

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1343**      June 2018

動的応答特性を考慮した胸壁の照査用震度と耐震性能照査への適応性

小濱 英司  
夏坂 亮太  
府川 裕史

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要 旨 .....	1
1. はじめに .....	4
2. 検討対象 .....	4
3. 検討手法 .....	5
4. 検討条件 .....	5
4.1 地震応答解析 .....	5
4.2 骨組解析 .....	7
5. 検討結果 .....	9
5.1 照査用震度 .....	9
5.2 性能照査 .....	12
6. まとめ .....	15
参考文献 .....	15

# Seismic coefficients of coastal parapet levees considering the dynamic response characteristics and applicability to performance verification

Eiji KOHAMA\*

Ryota NATSUSAKA\*\*

Hirofumi FUKAWA\*\*

## Synopsis

This study aimed to develop the design method for evaluating the seismic coefficients of coastal parapet levees with regard to level-1 earthquakes. In order to examine the applicability of seismic design method by using structural frame analysis and acceleration response spectrum, seismic coefficients of various coastal levees were calculated by the proposed method and seismic performance of the levees were verified.

It was clarified that the influence of the horizontal subgrade reaction on the footing and the configuration of steel pipe piles is relatively small on the horizontal seismic coefficients although the natural frequencies calculated by the frame analysis vary depending on the subgrade reaction and the configuration of piles.

Seismic performance verification was performed on pile stress of the pile foundation parapet levees and forces for the overturning and sliding of the spread foundation parapet levee. The stress-resistance ratio of piles decreased with the horizontal subgrade reaction on the footing, and increased as the diameter and plate thickness of the pile decreased. Considering the horizontal subgrade reaction on the footing increased the resistance-force ratio for sliding of the spread foundation levee and set it on the danger side, similar to the case of the pile foundation levees. Thus, it was recognized that safe side evaluation is obtained without the horizontal subgrade reaction on the footing.

**Key Words:** Coastal parapet levees, practical design, seismic coefficients, natural frequency, practical design

---

\* Head, Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Eng. Department

\*\* Member, Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Eng. Department (Toa Corporation)

\*\*\* Toa Corporation

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 e-mail: kohama-e83ab@pari.go.jp

# 動的応答特性を考慮した胸壁の照査用震度と耐震性能照査への適応性

小濱 英司\*・夏坂 亮太\*\*・府川 裕史\*\*\*

## 要 旨

本研究は、骨組解析と加速度応答スペクトルによるレベル1地震動に対する胸壁の照査用震度算出手法を用い、種々の形式の胸壁を対象として照査用震度を算出し、設計実務における性能照査への影響について検討するものである。

照査用震度算定において、骨組解析によって算出される固有振動数はフーチング側面地盤抵抗や使用する鋼管杭諸元によって変動したが、照査用震度に与える影響はあまり大きくないことが明らかとなった。

算出した照査用震度を用い、杭基礎式胸壁では杭応力度について照査し、直接基礎式胸壁では転倒および滑動の安定照査を行った。杭基礎式において鋼管杭の管径や板厚を小さくした場合、照査用震度はあまり変わらないものの、杭の断面耐力低下により作用耐力比が増加することを確認した。また、フーチング側面地盤抵抗を考慮することにより照査用震度が増加するものが多くあったが、その増分は壁体慣性力に対して抵抗側に作用するフーチング側面の地盤反力よりも小さく、結果として作用耐力比は減少した。直接基礎式においてもフーチング側面地盤抵抗を考慮することにより滑動安全率は増加して危険側の判定となった。よって、杭基礎式および直接基礎式のどちらの場合も、フーチング側面地盤抵抗を考慮しないことで安全側の評価となることを確認した。

キーワード：胸壁，レベル1地震動，照査用震度，固有振動数，設計

---

\* 地震防災研究領域耐震研究グループ長

\*\* 耐震構造研究グループ依頼研修員（東亜建設工業株式会社）

\*\*\* 東亜建設工業株式会社

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail:kohama-e83ab@pari.go.jp

## 1. はじめに

胸壁は防潮堤の一種であり、海岸線に漁港や港湾等の施設が存在し、利用の面から海岸線付近に堤防、護岸等を設置することが困難な場合において、海岸背後にある人命・財産を高波、波浪および津波から防護することを目的として設置される海岸保全施設である<sup>1)</sup>。胸壁はコンクリート壁体を有し、表-1.1 に示すように、直接基礎のもの、杭や矢板を有するものがある<sup>2)</sup>。

現在の港湾構造物のレベル 1 地震動に対する耐震設計では、構造物の動的応答を考慮した照査用震度を用いた震度法による設計が主流であるが、現行の港湾の基準<sup>3)</sup>では動的特性を考慮した胸壁の耐震性能評価手法は明確な記載がなく、港湾ごとに決められているレベル 1 地震動を胸壁の耐震設計に用いることが難しい現状にある。そこで、レベル 1 地震動に対する胸壁の照査用震度算出手法の確立を目的として、骨組解析と加速度応答スペクトルを用いた手法について数値解析および模型実験による検討を行い、その有効性を確認した<sup>4)</sup>。本研究ではこの方法により、種々の形式の胸壁を対象として地震時応答特性を考慮したレベル 1 地震動に対する照査用震度を算出し、設計実務における性能照査への影響について検討する。

## 2. 検討対象

本研究では、一般的な断面を有する構造物を念頭に、構造形式や大きさの異なる 3 つの胸壁を検討対象として選定した。図-2.1 に対象とする胸壁の断面図を示す。構造諸元として、逆 T 型杭基礎式の中から、大きさの異なる 2 つの構造物 (TYPE-1<sup>5)</sup>, TYPE-2), 重力式直接基礎の中から 1 つの構造物 (TYPE-3) を参考とした。TYPE-

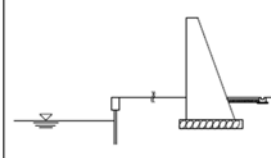
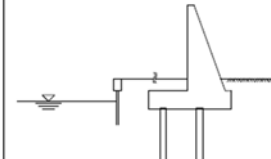
3 の重力式胸壁は、一般的な構造として、海岸保全施設の基準<sup>1)</sup>に掲示されているものである。

一般的に胸壁は海岸線から陸上側に離れたところに置かれる構造物であり、既往検討<sup>4)</sup>においても平坦な地盤上に設置される胸壁を対象に検討されており、本研究で対象とする胸壁も同様とする。よって海岸線付近や傾斜した地盤上に配置される胸壁は対象外とし、その耐震性能照査においては別途壁体下の基礎地盤の安定性に関する検討が必要である。

## 3. 検討手法

本研究においては、これまで検討された手法<sup>4)</sup>を用いて胸壁の照査用震度を算定し、レベル 1 地震動変動状態の性能照査を試行して結果を確認する。図-3.1 に既往検討で提案された胸壁の照査用震度の算定フローを示す。ここでは、地盤の次元地震応答解析と胸壁構造の骨組解析の 2 つの数値解析を実施して、照査用震度を求める。

表-1.1 胸壁の型式分類<sup>2)</sup>から引用したものに加筆

胸壁		
単塊型	重力式、 杭式・鋼矢板式	
L型・ 逆T型	重力式、 杭式・鋼矢板式	

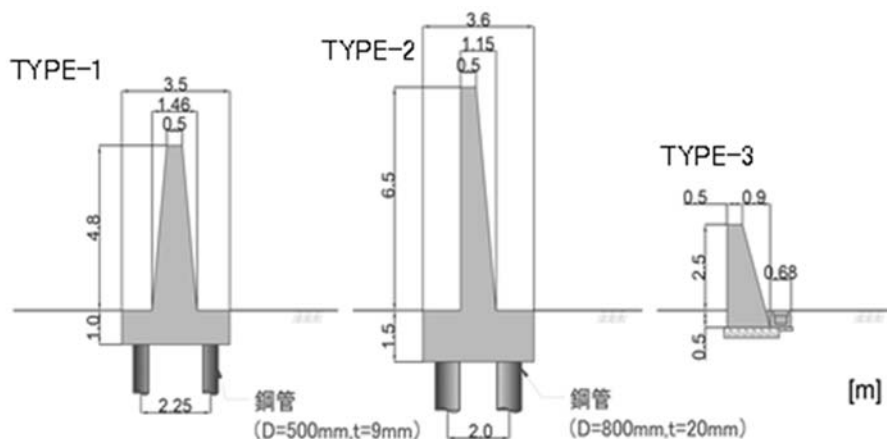


図-2.1 対象とする構造物の断面図

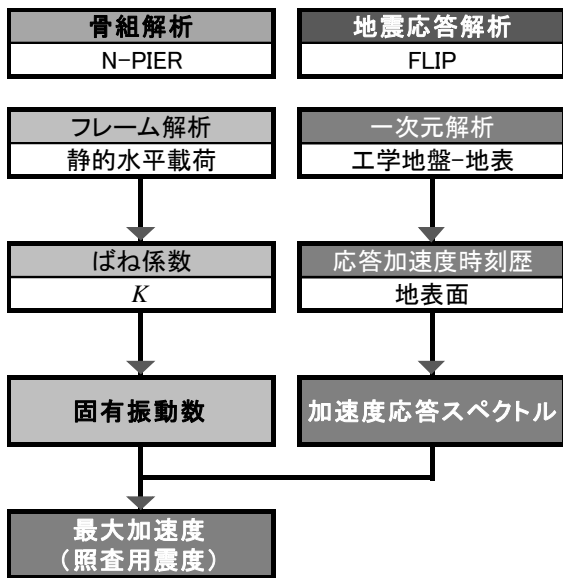


図-3.1 照査用震度の算定フロー

胸壁の最大加速度推定に用いる加速度応答スペクトルは、有限要素解析プログラム FLIP を用いて一次元地震解析を実施し、地表面節点の応答加速度時刻歴から算出した。なお、杭式構造物である栈橋構造物の設計では、一次元地震応答解析での仮想地表面下  $1/\beta$  における応答加速度時刻歴から算出した加速度応答スペクトルを用いることとされているが、胸壁は地表面位置に上部工が存在するために、基盤から地表面までの地盤全体の振動特性を加速度応答スペクトルに反映させるという観点から、地表面の時刻歴を用いて加速度応答スペクトルを算出することとしている。

