

ケーソンの滑動に関する実験的研究

(株) 明治ゴム化成技術開発本部 岡田 壽夫
 同上 香川 隆
 同上 岡田 亨
 (株) 三井造船昭島研究所 正会員 久宝 啓作

1. まえがき

ケーソン式混成堤のマウンド上に設置されるケーソンの滑動安定性を増大させることは、防波堤の安全確保のみならず、経済的な建設を実現させるうえで必須条件となる。そのため各種の工法が検討されており、その中の一つとして、ケーソンとマウンドとの摩擦係数を増大させることを目的として、ラバーをケーソン底面に取り付ける工法が研究、開発されている^{1,2,3)}。

これまでの研究によってケーソンラバーの摩擦係数についてかなり明らかにされてきているが、ケーソンの滑動メカニズムをケーソンの平面的挙動として捕らえる傾向にあった。ケーソンラバーの有効性並びに効果的なケーソンラバーの被覆率を検討するうえではケーソンの滑動特性を三次元的に捕らえる必要がある。

そのために本研究は、規則波中における模型水槽実験を実施し、1) 波による滑動の有無の実験値と計測値との比較、2) 波とケーソン変位との関係、3) 波と滑動量との関係、4) ラバー被覆率と滑動量との関係などについて検討を行い、その結果をとりまとめた。

2. 模型水槽実験

2.1 実験水槽

実験は三井造船昭島研究所の二次元水槽(長さ25.2m、幅1.1m、高さ1.93m)で行った。同水槽端部にはプランジャー型造波装置が取り付けられており、規則波及び不規則波の造波が可能となっている。

2.2 供試模型

2.2.1 ケーソンラバー

実験には図-1に示すような断面形状の実機縮尺1/100相当の5種類のケーソンラバーを用いた。ラバーのケーソン底面積に対する被覆率は13.3%~100%である。

2.2.2 ケーソン及びマウンド

実験に用いたケーソン模型は、実機高さ13.8m、幅15mのケーソンの1/100縮尺の二次元模型である。またマウンドとの摩擦係数を相似させるため、底面部はコンクリート板とした。次にケーソンに対する波力を一定としながらケーソンの単位重量を変えられるように、コンクリート板の上部は鋼製函とし、内部にウエイトが搭載できるような構造とした。

ケーソンを支持するマウンドは図-2に示すような形状・寸法である。マウンドの上面には直径7~8mm(実機直径0.7~0.8mm相当)の栗石を、表面を均一にした状態で石の下部をモルタルで固めた。ケーソン及びマウンドは水槽内に固定した勾配1/30の鋼製ビーチ上に所定の水深位置でセットした。

2.3 計測システム

実験には図-3に示すように、計測は沖波及び法先波高をサーボ式水位計により、またケーソンの3方向変位(滑動量、鉛直変位、回転角)を3自由度運動計測装置にて計測した。ケーソンの挙動はビデオTVとスチルカ

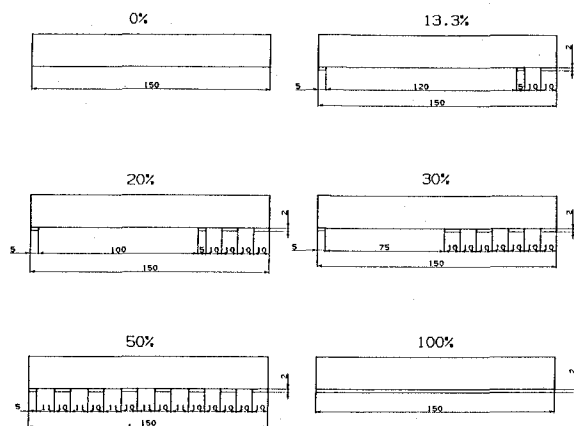


図-1 ケーソンラバー形状図

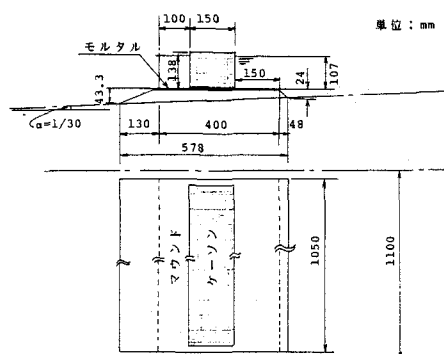


図-2 ケーソン及びマウンド形状(模型寸法)

