

斜底面ケーソン式岸壁の設計法と耐震強化岸壁への適用

Design and Construction of Wedged Caissons

木村 玄 (きむら たかし)

竹中技術研究所 研究員

三藤 正明 (みつとう まさあき)

五洋建設㈱ 技術研究所 部長

井戸 慎一 (いど しんいち)

東洋建設㈱ 土木本部 土木技術部長

菅野 高弘 (すがの たかひろ)

独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 室長

島 正憲 (しま まさのり)

東亜建設工業㈱ 土木本部 技術開発部長

関口 宏二 (せきぐち こうじ)

NKK 基盤技術研究所 主任研究員

1. はじめに

重力式ケーソンは、兵庫県南部地震のような強大な地震動を想定すると、滑動安定性を確保するためにケーソンの壁体幅が非常に大きくなる。そこで、ケーソン底面および基礎捨石マウンドを陸側に向かって深くなるように数度傾斜させることで、地震時のケーソンの海側への滑動安定性を増して、同じ設計震度であればケーソン壁体幅を小さくできる斜底面ケーソン式岸壁を開発した。高耐震性であるとともに経済性に優れているため、建設費縮減効果が高く、特に耐震強化岸壁に適した工法であるといえる。

本論文では、斜底面ケーソンの設計の考え方を示すとともに、水中振動台実験によりケーソンの底面を傾斜させる有効性を検証した結果について述べる。さらに、耐震強化岸壁として実施工された斜底面ケーソンの据付け後のケーソン傾斜角測定状況を報告する。

2. 斜底面ケーソン式岸壁の設計法

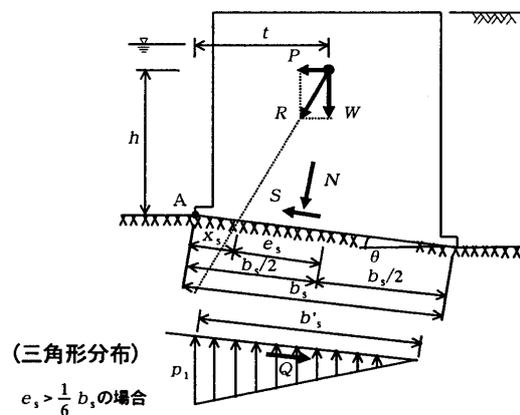
重力式ケーソンの安定検討項目は、ケーソン壁体の滑動、転倒、ケーソン基礎地盤の支持力、沈下に大別される。以下に、各検討項目に対する考え方を示す¹⁾。

2.1 滑動安定性

ケーソン底面に生じる摩擦抵抗力を評価するため、図一に示すとおり、ケーソン壁体に作用する全鉛直合力 W と全水平合力 P をケーソン底面に垂直方向の力 N と平行方向の力 S に再構成してケーソンの滑動安全率 F_s を次式で評価する。

$$F_s = \frac{f \cdot N}{S} = \frac{f \cdot (P \sin \theta + W \cos \theta)}{(P \cos \theta - W \sin \theta)} \quad (1)$$

ここで、 θ : ケーソン底面傾斜角、 f : 底面摩擦係数、である。(1)式から分かるように、ケーソン底面傾斜角 θ を増加させれば滑動安全率 F_s は増大する。すなわち、強大な水平力が作用する場合でもケーソン底面傾斜角を大きくすることにより、ケーソン壁体幅を大きくすることなく必要な滑動安全率を確保できる。



図一 斜底面ケーソンに作用する力の模式図

2.2 転倒安定性

ケーソンの前趾(海側下端部 A 点)を回転の中心としたケーソンに作用する全転倒モーメント M_D と全抵抗モーメント M_R の比で転倒安全率 F_o を評価する。

$$F_o = \frac{M_R}{M_D} = \frac{W \cdot t}{P \cdot h} \quad (2)$$

2.3 ケーソンの底面反力

ケーソンの底面反力における前趾圧 p_1 を、反力分布を台形あるいは三角形と仮定して、ケーソンに作用する力の釣合い式を解くことにより求めた。三角形分布の場合 ($e_s > b_s/6$ の時) を次式に示す。

$$p_1 = \frac{1}{\cos^2 \theta} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{(b_s/2 - e_s)} \quad (3)$$

$$b'_s = 3 \left(\frac{b_s}{2} - e_s \right) \quad (4)$$

$$Q = P / \cos \theta \quad (5)$$

ここで、 $e_s = b_s/2 - x_s$ 、 $x_s = (M_R - M_D) / N$ 、である。底面反力は図一に示すとおり鉛直方向に作用すると考える。

