

斜底面ケーソン式岸壁の地震時変形特性について

菅野 高弘* ・ 森田 年一** ・ 安部 賢***
木村 玄**** ・ 三藤 正明*****

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震により阪神・淡路地区の港湾施設に甚大な被害が生じたことから、設計で想定する地震動を上回る過大な地震動に対する合理的な対応が迫られることとなった。1999年4月に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(1999)では、耐震性能設計の概念を導入し、耐震強化施設の設計を、①レベル1、レベル2の地震動を想定し、②それらに対する耐震性能(レベル1地震動に対しては「健全性の確保」、レベル2地震動に対しては「所期の機能の保持」)を設定し、③震度法による断面設計を行い、④変形照査により耐震性能をチェックする、というステップで行うことが示されている(山本, 1999)。

一方、兵庫県南部地震では、設計震度0.25で設計された耐震強化岸壁の被害が最小限なものであったため、震災直後より緊急物資輸送や海上交通の拠点として、被災地の復旧・復興へ大きく貢献することができた。この経験より、耐震強化岸壁の重要性が認識され、現在、全国の港湾で整備が進められている。しかし、ケーソン式岸壁は水平力に対してケーソン底面の摩擦により抵抗する構造のため、耐震強化岸壁のように設計震度が大きくなるとケーソンの堤体幅が増大し、コストがかかる。そこで、ケーソン底面を陸側に向かって深くなるように傾斜させ、ケーソンの海側への滑動抵抗力を高めた「斜底面ケーソン式岸壁」を開発した。斜底面ケーソン式岸壁は耐震性を低下させることなく従来のケーソン式岸壁よりもケーソン堤体幅を小さくすることができ、耐震強化岸壁として経済性と耐震性を兼ね備えた合理的な構造である(山本ら, 1998)。

本研究では、水中模型振動実験を行い、さらに有効応力解析プログラムFLIP(Iai, S. et al., 1990)を用いて水

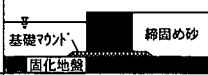

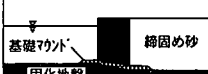

中模型振動実験をシミュレートする目的で実施した解析結果を示すとともに、斜底面ケーソン式岸壁の地震時変形特性について検討した。

2. 水中模型振動実験

設計水深-12.7m(フーチング厚さ0.7m含む)、設計震度0.25(耐震強化岸壁)として、震度法により底面傾斜角を考慮のうえ設計された斜底面ケーソン式岸壁を対象に水中模型振動実験を行った。本実験では、水深2mの水槽の底面に振動台が設置されている大型水中振動台を用い、長さの縮尺比を1/22とした。実験ケースを表-1に示す。ケーソンの底面を傾斜させる効果の検証を主な目的とした基礎実験と、実際の条件でケーソンの残留変形量の検証を目的とした実証実験を行った。

基礎実験では、3種類の断面を対象とした。ケーソンの底面傾斜角を0度、5度、10度と変化させ、それぞれケース1、ケース2、ケース3とした。入力波には、10Hz、20波の正弦波を用い、段階的に加速度レベルを上げるステージ加振とした。実証実験はケース4とし、ケーソンの底面傾斜角を5度として、入力波に平成7年兵庫県南部地震の際に神戸のポートアイランドで観測された地震波(GL-32m)を1G場の相似則(Iai, S., 1989)に

表-1 実験内容および解析対象

ケース	実スケールケーソン幅 底面傾斜角	実験断面 (設計震度 $k_h = 0.25$)	入力波	最大加速度 (cm/s^2)
基礎実験	1 1.8 (m) 0 (度)		正弦波 10Hz 20波	1.00 2.00 4.00
	2 1.5 (m) 5 (度)		"	"
	3 1.3 (m) 10 (度)		"	"
実証実験	4 1.5 (m) 5 (度)		神戸波 GL-32m	5.44 (NS) 4.62 (EW) 2.00 (UD)

* 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
*** 正会員 運輸省第三港湾建設局 神戸調査設計事務所建設専門官
**** 正会員 工修 竹中技術研究所 研究開発部研究員
***** 正会員 工博 五洋建設株式会社 技術研究所開発部長代理

従い時間軸を1/10.2に縮小した地震波を用い、3次元入力した。また、耐震強化岸壁ではケーソン背後地盤が液状化しないように地盤改良を施すことが前提となっていることから、実験のモデル地盤についても加振によりケーソン背後の砂地盤(裏埋土)の過剰間隙水圧があまり上昇しないように十分に締め固めて作成した。

