

レベル1地震動に対する根入れセル式岸壁の耐震性能照査用震度の設定方法

SEISMIC COEFFICIENTS OF EMBEDDED-TYPE CELLULAR BULKHEAD QUAY WALLS AGAINST THE LEVEL-ONE EARTHQUAKE GROUND MOTION

柴田大介¹・長尾毅²
Daisuke SHIBATA, Takashi NAGAO

¹株式会社 日本港湾コンサルタント 技術本部 (〒141-0031 品川区西五反田8丁目3番6号)

²正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

In this paper, we aim at establishing the method of evaluating the seismic coefficients for embedded-type cellular bulkhead quay walls against the level-one earthquake ground motion. The proposed method takes into consideration of the influence of the frequency characteristic of seismic motion using the subgrade reaction coefficient as well as the wall height and natural period of the ground as the parameters.

The accuracy of the proposed method for the calculation of seismic coefficients for embedded-type cellular bulkhead quay walls was assessed from the viewpoint of the comparison with the other methods. As the results, we confirmed the applicability of the proposed method to the practical design.

Key Words : Embedded-type cellular bulkhead quay wall, level-one earthquake ground motion, earthquake resistant design

1. はじめに

2007年に港湾の施設の技術上の基準¹⁾(以下, 現行基準)が改訂され, 仕様規定から性能規定へと移行した. その際にレベル1地震動に対する岸壁の耐震性能照査用震度の設定方法として, 地震動の周波数特性と継続時間の影響を考慮し, 岸壁の変形量に対応した手法が導入された. 現在, 重力式, 控え矢板式(控え直杭式, 控え組杭式), 自立矢板式, 二重矢板式については耐震性能照査用震度の設定方法が提示されているものの, 根入れセル式については未だ提示されていない. その為, 現行基準では便宜的に重力式係船岸の手法に準じて照査用震度を設定しても良いとされている. 根入れセル式岸壁のレベル1地震動に対する耐震性能照査用震度の設定方法は過去に検討されており, 住谷ら²⁾は, 地震動の周波数特性を考慮する際に用いるフィルターのパラメータとして, 根入れ長 D と壁高 H の比 D/H (以下, 根入れ比), 根入れ長 D と換算壁体幅 B の比 D/B (以下, 根入れ壁体幅比)を用いることで根入れセル式岸壁の特徴である根入れ効果を考慮した. しかし, 根入れ比や根入れ壁体幅比をパラメータとすると根入れ効果を過大に評価してしまうケース等があり, 精度が良くない結果となっていた. そこで, 本研究では, セルの根入れ効果を適切に反映した耐震性能照査用震度の設定方法について検討

を行った.

2. 検討条件

本研究では, 地震応答解析コードFLIP³⁾を用いて地震応答解析を行った. 検討条件および検討断面は, 表-1, 図-1に示す通りであり, 港湾基準における根入れセル式岸壁の設計方法に基づいて断面を設定している.

