

## 神戸港の各種岸壁の被災変状分析

運輸省港湾技術研究所 上部達生\*  
 運輸省港湾技術研究所 篠澤 巧\*  
 運輸省第三港湾建設局 松永康男\*\*

神戸港で被災した各種岸壁の被災変状の特徴と、その被災の主要な要因を検討した。東西の法線方向の各種岸壁の被災変形量は、南北方向の法線方向の岸壁のそれより大きな値を示しており、これは地震動の卓越方向と整合していた。ケーソン式大型岸壁の被災変形量と岸壁の基礎の置換砂の層厚とは明瞭な相関関係が認められた。また、被災変形量を置換砂の層厚で除した値は、危険度（作用震度と破壊震度との比）と相関関係が認められた。ケーソン式大型岸壁ではケーソンが海側に傾斜していたが、重力式小型岸壁、鋼板セル式岸壁では陸側に傾斜しているものも認められた。重力式岸壁と栈橋の比較結果では、各被災変形量とも栈橋の方が小さい値を示していた。ただし、栈橋では座屈した杭があった事等に留意する必要がある。矢板式岸壁の天端沈下量は重力式岸壁のそれより小さい傾向が認められた。

### 1. はじめに

平成7年1月17日早朝に発生した兵庫県南部地震により、港湾施設では、神戸港を中心に24港で被害が発生した。特に、神戸港の被害は大きく、耐震強化岸壁（摩耶埠頭地区の3岸壁）を除く大半の施設が大きな被害を受け<sup>1, 2)</sup>、我が国のみならず、アジアの経済活動に深刻な影響を与えた。その被害額（災害復旧費）は、国・神戸市・神戸港埠頭公社を併せ約5500億円に及んだ。ここではこうした港湾施設の被災変状にどのような特徴があり、その被災の主要な要因が何であるのかを検討するための各種岸壁等の被災変状の分析結果を報告する。

### 2. 対象とした岸壁等

神戸港で被災した岸壁等の196施設の構造形式別の施設数を図-1に示す。図には二種類の構造形式の施設をそれぞれ1施設として数えているため、合計施設数は196より多くなっている。図に示すように重力式の構造の岸壁が圧倒的に多くなっており、さらに重力式でもコンクリートケーソンを用いた構造が約65%を占めている。こうした状況から、ケー

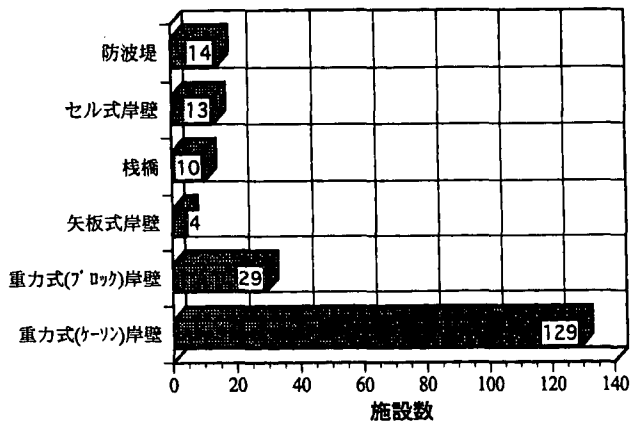


図-1 構造形式別の施設数

ソン式の大型岸壁について、重点的に被災変状分析を実施し、既に報告している<sup>3)</sup>。この報告以後、被災変形量のデータが見直しされているので、本報告では、まず、ケーソン式大型岸壁の被災変状の再分析結果を示し、続いて、ケーソン式大型岸壁との比較に重点を置いた各種岸壁の被災変状の分析結果を示す。

### 3. 岸壁の被災変状

図-2に示すように岸壁の被災変形量としては、岸壁法線の変位量（はらみ出し量）、天端沈下量、岸壁本体の傾斜、岸壁背後のエプロン沈下量がある。一つの岸壁（1バース）の法線の変位量の最大値、最小値、平均値が測定されているが、ここでは平均

