

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1001

January 2018

地震動に伴う地盤の非線形性を考慮した 直杭式横棧橋の照査用震度算出方法に関する研究

勝俣優・福永勇介・竹信正寛・宮田正史・小濱英司

A Study of a Method of Calculating Seismic Coefficients of
Open-type Wharves on Vertically Pile Considering the Nonlinearity of Soil Stiffness
Accompanying Earthquake Ground Motion

Masaru KATSUMATA, Yusuke FUKUNAGA, Masahiro TAKENOBU,
Masafumi MIYATA, Eiji KOHAMA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

地震動に伴う地盤の非線形性を考慮した 直杭式横栈橋の照査用震度算出方法に関する研究

勝俣 優*・福永勇介**・竹信正寛***・宮田正史****・小濱英司*****

要 旨

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」¹⁾において、L1地震動に対する直杭式栈橋の固有周期や照査用震度は、地盤が弾性体であると仮定し骨組解析を介して求める手法が示されている。しかしながら、強い地震動に対しては地盤を弾性体と仮定することはできず、地盤剛性が低下すると考えられる。

このため、本研究では直杭式横栈橋の照査用震度算出手法に対し、地震動に伴う地盤の非線形性を考慮した補正法について検討する。まず、地震作用時における栈橋固有周期や地盤剛性の変化を地震応答解析により評価し、その関係性を整理する。これにより、地盤剛性の初期値からの低下の程度を入力パラメータとする固有周期算出式の補正法を提案する。さらに、二次元地震応答解析における上部工加速度時刻歴と、一次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤の加速度時刻歴から求められる加速度応答スペクトルを比較することで、照査用震度を求める際に適用すべき減衰定数の値についても検討する。これらを取りまとめることで、地震動に伴う地盤非線形性を考慮した直杭式横栈橋の照査用震度算出方法を提案する。

キーワード：直杭式横栈橋，地震応答解析，固有周期，照査用震度

* 港湾研究部 港湾施設研究室 交流研究員（中央復建コンサルタンツ株式会社）

** 港湾研究部 主任研究官

*** 港湾研究部 主任研究官

**** 港湾研究部 港湾施設研究室長

***** 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 耐震構造研究グループリーダー

A Study of a Method of Calculating Seismic Coefficients of Open-type Wharves on Vertically Pile Considering the Nonlinearity of Soil Stiffness Accompanying Earthquake Ground Motion

Masaru KATSUMATA*
Yusuke FUKUNAGA**
Masahiro TAKENOBU***
Masafumi MIYATA****
Eiji KOHAMA*****

Synopsis

Natural period and seismic coefficients of open-type wharves on vertically pile are estimated assuming that soil is linearly elastic material at small displacement according to the Japanese design standards for port facilities titled "Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan (2007)"¹⁾. But, under strong earthquake ground motion, soil is not still linearly elastic material but its stiffness decreases nonlinearly as the level of load become larger.

For this reason, the authors strive to derive the formula for estimating the natural period and the method of calculating seismic coefficients of open-type wharves on vertically pile considering the nonlinearity of soil stiffness caused by larger earthquake ground motion.

At first, we evaluated the relationship between natural period and soil nonlinearity by 2D-Seismic Response Analysis, and proposed a correction method for the current natural period calculation formula that has input parameter of soil nonlinearity. Then, by comparing the acceleration of 2D-Seismic Response Analysis and the Acceleration Response Spectrum calculated by 1D-Seismic Response Analysis, we studied the damping coefficient to be applied in order to calculate the seismic coefficients of wharves.

From the above studies, we proposed the method of calculating seismic coefficients of vertically pile-supported wharves considering the nonlinearity of soil stiffness accompanying earthquake ground motion.

Key Words: Open-type Wharves on Vertically Pile, Seismic Response Analysis, Natural Period, Seismic Coefficients

* Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
(CHUO FUKKEN CONSULTANTS Co., Ltd.)

** Senior Researcher, Port and Harbor Department, NILIM

*** Senior Researcher, Port and Harbor Department, NILIM

**** Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

***** Group Leader, Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division, Port and Airport Research Institute, MPAT

目 次

1. はじめに.....	1
1.1. 本研究の背景	1
1.2. 本研究における検討項目	2
1.3. 研究の全体手順と本稿の構成	4
2. 微小地震動に対する栈橋固有周期算出式の補正	5
2.1. 検討の目的	5
2.2. 検討断面の設定	5
2.3. 入力波形.....	6
2.4. 固有周期算出手法.....	6
2.5. 栈橋固有周期の算出結果と比較検討.....	8
2.6. 栈橋バネ定数の補正	8
2.7. 固有周期補正法の推定精度の評価	12
3. 地盤の非線形性を反映した固有周期の補正	13
3.1. 検討の目的	13
3.2. 入力波形.....	13
3.3. 仮想固定点の設定	14
3.4. 作用震度と固有周期の関係.....	14
3.5. 作用震度と地盤のせん断剛性の関係.....	15
3.6. 地盤非線形性と固有周期との関係式の構築	16
3.7. 1次元地震応答解析による地盤非線形性の評価	23
3.8. 栈橋固有周期補正法の設定	24
3.9. 固有周期補正法の推定精度の評価	26
4. 減衰定数の検討	28
4.1. 検討の目的	28
4.2. 検討手法.....	28
4.3. 減衰定数の比較検討	29
4.4. 照査用震度の推定精度の評価	31
5. 補正法の提案と応力照査の比較	33
5.1. 検討の目的	33
5.2. 補正法の提案	33
5.3. 2次元地震応答解析と骨組解析との杭応力の比較.....	33
6. 結論	39
6.1. 本稿の取りまとめ.....	39
6.2. 今後の課題	40
謝辞	42
参考文献	42
附録 A 計算事例と検討対象事例	43
附録 B 2次元地震応答解析における固有周期	46
附録 C 2次元地震応答解析におけるせん断剛性比	69
附録 D 1次元地震応答解析におけるせん断剛性比	92
附録 E 2次元地震応答解析における上部工加速度最大値.....	115
附録 F 1次元地震応答解析における加速度応答値.....	117

1. はじめに

1.1. 本研究の背景

(1) 直杭式栈橋における照査用震度の算出方法

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」¹⁾（以下、「現行港湾基準」とする）において、直杭式栈橋の照査用震度は、栈橋中央部の地盤をモデル化した1次元地震応答解析から仮想固定点(仮想海底面下 $1/\beta$ 地点、図-1)における加速度応答スペクトルを算出し、栈橋の固有周期に対応する加速度応答を栈橋上部工に生ずる最大加速度 α_{max} とすることで求める手法が示されている(図-2)。

この際、地震応答解析を用いずに栈橋の固有周期を算出する方法として、栈橋に作用する荷重と栈橋上部工の変位の関係が線形であると仮定し、微小な外力を与えた骨組解析により栈橋バネ定数を求め、式(1.1)により固有周期を算出する手法が現行港湾基準に示されている。

$$T_s = 2\pi \sqrt{W/gK} \quad (1.1)$$

ここに、 T_s ：栈橋の固有周期(s)、 W ：杭1列が受け持つ自重および載荷重(kN)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 K ：栈橋のバネ定数(kN/m)である。

栈橋上部工に生ずる加速度最大値については、横田ら²⁾が全応力解析に基づく2次元地震応答解析により、栈橋中央部の仮想固定点における加速度応答スペクトルから評価できることを示している。また、1次元全応力解析(SHAKE)と2次元全応力解析(FLUSH)を比較することで、1次元全応力解析から得られた仮想固定点における加速度時刻歴に基づいて加速度応答スペクトルを求める際は、10～30%の減衰定数を導入することを提案しており、現行港湾基準においては減衰定数を $h=20\%$ とすることで反映されている。

現行港湾基準に示される照査用震度の算出方法（以下、「現行法」とする）は、基本的にこれらの成果を反映したものであり、レベル1地震動に関する変動状態については、現行法により算出した照査用震度を外力とした骨組解析により杭の発生応力を照査する手法が一般的に採用されている。

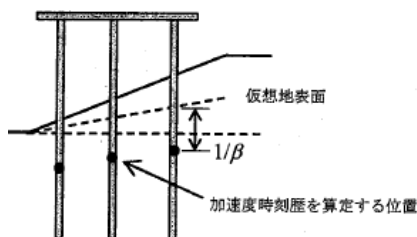


図-1 仮想固定点¹⁾

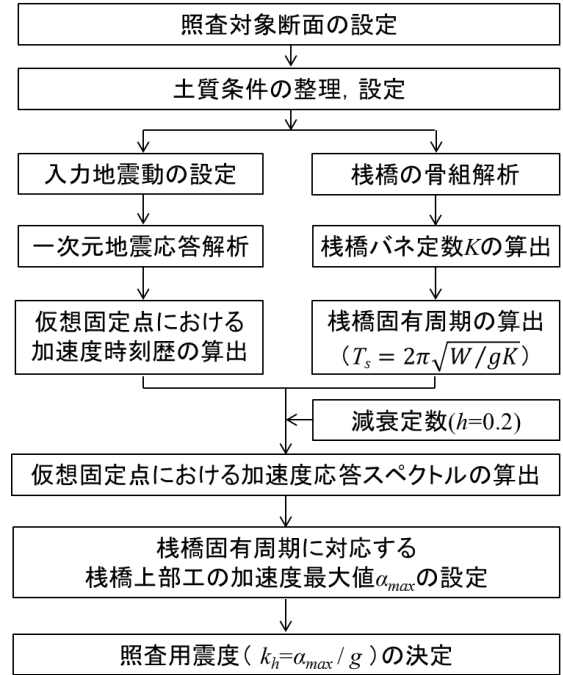


図-2 現行港湾基準における照査用震度の算出過程¹⁾

(2) 直杭式栈橋の照査法に関する既往研究

現行港湾基準では、杭と地盤の動的相互作用を考慮する手法として、非線形地震応答解析を用いた照査法を提案している。強震観測事例や常時微動観測事例と非線形地震応答解析との整合性を検証した事例はいくつかあり、有効応力解析による2次元地震応答解析は実際の栈橋の挙動をよく再現することが確認されている。

例えば、長尾³⁾は川崎港および横浜港の直杭式栈橋を対象とした常時微動観測を行い、観測から得られた固有周期と2次元地震応答解析から算出した固有周期が良く整合することを示している。また、背後地表面における最大加速度が86.1Gal(川崎港)、60.7Gal(横浜港)、61.6Gal(横浜港)の強震観測事例を2次元地震応答解析により再現することで、強震観測事例についても2次元地震応答解析から栈橋の固有周期を求めることができるとしている。ただし、この研究では地震動や対象栈橋によっては、渡版の影響を適切にモデル化する必要があることも示している。さらに、田代ら⁴⁾は常時微動観測から得られた固有周期と、最大加速度1Galのホワイトノイズを与えた2次元地震応答解析から得られた固有周期とを比較し、両者が概ね整合することを示している。

このように、適切にモデル化された非線形地震応答解析を適用することで、地震時における栈橋の挙動をある程度再現することが可能である。ところが、有限要素法を用いた2次元の非線形地震応答解析は複雑な手法であり、解析に多大な計算負荷が要求される。このため、レベル1地震

動に関する変動状態における杭の応力照査法として、2次元地震応答解析を適用する事例はあまり多くない。

さて、2次元地震応答解析は地震時における桟橋の挙動をある程度再現できることから、2次元地震応答解析と現行法とで算出される桟橋の固有周期や照査用震度が整合している場合は、現行法は実際の桟橋の挙動を再現できていると判断できる。しかしながら、栗原・長尾⁵⁾は、現行法と2次元地震応答解析との比較から、地盤の非線形性をほとんど無視できる微弱な地震動に対しても、現行法と2次元地震応答解析とは算出される桟橋固有周期が乖離していることを指摘している。また、より強い地震動に対しては、地震動の強さに応じて杭周辺における地盤のせん断剛性が低下することで、桟橋の固有周期が長くなることを指摘している。

さらに、1次元地震応答解析による加速度応答スペクトル算出時に適用する減衰定数($\alpha=20\%$)は、前述のとおり1次元と2次元の全応力解析の比較を反映したものである²⁾が、現在では1次元地震応答解析は有効応力解析を適用することが一般的となっている。これについて、栗原・長尾⁵⁾や大久保・小濱・楠⁷⁾は、FLIPを用いた有効応力解析により1次元地震応答解析と2次元地震応答解析を比較しており、減衰定数をより小さな値とすることが適切であると指摘している。

このように、現行法により算出される固有周期や照査用震度は、有効応力解析を適用した2次元地震応答解析と整合しないことが確認されている。このため、栗原・長尾⁵⁾や大久保・小濱・楠⁷⁾は、現行法を2次元地震応答解析に整合させるための補正法を提案しているが、検証された設計条件が限定されていることや、補正過程が複雑であることから、設計実務への適用には至っていない。

(3) 本研究の目的

本研究では、これらの先行研究を踏まえつつ、実務への適用性を考慮した現行法の補正法を検討する。すなわち、まず初めに地盤の非線形性をほとんど無視できる微弱地震動について、現行法を2次元地震応答解析に整合させる補正法を立案し、その推定精度を検証する。

次いで、加速度最大値を種々に変化させた入力地震動を与えることで、地震動の強さと地盤剛性や桟橋の固有周期、減衰定数の関係を2次元地震応答解析により評価する。これにより、地震動の強さに応じた地盤剛性の変化をパラメータ化し、現行法へ組み込むことで2次元地震応答解析と整合する照査用震度算定法を構築する。また、杭に発生する曲げモーメントを比較することで、骨組解析と2次元地震応答解析との整合性を検討する。

1.2. 本研究における検討項目

本節では、本研究の検討項目について詳述する。

(1) 微小地震動に対する桟橋固有周期算出式の補正

前述のとおり、現行港湾基準では桟橋固有周期の算出方法として式(1.1)が示されているが、式中の桟橋バネ定数 K を骨組解析により求める際に、杭周辺地盤の地盤反力係数を式(1.2)から決定できるとしている。

$$k_{CH}=1500N \quad (1.2)$$

ここに、 k_{CH} : 水平方向地盤反力係数(kN/m^3)、 N : N 値である。この式は、横山⁸⁾が収集整理した我が国における鋼杭の横方向荷重試験結果(図-3)を踏まえ、逆算された水平方向地盤反力係数の下限値と中間値の中間の値であり、地表変位が1cmのときの水平方向地盤反力係数を求めるものである¹⁾。土は線形弾性体ではないため、杭に対する水平方向力と変位の関係は非線形と考えられるが、式(1.2)は微小変位を仮定することで地盤反力係数を N 値と比例するものとしている。

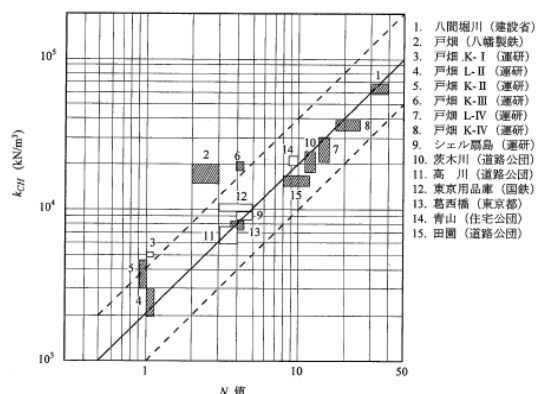


図-3 杭の水平荷重実験から逆算した k_{CH} ¹⁸⁾

しかしながら、栗原・長尾⁵⁾は、現行法と2次元地震応答解析との比較から、地盤の非線形性をほとんど無視できる微弱な地震動に対しても、現行法で算出される桟橋固有周期は2次元地震応答解析と比較して大きな値となることを指摘している(図-4)。式(1.1)の自重および荷重 W や重力加速度 g は固定値であり、水平方向地盤反力係数は複数の荷重試験に基づいた値である。地盤反力係数の実測値が概ね正しい値と仮定すると、骨組解析において桟橋バネ定数 K が過小評価されることが、現行法と2次元地震応答解析とで算出される固有周期が乖離する要因と考えられる。このため、本研究においては、骨組解析により求めた桟橋バネ定数 K を適切に補正することで、微小地震動を前提とした固有周期算出式の補正法の在り方について検証する。

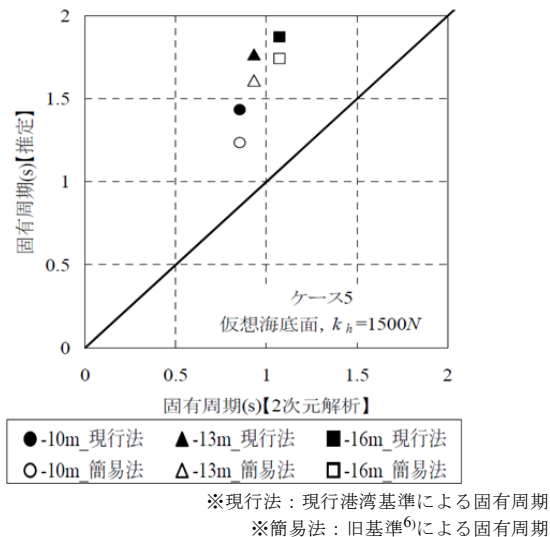


図-4 現行法と2次元解析の固有周期の比較⁵⁾

(2) 地盤非線形性を反映した固有周期の補正

土は線形弾性体ではないため、杭に対する水平方向力と変位の関係は非線形である。これに対し、現行港湾基準は微小変位を仮定することで、骨組解析における地盤反力係数を式(1.2)より求めることができるとしている。しかしながら、レベル1地震動のような比較的強い地震動に対しては、栈橋杭の変位は微小といえる範囲に留まらないため、水平方向力と変位の関係は非線形な状態にあると考えられる。したがって、微小変位を仮定した式(1.2)では、L1地震動においては地震動の強さに応じて低下する地盤反力係数を過大に評価する可能性がある。

現行法において杭の仮想固定点に関わるパラメータ β は式(1.3)で求められ、水平方向地盤反力係数により変化する値である。したがって、地盤反力係数を過大に評価すると、栈橋杭の仮想固定点(仮想海底面下 $1/\beta$ 地点)がより高い標高に設定され、栈橋固有周期をより短周期側に評価することとなる。

$$\beta = \sqrt[4]{k_{CH}D/4EI} \quad (1.3)$$

ここに、 β ：仮想固定点に関するパラメータ(m^{-1})、 D ：杭の直径(m)、 EI ：杭の曲げ剛性($kN \cdot m^2$)、 k_{CH} ：水平方向地盤反力係数(kN/m^3)である。

現行法においては、1次元地震応答解析から求めた加速度応答スペクトルに対し、栈橋固有周期に対応する加速度最大値から栈橋の照査用震度が設定されるため、地震動の強さに応じて変化するであろう地盤反力係数や固有周期を正確に評価することは非常に重要である。これに対し、栗原・長尾⁵⁾は、水平地盤反力係数と地盤のせん断剛性に

一定の関係があることに着目し、仮想固定点周辺における地盤の初期せん断剛性 G_0 とせん断応力最大時のせん断剛性 G_{Tmax} の比(G_{Tmax}/G_0)と、仮想固定点に関するパラメータ β の関係を定式化した。これにより、1次元地震応答解析により求めたせん断剛性比により β を補正し、地震作用に伴う地盤の非線形性を考慮した固有周期の算出手法を提案した。

また、大久保・小濱・楠⁷⁾は、2次元地震応答解析から逆算した水平方向地盤反力係数を代入することで、現行法と2次元地震応答解析との栈橋固有周期の乖離は地盤反力係数の違いによるところが大きく、水平方向地盤反力係数が適切に設定されれば、現行法は2次元地震応答解析に近い固有周期を算出することを示した。

本研究では、複数の地震動に対する栈橋の地震応答を2次元地震応答解析により評価することで、栈橋の固有周期と地盤のせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 との関係を定式化する。これにより、地震動に伴う固有周期の変化を式(1.1)に反映させるための補正法について検討する。

(3) 固有周期算出式の推定誤差の整理

算出される栈橋固有周期は誤差を含むものであることから、現行港湾基準では図-5に示すように固有周期の幅を設定することで、固有周期に対応する加速度応答値が谷間の値となることを避けている。しかしながら、考慮する固有周期の幅について具体的な設定方法の記述がなく、設計者の経験に依存している面がある。

このため、本研究においては栈橋固有周期について2次元地震応答解析に対する現行法のばらつきを整理し、その推定精度を評価することで、考慮する固有周期の幅について統計的根拠を与える。

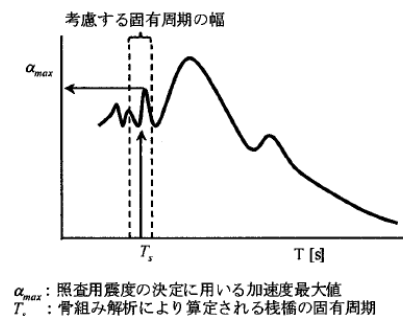


図-5 考慮する固有周期の幅¹⁾

(4) 減衰定数の補正

前節に述べたように、現行法では加速度応答スペクトルを算出する際に適用する減衰定数を全応力解析の比較に基づいて $\eta=20\%$ としているが、現在では1次元地震応答解析は有効応力解析を適用することが一般的となっている。

これについて、栗原・長尾⁹⁾や大久保・小濱・楠⁷⁾は、FLIPを用いた1次元地震応答解析と2次元地震応答解析の比較により、前者は減衰定数を5%程度、後者は3~6%程度とすることが適切であると指摘している。

減衰定数については、入力地震動の大きさや地盤条件の影響を受けると考えられるため、本研究ではより広範な適用範囲を有する減衰定数の設定方法について検討する。

(5) 照査用震度算出法の補正と応力の比較検討

上述の各検討項目から得られた知見を統合することで、現行法により算出される照査用震度と、2次元地震応答解析から得られる作用震度とを整合させるための補正法を提案する。

また、骨組解析に入力される照査用震度が2次元地震応答解析と同値であったとしても、出力として得られる杭応力まで2次元地震応答解析と一致するとは限らないことから、杭に発生する最大曲げモーメントについて、2次元地震応答解析と骨組解析との比較を行う。

1.3. 研究の全体手順と本稿の構成

(1) 研究の全体手順

本研究全体を通しての検討手順は図-6に示すとおりである。なお、手順(1)は微弱な地震動を外力とした微小地震動に対する検討であり、手順(2)~(4)はL1地震動を考慮した検討である。

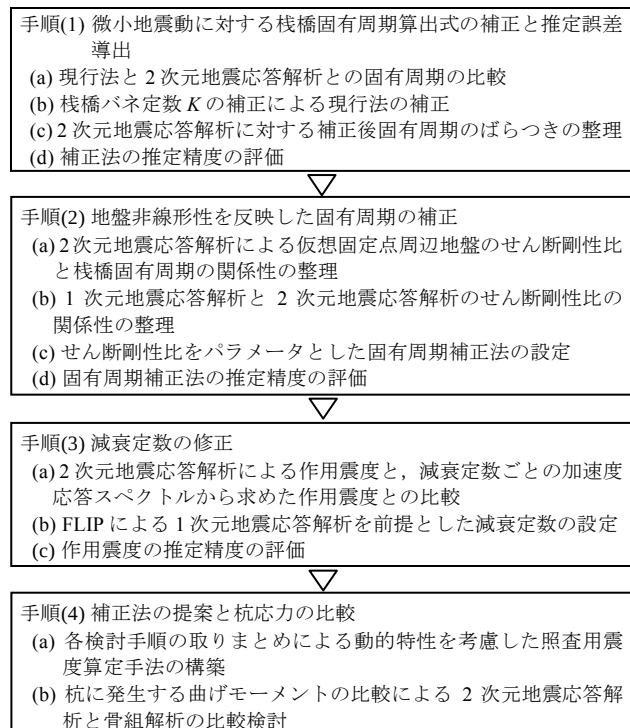


図-6 本研究の全体フロー

なお、本研究は、現行法では作用する地震動に関わらず一定値である桟橋の固有周期や地盤の剛性が、実際には地震動の強さに応じて変化すると想定し、検討を加えたものである。そして、本研究の目的は、地震動の強さとこれらの物理量との間にある関係性を見出し、その定式化を図ることである。本研究では地震動の強さとこれらの物理量との関係性を「動的特性」と称し、以降の整理の簡略化を図っているため留意されたい。

(2) 本稿の構成

第2章では、手順(1)について、微小地震動を対象として現行法および2次元地震応答解析から算出される桟橋固有周期を比較し、その結果を踏まえて骨組解析から算出される桟橋バネ定数を補正する手法について検討する。さらに、2次元地震応答解析に対する補正法の固有周期の誤差割合を導出することで、補正法の推定精度を評価する。

第3章では、手順(2)について、種々の最大加速度に振幅調整した地震動に対する直杭式桟橋の挙動を2次元地震応答解析より求め、地盤剛性と桟橋の固有周期の関係を整理する。本研究においては、仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比を、地震動に伴う地盤剛性の非線形的な変化を表すパラメータとして採用し、せん断剛性比を入力パラメータとして固有周期の変化量を算定するための関係式を導出する。次いで、2次元地震応答解析と1次元地震応答解析のせん断剛性比を比較し、その関係性を定式化する。これにより、1次元地震応答解析により得られるせん断剛性比に基づいて、現行法により算出される桟橋の固有周期を地震動の強さに応じて補正する手法を提案し、その推定精度を評価する。

第4章では、手順(3)について、1次元地震応答解析から得られる加速度応答スペクトルから求めた上部工最大加速度と、2次元地震応答解析における上部工の節点時刻歴から求めた上部工最大加速度を比較する。これにより、適切な減衰定数を提案するとともに、照査用震度の推定精度を評価する。

最後に第5章では、各検討結果を取りまとめることで、動的特性を考慮した照査用震度算定手法の構築を図る。さらに、補正法および2次元地震応答解析から得られた照査用震度を骨組解析に適用することで、杭に発生する最大曲げモーメントについて、2次元地震応答解析と骨組解析との比較を行う。

以上の検討から得られる結論を第6章に取りまとめ、今後の課題と併せて提起する。

2. 微小地震動に対する栈橋固有周期算出式の補正

2.1. 検討の目的

本検討では、地盤非線形性がほとんど生じないと考えられる微小地震動を対象として、2次元地震応答解析および現行法により算出された栈橋固有周期を比較する。これにより、2次元地震応答解析を正として、現行法から算出される栈橋固有周期の補正を行う。

2.2. 検討断面の設定

(1) 検討断面の概要

検討断面の概形を図-7に示す。骨組解析から求まる栈橋バネ定数は、微小変位においても仮想海底面の標高や地盤反力係数、杭剛性等の影響を受ける。このため、設計水深、原地盤N値、杭の剛性については複数の設計条件を設定した。それぞれの設計水深における検討断面の概形と杭諸元は図-8～図-10に示すとおりであり、検討断面数は21断面である。

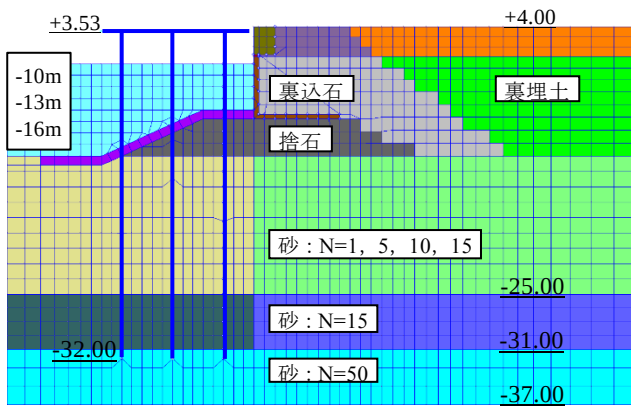


図-7 検討断面の概要

(2) 解析コードと入力パラメータの設定

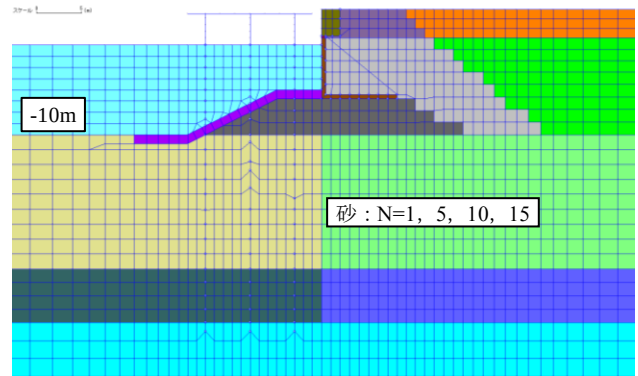
2次元地震応答解析における各地盤の入力パラメータは、栈橋中央部の土層構成に基づいて1D-MAKER⁹⁾より設定する。これは、1次元地震応答解析と2次元地震応答解析とで地盤の入力パラメータを一致させるためである。入力パラメータの設定例を表-1に示す。

(3) 骨組解析における地盤反力係数の設定

骨組解析における水平方向地盤反力係数は、式(1.2)より算定する。ただし、捨石については設計事例集¹⁰⁾より $N=5$ とし、菊池ら¹¹⁾の実験結果から $k_{CH}=3500(\text{kN/m}^3)$ とした。

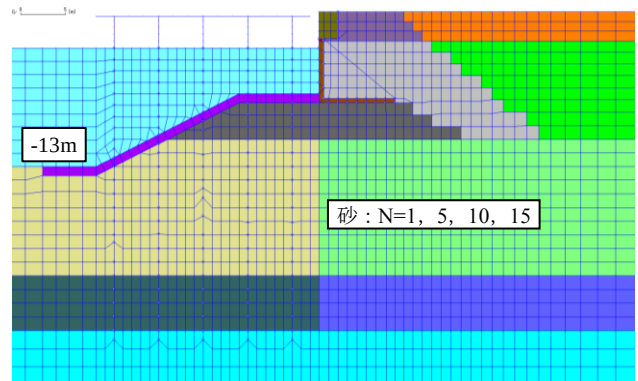
$$k_{CH}=1500N$$

(1.2) 再掲



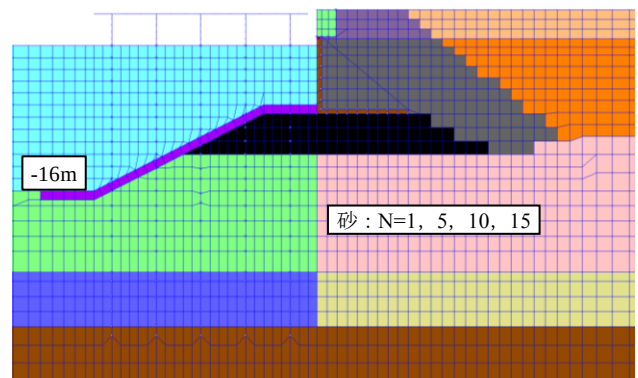
N 値		1	5	10	15
杭諸元(強) (mm)	φ700	t14.9	t14.1	-	t13.4
杭諸元(弱) (mm)	φ700	t10.4	t10.0	t9.7	t9.6

図-8 検討断面の概形と杭諸元(設計水深-10m)



N 値		1	5	10	15
杭諸元(強) (mm)	φ800	t13.2	t12.4	-	t11.9
杭諸元(弱) (mm)	φ700	t11.5	t10.9	t10.6	t10.5

図-9 検討断面の概形と杭諸元(設計水深-13m)



N 値		1	5	10	15
杭諸元(強) (mm)	φ900	t12.3	t11.5	-	t11.0
杭諸元(弱) (mm)	φ800	t11.1	t10.5	t10.2	t10.1

図-10 検討断面の概形と杭諸元(設計水深-16m)

表-1 1D-MAKER による入力パラメータの設定例(設計水深-10m, N=5)

	土質	分類	層上面 標高 (m)	湿潤単 位体積 重量 γ_t (kN/m ³)	飽和単 位体積 重量 γ_{sat} (kN/m ³)	基準有 効拘束 圧 σ'_{ma} (kN/m ²)	初期せん 断剛性 G _{ma} (kN/m ²)	初期体 積弾性 係数 K _{ma} (kN/m ²)	せん断 抵抗角 ϕ (度)	粘着力 c (kN/m ²)	最大減衰 h _{max}	間隙率 n	有効 拘束圧 依存性 mG, mK	層中央 での有効 上載圧 σ'_v (kN/m ²)	層厚 h (m)	せん断 波速度 V _s (m/s)	H/V _s (s)	分割数
1	被覆石	捨石	-6.50	20.00	20.00	98.00	180000	469400	40	0.00	0.240	0.45	0.5	5.00	1	131.4	0.008	1
2	捨石	捨石	-7.50	20.00	20.00	98.00	180000	469400	40	0.00	0.240	0.45	0.5	22.50	2.5	191.3	0.013	2
3	砂質土1	砂質土	-10.00	18.00	20.00	98.00	53593	139762	38.8	0.00	0.240	0.45	0.5	110.00	15	155.2	0.097	8
4	砂質土2	砂質土	-25.00	18.00	20.00	98.00	77771	202816	39.7	0.00	0.240	0.45	0.5	215.00	6	221.1	0.027	3
5	礫質土	砂質土	-31.00	20.00	20.00	98.00	160593	418802	42.8	0.00	0.240	0.45	0.5	275.00	6	337.9	0.018	2
6	工学的基盤	基盤	-37.00	20.00	20.00	V _p =	1600	V _s =	300					ΣH=	30.5	ΣH/V _s =	0.162	

2.3. 入力波形

2次元地震応答解析における入力地震動は、最大加速度を10Galに振幅調整した八戸波、岩国波、博多波とした。各入力波形の振幅調整前の原波形を図-11に示す。

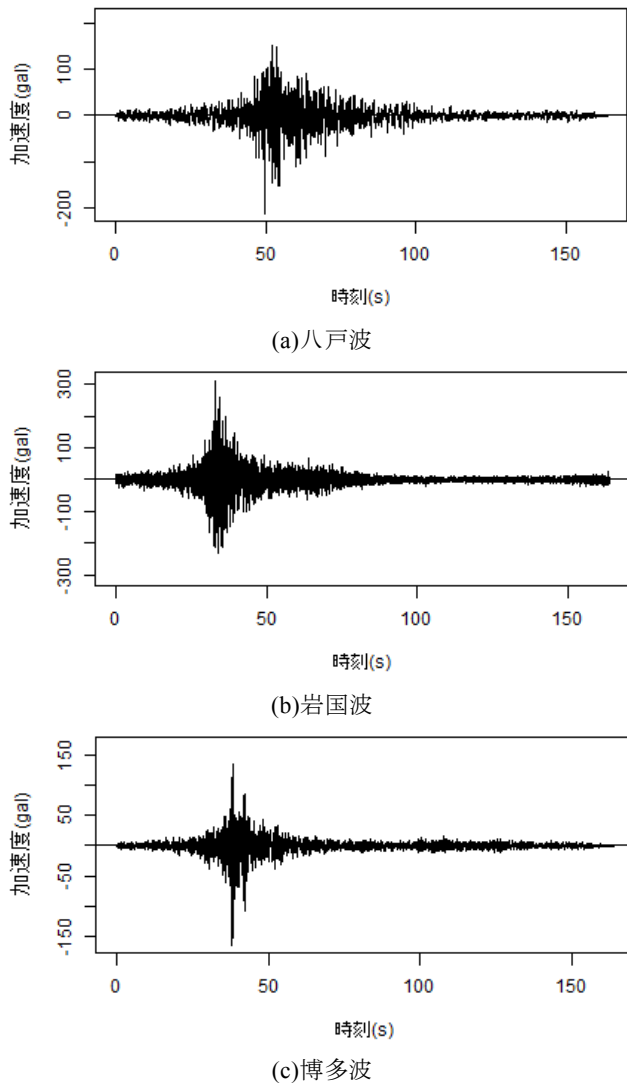


図-11 入力地震動(原波形)

2.4. 固有周期算出手法

(1) 2次元地震応答解析

2次元地震応答解析による桟橋固有周期の算出方法は、栗原・長尾⁵⁾と同様の手法を採用する。すなわち、図-12に示すように、桟橋上部工および仮想固定点における加速度時刻歴からフーリエスペクトルを算出し、両者のスペクトル比を取ることで仮想固定点から桟橋上部工までの伝達関数を求める手法である。伝達関数が極大値を取る周期を桟橋の固有周期として整理する。なお、本検討においては、フーリエスペクトルは高速フーリエ変換により算出するものとし、Parzen窓を掛けることでスペクトルの平滑化を図っている¹²⁾。なお、バンド幅は0.05Hzとした。

杭の仮想固定点は現行港湾基準に基づき、仮想地表面を基準線とし、杭の特性値 β を考慮して設定する(図-1)。本検討においては、桟橋上部工の中央部と桟橋中央杭の仮想固定点における加速度時刻歴から桟橋固有周期を算定した。なお、現行港湾基準は図-1の手法によらず仮想固定点を設定してもよいとしており、2次元地震応答解析における仮想固定点の定義については検討の余地がある。しかしながら、微小変位に限れば、現行法による仮想固定点、杭下端、地表面のいずれであっても桟橋上部工までの伝達関数が極大値となる周期はほぼ変わらないため(図-13)、本検討においては、現行法に基づいて仮想固定点を設定する。

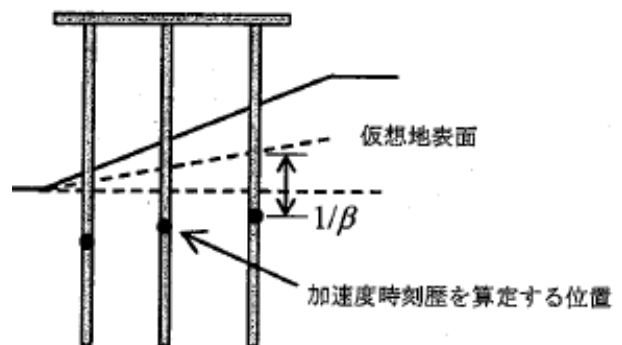


図-1(再掲) 仮想固定点¹⁾

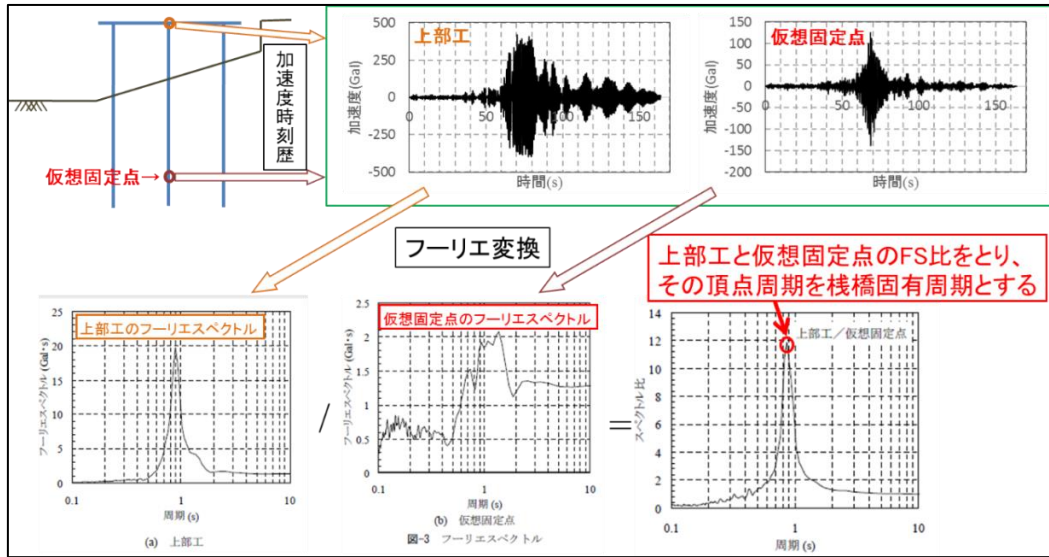


図-12 2次元地震応答解析における栈橋固有周期の算出手法

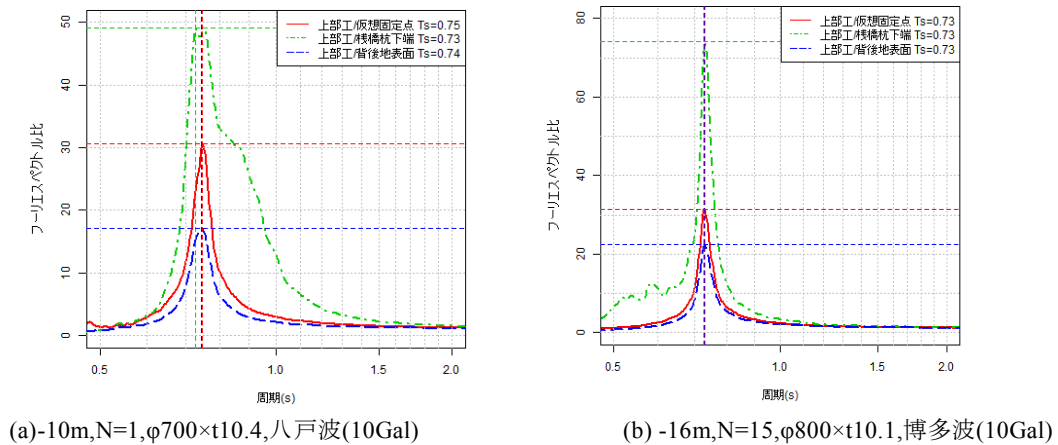


図-13 2次元地震応答解析による固有周期算出の一例

(2) 現行法

現行法による栈橋固有周期は、式(1.1)により算出する。

$$T_s = 2\pi \sqrt{W/gK} \quad (1.1) \text{再掲}$$

ここに、 T_s ：栈橋の固有周期(s)、 W ：杭1列が受け持つ自重・載荷重(kN)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 K ：栈橋バネ定数(kN/m)であり、栈橋バネ定数は骨組解析により求める。なお、骨組解析は市販ソフトウェアである「横栈橋設計計算 2007 Ver2.2.9」により実施した。

変数 W は上部工と上載荷重により定まる値であり、 g は定数であるため、同一断面であれば式(1.1)による固有周期は栈橋バネ定数 K によってのみ変化する。したがって、現行法による固有周期を2次元地震応答解析と整合させるためには、栈橋バネ定数 K を適切に補正する必要がある。