実証実験における加振後のケーソン天端の水平残留変位量は実スケール換算で0.257 m、残留傾斜角は0.063度で、岸壁の供用の観点から支障のない範囲の変形量であった。このように水中模型振動実験から、斜底面ケーソンの地震時挙動および耐震性を確認した。

3. 基礎実験に対する解析

3.1 解析方法

水中振動実験の再現解析であることから、実験断面、実験条件をそのままモデル化した。実験断面が3種類、加速度レベルが3種類の全部で9ケースの計算を行った。

図-1に底面傾斜角が5度(ケース2)の場合の解析モデルを示す。表-2にケース2の場合の解析に用いた主な定数を示す。ケーソンおよび固化地盤は弾性体とした。基礎マウンド(碎石)は透水性が良いため便宜上ダイラタンシーが発生しないものとしてモデル化した。裏埋土(締固め砂)は過剰間隙水圧があまり上昇しないようにモデル化した。また、数値解析的に安定性を高めるためにRayleigh減衰として $\alpha=0.0$ 、 $\beta=0.002$ を用いた。

本解析の目的は、水中振動実験における加振後のケーソン残留変形を精度良く再現することである。本解析で対象とした断面は、ケーソン背後の地盤および基礎地盤が共に堅固であることから、解析においては基礎マウンドの剛性がケーソンの変形に与える影響が大きいと予測した。そこで、基礎マウンドの初期せん断剛性は、底面傾斜角が5度(ケース2)、入力加速度が400 (cm/s²)の場合の実験結果を最も精度良くシミュレートできる値を逆解析的に算定し、すべてのケースにおいて用いた。

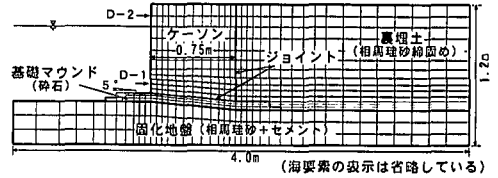


図-1 基礎実験に対する解析モデル (底面傾斜角5度の場合; ケース2)

表-2 基礎実験の解析に用いた主な定数 (地震応答解析時; ケース2)

動的変形特性	密度 (t/m ³)	基礎有効拘束圧力 (kPa)	初期せん断弾性係数 (kPa)	内部摩擦角 (deg)		
裏埋土(相馬珪砂締固め)	1.98	9.8	41572	45		
基礎マウンド(碎石4号)	2.00	98.0	29400	40		
液状化特性	変相角 (deg)	w1	p1	p2	c1	S1
裏埋土(相馬珪砂締固め)	35	600	1.0	0.7	1.0	0.005
ジョイント要素	法線方向剛性 (kPa)	接線方向剛性 (kPa)	摩擦角 (deg)			
ケーソン背面	2.5×10 ⁶	2.4×10 ⁶	31			
ケーソン底面	4.8×10 ⁷	4.8×10 ⁶	35			

3.2 解析結果

図-1のD-1およびD-2の位置の加振後のケーソンの残留水平変位量を全9ケースについて比較する。図-2にケーソン天端近傍(D-2)、図-3にケーソン下端近傍(D-1)の残留水平変位量を示す。また、図-4に図-2、3から計算されるケーソンの残留傾斜角の比較を示す。入力加速度が400 (cm/s²)の場合には残留水平変位量、残留傾斜角ともに解析値は実験値と良い対応を示している。入力加速度が200 (cm/s²)の場合には、実験では残留変形が生じているが、解析では各ケースともほとんど残留変形が生じなかった。

ここで、ケーソン底面に傾斜角を設けたことによる変形量への影響を検討する。図-2より底面傾斜角が0度の場合と比較して5度の場合には値が同程度であり、底面を傾斜させる効果が確認できたが、10度の場合には値が大きくなっている。また、図-4に示す残留傾斜角についても底面傾斜角が10度の場合が最も値が大きくなっている。この点について、さらに詳細に検討するため、それ

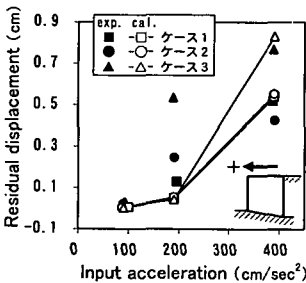


図-2 ケーソン天端近傍(D-2)の残留水平変位量(基礎実験)

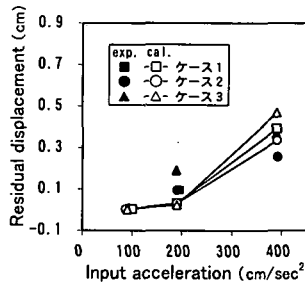


図-3 ケーソン天端近傍(D-1)の残留水平変位量(基礎実験)

