

# 1995年兵庫県南部地震により被災したケーソン式岸壁に関する実験的研究

猪野 健吾 中原 知洋  
三藤 正明

## 要 旨

1995年1月に発生した兵庫県南部地震により、様々な社会基盤に甚大な被害が発生したが、港湾施設についても同様であった。大都市部の大規模直下型地震により、神戸港は大半の施設が被災し、港湾機能は地震直後ほとんど麻痺状態に陥った。同地震で被害が大きかったケーソン式岸壁の被災メカニズムを検討する目的で、縮尺1/17の岸壁模型を現地に忠実に作製し、ポートアイランドKP-28m観測波を入力波として上下水平3方向振動実験を行ったのでその結果について報告する。

### 1. まえがき

兵庫県南部地震で被災した岸壁、護岸の被災の形態については、施設の設計震度、構造形式により被害の程度に明確な差が見られた。施設の設計震度に着目して検討すると、設計震度の小さな施設は大半のものが被害を受けている。一方、神戸港の中で最大の設計震度をもつ耐震強化岸壁である摩耶埠頭地区の3バースは、ほとんど被害がなかった。構造形式についてみると、被災の程度は栈橋形式等の比較的軽い構造物に比べて、ケーソン式、ブロック式など重量の重い構造物の被害が大きかった。ケーソン式岸壁の被災形態は、ケーソンが海側へ移動、前傾、沈下し、背後地盤が陥没するものである。本報文では、同地震で被害が大きかったケーソン式岸壁の被災メカニズムを検討する目的で模型振動実験を行ったのでその結果について報告する。

### 2. 模型振動実験の概要

模型振動実験には、水深2mの水槽の底面に振動台が設置されている水中型の振動台を用いた。これは、水中に建設されるケーソン式岸壁の地震時の挙動をより忠実に再現するためである。図-1に実験に用いたケーソン式岸壁模型の断面図を示す。図-1には、模型地盤およびケーソンに配置した各種計測機器位置も併せて示してある。また、写真-1に同模型写真を示す。この模型は、ポートアイランド地区のコンテナ埠頭-12m岸壁C-1をモデルに長さの縮尺比を1/17としたものである。模型の置換部およびケーソン背後裏込部分はポートアイランドで採取したまさ土の30mmフルイ通過分を用い、水中落下法により作製した。基礎捨石部分は砕石4号、裏込石は砕石6号を用いた。

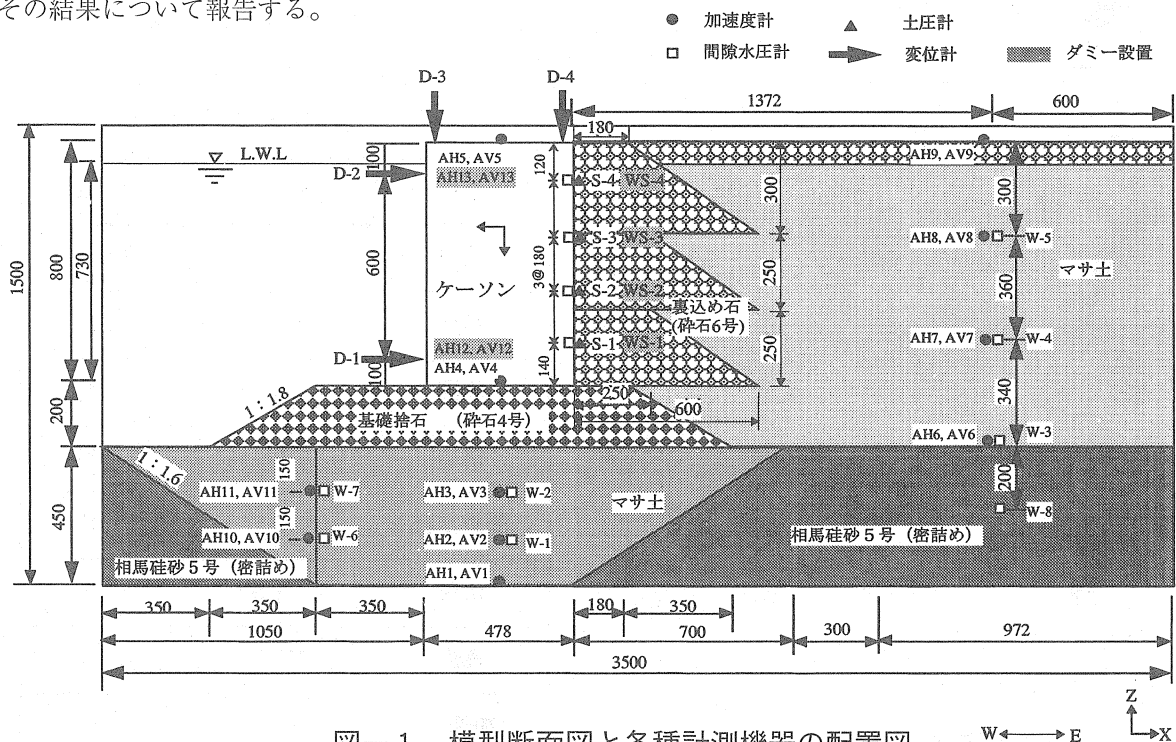


図-1 模型断面図と各種計測機器の配置図

ケーソンに作用する動土圧および動水圧を計測するために、ケーソン背後に土圧計と間隙水圧計をそれぞれ4個設置した。置換部ではケーソン直下およびその前方位置に間隙水圧計と加速度計を配置し、過剰間隙水圧と応答加速度の発生状況を調べた。裏込部も間隙水圧計と加速度計を配置した。

実験に用いた入力波は、神戸市開発局がポートアイランド地区で実施している強震観測のなかで、兵庫県南部

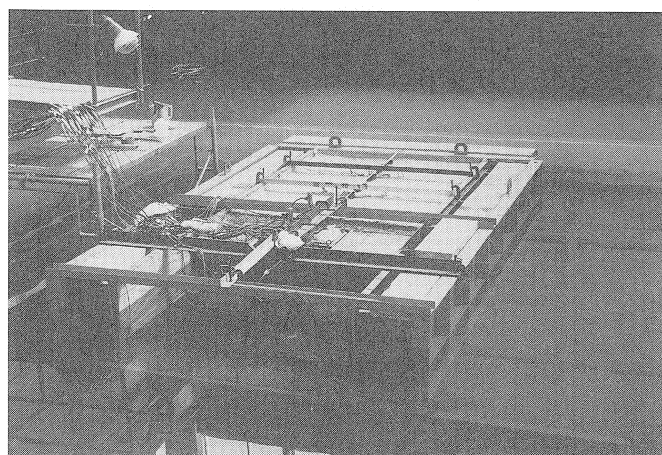
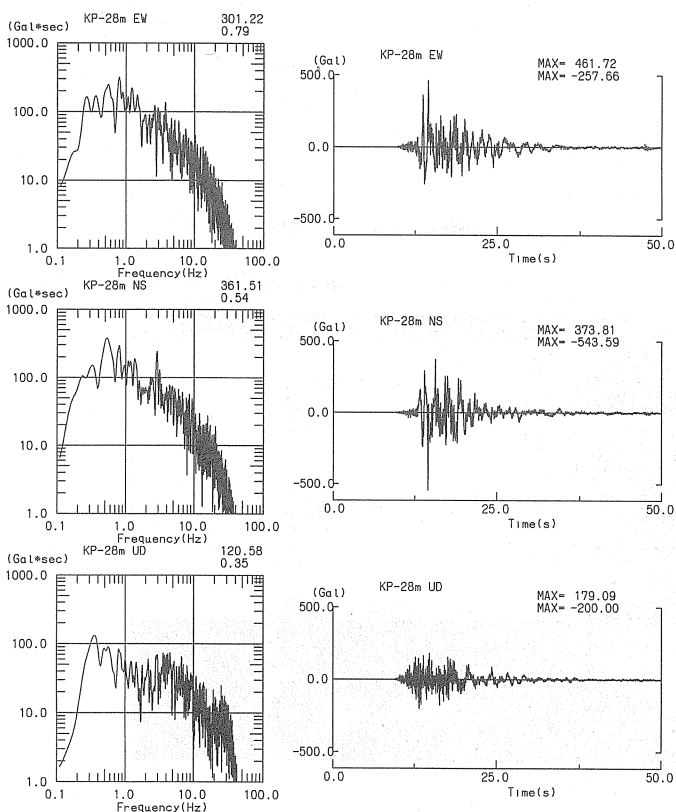


写真-1 実験模型写真



1995/01/17 HYOGOKEN-NANBU KP-28m

図-3 強震観測記録 (KP-28m)

地震時に得られたKP-28m地点の強震記録を用いた。本記録を用いた理由は、模型の深度との対応をとるためである。図-2に強震観測点の土質性状を示す。また、図-3に観測された水平2成分と上下成分の強震加速度記録を示す。模型振動実験の相似則は、表-1に示すような井合提案の1G場における相似則に従った。これによれば、時間軸を0.12倍に圧縮した波形を入力することになる。

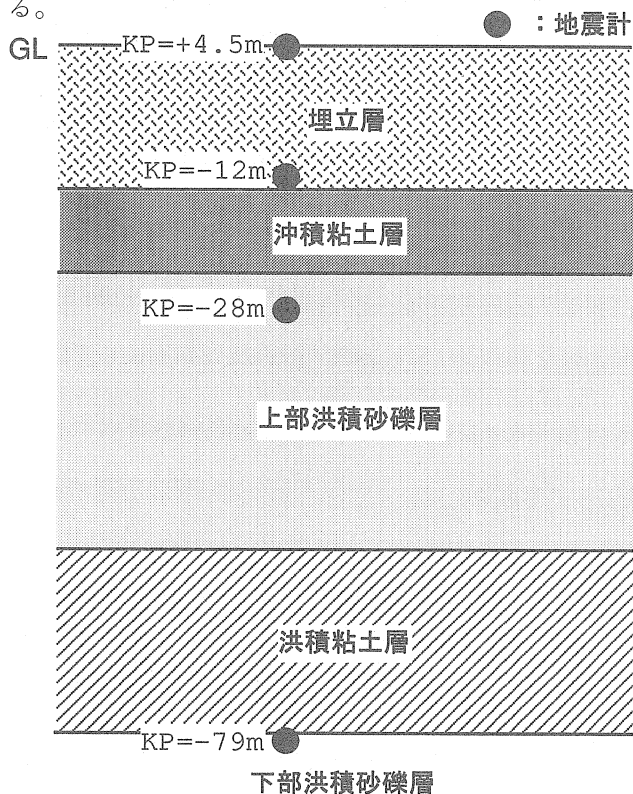


図-2 地震計位置の土質性状

表-1 模型振動実験相似則

パラメータ	実物/モデル	縮尺比
長さ	$\lambda$	17.000
密度	1	1.00
時間	$\lambda^{**0.75}$	8.37
応力	$\lambda$	17.00
間隙水圧	$\lambda$	17.00
変位	$\lambda^{**1.50}$	70.09
速度	$\lambda^{**0.75}$	8.37
加速度	1	1.00

3. 模型振動実験結果の検討

3.1 応答加速度に関する検討

図-4に裏込部のまさ土に配置したAH6~AH9および入力AH1の水平方向加速度計の応答加速度時刻歴図を示す。AH9が地表面に設置した加速度計であり、AH6、AH7、AH8はそれぞれ地表面から100、66、30cmの深度に設置したものである。最深部のAH6では最大応答加速度が約345Galに対して、地表面のAH9では約190Gal程度である。図-5にAH(AV)6~AH(AV)9の加速度計で計測された最大応答加速度の分布を示す。これより、地表面に近づくに従って最大応答加速度が小さくなっているこ

とがわかる。また、周波数特性について見ると、最深部のAH6に比べて地表面のAH9の方が長周期の波が卓越する傾向にある。すなわち、地表面に近づくに従って最大応答加速度が小さくなるとともに、長周期成分が卓越してくる。これは、地表面に近づくに従い、過剰間隙水圧の上昇に伴うまさ土の軟化が顕著に現れた為である。図-6に同じ深度に配置したAV6~AV9加速度計の鉛直方向の応答加速度時刻歴図を示す。水平方向の応答加速度と異なり、地表面に近づくに従い最大応答加速度が増加している。また、周波数特性に関しても長周期成分が卓越する傾向も認められない。

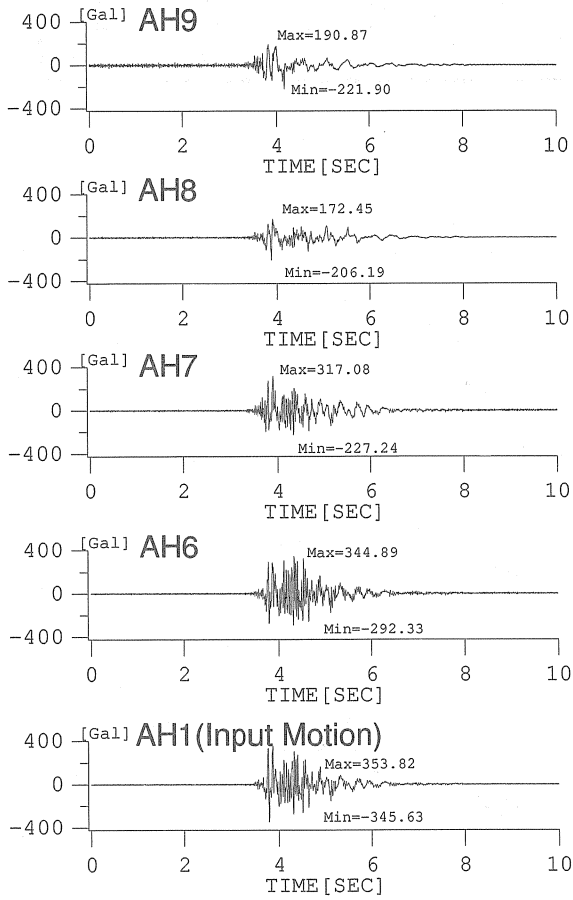


図-4 裏込部まさ土の水平応答加速度

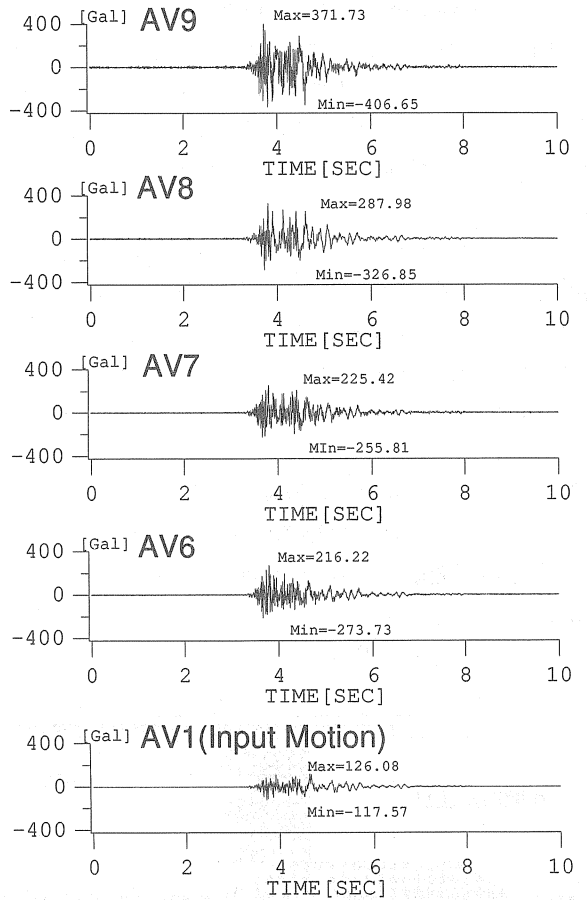


図-6 裏込部まさ土の鉛直応答加速度

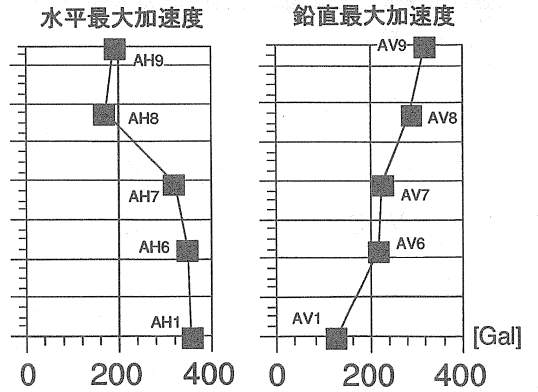
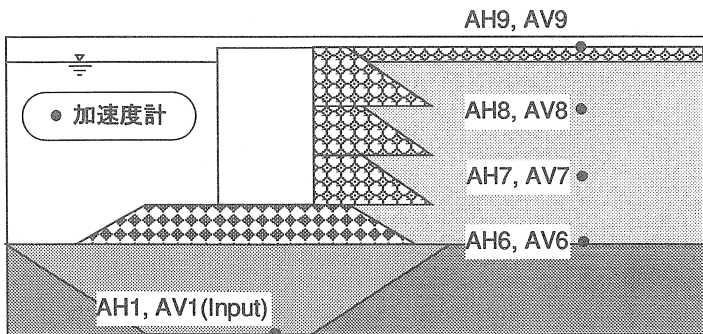


図-5 最大応答加速度分布図

3. 2 過剰間隙水圧に関する検討

図-7に裏込め部のまさ土に配置した間隙水圧計 W3~W5、ケーソン直下の置換部まさ土に配置したW1、W2および置換部前方に配置したW6、W7、背後基礎相馬砂地盤に配置したW8の過剰間隙水圧時刻歴図を示す。また、自重解析より算定した各間隙水圧計位置の有効上載圧値を表-2に示す。さらに、各間隙水圧計位置における最大過剰間隙水圧と有効上載圧の分布図を図-8に示す。W3~W5の時刻歴より、裏込め部のまさ土では深くなるに従って最大過剰間隙水圧も増加している。裏込め部最深部に配置したW3間隙水圧計の位置では最大過剰間隙水圧が約100gf/cm<sup>2</sup>発生し、鉛直有効上載圧に比較すると過剰間隙水圧比が1.0程度になっている。同様の傾向は裏込め部のまさ土に配置した他の間隙水圧計位置でも認められる。従って、裏込め部のまさ土はほぼ全域に渡って完全液状化に近い状態まで過剰間隙水圧が発生したものと判断される。

ケーソン直下のW1およびW2については、W1の最大過剰間隙水圧が約55gf/cm<sup>2</sup>であり、過剰間隙水圧比では約0.4程度となり、地盤は安定していたものと判断される。W2についてもほぼ同様の傾向である。ただし、ケーソンの上下動に伴う有効応力の変化によって過剰間隙水圧も変化している。

ケーソン直下より前方の置換部まさ土に設置したW6、W7については、W6が過剰間隙水圧が約47gf/cm<sup>2</sup>発生しており、過剰間隙水圧比では約0.63である。従って、置換部のこの部分はケーソン直下に比べてやや不安定な状態が発生したものと判断される。

表-2 有効上載圧と過剰間隙水圧比

計測点	最大過剰間隙水圧 [gf/cm <sup>2</sup> ]	有効上載圧 [gf/cm <sup>2</sup> ]	過剰間隙水圧比
W-1	54.57	137.25	0.40
W-2	40.42	113.50	0.36
W-3	99.51	104.32	0.95
W-4	45.17	74.18	0.61
W-5	27.29	37.98	0.72
W-6	46.94	74.93	0.63
W-7	20.44	39.56	0.52
W-8	15.91	120.77	0.13

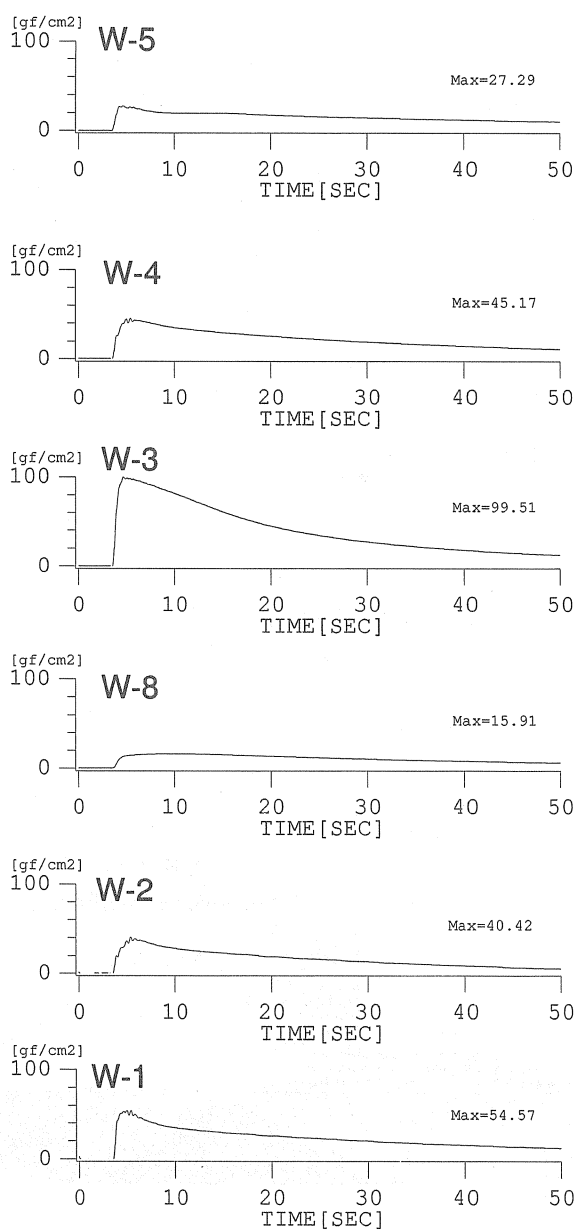
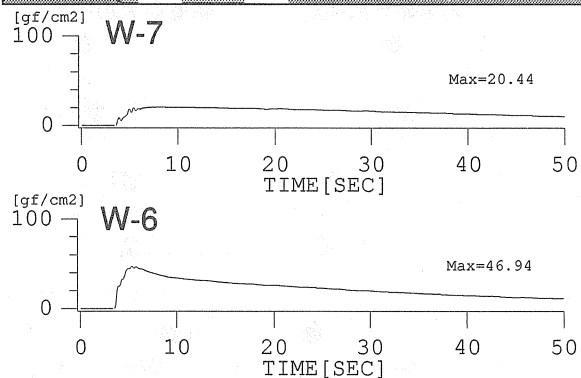
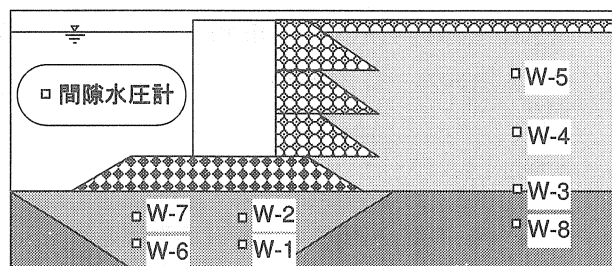
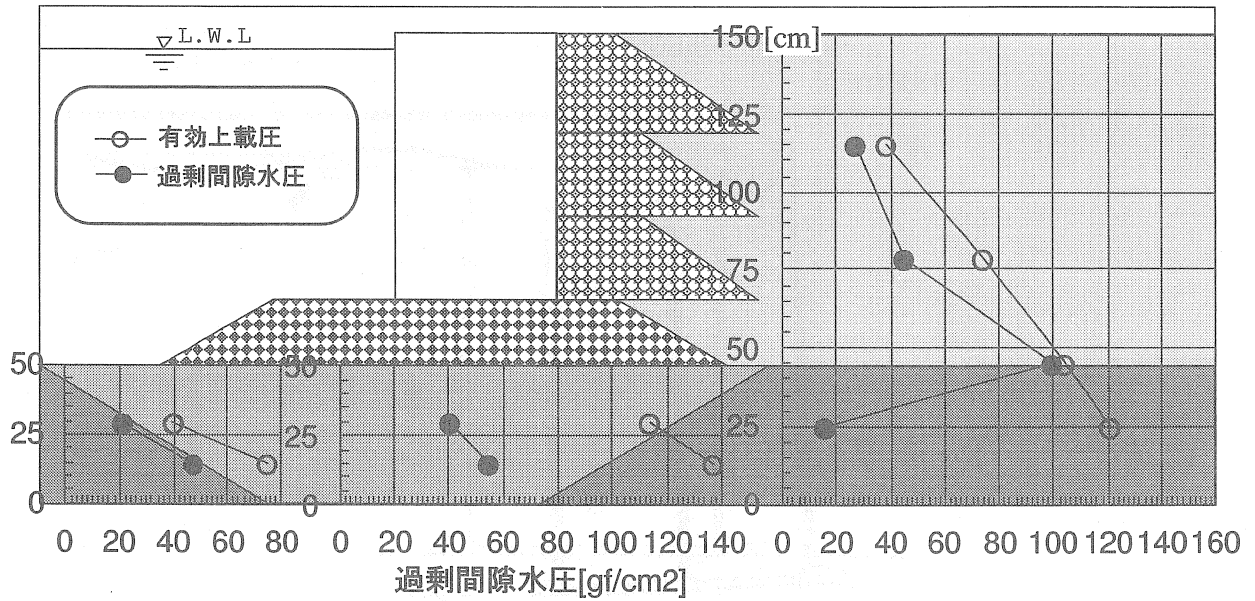


図-7 過剰間隙水圧の時刻歴図



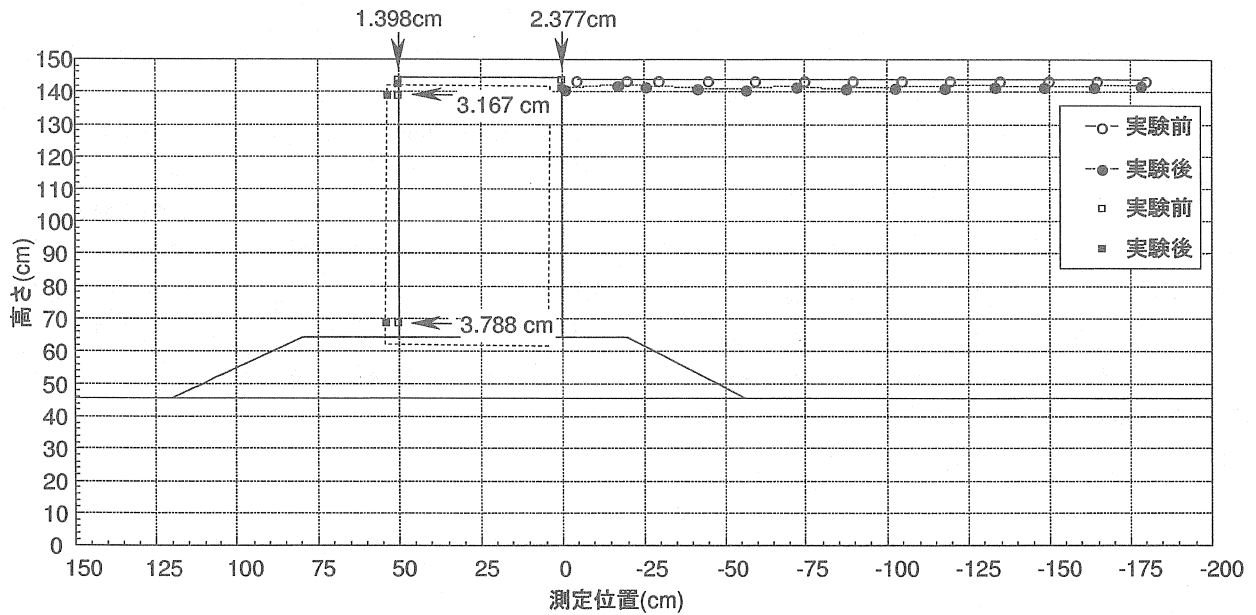
図一 8 最大過剰間隙水圧分布図

3. 3 ケーソン本体の移動量等に関する検討

図一 9 に実験より得られたケーソン本体の移動量および背後地盤の沈下量を示す。図からわかるように、ケーソン下端付近で約3.8cm程度、上端付近で3.2cm程度海側へ移動している。従って、下端の方が上端に比較して前方に移動している。ケーソンの上下方向に関しては2cm程度沈下した。

実際の被害との対応関係を調べるために、実験結果と

被害の調査結果を比較した。図一 10 にコンテナ埠頭の12m岸壁の被災後の地表面およびケーソンの移動状況を実線と点線で示す。模型振動実験から得られた地表面およびケーソンの残留変位を表一 1 に示した相似則に従って実物に換算した残留変位を濃い実線で示す。地表面の沈下量およびケーソンの移動量に関して、実験による値と被害の実測値は比較的良い対応関係にある。



図一 9 実験でのケーソンの移動量と背後地盤の沈下量

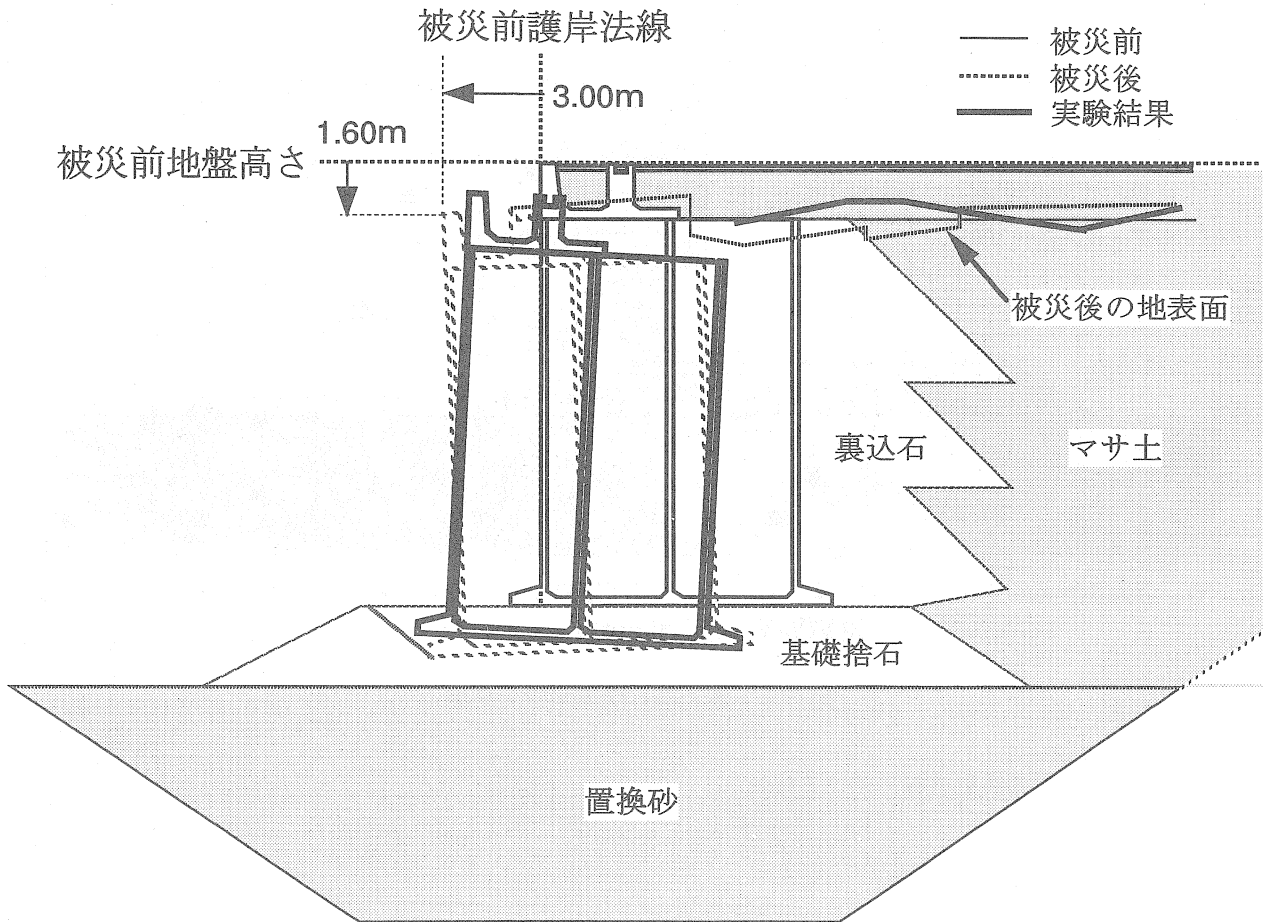


図-10 被災状況の実測値と実験値の比較

4. まとめ

兵庫県南部地震で被災したケーソン式岸壁に関する模型振動実験を行い、被災のメカニズムに関する検討を行った。今回の実験に関しては、裏込部および置換部の一部のまさ土は過剰間隙水圧が完全液状化近くまで上昇した。また、地表面の沈下量およびケーソンの移動量に関しては、実験による値と被害の実測値は比較的良い対応関係にあった。

謝辞

本研究は、運輸省港湾技術研究所との共同研究の一環として実施したものであり、構造部稲富隆昌構造部長、構造部構造振動研究室外山進一（前）室長、構造部構造振動研究室菅野高弘室長をはじめ多大なご指導を頂きました。紙面を借りて深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) S.Iai: Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1G Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Res.Inst., Vol.27, No.3, pp.3-24, 1988.
- 2) H.Inagaki et al.: Performance Of Caisson Type Quay Walls At Kobe Port, Soils And Foundations, Jan.1996, Japanese Geotechnical Society, pp.119-136, Jan.1996.
- 3) 菅野高弘、三藤正明、稲富隆昌：兵庫県南部地震により被災したケーソン式岸壁に関する実験的研究、第23回地震工学研究発表会講演概要、pp.257-260、1995.
- 4) 稲富隆昌、菅野高弘、三藤正明：兵庫県南部地震により被災したケーソン式岸壁に関する実験的研究、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集、pp.1178-1179、1995.