

1. はじめに

港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾(以下、現行法と称す。)の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次元地震応答解析を行い、仮想固定点における加速度応答を算出し、栈橋の固有周期に対応する加速度応答値から求めた値を用いている(図-1)。

栈橋の振動特性に関する既往の研究として、横田ら²⁾は、2次元全応力地震応答解析を行い、栈橋上部工の地震応答が栈橋中央部の仮想固定点(仮想海底面下 $1/\beta$ 地点)に関する加速度応答スペクトルにより評価できることを示した。さらに、仮想固定点における加速度応答スペクトルについて、2次元全応力解析と1次元全応力解析による比較を行い、1次元全応力解析では、地盤と杭の動的相互作用による減衰効果等を適切に評価できないことを示し、1次元全応力解析を用いて加速度応答スペクトルを算出する際には、構造物自体及び地盤と杭の動的相互作用に起因する総括的な減衰として、10%~30%を設定することを提案した。現行の加速度応答スペクトルの算出方法は、基本的に、この成果を反映したものである。

栈橋の固有周期の算出方法については、栈橋に作用する荷重と栈橋上部工の変位の関係(水平地盤反力係数)が線形であると仮定して骨組解析等により求めている。しかし、水平地盤反力係数とせん断剛性との間には一定の関係があり、杭周辺を構成する地盤のせん断剛性は加震中に低下することから、地震動のレベルに応じて水平地盤反力係数も低下する。そのため、直杭式栈橋の固有周期は、本来地震動のレベルに応じて変化するものであり、一定の値と見なす標準的な方法により求められる値には誤差を多く含む可能性がある。

本研究では、まず、加速度レベルが非常に小さい入力地

震動による2次元地震応答解析(以下、2次元解析と称す。)を実施し、地盤の非線形性の影響が無い場合の栈橋の固有周期を求めて、現行法による固有周期、及び旧基準⁴⁾に示されている簡易式から求める固有周期(以下、簡易法と称す。)との比較を行い、現行法と簡易法の推定精度を検証した。

次に、加速度レベルを変化させた入力地震動による2次元解析を実施し、作用震度と固有周期の関係を整理することにより、動的特性を考慮した栈橋の固有周期の算出方法について検討を行った。併せて、1次元地震応答解析と2次元地震応答解析の加速度応答スペクトルの比較検討を行うことにより、推定精度の高い、動的特性を考慮した照査用震度算定手法について検討を行った。

2. 現行法及び簡易法の固有周期推定精度の検証

2.1 固有周期算出手法

2次元解析と現行法、及び簡易法の比較を実施することにより、現行法、及び簡易法の推定精度等について検証する。また、検証の結果から動的特性考慮した固有周期の算出方法に用いる手法の選定も併せて行う。

具体的に、現行法とは、骨組解析に一定の静的な荷重を作用させて生じた変位量から、荷重と変位の関係を求めて算出する方法¹⁾であり、簡易法とは、上部工から仮想固定点までの長さを自由長としたラーメンモデルを仮定して、横方向地盤反力係数と杭の物理特性及び栈橋の上部工の自重から簡易式により推定する方法⁴⁾である。

2次元解析に用いる解析コードは、港湾分野において実績が多いFLIPとした。また、現行法に用いる解析コードはN-PIERとした。

なお、本検討で対象とする断面は図-2に示す通り、栈橋の設置水深が、-10m、-13m及び-16mの計3断面とした。各水深の杭の諸元は表-1の通りである。

栈橋のモデル化は、上部工をRCコンクリート梁とし、杭と上部工を結合した構造とした。なお、栈橋に用いる杭は全て同じ諸元とすることを前提とし、栈橋本体と背後土留壁間の渡版は設定せず、独立としている。鋼管杭の $M-\phi$ 関係は、全塑性モーメントを上限値としたバイリニアモデルとした。地盤条件は、砂質土を対象として、軟弱な地盤を想定した地盤(固有周期 $T_g=1.2s$)となるように地盤のせん断波速度を設定した。

2次元解析に用いる地盤パラメタは、FLIPにおける標準的なパラメタの設定方法⁵⁾に準じて設定した。FLIPに用いる地盤パラメタを表-2に示す。なお、2次元解析の検討モデルでは、杭と地盤の間に相互作用バネを設け、杭間の地

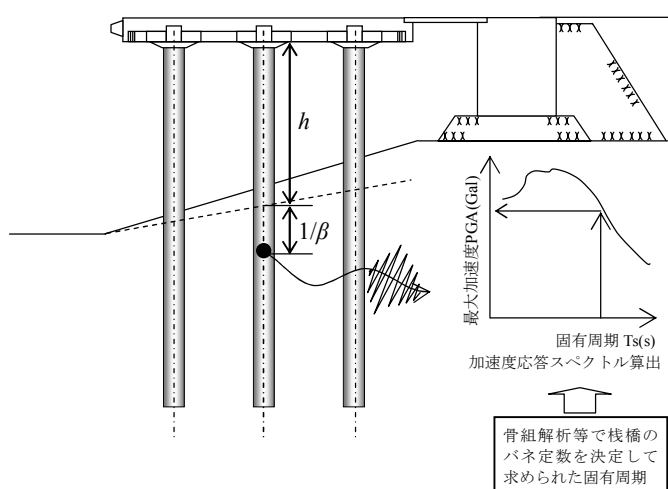


図-1 現行設計法による固有周期の算出方法

盤のすり抜けを考慮している⁶⁾。

また、入力波形は、地盤の非線形性の影響をほとんど受けていない状態での栈橋の固有周期を把握することを目的として、最大加速度(以下 *PGA* と称す。)を 10Gal に補正した、加速度レベルが非常に小さい White-Noise 波を用いることとした。

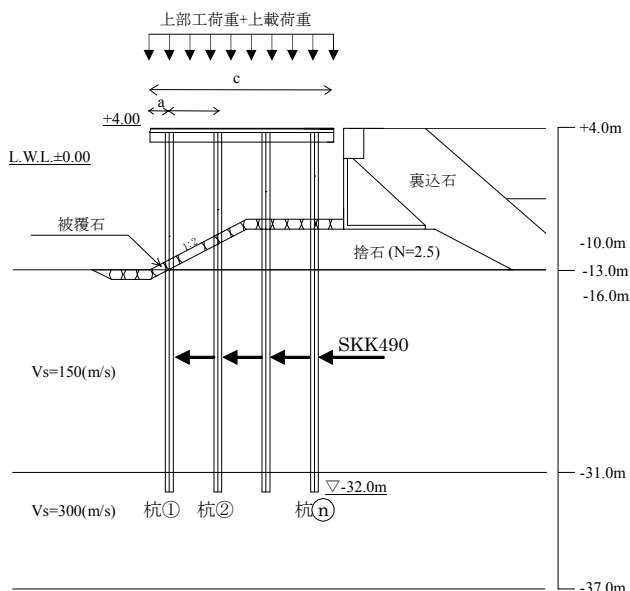


図-2 検討断面

表-1 杭諸元

設置水深 (m)	杭本数 (本)	支持形式	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	断面積 (cm ²)	断面2次モーメント (cm ⁴)	断面係数 (cm ³)	a(m)	b(m)	c(m)
-10	3	支持	900	12	334.77	3.30E+05	7334	2.0	5.0	14.0
-13	5	支持	813	14	351.33	2.80E+05	6897	2.0	5.0	24.0
-16	5	支持	900	14	389.68	3.82E+05	8499	2.0	5.0	24.0

