

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個から構成される。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 CASE 3 で約 2.0 m、CASE 4 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

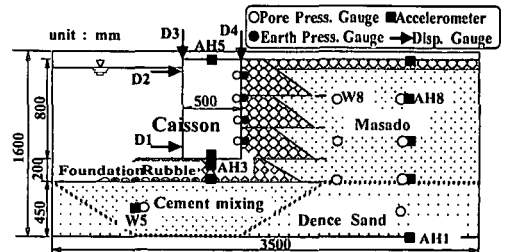


図-2 模型断面および計測器位置図

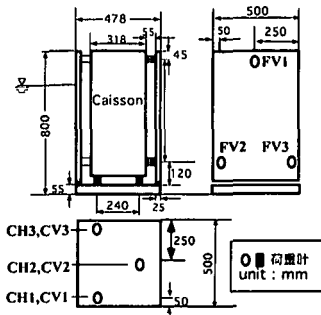


図-3 ケーソン模型断面および荷重計位置図

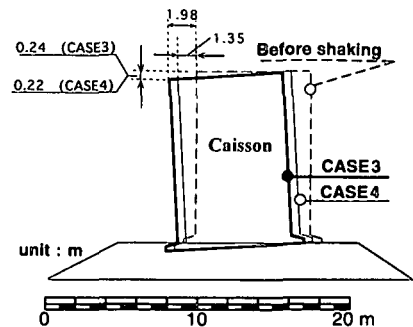


図-4 ケーソン式岸壁の模型変状 (現地スケール)

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

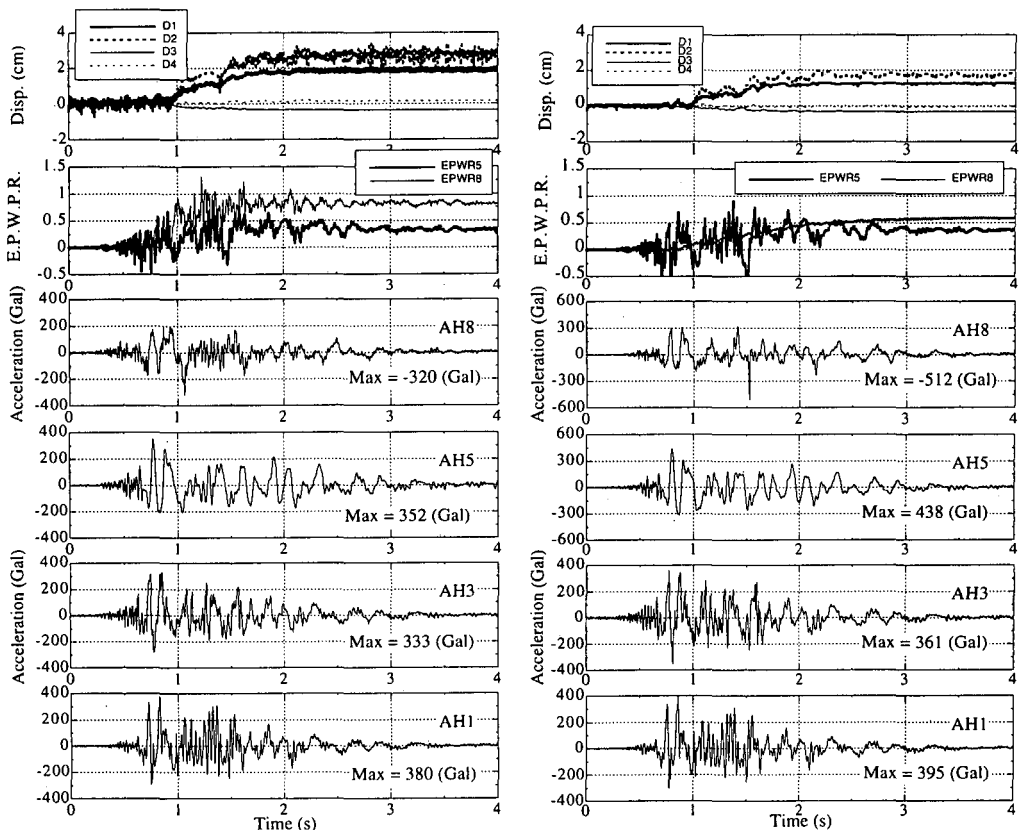


図-5 模型実験のケーソン変位・過剰間隙水圧比・加速度の時刻歴（左：CASE 3, CASE 4）

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随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。

