

控え直杭式矢板岸壁の残留変形量に影響を 及ぼすパラメータに関する研究

A STUDY ON THE PARAMETER THAT AFFECTS THE DISPLACEMENT OF SHEET PILE QUAY WALLS WITH VERTICAL PILE ANCHORAGE

宮下健一朗¹・長尾 毅²
Kenichirou MIYASHITA and Takashi NAGAO

¹非会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒206-8550 東京多摩市関戸 1-7-5)

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)

Earthquake resistant design of quay wall is carried out by using quasi-static method especially for Level-one earthquake ground motion. The method is easy to be implemented, however, residual deformation of quay walls cannot be evaluated precisely by the conventional design method. Therefore, it is very important to establish the method to control the residual deformation of quay walls without much calculation load for practical design.

In this study, we identified the parameter that affects the residual deformation by the parametric study using two-dimensional earthquake response analyses. As the result of the analysis, we found that the distance from sheet pile to anchorage is the governing parameter. We also proposed the method to evaluate the residual deformation of sheet pile quay walls with vertical pile anchorage in accordance with the change in the distance from sheet pile to anchorage.

Key Words: Sheet pile quay wall, earthquake resistant design, earthquake response analysis

1. はじめに

今般、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾が改訂され、設計体系は仕様規定型から性能規定型へ移行した。本研究で対象とする矢板式岸壁の耐震設計を例にとると、仕様規定型の設計体系の下では、極限状態での力の釣り合いに基づいて構造部材の断面力の観点のみにより耐震性能を規定していたが、性能規定型の設計体系の下では、構造部材の断面力のみならず、地震後の残留変形量が供用上の観点から規定される許容変形量以下となることも耐震性能として要求される。特にレベル1地震動に対しては、矢板式岸壁の破壊モードは変形先行型であり、鋼材の降伏先行型ではないこと²⁾が指摘されており、性能規定型の設計体系の下では精度の良い残留変形量算出方法が重要となる。

この点を踏まえて、矢板式岸壁のレベル1地震動に対する耐震性能照査用震度の算出方法として、地震動の周波数特性と継続時間を考慮し残留変形量に対応した震度を求める方法が提案され³⁾、今後標準的な方法として採用されることとなった。しかしながらこの方法は、設計者の便を考慮して、耐震性能照査方法としては従来の断面力照査法を踏襲したも

のとなっており、実際の変形メカニズムと必ずしも調和したものではないため、残留変形量の正確な制御法としては精度面の問題を残している。例えば、評価される残留変形量が許容値よりも大きい場合、照査用震度を増加させることとなるが、この場合鋼材の剛性の増加、根入深さの増加、矢板控え間距離の増加などを行うことになる。今仮に、応力については余裕があるものの変形量のみをコントロールしたい場合は、これら全ての諸元変更は必要がない可能性があるが、従来より用いられてきた設計手法の枠組みでは、この点を必ずしも適切に考慮できない。

換言すると、レベル1地震動を対象として標準的な設計法を用いた場合、必ずしも経済的な断面が決定されていない可能性が示唆される。

より経済的な断面を設定するには、控え直杭式矢板岸壁を構成する矢板剛性、矢板や控え杭の根入れ長、矢板控え杭間距離などのパラメータのうち、残留変形量に影響が大きいパラメータを特定して効率よく変更する必要がある。しかしながら、現在それらパラメータがどのように残留変形量に影響を及ぼしているのかに関する知見は少なく、適切な変更方法を簡易に設定することはできない。

本研究は、控え直杭式矢板岸壁の残留変形量に影響を及ぼすパラメータについて研究を行ったもので

ある。検討方法として、控え直杭式矢板岸壁を構成する矢板剛性、矢板や控え杭の根入れ長、矢板控え杭間距離などのパラメータを変更した幾つかの断面に対して、2次元有限要素法による地震応答解析を行うことにより、パラメータの残留変形量への影響を調べた。

