

重力式ケーソン岸壁に作用する地震時土圧に関する模型実験

宮田 正史*・菅野 高弘**・森田 年一***

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震により神戸港の港湾施設は甚大な被害を受けた。既に筆者らは、同港の代表的な港湾施設である重力式ケーソン岸壁の被災原因究明を目的として、大型水中振動台を用いた模型振動実験を実施し、その被災原因が設計震度を大きく上回る地震力、ケーソン背後地盤の液状化の発生およびケーソン直下の置換土の過剰間隙水圧上昇に伴う軟化によることを示した(菅野ら, 1996)。さらに、ケーソンを直接支持する基礎捨石マウンドの直下地盤が強固でない場合、捨石マウンドは基礎地盤にめり込む形で被災していることが明らかになった。この変形モードは、設計では想定されていない形態ではあるが、現地被災と模型実験は整合性のある結果となっており、ケーソン岸壁の被災再現に模型振動実験が有効であることが示されている。

一方、通常のケーソン式岸壁の設計において、地震時土圧は物部(1924)・Okabe(1924)が提案した地震時土圧式を適用している。周知のとおり、同式は震度法をクーロン土圧の土くさび論に適用したものである。港湾施設の設計では、対象断面でケーソン背後の地盤が液状化すると判断された場合、対象地盤に液状化の発生がないように対策を実施することを基本としており、地震時土圧の算定は改良後の地盤に先に示した土圧式を適用している。しかし、液状化対策を実施していない既設岸壁や極大地震動が作用した場合に、ケーソン背後地盤では液状化の可能性があること、また今後被災予測のための変形照査の重要性が益々高くなることを鑑みると、液状化時の土圧の特性を把握することは非常に重要である。

このような背景のもと、本研究では重力式ケーソン岸壁を対象に大型水中振動台を用いた模型振動実験を行い、加振前後および加振中のケーソンに作用する外力の特性を把握することを目的としている。ケーソン模型に作用する外力の計測は、地震慣性力・ケーソン背後土圧・

ケーソン底面摩擦等について行われている。背後地盤が液状化する場合と液状化しない場合の2種類の実験を行っており、ケーソン背後地盤の液状化がケーソン変形状況に及ぼす影響を比較・検討している。

2. 水中振動台実験概要

(1) 模型断面および入力地震動

実験の対象断面としては神戸港ポートアイランドの図-1に示す岸壁を選定している。模型地盤は現地断面を忠実に再現しており、縮尺は1/17としている(図-2)。測定計器は、地盤中に加速度計・間隙水圧計を、ケーソン函体に変位計・加速度計を設置している。またケーソン背面および底面に荷重板を設置し、ケーソンに作用する荷重を直接計測している。

ケーソンの背後地盤および基礎地盤の材料は、現地から直接掘削した埋立土(まさ土)を使用している。但し、設計上想定している地震時のケーソンの滑動を再現するために、基礎地盤のまさ土にセメントを重量比で0.2%混入し、固化させている。固化後の基礎地盤の一軸圧縮強度は19.21 KPa (0.196 Kgf/cm²)である。

実験は、背後地盤の液状化発生の有無がケーソン変形状況やケーソンに作用する背後土圧に及ぼす影響を調べるため、背後地盤が液状化する場合(CASE 3)と背後地

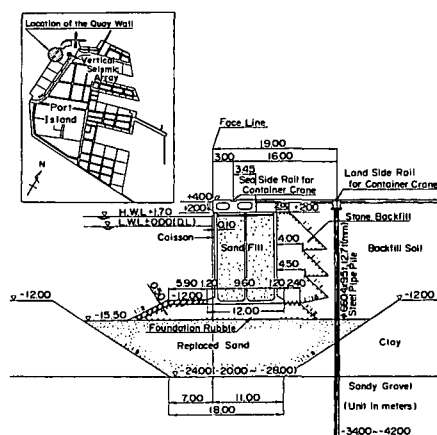


図-1 模型実験対象のケーソン式岸壁標準断面図

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 構造部構造振動研究室研究員

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部構造振動研究室室長

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 構造部構造振動研究室研究員

盤の締固めを行い液状化の発生を抑えた場合 (CASE 4) の2ケースを行った。各々の地盤は水中落下および乾燥状態における締固めにより製作している。SWEEP加振により求めた背後地盤の初期せん断波速度は、各々62 m/s, 100 m/sである。

