

# レベル2地震動入力時のケーソン基礎の 模型振動実験

岡本晋<sup>1</sup>、坂下克之<sup>2</sup>、福嶋研一<sup>3</sup>、志田智之<sup>3</sup>、立石章<sup>3</sup>

1 正会員 博士 (工学) 大成建設技術研究所土木研究部 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)  
2 正会員 大成建設技術研究所土木研究部 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)  
3 正会員 工修 大成建設土木設計第一部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

レベル2地震動入力時、ケーソン基礎に作用する外力の特性を調べるため、乾燥砂地盤内に設置した模型ケーソンの振動実験を実施した結果、以下の点が明らかになった。①大きな地震動が作用した場合、ケーソン側面および底面に作用する圧縮側の土圧は上載圧より大きく、土圧と同時に大きなせん断応力を受ける。②ケーソン側面および底面が引張を受ける時、土圧がゼロとなり、せん断応力も小さくなる。③ケーソン底面に作用する地震時増分土圧の最大値は、ロッキングに伴うケーソンの回転角と相関が大きい。④ケーソンの加振方向に直角な面および底面には、周辺地盤から大きなせん断応力が作用する。

*Key Words : Level 2 Earthquake, Caisson, Shake table test, Earth pressure, Shear stress, Dynamic behavior*

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災以後、土木構造物の耐震設計において、いわゆるレベル2地震動<sup>1)</sup>の影響を考慮する必要性が指摘されており、橋梁等の構造物基礎を対象とした設計手法が既に提示されている<sup>2)</sup>。しかし、これらの設計法においても、地盤～構造物間の相互作用を忠実に考慮した外力の評価手法は明示されてはいない。

そこで、本報では模型地盤中にケーソンを設置し、レベル2クラスの地震動を入力した振動実験を実施し、大きな地震時に非線形化する地盤内に建設されるケーソン基礎の基本的な地震時挙動を把握し、強震時の作用外力を検討した結果を報告する。

## 2. 実験方法

### (1) ケーソン基礎模型および上部工模型

原型として、「道路橋の耐震設計に関する資料」<sup>3)</sup>のケーソン基礎を選んだ。基礎の重量と基礎により排除される土の重量の比がほぼ原型と一致するように基礎側面および底面を19mmの鋼板で製作した。ケーソンの平面形状は0.5m角で、高さを1.1mとした。ただし、地中に埋設される部分は1.0mとした。また、砂地盤～基礎間の摩擦係数を増加させ、境界におけるすべりをなくすため、ケーソン表面に砂を接着した。

をなくすため、ケーソン表面に砂を接着した。

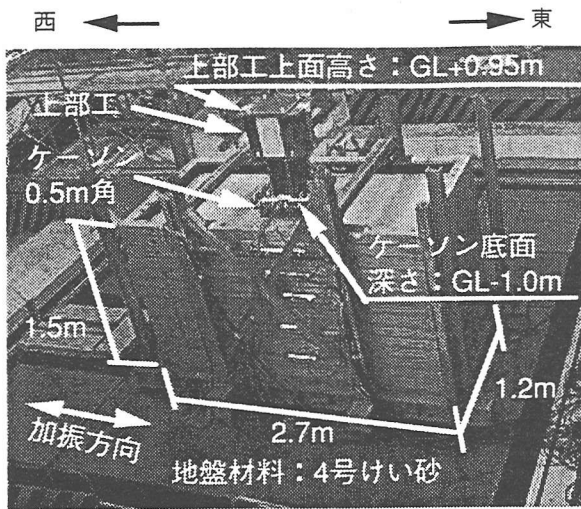
上部工はケーソン重量との比および上部工の重心位置を原型とほぼ一致させることを目指す。上部工上面の砂層上面からの高さは約0.95mとした。なお、本文中では橋桁と橋脚に相当する部分をモデル化したものを上部工と呼ぶ。

### (2) 地盤模型

地盤模型は、図-1に示すせん断土槽中に製作する高さ1.5m×長さ2.7m×幅1.2mの砂層とした。液状化の影響は考慮せず、地盤材料として気乾状態の4号ケイ砂を使用した。土槽底面 (GL-1.5m) からケーソン底面 (GL-1.0m) まではケーソンの支持地盤となるため比較的密な砂層とした。ケーソン底面以浅は、支持地盤より緩い地盤とした。