一方、胸壁の固有振動数は構造解析プログラム N-PIER<sup>6)</sup>を用いた骨組解析にて算出する。ここでは、地盤バネおよび梁要素を用いて胸壁構造物をモデル化し、静的な水平荷重を壁体重心位置に載荷した際の水平荷重-変位曲線の初期勾配を構造物のばね係数  $K$  として読み取る。読み取ったばね係数  $K$  と、壁体の重量  $W$  を用いて、式(1)により固有周期  $T_s$  を算出する。算出した固有周期は式(2)のように固有振動数に換算する。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{T_s} \quad (2)$$

ここに、

- $T_s$ : 固有周期 (s)
- $W$ : 壁体重量 (kN)
- $g$ : 重力加速度 ( $m/s^2$ )
- $K$ : ばね係数 (kN/m)

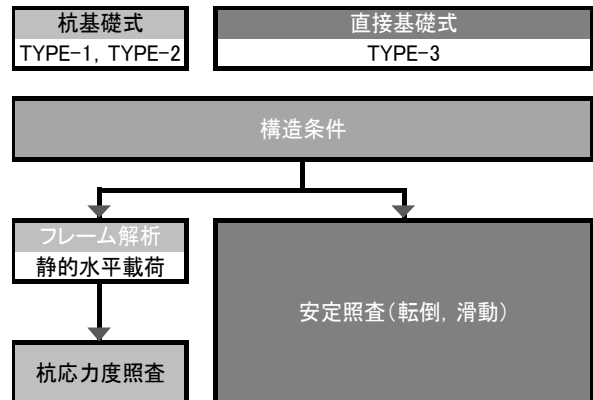


図-3.2 設計実務による検討フロー

$f$ : 固有振動数 (Hz)

以上により算出された固有振動数と応答スペクトルを用いて地震時の壁体の応答最大加速度を求め、重力加速度で除すことによって照査用震度を求める。

得られた照査用震度を用いて壁体慣性力を算出し、胸壁の耐震性能照査を行う (図-3.2 参照)。杭基礎式胸壁 (TYPE-1, TYPE-2) では、胸壁構造の骨組解析において壁体慣性力を作用させて杭の応力度と支持力に関する照査が考えられるが、ここでは、地震時の壁体水平慣性力が大きく影響する杭の応力度について検討を行う。重力式胸壁 (TYPE-3) においては壁体の滑動、転倒、支持力の照査が考えられ、ここでは、壁体慣性力の影響が大きい滑動および転倒について照査する。本研究においては、フーチング側面の地盤抵抗ばねの有無や鋼管杭の管径および板厚を変化させた場合の性能照査への影響について確認した。

#### 4. 検討条件

##### 4.1 地震応答解析

地盤の一次元地震応答解析には有限要素解析プログラム FLIP を用いる。地盤の物性値や構成は、長尾ら<sup>7)</sup>による栈橋の設計震度算出に関する検討の際に用いたモデルを参照している。ここでは、過去の港湾基準に示されていた地盤種別<sup>8)</sup>を考慮して地盤条件が設定されており、Ground-1 (第 III 種地盤相当)、Ground-2 (第 II 種地盤相当) および Ground-3 (第 I 種地盤相当) の 3 条件としている。表-4.1 に地盤要素の物性を示す。3 ケースの地盤条件について液状化が発生しないと想定して、FLIP において標準的に用いられている森田ら<sup>9)</sup>による設定法に基づき解析に用いる地盤パラメータを設定した。入力地震動には、港湾施設研究室 HP にて公開されているレベ

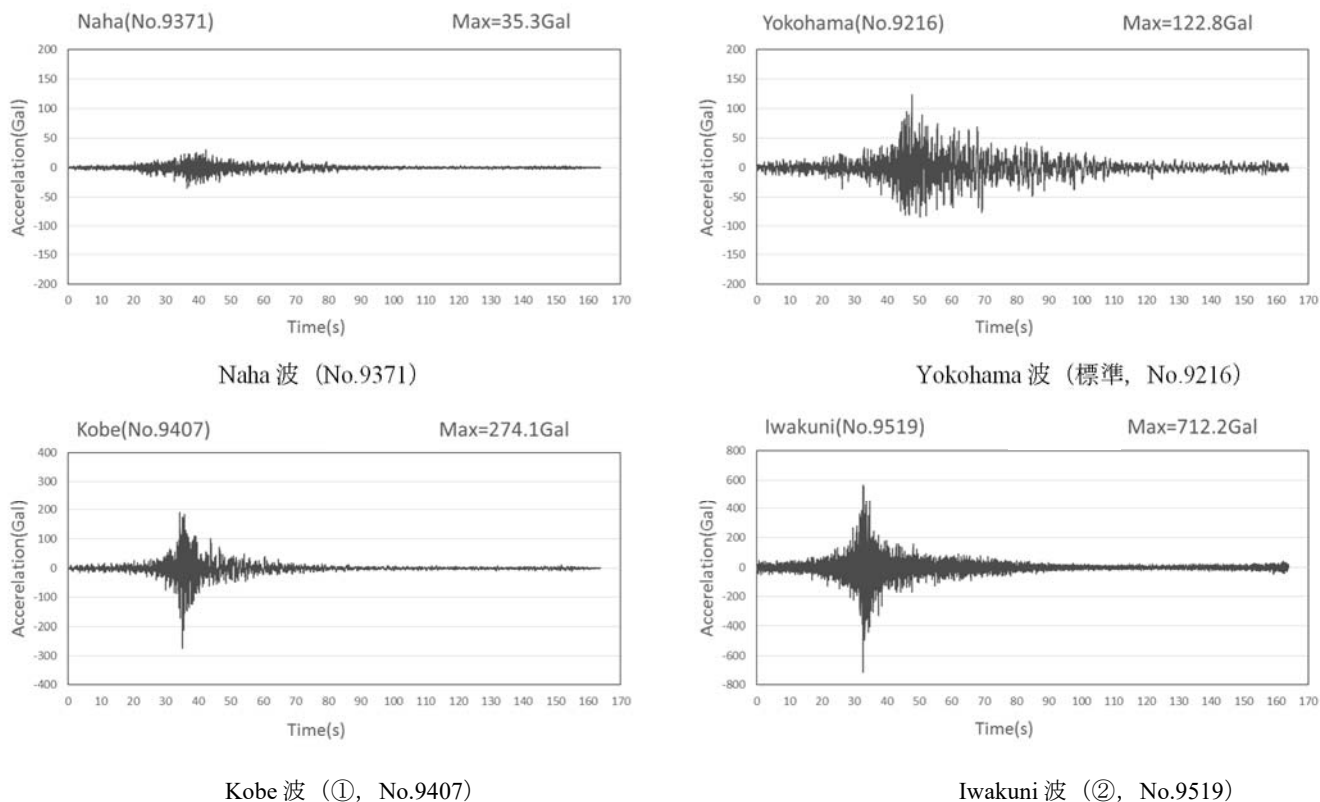
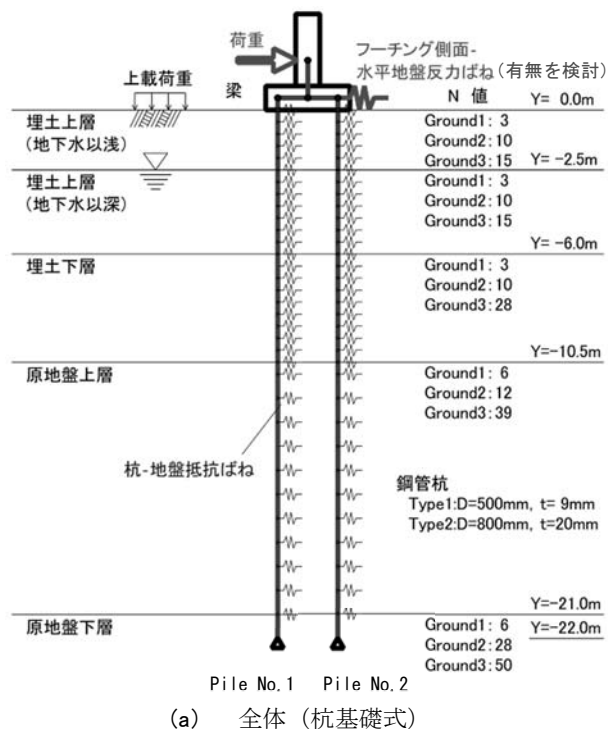
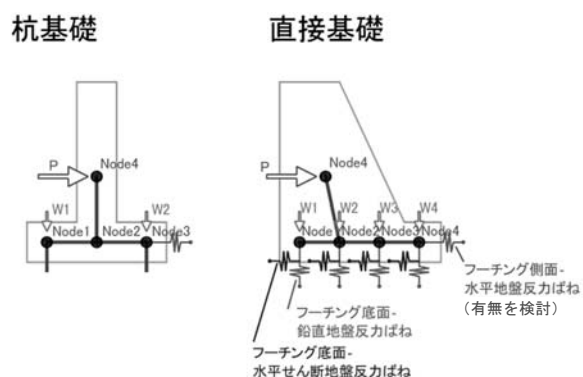


