

## 兵庫県南部地震により被災したケーソン式防波堤に関する実験的研究

中原 知洋\* 猪野 健吾\*  
三藤 正明\*

### 要 旨

1995年1月17日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、地震直後港湾機能はほとんど麻痺状態に陥った。重力式構造物であるケーソン式防波堤も被害を生じた。被災形態は、防波堤法線の水平変位量は比較的小さく、沈下が卓越するものであった。そこで、被災メカニズムを検討する目的で水中型の大型振動台を用いて再現性実験を行った。その結果、ケーソン本体が沈下した原因は、ケーソン直下の置換層の軟化に伴って支持力が低下したためであることがわかった。本報告では模型振動実験の概要および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

兵庫県南部地震により、兵庫県、大阪府、徳島県の24港において大きな被害が生じ、神戸港は大半の施設が被災し、港湾機能は麻痺状態に陥った<sup>1)</sup>。重力式構造物であるケーソン式防波堤も被災した。その被災形態はケーソン本体の沈下が支配的であり、水平変位は小さかった。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、ケーソン式防波堤の被災メカニズムを検討するために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防波堤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、被災原因について考察を行う。また、実験で用いた相似則の適用性と模型振動実験の精度について併せて言及する。

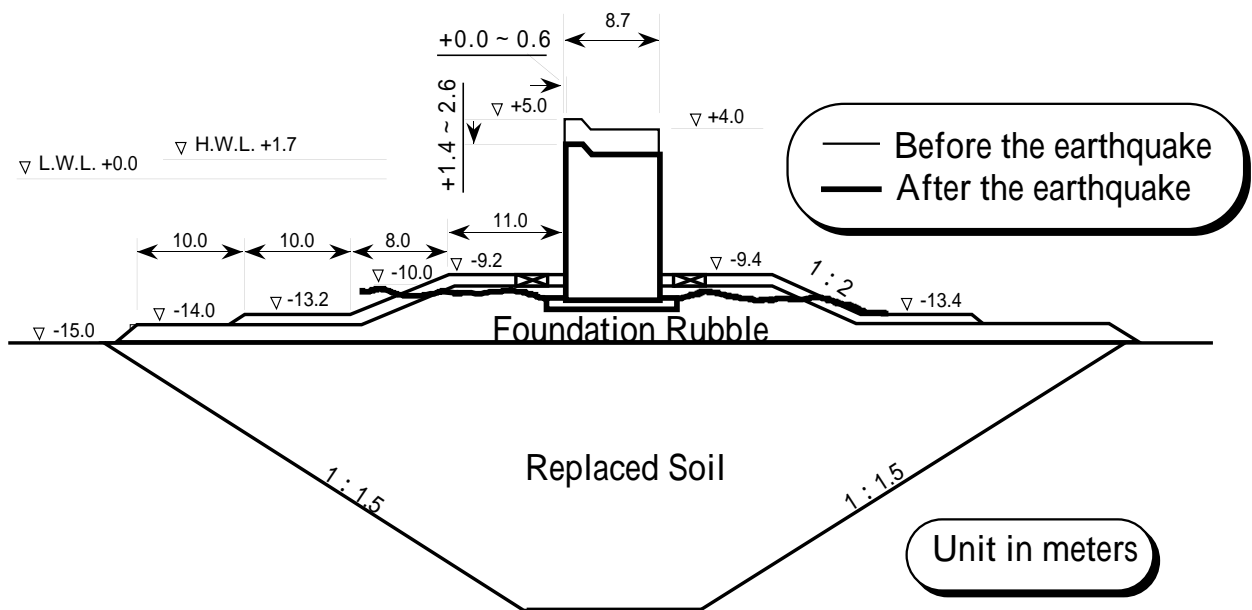


図 - 1 ケーソン式第7防波堤の標準断面と被災状況

\* 技術研究所

2. 被災形態

図-1に実験対象とした神戸港内の六甲アイランドの南に位置する第七防波堤の標準断面とその被災状況を示す<sup>2)</sup>。この防波堤の構造形式は、海底の軟弱な粘土層に床堀を施して置換土を投入し、その上に捨石を用いて基礎マウンドを施工した後に、ケーソンを据え付けたものである。置換土には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。被災状況は、防波堤法線の出入りは小さく、ケーソン間の目地の開きや段差も非常に小さかった。残留変位に関しては図から判断されるように、基礎捨石の崩壊に伴ってケーソン本体も大きく沈下するものである。その変位量は、最大残留沈下量は約2.6mであるのに対して、最大水平残留変位は約0.6m程度である。これより、防波堤の被災形態は沈下の方が支配的であり、置換層の支持力の低下に伴ってケーソン本体が沈下したものと考えられる。