メラを用いて撮影した。なおケーソン変位と波の時系列データはデータレコーダに収録し、位相を考慮したケーソンの挙動をこれらのデータを用いて解析した。

2. 4 実験方法

実験は表-1に示すように、実機換算波高7.4～12.1m、換算周期13～17s、マウンド上水深10.7m、ケーソン水中単位重量160～200t/mの状態で行った。一連の実験は、造波開始後の最初の2～3波を除いて連続10波の波がケーソンに作用した状態を計測時間とした。

3. データ解析方法

ケーソンの滑動量は、計測時間内におけるロッキング変位を除く全滑動量を波数で除し、一波における滑動量の平均値で定義した。ケーソン回転角、鉛直変位、ロッキング変位、波高についても同様な方法で求め、両振幅の平均値で定義した。これらの時系列データは約50Hzでサンプリングし、A-D変換を行い、ノイズを除去した状態でD-A変換し、時系列データに再変換した。

4. 実験結果及び考察

4. 1 波による滑動の有無の実験値と計算値との比較

図-4、5にケーソンラバー無しの場合とラバー被覆率20%の場合における波による滑動の有無の実験値と計算値の比較を示す。図中黒丸は滑動を起こした波、白抜きは滑動しない場合の波の実験値を示す。曲線は直立壁に作用する重複波及び砕波の波力を合田式⁴⁾から求め、その結果から滑動限界波高を逆算したものである。滑動限界は次のように推定した。

$$\left. \begin{aligned} F_H > \mu W & \text{ 滑動する} \\ F_H < \mu W & \text{ 滑動しない} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 F_H : 合田式から求めた水平波力
 μ : コンクリートと捨石との摩擦係数⁴⁾
($\mu=0.6$)。コンクリートとラバーとの摩擦係数の推定値³⁾ (ラバー被覆率20%の場合 : $\mu=0.774$)
 W : 静水中の浮力を差し引いたケーソン重量

なお図中の破線は、混成堤直立部の波圧強度を求める式⁵⁾ (以下港湾基準と称する。)よりケーソンに対する水平波力を求め、次式より滑動限界を推定したものである。

$$P_c = \frac{\mu W}{1 + \frac{\mu}{2} B} \quad (2)$$

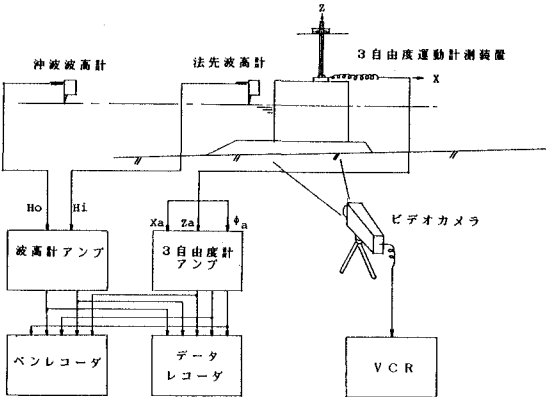


図-3 計測システム

表-1 実験条件

項目	実機	模型
波高	7.4m～12.1m	0.074m～0.121m
周期	13, 15, 17 sec	1.3, 1.5, 1.7 sec
ケーソンラバー	① なし ② 13% (ラバー厚 0.2mm) ③ 20% (") ④ 30% (") ⑤ 50% (") ⑥ 100% (")	① なし ② 13% (ラバー厚 2mm) ③ 20% (") ④ 30% (") ⑤ 50% (") ⑥ 100% (")
マウンド上水深	10.7m	0.107m
ケーソン水中単位重量	160, 180, 200 t/m	16, 18, 20 Kg/m