図-4.1 入力波時刻歴



(a) 全体 (杭基礎式)



(b) 上部工周辺

図-4.2 N-PIER 概念図

ル 1 地震動の中から，加速度振幅が大きいものから小さいものまでが含まれるよう，図-4.1 に示す 4 種類の地震波（工学的基盤，2E 波）<sup>10）</sup> を用いた．図には地震波の

継続時間および最大加速度を併記している．また，レーレー減衰パラメータは，地盤の一次固有周期および最大応答変位を考慮して $\beta = 0.002$  とした．既往研究において，

表-4.1 地盤要素解析パラメータ

地盤	土質区分		湿潤密度	基準有効拘束圧	基準初期せん断剛性	基準初期体積剛性	粘着力	内部摩擦角	最大減衰	S波速度	N値	層厚	備考
			t/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	°	-	m/s		m	
Ground-1	埋土	上層(地下水以浅)	1.8	89.8	25,920	67,595	0	37	0.24	120	3	2.5	第Ⅲ種地盤相当
		上層(地下水以深)	2.0				0					3.5	
		下層					0					4.5	
	原地盤	上層	2.0	239.8	45,000	117,353	0	38	0.24	150	6	9.5	
		下層					0					1.0	
Ground-2	埋土	上層(地下水以浅)	1.8	89.8	58,320	152,089	0	38	0.24	180	10	2.5	第Ⅱ種地盤相当
		上層(地下水以深)	2.0				0					3.5	
		下層					0					4.5	
	原地盤	上層	2.0	198.5	72,200	188,286	0	38	0.24	190	12	9.5	
		下層		279.2	125,000	325,980	0	39	0.24	250	28	1.0	
Ground-3	埋土	上層(地下水以浅)	1.8	72.9	79,380	207,011	0	38	0.24	210	15	2.5	第Ⅰ種地盤相当
		上層(地下水以深)	2.0			0	3.5						
		下層				142.3	125,000					325,980	
	原地盤	上層	2.0	198.5	156,800	408,910	0	39	0.24	280	39	9.5	
		下層		279.2	405,000	1,056,176	0	44	0.24	450	50	1.0	

表-4.2 杭要素解析パラメータ

形式	寸法		降伏応力	断面二次モーメント	断面積	全塑性モーメント	曲げ剛性		降伏軸方向応力	降伏モーメント	備考
	外径	板厚					第1勾配	第2勾配			
	m	m									
TYPE-1	0.5	0.009	315 (SKK490)	418×10 <sup>-6</sup>	1388×10 <sup>-5</sup>	684	8.36×10 <sup>4</sup>	0	4372	527	1本分 (奥行き2.25m)
	0.4	0.006	315 (SKK490)	144×10 <sup>-6</sup>	743×10 <sup>-5</sup>	219	2.88×10 <sup>4</sup>	0	2340	169	1本分 (奥行き2.25m)
TYPE-2	0.8	0.020	235 (SKK400)	3730×10 <sup>-6</sup>	4901×10 <sup>-5</sup>	2860	7.46×10 <sup>5</sup>	0	11517	2191	1本分 (奥行き2.00m)
	0.6	0.009	235 (SKK400)	730×10 <sup>-6</sup>	1671×10 <sup>-5</sup>	739	1.46×10 <sup>5</sup>	0	3927	572	1本分 (奥行き2.00m)
	0.4	0.009	235 (SKK400)	211×10 <sup>-6</sup>	1106×10 <sup>-5</sup>	323	4.22×10 <sup>4</sup>	0	2599	248	1本分 (奥行き2.00m)

胸壁の照査用震度算定に用いる加速度応答スペクトル算出時の減衰定数は、 $h = 0.4$  とすることで二次元地震応答解析や模型振動実験結果と整合するとされており<sup>4)</sup>、本検討でもその値を用いることとした。

#### 4.2 骨組解析

骨組解析には構造解析プログラム N-PIER を使い、図-4.2 のようなモデルおよび条件を設定した。考慮した杭諸元を表-4.2 に示す。なお、地盤の構成は地盤の一次元地震応答解析と同等の条件を与えている。杭は、図-2.1 に示されるように、TYPE-1 では径 500mm 肉厚 9mm、TYPE-2 では径 800mm 肉厚 20mm のものが実設計におい

て用いられている。本研究でもそれらを基本としているが、杭諸元の影響を検討するため表中の他の諸元の杭についても検討した。

図-4.2 に示されるように、壁体モデルはフーチングに相当する横梁要素に、地上部の壁体を想定した縦梁要素を追加することで、水平荷重となる地震時の壁体慣性力の作用高さの影響を考慮した。杭基礎式では、壁体モデルの 4 節点のうち、3 節点を横梁要素の杭接合点 (Node1 および Node3) と梁中心 (Node2) に配置し、縦梁要素には胸壁の重心位置に水平荷重を作用させる節点 (Node4) を配置した。これらの梁要素は杭要素と比較して非常に大きい剛性とし、上部工そのものの変形は



考慮しない。プログラムの構成上、地表面はフーチング下端面としたが、フーチング深さに相当する上載荷重を作用させることで、地盤内の拘束圧を整合させている。

杭要素に作用する地盤の水平抵抗は地盤ばねを用いて設定することとし、水平地盤抵抗反力係数を  $N$  値から直接評価する港湾基準の式(3)<sup>11)</sup>を用いることとした。既往研究<sup>4)</sup>ではその地盤反力係数算出式の違いによる固有振動数の差は、加速度応答スペクトルと合わせて求められる照査用震度にあまり影響しないことが明らかにされた。一方、栈橋の固有振動数を算定する場合においては、港湾基準における水平地盤反力係数式の 2 倍の値を用いる方が実際の値に近いという報告があり<sup>12,13)</sup>、胸壁の照査用震度に関する既往検討においても 2 倍の値を用いることで有限要素解析での固有振動数に近い値となった<sup>4)</sup>。よって、本検討においても同様に、固有振動数算定の際の骨組解析では、杭要素に接続する地盤ばねの地盤反力係数式(3)において、係数  $a = 2.0$  とした。

$$k_H = 1500aN \quad (3)$$

ここに、

$k_H$  : 水平方向地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)

$a$  : 地盤反力の推定に用いる係数 (=2.0, 地震時)

$N$  :  $N$  値

また、前述のように、地表面はフーチング下端面としてフーチング深さに相当する上載荷重を作用させて地盤内の拘束圧を整合させており、内部摩擦角と粘着力から受働土圧を求め、地盤反力の上限值としている。

フーチング側面の地盤抵抗ばねについては、その有無による違いを検討している。地盤抵抗ばねはフーチング側面に相当する地中部横梁要素の陸側の節点 (Node3) に水平方向に配置し、道路橋示方書<sup>14)</sup>に示されている以下の式(4)により地盤反力を作用させた。

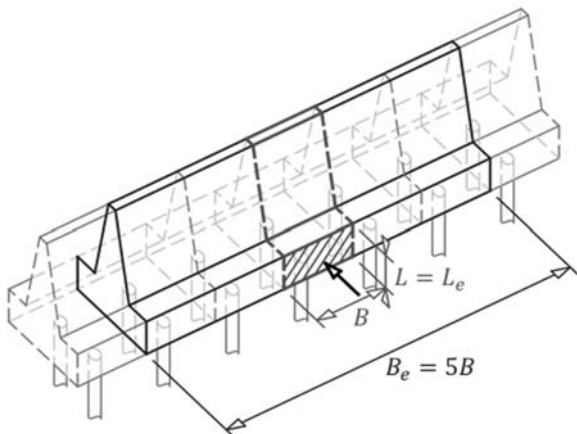


図-4.3 奥行き 1 ユニットの考え方

$$k_H = k_{H0} \left( \frac{B_H}{0.3} \right)^{-3/4} \quad (4)$$

ここに、

$k_H$  : 水平方向地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)

