

斜底面ケーソン式岸壁の動的挙動に関する一考察

木村 玄* ・菅野高弘**・森田年一***
福岡 正****・三藤正明*****

1. はじめに

重力式ケーソンの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」を開発してきた (Sugano ら, 2000)。レベル 2 地震に対しても被害を最小限に抑えなければいけない耐震強化岸壁や船舶の大型化に伴う大水深岸壁においては重力式ケーソンは大型化し、堤体幅が必然的に広くなることは避けられない。斜底面ケーソンはこのような場合に特に効果的である。同じ水平設計震度、同じ水深であれば岸壁の海側への滑動安定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る。ケーソン堤体幅の縮小に伴い底面反力が増大する特性を有するが、基礎地盤を堅固に改良することで斜底面とする効果が発揮される。近年の建設コスト縮減目標にも合致した経済性と耐震性を兼ね備えた合理的構造の岸壁である。

菅野ら (1999) は水中模型振動実験および有効応力解析プログラム FLIP を用いた水中模型振動実験のシミュレートを通して斜底面ケーソン式岸壁の地震時安定性の確認および FLIP の斜底面ケーソン構造への適用可能性を示した。しかし、その検討のなかで、ケーソン底面傾斜角を大きくしてケーソンの堤体幅をより小さくしたケースでは、水平設計震度が同じであるにも拘わらず、ケーソン天端の海側への残留水平変位が大きくなる傾向にあることが分かった。

ここでは、ケーソンの堤体幅、ケーソンの底面傾斜角などをパラメータとした一連の地震応答解析を FLIP を用いて実施して、各パラメータがケーソンの動的挙動に及ぼす影響の程度を検討したので報告する。

2. 水中模型振動実験概要

水深 2 m 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て実験を実施した。設計水深 12.7 m、水平設計震度 0.25 として震度法により設計された耐震強化岸壁を対象とした。ケーソン模型は、海側への滑動安全率が 1.0 以上となるようにケーソンの堤体幅 B と底面傾斜角 θ を考慮して設計された 3 種類の断面を基に作成された。 (B, θ) の組み合わせは、プロトタイプの寸法で示すが、① (18 m, 0°)、② (15 m, 5°)、③ (13 m, 10°) の 3 ケースである。1G 場の相似則 (Iai, 1989) に従い、長さの縮尺比を 1/22 とした。入力波は、10 Hz、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。実験の主な目的はケーソンの底面を傾斜させる効果の検証である。

実験結果を図-1 および図-2 に示す。図-1 はケーソンの天端近くの残留水平変位である。入力加速度が大きくなるとケーソンには残留変位が生じるが、ケース①とケース②ではその大きさはほぼ同じであり、ケーソンの底面を傾斜させる効果があることが確認できる。しかし、ケース③の変位量は他に較べて明らかに大きくなっている。図-2 はケーソン下端近くの残留水平変位である。

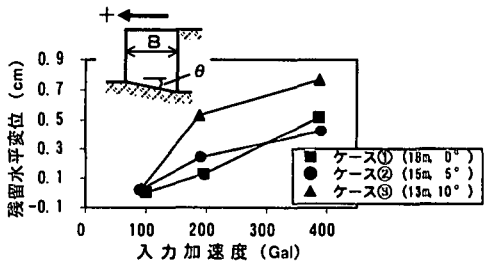


図-1 ケーソン天端近傍の残留水平変位量 (実験)

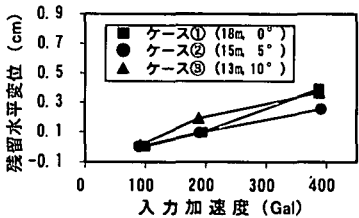


図-2 ケーソン下端近傍の残留水平変位量 (実験)

* 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 運輸省港湾技術研究所 構造振動研究室室長
*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 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総括建設専門
***** 正会員 工博 五洋建設株式会社 技術研究所開発部長代理

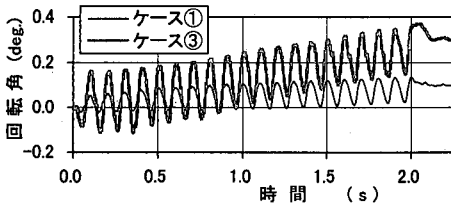


図-3 ケーソンの回転角時刻歴
(実験ケース①とケース③の比較)