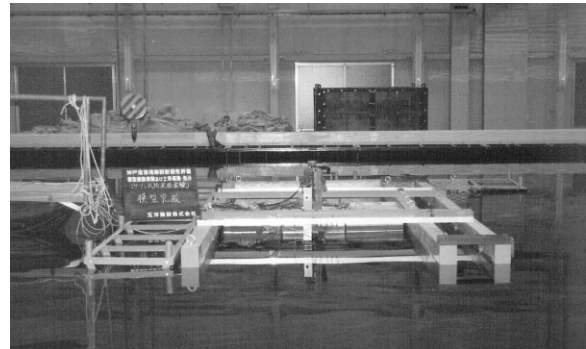


写真 - 1 実験模型

3. 模型振動実験概要

3.1 実験模型

ケーソン式防波堤の模型振動実験は、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大型振動台を用いた。これは、水中に建設されるケーソン式防波堤の地震時挙動をより忠実に再現するためである。図-2に実験に用いた実験模型の断面と設置した各種計器

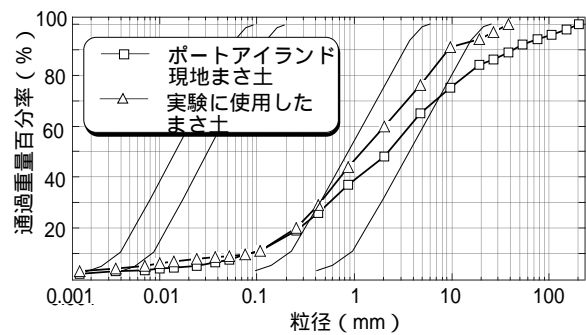


図 - 3 まさ土の粒径加積曲線

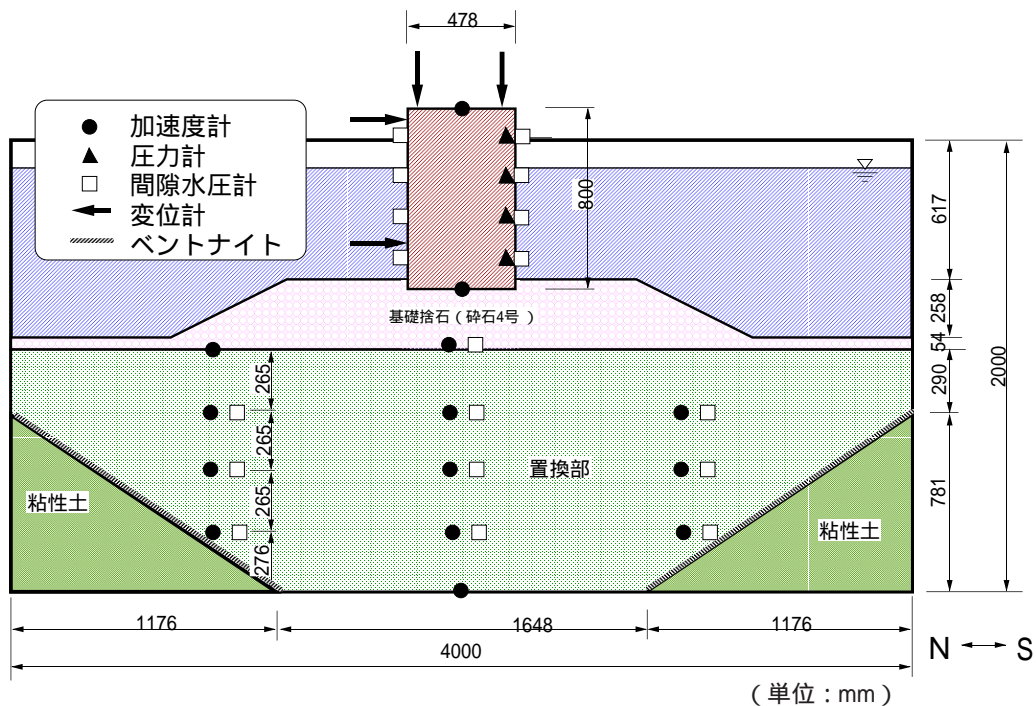


図 - 2 ケーソン式防波堤の模型断面

(加速度計、間隙水圧計、圧力計、変位計)の設置位置を併せて示す<sup>3)4)</sup>。この模型は、対象とした第七防波堤を長さに関する縮尺比を1/18として作製したものである。実験模型の作製手順としてはまず、振動台上に高さ150cm×幅350cmの2枚の鋼製枠を間口150cmになるように固定する。つぎに、相馬硅砂5号を締め、その表面にベントナイトを散布して粘性土地盤を作製する。その後、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の30mmフルイ通過分を用いて水中落下法により置換層を作製する。さらに、砕石4号を投入して整形をほどこして基礎捨石部を完成させ、計測用ケーソン模型1函とその両側にダミーケーソン模型2函の併せて3函を設置する。図-3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。写真-1に模型作製終了後の状況を示す。

3.2 計測項目