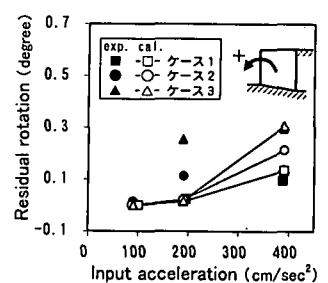


図-4 ケーソンの残留傾斜角(基礎実験)

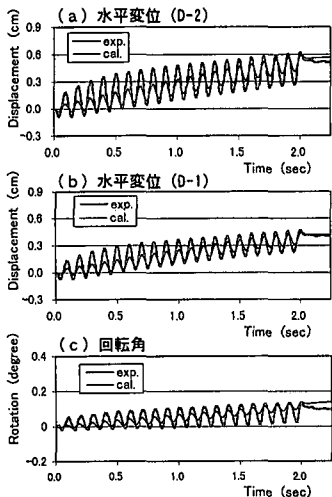


図-5 ケーソンの水平変位および回転角の時刻歴 (ケース 1)

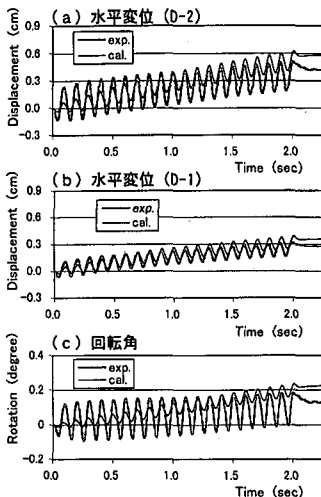


図-6 ケーソンの水平変位および回転角の時刻歴 (ケース 2)

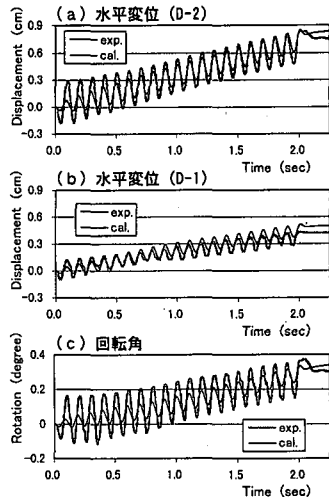


図-7 ケーソンの水平変位および回転角の時刻歴 (ケース 3)

それぞれのケースの入力加速度が $400 \text{ (cm/s}^2\text{)}$ の場合のケーソンの水平変位およびケーソンの回転角の時刻歴を図-5~7に示す。水平変位については、ケーソン天端近傍(D-2)、ケーソン下端近傍(D-1)とも、実験値と解析値で良い対応を示している。回転角については、解析において振幅がやや小さいが、ロッキングしながら徐々に前傾していく変化の傾向は十分捉えている。また、3ケースともケーソン下端近傍(D-1)の水平変位は、ともに同程度の値であるが、ケーソン天端近傍(D-2)の水平変位は、ケース3が大きく、したがって回転角も大きくなっている。震度法で、静的には同程度の滑動安定性を有する3種類のケーソン断面であるが、表-1を見ても分かる通り、ケース3では高さに対して幅が細く、他の2ケースに比べて細長い形状となっている。ケーソン下部は底面を傾斜させたことにより3ケースとも同程度の滑動安定性を発揮するが、ケーソン頭部は、その断面形状特性からケース3が最も振れやすい、ことがこのケースからは推測できる。ケーソンの断面形状がどの程度細長くなればケース3のようなロッキング挙動が顕著となるかについては、今後の検討課題としたい。

4. 実証実験に対する解析

4.1 解析方法

本解析は2次元解析であるため神戸のポートアイランドで観測された地震波(GL-32 m)のうちNS成分とUD成分を地震波として入力した。加速度の最大値は実験土槽底面に取付けた加速度計の最大値に一致するようにし、時間刻みが煩雑になるのを避けるため時間軸の縮尺比は1/10とした。用いた地震波を図-8に示す。また、

その他の解析方針・手順は、基礎実験と同様とした。基礎マウンドの初期せん断剛性についても基礎実験と同様の手法で決定した。図-9に解析モデルを、表-3に解析に用いた主な定数を示す。

4.2 解析結果

ケーソンの残留変形解析結果を図-10に示す。これを

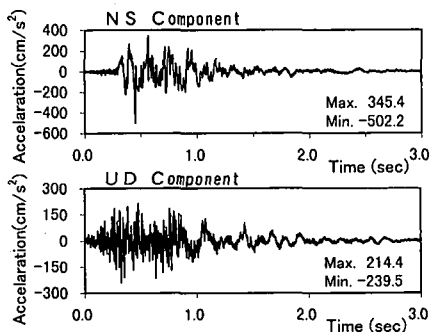


図-8 実証実験の解析に用いた地震波 (ケース 4)