表-2 地盤パラメータ一覧

土層区分		湿潤密度 (t/m ³)	基準有効拘束圧 (kN/m ²)	基準初期せん断剛性 (kN/m ²)	基準初期体積剛性 (kN/m ²)	内部摩擦角 (deg.)	粘着力 (kN/m ²)
埋立土	上層(水位上)	1.8	70	2.08E+04	5.43E+04	37	0.0
	上層(水位下)						
	下層						
原地盤	上層	2.0	199	4.50E+04	1.17E+05	37	0.0
	下層		298	1.80E+05	4.69E+05	41	
捨石		2.0	98	1.80E+05	4.69E+05	35	20.0
裏込石							

(※)共通項目:ポアソン比 ν :0.33, 最大減衰 h_{max} :0.24

現行法に用いる水平地盤反力係数は、式(1)に示す Imai 式⁷⁾よりせん断波速度に対応する *N* 値を求め、式(2)より算出した。捨石層は、文献 8)の水平地盤反力係数に関する実験結果から、*N*=2.5 として設定した。

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

$$k_h = 1500N \quad (2)$$

ここに、

N: *N* 値

V_s: せん断波速度(m/s)

k_h: 水平地盤反力係数(kN/m³)

簡易法は、上述の式(1)、式(2)、及び式(3)~式(5)より算出する。なお、水平地盤反力係数算出時に用いる *N* 値は、現行法と同様の値とした。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \sum_i k_{Hi}}} \quad (3)$$

$$k_{Hi} = \frac{12EI_i}{\left(h_i + \frac{1}{\beta_i}\right)^3} \quad (4)$$

$$\beta_i = 4\sqrt{\frac{k_{hi}D_i}{4EI_i}} \quad (5)$$

ここに、

T_s: 栈橋の固有周期(s)

W: 上部工の自重(kN)

g: 重力加速度(=9.8m/s²)

k_{Hi}: 杭 *i* の横方向ばね定数(kN/m)

EI_i: 杭 *i* の曲げ剛性(kN・m²)

β_i: 杭 *i* の仮想固定点に関するパラメータ(m⁻¹)であり、式(5)による。

h_i: 杭 *i* の杭頭から海底面までの長さ(m)

D_i: 杭 *i* の杭の直径(m)

k_{hi}: 杭 *i* の水平地盤反力係数(kN/m³)であり、式(2)による。

なお、水平地盤反力係数を 2 倍し、併せて仮想海底面を考慮しない方が栈橋の固有周期をより正しく計算するという報告³⁾もあることから、現行法及び簡易法については、式(2)に 2 を乗じた水平地盤反力係数(式(6))を用いたケースについても検討を行うこととした。

その他、栈橋の固有周期は、海底の基準面の設定や、水平地盤反力係数の設定に応じて変わるため、ここでは、表-3 に示す、計 6 ケースについて、現行法及び簡易法の検討

を実施し、2次元解析との比較を行うこととした。

$$k_h = 2 \times 1500N \quad (6)$$

ここに、 k_h は式(2)、 N は式(1)と同じである。

表-3 固有周期算出の組合せ

ケース	基準面	1/βの算出方法
1	実海底面	$k_h=2 \times 1500N$
2	実海底面	$k_h=1500N$
3	実海底面	$1/\beta=0$
4	仮想海底面	$k_h=2 \times 1500N$
5	仮想海底面	$k_h=1500N$
6	仮想海底面	$1/\beta=0$

2.2 比較検討結果

2次元解析による固有周期と、現行法、及び簡易法により算出される固有周期との比較を行った。

2次元解析による固有周期は、フーリエスペクトル比(上部工/仮想固定点)からピーク値を読み取ることにより求めている。水深-10mの断面を例として、図-3に2次元解析から求められた、上部工、仮想固定点のフーリエスペクトル、図-4に上部工と仮想固定点のフーリエスペクトル比を示す。また、図-5に2次元解析と現行法及び簡易法との比較結果を示す。この結果、固有周期算出の際の海底面と水平地盤反力係数の組合せによらず、全てのケースにおいて、現行法と簡易法はほぼ同じ固有周期となることが確認できる。

次に、2次元解析により求められた固有周期との比較によると、地盤の非線形性の影響をほとんど受けていない栈橋の固有周期の再現性は、基準面を実海底面とし、1/β算出時の水平地盤反力係数を2×1500Nとしたケース1、海底面を固定点としたケース3、あるいは仮想固定点を固定点としたケース6の対応が良いことが分かる。

現行法と簡易法による栈橋の固有周期がほぼ同じであること、また設計実務の便を考慮して、以降の検討における動的特性を考慮した栈橋の固有周期の算出は、計算負荷の少ない、簡易法により実施することとする。また、固有周期算出の際の基準面と水平地盤反力係数の組合せケースは、地盤の非線形性の影響をほとんど受けていない栈橋の固有周期の再現性が良いケース1、ケース3、及びケース6のうち、ケース1により検討を進めることとした。ケース1を選択した理由は、以降の検討において栈橋の動的特性を自

由長により評価するため、ケース3あるいはケース6では、これを評価できないためである。

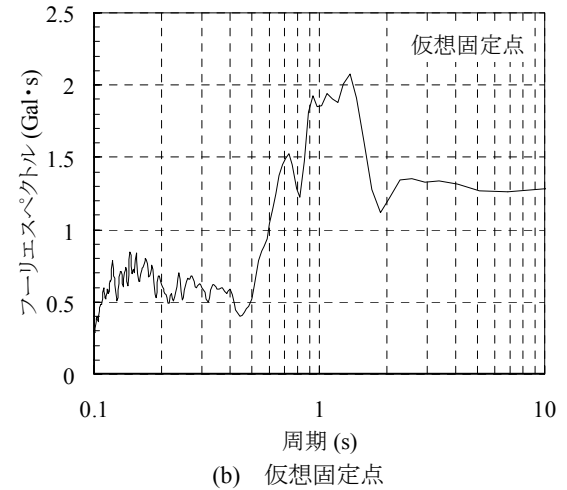
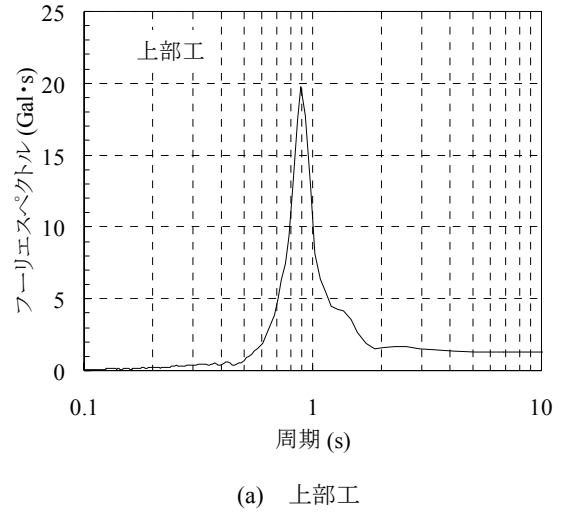


図-3 フーリエスペクトル

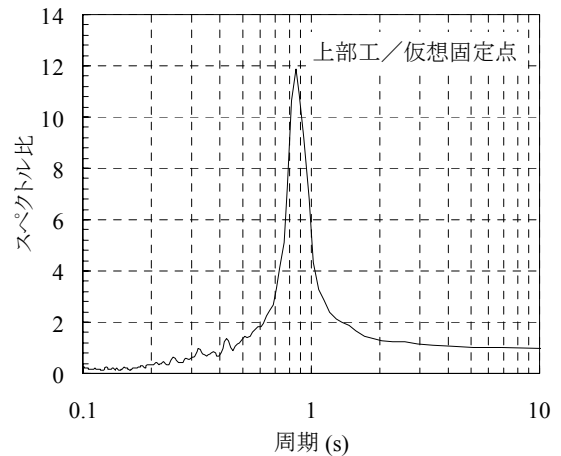


図-4 スペクトル比(上部工/仮想固定点)