栈橋バネ定数 K は、仮想固定点の位置の影響を受けるた

め、本検討では仮想固定点の適切な設定方法についても検討する。仮想固定点を設定する際の基準面について現行港湾基準では仮想海底面を用いることとしているが、栗原・長尾⁵⁾は実海底面を基準面とする方が固有周期の整合性が良いとしている。このため、基準面については仮想海底面と実海底面を検討対象とする。また、捨石の水平方向地盤反力係数の設定については、菊池ら¹¹⁾が実験より示した $k_{CH}=3500(\text{kN/m}^3)$ 、および設計事例集¹⁰⁾に示される $k_{CH}=7500(\text{kN/m}^3)$ を検討対象とする。以上から、本検討では表-2に示す4手法に基づいて仮想固定点を設定し、それぞれの固有周期を比較検討する。

表-2 骨組解析における仮想固定点の設定

設定	基準面	捨石の地盤反力係数	備考
1	仮想海底面	3500(kN/m^3)	現行法
2	仮想海底面	7500(kN/m^3)	
3	実海底面	3500(kN/m^3)	
4	実海底面	7500(kN/m^3)	

2.5. 桟橋固有周期の算出結果と比較検討

2次元地震応答解析および現行法により算出した固有周期の比較図を図-14に示し、その相関係数を表-3に示す。また、断面ごとの固有周期算出結果の詳細を図-15に示す。

図-14より、仮想海底面を基準面として仮想固定点を設定すると、現行法で算出される固有周期(1.0~1.5s)は2次元地震応答解析による固有周期(0.6~0.8s)と比較して非常に長い値となることが確認できる。また、実海底面を基準面として仮想固定点を設定すると、骨組解析と2次元地震応答解析とで算出される固有周期は比較的近い値となる。

一方、図-15では、現行法、2次元地震応答解析のいずれにおいても、原地盤N値の差異は桟橋固有周期にほとんど影響しておらず、設計水深と杭諸元の差異による影響が大きいことが確認できる。特に骨組解析において実海底面を基準面とすると、算出される桟橋固有周期が設計水深の影響を強く受けるようになり、設計水深-10mの断面と-13m、-16mの断面とで固有周期に顕著な差が生じる。これは、実海底面を基準面とすると、基準面から仮想固定点までの土層構成における基礎捨石の占有率が高くなり、基礎捨石の配置状況、特に基礎捨石下面標高と設計水深の関係が固有周期の算出結果に影響を与えるようになると考えられる。このため、表-3に示したとおり、仮想固定点の算出に当たっては、仮想海底面を基準面とする方が、現行法と2次元地震応答解析の相関係数は高い値となる。

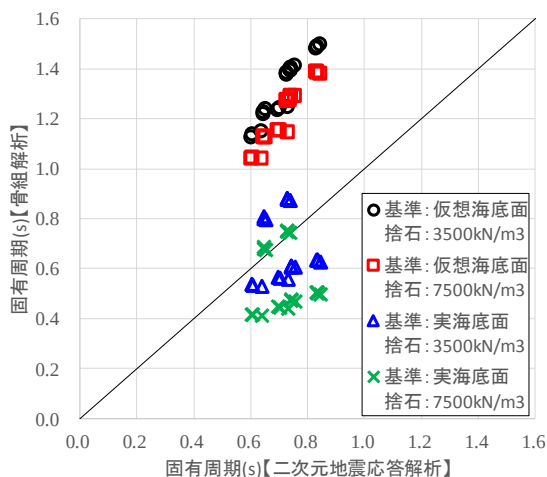


図-14 2次元地震応答解析と骨組解析との固有周期の比較

表-3 2次元地震応答解析に対する現行法の
固有周期の相関係数

設定	基準面	捨石の地盤反力係数	相関係数
1	仮想海底面	3500(kN/m ³)	0.944
2	仮想海底面	7500(kN/m ³)	0.951
3	実海底面	3500(kN/m ³)	-0.013
4	実海底面	7500(kN/m ³)	-0.028

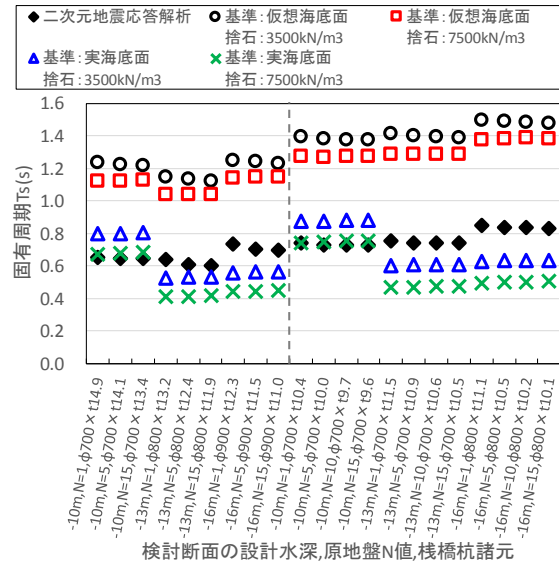


図-15 断面ごとの固有周期算出結果

2.6. 桟橋バネ定数の補正

前節の固有周期算出結果を踏まえ、骨組解析による桟橋バネ定数算出時に適用する補正法について検討する。考えられる補正法は概ね以下の2手法であるため、それぞれについて整理する。

- (1) 地盤反力係数算出式($k_{CH}=1500N$)の補正
- (2) 補正係数による桟橋バネ定数 K の補正

(1) 地盤反力係数算出式($k_{CH}=1500N$)の補正

現行法と2次元地震応答解析との算出される固有周期の乖離が、骨組解析における地盤反力係数の設定方法に起因するものと仮定し、その算出式($k_{CH}=1500N$)に補正を掛けることについて検討する。

ここでは、原地盤の地盤反力係数の算出式を表-4に示す4事例として、現行の固有周期算出式と2次元地震応答解析がどの程度整合するか評価する。なお、仮想固定点の設定法は表-2に示した4事例であるため、仮想固定点と原地盤の地盤反力係数の設定パターンは全16事例となる。

表-4 原地盤の地盤反力係数算出式の設定

設定	原地盤の地盤反力係数の算出式
1	$k_{CH}=1500N$ (現行法)
2	$k_{CH}=2 \times 1500N$
3	$k_{CH}=4 \times 1500N$
4	$k_{CH}=10 \times 1500N$

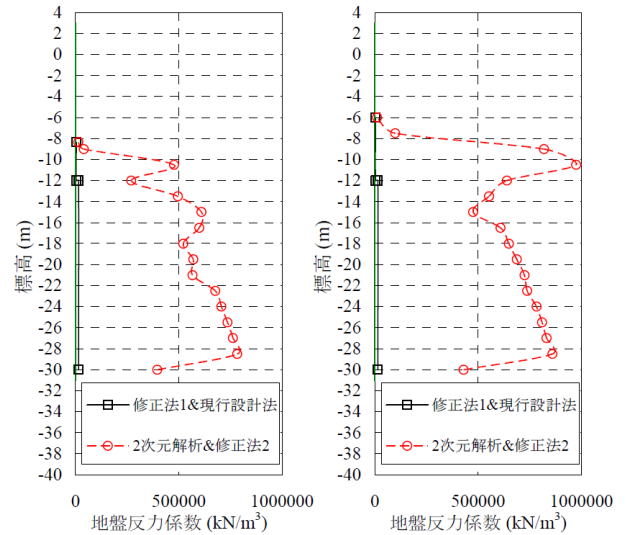
検討結果は図-17に示すとおりであり、表-4に示した原地盤の地盤反力係数の補正では算出される固有周期がほとんど変化せず、2次元地震応答解析との乖離は解消しない。

骨組解析における地盤反力係数の適切な設定法については、大久保・小濱・楠⁷⁾が検討を行っており、2次元地震応答解析から逆算した水平方向地盤反力係数を骨組解析に適用することで、現行法と2次元地震応答解析との栈橋の固有周期がよく整合することを示している。ただし、2次元地震応答解析から逆算された地盤反力係数は図-16⁷⁾に示すとおりであり、式(1.2)による地盤反力係数と比較して遥かに大きな値である。ただし、式(1.2)は水平荷重試験⁸⁾による変位量1cmのときの実測値に基づいた式であり、大久保・小濱・楠⁷⁾が示した地盤反力係数はL1地震動を入力波形として与えた場合の値である。

また、図-16⁷⁾において各標高でのN値は同値であるが、2次元地震応答解析から逆算された地盤反力係数は深度方向に大きく変化していることから、地震時における地盤反力係数をN値のみで設定することは困難であることが示唆されている。したがって、表-4に示した各設定では、地盤反力係数の補正量が不足しているとともに、地盤反力係数の深度方向の変化を反映できないと判断できる。

取りまとめると、式(1.2)から算出される地盤反力係数に補正係数を乗じることで、現行法と2次元地震応答解析との固有周期の乖離を解消することは可能と考えられるが、補正後の地盤反力係数は現行法と比較して遥かに大きな

値となると考えられる。また、捨石と原地盤の構成や、深度方向での地盤反力係数の変化を適切に反映させる必要があるため、補正係数の算出法が複雑になると考えられる。このため、本研究では式(1.2)を補正する手法は採用せず、以降に示す栈橋バネ定数Kに補正係数を掛ける手法を採用する。



(a) 杭2

(b) 杭4

図-16 逆算した地盤反力係数の鉛直分布⁷⁾

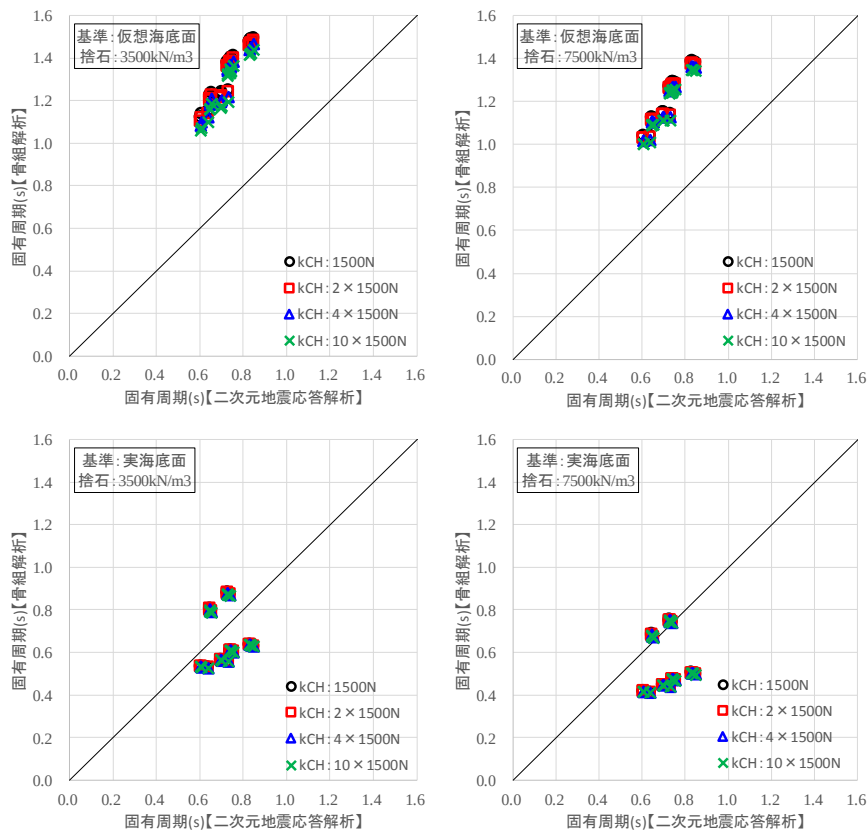


図-17 補正した地盤反力係数算出式に基づいて算出した固有周期と2次元地震応答解析による固有周期の比較

(2) 補正係数による桟橋バネ定数 K の補正

前述のとおり、原地盤の地盤反力係数の補正のみでは、現行法と2次元地震応答解析との算出される固有周期の乖離を解消することはできない。このため、物理的な定義が明白でないものの、骨組解析から算出される桟橋バネ定数 K に補正係数を与えることで、現行法と2次元地震応答解析との固有周期を整合させることを試みる。

すなわち、式(1.1)に示した桟橋固有周期の算出式を以下のように修正する。

$$T_s = 2\pi \sqrt{W/gM_k K} \quad (2.1)$$

ここに、 T_s ：桟橋固有周期(s)、 W ：杭1列が受け持つ自重および荷重(kN)、 g ：重力加速度(m/s²)、 M_k ：桟橋バネ定数の補正係数、 K ：桟橋バネ定数(kN/m)であり、補正係数 M_k により桟橋バネ定数を補正することで、算出される固有周期の修正を図る。

式(2.1)を変形すると式(2.2)となり、2次元地震応答解析から求めた桟橋の固有周期を式(2.2)の T_s に代入することで、補正係数 M_k を求めることができる。

$$M_k = 4\pi^2 W / g K T_s^2 \quad (2.2)$$

断面ごとに補正係数 M_k を算出すると、図-18に示すとおりとなり、設定ごとの平均値は表-5に示すとおりとなる。

表-5に示した補正係数を用いると、補正した現行法と2次元地震応答解析との固有周期の比較は図-19に示すとおりとなる。なお、断面ごとの整理結果一覧表は表-6に示すとおりであり、表-6における補正後固有周期とは表-5に示した補正係数により補正された固有周期である。

図-19に示されるとおり、桟橋バネ定数に補正係数を適用する場合は、仮想海底面を基準面とする方が2次元地震応答解析との固有周期の相関性が強い。この結果は、補正前であっても仮想海底面を基準面とする方が相関性は高かったという検討結果(表-3)と同様の傾向である。また、捨石の地盤反力係数の違いによる相関係数への影響は殆ど認められなかった。

以上から、本検討においては、現行法における固有周期算出式を補正する手法としては、桟橋バネ定数に補正係数を掛ける方が、原地盤の地盤反力係数へ補正を掛けるより適切な手法であると判断される。また、仮想固定点の設定方法としては、仮想海底面を基準面とする方がよいと考えられる。

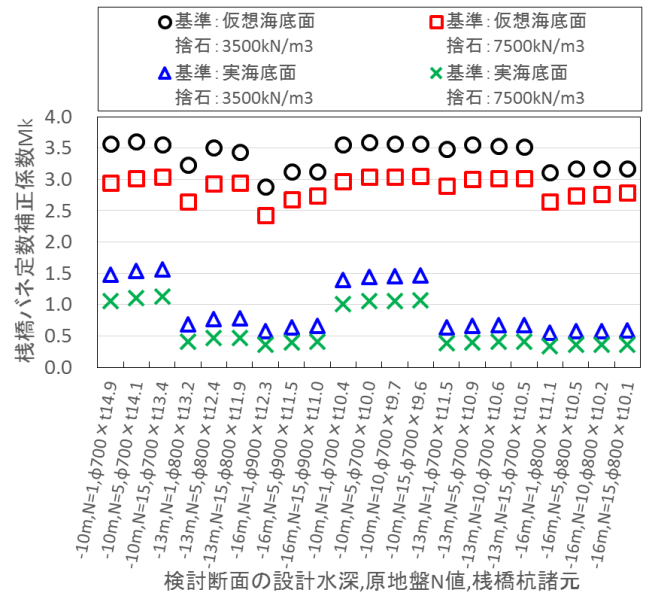


図-18 断面ごとの補正係数算出結果

表-5 各設定における桟橋バネ定数補正係数の平均値

設定	基準面	捨石地盤反力係数 (kN/m ³)	補正係数 M_k の平均値
1	仮想海底面	3500	3.38
2	仮想海底面	7500	2.87
3	実海底面	3500	0.92
4	実海底面	7500	0.62

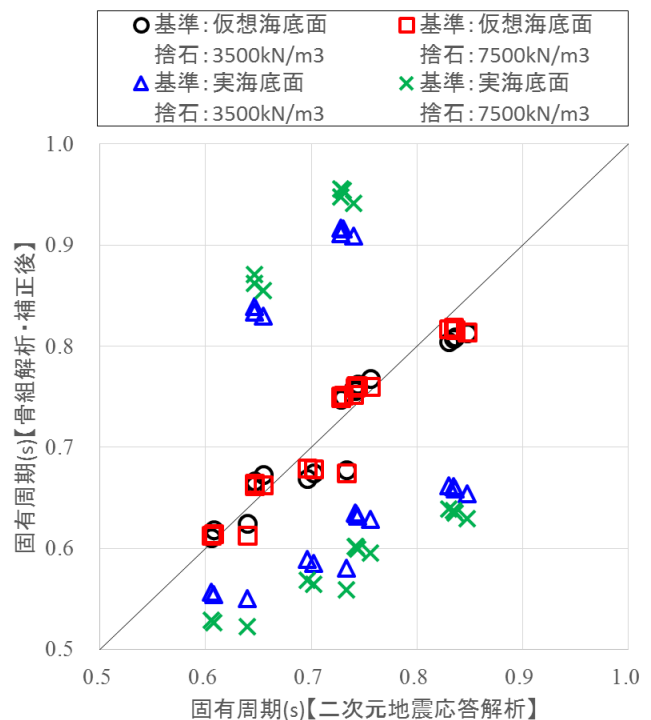


図-19 2次元地震応答解析と補正法の固有周期比較

表-6 2次元地震応答解析と現行法の固有周期の比較一覧

設計水深			-10m			-13m			-16m			-10m				-13m				-16m				
N 値			1	5	15	1	5	15	1	5	15	1	5	10	15	1	5	10	15	1	5	10	15	
杭径(mm)			700	700	700	800	800	800	900	900	900	700	700	700	700	700	700	700	700	800	800	800	800	
杭肉厚(mm)			14.9	14.1	13.4	13.2	12.4	11.9	12.3	11.5	11.0	10.4	10.0	9.7	9.6	11.5	10.9	10.6	10.5	11.1	10.5	10.2	10.1	
2次元地震応答解析	固有周期 Ts(s)	八戸 10Gal	0.655	0.648	0.648	0.650	0.609	0.607	0.738	0.706	0.700	0.748	0.731	0.735	0.731	0.762	0.755	0.752	0.752	0.853	0.845	0.845	0.840	
		岩国 10Gal	0.650	0.643	0.643	0.633	0.605	0.602	0.728	0.700	0.694	0.735	0.725	0.725	0.725	0.752	0.735	0.735	0.735	0.840	0.827	0.827	0.823	
		博多 10Gal	0.658	0.648	0.648	0.635	0.609	0.607	0.735	0.700	0.694	0.738	0.728	0.731	0.728	0.755	0.741	0.741	0.738	0.849	0.836	0.832	0.827	
		3 波平均	0.655	0.646	0.646	0.639	0.608	0.605	0.734	0.702	0.696	0.740	0.728	0.730	0.728	0.756	0.744	0.743	0.741	0.847	0.836	0.835	0.830	
現行法	設定①	固有周期 Ts(s)	1.237	1.226	1.218	1.148	1.137	1.123	1.247	1.241	1.231	1.395	1.381	1.379	1.375	1.412	1.402	1.397	1.390	1.495	1.489	1.485	1.479	
		栈橋バネ定数 K	3684.0	3754.9	3798.6	7331.5	7476.9	7666.8	6216.8	6276.2	6381.9	2896.4	2957.7	2963.8	2985.1	4846.4	4921.0	4956.5	5003.3	4324.1	4362.9	4382.6	4418.3	
		補正係数 Mk	3.57	3.60	3.56	3.23	3.50	3.44	2.89	3.12	3.13	3.55	3.60	3.57	3.56	3.49	3.55	3.54	3.52	3.11	3.17	3.17	3.17	
		補正係数平均値	3.38																					
	設定②	補正後固有周期	0.67	0.67	0.66	0.62	0.62	0.61	0.68	0.67	0.67	0.76	0.75	0.75	0.75	0.77	0.76	0.76	0.76	0.81	0.81	0.81	0.80	
		固有周期 Ts(s)	1.123	1.122	1.126	1.039	1.041	1.038	1.143	1.150	1.151	1.275	1.269	1.274	1.273	1.288	1.289	1.290	1.287	1.379	1.384	1.387	1.385	
		栈橋バネ定数 K	4470.1	4478.2	4445.4	8956.8	8916.4	8967.4	7394.6	7308.7	7291.9	3468.5	3499.6	3476.7	3482.8	5829.4	5817.7	5810.6	5835.1	5083.6	5049.4	5024.9	5037.3	
		補正係数 Mk	2.95	3.02	3.04	2.64	2.94	2.94	2.43	2.68	2.74	2.97	3.04	3.04	3.05	2.90	3.00	3.02	3.01	2.65	2.74	2.76	2.78	
	設定③	補正係数平均値	2.87																					
		補正後固有周期	0.66	0.66	0.66	0.61	0.61	0.61	0.67	0.68	0.68	0.75	0.75	0.75	0.75	0.76	0.76	0.76	0.76	0.81	0.82	0.82	0.82	
		固有周期 Ts(s)	0.797	0.801	0.807	0.529	0.532	0.535	0.557	0.562	0.566	0.874	0.876	0.881	0.881	0.604	0.607	0.609	0.610	0.628	0.633	0.635	0.636	
		栈橋バネ定数 K	8872.6	8781.4	8661.0	34534.7	34097.6	33802.1	31111.4	30573.7	30205.0	7387.3	7345.0	7273.0	7260.5	26504.1	26214.1	26037.6	25992.2	24500.7	24148.2	23950.1	23890.1	
	設定④	補正係数 Mk	1.48	1.54	1.56	0.69	0.77	0.78	0.58	0.64	0.66	1.39	1.45	1.45	1.46	0.64	0.67	0.67	0.68	0.55	0.57	0.58	0.59	
		補正係数平均値	0.92																					
		補正後固有周期	0.83	0.83	0.84	0.55	0.55	0.56	0.58	0.59	0.59	0.91	0.91	0.92	0.92	0.63	0.63	0.63	0.63	0.65	0.66	0.66	0.66	
		固有周期 Ts(s)	0.674	0.680	0.687	0.412	0.415	0.417	0.441	0.445	0.448	0.743	0.747	0.752	0.753	0.469	0.472	0.474	0.475	0.496	0.501	0.503	0.504	
		栈橋バネ定数 K	12407.5	12198.4	11964.2	56986.5	56161.5	55590.5	49734.6	48764.0	48112.0	10228.0	10101.6	9969.7	9936.0	43900.1	43320.9	42994.5	42898.5	39254.3	38593.3	38244.4	38130.7	
		補正係数 Mk	1.06	1.11	1.13	0.42	0.47	0.47	0.36	0.40	0.41	1.01	1.05	1.06	1.07	0.39	0.40	0.41	0.41	0.34	0.36	0.36	0.37	
		補正係数平均値	0.62																					
		補正後固有周期	0.85	0.86	0.87	0.52	0.53	0.53	0.56	0.56	0.57	0.94	0.95	0.95	0.96	0.60	0.60	0.60	0.60	0.63	0.63	0.64	0.64	

2.7. 固有周期補正法の推定精度の評価

前節で述べた固有周期の補正法について、2次元地震応答解析から得られる固有周期を正とした場合の推定精度を検証する。

推定精度は、現行法(式(1.1))および補正法(式(2.1))により算出した固有周期(以下、固有周期(予測値)とする)と、2次元地震応答解析による固有周期(以下、固有周期(解析値)とする)の誤差を求め、その誤差の固有周期(解析値)に対する割合(誤差割合)として評価する。すなわち、ある計算事例において固有周期(予測値)と固有周期(解析値)が同値である場合、その計算事例における誤差割合は0であり、固有周期(予測値)と固有周期(解析値)の乖離が大きいほど誤差割合は0から乖離する。現行法や補正法における誤差割合の頻度分布を求め、両者の平均値 μ と標準偏差 σ を比較することで、推定精度を定量的に比較する。なお、前節の検討

より仮想固定点算出時の基準面は仮想海底面とする。

現行法における誤差割合の頻度分布を図-20に示し、補正法における誤差割合の頻度分布を図-21に示す。図-20、図-21を比較すると、補正法は誤差割合の平均値がほぼ0であり、個々の計算事例については誤差が生じるものの、計算事例全体としては2次元地震応答解析とほぼ同じ固有周期を算出していることが確認できる。また、標準偏差も現行法と比較して改善されており、補正法は現行法と比較して、2次元地震応答解析から得られる固有周期を高い精度で推定していると判断できる。すなわち、本研究の検討範囲においては、地盤の非線形性を無視できるような状況であれば、現行法における栈橋バネ定数に一定の補正係数を乗ずるのみで、2次元地震応答解析から得られる固有周期を比較的高い精度で推定することができるといえる。

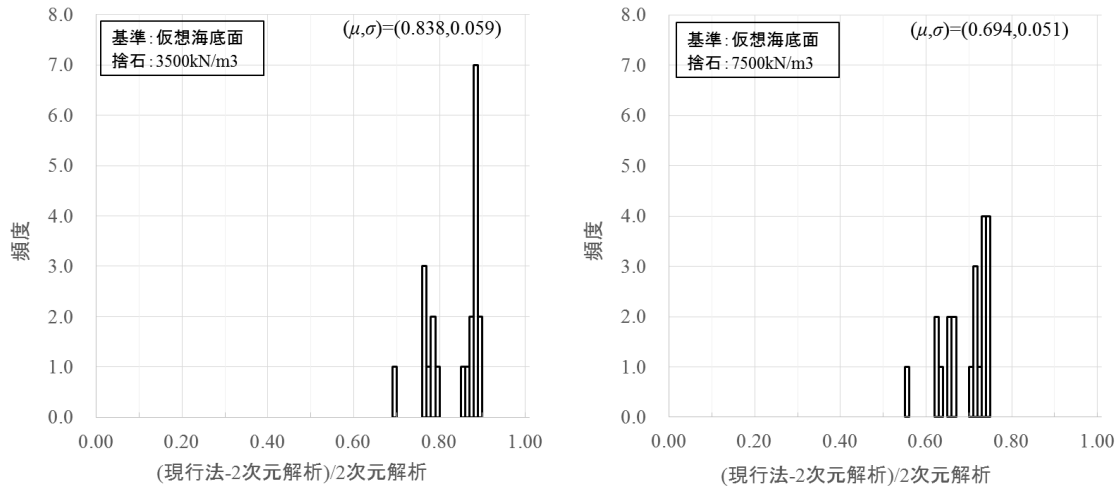


図-20 固有周期の誤差割合の頻度分布(現行法)

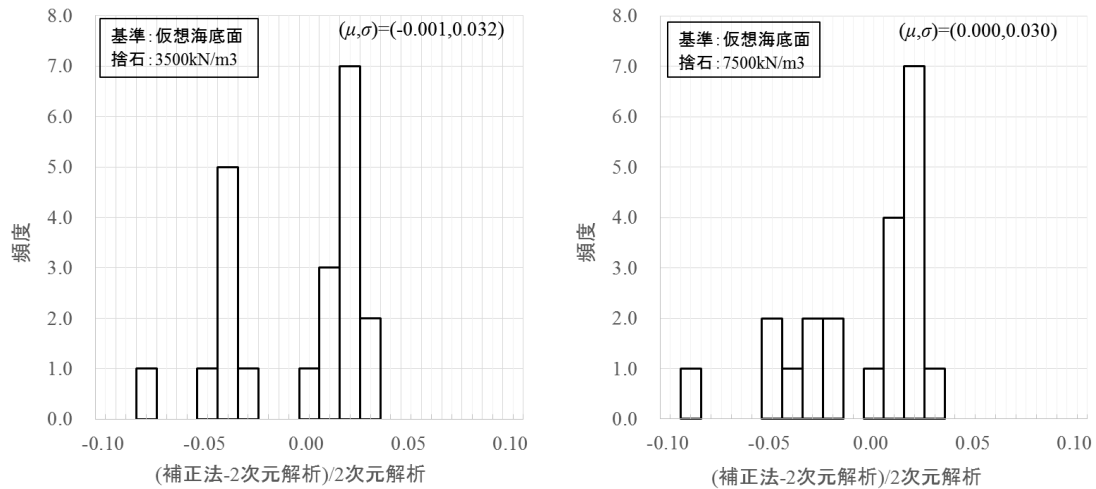


図-21 固有周期の誤差割合の頻度分布(補正法)

3. 地盤の非線形性を反映した固有周期の補正

3.1. 検討の目的

本検討では、2次元地震応答解析により、地震動の強さに対する仮想固定点周辺地盤における地盤剛性や栈橋固有周期の変化を定式化する。これにより、式(2.1)に示した栈橋固有周期の算出式に対し、地盤剛性の低下を反映した補正法を構築する。なお、2次元地震応答解析に用いた解析コードや検討断面は2. 微小地震動に対する栈橋固有周期算出式の補正と同様である。また、本研究はL1地震動による変動状態を対象とするため、原地盤の性状や入力地震動によらずFLIPに用いる液状化パラメータは設定しない。

3.2. 入力波形

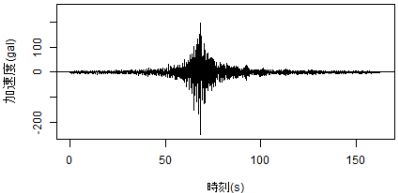
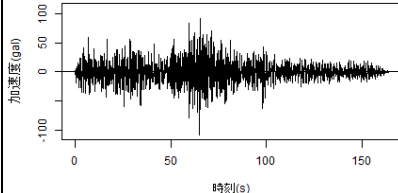
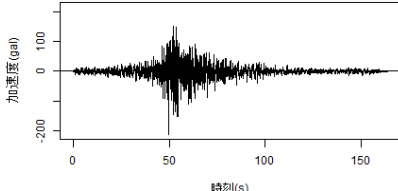
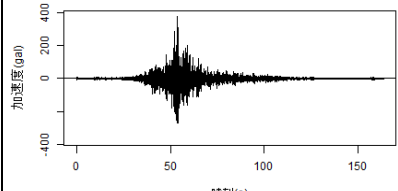
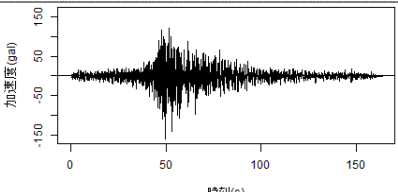
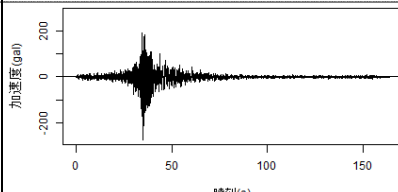
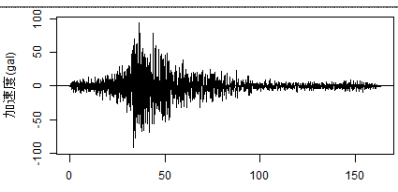
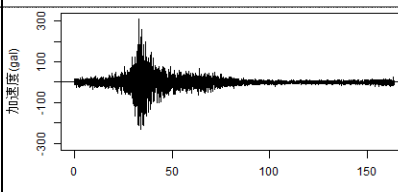
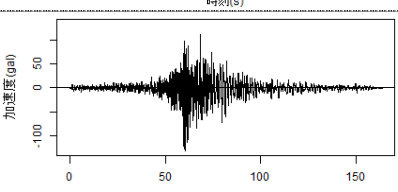
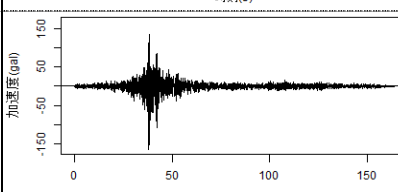
地震動に対する地盤剛性や栈橋固有周期の動的特性を定式化するためには、地震動の強さや地盤剛性の低下量が異なる様々な条件に対して地震応答解析を実施する必要がある。このため、本研究においては、表-8に示す卓越周期の

異なる複数のL1地震動⁹⁾について、最大加速度を振幅調整することで表-7に示す43波形を入力波形として設定した。なお、検討断面は2.2. 検討断面の設定に示した21断面とした。したがって、計算事例数は903例であるが、加震中に栈橋杭が全塑性した計算事例は検討対象から除外したため、検討対象とした計算事例は833例である。

表-7 入力波形一覧

最大加速度	波数	入力波形
5 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
10 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
20 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
50 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
100 Gal	5	八戸, 岩国, 博多, 石巻, 清水
150 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
200 Gal	5	八戸, 岩国, 博多, 石巻, 清水
300 Gal	5	八戸, 岩国, 博多, 石巻, 清水
500 Gal	3	八戸, 岩国, 博多
Original	10	八戸, 岩国, 博多, 石巻, 清水, 常陸那珂, 千葉, 四日市, 舞鶴, 神戸

表-8 検討に用いたL1地震動⁹⁾

波名	最大加速度 (Gal)	卓越周期 (s)	加速度波形	波名	最大加速度 (Gal)	卓越周期 (s)	加速度波形
石巻	247.61	1.000		四日市	108.05	1.377	
八戸	214.20	1.163		舞鶴	380.53	0.216	
常陸那珂	159.18	1.042		神戸	274.06	0.356	
千葉	94.97	1.342		岩国	312.27	0.238	
清水	132.02	1.587		博多	166.07	0.476	

3.3. 仮想固定点の設定

図-13に示したとおり、微小変位においては、現行法による仮想固定点、杭下端、地表面から桟橋上部工までのそれぞれの伝達関数が極大値となる周期にほとんど差は生じない。このため、前章では仮想固定点は現行法に基づいて設定した。しかしながら、より強い地震動に対しては、仮想固定点の設定方法によって2次元地震応答解析における桟橋固有周期の算出結果に差が生じることが考えられる。

各計算事例における現行法による仮想固定点、杭下端、背後地表面から桟橋上部工までのそれぞれの伝達関数が極大値となる周期を図-22に示すが、地盤剛性が低い断面ほど仮想固定点と杭下端や背後地表面とで伝達関数が極大値となる周期に差が生じやすいことがわかる。一方で、地盤剛性が高い断面ほど各地点で伝達関数が極大値となる周期が同値となる傾向が強く、現行法に基づいて設定した仮想固定点と実際の仮想固定点と多少ずれていたとしても、算出される固有周期は大差ない。なお、本研究では仮想固定点は現行法に基づいて設定する。

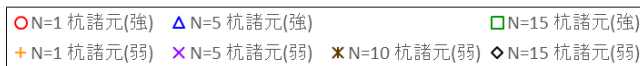
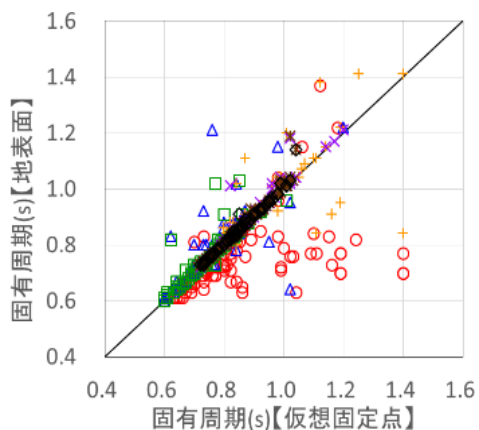
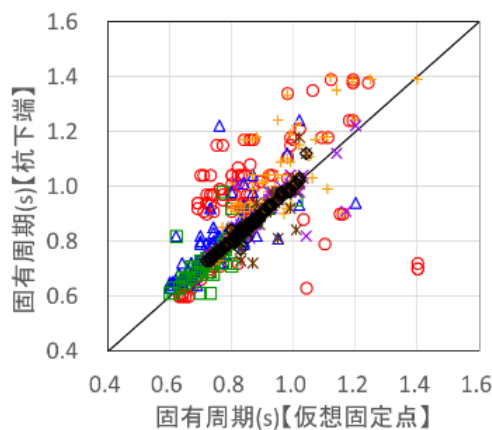


図-22 伝達関数が極大値となる周期の比較

3.4. 作用震度と固有周期の関係

2次元地震応答解析により、各計算事例における作用震度や桟橋固有周期を評価し、これらの関係性について整理する。なお、本研究においては、2次元地震応答解析から得られた桟橋上部工の最大加速度を重力加速度で除した値を作用震度と定義する(式(3.1))。

$$kh_{2D} = \alpha_{spst}/g \quad (3.1)$$

ここに、 kh_{2D} ：2次元地震応答解析から求めた作用震度、 α_{spst} ：桟橋上部工における最大加速度(Gal)、 g ：重力加速度(=980cm/s²)である。

作用震度と固有周期の関係は図-23、図-24に示すとおりであり、作用震度が大きい計算事例ほど固有周期が長くなることが確認できる。

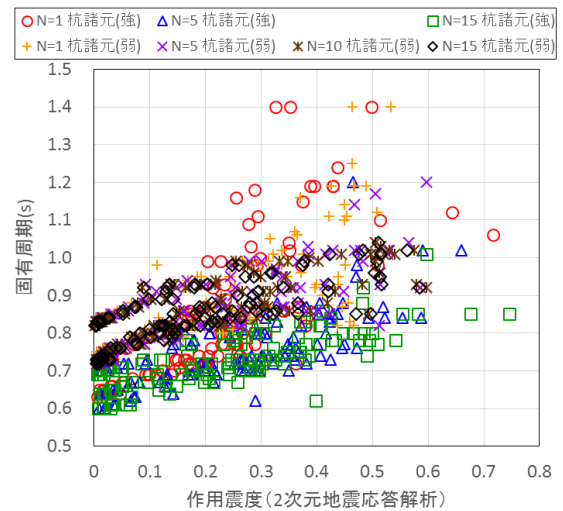


図-23 作用震度と固有周期の関係(N値別整理)

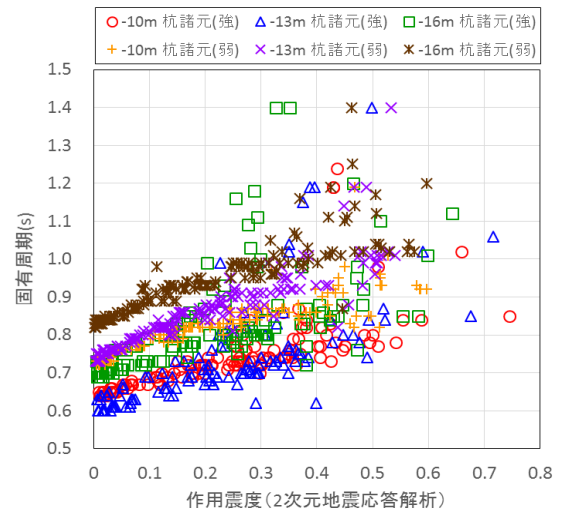


図-24 作用震度と固有周期の関係(水深別整理)

3.5. 作用震度と地盤のせん断剛性の関係

前節に示したとおり，作用震度の大小と栈橋固有周期の長短には関係性が認められる．これは，強い地震動に対しては，栈橋杭周辺の地盤剛性が低下し，杭の仮想固定点が下方に遷移することで仮想固定点から上部工までの距離が長くなるためと考えられる．したがって，作用震度と地盤剛性の低下量の関係性を整理することで，地盤剛性の低下量から栈橋固有周期の変化を推定することができる．

しかしながら，作用震度の増加と地盤剛性の低下は非線形な関係であり，固有周期算出式に動的特性を考慮した補正を加えるためには，1次元地震応答解析から得られる物理量に基づいて地盤剛性の低下をパラメータ化化する必要がある．これについて，栗原・長尾⁵⁾は式(3.2)，式(3.3)に示すように，地盤のせん断剛性と水平地盤反力係数には N 値を介して一定の関係があることに着目し，地盤のせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ により地盤の非線形性を表すことができることを示した．

$$G = \rho V_s^2 \quad (3.2)$$

$$V_s = 80.6N^{1/3} \quad (3.3)$$

ここに， G ：地盤のせん断剛性(kN/m²)， ρ ：地盤の単位体積重量(t/m³)， V_s ：地盤のせん断波速度(m/s)， N ： N 値である．また，地盤のせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ は，仮想固定点周辺における地盤の初期せん断剛性 G_0 とせん断応力最大時の地盤のせん断剛性 $G_{\tau max}$ の比である．なお，本研究においては，2次元地震応答解析における地盤の初期せん断剛性 G_0 は，初期自重解析の直後，すなわち地震応答解析開始時のせん断剛性として整理している．また，「仮想固定点周辺における地盤のせん断剛性」とは，仮想固定点を中心とした周辺4要素のせん断剛性を平均した値としている．

地盤のせん断剛性は式(3.4)により示せることから，仮想固定点周辺地盤のせん断応力とせん断ひずみの時刻歴を地震応答解析により求めることで，せん断応力最大時のせん断剛性 $G_{\tau max}$ を得ることができる．

$$G = \tau_{xy}/\gamma_{xy} \quad (3.4)$$

ここに， G ：地盤のせん断剛性(kN/m²)， τ_{xy} ：地盤のせん断応力(kN/m²)， γ_{xy} ：地盤のせん断ひずみである．

図-25 に2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断応力 τ_{xy} とせん断ひずみ γ_{xy} の時刻歴の一例を示す．なお，図中にはせん断応力最大時のせん断剛性 $G_{\tau max}$ も併記する．図-25より，強い地震動に対してせん断応力 τ_{xy} とせん断ひずみ γ_{xy} の関係が非線形となり，せん断応力最大

時のせん断剛性 $G_{\tau max}$ が小さくなることがわかる．すなわち，地震動が強くなるほど，栈橋杭周辺の地盤剛性は大きく低下し，それに伴い固有周期が長くなると想定できる．また，地震応答解析から得られる地盤のせん断剛性は，せん断ひずみとせん断応力の非線形な関係をよく再現し，初期せん断剛性との比 $G_{\tau max}/G_0$ として表すことで，地盤剛性の低下量を0～1の変数として評価できると考えられる．

