

ケーソン式防波堤の背面に配した裏込捨石の 滑動変位抑制効果に関する実験

鍛冶壮吉¹・須田清隆²・滝本孝哉³

¹正会員 白島石油備蓄(株) 建設第一部 次長 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-3)

²正会員 ハザマ 土木本部 技術設計部 課長 (〒107-0061 東京都港区北青山2-5-8)

³正会員 日本セックコンサルタント(株) 研究調査部 企画調査室 室長 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

白島石油備蓄基地では、波浪に対する補強工として裏込捨石を防波堤の背面に配している。本論文は裏込捨石の側面抵抗力について室内実験を行い、捨石の変位にともなう抵抗力の増加を考慮した防波堤の滑動安定性について考察した。滑動安定性については裏込捨石は防波堤の滑動変位の抑制に十分な効果が得られることを確認した。

Key Words : stability, design model, characteristic of rubble, foundation mound, caisson type breakwater

1. はじめに

北九州市の北方約8kmの沖合いに浮かぶ白島(男島)の南東海域に建設される「白島石油備蓄基地」は、原油備蓄容量560万klの大規模洋上備蓄基地である(図-1参照)。本基地は8槽の原油貯蔵船を波浪から防護するために貯蔵施設周辺に122函のケーソンと捨石マウンドからなる混成式防波堤を設置している。特に北側に面している北防波堤は、耐波性を高めるためにケーソンの背面に裏込捨石による補強工を行っている(図-2参照)。

従来の防波堤構造物の安定性検討においては、防波堤ケーソンに作用する力と構造物の抵抗力との釣り合いの程度を安全率にて評価する方法が採用されてきた¹⁾。しかし、上記のような混成式防波堤の場合、捨石マウンド上のケーソン構造は、作用荷重に対する抵抗特性が変位とともに変化することが確認されている²⁾。また、作用荷重については、波浪荷重という繰り返し荷重であり(図-3参照)、かつ再現性の高い荷重でもある。そのため、構造物の重要度から、ケーソンの滑動量が安定上問題になる場合は、設計方法として、その累積滑動量について配慮する必要性が出てくる。そこで、次の①~③に示す実験および計測を行い、数値解析による評価においても設計波力に対して十分な余裕を有することを考察した。