ケーソン下端においてもケース③の残留変位は他に較べると僅かながら大きめであるものの、その差はケーソン天端ほど顕著ではなく、ケーソン下端では3ケースともほぼ同等の残留変位量であるといえる。

これらの結果は、ケーソンの底面を傾斜させることにより海側への滑動安定性が増し、ケーソンの堤体幅を小さくできる効果があるが、底面傾斜角を大きく、ケーソン幅を小さくした場合には、ケーソンの残留傾斜角(回転角)が大きくなることを示している。図-3は、ケーソン天端付近と下端付近の水平変位より計算されるケーソン前面の回転角時刻歴のケース①とケース③の比較である。両ケースともケーソンが小刻みに振動(ロッキング)しながら少しずつ前傾していく様子が分かる。しかし、ケース③ではケース①に較べ振動の振幅は大きく、前傾していく変化の勾配も大きくなっている。すなわち、ケース③の場合には、静的には同じ設計震度であっても、他のケースに較べてケーソンのロッキング挙動が顕著であったといえる。

3. 地震応答解析によるパラメータスタディ

3.1 解析ケース

水中模型振動実験では、1ケース毎の実験モデルを製作するのが大掛かりであることから、ケーソンの底面傾斜角とケーソンの堤体幅の両方の条件を変化させて実験断面を設定した。そのため、ケース③においてロッキング挙動が顕著となった主要因が、ケーソン堤体幅の変化にあるのか、底面傾斜角の変化によるのか、判別が困難となった。そこで、両者のケーソンの動的挙動への影響を調べるため、表-1に示すケースの地震応答解析を実施した。ここでパラメータとしたのは、ケーソンの堤体幅 B およびケーソンの底面傾斜角 θ である。さらに、重力式岸壁ではケーソン基礎地盤の剛性が地震後のケーソンの変位量に及ぼす影響が大きいことから(一井ら, 1999; 森田ら, 1999など)、ケーソン基礎捨石マウンドのせん断剛性 G_0 もパラメータとした。表-1には各ケーソンの滑動安定性の目安とするため、プロトタイプ的设计上の滑動安全率を併せて示しておく。例えば、ケース1-1は他のケースに較べ滑動安定性に余裕のないことが分か

表-1 解析ケース

		ケーソン幅 B (m)	底面傾斜角 θ (deg.)	基礎マウンド 初期せん断弾 性係数 G_0 (kPa)	滑動安全率 (設計時)
ケース 1	1-1	15	0.0	29400	0.95
	1-2		5.0		1.10
	1-3		7.5		1.19
	1-4		10.0		1.29
ケース 2	2-1	13	5.0	29400	1.04
	2-2	15			1.10
	2-3	18			1.18
ケース 3	3-1	13	5.0	639000	(同上)
	3-2	15			
	3-3	18			

る。尚、 (B, θ) の組合せによりケース1-2とケース2-2は同じ断面となっている。また、ケーソンの堤体幅 B はプロトタイプにおける寸法で示している。

ケース1はケーソン底面傾斜角 θ の影響を調べるため、ケーソン幅 $B=15$ mと一定として、 θ を変化させたケースである。ケース2はケーソン幅 B の影響を調べるため、 $\theta=5^\circ$ と一定として、 B を変化させたケースである。ケース3は、 B と θ はケース2と同じ条件であるが、ケーソン基礎捨石マウンドのせん断剛性をその下の固化地盤(図-4参照)と同じ程度に堅くして、基礎マウンドの影響を受けない、ケーソン形状の違いが動的挙動へ及ぼす影響を調べたケースである。

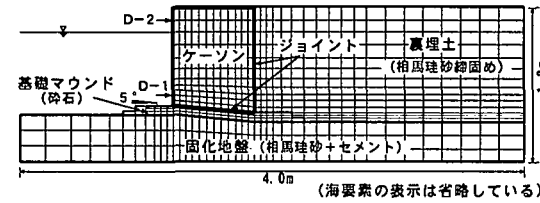
3.2 解析方法

計算は有効応力解析プログラムFLIP(Iai, et al., 1990)を用いて実施した。図-4(a)~(c)にケース2の場合の解析モデルを例として示す。(c)のケーソン堤体幅 $B=18$ mに較べ、(a)の $B=13$ mではケーソンがかなり細長い形状となっていることが分かる。表-2に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。砕石で構成された基礎マウンドは透水性が良かったためダイラタンシーによる過剰間隙水圧が発生しないものとしてモデル化した。裏埋土は十分に締め固めて作成されたため、過剰間隙水圧があまり上昇しないような液状化特性の設定とした。入力波は水中模型振動実験と同じく、10 Hz、20波の正弦波で、最大加速度は400 Galのみとした。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。