$k_{H0}$  : 直径 0.3m の剛体円盤による平板載荷試験の値に相当する水平方向地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>) で、各種土質試験又は調査により求めた変形係数から推定する場合は式(5)により求める。

$$k_{H0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \quad (5)$$

さらに、

$E_0$  : 地盤の変形係数 (kN/m<sup>2</sup>) で、式(6)により推定する。

$$E_0 = 2800N \quad (6)$$

また式(4)において、 $B_H$  : 荷重作用方向に直交する基礎の換算載荷幅 (m) で、式(7)により求める。

$$B_H = \sqrt{A_H} \quad (7)$$

ここで、

$A_H$  : 荷重作用方向に直交する基礎の載荷面積 (m<sup>2</sup>) であるが、胸壁のような線状構造物は奥行方向に連続するため、本検討では、図-4.3 に示すようにコンクリート壁に設置される目地間の壁体を一つの構造物と想定し、その基礎の奥行き断面積を載荷面積として仮定した。たとえば、TYPE-2 においては杭 5 列分を目地間隔としており、1 ユニットの奥行  $B_e = 5B$  とし ( $B$  : 杭間隔)、フーチング側面の面積  $5BL$  を載荷面積  $A_H$  とした。

直接基礎に関しては、図-4.2 (b) に示すように、重心節点と 4 つの地中部節点からなるモデルを設定した。壁体に作用する地盤の反力ばねは、①フーチング側面に作用する水平地盤反力ばね、ならびに②フーチング底面に作用する鉛直地盤反力ばね、および③水平せん断地盤反力ばねを用いるモデルとした。①フーチング側面に作用する水平地盤反力ばねは、杭基礎式モデルと同様に、その有無による比較検討を行うこととし、式(4)により地盤反力係数を算出する。この際の換算載荷幅  $B_H$  は、奥行き幅を上部工目地間隔 5m と、フーチング側面の載荷面積  $A_H$  と式(7)により算出した。

これに対し、②フーチング底面に作用する鉛直地盤反力ばねは以下の式(8)<sup>15)</sup>により反力係数を算出する。

$$k_V = k_{V0} \left( \frac{B_V + 0.3}{2B_V} \right)^2 \quad (8)$$

ここに、

$k_V$  : 鉛直方向地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)

$k_{V0}$  : 直径 0.3m の剛体円盤による平板載荷試験の値

に相当する水平方向地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)

$B_V$  : 基礎の換算載荷幅 (m) で、式(9)により求める.

$$B_V = \sqrt{A_V} \quad (9)$$

ここで、

$A_V$  : 鉛直方向の載荷面積 (m<sup>2</sup>)

また、③水平せん断地盤反力ばねは、道路橋示方書の式(10)により地盤反力係数を算出し、上部工地中部に設定した4節点 (Node1~Node4) に地盤反力を配分させた.

$$k_s = \lambda k_v \quad (10)$$

ここに、

$k_s$  : 水平方向せん断地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)

$\lambda$  : 鉛直方向地盤反力係数に対する水平方向せん断地盤反力係数の比

地盤反力係数の鉛直水平比 $\lambda$ は通常 $\lambda=1/3\sim 1/4$ とするが、ここでは、変位が大きく計算される $\lambda=1/4$ を採用した.

なお、固有振動数は、壁体重心節点に水平荷重を載荷した際の水平荷重 - 水平変位曲線の初期勾配 (ばね係数  $K$ ) を読み取ることで、式(1)により固有周期  $T_s$  (s) (固有振動数 :  $1/T_s$  (Hz) ) を算出した.

### 4.3 照査用震度を用いた性能照査

照査用震度を用いた性能照査では、壁体水平慣性力を重心位置に作用させて耐震性能照査を行う. 慣性力算定においては、前述の地盤の一次元地震応答解析から求めた地表面での加速度応答スペクトルと、地盤ばねを考慮した胸壁構造の骨組解析による胸壁の固有振動数を用いた.

杭基礎式胸壁 (TYPE-1, TYPE-2) では、杭の応力度と支持力に関する照査が考えられるが、本検討では地震時の壁体水平慣性力が大きく影響する杭の応力度について確認する. 固有振動数算出で用いた骨組解析モデルの壁体重心位置に照査用震度から求めた慣性力を作用させ、杭に生じた応力度を以下により照査する. 降伏応力は、表-4.2 に示されるように TYPE-1, TYPE-2 の鋼管杭の規格により、それぞれ 315N/m<sup>2</sup>, 235N/m<sup>2</sup> である.

$$F \geq \frac{\sigma}{\sigma_y} \quad (11)$$

ここで、

$F$  : 作用耐力比

$\sigma_y$  : 降伏応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma$  : 発生応力 (N/mm<sup>2</sup>) であり、式(12)により求める.

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{Z} \quad (12)$$

式(12)において、

$N$  : 軸力 (kN)

$A$  : 断面積 (mm<sup>2</sup>)

$M$  : 曲げモーメント (kNm)

$Z$  : 断面係数 (mm<sup>3</sup>)

直接基礎式胸壁 (TYPE-3) では、照査用震度から求める壁体慣性力と構造諸元を考慮し、それぞれ式(13)および式(14)により転倒および滑動の耐力作用比 (安全率) の照査を行った.

$$F_s \leq \frac{bW}{aP_H} \quad (13)$$

$$F_s \leq \frac{fW}{P_H} \quad (14)$$

ここに、

$F_s$  : 耐力作用比 (転倒照査では常時 1.2 以上, 異常時 1.1 以上. 滑動照査では常時 1.2 以上, 異常時 1.0 以上を標準とする<sup>16)</sup>)

$W$  : 壁体重量 (=66.7) (kN/m)

$P_H$  : 壁体に作用する水平力 (kN/m)

$a$  : 水平合力の作用線から壁体底面までの距離 (=1.25) (m)

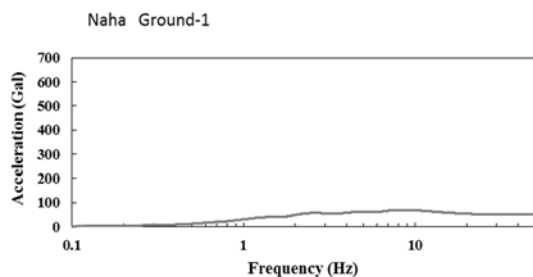
$b$  : 壁体重量合力の作用線から壁体前趾までの距離 (=1.57) (m)

$f$  : 壁体底面と地盤との摩擦係数 (=0.5)

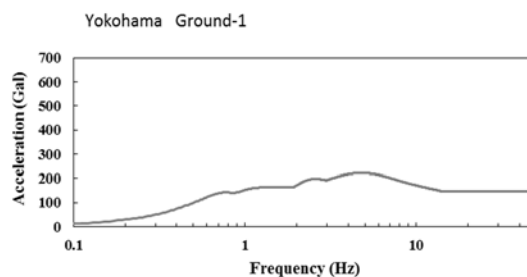
## 5. 検討結果

### 5.1 照査用震度

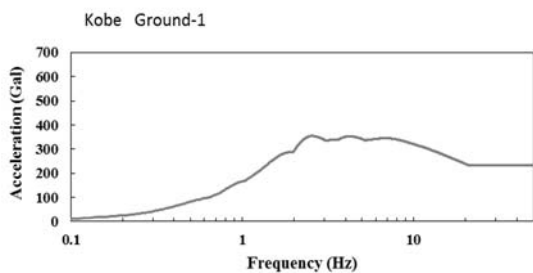
地盤の一次元地震応答解析より求めた地表面での加速度応答スペクトルについて、各入力波について地盤条件を Ground-1 としたものを図-5.1 に示す. また、Iwakuni 波および Yokohama 波について地盤条件を Ground-2, Ground-3 としたものを図-5.2 に示す. 胸壁の照査用震度算定における応答スペクトルの減衰定数として、既往研究で推奨されている  $h = 0.4$ <sup>4)</sup> を用いているため、どの条件においてもスペクトル形状はなだらかな形状を示す. 入力地震動により異なるものの、数 Hz から 10 Hz 程度まで振動数の増加に伴ってスペクトルは増加し、その後は振動数の増加とともに減少を始め、やがて一定の数値に落ち着く. また、図-5.1 (d)、図-5.2 の Iwakuni 波で地盤条件が異なる場合のスペクトルは他の入力波形と比較して類似しており、スペクトル曲線の形状は地盤条件



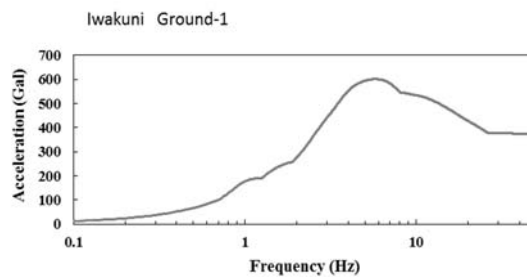
(a) Naha 波



(b) Yokohama 波



(c) Kobe 波



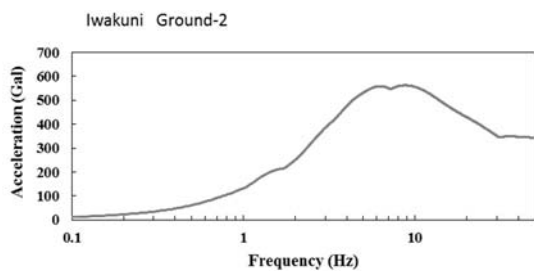
(d) Iwakuni 波

図-5.1 入力波ごとの加速度応答スペクトル (Ground-1)