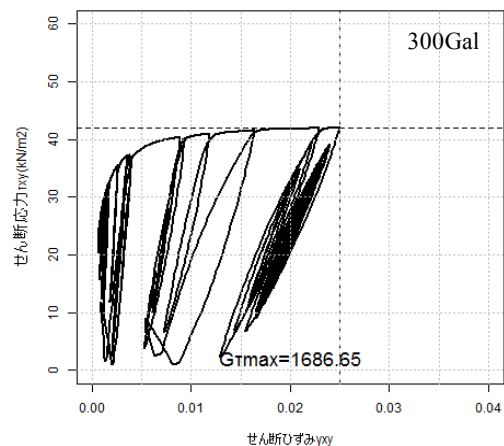
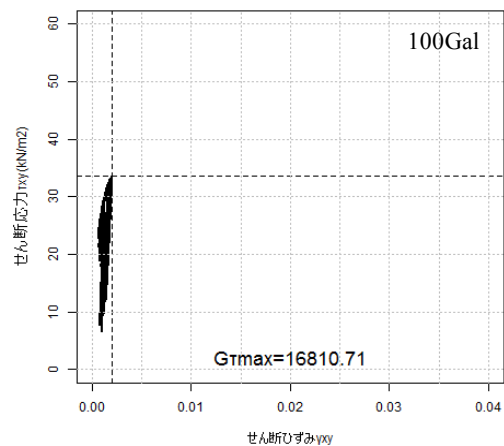
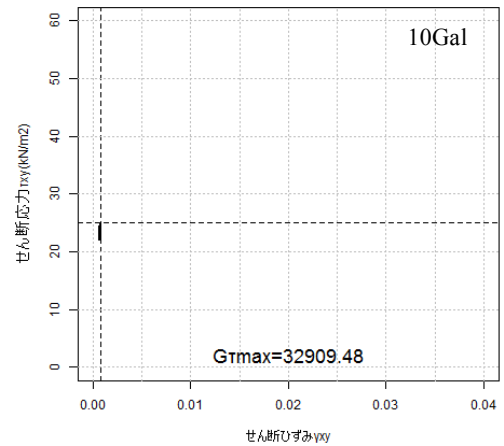


図-25 2次元地震応答解析におけるせん断ひずみとせん断応力の関係(八戸波 -16m・N=15)

図-26 に、2次元地震応答解析により求めた作用震度とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 の関係を示すが、せん断剛性比 G_{tmax}/G_0 と作用震度には関係性があることが確認できる。すなわち、作用震度が非常に小さい状態であれば、地盤のせん断剛性はほとんど低下せず、せん断剛性比 G_{tmax}/G_0 もほぼ 1.0 であるが、作用震度の増加とともに地盤のせん断剛性は低下し、せん断剛性比 G_{tmax}/G_0 も 0 に近い値へと遷移する。図-23、図-24 に示したとおり、作用震度と固有周期には関係性があることから、各計算事例におけるせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 と桟橋固有周期の関係性を整理することで、せん断剛性比 G_{tmax}/G_0 から固有周期を推定できると考えられる。

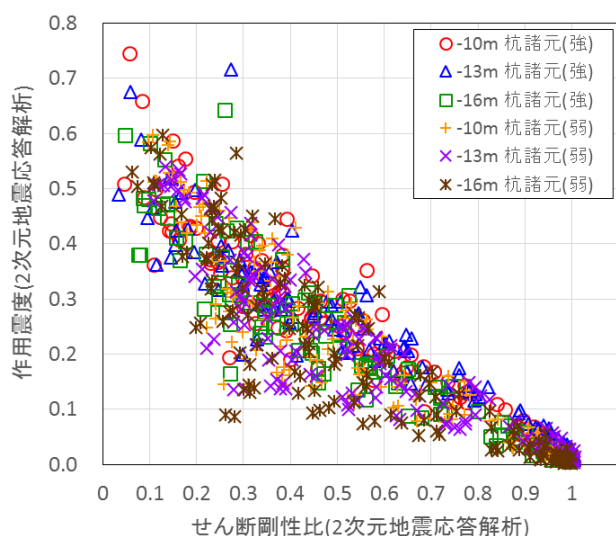


図-26 せん断剛性比と作用震度の関係

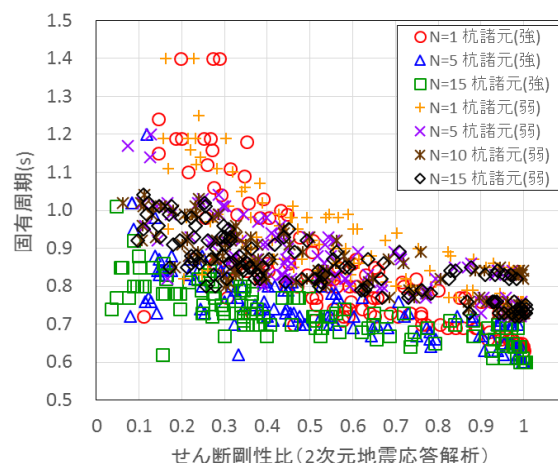


図-27 せん断剛性比と固有周期の関係(N 値別)

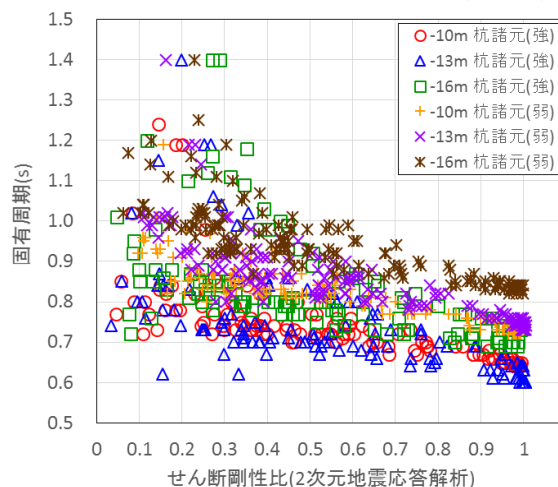


図-28 せん断剛性比と固有周期の関係(水深別)

3. 6. 地盤非線形性と固有周期との関係式の構築

前項に示したとおり、地盤のせん断剛性の時刻歴は、作用震度の増加に対する地盤剛性の低下をよく再現していることから、せん断剛性比 G_{tmax}/G_0 を地盤非線形性を表す指標と捉え、地震動に伴う桟橋固有周期の変化量を求めるための関係式を導出する。

(1) 地盤のせん断剛性比と桟橋固有周期の関係

各計算事例における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 と桟橋固有周期の関係は図-27、図-28 に示すとおりであり、せん断剛性比が低下するほど固有周期は長くなる。

ところで、図-27、図-28 では、せん断剛性比が 1.0 であっても検討断面ごとに固有周期が異なることから断面間の比較が難しい。そこで、以降の定式化を容易にするため、地震動に伴う桟橋固有周期の変化の程度を、静的状態における桟橋固有周期に対する比として考え、式(3.5)のように定義する。

$$R_{Ts} = T_{Sdyna}/T_{Sstat} = T_{Sex}/T_{S10Gal} \quad (3.5)$$

ここに、

R_{Ts} : 固有周期比

T_{Sdyna} : 地震作用時における桟橋固有周期(s)

T_{Sstat} : 静的状態における桟橋固有周期(s)

T_{Sex} : 2次元地震応答解析より求めた各計算事例における桟橋固有周期(s)

T_{S10Gal} : 最大加速度を 10Gal に振幅調整した地震動に対する桟橋固有周期(s)

である。

せん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 と固有周期比 R_{Ts} の関係は図-29、図-30 に示すとおりであるが、いずれの検討断面であつてもせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 がほぼ 1.0 であるときの固有周期比 R_{Ts} は 1.0 となるので、検討断面間の比較が容易となる。

なお、式(3.5)に示したとおり、本研究では最大加速度を 10Gal に振幅調整した地震動を静的状態と定義している。これは、FLIP による動的解析では静的状態における栈橋固有周期を算出することが困難であることから、最大加速度を 10Gal に振幅調整した地震動を与えることで静的な状態を仮定したためである。したがって、本研究における「静的な状態」とは、実際には微小地震動での検討に基づいていることに留意されたい。

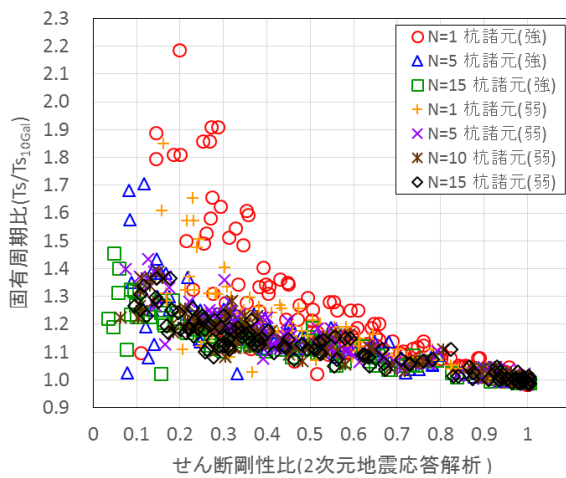


図-29 せん断剛性比と固有周期比の関係(N 値別)

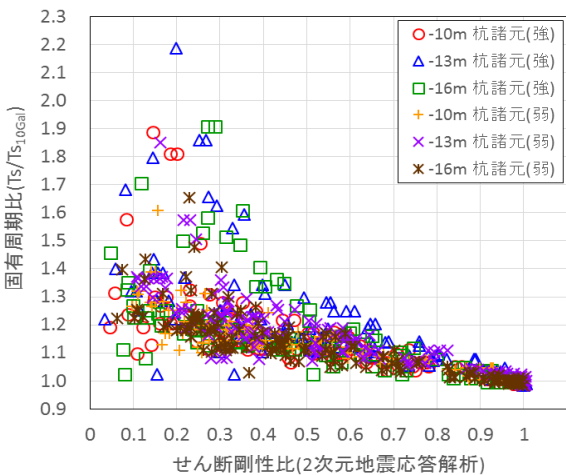


図-30 せん断剛性比と固有周期比の関係(水深別)

図-29、図-30 は、せん断剛性比の低下に対し固有周期比が増加することを示しているが、増加の程度は検討断面により異なることが確認できる。そこで、N 値や水深について分けて整理した散布図を表-9 に示すが、N 値別の散布図と比較して水深別の散布図はばらつきが大きいことが確認できる。これは、図-31 に示すように、水深別の整理では N=1 ～15 までの計算結果が包括されており、N 値の差異によってせん断剛性比の低下に対する固有周期比の増加の程度が大きく異なるためと考えられる。一方、N 値別の整理では設計水深-10～-16m までの計算結果が包括されているが、水深の違いはせん断剛性比の低下に対する固有周期比の増加にあまり影響せず、散布図ではばらつきが小さいように表現されることが考えられる。これから、せん断剛性比の低下に対する固有周期比の増加の程度は、設計水深や杭諸元の影響は比較的小さく、原地盤の地盤剛性による影響が大きいと考えられる。したがって、地盤のせん断剛性比と栈橋固有周期の関係式を構築する際は、原地盤 N 値を変数として与える必要があるといえる。

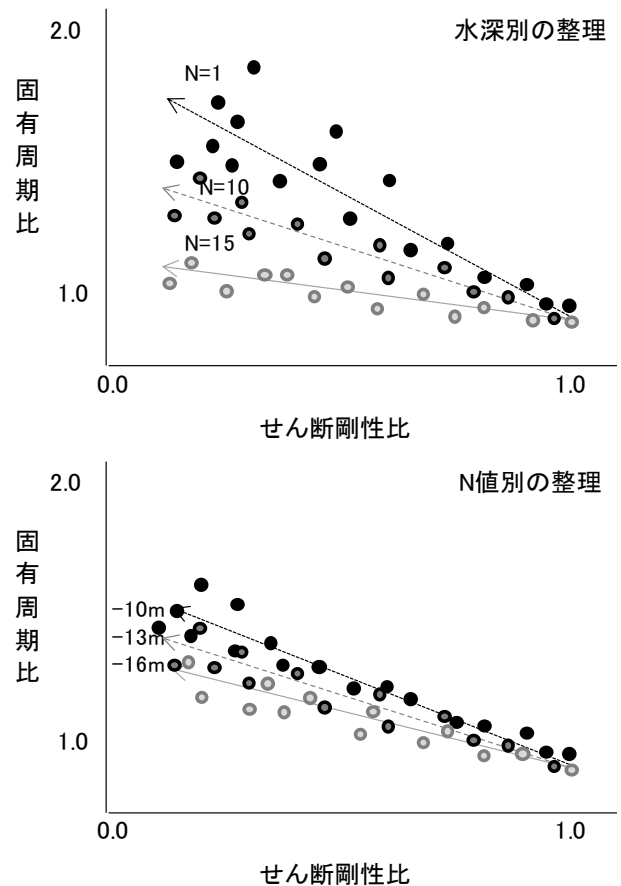
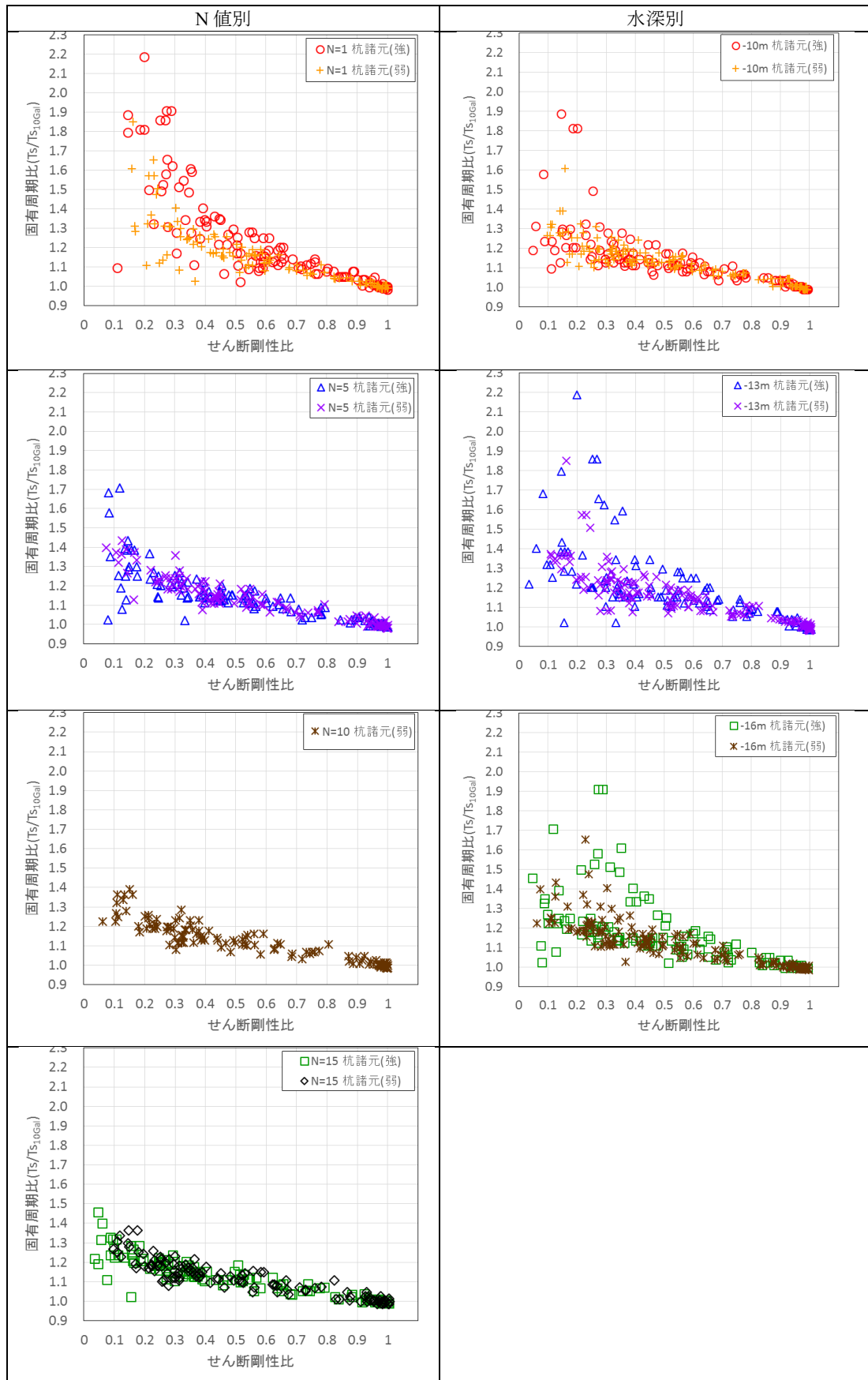


図-31 水深や N 値の差がせん断剛性比と固有周期比の関係に与える影響について

表-9 セン断剛性比と固有周期比の関係



(2) 地盤のせん断剛性比と栈橋固有周期比の近似式

上述を踏まえ、せん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ と固有周期比 R_{Ts} の関係を原地盤 N 値ごとに整理し、その近似曲線を求めると図-32 に示すとおりとなる。なお、近似曲線の設定方法は複数あるが、決定係数の高さや定式化の容易性を考慮し、ここでは累乗近似曲線を採用した。せん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ と固有周期比 R_{Ts} の近似式は原地盤 N 値ごとに以下に示すとおりとなる。

$$N=1 : R_{Ts} = 1.0022(G_{\tau max}/G_0)^{-0.257} \quad (3.6)$$

$$N=5 : R_{Ts} = 1.0166(G_{\tau max}/G_0)^{-0.138} \quad (3.7)$$

$$N=10 : R_{Ts} = 1.0189(G_{\tau max}/G_0)^{-0.117} \quad (3.8)$$

$$N=15 : R_{Ts} = 1.0212(G_{\tau max}/G_0)^{-0.103} \quad (3.9)$$

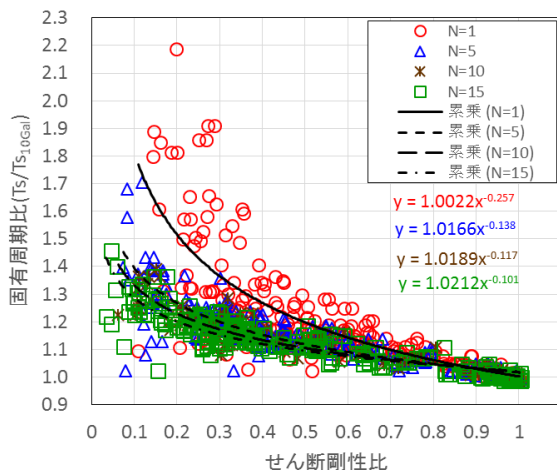


図-32 せん断剛性比と固有周期比の近似式

(3) 地盤のせん断剛性比と栈橋固有周期比の関係式の構築

本検討において栈橋固有周期比 R_{Ts} は、地震動に伴う栈橋固有周期を、静的状態における栈橋固有周期に対する変化率として表すために定義している。したがって、地盤のせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ が 1.0 であるとき、栈橋固有周期比 R_{Ts} は 1.0 であることが望ましい。しかしながら、式(3.6)～(3.9)はこの条件を満たしておらず、これらの式をそのまま地盤のせん断剛性比と栈橋固有周期の関係式として採用することは望ましくない。

そこで、本研究では栈橋固有周期比 R_{Ts} と地盤のせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ を以下の累乗式で定式化する。

$$R_{Ts} = (G_{\tau max}/G_0)^a \quad (3.10)$$

ここに、 a は調整係数であり、式(3.10)の形式であれば地盤のせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ が 1.0 であるとき、栈橋固有周期比 R_{Ts} は 1.0 となる。

調整係数 a は、関係式から求められる固有周期比(以下、

固有周期比(予測値)とする)と、2次元地震応答解析から求めた固有周期比(以下、固有周期比(解析値)とする)の残差分散が最も小さくなる値を求めることで導出し、原地盤 N 値ごとに表-10 に示す値である。すなわち、地盤のせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ と固有周期比 R_{Ts} は式(3.11)～(3.14)の関係式により表すことができるといえる。

$$N=1 : R_{Ts} = (G_{\tau max}/G_0)^{-0.264} \quad (3.11)$$

$$N=5 : R_{Ts} = (G_{\tau max}/G_0)^{-0.139} \quad (3.12)$$

$$N=10 : R_{Ts} = (G_{\tau max}/G_0)^{-0.116} \quad (3.13)$$

$$N=15 : R_{Ts} = (G_{\tau max}/G_0)^{-0.100} \quad (3.14)$$

表-10 調整係数 a

N 値	1	5	10	15
係数 a	-0.264	-0.139	-0.116	-0.100

式(3.11)～(3.14)から求めた固有周期比 R_{Ts} の予測値は図-33 に示すとおりであり、図-32 に示した近似式と大きな違いは無いことが確認できる。

なお、N 値ごとの調整係数 a と残差分散の関係、および解析値と予測値の比較は表-12 に示す。

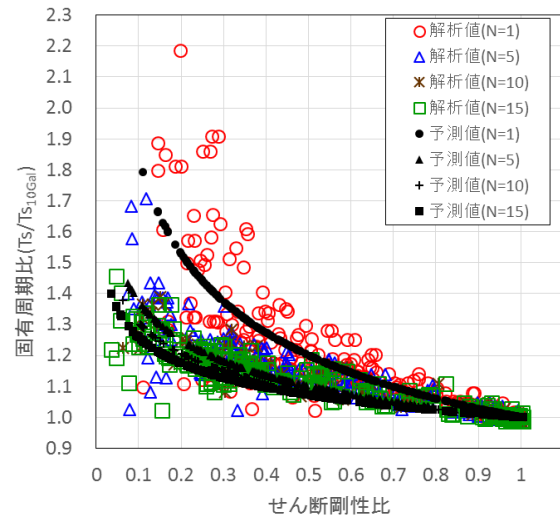


図-33 予測値とせん断剛性比の関係

一方、固有周期比の解析値と予測値の比較は図-34 に示すとおりであり、N 値が小さい計算事例ほど、また固有周期比が大きい計算事例ほど、解析値と予測値の乖離が大きくなることが示される。特に固有周期比が $R_{Ts} = 1.3 \sim 1.4$ 程度を超過すると、解析値と予測値の乖離はかなり大きい。ただし、両者の相関係数は N 値により異なるものの 0.8～0.9 程度あり(表-11)、かなり強い相関があることから、式(3.11)～(3.14)の関係式を用いた固有周期の予測は概ね可能と判断できる。

なお、固有周期比(解析値)と2次元地震応答解析から得られた作用震度との関係は図-35に示すとおりであるが、固有周期比 $R_{Ts}=1.3\sim 1.4$ は照査用震度としては概ね $kh=0.3\sim 0.5$ 程度に相当している。棧橋式係船岸において、照査用震度が $kh=0.5$ を超過するような L1 地震動はさほど多くないと考えられるが、この範囲であれば式(3.11)～(3.14)から得られる固有周期比の予測値と2次元地震応答解析とのばらつきは比較的小さい。したがって、式(3.11)～(3.14)は変動状態における棧橋固有周期の予測手法としては、概ね適用可能と判断できるといえる。

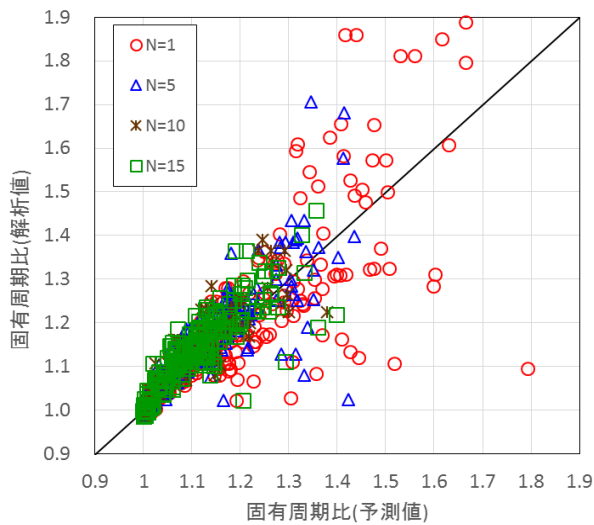


図-34 固有周期比の解析値と予測値の比較

表-11 固有周期比の解析値と予測値の相関係数

N 値	1	5	10	15
相関係数 r	0.799	0.859	0.896	0.880

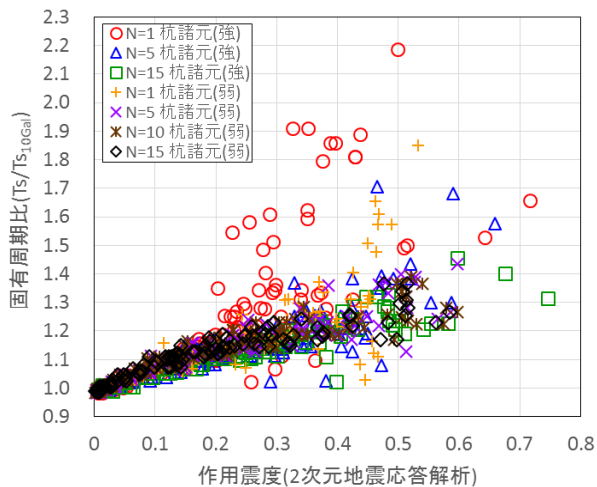


図-35 固有周期比と照査用震度の関係

表-12 調整係数 a と残差分散の関係, および解析値と予測値の比較

	調整係数 a と残差分散の関係図	解析値と予測値の比較図
N=1		
N=5		
N=10		
N=15		

(4) 変数としての原地盤 N 値の導入

図-33 からは、式(3.11)～(3.14)から求まる桟橋固有周期比 R_{Ts} の予測値は、N 値が小さい断面ほど大きく変化することがわかる。また、N=1 と N=5 とでは予測値の分布が大きく異なるのに対し、N=10 と N=15 では予測値の分布にあまり差がないことから、一定以上の N 値に達すると、N 値の大小はせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 と桟橋固有周期比 R_{Ts} の関係にさほど影響を及ぼさなくなると考えられる。

式(3.11)～(3.14)は調整係数 a の値のみが異なるため、上述した傾向の差異は調整係数 a の大小でしか表現することができない。つまり、原地盤 N 値は調整係数 a に強い影響を及ぼしており、N 値が小さいほど断面ほど調整係数 a は小さい値であるとともに、一定値以上の N 値であれば調整係数 a はほとんど変化しなくなると考えられる。

この前提から、調整係数 a を N 値との関係式に置き換え、式(3.11)～(3.14)を一つの式に集約する。一定値以上の N 値で調整係数 a がほぼ変化しなくなことを前提に N 値と調整係数 a を対数近似すると、図-36 に示す近似曲線が描ける。しかしながら、この近似曲線は N=1 や N=10 での整合は良いものの、N=5, 15 では近似値に若干の乖離がある。式(3.11)～(3.14)は、N=1 のときに 2 次元地震応答解析とのばらつきが大きくなることや、N=1 という値は設計上あまり現実的でないことを踏まえると、N=5～15 の範囲のフィッティング精度を高める方が適切である。このため、N=5 を境に近似曲線を分け、図-37 に示す近似曲線を設定する。

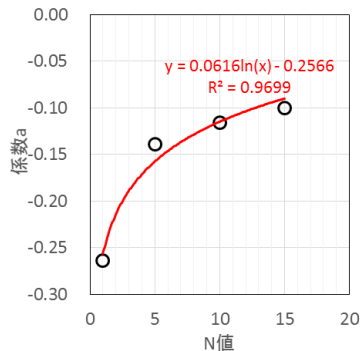


図-36 N 値と調整係数 a の近似曲線①

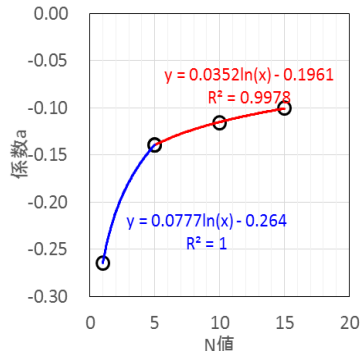


図-37 N 値と調整係数 a の近似曲線②

この近似曲線を式(3.11)～(3.14)に組み込むことで、N 値を変数とした補正式(3.15)、(3.16)を導出できる。

$$N=5 \text{ 未満} : R_{Ts} = (G_{tmax}/G_0)^{(0.0777 \ln(N)-0.264)} \quad (3.15)$$

$$N=5 \text{ 以上} : R_{Ts} = (G_{tmax}/G_0)^{(0.0352 \ln(N)-0.1961)} \quad (3.16)$$

ここに、N は仮想固定点周辺地盤の N 値である。

図-38 に式(3.15)、式(3.16)による予測値とせん断剛性比の関係を示すが、補正式はせん断剛性比の低下に伴う固有周期比の増加をよく表していることが確認できる。

また、図-39 に固有周期比の解析値と予測値の比較を示し、表-13 に両者の相関係数を示すが、これらは図-34、表-11 とほぼ同じ結果となっている。したがって、原地盤 N 値を変数として補正式(3.15)、(3.16)に組み込んでも、式(3.11)～(3.14)と大きな乖離は生じていないと判断できる。

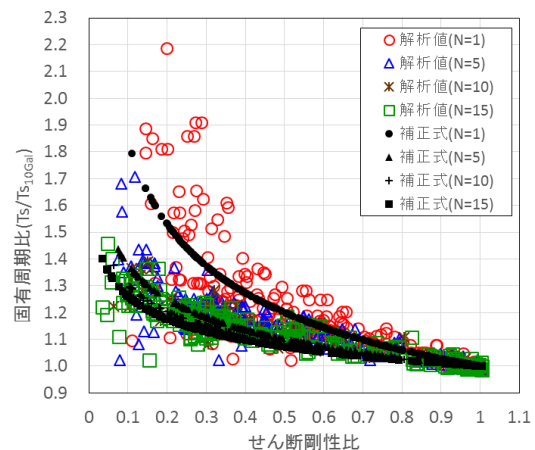


図-38 補正式による予測値とせん断剛性比の関係

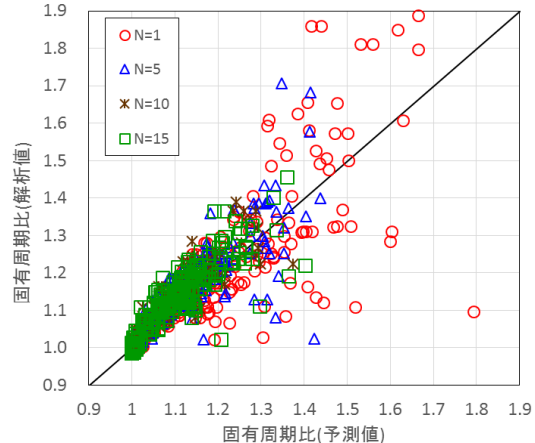


図-39 固有周期比の解析値と予測値の比較

表-13 固有周期比の解析値と予測値の相関係数

N 値	1	5	10	15
相関係数 r	0.799	0.859	0.896	0.880

3.7. 1次元地震応答解析による地盤非線形性の評価

前節では、2次元地震応答解析により求めたせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ を入力値として、地盤剛性と栈橋の固有周期との関係式を整理した。しかしながら、設計実務への適用性を考慮すると、地盤剛性は1次元地震応答解析に基づいて評価する必要がある。このため、以下に1次元地震応答解析から求まるせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ と、2次元地震応答解析のそれとの関係性を整理する。

(1) 1次元地震応答解析および2次元地震応答解析から求めたせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ の比較

1次元地震応答解析におけるせん断ひずみやせん断応力の時刻歴変化は、図-40に示すように原点が初期値となる。

図-41に、各検討断面における1次元地震応答解析および2次元地震応答解析から求めたせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ を示す。なお、1次元地震応答解析におけるせん断剛性 G は、仮想固定点の上下2要素におけるせん断剛性 G の平均値としている。また、1次元地震応答解析における地盤の初期せん断剛性 G_0 は、設計実務における利便性を考慮して1D-MAKERより設定される初期せん断剛性 G_{ma} と同値としている。すなわち、初期自重解析の直前におけるせん断剛性比であり、2次元地震応答解析の初期せん断剛性 G_0 (初期自重解析直後、地震応答解析直前のせん断剛性) とは定義が異なるため留意されたい。

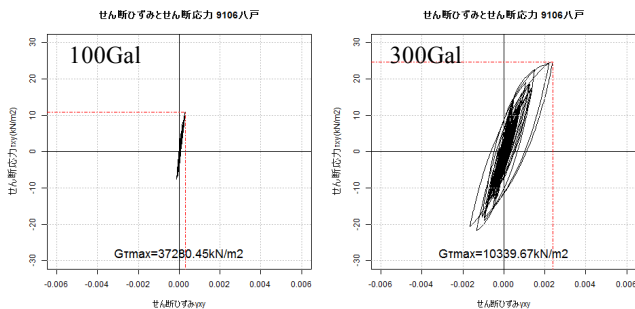


図-40 1次元地震応答解析におけるせん断ひずみとせん断応力の関係(八戸波・16m・N=15)

図-41から、特に2次元地震応答解析における $G_{\tau max}/G_0$ が1に近い条件、すなわち作用地震動が小さいほど1次元と2次元との算出される $G_{\tau max}/G_0$ が乖離することがわかる。ただし、表-14に示すとおり両者の相関係数は非常に高いことから、1次元地震応答解析から求まる $G_{\tau max}/G_0$ により、2次元地震応答解析における $G_{\tau max}/G_0$ を比較的精度よく予測することは可能である。

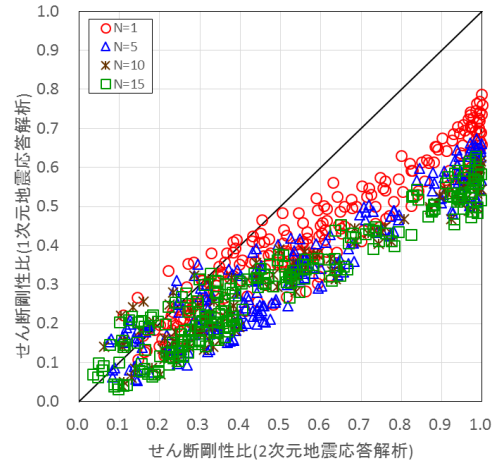


図-41 せん断剛性比の比較【1次元 - 2次元】

表-14 相関係数の比較

N 値	1	5	10	15
相関係数 r	0.945	0.947	0.956	0.959

(2) 補正式の検討

1次元地震応答解析から求めたせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ は、2次元地震応答解析のそれと高い相関係数を有することから、線形近似による補正が可能である。

2次元地震応答解析におけるせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ が0であるとき、1次元地震応答解析から求めたせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ も0であると仮定すると、両者の線形近似式は式(3.17)であり、図-42に示すとおりとなる。

$$R_{G2D} = \gamma R_{G1D} \quad (3.17)$$

ここに、 R_{G2D} : 2次元地震応答解析におけるせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ 、 γ : 調整係数(表-15)、 R_{G1D} : 1次元地震応答解析により求めたせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ である。

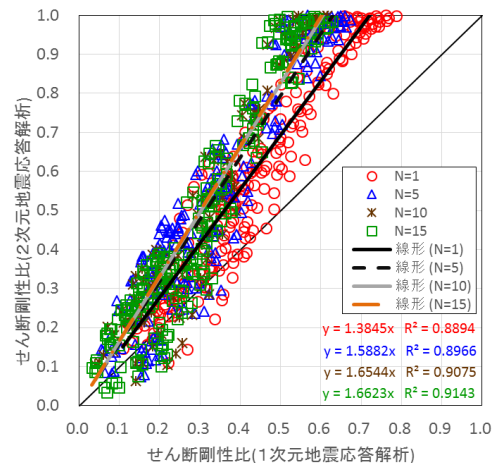


図-42 せん断剛性比の線形近似式

表-15 調整係数 γ

N 値	1	5	10	15
係数 γ	1.3845	1.5882	1.6544	1.6623

表-15 の調整係数 γ と N 値とを累乗近似すると、近似式は式(3.18)、式(3.19)に示すとおりとなり、その近似曲線は図-43 に示すとおりとなる。

$$N=5 \text{ 未満} : \gamma = 1.3845 N^{0.0853} \quad (3.18)$$

$$N=5 \text{ 以上} : \gamma = 1.4854 N^{0.0434} \quad (3.19)$$

ここに、 N は仮想固定点周辺地盤の N 値である。

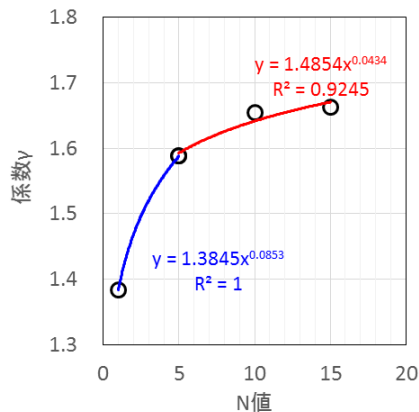


図-43 調整係数 γ と N 値の近似曲線

式(3.17)に式(3.18)、式(3.19)を代入することで、1次元地震応答解析より求めたせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 の補正式(3.20)、(3.21)を導出できる。

$$N=5 \text{ 未満} : R_{G2D} = 1.385 R_{G1D} \cdot N^{0.0853} \quad (3.20)$$

$$N=5 \text{ 以上} : R_{G2D} = 1.485 R_{G1D} \cdot N^{0.0434} \quad (3.21)$$

式(3.20)、(3.21)より求めた予測値と2次元地震応答解析から求めた解析値とを比較すると図-44 に示すとおりとなり、両者はよく対応していることが確認できる。以上より、1次元地震応答解析より求めたせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 から、2次元地震応答解析におけるせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 を精度よく予測することは可能と判断される。

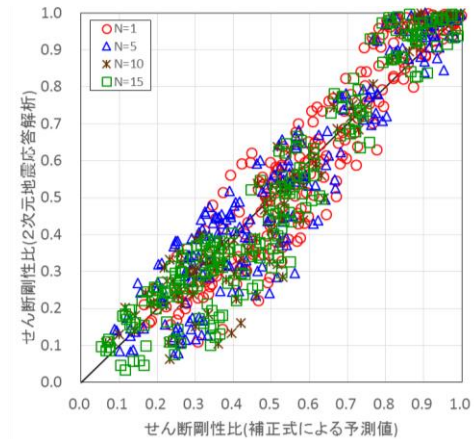


図-44 補正式による予測値と2次元地震応答解析とのせん断剛性比の比較

3.8. 档橋固有周期補正法の設定

前節までの検討結果を取りまとめ、档橋の固有周期の動的特性を反映した補正法を構築する。

(1) 1次元地震応答解析における固有周期比 R_{Ts} の設定法

式(3.15)、式(3.16)は、2次元地震応答解析における档橋固有周期比 R_{Ts} を、2次元地震応答解析から求めたせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 を用いて予測する式である。そして、式(3.20)、(3.21)は1次元地震応答解析により、2次元地震応答解析におけるせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 を求めるための式である。したがって、式(3.15)、式(3.16)に式(3.20)、(3.21)を代入した式(3.22)、式(3.23)により、1次元地震応答解析より求めたせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 から、2次元地震応答解析における档橋固有周期比 R_{Ts} を予測することが可能となる。

<N=5未満>

$$R_{Ts} = (1.3845 R_{G1D} \cdot N^{0.0853})^{(0.0777 \ln(N) - 0.264)} \quad (3.22)$$

<N=5以上>

$$R_{Ts} = (1.4854 R_{G1D} \cdot N^{0.0434})^{(0.0352 \ln(N) - 0.1961)} \quad (3.23)$$

ここに、

R_{Ts} : 固有周期比(静的状態を基準とした、地震時における档橋固有周期の変化率)

N : 仮想固定点周辺地盤における N 値

R_{G1D} : 1次元地震応答解析より求めたせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0

である。

図-45 に、式(3.22)、式(3.23)により求めた固有周期比(予測値)と、2次元地震応答解析により求めた固有周期比(解析値)の比較を示し、表-16 に両者の相関係数を示す。両者の

相関係数は概ね 0.7～0.8 程度であり、1 次元地震応答解析から求めた地盤のせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 より予測した栈橋固有周期比は、2 次元地震応答解析より求めた栈橋固有周期比と強い相関を有している。ただし、2 次元地震応答解析から求まるせん断剛性比を用いた場合($r=0.8\sim0.9$ 程度、表-13)と比較すると、相関係数は低下している。

表-16 相関係数の比較

N 値	1	5	10	15
相関係数 r	0.737	0.781	0.773	0.802

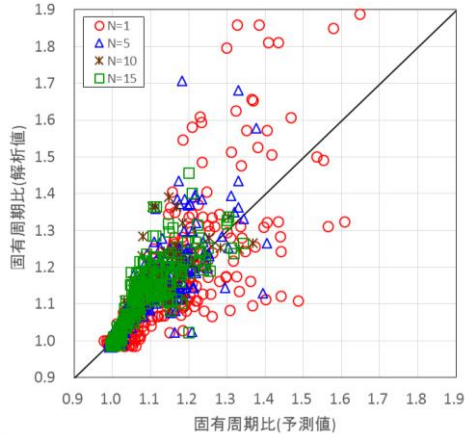


図-45 固有周期比の予測値と解析値の比較

(2) 固有周期 T_s の補正法

栈橋固有周期比 R_{Ts} は、静的状態における栈橋固有周期 T_{sstat} と、地震時における栈橋固有周期 T_{sdyna} の比である。静的状態における栈橋固有周期は、2. 微小地震動に対する栈橋固有周期算出式の補正に示したとおりであり、式(3.24)から2次元地震応答解析における静的状態での栈橋固有周期 T_{sstat} を予測することができる。

$$T_{sstat} = 2\pi \sqrt{W/gM_k K} \quad (3.24)$$

表-17 栈橋バネ定数補正係数

捨石の地盤反力係数(kN/m ³)	補正係数 M_k
3500	3.38
7500	2.87

ここに、 T_{sstat} : 2次元地震応答解析における静的状態での栈橋固有周期(s)、 W : 杭1列が受け持つ自重・载荷重(kN)、 g : 重力加速度(m/s²)、 M_k : 補正係数(表-17)、 K : 栈橋バネ定数(kN/m)である。

したがって、式(3.24)に式(3.22)、式(3.23)を乗ずることで、現行法(式(1.1))に対し、地震動に伴う地盤剛性の低下を反映した補正を掛けることが可能となる。

$$T_{sdyna} = R_{Ts} \cdot T_{sstat} \quad (3.25)$$

ここに、 T_{sdyna} は 2 次元地震応答解析から求めた地震時における栈橋固有周期であり、 R_{Ts} は式(3.22)、式(3.23)から求まる固有周期比、 T_{sstat} は式(3.24)から求まる 2 次元地震応答解析における静的状態での栈橋固有周期である。