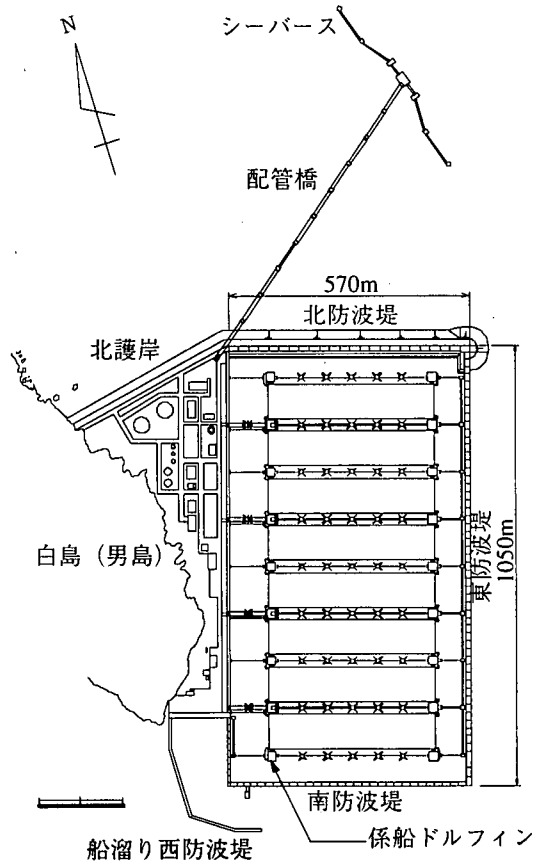


図-1 白島石油備蓄基地平面図

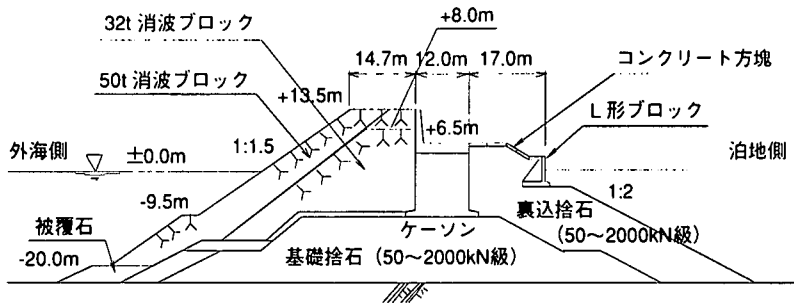


図-2 北防波堤断面図

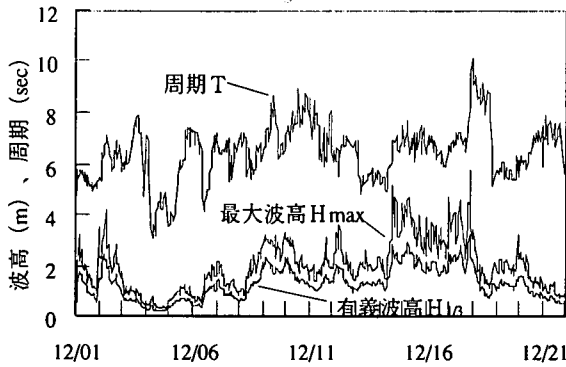


図-3 白島における波浪状況 (1985年)

表-1 最大作用荷重 (測定値) および摩擦係数

載荷版底面積 (m×m)	捨石の環境状態	実験 No.	鉛直荷重 (kN/m ²)	最大水平荷重 (kN/m ²)	最大摩擦係数
2.5×2.5	水中	1	33.0	9.2	0.72
		2	33.7	9.1	0.69
		3	69.9	16.6	0.61
		4	70.5	19.0	0.69
		5	96.1	22.5	0.60
		6	96.8	23.4	0.62
	気中	7	97.0	25.2	0.67
		8	97.2	24.2	0.64
		9	97.2	25.3	0.67
2.5×5.0	水中	10	34.1	16.7	0.63

- ① ケーソンの底面抵抗力の室内確認実験¹⁾
- ② 裏込捨石の側面抵抗力の室内確認実験
- ③ 捨石側圧力の現場計測⁴⁾

2. 実験概要

(1) ケーソンの底面抵抗力の室内確認実験

本実験の詳細は既に報告済み³⁾であるため、ここでは実験の概要 (図-4参照) を示す。実験は次の手順で行った。

- 1) 水を満たした土槽に捨石を投入し、均し精度 ±5 cm で均す (間詰め石均し)。
- 2) 捨石上にケーソンをモデル化した載荷版 (長さ 2.5m×幅 2.5m×厚さ 0.3m) を載せ、鉛直荷重として鋼製ピレットを均等に載荷版上に載せる。
- 3) 載荷版の水平変位量を測定しつつ、ジャッキで繰り返し荷重を水平方向に作用させる。

なお、比較のため水を満たさない場合 (気中状態) ならびに載荷版の底面積を大きくした場合 (長さ 2.5m×幅 5.0m×厚さ 0.3m)、鉛直荷重を 3 水準 (約 33, 70, 97kN/m²) 変化させた場合について実験を行った。

