

# レベル1地震動に対する重力式および矢板式 岸壁の許容変形量に関する研究

A STUDY ON THE ALLOWABLE DISPLACEMENT FOR GRAVITY TYPE AND SHEET PILE TYPE QUAY WALLS AGAINST THE LEVEL-ONE EARTHQUAKE GROUND MOTION

長尾 毅<sup>1</sup>・藤村公宜<sup>2</sup>・佐藤秀政<sup>3</sup>・森下倫明<sup>2</sup>

Takashi NAGAO, Masaki FUJIMURA, Hidemasa SATO and Noriaki MORISHITA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>非会員 国土技術政策総合研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>3</sup>正会員 復建調査設計 (〒732-0052 広島市東区光町2-10-11)

In order to introduce the performance-based design framework into the design of quay walls, it is necessary to stipulate the allowable displacements of the quay walls as one of the performance requirements. This paper aims at presenting the allowable displacement for gravity type and sheet pile type quay walls against the level-one earthquake ground motion. We conducted series of earthquake response analyses by using the level-one earthquake ground motion obtained by the earthquake hazard analysis and evaluated the displacements of the quay walls for each structural type. We proposed the average displacements as the allowable displacements of the quay walls.

*Key Words: level-one earthquake ground motion, quay wall, allowable deformation*

## 1. はじめに

性能設計体系に整合した港湾構造物に対するレベル1地震動として、次期港湾基準においては、確率論的地震ハザード解析<sup>1~2)</sup>により、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮して工学的基盤における時刻歴波形として与えることが提案されている。従来、レベル1地震動に対する照査は、力の釣合いに基づき、耐力と作用効果の比を安全率として、これが許容値以上となることを確認することにより行われてきた。しかしながら、性能設計体系への移行を考慮すると、構造物の損傷程度を確率論的に評価するか、または作用に対する変状を具体的に照査する手法の採用が求められるといえる。また、矢板式岸壁については、矢板壁の応力度が許容応力度以下であることなどを照査するが、控え直杭式の矢板式岸壁は変形先行型であり、降伏先行型ではないことが指摘されている<sup>3)</sup>。すなわち、岸壁の変形量が供用上の観点からの制限である20-30cmの範囲にあるときは断面力には余裕があることがわかっている。このため、重力式および矢板式岸壁については、具体的に変形量許容値を設定し、レベル1地震動の作用に対して変形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考えられる。

本研究はこのような背景のもと、重力式および矢板式岸壁（控え直杭式および控え組杭式）のレベル1地震動に対する標準的な変形量許容値を検討するものである。

## 2. 検討方法

確率論的地震ハザード解析<sup>1)</sup>により、全国40港湾を対象にレベル1設計地震動を時刻歴波形として作成した。ここで、レベル1地震動は、再現期間75年の信頼度50%となる地震動とし、従来の地域別震度ブロックのうち、A~D地区のそれぞれについて10波形を算出した。ここで、E地区を対象に加えなかった理由は、E地区は地震動レベルが小さいため、永続作用の条件で断面が決定する可能性があり、本研究で目的とする標準的な変形量許容値を算出する観点からは適切ではない可能性があるためである。

重力式および矢板式岸壁（控え直杭式および控え組杭式）について、現行設計法により許容安全率をちょうど満足する断面を求め、地震応答解析コードFLIP<sup>4)</sup>を用いた変形照査を行った。対象とした構造物は地盤・設計震度・水深などを変化させた17ケー

表-1 検討条件

水深	-7.5m	-11.0m	-14.5m
震度			
0.10	○△		
0.15	○△□	○△□	
0.20		○△□	○△□
0.25			○△□

注：○；重力式，△；控え直杭矢板，□；控え組杭矢板

ス(表-1参照)とした。ここで、水深が深いほど岸壁の重要度係数が高く設計震度が高い傾向があること、矢板式岸壁の控え組杭式は設計震度の小さい条件ではあまり用いられていないことを考慮して条件を設定している。