表-1 検討条件

水深 \ 震度	-7.5m	-11.0m	-14.5m	-16.0m
0.10	○	○		
0.15	○	○		
0.20			○	
0.25			○	○

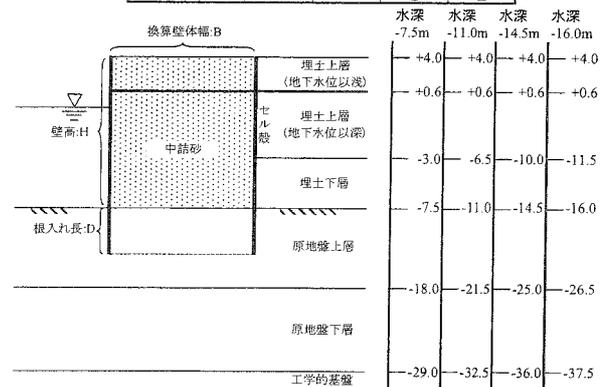


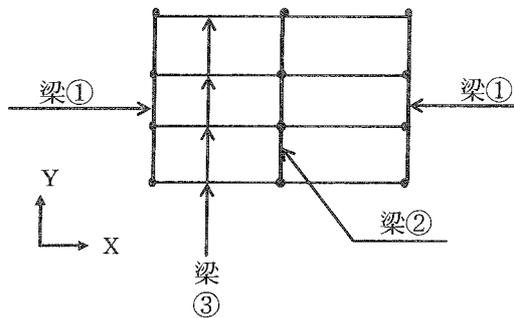
図-1 検討断面

地盤条件は全国の強震観測地点のS波速度構造から固有周期を整理した結果に基づき、やや締まった地盤で固有周期0.8秒、緩い地盤で固有周期1.2秒と設定している。また、横方向地盤反力係数は原地盤上層のS波速度から推定したM値を用いて、地盤の横抵抗定数推定図から設定したものである(表-3)。なお、根入れ長と換算壁体幅は、設計震度、水深および地盤条件等の違いによりそれぞれ異なる。

FLIPにおけるセル式岸壁のモデル化は、セル壁体が剛体として挙動するように、北村ら⁴⁾が実施した検討事例を参考に図-2のように設定した。ここで、梁①の原地盤および中詰砂と接する部分にはジョイント要素を挿入しており、梁②と梁③については地盤と独立である。

地盤物性、断面諸元等のモデルパラメータは、FLIPの標準的な方法⁵⁾に従って設定した。また、液状化は検討対象外である為、液状化に関するパラメータは考慮していない。

以上の解析条件は住谷ら²⁾の条件と同様である。



- 梁①：「セル殻+アーク鋼板の堤体中心軸回りの単位奥行き当り剛性」の1/2の剛性を有し、断面積が十分に小さい仮想梁
- 梁②：「セル殻+アーク鋼板の単位奥行き当り断面積」と等しい断面積を有し、剛性が十分に小さい仮想梁
- 梁③：仮想梁①～②～①を水平方向につなぐ剛性が十分に大きく断面積が十分に小さい仮想梁

図-2 FLIPによるセル式岸壁のモデル化

3. 既往の研究による根入れ効果の反映方法とその課題

住谷らによる既往の研究²⁾では、地震動の周波数特性を考慮する際に用いるフィルターのパラメータとして、根入れ比や根入れ壁体幅比を用いることで根入れセル式岸壁の特徴である根入れ効果を考慮した。しかし、これらのパラメータを用いると根入れ長の増加に伴ってb値(周波数特性フィルターにおける1Hz以下のフラットな部分の値)が急激に低減されてしまう傾向が確認されている。その為、根入れが大きな場合に過剰に低減された地表面加速度が算定されてしまい、照査用震度を過小に評価してしまう結果となっていた。このように、根入れ長に関するパラメータを用いて根入れ効果を考慮すると精度が良くない理由として以下のことが考えられる。

セルの根入れ効果とは、根入れ部に作用するせん断応力を有効拘束圧の大きな地盤深部の地盤強度で受け持たせることによって地盤の変形を抑制し、岸壁変形を小さくするものである。つまり、根入れ効果の大小は、根入れ長の大小によって決定されるものではなく、根入れ部の地盤強度の大小によって決定されるものである。例えば、地盤が緩く、地盤強度が期待できない場合には根入れ長が大きくても根入れ効果は発揮されにくいと考えられる。

次に、セル式岸壁の天端変形量には、セル壁体の傾斜(回転)による成分とセル直下の地盤変形による成分の2種類がある。既往の研究⁶⁾において、根入れ長を増加させると、地盤変形は抑制される傾向があるが、回転中心が深くなる為、傾斜による変形量はその逆の傾向を示すことが確認されている。つまり、根入れ長の増加率と比較して天端変形量の減少率は小さくなる。その為、根入れ長に関するパラメータを用いると、設定した根入れ長に応じた根入れ効果以上に根入れ効果を考慮した結果となる。