表-1に各実験における最大水平荷重と、その際の最大摩擦係数を示す。図-5には表-1における実験

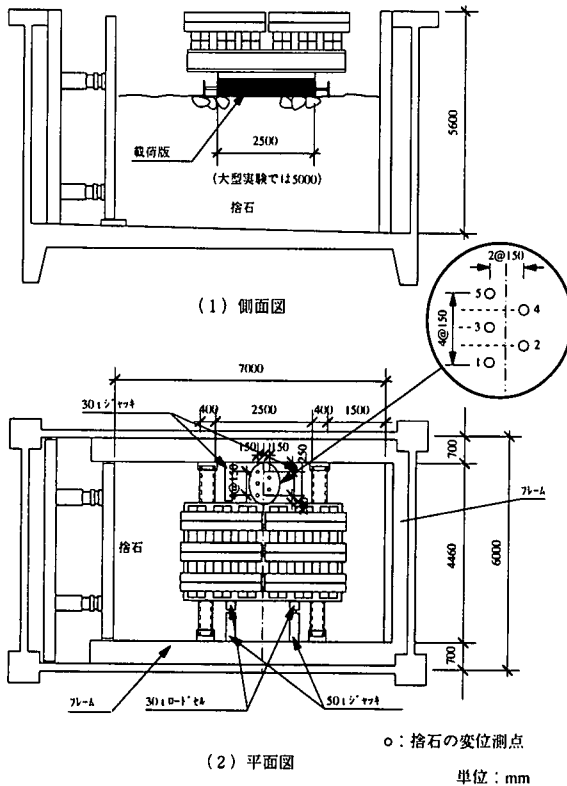


図-4 実験装置の概要

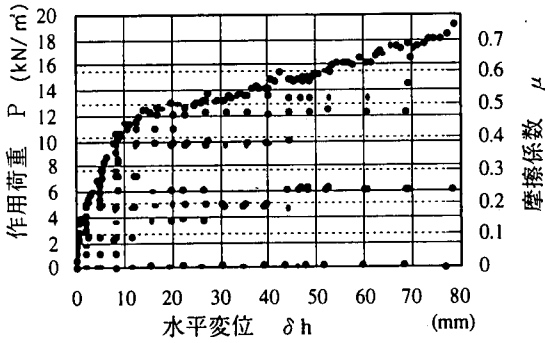


図-5 水平変位と水平荷重（摩擦係数）との関係（実験No.4）

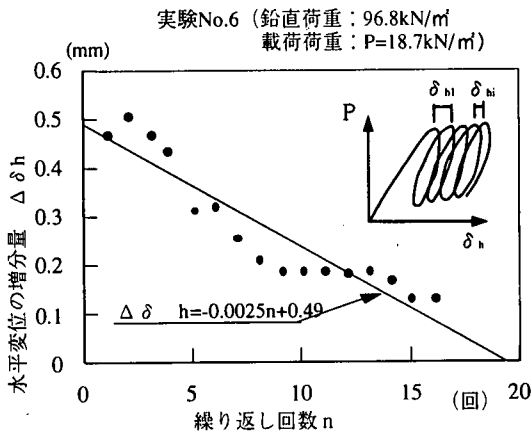
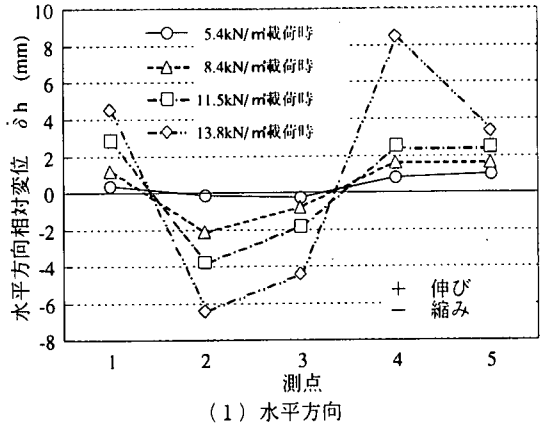


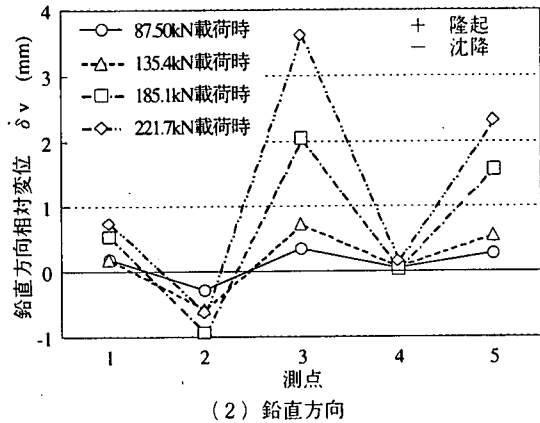
図-6 同一荷重の繰り返し載荷による水平変位増分

No.4での水平変位 δ_h と水平荷重 P および摩擦係数 μ との関係を示す。摩擦係数は水平荷重を鉛直荷重で除して求めている。各実験の最大摩擦係数は載荷版が45~90mmの変位後に生じている。これは、載荷版の変位とともにマウンド捨石が移動し、個々の捨石間の空隙が少なくなり、捨石が一体となって滑動に抵抗したためと思われる。また図-6に示すように、一定荷重を繰り返し作用させた場合には、繰り返し回数に従って変位の増分量 $\Delta \delta_h$ が減少し、実験結果の近似式から20回程度の繰り返し載荷で変位増加量が0.1mm以下となることが推定される。この現象も載荷版の移動とともに捨石間の空隙が減少したことによるものと考えられる。各ケースにおいて、通常設計で使用している捨石とコンクリート間の摩擦係数値 $\mu = 0.6$ はケーソンが45~90mm変位した時点で確保されている。

載荷版の後方位置における、載荷版と捨石表面の水平方向相対変位 δ_h および鉛直方向相対変位 δ_v の推移を図-7に示す。横軸に測点の位置を示し、縦軸に相対変位量を示す。測点2, 3付近では水平方向の相対変位がマイナス、すなわち捨石表面が締まる傾向にあることが解る。また、測点2では捨石表面が



(1) 水平方向



(2) 鉛直方向

図-7 捨石相対変位（実験No.4）

沈降し、測点3, 5付近で隆起を生じている。これら一連の現象により載荷版が滑りづらくなり、底面抵抗力を増加させる要因の1つになっていると考えられる。

(2) 裏込捨石の側面抵抗力の室内確認実験

側面抵抗力は、ケーソンが波浪を受けて水平変位したときに捨石から受ける抵抗力の増分である。

側面抵抗力の実験は、図-8に示すように土槽の長手方向に加圧可動式の鉄筋コンクリート版（以下、加圧版と称する）を有する水を満たした土槽内に捨石を投入して行なった。側面抵抗は、加圧版で捨石に載荷することで求めた。