図-46 に式(3.25)により補正した固有周期(予測値)と 2 次元地震応答解析から求めた固有周期(解析値)の散布図を示し、図-47 に現行法(式(1.1))による予測値との散布図を示す。また、両者の相関係数を表-18 に示す。両図に示されるとおり、補正法は現行法と比較して、2 次元地震応答解析における固有周期の動的特性をよく表すことができています。

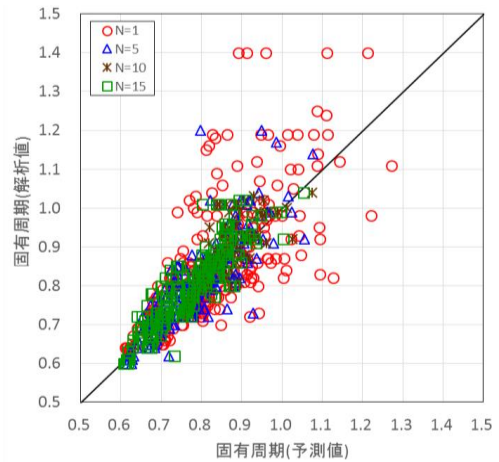


図-46 固有周期の予測値と解析値の比較(補正法)

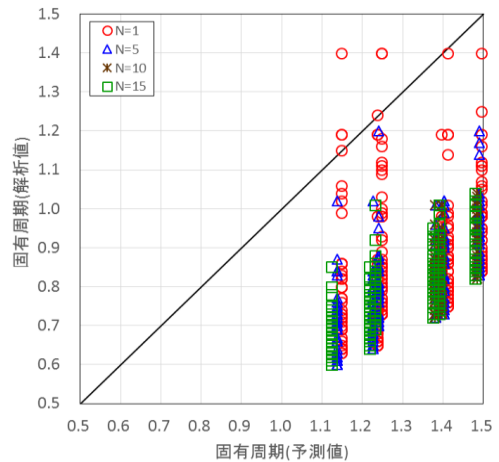


図-47 固有周期の予測値と解析値の比較(現行法)

表-18 相関係数の比較

N 値	1	5	10	15
相関係数 r (補正法)	0.692	0.851	0.812	0.893
相関係数 r (現行法)	0.300	0.638	0.494	0.726

3.9. 固有周期補正法の推定精度の評価

(1) 推定精度の評価

2.7. 固有周期補正法の推定精度の評価と同様に、2次元地震応答解析に対する誤差割合を求めることで、固有周期補正法の推定精度を評価する。

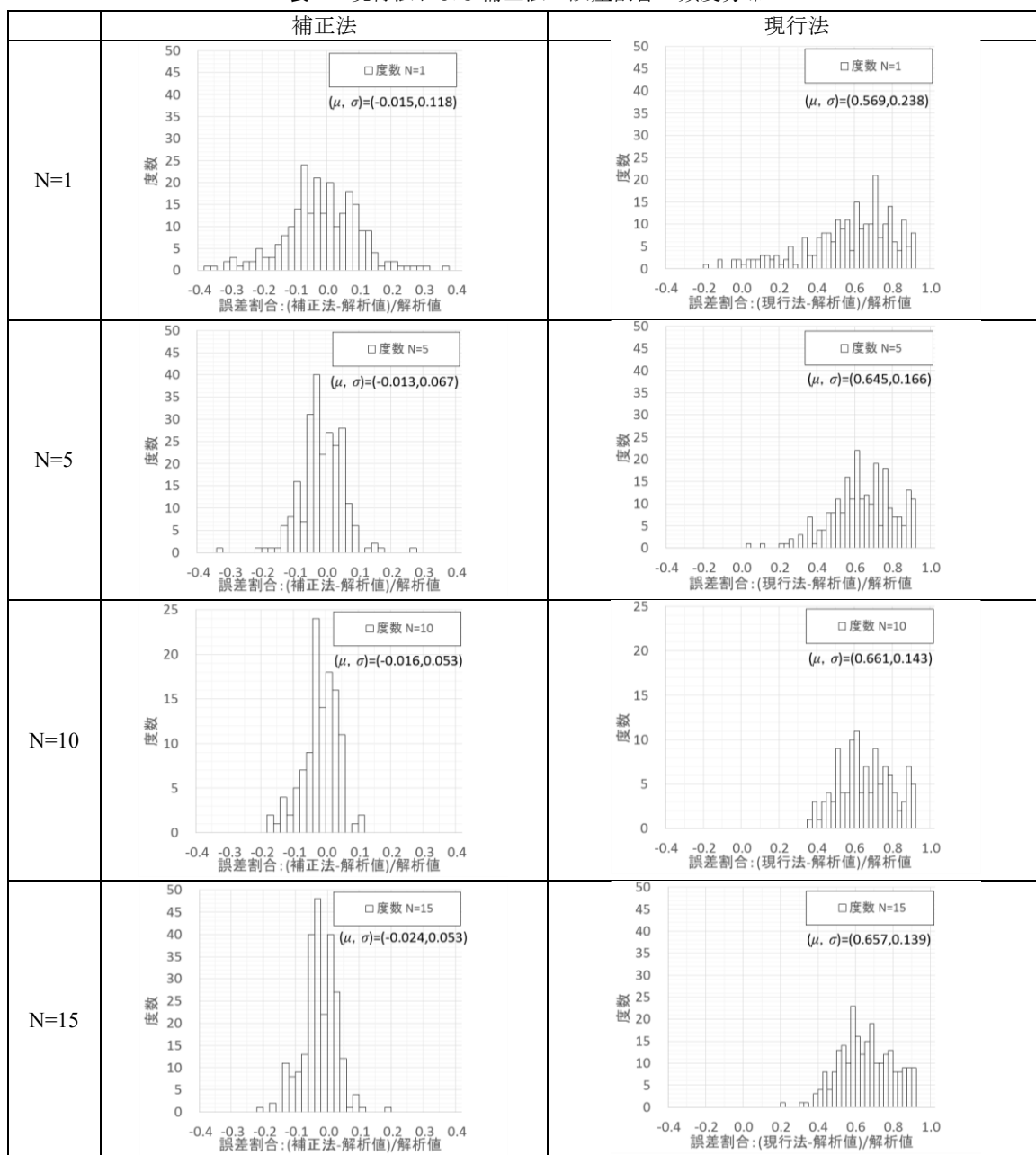
現行法および補正法の誤差割合の頻度分布は表-19、表-20に示すとおりである。誤差割合の平均値を比較すると、現行法は誤差割合の平均値が0.569～0.661となっており、全体的な傾向として2次元地震応答解析の1.6倍程度の固有周期を算出していることが確認できる。これに対し、補正法は誤差割合の平均値が-0.024～-0.013であり、若干小さ

な値となる傾向があるものの、2次元地震応答解析とほぼ同じ固有周期を算出していることが確認できる。また、標準偏差も現行法と比較して大きく改善されており、補正法は現行法と比較して2次元地震応答解析から得られる固有周期を精度よく推定していると判断できる。

表-19 現行法および補正法の誤差割合の平均値と標準偏差

		N=1	N=5	N=10	N=15
補正法	平均値 μ	-0.015	-0.013	-0.016	-0.024
	標準偏差 σ	0.118	0.067	0.053	0.053
現行法	平均値 μ	0.569	0.645	0.661	0.657
	標準偏差 σ	0.238	0.166	0.143	0.139

表-20 現行法および補正法の誤差割合の頻度分布



(2) 考慮する固有周期の幅の整理

算出式から求めた固有周期(予測値)に対し、2次元地震応答解析結果(解析値)がどの程度乖離するかが明確であると、実務において推定誤差に基づく固有周期の幅を考慮することが容易となる。そこで、各解析事例について解析値と予測値の比(解析値/予測値)を求め、現行港湾基準に示されている考慮幅(図-5)について統計的根拠を付与することを試みる。

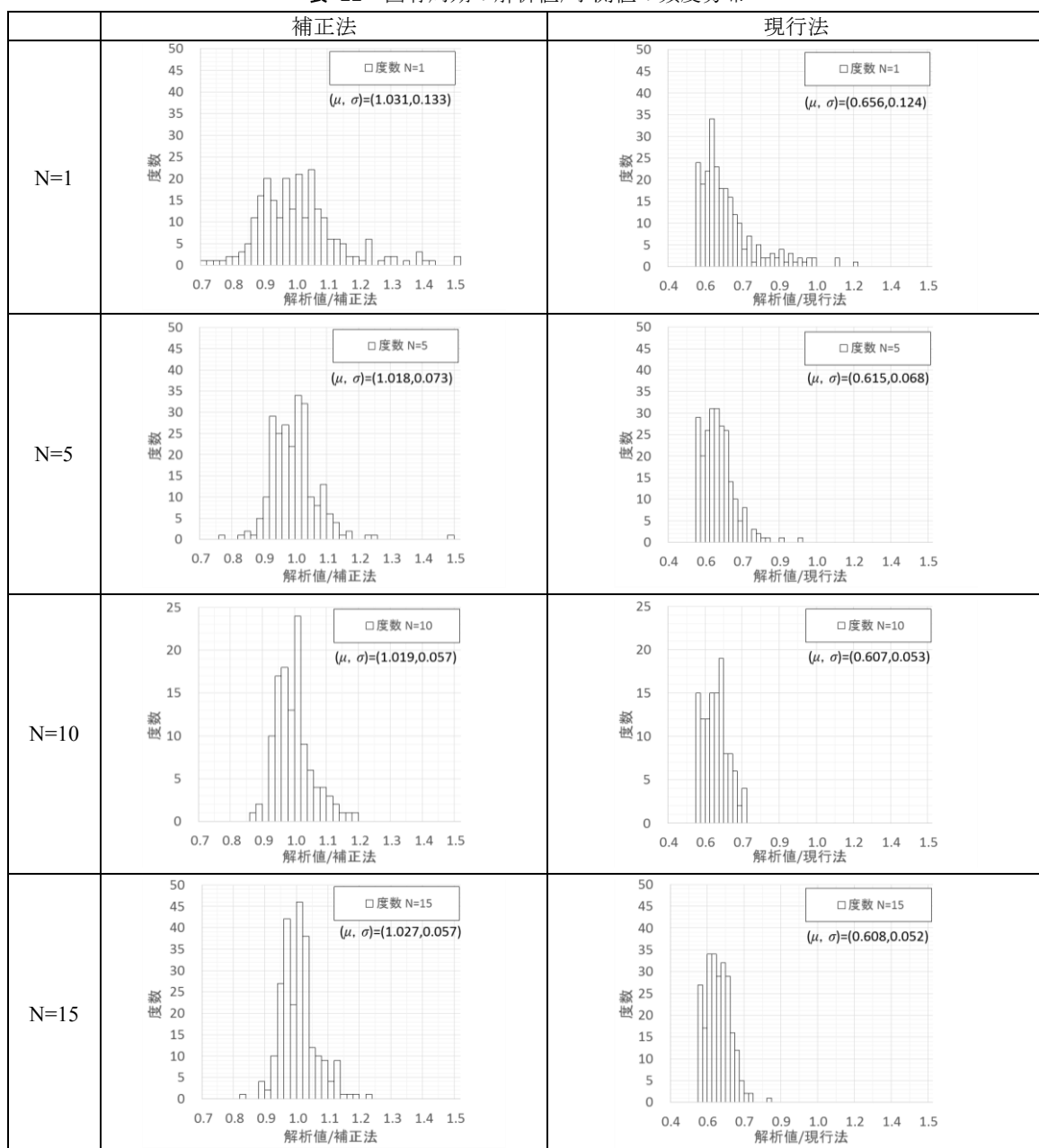
解析値と予測値の比の平均値と標準偏差は表-21、頻度分布は表-22 に示すとおりであり、補正法は N=5 以上であれば予測値の±20%程度を見込むことで概ね3σまで考慮でき、考慮幅が過度に広がることは無い。

一方、現行法は2次元地震応答解析と比較して平均値の乖離が大きい。また、ほぼ全ての計算事例において、予測値は解析値より長い固有周期を算出しており、解析値が予測値の50%程度の値と成り得ることに留意すべきである。

表-21 固有周期の解析値/予測値の平均値と標準偏差

		N=1	N=5	N=10	N=15
補正法	平均値 μ	1.031	1.018	1.019	1.027
	標準偏差 σ	0.133	0.073	0.057	0.057
現行法	平均値 μ	0.656	0.615	0.607	0.608
	標準偏差 σ	0.124	0.068	0.053	0.052

表-22 固有周期の解析値/予測値の頻度分布



4. 減衰定数の検討

4.1. 検討の目的

前述のとおり、1次元地震応答解析から加速度応答スペクトルを算出する際に適用する減衰定数について、現行法では20%としてもよいとされている。しかしながら、FLIPを用いた1次元地震応答解析と2次元地震応答解析の比較においては、減衰定数を5%程度⁵⁾、ないし3~6%程度⁷⁾とする方が2次元地震応答解析における上部工の最大加速度を精度よく推定することが指摘されている。修正震度法における照査用震度は、上部工の最大加速度を重力加速度で除した値であるため¹⁾、2次元地震応答解析における照査用震度を精度よく推定するためには、上部工最大加速度を精度よく算定できる減衰定数を設定する必要がある。したがって、本研究においても、各計算条件における適切な減衰定数について検討する。

4.2. 検討手法

減衰定数の検討は、種々の減衰定数を適用した1次元地震応答解析による作用震度と、2次元地震応答解析による作用震度とを比較することで行う。両者の算出方法を以下に概説する。

(1) 2次元地震応答解析による作用震度(解析値)

2次元地震応答解析における作用震度は、前章と同様に桟橋上部工の加速度時刻歴から求めた最大加速度を重力加速度で除した値とする(式(3.1)参照)。なお、地震応答解析はFLIPを適用する。

(2) 1次元地震応答解析による作用震度(予測値)

1次元地震応答解析においては、仮想固定点における加速度時刻歴から加速度応答スペクトルを算出することで作用震度を求める。すなわち、加速度応答スペクトルにおいて桟橋固有周期に対応する加速度応答値を上部工最大加速度とし、上部工最大加速度を重力加速度で除すことで作用震度とする。なお、仮想固定点は現行法により設定し、地震応答解析はFLIPを適用する。

加速度時刻歴から加速度応答スペクトルを算出する際の減衰定数は、既往研究を踏まえて $h=2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15, 20\%$ の9例を検討対象とした。設計水深-13m, $N=10$, 杭諸元②の断面を例とすると、減衰定数ごとに図-48(八戸波L1)、図-49(岩国波L1)に示す加速度応答スペクトルが得られ、桟橋固有周期に対応する加速度応答値は図-48、図-49の左下に示す値である。これらを重力加速度で除することで、各減衰定数における作用震度を求めることができる。なお、ここで用いる桟橋固有周期は2次元地震応答解

析から得られた解析値であり、固有周期補正式による予測値ではないことに留意されたい。

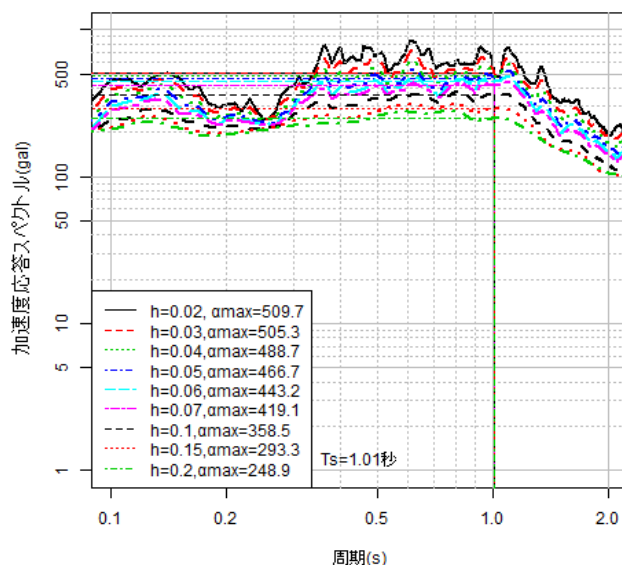


図-48 各減衰定数における加速度応答スペクトル
 (設計水深-13m, $N=10$, 杭諸元②, 八戸波)

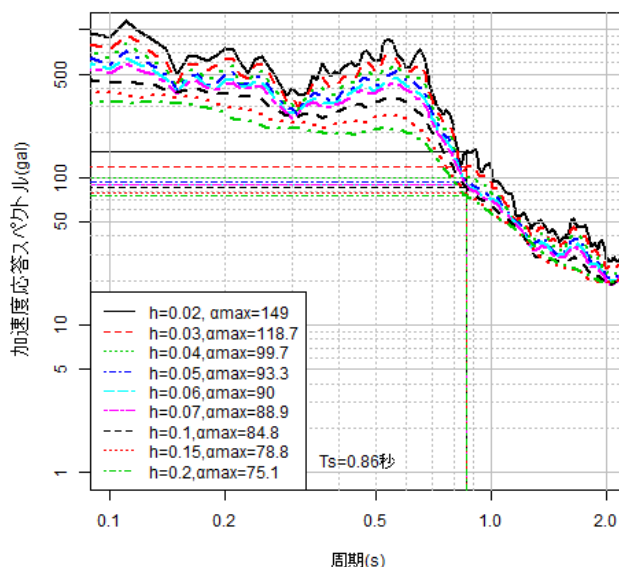


図-49 各減衰定数における加速度応答スペクトル
 (設計水深-13m, $N=10$, 杭諸元②, 岩国波)

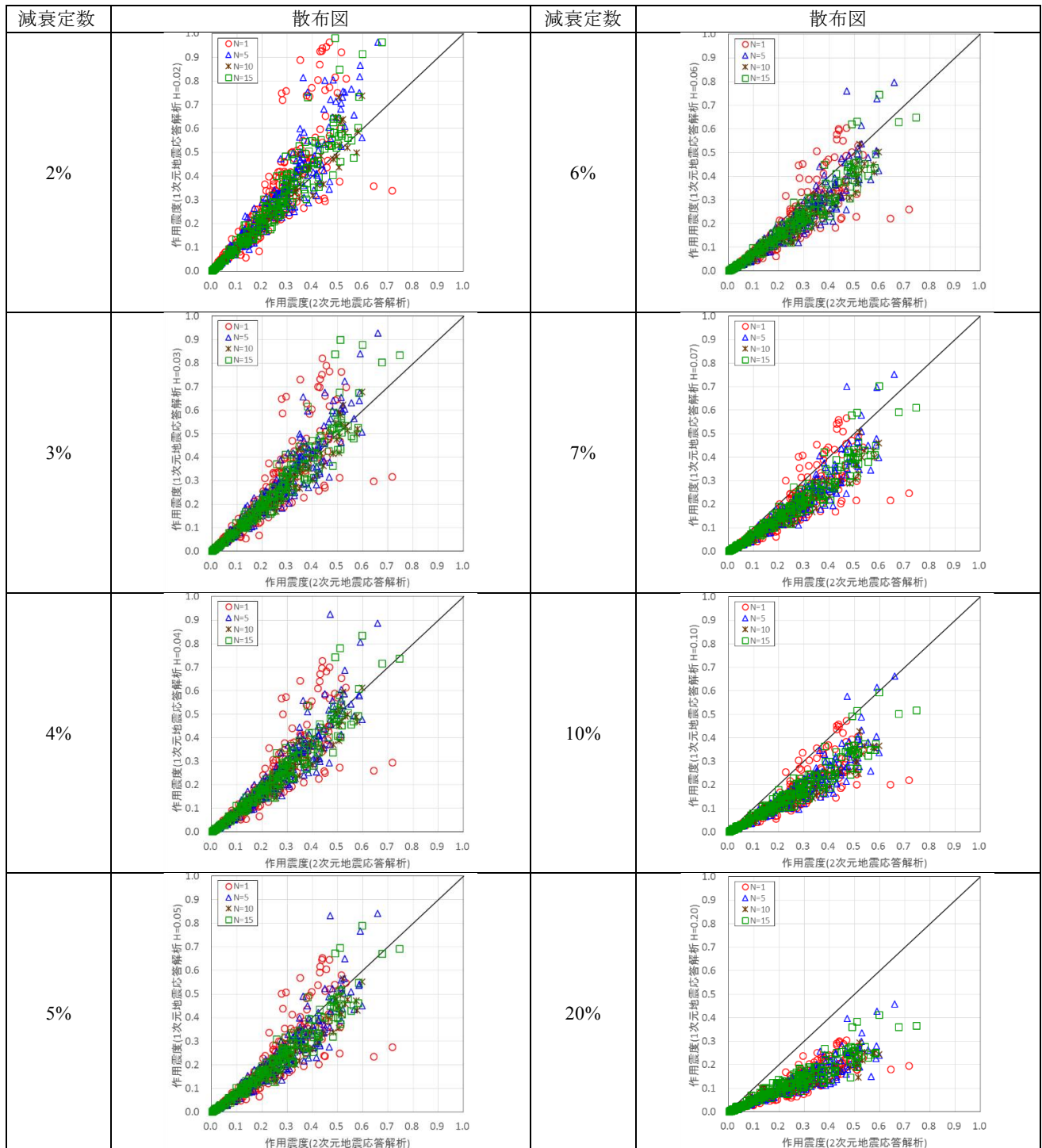
4.3. 減衰定数の比較検討

(1) 各計算事例における減衰定数ごとの作用震度

1次元地震応答解析と2次元地震応答解析との算出される作用震度の関係は表-23に示すとおりである。表-23からは、現行法の減衰定数($h=20\%$)は作用震度を過小に評価し、 $h=3\sim 5\%$ 程度で1次元地震応答解析による作用震度が2次元地震応答解析と整合することが確認できる。

ただし、作用震度が非常に大きい計算事例では、より大きな減衰定数とする方が2次元地震応答解析と良く整合する場合がある。これは、2次元地震応答解析においては、入力地震動が強いほど加震中に地盤や栈橋が大きく変形し、これに伴い減衰も増大するためと考えられる。すなわち、2次元地震応答解析と整合させるための減衰定数は、栈橋の設計条件により異なる値を適用すべきであると判断される。

表-23 1次元地震応答解析と2次元地震応答解析の作用震度の比較



(2) 計算事例ごとの最適減衰定数

上述のとおり、桟橋の設計条件により適用すべき減衰定数が異なるため、各計算事例における最も適切な減衰定数を整理する。ここでは、ある計算事例において作用震度の解析値と予測値の差の絶対値が最小となる減衰定数を、その計算事例における最適減衰定数と定義する。なお、加速度応答スペクトルの計算において減衰定数を連続的に設定することはできないため、最適減衰定数は離散的に設定された減衰定数(本研究では $h=2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15, 20\%$ の9例)での検討となることに留意されたい。

各計算事例における最適減衰定数と作用震度(解析値)との関係は図-50 に示すとおりであり、せん断剛性比の予測値(式(3.20)、式(3.21)による補正後)との関係は表-24 に示すとおりである。なお、表-24 中にはせん断剛性比の予測値と最適減衰定数の対数近似式も示している。

図-50、表-24 から、ほとんどの計算事例において最適減衰定数は $h=2\sim6\%$ の範囲内にあることが確認できる。ただし、計算条件によってはより大きな減衰定数が最適減衰定数となることもある。

一方で、最適減衰定数とせん断剛性比の対数近似式の決定係数は非常に小さいため、近似式により減衰定数を設定することは難しいと判断される。

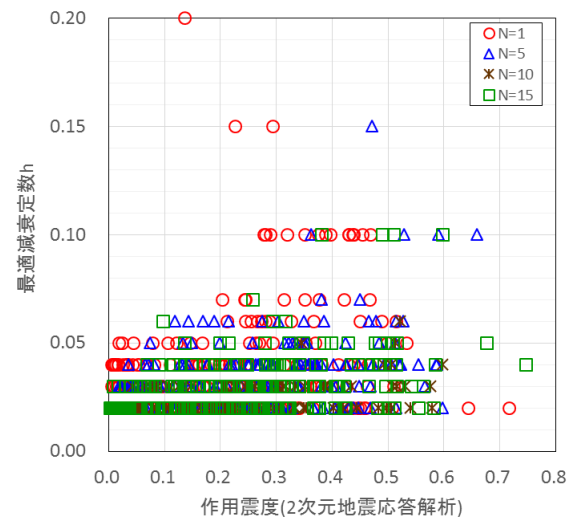


図-50 各計算事例における最適減衰定数と作用震度の関係

表-24 最適減衰定数とせん断剛性比の関係

N 値	散布図	N 値	散布図
N=1	最適減衰定数 h せん断剛性比(1次元地震応答解析・補正後) 対数 (N=1) $y = -0.023\ln(x) + 0.0258$ $R^2 = 0.152$	N=5	最適減衰定数 h せん断剛性比(1次元地震応答解析・補正後) 対数 (N=5) $y = -0.013\ln(x) + 0.0227$ $R^2 = 0.1882$
N=10	最適減衰定数 h せん断剛性比(1次元地震応答解析・補正後) 対数 (N=10) $y = -0.004\ln(x) + 0.0213$ $R^2 = 0.0949$	N=15	最適減衰定数 h せん断剛性比(1次元地震応答解析・補正後) 対数 (N=15) $y = -0.009\ln(x) + 0.0226$ $R^2 = 0.1633$

(3) 減衰定数の設定

前項に述べたとおり、個々の計算事例における減衰定数とせん断剛性との近似式は決定係数が小さく成立しない。そこで、全ての計算事例について作用震度の解析値と予測値との残差分散を求め、減衰定数ごとに残差分散を比較する。これにより、個々の計算事例については最適ではない可能性があるものの、本研究における計算事例全体としては標準的である減衰定数について検討する。

全ての計算事例についての減衰定数ごとの残差分散を図-51に示し、残差分散が最小となる減衰定数を表-25に示す。表-25からは、N値が小さくなるほど残差分散が最小となる減衰定数は大きくなる傾向が認められるが、これは地盤による減衰が大きくなるためである。しかしながら、N=10とN=15の計算事例については、N=10の事例の方が小さな減衰定数となりこの例から外れている。これは、N=10の断面では杭剛性が小さい条件のみ解析を実施していることから、減衰が大きくなる強い地震動に対しては、栈橋杭が全塑性に達することで検討対象事例から除外されるためと考えられる。

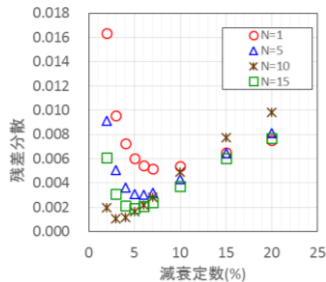


図-51 各減衰定数における作用震度の残差分散

表-25 残差分散が最小値となる減衰定数

N 値	減衰定数
1	7%
5	6%
10	3%
15	5%

ところで、表-25は全ての計算事例を包括して算出した減衰定数であるため、L1地震動としては過大な値に振幅調整された計算事例も検討範囲に含まれている。このため、検討範囲を実用的な作用震度までに留めることで、より適切な減衰定数について検討する。

表-23からは、作用震度の予測値が $kh=0.4 \sim 0.5$ 程度となるのを境として、解析値に対する予測値のばらつきが大きくなっていることがわかる。そこで、減衰定数の適用範囲を $kh=0.4$ 、もしくは $kh=0.5$ までに限定すると、残差分散が最小となる減衰定数は図-52や表-26に示すとおりとなる。表-26からは、作用震度の適用範囲を $kh=0.4$ までとする場

合は減衰定数を $h=3\%$ 程度、 $kh=0.5$ までとする場合は $h=4\%$ 程度とすることが適切と考えられる。

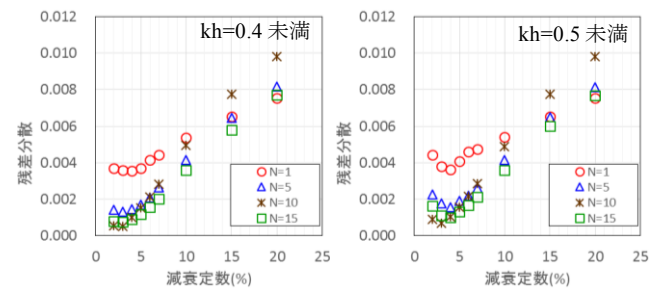


図-52 減衰定数ごとの作用震度の残差分散

表-26 残差分散が最小値となる減衰定数

N 値	減衰定数 ($kh=0.4$ まで)	減衰定数 ($kh=0.5$ まで)
1	4%	4%
5	3%	3%
10	3%	4%
15	3%	4%

4. 4. 照査用震度の推定精度の評価

減衰定数を 20%(現行法)および 4%(補正法)とした場合について、1次元地震応答解析による作用震度が $kh=0.5$ 未満となる範囲での作用震度の推定精度を評価する。ここでは、作用震度の解析値を正とし、各減衰定数に基づいて算出した作用震度の予測値の誤差割合により推定精度を評価する。なお、作用震度の予測値の算出においては、栈橋固有周期は2次元地震応答解析から得た解析値を適用した。

誤差割合の頻度分布は表-27に示すとおりである。誤差割合の平均値を比較すると、現行法は誤差割合の平均値が $-0.553 \sim -0.508$ となっており、全体的な傾向として2次元地震応答解析から得られる作用震度の5割程度の値を算出していることが確認できる。これに対し、補正法は誤差割合の平均値が $-0.193 \sim -0.124$ であり、現行法と比較すると2次元地震応答解析に近い値を算出することがわかる。その一方で、標準偏差については現行法の方が小さな値となるが、これは補正法と比較して現行法の誤差割合の平均値が非常に小さいためである。

いずれにせよ、補正法による作用震度の予測値は、2次元地震応答解析による作用震度の解析値と比較して小さな値となる傾向がある。これは、個々の計算事例の設計条件に関わらず減衰定数を一律に設定したことに起因しており、より高い精度で作用震度の予測値と解析値と整合させるためには、設計条件に応じた減衰定数の設定法を構築する必要がある。

表-27 現行法および補正法における照査用震度の誤差割合の頻度分布

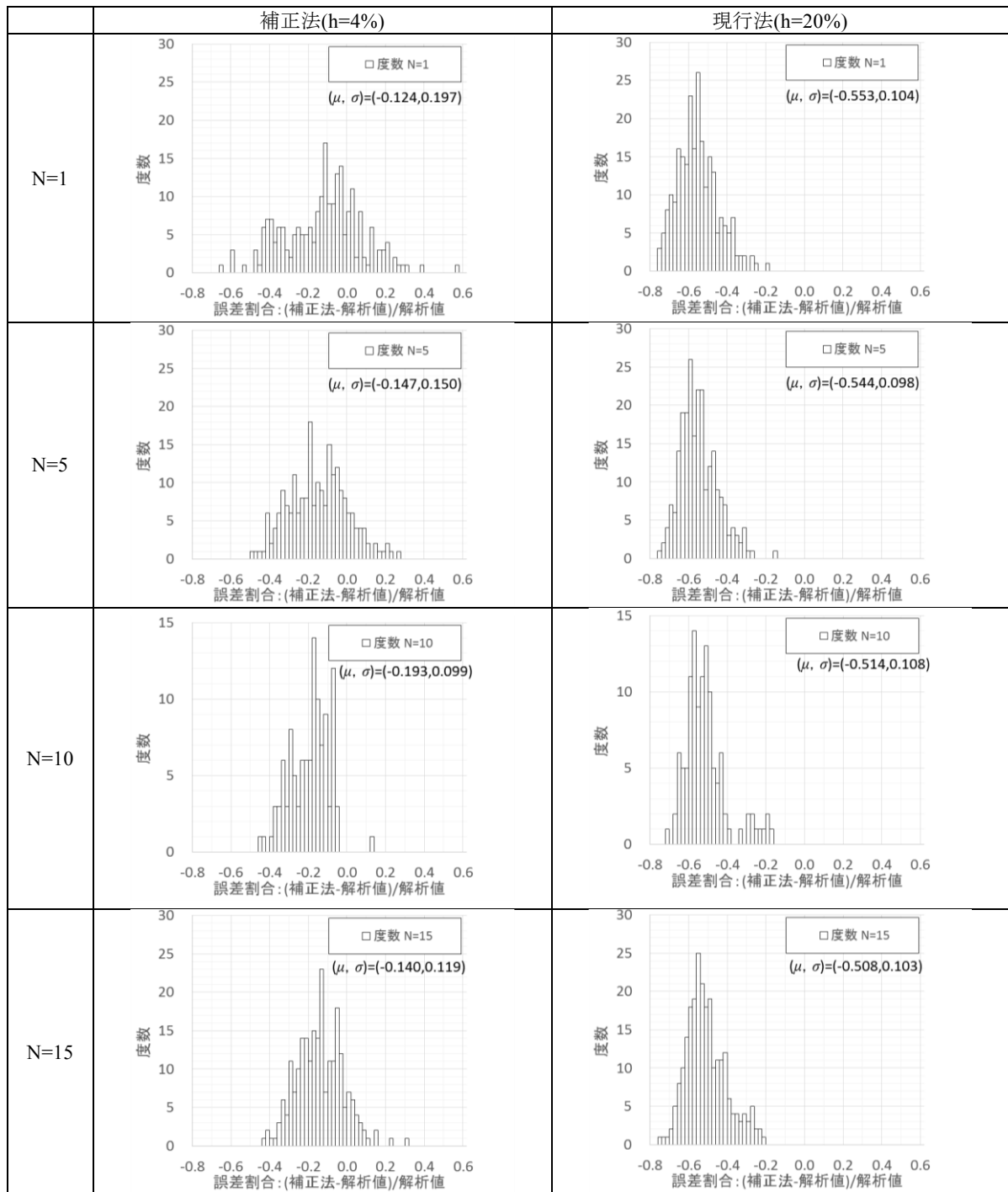


表-28 現行法および補正法における照査用震度の誤差割合の平均値と標準偏差

		N=1	N=5	N=10	N=15
補正法	平均値 μ	-0.124	-0.147	-0.193	-0.140
	標準偏差 σ	0.197	0.150	0.099	0.119
現行法	平均値 μ	-0.553	-0.544	-0.514	-0.508
	標準偏差 σ	0.104	0.098	0.108	0.103

5. 補正法の提案と応力照査の比較

5.1. 検討の目的

本章では、前章までの検討を取りまとめることで、現行の照査用震度算出手法に対し、2次元地震応答解析から求められる作用震度と整合させるための補正法を提案する。

また、2次元地震応答解析や現行法、補正法から得られる作用震度を外力とした骨組解析により杭の曲げモーメントを求め、2次元地震応答解析から得られる杭の曲げモーメントと比較することで、骨組解析と2次元地震応答解析の応力照査の整合性について検討する。

5.2. 補正法の提案

図-53 に補正法による照査用震度の算出過程を示す。ここに、静的状態における栈橋のパネ定数補正係数 M_K は 2. 微小地震動に対する栈橋固有周期算出式の補正に、固有周期の動的特性を表す栈橋固有周期比 R_{Ts} は 3. 地盤の非線形性を反映した固有周期の補正に、減衰定数の修正($h=0.04$) は、4. 減衰定数の検討に示したとおりである。

すなわち、栈橋固有周期の算出においては、仮想固定点周辺地盤における N 値、および 1 次元地震応答解析より求めたせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0 を入力パラメータとして、下式により地盤非線形性を反映した補正を行うことができる。

$$T_{Sdyna} = R_{Ts} \cdot T_{Sstat} \quad (3.25) \text{再掲}$$

$$T_{Sstat} = 2\pi\sqrt{W/gM_KK} \quad (3.24) \text{再掲}$$

<N=5未満>

$$R_{Ts} = (1.3845 R_{G1D} \cdot N^{0.0853})^{(0.0777 \ln(N)-0.264)} \quad (3.22) \text{再掲}$$

<N=5以上>

$$R_{Ts} = (1.4854 R_{G1D} \cdot N^{0.0434})^{(0.0352 \ln(N)-0.1961)} \quad (3.23) \text{再掲}$$

ここに、

T_{Sdyna} : 地震時における栈橋の固有周期

R_{Ts} : 固有周期比(静的状態を基準とした、地震時における固有周期の変化率)

T_{Sstat} : 静的状態における栈橋の固有周期(s)

W : 杭 1 列が受け持つ自重・载荷重(kN)

g : 重力加速度(m/s²)

M_K : 補正係数(表-17)

K : 栈橋パネ定数(kN/m)

N : 仮想固定点周辺地盤における N 値

R_{G1D} : 1 次元地震応答解析より求めたせん断剛性比 G_{Tmax}/G_0

である。

これに加え、仮想固定点における加速度時刻歴から栈橋

の加速度応答スペクトルを求める際の減衰定数を $h=0.04$ とすることで、2次元地震応答解析から求めた作用震度と整合させるための補正を加えることができる。

表-17 栈橋パネ定数補正係数(再掲)

捨石の地盤反力係数 (kN/m ³)	補正係数 M_K
3500	3.38
7500	2.87

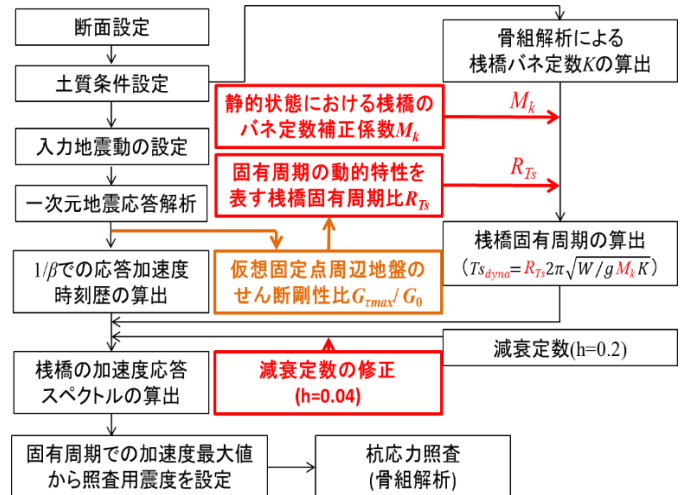


図-53 補正法による照査用震度の算出過程

5.3. 2次元地震応答解析と骨組解析との杭応力の比較

前節に示した補正法を用いることで、骨組解析による杭応力照査に対し、2次元地震応答解析における上部工加速度最大値と整合した照査用震度を与えることが可能となる。しかしながら、骨組解析に入力される照査用震度が2次元地震応答解析における上部工加速度最大加速度を反映した値であったとしても、出力として得られる杭応力まで2次元地震応答解析と一致するとは限らない。このため、杭に発生する最大曲げモーメントについて、2次元地震応答解析と骨組解析との比較を行う。

(1) 照査用震度算出手法ごとの最大曲げモーメントの比較

杭諸元①の各検討断面について、2次元地震応答解析から求めた杭の最大曲げモーメントと、骨組解析から求めた杭の最大曲げモーメントを表-29に示す。なお、骨組解析における照査用震度は以下の3手法を比較するものとした。

- ① 予測値(提案する補正法から求めた照査用震度)
- ② 解析値(2次元地震応答解析における上部工加速度最大値から求めた作用震度)
- ③ 現行法(耐震強化岸壁以外の栈橋に対する部分係数法)から求めた照査用震度の設計用値

各照査用震度算出法と2次元地震応答解析との最大曲げモーメントの相関係数は表-30に示すとおりであり、概ね以下のことが確認できる。

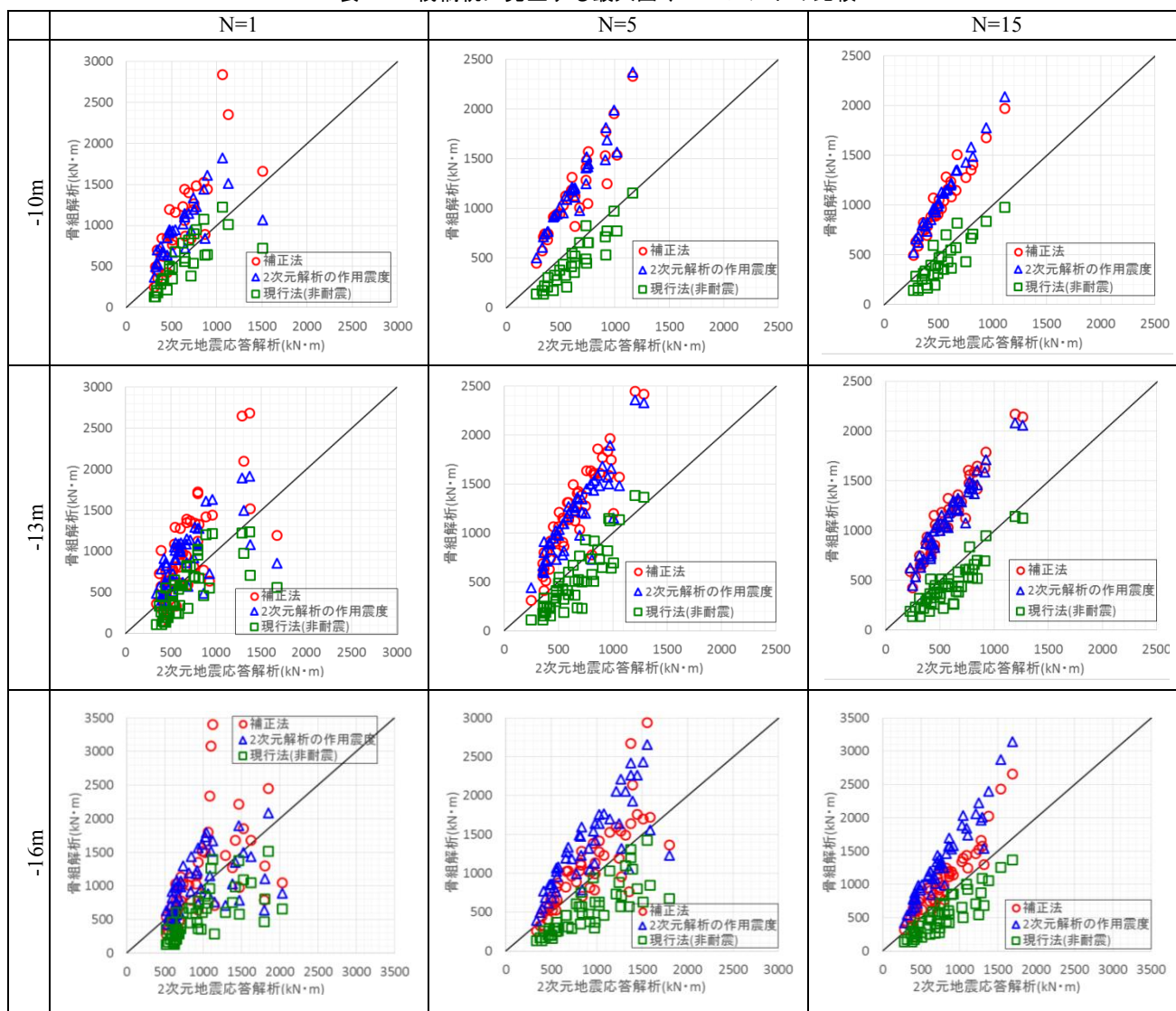
- ① 現行法は桟橋杭の最大曲げモーメントを過小評価する傾向がある
- ② 補正法や解析値はほとんどの事例において桟橋杭の最大曲げモーメントを過大評価する
- ③ 補正法や解析値を照査用震度とする骨組解析は、設計水深が浅く、原地盤N値が大きい断面ほど、2次元地震応答解析と高い相関性を示す傾向がある

