

# 自立式矢板式岸壁の耐震性能に関する 基礎的研究

## A STUDY ON THE EARTHQUAKE RESISTANT PERFORMANCE OF CANTILEVER SHEET PILE QUAY WALLS

長尾 毅<sup>1</sup>・藤森修吾<sup>2</sup>

Takashi NAGAO and Shugo FUJIMORI

<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>日本工営株式会社 (〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4)

The new design method of quay walls against the Level-one earthquake ground motion is going to be introduced to the technical standard so as to take the frequency characteristic and the effect of duration time of earthquake ground motion into consideration. As for the sheet pile quay walls, the new design method, however, is proposed only for those with anchorage system. We conducted two-dimensional earthquake response analyses and discussed the earthquake resistant performance of cantilever sheet pile quay walls. It was made clear that residual deformation of cantilever sheet pile quay walls is strongly affected by the bending modulus of the sheet pile.

**Key Words:** cantilever sheet pile quay wall, earthquake resistant design, deformation

### 1. はじめに

岸壁の耐震設計を震度法で行う場合、レベル1地震動に対しては地域別震度・地盤種別係数・重要度係数という3種類の係数の積で、レベル2地震動に対しては重要度係数を1.5とした3種類の係数の積もしくは地震応答解析により地表面加速度最大値をもとに震度を評価してきた<sup>1)</sup>。しかしながら、近年の地震工学の進展を踏まえて、2007年度より施行される港湾基準においては、入力地震動は震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を考慮した時刻歴の波形<sup>2)3)</sup>として表現することとなった。また、岸壁の照査用震度は地震動の周波数特性・継続時間等の影響を考慮して設定することが標準的な方法となった。矢板式岸壁を例にとると、この方法は控え工を有する矢板式岸壁については提案されている<sup>4)</sup>が、自立矢板式岸壁については未検討である。控え工を有する矢板式岸壁に対する照査用震度算出方法は、矢板式岸壁のレベル1地震動に対する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<sup>5)</sup>などを踏まえて構築されている。しかしながら、控え工を有する矢板式岸壁と自立矢板式岸壁では地震動に対する抵抗メカニズムが異なることが予想され、控え工を有する構造物に対して構築された照査用震度算出方法をそのまま適用してよいかどうかについては慎重な判断が必要と考えられる。

本研究では、自立矢板式岸壁の照査用震度設定方

法を確立するための端緒として、2次元の地震応答解析を実施し、設計震度の変化等に伴う自立矢板式岸壁の耐震性能(残留変形、断面力)に関する検討を行うとともに、別途検討している控え直杭式矢板岸壁<sup>6)</sup>との比較などを行った。

検討は実地震波として八戸波を用いた検討の他、照査用震度の設定方法確立に向けた基礎的検討として、正弦波を用いて残留変形量を一定値とする検討を行い、地震動の周波数特性が変形に及ぼす影響について検討した。

なお、自立矢板式岸壁は水深の浅い条件で用いられることがほとんどであるため壁高さが低く、このために大水深の岸壁と比較すると過去の地震による被災事例は少ない。被災事例については文献7),8)が参考となるが、主な被災形態は法線のはらみ出し、エプロンの沈下やクラックである。例えば、兵庫県南部地震における林崎漁港においては、水深-2.0mの東物揚場において0.4mのはらみ出しが生じている<sup>8)</sup>。

### 2. 検討方法

地盤条件や壁高の影響を考慮する観点から、水深2ケース、地盤条件3ケース、設計震度3ケースの条件で、現行設計法により自立矢板式岸壁の断面を設定した。図-1に断面図、表-1に地盤条件、表-2に矢板の断面諸元を示す。矢板の使用材料として、鋼矢

板はSY295，鋼管矢板はSKY400をそれぞれ用いることとしている．また，地盤の固有周期は，地盤case1で0.7～0.8秒，case2で0.5秒程度，case3で0.3～0.4秒である．ここで，水深については，自立矢板式岸壁が水深の浅い条件で専ら用いられることを考慮して設定している．なお，現行設計法では，矢板壁の応力度の照査のみならず，変形の照査も実施する場合がある．しかしながら，この変形の照査における変形量は地震応答解析により得られる変形量とは整合しないものである可能性が高いため，本研究では応力度の照査のみによる条件で断面諸元を決定している．

