

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 —被災メカニズムに関する検討—

中原 知洋* 猪野 健吾*
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。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となった。特に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の岸壁模型を作製し、水中振動台を用いて大規模な再現性実験を行った。実験結果と現地被災調査結果を比較検討した結果、被災原因は当初予想されていたケーソン底面とマウンド間の滑りだけによるのではなく、マウンドおよび置換土の変形が主な原因であることが明らかになった。本報告では模型振動実験より得られた被災メカニズムの検討結果について報告する。

1. まえがき

兵庫県南部地震において、神戸港の岸壁の構造形式の大半を占めるケーソン式岸壁の被害が甚大であった。その被災形態はケーソンの海側への移動・前傾・沈下および背後地盤の陥没であった。被災原因として、まず直下型地震による大きな地震力が考えられる。また、各所で液状化現象が観測されていることからケーソン背後埋立地盤およびケーソン基礎部の置換土層の液状化が考えられる。そこで、ケーソン式岸壁の被災メカニズムを検討するために合計9ケースの再現性実験を行った。実験により現地の被災調査では十分把握できない地盤内の応答加速度や間隙水圧および岸壁の変形状態を把握した。本報告では、実験結果と現地被災調査結果を比較検討し、被災原因に関する考察を行う。また、実験で用いた相似則の適応性と模型振動実験の精度について言及する。

2. 岸壁の被災形態

図-1に神戸港の施設位置を示す。実験対象としてケーソン式岸壁であるコンテナバースPC-1岸壁を選定した。選定理由は、この岸壁が地震動の観測位置に近く、模型振動実験の入力地震動として観測波を直接用いることができるかと判断したためである。図-2に岸壁の標準断面を示す。本構造は軟弱な粘土層を床堀りし、置換土として粒度分布が良い風化花こう岩質のまさ土を用いているのが特徴である。図-3に岸壁の被災断面を示す。地震によりケーソンが海側に約3m移動し、天端が約1m沈下し、マウンドが置換土層にめり込むという被災形態を呈している。

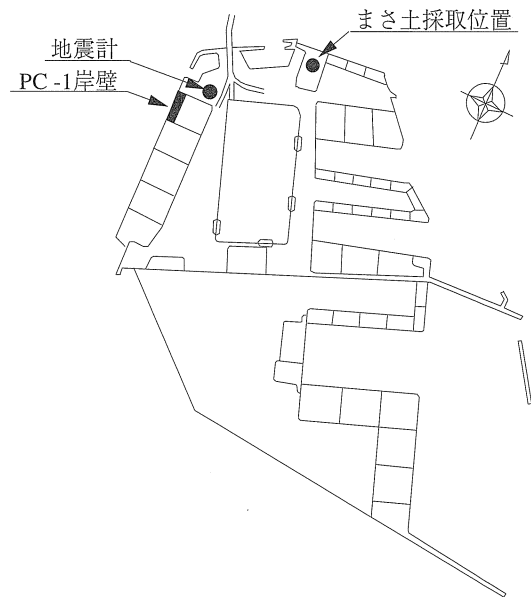


図-1 神戸港施設位置

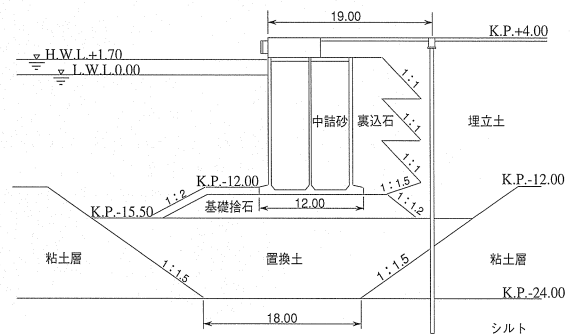
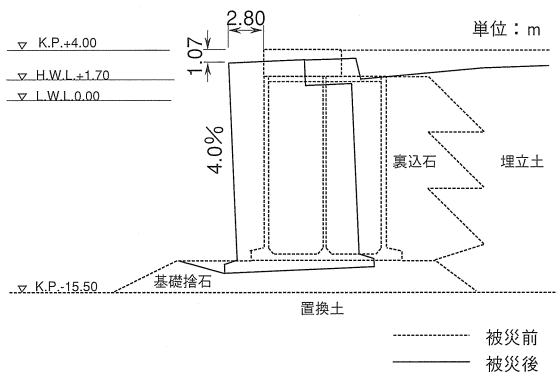