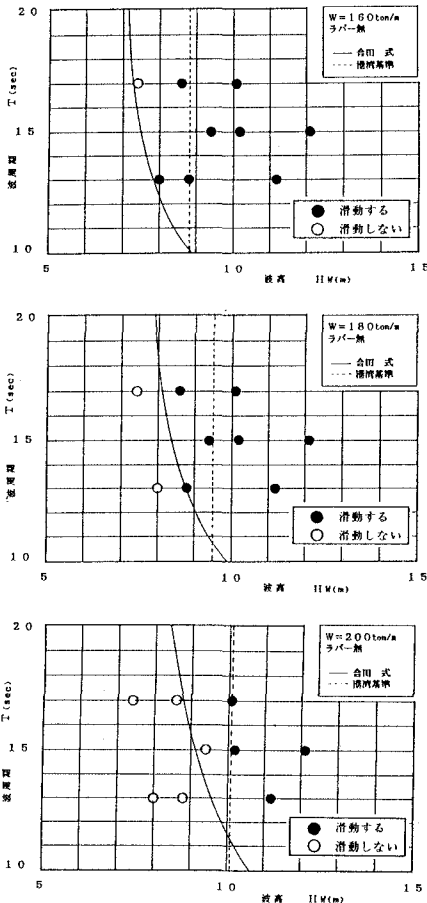


図-4 波による滑動の有無の実験値と計算値の比較 (ラバー無し)

ここで、 P_c : 滑動限界波圧

μ 、 W : (1) 式と同じ

l : 波圧の作用範囲

B : ケーソン幅

なお滑動限界波高 H_c と滑動限界波圧 P_c との関係は滑動限界波高算定図⁵⁾より求めた。

図-4、5よりつぎのことが明らかである。即ち、滑動限界波高は、波の諸元として波高のみをパラメータとした港湾基準²⁾より、波高と周期をパラメータとした合田式⁴⁾のほうが実験結果を良く説明できる結果を得た。更に、実験結果と計算結果が比較的良く一致することから、栗石とラバーとの摩擦係数の推定値³⁾がほぼ妥当であることがわかった。なお滑動の限界波高はケーソン単位重量が増大するにつれて上昇することが実験値及び計算値から明らかである。

4. 2 波とケーソン変位との関係

図-6はラバー無しの状態における波とケーソン変位との関係を示したもので、時系列の生データをA-D変換してノイズを除去したものである。まずケーソンに作用する波については同図に示すように、沖波の波形は余り浅水影響を受けていないが、法先波高の波形は非線形性が強く出ており、ケーソンに衝突する際に砕波したものである。このような条件下におけるケーソン滑動の基本的パターンとしては、波の峯がケーソンに衝突すると、ケーソンが岸側に回転しようとするため、回転角の波形が立ち上がる。更にこれとほぼ同位相で回転に伴う鉛直変位が生じる。滑動は波の峯がケーソンに達するとロッキングによってその波形が一旦立ち上がるが、波の峯から腹に差掛るときにロッキングが静まるために滑動の波形はゼロ近くに戻る。一方、波が腹から谷に差掛ると、回転仕掛かったケーソンが復元力により元に戻ろうとし、波の谷で回転角、鉛直変位はほぼゼロに戻るが沖方向への回転はみられない。なお滑動に対してケーソンは復元力が無いので少し滑った位置で一旦停止するが、波の谷付近では波形は立ち上がらず、ほぼ平行線となる。波が連続的にケーソンに衝突するに伴い、この状態を繰り返し、ケーソンは波周期と連動した変位を伴い、少しずつ岸側に滑動してゆくようであった。