地盤条件は表-2に示す条件とした。case1, case2はそれぞれ、地盤種別係数の第Ⅲ, 第Ⅱ種を念頭に置いて設定したもので、固有周期がそれぞれ1.2, 0.8秒に設定してある。地盤物性のパラメータ設定はFLIPにおける標準的な方法<sup>9)</sup>に従っている。岸壁のモデル断面は図-1に示すとおりである。なお、A地区についてはcase2, B~D地区についてはcase1の地盤条件とした。解析ケース数は680である。表-3に用いたレベル1地震動を示す。加速度最大値は、工学的基盤における2E波としての値である。

地域別ブロック別のレベル1地震動の工学的基盤における加速度最大値は、検討対象とした40波の範囲では、A地区で88~391Gal, B地区109~648Gal, C地区54~367Gal, D地区38~152Galなどと広い範囲にばらついている。

以上の条件によりFLIPを用いて変形量を評価したが、港湾基準<sup>9)</sup>の考えに従って設計震度を算出すると、必ずしも本研究において設定した設計震度と一致しないため、以下の考えで検討結果を内挿している。まず、水深-14.5mを重要度A級、水深-11mを重要度B級と扱う。地盤ケースをcase1で第Ⅲ種地盤、case2を第Ⅱ種地盤とする。以上により地域別震度、地盤種別係数、重要度係数の積により設計震度を求める。例えばA地区の-14.5m

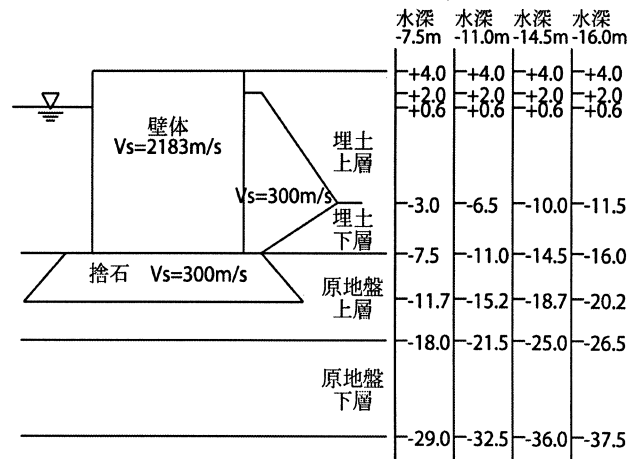


図-1 岸壁断面図

の場合、設計震度は $0.15 \times 1.0 \times 1.5 = 0.225$ であるので設計震度は0.23となる。このため、水深-14.5mの設計震度0.20と0.25の結果を用いて、設計震度0.23相当の変形量を算出する。ただし、矢板式岸壁の控え組杭式については設計震度0.15が最低であるので、0.15以下の設計震度に対する結果を0.15の断面の変形量で代表させてある。

なお変形量については、実際の各港湾における地盤モデルを用いているわけではないので、あくまで仮想的な条件での変形量であることに注意が必要である。

### 3. 検討結果

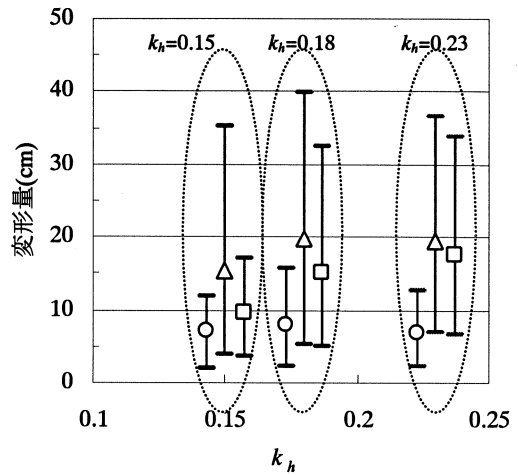
図-2に地域ブロック別の変形量を示す。図-3には構造形式別の変形量の頻度分布を示す。各構造形式について、D地区を除いては変形量にばらつきが大きい。また、従来地域別震度としては全国平均的な値であったC地区についても、細島港波、松山港波については大きな変形量が算出された。変形量が大きい理由としては、当該港湾のサイト特性の影響が大きいと考えられる。図-4には松山港の強震観測地点におけるサイト特性を示す。これは地震基盤から