図-2 PC-1岸壁の標準断面¹⁾

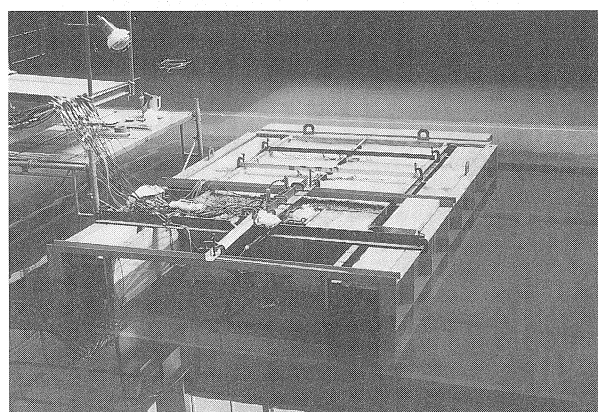
*技術研究所



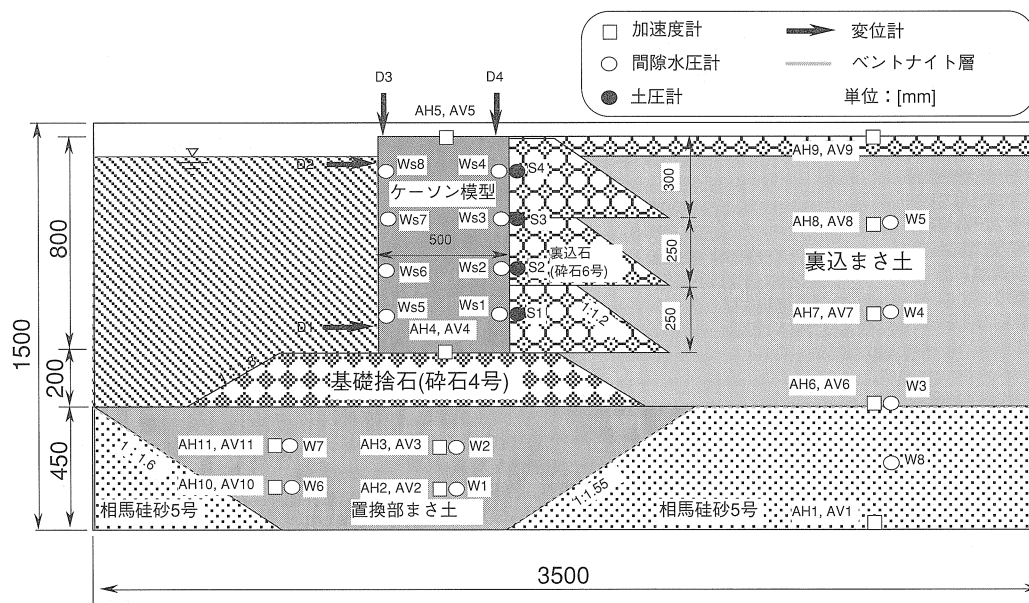
図一 3 PC-1岸壁の被災断面¹⁾

3. 模型振動実験の概要

模型振動実験では、水深 2 m 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、水中に建設されてい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。図一 4 に実験に用いたケーソン式岸壁模型の断面図を示す。同図には、模型地盤およびケーソンに配置した各種計測機器の位置も併せて示してある。また、写真一 1 に実験模型の写真を示す。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PC-1をモデルに長さの縮尺比を 1 / 17 として作製したものである。



写真一 1 実験模型写真



図一 4 模型断面図と各種計測機器の配置図²⁾

模型振動実験の縮尺比は、地盤を二相系飽和材と仮定したときの波動方程式を支配方程式として井合が提案した1G場における相似則³⁾に従って決定した。表-1に用いた縮尺比を示す。

図-5にポートアイランドの沈埋トンネル立坑工事で掘削されたまさ土と、模型地盤の置換土層および背後地盤の作製に使用したまさ土の30mmフルイ通過分の粒度分布を示す。同図よりまさ土は粒度分布が良い土であることがわかる。

4. 模型振動実験結果の検討

再現性実験は、液状化による背後地盤や置換土層の軟化がそれぞれの程度岸壁の被災に影響を与えたかを明らかにするために、背後地盤と置換土層の地盤条件を変化させて（背後地盤に締固めを施すか否か、また置換土層をセメント処理で固めるか否かの組み合わせによる）合計9ケース行った。その中で現地の被災現象を再現すると同時に模型振動実験の精度を検討するために、背後地盤および置換土層ともに水中落下法により作製したCASE 2、CASE 6、CASE 7の同一条件で行った3ケースの実験結果について比較検討し考察を加える。