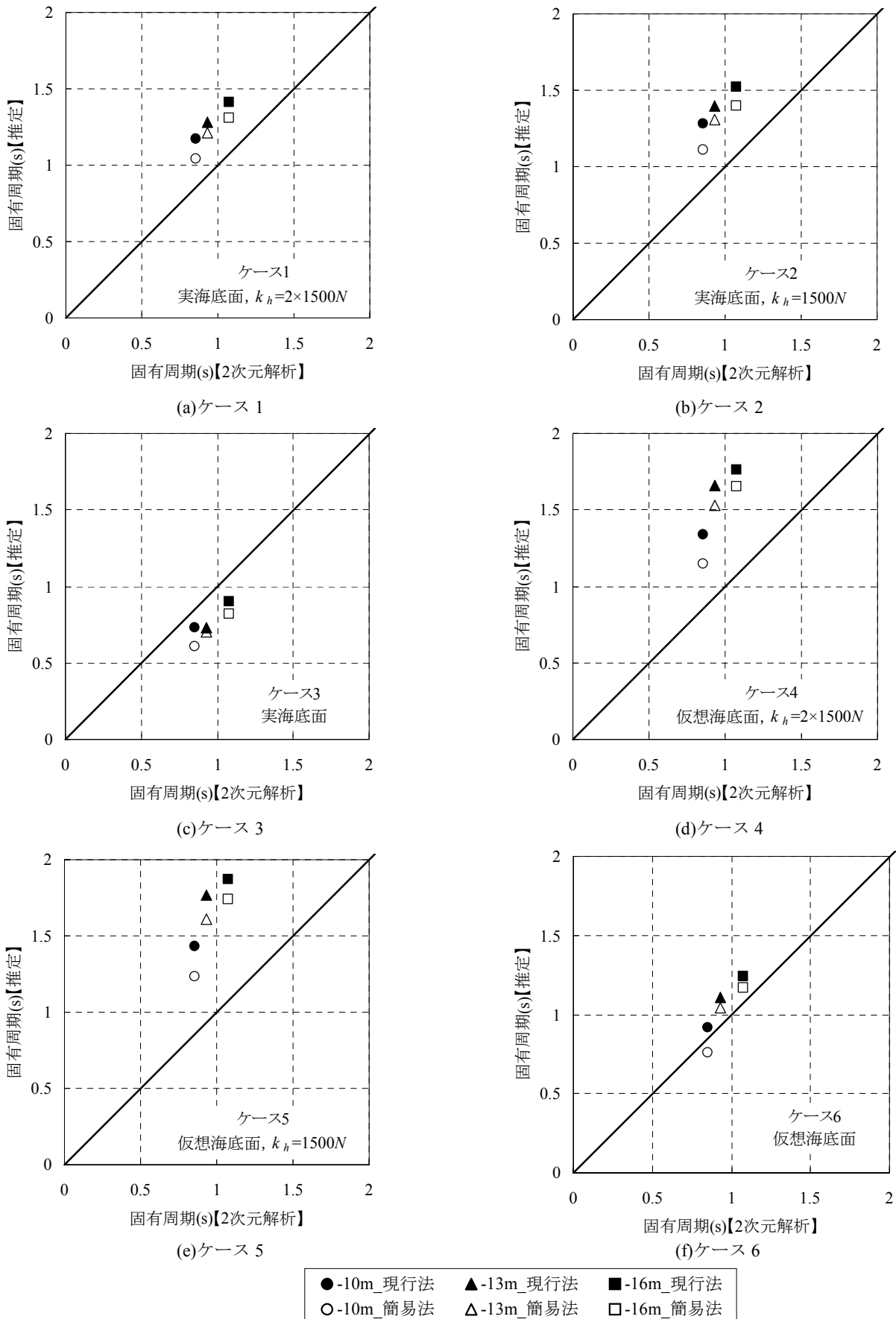


図-5 固有周期比較

3. 2次元解析を用いた固有周期の動的特性の把握

栈橋の固有周期の動的特性を把握することを目的として、加速度レベルが異なる波形を入力した2次元解析を実施した。2次元解析に用いた解析コード、断面ケースは2. 各手法による栈橋の固有周期の比較と同様である。ただし、加震中に発生する杭の最大モーメントの確認を行い、最大モーメントが全塑性モーメントに達し、杭が降伏したケースについては、検討ケースから除外している。なお、本研究は、動的特性を考慮した照査用震度の算出方法を検討することが目的であるため、レベル1地震動を想定した検討を行う。そのため、液状化の発生は許さない条件で検討を行っている。

3.1 入力波形

検討に用いた入力波形は、PGAを100Gal, 200Gal, 300Gal, 400Gal, 500Gal及び1000Galとした継続時間が20.48秒のWhite-Noise波、PGAを100Gal, 200Gal, 300Galとした八戸港波、PGAを100Gal, 300Gal, 500Galとした岩国港波、及び博多港波の計4波形の12種類である。なお、計算の効率化の観点から、八戸港波、岩国港波、及び博多港波にはオリジナルのレベル1地震波形の主要動の前後にテーパーをかけている。テーパー処理は、各波形の加速度最大値の1/4の加速度が初めて現れる時刻から加速度最大値の1/2の加速度が初めて現れる時刻までの加速度データにサイン状のテーパーをかけ、加速度最大値の1/2の加速度が現れる最後の時刻から加速度最大値の1/4の加速度が現れる最後の時刻までの加速度データにコサイン状のテーパーをかける方法とし、継続時間の短縮を図っている。八戸港波、岩国港波、及び博多港波の波形時刻歴及び卓越周波数は図-6に示す通りである。

3.2 作用震度と固有周期の関係

栈橋の振動特性に関する既往の研究として、稲富ら⁹⁾は、川崎港、横浜港、名古屋港における強震観測記録をもとに、栈橋の固有周期を求めている。稲富らによると、栈橋の固有周期は、栈橋上部工と背後地表面のスペクトル比におけるピーク周期として整理できるとしている。そのため、まず、栈橋の固有周期について、フーリエスペクトル比を(上部工/仮想固定点)としたケースと(上部工/背後地表面)としたケースについて比較検討を行った。

図-7に比較結果を示す。この結果、固有周期が長周期のケースでは、スペクトル比から読み取られる固有周期に若干の違いが見られるものの、概ね両者とも同じ固有周期となることが確認できた。従って、本研究の解析結果からも、上部工と背後地表面のスペクトル比により、栈橋の固有周