さらに、パラメータに根入れ長や換算壁体幅が入っている場合、これらのフィルターを用いて設定した断面が性能照査の過程で性能を満たさない場合に、根入れ長や換算壁体幅を変更して照査用震度を算定し直す必要が生じる。

以上より、根入れ効果を考慮する際には根入れに関するパラメータではなく地盤強度に関するパラメータで評価すべきであると考えられる。

表-3 地盤条件

地盤条件	土層区分		湿潤密度	基準有効拘束圧	基準せん断剛性	基準体積剛性	粘着力	内部摩擦角	最大減衰	S波速度	横方向地盤反力係数
			(t/m ³)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)					
Case1	埋土	上層(気中)	1.8	89.8	25920	67595	0	37	0.24	120	5900
		上層(水中)	2.0								
	原地盤	上層	2.0	239.8	45000	117353	0	38	0.24	150	
		下層	2.0								
Case2	埋土	上層(気中)	1.8	89.8	58320	152089	0	38	0.24	180	19400
		上層(水中)	2.0								
	原地盤	上層	2.0	198.5	72200	188286	0	38	0.24	190	
		下層	2.0	279.2	125000	325980		39		250	
共通材料	中詰砂		1.8	106.0	58300	152089	0	37	0.24	-	-

築地ら⁷⁾は、自立矢板式のフィルターに横抵抗反力係数 k_c をパラメータとして入れることで根入れのある構造特性を評価している。本研究の対象である根入れセル式岸壁も自立矢板式と同様に根入れを有した構造形式であり、セルを地盤に根入れすることで地盤強度を岸壁の安定性向上に利用している。そこで、本研究でも地盤強度の指標である横方向地盤反力係数 k_{CH} を用いて根入れ効果の反映を試みた。この横方向地盤反力係数は地盤条件によって定まる値であり、根入れ長や換算壁体幅のように性能照査の結果により変更されることがない。地盤反力係数を用いることで上記の問題点は克服できると考えられる。

4. 耐震性能照査用震度に関する検討

(1) 周波数特性の影響の評価

2. 検討条件で示した条件の基に、まず周波数特性と岸壁変形量の相関を検討する為、既往の研究^{2) 7) 8)}と同様に正弦波を用いた検討を行った。入力波形は既往の研究と同じく、継続時間の影響の条件を揃える為に継続時間を40秒、主要動継続時間を5秒に調整して、主要動の前後にコサイン状のテーパ処理を行った正弦波である。周波数は、0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0Hzの10種類とし、入力振幅を調節して岸壁の残留変形量が20cmとなる条件を2次元地震応答解析により探索した。この解析結果を用いて地震動の周波数特性を考慮する為のフィルターを検討した。ここで、1Hz以下の値(b 値)は、0.3~0.6Hzの解析結果の平均値をターゲットとして壁高 H 、背後地盤の固有周期 T_b 、海底面下の地盤の固有周期 T_u および横方向地盤反力係数、根入れ比をパラメータとした重回帰分析を行うことで回帰式を求めた。

式(1)~式(8)に本研究のフィルターの式、住谷らによる既往研究の式および現行基準で採用されている重力式係船岸の式を示す。

$$\alpha(f) = \begin{cases} b & (f \leq 1.0\text{Hz}) \\ \frac{b}{1 - \{g(f)\}^2 + 8.8g(f)i} & (f > 1.0\text{Hz}) \end{cases} \quad (1)$$

$$g(f) = 0.34(f - 1.0) \quad (2)$$

本研究① (横方向地盤反力係数)

$$b = 1.09 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.03 \frac{k_{CH}}{k_{CHR}} - 0.34 \quad (3)$$

本研究② (根入れ比+横方向地盤反力係数)

$$b = 1.07 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.10 \frac{D}{H} - 0.03 \frac{k_{CH}}{k_{CHR}} - 0.29 \quad (4)$$