捨石は、現場の施工状況を想定して水面付近から均等に落下投入した。また、捨石の均し精度も現場での施工精度 $\pm 30\text{cm}$ を目標に人力で行い、レベル測量による確認を行った。

実験土槽境界の抵抗を除くために、捨石の土槽長手方向の背面には水圧ゴムチューブを配置して静水圧以上の反力を極力低減するよう配慮した。また側面にはポリエチレンシートをフレームと捨石間に介

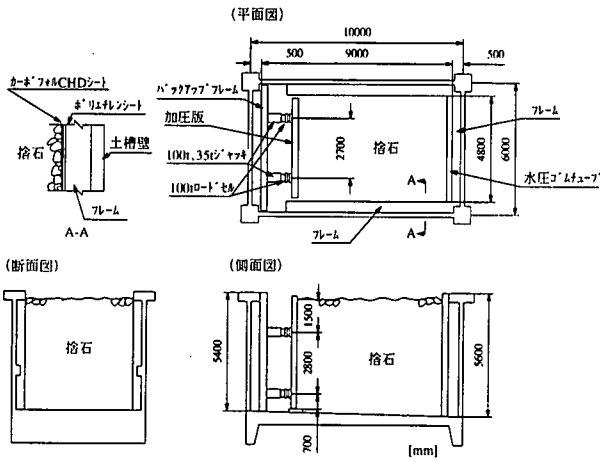


図-8 実験概要

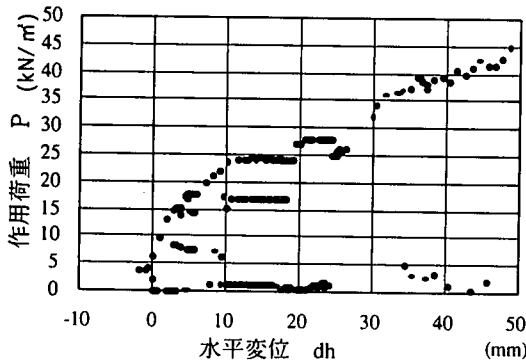


図-9 荷重・変位関係図

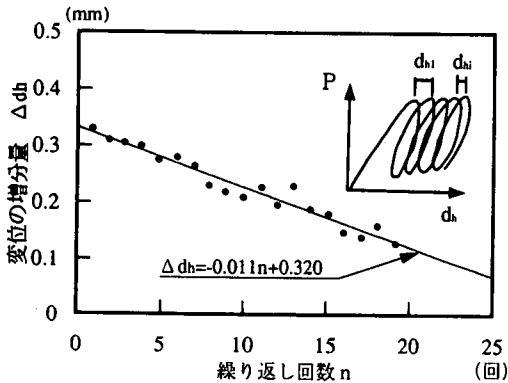


図-10 繰り返し回数と変位増分の関係

在させ、長さ方向の摩擦係数を小さくした（別途に行ったこの構造での摩擦実験結果では摩擦係数は $\mu = 0.2$ であった）。

実験は 3 回行い、図-9 に代表的な加圧版の荷重 P ~ 変位 dh 関係を示す。横軸に加圧版の平均変位量 dh を示し、縦軸には総加圧力 P を示す。加圧は繰り返し載荷とし、図-10 に示すように同一荷重を繰り返し載荷し、変位の増分量 Δdh が約 0.1mm 以下となった段階で荷重水準を上げるようにした。これにより、