期を評価することが可能であることが確認された。

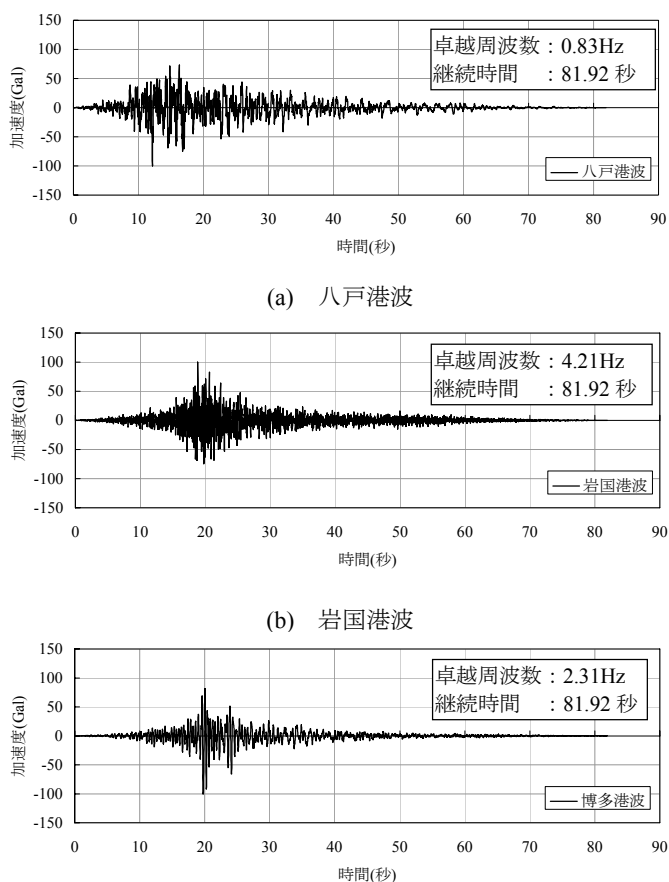


図-6 入力地震動

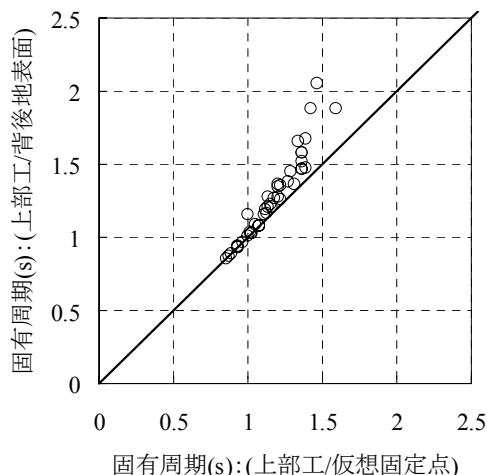


図-7 フーリエスペクトル比の比較

次に、作用震度と固有周期の関係について整理を行う。作用震度は、栈橋上部工の加速度応答最大値を重力加速度で除した値とした。栈橋の固有周期は、上記結果より、フーリエスペクトル比(上部工/仮想固定点)、あるいはフーリエスペクトル比(上部工/背後地表面)のいずれにおいても

評価可能であるが、本検討では、フーリエスペクトル比(上部工／仮想固定点)のピーク値から求めた。図-8 に検討結果を示す。この結果、全断面とも、作用震度が大きくなるに従い、栈橋の固有周期が長くなることが確認された。

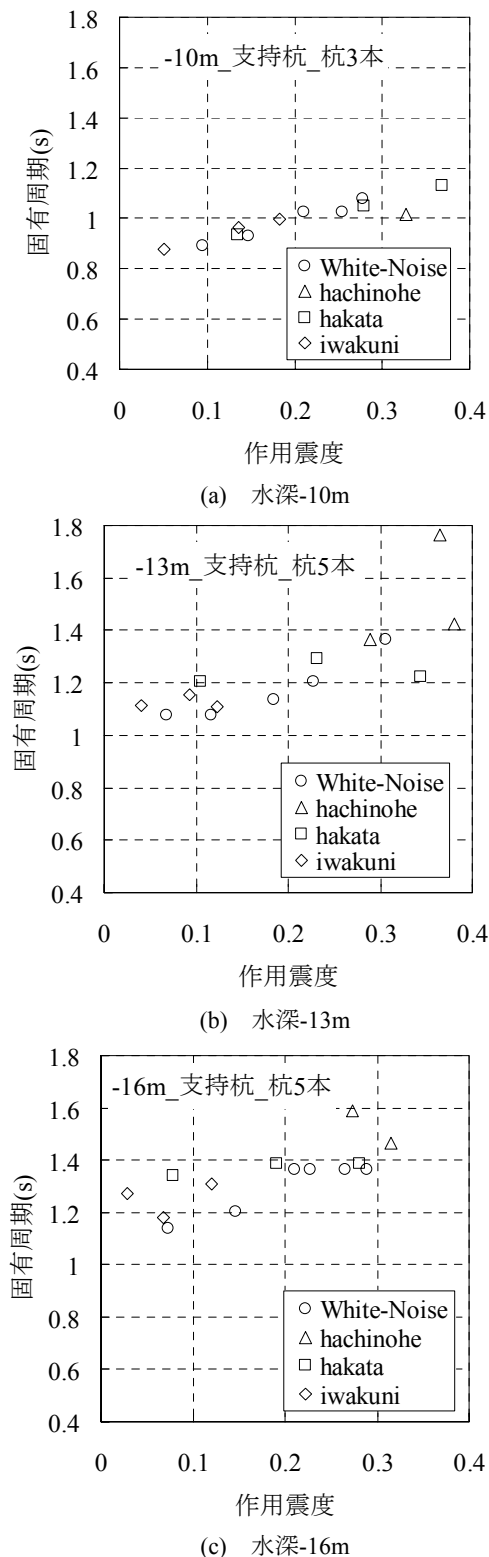


図-8 作用震度と固有周期の関係

この傾向は、以下に示すことに起因すると考えられる。地盤のせん断剛性は、せん断波速度と式(7)に示す関係がある。また、せん断波速度と N 値、及び N 値と水平地盤反力係数には、式(1)及び式(2)の関係があるため、水平地盤反力係数と地盤のせん断剛性には一定の関係がある。そのため、作用震度が大きいケースでは、栈橋杭周辺を構成している地盤のせん断剛性が大きく低下し、それに伴って、水平地盤反力係数が低下する傾向があるものと考えられる。これにより、作用震度が大きくなるに従って、栈橋の固定点が下がり(栈橋の自由長が長くなる)、栈橋の固有周期が長くなるものと考えられる。

$$G = \rho V_s^2 \quad (7)$$

ここに、

G : せん断剛性(kN/m²)

ρ : 単位体積質量(t/m³)

V_s : せん断波速度(m/s)

これを確認するため、栈橋中央部の仮想固定点位置における地盤のせん断応力 τ_{xy} ~ せん断ひずみ γ_{xy} の関係について確認を行った。水深-10m の断面を例に、作用震度が 0.09 である White-Noise(PGA100Gal)のケースと作用震度が 0.28 である White-Noise(PGA500Gal)のケースのせん断応力 τ_{xy} ~ せん断ひずみ γ_{xy} の関係を図-9、及び図-10 に示す。図中には、せん断応力 τ_{xy} 最大時のせん断剛性 G_{tmax} を併せて示す。この結果、作用震度が大きい White-Noise(500Gal)のケースは、作用震度が小さい White-Noise(100Gal)に比べ、せん断剛性が大きく低下していることが確認できる。この結果からも、作用震度が大きいケースは、作用震度が小さいケースに比べ、栈橋杭周辺の地盤のせん断剛性(水平地盤反力係数)が大きく低下するため、栈橋の固有周期が長くなる傾向にあることが想定される。

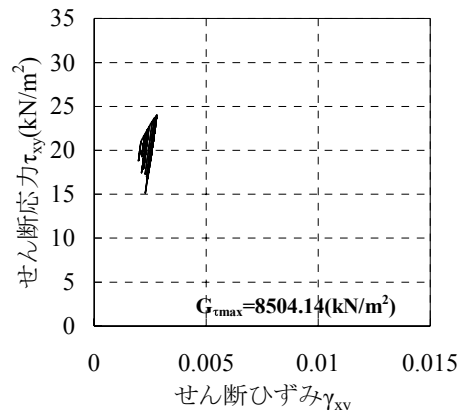


図-9 せん断応力とせん断ひずみの関係 (White-Noise_100Gal)

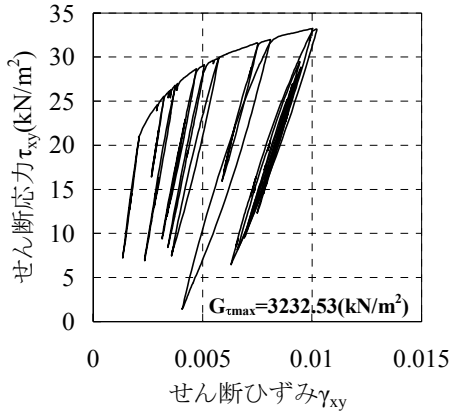


図-10 せん断応力とせん断ひずみの関係
(White-Noise_500Gal)