④ その一方で、特に原地盤N値が非常に小さい桟橋においては、補正法や解析値を照査用震度とする骨組解析は2次元地震応答解析との相関性が著しく低下する

⑤ N値が小さい断面において相関係数が低下する原因としては、N値が小さい断面においては、2次元地震応答解析に対する相関性が杭列ごとに異なることが挙げられる(表-31)。この場合、N値の低下に対し、海側杭(杭1)からばらつきが大きくなり、海側に近い杭列ほどばらつきが生じやすい

以上のとおり、照査用震度が同値であっても、骨組解析と2次元地震応答解析とは応力照査の結果として得られる杭の曲げモーメントは必ずしも一致しない。

表-29 桟橋杭に発生する最大曲げモーメントの比較

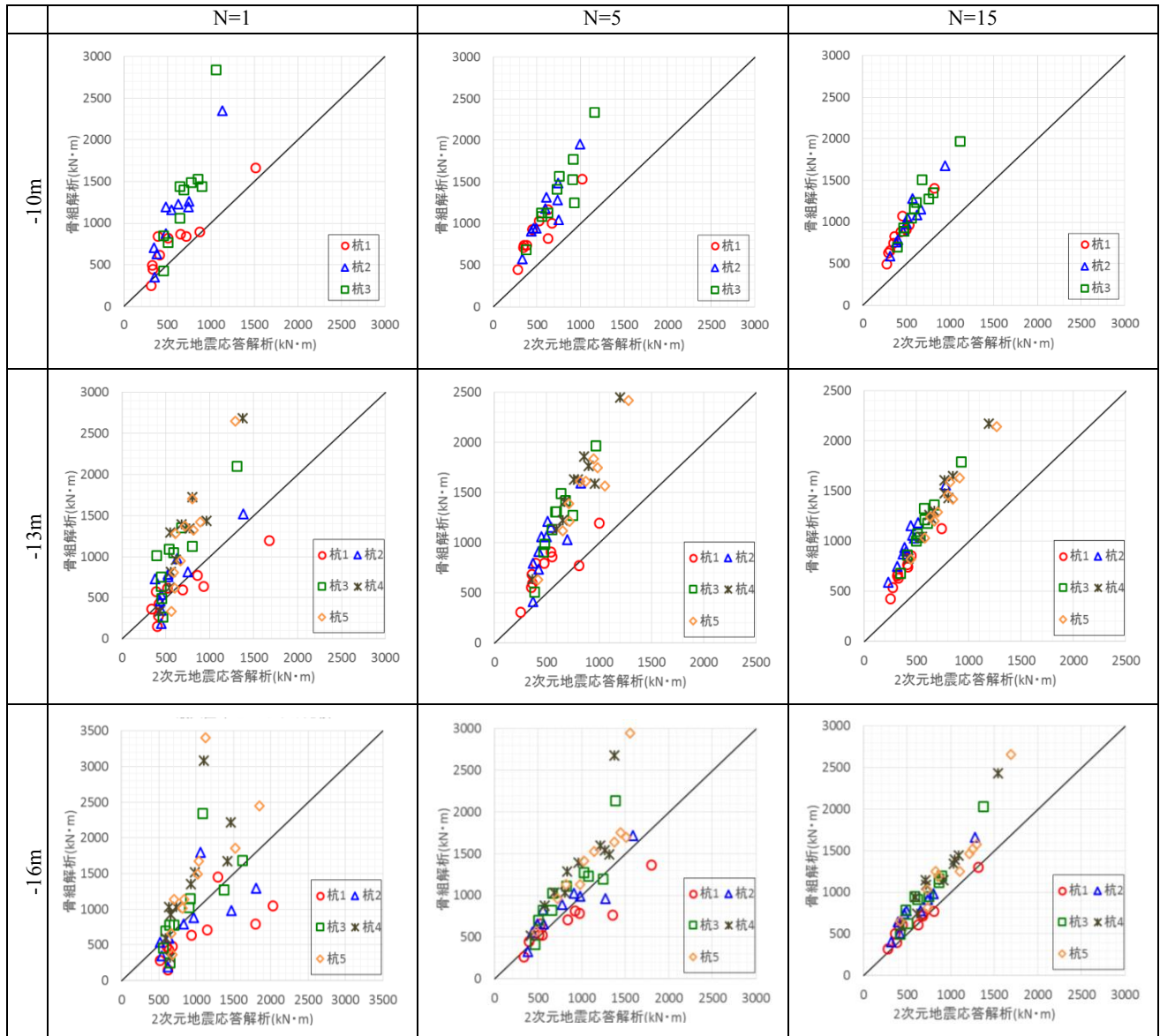


※現行法(非耐震)は耐震強化岸壁以外の桟橋の部分係数を用いた曲げモーメント

表-30 曲げモーメント最大値の相関係数

N 値		N=1			N=5			N=15		
照査用震度の 設定法		補正法 ○	解析値 △	現行法 □	補正法 ○	解析値 △	現行法 □	補正法 ○	解析値 △	現行法 □
設計 水深	-10m	0.800	0.741	0.760	0.915	0.960	0.916	0.963	0.993	0.863
	-13m	0.746	0.637	0.691	0.899	0.896	0.885	0.967	0.971	0.900
	-16m	0.564	0.474	0.687	0.807	0.808	0.804	0.947	0.957	0.888

表-31 杭列ごとの最大曲げモーメントの比較(補正法による照査用震度)



(2) 補正法における杭の最大曲げモーメントの乖離の要因
 上述したとおり、補正法より求めた照査用震度を外力とする骨組解析は、2次元地震応答解析と比較して杭の発生曲げモーメントを過大評価する。

その原因として、骨組解析により桟橋をモデル化する際に、桟橋の剛性を2次元地震応答解析と比較して過小に評価していることが考えられる。これは、2次元地震応答解析から直接算出した作用震度を外力としても、骨組解析から出力される杭応力が、2次元地震応答解析と比較して過大であることによる。

(3) 杭の発生応力に対する補正法の設定

骨組解析により算出される杭応力を、2次元地震応答解析と整合させるための手法は複数考え得るが、大別すると以下の4つである。

①骨組解析においてモデル化された桟橋の剛性の補正

骨組解析が2次元地震応答解析と比較して桟橋剛性を過小に評価することが、算出される杭応力が乖離する要因であるならば、当然、桟橋剛性そのものを適切に補正することが最も望ましい補正法である。

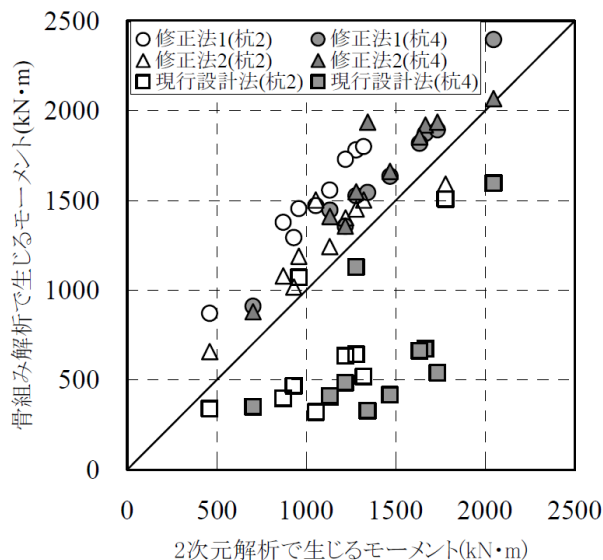
これについて、桟橋固有周期の算出においては、桟橋バネ定数 K の補正により桟橋剛性の乖離を是正できることは、2.微小地震動に対する桟橋固有周期算出式の補正に示したとおりである。しかしながら、骨組解析による杭応力算出では桟橋バネ定数 K は用いられないため、桟橋剛性の補正には、杭諸元や捨石基礎・原地盤各層の地盤反力係数、荷重条件といった複数の入力パラメータに対して補正係数を設定する必要がある。

②地盤反力係数の補正

骨組解析と2次元地震応答解析との桟橋剛性の乖離が、地盤反力係数のみによって生じていると仮定すると、補正係数は基礎捨石および原地盤の地盤反力係数にのみ適用されるため、補正法の設定は手法①と比べていささか容易となる。これについて、大久保・小濱・楠⁷⁾は、2次元地震応答解析の杭-地盤相互作用ばねから逆算した水平方向地盤反力係数を骨組解析に適用することで、算出される杭応力が2次元地震応答解析とよく整合することを示している(図-54)

ただし、1次元地震応答解析では桟橋杭のモデル化はされず、したがって杭-地盤相互作用ばねも設定されないことから、大久保・小濱・楠⁷⁾の手法をそのまま1次元地震応答解析に適用することはできない。このため、1次元地震応答解析から地盤反力係数を推定する手法を構

築する必要がある。また、図-16(再掲)に示すとおり、2次元地震応答解析から逆算された地盤反力係数は、現行法から算出される地盤反力係数と比較して遥かに大きな値であり、また同じ土層であっても標高により大きく変化することにも留意する必要がある。



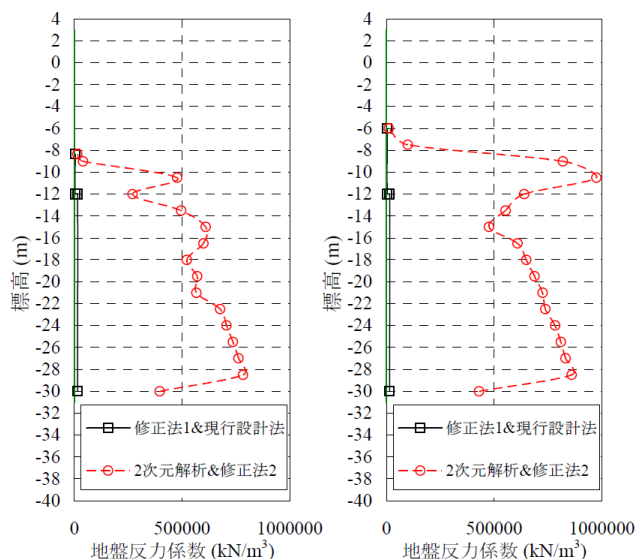
修正法1：地盤反力係数の補正なし

修正法2：地盤反力係数の補正あり

現行設計法：地盤反力係数の補正なし、

減衰定数 20%

図-54 杭頭に作用するモーメントの比較⁷⁾



(a) 杭2

(b) 杭4

図-16 逆算した地盤反力係数の鉛直分布⁷⁾(再掲)

③照査用震度の補正

栈橋剛性ではなく、照査用震度の補正により杭応力を整合させることができれば、補正係数は照査用震度のみに設定されるため、補正法の設定はさらに容易となる。

ただし、本研究で提案した照査用震度の設定法が、2次元地震応答解析における上部工加速度最大値を高い精度で推定していることを踏まえると、骨組解析で出力される杭応力を2次元地震応答解析と整合させるために、敢えて照査用震度を過小評価することが合理的であるとは言い難い。また、骨組解析における杭応力が2次元地震応答解析と整合するように照査用震度の補正係数を設定するためには、各検討断面における照査用震度と杭応力の関係についてのパラメトリックスタディが必要となる。このため、手法①や手法②に比べて容易とはいえども、補正法の設定には計算負荷を伴う。

④算出された杭応力の補正

骨組解析により算出された杭応力に対して補正係数を設定すれば、入力値に補正係数を設定する手法①～③と比較して遥かに容易に補正法の設定が可能である。これについては、特に原地盤N値の大きな検討断面では骨組解析と2次元地震応答解析との発生曲げモーメントの相関係数が非常に高く(表-30)、線型関数による補正法の設定が可能である。

ただし、この手法では出力値に補正を掛けることから、曲げモーメントや軸力、周面摩擦力といった杭応力の照査項目ごとに補正法を設定する必要がある。

なお、著者ら¹³⁾は船舶接岸力の増減に対する直杭式横栈橋の杭応力の変化について整理しており、杭に生じる曲げモーメントは船舶接岸力の増減に対してほぼ正比例の関係にあることを示している(図-55)。一方で、軸力については陸側杭と海側杭とで傾向が異なっている(図-56)。

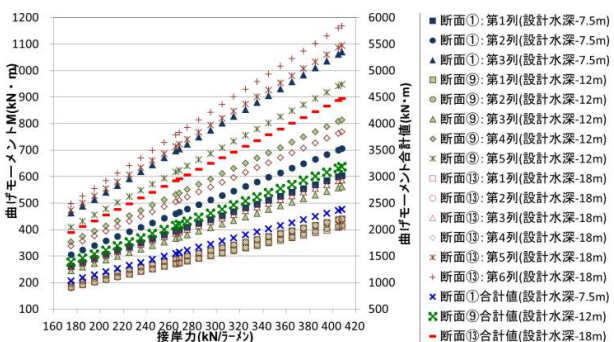


図-55 接岸力と曲げモーメントの関係¹³⁾

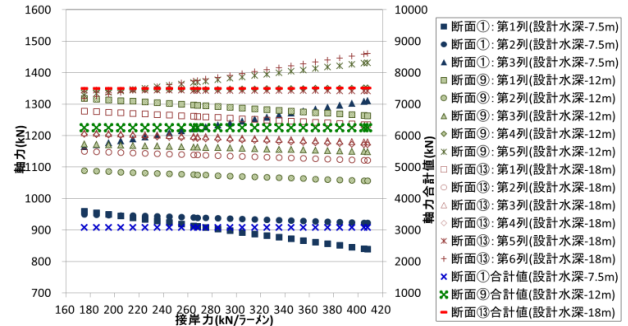


図-56 接岸力と軸力の関係¹³⁾

(4) 骨組解析における杭の最大曲げモーメントの補正

骨組解析における栈橋剛性の評価方法は、直杭式栈橋の杭応力照査において重要な課題と考えられるが、本研究は栈橋固有周期や照査用震度を2次元地震応答解析と整合させることを目的としたものである。このため、ここでは栈橋剛性の補正については詳細な検討は行わず、手法④に基づいた最大曲げモーメントの補正についてのみ検討する。

本研究における検討断面においては、N=5以上であれば設計水深によらず $r=0.8$ 以上の相関係数を確保しており、線型関数による補正による補正式の導出が可能である。すなわち、下式により、骨組解析から求めた杭の曲げモーメントを2次元地震応答解析から求めた杭の曲げモーメントと整合させる。

$$M_{2D} = M_m \cdot M_{FRM} \quad (5.1)$$

ここに、

M_{2D} : 2次元地震応答解析から求めた杭の発生曲げモーメントの最大値

M_m : 曲げモーメント補正係数(表-32)

M_{FRM} : 骨組解析より求めた杭の発生曲げモーメントの最大値

である。

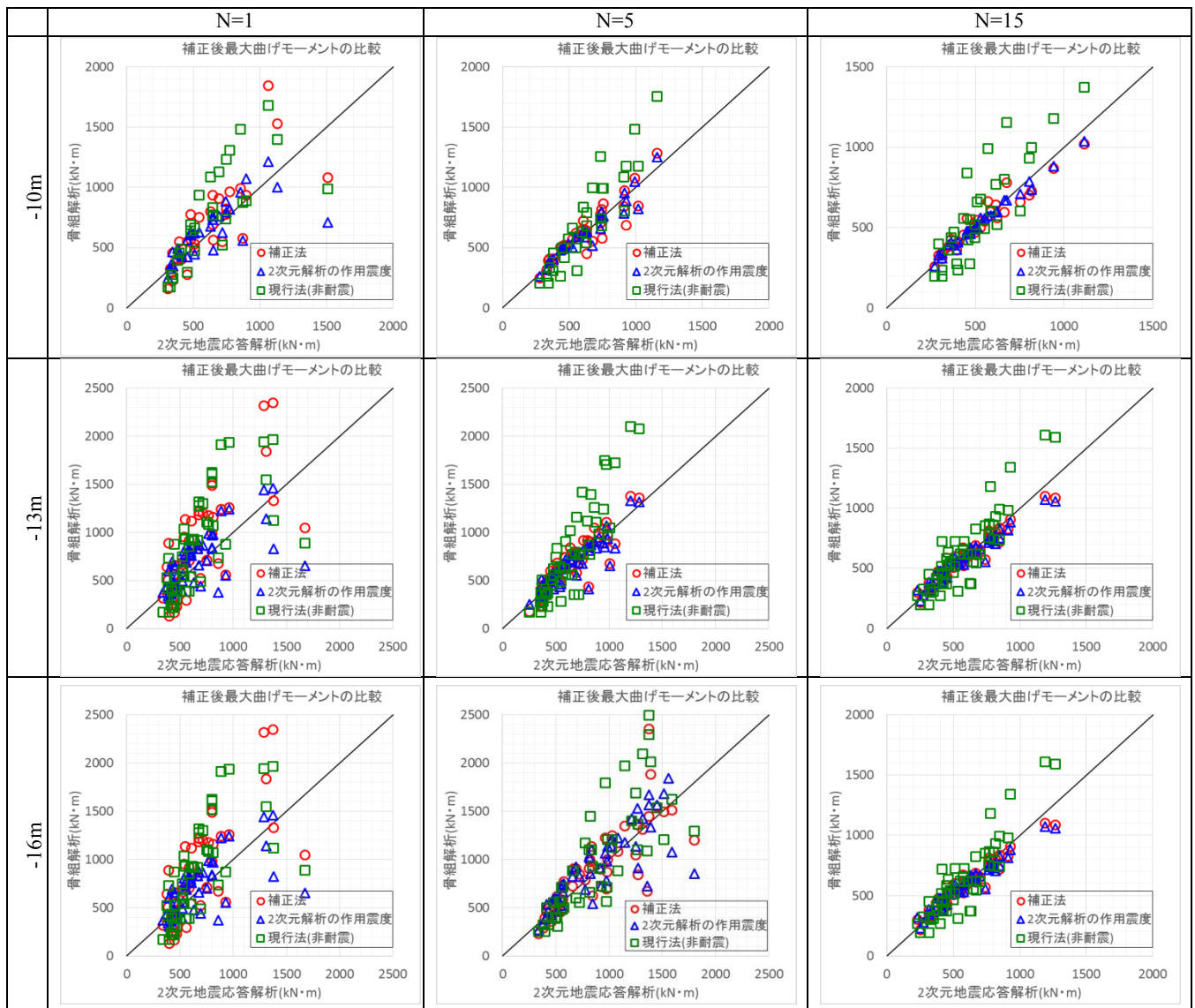
なお、曲げモーメント補正係数 M_m は、各計算事例における2次元地震応答解析から求めた杭の発生曲げモーメントの最大値を、骨組解析より求めた杭の発生曲げモーメントの最大値で割った値の平均値であり、表-32に示されるとおり設計水深とN値および照査用震度の設定手法により異なる値となる。

補正式より求めた杭の曲げモーメント最大値は表-33に示すとおりであり、特にN値が大きい断面や設計水深が浅い断面において、2次元地震応答解析とよく整合することが確認できる。

表-32 曲げモーメント補正係数 M_m

照査用震度の設定法	設計水深	N 値		
		N=1	N=5	N=15
補正法	-10m	0.65	0.55	0.51
	-13m	0.87	0.56	0.51
	-16m	1.18	0.88	0.77
解析値	-10m	0.66	0.53	0.49
	-13m	0.76	0.56	0.51
	-16m	1.03	0.69	0.58
現行法	-10m	1.38	1.52	1.41
	-13m	1.59	1.52	1.41
	-16m	2.14	1.91	1.65

表-33 棧橋杭に発生する最大曲げモーメントの比較 (補正後)



※現行法(非耐震)は耐震強化岸壁以外の棧橋の部分係数を用いた曲げモーメント

6. 結論

6.1. 本稿の取りまとめ

本研究では、直杭式栈橋の固有周期や照査用震度について、現行の算出手法と2次元地震応答解析とを整合させるための検討を行った。本稿の主要な結論を以下に示す。

①図-47に示したように、現行法は2次元地震応答解析と比較して栈橋固有周期を長く評価する傾向があり、2次元地震応答解析より算出される固有周期は現行法の50%程度の値となることもある(表-22)。したがって、特に短周期地震動に対しては、現行法は照査用震度を過小評価する可能性があり注意する必要がある。

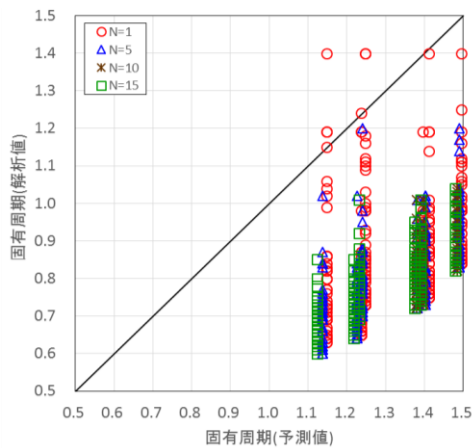


図-47 固有周期の予測値と解析値の比較(現行法)(再掲)

②作用震度と固有周期には関係性があり、作用震度が大きくなるほど、固有周期は長くなる(図-23)。これは、加震に伴い栈橋杭周辺地盤のせん断剛性が低下し、仮想固定点が下方に遷移することに起因すると考えられる。

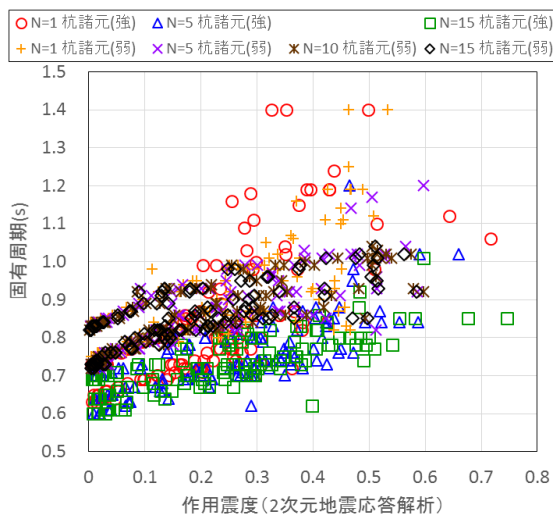


図-23 作用震度と固有周期の関係(N 値別整理)(再掲)

③仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比と栈橋固有周期の動的特性は近似式により定式化できる。すなわち、仮想固定点周辺地盤のN値と1次元地震応答解析より求めたせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$ を入力パラメータとして、下式により動的特性を反映した栈橋固有周期を算出することができる。

$$T_{Sdyna} = R_{Ts} \cdot T_{Sstat} \quad (3.25) \text{再掲}$$

$$T_{Sstat} = 2\pi\sqrt{W/gM_kK} \quad (3.24) \text{再掲}$$

<N=5未満>

$$R_{Ts} = (1.3845 R_{G1D} \cdot N^{0.0853})^{(0.0777 \ln(N) - 0.264)} \quad (3.22) \text{再掲}$$

<N=5以上>

$$R_{Ts} = (1.4854 R_{G1D} \cdot N^{0.0434})^{(0.0352 \ln(N) - 0.1961)} \quad (3.23) \text{再掲}$$

ここに、

T_{Sdyna} : 地震時における栈橋固有周期

R_{Ts} : 固有周期比(静的状態を基準とした、地震時における栈橋固有周期の変化率)

T_{Sstat} : 静的状態における栈橋固有周期(s)

W : 杭1列が受け持つ自重・載荷重(kN)

g : 重力加速度(m/s²)

M_k : 補正係数(表-17)

K : 栈橋バネ定数(kN/m)

N : 仮想固定点周辺地盤におけるN値

R_{G1D} : 1次元地震応答解析より求めたせん断剛性比 $G_{\tau max}/G_0$

である。

なお、補正法や現行法と2次元地震応答解析との比の平均値と標準偏差は表-21に示すとおりである。したがって、本研究の範囲においては、補正法や現行法に基づく固有周期に対し、表-21に示す推定精度を考慮することで、2次元地震応答解析に対する誤差を考慮することができる。

表-17 栈橋バネ定数補正係数(再掲)

捨石の地盤反力係数(kN/m ³)	補正係数 M_k
3500	3.38
7500	2.87

表-21 固有周期の解析値/予測値の平均値と標準偏差(再掲)

		N=1	N=5	N=10	N=15
補正法	平均値 μ	1.031	1.018	1.019	1.027
	標準偏差 σ	0.133	0.073	0.057	0.057
現行法	平均値 μ	0.656	0.615	0.607	0.608
	標準偏差 σ	0.124	0.068	0.053	0.052

④2次元地震応答解析における上部工最大加速度と加速度応答スペクトルにおける最大加速度とを整合させるためには、本研究の範囲内では減衰定数を4%程度とすることが適当である。ただし、設計条件や作用震度により最適な減衰定数は異なるため、それらを反映したより詳細な減衰定数の設定方法も有り得る。

⑤本研究より提案する照査用震度の算出過程は図-53に示すとおりである。なお、算出される照査用震度の推定精度は表-28に示すとおりであり、精度の高い照査用震度の設定が可能となったといえる。

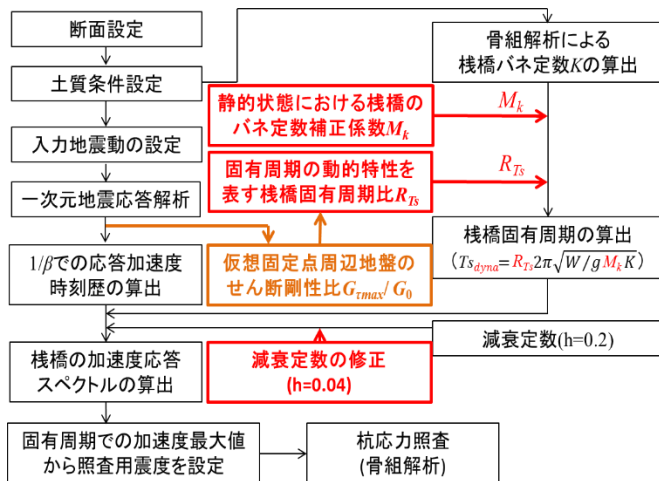


図-53 補正法による照査用震度の算出過程(再掲)

表-28 現行法および補正法における照査用震度の誤差割合の平均値と標準偏差(再掲)

		N=1	N=5	N=10	N=15
補正法	平均値 μ	-0.124	-0.147	-0.193	-0.140
	標準偏差 σ	0.197	0.150	0.099	0.119
現行法	平均値 μ	-0.553	-0.544	-0.514	-0.508
	標準偏差 σ	0.104	0.098	0.108	0.103

なお、本研究で検討対象とした設計条件は以下に示すとおりである。

- 設計水深：-10～-16m
- 土質条件：砂地盤(N=1～15)、ただし液状化しない
- 土層構成：仮想固定点周辺地盤は単層地盤
- 地震動：L1地震動
- 上部工：RC
- 渡版：なし
- 上載荷重：なし

⑥補正法により算出した照査用震度を外力とすると、骨組解析は2次元地震応答解析と比較して杭応力を過大に評価する。したがって、現行設計法では、骨組解析において棧橋をモデル化する際に、その剛性を過小に評価していると考えられる。

一方で、現行の部分係数法は、骨組解析による杭応力が2次元地震応答解析と比較して過小に評価される傾向があり、注意する必要がある。

6.2. 今後の課題

今後の主な課題としては以下が挙げられる。

①2次元地震応答解析と強震観測との整合性検証

本研究では、2次元地震応答解析を正として現行設計法の補正を図っているが、2次元地震応答解析と実現象との整合性検証は行っていない。これは、本研究の開始段階で直杭式棧橋における強震観測記録の収集を図ったものの、適切な事例が抽出できず2次元地震応答解析との比較が困難であったためである。

強震観測記録から棧橋固有周期を算出するためには、棧橋上部工、背後地表面、工学的基盤面の3点で強震記録計を設置する必要があるが、この条件を満たす港湾施設は、大水深のコンテナ岸壁などに限られている。これらの港湾施設では、L2地震動に対応するため一般的な直杭式棧橋は採用されにくいことや、大型ガントリークレーンなどの施設があることから、本研究における2次元地震応答解析と実現象との整合性検証のためのケーススタディとはなり得ない。

以上から、今後の課題としては、より一般的な直杭式棧橋に対する強震観測記録の充実を図り、2次元地震応答解析と実現象との整合性検証のケーススタディを積み上げていくことが挙げられる。

なお、既往の研究事例として、長尾³⁾が川崎港および横浜港の直杭式棧橋を対象に実施した検証が挙げられる。この研究では、背後地表面における最大加速度が86.1Gal(川崎港)、60.7Gal(横浜港)、61.6Gal(横浜港)の強震観測記録を2次元地震応答解析により再現しており、固有周期の観測値と解析値は良く整合していることが示されている。ただし、この研究では地震動や対象棧橋によっては、渡版の影響を適切にモデル化する必要があることも示されている。

②2次元地震応答解析と常時微動観測との整合性検証

強震観測は、観測網整備のための多大な費用と適当な地震動が発生するまでの膨大な時間を要するため、数多くの直杭式棧橋に対して2次元地震応答解析と強震観測記録と

の整合性検証を行うことは容易ではない。これに対し、常時微動観測であれば、比較的容易に観測記録を確保することができる。したがって、2次元地震応答解析と常時微動観測記録との整合性検証のケーススタディを充実させ、少なくとも地盤非線形性が殆ど生じていない状態において、2次元地震応答解析が実現現象をよく再現することを示すことは今後の重要な課題であるといえる。

これについて、既往の研究事例として長尾³⁾や田代ら⁴⁾がある。長尾³⁾は川崎港および横浜港の直杭式栈橋に対し常時微動観測を行い、固有周期の観測値と2次元地震応答解析から得られた解析値が良く整合することを示した。また、田代ら⁴⁾は常時微動観測から得られた固有周期と、最大加速度 1Gal のホワイトノイズを与えた 2次元地震応答解析から得られた固有周期とを比較し、両者が概ね整合することを示している。

なお、図-13 および巻末資料に示すとおり、最大加速度 10Gal 程度の地震動であれば、仮想固定点と背後地表面とで栈橋上部工までの伝達関数の周期特性に大きな差は生じない。これから、背後地表面と栈橋上部工の2点において常時微動観測を実施することで、常時微動に対する栈橋固有周期を実測することが可能であると考えられる。

③骨組解析における栈橋剛性の適切な設定方法

提案した補正法から算出した照査用震度や、2次元地震応答解析における上部工加速度最大値から算出した作用震度を外力とする骨組解析は、2次元地震応答解析と比較して杭応力を過大に評価する。つまり、たとえ照査用震度が同値であっても、現行法に基づいた骨組解析では2次元地震応答解析と異なる杭応力が出力されるといえる。したがって、入力値である照査用震度が同一であれば、出力値である杭応力も骨組解析と2次元地震応答解析とで整合するように、骨組解析における入力パラメータの設定法を修正する必要がある。

④比較対象としなかった設計条件についての検討

本研究では、複数の設計条件に基づいて検討断面を設定しているものの、あらゆる設計条件を網羅的に検討したものではない。これは、2次元地震応答解析や Parzen 窓を掛けたフーリエスペクトル変換、加速度応答スペクトル算出にはある程度の計算時間を要することや、解析結果として得られるデータファイル群の容量が非常に大きいことから、研究に使用する計算機の処理速度や記憶容量、計算機の数により解析可能な断面数が制限されるためである。

しかしながら、本研究において提示した補正法が様々な設計条件において2次元地震応答解析の固有周期や照査用

震度を推定できることを示すためには、本研究では比較対象としなかった以下の設計条件についても補正法と2次元地震応答解析との比較を行う必要がある。

- イ)荷重条件(上載荷重の大小、PC 桁、クレーン荷重等)
- ロ)鋼管杭の杭径および肉厚
- ハ)渡版の有無
- ニ)捨石基礎の有無、勾配、配置
- ホ)粘性土地盤
- ヘ)単層でない地盤

特に荷重条件については、栈橋の固有周期や現行法における仮想固定点の標高に大きく影響すると考えられることから、複数の荷重条件に基づいて比較検討を加える必要があるといえる。

また、本研究では杭諸元について断面性能が強弱2種類となるように設計条件を設定しているものの、杭の断面性能が同一であるときに杭径と杭肉厚が栈橋の動的特性にどのような影響を及ぼすかについては検討していない。杭径の違いは杭と地盤反力との関係に大きく影響すると考えられることから、適切な杭径と肉厚の考え方について整理する必要があるといえる。

⑤背後土留構造および背後地盤の影響検討

本研究で設定した検討断面は、栈橋の設計水深等に関わらず土留護岸はL型擁壁としている。また、各検討断面における土層構成や各土層の土質定数など、基本的な地盤条件は海側地盤と陸側地盤で同一としている。

しかしながら、特に強い地震動に対しては、栈橋杭は土留護岸や背後地盤に起因する側方からの作用を受けると考えられるため、これらの影響を減衰定数などに適切に反映させることで、補正法の精度向上を図ることが可能と考えられる。

⑥L2 地震に対する適用性の検討

現行港湾基準は、偶発状態における港湾施設の性能照査法として、数値解析法や模型実験、現地試験に基づく方法を推奨している。このため、現在の設計実務においては、L2 地震動に対する栈橋の照査法として FLIP による 2次元地震応答解析を適用することが一般的となっている。しかしながら、2次元の非線形地震応答解析は解析結果を得るまでのタイムラグが長く、最適断面の追求に多大な負荷が要求されるという問題がある。また、解析モデルの設定方法が複雑であるうえ、強大な地震動が入力されることから、解析結果の妥当性検証や第三者による照査も容易でない。

したがって、本研究で示したような比較的簡易な手法により L2 地震動に対する直杭式棧橋の挙動を把握することが可能となれば、L2 地震動に対する棧橋の最適断面追及や、2 次元地震応答解析から得られた解析結果の妥当性検証、第三者照査の効率化に大きく寄与すると考えられる。

これに対し、本研究は L1 地震動を検討対象としていることから、各検討断面における棧橋杭は L1 地震動への対応を念頭にその諸元を設定している。このため、L2 地震動のような非常に強い地震動に対する適用性や、耐震強化岸壁に適用されるような高剛性の杭についての適用性は検討していない。また、地盤の液状化についても考慮の対象外としている。すなわち、これらの設計条件に対する検討を加え、補正法の修正と適用範囲の拡大を図ることは、L2 地震動に対する設計実務の効率化に繋がる重要な課題であると考えている。

⑦組杭式棧橋への適用性検討

本研究は直杭式棧橋を対象としており、組杭式棧橋に対する適用性は検討していない。しかしながら、組杭式棧橋においても、現行設計法と2次元地震応答解析とでは算出される固有周期や照査用震度に乖離があると考えられる。

したがって、本研究で提案した補正法の組杭式棧橋に対する適用性の検討や、同様の手法による補正法の構築が必要であるといえる。

(2017年11月15日受付)

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり、既往事例や地震動の評価法について、港湾空港技術研究所の野津厚地震防災研究領域長より様々な御助言を賜りました。また、港湾施設研究室の交流研究員である田端優憲氏、港湾施設研究室に交流研究員として在籍されていた佐藤健彦氏、高野向後氏には、本稿の執筆方針および検討内容に対して貴重なご意見を頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

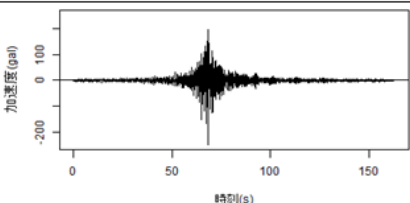
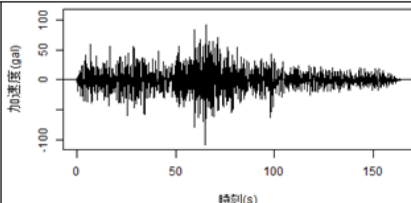
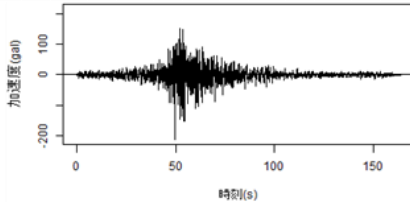
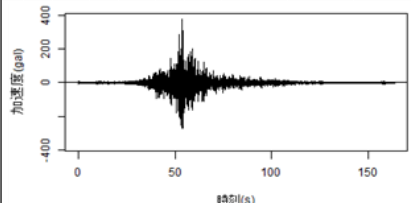
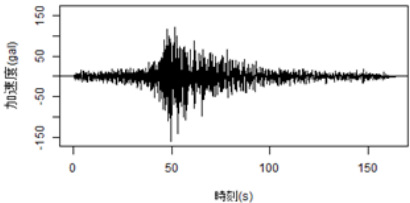
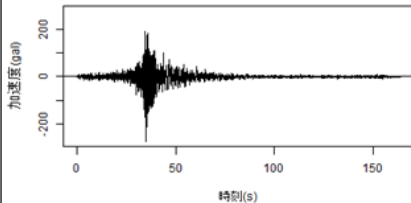
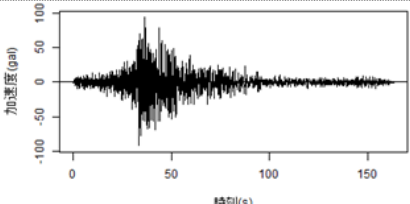
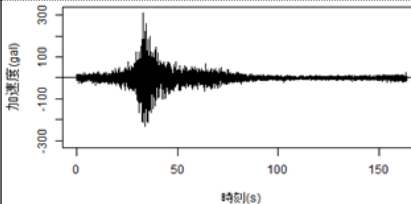
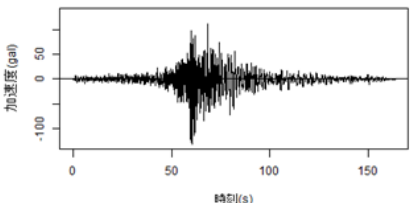
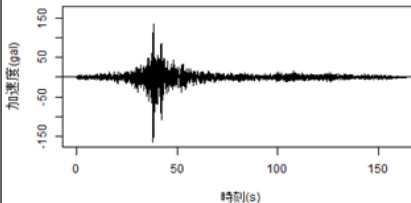
- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 2) 横田弘，竹鼻直人，南兼一郎，高橋邦夫，川端規之：鋼管杭式棧橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察，港湾技術研究所報告，第 37 巻 第 2 号，pp.75～130，1998.
- 3) 長尾毅：棧橋式岸壁の耐震性照査手法に関する解析的研究，国土技術政策総合研究所資料，No.61，2003.
- 4) 田代聡一，井合進，一井康二，井福周介，高原裕一：常時微動観測による既設棧橋の振動特性の検討(解析編)，土木学会第54回年次学術講演会，pp.166-167，1999.
- 5) 栗原直範，長尾毅：直杭式棧橋の動的特性を考慮した照査用震度の算出方法に関する基礎的研究，国土技術政策総合研究所資料，No.591，2010.
- 6) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 7) 大久保，小濱英司，楠謙吾：直杭式横棧橋の異なる照査手法による棧橋応答の比較，土木学会論文集B3，Vol.68，No.2，I 438- I 443，2012.
- 8) 横山幸満：くい構造物の計算法と計算例，山海堂，1977.
- 9) 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室HP，
<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>
- 10) 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集，2007.
- 11) 菊池喜昭，小椋卓美，石丸守，近藤武司：捨石地盤の横方向地盤反力係数，土木学会第53回年次学術講演会，pp.52-53，1998.
- 12) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
- 13) 勝俣優，竹信正寛，宮田正史，村上和康：直杭式横棧橋の船舶接岸時のレベル 1 信頼性設計法に関する諸考察（その 2），国土技術政策総合研究所資料，No.931，2017.
- 14) 長尾 毅，菊池喜昭，藤田宗久，鈴木 誠，佐貫哲朗：棧橋式係船岸のレベル1地震動に対する信頼性設計法，構造工学論文集，Vol.52A，2006.

