

ケーソン式防波堤の背面に配した捨石土圧の現場計測

鍛冶壮吉¹・後藤貞治²・滝本孝哉³

¹正会員 白島石油備蓄(株) 建設一部 次長

²コスモエンジニアリング(株) 四日市事業所 プロジェクト部 次長(前:白島石油備蓄(株) 北九州事業所 課長)

³正会員 日本シールドエンジニアリング(株) 第二事業部 企画調査室 課長

石材は、重力式係船岸など背面からの土圧軽減のための裏込材として、多量に用いられる材料である。白島石油備蓄基地では、捨石をケーソン式防波堤の波力に対する滑動抵抗部材として使用した。本報告は、大型のパネル式土圧計を使用して、ケーソン背面に作用する捨石の土圧強度を計測した結果である。本現場における捨石の土圧係数は、平均値で $K=0.2$ であった。

Key Words : earth pressure, coefficient of earth pressure at rest, field measurements, rubble

1. はじめに

北九州市の北方約 8 km 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)。この地域は、非常に厳しい気象・海象条件下にあるため、貯蔵船の周囲約 2.4 km に亘ってケーソン式の防波堤を配置し、波浪に対する貯蔵船の安全を確保している。波力によるケーソン本体の滑動や転倒に対しては、次の 2 つの抵抗力で安全性を確保した設計を行っている(図-2 参照)。

- ①ケーソンの重量によるマウンドとの摩擦抵抗力
 - ②ケーソンの泊地側に投入した裏込捨石の土圧抵抗力
- 本現場計測は、上述の②がケーソン本体の滑動の抑制に有効に寄与しているかどうかを確認する目的で行った。計測期間は、裏込捨石の施工開始から設計断面が完成するまでの 1 年間と完成後から 1 年間の約 2 年間に亘って行った。計測期間中の波浪観測結果から、合田式で算出した最大水平波力は、 337 kN/m ($H_{1/3}=2.95 \text{ m}$, $T_{1/3}=7.7 \text{ sec}$) であった。そのため、設計水平波力 (1417 kN/m) 規模でのケーソンの滑動に対する捨石の有効性は確認できなかったが、既往の事例に無い大規模な現場計測によって、捨石の静止土圧強度の規模が必要最小土圧抵抗力の 3 倍以上あることを確認できたことは、滑動に対する安全性を裏付けるものであった。

2. 計測概要

(1) 室内実験

設計に使用した諸定数の確認のために、現場計測に先

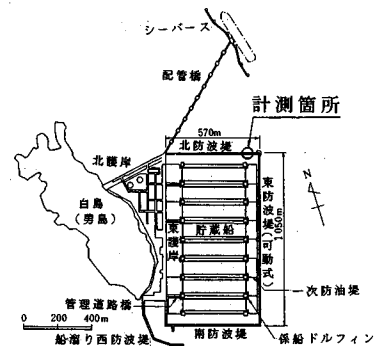


図-1 白島石油備蓄基地平面図

立ち、次の 2 つの室内実験を行った。

a) 基礎捨石とケーソンの底版コンクリートとの摩擦係数値を確認する実験では、水中において均し精度 $\pm 5 \text{ cm}$ の基礎捨石上に幅 $2500 \text{ mm} \times$ 長さ $2500 \text{ mm} \times$ 厚さ 300 mm の RC 製版(滑動方向に対して、現場で使用するケーソンの 1/5 モデル)を載せ、上載荷重の大きさを数通り変えて版を滑らす方向に載荷した。その結果、水中下におけるコンクリートと捨石の摩擦係数 (μ) は $\mu > 0.6^{(1),(2)}$ が得られ、設計に使用した μ の妥当性が確認できた。

b) ケーソン背面に配した裏込捨石の抵抗力を確認する実験では、長さ方向に加圧可動式の載荷版を有する水を満たした幅 $4600 \text{ mm} \times$ 長さ $9000 \text{ mm} \times$ 高さ 5400 mm (現場で使用するケーソンの高さに対して、約 1/3 モデル) の土槽内に捨石を投入し、可動壁で載荷することで捨石の抵抗土圧を求めた。その結果、捨石の最大抵抗土圧は、設計上必要な抵抗土圧を満足することを確認