3.3 せん断剛性比と自由長の関係

前節の結果から、作用震度が大きいケースでは、作用震度が小さいケースに比べ、杭周辺地盤のせん断剛性(水平地盤反力係数)が大きく低下し、自由長が長くなることにより、栈橋の固有周期が長くなることが想定された。

本節では、地盤のせん断剛性の低下率と栈橋の自由長の関係について、以下に示す方法により整理を行う。なお、栈橋中央部の仮想固定点位置の地盤に着目し、せん断応力 τ_{xy} 時刻歴最大時のせん断剛性 G_{tmax} を初期せん断剛性 G_0 で除した値 G_{tmax}/G_0 をせん断剛性比と定義する。

- ① 式(3)(再掲), 式(5)(再掲), 及び式(8)の関係を用いて, 2次元解析から得られた栈橋の固有周期と同じとなるような自由長の算出を行う。具体的には, 式(8)の分母が栈橋の自由長を表しているが, このうち, h_i は栈橋の杭頭から海底面までの長さであるため不変である。そこで, 海底面から仮想固定点までの長さ(地中部の仮想固定点までの長さ)である $1/\beta_i$ に補正係数 A を乗じて, 2次元解析の栈橋の固有周期と同じとなる自由長(補正係数 A)を求め, 両者の関係を整理する。(自由長を表すパラメタの説明については, 図-1を参照)

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \sum_i k_{Hi}}} \quad (3)$$

$$\beta_i = 4 \sqrt{\frac{k_{hi} D_i}{4EI_i}} \quad (5)$$

$$k_{Hi} = \frac{12EI_i}{\left(h_i + A \frac{1}{\beta_i}\right)^3} \quad (8)$$

ここに, $T_s, W, g, k_{Hi}, EI_i, \beta_i, h_i, D_i, k_{hi}$ は, 式(3)~式(5)と同じ。 A は地中部の自由長の補正係数である。

- ② 次に, ①と対応した2次元解析ケースを用いて, 仮想固定点位置における地盤のせん断応力 τ_{xy} ~せん断ひずみ γ_{xy} からせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 を算出し, 補正係数 A とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 の関係を整理する。
- ③ 同じく, ①と対応した2次元解析ケースを用いて, 上部工の加速度応答最大値を重力加速度で除することにより作用震度を求め, 作用震度とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 の関係の整理を行う。

上記方法により求められた補正係数 A とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 の関係を図-11に示す。この結果, 設置水深の違いに係わらず補正係数 A とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 の間には一定の関係があることが確認された。また, その関係は, せん断剛性比 G_{tmax}/G_0 が小さくなるにつれ, 補正係数 A が大きくなる傾向にあることが分かる。この結果は, 地盤のせん断剛性の低下が大きいほど, 自由長が長くなることを意味する。

次に, 作用震度とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 の関係を図-12に示す。この結果, 作用震度が大きくなるにつれ, せん断剛性比が小さくなる傾向を示した。この結果は, 作用震度が大きいほど, 杭周辺の地盤のせん断剛性が大きく低下することを意味する。

以上の結果から, せん断剛性比 G_{tmax}/G_0 と補正係数 A の関係を結びつけることにより, 作用震度に応じた動的特性を考慮した栈橋の固有周期を算出することが可能になると考えられる。

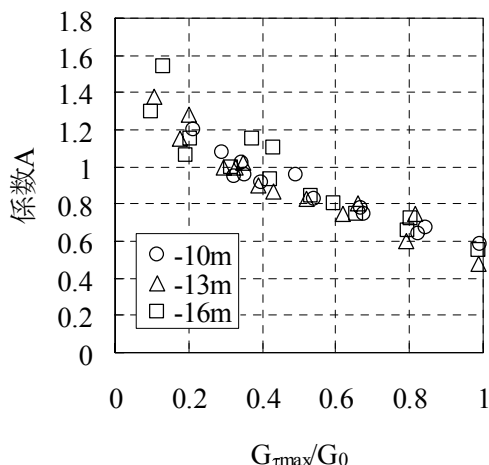


図-11 補正係数 A とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 の関係

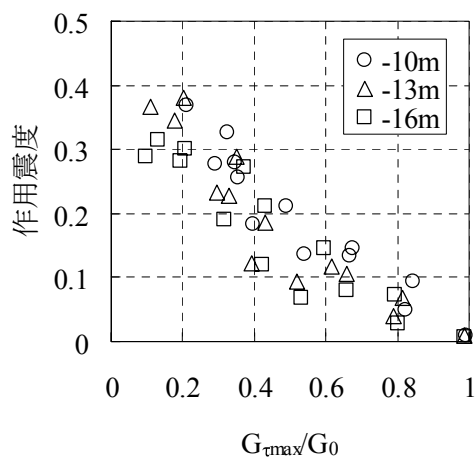


図-12 作用震度とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 の関係

4. 固有周期算出手法の検討

ここでは、3.3 せん断剛性比と自由長の関係の知見を反映し、せん断剛性比 G_{tmax}/G_0 と補正係数 A (自由長) の関係を定式化することにより、動的特性を考慮した栈橋の固有周期の算出方法の確立を試みる。なお、せん断剛性比 G_{tmax}/G_0 は、2次元解析から求められた値を用いる。

まず、定式化を行う前段として、 $1/\beta$ とせん断剛性 G の関係について整理する。 $1/\beta$ と N 値は、式(5)、及び式(6)より、式(9)に示す関係がある。一方、せん断剛性 G と N 値は、式(1)と式(7)より、式(10)に示す関係がある。従って、 $1/\beta$ とせん断剛性 G の間には、式(11)に示す関係があるものと想定される。

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{k_{hi} D_i}{4EI_i}}} = \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{(2 \cdot 1500N)_i D_i}{4EI_i}}} = f(N^{-1/4}) \quad (9)$$

$$N = \left(\frac{1}{80.6} \right)^3 (\rho G)^{3/2} = g(G^{3/2}) \quad (10)$$

$$\frac{1}{\beta} = h(G^{-3/8}) \quad (11)$$

ここに、 EI_i , β_i , D_i , k_{hi} は式(3)～式(5)と同じ。 N は式(1)と同じ。 ρ , G は式(7)と同じである。 $f(\cdot)$, $g(\cdot)$, $h(\cdot)$ は関数を表す。

そこで、本研究では、補正係数 A とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 を式(12)で定式化することとした。なお、式中の係数 a は、最小二乗法により設定を行う。近似曲線及び不偏分散 s^2 を図-13に示す。不偏分散からも、近似曲線は補正係数 A とせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 の関係を精度良く表現できていることが確認できる。

$$A = a \left(\frac{G_{tmax}}{G_0} \right)^{-3/8} \quad (12)$$

ここに、
 A : $1/\beta$ に乗じる補正係数
 G_{tmax}/G_0 : せん断剛性比
 a : 係数 (=0.645)