図-7はラバーの被覆率を変えたときの滑動パターンを比較したものである。本条件内においては滑動量はラバー被覆率100%の場合が最大で、20%の場合が最少となっている。被覆率100%の場合、ロッキング変位は逆に最少となっている。これはラバーをケーソン全面に取り付けた場合、ラバーの栗石を包み込むことによる滑動抵抗が他の場合より大きくなるものと考えられるが、被覆率20%~50%の場合よりラバーの弾性変形が小さくなる。そのためマウンド上の栗石との噛み合い状態がかえって悪くなり、滑り易くなったものと考えられる。このことはラバーの被覆率が30%までは摩擦係数は漸増するが、それ以上になると一定となることを示す文献^{2),3)}からも

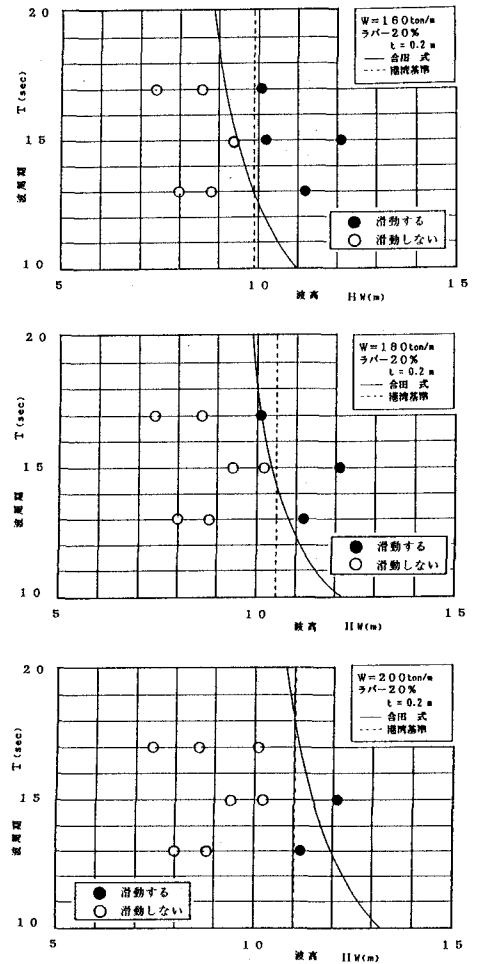


図-5 波による滑動の有無の実験値と計算値の比較 (ラバー被覆率20%)

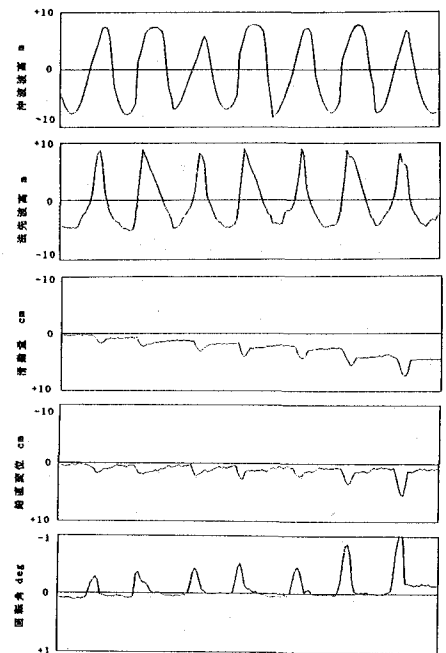


図-6 波とケーソン変位との関係
($T=13s$, $H=11.2m$, $W=160t/m$, ラバー無し)

想定できる。一方ラバー無しの場合、被覆率100%の場合より滑動量は減少しているが、ロッキングはむしろ大きくなっている。これは被覆率100%の場合よりラバー無しのほうが滑動に対して抵抗力が幾分大きいことを示している。被覆率20%～50%の場合はロッキング量はラバー無しの場合より増えているが、滑動量は逆に減少している。このことから滑動量が小さい場合のほうが、滑動に対する抵抗を示すロッキング変位が逆に大きくなること がわかる。

図-8はラバー被覆率とロッキング変位との関係を示し、図中の曲線は計測値を波周期別に最少二乗近似で表したものである。ロッキング変位は波浪条件によっても異なるが、ラバー無しの場合と被覆率100%の場合が他の場合より小さくなる。そのため、全体的に山型の曲線となっている。本条件下で波周期別にみると、周期の短い波のほうが長い波よりロッキング変位が大きくなる傾向にある。