キーワード：阪神・淡路大震災、港湾施設、被災分析

\*港湾技術研究所構造部 0468-44-5030

\*\*第三港湾建設局震災復興建設部 078-333-2554

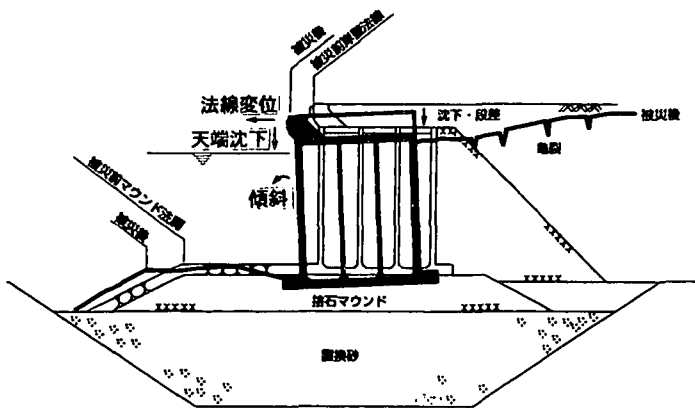


図-2 岸壁の被災変状

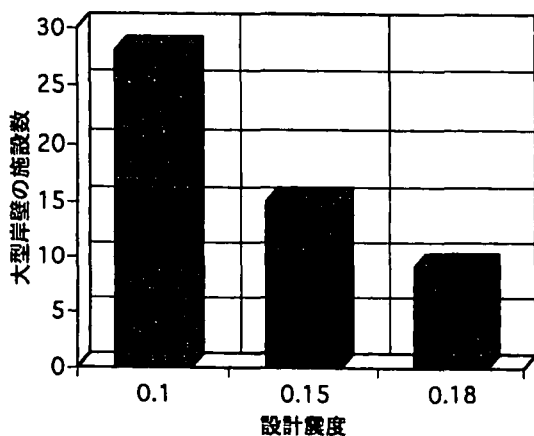


図-3 ケーソン式大型岸壁の設計震度

値を法線変位量として主に用いている。岸壁の地震前の正確な位置の資料が無いので、次のように法線変位量を求めた。まず、仮の基準点からの岸壁の変位量を求め、次に、仮の基準点の地震前後の移動量をGPS(Global Positioning System, 汎地球測位システム)により測定し、この測定値を仮の基準点からの変位量に加算し、これを岸壁の法線変位量とした。このGPS測定の精度は10cm程度と推定されている。以下の検討ではこうして測定した被災変形量(測定精度Aとする)を主に用いているが、このGPSによる測定の精度がやや劣るもの(測定精度Bとする)、あるいはGPS測量によらないもの(測定精度Cとする)も用いている。ただし、変形量を相互に比較する場合には測定方法(測定精度)が同じ値を用いるよう配慮した。

#### 4. ケーソン式大型岸壁の被災分析

被災変形量が正確に判明しているもので大型のケーソン式岸壁(前面水深-7.5m以上)の52施設をこ

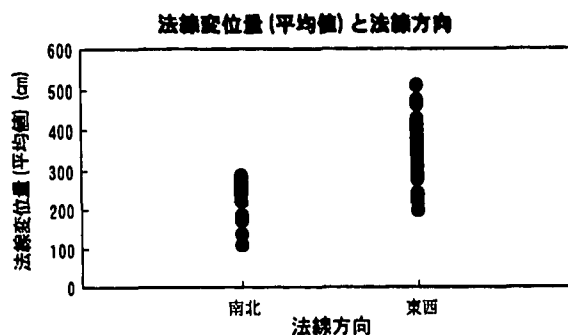


図-4 法線変位量と法線方向の関係

こでは対象とした。これら施設の位置はポートアイランドが28施設、六甲アイランドが24施設である。設計震度別の施設数を図-3に示す。各施設の設計水深は-7.8mから-14.5mの範囲に、置換砂の層厚は8.5mから24mの範囲にある。

ケーソン式岸壁の被災変状の要因には様々な項目が考えられるが、ここでは比較的明確な相関関係が得られた下記の項目について示す。

- i)被災変形量と岸壁の法線方向の関係
- ii)被災変形量と岸壁の基礎の置換砂の層厚との関係
- iii)被災変形量と危険度との関係

ここで検討する危険度とは作用震度を破壊震度で除した値である。破壊震度は構造物の地震時の安定計算で安全率が1となるときの震度である。現状では全ての施設においてこの地震時の安定計算が実施されていないので、ここでは破壊震度の代わりに構造物の設計震度を用いることとした。ただし、設計震度0.1の岸壁についてはその破壊震度が0.13と計算されているので、設計震度0.1の岸壁の破壊震度は0.13とした。