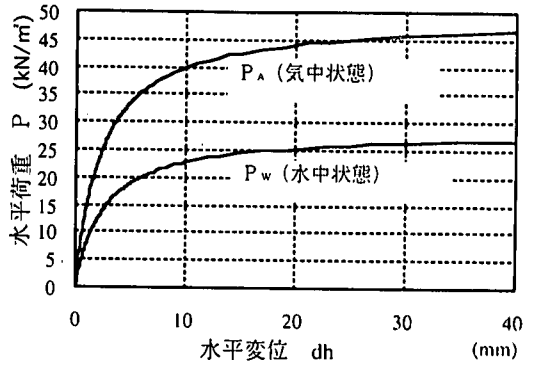


図-11 作用荷重の気中および水中状態の比較

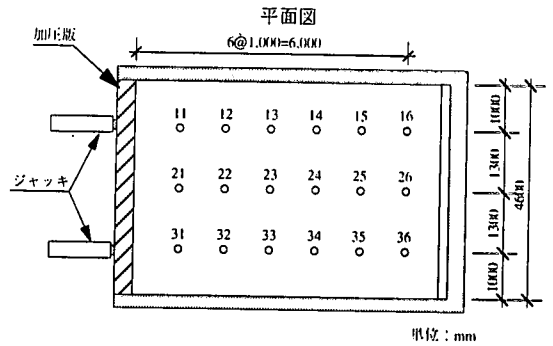
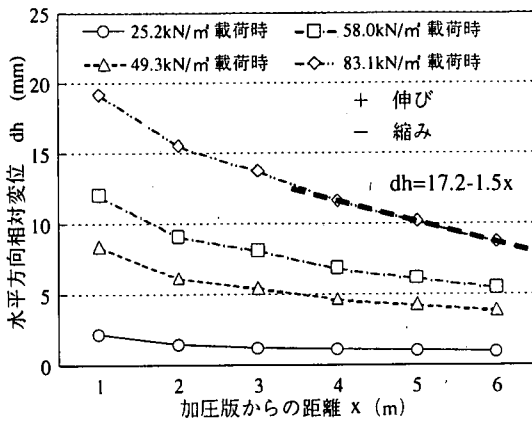


図-12 捨石表面変位測定位置

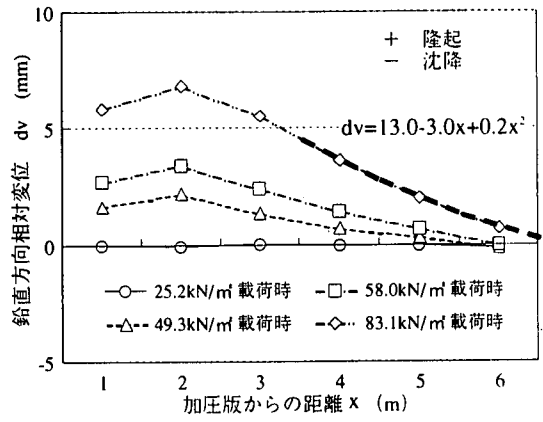
約 20 回程度の繰り返し荷重が裏込捨石に作用することで捨石は締め固まり、ケーソンの滑動変位は収束するとともに側面抵抗力が増加することが解る。

また、荷重-変位特性の確認のために行なった土槽内に水を満たさない場合の載荷においても同様の傾向が得られたが、図-11 に示すように同じ加圧版の変位量での作用荷重 P は、水中状態に比較して 60 ~ 80% 大きい結果となった。最も大きな影響を与えると思われる原因としては、気中状態で投下した捨石は水中状態に比較して締め固め度合いが大きいためと推定される。水中状態での締め固め度合いが小さい理由としては、50 ~ 2000kN 級の捨石が水中内を 1 ~ 2 m 落下すると水の粘性抵抗を受けて 20 ~ 300cm/sec の一定した終速度⁹⁾になることが挙げられる。また、浮力の影響や、気中と水中での捨石の噛み合わせ状態の違いがあることも考えられる。なお、図-11 は実験結果から推定した近似式のグラフである。

実験時に捨石表面の水平変位 dh および鉛直変位 dv を図-12 に示す位置で測定した。なお、水平変位は定点測量と土槽に取り付けたスケールの読み値とを併用し、鉛直変位はダイヤルゲージ式変位計にて測定した。測定結果を図-13 に示す。横軸に加圧版から変位測定位置までの距離を示し、縦軸に載荷段階毎の加圧点（4 箇所）からの相対変位量を示す。この相対変位量は、同一距離の 3 点の平均値である。



(1) 水平方向



(2) 鉛直方向

図-13 捨石相対変位

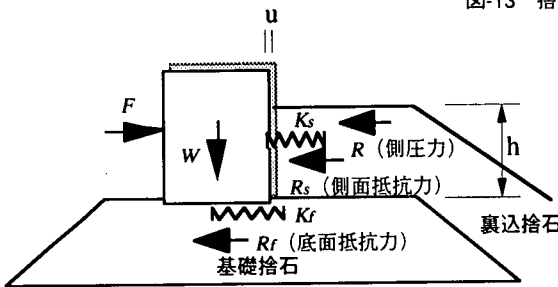


図-14 ケーソンの荷重の釣合

最大荷重載荷時の結果を図中に示す近似式により推定すると、水平変位の影響は加圧版位置から加圧版高さの2倍(約11m)程度までの後方まで及び、鉛直変位の影響はおよそ加圧版高さの1.5倍(約8m)後方までに達している。これより内部摩擦角を推定すると $\phi = 26 \sim 41^\circ$ 程度となる。この値は、土槽境界の拘束などを考慮すれば、設計で通常使用している ϕ 値($\phi = 40^\circ$)と近い値であると考えられる。