附録 A 計算事例と検討対象事例

本研究では、地盤非線形性と固有周期の動的特性との関係を定式化するために、地盤非線形性の強さが異なる様々な条件に対して地震応答解析を実施した。

計算事例数は903例であるが、加震中に栈橋杭が全塑性した計算事例は検討対象から除外したため、検討対象とした計算事例は833例である。振幅調整を200Gal, 300Gal, 500Galとした計算事例、およびL1地震動に対する計算事例について、杭の全塑性の有無を付表A-2～付表A-5に示す。

付表 A-1 入力地震動(原波形)

波名	最大加速度 (Gal)	卓越周期 (s)	加速度波形	波名	最大加速度 (Gal)	卓越周期 (s)	加速度波形
石巻	247.61	1.0		四日市	108.05	1.377	
八戸	214.20	1.163		舞鶴	380.53	0.216	
常陸那珂	159.18	1.042		神戸	274.06	0.356	
千葉	94.97	1.342		岩国	312.27	0.238	
清水	132.02	1.587		博多	166.07	0.476	

付表 A-2 各計算事例における栈橋杭の全塑性の有無(振幅調整なし)

設計水深	N 値	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	石巻	八戸	常陸那珂	千葉	清水	四日市	舞鶴	神戸	岩国	博多
-10m	1	700	14.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	700	14.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	15	700	13.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
-13m	1	800	13.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	800	12.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	15	800	11.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
-16m	1	900	12.3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	900	11.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	15	900	11.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
-10m	1	700	10.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	700	10.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	700	9.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	15	700	9.6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
-13m	1	700	11.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	700	10.9	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	700	10.6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	15	700	10.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
-16m	1	800	11.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	800	10.5	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	800	10.2	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	15	800	10.1	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○

付表 A-3 各計算事例における栈橋杭の全塑性の有無(振幅調整 200Gal)

設計水深	N 値	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	石巻	八戸	常陸那珂	千葉	清水	四日市	舞鶴	神戸	岩国	博多
-10m	1	700	14.9	○	○			○				○	○
	5	700	14.1	○	○			○				○	○
	15	700	13.4	○	○			○				○	○
-13m	1	800	13.2	○	○			○				○	○
	5	800	12.4	○	○			○				○	○
	15	800	11.9	○	○			○				○	○
-16m	1	900	12.3	○	○			×				○	○
	5	900	11.5	○	○			○				○	○
	15	900	11.0	○	○			○				○	○
-10m	1	700	10.4	○	○			×				○	○
	5	700	10.0	○	○			○				○	○
	10	700	9.7	○	○			○				○	○
	15	700	9.6	○	○			○				○	○
-13m	1	700	11.5	○	○			×				○	○
	5	700	10.9	○	○			○				○	○
	10	700	10.6	○	○			○				○	○
	15	700	10.5	○	○			○				○	○
-16m	1	800	11.1	○	○			×				○	○
	5	800	10.5	○	○			○				○	○
	10	800	10.2	○	○			○				○	○
	15	800	10.1	○	○			×				○	○

付表 A-4 各計算事例における栈橋杭の全塑性の有無(振幅調整 300Gal)

設計水深	N 値	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	石巻	八戸	常陸那珂	千葉	清水	四日市	舞鶴	神戸	岩国	博多
-10m	1	700	14.9	○	○			×				○	○
	5	700	14.1	○	○			×				○	○
	15	700	13.4	○	○			○				○	○
-13m	1	800	13.2	○	○			×				○	○
	5	800	12.4	○	○			×				○	○
	15	800	11.9	○	○			○				○	○
-16m	1	900	12.3	○	○			×				○	○
	5	900	11.5	○	○			×				○	○
	15	900	11.0	○	○			×				○	○
-10m	1	700	10.4	○	×			×				○	○
	5	700	10.0	×	×			×				○	○
	10	700	9.7	○	×			×				○	○
	15	700	9.6	○	×			×				○	○
-13m	1	700	11.5	○	○			×				○	○
	5	700	10.9	×	×			×				○	○
	10	700	10.6	×	×			×				○	○
	15	700	10.5	×	×			×				○	○
-16m	1	800	11.1	○	○			×				○	○
	5	800	10.5	×	×			×				○	○
	10	800	10.2	×	×			×				○	○
	15	800	10.1	×	×			×				○	○

付表 A-5 各計算事例における栈橋杭の全塑性の有無(振幅調整 500Gal)

設計水深	N 値	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	石巻	八戸	常陸那珂	千葉	清水	四日市	舞鶴	神戸	岩国	博多
-10m	1	700	14.9		×							○	○
	5	700	14.1		×							○	○
	15	700	13.4		×							○	○
-13m	1	800	13.2		×							○	○
	5	800	12.4		×							○	○
	15	800	11.9		×							○	○
-16m	1	900	12.3		×							○	○
	5	900	11.5		×							○	○
	15	900	11.0		×							○	○
-10m	1	700	10.4		×							○	○
	5	700	10.0		×							○	○
	10	700	9.7		×							○	○
	15	700	9.6		×							○	○
-13m	1	700	11.5		×							○	○
	5	700	10.9		×							○	○
	10	700	10.6		×							○	○
	15	700	10.5		×							○	○
-16m	1	800	11.1		×							○	○
	5	800	10.5		×							○	○
	10	800	10.2		×							○	○
	15	800	10.1		×							○	○

附録 B 2次元地震応答解析における固有周期

本研究において、2次元地震応答解析における桟橋固有周期は、仮想固定点から桟橋上部工までの伝達関数(仮想固定点と桟橋上部工のフーリエスペクトル比)が極大値を取る周期として定義した。

2次元地震応答解析における桟橋固有周期の算出結果一覧は付表B-1、付表B-2にを示すとおりであるが、全般的な傾向として、最大加速度が増加するほど桟橋固有周期が長周期化することが確認できる。また、岩国波や博多波と比較して、八戸波や石巻波で桟橋固有周期が長周期化しやすい傾向があり、地震動の卓越周期が桟橋固有周期に影響を与えていることが示されている。

なお、本検討においては現行法により桟橋の仮想固定点を設定したが、適切な仮想固定点の設定方法については検討の余地があると考えられる。付表B-3～付表B-23は、最

大加速度を10Gal、100Gal、300Galおよび無調整とした計算事例について、仮想固定点、杭下端、背後地表面の3点から桟橋上部工までの伝達関数の周期特性を示したものであるが、弱い地震動においては、いずれの地点においても伝達関数が極大値を取る周期はほぼ同一でありながら、地震動が強くなるに連れ極大値を取る周期にずれが生じることが確認できる。すなわち、L1地震動程度の強い地震動においては、仮想固定点付近の地盤と杭下端付近や背後地表面とでは異なる挙動を取ると考えられるため、強震観測により桟橋の動的特性を把握する際に注意する必要があるといえる。なお、強い地震動においては、背後地表面から桟橋上部工までの伝達関数に明瞭な極大値が生じにくくなるため、どちらかという仮想固定点や杭下端(基盤面付近)から桟橋上部工までの伝達関数を桟橋固有周期と捉える方が適当と思われる。

付表 B-1 2次元地震応答解析における桟橋固有周期算出結果一覧(杭諸元①)

設計水深	-10m			-13m			-16m		
N値	1	5	15	1	5	15	1	5	15
杭径(mm)	700	700	700	800	800	800	900	900	900
肉厚(mm)	14.9	14.1	13.4	13.2	12.4	11.9	12.3	11.5	11.0
5Gal	八戸	0.65	0.64	0.64	0.64	0.60	0.60	0.73	0.70
	岩国	0.65	0.64	0.64	0.63	0.60	0.60	0.73	0.70
	博多	0.65	0.64	0.64	0.64	0.60	0.60	0.73	0.70
10Gal	八戸	0.66	0.65	0.65	0.65	0.61	0.61	0.74	0.71
	岩国	0.65	0.64	0.64	0.63	0.60	0.60	0.73	0.70
	博多	0.66	0.65	0.65	0.64	0.61	0.61	0.73	0.70
20Gal	八戸	0.66	0.66	0.66	0.66	0.62	0.61	0.76	0.72
	岩国	0.66	0.65	0.65	0.64	0.61	0.60	0.73	0.70
	博多	0.67	0.67	0.67	0.64	0.63	0.61	0.73	0.71
50Gal	八戸	0.70	0.69	0.69	0.70	0.66	0.65	0.82	0.76
	岩国	0.68	0.67	0.67	0.67	0.63	0.63	0.76	0.72
	博多	0.69	0.67	0.67	0.69	0.64	0.64	0.77	0.73
100Gal	石巻	0.73	0.70	0.70	0.73	0.69	0.66	0.83	0.78
	八戸	0.77	0.72	0.72	0.82	0.70	0.68	0.75	0.79
	清水	0.80	0.74	0.74	0.71	0.71	0.67	0.99	0.81
	岩国	0.69	0.68	0.68	0.69	0.66	0.66	0.77	0.72
	博多	0.73	0.70	0.70	0.73	0.67	0.67	0.81	0.77
150Gal	八戸	0.84	0.77	0.76	1.02	0.77	0.71	1.18	0.85
	岩国	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68	0.79	0.77
	博多	0.74	0.73	0.73	0.72	0.70	0.70	0.86	0.79
200Gal	石巻	0.84	0.74	0.73	0.86	0.62	0.70	1.03	0.88
	八戸	1.19	0.84	0.78	1.19	0.84	0.78	1.40	0.76
	清水	0.72	0.77	0.80	1.15	0.76	0.80	#N/A	0.72
	岩国	0.72	0.72	0.72	0.72	0.69	0.69	0.80	0.78
	博多	0.77	0.74	0.74	0.82	0.74	0.73	0.92	0.80
300Gal	石巻	0.87	0.83	0.82	1.04	0.84	0.62	1.11	0.88
	八戸	1.24	1.02	0.85	1.40	1.02	0.85	1.10	0.95
	清水	#N/A	#N/A	0.77	#N/A	#N/A	0.74	#N/A	#N/A
	岩国	0.72	0.72	0.72	0.77	0.70	0.70	0.84	0.80
	博多	0.73	0.74	0.78	0.84	0.73	0.74	0.98	0.87
500Gal	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.70	0.79	0.79	0.80	0.70	0.73	0.93	0.84
	博多	0.98	0.73	0.80	1.06	0.87	0.80	1.12	0.98
L1 Original	石巻	0.86	0.82	0.75	0.86	0.83	0.73	1.09	0.88
	八戸	1.19	0.84	0.78	1.19	0.84	0.78	1.40	1.20
	常陸那珂	0.82	0.76	0.75	0.86	0.75	0.72	1.00	0.85
	千葉	0.76	0.76	0.72	0.76	0.72	0.72	0.87	0.80
	清水	0.77	0.80	0.77	0.99	0.76	0.75	1.16	0.80
	四日市	0.74	0.72	0.71	0.80	0.70	0.69	0.89	0.80
	舞鶴	0.71	0.72	0.72	0.74	0.71	0.67	0.80	0.81
	神戸	0.80	0.74	0.74	0.83	0.74	0.73	0.98	0.85
	岩国	0.72	0.73	0.73	0.77	0.70	0.70	0.85	0.80
	博多	0.74	0.74	0.73	0.80	0.73	0.70	0.85	0.80

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において桟橋杭が全塑性した解析事例を示す。

付表 B-2 2次元地震応答解析における栈橋固有周期算出結果一覧(杭諸元②)

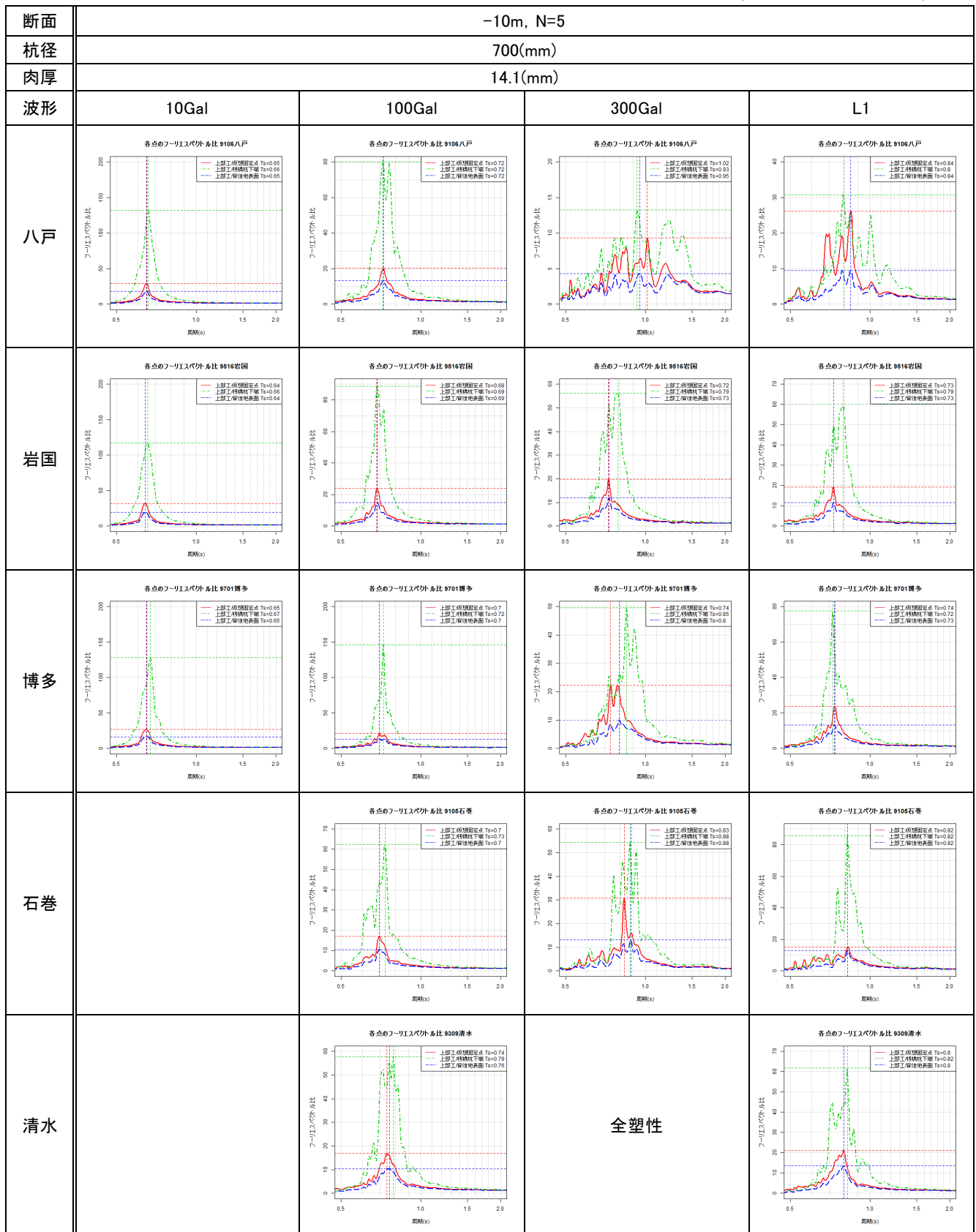
設計水深		-10m				-13m				-16m			
N値		1	5	10	15	1	5	10	15	1	5	10	15
杭径(mm)		700	700	700	700	700	700	700	700	800	800	800	800
肉厚(mm)		10.4	10.0	9.7	9.6	11.5	10.9	10.6	10.5	11.1	10.5	10.2	10.1
5Gal	八戸	0.73	0.73	0.73	0.73	0.76	0.74	0.74	0.74	0.84	0.84	0.84	0.83
	岩国	0.73	0.72	0.72	0.72	0.75	0.73	0.73	0.73	0.84	0.83	0.82	0.82
	博多	0.73	0.72	0.73	0.73	0.75	0.73	0.73	0.73	0.84	0.83	0.83	0.83
10Gal	八戸	0.75	0.73	0.73	0.73	0.76	0.76	0.75	0.75	0.85	0.84	0.84	0.84
	岩国	0.73	0.72	0.72	0.72	0.75	0.73	0.73	0.73	0.84	0.83	0.83	0.82
	博多	0.74	0.73	0.73	0.73	0.76	0.74	0.74	0.74	0.85	0.84	0.83	0.83
20Gal	八戸	0.76	0.76	0.76	0.76	0.78	0.77	0.76	0.76	0.87	0.86	0.85	0.85
	岩国	0.74	0.72	0.73	0.73	0.76	0.75	0.75	0.74	0.84	0.83	0.83	0.83
	博多	0.75	0.73	0.74	0.73	0.76	0.76	0.76	0.76	0.86	0.85	0.84	0.84
50Gal	八戸	0.79	0.78	0.78	0.78	0.84	0.82	0.82	0.82	0.94	0.89	0.89	0.89
	岩国	0.76	0.76	0.76	0.76	0.77	0.77	0.77	0.76	0.85	0.85	0.84	0.84
	博多	0.77	0.77	0.77	0.77	0.79	0.79	0.79	0.78	0.89	0.88	0.87	0.87
100Gal	石巻	0.83	0.81	0.81	0.79	0.88	0.83	0.82	0.82	0.99	0.93	0.92	0.89
	八戸	0.85	0.84	0.84	0.84	0.81	0.86	0.86	0.85	1.01	0.96	0.95	0.95
	清水	0.87	0.83	0.83	0.83	0.95	0.87	0.87	0.87	1.02	0.97	0.96	0.95
	岩国	0.77	0.77	0.77	0.77	0.79	0.79	0.79	0.79	0.88	0.87	0.86	0.86
150Gal	博多	0.80	0.81	0.81	0.81	0.80	0.82	0.82	0.82	0.92	0.92	0.91	0.91
	八戸	0.84	0.85	0.86	0.85	1.01	1.01	0.95	0.85	1.19	1.02	1.01	1.01
	岩国	0.79	0.79	0.79	0.79	0.81	0.80	0.80	0.80	0.90	0.89	0.88	0.87
200Gal	博多	0.81	0.83	0.83	0.82	0.87	0.88	0.87	0.86	0.98	0.93	0.93	0.93
	石巻	0.93	0.88	0.84	0.84	0.93	0.93	0.92	0.88	0.87	1.04	1.03	1.02
	八戸	0.95	0.82	0.85	0.85	1.19	1.02	1.01	1.01	1.25	1.20	1.02	1.02
	清水	#N/A	0.96	0.96	0.95	#N/A	1.02	1.01	0.96	#N/A	1.17	1.02	#N/A
300Gal	岩国	0.81	0.80	0.80	0.80	0.82	0.82	0.82	0.81	0.92	0.91	0.89	0.89
	博多	0.87	0.87	0.87	0.86	0.91	0.91	0.91	0.90	0.98	0.99	0.98	0.98
	石巻	0.82	#N/A	0.93	0.93	0.88	#N/A	#N/A	#N/A	1.11	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	1.40	#N/A	#N/A	#N/A	1.11	#N/A	#N/A	#N/A
500Gal	清水	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.82	0.82	0.82	0.82	0.86	0.86	0.85	0.83	0.95	0.93	0.93	0.92
	博多	0.92	0.91	0.91	0.91	0.98	0.92	0.92	0.92	1.05	1.03	1.00	0.99
	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
L1 Original	岩国	0.87	0.87	0.87	0.86	0.92	0.92	0.89	0.88	0.99	0.99	0.99	0.98
	博多	0.98	0.92	0.92	0.92	1.14	0.99	0.99	0.99	1.12	1.14	1.04	1.04
	石巻	0.83	0.93	0.88	0.88	0.82	#N/A	0.93	0.93	1.10	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	1.19	1.01	1.01	0.85	1.19	#N/A	1.01	1.01	1.40	#N/A	#N/A	#N/A
	常陸那珂	0.90	0.86	0.86	0.85	0.96	0.91	0.91	0.90	1.07	1.01	0.99	0.96
	千葉	0.86	0.83	0.83	0.83	0.87	0.86	0.86	0.85	0.99	0.93	0.93	0.92
	清水	0.97	0.87	0.87	0.87	0.99	0.95	0.88	0.88	1.16	1.02	0.99	0.98
	四日市	0.84	0.82	0.82	0.82	0.90	0.88	0.84	0.84	0.98	0.95	0.94	0.93
	舞鶴	0.81	0.81	0.81	0.80	0.84	0.80	0.80	0.80	0.98	0.93	0.92	0.92
	神戸	0.92	0.86	0.86	0.86	0.95	0.92	0.91	0.91	1.06	0.99	0.99	0.96
	岩国	0.82	0.82	0.82	0.82	0.86	0.86	0.86	0.85	0.95	0.94	0.93	0.93
	博多	0.86	0.83	0.83	0.83	0.90	0.90	0.89	0.87	0.98	0.98	0.93	0.93

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において栈橋杭が全塑性した解析事例を示す。

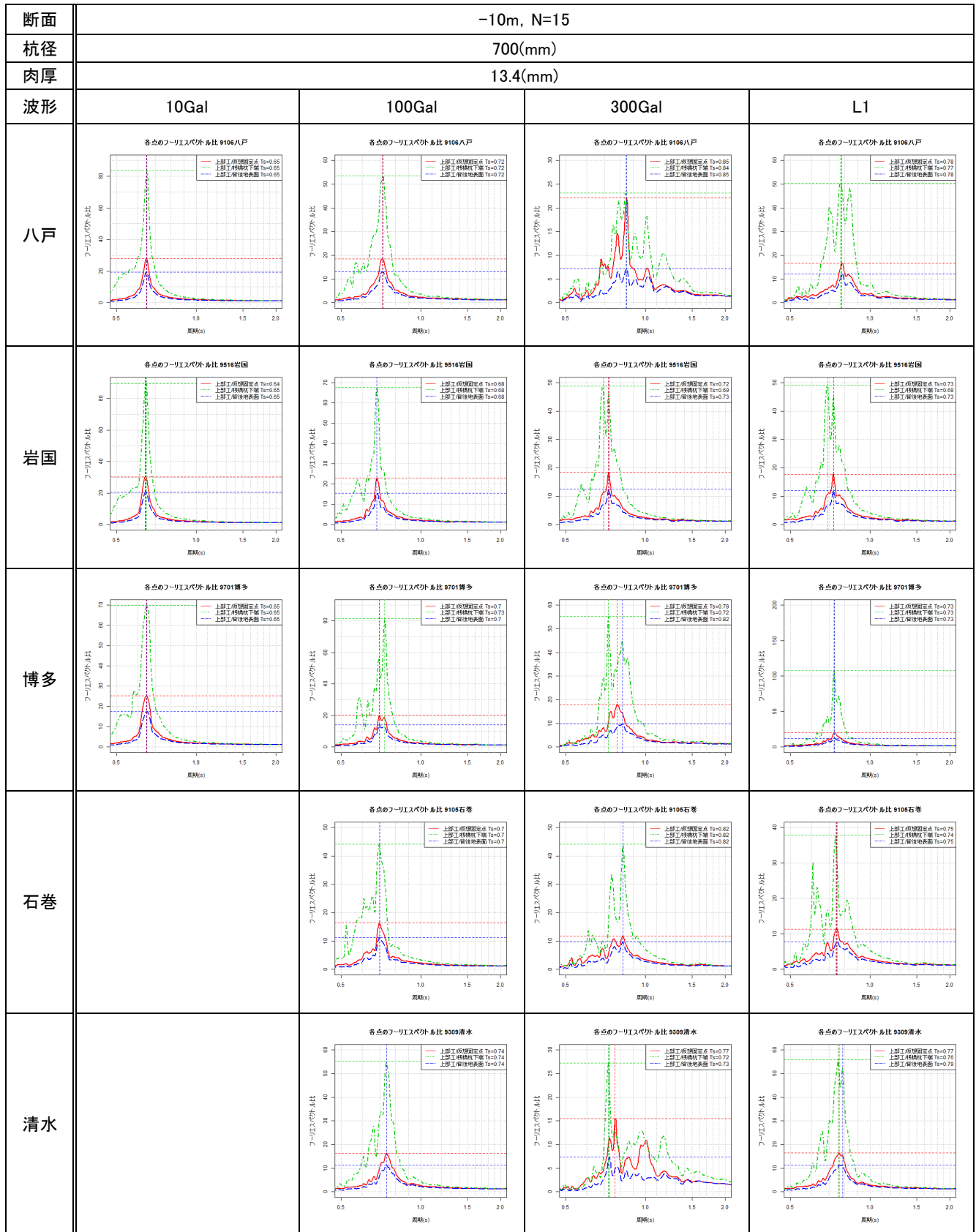
付表 B-3 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-10m, N=1, 杭諸元①)

断面	-10m, N=1			
杭径	700(mm)			
肉厚	14.9(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸				
岩国				
博多				
石巻				
清水			全塑性	

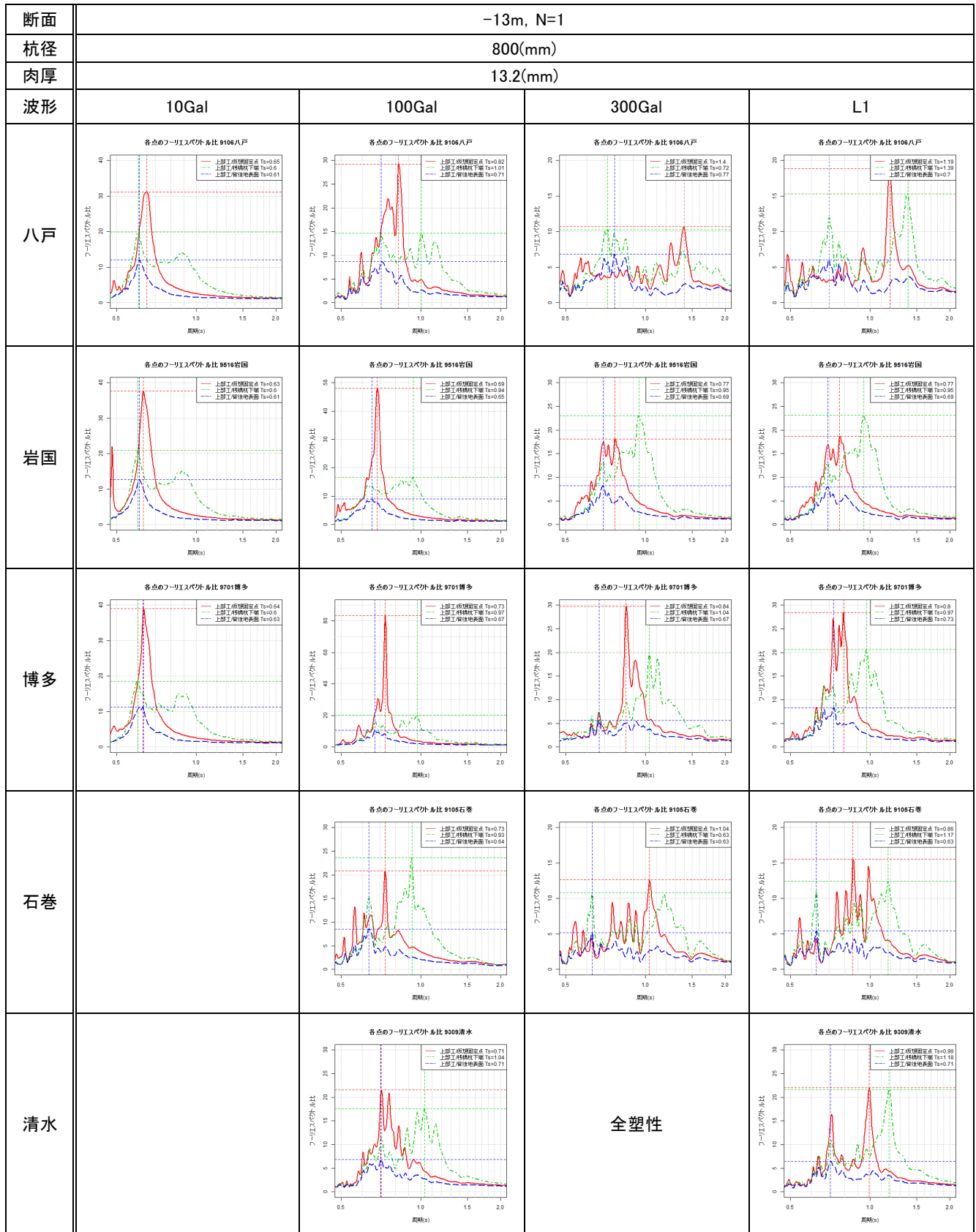
付表 B-4 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-10m, N=5, 杭諸元①)



付表 B-5 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-10m, N=15, 杭諸元①)



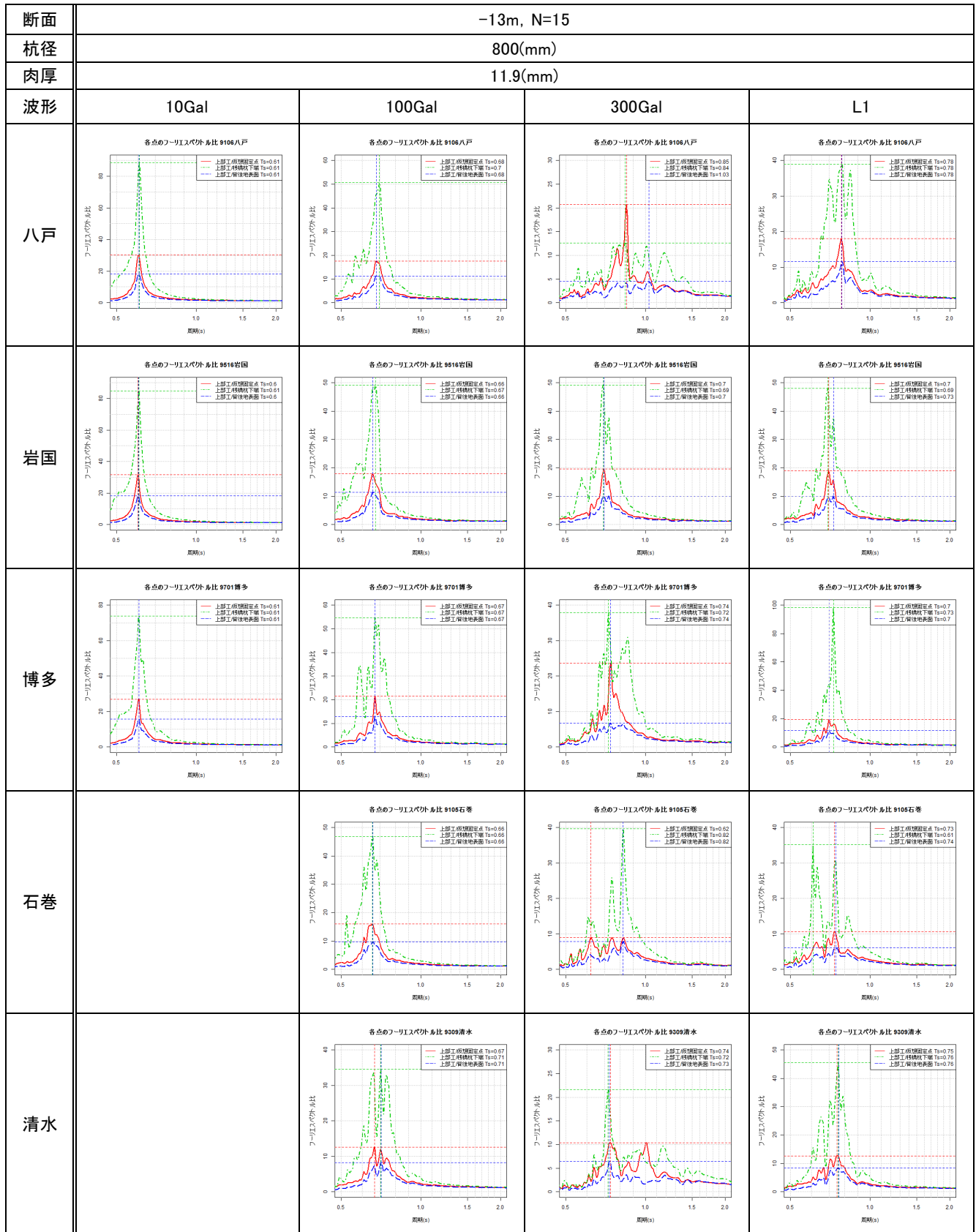
付表 B-6 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-13m, N=1, 杭諸元①)



付表 B-7 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-13m, N=5, 杭諸元①)

断面	-13m, N=5			
杭径	800(mm)			
肉厚	12.4(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸				
岩国				
博多				
石巻				
清水			全塑性	

付表 B-8 仮想固定点，杭下端，背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-13m, N=15, 杭諸元①)



付表 B-9 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-16m, N=1, 杭諸元①)

断面	-16m, N=1			
杭径	900(mm)			
肉厚	12.3(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	各点のフリスベ外比 9106八戸 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.74$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.71$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.71$	各点のフリスベ外比 9106八戸 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.75$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.75$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.79$	各点のフリスベ外比 9106八戸 上部工・橋脚固定点 $T_s=1.1$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.79$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.84$	各点のフリスベ外比 9106八戸 上部工・橋脚固定点 $T_s=1.4$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.7$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.7$
岩国	各点のフリスベ外比 9516岩国 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.73$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.71$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.71$	各点のフリスベ外比 9516岩国 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.77$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.72$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.72$	各点のフリスベ外比 9516岩国 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.84$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.81$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.81$	各点のフリスベ外比 9516岩国 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.85$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.81$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.81$
博多	各点のフリスベ外比 9701博多 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.73$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.69$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.72$	各点のフリスベ外比 9701博多 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.81$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.81$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.73$	各点のフリスベ外比 9701博多 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.88$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.81$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.84$	各点のフリスベ外比 9701博多 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.85$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.81$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.85$
石巻	各点のフリスベ外比 9105石巻 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.83$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=0.82$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.83$	各点のフリスベ外比 9105石巻 上部工・橋脚固定点 $T_s=1.1$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=1.1$ 上部工・背後地表面 $T_s=1.1$	各点のフリスベ外比 9105石巻 上部工・橋脚固定点 $T_s=1.1$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=1.1$ 上部工・背後地表面 $T_s=1.1$	各点のフリスベ外比 9105石巻 上部工・橋脚固定点 $T_s=1.08$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=1.08$ 上部工・背後地表面 $T_s=1.08$
清水	各点のフリスベ外比 9309清水 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.99$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=1.15$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.72$	各点のフリスベ外比 9309清水 上部工・橋脚固定点 $T_s=0.99$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=1.15$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.72$	全塑性	各点のフリスベ外比 9309清水 上部工・橋脚固定点 $T_s=1.16$ 上部工・橋脚枕下層 $T_s=1.16$ 上部工・背後地表面 $T_s=0.73$

付表 B-10 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-16m, N=5, 杭諸元①)

断面	-16m, N=5			
杭径	900(mm)			
肉厚	11.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	各点のフーリスベタ外比 9106八戸	各点のフーリスベタ外比 9106八戸	各点のフーリスベタ外比 9106八戸	各点のフーリスベタ外比 9106八戸
岩国	各点のフーリスベタ外比 9516岩国	各点のフーリスベタ外比 9516岩国	各点のフーリスベタ外比 9516岩国	各点のフーリスベタ外比 9516岩国
博多	各点のフーリスベタ外比 9701博多	各点のフーリスベタ外比 9701博多	各点のフーリスベタ外比 9701博多	各点のフーリスベタ外比 9701博多
石巻		各点のフーリスベタ外比 9105石巻	各点のフーリスベタ外比 9105石巻	各点のフーリスベタ外比 9105石巻
清水		各点のフーリスベタ外比 9309清水	全塑性	各点のフーリスベタ外比 9309清水

付表 B-11 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-16m, N=15, 杭諸元①)

断面	-16m, N=15			
杭径	900(mm)			
肉厚	11.0(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	各点のフリスベ外比 8106八戸 上部工・橋脚固定点 Ts=0.7 上部工・橋脚下端 Ts=0.7 上部工・背後地表面 Ts=0.7	各点のフリスベ外比 8106八戸 上部工・橋脚固定点 Ts=0.77 上部工・橋脚下端 Ts=0.77 上部工・背後地表面 Ts=0.77	各点のフリスベ外比 8106八戸 上部工・橋脚固定点 Ts=1.01 上部工・橋脚下端 Ts=0.95 上部工・背後地表面 Ts=0.95	各点のフリスベ外比 8106八戸 上部工・橋脚固定点 Ts=0.85 上部工・橋脚下端 Ts=0.84 上部工・背後地表面 Ts=0.85
	各点のフリスベ外比 8516岩国 上部工・橋脚固定点 Ts=0.69 上部工・橋脚下端 Ts=0.7 上部工・背後地表面 Ts=0.7	各点のフリスベ外比 8516岩国 上部工・橋脚固定点 Ts=0.72 上部工・橋脚下端 Ts=0.72 上部工・背後地表面 Ts=0.72	各点のフリスベ外比 8516岩国 上部工・橋脚固定点 Ts=0.8 上部工・橋脚下端 Ts=0.81 上部工・背後地表面 Ts=0.8	各点のフリスベ外比 8516岩国 上部工・橋脚固定点 Ts=0.8 上部工・橋脚下端 Ts=0.81 上部工・背後地表面 Ts=0.8
	各点のフリスベ外比 8701博多 上部工・橋脚固定点 Ts=0.69 上部工・橋脚下端 Ts=0.69 上部工・背後地表面 Ts=0.7	各点のフリスベ外比 8701博多 上部工・橋脚固定点 Ts=0.77 上部工・橋脚下端 Ts=0.74 上部工・背後地表面 Ts=0.77	各点のフリスベ外比 8701博多 上部工・橋脚固定点 Ts=0.86 上部工・橋脚下端 Ts=0.89 上部工・背後地表面 Ts=0.91	各点のフリスベ外比 8701博多 上部工・橋脚固定点 Ts=0.79 上部工・橋脚下端 Ts=0.81 上部工・背後地表面 Ts=0.91
	各点のフリスベ外比 8108石巻 上部工・橋脚固定点 Ts=0.74 上部工・橋脚下端 Ts=0.69 上部工・背後地表面 Ts=0.74	各点のフリスベ外比 8108石巻 上部工・橋脚固定点 Ts=0.74 上部工・橋脚下端 Ts=0.74 上部工・背後地表面 Ts=0.74	各点のフリスベ外比 8108石巻 上部工・橋脚固定点 Ts=0.88 上部工・橋脚下端 Ts=0.88 上部工・背後地表面 Ts=0.88	各点のフリスベ外比 8108石巻 上部工・橋脚固定点 Ts=0.83 上部工・橋脚下端 Ts=0.83 上部工・背後地表面 Ts=0.83
	各点のフリスベ外比 8308清水 上部工・橋脚固定点 Ts=0.79 上部工・橋脚下端 Ts=0.79 上部工・背後地表面 Ts=0.79	各点のフリスベ外比 8308清水 上部工・橋脚固定点 Ts=0.79 上部工・橋脚下端 Ts=0.79 上部工・背後地表面 Ts=0.79	全塑性	
清水		各点のフリスベ外比 8309清水 上部工・橋脚固定点 Ts=0.82 上部工・橋脚下端 Ts=0.83 上部工・背後地表面 Ts=0.82		各点のフリスベ外比 8309清水 上部工・橋脚固定点 Ts=0.82 上部工・橋脚下端 Ts=0.83 上部工・背後地表面 Ts=0.82

付表 B-12 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-10m, N=1, 杭諸元②)

断面	-10m, N=1			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.4(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	各点のフーリスベクトル比 9106八戸	各点のフーリスベクトル比 9106八戸	全塑性	各点のフーリスベクトル比 9106八戸
岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国
博多	各点のフーリスベクトル比 9701博多	各点のフーリスベクトル比 9701博多	各点のフーリスベクトル比 9701博多	各点のフーリスベクトル比 9701博多
石巻		各点のフーリスベクトル比 9105石巻	各点のフーリスベクトル比 9105石巻	各点のフーリスベクトル比 9105石巻
清水		各点のフーリスベクトル比 9309清水	全塑性	各点のフーリスベクトル比 9309清水

付表 B-13 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-10m, N=5, 杭諸元②)

断面	-10m, N=5			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.0(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸			全塑性	
岩国				
博多				
石巻			全塑性	
清水			全塑性	

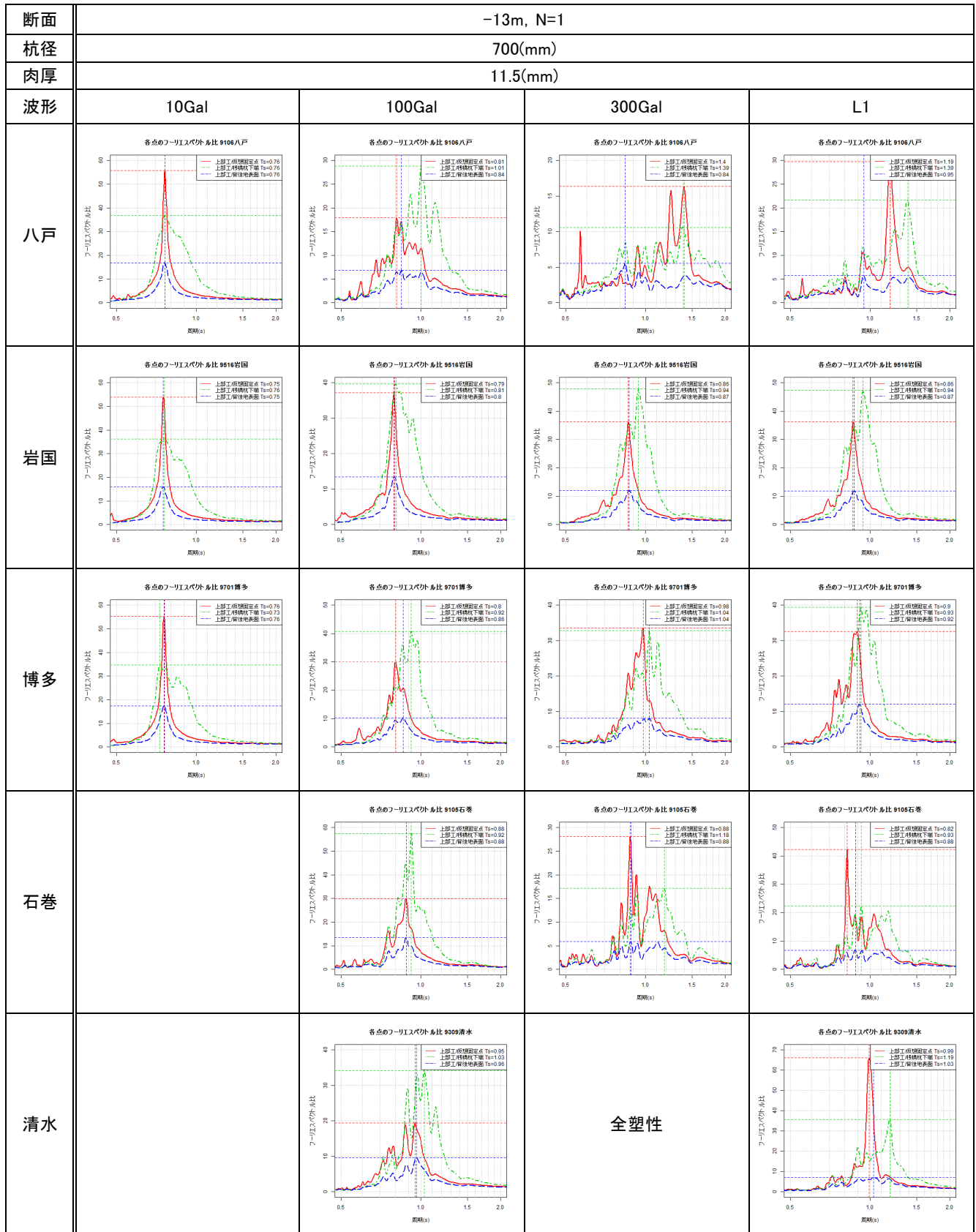
付表 B-14 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-10m, N=10, 杭諸元②)