2.4 パラメータスタディー

以上の考え方を基に、水平設計震度 $kh = 0.25$ の岸壁でケーソン壁体幅 B と底面傾斜角 θ を変化させてパラメータスタディーを行った。図二(a)より、同一ケーソン壁体幅 B に対してケーソン底面傾斜角 θ を 0° (通常ケーソン) から増加させるに従い滑動安全率 F_s が

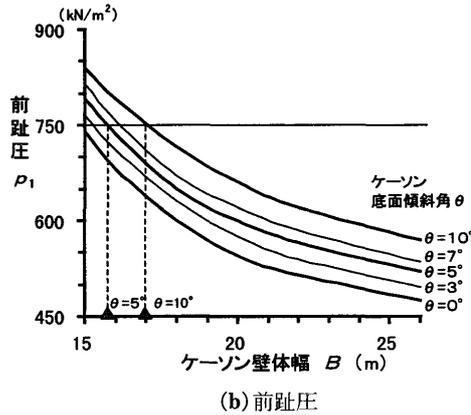
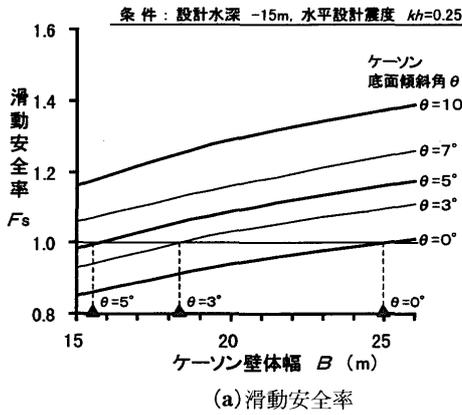


図-2 ケーソン壁体幅と底面傾斜角のパラメータスタディー

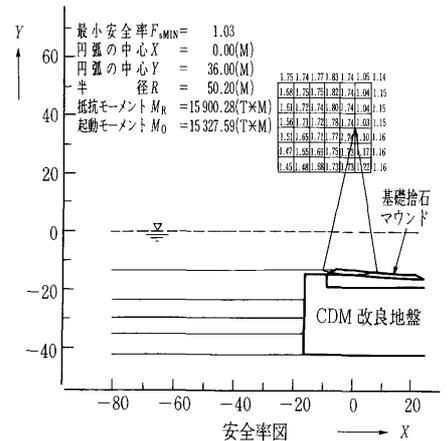


図-3 偏心傾斜荷重に対する支持力検討の一例

大幅に向上することが分かる。さらに、 $F_s > 1.0$ を満足するケーソン最小幅は、ケーソン底面傾斜角 $\theta=0^\circ$ の場合は25 m以上必要であるのに対して、 $\theta=5^\circ$ では15.5 m程度で済むことが分かる。図-2 (b)はケーソン前趾圧 P_1 に対する結果である。滑動安全率 F_s とは逆にケーソン底面傾斜角 θ が大きくなるに従い前趾圧 P_1 は増加することが分かる。基礎捨石マウンドの支持力を地震時を考慮して750(kN/m²)とした場合、ケーソン底面傾斜角 $\theta=5^\circ$ ではケーソン壁体幅 B は15.8 m程度となる。滑動安全率 F_s を考慮すると、ケーソン壁体幅 B は16 m程度であればよいこととなる。なお、転倒安全率 F_o はすべてにおいて $F_o > 1.1$ であった。

このように、ケーソン底面を傾斜させることで滑動安定性が大幅に向上するが、ケーソンの前趾圧も増加するため、最適ケーソン壁体幅は滑動安全率と前趾圧の両方の条件から決定されることが分かる。

2.5 偏心傾斜荷重に対する基礎の支持力

前項に示すとおり、斜底面ケーソンでは底面反力が通常ケーソンに比べ増大すること、および基礎マウンドを含む地盤の不同沈下等による底面傾斜角の変化がケーソン壁体の安定性に大きく影響することが分かる。したがって、大きな底面反力を支え、長期にわたり底面傾斜角を維持できるように基礎の設計を行わなければならない。海底地盤が軟弱な場合は堅固な地盤改良が必要となる。