4.3 波と滑動量との関係

図-9、10はラバー無しの場合とラバー被覆率20%の場合の波と滑動量との関係を示したものである。滑動量は両者とも波高が大きいほど増加することが明らかである。これは文献⁹⁾とも傾向が一致する。周期別にみると、13sの場合が最も大きくなり、15s、17sの場合は同程度になっている。これらのことから、滑動量は波圧強度にほぼ比例するものと思われる。更に滑動量をケーソン単位重量別でみると、いずれの周期の場合においても160 t/mの場合の滑動量が大きく、180 t/m、200 t/mの場合はほぼ同程度となっており、本実験範囲においては滑動量がケーソンの単位重量に余り依存しないことがわかる。

4.4 ラバー被覆率と滑動量との関係

図-11はラバー被覆率と滑動量との関係を示したもので、曲線は計測値を波周期別に最少二乗近似したものである。滑動量はいずれの周期の場合においても被覆率20%～30%の場合が最少であり、他の場合より滑動量を少なくする点で効果的であることがこの図から明らかである。この理由としては、ラバー被覆率20～30%の場合は、前述のラバー側面の栗石に対する引っ掛かり効果と、ラバー自身の弾性変形による栗石の包み込み効果との相乗作用が他の場合より良く発揮されたことによるものと思われる。

5. まとめ

今回の実験範囲から得られた結果をまとめるとつぎのようになる。

- (1) 滑動限界波高の実験値は合田式⁹⁾により良く説明できる。
- (2) 滑動限界波高の推定に用いたマウンド上の栗石とラバーとの摩擦係数の推定値がほぼ妥当であることが明らかとなった。
- (3) 滑動の限界波高はケーソン単位重量が増加するほ

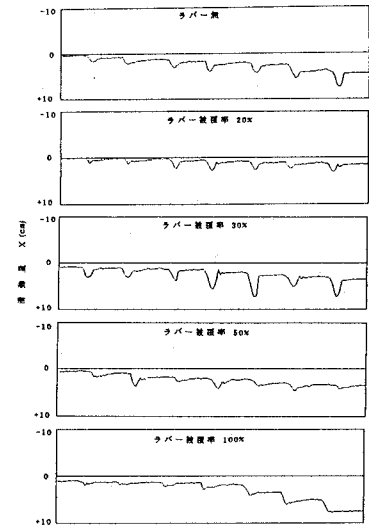


図-7 ラバー被覆率の違いによる滑動パターンの比較
($T=13s, H=11.2m, W=160t/m$)

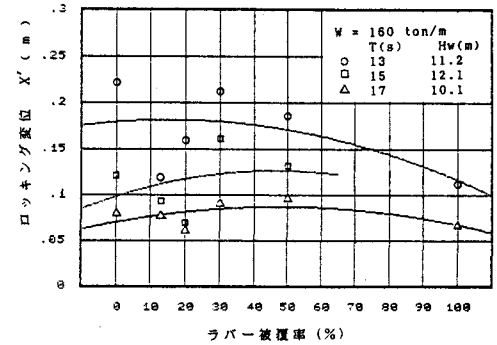


図-8 ケーソンラバー被覆率とロッキング変位との関係 ($W=160t/m$)

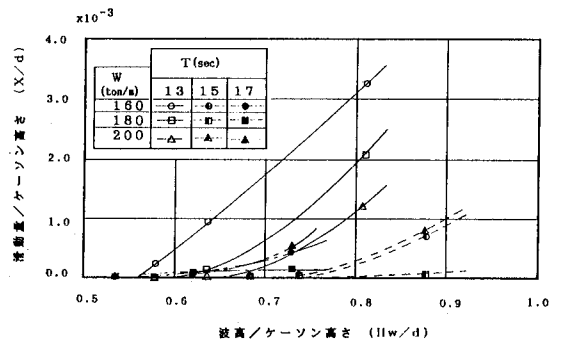


図-9 波と滑動量との関係 (ラバー無し)

