

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基礎的考察

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

住谷圭一¹・長尾 毅²
Keiichi SUMIYA, Takashi NAGAO

¹東亜建設工業(株) 土木事業本部設計部 (〒110-8451 千代田区四番町5)

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

This paper discusses the method to evaluate the seismic coefficient of embedded cellular bulkhead quay walls against the level one earthquake ground motion. The method evaluates the corrected peak ground acceleration in accordance with the residual deformation of quay walls by considering the parameters such as wall height and natural period of the ground. We found that it is not necessarily adequate to take the embedded length as one of the explanatory parameters.

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

1. はじめに

港湾構造物の技術基準が改訂され¹⁾, 設計体系が仕様規定から性能規定へ変更となり, 構造物は要求される性能を満たすように設計することが必要となる。この流れを踏まえて設計地震動は, レベル1地震動についても地震動増幅特性を考慮した確率論的地震ハザード解析に基づいて算出される時刻歴波形として与えられるようになった²⁾。岸壁のレベル1地震動に対する照査は, 現状では地域別震度・地盤種別係数・重要度係数の積で得られる設計震度を用いた震度法³⁾によっている。しかし, 震度法は簡便ではあるものの, 地震動の周波数特性や継続時間が岸壁の変形に与える影響を十分に考慮できているとは言いがたい。長尾ら⁴⁾は, これらの影響を考慮したより合理的な照査用震度の算出方法を重力式および矢板式岸壁について示しているが, 他の構造形式への適用は確認されていない。

よって本研究では, 根入れセル式岸壁における照査用震度の設定方法に関して, 照査用震度の設定に必要な基礎的な知見を得ることを目標とした。なお, レベル1地震動の作用に対しては岸壁が引き続き供用できることが求められることから, 変形量は過去の地震被災における供用制限の変形量などを考慮し, 概ね20cm以下となるような条件において検討を実施した。また, 港湾構造物の設計においてはレベル1地震動に対して液状化を許容しないことを基本としていることから, 本研究においても液状化に対す

る安全性は確保されているという前提で議論を進める。加えて, 本研究では通常岸壁が設計される地盤条件を対象としている。このため, 岩盤上に直接建設されるような岸壁については対象外である。

2. 検討条件および方法

(1) 検討概要

根入れセル式岸壁について, 表-1に示す条件で現行設計法により断面を設定した。水深は岸壁の標準的な水深の範囲から設定している。また, 設計震度も標準的な設計震度の範囲から設定しているが, 水深が深い条件ほど岸壁の重要度が高く, 大きな設計震度が採用される傾向が強いことを考慮している。根入れ長と換算壁体幅は, 設計震度, 水深(壁高)および地盤条件などの条件の違いによってそれぞれ異なる。検討モデルの断面は図-1に示すとおりである。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, 地盤の固有周期は緩い地盤で1.0~1.4秒, 締まった地盤で0.6秒以下, その中間の地盤で0.6~1.0秒程度と考えられたため, 固有周期として緩い地盤(第Ⅲ種地盤相当)で1.2秒, 締まった地盤(第Ⅰ種地盤相当)で0.6秒, その中間の地盤(第Ⅱ種地盤相当)で0.8秒と設定したが, 根入れセル式岸壁の建設地点の地盤には第Ⅰ種地盤のような硬い地盤は少ないと判断し, 今回の検討条件から第Ⅰ種地盤相当の条件は除外した。これらの断面について地震応答解析を実施し,

その解析結果を用いてセル式岸壁の周波数特性と変形量の相関および変形量に対する地震継続時間の影響を検討した。

地震応答解析には、マルチスプリング要素を採用した解析コードFLIP⁵⁾を用いた。FLIPは、セル式岸壁の被災事例再現性に実績があり、実務においても現在広く用いられている解析コードである。FLIPにおけるセル殻のモデル化は、セル壁体が剛体として挙動するように、北村⁶⁾ら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。地盤物性は表-2に示すとおりである。地盤物性の与え方は解析コードFLIPにおける標準的な方法⁷⁾に従っている。また、液状化は検討対象外であるため液状化に関するパラメータは考慮していない。