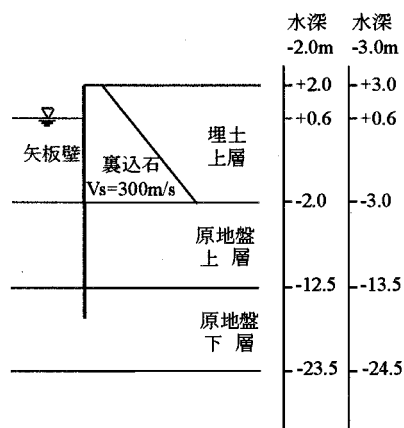


図-1 検討対象断面

表-1 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) | N値   |
|-------|------|---------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------|------|------------|------|
| case1 | 埋土   | 上層(水面上) | 1.8                      | 89.8                         | 25920                          | 67595                         | 0                        | 37        | 0.24 | 120        | 3    |
|       | 原地盤  | 上層(水面上) | 2.0                      | 239.8                        | 45000                          | 117353                        | 0                        | 38        | 0.24 | 150        | 6    |
| case2 | 埋土   | 上層(水面上) | 1.8                      | 89.8                         | 58320                          | 152089                        | 0                        | 38        | 0.24 | 180        | 10   |
|       | 原地盤  | 上層(水面上) | 2.0                      | 198.5                        | 72200                          | 188286                        | 0                        | 38        | 0.24 | 190        | 12   |
| case3 | 埋土   | 上層(水面上) | 1.8                      | 72.9                         | 79380                          | 207011                        | 0                        | 38        | 0.24 | 210        | 15   |
|       | 原地盤  | 上層(水面上) | 2.0                      | 198.5                        | 156800                         | 408910                        | 0                        | 39        | 0.24 | 280        | 39   |
| 共通材料  | 裏込石  | 裏込石     | 2.0                      | 98.0                         | 180000                         | 469412                        | 0                        | 40        | 0.24 | 300        | 50以上 |

表-2 矢板諸元

| 水深    | 地表面標高 | 地盤ケース | 設計震度 | 矢板規格      |         |             |
|-------|-------|-------|------|-----------|---------|-------------|
|       |       |       |      | 型式        | 矢板長 (m) | 矢板天端 標高 (m) |
| -2.0m | 2.0m  | 1     | 0.10 | 鋼矢板Ⅲw     | 13.5    | 1.0         |
|       |       |       | 0.15 | 鋼矢板Ⅳw     | 14.0    | 1.0         |
|       |       |       | 0.20 | 鋼矢板Ⅳw     | 15.0    | 1.0         |
|       |       | 2     | 0.10 | 鋼矢板Ⅲw     | 11.5    | 1.0         |
|       |       |       | 0.15 | 鋼矢板Ⅲw     | 12.0    | 1.0         |
|       |       |       | 0.20 | 鋼矢板Ⅳw     | 13.0    | 1.0         |
|       |       | 3     | 0.10 | 鋼矢板Ⅲw     | 10.0    | 1.0         |
|       |       |       | 0.15 | 鋼矢板Ⅲw     | 10.0    | 1.0         |
|       |       |       | 0.20 | 鋼矢板Ⅲw     | 11.0    | 1.0         |
| -3.0m | 3.0m  | 1     | 0.10 | φ800*t12  | 20.5    | 2.0         |
|       |       |       | 0.15 | φ800*t13  | 21.5    | 2.0         |
|       |       |       | 0.20 | φ1000*t14 | 24.0    | 2.0         |
|       |       | 2     | 0.10 | φ800*t12  | 19.0    | 2.0         |
|       |       |       | 0.15 | φ900*t11  | 19.5    | 2.0         |
|       |       |       | 0.20 | φ1000*t12 | 21.0    | 2.0         |
|       |       | 3     | 0.10 | φ900*t10  | 16.0    | 2.0         |
|       |       |       | 0.15 | φ900*t10  | 16.5    | 2.0         |
|       |       |       | 0.20 | φ900*t10  | 17.0    | 2.0         |

各断面について，2次元の地震応答解析を実施した．用いたコードはFLIP<sup>9)</sup>とした．FLIPにおける控え工を有する矢板式岸壁の解析においては，自重解析を3段階で実施することが標準となっている．このため，本研究では，自立矢板式岸壁の解析方法として，控え工を有する矢板式岸壁と同様に自重解析を多段階で実施することとした．ただし，控え工がないことを考慮して図-2に示すように自重解析2段階+動的解析とした．また，地盤と矢板壁の接触条件は図に示したとおりとしている．