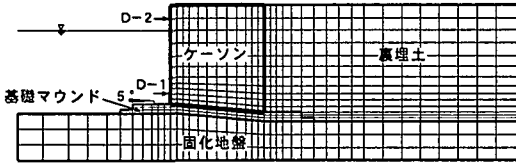
3.3 解析結果

a) ケーソン底面傾斜角 θ の影響(ケース1: $B=15$ m一定)

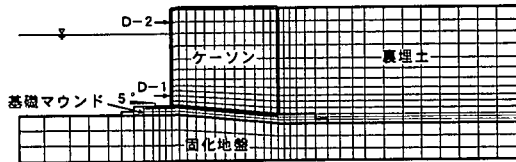
ケース1-2のケーソン天端近傍D-2およびケーソン下端近傍D-1(図-4参照)の位置の水平変位時刻歴、および両者から計算されるケーソン前面の回転角時刻歴を図-5に示す。一波毎に変形が進行していく様子が分かる。ここでは、このようなケーソンの振動性状を入力波



(a) ケース 2-1 ($B=13\text{ m}$)



(b) ケース 2-2 ($B=15\text{ m}$)



(c) ケース 2-3 ($B=18\text{ m}$)

図-4 解析モデル (ケース 2 : $\theta=5^\circ$)

表-2 解析に用いた主な定数 (地震応答解析時)

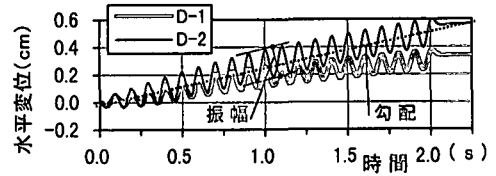
助変特性	密度 (t/m^3)	基準有効拘束 圧力 (kPa)	初期せん断弾性 係数 (kPa)	内部摩擦 角 (deg.)
裏埋土 (相馬珪砂締固め)	1.98	9.8	41572	45
基礎マウンド (砕石 4号)	2.00	98.0	(表-1 参照)	40

液状化特性	変相角 (deg)	w_L	β_1	β_2	c_1	S_1
裏埋土 (相馬珪砂締固め)	35	600	1.0	0.7	1.0	0.005

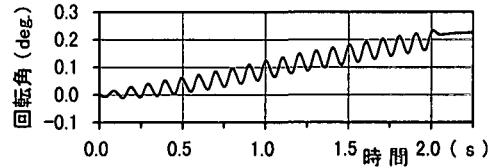
ジョイント要素	法線方向剛性 (kPa)	接線方向剛性 (kPa)	摩擦角 (deg.)
ケーソン背面	2.5×10^5	2.4×10^4	31
ケーソン底面	4.8×10^7	4.8×10^6	35

一波毎に対応した振幅の大きさ (いわゆるケーソンのロッキング挙動) と加振終了までの変化の平均的な勾配に着目して整理する。具体的には、図-5(a)に示すように、振幅値は時刻 1.0 s 前後の 3 波の振幅の平均値、平均的な勾配は計算の開始と最後の値を結んだ線の勾配とした。

図-6 にケーソンの底面傾斜角 θ を横軸にしてケース 1 の水平変位の変化性状を示す。いずれのケースにおいてもケーソン天端近傍 D-2 の変化はケーソン下端近傍 D-1 に較べて大きく、相対的にケーソン頭部が振れるような挙動をしていることが分かる。また、図-6(a)より、

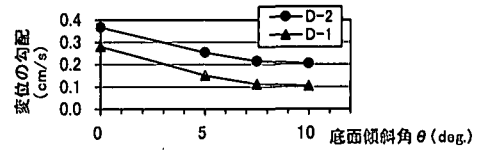


(a) 水平変位時刻歴

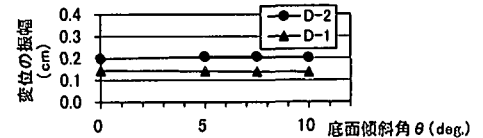


(b) 回転角時刻歴

図-5 ケース 1-2 ($B=15\text{ m}$, $\theta=5^\circ$)