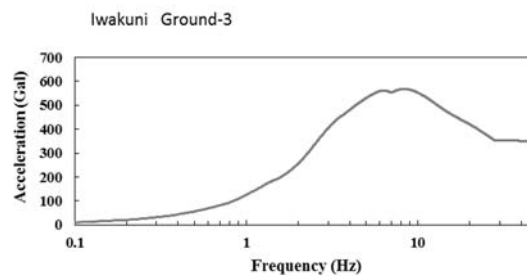
の影響よりも入力波の影響を大きく受けていることがわかる。

応答スペクトルと固有周期を用いて算出した照査用震度について、地盤条件の違いとフーチング側面の地盤抵抗ばねの有無による比較を図-5.3 に示す。前述のように、TYPE-1 では径 500mm 肉厚 9mm, TYPE-2 では径 800mm 肉厚 20mm を用いた時のものを示しており、そのときの

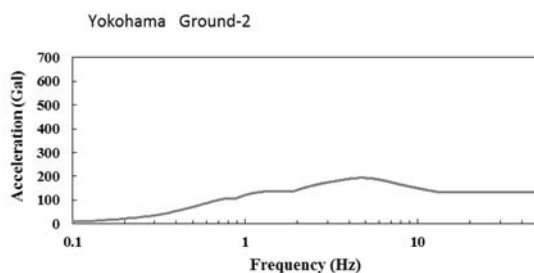
固有振動数も合わせて示している。図より、フーチング側面地盤抵抗ばねの有無により照査用震度が変化しているが、その増減傾向は地震波および地盤条件により異なる。図-5.4 は、図-5.3 におけるフーチング側面地盤抵抗が有る場合の震度について、側面地盤抵抗が無い場合のものに対する増減を比率で示したものである。杭基礎式の TYPE-1, TYPE-2 における Naha 波と Iwakuni 波で



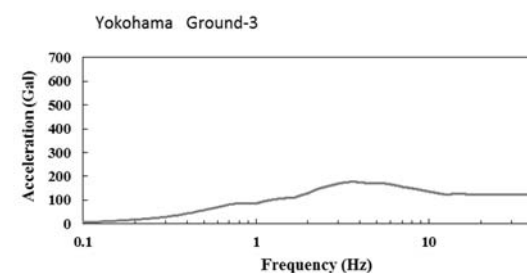
(a) Ground-2, Iwakuni 波



(b) Ground-3, Iwakuni 波

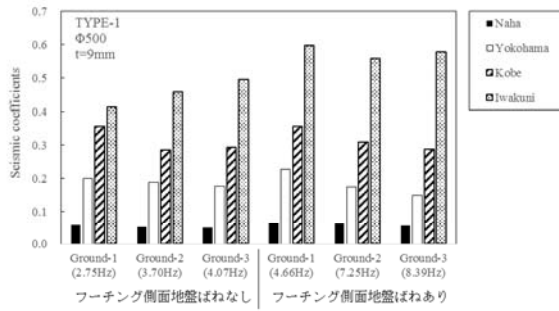


(c) Ground-2, Yokohama 波

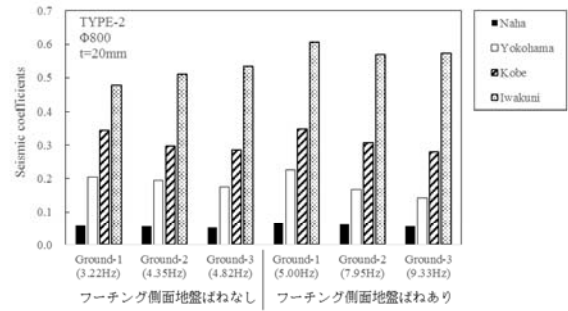


(d) Ground-3, Yokohama 波

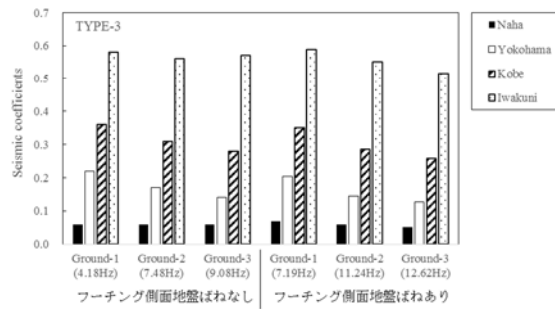
図-5.2 地盤条件ごとの加速度応答スペクトル (Iwakuni 波, Yokohama 波)



(a) TYPE-1

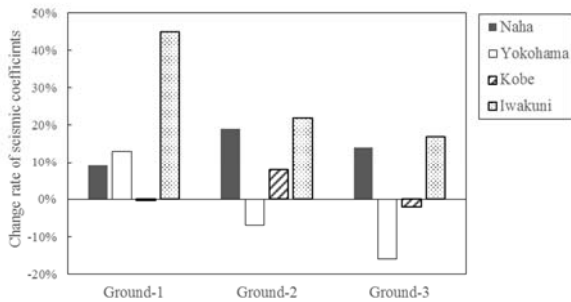


(b) TYPE-2

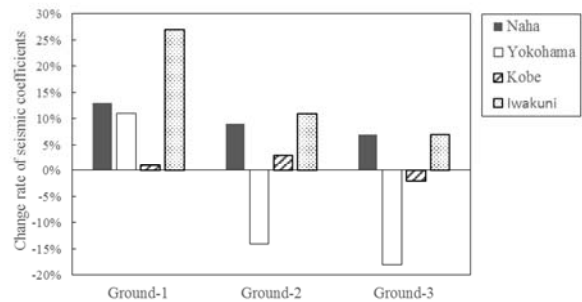


(c) TYPE-3

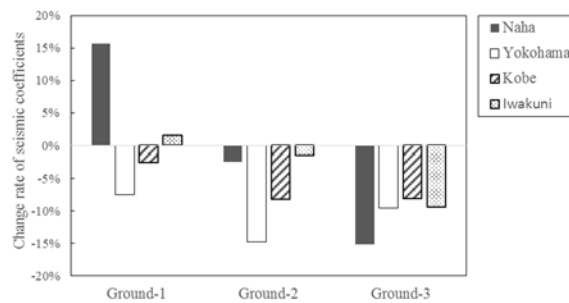
図-5.3 フーチング側面地盤ばねの有無による照査用震度の比較  
縦軸：照査用震度，横軸：地盤条件（固有振動数）



(a) TYPE-1



(b) TYPE-2

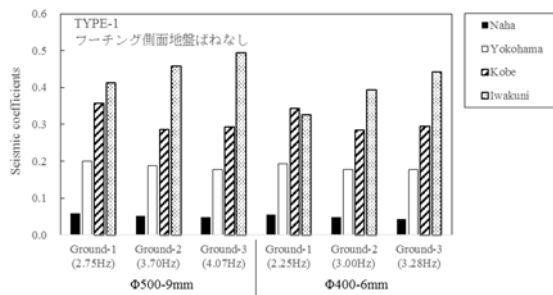


(c) TYPE-3

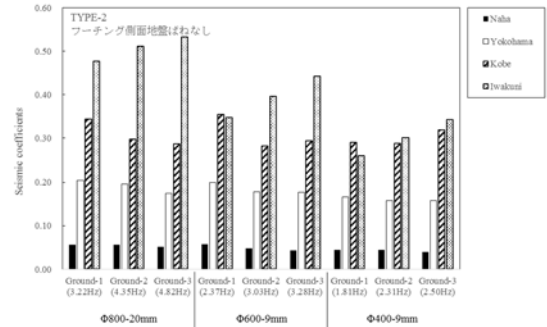
図-5.4 フーチング側面地盤ばね考慮時の照査用震度変化率  
縦軸：照査用震度の変化率，横軸：地盤条件（固有振動数）

は、地盤抵抗ばねを考慮した場合、どの地盤条件でも 10～45%程度照査用震度の値は大きくなっているが、Yokohama 波の Ground-2, Ground-3 においては 15%程度低下しているケースもあった。これは図-5.1, 図-5.2 に

示すような各地盤条件と地震波での加速度応答スペクトルの形状と、固有振動数の関係によるものである。たとえば、胸壁の固有振動数は胸壁構造諸元や地盤条件により異なるが、フーチング側面の地盤抵抗ばねが有る条件