模型振動実験では図-2示すとおりケーソン本体と置換層内部に計測器を設置した。また、置換層と基礎捨石の表面に計測用のターゲットを配置した。これは、現地の被災調査では十分把握できない地震時における地盤内の応答加速度や間隙水圧を計測するとともに、被災の原因と考えられる置換層の変形状態を模型振動実験により把握するためである。模型振動実験における計測項目としては、ケーソン本体の天端と下端に加速度計を設置し、地震時の応答加速度やロッキング現象を計測するとともに、水平および鉛直にそれぞれ2個の変位計を設置してケーソンの変位量を把握した。また、前面と背面にそれぞれ間隙水圧計を設置して地震時にケーソンに作用する動水圧を計測した。置換層内部には、地盤の軟化により生じる過剰間隙水圧を計測するためにケーソン直下とその前後に間隙水圧計を設置するとともに、同深度の置換層内の応答加速度を計るために加速度計を併せて設置した。計測用ケーソン模型にはロードセルを搭載し、地震時の外力を計測した。置換層と基礎捨石部に適宜配置した計測用ターゲットは、加振前後に計測を行い残留変形量を把握した。

3.3 入力波形

模型振動実験に用いた入力波を図-4に示す。この波は、神戸市開発局がポートアイランド地区K.P.-28mレベルで観測を行った強震記録により計測されたものである。実際に模型振動実験で入力した波は、加速度はそのままの値を用いるが、時間スケールを相似則にしたがい1/9に圧縮した波形である。さらに、入力は現地の地震時の状況を再現するために、法線直角方向に

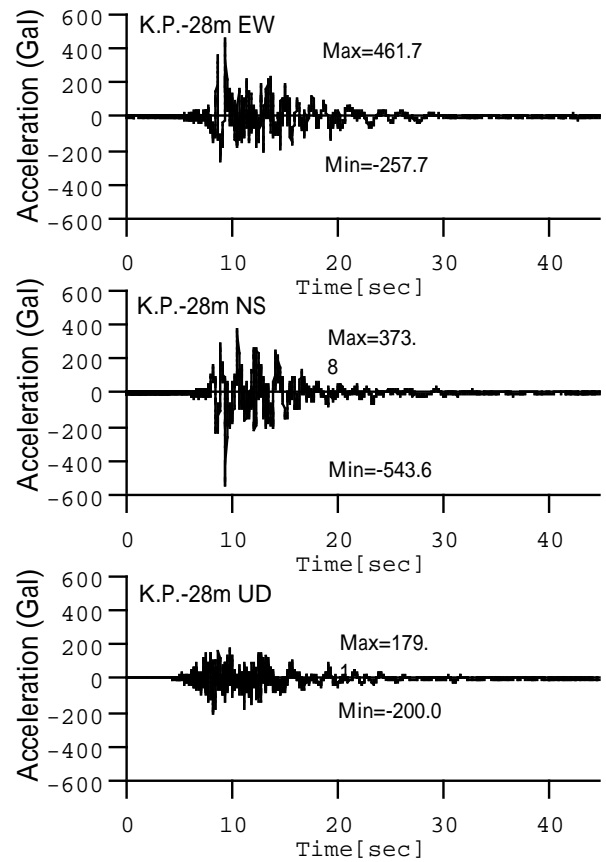


図-4 入力波形

表-1 相似則

パラメータ	実物/モデル	縮尺比
長さ		17.0
密度	1	1.0
時間	**0.75	8.4
応力		17.0
間隙水圧		17.0
変位	**1.50	70.1
速度	**0.75	8.4
加速度	1	1.0