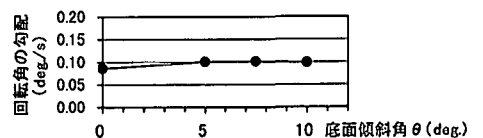


(a) 変位の平均的な勾配

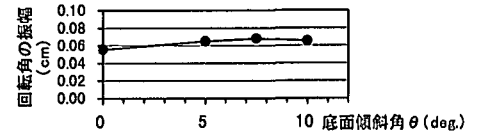


(b) 変位の振幅

図-6 ケース 1 解析結果—変位 ($B=15\text{ m}$ 一定)



(a) 回転角の平均的な勾配



(b) 回転角の振幅

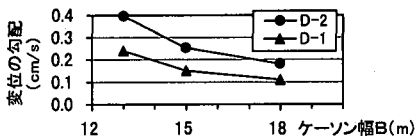
図-7 ケース 1 解析結果—回転角 ($B=15\text{ m}$ 一定)

従来式ケーソンの形状であるケース 1-1 ($\theta=0^\circ$) は滑動安定性に余裕がないこともあり変位の勾配が大きい。さらに、底面傾斜角が大きくなる毎に変位の勾配は小さくなっており、滑動安全率の大きさに従っている。しかし、図-6(b)の振幅については、D-2 の位置で僅かであるが

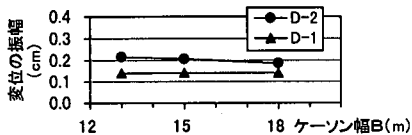
ケース 1-1 が小さくなっている。他のケース 1-2~1-4 ではほぼ同じ振幅値である。このことは、図-7 に示すケーソンの回転の変化性状が、勾配、振幅ともにケース 1-1 が僅かながら小さくなっていることに表れている。すなわち、従来式ケーソン ($\theta=0^\circ$) の形状では、ケーソン天端の変位は大きい、ケーソン下端も滑動するため、結果的にケーソンの回転は斜底面ケーソンよりも小さくなる傾向にあるといえる。逆に、斜底面ケーソンでは、ケーソン下端が変位しにくい、従来ケーソンに較べケーソン天端の変位が小さいにも拘わらず回転は大きくなる傾向にあるといえる。さらに、回転性状は、底面傾斜角の大小にはほとんど影響を受けないことも分かる。

b) ケーソン堤体幅 B の影響 (ケース 2 : $\theta=5^\circ$ 一定)

図-8 に、ケーソンの堤体幅 B を横軸にしてケース 2 の水平変位の変化性状を示す。堤体幅が大きく滑動安定性に余裕のあるケース 2-3 ($B=18\text{ m}$) の変位の勾配、振幅は小さくなっている。図-9 に回転角の変化性状を示す。勾配、振幅ともにケーソンの堤体幅 B が大きくなるに従い小さくなっている。すなわち、底面傾斜角 θ が同じ斜底面ケーソンでは、ケーソンの堤体幅 B が小さいほどケーソン天端が大きく振動して、ケーソンの回転の振

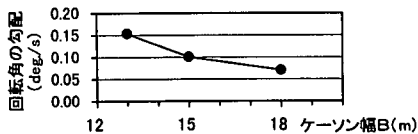


(a) 変位の平均的な勾配

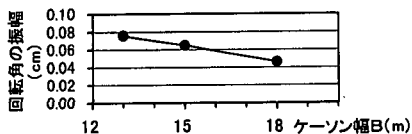


(b) 変位の振幅

図-8 ケース 2 解析結果—変位 ($\theta=5^\circ$ 一定)

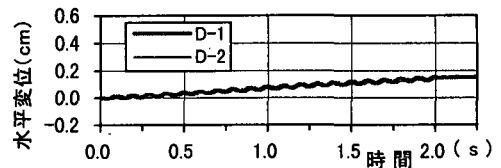


(a) 回転角の平均的な勾配

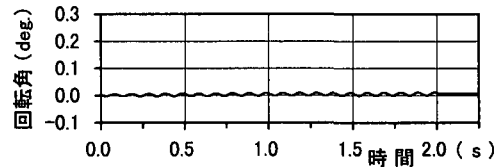


(b) 回転角の振幅

図-9 ケース 2 解析結果—回転角 ($\theta=5^\circ$ 一定)