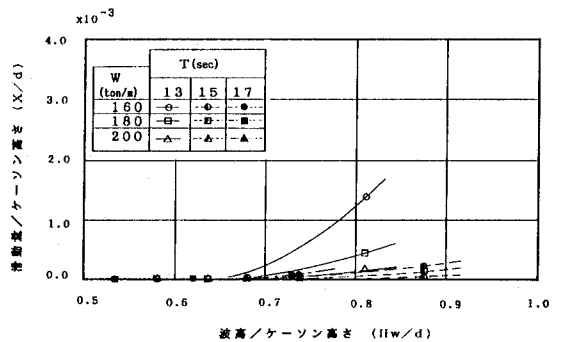


図-10 波と滑動量との関係 (ラバー20%)

ど大きくなるが、滑動量はケーソン単位重量に余り依存しない。

(4) 被覆率20%のラバーを取り付けることにより、ラバー無しの場合より限界波高が約10%上昇する。

(5) 波の峰がケーソンに差掛かったときにケーソンはロッキングしながら岸側に滑動し、波が峯から谷へ移るときに沖側に少し戻る。波が連続的に来襲するとこの状態を波周期と連動して繰り返し、徐々に岸側に滑動する。

(6) ラバー被覆率20%～50%の場合が、ラバー無しあるいはラバー被覆率100%の場合よりロッキングは大きくなるが、滑動量は小さくなる。

(7) 滑動量は波圧強度が大きくなるほど増加する。

(8) ラバー被覆率20%～30%の場合がラバー側面の栗石に対する引っ掛かり効果と、ラバー自身の弾性変形による栗石の包み込み効果と相乗されて滑動に対して最も効果的である。

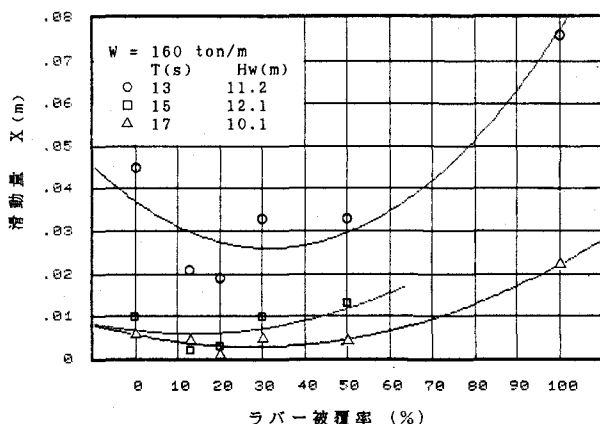


図-11 ケーソンラバー被覆率と滑動量との関係(W=160t/m)

以上、ケーソンの滑動メカニズムの把握を目的として、規則波中における模型実験による検討結果についてまとめ、ケーソンの波による滑動パターン等について明らかにした。しかし、未解明の点も多々残されており、今後一層の検討が必要である。

今後は不規則波中による実験や、移動床による実験等によって更に検討を進めたいと考えている。

(参考文献)

- 1) 高田重作・有賀 朗・小沢達彦：ケーソンラバーに関する実験報告(その1)、明治ゴム化成技報 Vol.1, No.1, pp.19~24, 1981
- 2) 高田重作・有賀 朗・小沢達彦：ケーソンラバーに関する実験報告(その2)、明治ゴム化成技報 Vol.3, No.2, pp.34~40, 1981
- 3) (社)日本作業船協会編：ケーソンラバーの応用研究成果報告書、1984
- 4) (社)日本港湾協会編：港湾の施設の技術上の基準・同解説、改訂版(上巻)、pp.119~122, 1989
- 5) (社)日本港湾協会編：港湾の施設の技術上の基準・同解説、pp.7-13 ~7-14, 1979
- 6) 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司：1. 大水深混成堤の耐波安定性に関する研究(第1報)、港技研報告 第27巻第1号、pp.19~22, 1988