断面	-10m, N=10			
杭径	700(mm)			
肉厚	9.7(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	各点のフリスベ外比 9106八戸	各点のフリスベ外比 9106八戸	全塑性	各点のフリスベ外比 9106八戸
岩国	各点のフリスベ外比 9516岩国	各点のフリスベ外比 9516岩国	各点のフリスベ外比 9516岩国	各点のフリスベ外比 9516岩国
博多	各点のフリスベ外比 8701博多	各点のフリスベ外比 8701博多	各点のフリスベ外比 8701博多	各点のフリスベ外比 8701博多
石巻		各点のフリスベ外比 9105石巻	各点のフリスベ外比 9105石巻	各点のフリスベ外比 9105石巻
清水		各点のフリスベ外比 8308清水	全塑性	各点のフリスベ外比 8308清水

付表 B-15 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から橋橋上部工までの伝達関数の周期特性(-10m, N=15, 杭諸元②)

断面	-10m, N=15			
杭径	700(mm)			
肉厚	9.6(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	各点のフーリスベクトル比 9106八戸	各点のフーリスベクトル比 9106八戸	全塑性	各点のフーリスベクトル比 9106八戸
岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国
博多	各点のフーリスベクトル比 9701博多	各点のフーリスベクトル比 9701博多	各点のフーリスベクトル比 9701博多	各点のフーリスベクトル比 9701博多
石巻		各点のフーリスベクトル比 9105石巻	各点のフーリスベクトル比 9105石巻	各点のフーリスベクトル比 9105石巻
清水		各点のフーリスベクトル比 9309清水	全塑性	各点のフーリスベクトル比 9309清水

付表 B-16 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-13m, N=1, 杭諸元②)



付表 B-17 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から棧橋上部工までの伝達関数の周期特性(-13m, N=5, 杭諸元②)

断面	-13m, N=5			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.9(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸			全塑性	全塑性
岩国				
博多				
石巻			全塑性	全塑性
清水			全塑性	

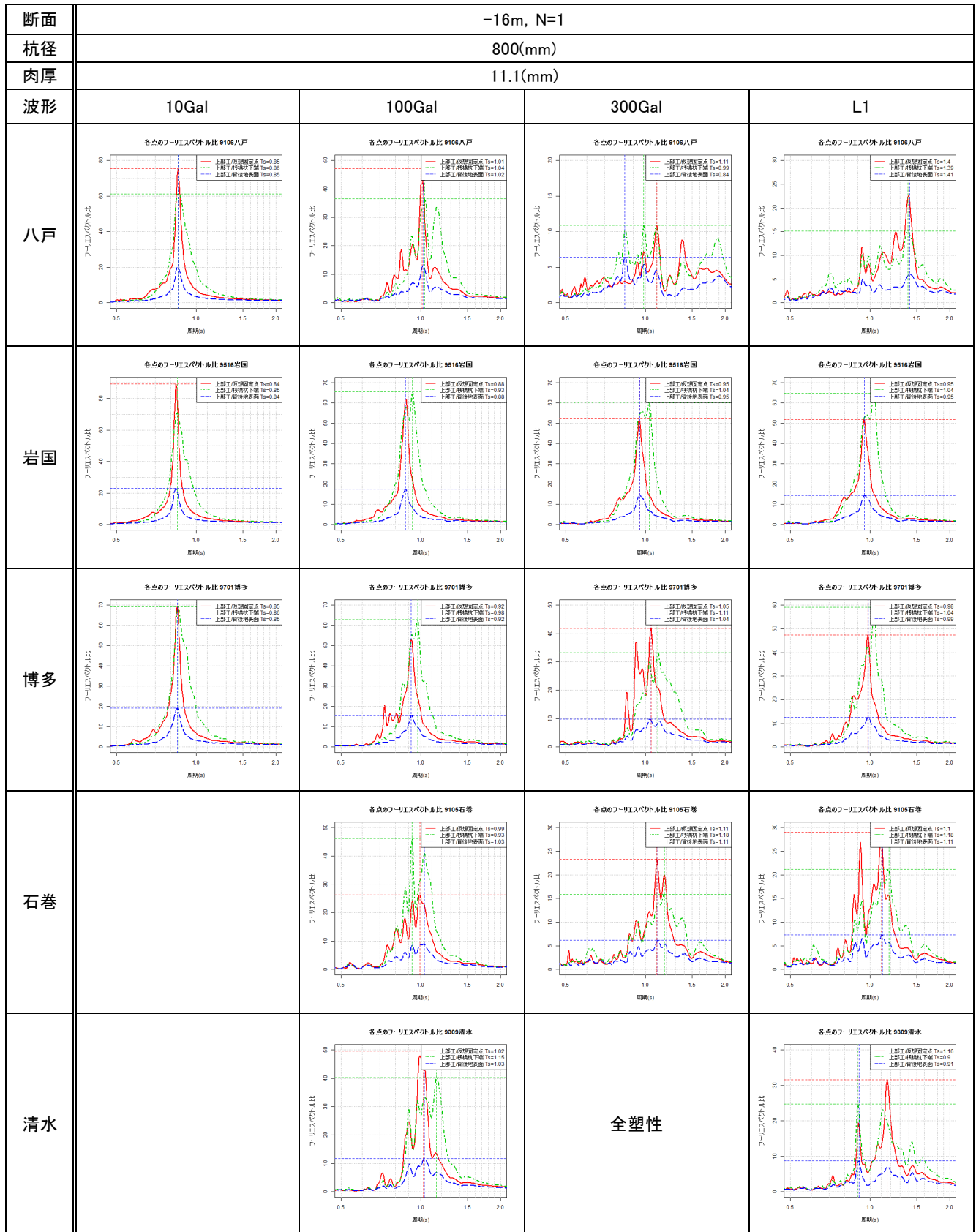
付表 B-18 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-13m, N=10, 杭諸元②)

断面	-13m, N=10			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.6(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	各点のフーリスベクトル比 9106八戸	各点のフーリスベクトル比 9106八戸	全塑性	各点のフーリスベクトル比 9106八戸
岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国	各点のフーリスベクトル比 9516岩国
博多	各点のフーリスベクトル比 8701博多	各点のフーリスベクトル比 8701博多	各点のフーリスベクトル比 8701博多	各点のフーリスベクトル比 8701博多
石巻		各点のフーリスベクトル比 9108石巻	全塑性	各点のフーリスベクトル比 9108石巻
清水		各点のフーリスベクトル比 8309清水	全塑性	各点のフーリスベクトル比 8309清水

付表 B-19 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-13m, N=15, 杭諸元②)

断面	-13m, N=15			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸			全塑性	
岩国				
博多				
石巻			全塑性	
清水			全塑性	

付表 B-20 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-16m, N=1, 杭諸元②)



付表 B-21 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-16m, N=5, 杭諸元②)

断面	-16m, N=5			
杭径	800(mm)			
肉厚	10.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸			全塑性	全塑性
岩国				
博多				
石巻			全塑性	全塑性
清水			全塑性	

付表 B-22 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-16m, N=10, 杭諸元②)

断面	-16m, N=10			
杭径	800(mm)			
肉厚	10.2(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸			全塑性	全塑性
岩国				
博多				
石巻			全塑性	全塑性
清水			全塑性	

付表 B-23 仮想固定点, 杭下端, 背後地表面から栈橋上部工までの伝達関数の周期特性(-16m, N=15, 杭諸元②)

断面	-16m, N=15			
杭径	800(mm)			
肉厚	10.1(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸			全塑性	全塑性
岩国				
博多				
石巻			全塑性	全塑性
清水			全塑性	

附録 C 2次元地震応答解析におけるせん断剛性比

付表 C-1 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比算出結果一覧(杭諸元①)

設計水深		-10m			-13m			-16m		
N値		1	5	15	1	5	15	1	5	15
杭径(mm)		700	700	700	800	800	800	900	900	900
肉厚(mm)		14.9	14.1	13.4	13.2	12.4	11.9	12.3	11.5	11.0
5Gal	八戸	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.01	0.98	0.97	0.97
	岩国	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98
	博多	0.99	0.98	0.98	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.96
10Gal	八戸	0.96	0.97	0.97	0.98	0.99	1.00	0.95	0.94	0.94
	岩国	0.99	0.98	0.98	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.97
	博多	0.97	0.95	0.95	0.99	0.98	0.98	0.97	0.94	0.92
20Gal	八戸	0.92	0.93	0.93	0.95	0.95	0.95	0.90	0.88	0.88
	岩国	0.97	0.97	0.96	0.99	0.98	0.99	0.97	0.94	0.94
	博多	0.94	0.90	0.88	0.97	0.94	0.93	0.94	0.88	0.84
50Gal	八戸	0.76	0.77	0.78	0.80	0.79	0.79	0.75	0.71	0.72
	岩国	0.92	0.90	0.88	0.96	0.91	0.92	0.93	0.84	0.83
	博多	0.86	0.75	0.69	0.89	0.78	0.73	0.85	0.73	0.65
100Gal	石巻	0.64	0.66	0.65	0.69	0.65	0.66	0.63	0.56	0.58
	八戸	0.50	0.54	0.54	0.55	0.53	0.57	0.51	0.44	0.47
	清水	0.47	0.45	0.38	0.51	0.45	0.40	0.45	0.39	0.34
	岩国	0.84	0.78	0.74	0.89	0.78	0.74	0.86	0.72	0.68
	博多	0.73	0.56	0.46	0.76	0.64	0.52	0.71	0.57	0.46
150Gal	八戸	0.31	0.33	0.36	0.36	0.31	0.34	0.35	0.24	0.26
	岩国	0.77	0.68	0.64	0.82	0.68	0.62	0.80	0.62	0.56
	博多	0.62	0.44	0.33	0.65	0.49	0.40	0.60	0.45	0.36
200Gal	石巻	0.35	0.34	0.36	0.40	0.33	0.34	0.39	0.25	0.26
	八戸	0.20	0.18	0.19	0.27	0.17	0.18	0.29	0.13	0.13
	清水	0.11	0.12	0.11	0.14	0.11	0.11	#N/A	0.08	0.08
	岩国	0.71	0.60	0.55	0.76	0.60	0.53	0.72	0.55	0.47
	博多	0.51	0.38	0.30	0.54	0.39	0.34	0.51	0.34	0.27
300Gal	石巻	0.23	0.15	0.16	0.29	0.16	0.16	0.31	0.14	0.10
	八戸	0.15	0.08	0.06	0.20	0.08	0.06	0.21	0.09	0.05
	清水	#N/A	#N/A	0.05	#N/A	#N/A	0.03	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.59	0.48	0.39	0.66	0.49	0.38	0.66	0.44	0.35
	博多	0.36	0.24	0.19	0.40	0.25	0.20	0.38	0.22	0.16
500Gal	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.46	0.32	0.25	0.56	0.32	0.25	0.48	0.29	0.22
	博多	0.25	0.14	0.09	0.27	0.15	0.09	0.26	0.14	0.09
L1 Original	石巻	0.28	0.23	0.25	0.33	0.22	0.25	0.35	0.18	0.16
	八戸	0.19	0.15	0.16	0.25	0.14	0.16	0.27	0.12	0.10
	常陸那珂	0.38	0.39	0.34	0.45	0.37	0.34	0.43	0.29	0.33
	千葉	0.60	0.56	0.51	0.64	0.55	0.51	0.61	0.53	0.50
	清水	0.31	0.32	0.28	0.33	0.30	0.29	0.27	0.25	0.24
	四日市	0.55	0.53	0.51	0.59	0.54	0.51	0.50	0.45	0.43
	舞鶴	0.58	0.40	0.27	0.58	0.41	0.30	0.54	0.46	0.27
	神戸	0.44	0.38	0.30	0.49	0.34	0.30	0.40	0.31	0.25
	岩国	0.58	0.46	0.37	0.65	0.48	0.37	0.65	0.42	0.34
	博多	0.59	0.42	0.30	0.61	0.45	0.38	0.57	0.40	0.34

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において栈橋杭が全塑性した解析事例を示す。

付表 C-2 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比算出結果一覧(杭諸元②)

出力番号		33											
出力項目		せん断剛性比											
設計水深		-10m				-13m				-16m			
N値		1	5	10	15	1	5	10	15	1	5	10	15
杭径(mm)		700	700	700	700	700	700	700	700	800	800	800	800
肉厚(mm)		10.4	10.0	9.7	9.6	11.5	10.9	10.6	10.5	11.1	10.5	10.2	10.1
5Gal	八戸	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01	0.97	0.97	1.00	0.97
	岩国	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	0.98
	博多	0.98	0.98	0.97	0.97	1.00	1.00	0.99	1.00	0.98	0.97	0.99	0.95
10Gal	八戸	0.96	0.97	0.97	0.97	0.99	0.99	0.99	1.00	0.95	0.94	0.99	0.94
	岩国	0.98	0.98	0.98	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.97	0.99	0.97
	博多	0.97	0.95	0.94	0.94	0.99	0.98	0.97	0.98	0.97	0.94	0.98	0.91
20Gal	八戸	0.91	0.93	0.92	0.93	0.94	0.96	0.96	0.98	0.88	0.88	0.94	0.88
	岩国	0.97	0.96	0.95	0.95	0.99	0.98	0.99	1.00	0.97	0.93	0.98	0.93
	博多	0.93	0.90	0.87	0.87	0.97	0.93	0.91	0.93	0.93	0.87	0.91	0.83
50Gal	八戸	0.74	0.77	0.77	0.78	0.78	0.79	0.81	0.82	0.70	0.70	0.76	0.71
	岩国	0.91	0.90	0.87	0.87	0.95	0.91	0.90	0.94	0.91	0.84	0.89	0.84
	博多	0.84	0.74	0.69	0.67	0.88	0.77	0.73	0.73	0.82	0.71	0.68	0.64
100Gal	石巻	0.60	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64	0.65	0.67	0.59	0.54	0.56	0.56
	八戸	0.46	0.53	0.54	0.56	0.51	0.53	0.56	0.58	0.46	0.43	0.44	0.45
	清水	0.44	0.44	0.39	0.38	0.47	0.45	0.41	0.40	0.39	0.38	0.33	0.31
	岩国	0.82	0.77	0.74	0.73	0.87	0.77	0.75	0.76	0.83	0.71	0.72	0.67
	博多	0.70	0.55	0.47	0.44	0.74	0.58	0.53	0.51	0.68	0.56	0.45	0.42
150Gal	八戸	0.26	0.32	0.34	0.36	0.31	0.30	0.32	0.39	0.30	0.24	0.23	0.25
	岩国	0.75	0.67	0.63	0.62	0.79	0.67	0.62	0.63	0.75	0.61	0.58	0.55
	博多	0.60	0.43	0.33	0.30	0.61	0.52	0.38	0.35	0.57	0.43	0.36	0.31
200Gal	石巻	0.32	0.32	0.32	0.34	0.38	0.32	0.32	0.33	0.37	0.29	0.24	0.25
	八戸	0.17	0.17	0.18	0.21	0.23	0.17	0.16	0.18	0.24	0.13	0.10	0.12
	清水	#N/A	0.11	0.11	0.11	#N/A	0.11	0.11	0.14	#N/A	0.07	0.06	#N/A
	岩国	0.68	0.59	0.54	0.52	0.72	0.58	0.52	0.52	0.68	0.54	0.48	0.46
	博多	0.48	0.37	0.27	0.24	0.52	0.39	0.35	0.28	0.46	0.34	0.27	0.26
300Gal	石巻	0.21	#N/A	0.14	0.15	0.27	#N/A	#N/A	#N/A	0.28	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.16	#N/A	#N/A	#N/A	0.17	#N/A	#N/A	#N/A
	清水	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.56	0.46	0.40	0.38	0.61	0.46	0.38	0.38	0.61	0.42	0.32	0.31
	博多	0.34	0.27	0.20	0.18	0.36	0.27	0.21	0.20	0.34	0.25	0.18	0.17
500Gal	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.42	0.32	0.24	0.22	0.50	0.30	0.24	0.22	0.43	0.28	0.21	0.20
	博多	0.21	0.14	0.11	0.10	0.24	0.17	0.13	0.12	0.23	0.13	0.11	0.11
L1 Original	石巻	0.25	0.22	0.22	0.23	0.31	#N/A	0.21	0.23	0.32	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	0.16	0.14	0.15	0.17	0.22	#N/A	0.13	0.15	0.23	#N/A	#N/A	#N/A
	常陸那珂	0.36	0.39	0.36	0.34	0.43	0.40	0.38	0.36	0.38	0.30	0.29	0.30
	千葉	0.56	0.56	0.53	0.53	0.61	0.59	0.59	0.59	0.54	0.49	0.50	0.49
	清水	0.27	0.32	0.28	0.27	0.28	0.32	0.29	0.30	0.22	0.25	0.23	0.22
	四日市	0.52	0.52	0.49	0.48	0.56	0.55	0.52	0.52	0.45	0.44	0.44	0.44
	舞鶴	0.54	0.39	0.31	0.26	0.54	0.39	0.30	0.28	0.49	0.45	0.28	0.26
	神戸	0.41	0.37	0.33	0.31	0.43	0.34	0.30	0.30	0.35	0.29	0.23	0.23
	岩国	0.54	0.44	0.39	0.37	0.60	0.44	0.37	0.36	0.60	0.41	0.31	0.30
	博多	0.56	0.41	0.30	0.27	0.58	0.45	0.35	0.33	0.54	0.40	0.33	0.29

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において栈橋杭が全塑性した解析事例を示す。

付表 C-3 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=1, 杭諸元①)

断面	-10m, N=1			
杭径	700(mm)			
肉厚	14.9(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=8871.45	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=4641.55	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1337.52	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1712.2
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=9093.92	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=7744.84	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=5429.83	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=5314.97
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=8969.25	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=6766.26	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=3340.8	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=5447.42
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5884.23	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2110.86	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2541.86
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=4331.88	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=2813.6

付表 C-4 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=5, 杭諸元①)

断面	-10m, N=5			
杭径	700(mm)			
肉厚	14.1(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=17404.99	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=9703.43	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1501.13	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=2670.78
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=17658.07	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=14001.35	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8521.04	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8291.55
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=17102.09	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=10059.77	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=4374.14	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=7443.82
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=11758.22	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2633.13	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=4123.01
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=7982.03	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=5669.88

付表 C-5 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=15, 杭諸元①)

断面	-10m, N=15			
杭径	700(mm)			
肉厚	13.4(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=30368.37	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=16867.53	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1772.42	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=5024.25
	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=30560.16	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=23193.62	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=12150.7	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=11625.85
	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=29547.61	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=14251.19	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=5798.59	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=9303.12
	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=20185.23	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5055.39	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=7801.62	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=8613.46
清水	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=11708.61	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=4445.41	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=4445.41	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=8613.46

付表 C-6 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=1, 杭諸元①)

断面	-13m, N=1			
杭径	800(mm)			
肉厚	13.2(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=9211.82	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=5189.5	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1851.86	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=2354.44
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=9348.85	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8294.49	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=6149.75	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=6056.62
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=9289.96	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=7111.79	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=3767.7	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=5702.89
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5437.88	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2733.57	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=3120.65
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=4754.85	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=3070.52

付表 C-7 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=5, 杭諸元①)

断面	-13m, N=5			
杭径	800(mm)			
肉厚	12.4(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=18339.81	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=9900.82	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1533.98	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=2670.58
	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=18497.75	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=14470.5	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=9056.07	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8859.84
	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=18176.54	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=11927.85	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=4711.03	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=8419.12
	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=12006.02	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2902.97	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=4028.76	
	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=8331.3	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=5566.14	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=5566.14	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=5566.14
清水			全塑性	

付表 C-8 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=15, 杭諸元①)

断面	-13m, N=15			
杭径	800(mm)			
肉厚	11.9(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=33330.87	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=18980.19	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=1994.42	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=5200.55
	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=33518.89	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=24629.4	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=12764.4	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=12225.34
	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=32886.83	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=17483.71	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=6549.34	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=12741.15
	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=21919.14	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=5182	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=8246.06	
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=13283.57	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=165.57	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=9787.98

付表 C-9 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=1, 杭諸元①)

断面	-16m, N=1			
杭径	900(mm)			
肉厚	12.3(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=9540.73	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=5155.23	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=2139.94	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=2723.86
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=9874.33	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8633.4	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=6593.82	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=6509.13
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=9722.18	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=7150.52	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=3825.14	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=5664.49
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5302.78	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=3132.4	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=3463.32
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=4471.33	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=2710.59

付表 C-10 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=5, 杭諸元①)

断面	-16m, N=5			
杭径	900(mm)			
肉厚	11.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=18273.17	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=8498.09	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1702.13	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=2282.53
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=18787.41	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=13931.85	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8556.57	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8068.11
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=18258.33	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=10975.56	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=4246.95	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=7779.73
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=10832.32	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2655.99	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=3406.19
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=7598.95	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=4781.93

付表 C-11 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=15, 杭諸元①)

断面	-16m, N=15			
杭径	900(mm)			
肉厚	11.0(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=33419.77	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=16810.71	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1686.65	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=3569.24
	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=34472.03	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=24118.35	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=12328.96	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=11937.03
	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=32545.69	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=16339.86	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=5564.26	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=12230.1
	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=20614.93	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=3497.07	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5836.12	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5836.12
	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=12018.7	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=12018.7	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=12018.7	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=8462.82
清水			全塑性	

付表 C-12 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=1, 杭諸元②)

断面	-10m, N=1			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.4(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=8092.34	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=3897.74	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1329.85
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8314.94	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=6961.78	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=4697.11	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=4584.37
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=8179.34	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=5917.28	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=2883.52	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=4745.73
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5026.63	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=1738.14	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2097.15
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=3683.01	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=2247.91

付表 C-13 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=5, 杭諸元②)

断面	-10m, N=5			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.0(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=16903.71	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=9230.26	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=2452.1
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=17159.46	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=13444.76	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=7964.66	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=7692.94
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=16587.94	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=9555.66	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=4687.32	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=7071.67
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9106石巻 Gmax=11198.92	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106石巻 Gmax=3854.54
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=7624.35	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=5580.58

付表 C-14 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=10, 杭諸元②)

断面	-10m, N=10			
杭径	700(mm)			
肉厚	9.7(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=22912.24	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=12760.74	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=3578.73
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=23125.95	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=17599.44	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=9427.59	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=9150.94
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=22215.54	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=11061.56	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=4763.87	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=7069.96
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=15085.81	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=3298.75	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5145.54
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=9267.25	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=6575.04

付表 C-15 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=15, 杭諸元②)

断面	-10m, N=15			
杭径	700(mm)			
肉厚	9.6(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=29962.95	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=17184.73	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=5332.22
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=30145.75	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=22468.34	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11802.43	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11407.55
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=29029.3	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=13647.14	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=5561.42	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=8467.61
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=19315.75	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=4620.35	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=7181.27
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=11696.65	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=8307.3

付表 C-16 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=1, 杭諸元②)

断面	-13m, N=1			
杭径	700(mm)			
肉厚	11.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=8780.55	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=4566.73	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1443.52	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1915.5
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8902.08	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=7721.76	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=5464.94	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=5369.38
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=8846.99	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=6548.73	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=3209.92	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=5186
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5729.87	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2434.68	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2803.13
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=4201.18	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=2535.91

付表 C-17 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=5, 杭諸元②)

断面	-13m, N=5			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.9(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=18057.09	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=9681.21	全塑性	全塑性
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=18142.2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=14038.05	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8274.4	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=8011.91
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=17786.71	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=10613.49	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=4929.75	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=8151.77
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9106石巻 Gmax=11550.6	全塑性	全塑性
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=8088.66	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=5750.04

付表 C-18 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=10, 杭諸元②)

断面	-13m, N=10			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.6(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=25699.47	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=14477.1	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=3458.15
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=25805.61	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=19411.56	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=9942.35	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=9600.96
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=25134.85	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=13760.32	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=5482.4	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=9095.18
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9106石巻 Gtmax=16719.56	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106石巻 Gtmax=5497.18
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=10631.34	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=7626.83

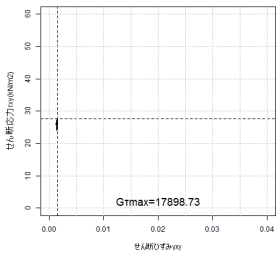
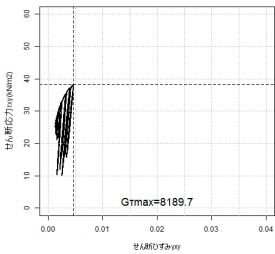
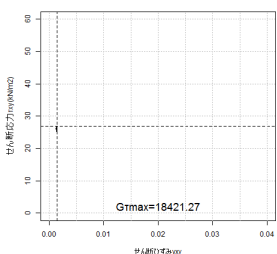
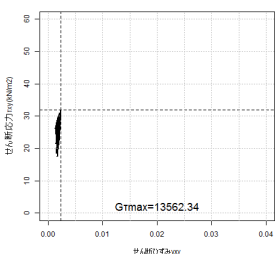
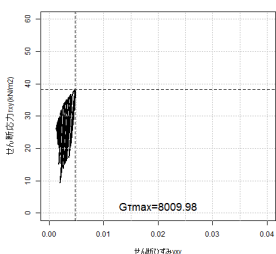
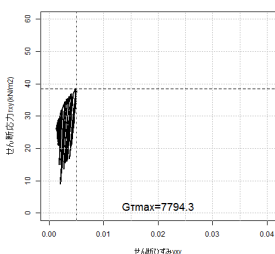
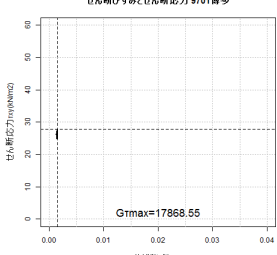
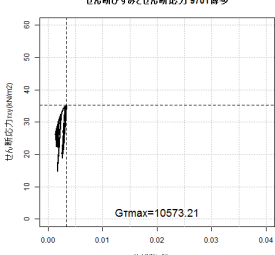
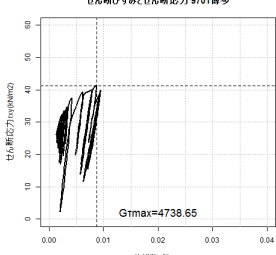
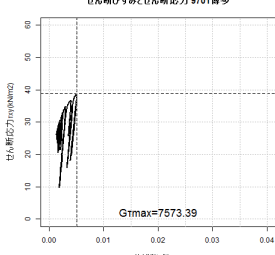
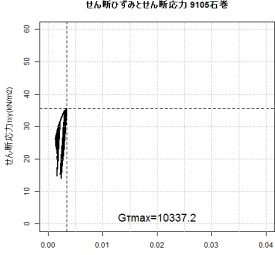
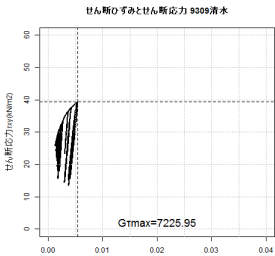
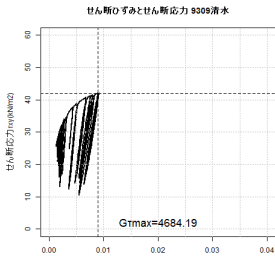
付表 C-19 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=15, 杭諸元②)

断面	-13m, N=15			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=33405.07	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=19357.84	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 全塑性 Gtmax=4871.23	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=4871.23
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=33447.5	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=25339.95	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=12622.25	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11910.09
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=32784.15	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=17028.58	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=6531.1	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=10858.54
石巻	せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=22168.45	せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=22168.45	せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 全塑性 Gtmax=7626.9	せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=7626.9
清水	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=13424.49	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=13424.49	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 全塑性 Gtmax=9827.44	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=9827.44

付表 C-20 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=1, 杭諸元②)

断面	-16m, N=1			
杭径	800(mm)			
肉厚	11.1(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=8980.47	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=4360.27	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=1591.95	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=2173.37
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=9347.18	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=7870.97	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=5802.04	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=5715.98
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=9180.27	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=6428.29	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=3234.08	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=5099
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=5592.48	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=2673.69	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=3030.09
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=3683.81	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=2102.51

付表 C-21 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=5, 杭諸元②)

断面	-16m, N=5			
杭径	800(mm)			
肉厚	10.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸  Gmax=17898.73	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸  Gmax=8189.7	全塑性	全塑性
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国  Gmax=18421.27	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国  Gmax=13562.34	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国  Gmax=8009.98	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国  Gmax=7794.3
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多  Gmax=17868.55	せん断ひずみとせん断応力 9701博多  Gmax=10573.21	せん断ひずみとせん断応力 9701博多  Gmax=4738.65	せん断ひずみとせん断応力 9701博多  Gmax=7573.39
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9108石巻  Gmax=10337.2	全塑性	全塑性
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水  Gmax=7225.95	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水  Gmax=4684.19

付表 C-22 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=10, 杭諸元②)

断面	-16m, N=10			
杭径	800(mm)			
肉厚	10.2(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=22591.82	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=10037.24	全塑性	全塑性
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=22714.9	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=16402.42	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=7391.18	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=7110.69
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=22293.83	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=10328.96	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=4120.56	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=7508.41
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9106石巻 Gmax=12864.28	全塑性	全塑性
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=7461.74	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=5149.01

付表 C-23 2次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=15, 杭諸元②)

断面	-16m, N=15			
杭径	800(mm)			
肉厚	10.1(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=23909.48	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=15791.84	全塑性	全塑性
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=33869.69	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=23608.03	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=10997.26	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=10546.19
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=31935.92	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=14610.29	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=5979.24	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=10233.88
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9106石巻 Gtmax=19696.99	全塑性	全塑性
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=10864.05	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=7778.46

附録 D 1 次元地震応答解析におけるせん断剛性比

各計算事例における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比の算出結果を付表 D-1、付表 D-2 に示し、各計算事例におけるせん断応力とせん断ひずみの時刻歴の一部を付表 D-3～付表 D-23 に示す。

本研究では、設計した地震動の PSI 値を整理していないため詳細の検討はしないが、入力地震動の PSI 値や卓越周期と地盤のせん断剛性比には関係があると予想される。作用震度と地盤のせん断剛性比には相関性があるこ

とから、整理結果によっては入力地震動の PSI 値と卓越周期、原地盤の N 値から、直杭式桟橋のせん断剛性比を予測するための関係式を構築することが可能となるかもしれない。この場合、本研究で提案した照査用震度算出法と組み合わせることで、1 次元地震応答解析を用いずに簡易的に直杭式桟橋の照査用震度を予測することが可能となるため、今後の研究課題となり得るとは考えられる。

付表 D-1 1 次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比算出結果一覧(杭諸元①)

設計水深		-10m			-13m			-16m		
N 値		1	5	15	1	5	15	1	5	15
杭径(mm)		700	700	700	800	800	800	900	900	900
肉厚(mm)		14.9	14.1	13.4	13.2	12.4	11.9	12.3	11.5	11.0
5Gal	八戸	0.60	0.52	0.50	0.69	0.57	0.53	0.73	0.59	0.54
	岩国	0.67	0.62	0.58	0.74	0.66	0.62	0.72	0.67	0.63
	博多	0.62	0.59	0.55	0.79	0.64	0.58	0.76	0.65	0.59
10Gal	八戸	0.59	0.51	0.49	0.67	0.56	0.52	0.71	0.58	0.53
	岩国	0.66	0.61	0.57	0.74	0.65	0.61	0.71	0.66	0.62
	博多	0.60	0.57	0.53	0.77	0.62	0.57	0.74	0.63	0.58
20Gal	八戸	0.55	0.49	0.47	0.64	0.54	0.50	0.67	0.56	0.50
	岩国	0.64	0.58	0.55	0.73	0.66	0.59	0.70	0.64	0.59
	博多	0.57	0.53	0.50	0.73	0.58	0.54	0.70	0.59	0.54
50Gal	八戸	0.47	0.43	0.41	0.54	0.48	0.44	0.57	0.50	0.44
	岩国	0.59	0.52	0.50	0.70	0.59	0.53	0.67	0.60	0.53
	博多	0.56	0.44	0.42	0.65	0.49	0.45	0.61	0.49	0.45
100Gal	石巻	0.38	0.33	0.32	0.50	0.36	0.35	0.56	0.37	0.35
	八戸	0.36	0.34	0.33	0.41	0.39	0.35	0.43	0.39	0.35
	清水	0.38	0.31	0.29	0.44	0.34	0.31	0.41	0.34	0.31
	岩国	0.53	0.44	0.41	0.65	0.49	0.44	0.62	0.50	0.43
	博多	0.44	0.32	0.31	0.54	0.35	0.33	0.52	0.34	0.33
150Gal	八戸	0.26	0.27	0.26	0.33	0.30	0.28	0.33	0.31	0.28
	岩国	0.48	0.36	0.34	0.61	0.41	0.36	0.63	0.43	0.36
	博多	0.32	0.22	0.22	0.43	0.26	0.24	0.45	0.25	0.23
200Gal	石巻	0.24	0.18	0.17	0.35	0.21	0.18	0.42	0.23	0.18
	八戸	0.20	0.18	0.21	0.25	0.20	0.22	0.26	0.21	0.22
	清水	0.22	0.15	0.15	0.27	0.17	0.16	#N/A	0.16	0.15
	岩国	0.44	0.30	0.28	0.56	0.34	0.32	0.55	0.37	0.32
	博多	0.27	0.16	0.15	0.38	0.19	0.16	0.41	0.19	0.15
300Gal	石巻	0.18	0.10	0.09	0.25	0.14	0.10	0.26	0.16	0.10
	八戸	0.11	0.06	0.08	0.14	0.08	0.09	0.14	0.09	0.10
	清水	#N/A	#N/A	0.06	#N/A	#N/A	0.07	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.38	0.21	0.20	0.50	0.26	0.22	0.45	0.28	0.23
	博多	0.20	0.10	0.07	0.31	0.13	0.08	0.32	0.14	0.08
500Gal	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.30	0.13	0.10	0.37	0.18	0.12	0.38	0.20	0.13
	博多	0.14	0.06	0.04	0.22	0.08	0.04	0.21	0.09	0.04
L1 Original	石巻	0.20	0.14	0.12	0.28	0.17	0.13	0.33	0.19	0.13
	八戸	0.18	0.16	0.19	0.21	0.18	0.21	0.23	0.19	0.20
	常陸那珂	0.38	0.28	0.28	0.43	0.34	0.31	0.42	0.32	0.33
	千葉	0.42	0.37	0.35	0.52	0.42	0.37	0.50	0.42	0.38
	清水	0.31	0.24	0.24	0.38	0.27	0.26	0.35	0.26	0.25
	四日市	0.41	0.30	0.31	0.49	0.35	0.33	0.48	0.35	0.33
	舞鶴	0.37	0.20	0.13	0.38	0.24	0.16	0.38	0.25	0.17
	神戸	0.26	0.16	0.15	0.36	0.19	0.16	0.36	0.18	0.16
	岩国	0.37	0.20	0.19	0.49	0.25	0.21	0.44	0.27	0.22
	博多	0.30	0.20	0.19	0.41	0.23	0.21	0.43	0.23	0.20

※表中の「#N/A」は、2 次元地震応答解析において桟橋杭が全塑性した解析事例を示す。

付表 D-2 1 次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性比算出結果一覧(杭諸元②)

設計水深		-10m				-13m				-16m			
N値		1	5	10	15	1	5	10	15	1	5	10	15
杭径(mm)		700	700	700	700	700	700	700	700	800	800	800	800
肉厚(mm)		10.4	10.0	9.7	9.6	11.5	10.9	10.6	10.5	11.1	10.5	10.2	10.1
5Gal	八戸	0.58	0.51	0.50	0.48	0.66	0.55	0.55	0.52	0.70	0.57	0.54	0.52
	岩国	0.65	0.61	0.59	0.56	0.71	0.67	0.63	0.61	0.70	0.65	0.61	0.62
	博多	0.60	0.58	0.55	0.53	0.76	0.63	0.58	0.57	0.75	0.63	0.60	0.57
10Gal	八戸	0.56	0.50	0.49	0.47	0.64	0.54	0.54	0.51	0.69	0.56	0.53	0.51
	岩国	0.64	0.60	0.58	0.55	0.70	0.66	0.62	0.60	0.69	0.64	0.59	0.61
	博多	0.58	0.56	0.53	0.52	0.74	0.61	0.56	0.56	0.72	0.61	0.58	0.56
20Gal	八戸	0.54	0.48	0.47	0.45	0.61	0.52	0.52	0.49	0.65	0.54	0.51	0.49
	岩国	0.62	0.57	0.56	0.53	0.69	0.64	0.59	0.58	0.68	0.62	0.57	0.59
	博多	0.55	0.52	0.50	0.49	0.71	0.57	0.53	0.53	0.69	0.57	0.54	0.53
50Gal	八戸	0.46	0.42	0.41	0.40	0.51	0.47	0.47	0.43	0.55	0.48	0.45	0.43
	岩国	0.57	0.51	0.49	0.47	0.66	0.57	0.53	0.52	0.64	0.57	0.51	0.52
	博多	0.54	0.43	0.41	0.41	0.61	0.47	0.44	0.44	0.59	0.47	0.44	0.44
100Gal	石巻	0.36	0.33	0.31	0.31	0.45	0.35	0.35	0.34	0.52	0.35	0.34	0.34
	八戸	0.34	0.34	0.32	0.32	0.39	0.38	0.38	0.34	0.41	0.38	0.36	0.34
	清水	0.36	0.31	0.28	0.28	0.42	0.33	0.30	0.30	0.39	0.33	0.30	0.30
	岩国	0.50	0.43	0.40	0.39	0.61	0.47	0.43	0.43	0.59	0.49	0.43	0.42
	博多	0.41	0.31	0.29	0.29	0.50	0.34	0.31	0.32	0.50	0.33	0.32	0.31
150Gal	八戸	0.24	0.27	0.26	0.25	0.30	0.29	0.31	0.27	0.31	0.29	0.28	0.27
	岩国	0.45	0.35	0.33	0.32	0.57	0.39	0.37	0.37	0.55	0.41	0.38	0.35
	博多	0.32	0.22	0.21	0.21	0.39	0.25	0.22	0.23	0.42	0.23	0.22	0.22
200Gal	石巻	0.22	0.17	0.16	0.16	0.32	0.20	0.20	0.18	0.38	0.21	0.18	0.17
	八戸	0.18	0.18	0.20	0.20	0.23	0.20	0.26	0.22	0.24	0.20	0.22	0.21
	清水	#N/A	0.15	0.14	0.14	#N/A	0.17	0.16	0.15	#N/A	0.15	0.14	#N/A
	岩国	0.41	0.29	0.28	0.27	0.53	0.33	0.32	0.31	0.52	0.34	0.32	0.30
	博多	0.25	0.16	0.14	0.14	0.34	0.18	0.16	0.15	0.37	0.18	0.15	0.15
300Gal	石巻	0.16	#N/A	0.08	0.08	0.22	#N/A	#N/A	#N/A	0.24	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.13	#N/A	#N/A	#N/A	0.13	#N/A	#N/A	#N/A
	清水	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.34	0.21	0.19	0.19	0.46	0.25	0.25	0.21	0.44	0.26	0.23	0.21
	博多	0.18	0.09	0.07	0.06	0.27	0.13	0.11	0.08	0.30	0.12	0.09	0.07
500Gal	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	0.27	0.13	0.10	0.10	0.35	0.17	0.15	0.12	0.36	0.18	0.14	0.12
	博多	0.12	0.05	0.04	0.03	0.19	0.08	0.06	0.04	0.20	0.08	0.05	0.04
L1 Original	石巻	0.18	0.13	0.12	0.11	0.26	#N/A	0.16	0.13	0.31	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	0.17	0.16	0.18	0.19	0.20	#N/A	0.24	0.20	0.22	#N/A	#N/A	#N/A
	常陸那珂	0.36	0.27	0.27	0.27	0.41	0.32	0.32	0.30	0.41	0.35	0.32	0.31
	千葉	0.40	0.36	0.36	0.33	0.50	0.40	0.38	0.37	0.48	0.40	0.39	0.36
	清水	0.29	0.24	0.23	0.23	0.36	0.26	0.25	0.25	0.34	0.25	0.25	0.24
	四日市	0.38	0.30	0.29	0.30	0.46	0.33	0.33	0.32	0.46	0.33	0.32	0.32
	舞鶴	0.35	0.19	0.13	0.12	0.37	0.23	0.18	0.15	0.35	0.23	0.18	0.16
	神戸	0.23	0.15	0.14	0.14	0.32	0.18	0.17	0.16	0.35	0.17	0.16	0.15
	岩国	0.34	0.20	0.18	0.18	0.46	0.24	0.24	0.20	0.43	0.25	0.22	0.20
	博多	0.28	0.19	0.18	0.19	0.37	0.22	0.20	0.20	0.40	0.21	0.19	0.20

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において栈橋杭が全塑性した解析事例を示す。

付表 D-3 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=1, 杭諸元①)