既往研究① (根入れ比)

$$b = 0.90 \frac{H}{H_R} - 1.10 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.65 \frac{D}{H} + 0.29 \quad (5)$$

既往研究② (根入れ壁体幅比)

$$b = 0.83 \frac{H}{H_R} - 0.91 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.69 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.60 \frac{D}{B} + 0.50 \quad (6)$$

既往研究③ (根入れ無視)

$$b = 1.80 \frac{H}{H_R} - 2.03 \frac{T_b}{T_{bR}} + 1.98 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.85 \quad (7)$$

現行基準 (重力式準用)

$$b = 1.05 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.23 \quad (8)$$

ここに、

f : 周波数 (Hz)

i : 虚数単位

H : 壁高 (m)

H_R : 基準壁高 (=15.00m)

T_b : 背後地盤の初期固有周期 (s)

T_{bR} : 背後地盤の基準初期固有周期 (=0.80s)

T_u : 海底面下地盤の初期固有周期 (s)

T_{uR} : 海底面下地盤の基準初期固有周期 (=0.40s)

D : 根入れ長 (m)

B : 換算壁体幅 (m)

k_{CH} : 横方向地盤反力係数 (kN/m³)

k_{CHR} : 基準横方向地盤反力係数 (=12650kN/m³)

図-3にフィルターの例(水深-11.0m, 地盤Case1, 設計震度0.10)を示す。図中の◆のプロットが正弦波による地震応答解析に対応する値で、設計震度0.10相当の加速度100Galに対応している。

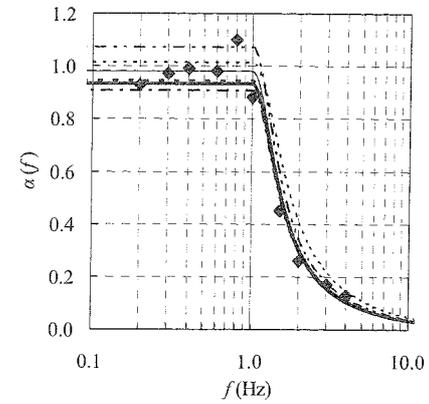
図より、根入れ比や根入れ壁体幅比をパラメータとして根入れを考慮した既往研究のフィルター(式(5)、式(6))は、解析結果のプロットと比較的良好一致しているものの、根入れ長の増加に伴って b 値が急激に低減されてしまう傾向がある。その為、根入れが大きな場合に過剰に低減された地表面加速度が算定されてしまい、照査用震度を過小に評価する結果となる。次に、根入れを無視したフィルター(式(7))や現行基準で採用されている重力式係船岸のフィルター(式(8))は、解析結果との一致はあまり良くないものの、根入れが深くなるとやや安全側の値を算出することがわかる。以上、これらの傾向は他の条件においても同様の傾向であった。

本研究では、3. 既往の研究による根入れ効果の反映方法とその課題で示した考え方に基づき、横方向地盤反力係数をパラメータとしたフィルター(式(3))と、さらに根入れ比を追加したフィルター(式(4))を検討した。また、本研究では、既往の重力式や矢板式岸壁に対する研究⁸⁾と同様に、目標とする変形量に対して平均的な結果を与える照査用震度算出式を構築することを目的とし、1Hz以下の領域のフラットな部分として0.3Hz~0.6Hzの平均値をターゲットとしたフィルターの検討を行った。得られた