2. 検討条件

2次元地震応答解析には、解析コード FLIP⁴⁾を使用する。FLIPは平面ひずみ状態を対象とした有効応力法に基づく解析プログラムである。FLIPの控え直杭式矢板岸壁に対する解析手法として、小堤ら⁹⁾は自重解析時の多段階解析法を提案しており、同解析法によって岡ら⁷⁾が、日本海中部地震の際に被害を受けた控え式矢板岸壁と、無被害だった控え式矢板岸壁の再現解析で実際の状況と整合する結果を得ている。本研究においても多段階解析法を用いる。

検討断面は設計震度 0.15、水深-11.0mの条件により技術基準⁸⁾によって設計した断面である基本断面と、矢板剛性、矢板根入れ長、控え杭根入れ長、矢板控え杭間距離を基本断面から変更した断面とする。地盤条件は矢板岸壁が比較的軟弱な地盤で用いられることが多いことから第Ⅱ、第Ⅲ種地盤を想定した。表-1に地盤条件を示す。ここで、 G_{ma} ：基準せん断剛性、 σ_{ma} ：基準拘束圧、 h_{max} ：最大減衰定数、 m_g ：せん断剛性の拘束圧依存性を制御するパラメータである。FLIPに用いる各種パラメータは現在標準的に用いられている設定法⁵⁾に従って設定した。

図-1に基本断面を示す。()は地盤 case2での値である。表-3に変更断面の変更後パラメータの値を示す。

表-1 地盤条件

地盤	土層区分	ρ (t/m^3)	G_{ma} (kN/m^2)	σ_{ma} (kN/m^2)	ν	ϕ (deg)	h_{max}	m_g
case1 (第Ⅲ種相当)	埋土	1.8	25920	89.8	0.33	37	0.24	0.5
	原地盤	2	45000	239.8	0.33	38	0.24	0.5
case2 (第Ⅱ種相当)	埋土	1.8	58300	89.8	0.33	38	0.24	0.5
	原地盤	2	72200	198.5	0.33	38	0.24	0.5
		2	125000	279.2	0.33	39	0.24	0.5
共通物性	基礎捨石 裏込め石	2	180000	98	0.3	40	0.24	0.5

表-2 構造諸元

地盤	矢板		タイ材		控え杭	
	種別	断面2次モーメント (m^4/m)	種別	断面積 (m^2/m)	種別	断面2次モーメント (m^4/m)
case1	SKY490	2.15E-03	HT-490	2.21E-03	SHK490M	1.14E-03
case3	SKY490	2.08E-03	HT-490	2.21E-03	SHK490M	9.07E-04

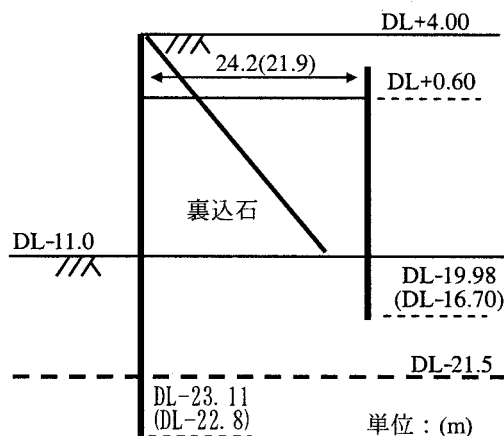


図-1 基本断面

表-3 変更後パラメータ

	地盤case1				地盤case2			
矢板断面2次モーメント変更ケース	yg0	yg1	yg2	yg3	yg0	yg1	yg2	yg3
1 (m ⁴ /m)	2.15E-03	1.71E-03	1.84E-03	3.63E-03	2.08E-03	1.71E-03	1.84E-03	3.63E-03

	地盤case1			地盤case2		
矢板根入れ長さ変更ケース	yy0	yy1	yy2	yy0	yy1	yy2
DL(m)	-23.11	-27	-30.67	-22.8	-27	-30.67

	地盤case1			地盤case2		
控え根入れ長さ変更ケース	hy0	hy1	hy2	hy0	hy1	hy2
DL(m)	-19.98	-23.33	-27	-16.7	-19.75	-23.33