(a) TYPE-1



(b) TYPE-2

図-5.5 杭諸元の変化による照査用震度の比較  
縦軸：照査用震度，横軸：地盤条件（固有振動数）

のほうが数 Hz 程度高く，その付近の振動数で Naha 波や Iwakuni 波での応答スペクトルは振動数とともに大きくなり，よって照査用震度は大きくなる．一方，Yokohama 波の Ground-2，Ground-3 では，数 Hz から 10Hz 程度まで振動数の増加とともにスペクトルはゆるやかに減小しており，フーチング側面の地盤抵抗ばねを考慮することによる固有振動数の増加で照査用震度は小さくなっている．

図-5.3(c)に示す直接基礎形式の TYPE-3 では，フーチング側面の地盤抵抗ばねを考慮した場合に各地盤条件において固有振動数は 3Hz 程度増加している．ただし，フーチング側面地盤抵抗の有無にかかわらず固有周波数は杭基礎式よりも比較的高く（4～13Hz），その振動数帯でスペクトル曲線はあまり増減が無いことから，杭基礎式と比較して，読み取られる最大加速度には大きな差が生じなかった．

図-5.5 には杭基礎式について鋼管杭の諸元を変化させた場合の照査用震度の比較結果を示している．どちらの構造形式も，管径や板厚を小さくしたことにより胸壁の固有振動数は低下し，その周波数帯におけるスペクトル形状の影響もあって照査用震度も低下した．TYPE-1 は径 500mm 厚さ 9mm から径 400mm 厚さ 6mm に変化させており，照査用震度は最大で 20% 程度（Ground-3，Iwakuni 波）低下した．TYPE-2 は径 800mm 厚さ 20mm

から径 600mm 厚さ 9mm，さらに径 400mm 厚さ 9mm へと変化させ，照査用震度はそれぞれ最大で 30% 程度と 50% 程度低下（どちらも Ground-1，Iwakuni 波）した．TYPE-2 のように杭の諸元を大幅に変化させると固有振動数の変化も大きく，照査用震度への影響も大きい．

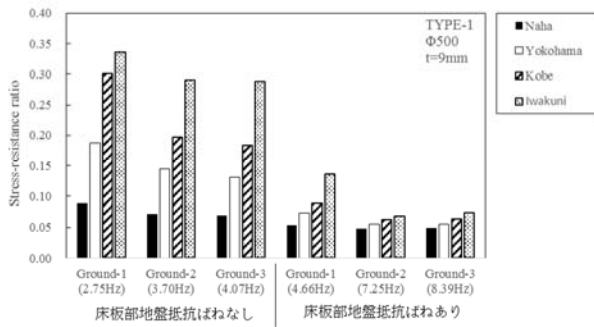
## 5.2 性能照査

### (1) 杭基礎式（TYPE-1，TYPE-2）

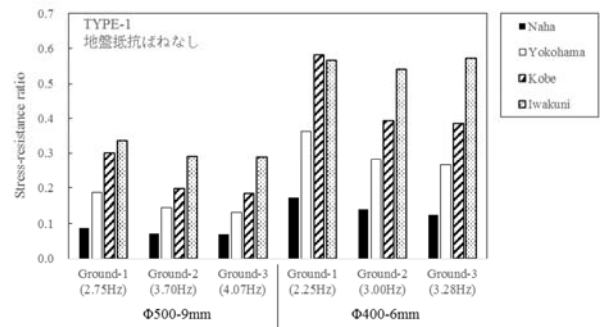
前項で求めた照査用震度より地震時壁体慣性力を算出して骨組解析モデルに作用させ，鋼管杭に生じた軸力および曲げ応力度について，式(11)，(12)により作用耐力比としたものを図-5.6 に示す．ここでは，港湾基準における栈橋の杭の応力照査の場合と同様に，杭要素に作用する地盤の水平抵抗を表現する地盤ばねについて，式(3)における係数  $a$  を 1.0 とした．降伏応力は TYPE-1，TYPE-2 の鋼管杭の規格により，表-4.2 に示される値を用いている．図-5.6 においては，フーチング側面の地盤抵抗ばねの有無と，杭諸元を変化させた場合の比較も示している．

表-5.1 地盤抵抗ばねの有無による壁体慣性力の比較（TYPE-1（Φ500，t=9mm）），

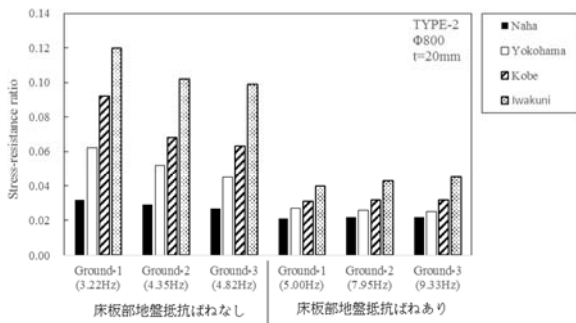
地盤条件	Ground-1		Ground-2		Ground-3	
	無	有	無	有	無	有
フーチング側面地盤ばね	無	有	無	有	無	有
照査用震度	0.41	0.60	0.46	0.56	0.49	0.58
①壁体慣性力[kN]	161.5	236.4	181.2	220.6	193.1	228.5
②フーチング側面地盤ばね反力[kN]	—	100.1	—	105.8	—	105.8
①-②[kN]	161.5	136.3	181.2	114.8	193.1	122.7



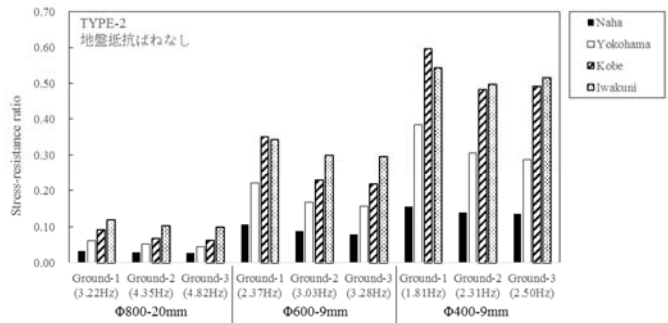
(a) 地盤抵抗ばねの有無による比較 (TYPE-1)



(b) 杭諸元の変化による比較 (TYPE-1)



(c) 地盤抵抗ばねの有無による比較 (TYPE-2)

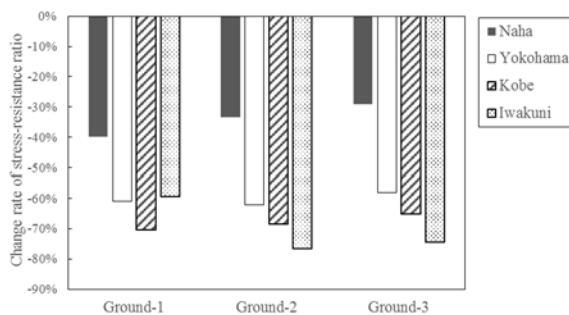


(d) 杭諸元の変化による比較 (TYPE-2)

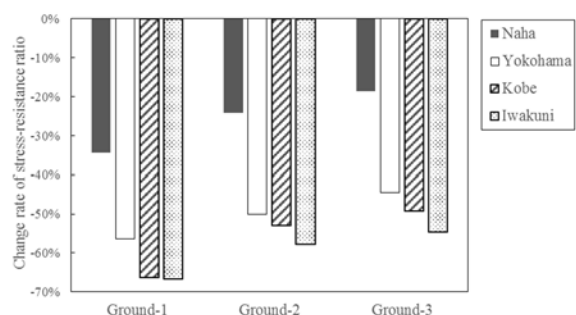
図-5.6 各比較条件における杭の応力照査 ( $a=1$ )  
縦軸：作用耐力比，横軸：地盤条件（固有振動数）

フーチング側面の地盤抵抗ばねの有無による比較をすると(図-5.6(a), (c)), すべての地盤条件および入力波において、地盤抵抗ばねを考慮した場合に作用耐力比の低下が見られた。図-5.7は、図-5.6(a), (c)におけるフーチング側面地盤抵抗が有る場合の作用耐力比について、側面地盤抵抗が無い場合に対する増減の比率で示したものである。入力最大加速度の大小によりその影響度は変わるが、地盤抵抗ばねを考慮しない場合よりも、TYPE-1で最大80%程度、TYPE-2では最大70%程度作用耐力比は減少する。前項に示すように、地盤抵抗ばねを考慮すると胸壁の固有振動数は増大し、条件によるもの

の、照査用震度は増加するものが多くあった。しかし、表-5.1にTYPE-1でIwakuni波の場合における地盤抵抗ばねの有無による壁体慣性力、フーチング側面地盤反力とその合力を示すように、フーチング側面ばねが有ることによる壁体慣性力の増分は、フーチング側面の地盤ばね反力よりも小さい。フーチング側面の地盤ばね反力は壁体慣性力に対して抵抗側に作用する。よって、フーチング側面ばねが有る場合、壁体を側方に押す外力となる壁体慣性力とフーチング側面地盤ばね反力の合力は小さくなり、結果として杭応力の作用耐力比が減少している。管径と板厚を小さくした場合には、杭応力の作用耐力