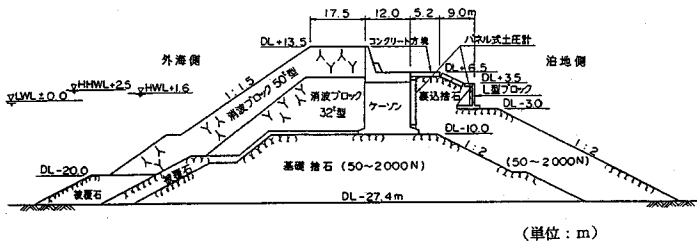


図-2 北防波堤断面図

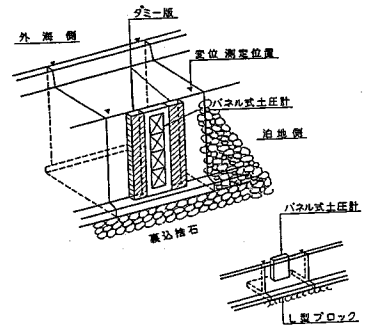


図-4 計測機器設置概要図

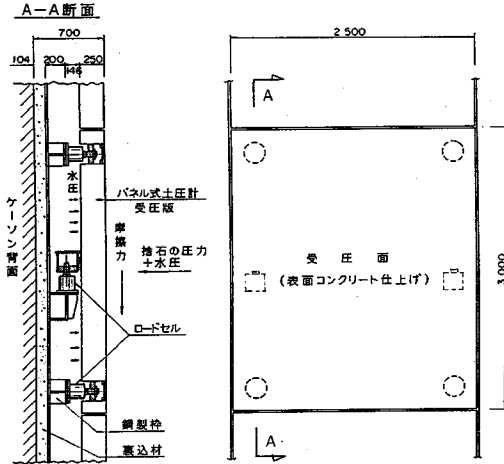


図-3 パネル式土圧計概略構造図 (単位: mm)

得るためにコンクリート仕上げとした。

④パネル式土圧計がケーソン壁面より泊地側に700mm突起することから、受圧面周辺の土圧の集中を除くため、幅2mのRC製ダミー版をパネル式土圧計の両隣に設置した(図-3, 4参照)。

⑤パネル式土圧計(受圧版, ロードセルならびに鋼製棒を組み合わせた状態)としての精度を確認するために、次の2つの校正試験を行った。

校正試験a)：陸上での横置き状態で、約120kNの鋼製スラブを順次6枚まで受圧版に載荷した。精度は、受圧版上での偏心載荷などに対しても全て0.5%以内であった。

校正試験b)：パネル式土圧計をケーソン背面に設置した縦置き状態において、受圧版背面とケーソン壁面の隙間から水中ポンプで強制排水を行い、受圧版の前後に水頭差を生じさせた。出力値は受圧面に寄せる小波やポンプ排水の不安定さなどの影響を大きく受けたが、水頭差3mにおける水圧荷重と出力値との差は最大15%であった。

測定器は、計測箇所に電源が無く、波浪時に現地に行くことが困難なことから、1日あたり3回の頻度で約3ヶ月間のデータが記憶できる電池式のひずみ測定器を使用した。なお、測定器は、ケーソン上に設置した耐波測定室内に設置した。

3. 計測結果

計測は、図-2に示すケーソン式防波堤の底面位置(DL-10m)からコンクリート方塊による被覆工が完成する(DL+6.5m)までの期間(施工時計測)と、断面が完成した後から波浪の厳しい越冬を含む期間(定期計測)の計測に分けて行った。前者は、裏込捨石高さが約1m増加する毎に投入を停止して随時計測を行った。後者は、1日あたり3回の自動計測を行った。