	地盤case1				地盤case2			
矢板控え間距離変更ケース	hx0	hx1	hx2	hx3	hx0	hx1	hx2	hx3
(m)	24.2	29.2	34.2	39.2	21.9	26.67	31.67	36.67

入力地震動は控え直杭式矢板岸壁の基本的な特性を調べるため正弦波を使用し、周波数 0.8Hz、最大振幅 45Gal と 20Gal とした。継続時間は 40 s とし、そのうち主要動は 5 秒に調整し、主要動の前後はコサイン状のテーパーをかけた波形としている。図-2に 45Gal の波形を示す。また、本研究はレベル 1 地震動作用時の控え直杭式矢板岸壁の挙動についての研究であるため、液状化に対する対策は施されているという仮定で議論を進める。

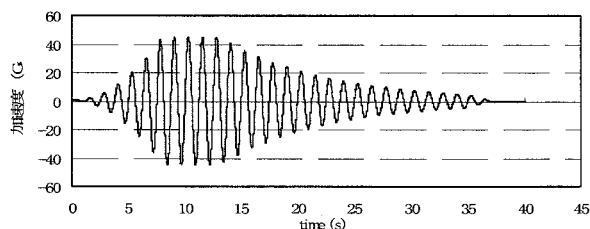
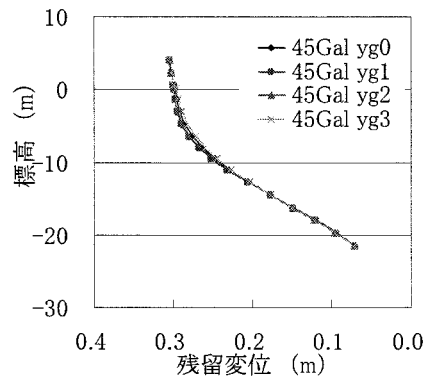