斜底面ケーソンでは壁体幅を小さくできる反面、荷重の傾斜率 ($\tan \alpha = P/W$) が通常ケーソンより大きく偏心傾斜荷重となるため、ビショップ法による円弧すべり解析により基礎の支持力を検討する。図-3に一例(図-4に対する解析例)を示す。軟弱な海底地盤を堅固に地盤改良した場合、基礎捨石マウンド内をほぼ水平に横切るすべり面がクリティカルになるため、基礎捨石マウンドの強度を十分に確保しなければいけない。

2.6 斜底面ケーソンの試算例

これまで述べた設計法に従い水平設計震度 $kh = 0.25$ の-12 m岸壁での試算例を図-4に示す。通常ケーソンではケーソン壁体幅が17.5 m必要となることから、ケーソン壁体幅・地盤改良幅を大幅に小さくできた。

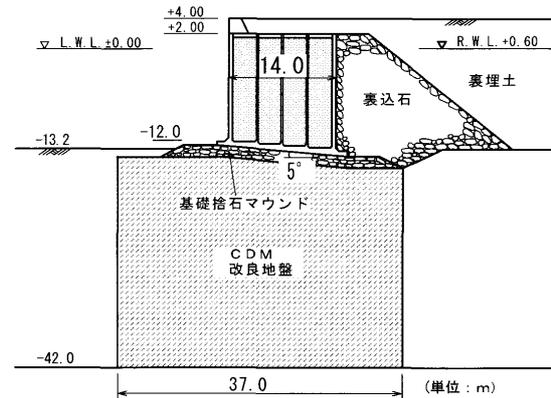


図-4 斜底面ケーソンの試算例

3. 水中振動台実験

3.1 実験ケース

大型水中振動台を用いて斜底面ケーソンの模型振動実験を実施した^{2),3)}。ケーソン模型は水平設計震度 $kh = 0.25$ の-12 m岸壁を想定し、長さの縮尺比を1/22とした。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の2とおりをを行った。実験ケースを表-1に示す。

3.2 実験結果

基礎実験における加振後のケーソン天端の残留水平変位量と入力加速度の関係を図-5に示す。底面傾斜角が 5° では通常ケーソン ($\theta=0^\circ$)より残留変位が小さくなっており、通常ケーソンと同等、またはそれ以上の耐震性を有すること、すなわちケーソン底面を傾斜させる効果が確認できた。底面傾斜角が 10° の場合は他の2ケースに比べてケーソンが細長い形状のためケーソン天端が振れやすく、ロッキング挙動が顕著となり、ケーソン天端の変位が大きくなったものと考えられる。

実証実験では、加振後のケーソン天端の残留水平変位量が実スケール換算で海側に0.257 m、残留鉛直変位量が0.086 mであった。実際に兵庫県南部地震で被災したケーソンの水平変位量(約3~5 m程度)と比較して小さく、地震後直ちに供用を再開できる程度の変位量であり、十分な耐震性を有していることを確認した。

表一 水中模型振動実験ケース

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 (Gal)
基礎 実験	1 1.8 (m) 0°	基礎マウンド、締固め砂、 固化地盤	正弦波 1.0 Hz 2.0 波	1.00 2.00 4.00
	2 1.5 (m) 5°	基礎マウンド、締固め砂、 固化地盤	"	"
	3 1.3 (m) 10°	基礎マウンド、締固め砂、 固化地盤	"	"
実証 実験	4 1.5 (m) 5°	基礎マウンド、裏込め石、 締固め砂、固化地盤	神戸波 GL-32m	5.44 (NS) 4.62 (EW) 2.00 (UD)

実験に対する地震応答解析を実施^{4),5)}し、斜底面ケーソン構造への有効応力法に基づく地震応答解析の適用性を確認している。

4. 施工事例

4.1 概要

和歌山県日高港耐震強化岸壁工事に斜底面ケーソン式岸壁が適用された^{6),7)}。2000年10月からケーソン製作が開始され、2001年3月にケーソン据付けが完了した(口絵写真一6~8)。対象となった岸壁は、計画水深が-12mの大水深耐震強化岸壁(水平設計震度 $k_h = 0.25$)であり、かつ基礎地盤が大変形・不同沈下の発生が少ない岩盤であることから斜底面ケーソンが適していると判断された。ケーソン堤体幅が14.4m、底面傾斜角が5°で前面に遊水部を有するスリット式ケーソンである。