NS成分、法線方向にEW成分、鉛直方向にUD成分を用いた3成分同時加振した。

3.4 相似則

模型振動実験の縮尺比は、地盤を土粒子と水との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<sup>9)</sup>に従って決定した。用いた各物理量の縮尺比を表-1に示す。

4. 実験結果

模型振動実験で計測されたケーソンと基礎捨石および置換部の残留変位量を、相似則にしたがい実スケールに換算した結果を図-5の□印で示す。これにより防波堤の被災形態は、ケーソンが基礎捨石と一体となって置換層にめり込みながら沈下することが明らかになった。同図には、現地調査で計測されたケーソンの沈下や基礎捨石部の残留変形状況も実線でプロットしている。模型振動実験と現地調査の結果比較すると、模型振動実験の結果は現地被災状況と概ね良い対応関係にあるものと判断される。これは、実施した模型振動実験の精度および用いた相似則の適用性を示すものと考えられる。

模型振動実験で計測されたケーソンの変位と加速度、置換部の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を図-6に示す。時刻歴のスケールは表-1に示した相似則に従い実スケールに換算した。ケーソンの沈下の時刻歴(D3、D4)は、概ね10秒頃から沈下を生じ始め20秒程度まで徐々に増加し、約2.6mの残留沈下量を生じている。

一方、水平変位(D1、D2)の時刻歴は、沈下とは異なり時間の経過とともに徐々に増加する傾向は見られず、最大0.6m程度変位しているが最終的には0.3m程度の残留変位を示した。つぎに、置換層内の応答加速度は、地表面に近づくにしたがい小さくなっている。これは地盤の軟化の影響によるものと考えられる。また、

応答加速度の低減は前面部(A12、A13)と比べて直下部(A3、A4)の方が大きい傾向を示している。

さらに、置換層の過剰間隙水圧の上昇に関しては、前面部(W9、W10)と直下部(W2)は加振開始3秒ほどで最大値に達した後で残留水圧を生じているが、直下部(W3)の過剰間隙水圧の上昇は20秒程度を経て徐々に増加している。時刻歴の図中の実線は有効上載圧を示したもののだが、前面部(W9、W10)では水圧比がほぼ1.0であることから完全液化化またはそれに近い状態であったものと考えられる。直下部(W2、W3)はケーソンの重量の影響による有効上載圧の増加の影響で、水圧比は前面部と比較して半分程度の値を示しており、前面部と比べて軟化の程度は小さいと思われる。しかし、前面部と同深度の応答加速度の最大値を比較すると、直下部の値が低減している。これは、ケーソンの重量による初期せん断力の影響によるものと判断される。置換層の過剰間隙水圧の最大値分布と有効上載圧を図-7に示した。

5. 被災メカニズムの検討

現地調査と実施した模型振動実験の結果から、ケーソン式防波堤の被災は、沈下が支配的なことが明らかになった。そこで、被災メカニズムの検討を行うために模型振動実験で計測されたケーソンの沈下(D3、D4)の時刻歴と置換層内の応答加速度および過剰間隙水圧の時刻歴の比較検討を行った。つぎに、ケーソン本体の沈下(D3、D4)の時刻歴と置換部内の過剰間隙水圧(W2、W9、W10)の時刻歴に着目する。置換層前面部(W9、W10)の過剰間隙水圧は、加振波の主要動が作用する10秒周辺で急激に上昇して加振の終了とともに残留水圧を生じており、沈下との相関は小さいと考えられる。それに対して、ケーソン直下の置換層内の過剰間隙水圧(W3)は加振終了後から約20秒程度をかけて

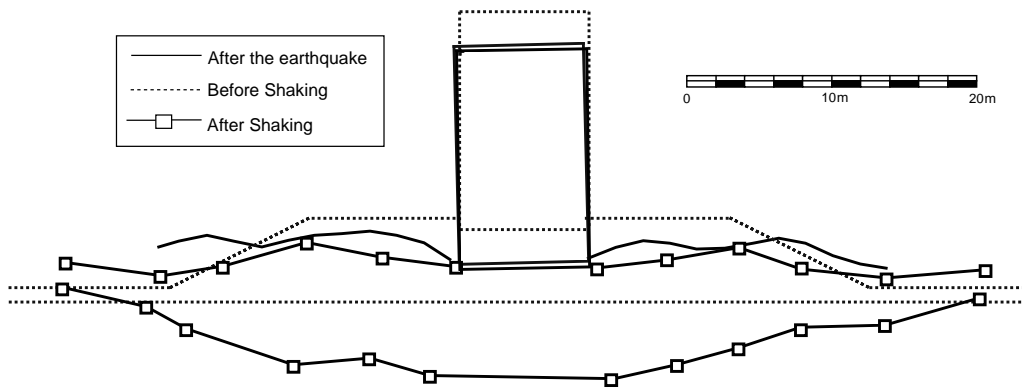


図-5 ケーソン式防波堤の残留変位に関する実験結果(実スケール)

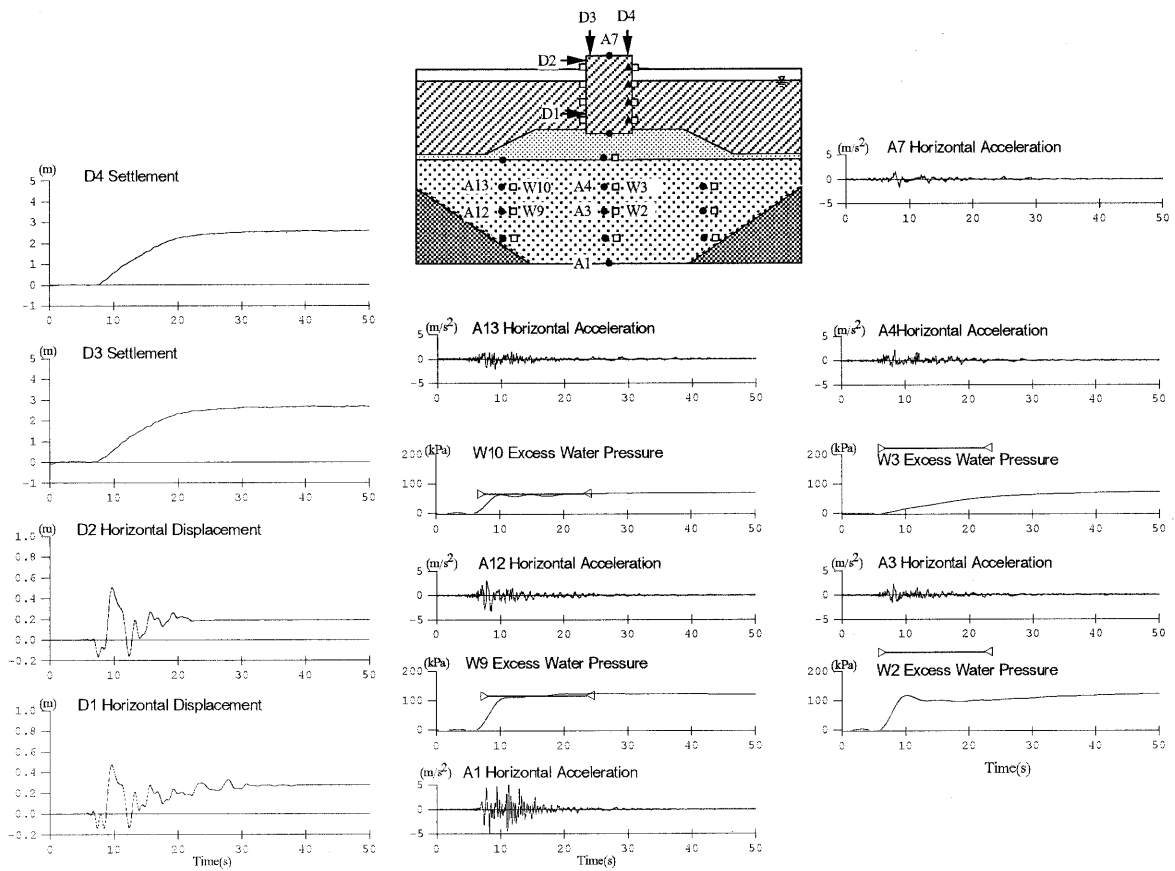


図 - 6 応答加速度、過剰間隙水圧、変位に関する実験結果（実スケール）

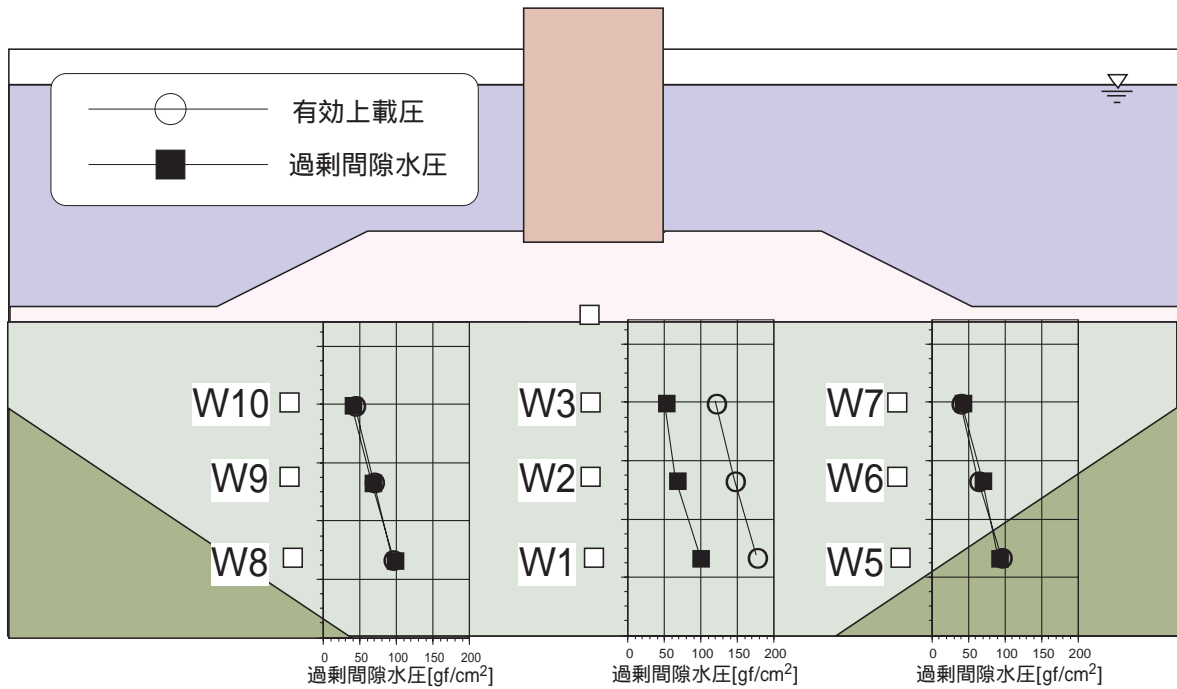


図 - 7 過剰間隙水圧の最大値と有効上載圧（模型スケール）



時間の経過とともに徐々に上昇しおり、上昇の過程は沈下の時刻歴と同様の傾向が見られる。これから、ケーソン本体の沈下(D3、D4)とケーソン直下置換部内の過剰間隙水圧(W3)との間には強い相関があると判断される。

以上の検討結果から防波堤の被災メカニズムとしては、過剰間隙水圧の上昇が地盤の軟化を表していることから、ケーソン直下の置換層の軟化に伴って支持力が低下したことにより、ケーソンが沈下したものと判断される。

#### 5. まとめ

兵庫県南部地震により、重力式構造物であるケーソン式防波堤も被災した。ケーソン式防波堤の被災形態は、防波堤法線の水平移動は比較的小さく、沈下が卓越した。そこで、被災メカニズムを検討するために水中型の大型振動台を用いて模型振動実験を行った。実験により計測されたケーソン直下の過剰間隙水圧の時刻歴は、ケーソンの沈下応答と良い対応が見られた。これより、ケーソン式防波堤の被災形態であるケーソン本体の沈下は、ケーソン直下の置換層の軟化に伴って支持力が低下したことにより生じたものと判断される。また、ケーソンの残留変位に関して現地計測と実験を比較検討した結果、両者は概ね良い対応関係にあることから、実施した模型振動実験は現地の被災状況を良く再現し、用いた相似則の適用性も示す結果となった。

#### 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、構造部構造振動研究室菅野高弘室長、宮田研究官からは多大なご指導を頂きました。また、構造部地盤震動研究室 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) 運輸省港湾技術研究所編：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告、No.857、1997.3
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：地震対策に関する港湾技術セミナーテキスト、1995.10
- 3) 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、Vol.43、pp.1311～1315、1996
- 4) 菅野高弘・三藤正明・稲富隆昌・宮田正史：兵庫県南部地震時におけるケーソン式防波堤の被災メカニズムに関する模型振動実験、第24回地震工学研究発表会講演論文集、Vol.2、pp.729～732、1997
- 5) 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.