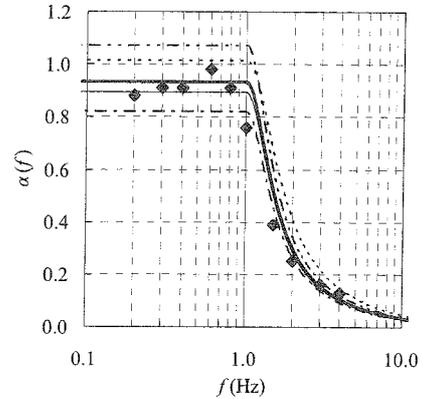
フィルターは1Hz以下の領域では平均的に目標値と最も良い一致を見せる結果となるとともに、得られた重回帰式の横方向地盤反力係数の係数も符号が負となり、工学的な観点からも実現象と整合性のとれたものとなった。なお、このフィルターを採用した場合には、0.8Hz付近のピークに対しては危険側の結果となる。ただし、本研究では地震動の継続時間を一定として周波数を変化させた解析を行っているため、周波数の違いにより各正弦波に含まれる波数が異なる。その為、0.8Hzのピークが周波数特性のみの影響であるとは断定できず、波数の違いによる地震動の継続時間の影響を受けている可能性がある。よって、フィルターのフラットな部分が目標値と一致しない部分は、後述する継続時間の影響の評価および照査用震度算定式の作成の過程において最終的に算出される照査用震度が危険側の結果とならないように考慮することとした。また、重回帰分析の際にはフィルターの地盤固有周期の係数を重力式係船岸と同値にして残りの係数に対する回帰とした。これは、そのまま重回帰分析を行った場合に極端に良好な地盤条件でフィルターの値が負になるケースが生じた為である。このように設定した本研究のフィルターの結果は地震応答解析の結果と比較的良好一致を見せることがわかる(図-3)。なお、この傾向は地盤条件や水深を問わず同様であった。また、横方向地盤反力係数に根入れ比を追加したケースでは横方向地盤反力係数をパラメータとして追加したことで、根入れ長の増加に伴う急激な b 値の低減が緩和されている。その為、本研究の結果は既往研究や現行基準と比較して精度良く、かつ、根入れの効果も評価できるフィルターであると考えられる。

(2) 継続時間の影響の評価

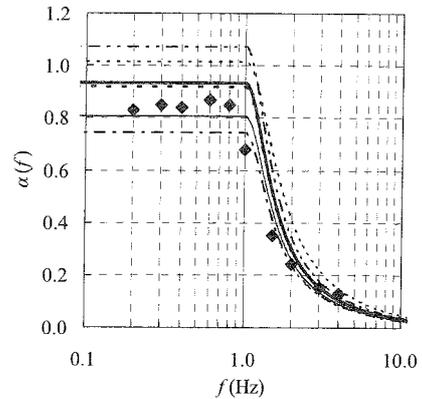
次に地震動の継続時間の影響について検討する。検討条件は周波数特性の検討と同様に、設計震度0.10とし、検討対象波形は表-2に示す9波形とした。これらの波形は、継続時間および卓越周波数が偏らないように港湾等における代表的な観測波形、鉄道構造物における設計波および模擬地震動を選定したものである⁸⁾。これらの9波形を入力地震動として入力振幅を調整することで2次元地震応答解析により岸壁の残留変形量が20cmとなる条件を探索し、既往研究⁸⁾と同様に低減率 p を設定した。図-4にフィルター処理後の加速度時刻歴の二乗和平方根 S とフィルター処理後の加速度最大値 α_f の比 S/α_f と低減率 p の関係を示す。また、式(9)に地震動の継続時間の影響を考慮した補正加速度最大値 α_c の算定式を示す。図-5は、水深-11.0m、地盤Case1、設計震度0.10の条件における α_f と α_c の結果を波形毎に示したものである。図より、補正前の α_f は波形間にバラツキがあったのに対し、低減率 p を用いて補正した後の α_c では波形間のバラツキが抑えられていることがわかる。