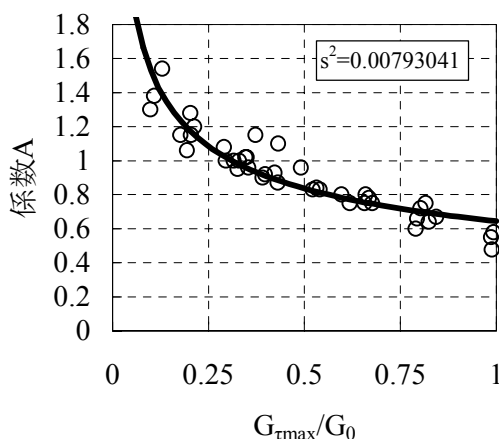


図-13 近似曲線

ただし、上記に示した関係は、2次元解析によるせん断剛性比 G_{tmax}/G_0 と自由長の関係について整理したものである。一方、設計実務では、1次元地震解析(以下、1次元解析と称す。)により栈橋の照査用震度を算出する。そのため、上記の関係式が1次元解析により求められたせん断剛性比

G_{rmax}/G_0 を用いて評価することが可能であるかの確認を行う必要がある。そこで、2次元解析断面の栈橋中央部をモデル化した1次元解析を用いて、仮想固定点位置におけるせん断剛性比 G_{rmax}/G_0 を算出し、2次元解析との比較を行った。なお、1次元解析に用いた解析コードは、2次元解析と同じ解析コードである FLIP を用いた。図-14 に比較結果を示す。この結果、若干のばらつきがあるものの、1次元解析と2次元解析のせん断剛性比 G_{rmax}/G_0 の対応は良いことが確認された。

以上より、1次元解析のせん断剛性比 G_{rmax}/G_0 においても、動的特性を考慮した固有周期を評価することが可能であるものと考えられる。

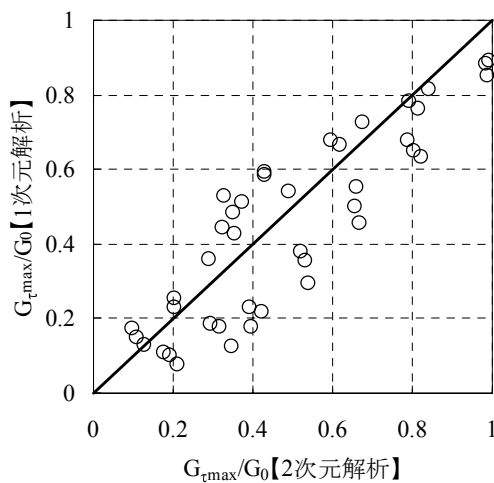


図-14 せん断剛性比比較

5. 照査用震度算出方法の検討

前章までは、動的特性を考慮した固有周期の算出方法について検討を行ってきた。本章では、照査用震度算出時に用いる、加速度応答スペクトルについての検討を実施する。

5.1 加速度応答スペクトルの抽出地点

栈橋の固有周期は、動的特性を考慮するため、 $1/\beta$ に補正係数 A を乗じることにより自由長を補正して算出する。そのため、厳密には、加速度応答スペクトルは、補正係数 A を用いて補正した、補正後の仮想固定点から抽出する必要がある。

補正後の仮想固定点の加速度応答スペクトルを算出するためには、補正前の仮想固定点に着目した1次元解析を実施した後、補正後の仮想固定点に着目した1次元解析を再度実施する必要がある、1次元解析を2度実施することになる。

一方、設計実務の観点から、作業負荷は極力少ない方が望ましいため、ここでは、補正前の仮想固定点における加

速度応答スペクトルを用いて照査用震度を評価することが可能であるかの検討を行う。そこで、補正前・後の仮想固定点の加速度応答スペクトルから照査用震度をそれぞれ求めて比較を行い、両者の違いについて確認を行った。なお、加速度応答スペクトル算出時に用いる加速度時刻歴は1次元解析から求め、栈橋の固有周期は2次元解析の結果を用いている。また、構造物自体及び地盤と杭の動的相互特性に起因する総括的な減衰を表現する減衰定数は、現行法に従い20%とした。図-15 に比較結果を示す。この結果、補正前・後の加速度応答スペクトルを用いた照査用震度はほぼ同じであることが確認された。従って、厳密には、補正後の仮想固定点における加速度応答スペクトルによらなければならないが、補正前の仮想固定点の加速度応答スペクトルにおいても十分に照査用震度を評価することが可能であることが分かった。以上より、補正前の仮想固定点の加速度応答スペクトルを用いて、照査用震度を算出することとする。

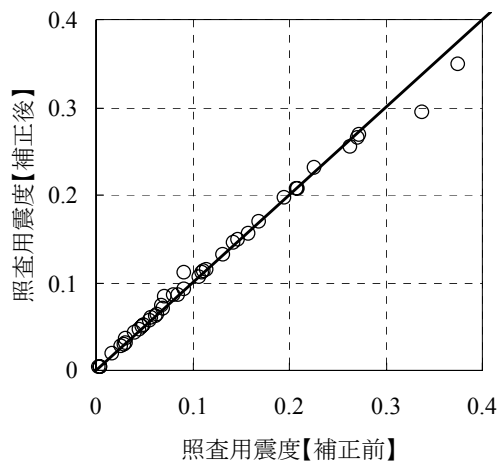


図-15 照査用震度比較

5.2 減衰定数の設定

加速応答スペクトルを求める際、2次元効果を反映するための減衰定数を設定する必要がある。

現行法では、減衰定数を20%としてもよいとしているが、この減衰定数は、構造物自体及び地盤と杭の動的相互特性に起因する総括的な減衰の効果を表現するものであり、減衰のメカニズムが複雑であるため、減衰定数をどの程度に設定するべきかについては、議論の余地が残されている。

ここでは、1次元解析から求められた仮想固定点の加速度時刻歴を用いて、減衰定数を変数とした加速度応答スペクトルを求め、固有周期に対応する加速度応答値から照査用震度を算出した。なお、栈橋の固有周期は、2次元解析結果を参照した。

また、2次元解析から求められた照査用震度との比較を

行い、2次元解析の照査用震度の再現性が高い減衰定数の設定を行った。図-16～図-18に比較結果を示す。この結果、減衰定数を20%(現行法)、及び10%とした場合、照査用震度が大きいケースでは、概ね2次元解析との整合は良いものの、照査用震度が小さいケースでは、減衰効果を大きく評価する傾向にあり、2次元解析と比べて照査用震度を過小に評価する傾向がある。次に、減衰定数を5%とした場合、照査用震度が大きいケースでは、減衰効果を小さく評価する傾向にあり、2次元解析と比べて照査用震度を過大に評価するものの、照査用震度が小さいケースでは、概ね2次元解析を再現できている。

これらの結果から、照査用震度が大きいケースでは、2次元効果による減衰が大きく、照査用震度が小さいケースでは2次元効果による減衰が小さいことが分かった。これらの傾向は、照査用震度が大きいケースは、地盤や栈橋が、加震中大きく変形するため、これに伴って減衰が大きく生じるのに対し、照査用震度が小さいケースは、照査用震度が大きいケースに比べ、変形が小さいため、減衰も小さいことに起因するものと考えられる。

一方、本検討は、照査用震度を算出することが目的であるため、現行法で設定されている照査用震度の上限値(=0.25)までを対象とすると、加速度応答スペクトル算出時に用いる減衰定数は、5%程度が妥当であると考えられる。