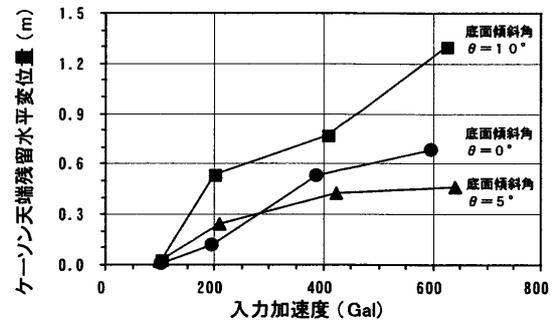
設計・施工においては耐震安定性に影響する底面傾斜角の変化に特に留意した。ケーソン製作精度、基礎捨石マウンドの均し精度および即時沈下量の施工精度を検討し、ケーソン前~後趾間の最大高低差を29cmと想定した。これは底面傾斜角の約1°に相当するため、ケーソンの安定計算では±1°が考慮された。なお、基礎地盤は岩盤であるため沈下、クリープ等の長期的変形は生じないと判断した。

4.2 斜底面ケーソンの挙動計測

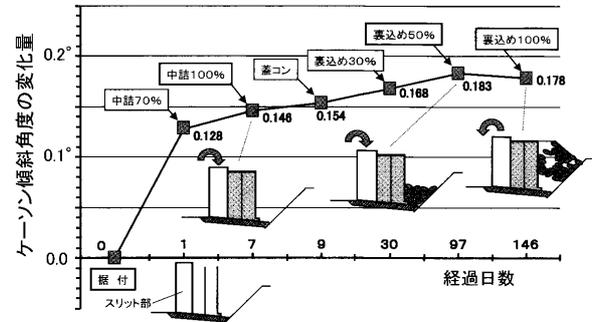
初めての施工であるため各施工段階毎にケーソンの挙動を計測している。計測項目は、ケーソン天端4隅のレベル測量、法線の出入り測量、およびケーソン製作時に底版に埋込んだ差動トランス式固定傾斜計によるケーソン傾斜角測定である。図一6にケーソン傾斜角測定状況を示す。ケーソン据付け後から中詰め投入、裏込め石施工途中までケーソンは陸側へ傾斜する傾向であったが、裏込め石施工完了時点で僅かながら海側へ傾斜が戻った。傾斜角の変化量は最大でも0.2°以下であり、基礎捨石マウンドの変形がほとんど生じないことが確認できた。

5. おわりに

斜底面ケーソンの設計法を構築するとともに、水中振動台実験によりケーソン底面を傾斜させる効果を検証し



図一5 ケーソン天端の残留水平変位量



図一6 斜底面ケーソン据付け後の傾斜角の変化

た。さらに実施工を通して現状技術で問題なく実現可能であることを確認した。今後も施工法の合理化に関する検討やケーソン傾斜角の計測を継続し、設計・施工法の充実を図っていききたい。同工法の適用を通して港湾構造物の建設費縮減に供することが出来れば幸いである。

なお、斜底面ケーソン式工法は独立行政法人港湾空港技術研究所(旧運輸省港湾技術研究所)、国土交通省近畿地方整備局(旧運輸省第三港湾建設局)および民間5社(株竹中土木、五洋建設(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)、NKK)で構成する斜底面ケーソン工法共同研究グループにて開発された工法であることを付記するとともに、ご協力頂いた多くの関係者に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 運輸省第三港湾建設局 神戸調査設計事務所, 助沿岸開発技術研究センター: 斜底面ケーソン工法技術マニュアル(案), 1999.
- 2) 岩上淳一・岸谷克己・三藤正明・田中征登・徳永幸彦・井戸慎一: 斜底面ケーソン式岸壁の動的安定性に関する模型振動実験について, 土木学会第53回年次学術講演会, I-B, pp. 592~593, 1998.
- 3) 菅野高弘・岸谷克己・猪野健吾・鈴木 亘・若菜弘之・亀井幸雄: 斜底面ケーソン式岸壁の地震時挙動に関する模型振動実験, 土木学会第53回年次学術講演会, VI, pp. 512~513, 1998.
- 4) Sugano T., Kishitani K., Mito M., Nishinakagawa K., Ido S., Shima M. and Sekiguchi K.: Shaking table tests and effective stress analyses on the dynamic behavior of wedged caissons, 12th WCEE, Paper No. 1193, 2000.
- 5) 菅野高弘・森田年一・安部 賢・木村 玄・三藤正明: 斜底面ケーソン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, 1999.
- 6) 横山茂雄: 斜底面ケーソン式岸壁工事の初事例, 土木施工, 42巻9号, pp. 34~39, 2001.
- 7) 日経コンストラクション: ズームアップ海洋, pp. 38~43, 2001/4-27 No. 278.

(原稿受理 2001.12.21)