4.1 岸壁被災形態に関する検討

図-6に再現性振動実験（CASE 6）により得られたケーソン式岸壁の変形状況を実スケールに換算して表示した。同図よりケーソン本体と捨石マウンドの相対変位は小さく、ケーソンを載せたマウンド全体が置換土層にめり込み、沈みながら海側に移動していることが読みとれる。これより岸壁の被災形態としては、これまで推定されていたケーソン本体底面とマウンド間の滑りよりは、置換土層およびマウンド全体の変形がより大きく影響しているものと判断される。また、こ

の被災形態はCASE 2、CASE 7のいずれの再現性実験でも同じように確認されている。

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	λ	17.0
密度	1	1.0
時間	$\lambda^{**0.75}$	8.4
応力	λ	17.0
間隙水圧	λ	17.0
変位	$\lambda^{**1.50}$	70.1
速度	$\lambda^{**0.75}$	8.4
加速度	1	1.0

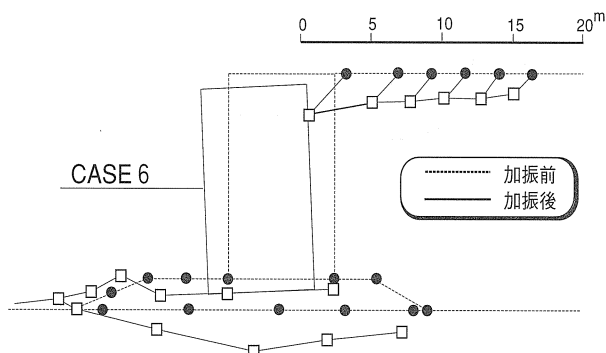


図-6 ケーソン式岸壁の変形状¹⁾

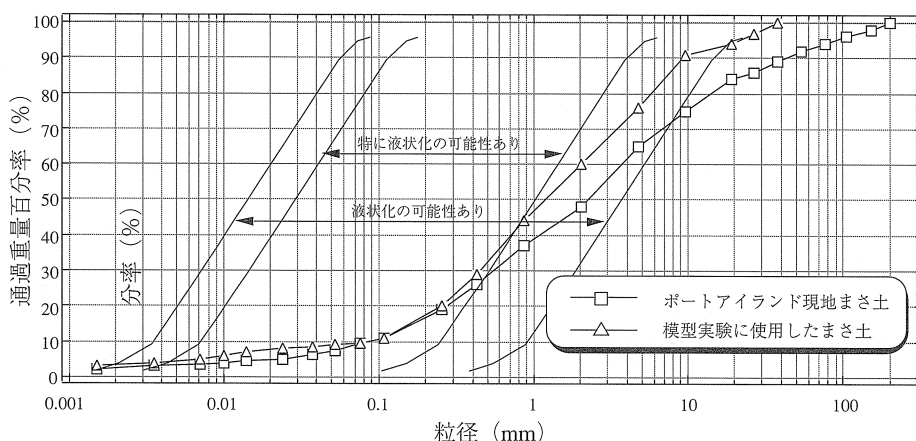


図-5 まさ土の粒度分布¹⁾

4.2 応答加速度・過剰間隙水圧・ケーソン変位