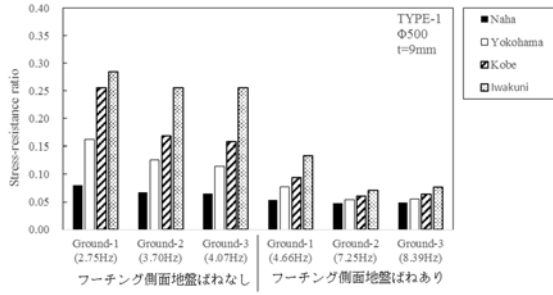


(a) TYPE-1

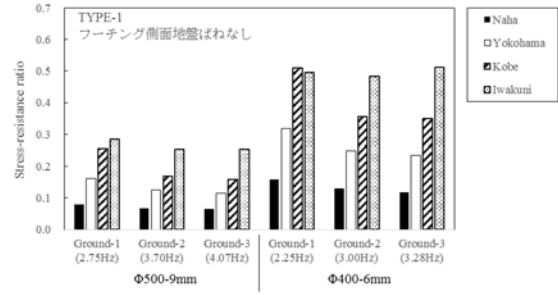


(b) TYPE-2

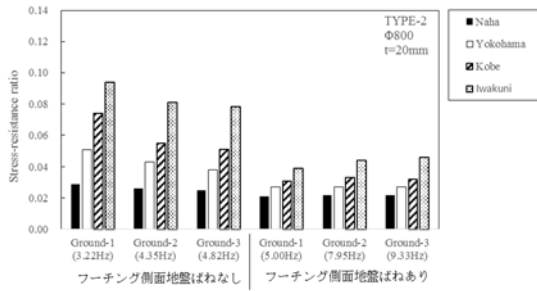
図-5.7 フーチング側面地盤ばね考慮時の作用耐力比変化率 ( $a=1$ )  
縦軸：作用耐力比の変化率，横軸：地盤条件（固有振動数）



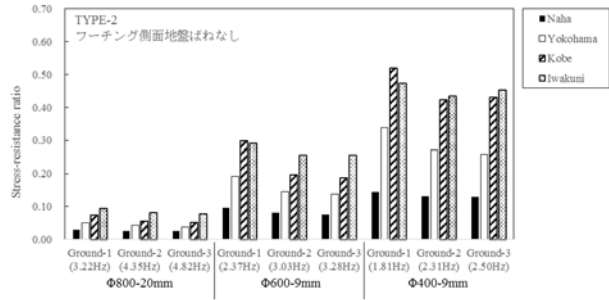
(a) 地盤抵抗ばねの有無による比較 (TYPE-1)



(b) 杭諸元の変化による比較 (TYPE-1)



(c) 地盤抵抗ばねの有無による比較 (TYPE-2)



(d) 杭諸元の変化による比較 (TYPE-2)

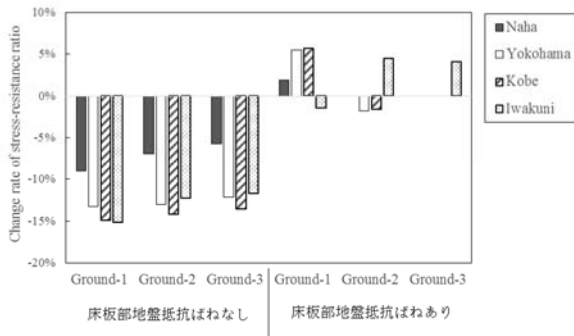
図-5.8 各比較条件における杭の応力照査 ( $a=2$ )  
縦軸：作用耐力比，横軸：地盤条件（固有振動数）

比は増加した（図-5.6(b), (d)）。TYPE-1 では、地盤条件や入力波により異なるが、径 500mm 肉厚 9mm を径 400mm 肉厚 6mm とすることで作用耐力比は 2 倍程度に大きくなった。TYPE-2 では、径 800mm 肉厚 20mm を径 600mm 肉厚 9mm とすると作用耐力比は 3~4 倍程度に、径 400mm 肉厚 9mm とすると 5~8 倍程度に大きくなった。これらの作用耐力比の増加は、表-4.2 に示される断面耐力である降伏モーメントの低下が大きな要因であり、前項で述べた照査用震度の低下による影響は少ない。

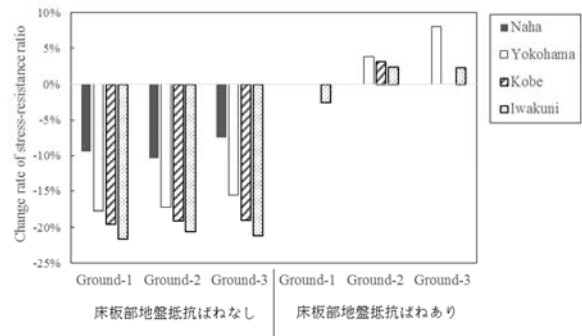
これらの検討では、いずれの条件においても杭応力の作用耐力比は 1.0 を超えず、十分な耐力を有している結果となった。これは、本検討では実際に設計された胸壁

を参考に検討しているが、地震動や地盤等の条件が実際とは異なることや、地震時の曲げ挙動だけでなく支持力や施工等の他の条件の影響も受けて杭諸元が決まることから、杭応力の作用耐力比が 1.0 に対して余裕があったことが考えられる。また、フーチング側面の地盤抵抗を考慮した場合、杭応力の作用耐力比は大きく減少して危険側の評価となった。他種構造物の浅い基礎においてもフーチング側面の地盤抵抗を考慮しないことは多く、胸壁の杭応力度の照査においても、フーチング側面地盤抵抗を考慮しないことでより安全側の設計を行うことができる。

図-5.8 には、胸壁の固有振動数を求める際の骨組解析

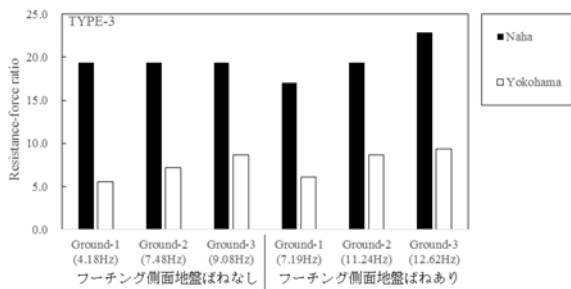


(a) TYPE-1

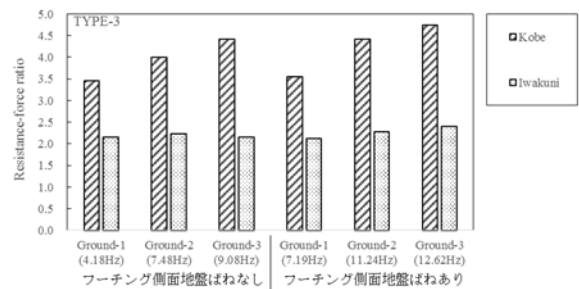


(b) TYPE-2

図-5.9 フーチング側面地盤ばね考慮時の作用耐力比変化率  
縦軸：作用耐力比の変化率，横軸：地盤条件（固有振動数）



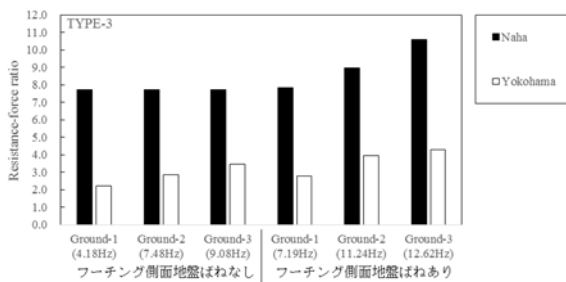
(a) Naha 波, Yokohama 波



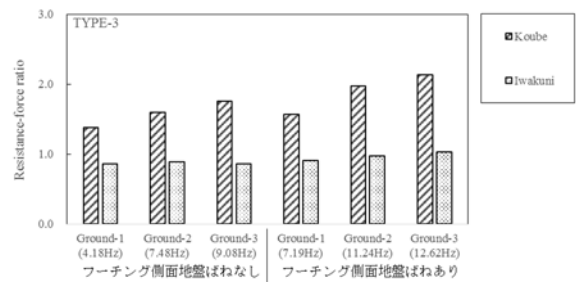
(b) Kobe 波, Iwakuni 波

図-5.10 転倒照査における耐力作用比 (直接基礎式, TYPE-3)

縦軸：耐力作用比, 横軸：地盤条件およびフーチング側面地盤反力の有無 (固有振動数)



(a) Naha 波, Yokohama 波



(b) Kobe 波, Iwakuni 波

図-5.11 滑動照査における耐力作用比 (直接基礎式, TYPE-3)

縦軸：耐力作用比, 横軸：地盤条件 (固有振動数)