3. ケーソンの安定性の評価

以上の実験結果から、滑動変位に対するケーソンの抵抗特性を考慮した設計モデルにて、ケーソンの挙動評価を行なった。

混成式防波堤の安定性評価のための設計モデルを、設計外力と見かけ上の抵抗力との釣り合い式(1)で仮定する。図-14は式(1)を模式的に示したものである。

$$F(u) = R_f(u) + R_s(u) + R \quad (1)$$

ここで、

- u : ケーソンの水平変位 (mm)
- $F(u)$: ケーソンの全抵抗力 (kN/m)
- $R_f(u)$: ケーソンの底面抵抗力 (kN/m)
- $R_s(u)$: 捨石の側面抵抗力 (kN/m)

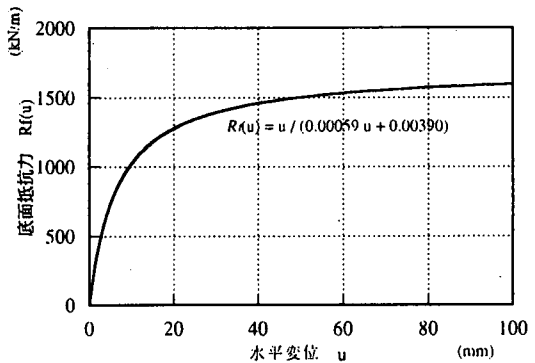


図-15 底面抵抗力とケーソンの水平変位の関係

R : 捨石の側圧力 (kN/m)

$$= 1/2 \cdot \gamma \cdot K \cdot h^2$$

K : 側圧係数

γ : 捨石の水中単位体積重量 (kN/m³)

h : 裏込捨石の高さ (m)