表-2 地盤条件

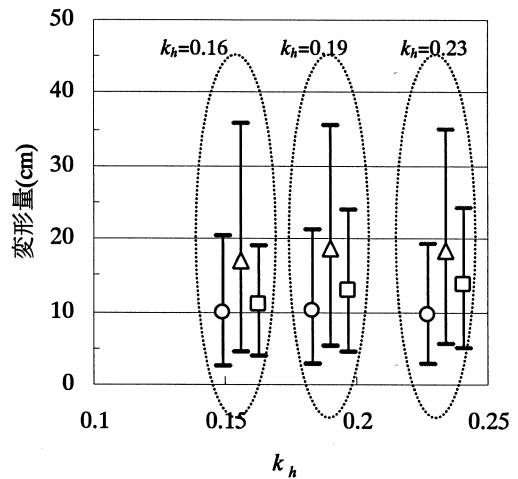
地盤	土層区分	土層区分	湿潤密度 (t/m <sup>3</sup> )	基準有効拘束圧 (kN/m <sup>2</sup> )	基準初期せん断剛性 (kN/m <sup>2</sup> )	基準初期体積剛性 (kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (°)	最大減衰	S波速度 (m/s)
case1	埋土	上層(水面上)	1.8	89.8	25920	67595	0	37	0.24	120
		上層(水面下)	2.0							
case2	埋土	上層(水面上)	1.8	89.8	58320	152089	0	38	0.24	180
		上層(水面下)	2.0							
共通材料	基礎捨石裏込石	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	基礎捨石裏込石	基礎捨石裏込石	2.0	98.0	180000	469412	0	40	0.24	300

表-3 レベル1地震動

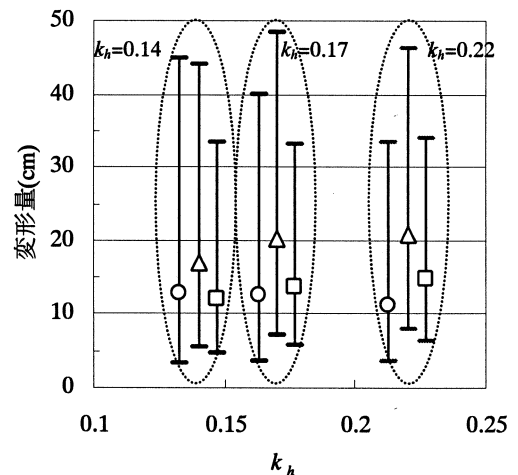
地域 ブロック	港湾名	加速度最大値(Gal)
A	釧路港	172.6
	十勝港	391.0
	木更津港	175.9
	尾鷲港	228.0
	和歌山下津港	284.5
	東京港	106.5
	横須賀港	89.9
	名古屋港	87.9
	清水港	163.9
	大阪港	100.8
B	久慈港	231.0
	小名浜港	389.7
	鹿島港	267.3
	橘港	182.2
	宿毛湾港	293.6
	釜石港	109.3
	大船渡港	133.6
	日立港	284.1
	須崎港	128.2
	徳島小松島港	648.3
C	船川港	193.5
	境港	142.2
	松山港	256.7
	油津港	156.6
	大分港	161.7
	秋田港	73.9
	七尾港	54.0
	新潟港	88.0
	細島港	366.7
	別府港	106.7
D	石狩港	37.5
	岡山港	125.4
	宇野港	152.2
	高松港	123.6
	西之表港	66.5
	小樽港	118.6
	水島港	64.6
	浜田港	59.9
	三隅港	96.8
	坂出港	85.1



(a)A地区



(b)B地区



(c)C地区

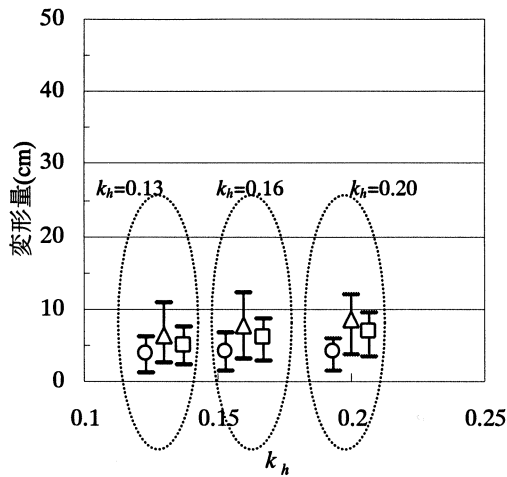
○；重力式，△；控え直杭矢板，□；控え組杭矢板  
 図-2(a) 地域ブロック別変形量