検討に用いた地震波は，港湾の代表的な波形として，1968年十勝沖地震において観測された八戸波を用いて，最大加速度を200，350Galに振幅調整して，各条件の残留変形量，断面力などを検討した．なおここでは，研究の端緒として，水深や設計震度等の変化に伴う耐震性能の変化について相対的な傾向を探るために1種類の波形のみを用いている．また，自立矢板式岸壁は主に通常岸壁に用いられると考えられ，このためレベル2地震動に対する性能は要求されないこと，またレベル1地震動に対しては液状化を発生させないことが標準であるため，液状化しない地盤条件が前提のもと，液状化については検討対象外としている．

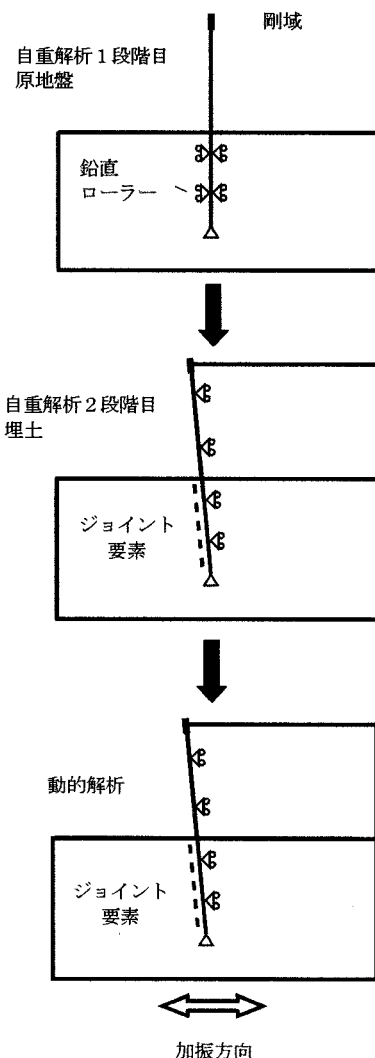


図-2 解析の手順

### 3. 検討結果

まず残留変形量について議論する。図-3に残留変形量を示す。まず、大局的な傾向として、設計震度が増加するほど、地盤条件が良好であるほど、残留変形量は減少することがわかる。

しかしながら、水深-2m、設計震度0.15の350Gal入力の場合、軟弱な地盤case1の残留変形量はcase1よりも地盤条件の良いcase2の残留変形量よりも少ない。ここで、case1とcase2の条件を比較すると、case2の方が地盤が良好であるために現行設計法で必要とされる矢板の剛性が低いことが特徴である。case1とcase2の差は剛性だけではなく、矢板根入れ長もcase1の方が長い。ただし、同じ水深-2mでの地盤case1の設計震度0.15と0.20、地盤case2の設計震度0.10と0.15、および地盤case3の設計震度0.20とそれ以外のように、矢板の剛性が等しく根入れ長のみ異なる場合には、残留変形量の差はわずかである。従って、設計震度0.15の地盤case1とcase2の残留変形量の差は、主に矢板の剛性の差により生じていると考えられる。これは、別途検討している控え直杭式の矢板岸壁<sup>6)</sup>と大きく異なる特徴である。即ち、控え直杭式の矢板岸壁においては岸壁の残留変形量は控え工の位置する地盤の変形量に依存するが、自立矢板式岸壁は控え工を有さないために、矢板壁直背後の地盤の変形の影響を強く受け、このために残留

変形量は矢板の剛性の影響を強く受けると考えられる。

このため、自立矢板式岸壁の変形の抑制のためには、矢板の曲げ剛性を高めることが効果的である。またこのことにより、設計震度が同一であっても、自立矢板式岸壁の耐震性能には顕著な差がある場合がある。即ち、地盤条件が良好な場合に、軟弱地盤の場合と比較して矢板の曲げ剛性を低くできる場合があるが、曲げ剛性を低くすると変形に対して不利となる場合がある。このため、自立矢板式岸壁の照査用震度の設定においては、そのような傾向を表現できる方法を構築する必要があるといえる。

次に断面力について検討する。図-4に矢板壁の断面力を示す。同じ水深および地盤条件では、設計震度の増加に従って断面力が増加する傾向があることがわかる。特に、地盤case2の設計震度0.15から0.20への変化のように、残留変形量が大きく減少する場合に断面力が大きく増加している。これは、矢板の剛性を高めることで変形を抑制したために、矢板に生じる断面力が増加していることを示すものである。岸壁の供用性を考えた場合、船舶接岸の観点から残留変形量が許容値よりも小さいことと、構造安定性の観点から断面力が許容値よりも小さいことが求められる。図-5に、残留変形量と断面力余裕度の関係を示す。図より、自立矢板式岸壁は、供用上の観点からの制限値である20~30cm変形時には断面力には