水面下への裏込捨石の投入方法は、海水の汚濁防止の

した。また、捨石投入状態で生じる捨石の静止土圧が構造物の滑動変位量の抑制に有効であることが分かった。

なお、両実験で使用した捨石は、現場で使用する捨石と同じ門司産(50~2000N級)³⁾を使用した。

(2) 現場計測

計測箇所は、最も波浪の影響が大きい北防波堤のケーソン(図-1参照)を対象として行った。計測器として、図-3に示すパネル式土圧計をケーソンの泊地側に4面と裏込捨石を挟み相対する位置のL型ブロックに1面設置した(図-4参照)。パネル式土圧計は、福岡ら⁵⁾が擁壁に作用する土圧を計測するために開発したものである。パネル式土圧計の採用にあたり、次の①~④の工夫および⑤の校正試験を行った。

①受圧面の大きさは、裏込捨石の最大粒径が約50cmであることから、測定精度を確保する⁴⁾ために図-4に示す規模とした。

②土圧を受ける受圧版は、捨石投入時の衝撃にも耐えるように、厚さ250mmの鉄骨コンクリート製とした。荷重を感知するセンサーは、500kNのひずみゲージ式ロードセル(精度0.5%以内)を鉛直方向荷重に対して2箇所、水平方向の荷重に対して4箇所使用した。

③受圧面の表面は、ケーソン壁面と同様の摩擦係数を

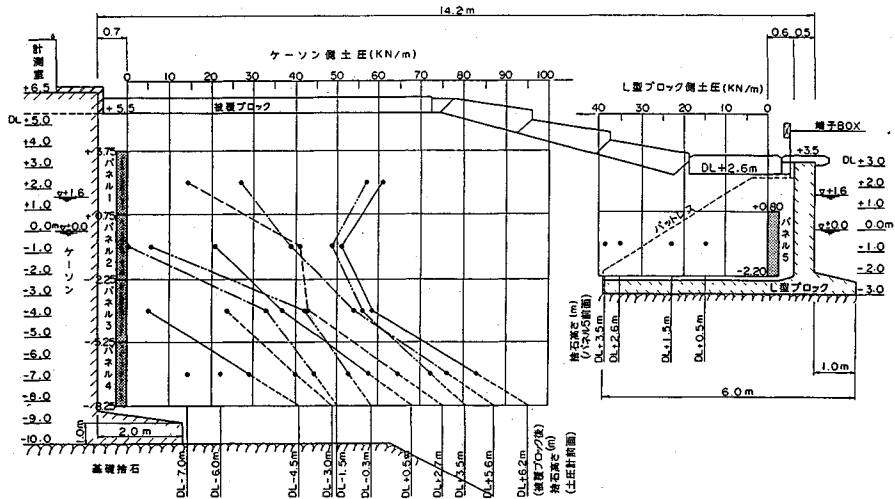


図-5 施工時における土圧強度分布

ため、ポケットを水中で開放する方法で行っている⁹⁾。捨石の投下高さが水面より上の場合には、捨石がケーソン背面に設置したパネル式土圧計に直接当たる勢いで投入した。

裏込捨石の均しは、ブルドーザーおよびユンボで行い、コンクリート方塊の敷設にあたっては碎石を投入して均した。なお、パネル式土圧計の前面での裏込捨石の投入高さの測定は、重りをつけたスチールテープで測定した。

(1) 施工時計測結果

図-5は、計測箇所の断面図を示し、裏込捨石の投入高さに比例して増加する土圧強度を各パネルの中央位置で示したものである。図-5に示す捨石高さの表示値は、パネル式土圧計の直前面での標高を示している。図示している土圧強度は、水中部では捨石の有効土圧強度を示し、気中部では浮力を受けない捨石の土圧強度を表している。ブロック方塊を敷設するまでの土圧強度の分布は、概ね深度方向に増加する三角形分布を呈している。また、パネル式土圧計に発生する鉛直下向きの摩擦力 (P_v) は、水平方向土圧強度 (P_h) と概ね式 (1)、および式 (2) の関係にあった。

$$P_v = (0.2 \sim 0.4) \times P_h \quad (\text{捨石が水中にある場合}) \quad (1)$$

$$P_v = (0.4 \sim 0.5) \times P_h \quad (\text{捨石が気中にある場合}) \quad (2)$$

(2) 定期計測結果

図-6に示す定期計測結果は、月あたりに得られる約90回の計測データの内、パネル1からパネル4の水平方向の土圧強度の総和が最大値および最小値となる計測値をパネル毎に経時的に示したものである。●印は、