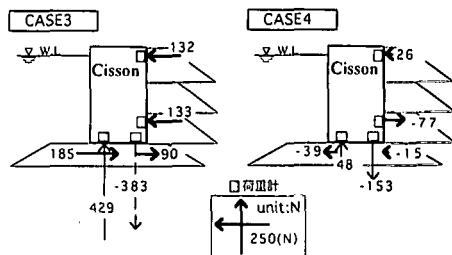


図-7 加振後の荷重計による土圧増分の分布

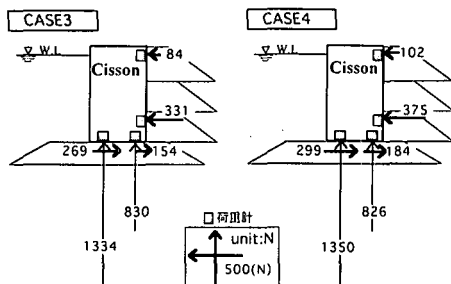


図-6 加振前の荷重計による土圧分布

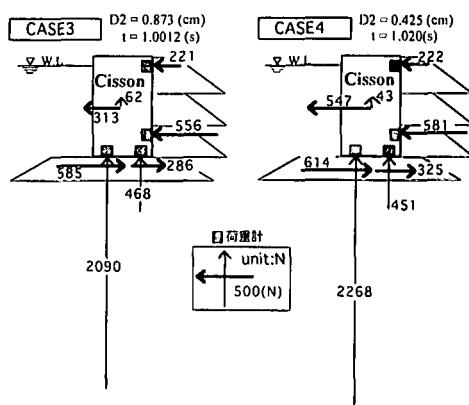


図-8 ケーソン滑動中の荷重分布

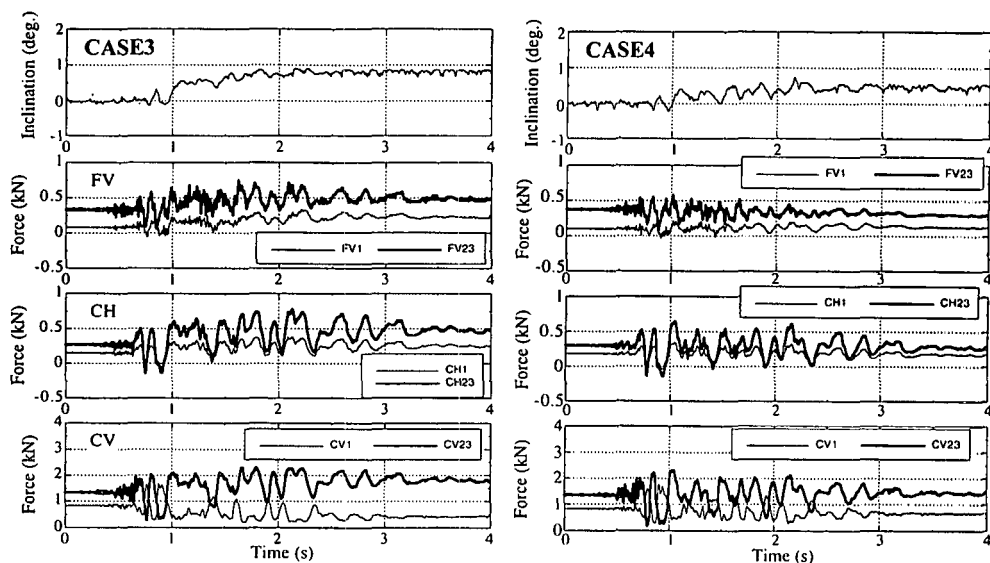


図-9 ケーソン海側傾斜角および荷重計の時刻歴

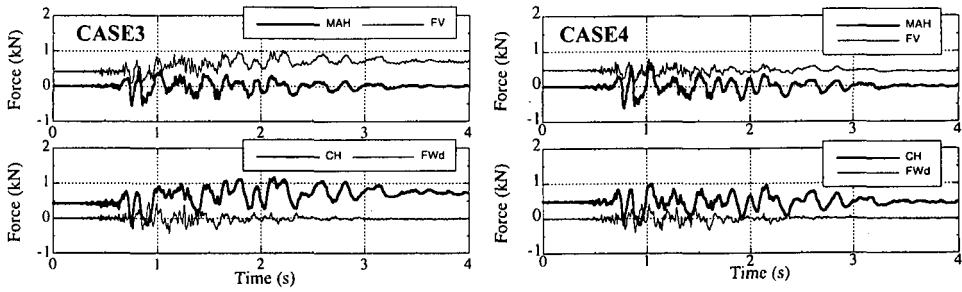


図-10 ケーソンに作用する水平慣性力・背後土圧合力・底面せん断合力・前面動水圧の時刻歴

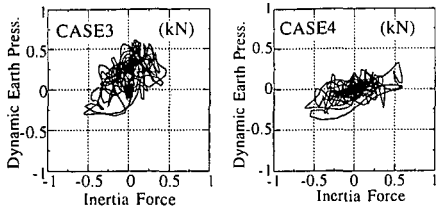


図-11 ケーソン慣性力とケーソン背後動圧の関係

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 の液状化土圧が連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, 土木学學會誌, 第 10 巻, 第 5 號, pp. 1063-1094。
- Sabro Okabe (1924): General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Wall and Dam, 土木学學會誌, 第 10 巻, 第 6 號, 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。