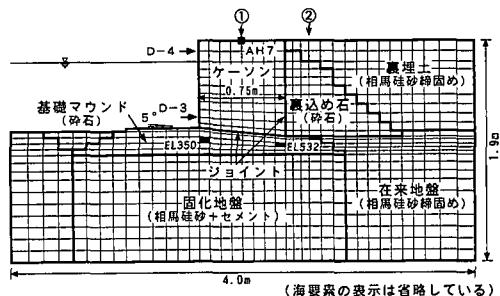


図-9 実証実験に対する解析モデル (底面傾斜角5度; ケース 4)

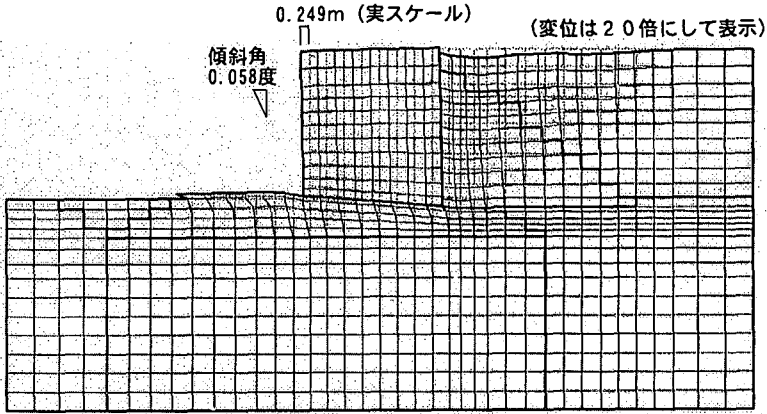


図-10 残留変形解析結果 (ケース4)

表-3 実証実験の解析に用いた主な定数
(地震応答解析時; ケース4)

動的変形特性	密度 (t/m ³)	基準有効拘束圧力 (kPa)	初期せん断弾性係数 (kPa)	内部摩擦角 (deg)			
裏埋土 (相馬珪砂締固め)	1.66	9.8	68776	45			
裏込石 (砕石6号)	1.63	98.0	19600	40			
基礎マウンド (砕石4号)	1.64	98.0	19600	40			
液状化特性		変相角 (deg)	w1	p1	p2	c1	S1
裏埋土 (相馬珪砂締固め)		35	600	1.0	0.7	1.0	0.005
ジョイント要素		法線方向剛性 (kPa)	接線方向剛性 (kPa)	摩擦角 (deg)			
ケーソン背面		1.13×10^6	4.23×10^4	31			
ケーソン底面		1.54×10^7	5.77×10^4	35			

みると、基礎マウンドが変形し、それに伴いケーソンが前傾、背後地盤が沈下していることが分かる。ケーソン天端近傍(図-9のD-4の位置)の残留水平変位量は実スケール換算で0.249 m、ケーソンの残留傾斜角は0.058度であった。また、図-9の測線①、②について最大水平加速度を図-11に示す。測線①で、ケーソン天端の加速度がケーソン下端より大きいことから、ケーソンはロッキング挙動をしていると考えられる。図-10、図-11とも解析結果は実験結果と良い対応を示していると言える。

次に、動的挙動に関して考察を行う。図-12に、ケー

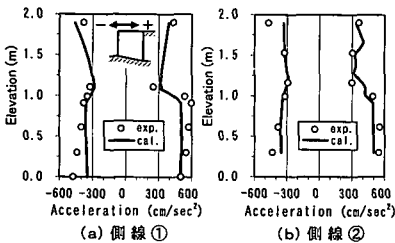


図-11 最大水平加速度分布 (ケース4)

ソン天端(図-9のAH7の位置)の水平加速度の計算開始から最初の2秒間の時刻歴を示す。同図より、本解析において実験時のケーソンの挙動を、最大加速度のピークをはじめとして良く再現できていると言える。ただ、時刻歴の後半で実験と解析に若干の位相のずれが生じて

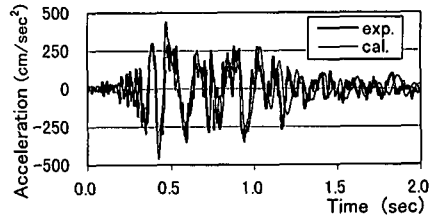


図-12 ケーソン天端 (AH7) の水平加速度時刻歴 (ケース4)