### (3) 実験ケース

実験は、上部工が無い場合と有る場合について行った。上部工が無い場合は、地盤の一部が剛なケーソンで置き換えられたケースに相当し、動的相互作用の基本的な問題を対象とした実験となる。これに対して上部工が有る場合は上部工の慣性力の影響により、地盤との相互作用の影響が大きくなるケースである。なお、微小振幅時の模型の卓越振動数は上部工が無い場合25.5Hz、上部工が有る場合21.1Hzとなった。



上部工重量：3.01kN ケーソン重量：4.28kN

図-1 実験で使用了る模型

表-1 実地震波加振ケース一覧

対象モデル	入力地震波	入力レベル	時間軸	実験数
上部工無し のケーソン モデル	神戸波 <sup>a)</sup>	25%	1/5	2
		50%		2
		100%	1/10	4
上部工有り のケーソン モデル	神戸波 <sup>a)</sup>	25%	1/5	2
		50%		2
		100%	2/5	2
			1/10	2
	葺合波 <sup>b)</sup>	200%	1/5	2
	津軽波 <sup>c)</sup>	100%	1/5	1
釧路波 <sup>d)</sup>	80%	1/5	1	

- a)1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台NS波  
 b)1995年兵庫県南部地震大阪ガス葺合供給所N330E波  
 c)1983年日本海中部地震津軽大橋周辺地盤橋軸方向成分を原波として道示の3種地盤レベル2タイプ2の加速度応答スペクトルにフィットした波  
 d)1993年釧路沖地震釧路気象台EW波

#### (4) 加振ケース

表-1に示すように神戸波などの実地震波を水平1方向に入力した。入力地震波は原波の時間軸を1/5に縮小した波を中心とした。なお、神戸波については、時間軸の影響を見るため時間軸を2/5、1/10とした波についても実験を行った。

#### (5) 計測方法

本実験では、ケーソンおよび地盤の加振方向加速度、振動台に対する相対変位、ケーソン加振方向に垂直な面（東西面、以下、加振方向面と呼ぶ）に作用する土圧と上下方向せん断応力を計測した。