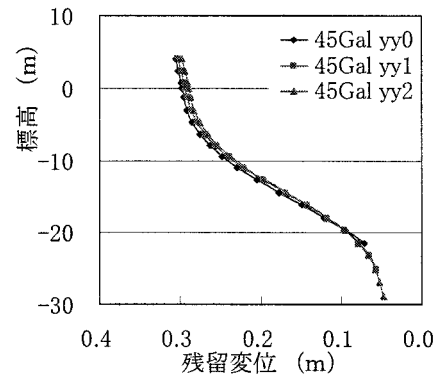
図-2 入力地震波形

3. 検討結果

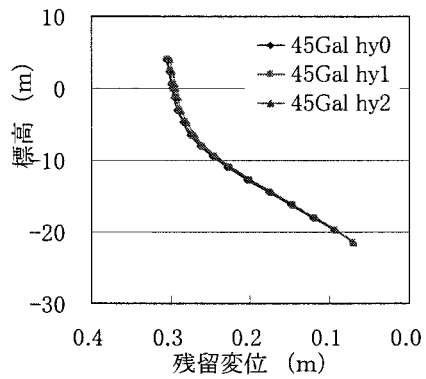
図-3に各検討ケースの入力地震動に対する残留変形量を示す。



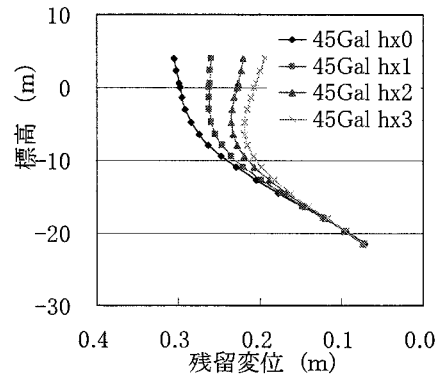
(a) 矢板剛性変更時



(b) 矢板根入れ長変更時

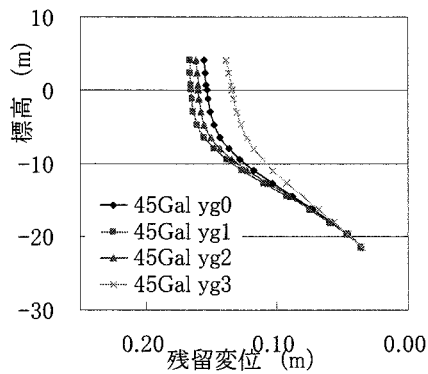


(c) 控え杭根入れ長変更時

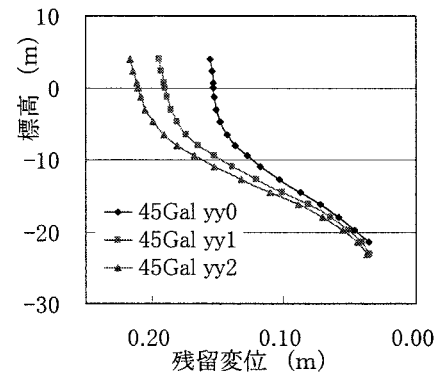


(d) 矢板控え間距離変更時

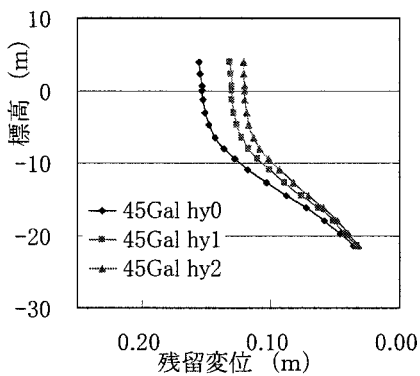
(i) 地盤 case1



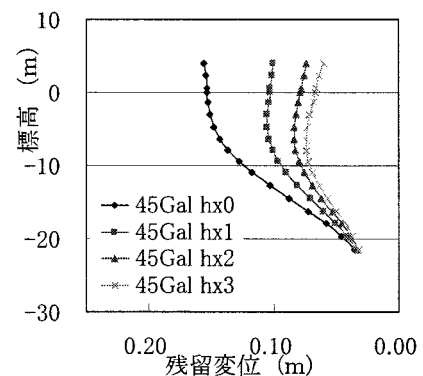
(a) 矢板剛性変更時



(b) 矢板根入れ長変更時



(c) 控え杭根入れ長変更時



(d) 矢板控え間距離変更時

(ii) 地盤 case2

図-3 検討結果

まず、図-3 (ii) 地盤 case2 の(a)より、地盤 case2 については、矢板剛性が大きい程、残留変形量が小さいことが分かる。残留変形量が小さいということは、地震後の地盤剛性の低下が小さいことを示していると考えられる。ただし、yg3 と yg1 では矢板の断面二次モーメントは 2.1 倍の差があるが、残留変形量は 0.84 倍の差しかないことも注意が必要である。

次に地盤 case2 の(b)より、地盤 case2 については、矢板根入れが深い程、残留変形量が大きいことが分かる。これは、矢板根入れが深いほど、地盤変形の影響を矢板が強く受けるためであると考えられる。

逆に、地盤 case2 の(c)では控え杭の根入れが深い程、残留変形量は小さくなっており、根入れ長の変化による変形抑止効果は一様ではない。

しかしながら、図-3 (i) に示す比較的剛性が小さい地盤 case1 (第三種地盤相当) では、矢板剛性、矢板根入れ長、控え杭根入れ長の残留変形量に対する影響はほとんど見られなかった。入力地震動の作用による地盤剛性の低下にあまり差がないことが分かる。地盤剛性が小さい場合、残留変形量は地盤剛性の大きさが支配的になり、矢板剛性、矢板根入れ長、控え杭根入れ長といったパラメータの残留変形量に対する影響は小さいことが分かる。