 応答に関する検討

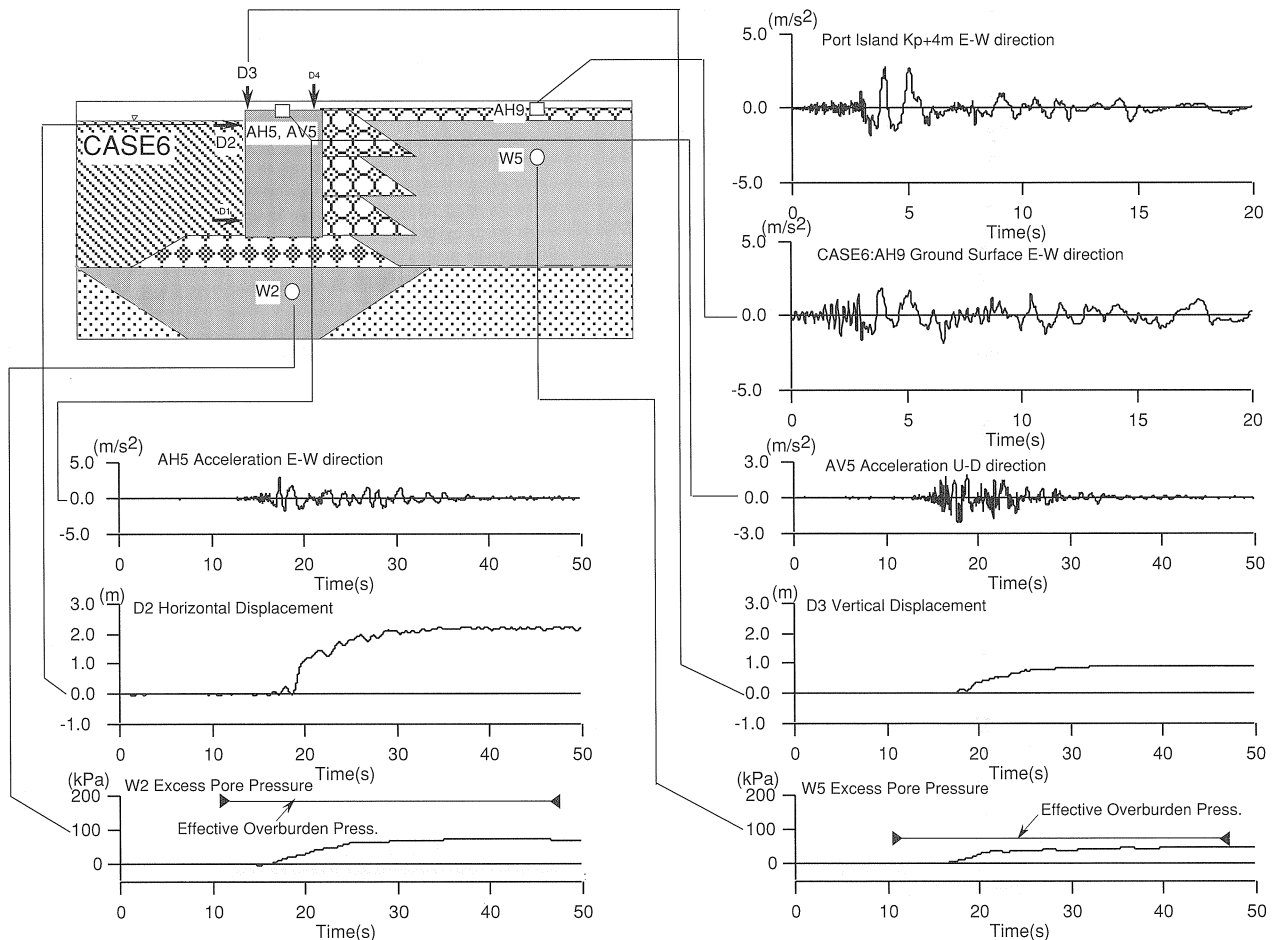
図一七に再現性振動実験(CASE 6)により得られた
 応答加速度、過剰間隙水圧、ケーソン変位の測定結果
 を相似則に従い実スケールに変換して図示した。

まず、応答加速度の検討を行うために、同図の右上
 にポートアイランド鉛直アレーの地表面K. P. +4mのEW
 方向の観測波と模型振動実験より得られた地表面のEW
 方向の加速度波形を示す。最大加速度は観測波の方が
 大きめであるが、全体的な波形はほぼ一致している。
 これにより、本実験が実現象を良く再現しているもの
 と考えられる。

つぎに、過剰間隙水圧の検討を行う。同図にケーソ
 ン直下の置換土層内(W2)と背後地盤内(W5)の過
 剰間隙水圧の時刻歴を各観測点での有効上載圧の値と
 ともに図示した。過剰間隙水圧比は背後地盤内(W5)
 では0.7程度まで上昇しているが、置換土層内(W2)

では0.4程度しか上昇していない。これはケーソン直下で
 はケーソン自重によって背後地盤に比べて大きな拘束圧
 が作用しており、そのために地盤の軟化の程度が小さ
 かったためと考えられる。また、過剰間隙水圧は強い地
 震動により急激に増加するのではなく、加振開始から10
 秒程度を必要としながら徐々に増加することが新たに確
 認された。