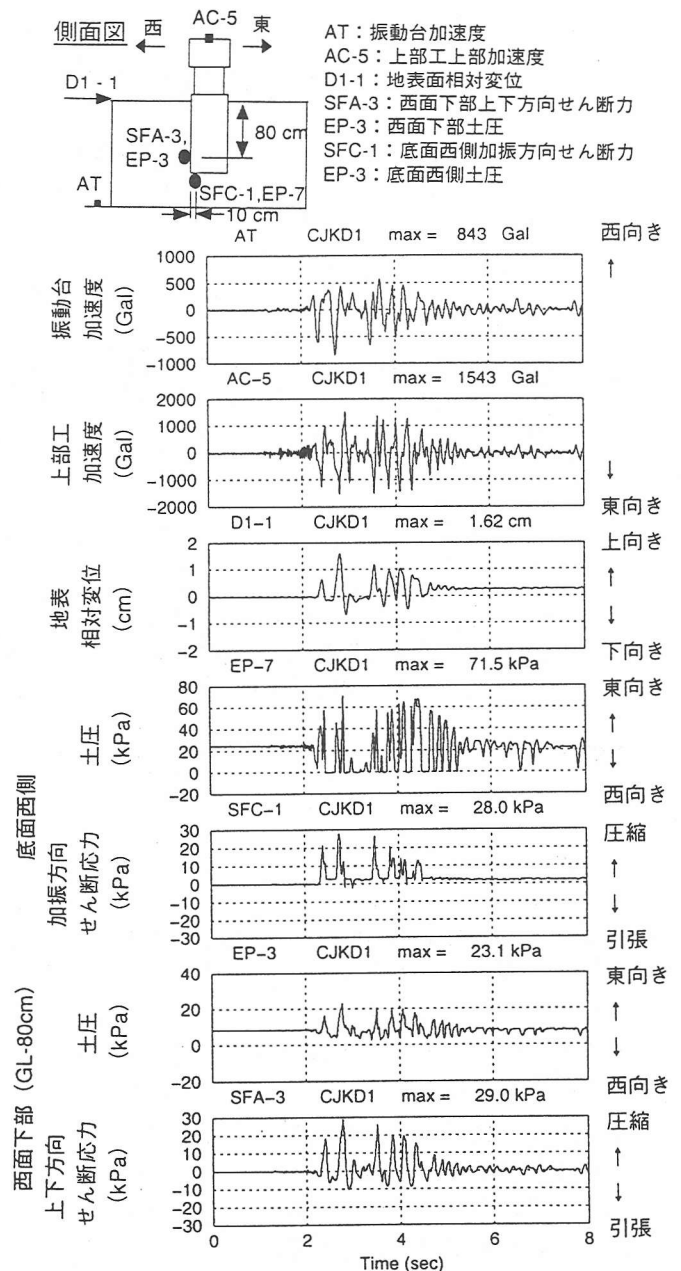


図-2 実験時の模型各部の応答  
 (神戸海洋気象台NS波振幅100%時間軸2/5入力)

力およびケーソン底面に作用する土圧と加振方向せん断応力を計測した。

### 3. 実験結果

実地震波加振実験の一例として、上部工有りのケース、神戸波100%時間軸2/5を入力した時の模型各部の応答波形を図-2に示す。図には示していないが、地表面加速度の最大値は838Galであり、地盤模型だけの振動実験結果<sup>4)</sup>と同様に入力加速度とほぼ等しい。上部工加速度は振動台の約1.8倍に増幅され重力加速度を越える。地表面位置の土槽の振動台に対する相対変位は最大

1.62cmで、地盤の深さ150cmを考慮すると、平均せん断ひずみが1.08%となる。

模型の加振方向に当たる西面のGL-80cmの位置に設けた土圧計 (EP-3) に圧縮力が加わる時に大きな上向きせん断応力 (SFA-3) が作用する。これに対して、ケーソンが地盤から遠去かり、西面のGL-80cmの土圧 (EP-3) がゼロとなる時にはせん断応力 (SFA-3) が小さくなる。図には示していないが、この瞬間には、東面に圧縮側の大きな土圧が作用し、対応する位置のせん断応力が大きくなる。すなわち、圧縮力が作用する面に大きなせん断応力が作用する。

実験開始時の底面西側の土圧 (EP-7) は24.7kPaとなる。この値はケーソンおよび上部工の重量から算出される接地圧29.2kPaの約85%であり、実験開始時に側面の摩擦で支持されている荷重はケーソンおよび上部工の重量の15%に過ぎない。加振時の底面土圧の最大値は71.4 kPaとなり、実験開始時の接地圧29.2kPaの約2.5倍に達する。また、土圧の時刻歴を見ると、圧縮力がゼロとなる時間帯が存在する。この瞬間は浮き上がりが生じたと考えられる。底面のせん断応力は浮き上がりが生じている間はほぼゼロとなり、大きな圧縮力が作用した時に大きなせん断応力が生じる。

#### 4. ケーソンに作用する外力

##### (1) ケーソンに作用する外力の分布

図-3に上部工が無いモデルに神戸波100%時間軸1/5の波を入力したケースと、上部工が有るモデルに時間軸をそれぞれ1/5, 2/5とした神戸波を入力したケースの土圧とせん断応力の最大値分布を示す。以下、本文中では単に土圧と表記した場合、各実験開始時の静止土圧を考慮した値とし、地震時増分土圧と区別する。

図-3(a)より、底面と側面に作用する土圧を比較すると、底面の土圧が側面の土圧より大きい。また、上部工が無い場合、側面に作用する土圧は深い位置ほど大きくなるが、上部工が有る場合は地表面から50cmの位置と80cmの位置の土圧がほぼ等しいか逆転する。図中に各深度の上載圧分布を併記する。上部工が有る場合、加振時の側面の土圧は上載圧に比べてかなり大きな値となり、底面の土圧も実験開始時のケーソンと上部工の全重量が作用した時の接地圧29.2 kPaよりかなり大きな値となる。