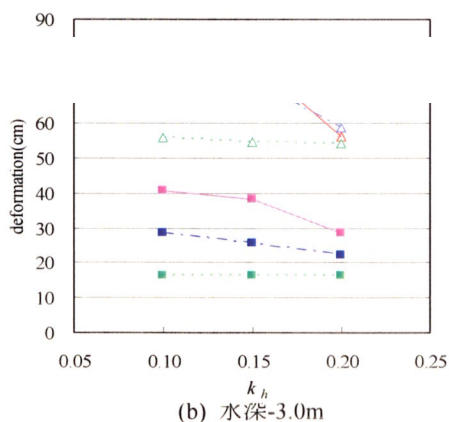
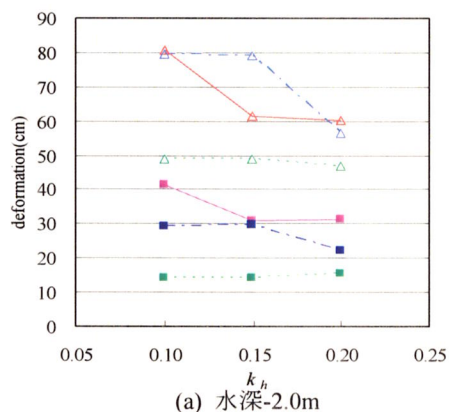


図-3 残留変形量

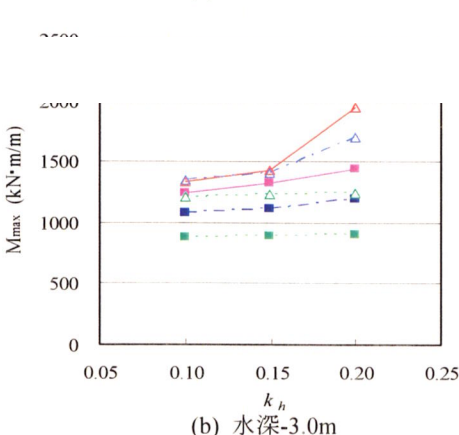
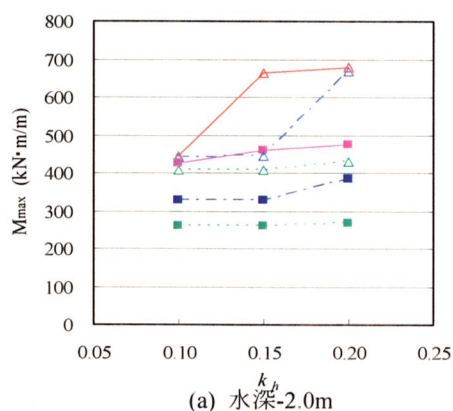


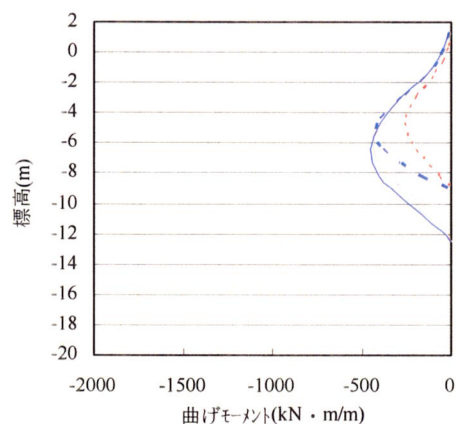
図-4 断面力

| deformation(cm) | Mmax/My |
|-----------------|---------|
| 15              | 0.62    |
| 18              | 0.63    |
| 22              | 0.56    |
| 30              | 0.70    |
| 31              | 0.78    |
| 32              | 0.72    |
| 42              | 1.00    |
| 48              | 1.02    |
| 50              | 0.95    |
| 58              | 0.98    |
| 60              | 1.00    |
| 62              | 0.98    |
| 80              | 1.05    |
| 81              | 1.04    |

| deformation(cm) | Mmax/My |
|-----------------|---------|
| 18              | 0.78    |
| 22              | 0.75    |
| 25              | 0.78    |
| 28              | 0.88    |
| 30              | 0.90    |
| 38              | 1.00    |
| 42              | 1.02    |
| 55              | 1.05    |
| 58              | 1.02    |
| 60              | 1.08    |
| 62              | 1.05    |
| 75              | 1.12    |
| 78              | 1.10    |
| 82              | 1.12    |
| 85              | 1.10    |