パネル1からパネル4の計測値の総和を示す。○印は、ケーソンの背面全体に作用する全土圧強度を図-7に示すような土圧強度の分布を仮定して算出したものである。パネル1より上の土圧強度は、ケーソン防波堤天端での土圧強度を0としてパネル1の計測値と直線で結ぶ三角形分布とした。パネル4から下の土圧強度はパネル3とパネル4の計測値を直線で結ぶ台形分布とした。

図-7は、定期計測期間中に得られた全土圧強度の最小値(1992年3月)と最大値(1992年10月)の分布を示す。図-7中の破線は、式(3)を用いて静止土圧係数(K)を変化させた場合の土圧強度(P)の分布を示す。

$$P = K \cdot \gamma \cdot H \quad (0 \leq H \leq H_a) \quad (3)$$

$$P = K \cdot (\gamma \cdot H_a + \gamma' \cdot H) \quad (H_a \leq H \leq H_w)$$

ここで、 H : 裏込捨石の投入高さ (m)

γ : 裏込捨石の空中単位体積重量 (=16.46 kN/m³)

γ' : 裏込捨石の水中単位体積重量 (=6.37 kN/m³)

H_a, H_w : $M.W.L = \pm 0.8$ mとした場合の気中部の捨石高さ ($H_a = 5.7$ m) と水中部の高さ ($H_w = 10.8$ m)

これより、約1年間の定期計測から求めた裏込捨石の静止土圧係数は、 $K = 0.2$ 前後の値であることが分かる。

光波距離計による測量結果では、波浪の厳しい越冬の前後(1991年12月と1992年2月)のケーソン天端面の外海側への平均水平変位量は、約1.5 mmであった。

この3ヶ月間の土圧強度は図-6に示すように減少傾向にあるが、越冬後は徐々に回復し越冬前の値に復帰している。これは、越冬後の潮位変動や繰り返し寄せる小さな波により、捨石が徐々に動き、ケーソンと捨石の間