作用震度は地震時に構造物に作用したと考えられる震度で、この作用震度と地盤加速度の関係は過去の地震被災事例解析より下記のように与えられている<sup>4)</sup>。

$$\begin{aligned}
 Ke &= 1/3(\alpha/g)^{1/3} & (\alpha \geq 200\text{Gal}) \\
 &= \alpha/g & (\alpha < 200\text{Gal})
 \end{aligned}$$

ここに、 Ke : 作用震度

α : 地盤最大加速度 (Gal)

g : 重力加速度 (980Gal)

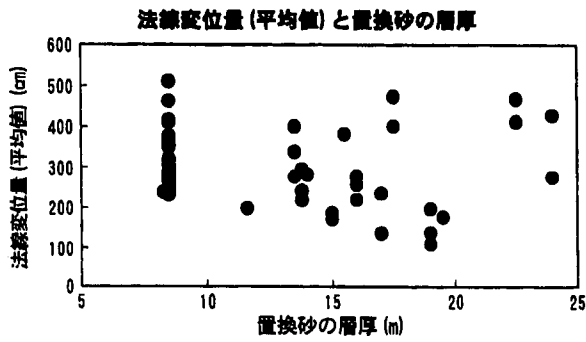


図-5 法線変位量と置換砂の層厚の関係

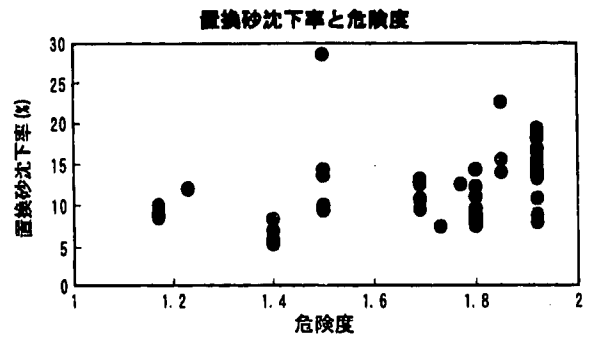


図-9 置換砂沈下率と危険度の関係

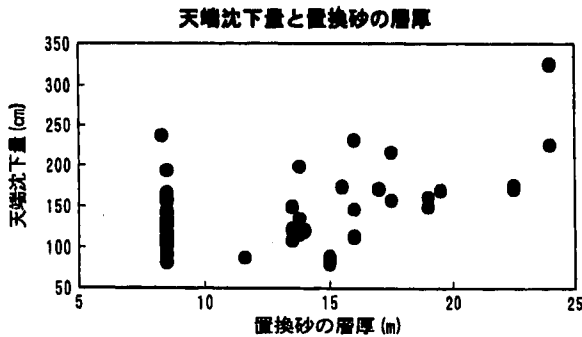


図-6 天端沈下量と置換砂の層厚の関係

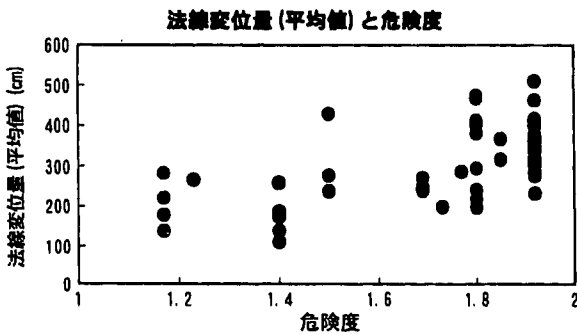


図-7 法線変位量と危険度の関係

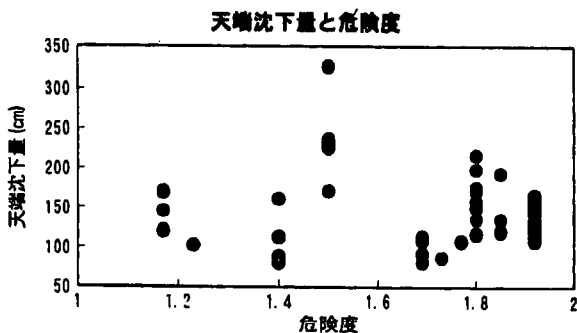


図-8 天端沈下量と危険度の関係

大加速度はポートアイランドについては神戸市開発局の強震記録、六甲アイランドについては神戸港工事事務所の強震記録より推定した。なお、今回の地震動には方向性が認められると報告されているので、作用震度も岸壁法線に直交する方向について求めた。