以下、実験結果を基にして $R_f(u)$ ならびに、 $R_s(u)$ を求める。

(1) ケーソンの底面抵抗力 $R_f(u)$ の算出

底面抵抗力は、式(2)で表わされる。

$$R_f(u) = K_f(u) \times u \quad (2)$$

ここで、

$K_f(u)$: ケーソンの底面抵抗係数

式(2)における $K_f(u)$ は、図-5で示した荷重～変位関係の包絡線から最小二乗法により近似すると、次式となる。

$$K_f(u) = 1 / (0.00059u + 0.00390) \quad (3)$$

したがって、 $R_f(u)$ は

$$R_f(u) = u / (0.00059u + 0.00390) \quad (4)$$

と求められる。なお、これらは同じ条件で行った3回の実験結果の平均値より近似され、各実験ケース

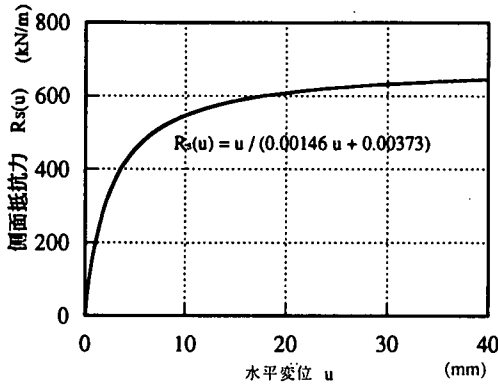


図-16 側面抵抗力とケーソンの水平変位の関係

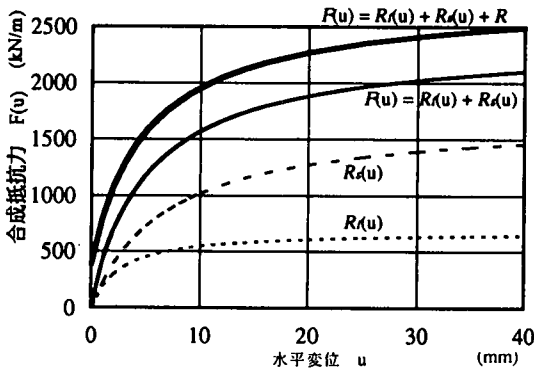


図-17 合成 $F(u)$ 曲線

毎に推定される実験式であるが、式(4)には平均的なケースとして実験No.4の結果を示す。

図-15に、式(4)の底面抵抗力 R_f ～ケーソン滑動変位量 u の関係を示す。

(2) 捨石の側面抵抗力 $R_s(u)$ の算出

側面抵抗力は、式(5)で表わされる。

$$R_s(u) = K_s(u) \times u \quad (5)$$

ここで、

$K_s(u)$ ：側面抵抗係数

式(5)における $K_s(u)$ は、図-9で示した荷重～変位曲線の包絡線から最小二乗法により近似すると、次式となる。

$$K_s(u) = 1 / (0.00146 u + 0.00373) \quad (6)$$

したがって、 $R_s(u)$ は

$$R_s(u) = u / (0.00146 u + 0.00373) \quad (7)$$

と求められる。なお、式(7)は同じ条件で行った3回の実験結果の平均値より近似され、各実験ケース毎に推定される実験式である。

図-16に、式(7)の側面抵抗力 R_s ～ケーソン水平変位 u の関係を示す。

(3) 捨石の側圧力の算出

捨石の側圧力は、ケーソンに対する静止土圧に相

表-2 側圧実験

実験番号	R_e (kN/m)	換算側圧係数
1	27.4	0.34
2	37.6	0.44
3	42.4	0.50
平均	35.8	0.42

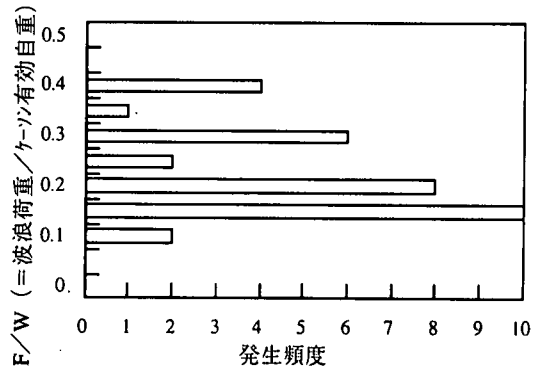


図-18 推測年最大波の出現頻度 (1955～1987年)⁷⁾

当するものであり、ケーソンの滑動量に依存しない抵抗力である。側面抵抗実験において、土槽内に捨石を投入する際に加圧版に発生する側圧力の測定結果を表-2に示す。3回の側圧実験の平均値は $R_e = 35.8 \text{ kN/m}$ であった。ここで、図-2に示す北防波堤の裏込高さは $H=16.5\text{m}$ であり、実験の加圧版の高さは $h=5\text{m}$ であることから実験結果を相似的に式(8)で換算し、実規模での側圧力は $R=390 \text{ kN/m}$ と推定した。

$$R = R_e \times (H/h)^2 = 35.8 \times (16.5/5.0)^2 = 390.0 \text{ kN/m} \quad (8)$$

(4) $R_f(u) + R_s(u) + R$ の合成式

$K_f(u)$ と $K_s(u)$ はケーソンに対して式(9)に示すように並列関係にあると仮定した。

$$K(u) = K_f(u) + K_s(u) \quad (9)$$

式(9)から求められる合成抵抗係数の値に式(8)で求めた側圧力を加えた合成式を式(10)に示す。

$$F(u) = K(u) \times u + R = \{ 1 / (0.00059 u + 0.00390) + 1 / (0.00146 u + 0.00373) \} \times u + 390.0 \quad (10)$$

図-17にはケーソンの水平変位 u とケーソンの抵抗力 F の関係を示す。この図より、側圧力はケーソンの滑動量が小さい領域(底面抵抗力と側面抵抗力が小さい領域)において、ケーソンの滑動量の抑制に有効であることが解る。