(a) 根入れ長 $D=2.0$ m



(b) 根入れ長 $D=4.0$ m



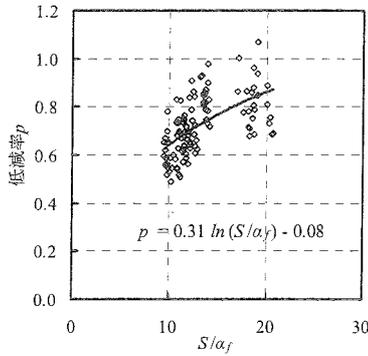
(c) 根入れ長 $D=6.0$ m

— 既往研究①(根入れ比)
 - - - 既往研究②(根入れ壁体幅比)
 ····· 既往研究③(根入れ無視)
 - · - · 現行基準(重力式準用)
 ——— 本研究①(横方向地盤反力係数)
 - - - 本研究②(根入れ比+横方向地盤反力係数)
 ◆ 解析値
 (水深-11.0m 地盤Case1 設計震度0.10)

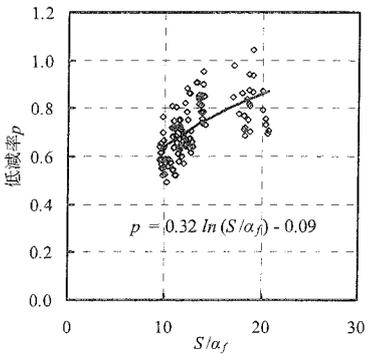
図-3 周波数特性考慮用フィルター

表-2 検討対象波形

No.	名称	継続時間(s)	卓越周波数(Hz)
1	八戸波	19.0	0.39
2	神戸波	20.0	2.88
3	大船渡波	19.0	2.34
4	宮崎波	80.0	4.55
5	美都波	161.0	0.37
6	JR波	40.0	1.34
7	Dip波	29.1	0.68
8	Strike波	29.1	1.66
9	Subduction波	40.3	0.60



(a) 本研究① (横方向地盤反力係数)



(b) 本研究② (根入れ比+横方向地盤反力係数)
図-4 低減率p

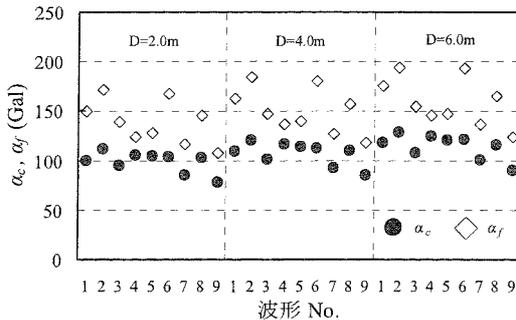
$$\alpha_c = p \cdot \alpha_f \quad (9)$$

ここに、

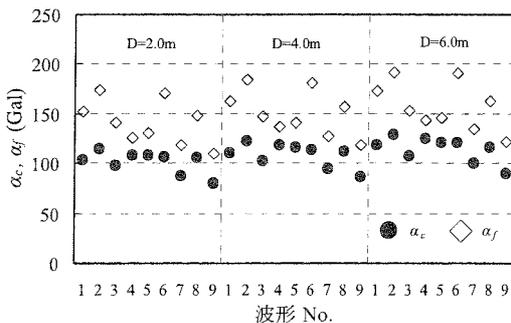
α_c : 補正加速度最大値 (Gal)

p : 低減率

α_f : フィルター処理後の加速度最大値 (Gal)



(a) 本研究① (横方向地盤反力係数)



(b) 本研究② (根入れ比+横方向地盤反力係数)
図-5 加速度最大値の比較

(3) 照査用震度の算定

任意の許容変形量に対応した照査用震度が求められるように、先述した9波形を用いて2次元地震応答解析を実施し、岸壁の残留変形量が5, 10, 15cmとなるように入力振幅調整を行い、得られた条件における自由地盤部の地表面加速度時刻歴をもとに補正加速度最大値 α_c を算出した。そして、既往研究⁸⁾と同様に設計震度を目的変数とし、岸壁の変形量と補正加速度最大値 α_c を重力加速度で除した値 α_c/g を説明変数とした回帰分析により、照査用震度算定式を求めた。まず、検討した変形量の範囲において平均的な10cm変形時の結果に対して、設計震度 k_h を目的変数、 α_c/g を説明変数として線形回帰 ($k_h = A \cdot \alpha_c/g + B$) を行い、係数 A 、 B を決定した。次に、全ての結果を用いて、係数 A に対して変形量 D を基準変形量 $D_r (=10\text{cm})$ で除した値の回帰を求めた。式(10)～式(12)に照査用震度算定式を示す。