(1) ケーソン式大型岸壁の被災変形量と岸壁の法線方向の関係

図-4に法線変位量を岸壁の法線方向別に示す。法線変位量は東西方向の法線の岸壁の被災変形量の方が、南北方向のそれより大きいことが分かる。地震動の観測結果によれば、南北方向の水平成分の方が東西方向の水平成分より大きく、これは岸壁の被害状況と整合性のとれたものとなっている。

(2) ケーソン式大型岸壁の被災変形量と置換砂の層厚の関係

図-5には法線変位量と置換砂の層厚の関係、図-6には天端沈下量と置換砂の層厚の関係を示す。図に示すように、天端沈下量だけでなく、法線変位量も置換砂の層厚と正の相関性があることが分かる。なお、傾斜角と置換砂の層厚には明確な相関関係は認められなかった。このように傾斜角を除く被災変形量は置換砂の層厚と相関関係があり、ケーソン式岸壁の被災変状に置換砂が影響を与えたことが推察される。

(3) ケーソン式大型岸壁の被災変形量と危険度の関係

ケーソン式岸壁のような重力式構造物の場合は、その地震時の挙動は無被害、破壊の二者択一的でなく、地震外力の増大とともに変形量が連続的に増加していくものと考えられる。過去の地震被災事例解析の結果では、作用震度が破壊震度を越えると、破壊状態に移行し、作用震度の増加(危険度の増加)とともに被災変形量が増加することが確認されてい

上式を用いて、地盤加速度より作用震度を推定している。

ポートアイランドおよび六甲アイランドの地盤最



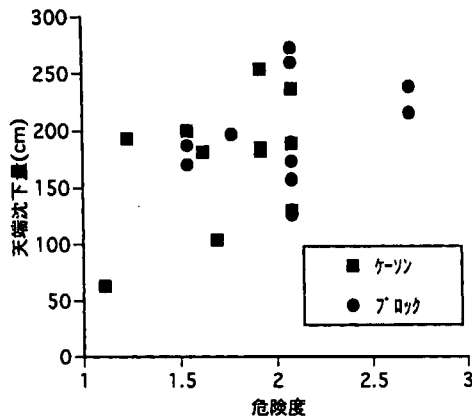


図-16 天端沈下量と危険度の関係

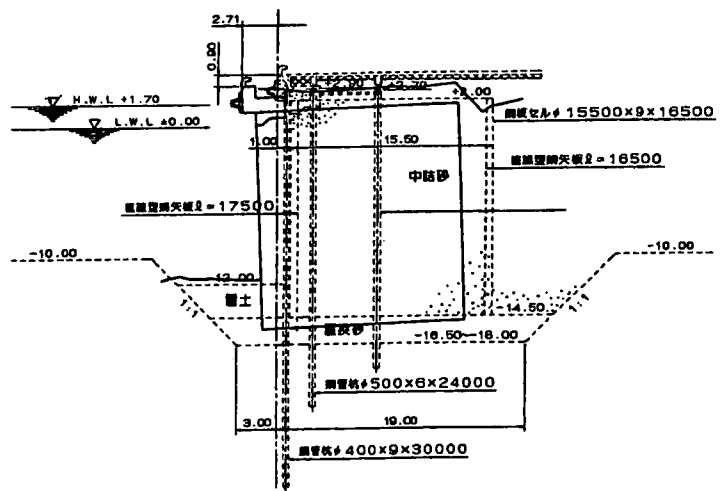
今回の地震被災事例の被災変形量と危険度の関係も過去の地震被災事例に基づいて導かれた結果と同様な傾向が得られている。ただ、今回の被災変形量は、同じ危険度の過去の事例のものより大きく、これは地震動の特性（今回の地震動が大きな変形量を与えるような地震波形である）あるいは置換砂、岸壁後の埋立地盤の液状化によるものと推察される。