図-3(b)に示すせん断応力分布を見ると、上部

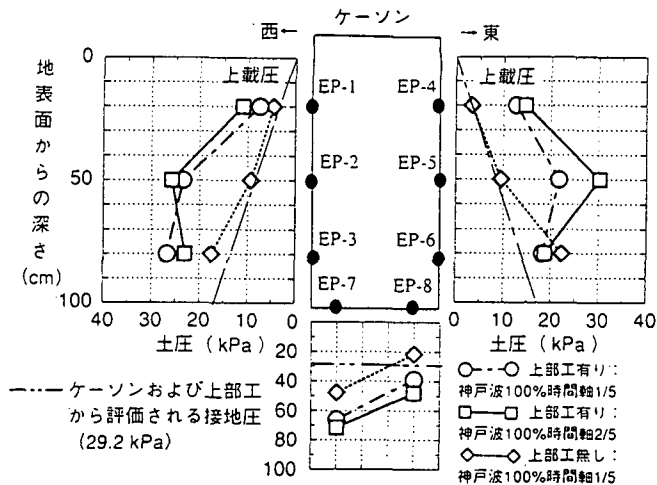


図-3(a) 土圧分布

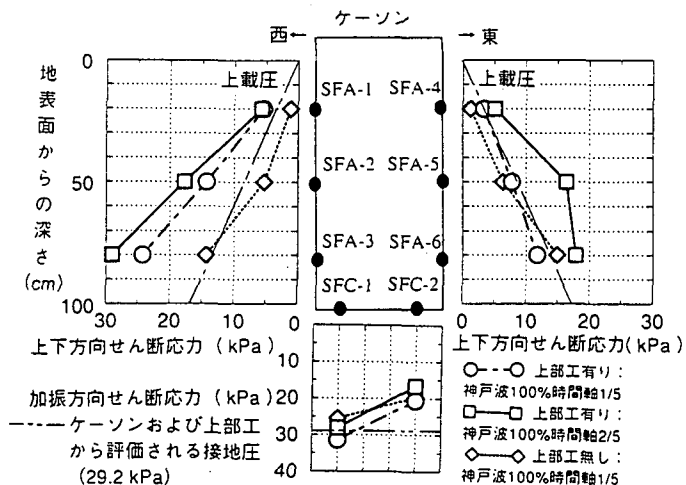


図-3(b) せん断応力分布

工が無い場合、東西両面のせん断応力は対応する深度の上載圧とほぼ等しい。上部工が有る場合は、神戸波時間軸1/5入力時の東側のせん断応力が上載圧とほぼ等しいものの、西側のせん断応力と神戸波時間軸2/5入力時のせん断応力は上載圧の約2倍となる。底面のせん断応力は、上部工の有無、入力波の周期特性の影響はあまり小さくなく、上部工が有る場合、その重量から算出される接地圧より若干小さくなる。

##### (2) 地震時増分土圧の発生状況

図-4にケーソンの回転角に対する加振方向面GL-80cmに作用する地震時増分土圧 (図-3参照, EP-3, EP-6) の上載圧に対する比の値 (正規化土圧と呼ぶ) および底面に作用する地震時増分土圧の平均値 (図-3参照, EP-7, EP-8の平均) を接地圧で割った正規化土圧との関係を示す。

加振方向面の正規化土圧はケーソンの回転角が  $10 \times 10^{-3}$  rad程度まで、ばらつきはあるものの回転角にほぼ比例して増加する。回転角が  $10 \times 10^{-3}$  radを越える地震波を入力した場合には、ば