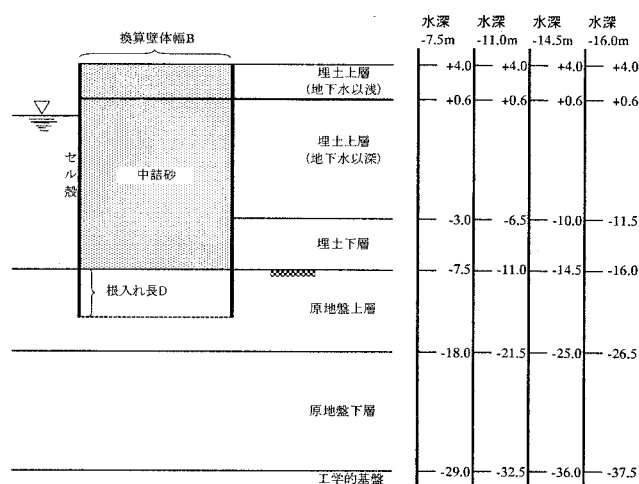
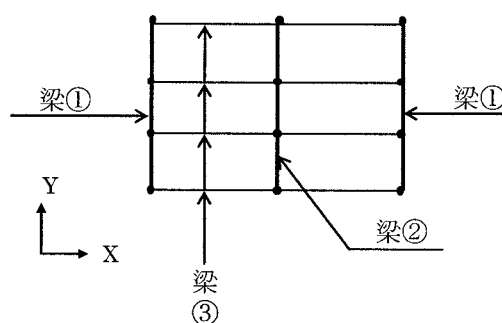


図-1 検討モデル

(1) 周波数特性に関する検討

周波数特性と岸壁変形量の相関を検討するため、表-1の検討断面について周波数の異なる10種類の正弦波(継続時間40s)を入力し、正弦波の振幅を変えながら天端変形量が20cmとなる時の地表面最大加速度を探索した。この20cmは、レベル1地震動作用後の変形量として供用制限を行うことなく岸壁が引き続き供用できる値の上限値に近い値として設定している。それらの傾向を調べ、周波数特性を考慮したフィルターを検討した。



- 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によるセル殻のモデル化

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			○	○

表-2 地盤物性

地盤 条件	土層区分	土層区分	湿润密度 (t/m ³)	基準有効 拘束圧 (kN/m ²)	基準せん 断剛性 (kN/m ²)	基準体積 剛性 (kN/m ²)	粘着力 (kN/m ²)	内部 摩擦角 (°)	最大減衰	S波速度 (m/s)
Case1	埋土	上層(気中)	1.8	89.3	25920	67595	0	37	0.24	120
		上層(水中)	2.0							
		下層								
	原地盤	上層	2.0	239.8	45000	117353	0	38	0.24	150
Case2	埋土	上層(気中)	1.8	89.3	58320	152089	0	38	0.24	180
		上層(水中)	2.0							
		下層								
	原地盤	上層	2.0	198.5	72200	188286	0	38	0.24	190
共通 材料	中詰砂	下層		279.2	125000	325980		39		250
			1.8	106.0	58300	152089	0	37	0.24	—

(2) 地震継続時間の影響の検討

岸壁の変形量は、地震動の継続時間の長短によっても影響を受けると考えられる。よって、それらの影響について補正方法を検討するために、継続時間の異なる地震動を表-1の検討断面に入力し、周波数特性に関する検討と同様に天端変形量が20cmとなる条件におけるフィルター処理後の加速度最大値を調べた。検討に用いた入力地震動としては、周波数特性の偏りの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など表-3に示す9種類の波形とした。

表-3 地震継続時間の影響の検討における対象波形

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

3. 検討結果

(1) 周波数特性の影響評価

図-3は、設計震度が0.10の条件で、天端変形量が20cmとなる条件について、入力地震動（各波形の周波数）ごとに地表面応答加速度最大値を示したものである。図の横軸は、入力地震動の周波数(Hz)を示し、縦軸のPGAは、20cmの天端変形量が生じた際のセル背後地盤における地表面応答加速度最大値(Gal)である。セルの根入れ長による違いを見るために根入れ長(D)別に図示した。この地表面応答加速度最大値は、照査用震度が1次元の地震応答計算における応答加速度をもとに設定されることを想定し、解析コードFLIPの自由地盤部における1次元の応答結果をもとに評価している。