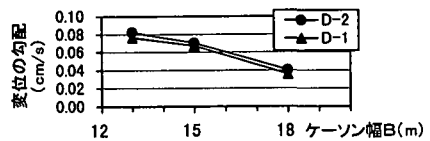


(a) 水平変位時刻歴

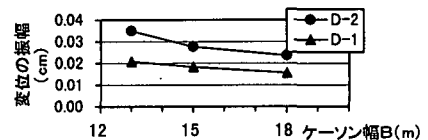


(b) 回転角時刻歴

図-10 ケース 3-2 の解析結果

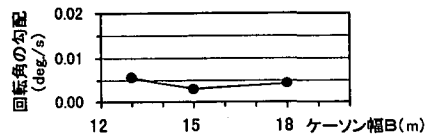


(a) 変位の平均的な勾配

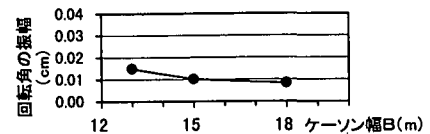


(b) 変位の振幅

図-11 ケース 3 解析結果—変位 ($\theta=5^\circ$ 一定)



(a) 回転角の平均的な勾配



(b) 回転角の振幅

図-12 ケース 3 解析結果—回転角 ($\theta=5^\circ$ 一定)

幅 (ロック) が大きくなる傾向にあるといえる。

c) 基礎マウンドせん断剛性の影響 (ケース 3 : G_0 大)

図-10 にケース 3-2 の水平変位および回転の時刻歴を示す。図-5 と比較するとその差が明らかであるが、ケーソン基礎マウンドが堅い場合はケーソンの変位量かなり小さくなるとともに、ケーソンの天端と下端で変位に差が無く、回転はほとんど生じないことが分かる。

図-11 に、ケーソンの堤体幅 B を横軸にしてケース 3 の水平変位の変化性状を示す。振幅は僅かながら D-2 の位置の方が大きい、変位の勾配は D-2 と D-1 でほとんど差がない。ケーソンの堤体幅 B が大きいケース 3-3 ($B=18\text{ m}$) の方が変位の勾配は小さい、 B が小さいケース 3-1 との差は小さい (図-8 とは縦軸のスケールが 1 オーダー小さいことに注意)。図-12 に回転角の変化性状を示す。図-9 と比較して、ケース 3 の場合は、ケーソンの回転はほとんど生じていないことが分かる。

4. おわりに

斜底面ケーソンのケーソン堤体幅 B 、底面傾斜角 θ 、基礎捨石マウンドのせん断剛性 G_0 をパラメータとした地震応答解析により、ここで解析した条件においては以下のことが分かった。

(1) 従来式ケーソンでは、ケーソン天端の変位は大きい、ケーソン下端も変位するため、結果的にケーソンのロッキング挙動は小さくなる。斜底面ケーソンでは、ケーソン底面が滑動に抵抗するため、ケーソン天端の変位は従来式ケーソンより小さくても、ロッキング挙動は大きくなる傾向にある。

(2) 斜底面ケーソンのロッキング挙動には、ケーソン堤体幅の影響が大きく、底面傾斜角の影響は小さい。

(3) 基礎マウンドが堅固であれば、斜底面ケーソンにおいてもロッキング挙動はほとんど生じない。地震時のケーソンの変形を抑えるためには、ケーソン基礎地盤を堅くすることが有効であるといえる。

今回の解析では、斜底面ケーソンの動的挙動の一面を捉えたにすぎない。今後とも、より幅広い見地から斜底面ケーソンの動的特性を明らかにしていきたい。

尚、斜底面ケーソン工法の開発は、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) にて実施されたものである。

参考文献

- 一井康二・佐藤幸博・井合 進・劉 漢竜 (1999): 重力式岸壁の地震時残留変形量の簡易評価, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 973-976.
- 菅野高弘・森田年一・安部 賢・木村 玄・三藤正明 (1999): 斜底面ケーソン式岸壁の地震時変形特性について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 931-935.
- 森田年一・菅野高弘・風間基樹 (1999): ケーソン式岸壁の地震時被災原因に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 783-792.
- Iai, S. (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.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1990): Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27-56.
- Sugano, T., Kishitani, K., Mito, M., Nishinakagawa, K., Ido, S., Shima, M. and Sekiguchi, K. (2000): Shaking Table Tests and Effective Stress Analyses on the Dynamic Behavior of Wedged Caissons, 12th WCEE, 1193/5/A.