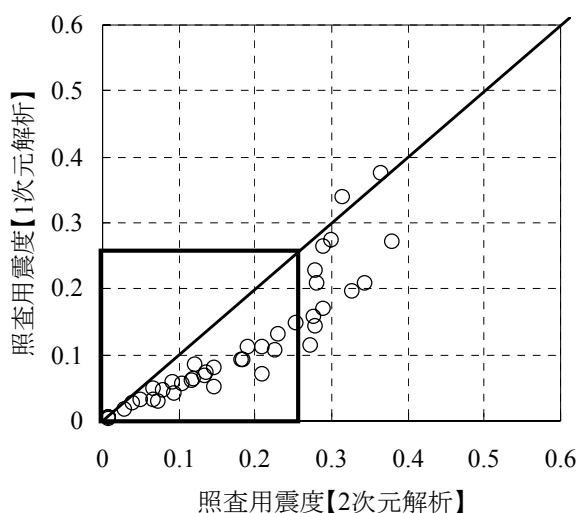


図-16 照査用震度比較【減衰定数20%】

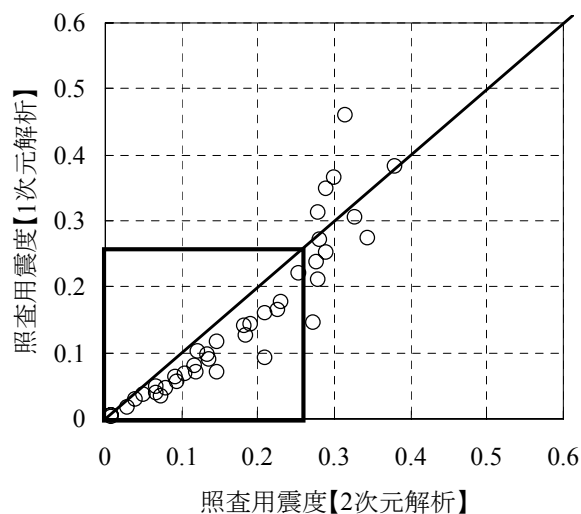


図-17 照査用震度比較【減衰定数10%】

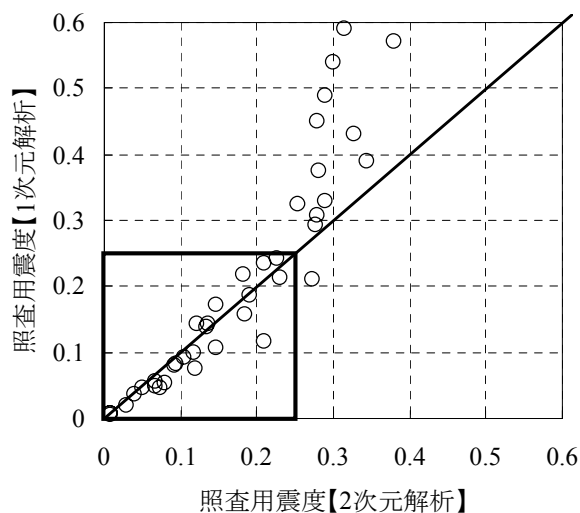


図-18 照査用震度比較【減衰定数5%】

6. 動的特性を考慮した照査用震度算定方法

これまでは、動的特性を考慮した照査用震度算定方法の検証とその精度を把握することを目的として、2次元解析の値を参照して検討を行ってきた。

ここでは、前章までに検討した方法に基づき、動的特性を考慮した照査用震度の算出を行う。また、2次元解析との比較を行うとともに、現行法との比較を行い、本算定方法の推定精度について検証を行う。

対象とするケースは、3.2次元解析を用いた固有周期の動的特性の把握に使用したケースのうち、2次元解析により求められた作用震度が、現行法で設定されている照査用震度の上限値(=0.25)以下となったケースのみを対象とした。

6.1 照査用震度算定フロー

動的特性を考慮した照査用震度算定フローを整理すると図-19の通りである。

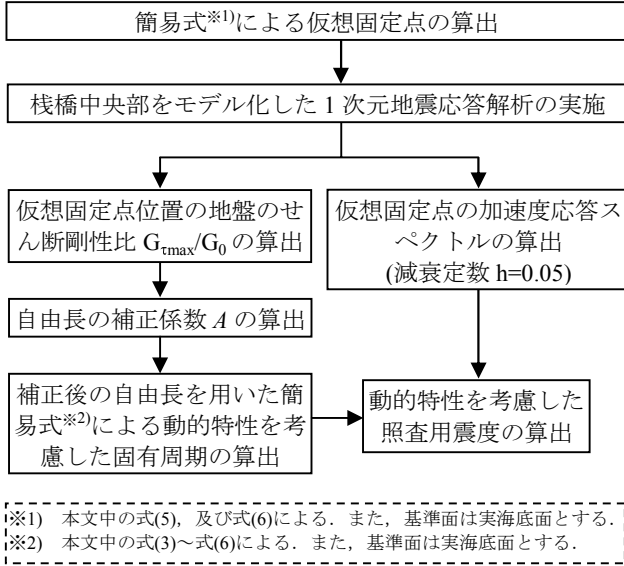


図-19 照査用震度算定フロー

6.2 推定精度の検証

6.1 照査用震度算定フローに従い, 固有周期, 及び照査用震度の推定を行った。また, 推定精度の検証を行うため, 本研究で検討した提案法と2次元解析, 及び現行法により求められた栈橋の固有周期及び照査用震度の比較を行った。さらに, 推定された固有周期, 及び照査用震度の2次元解析結果に対する誤差を求め, その誤差が2次元解析結果に対して占める割合(誤差割合)を算出し, その頻度分布を確認した。また, 頻度分布から得られる誤差割合の平均値 μ と標準偏差 σ も併せて確認した。なお, 照査用震度は, 現行法によって求められた固有周期と加速度応答スペクトル(減衰定数 $h=0.20$)の組合せ(以下, 現行法【 $h=0.20$ 】), 及び現行法によって求められた固有周期と加速度応答スペクトル(減衰定数 $h=0.05$)の組合せ(以下, 現行法【 $h=0.05$ 】)の2ケースについて検討を行い, 提案法との比較を行っている。

図-20 に現行法及び提案法と2次元解析から得られた固有周期の比較結果を示す。また, 図-21, 及び図-22 に固有周期の推定精度の結果を示す。この結果, 提案法により推定された固有周期の誤差割合の μ は0.03, σ は0.06であるのに対し, 現行法により推定された固有周期の誤差割合の μ は0.13, σ は0.09であった。この結果からも, 提案法は, 動的特性を考慮したことにより, 現行法に比べて大幅に推定精度が向上したと言える。

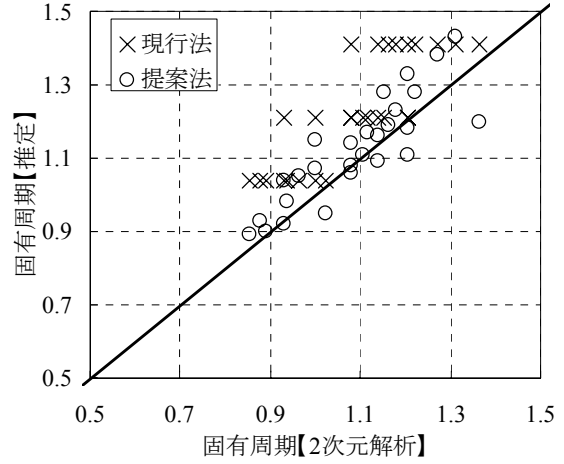


図-20 固有周期比較

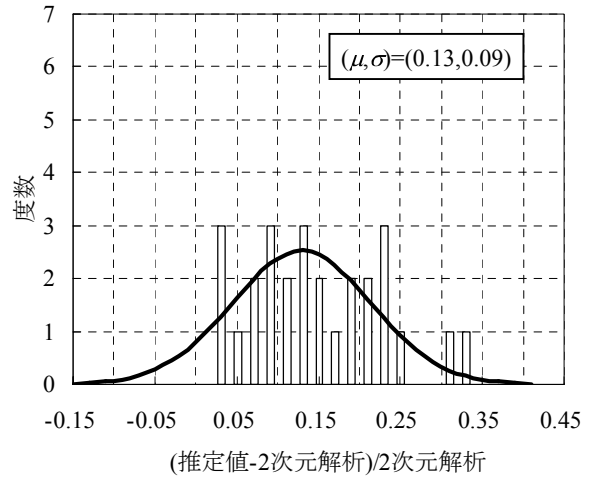


図-21 固有周期推定精度(現行法)