図-3より以下の特徴が指摘できる。まず、1Hz以上になると壁体に変形を起こさせるためには非常に大きな入力地震動が必要になる。また、1Hz以下では基本的にほぼ同程度の入力地震動によって等量の変形が発生する。さらに、水深が浅いほど同じ入力に対して変形が生じにくいことがわかる。これは同じ設計震度で設計した断面であっても壁高が高いほど変形しやすいことを示している。また、根入れの違いによる差は僅かではあるが、根入れが大きい場合ほど、変形には大きな入力地震動が必要となっている。これらの特徴は、根入れによる傾向以外は、重力式や矢板式と同じ結果を示している⁴⁾。

以上の検討により、1Hz以下の領域でフラット、1Hz以上で急減する値を持つフィルターを用いることにより地震動の周波数特性を考慮する。1次元の地震応答解析により得られる地表面加速度時刻歴を高速フーリエ変換したものにこのフィルターを乗じることにより、一様変形スペクトルが得られることになる。従って、一様変形スペクトルをフーリエ逆変換することによって得られる加速度最大値は、岸壁の変形量に対応すると言える。

設計震度0.10の条件における結果であることを考慮して、フィルター処理後の加速度最大値が100Galとなるようなフィルターを検討する。ここで、1Hz以下の応答値の代表値として、0.6~1.0Hz入力の平均値に対する値に対して次に示す線形重回帰分析を

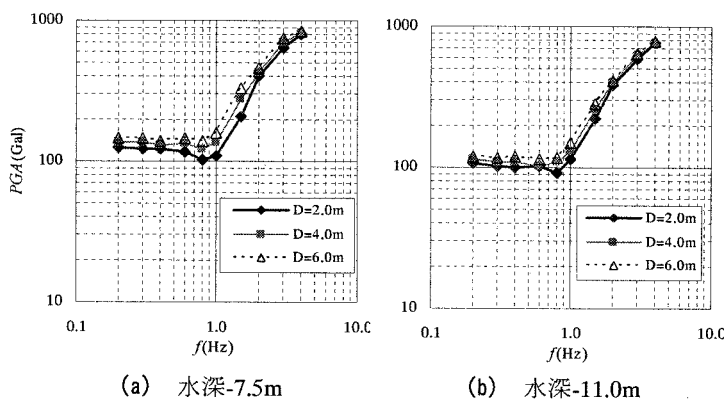


図-3 周波数と地表面最大加速度の関係
(地盤条件Case1)

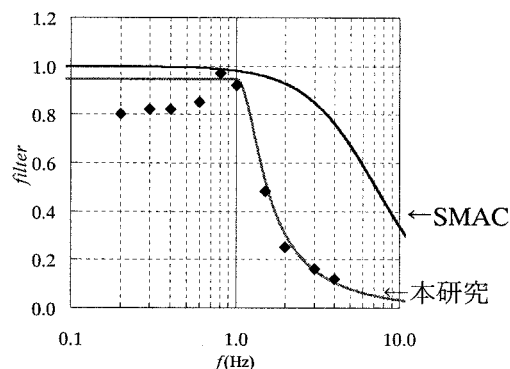


図-4 周波数考慮用フィルター
根入れ長 D=2.0m

行い1Hz以下のフラットな部分の値（これをbase値の意味でbと呼ぶ）に対する回帰式を求めた。

検討結果をもとに壁高H、背後地盤（ $V_s \geq 300\text{m/s}$ の工学的基盤から背後地盤の地表面まで）の固有周期 T_b 、海底面下の地盤の固有周期 T_u および根入れ長Dと壁高Hの比D/H（以下、根入れ比）の4つのパラメータを用いて線形重回帰分析を行いb値に対する回帰式を求めた。なお、地盤の固有周期は1/4波長則により求めている。さらに1Hz以上については、結果にフィットする関数形を用いてフィルターを作成した。その際、従来の港湾構造物の設計震度算出の際にはSMAC型強震計の特性に補正するフィル

ター（以下SMACフィルターと呼ぶ）が用いられてきたことを考慮し、SMACフィルターの関数を参考に設定している。

フィルター $a(f)$ の関数を式(1)～(3)に、参考として式(4)にSMACフィルター $SF(f)$ の関数もあわせて示す。

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

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

$$b = 0.90 \frac{H}{H_R} - 1.10 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.65 \frac{D}{H} + 0.29 \quad (3)$$

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)

$$SF(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{7.14}\right)^2 + 2\left(\frac{f}{7.14}\right)i} \quad (4)$$

根入れの効果を考慮したフィルター形状を図-4に示す。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ある。図に示すとおり、地震応答解析の結果と良い一致を見せることがわかる。