唯一、地盤 case1, case2 の両方で残留変形量に大きく影響を及ぼしていたのは矢板控え杭間距離であり、矢板控え杭間距離が長い程、残留変形量は小さかった。矢板控え杭間距離が、最も残留変形量に影響を及ぼすパラメータであると考えられる。図-4 は矢板頭部での残留変形量が 20cm になるよう正弦波を振幅調整した時の地盤 case1 での hx0 と hx3 における残留変形量鉛直分布の断面方向への変化を示した図であり、実線は各断面方向位置の残留変形量の鉛直分布、破線は上から矢板設置位置($X=0\text{m}$)における海底面 ($Y=-11\text{m}$) での残留変形量に対する等残留変形量線、矢板設置位置 ($X=0\text{m}$) における矢板下端 ($Y=-23.1\text{m}$) での残留変形量に対する等残留変形量線を示す。この結果から、等残留変形量線の控え杭設置位置における標高は、hx0 でそれぞれ $Y=-1.0\text{m}$, $Y=-10.0\text{m}$ あたりであるのが、hx3 では $Y=4.0\text{m}$, $Y=-5.0\text{m}$ あたりと矢板控え杭間距離が長くなるほど上昇しているのが分かる。つまり、矢板控え杭間距離が長くなる程、同標高での控え杭の残留変形量は減少しており、控え杭周辺地盤の剛性が大きいことが分かる。矢板控え杭間距離を長くすることは、地震後の地盤の剛性の低下の影響が少ない位置に控え杭を設置することを示している。

なお、20Gal 入力時の結果についても検討したが、傾向は同じであった。

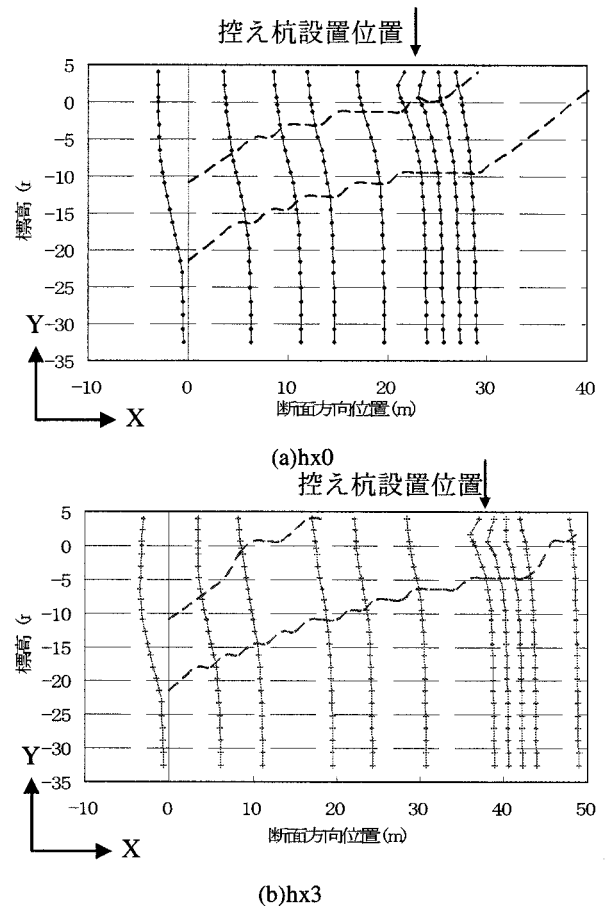


図-4 残留変形量鉛直分布の断面方向変化

4. 矢板控え杭間距離による残留変形量の整理

前章までの検討より、矢板控え杭間距離が最も残留変形量に影響を与えているパラメータであることが分かった。特に地盤剛性が小さい地盤 case1 での検討結果では、他のパラメータ変更時には残留変形量に大きな差が見られず、残留変形量は矢板控え杭間距離の長さによってほぼ決定されている。これは、控え直杭式矢板岸壁は設計震度により矢板剛性、矢板根入れ長、控え杭根入れ長、矢板控え杭間距離が決定されるが、変形性能は矢板控え杭間距離によって主に決定されることを示唆している。

ここでは、矢板控え杭間距離と残留変形量の関係式について検討する。

1 はじめに述べたとおり、照査用震度を用いて標準的設計法により控え直杭式矢板岸壁を設計した場合、レベル 1 地震動に対する許容変形量発生時では、耐力的に余裕があるという報告がある²⁾。そこで、矢板控え杭間距離と残留変形量の関係式により、所要の変形性能を満たす矢板控え杭間距離を決定し、別途、対象地震動の作用を表現できる荷重条件で限