#### 5. 重力式小型岸壁の被災分析

前面水深が-7.5m以上の岸壁が大型岸壁であり、大型岸壁以外の施設を小型岸壁として被災変状分析した結果を以下に示す。図-1に示したブロック式の29施設は全て小型岸壁であり、ケーソン式の小型岸壁は22施設である。これら小型岸壁の設計水深は-2mから-6mの範囲にある。また、設計震度は0.1がもっとも多く約4割を占めるが、不明な施設も多く4割を占める。小型岸壁の置換砂の層厚は0.3mから19mと幅が広い。

図-10、11がケーソン式の小型岸壁の被災事例であり、図-12がブロック式のそれである。図-10が置換砂の層厚が厚い場合、図-11が薄い場合である。小型岸壁の被災も大型岸壁の被災と同様に、海側に変位し、沈下しているが、図-10に示すようにケーソンが陸側に傾斜している状況（大型岸壁では海側に全て傾斜した）、あるいは、図-11、12に示すように壁体がマウンドにのめり込んだ状況（大型岸壁では壁体とマウンドがほぼ一体となって海側に移動した）が大型岸壁の被災状況と異なっていた。

小型岸壁についても、大型岸壁同様に各種被災変



摩耶埠頭 第2突堤 第1岸壁 被災状況断面図

図-17 鋼板セル式岸壁の被災変状

形量と設計水深、法線方向、置換砂の層厚、危険度との関係を検討した。設計水深については、大型岸壁と同様各被災変形量と明確な相関関係は認められなかった。また、法線方向については図-13に示すように法線が東西方向の岸壁の被災変形量が南北方向のそれより大きな値を示した。この関係は、大型岸壁の図-4と比較して分かるように最大値、ばらつきを含めて、大型岸壁の場合とほとんど同じ傾向を示している。図-13ではケーソン式とブロック式とを区別して示しているが、両者に明確な差は認められない。

図-14には天端沈下量と置換砂の層厚の関係を示す。大型岸壁の場合と異なり、小型岸壁の場合は各被災変形量と置換砂の層厚の間に明確な相関関係を認められなかった。これは、置換砂の層厚が薄い小型岸壁が図-11、12のような被災形態を示したためと考えられる。

図-15、16には、それぞれ法線変位量と危険度、天端沈下量と危険度の関係を示す。大型岸壁の場合と同様、危険度の増加とともに各被災変形量は増加している。

#### 6. 鋼板セル式岸壁の被災分析

図-1に示したように、鋼板セル式岸壁は神戸港で13施設あり、被災している。図-17に鋼板セル式岸壁の被災状況を示す。重力式岸壁と同様、岸壁本体が海側に移動し、沈下している。海側に傾斜した鋼板セル本体は、法線直角方向を長軸とする楕円形に変形していた。セル内の一部の杭には屈曲が

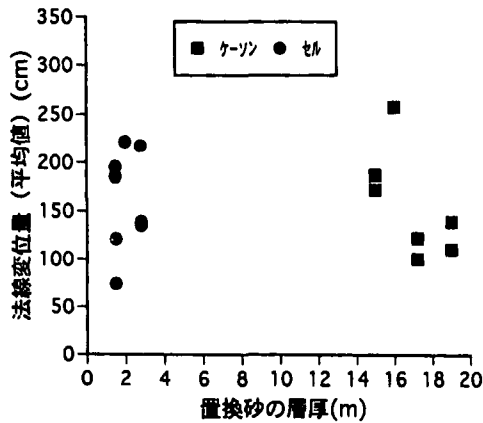
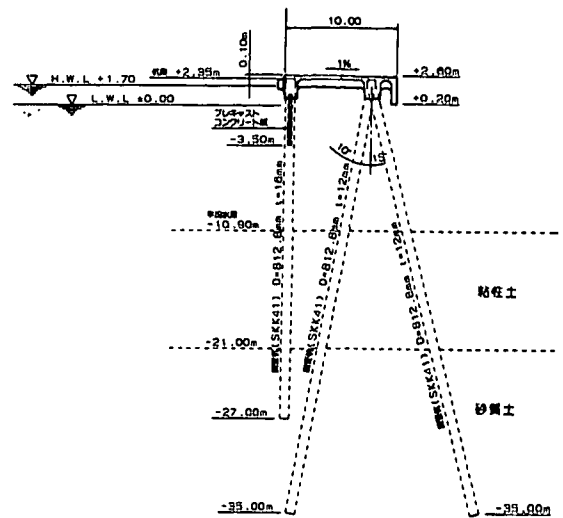