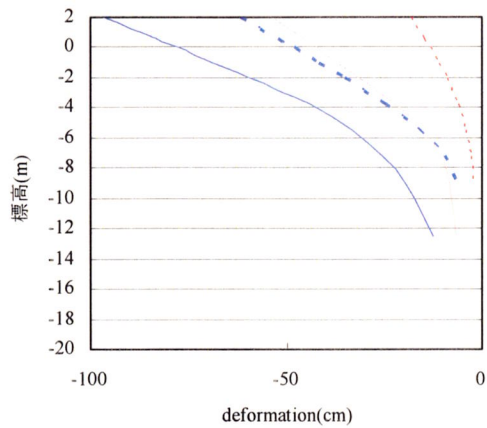
図-5 残留変形量と断面力余裕度の関係

40t、水深2mの湧き上げポンプ性で、水深5mでは7~12m程度で発生している。地盤が軟弱であるほど最大曲げモーメント発生地点は深くなるが、これは地盤が軟弱であるほど、矢板に対する地盤の横抵抗が低くなることや、応力上、矢板剛性を高める必要があることに影響して矢板の根入れ長が長く必要となることに対応している。残留変形量の深度分布は、最大曲げモーメント発生位置よりも深い場所では変形量が少なく、浅い地点で急激に残留変形量が増加していることが分かる。

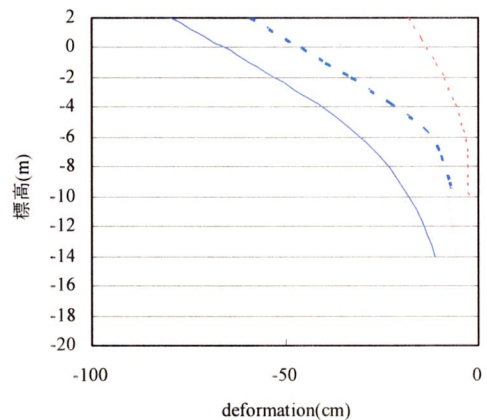


case1\_200Gal      case1\_350Gal  
- - - - - case3\_200Gal      - - - - - case3\_350Gal

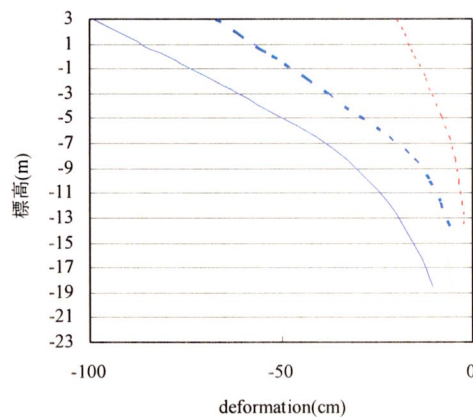
- 814 -



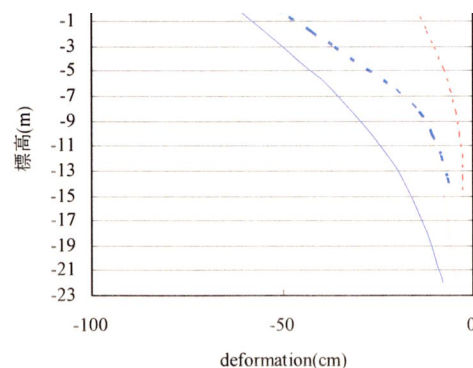
(a) 水深-2.0m,  $k_h$ 0.10



(b) 水深-2.0m,  $k_h$ 0.20



(c) 水深-3.0m,  $k_h$ 0.10



(d) 水深-3.0m,  $k_h$ 0.20

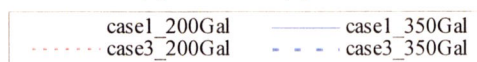
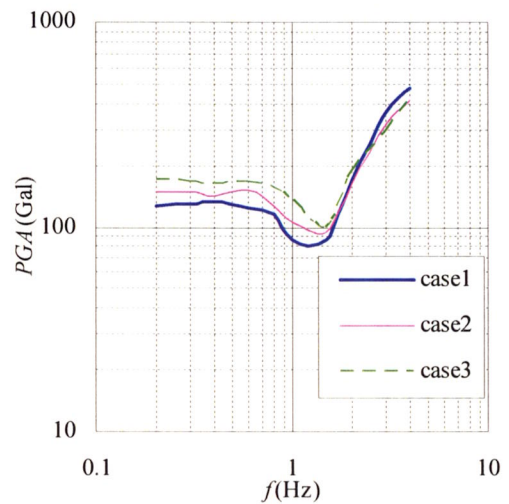