さらに、ケーソンの変位に関する検討を行う。ケーソ
 ンの変位は過剰間隙水圧と同様に強い地震動により急激
 に増加するのではなく徐々に増している。これよりケー
 ソンの変位は、加速度応答よりも間隙水圧の上昇による
 地盤の軟化と強い相関があることが明らかである。この
 現象はケーソンの移動が、慣性力により突然生じたので
 はなく、強い地震動が過ぎた後に遅れて進行した間隙水
 圧の上昇、つまり液状化による地盤の軟化がケーソンの
 移動・沈下に大きな影響を及ぼしたことを示唆している。



図一七 模型実験の時刻歴波形および観測波 (実スケール) 4)

4. 3 過剰間隙水圧に関する検討

前節の検討により、置換土層内および背後地盤内の過剰間隙水圧の上昇がケーソン本体の移動・沈下に大きく影響していることが推測された。本節では、置換土層および背後地盤ともにCASE 6 と同一条件で行ったCASE 2、CASE 7 の3ケースの再現性実験により計測された過剰間隙水圧から、ケーソンの変位と間隙水圧との関係についてより詳細に検討を行う。

図-8にCASE 2、CASE 6、CASE 7の3ケースの再現性実験により計測された過剰間隙水圧の最大値と各計測点での有効上載圧とを併せて表示する。同図より置換土層および背後地盤内の最大過剰間隙水圧比は、最も値が大きい置換土層の前面地盤でも1.0には達しておらず、有効上載圧の半分程度であることが読みとれる。これまでの液状化現象に対する一般的な概念では、水圧比がほぼ1.0に上がりきった結果地盤が液体のようになり構造物の沈下や地盤の流動が生じると解釈されてきた。しかしながら模型実験より明らかになったことは、置換土層内の過剰間隙水圧は加振により水圧比でおおむね0.5程度しか上昇しておらず、したがって水圧比はほぼ1.0の完全液状化状態に達しなくても大きな被災が生じたことになる。これは前述した液状化による被災のこれまでの解釈とくい違いが生じており、完全液状化が被災の要因とは断言できないことを示している。ただし、前節に述べたよう

に過剰間隙水圧の上昇は確かに岸壁の被災に大きく影響している。これは常時に初期せん断応力が作用しているため、地盤が完全液状化を起こす前に地盤のせん断変形が先行して生じたためと推測される。岸壁の被災はケーソン底面とマウンド間のすべりだけでなく、過剰間隙水圧の上昇により置換土層が軟化して、地盤にせん断変形が生じたことが主な原因であることが過剰間隙水圧からも推測された。

5. 実験精度と相似則に関する検討

同一条件で実施した3回の再現性実験（CASE 2、CASE 6、CASE 7）により計測された過剰間隙水圧の最大値とケーソン本体の移動量により、実験の精度と用いた相似則の適応性について検討を行う。

まず、過剰間隙水圧の最大値による検討を行う。置換土層および背後地盤は、飽和度を高めるために乾燥させた現地採取まさ土を水中落下法により作製した。図-8に過剰間隙水圧の最大値を示したが、同一条件で行った3回の実験から求められた過剰間隙水圧の最大値はいずれもほぼ同じ値と分布を示し、ケースごとによるばらつきは比較的小さい。したがって、各ケースともに再現性の良い実験であったと考えられる。