(5) 安定性の評価

白鳥地域には、1955～1987年の33年間に図-18に示す波浪が来襲したと推定される。北防波堤が、こ

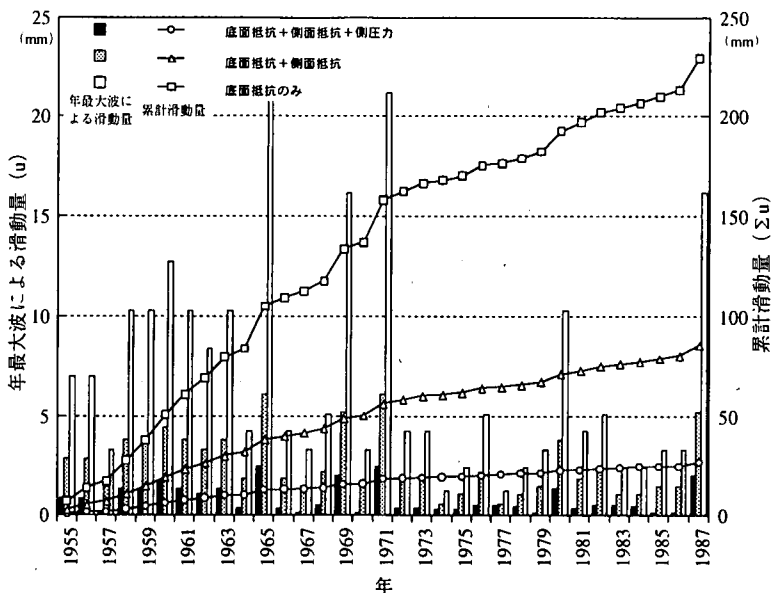


図-19 年最大波による累積滑動量

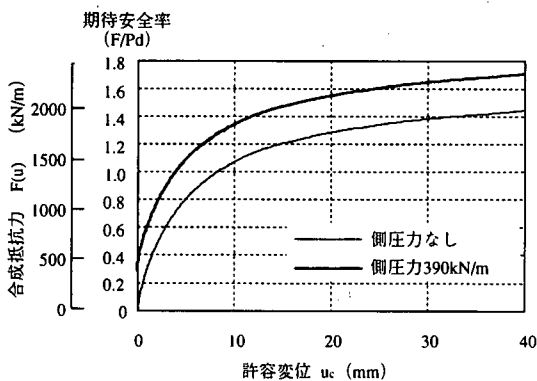


図-20 設計水平合力と許容変位量の関係

の波浪を受けた場合に生じるケーソンの滑動量を図-17に示した抵抗力の関係から試算したものを図-19に示す。図-19は、横軸に波浪の発生年をとり、左縦軸には各年におけるケーソンの滑動量を棒グラフで示し、右縦軸には各年で生じた滑動量を1955年～1987年まで順次累積した滑動量を折れ線グラフで示す。今回のケーソン底面抵抗力の確認実験結果から、ケーソンの滑動については、経験最大荷重を受けたときの変位増分のみが支配的に累積し、経験最大荷重以下の荷重載荷時の変位はほとんど累積しないことが確認された。しかしながら実際の現象としては、捨石は繰り返し波浪荷重を受けて初期の弛緩状態に近づくものと考えられる。図-19に示すグラフは、1年間で捨石マウンドの状態が初期状態に戻ると仮定した時の累積変位量である。これより裏込捨石は、ケーソンの底面抵抗力のみを期待した場合と比較して側面抵抗力の効果で約4割、側面抵抗力

と側圧力との効果で約1割にまで、ケーソンの滑動量を低減することが推定される。この仮定に基づいてケーソンの累積滑動量を算出すると、33年間で100mm以下に押さえることが可能であり、本防波堤の機能保持に十分な値であると言える。

また、設計水平合力Pd (=1417kN/m) が作用した場合のケーソンの滑動変位量は、図-20に示すように側圧力を考慮しない場合で約8mm、390kN/mの側圧力を考慮した場合には約4mm程度である。ここで、設計水平合力に対して1.2倍の安全率を考えた場合でも各々15mm、7mm程度である。

4. まとめ

本研究の成果をまとめると次のことが言える。

- 1) 捨石が十分に締まっていない状態で波力がケーソンに作用すると、ケーソンは微小な変位を生じるが、変位が生じる毎に捨石が締まり、底面抵抗力が増す。
- 2) 過去の経験荷重と同一レベルの繰り返し荷重に対しては、ケーソンの変位は収束傾向にある。
- 3) 上記1) 2) の成果は、ケーソンと捨石マウンドとの底面抵抗力および裏込捨石の側面抵抗力の両者に言える。
- 4) ケーソン防波堤の安全性においては、荷重と滑動特性を考慮して評価した結果から、裏込捨石の有効性が確認された。

謝辞：最後に、ご指導ご協力を頂いた福岡正巳博士
ならびに運輸省港湾技術研究所、石油公団、白鳥石
油備蓄基地建設工事JVの関係各位を初め多くの方に
感謝する次第である。

参考文献

- 1) 高橋邦夫, 富田幸晴: 捨石マウンドの支持力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol.24, No.1, pp.133~181, 1985.
- 2) 森平倫生, 足立一美: 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について (第2報), 第26回海岸工学講演会論文集, pp.446~450, 1979.
- 3) 鍛冶杜吉, 後藤貞治, 滝本孝哉: 基礎捨石とケーソンの摩擦係数確認実験, 土木学会論文集, No.509/II-30, 231-234, 1995.2.
- 4) 鍛冶杜吉, 後藤貞治, 滝本孝哉: ケーソン式防波堤の背面に配した捨石土圧の現場計測, 土木学会論文集, No.509/II-30, 225-229, 1995.2.
- 5) 高橋, 近藤, 小岩, 岩崎, 白鳥, 菊谷, 佐藤, 齊藤, 松本: 捨石の水中落下速度について, 港湾技研資料, No.249, 1976.
- 6) 社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1989改訂版.
- 7) 白鳥石油備蓄株式会社, 日本シート・エンジニアリング株式会社: 防波堤基礎の安全性に係る確認実験業務報告書, 1989.7., p.226.

(1995.9.11 受付)

EXPERIMENTAL EXAMINATION TO A CHARACTERISTIC OF RUBBLE IS USED IN THE FOUNDATION MOUND FOR A CAISSON TYPE BREAKWATER

Sokichi KAJI, Kiyotaka SUDA and Takaya TAKIMOTO

At Shirashima Oil Stockpiling Base, we put back-filling rubble behind a breakwater as a reinforcement against to the waves. We practiced an indoor experiment on resistance force from rubble to the breakwater. This paper describes the breakwater's anti-slide stability with consideration of increasing resistance force with rubble's displacement. About anti-slide stability, we ascertained that back-filling rubble have an enough effect on restraint of the breakwater's sliding displacement.