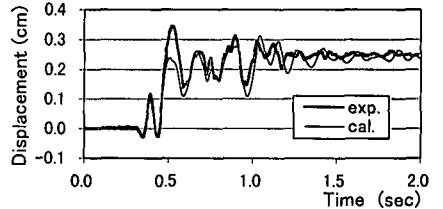


図-13 ケーソン天端近傍 (D-4) の水平変位時刻歴 (ケース4)

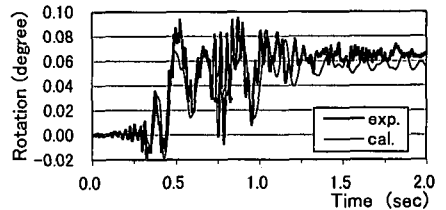


図-14 ケーソンの回転角時刻歴 (ケース4)

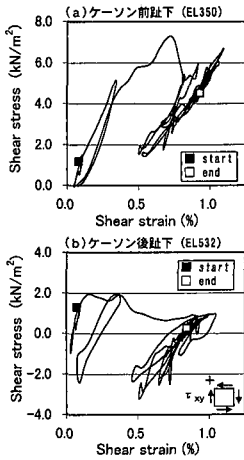


図-15 基礎マウンド内要素のせん断応力～ひずみ関係 (ケース4)

いる。これは、時間軸縮尺の僅かの差(実験では1/10.2, 計算では1/10)に起因していると考えられる。図-13はケーソン天端近傍(D-4)の水平変位の比較である。最初の0.3 sec頃までは加速度が小さくケーソンはほとんど動かないが、その後の250 (cm/s²)を越えるような数波の加速度(図-12参照)でケーソンは一気に海側に変位し、その後は小刻みに振動しながら緩やかに変位していく様子が再現されている。図-14はケーソン天端近傍(D-4)とケーソン下端近傍(D-3)の水平変位から計算されるケーソンの回転角の比較である。実験では、かなり小刻みに回転しているのに対し、解析では、比較的緩やかな回転となっているが、全体の変化の傾向は概ね再現されている。

最後に、図-15に基礎マウンド内要素(図-9のEL 350およびEL 532の位置)のせん断応力～せん断ひずみ関係を示す。初期状態から一気に塑性ひずみが進行しているが、これは図-13に示したように地震波前半でのケーソンの大きな水平変位に対応していると考えられ、この実験におけるケーソンの変形は、ケーソン底面のすべりよりはむしろ基礎マウンドの塑性変形に伴い生じている、ことを示唆するものと言える。

5. おわりに

斜底面ケーソン式岸壁を対象に水中模型振動実験およびFLIPを用いた地震応答解析を実施した。解析では、実験における斜底面ケーソンの残留変形状態を再現することを主目的に定数を設定したが、残留変形だけでなく、加速度や水平変位など斜底面ケーソンの動的挙動についても概ね再現できた。基礎マウンドの剛性が斜底面ケーソンの変形に支配的であるような模型振動実験の再現に対して、FLIPのような有効応力法による地震応答解析が適用できることの可能性を示した。また、斜底面ケーソンの変形照査に本研究のような有効応力法による地震応答解析を用いる場合の精度確認に模型振動実験を用いることの可能性を示したとも言える。

しかし、背後地盤の液状化や基礎地盤の変形など斜底面ケーソンを変形させる要因は他にも考えられる。また、模型地盤の延長で実地盤の地盤定数を決めることは出来ない。このように残された課題は少なくないが、今後もこれらの課題を解決するべく、斜底面ケーソンの地震時変形特性を明らかにしていく予定である。

尚、本研究における実験および解析は、斜底面ケーソン工法共同研究グループ(運輸省港湾技術研究所, 運輸省第三港湾建設局, 株式会社竹中土木, 五洋建設株式会社, 東亜建設工業株式会社, 東洋建設株式会社, NKK)での研究活動の一部として行われたものである。

参考文献

- 社団法人日本港湾協会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 224-227.
- 山本修司 (1999): 技術基準見直しの観点, 港湾の施設の技術上の基準・同解説講習会テキスト, 社団法人日本港湾協会, p. 2.
- 山本修司・井上博士・西中川剛・吉田貴昭・今泉正次 (1998): 斜底面ケーソン工法における底面傾斜角の感度分析, 土木学会第53回年次学術講演会, VI-257.
- Iai, S. (1989): Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1G Gravitational Field, Soils and Foundations, Japan Soc. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 29, No. 1, pp. 105-118.
- Iai, S., Y. Matsunaga and T. Kameoka (1990): Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27-56.