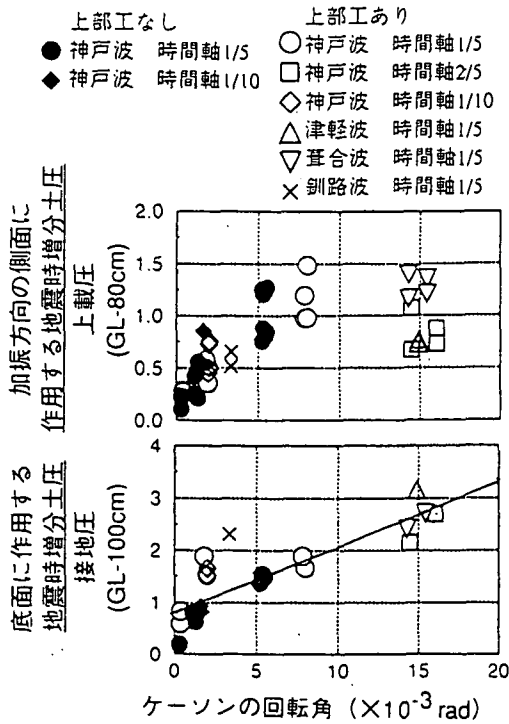


図-4 ケーソンの回転角と地震時増分土圧の関係

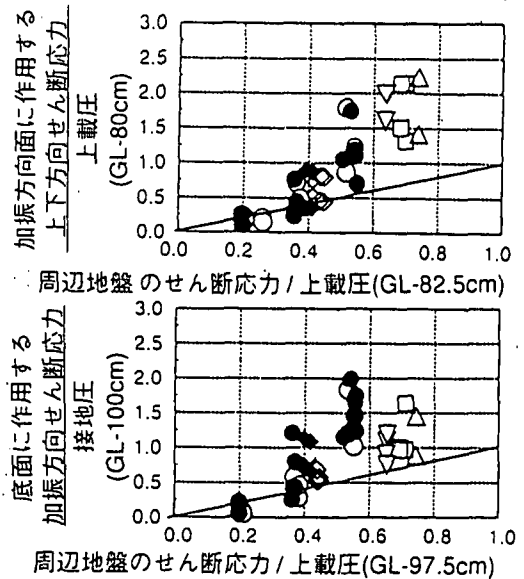


図-5 上載圧とケーソンの作用せん断応力の関係

らつきはあるものの、 $5 \sim 10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の回転角が生ずる神戸波時間軸1/5入力時とほぼ等しい地震時増分土圧が作用する。ちなみに、回転角 $10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の場合のケーソン部の相対水平変位は1.1cm（全高：110cm）となる。

底面の正規化土圧をケーソンの回転角の一次式で回帰した結果を図-4の下の方に実線で示す。側面の地震時増分土圧とは異なり、大きな回転が生じて、底面の地震時増分土圧はケーソンの回転角とかなり相関が高く、ロッキング動との関連が大きい。

### (3) 周辺地盤とケーソンに作用するせん断応力

図-5に周辺地盤に深さ方向に配置した加速度計から算出したせん断応力を上載圧で割った値（以下、正規化せん断応力と呼ぶ）とケーソンに作用する正規化せん断応力との関係を示す。

加振方向面の上下方向せん断応力と底面の加振方向せん断応力ともに上部工の影響が少ない。

図中の直線は周辺地盤の正規化せん断応力と加振方向面、および、底面の正規化せん断応力が等しい点を結んだものであるが、周辺地盤の正規化せん断応力が0.4を越えると、加振方向面および底面の正規化せん断応力がケーソンの存在により周辺地盤の正規化せん断応力より大きくなる。かなりばらつきはあるものの、加振方向面に作用する上下方向正規化せん断応力は周辺地盤の正規化せん断応力にはほぼ比例している。

## 5. まとめ

高さ1.5m×長さ2.7m×幅1.2mの砂層中に設置した上部工を有する0.5m角高さ1.1m（地盤中1.0m）の鋼製ケーソン基礎の模型振動実験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 大きな地震動が作用した場合、ケーソン側面および底面に作用する圧縮側の土圧は地盤の上載圧より大きく、土圧と同時に大きなせん断応力を受ける。
- (2) ケーソン側面および底面が引張を受ける時、土圧がゼロとなり、せん断応力も小さくなる。
- (3) ケーソン底面に作用する地震時増分土圧の最大値は、ロッキングに伴うケーソンの回転角と相関が大きい。
- (4) ケーソンの加振方向に直角な面および底面には、周辺地盤から大きなせん断応力が作用する。

今後、実験結果を詳細に解析し、定量的な評価を行っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 土木学会：土木学会耐震基準等に関する提言集、1996年5月
- 2) たとえば、日本道路協会：道路橋示方書・同解析、V耐震設計編、平成8年12月
- 3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、平成9年3月
- 4) 岡本晋他：レベル2地震動作用時の砂地盤の模型振動実験、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、第1分冊、pp.811-816、平成9年11月