図-18 法線変位量と置換砂の層厚の関係



ポートアイランド 棧橋 (-7.5m) 被災状況断面図

図-21 棧橋の被災変状

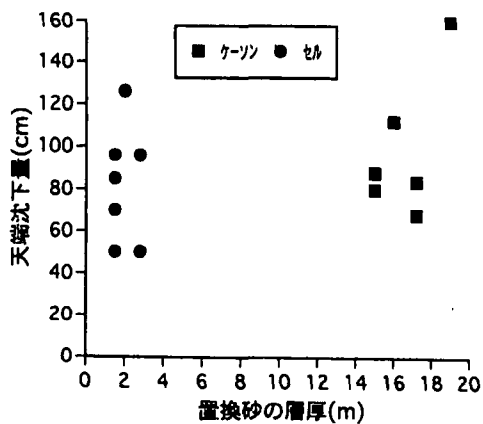


図-19 天端沈下量と置換砂の層厚の関係

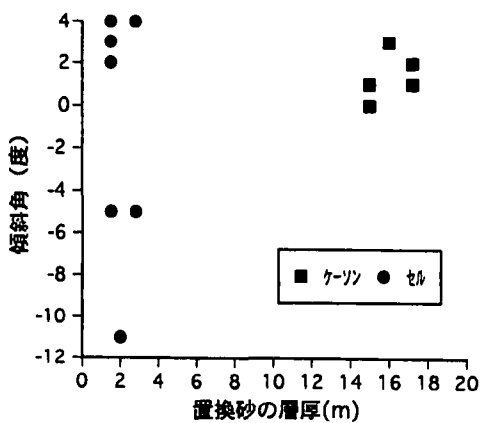


図-20 傾斜角と置換砂の層厚の関係

認められている。セル内の中詰めは砂質土および砂礫土で、そのN値は10~20である。

鋼板セル式岸壁は施設の数少なく、その設計水深は-14.5mか-12mであり、設計震度は0.15、法線方向はほとんどが南北方向であるので、被災変形量に関するケーソン式大型岸壁と同様な詳細な検討が難

しいと判断し、ここでは重力式岸壁の被災変形量との比較に重点を置き、その被災分析を実施した。比較の対象とした重力式岸壁は設計震度が0.15で、法線方向が南北方向の7つのケーソン式大型岸壁である。

図-18、19にはそれぞれ置換砂の層厚と法線変位量の関係、置換砂の層厚と天端沈下量の関係を鋼板セル式岸壁とケーソン式岸壁とで比較したものである。鋼板セル式岸壁の層厚は2~3mとケーソン式岸壁と比較して薄い、両者の法線変位量はほぼ同じ値を示している。図-20は置換砂の層厚と傾斜角の関係を示す。鋼板セル式岸壁では、陸側に傾斜した岸壁もあり、しかもその値はケーソン式岸壁と比較して大きな値を示した。危険度と法線変位量の関係では鋼板セル式岸壁とケーソン式岸壁とで特に明確な差は認められなかった。

### 7. 棧橋の被災分析

図-1に示したように、神戸港で被災した棧橋は10施設であった。図-21には棧橋の被災状況を示す。図-21に示すように棧橋の杭は傾斜しており、一部の杭は杭頭等で座屈していた。また、棧橋の上部工のコンクリートにはクラックが認められた。こうした被災状況を重力式岸壁と比較した結果を以下に示す。比較は同じ地区の近接した岸壁で行った。対象となったのは、ポートアイランド、摩耶埠頭、中突堤、高浜地区である。被災変形量の精度は摩耶埠頭だけがAで、あとの地区はCである。