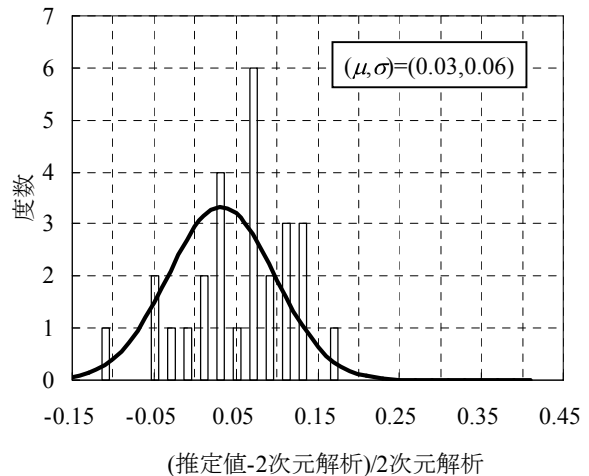


図-22 固有周期推定精度(提案法)

次に, 図-23 に現行法及び提案法と2次元解析から得られた照査用震度の比較結果を示す。また, 図-24~図-26 に照査用震度の推定精度の結果を示す。この結果, 提案法に

より推定された照査用震度の誤差割合の μ は-0.20, σ は0.17であるのに対し, 現行法【h=0.20】, 及び現行法【h=0.05】により推定された照査用震度の誤差割合は, それぞれ μ が-0.60, 及び-0.38, σ は0.09, 及び0.21であった. この結果からも, 提案法による照査用震度は, 現行法に比べて大幅に推定精度が向上したと言える. しかしながら, 平均的には過小に評価する傾向があることに注意が必要である.

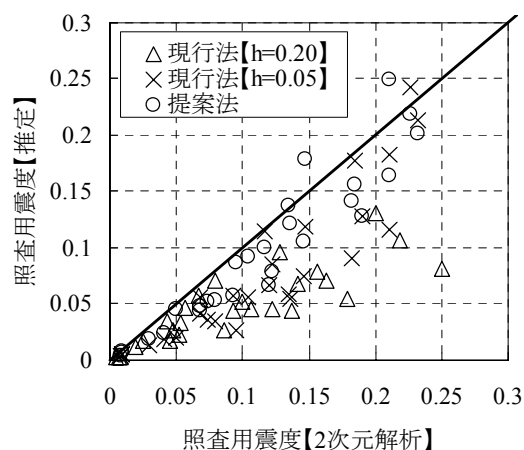


図-23 照査用震度比較

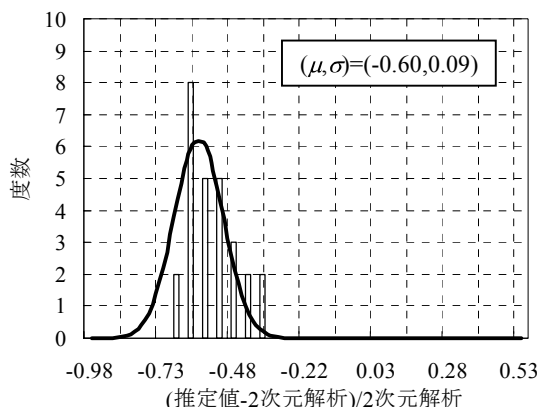


図-24 固有周期推定精度(現行法【h=0.20】)

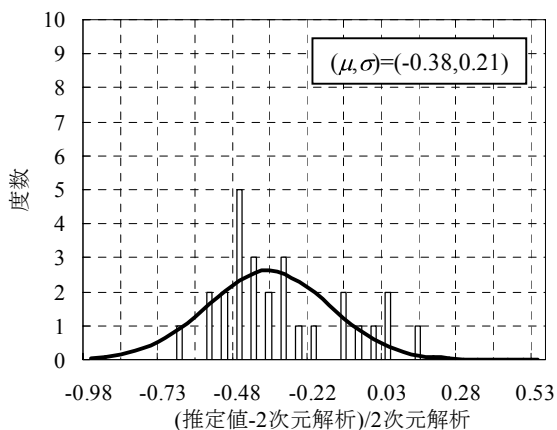


図-25 固有周期推定精度(現行法【h=0.05】)

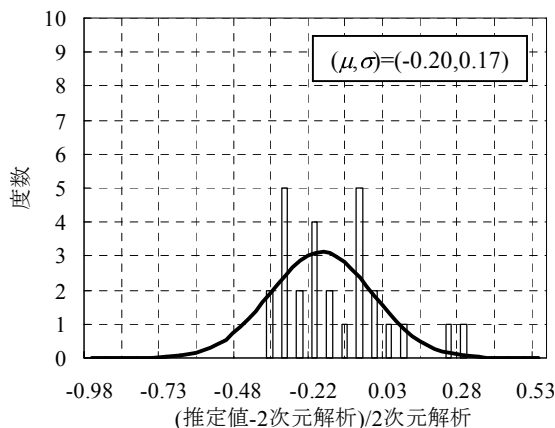


図-26 固有周期推定精度(提案法)

7. まとめ

本研究は, 直杭式栈橋の動的特性を考慮した固有周期及び照査用震度の算出方法について検討を行ったものである. 主要な結論は以下の通りである.

- ①現行法における設定とは異なり, 作用震度が大きくなるにつれ, 固有周期が長くなることが確認された. これは, 作用震度が大きくなるに従って, 栈橋杭周辺を構成する地盤のせん断剛性(水平地盤反力係数)が低下し, 固定点が下がり, 栈橋の自由長が長くなることに起因するものと考えられる.
- ②せん断剛性比と自由長の関係を定式化し, 作用震度に応じた栈橋の自由長を求めることにより, 動的特性を考慮した栈橋の固有周期を算出することができた.
- ③加速度応答スペクトルは, 補正前の仮想固定点位置で評価することが可能である.
- ④また, 2次元効果を表現する減衰定数は, 本検討の範囲内では5%程度が妥当である.
- ⑤加速度応答スペクトルの抽出箇所及び2次元効果を表現する減衰定数を適切に設定することにより, 精度の高い照査用震度の設定が可能となった.

今後の課題として, 地盤条件が異なる断面など, ケーススタディを増やすことや, 強震記録が観測されている実断面を用いた検討を行う必要がある. 特に, 加速度応答スペクトルを算出する際に用いる減衰定数は, 照査用震度の算出において非常に重要なパラメタであることから, 推定精度の向上を目的として, 強震記録が観測されている実断面等による検討等を実施するなど, 多くのケーススタディを実施する必要がある.

(2010年2月15日受付)

参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修, 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, 川端規之: 鋼管杭式栈橋の耐震設計法に関する考察, 構造工学論文集 Vol.44A, pp.1613-1622, 1998
- 3) 横田 弘, 竹鼻直人, 南兼一郎, 高橋邦夫, 川端規之: 鋼管杭式栈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 Vol.37, No.2, pp.75-130, 1998
- 4) 運輸省港湾局監修, 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999
- 5) 森田年一, 井合進, H. Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研資料 No.869, 1997
- 6) 小堤 治, 溜 幸夫, 岡 由剛, 一井康二, 井合 進, 梅木康之: 2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化, 第38回地盤工学研究発表会, pp.1899-1900, 2003
- 7) 社団法人土木学会: 動的解析と耐震設計第1巻地震動・動的解析, 技報堂
- 8) 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
- 9) 稲富隆昌, 高木保志, 風間基樹: 鋼直杭式栈橋の地震観測と動的解析, 港湾技研資料, No.615