次に、本研究で提案した照査用震度算定式を既往研究や現行基準等と精度比較した結果を図-6に示す。また、図-7に照査用震度と設計震度の比の平均値と標準偏差を示す。ここで、本研究で対象としている根入れセル式岸壁は対象とする地震動が大きく、大水深の場合に採用され易い構造形式である。また、現行基準では根入れセル式岸壁の許容変形量を10cmと定めていることから、根入れセル式岸壁の照査用震度算定式の精度を議論する上で変形量10cm、設計震度0.15以上の部分が重要な範囲となる。

図より、既往研究①は設計震度0.10～0.25の範囲において照査用震度の標準偏差が0.001～0.004とバラツキが小さいものの、設計震度が増加しても照査用震度の値が増加せず、照査用震度の平均値は設計震度0.10では0.169、設計震度0.15では0.172、設計震度0.20と0.25では0.173となっており、設計震度と照査用震度の対応が悪い。次に、既往研究②は設計震度の増加とともに照査用震度も増加しているが設計震度0.20では照査用震度の平均値が0.163、設計震度0.25では0.174となっており、設計震度0.20以上であまり対応が良くない。既往研究③は設計震度0.20以下で照査用震度の標準偏差が0.011～0.017、現行基準は0.013～0.018であり、本研究①の0.014～0.019、本研究②の0.014～0.020とほぼ同程度のバラツキとなっている。しかし、設計震度0.25の条件において既往研究③では0.15、現行基準では0.16と極端に小さな照査用震度の値が見られる。それに対して、本研究ではそのような極端に小さな値は見られない。以上より、本研究の方が既往研究や現行基準よりも設計震度と照査用震度との対応が良く精度の良い結果が得られると考えられる。ここで、フィルターのパラメータに根入れ比が入っている場合、仮定した根入れ長で設定した照査用震度を用いて決定した断面が性能照査によって性能が満足していないことが判明した場合に再度根入れ長を変更して照査用震度を設定する必要が生じる。これは、設

計実務を考えると計算が煩雑になることを意味している。その為、根入れ比がパラメータにあることは望ましくないと判断し、ほぼ同精度の結果が得られる本研究①（横方向地盤反力係数）を最終案とした。

照査用震度算定式

本研究①（横方向地盤反力係数）

$$k_h = 1.62 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.58} \cdot \frac{\alpha_c}{g} + 0.04 \quad (10)$$

本研究②（根入れ比+横方向地盤反力係数）

$$k_h = 1.74 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.58} \cdot \frac{\alpha_c}{g} + 0.03 \quad (11)$$

$$\alpha_c = p \cdot \alpha_f \quad (12)$$

ここに、

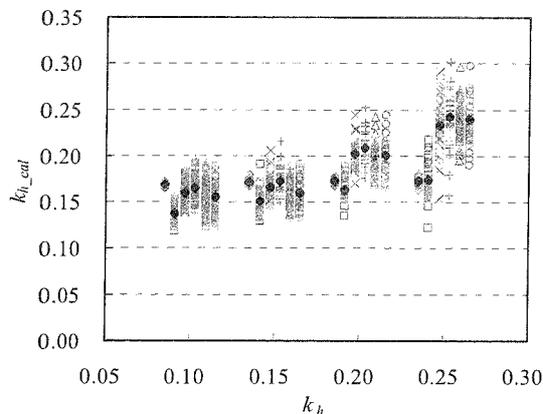
k_h : 照査用震度

D_a : 変形量許容値 (cm)

D_r : 基準変形量 (=10cm)