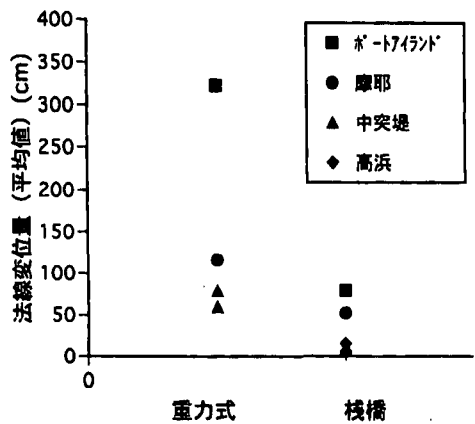


図-22 法線変位量の比較

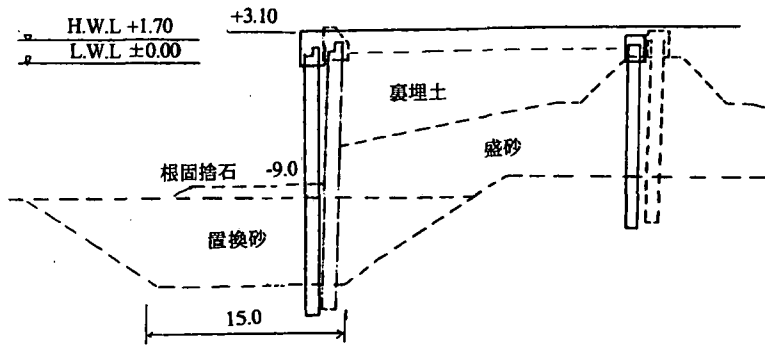


図-25 矢板式岸壁の被災変状

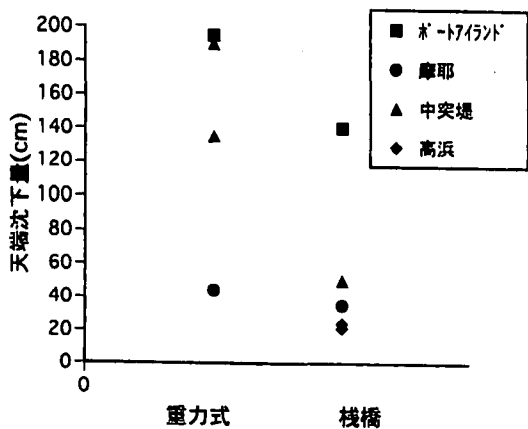


図-23 天端沈下量の比較

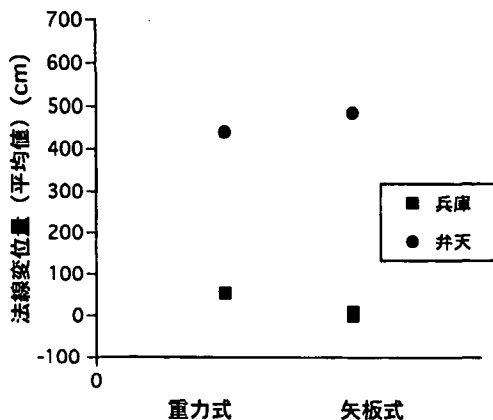


図-26 法線変位量の比較

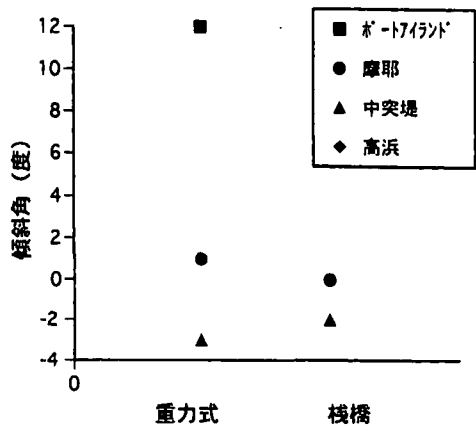


図-24 傾斜角の比較

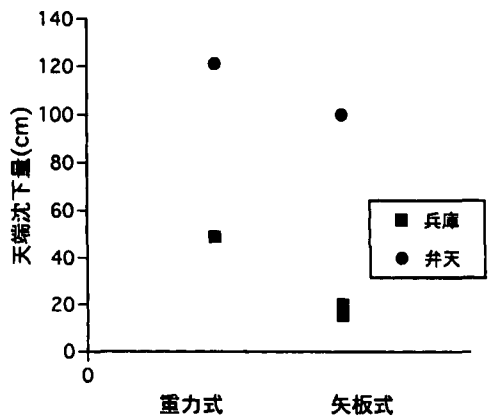


図-27 天端沈下量の比較

図-22～24には、被災変形量を栈橋と重力式岸壁で比較したものを示す。図に示すように、各被災変形量とも栈橋の方が小さい値を示している。このように栈橋の方が被災変形量が小さかったが、高浜栈橋では、海側杭のほとんどが杭頭部（上部工の下）で座屈・傾斜があった事等に留意する必要がある。