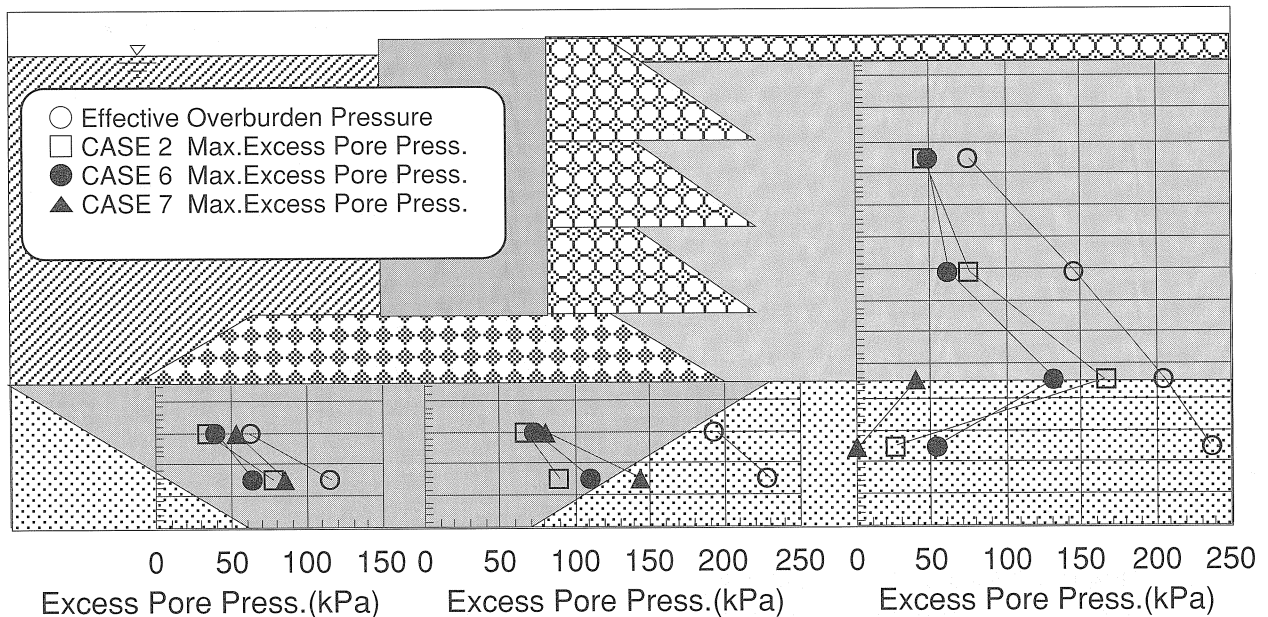
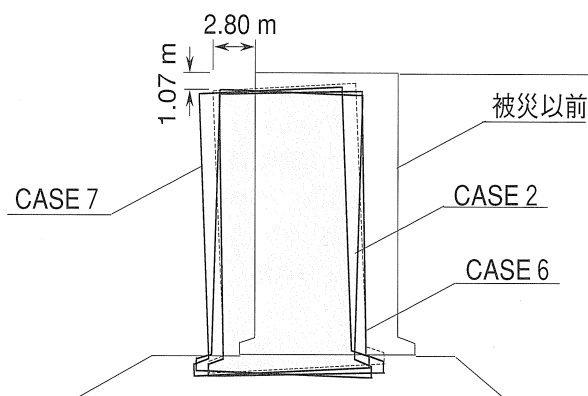


図-8 過剰間隙水圧と有効上載圧 (実スケール)⁴⁾

つぎに、ケーソン本体の移動による検討を行う。図一9にコンテナバースPC-1岸壁の被災前の状態を実線で示し、被災後に行われた現地調査により計測されたケーソンの移動状況を点線で示した。また、再現性実験において同一条件で行ったCASE 2、CASE 6、CASE 7の3ケースから得られた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スケールに換算して濃い実線で表示した。同図からケーソンの移動量は、現地被害の実測値と実験による変形量が比較的良い対応関係にある。この結果から実験で作製した模型は現地の状態を再現できたものと考えられる。さらに、用いた相似則の適応性が証明されたと解釈できる。



図一9 被災状況の実測値と実験値の比較²⁾

6. 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。今回の実験結果によりケーソンの変位に大きな影響を与えているのは、置換土層の軟化に伴う地盤のせん断変形であることが明らかになった。このことは、ケーソンは最初の数秒間に繰り返される大きな加速度で変位が生じ始め、その後続く小さな加速度の段階でより大きく変位していることより説明できる。また、被災形態としては、ケーソンとマウンドが一体となって、軟化した地盤に沈込みながら海側に移動している。これは、現地の測量の結果と整合性がとれており、設計段階では考慮されていない現象であった。

さらに、地表面の沈下量およびケーソンの移動量に関しては、実験による値と現地被害の実測値は良い対応関係にあり、行われた模型実験の精度と用いた相似則の適応性を示す結果となった。

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 菅野高弘室長から多大なご指導を頂きました。また、構造部地盤振動研究室井合進室長からは実験手法および結果について貴重な御意見を頂きました。紙面を借りて深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 菅野高弘・宮田正史・三藤正明・稲垣紘史・及川研・飯塚栄寿：平成7年兵庫県南部地震時の港湾・海岸施設の挙動に関する研究、海岸工学論文集、第43巻(2)、pp.1311-1315、1996
- 2) 菅野高弘・稲富隆昌・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の模型振動実験、第31回地盤工学研究発表会、2冊分の2、pp.1203-1204、1996
- 3) 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
- 4) H.Inagaki, S.Iai, T.Sugano, H.Yamazaki and T.Inatomi: Performance of caisson type quay walls at Kobe Port, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Soc, pp. 119-136, 1996
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 菅野高弘・三藤正明・及川研：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その6)ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験、港湾技研資料No.813、兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察、pp.207-252、1995.9