地表面に至るサイト特性であるが、図より分かるように1Hzに非常に鋭いピークを有する増幅特性となっている。このため、松山港強震観測地点のレベル1地震動は岸壁の変形に大きな影響を及ぼす1Hzの成分が卓越する波形となっている。加速度最大値が大きいのも基本的にはこの理由によるものである。

また、これとは逆に、A地区でも変形量の小さい波形があり、例えば十勝港波は加速度最大値が大きいものの変形量は比較的小さい。これも十勝港におけるサイト特性の影響であり、図-4に示すように、岸壁の変形に大きな影響を及ぼす2Hz以下の増幅率が低いために岸壁の変形量は小さい。B地区の徳島小松島港についても、3.6Hzが卓越しているものの岸壁の変形に影響の強い成分の増幅率は大きくなく、このため変形量はB地区の中で中位となっている。このように岸壁の変形量は地震動の周波数特性との相関が強く、このため図-5に示すように加速度最大値は必ずしも変形量との相関は高くない。

この他、変形量と設計震度の相関は低いことも特徴である。上述のように従来、設計震度には重要度

係数が考慮され、水深が深いほど大きな重要度係数を用いて設計震度が高く設定される傾向があった。しかしながら、水深が深いほど岸壁は地震時に変形



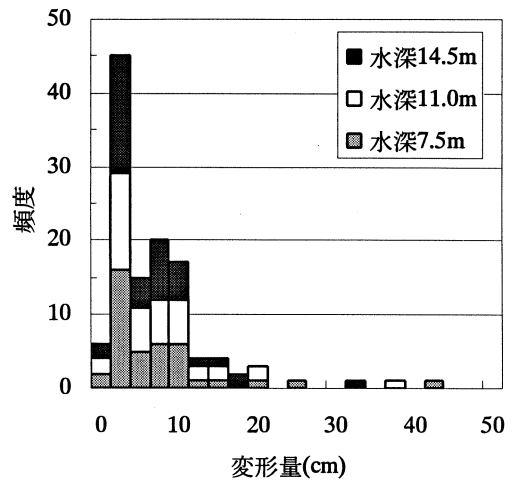
(d)D地区

○；重力式, △；控え直杭矢板, □；控え組杭矢板  
 図-2(b) 地域ブロック別変形量

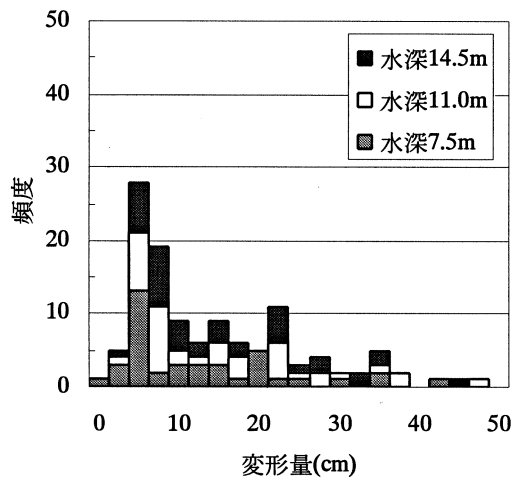
しやすい。このことが、変形量と設計震度（岸壁の重要度）の相関が低い理由であると考えられる。なお、地震動の周波数特性に対する構造形式別の耐変形性能には大差はなく、どの構造形式も1Hz以下の周波数が卓越する地震波形に対しては変形しやすい。

ここで、控え組杭式の矢板岸壁の変形量と断面力余裕度について整理すると図-6に示すとおりである。鉛直軸は断面力を降伏値で除して正規化している。変形量が15cm以下の範囲では概ね断面力には余裕がある。控え直杭式の場合<sup>3)</sup>と同様に、この傾向は水深が深いほど顕著である。控え組杭式矢板岸壁は水深の深い場合に用いられることが多いことから、控え組杭式矢板岸壁も控え直杭式と同様に、変形量が20cm程度以下の場合降伏先行型ではなく、基本的に変形先行型であると考えられる。