8. 矢板式岸壁の被災分析  
 図-1に示したように神戸港の矢板式岸壁はわずか4施設であった。図-25には矢板式岸壁の被災状況を示す。図に示すように控え杭と矢板本体が一体となって海側に移動したと推察されている。また、一部の矢板ではセクションの開きが確認されている。弁天地区の近接した重力式岸壁と矢板式岸壁、兵庫突堤の隣接した両岸壁の被災変形量を比較した。これらの被災変形量の精度はCである。図-26には法線変位量、図-27には天端沈下量について重力式岸壁と矢板式岸壁を比較して示す。図に示すように法線変位量については両者に明確な差を認められないが、天端沈下量は矢板式岸壁の方が小さい傾向にある。

## 9. まとめ

神戸港の各種岸壁の被災変状の特徴、被災の主要な要因に関する検討結果は下記の通りであった。

(1) 東西の法線方向の岸壁の被災変形量は、南北の法線方向の岸壁のそれより大きな値を示した。これは地震動の卓越方向と整合していた。

(2) ケーソン式大型岸壁の法線変位量、天端沈下量と置換砂の層厚には相関関係が認められた。ケーソン式大型岸壁の被災変状に置換砂が影響を与えたことが推察される。一方、小型岸壁（前面水深が7.5mより小）では、各被災変形量と置換砂の層厚と明確な相関関係は認められなかった。

(3) 法線変位量と危険度（作用震度と破壊震度の比）、ケーソン式大型岸壁の天端沈下量を置換砂の層厚で除した値と危険度には明瞭な相関関係が認められた。この関係は、過去の地震被災事例の検討結果と同様な傾向であるが、同じ危険度に対する被災変形量は過去の結果より大きな値を示した。これは地震動の特性、あるいは、置換砂、岸壁背後の埋立地盤の液状化の影響によるものと推察される。

(4) ケーソン式大型岸壁ではケーソンが海側に移動するとともに、海側に傾斜していたが、重力式小型岸壁、鋼板セル式岸壁では陸側に傾斜しているものもあった。

(5) 重力式岸壁と栈橋の比較結果では、各被災変形量とも栈橋の方が小さい値を示している。ただし、栈橋では座屈した杭があった事に留意する必要がある。

る。

(6) 重力式岸壁と矢板式岸壁の被災変形量の比較によれば、矢板式岸壁の天端沈下量の方が小さい傾向が認められた。

## 参考文献

- 1) 上部達生：兵庫県南部地震による港湾施設の被害、土木学会誌、Vol.80、No.4、pp.6~10、1995.
- 2) 井合 進：ケーソン式岸壁の被害の特徴、土木学会誌、Vol.80、No.6、pp.46~49、1995.
- 3) 上部達生、稲垣紘史、及川 研：神戸港における岸壁の設計震度と地震被害の関係、土と基礎、Vol.44、No.2、1996年2月
- 4) 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.14、No.4、pp.67~111、1976.
- 5) 上部達生：地震被災事例に基づく重力式及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.
- 6) 運輸省港湾局、運輸省港湾技術研究所、運輸省第3港湾建設局：阪神・淡路大震災による港湾施設等の被災状況調査報告書（第2集）、1995年10月
- 7) 運輸省港湾局、運輸省港湾技術研究所、運輸省第3港湾建設局：阪神・淡路大震災による港湾施設等の被災状況調査報告書（第3集）、1996年3月

## Earthquake Damage Deformation Analysis of a Various Quaywall of Kobe Port

Tatsuo Uwabe, Takumi Shinozawa and Yasuo Matsunaga

A characteristic of damage deformation of a various quaywall suffered from the earthquake in Kobe Port and a major factor of the suffering were examined. Damage deformation of a quaywall in the north and south direction of face line showed a bigger value than that in the east and west direction, and this adjusted with predominant direction of earthquake motion. Clear correlation was recognized as damage deformation of concrete caisson type quaywall and a thickness of replaced sand under a concrete caisson. In comparison result of gravity type quaywall and a pier, a pier showed a small value with each damage deformation. But buckling of piles of a pier needs to pay attention. As for a quantity of top subsidence of steel sheet pile type quaywall, a small tendency was recognized than it of gravity type quaywall.