(2) 継続時間の影響評価

表-3に示す9波形を用いて、入力振幅を調整することにより、岸壁の残留変形量が20cmとなる条件を探索した。設計深度0.10、水深-11.0m、地盤条件Case1の条件における自由地盤部の地表面加速度について(1)で述べた根入れの効果を考慮したフィルター処理後の加速度最大値 a_f を図-5に示す。図中の◇がフィルター処理を行った結果であるが、地震波形によってかなりばらつきがある。これは入力波形の継続時間における長短等の影響が考えられ、継続時間が短い地震動ほど水平変位20cmを発生させる a_f は必然的に大きくなるものと考えられる。そこで継続時間に関するパラメータとして加速度最大値 a_f で基準化したフィルター処理後の加速度の二乗和平方根 S を用いて補正を行う。図-6および式(5)に S/a_f と低減率 p の関係を示す。ここで低減率 p とはフィルター処理で得られた a_c を検討に用いた設計震度0.10相当の100Galに対応させるために設定した値

(=100/ a_f)である。図より地盤ケースに関係なく S/a_f と低減率の間には比較的高い相関があり、この関係を用いることで継続時間の影響を考慮できると考えられる。式(5)に示す関係を用いて継続時間の影響を考慮した結果、図-5の●で示す結果が得られ、波形間のばらつきが適切に補正されていることが分かる。

$$p = 0.38 \ln(S/a_f) - 0.24 \quad (5)$$

ここに、

S : フィルター処理後の加速度自乗和平方根 (Gal)

a_f : フィルター処理後の加速度最大値(Gal)

式(5)より得られる低減率 p を用いて周波数特性と継続時間の影響を考慮した補正加速度最大値は式(6)により得られる。

$$a_c = p \cdot a_f \quad (6)$$

ここに、

a_c : 補正加速度最大値(Gal)

(3) 補正加速度最大値

表-3に示した9波形を用いて残留変形量が5cm, 10cm, 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 a_c を算出した。変形量

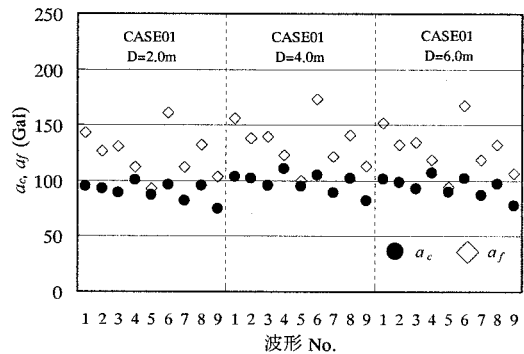


図-5 加速度最大値の比較

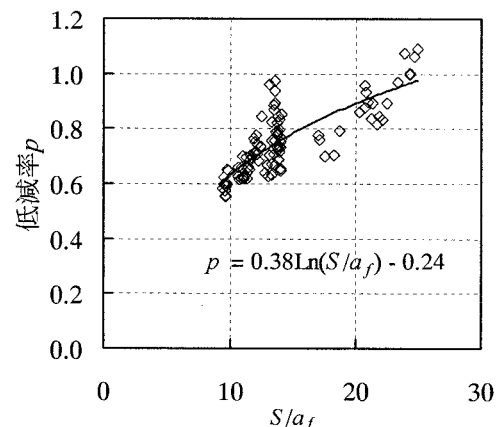


図-6 低減率

10cmおよび20cmの場合における設計震度 k_{hd} に対する補正加速度最大値 a_c の分布を図-7に示す。比較のために、従来港湾構造物において用いられてきた野田ら⁸⁾による震度算出方法で設計震度を求める際に用いられるSMACフィルターを施した地表面最大加速度値 a_s を併記した。

補正加速度最大値 a_c は、設計震度が大きくなるとややばらつくものの、SMAC加速度最大値 a_s よりもばらつきが少ない。しかし、既往の重力式や矢板式の検討⁴⁾では a_c が、設計震度の増加に対応して増加しているのに対し、セルの場合は、 a_c が設計震度の増加に対応せず頭打ちになっているように思われる。次に、図-8は図-7の補正加速度最大値 a_c に関して根入れ長 D 別に再プロットした図であり、それぞれの結果が重ならないように若干ずらして図化している。図-8から変形量に関係なく、各設計震度において根入れが大きい断面の方が根入れの小さい断面と比較して a_c が小さく算出されていることがわかる。そしてこの傾向は、設計震度の大きな断面になるほど顕著に表れる。今回の検討では、周波数特性を考慮するフィルターの b 値の線形回帰式設定時に根入れ比をパラメータに組み入れることで根入れの効果を考慮した。 b 値の線形回帰式では、根入れ長に比例して根入れの効果が発揮されるようになっている。しかし、今回のフィルターでは、根入れの大きい断面については過剰に低減された補正加速度最大値が算