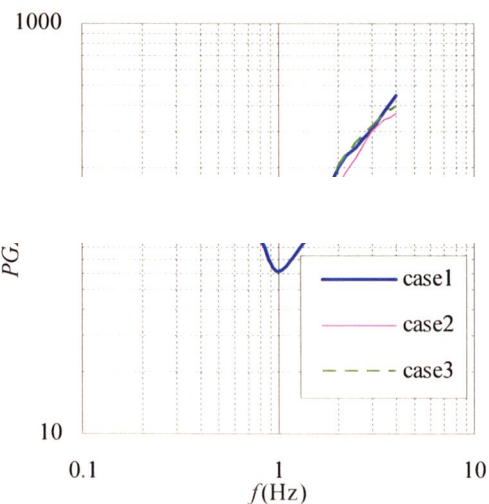
図-7 残留変形量の深度分布

#### 4. 自立矢板式岸壁の照査用震度算定方法確立のための基礎的検討

自立矢板式岸壁の照査用震度算定方法を確立するための基礎的検討として、既往の研究<sup>4)</sup>と同様に、正弦波を用いて残留変形量が同じ20cmとなる条件を探索した。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、設計震度0.10の断面を対象に3種類の地盤条件について検討した。図-8に、周波数別の地表面応答加速度最大値を示す。例えば、水深-2m, 地盤case1においては、0.8Hz程度以下では120Gal程度の応答加速度により残留変形量が20cmとなるが、3Hzでは370Gal程度で20cmの残留変形量が生じる。このように、概ね1Hz以下では応答が同じ条件では同程度の残留変形量が生じ、1Hzを越えると急激に同程度の残留変形量を生じさ



(a) 水深-2.0m



(b) 水深-3.0m

図-8 正弦波による等変形量解析結果

せる加速度最大値が大きくなるという傾向は、控え工を有する矢板式岸壁と同じ傾向であるといえる。しかしながら、例えば地盤case3の結果を見ると、水深-2m（壁高4m）の結果と水深-3m（壁高6m）の条件で大きな差が見られない。これは、3. で検討したように、矢板の剛性が異なることが原因と考えられ、壁高さの違いによる耐震性能の違いと、矢板剛性の違いによる耐震性能の違いがほぼ相殺された形となっていると考えられる。

控え工を有する矢板式岸壁の耐震性能照査用震度は、壁高さ、地盤固有周期を引数とする関数形を持つフィルターをもとに算出される<sup>4)</sup>。しかしながら、自立矢板式岸壁に対しては、照査用震度の算出方法の確立のためには矢板の剛性の評価方法について慎重な検討が必要と考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、自立矢板式岸壁の耐震性能照査法確立に向けた基礎的な検討を行った。本研究の主要な結論は以下のとおりである。

①自立矢板式岸壁は、供用上の観点からの制限値である20～30cm変形時には断面力には余裕があり、検討範囲では30cm変形時に部材に降伏は生じていない。すなわち、自立矢板式岸壁の破壊は変形先行型であり、降伏先行型ではない。これは、控え工を有する他の矢板式岸壁と同様の傾向である。

②自立矢板式岸壁の変形は、矢板の曲げ剛性に大きく依存する。これは、控え工を有する矢板式岸壁とは異なる傾向である。このため、自立矢板式岸壁の変形の抑制のためには、矢板の曲げ剛性を高めることが効果的である。またこのことにより、設計震度が同一であっても、自立矢板式岸壁の耐震性能には

顕著な差がある場合がある。即ち、地盤条件が良好な場合に、軟弱地盤の場合と比較して矢板の曲げ剛性を低くできる場合があるが、曲げ剛性を低くすると変形に対して不利となる場合がある。このため、自立矢板式岸壁の照査用震度の設定においては、そのような点に配慮した方法を構築する必要がある。

## 参考文献

- 1) 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
- 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) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 宮下健一郎，長尾 毅：控え直杭式矢板岸壁の変形量に寄与するパラメータに関する研究，海洋開発論文集，第23巻，2007，投稿中
- 7) 上部達生：地震被災事例に基づく重力式および矢板式係船岸の被災変形量と被災額の推定，港湾技研資料，No.473，1983
- 8) 稲富隆昌他：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技研資料，No.857，1997
- 9) 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