模型実験の入力地震動としては、岸壁の近隣に展開されている強震観測鉛直アレー (神戸市開発局) において、兵庫県南部地震の際に観測された KP-28 m 地点の観測地震波を用いている。

(2) ケーソン模型に作用する荷重の測定

ケーソン模型は、加速度計・土圧計・荷重計を搭載した計測用ケーソンとその両側に設置するダミーケーソンの計3函から構成される。模型サイズは高さ80 cm, 接地断面50 cm×50 cmであり、これに中詰砂を入れ現地ケーソンの比重と合わせている。

模型の背面および底面には荷重板を設置し、加振前および加振中のケーソン背面に作用する土圧・ケーソン底面に作用する摩擦力の計測を行う (図-3)。図中の FV 1, 2, 3 はケーソン背後地盤の土圧によるケーソン背面に作用する鉛直荷重、同様に CH はケーソン底面に作用するせん断荷重, CV はケーソン底面の鉛直荷重の計測を行っている。鉛直荷重計は圧縮側を正、底面のせん断荷重計はケーソン底面の荷重板に陸側向きのせん断力が作用する方向を正としている。図中ではケーソン前面海側 (左側) にも荷重板が取り付けられているが、計測は行っていない。

3. 実験結果および考察

(1) 模型実験の被災状況

模型ケーソンの変形状況を図-4に示す。但し、図中のスケールは井合 (1989) の提案した1g場における模型振動実験に関する相似則を適用し、現地スケールとしている。ケーソン水平変位はCASE3で約2.0 m, CASE4で約1.35 mとなっており、背後地盤の強度の差が、ケーソン水平変位に大きな影響を与えることが示された。また、基礎地盤を固化しているため、ケーソンの被災形態は滑動が支配的である。

(2) 加速度・過剰間隙水圧比・ケーソン変位の応答

CASE 3の場合、ケーソンの滑動開始時刻である時刻約1.0秒に背後地盤の過剰間隙水圧比 (以下、水圧比と呼ぶ) の上昇 (W 8) が生じていることから、背後地盤の液状化程度とケーソン水平変位の相関は非常に高いことが示された。また、ケーソン滑動開始後の時刻約1.0秒から1.4秒の区間では、ケーソンが海側に変位しているため、背後地盤は水平方向の伸長を受け、背後地盤の水圧比は一時減少している (W 8)。この結果は、背後地盤がケーソン背面の海側移動に追随しており、地盤が海側に向

かって側方流動的な挙動をしていることを示唆している。一方、ケーソン前面の基礎地盤中の水圧比 (W 5) は、ケーソンの滑動速度が小さくなる時刻約1.5秒まで激しく変動し、部分的に初期静水圧よりも水圧が低下している。これは、W 5 測点付近の地盤に大きな荷重が作用していることを示唆している。

CASE 4の場合、ケーソン前面の基礎地盤の水圧比 (W 5) の応答はCASE 3と同様であり、大きな荷重が作用していると考えられる。一方、背後地盤の水圧比の応答 (W 8) はCASE 3とは異なり、変動成分は持たずに徐々に水圧比が上昇している。ケーソンの挙動はロッキング的な運動をしている。この結果は、背後地盤が軟化し地盤がケーソン背面に追随している場合 (CASE 3) とは逆に、背後地盤はケーソン背面に追随していないため

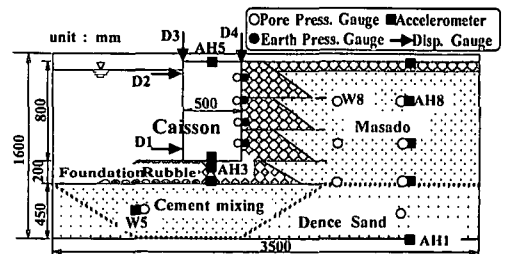


図-2 模型断面および計測器位置図

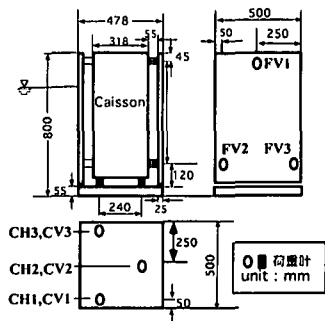


図-3 ケーソン模型断面および荷重計位置図

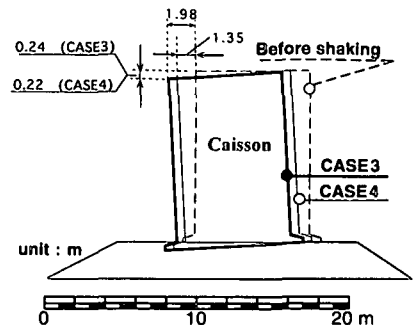


図-4 ケーソン式岸壁の模型変状 (現地スケール)

と考えられる。すなわちケーソンが海側に最大傾斜した後においても、陸側に戻れる余裕が有るため、変位量は小さく抑えられている。また、ケーソン天端の加速度はCASE 4の方が全体的に大きく、ケーソン背後の地盤条件がケーソンの応答加速度に及ぼす影響が大きいたことがわかる。背後地盤では液状化のため、CASE 3の方が加速度レベルは小さくなっている。

(3) 加振前後のケーソンに作用する荷重分布

ケーソン(重量 2830 N)に作用する加振前の荷重分布を図-6に示す。なお、図中のFV 23は荷重計FV 2とFV 3の合力を示す。CV 23およびCH 23についても同様である。CASE 4の背後地盤は3段階の高さに分けて、埋立および締固めを行っている。背後地盤を締固めているため、初期土圧はCASE 4の方が大きくなる結果となっている。両者の底面せん断力および鉛直力は、加振前においても海側が大きくなるように偏っている。従って、ケーソン設計の際には、特に海側の基礎地盤の強度に注意を払う必要が有る。

ケーソンに作用する加振後における、初期荷重からの増分荷重の分布を図-7に示す。CASE 3の場合、液状化した背後地盤がケーソン背面に追随し、ケーソンに寄り

掛かる状態で停止しているため、加振後に大きな残留土圧が生じている。また、本実験の場合、地盤高に関係なく残留土圧は増加している。同時に底面のせん断力も背後土圧を支えるために増加している。底面の鉛直荷重については、ケーソン海側では著しく増加、陸側では減少している。従って、ケーソンは前傾したまま静止しており、加振後のケーソンは不安定な状態にある。

これに対して、CASE 4では背後地盤の液状化は発生していないため、先に述べたように背後地盤はケーソンの海側変形には追従していない。その結果、背後地盤は加振後においてケーソン背面には寄り掛かってはおらず、初期土圧より減少している。同様に底面せん断力も減少している。また、ケーソン底面の鉛直荷重はCASE 3に比べると、荷重変化量は小さい。従って、背後地盤を液状しないように改良すると、地震中ではもとより、地震後の施設の安全性も確保されることが明らかになった。

(4) 加振中のケーソンに作用する荷重分布

ケーソンが海側に向かって大きく変形している時刻における荷重分布を図-8に示す。選定した時刻およびその時刻におけるケーソン水平変位量は図中に示すとおりである。この結果より、ケーソンが滑動している際の荷

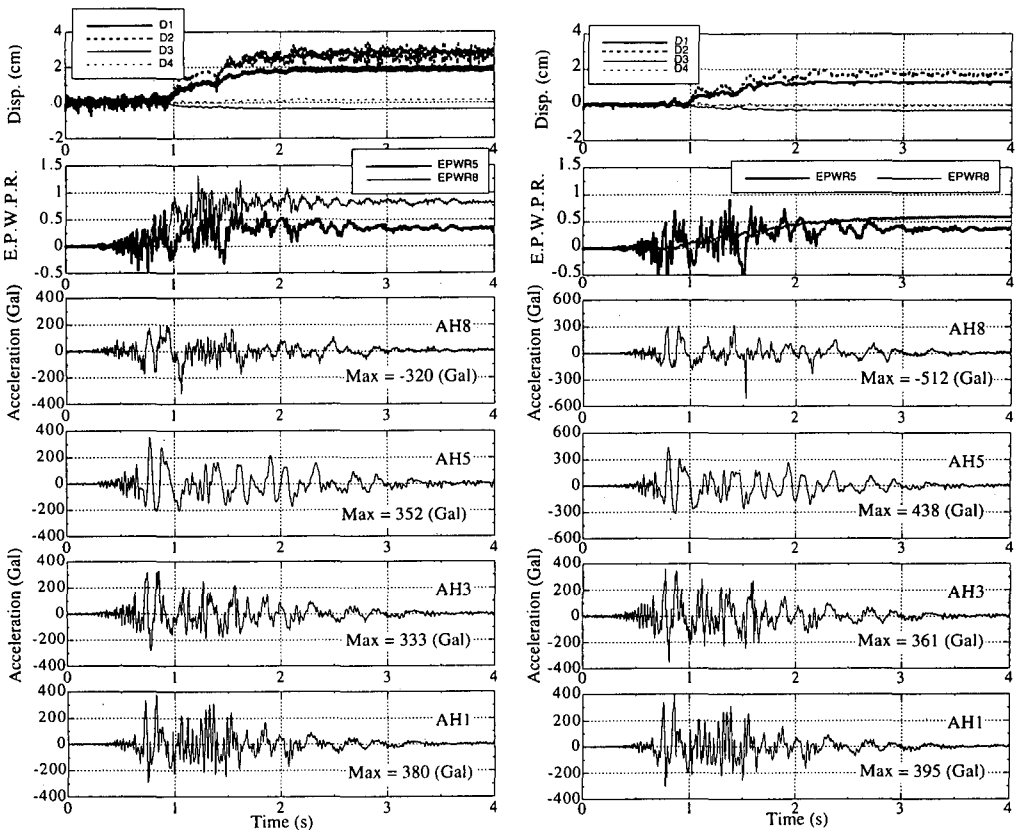


図-5 模型実験のケーソン変位・過剰間隙水圧比・加速度の時刻歴(左: CASE 3, CASE 4)

重分布は、背後地盤の液状化の有無に関係なく、同様の荷重分布となることが明らかになった。特にケーソン海側の底面に作用するせん断力および鉛直力は非常に大きな値を有しており、ケーソンは海側につまずいた状態で滑動していることが確認された。

(5) 加振中のケーソンに作用する荷重の時刻歴

加振中のケーソンに作用する荷重およびケーソン海側傾斜角の時刻歴を図-9に示す。CASE3の場合、滑動中のケーソンは一度海側に傾斜すると、その後大きく陸側に戻るような挙動はしていない。これは、先述したようにケーソンの海側変位に伴い液状化した背後地盤がケーソン背面に追従しているためである。従って、背後地盤が液状化している場合、ケーソンは前傾したまま水平移動している。また、ケーソンの滑動中はケーソン底面の海側に、せん断力および鉛直力が集中的かつ継続的(時間)に作用していることから、基礎マウンドの海側法面付近およびその直下地盤には過大なせん断応力が一方向に作用していると考えられる。従って、この部分の強度

が低いとケーソン変形量は非常に大きくなることが予想される。一方、時刻歴の後半部分では背後地盤の加速度は小さいが、背後土圧は加速度変動に応じて、非常に大きな値を有している。しかし、この区間ではケーソン慣性力が小さいため、ケーソンの滑動量は極く小さなものとなっている。

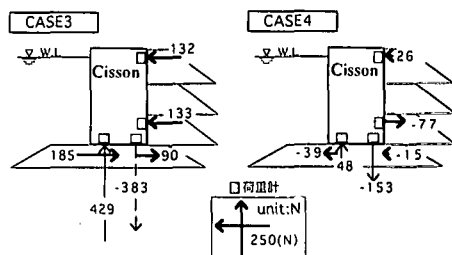


図-7 加振後の荷重計による土圧増分の分布

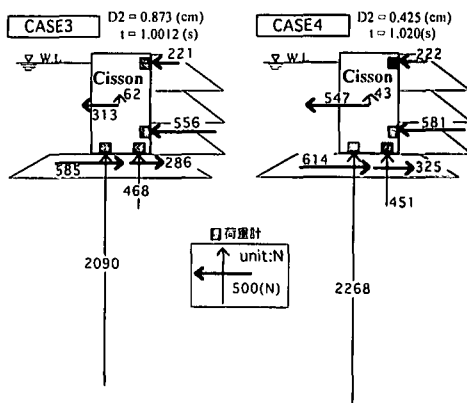


図-8 ケーソン滑動中の荷重分布

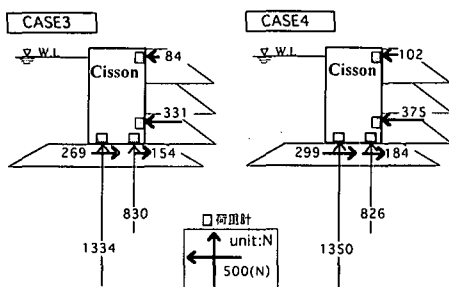


図-6 加振前の荷重計による土圧分布

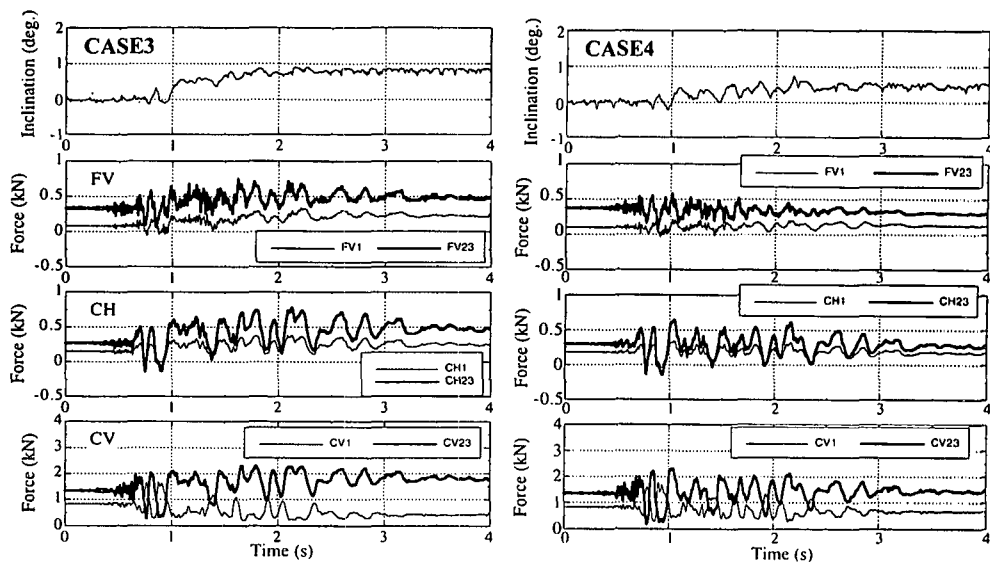


図-9 ケーソン海側傾斜角および荷重計の時刻歴

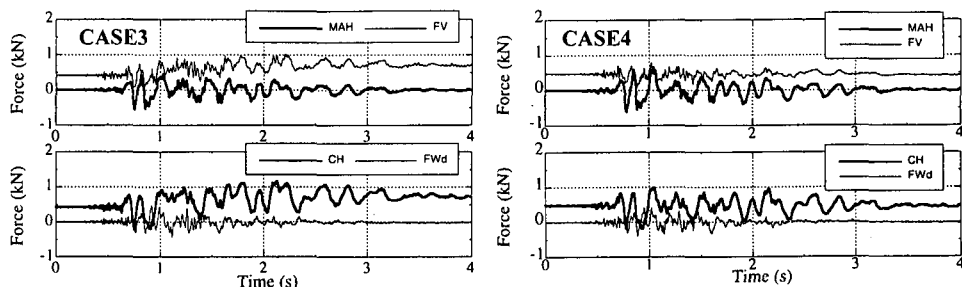


図-10 ケーソンに作用する水平慣性力・背後土圧合力・底面せん断合力・前面動水圧の時刻歴

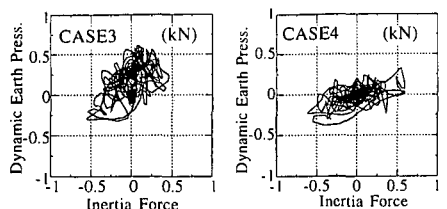


図-11 ケーソン慣性力とケーソン背後動圧の関係

CASE 4 の場合、ケーソンは海側に大きく傾き、若干陸側に戻り、また陸側に大きく傾くような挙動をしている。背後地盤の土圧は継続的に作用しておらず、またその値は液状化時の土圧に比較して小さいため、ケーソン変位は小さいものとなっている。

(6) ケーソンに作用する水平方向の外力

ケーソン水平慣性力 (MAH)、背後土圧合力 (FV)、底面せん断合力 (CH) およびケーソン前面に作用する動水圧 (FWd) の時刻歴を図-10 に示す。力の向きは、慣性力および背後土圧に関しては海側を正、底面せん断および動水圧に関しては陸側を正としている。但し、ケーソン前面に作用する動水圧は、ケーソンに作用する水平方向外力の釣合いより算定しており、実測値ではない。

CASE 3 と CASE 4 の違いは、既に述べたように CASE 3 の液状化土圧が継続的に海側に作用していること、およびその値が大きいことである。一方、ケーソンに作用する水平慣性力を見ると CASE 4 の方が大きくなっており、ケーソンの被災程度とは逆の傾向となっている。この結果は、ケーソンに作用する慣性力だけではケーソンの変形量は予測できないことを示唆している。ケーソン前面の動水圧はケーソンの水平慣性力とほぼ同位相（この場合、符号が逆であることに注意）となっているので、ケーソンに海側慣性力が作用した場合には、その逆方向、すなわち陸側にケーソンを押戻す方向に動水圧が作用していることになる。但し、動水圧に関しては荷重板による測定値ではないため、これ以上の検討は差し控えたい。

最後にケーソン水平慣性力と背後動土圧の関係を図-11 に示す。CASE 3 の液状化地盤では、ケーソン水

平慣性力と背後土圧の位相は一致しており、この2つの外力はケーソンの滑動にとって常に危険側に作用している。今回の実験では、背後地盤が液状化しない CASE 4 の場合も、ケーソン慣性力と土圧の位相は同位相の傾向となっている。しかし、乾燥砂を用いた振動実験（風間ら、1990）では、土圧と慣性力は逆位相の結果となっている。また、小濱ら（1996）が水中地盤で行った振動実験においては、背後地盤を十分締固めた場合には、慣性力と土圧は逆位相の結果が得られている。従って、地盤が液状化しない場合の慣性力と土圧の位相については、十分な検討が必要である。

4. おわりに

大型水中振動台を用いたケーソン模型振動実験を行った結果、加振前後および加振中のケーソンに作用する外力の特性が明らかになった。今後は、地震時ケーソンに作用する外力およびその位相特性に焦点をあてた実験・解析を進める予定である。ケーソン設計に、地震時の外力（液状化土圧も含む）とその位相特性を正確に評価できるようにすること、およびその外力特性に基づくケーソン変形照査を最終目標としている。

参考文献

- 風間基樹・稲富隆昌・大塚幸治 (1990): ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験とその解析, 港研報告, 第29巻, 第2号。
- 小濱英司・三浦均也・岡 宣克・笹島隆彦・大塚夏彦 (1996): 重力式岸壁の地震時挙動の振動台実験, 第31回地盤工学研究発表講演集, pp. 1199-1200。
- 菅野高弘・宮田正史・三藤正明・稲垣紘史・及川 研・飯塚英寿 (1996): 平成7年兵庫県南部地震時の港湾・海岸施設設の挙動に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1311-1315。
- 物部長穂 (1924): 地震上下動に関する考察並に振動雑論, 土木学会誌, 第10巻, 第5号, pp. 1063-1094。
- Sabro Okabe (1924): General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Wall and Dam, 土木学会誌, 第10巻, 第6号, pp. 1277-1323。
- Susumu Iai (1989): Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1 g Gravitational Field, Soils and Foundations, Japan Soc. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 29, No. 1, pp. 105-118。