界応力状態を照査し耐力性能を満たす断面を決定すれば、変形性能と耐力性能のバランスの取れた、より経済的な断面となると考えられる。

(1) 使用データ

本研究では、重回帰分析による残留変形量と矢板控え杭間距離の関係式について検討する。

矢板控え杭間距離と残留変形量のデータは、既存の研究⁸⁾で2次元地震応答解析(FLIP)により得られたデータを用いる。この既存の研究で検討された断面は、水深-7.5m,-11.0m,-13m,-16.0mの4ケースに対して、表-4のように水深ごとに設計震度を設定し、技術基準⁹⁾に従い設計されている。地盤条件は、固有周期1.2s程度(Ⅲ種地盤相当),0.8s程度(Ⅱ種地盤相当),0.6s程度(Ⅰ種地盤相当)の3つが設定されている。

表-4 各水深における設計震度

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

既存の研究⁷⁾における検討では、これら各検討ケースに対し、実地震波9ケース(表-5)を振幅調整し、残留変形量が5cm, 10cm, 15cm, 20cmとなる補正地表面加速度 α_c をまとめており、本検討ではこれらのデータを利用する。ここで、 α_c とは地震波の周波数特性や継続時間など、構造物の水平残留変形量に影響のある因子で補正した地震動の最大加速度である。

表-5 実地震波概要

No.	地震波名	卓越周波数 (Hz)	継続時間 (s)
No.1	宮崎波	4.55	80
No.2	美都波	0.37	161
No.3	JR波	1.34	40
No.4	Dip波	0.68	29.1
No.5	八戸波	0.39	19
No.6	神戸波	2.88	20
No.7	大船渡波	2.34	19
No.8	Strike波	1.66	29.1
No.9	Subduction波	0.67	40

残留変形量を、矢板控え杭間距離 X を壁高 H で除して無次元化したパラメータ X/H と α_c で整理したグラフを図-5に示す。ここで直線は、各 X/H における残留変形量の α_c への回帰式である。 X/H が大きくなると、同残留変形量に対応する α_c は大きくなり、残留変形量が X/H に大きく影響されていることが分

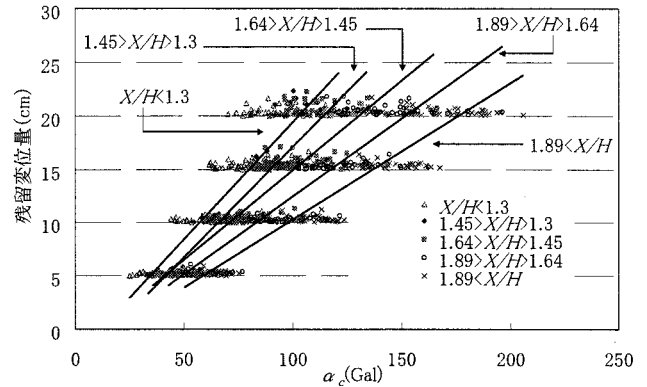


図-5 残留変形量と X/H の関係

かる。

残留変形量を、設計震度と α_c で整理したグラフを図-6に示す。ここで直線は、各設計震度における残留変形量の α_c への回帰式である。図-5と比較することにより X/H が設計震度に対応しているのが分かる。

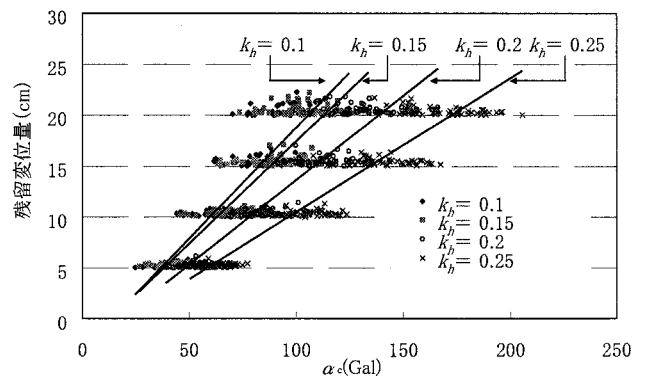


図-6 残留変形量と設計震度の関係

(2) 矢板控え杭間距離と残留変形量の関係式作成

残留変形量のデータを目的変数、 α_c と X/H を説明変数として重回帰分析を行い、 α_c 、 X/H による残留変形量と X/H の関係式を作成した。用いた全データ数は863である。式(1)に本研究で得られた式を示す。図-7に重回帰分析に使用した2次元地震応答解析結果と本関係式による残留変形量を比較したグラフを示す。