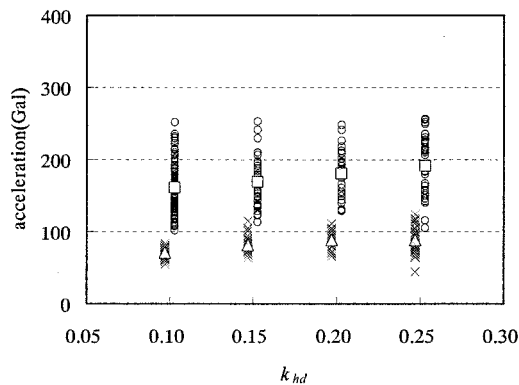
出される可能性がある。

セルの天端変形量の成分としては、セル直下の地盤変形量とセル壁体の傾斜による変形量が考えられる。前者は根入れ長の増加によって変形が抑制される傾向があるが、後者はその逆の傾向を示す⁹⁾。これらの相反する変形特性の合成がセルの天端変形量となっており、このような複雑なメカニズムを今回のような簡易な方法で表現することは困難であり、より詳細な検討が必要である。しかし、ここではあくまでも簡易な手法による照査用震度算出方法を目指し、次節では、根入れと変形に関する複雑なメカニズムを照査用震度算定に積極的に取り込むことは考えず、簡易な方法の再検討を試みる。

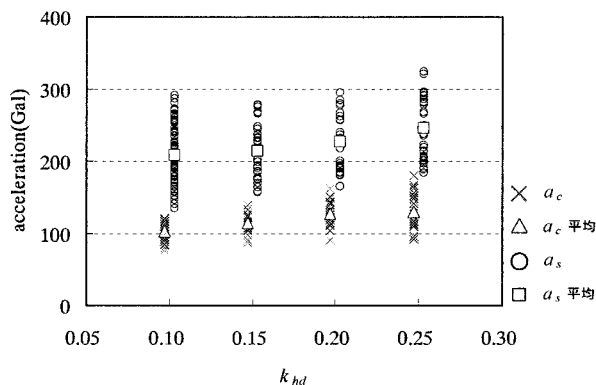
4. 根入れ効果を見視した場合の検討

フィルター b 値の回帰式において、根入れに関するパラメータを考慮せず、その他の3つのパラメータで b 値に対する回帰式を求めた。このとき b 値の代表値については、既往の研究結果¹⁰⁾を参考に工費が最適となる根入れ長を有する断面の値を採用した。

根入れの効果を無視したフィルターの b 値について式(7)に示す。なお、式(7)の各記号の意味は前出の式(3)と同じである。

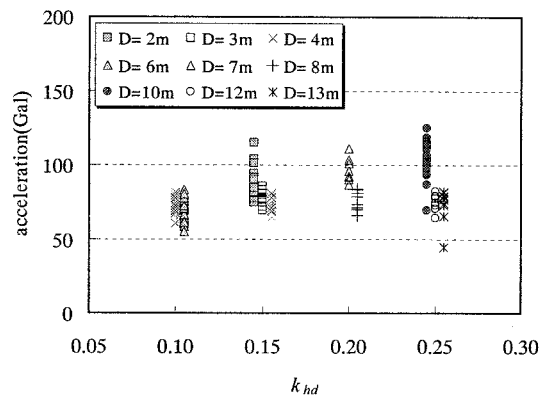


(a) 10cm変形時

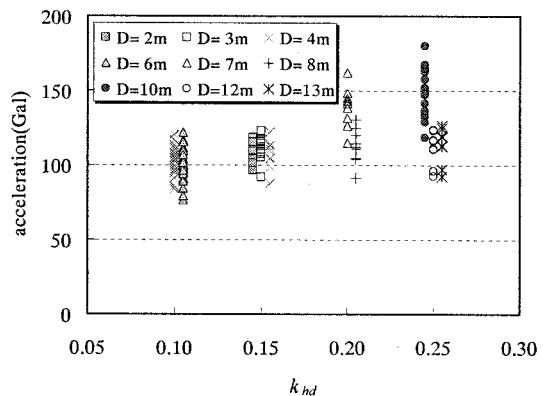


(b) 20cm変形時

図-7 設計震度と補正加速度最大値の関係



(a) 10cm変形時



(b) 20cm変形時

図-8 設計震度と補正加速度最大値の関係
(根入れ長別に表示)

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

次に、低減率 p についても式(8)のように見直した。

$$p = 0.29 \ln(S/a_f) - 0.13 \quad (8)$$

式(7)および(8)より根入れ効果を考慮しない周波数特性フィルタおよび低減率を用いて算出した変形量10cmと20cmの場合における補正加速度最大値 a_c の分布を図-9に示す。比較のためSMACフィルタによる加速度最大値 a_s も併記した。図-7に示した補正加速度最大値 a_c の分布と比較すると、図-9に示す a_c の分布は、設計震度の増加に対応して調和のとれたものになっており、図-7で見られたような大きな設計震度における a_c の頭打ちは発生しない。SMACフィルタによる加速度最大値 a_s と比較してもばらつきは小さく設計震度との相関も良好である。

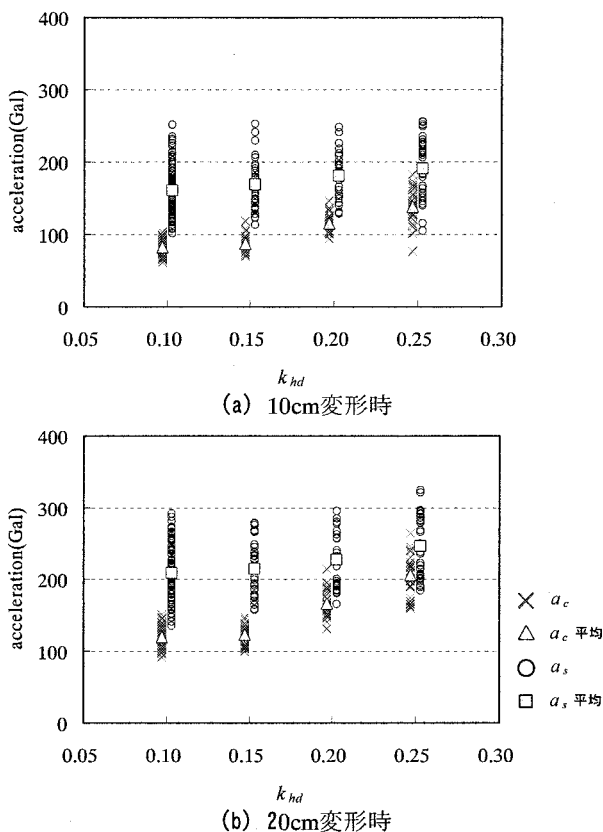


図-9 設計震度と補正加速度最大値の関係
(根入れを考慮しない場合)

5. まとめ

レベル1地震動に対する根入れ式セルの耐震性能照査用震度設定に関して基礎的な知見を得た。最初に、根入れ比によって根入れの効果を見込んだ周波数特性フィルタを検討したが、これは根入れの効

果を過大に見込んでしまい設計震度と補正加速度最大値の増加の調和性に問題がある。この原因は、変形量に対する根入れの効果の複雑なメカニズムを、本検討のような簡易な手法では十分に組み込めていないことにあり、今後、フィルタ b 値の上下限値の検討などが課題である。

現状では照査用震度算出に根入れの効果を十分に組み込むことは困難であるものの、根入れの効果を無視した場合の補正加速度最大値で設計震度の増加や変形量に調和しており、当面は根入れの効果を無視した方法を用いて震度を算出しても大きな問題はないと思われる。

参考文献

- 1) 長尾 毅, 川名 太: 港湾構造物の設計法の性能規定化について, 第60回土木学会年次学術講演会, 2005
- 2) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析, 土木学会論文集, No.801, I-73, pp.141-158, 2005
- 3) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 1999
- 4) 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照査用震度の設定手法, 国土技術政策総合研究所資料, N0.310, 2006
- 5) 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
- 6) 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-B, pp.516-517, 1998
- 7) 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
- 8) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, Vol.4, No.4, pp.67-111, 1975
- 9) 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関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, N0.352, 2006
- 10) 長尾 毅, 北村卓也: セル式岸壁の最適断面設定方法に関する研究, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.203-208, 2004