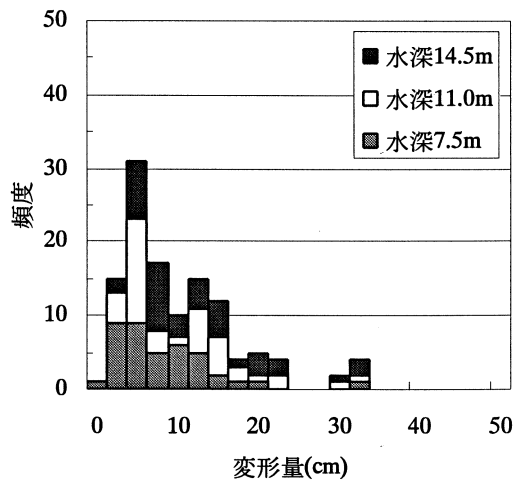
このように変形量にばらつきが大きいですが、本研究では性能照査における標準的な許容変形量を検討することが目的であるので、変形量の平均値について検討する。表-4に構造形式別の変形量平均値を示す。レベル1地震動に対する変形量の平均値は、概ね重力式岸壁で10cm、矢板式岸壁で15cm程度であり、矢板式岸壁の方が変形量大きい結果となった。図-7には構造形式別の変形量の比較を示した。これは、同じ設計震度で断面を設計しても、変形性能としては構造形式によって差がある事を意味する。ただし、重力式岸壁は2次元有限要素解析におけるモデル化の問題は少ないと考えられるのに対して、矢板式岸壁は控え工の杭材を単位奥行きあたりの剛性の等価な矢板に置き換えて解析しており、モデル化の問題がある。また、現在FLIPでは、地盤と杭の3次元的な効果を考慮した地盤バネを考慮できるようになっているが、本研究のような変形の小さい範囲での適用性については不明な点が多い。このため本研究では控え工と地盤は多重接点として地盤と同じ変形を与えている。このような矢板式岸壁の2次元



(a)重力式



(b)控え直杭矢板



(c)控え組杭矢板

図-3 変形量頻度分布

有限要素解析におけるモデル化の問題が、重力式と矢板式岸壁の変形量平均値の差に影響を及ぼしている可能性も否定できない。従って、本研究で対象とした変形量の範囲において、重力式岸壁と矢板式岸

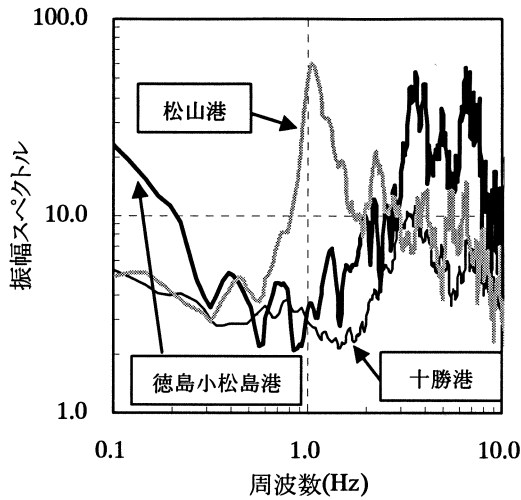


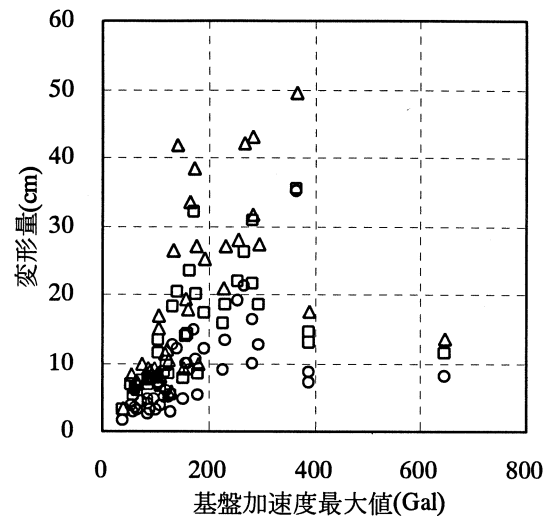
図-4 サイト特性

壁の耐変形性能の差については慎重な判断が必要と考えられる。ただしこれは、一つの構造形式における各々の地震波形に対する変形量の値や差に精度が認められないことを意味しているのではない。