$$d_{est} = 0.072 \alpha_c^{1.27} (X/H)^{-1.32} \quad (1)$$

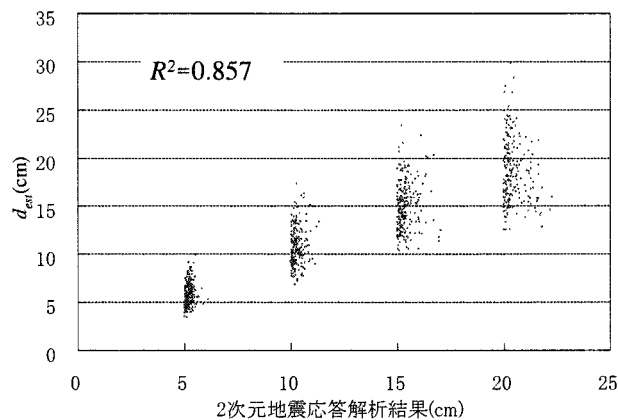


図-7 関係式と2次元地震応答解析の比較

図-7 より $R^2=0.857$ と相関が高いことが伺える。しかし、関係式による算出値は2次元地震応答解析結果に比べ、最大で約9.5cmの差があり注意が必要である。

今後の課題としては、重回帰分析に利用していないデータを用いての本関係式の精度の検証、また、本関係式は砂質土での2次元地震応答解析結果をもとに作成しているため、粘性土地盤への適用性の検討などが挙げられる。

5. まとめ

本研究では、控え直杭式矢板岸壁を構成する矢板剛性、矢板と控え杭の根入長、矢板控え杭間距離といったパラメータの残留変形量への影響を2次元地震応答解析により調べた。本研究で得られた主な知見は以下のとおりである。

- ①矢板控え杭間距離は、控え直杭式矢板岸壁を構成する矢板剛性、矢板と控え杭の根入長、矢板控え杭間距離のうち、最も残留変形量影響があるパラメータである。
- ②矢板控え杭間距離を長くすることは、地震後の地盤の低下が小さい所に控え杭を設置することに対応している。
- ③地盤剛性が小さい場合、残留変形量は地盤剛性による影響が支配的であり、矢板控え杭間距離以外のパラメータにはほとんど影響されない。
- ④このことは、控え直杭式矢板岸壁の変形性能は主

に矢板控え杭間距離によって決定されることを示唆している。耐力性能とは別に矢板控え杭間距離により変形性能を決定すれば、より経済的な設計ができると考えられる。

⑤本研究では重回帰分析により残留変形量と矢板控え杭間距離の関係式を作成した。

謝辞：本研究で引用したデータは防災科学技術研究所の基盤強震観測網(KiK-net)の地震波によるものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007. (印刷中)
- 2) 長尾 毅, 尾崎竜三: 控え直杭式矢板岸壁のレベル1地震動に対する性能規定化に関する研究, 地震工学論文集, CD-ROM, 2005
- 3) 長尾 毅, 岩田直樹: 重力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用震度の設定方法, 構造工学論文集 Vol.53A, 2007
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990
- 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ータの簡易設定法, 港湾技研資料 No.869, 1997.
- 6) 小堤治, 塩崎禎郎, 一井康二, 井合進, 森玄: 二次元有効応力解析法の解析精度向上に関する検討, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.443-448, 2004
- 7) 岡由剛, 三輪滋, 石倉克真, 平岡慎司, 松田英一, 吉田晃: 鋼矢板岸壁の被災事例による有効応力解析における初期応力状態のモデル化手法の検証, 第26回地震工学研究発表会, pp.813-816, 2001
- 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方法, 国土技術政策総合研究所資料, No310, 2006
- 8) 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