と同様に、杭要素への地盤反力の推定に用いる地盤反力係数の式(3)において係数  $a$  を 2.0 とし、各比較条件について杭応力の作用耐力比を算出した結果を示している。図-5.6 と比較すると、フーチング側面の地盤抵抗ばねを考慮した場合には作用耐力比の変化はほとんど無かったが、地盤抵抗ばねを考慮しない場合には作用耐力比はすべてのケースにおいて減少している。図-5.9 は、図-5.8(a), (c)での杭への地盤反力係数式(3)において  $a = 2.0$  としたときの作用耐力比について、図-5.6(a), (c)の  $a = 1.0$  の場合に対する増減の比率で示したものである。この図より、フーチング側面地盤抵抗を考慮しない場合、 $a = 2.0$  とすることにより作用耐力比は  $a = 1.0$  の場合よりも 10~20% 割程減少している。フーチング側面地盤抵抗がある場合にはその地盤抵抗が大きく、杭要素への地盤反力係数の違いが作用耐力比に与える影響は大きくないが、フーチング側面地盤抵抗が無い場合には、杭への地盤反力係数を 2 倍としたことで杭に作用する水平方向地盤反力は増加して作用耐力比は小さくなり危険側の評価となったと考えられる。よって、フーチング側面地盤抵抗を考慮しない条件において、杭に接続する地盤ばねの地盤反力係数は通常の 1 倍とすることにより安全側の設計を行うことができる。

上述の検討において、照査用震度作用時の杭頭の水平

変位は最大で 12mm (径 400mm 肉厚 9mm, Iwakuni 波, Ground-3, 地盤抵抗ばね考慮無し) であった。

検討で用いた港湾基準における  $N$  値から算出する杭への地盤反力係数 ( $k_H=1500aN$ ) は、杭の横方向載荷試験結果を集めて求められたものである。載荷試験より求めた地盤反力係数は杭変位の増大とともに減少するものであり、港湾基準における地盤反力係数は杭頭水平変位が 1cm のときの値として整理されている<sup>17)</sup>。本検討での照査用震度作用時の杭頭変位は最大で 12mm (径 400mm 肉厚 9mm, Iwakuni 波, Ground-3, 地盤抵抗ばね考慮無し) であり、他に 1cm を超えたものが 1 ケースあったが、ほとんどのケースにおいて杭頭変位は 1cm 以下であった。よって、本検討における杭頭変位は港湾基準での地盤反力係数算定時の杭頭変位と同等以下であり、地盤反力係数が港湾基準のものよりも小さくなって杭の応力が増大し、危険側となる可能性を考える必要はない。よって、胸壁のレベル 1 地震動の照査用震度作用時の杭応力照査時において港湾基準による地盤反力係数を用いることは妥当であると考えられる。

(2) 直接基礎式 (TYPE-3)

図-5.10, 図-5.11 は直接基礎である TYPE-3 について、前項で求めた照査用震度より地震時壁体慣性力を算出し、式(13), (14)により転倒および滑動の照査を行ったもの



を示している。ここでは、フーチング側面の地盤抵抗ばねの有無による、安全率に相当する耐力作用比を比較している。フーチング側面の地盤抵抗ばねを考慮して照査用震度を求めた場合においては、転倒および滑動照査においてフーチング側面に受働土圧が作用するとしており、港湾基準に示される地震合成角 $\theta$ を考慮する地震時の受働土圧を用いている。

転倒照査では、Naha 波において、フーチング側面の地盤抵抗を考慮することによって Ground-1 では 2.36 程度耐力作用比（安全率）が減少（12%減少）し、Ground-3 では 3.49 程度増加（18%増加）がみられた。一方、それ以外の地震動ではフーチング側面の地盤抵抗有無による変化はほとんど見られなかった。これは、照査用震度が比較的大きい条件では、フーチング側面受働土圧の作用位置が低いために転倒に対する抵抗が相対的に小さいことが要因と考えられる。過去の港湾基準<sup>16)</sup>の重力式岸壁の照査では地震時において転倒安全率は 1.1 以上（常時において 1.2 以上）が求められており、ここではどの条件においても転倒安全率を満足している。

滑動照査では、過去の港湾基準<sup>16)</sup>の地震時の重力式岸壁の照査において滑動安全率が 1.0 以上（常時 1.2 以上）が求められるが、加速度の大きい Iwakuni 波ではフーチング側面の地盤抵抗を考慮した Ground-3 以外のケースにおいて、耐力作用比が 1.0 を下回った。フーチング側面の地盤抵抗を考慮した場合、滑動照査ではいずれの地震動・地盤条件においても数値は増加する傾向にあった。Naha 波や Yokohama 波においては地盤条件により耐力作用比が 4 割程増加するケースもあり、滑動照査ではフーチング側面の地盤抵抗を考慮することにより危険側の判定となることが明らかとなった。

## 6. まとめ

本研究の検討から得られた結論を以下にまとめる。

(1) 既往研究での胸壁の骨組解析から求めた固有振動数と加速度応答スペクトルによる照査用震度算定法の有効性を確認するため、その方法を用いて種々の形式の胸壁について港湾のレベル 1 地震動に対する照査用震度を算定した。胸壁の固有振動数はフーチング側面地盤抵抗ばねを考慮すると増加し、管径や板厚を小さくすると減少する。算出される照査用震度は胸壁固有振動数の増加により変化するが、その増減は加速度応答スペクトル曲線の形状により異なる。加速度応答スペクトルの形状は、地盤条件よりも入力地震波形による影響

の方が大きい。

- (2) 算出した照査用震度を用いて地震時壁体慣性力を求め、骨組解析モデルに作用させて鋼管杭に生じた軸力および曲げ応力度について照査した。杭応力度の作用耐力比は、フーチング側面地盤抵抗ばねを考慮することにより減少した。地盤抵抗ばねを考慮すると胸壁の固有振動数は増大し、条件により照査用震度は増加するものも多くあった。しかし、その増分は壁体慣性力に対して抵抗側に作用するフーチング側面の地盤反力よりも小さく、杭を曲げようとする壁体を水平に押す力が小さくなり、結果として作用耐力比は減少した。一方、鋼管杭の径や板厚を小さくした場合、作用耐力比は増加した。これは、杭の断面耐力が低下することが主要因であり、固有振動数の低下による照査用震度の変化の影響は小さい。いずれの結果でも杭応力の作用耐力比は 1.0 を超えず、十分な耐力を有している結果となったが、フーチング側面の地盤抵抗を考慮することで作用耐力比は減少して危険側の評価となった。杭への地盤抵抗の算定に用いる地盤反力係数を照査用震度算定時と同様に 2 倍とした場合も、フーチング側面の地盤抵抗を考慮しない場合では杭応力の作用耐力比は減少し、危険側の評価となった。また、照査用震度算定時の杭頭水平変位量を確認し、港湾基準における N 値から算出する杭への地盤反力係数を用いることの妥当性を確認した。
- (3) 算出した照査用震度を用い、直接基礎式胸壁の転倒および滑動の安定照査を行った。転倒についてはフーチング側面の地盤抵抗の有無の影響はあまり大きくなく、耐力作用比（安全率）はあまり変化しない。滑動においては、いずれの地震動・地盤条件においても、フーチング側面地盤抵抗を考慮することにより耐力作用比（安全率）は増加する傾向にあり、杭基礎式の場合と同様に、危険側の判定となることが明らかとなった。
- (4) 杭基礎式および直接基礎式のどちらの場合も、フーチング側面地盤抵抗を考慮しないことで安全側の照査となり、実務的により安全に配慮した設計を行うことができる。

(2018年2月2日受付)

## 謝辞

本研究の実施においては、水谷崇亮基礎工研究グループ長にご助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 海岸保全施設技術研究会：海岸保全施設の技術上の基準・同解説，p.3-72，2004.
- 2) 水産庁漁港漁場整備部防災漁村課：漁港海岸保全施設の耐震性能設計のガイドライン（案），2010.
- 3) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，p.922, 2007.
- 4) 小濱英司，府川裕史：数値解析および模型実験によるレベル 1 地震動に対する胸壁の照査用震度算出手法の検討，港湾空港技術研究所報告，vol. 56, No. 3, pp.49-115, 2017.
- 5) 全国漁港協会：漁港海岸事業設計の手引（平成 8 年度版），1998.
- 6) 横田弘，川端規之，芥川博昭，黒崎和保，津嶋敏明，原田典佳，矢頭明子：鋼直杭式栈橋の弾塑性解析による耐震性能照査および簡便照査法の提案，港湾技術研究所資料，No.943, 1999.
- 7) 長尾毅，岩田直樹，藤村公宣，森下倫明，佐藤秀政，尾崎竜三：レベル 1 地震動に対する重力式および矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定手法，国土技術政策総合研究所資料，No. 310, 2006.
- 8) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，pp.262-263, 1999.
- 9) 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想プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易測定法，港湾技術研究所資料，No. 869, 1997.
- 10) 国土技術政策総合研究所港湾施設研究室：<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>（2017 年 5 月 8 日閲覧）
- 11) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，p.1112, 2007.
- 12) 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.
- 13) 葉原直範，長尾毅：直杭式栈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.
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書（共通編・下部構造編）・同解説，pp.283-287, 2012.
- 15) 日本道路協会：道路橋示方書（共通編・下部構造編）・同解説，pp.311-313, 2012.
- 16) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，pp.658-659, 1999.
- 17) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，p.628, 2007.



港湾空港技術研究所資料 No.1343

2018.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2018) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。