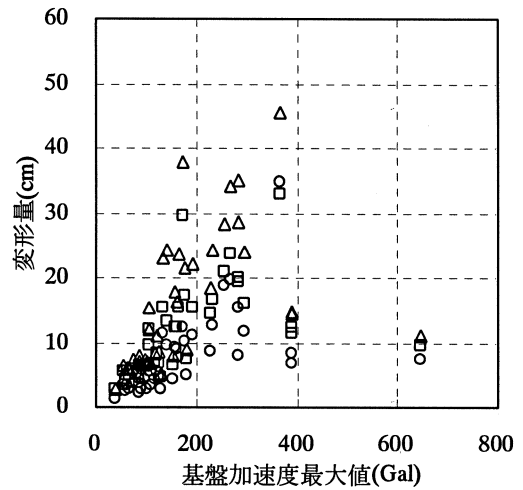
岸壁の実際の供用上の変形量限界値は概ね20～30cm程度と考えられることから、重力式岸壁10cm、矢板式岸壁15cmという平均的な変形量は、いずれも基本的に地震動が作用した後も岸壁を引き続き供用するためには十分に小さな値であると考えられる。ここで、上記平均変形量は地震応答解析によるものであり、20～30cmという数値は実際の変形量であるため、地震応答解析の誤差を考慮する必要があると考えられることに注意が必要である。特に、ここでは小さな変形量の議論を行っているため、地震応答解析の誤差は無視できないといえる。例えば北海道開発局が実施した釧路港試験岸壁の変形再現解析<sup>7)</sup>においては、実測最大変形量20cmに対してFLIPによる解析では20%程度の変形量の差が認められている。構造物の設計においては必ず安全性の余裕の考慮が求められる。このため実際の制限値をそのまま設計上の許容値とすることは、一般的には適切ではないと考えられる。このため、本研究では上記の平均値をそのまま標準的な許容値とすることを提案する。なお、矢板控え組杭式岸壁の水深-7.5mの結果はやや変形が小さいが、水深-7.5mで組杭の例は少ないことから問題はないと判断される。

平均値を許容値と設定することにより、全国平均的には従来と同程度の建設コストで岸壁の建設が行えることとなる。許容値よりも大きな変形量が見込まれる港湾については、従来よりも大きな設計震度を採用する以外に、地盤改良を行うか、栈橋など他の構造形式を検討するか、あるいはその幾つかの組合せにより対処する方法も考えられる。

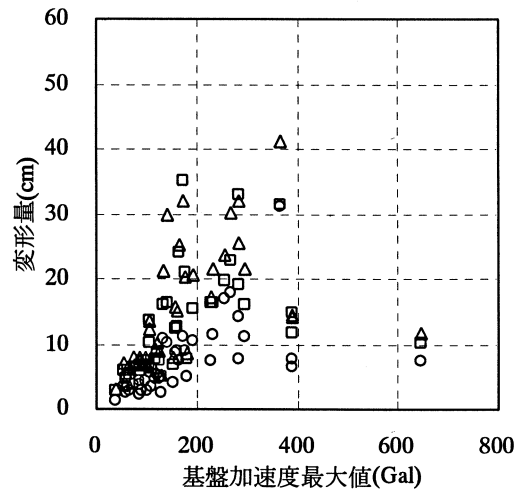
なおこの許容値は、あくまで標準値として提案しているものであり、個々の港湾における固有の条件に応じて変化させることも可能であると考えられる。