断面	-10m, N=1			
杭径	700(mm)			
肉厚	14.9(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=14307.05kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=8780.67kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=2656.6kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=4505.32kN/m2
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=16058.47kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=12938.62kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=9272.57kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=9128.98kN/m2
博多	せん断ひずみとせん断応力 8701博多 Gtmax=14679.07kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 8701博多 Gtmax=10681.82kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 8701博多 Gtmax=4914.76kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 8701博多 Gtmax=7420.73kN/m2
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=9334.06kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=4506.92kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=4985.35kN/m2
清水		せん断ひずみとせん断応力 8309清水 Gtmax=9188.81kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 8309清水 Gtmax=7582.08kN/m2

付表 D-4 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=5, 杭諸元①)

断面	-10m, N=5			
杭径	700(mm)			
肉厚	14.1(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=27272.84kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=18377.42kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=3401.18kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=8551.4kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=32469.73kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=23409.73kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11341.28kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=10918.09kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=30365.81kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=17065.26kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=5236.37kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=10686.07kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=17746.82kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=5543.17kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=7306.16kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=7306.16kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=16746.03kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=13098.43kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=13098.43kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=13098.43kN/m2
清水			全塑性	

付表 D-5 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=15, 杭諸元①)

断面	-10m, N=15			
杭径	700(mm)			
肉厚	13.4(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=51479.89kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=34575kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=8615.66kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gmax=20382.6kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=60181.4kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=43388.04kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=20945.51kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gmax=19945.49kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=56381.78kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=32240.37kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=7327.03kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gmax=20586.65kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=34097.43kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=8995.28kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=8995.28kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gmax=12552.94kN/m2
清水	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=30649.48kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=6583.34kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=6583.34kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gmax=25314kN/m2

付表 D-6 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=1, 杭諸元①)

断面	-13m, N=1			
杭径	800(mm)			
肉厚	13.2(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=16404.89kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=10013.41kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=3468.02kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=5155.23kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=17974.27kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=15940.44kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=12202.32kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11909.15kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=18772.23kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=13233.6kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=7565.57kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=10117.85kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=12202.8kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=6104.29kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=5940.1kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=5940.1kN/m2
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=10759.62kN/m2	全塑性	
		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=9286.55kN/m2		

付表 D-7 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=5, 杭諸元①)

断面	-13m, N=5			
杭径	800(mm)			
肉厚	12.4(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=29899.96kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=20692.15kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=4367.44kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=9702.7kN/m2
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=34773.58kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=26229.67kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=13998.54kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=13528.44kN/m2
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=33275.19kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=18930.86kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=7186.8kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=12428.21kN/m2
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=19540.45kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=7413.17kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=9219.28kN/m2
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=18237.79kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=14411.11kN/m2

付表 D-8 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=15, 杭諸元①)

断面	-13m, N=15			
杭径	800(mm)			
肉厚	11.9(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=54491.58kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=36902.27kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=9630.91kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=21950.71kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=64764.14kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=46196.19kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=23019.13kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=21841.7kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=59920.78kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=34575.94kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=8329.33kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=22060kN/m2
	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=36595.17kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=10367.38kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=13981.47kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=13981.47kN/m2
清水	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=32695.22kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=7328.3kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=7328.3kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=27169.2kN/m2

付表 D-9 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=1, 杭諸元①)

断面	-16m, N=1			
杭径	900(mm)			
肉厚	12.3(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=18783.96kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=11289.91kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=3777.58kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=6211.74kN/m²
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=18923.09kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=16393.45kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11890.43kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11728.54kN/m²
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=19657.01kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=13895.05kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=8569.62kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=11509.8kN/m²
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=14841.62kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=6858.98kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=8613.81kN/m²
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=10804.85kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=9350.78kN/m²

付表 D-10 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=5, 杭諸元①)

断面	-16m, N=5			
杭径	900(mm)			
肉厚	11.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=32525.13kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=21926.05kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=4830.58kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=10590.06kN/m2
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=37146.66kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=28239.01kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=15624.15kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=15193.2kN/m2
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=35185.73kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=19226.54kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=7568.69kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=12622.68kN/m2
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=20853.56kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=9162.97kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=10863.8kN/m2
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=18950.56kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=14579.28kN/m2

付表 D-11 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=15, 杭諸元①)

断面	-16m, N=15			
杭径	900(mm)			
肉厚	11.0(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 G_{max}=6.88kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 G_{max}=38.83kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 G_{max}=107.55kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 G_{max}=222.39kN/m²
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 G_{max}=6.26kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 G_{max}=47.59kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 G_{max}=246.27kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 G_{max}=234.65kN/m²
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 G_{max}=6.28kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 G_{max}=35.67kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 G_{max}=63.47kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 G_{max}=224.4kN/m²
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 G_{max}=38.46kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 G_{max}=110.6kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 G_{max}=146.37kN/m²
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 G_{max}=33.89kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 G_{max}=277.59kN/m²

付表 D-12 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=1, 杭諸元②)

断面	-10m, N=1			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.4(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 G_{max}=13792.27kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 G_{max}=8338.47kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 G_{max}=4121.3kN/m²
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 G_{max}=15560.62kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 G_{max}=12232.88kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 G_{max}=8390.04kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 G_{max}=8242.27kN/m²
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 G_{max}=14185.61kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 G_{max}=10050.76kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 G_{max}=4416.71kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 G_{max}=6920.09kN/m²
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 G_{max}=8751.26kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 G_{max}=3928.69kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 G_{max}=4415.79kN/m²
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 G_{max}=8770.78kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 G_{max}=7198.86kN/m²

付表 D-13 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=5, 杭諸元②)

断面	-10m, N=5			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.0(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=26893.36kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=18068.92kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=8330.94kN/m2
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=31918.78kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=22890.07kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11093.25kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=10615.81kN/m2
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=29910.81kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=16771.23kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=5030.33kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=10428.29kN/m2
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=17454.31kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=7073.66kN/m2
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=16497.8kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=12882.72kN/m2

付表 D-14 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=10, 杭諸元②)

断面	-10m, N=10			
杭径	700(mm)			
肉厚	9.7(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=39872.17kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=26510.9kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=14935.67kN/m²
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=47041.05kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=33004.6kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=15619.15kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=14925.04kN/m²
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=43402.35kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=24026.46kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=5723.23kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=14790.33kN/m²
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=25639.25kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=6930.22kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=9473.23kN/m²
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=22800.31kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=18992.14kN/m²

付表 D-15 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-10m, N=15, 杭諸元②)

断面	-10m, N=15			
杭径	700(mm)			
肉厚	9.6(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=49988.49kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=33394.65kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=19596.48kN/m2
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=57975.05kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=41418.41kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=20581.37kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=19107.13kN/m2
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=54644.37kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=31053.83kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=6863.43kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=19551.41kN/m2
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=32850.05kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=8380.51kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=11883.37kN/m2
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=29602.33kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=24376.53kN/m2

付表 D-16 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=1, 杭諸元②)

断面	-13m, N=1			
杭径	700(mm)			
肉厚	11.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=15657.8kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=9430.93kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=3135.73kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=4876.46kN/m²
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=17203.51kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=14928.63kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11345.33kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11213.66kN/m²
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=18120.66kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=12195.66kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=6510.65kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=8993.27kN/m²
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=11059.89kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=5469.13kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=6396.02kN/m²
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=10186.55kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=8727.17kN/m²

付表 D-17 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=5, 杭諸元②)

断面	-13m, N=5			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.9(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=29171.39kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=20166.78kN/m²	全塑性	全塑性
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=35400.33kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=25429.88kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=13198.88kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=12808.87kN/m²
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=32464.74kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=18370.55kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=6746.72kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=11875.6kN/m²
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=19020.53kN/m²	全塑性	全塑性
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=17808.32kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=14008.27kN/m²

付表 D-18 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=10, 杭諸元②)

断面	-13m, N=10			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.6(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=44052.85kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=31415.05kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=19662.96kN/m2
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=50280.77kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=35508.17kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=20044.92kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=19397.25kN/m2
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=46090.55kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=24938.75kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=9038.29kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=16197.02kN/m2
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=28522.26kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=13181.57kN/m2
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=24834.92kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=20010.89kN/m2

付表 D-19 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-13m, N=15, 杭諸元②)

断面	-13m, N=15			
杭径	700(mm)			
肉厚	10.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=63628.68kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=36215.76kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=21486.25kN/m²
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=63792.78kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=45551.25kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=22333.4kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=21245.9kN/m²
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=58891.33kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=21245.9kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=7987.08kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=21551.99kN/m²
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=35775.39kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=13510.99kN/m²
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=31974.16kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=26520.35kN/m²

付表 D-20 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=1, 杭諸元②)

断面	-16m, N=1			
杭径	800(mm)			
肉厚	11.1(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=18195.44kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=10848.7kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=3503.38kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=5839.37kN/m2
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=18340.3kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=15666.8kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11640.77kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=11404.28kN/m2
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=19181.82kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=13149.82kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=7890.78kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=10671.3kN/m2
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=13794.15kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=6380.56kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9105石巻 Gtmax=8099.13kN/m2
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=10391.43kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=8906.07kN/m2

付表 D-21 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=5, 杭諸元②)

断面	-16m, N=5			
杭径	800(mm)			
肉厚	10.5(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=31473.88kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=21499.14kN/m²	全塑性	全塑性
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=35682.55kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=27190.1kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=14612.99kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=14219.38kN/m²
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=34025.42kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=18377.18kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=6946.84kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=11810.59kN/m²
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=19853.95kN/m²	全塑性	全塑性
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=18312.28kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=13954.55kN/m²

付表 D-22 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=10, 杭諸元②)

断面	-16m, N=10			
杭径	800(mm)			
肉厚	10.2(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=45101.69kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=30118.93kN/m2	全塑性	全塑性
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=50346.42kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=36536.51kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=19094.98kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=18418.56kN/m2
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=48974.92kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=26848.15kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=7308.32kN/m2	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=16149.63kN/m2
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9108石巻 Gtmax=28986.53kN/m2	全塑性	全塑性
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=25541.64kN/m2	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=21053.78kN/m2

付表 D-23 1次元地震応答解析における仮想固定点周辺地盤のせん断剛性の時刻歴(-16m, N=15, 杭諸元②)

断面	-16m, N=15			
杭径	800(mm)			
肉厚	10.1(mm)			
波形	10Gal	100Gal	300Gal	L1
八戸	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=66021.96kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9106八戸 Gtmax=37280.45kN/m²	全塑性	全塑性
岩国	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=66480.33kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=46162.3kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=23467.84kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9516岩国 Gtmax=22366.09kN/m²
博多	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=61074.06kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=34366.45kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=7808.03kN/m²	せん断ひずみとせん断応力 9701博多 Gtmax=21340.55kN/m²
石巻		せん断ひずみとせん断応力 9106石巻 Gtmax=37056.77kN/m²	全塑性	全塑性
清水		せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=32759.34kN/m²	全塑性	せん断ひずみとせん断応力 9309清水 Gtmax=26652.32kN/m²

附録 E 2次元地震応答解析における上部工加速度最大値

付表 E-1 2次元地震応答解析における上部工加速度最大値(1)

設計水深		-10m			-13m			-16m		
N値		1	5	15	1	5	15	1	5	15
杭径(mm)		700	700	700	800	800	800	900	900	900
肉厚(mm)		14.9	14.1	13.4	13.2	12.4	11.9	12.3	11.5	11.0
5Gal	八戸	16.29	18.82	15.37	13.83	18.70	15.78	15.06	14.81	12.89
	岩国	8.85	12.08	10.73	6.29	9.39	7.90	5.30	6.82	6.08
	博多	16.00	21.82	18.18	12.85	19.89	16.68	8.17	10.28	8.22
10Gal	八戸	29.80	33.65	27.46	26.57	35.66	30.38	29.50	29.85	23.21
	岩国	17.01	22.59	19.72	12.30	18.12	15.35	10.14	13.18	11.86
	博多	29.37	38.65	32.06	24.50	38.51	33.11	16.15	20.42	16.45
20Gal	八戸	51.53	59.34	50.01	50.59	64.32	56.35	56.60	59.92	46.58
	岩国	31.89	40.97	35.48	23.32	34.45	29.15	18.74	24.78	22.54
	博多	50.75	64.91	54.96	46.01	69.47	63.00	31.54	40.24	33.47
50Gal	八戸	119.48	128.38	111.04	120.39	124.33	113.04	138.65	137.43	122.10
	岩国	66.70	79.08	67.72	51.21	72.46	66.48	38.18	52.83	49.29
	博多	97.03	116.56	94.67	95.82	139.88	133.12	74.85	92.73	86.22
100Gal	石巻	163.32	195.13	173.33	143.21	165.11	144.47	145.17	174.39	164.59
	八戸	247.13	247.08	206.72	242.36	211.24	202.90	252.24	304.91	258.74
	清水	250.84	336.07	306.67	200.14	268.99	252.90	199.02	259.80	244.70
	岩国	108.04	129.32	112.12	90.74	130.36	126.34	68.53	90.42	83.36
	博多	147.36	184.88	171.57	158.64	209.86	210.00	137.71	171.23	171.59
150Gal	八戸	373.59	393.67	316.00	343.43	341.59	274.59	282.65	428.81	415.69
	岩国	141.25	173.72	154.69	137.46	172.36	166.80	93.79	139.93	115.81
	博多	201.25	257.69	251.99	201.46	258.89	262.63	168.51	238.46	244.53
200Gal	石巻	274.45	297.19	273.04	290.90	284.34	286.97	275.43	322.67	271.10
	八戸	420.39	543.01	484.99	380.14	482.52	419.29	320.06	462.97	542.70
	清水	355.02	440.54	489.95	367.76	355.39	455.62	#N/A	373.38	373.17
	岩国	164.82	206.88	188.44	170.93	216.30	198.27	117.94	176.82	162.07
	博多	251.23	307.95	334.16	268.13	294.99	319.92	209.18	283.53	302.23
300Gal	石巻	359.04	414.63	399.83	343.23	415.51	390.39	287.99	437.43	471.82
	八戸	427.92	646.07	730.74	488.49	577.86	662.56	503.55	461.08	585.78
	清水	#N/A	#N/A	499.66	#N/A	#N/A	480.16	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	193.95	252.62	237.91	224.23	283.92	282.90	165.21	203.09	227.81
	博多	301.34	398.19	424.54	416.21	353.82	377.60	364.83	373.62	403.18
500Gal	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	290.98	350.51	359.21	301.05	341.99	371.03	229.15	301.41	276.88
	博多	498.93	416.23	475.05	702.03	509.29	438.35	629.83	463.08	474.11
L1 Original	石巻	332.78	365.01	340.47	333.48	322.03	310.40	271.85	396.71	363.33
	八戸	420.75	575.81	530.16	388.27	511.51	466.60	345.01	456.16	570.14
	常陸那珂	372.69	437.26	362.31	264.21	360.01	334.13	292.74	420.78	397.06
	千葉	267.50	344.92	294.59	206.91	315.65	290.11	194.43	300.22	283.78
	清水	282.03	408.49	397.36	222.10	343.55	363.14	249.46	293.93	317.21
	四日市	256.64	291.09	234.94	224.67	265.01	237.79	230.75	287.69	227.55
	舞鶴	150.90	186.81	189.68	183.99	193.81	194.64	133.07	146.09	161.57
	神戸	260.62	348.11	307.57	239.83	327.76	320.05	286.61	395.67	369.43
	岩国	196.92	261.59	242.45	230.19	289.37	290.47	169.84	202.99	233.45
	博多	217.28	277.89	281.02	219.95	272.87	275.72	178.66	250.44	268.10

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において栈橋杭が全塑性した解析事例を示す。

付表 E-2 2次元地震応答解析における上部工加速度最大値(2)

設計水深		-10m				-13m				-16m			
N値		1	5	10	15	1	5	10	15	1	5	10	15
杭径(mm)		700	700	700	700	700	700	700	700	800	800	800	800
肉厚(mm)		10.4	10.0	9.7	9.6	11.5	10.9	10.6	10.5	11.1	10.5	10.2	10.1
5Gal	八戸	17.85	16.18	14.15	13.27	16.24	15.24	13.79	13.11	19.04	16.81	14.70	13.97
	岩国	4.86	5.56	4.79	4.40	4.70	5.20	4.55	4.26	3.35	2.77	2.32	2.14
	博多	9.24	9.95	8.56	8.11	8.49	8.71	7.56	6.83	10.26	8.20	6.91	6.45
10Gal	八戸	32.87	30.57	27.06	25.50	32.31	27.99	25.07	24.14	35.97	32.11	27.83	26.50
	岩国	9.38	10.78	9.32	8.57	9.35	9.94	8.68	8.08	6.65	5.59	4.68	4.30
	博多	16.94	17.70	15.41	14.15	16.69	17.32	15.26	13.90	20.40	16.58	13.84	12.84
20Gal	八戸	65.74	56.22	49.74	47.52	63.75	56.71	50.26	47.06	69.37	61.23	53.91	50.93
	岩国	17.55	20.10	17.54	16.20	18.41	19.66	17.35	15.85	13.26	11.36	9.61	8.83
	博多	33.32	35.01	31.25	28.56	31.87	35.08	31.47	28.87	41.47	34.57	28.82	26.57
50Gal	八戸	157.25	148.04	131.58	123.59	146.46	137.67	122.51	114.96	165.38	144.38	124.40	119.39
	岩国	43.34	46.56	41.50	38.11	41.28	46.80	41.61	38.68	35.23	30.29	25.81	23.49
	博多	79.44	89.13	82.39	77.32	76.18	78.99	73.54	70.04	94.61	88.05	77.95	73.93
100Gal	石巻	183.02	158.39	144.43	138.05	197.61	143.38	129.75	124.88	307.34	210.99	160.75	139.81
	八戸	286.94	286.21	256.27	239.49	244.72	260.62	239.04	226.31	315.67	317.87	293.15	281.33
	清水	239.09	244.88	221.64	209.20	238.93	232.03	202.42	185.43	330.91	321.27	281.35	266.03
	岩国	77.32	88.35	79.40	74.78	67.45	72.75	65.60	62.81	66.07	59.95	53.14	50.63
150Gal	博多	145.47	159.35	146.45	138.66	141.64	137.51	126.48	120.91	158.99	145.13	131.66	126.86
	八戸	361.21	414.60	380.48	359.24	368.74	377.52	337.77	316.05	417.04	459.01	434.67	415.46
	岩国	103.58	115.41	104.78	100.68	88.52	96.00	85.87	80.62	94.75	88.11	76.67	72.03
200Gal	博多	227.40	227.18	203.97	187.29	211.20	223.77	201.32	186.46	242.41	213.32	188.38	177.36
	石巻	429.86	359.39	287.17	257.93	391.04	407.30	324.03	284.88	436.39	553.99	505.08	473.51
	八戸	429.70	502.66	483.02	461.70	456.77	516.97	487.56	467.01	454.89	585.47	563.54	551.37
	清水	#N/A	503.35	502.23	503.24	#N/A	469.11	497.72	493.38	#N/A	494.74	519.62	#N/A
300Gal	岩国	130.07	137.08	123.43	117.10	109.57	117.94	105.49	97.88	121.54	109.94	100.67	96.27
	博多	306.97	334.46	305.40	285.23	247.58	277.04	260.28	253.03	289.75	294.75	270.22	254.82
	石巻	456.72	#N/A	566.99	505.79	447.19	#N/A	#N/A	#N/A	412.83	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	522.17	#N/A	#N/A	#N/A	445.26	#N/A	#N/A	#N/A
500Gal	清水	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	166.37	186.27	168.17	158.28	152.45	156.79	144.83	134.62	182.14	156.25	135.42	128.07
	博多	389.44	439.00	425.01	411.80	329.70	362.89	346.42	333.67	310.39	376.43	377.57	369.48
	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
L1 Original	岩国	281.52	290.37	260.00	242.62	246.74	248.21	222.96	207.20	245.81	272.88	250.46	242.78
	博多	441.55	573.85	585.48	572.35	440.39	473.63	495.60	497.60	497.37	458.26	495.40	500.94
	石巻	450.80	503.69	410.71	359.46	428.34	#N/A	472.72	412.46	440.96	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	458.30	517.59	510.60	487.66	479.04	#N/A	528.79	504.77	453.84	#N/A	#N/A	#N/A
	常陸那珂	402.26	373.34	326.22	305.08	363.96	328.66	297.27	279.31	353.32	407.54	341.78	313.55
	千葉	239.64	244.38	219.83	207.22	204.12	194.39	183.73	179.70	260.70	196.96	185.29	177.04
	清水	312.54	330.81	297.34	271.33	306.70	331.62	299.95	275.11	362.51	419.72	393.82	367.42
	四日市	274.37	259.37	222.37	204.14	240.95	222.78	204.40	195.61	279.80	241.10	214.02	200.20
	舞鶴	108.02	140.25	143.19	141.81	113.36	134.48	135.10	132.91	111.46	91.20	85.73	88.44
	神戸	420.95	391.31	343.37	320.84	340.51	350.59	310.11	288.98	357.40	358.53	326.56	311.47
	岩国	171.16	191.33	173.66	162.72	158.57	160.47	149.86	139.29	188.79	164.47	141.44	132.99
	博多	258.37	260.15	235.21	217.80	223.51	244.61	224.37	213.46	264.87	241.36	213.42	199.17

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において桟橋杭が全塑性した解析事例を示す。

附録 F 1 次元地震応答解析における加速度応答値

付表 F-1 1 次元地震応答解析における加速度応答値(減衰定数 h=4%) (1)

設計水深		-10m			-13m			-16m		
N値		1	5	15	1	5	15	1	5	15
杭径(mm)		700	700	700	800	800	800	900	900	900
肉厚(mm)		14.9	14.1	13.4	13.2	12.4	11.9	12.3	11.5	11.0
5Gal	八戸	14.47	14.60	11.54	12.46	14.32	11.26	12.27	9.77	8.82
	岩国	8.74	8.18	6.39	6.11	7.95	6.37	3.49	4.49	4.32
	博多	14.76	17.99	13.92	11.80	16.96	13.69	6.23	8.40	7.80
10Gal	八戸	27.39	26.97	21.53	24.08	30.05	23.86	24.03	19.58	17.68
	岩国	17.27	16.39	12.81	12.05	15.88	12.77	6.96	9.00	8.65
	博多	26.25	33.78	25.82	22.75	34.96	28.18	12.45	16.83	15.66
20Gal	八戸	52.36	49.20	39.75	44.78	60.58	47.98	43.91	39.60	35.50
	岩国	32.81	33.16	25.60	26.28	31.32	25.66	13.80	18.05	16.35
	博多	44.36	53.44	42.29	42.15	70.01	57.05	24.82	31.79	29.12
50Gal	八戸	127.53	117.06	92.23	109.67	117.76	108.03	117.61	105.97	92.82
	岩国	61.47	73.80	58.79	53.26	78.68	66.09	33.66	39.16	38.43
	博多	80.68	133.38	108.67	63.84	168.68	144.60	55.41	74.58	64.72
100Gal	石巻	185.37	210.61	168.70	156.35	196.74	144.94	127.35	134.87	135.53
	八戸	263.87	241.31	191.90	237.10	214.49	199.15	207.46	230.24	202.10
	清水	230.88	315.56	263.30	178.55	329.66	329.63	237.73	180.60	189.13
	岩国	103.10	132.26	106.54	77.96	151.11	127.01	63.24	79.22	72.49
	博多	141.29	192.61	163.62	109.01	233.57	219.54	92.49	144.97	133.80
150Gal	八戸	377.02	384.17	316.62	408.76	364.43	282.44	369.63	350.17	331.10
	岩国	128.53	177.66	143.24	102.77	165.21	159.13	84.03	98.37	102.43
	博多	164.58	252.99	235.05	136.80	234.68	244.30	177.51	195.17	209.34
200Gal	石巻	308.80	361.19	288.97	256.12	279.53	350.57	490.15	228.81	237.52
	八戸	628.47	531.81	459.16	526.94	494.98	450.11	374.91	450.35	448.44
	清水	362.96	574.70	401.24	530.34	546.84	394.11	#N/A	499.82	525.03
	岩国	146.60	186.74	158.49	114.21	217.28	190.25	102.44	126.58	122.69
	博多	193.31	317.41	317.17	163.56	272.13	306.97	197.22	231.23	255.18
300Gal	石巻	404.39	439.27	379.89	630.91	401.31	414.12	562.81	351.75	331.00
	八戸	683.16	869.61	722.03	560.08	790.66	701.42	641.71	906.47	817.94
	清水	#N/A	#N/A	765.17	#N/A	#N/A	727.82	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	193.06	273.39	242.75	160.22	291.20	269.49	104.20	158.78	144.89
	博多	218.76	361.27	433.46	221.06	328.44	411.16	274.94	364.44	370.49
500Gal	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	274.33	344.40	316.08	182.12	436.41	357.82	169.28	191.42	231.78
	博多	395.94	405.97	469.64	289.84	493.95	421.20	255.30	469.28	521.90
L1 Original	石巻	354.06	373.12	379.68	295.03	340.77	358.61	556.08	286.56	285.31
	八戸	657.87	566.61	496.09	544.97	525.65	485.58	400.44	508.52	483.60
	常陸那珂	334.81	427.92	328.24	279.07	385.09	321.70	269.66	293.95	276.23
	千葉	333.33	338.45	295.57	265.08	352.87	291.14	165.57	242.80	214.17
	清水	340.31	300.03	343.11	349.05	402.67	369.68	299.48	264.96	226.42
	四日市	241.75	272.31	222.48	199.57	268.45	235.77	186.79	197.50	187.11
	舞鶴	94.96	167.05	173.16	66.20	137.20	188.31	54.26	96.47	121.87
	神戸	325.34	382.35	314.43	287.93	352.23	331.01	247.69	302.35	262.86
	岩国	198.30	263.18	235.71	164.41	301.55	280.60	111.52	165.92	151.45
	博多	172.52	274.08	263.64	125.95	241.22	271.18	184.31	200.78	224.46

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において栈橋杭が全塑性した解析事例を示す。

付表 F-2 1 次元地震応答解析における加速度応答値(減衰定数 h=4%) (2)

設計水深		-10m				-13m				-16m			
N値		1	5	10	15	1	5	10	15	1	5	10	15
杭径(mm)		700	700	700	700	700	700	700	700	800	800	800	800
肉厚(mm)		10.4	10.0	9.7	9.6	11.5	10.9	10.6	10.5	11.1	10.5	10.2	10.1
5Gal	八戸	16.46	11.44	9.98	9.50	14.01	11.02	9.71	9.53	12.04	11.15	10.53	10.32
	岩国	4.88	4.58	3.96	3.70	4.17	4.00	3.62	3.37	2.02	1.80	1.90	1.85
	博多	8.95	8.90	7.09	6.43	6.78	7.97	7.00	6.32	5.79	4.82	4.59	4.47
10Gal	八戸	31.34	22.99	20.00	19.03	27.80	22.99	19.41	18.77	23.95	22.35	21.12	20.51
	岩国	9.70	9.17	7.94	7.42	8.29	8.02	7.26	6.75	4.04	3.58	3.50	3.70
	博多	16.38	17.04	14.27	12.94	13.91	15.40	13.55	12.22	12.14	9.78	9.21	8.98
20Gal	八戸	63.85	48.37	41.05	39.06	56.73	46.56	39.86	38.68	47.10	44.22	42.11	40.87
	岩国	18.94	18.43	14.83	13.85	16.15	15.33	13.33	12.45	8.09	7.13	7.00	6.78
	博多	33.03	34.45	27.92	26.25	27.19	29.83	27.18	24.89	24.95	20.41	18.23	17.57
50Gal	八戸	159.74	124.49	110.39	104.83	141.36	125.52	113.02	109.43	146.51	107.93	100.92	97.46
	岩国	47.72	39.66	34.71	32.72	38.96	37.31	33.55	32.17	18.84	15.23	16.03	15.59
	博多	81.08	81.70	70.82	65.33	62.07	72.75	65.39	62.78	59.10	54.40	51.10	49.37
100Gal	石巻	179.96	150.48	133.13	130.48	150.92	133.84	124.16	119.25	232.63	146.51	132.91	99.24
	八戸	304.35	265.09	237.53	224.43	251.11	249.07	223.13	219.32	270.28	260.55	249.96	243.51
	清水	272.26	218.75	187.31	174.19	301.43	221.28	181.21	181.25	248.00	216.78	201.45	196.09
	岩国	90.82	79.56	69.29	65.10	69.51	65.87	58.44	54.94	37.70	31.97	29.53	28.51
150Gal	博多	133.00	139.02	122.39	113.78	104.83	121.18	109.68	106.47	101.94	91.85	88.02	85.00
	八戸	396.47	402.89	360.38	343.97	448.45	410.24	379.91	338.55	373.56	364.46	343.19	332.22
	岩国	117.17	106.52	91.31	84.81	82.74	88.75	77.58	73.30	56.00	49.88	46.96	44.48
200Gal	博多	168.26	183.62	167.99	170.72	224.73	193.56	166.96	162.26	156.25	141.32	131.97	126.74
	石巻	406.23	268.27	243.37	228.20	357.41	316.61	274.55	214.24	253.43	483.42	460.82	446.91
	八戸	713.08	552.21	497.06	471.13	555.79	576.11	452.20	488.49	442.25	468.81	479.05	460.38
	清水	#N/A	593.25	525.36	488.68	#N/A	547.24	441.83	478.44	#N/A	466.07	481.99	#N/A
	岩国	124.51	129.72	109.97	101.48	91.05	93.75	79.43	86.36	69.79	63.96	63.76	61.94
300Gal	博多	328.44	293.75	255.53	233.28	251.86	225.96	187.06	199.44	212.29	196.84	185.58	178.66
	石巻	442.50	#N/A	457.89	444.06	362.17	#N/A	#N/A	#N/A	598.94	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	602.40	#N/A	#N/A	#N/A	668.84	#N/A	#N/A	#N/A
	清水	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	145.38	159.76	136.18	123.41	145.58	111.30	96.60	110.23	106.04	93.11	88.42	87.05
500Gal	博多	368.32	391.11	354.38	331.69	321.05	346.16	289.86	313.51	189.22	245.41	296.80	299.15
	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	276.21	220.15	191.60	179.64	214.53	182.37	172.31	175.25	171.32	151.15	140.97	143.09
L1 Original	博多	427.45	571.44	600.82	596.89	246.82	524.85	501.97	569.87	268.76	287.72	379.73	394.51
	石巻	384.18	405.91	301.19	282.34	334.47	#N/A	362.88	360.98	569.52	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	686.13	673.25	583.10	508.20	577.49	#N/A	488.66	532.83	417.97	#N/A	#N/A	#N/A
	常陸那珂	389.14	341.08	295.08	275.15	324.24	327.45	279.72	280.36	298.52	250.73	233.92	220.97
	千葉	248.01	240.80	203.95	189.91	210.12	183.49	156.85	167.46	169.96	143.58	132.39	135.70
	清水	431.89	315.52	274.02	253.90	367.85	339.77	250.93	257.18	310.98	306.10	278.36	265.75
	四日市	266.47	220.96	191.84	178.88	229.28	207.42	180.65	176.95	166.27	166.29	158.32	155.81
	舞鶴	63.20	114.98	122.02	122.20	59.75	105.38	126.22	116.49	52.46	65.92	74.30	72.50
	神戸	436.52	359.26	306.82	283.86	327.59	331.90	272.15	279.11	206.17	237.19	221.06	231.85
	岩国	149.19	167.37	142.39	129.61	151.42	116.58	99.73	103.15	110.68	96.43	92.30	89.58
	博多	278.57	206.71	187.43	177.72	227.28	190.22	174.19	186.66	174.38	159.20	148.63	142.74

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において桟橋杭が全塑性した解析事例を示す。

付表 F-3 1 次元地震応答解析における加速度応答値(減衰定数 $h=20\%$) (1)

設計水深		-10m			-13m			-16m		
N値		1	5	15	1	5	15	1	5	15
杭径(mm)		700	700	700	800	800	800	900	900	900
肉厚(mm)		14.9	14.1	13.4	13.2	12.4	11.9	12.3	11.5	11.0
5Gal	八戸	7.78	6.83	5.66	6.50	6.67	5.74	6.29	6.13	5.68
	岩国	2.65	3.03	2.70	2.55	3.30	2.81	2.07	2.05	2.14
	博多	5.40	8.22	7.26	4.43	8.68	8.14	3.93	6.17	5.92
10Gal	八戸	15.55	13.50	11.43	12.96	13.24	11.41	12.51	12.31	11.38
	岩国	5.27	6.07	5.40	5.06	6.61	5.62	4.12	4.10	4.28
	博多	10.55	15.78	14.08	8.75	16.63	15.80	7.83	12.30	11.91
20Gal	八戸	30.66	26.65	23.07	25.62	26.17	22.92	24.67	24.73	22.91
	岩国	10.22	11.83	10.47	9.82	12.78	11.24	8.13	8.21	8.17
	博多	20.14	29.08	26.44	17.14	30.45	31.71	15.51	23.43	23.17
50Gal	八戸	75.37	67.68	59.14	62.14	64.44	57.29	56.70	62.60	58.25
	岩国	23.02	27.44	24.45	21.73	29.14	26.48	17.15	19.22	19.35
	博多	45.53	68.77	66.82	38.89	68.19	72.01	34.67	51.50	53.42
100Gal	石巻	85.33	89.10	73.64	75.23	85.53	73.58	66.59	72.97	68.75
	八戸	136.08	137.97	121.68	124.64	130.72	117.81	110.60	125.12	118.77
	清水	139.51	153.46	135.33	106.66	148.72	149.56	113.96	128.65	117.25
	岩国	40.91	51.08	46.89	36.65	50.47	48.15	29.89	38.42	36.45
	博多	78.92	109.84	119.93	64.81	106.49	127.94	56.62	74.49	93.61
150Gal	八戸	210.14	209.50	187.09	216.73	197.84	180.99	179.91	174.27	170.58
	岩国	54.43	72.21	67.62	49.23	66.90	66.96	37.17	45.47	51.82
	博多	103.45	138.76	157.01	83.47	127.79	164.37	64.98	103.46	128.76
200Gal	石巻	168.89	164.62	153.65	168.18	161.86	153.57	160.82	144.15	138.61
	八戸	277.79	257.55	252.06	232.29	244.43	246.78	169.16	245.13	226.35
	清水	192.21	276.94	267.31	211.83	251.22	260.00	#N/A	238.95	263.69
	岩国	64.49	85.51	78.54	52.35	86.10	85.09	44.69	59.82	57.05
	博多	114.35	163.37	187.15	85.29	151.69	178.48	75.74	132.31	141.99
300Gal	石巻	226.88	238.26	220.30	247.27	215.46	231.76	233.24	213.38	214.19
	八戸	289.86	449.57	359.22	209.89	418.15	354.17	273.29	389.76	403.91
	清水	#N/A	#N/A	376.40	#N/A	#N/A	352.75	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	87.29	119.33	112.06	64.72	122.48	116.18	58.05	83.78	73.51
	博多	140.81	212.29	212.90	144.93	188.48	216.33	111.46	138.49	170.89
500Gal	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	119.50	136.18	140.68	87.41	176.38	169.18	69.31	106.10	126.23
	博多	175.64	245.37	270.80	191.28	185.94	250.43	177.59	177.26	207.78
L1 Original	石巻	206.34	191.73	188.85	195.99	179.42	187.21	196.87	177.96	174.10
	八戸	286.35	275.02	271.00	237.34	262.91	264.50	176.61	253.26	243.00
	常陸那珂	166.00	168.33	141.94	136.36	159.86	137.91	118.27	146.05	134.54
	千葉	116.27	118.06	104.80	94.65	122.25	102.90	91.43	95.48	86.89
	清水	164.83	193.96	172.02	165.51	185.32	173.71	127.44	171.65	156.34
	四日市	118.88	130.10	108.86	101.46	122.60	108.73	90.37	103.67	99.31
	舞鶴	66.52	118.13	120.95	62.22	106.95	133.94	60.84	81.87	97.54
	神戸	136.81	161.50	158.62	120.59	140.78	157.97	106.54	116.58	120.48
	岩国	89.56	120.33	112.48	66.42	127.23	120.96	58.96	87.19	76.83
	博多	109.69	145.93	170.32	77.07	131.09	177.11	70.26	112.37	133.71

※表中の「#N/A」は、2次元地震応答解析において栈橋杭が全塑性した解析事例を示す。

付表 F-4 1 次元地震応答解析における加速度応答値(減衰定数 h=20%) (2)

設計水深		-10m				-13m				-16m			
N値		1	5	10	15	1	5	10	15	1	5	10	15
杭径(mm)		700	700	700	700	700	700	700	700	800	800	800	800
肉厚(mm)		10.4	10.0	9.7	9.6	11.5	10.9	10.6	10.5	11.1	10.5	10.2	10.1
5Gal	八戸	8.44	6.85	6.20	5.91	7.36	6.65	6.15	5.87	6.15	5.84	5.54	5.47
	岩国	2.23	2.25	2.08	1.96	1.91	2.03	2.19	1.79	1.38	1.24	1.26	1.26
	博多	5.16	6.40	5.76	5.36	4.14	5.78	6.28	5.27	3.28	4.22	4.00	3.81
10Gal	八戸	16.92	13.72	12.43	11.85	14.61	13.33	12.33	11.77	12.03	11.69	11.10	10.79
	岩国	4.41	4.49	4.17	3.91	3.78	4.06	4.38	3.59	2.76	2.47	2.45	2.52
	博多	9.91	12.32	11.56	10.76	8.08	11.09	12.22	10.21	6.40	8.17	8.03	7.65
20Gal	八戸	33.56	27.70	25.07	23.89	28.59	26.72	24.72	23.65	23.48	22.68	21.93	21.33
	岩国	8.49	8.97	7.93	7.45	7.29	7.46	7.97	6.82	5.49	4.93	4.88	4.87
	博多	18.72	24.34	22.44	21.69	15.88	20.44	23.19	19.27	12.39	15.76	15.72	15.03
50Gal	八戸	79.51	69.89	63.32	60.28	65.88	65.24	60.45	57.79	63.03	54.32	53.15	52.09
	岩国	19.24	18.98	17.06	16.11	16.94	16.96	18.05	15.40	13.09	11.79	11.86	11.83
	博多	42.74	50.91	50.95	48.19	35.24	43.47	54.15	45.67	27.77	34.48	36.56	35.44
100Gal	石巻	94.63	81.50	73.11	69.53	86.89	77.09	68.26	67.81	82.22	73.17	69.10	66.54
	八戸	150.93	134.71	122.91	116.88	128.54	123.70	116.42	113.09	137.90	116.16	110.41	108.06
	清水	152.49	144.88	127.24	117.63	137.96	132.09	110.37	110.25	116.15	106.40	97.27	93.74
	岩国	34.95	36.14	33.26	31.80	30.02	30.44	32.46	28.04	23.21	22.41	22.57	22.69
	博多	72.66	79.98	87.18	85.27	60.62	69.65	99.76	80.15	46.70	51.88	63.59	64.14
150Gal	八戸	217.66	198.95	181.69	175.91	226.58	207.01	169.69	172.54	184.78	190.14	174.87	169.07
	岩国	47.85	49.95	45.94	44.67	40.03	43.49	45.46	40.43	31.34	31.73	32.63	32.76
	博多	96.44	108.57	114.27	119.92	77.59	91.28	119.44	101.93	59.77	78.06	80.07	86.76
200Gal	石巻	201.49	165.03	153.21	146.12	175.30	162.08	146.60	144.60	158.79	147.80	143.47	142.71
	八戸	294.97	269.66	248.69	238.41	245.41	293.31	230.99	245.28	212.81	234.70	246.50	237.17
	清水	#N/A	266.87	241.10	230.37	#N/A	248.86	198.05	222.81	#N/A	207.84	213.99	#N/A
	岩国	58.65	64.38	58.61	56.96	50.36	54.77	57.15	51.66	36.90	39.54	42.59	41.96
	博多	117.75	129.54	124.06	131.86	90.63	109.93	120.16	109.66	74.08	92.01	94.06	97.38
300Gal	石巻	223.28	#N/A	244.92	235.81	215.61	#N/A	#N/A	#N/A	242.70	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	224.65	#N/A	#N/A	#N/A	283.46	#N/A	#N/A	#N/A
	清水	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	78.60	87.61	81.89	78.28	62.90	72.62	75.26	71.16	49.27	56.34	57.29	59.44
	博多	146.18	170.04	165.34	165.15	119.34	149.15	159.57	155.38	104.71	109.11	130.20	137.31
500Gal	八戸	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	岩国	101.04	115.38	114.43	111.46	88.36	95.17	109.07	103.40	67.72	80.50	84.13	86.48
	博多	177.76	222.97	239.60	247.21	171.55	197.13	202.93	203.12	177.20	157.03	182.79	186.26
L1 Original	石巻	203.25	219.06	194.26	187.00	200.12	#N/A	186.05	186.05	203.10	#N/A	#N/A	#N/A
	八戸	299.36	328.76	288.61	256.37	251.36	#N/A	248.86	266.92	185.51	#N/A	#N/A	#N/A
	常陸那珂	169.69	164.80	145.74	137.44	139.39	150.34	125.82	129.20	116.18	124.88	117.75	116.86
	千葉	123.57	101.36	90.04	84.46	108.17	93.73	85.16	81.38	89.06	82.20	76.32	73.34
	清水	200.52	185.80	167.04	154.58	173.67	160.90	150.22	150.36	132.10	134.26	128.94	123.72
	四日市	121.41	118.10	104.29	96.92	102.07	100.59	98.94	92.23	85.37	79.01	76.91	76.83
	舞鶴	55.44	97.25	100.91	99.68	51.13	88.17	102.77	95.88	43.25	60.81	69.09	69.12
	神戸	152.48	133.35	126.01	122.68	126.69	119.47	117.12	114.53	110.39	113.21	111.98	110.29
	岩国	80.91	91.11	84.98	81.32	64.68	75.55	75.12	71.18	50.98	57.30	59.09	60.60
	博多	103.70	120.02	122.07	126.51	81.99	96.09	117.93	106.90	64.71	79.11	84.90	93.01

※表中の「#N/A」は、2 次元地震応答解析において栈橋杭が全塑性した解析事例を示す。

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1001 January 2018

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp