ISSN 1346-7328
国総研資料 第373号
平 成 1 9 年 2 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.373 February 2007

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

住谷圭一・長尾 毅

A study on Seismic Coefficients of Embedded-type Cellular Bulkhead Quay Walls against a Level-one Earthquake Ground Motion

Keiichi SUMIYA and Takashi NAGAO

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 and Transport, Japan

国土技術政策総合研究所資料
No. 373　2007年2月
(YSK-N-129)

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

住谷　圭一*・長尾　毅**

要　旨

本研究では，レベル1地震動に対する根入れ式セル岸壁の耐震性能照査用震度の設定方法についての考察を行った．岸壁の壁高や地盤の固有周期を考慮することにより，岸壁の残留変形量に対応させて修正した地表面応答加速度最大値を評価する方法を検討したものである．その際，セルの根入れ長を説明変数の一つとして採用することが，必ずしも十分ではないことがわかった．

キーワード：根入れセル式岸壁，レベル1地震動，耐震設計

*港湾研究部港湾施設研究室交流研究員（東亜建設工業株式会社）
**港湾研究部港湾施設研究室長
〒239-0826　横須賀市長瀬3-1-1　国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5029　Fax：046-844-5081　e-mail: sumiya-k92y2@ysk.nilim.go.jp

Technical Note of NILIM
No. 373 February 2007
(YSK-N-129)

A study on Seismic Coefficients of Embedded-type Cellular Bulkhead Quay Walls against a Level-one Earthquake Ground Motion

Keiichi SUMIYA*
Takashi NAGAO**

Synopsis

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*

* Researcher of Port Facilities Division, Port and Harbor Department
** Head of Port Facilities Division, Port and Harbor Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5029 Fax: +81-46-844-5081 e-mail: sumiya-k92y2@ysk.nilim.go.jp

目　次

1. はじめに 1

2. 岸壁の耐震性能照査体系 1

3. 耐震性能照査用震度に関する検討 2
3.1. 検討条件 2
3.2. 検討方法 2
3.3. 周波数特性の影響評価 4
3.4. 継続時間の影響 5
3.5. 補正加速度最大値 8

4. 照査用震度の再検討 10
4.1. 周波数特性のフィルターb値の見直し 10
4.2. 低減率pの見直し 11
4.3. 補正加速度最大値の計算 12
4.4. 照査用震度の計算 12

5. まとめ 12

参考文献 15

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．これは根入れセル式岸壁についても例外ではない．この流れを踏まえて，港湾構造物の耐震設計における設計地震動は，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る [2]．根入れセル式岸壁を含めた岸壁のレベル 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，耐震性能照査方法に関して震度法は簡便であるものの，基本的に加速度最大値をもとに震度に換算して耐震性能を評価するものであるため，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という問題がある．

性能設計体系への移行を考慮すると，セル式岸壁については重力式などの他の構造形式と同様に，具体的に変形量の許容値を設定し，レベル 1 地震動の作用に対して変形量等がそれを上回らないことを確認する性能照査体系の導入が必要である．

そのような体系に適合する手法として，2 次元有限要素法による地震応答解析 [4]がこれまで提案されており，解析で被災を説明できるという知見が蓄積されてきた．セル式岸壁においても北村ら [5]によって，兵庫県南部地震の際の被災事例について良好な再現性を得ている．

2 次元の有限要素法による地震応答解析の実務への適用を考えるとき，主な問題点は計算負荷にあるといえる．特に，設定した照査断面が所要の性能を満足しない場合は，断面を変更して性能が満足するまで照査を行う必要があるが，有限要素法において断面を変更し照査を繰り返すことは，設計者にとって大きな負担となる．従って，2 次元の地震応答解析において用いる照査断面が手戻りの少ない合理的なものとして簡易に設定できることが望ましい．

以上のような背景から長尾ら [6]は，性能照査を最終的には 2 次元有限要素法により行う場合を想定して，震度法を用いながらも，従来法よりも手戻りの少ない照査用断面を設定するための震度の設定について重力式および矢板式岸壁に関して示している．しかしながら，同手法がセル式を含めたその他の構造形式に対して適用可能かどうかの確認はなされていない．

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り，検討対象が根入れセル式岸壁であるので，第 I 種地盤相当の締まった地盤は，地盤条件から除外して検討した．

2. 岸壁の耐震性能照査体系

図- 1に性能設計体系における岸壁の耐震性能照査フローを示す．基本的には 2 次元非線形地震応答計算などにより耐震性能を照査する形態を想定する．ただし，設計実務における計算負荷軽減の観点から，1 次元の地震応答計算により得られる地表面の応答地震動をもとに照査用断面決定のための震度を算出し，震度法に基づいて照査用断面を設定する．このとき，根入れセル式岸壁はレベル 1 地震動の作用に対して変形量が支配的要因になると考えられることから，変形量に対応した震度が求められる必要がある．その際，従来の方法では，岸壁の変形量に影響を及ぼす地震動の周波数特性や継続時間の影響などが必ずしも十分に考慮されているとは言えない可能性があることから，本研究においてこの方法を検討するものである．

2 次元の地震応答計算によって，岸壁の性能が達成されないことが判明した場合には，何らかの対処方法を考える必要がある．しかしその場合，照査用震度を増加させて断面諸元を変更する以外にも，地盤改良を検討する方法がある．断面緒元の設定がある程度妥当なものであれば，断面緒元を増加させるよりは地盤改良を検討する方が合理的な結果が得られる場合があると考えられるが，地盤改良の検討であれば 2 次元有限要素法における再照査は比較的容易と考えられる．

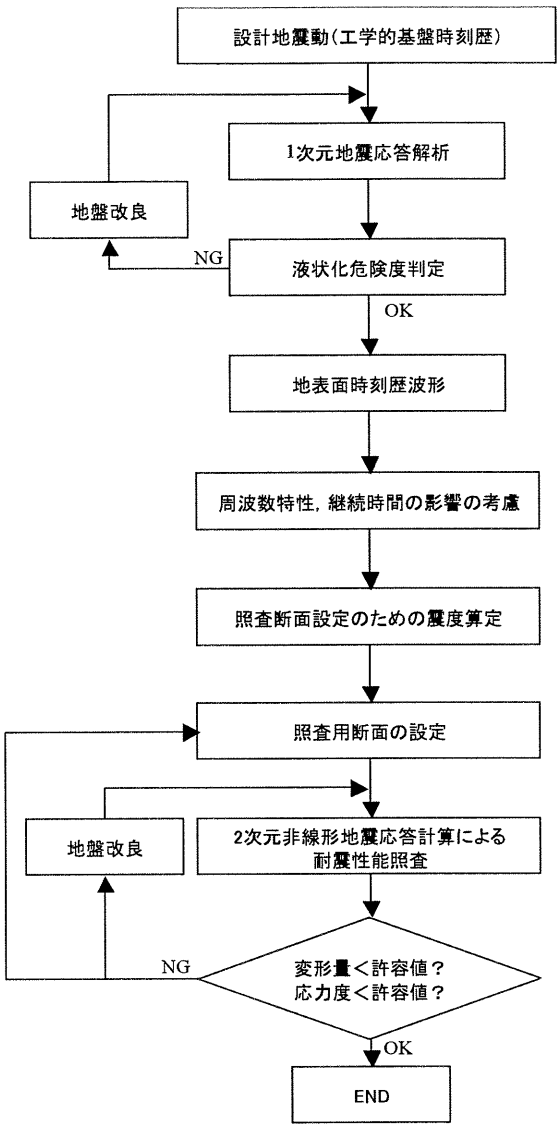


図- 1　耐震性能照査フロー

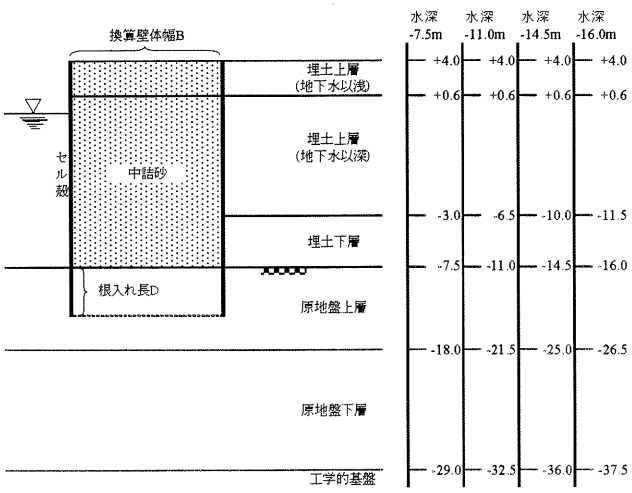


図- 2　検討モデル

3. 耐震性能照査用震度に関する検討

3.1. 検討条件

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- 2**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．

表- 1　検討条件

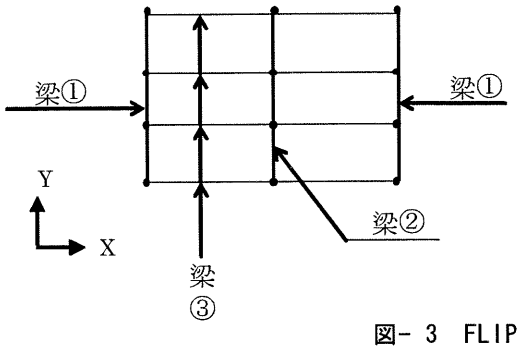
震度＼水深	-7.5m	-11.0m	-14.5m	-16.0m
0.10	○	○		
0.15	○	○		
0.20		○	○	
0.25			○	○

3.2. 検討方法

地震応答解析は，マルチスプリング要素を採用した解析コード FLIP[4]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ことから対象とした．

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 [5]らが実施した検討事例を参考に以下のように設定した(**図- 3**参照)．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．

地盤物性および断面緒元は**表- 2**～**表- 3**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．



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- 3 FLIP によるセル殻のモデル化

表- 2 地盤物性

地盤条件	土層区分	土層区分	湿潤密度 (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
		下層								
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
		下層		279.2	125000	325980		39		250
共通材料	中詰砂		1.8	106.0	58300	152089	0	37	0.24	－

表- 3 セルの断面諸元

水深 (m)	設計震度	地盤条件	セル緒元				FLIP 入力パラメータ								
							梁 1			梁 2			梁 3		
			セル直径 (m)	セル板厚 (mm)	根入れ長 (m)	換算壁体幅 (m)	密度 ρ (t/m^3)	断面積 A_1 (m^2/m)	断面 2 次モーメント I_1 (m^4/m)	密度 ρ (t/m^3)	断面積 A_2 (m^2/m)	断面 2 次モーメント I_2 (m^4/m)	密度 ρ (t/m^3)	断面積 A_3 (m^2/m)	断面 2 次モーメント I_3 (m^4/m)
-7.5	0.10	1	9.5	8.0	2.0	8.75	0	1.14E-4	1.29E-1	7.85	2.28E-2	2.57E-3	0	0.1	3.21E+0
			11.0	8.0	4.0	10.13	0	1.14E-4	1.29E-1	7.85	2.28E-2	2.57E-3	0	0.1	3.21E+0
			12.5	8.0	6.0	11.05	0	1.14E-4	1.29E-1	7.85	2.28E-2	2.57E-3	0	0.1	3.21E+0
		2	8.5	8.0	2.0	7.83	0	1.14E-4	1.03E-1	7.85	2.28E-2	2.06E-3	0	0.1	2.57E+0
			9.5	8.0	4.0	8.75	0	1.14E-4	1.03E-1	7.85	2.28E-2	2.06E-3	0	0.1	2.57E+0
			10.5	8.0	6.0	9.21	0	1.14E-4	1.03E-1	7.85	2.28E-2	2.06E-3	0	0.1	2.57E+0
	0.15	1	12.0	8.0	3.0	11.05	0	1.14E-4	2.05E-1	7.85	2.28E-2	4.10E-3	0	0.1	5.13E+0
		2	10.0	8.0	2.0	9.21	0	1.14E-4	1.42E-1	7.85	2.28E-2	2.85E-3	0	0.1	3.56E+0
-11.0	0.10	1	12.5	8.0	2.0	11.51	0	1.14E-4	2.23E-1	7.85	2.28E-2	4.45E-3	0	0.1	5.57E+0
			13.5	8.0	4.0	12.44	0	1.14E-4	2.23E-1	7.85	2.28E-2	4.45E-3	0	0.1	5.57E+0
			14.5	8.0	6.0	13.36	0	1.14E-4	2.23E-1	7.85	2.28E-2	4.45E-3	0	0.1	5.57E+0
		2	11.0	8.0	2.0	10.13	0	1.14E-4	1.72E-1	7.85	2.28E-2	4.45E-3	0	0.1	4.31E+0
			11.5	8.0	4.0	10.59	0	1.14E-4	1.72E-1	7.85	2.28E-2	4.45E-3	0	0.1	4.31E+0
			13.0	8.0	6.0	11.51	0	1.14E-4	1.72E-1	7.85	2.28E-2	4.45E-3	0	0.1	4.31E+0
	0.15	1	15.5	8.0	4.0	14.28	0	1.14E-4	3.58E-1	7.85	2.28E-2	7.17E-3	0	0.1	8.96E+0
		2	13.5	8.0	2.0	12.44	0	1.14E-4	2.60E-1	7.85	2.28E-2	5.20E-3	0	0.1	6.49E+0
	0.20	2	17.0	9.0	5.0	15.66	0	1.28E-4	4.61E-1	7.85	2.56E-2	9.23E-3	0	0.1	1.15E+1
-14.5	0.20	1	24.5	13.5	8.0	22.57	0	1.93E-4	1.45E+0	7.85	3.87E-2	2.90E-2	0	0.1	3.62E+1
		2	21.5	12.2	7.0	19.80	0	1.74E-4	1.00E+0	7.85	3.47E-2	2.00E-2	0	0.1	2.50E+1
	0.25	1	31.5	16.8	12.0	29.02	0	2.39E-4	2.97E+0	7.85	4.97E-2	5.93E-2	0	0.1	7.41E+1
		2	26.5	14.5	10.0	24.41	0	2.07E-4	1.81E+0	7.85	4.13E-2	3.62E-2	0	0.1	4.53E+1
-16.0	0.25	1	34.0	18.9	13.0	31.32	0	2.70E-4	3.89E+0	7.85	5.39E-2	7.78E-2	0	0.1	9.73E+1
		2	32.0	17.9	10.0	29.48	0	2.56E-4	3.27E+0	7.85	5.11E-2	6.54E-2	0	0.1	8.17E+1

せん断剛性 (G=7.7E+8kN/m^2) およびポアソン比 (ν=0.3) は全ての梁で共通

3.3. 周波数特性の影響評価

以上述べた条件のもとに，まず周波数特性と岸壁変形量の相関を検討するため，正弦波を用いた検討を行った．正弦波は継続時間の影響の条件を揃えるために継続時間を 40 秒，主要動継続時間を 5 秒に調整して，主要動の前後はコサイン状のテーパーをかけた波形を用いた（**図- 4** 参照）．用いた周波数は，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 20m となる条件を探索した．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．

設計震度が 0.10 の条件について，変形が 20cm となる条件について周波数ごとの地表面加速度最大値を示したものが**図- 5**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*)別に図示してある．この加速度最大値は，照査用震度が 1 次元の地震応答計算における地表面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か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[6]．

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．

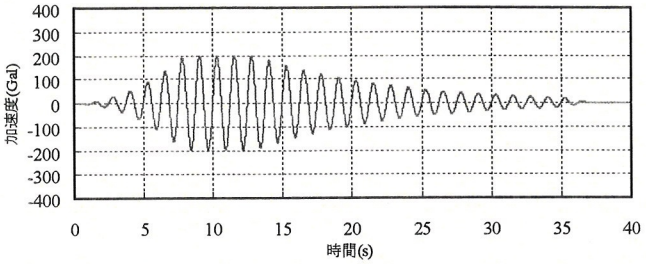
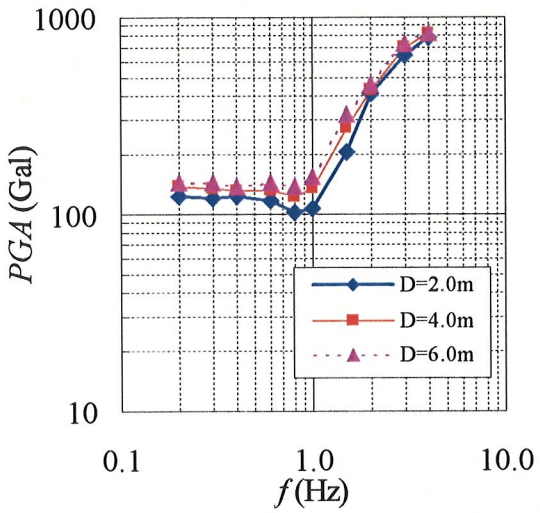
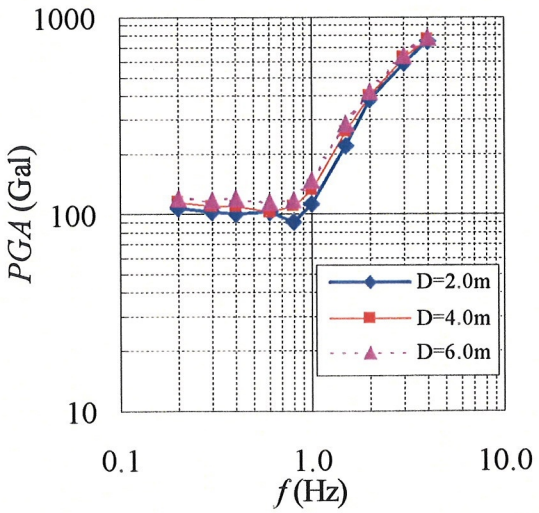


図- 4　入力波形の一例（正弦波 0.8Hz）



(a) 水深-7.5m



(b) 水深-11.0m

図- 5　20cm 変形時の周波数と地表面最大加速度の関係

検討結果をもとに壁高 H，背後地盤（Vs≧300m/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$S(f)$の関数もあわせて示す．

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

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

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

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)

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

根入れの効果を考慮したフィルター形状を**図- 6～図- 9**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，地盤ケースや水深を問わず，地震応答解析の結果と良い一致を見せることがわかる．

3.4. 継続時間の影響

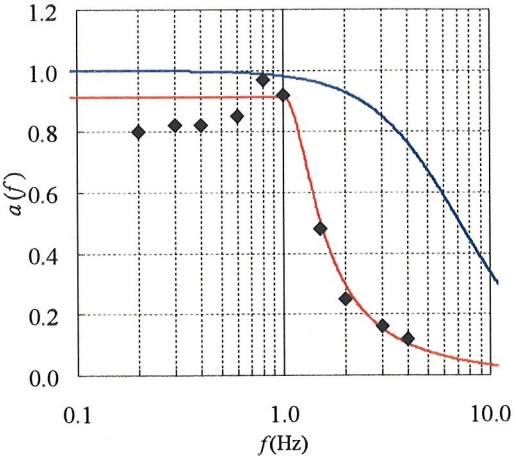
正弦波の検討により周波数特性を考慮できることになるが，この他に岸壁の変形量に影響を及ぼす要素として地震の継続時間の影響が考えられるので，この影響についても検討する．

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- 4**に示す９波形とした．これらの波形は，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であり既往の照査用震度設定の検討で用いた波形と同様のものである[6]．

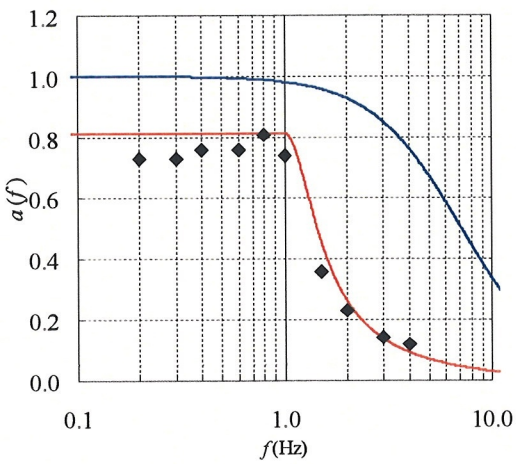
以上の９波形を用いて，入力振幅を調整することにより，岸壁の残留変形量が 20cm となる条件を探索した．設計深度 0.10，水深-11.0m，地盤ケース 1 の条件における自由地盤部の地表面加速度について上述の根入れの効果を考慮したフィルター処理後の加速度最大値 α_f を**図- 10**に示す．図中の◇がフィルター処理を行った結果であるが，地震波形によってかなりばらつきがある．これは入力波形の継続時間における長短等の影響が考えられ，継続時間が短い地震動ほど水平変位 20cm を発生させる a_f は必然的に大きくなるものと考えられる．そこで継続時間に関するパラメータとして加速度最大値 a_f 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- 11**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_f 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- 10**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．

表- 4　検討対象波形

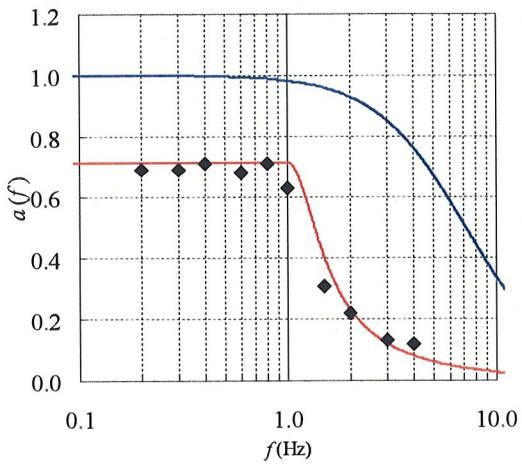
No.	名称	継続時間(s)	卓越周波数(Hz)
1	八戸波	19.0	0.39
2	神戸波	20.0	2.88
3	大船渡波	19.0	2.34
4	宮崎波	80.0	4.55
5	美都波	161.0	0.37
6	JR 波	40.0	1.34
7	Dip 波	29.1	0.68
8	Strike 波	29.1	1.66
9	Subduction 波	40.3	0.60



(a) 根入れ長　D=2.0m

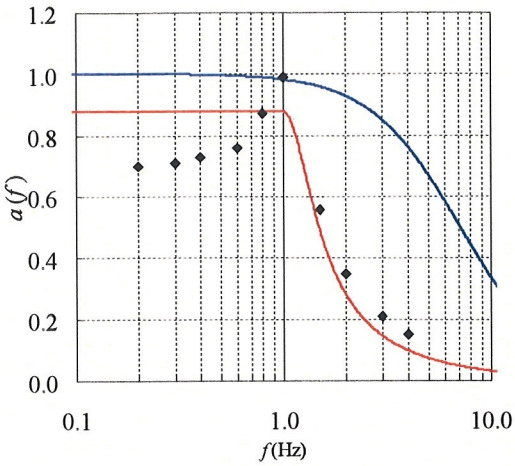


(b) 根入れ長　D=4.0m

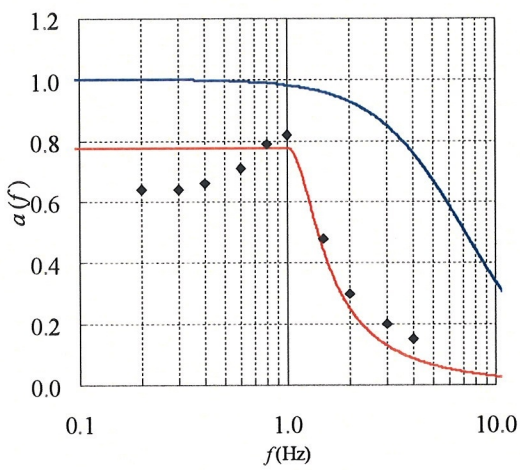


(c) 根入れ長　D=6.0m

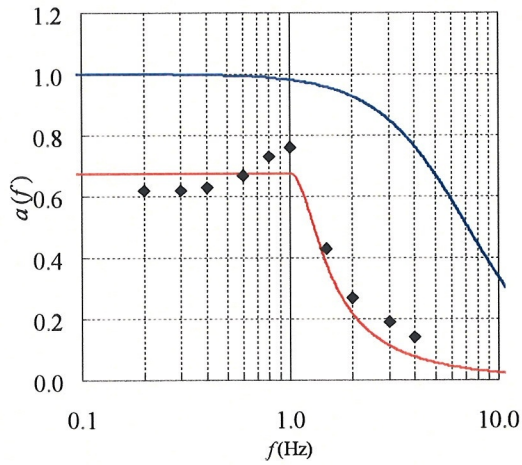
図- 6　周波数特性考慮用フィルター
（水深-7.5m 地盤ケース 1）



(a) 根入れ長　D=2.0m

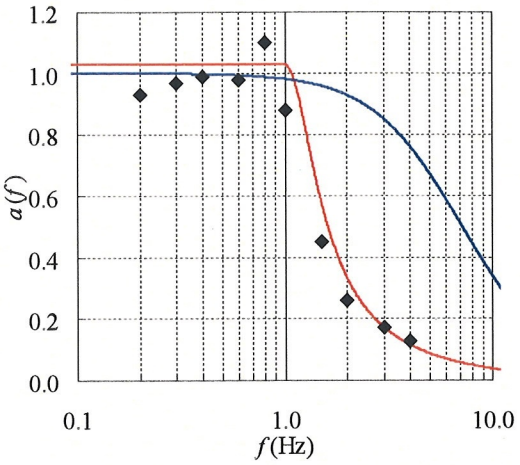


(b) 根入れ長　D=4.0m

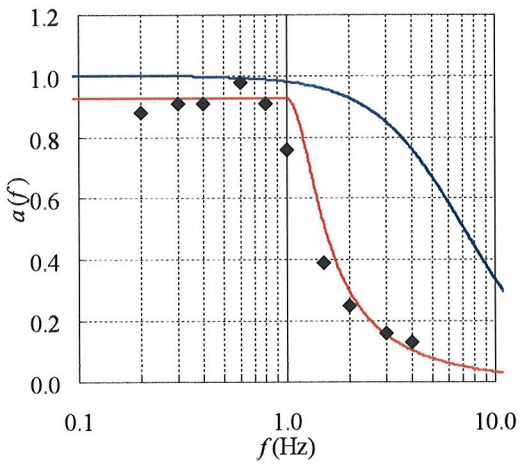


(c) 根入れ長　D=6.0m

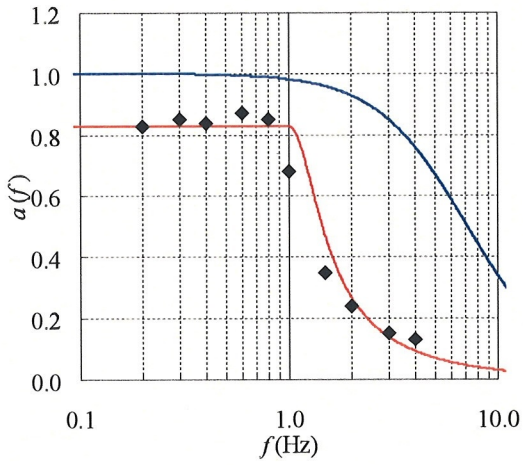
図- 7　周波数特性考慮用フィルター
（水深-7.5m 地盤ケース 2）



(a) 根入れ長　D=2.0m

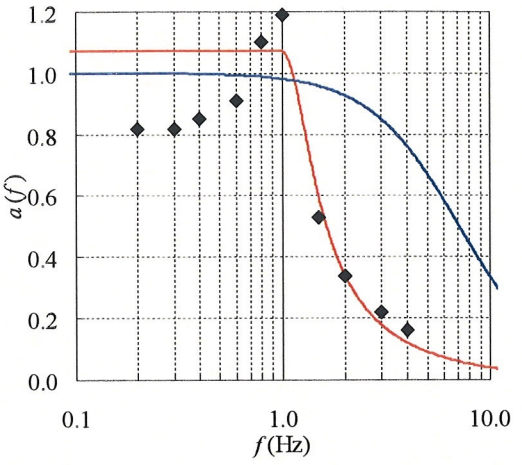


(b) 根入れ長　D=4.0m

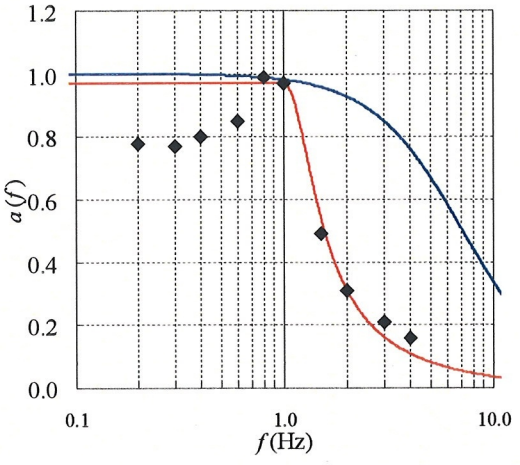


(c) 根入れ長　D=6.0m

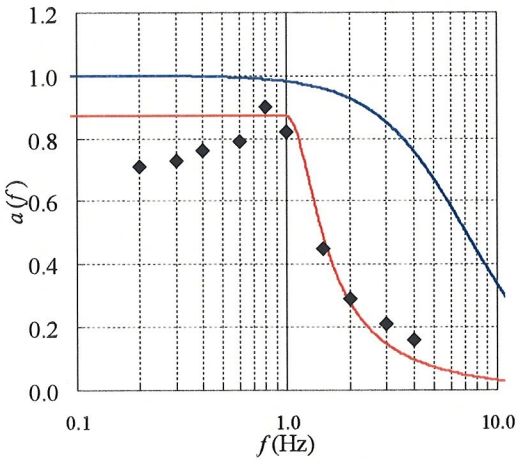
図- 8　周波数特性考慮用フィルター
(水深-11.0m 地盤ケース 1)



(a) 根入れ長　D=2.0m



(b) 根入れ長　D=4.0m



(c) 根入れ長　D=6.0m

図- 9　周波数特性考慮用フィルター
(水深-11.0m 地盤ケース 2)

$$p = 0.38\ln\left(S/a_f\right) - 0.24 \qquad (5)$$

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．

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

ここに，

a_c：補正加速度最大値(Gal)

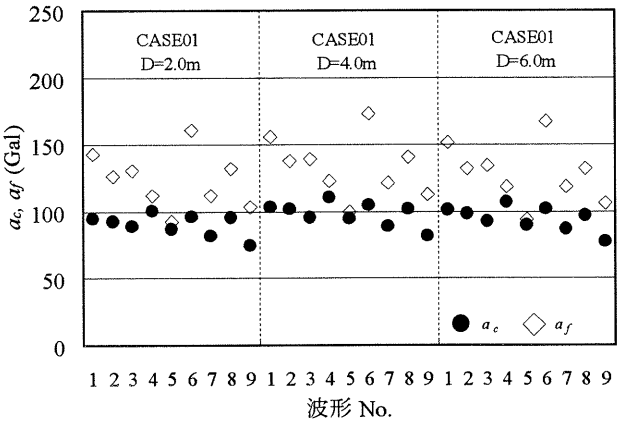


図- 10　加速度最大値の比較

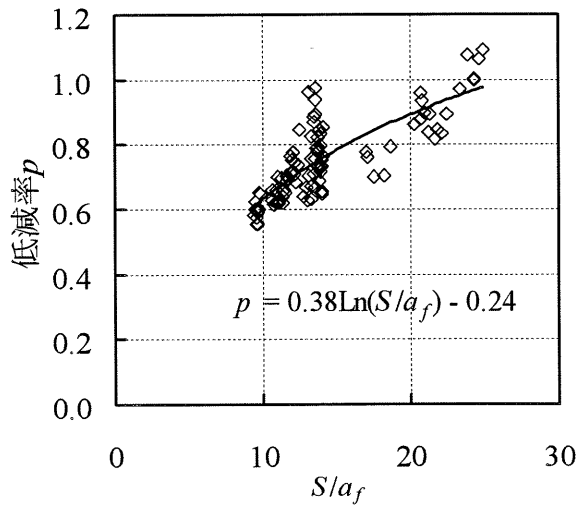


図- 11　低減率（根入れ考慮）

3.5. 補正加速度最大値

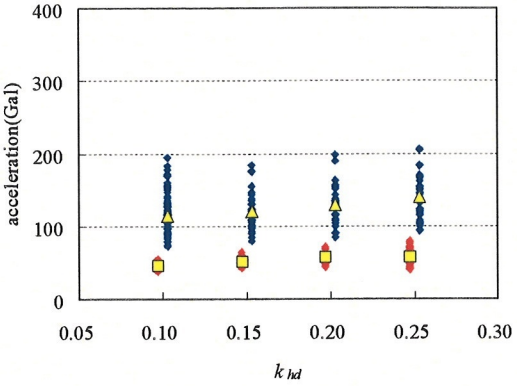
以上の手法を用いて，**表- 4**に示した9波形を用いて残留変形量が 5cm，10cm，15cm となるように入力振幅調整を行い，得られた条件における自由地盤部の地表面加速度時刻歴をもとに補正加速度最大値a_cを算出した．変形量ごとに設計震度k_{hd}に対する補正加速度最大値a_cの分布を**図- 12**に示す．比較のために，従来港湾構造物において用いられてきた野田ら[8]による震度算出方法で設計震度を求める際に用いられるSMACフィルターを施した地表面最大加速度値a_sを併記した．

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[6]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．

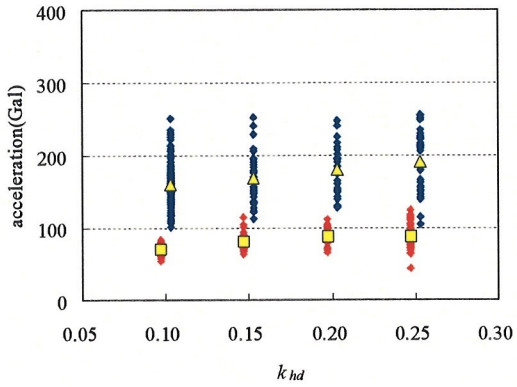
図- 13は**図- 12**の補正加速度最大値a_cに関して根入れ長D別にプロットし直した図である．**図- 13**から変形量に関係なく，各設計震度において根入れが大きい断面の方が根入れの小さい断面と比較してa_cが小さく算出されていることがわかる．そしてこの傾向は，設計震度の大きな断面になるほど顕著に表れる．

この検討では，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の効果について根入れ長に比例して効果を発揮するようになっている．しかし，今回のフィルターでは，根入れの効果を過大に評価しているように思われ，根入れの大きな場合において過剰に低減された補正加速度最大値が算出されたと考えられる．

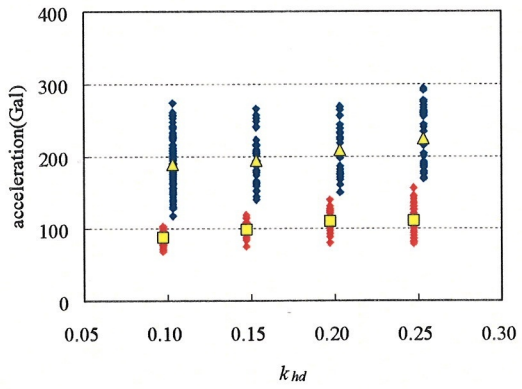
根入れとセルの変形量の関係については，根入れに対して地盤の変形量とセル壁体の傾斜による変形量に分けて考慮しなければならない[9]．前者は根入れの増加によって変形が抑制される傾向があるが，後者はその逆の傾向を示す．この両者の相反する変形特性の合成がセルの変形量となっており，このような複雑なメカニズムを今回のような簡易な方法で表現することは困難であり，より詳細な検討が必要である．しかし，ここではあくまでも簡易な手法による照査用震度算出方法を目指し，次節では，根入れと変形に関する複雑なメカニズムを照査用震度算定に積極的に取り込むことは考えず，簡易な方法の再検討を試みる．



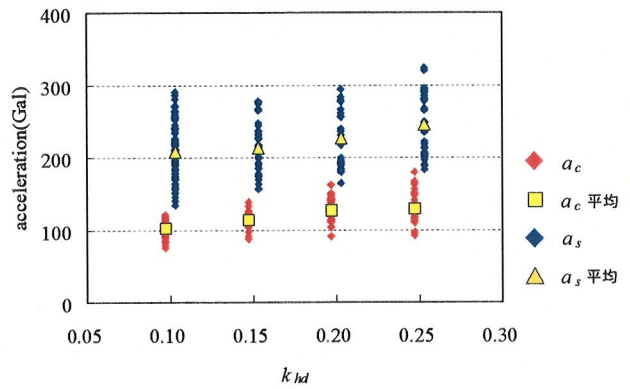
(a) 5cm 変形時



(b) 10cm 変形時

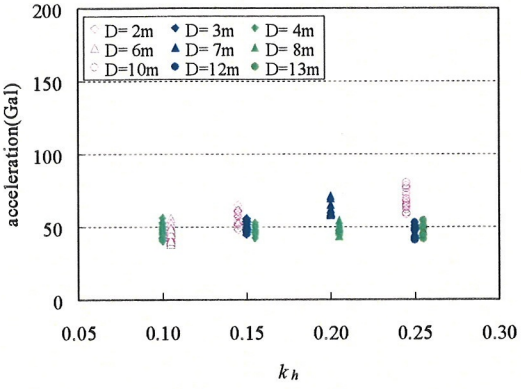


(c) 15cm 変形時

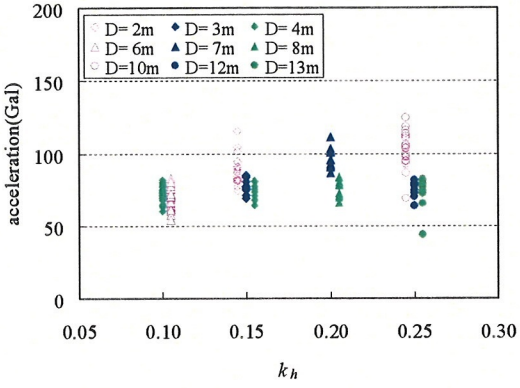


(d) 20cm 変形時

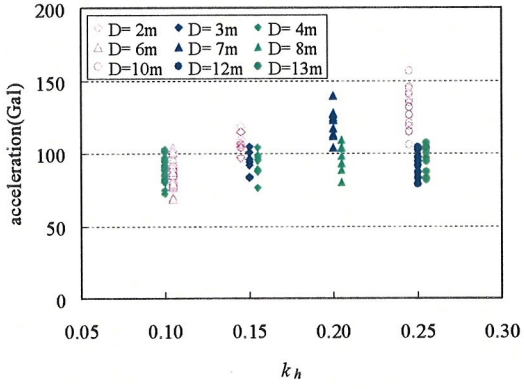
図- 12 設計震度と加速度最大値の関係



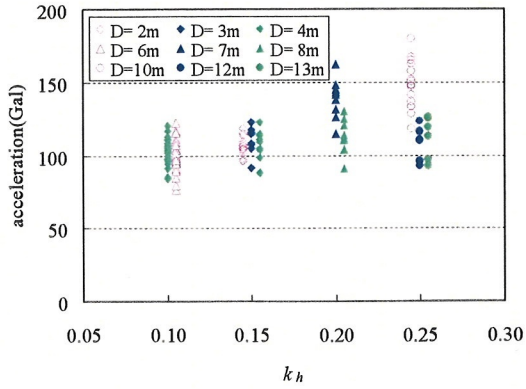
(a) 5cm 変形時



(b) 10cm 変形時



(c) 15cm 変形時



(d) 20cm 変形時

図- 13 設計震度と加速度最大値の関係(根入れ長別)

4. 照査用震度の再検討

以下では試みとして根入れ長 D の正規化において換算壁体幅 B を用いた場合および根入れの効果を無視した場合の検討を行った.

4.1. 周波数特性のフィルター b 値の見直し

3.3で検討したフィルター b 値の回帰式について以下のように見直した.

1) 換算壁体幅 B による根入れ長の正規化

フィルター b 値の回帰式において，根入れ比(D/H)で考慮していた根入れ効果を考慮する項を，根入れ長 D を換算壁体幅 B で正規化したパラメータ(D/B)に変更して b 値に対する回帰式を求めた.

$$b = 0.83\frac{H}{H_R} - 0.91\frac{T_b}{T_{bR}} + 0.69\frac{T_u}{T_{uR}} - 0.60\frac{D}{B} + 0.50 \qquad (7)$$

ここに,

B：換算壁体幅(m)

その他の各記号の意味は，前出の式(3)と同じである.

2) 根入れを無視

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(8)に示す．なお，式(8)の各記号の意味は前出の式(3)と同じである.

$$b = 1.80\frac{H}{H_R} - 2.03\frac{T_b}{T_{bR}} + 1.98\frac{T_u}{T_{uR}} - 0.85 \qquad (8)$$

式(7)および式(8)に示す b 値を用いたフィルター形状を**図- 14**と**図- 15**に示す．これらの図は，水深-7.5m，地盤条件 case1 の場合であり，図中の◆は正弦波による地震応答解析に対応する値のプロットである．**図- 14**に示すフィルター形状は，根入れ比を考慮した b 値の場合と同様に，地震応答解析の結果と良好な一致を見せる．一方，**図- 15**は地震応答解析の結果とフィルター形状が必ずしも良い一致は見せないが，安全側の結果を得ていると言える.

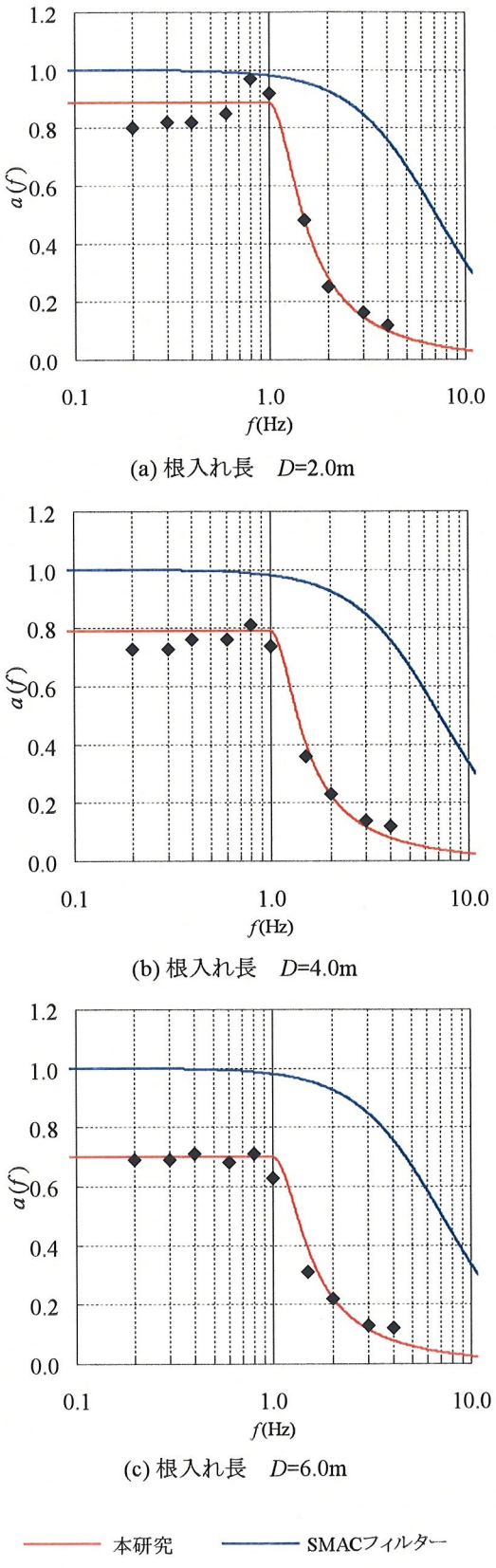
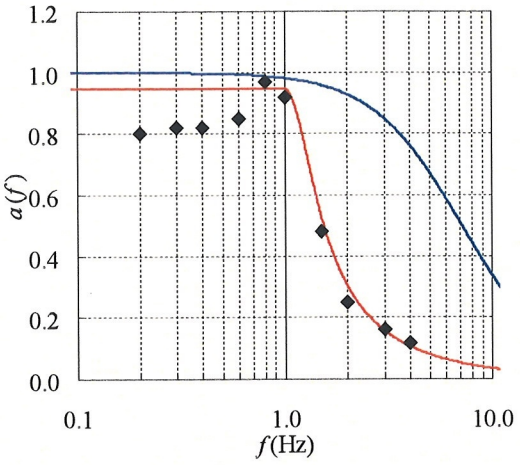
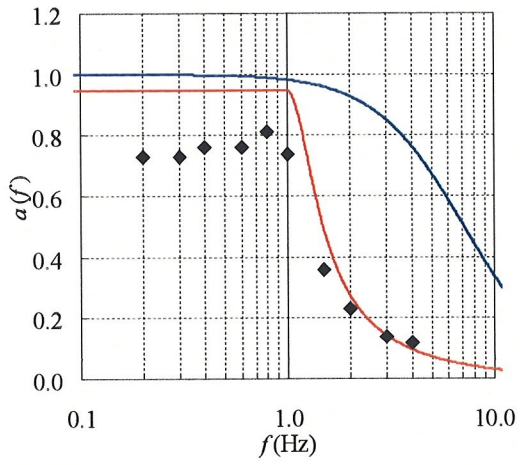


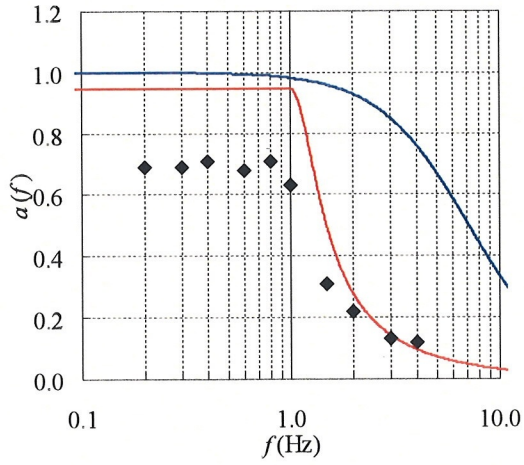
図- 14　周波数特性考慮用フィルター
換算壁体幅による正規化(水深-7.5m 地盤条件 Case1)



(a) 根入れ長　D=2.0m



(b) 根入れ長　D=4.0m



(c) 根入れ長　D=6.0m

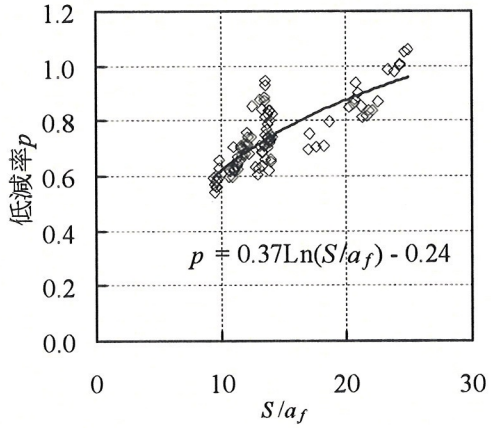
図- 15　周波数特性考慮用フィルター
根入れ無視(水深-7.5m 地盤条件 Case1)

4.2. 低減率 p の見直し

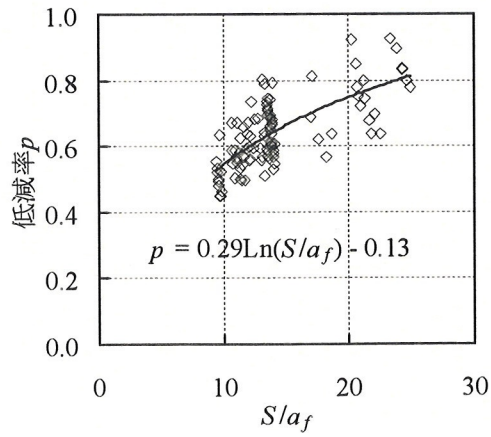
式(7)および式(8)で設定された b 値によるフィルター処理後の加速度最大値 a_f に関して，3.4で行ったような地震継続時間に関する低減率の再検討を行った．その結果を式(9)，(10)および**図- 16**に示す．根入れ長を換算壁体幅で正規化することによって周波数特性フィルターに根入れの効果を見込んだ場合（式(9)と**図- 16** (a)）については，3.4とほぼ同じ結果を得た．また，周波数特性フィルターに根入れの効果を考慮しない場合（式(10)と**図- 16** (b)）については，多少ばらつきは大きくなるものの，低減率 p とフィルター処理後の加速度最大値 a_f で正規化された加速度の二乗和平方根 S の間は比較的高い相関を保っており，3.4に示した方法と同様に継続時間についての低減率が設定可能であると考えられる．

$$p = 0.37\ln\left(S/a_f\right) - 0.24 \qquad (9)$$

$$p = 0.29\ln\left(S/a_f\right) - 0.13 \qquad (10)$$



(a) 根入れ長 D を換算壁体幅 B で正規化



(b) 根入れ長を換算壁体幅で正規化

図- 16　低減率の見直し

4.3. 補正加速度最大値の計算

4.1および4.2で再検討した周波数特性フィルターおよび低減率を用いて算出した補正加速度最大値a_cの分布を**図- 17**と**図- 18**に示す．比較のためSMACフィルターによる加速度最大値a_sも併記した．**図- 12**に示した補正加速度最大値a_cの分布と比較すると，**図- 17**と**図- 18**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- 12**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フィルター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．また，**図- 17**と**図- 18**を比較すると**図- 18**の方が補正加速度最大値a_cは大きくなっているが，これは根入れの効果を考慮するか否かの差であると思われる．その差は根入れ長が比較的小さくて済む設計震度の小さい断面より大きな根入れ長を必要とする設計震度の大きな断面の場合でより顕著な差となっていることがわかる．

4.4. 照査用震度の計算

4.1以降で再検討した結果を用いて既往の重力式や矢板式の照査用震度算出法[6]を参考にすることにより，震度算出式を設定した．これは，現行設計震度に対して岸壁の変形量と補正加速度を重力加速度で除した値a_c/gを説明変量とした回帰分析によるものであり，ここで用いたデータ数は828である．検討した変形量の範囲（5cm，10cm，15cm，20cm）のうち平均的な10cm変形の結果に対して，現行設計震度k_{hd}についてa_c/gを説明変量とした線形回帰（$k_h=A\,a_c/g+B$）により係数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(=10cm)で除した値の回帰を求めた．以上により式(11)と式(12)が各ケースに対して得られた．

$$k_h = 0.66\left(\frac{D_a}{D_r}\right)^{-0.54}\cdot\frac{a_c}{g}+0.07 \qquad (11)$$

$$k_h = 0.87\left(\frac{D_a}{D_r}\right)^{-0.58}\cdot\frac{a_c}{g}+0.05 \qquad (12)$$

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)

a_c：補正加速度最大値（Gal）

g：重力加速度(=980Gal)

式(11)は根入れ長Dを換算壁体幅Bで正規化することによって周波数特性フィルターのb値に根入れの効果を考慮した場合であり，式(12)は根入れの効果を無視した場合である．

式(11)，式(12)による精度を，従来の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と比較する．野田らによる震度は，SMACフィルターを施した地表面加速度最大値a_s（以下，SMAC加速度最大値と称する）をもとに，以下の式により算出される．

$$k_h = a_s/g \qquad :(a_s\leqq 200\text{Gal})$$

$$k_h = 1/3(a_s/g)^{1/3} \qquad :(a_s>200\text{Gal}) \qquad (13)$$

ここに，

k_h：照査用震度

a_c：SMACフィルター処理後の加速度最大値(Gal)

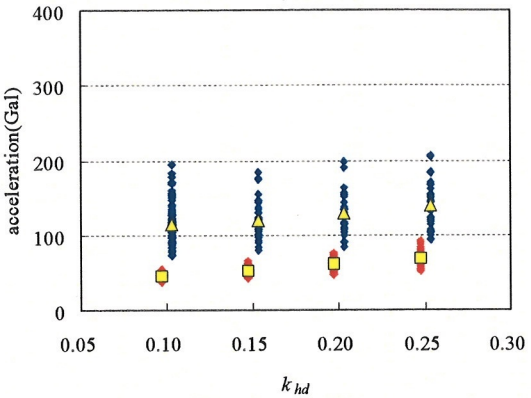
g：重力加速度(=980Gal)

本研究による照査用震度と野田らの式による震度を比較したものが**図- 19**と**図- 20**である．**図- 19**は野田らの方法に比べてばらつきが少なく設計震度の増加に伴って対応のとれたものになっているが，算出される震度がやや小さい．一方，**図- 20**は設計震度が大きくなるとばらつきが大きくなるものの，設計震度の増加に伴う対応は良好である．**図- 21**は，既往の検討にある重力式岸壁における照査用震度の算定方法を準用して求めた結果である．この結果は，**図- 20**と比較するとやや大きめの値を算出するが，ほぼ同じ結果を得ることがわかる．

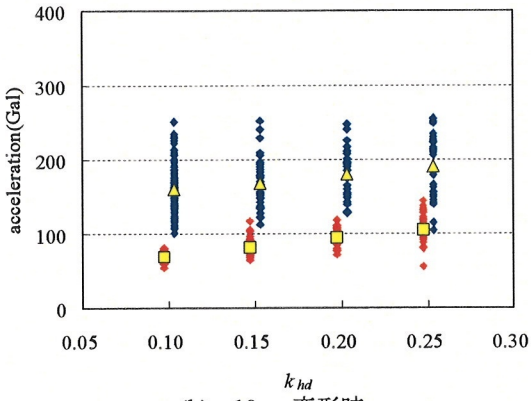
5. まとめ

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ーを検討したが，これは根入れの効果を過大に見込んでしまうことがわかった．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取り込めていないことが原因であり，照査用震度算出において根入れの効果を見込むことについては，より詳細な検討が必要である．

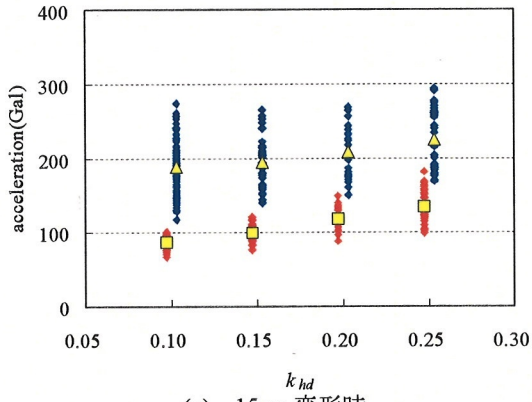
現状では照査用震度算出に根入れの効果を十分に見込むことは困難であるものの，根入れの効果を無視した震度算出方法でも設計震度の増加や変形量に調和した震度を算出可能であり，当面は根入れの効果を無視した方法を用いて震度を算出しても問題はないと思われる。



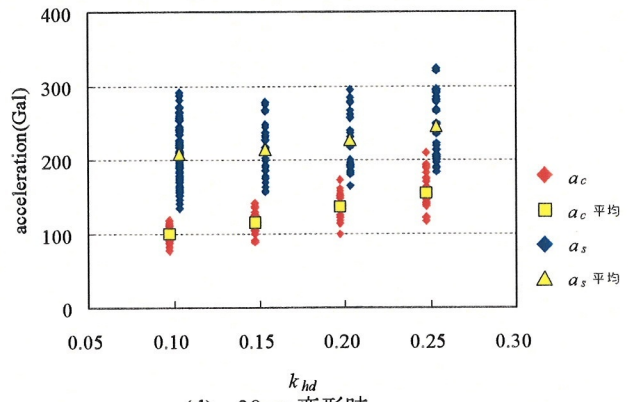
(a) 5cm 変形時



(b) 10cm 変形時



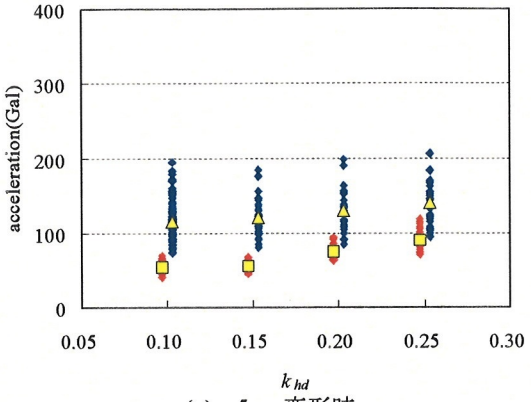
(c) 15cm 変形時



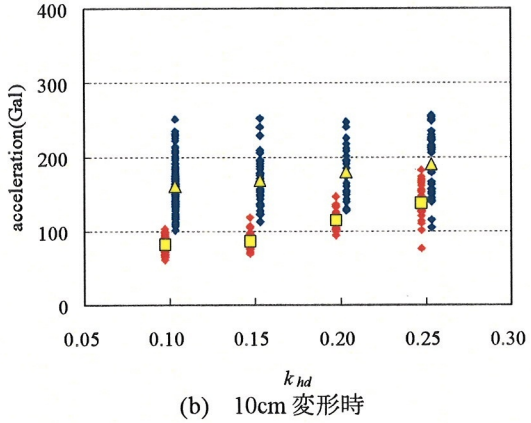
(d) 20cm 変形時

図- 17 設計震度と補正加速度最大値の関係

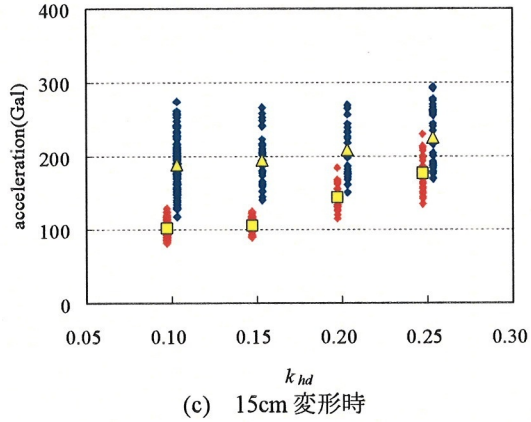
（根入れを考慮・換算壁体幅による正規化）



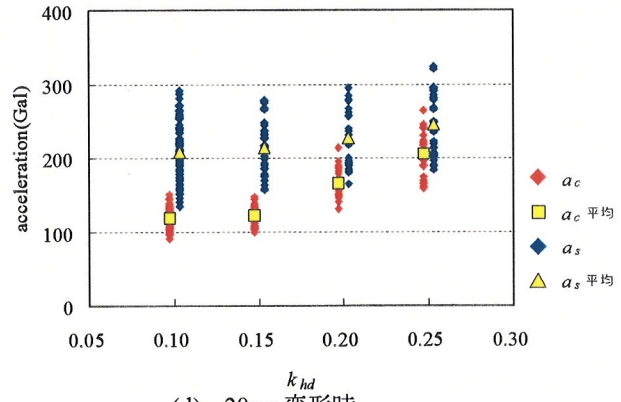
(a) 5cm 変形時



(b) 10cm 変形時



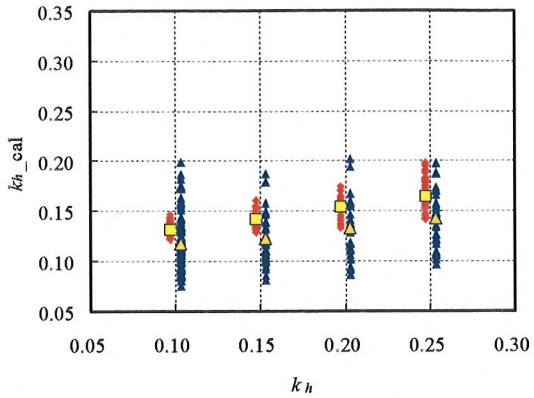
(c) 15cm 変形時



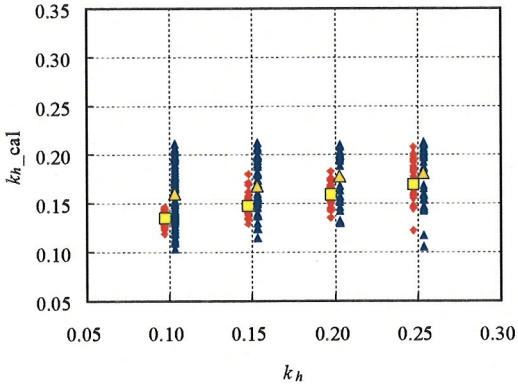
(d) 20cm 変形時

図- 18 設計震度と補正加速度最大値の関係

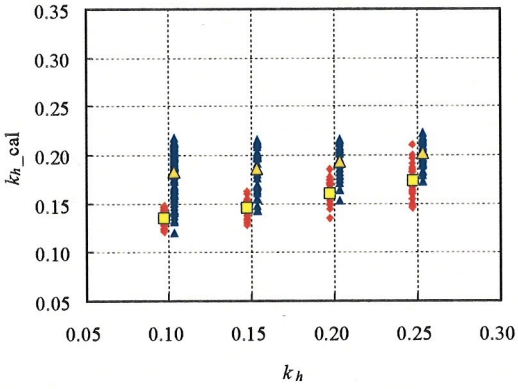
（根入れ無視）



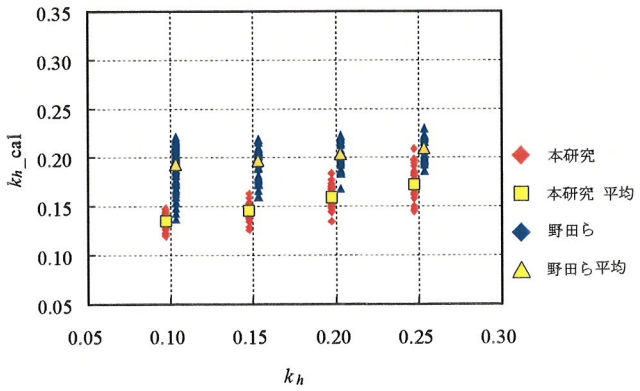
(a)　5cm 変形時



(b)　10cm 変形時

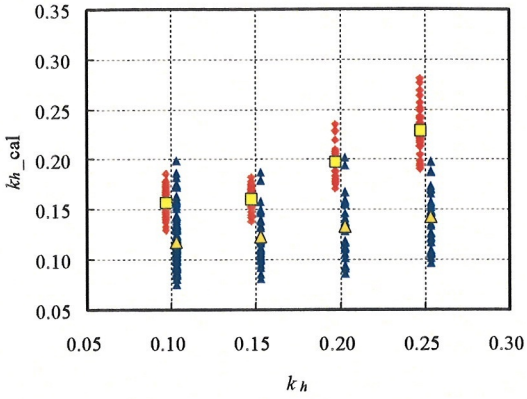


(c)　15cm 変形時

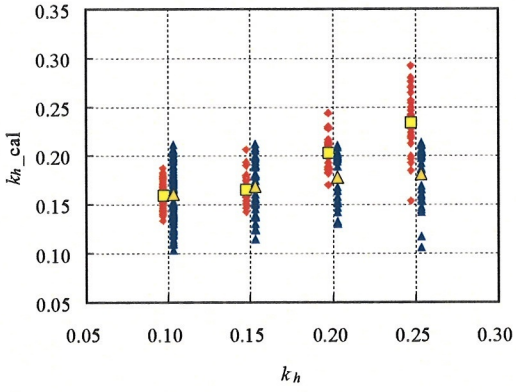


(d)　20cm 変形時

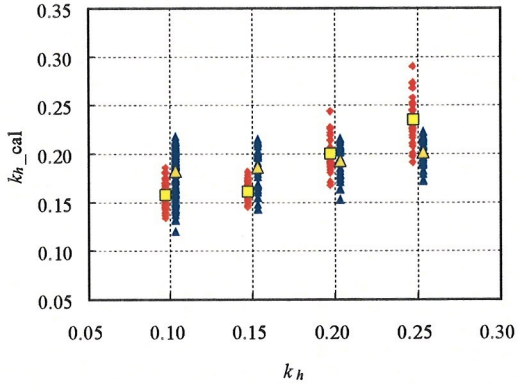
図- 19　算出震度の比較（根入れ考慮）



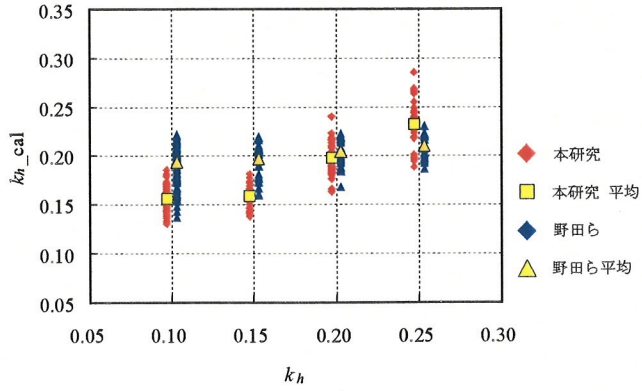
(a)　5cm 変形時



(b)　10cm 変形時

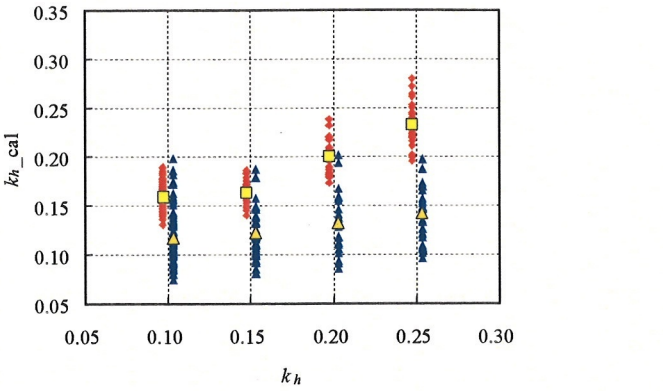


(c)　15cm 変形時

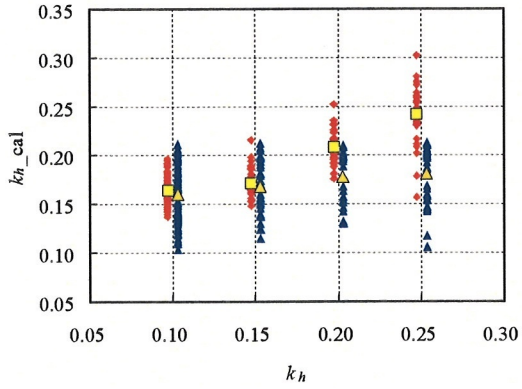


(d)　20cm 変形時

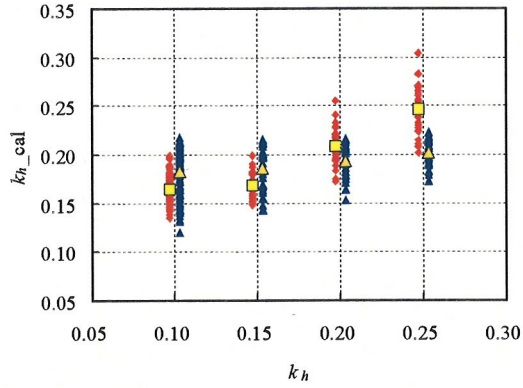
図- 20　算出震度の比較（根入れ無視）



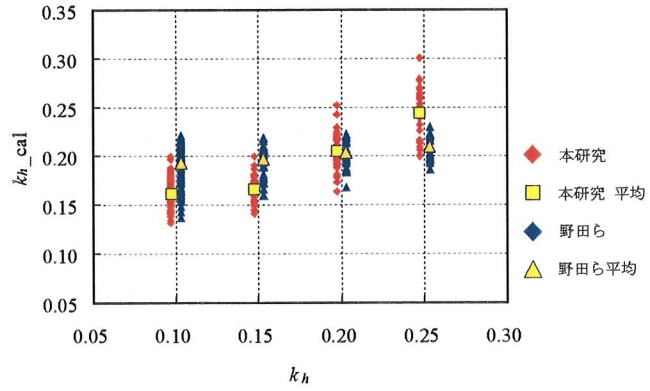
(a) 5cm 変形時



(b) 10cm 変形時



(c) 15cm 変形時



(d) 20cm 変形時

図- 21 算出震度の比較（重力式の準用）

また，根入れの効果を無視した場合の照査用震度算出結果は，既往の重力式岸壁の照査用震度算出方法による結果よりもやや危険側であるが，ほぼ同じ結果を示しており，セル式岸壁の照査用震度算出において重力式岸壁の照査用震度算出方法を準用することの可能性も示すことができた．

(2007 年 2 月 14 日受付)

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) 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
5) 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
6) 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
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，pp67-111，1975
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，2005

この資料は，国土交通省国土技術政策総合研究所長の複製許可承認
（平成19年3月8日付け国総研企調第55号）を得て複製したものである。

平成19年6月　　複製

港湾空港技術振興会

〒239-0826　横須賀市長瀬3-1-1
電話　046-843-6558　Fax　046-843-2821

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No. 373　　February 2007

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：046-844-5018