(a)水深-7.5m,  $k_h=0.15$



(b)水深-11.0m,  $k_h=0.20$



(c)水深-14.5m,  $k_h=0.25$

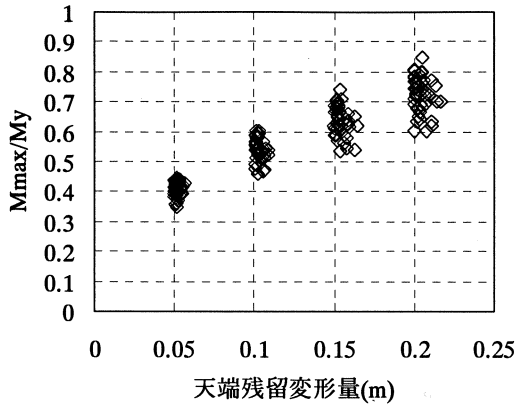
○; 重力式, △; 控え直杭矢板, □; 控え組杭矢板

図-5 入力加速度最大値と変形量の関係

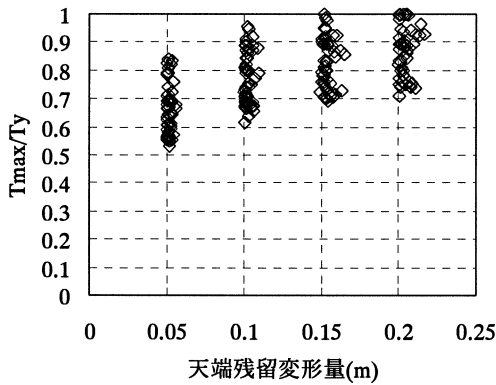
#### 4. まとめ

本研究では、岸壁の耐震性能設計体系の構築に資する観点から、レベル1地震動に対する重力式および矢板式（控え直杭式および控え組杭式）岸壁の標準的な変形量許容値について検討した。本研究による主要な結論は以下のとおりである。

- ①工学的基盤におけるレベル1地震動の加速度最大値は、同一ブロック内でも広い範囲にばらつき、従来想定していた最大値との違いが大きい。また、C地区の細島港波、松山港波のように、従来地域別震度としては全国平均程度のレベルと見なされていた港湾の地震動に対して、非常に大きな変形量が得られた場合があった。逆に、A地区の十勝港波のように、変形量が小さいケースもあった。これは当該港湾のサイト特性の影響が強いものと考えられる。
- ②従来、設計震度においては重要度係数が考慮され、重要度の高い岸壁ほど大きな設計震度が採用されてきた。岸壁の重要度はこれまで水深に応じて定められてきた傾向が強いが、水深が深いほど岸壁は地震時に変形しやすい。このため、変形量は岸壁の重要度と相関が低いことがわかった。
- ③レベル1地震動に対する変形量の平均値は、重力式岸壁で10cm、矢板式岸壁で15cm程度である。構造形式別の変形量の差は、杭材を含む構造と含まない構造による地震応答解析精度の差の影響も考えられる。地震応答解析の誤差や安全性の余裕に配慮し、上記の値をそのまま標準的な許容値とすることを提案する。これら変形量は、基本的に地震動が作用した後も岸壁を引き続き供用するためには十分に小さな値であると考えられる。



(a)矢板壁



(b)タイロッド

図-6 控え組杭式矢板岸壁の断面力余裕度

表-4 構造形式別平均変形量（単位：cm）

水深	重力式	矢板控え直杭式	矢板控え組杭式
-7.5m	8.4	13.9	9.4
-11.0m	8.8	16.6	11.9
-14.5m	7.9	16.8	13.3

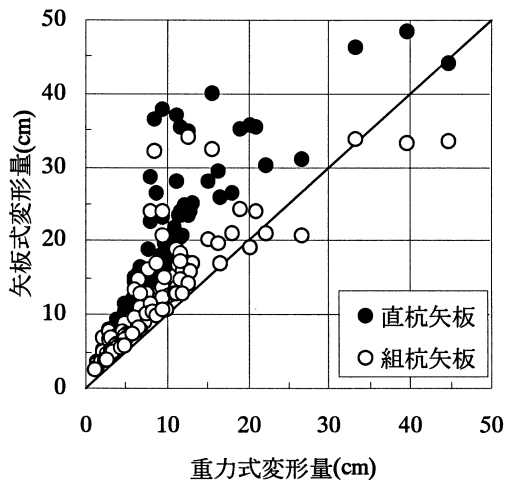


図-7 構造形式別の変形量の比較

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: レベル1設計入力地震動の評価と岸壁の照査例, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.767-772, 2005
- 3) 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
- 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タの簡易設定法, 港湾技研資料No.869, 1997
- 6) 運輸省港湾局監修, 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999
- 7) 笹島隆彦, 窪内 篤, 大塚夏彦, 森政信吾, 三浦均也: 2003十勝沖地震における釧路港試験重力式岸壁の2次元FEM 解析, 第39回地盤工学研究発表会, CD-ROM, 2004