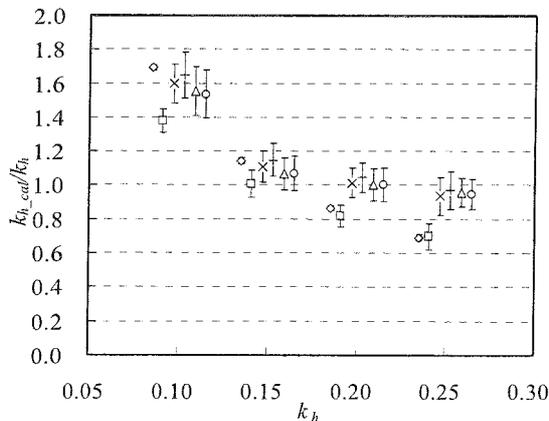
α_c : 補正加速度最大値 (Gal)

g : 重力加速度 (=980Gal)



○ 既往研究①(根入れ比) △ 本研究①(横方向地盤反力係数)
 □ 既往研究②(根入れ壁体幅比) ○ 本研究②(根入れ比+横方向地盤反力係数)
 × 既往研究③(根入れ無視) ◆ 平均値
 + 現行基準(重力式準用)

図-6 設計震度と照査用震度の関係



○ 既往研究①(根入れ比) + 現行基準(重力式準用)
 □ 既往研究②(根入れ壁体幅比) △ 本研究①(横方向地盤反力係数)
 × 既往研究③(根入れ無視) ○ 本研究②(根入れ比+横方向地盤反力係数)

図-7 照査用震度と設計震度の比の平均値と標準偏差

5. おわりに

本研究では、レベル1地震動に対する根入れセル式岸壁の耐震性能照査用震度の設定方法について検討を行った。その結果、既往研究①（根入れ比）は算定される照査用震度のバラツキが小さいものの、設計震度が増加しても照査用震度の値が増加せず、設計震度と照査用震度の対応が悪かった。次に、既往研究②（根入れ壁体幅比）は設計震度の増加とともに照査用震度も増加していたが設計震度0.20以上であまり対応が良くなかった。既往研究③（根入れ無視）および現行基準（重力式準用）は、本研究①（横方向地盤反力係数）および本研究②（根入れ比+横方向地盤反力係数）とほぼ同程度のバラツキとなった。しかし、設計震度0.25の条件において既往研究③（根入れ無視）と現行基準（重力式準用）では極端に小さな照査用震度の値が見られたのに対して、本研究の結果ではそのような極端に小さな値は見られなかった。

本研究では、本研究①（横方向地盤反力係数）と本研究②（根入れ比+横方向地盤反力係数）の2案を提案したが、設計実務における利便性を考慮して根入れの効果を横方向地盤反力係数で周波数特性考慮用フィルターに反映させた本研究①（横方向地盤反力係数）を最終案とした。

参考文献

- 国土交通省港湾局監修, (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007
- 住谷圭一, 長尾 毅: レベル1地震動に対する根入れセル式岸壁の耐震性能照査用震度に関する基礎的考察, 海洋開発論文集, 第23巻, 2007
- Susumu Iai, Yasuo Matsunaga, Tomohiro Kameoka: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990
- 北村卓也, 由井洋三, 森田年一, 菅野高弘: 兵庫県南部地震における鋼板セル式岸壁の解析的研究, 土木学会第53回年次学術講演会, I - B258, pp.516-517, 1998
- 森田年一, 井合 進, Hanlong 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ータの簡易設定法, 港湾技研資料 No.869, 1997
- 住谷圭一, 長尾 毅: セル式岸壁の根入れが耐震性能に与える影響について, 応用力学論文集, Vol.10, 2007
- 築地健太郎, 長尾 毅: 自立矢板式係船岸のレベル1地震動に対する照査用震度, 海洋開発論文集, 第24巻, 2008
- 長尾 毅, 岩田直樹: ケーソン式及び矢板式岸壁のレベル1地震動に対する耐震性能照査震度, 構造工学論文集, Vol.52A, 2007