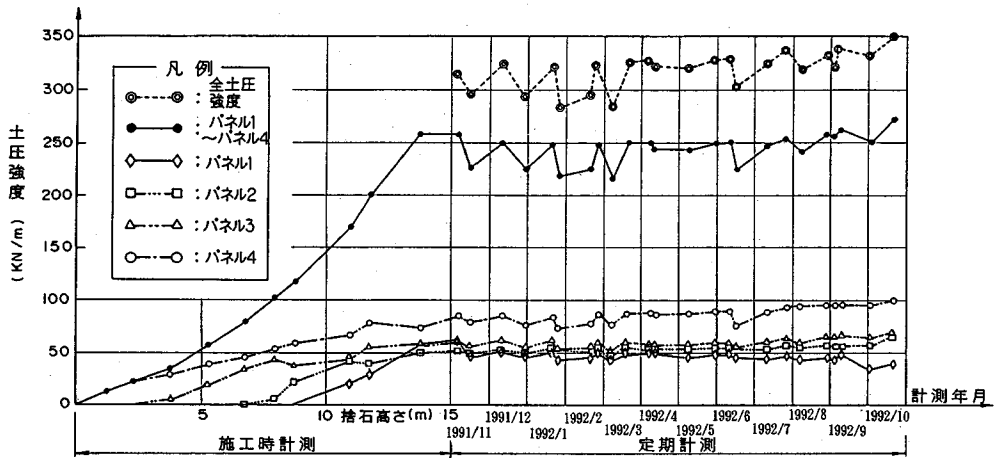


図-6 土圧強度の経時変化

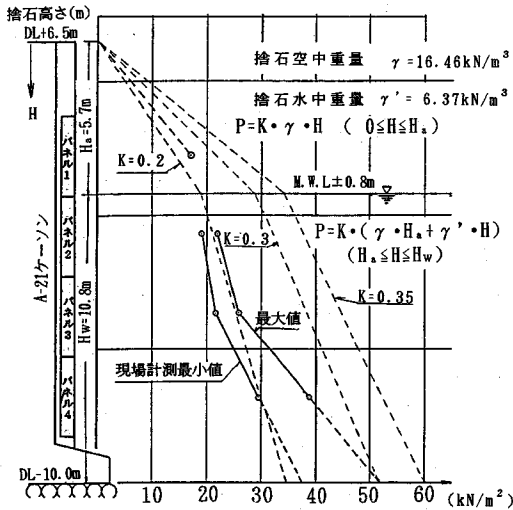


図-7 防波堤断面完成後の土圧強度分布

に生じた隙間を間詰めしたものとして推定される。また、計測から求めた静止土圧係数 ($K=0.2$) は、捨石の内部摩擦角を $\phi=35\sim 40^\circ$ と仮定した場合に、式 (4) で示す主動土圧係数に近い値を示している。

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) = 0.27 \sim 0.22 \quad (4)$$

4. まとめ

現場計測で得られた静止土圧強度 (R) は、図-6の推移から防波堤断面の完成8ヶ月後より約 $R=300$ kN/m以上が期待できると推定される。ここで、ケーソンの滑動に対する安全率 (SF) を式 (5) から求める。なお、ケーソン防波堤の設計に使用した設計波は、 $H_{1/3}=7.0$ m、 $T=12.5$ secである。

$$SF = (\mu(W-U) + R) / P_H = 1.46 \quad (5)$$

ここで、 P_H : 設計水平波力合力 (=1417 kN/m)

μ : ケーソン底面と捨石の摩擦係数 (=0.6)

W : 浮力を考慮したケーソン自重 (=344 kN/m)

U : ケーソンに作用する揚圧力 (=390 kN/m)

R : 裏込捨石の静止土圧 (=300 kN/m)

これより、捨石には受働抵抗土圧も期待できるが、捨石の静止土圧のみでも滑動に対して十分な抵抗性が確保できていると考える。また、捨石の静止土圧係数は、概ね $K=0.2$ が得られており、慎重な施工後に締め固められた捨石の自立性は大きいと推定される。

ご指導ご協力をいただ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、白島石油備蓄基地建設工事JVの関係各位をはじめ多くの方に深謝する次第である。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、(上巻): 社団法人日本港湾協会、p.228, 1989改訂版。
- 2) 森平倫生、他2名: 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について、第25回海岸工学講演会論文集、pp.337-341, 1987。
- 3) 小林正樹、他4名: 捨石マウンドの支持力の新しい計算法、港湾技術研究所報告、第26巻、第2号、pp.377-379, 1987/6。
- 4) 粗粒材料の変形と強度: I粗粒材料を用いた大型共通試験、社団法人土質工学会:p.184, 1986。
- 5) 福岡正巳: 新しい土圧入門、近代図書、pp.4-32-4-39, 1982。
- 6) 高橋英俊、他8名: 捨石の水中落下速度について、運輸省港湾研究所資料、No.249、pp.1-36, 1976。

(1994.3.22 受付)

FIELD MEASUREMENTS OF THE EARTH PRESSURE IN A RUBBLE MOUND ON THE REAR FACE OF A CAISSON TYPE BREAKWATER

Sokichi KAJI, Teiji GOTOH and Takaya TAKIMOTO

Stones are employed in many cases as backfill material to reduce the earth pressure on the rear face of gravity mooring quays etc. At Shirashima Petroleum Storage Base rubble was used for sliding resistance against the wave pressures on a caisson type breakwater. In this study, large scale panel type earth pressure cells were used to measure the earth pressure in the rubble acting on the rear face of the caisson. The coefficient of earth pressure for the rubble had an average value of $K=0.2$.