

大水深混成堤の直立部に働く波力と滑動安定性

谷本 勝利*・木村 克俊**・宮崎 啓司**

1. ま え が き

近年における防波堤建設の大きな特徴の一つはその大水深化である。現在、釜石港湾口津波防波堤（最大水深 63 m）を始めとして、下田港（同 42 m）、柴山港（同 35 m）で大水深防波堤が建設中あるいは計画されている。これらの防波堤には低反射性が要求されるとともに、大水深化に伴う工費の高騰を抑える新しい構造が求められている。また、大水深の非碎波領域における波浪条件の不確実性に対し、いかに合理的に設計するかといった設計上の多くの課題が残されている。そのため、筆者らは大水深に適した構造の開発を含めた大水深混成防波堤の耐波安定性に関する研究を、主として現地計画における具体的な課題解決を通じて推進中である。本論文ではこのうち、釜石港を想定した実験結果等に基づき、大水深における直立部に働く波力および滑動安定性上の特性を論じる。

2. 実験の方法

(1) 実験水路および模型

実験は長さ 105 m、幅 3 m、深さ 2.5 m の大型造波水路で行った。対象とした堤体は、図-1 に示すように、基礎捨石マウンドの上に直立部を据付けた水深 60 m における混成堤¹⁾の縮尺 1/40 の模型である。ケーソン基面は -67.5 cm（現地換算 -27 m）で、ケーソン形状は下部が台形で上部の入射側には二重横スリットの消波部を有している。ただし、実験では比較のためにケーソンの前後を逆にして波の入射側を不透過な壁とした場合も一部対象としている。そのため、消波部が波の入射側にある正規の場合を「消波型」、そうでない場合を「反射型」と呼んで区別する。

ケーソン模型の側面図および壁面における波圧の測点を図-2 に示す。ケーソン模型はアクリル合成樹脂板で製作したものである。ただし、底は滑動実験を行うため、厚さ 4 cm のコンクリート版としている。波圧の測

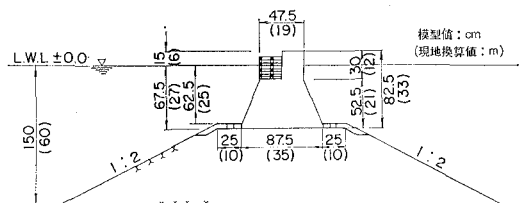


図-1 堤体模型の断面

点は図に P1～P9 で示しているように合計 9 点で、波圧計（直径 1 cm および 3 cm）を受圧面が各壁面に一致するように固定している。

(2) 実験の種類

実施した実験は次の 2 種に大別される。

① 不規則波による滑動実験

② 規則波による波力実験

不規則波による滑動実験は不規則波作用下での滑動量を変位計で測定したものである。ただし、変位計はケーソン背後の天端下 5 cm に取付けており、変位にはロッキングや傾斜によるものも含まれる。そのほか、変位と同時に前面台形斜面壁（P7～P9）での波圧を測定している。

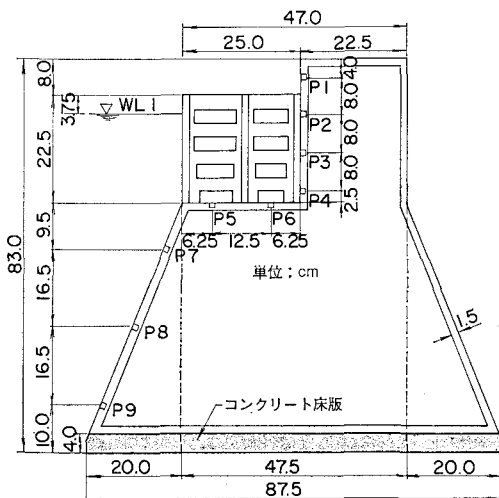


図-2 ケーソン部の断面

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部長

** 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室

不規則波の有義波周期は $T_{1/3}=1.90$ s とし, Bretschneider・光易型スペクトルを目標とした有効波数約 200 波の波列を3種用意した。さらに, 波高レベルは有義波高 $H_{1/3}=7\sim 24$ cm の範囲で5種類に変化させた。ケースンの空中重量は, 合田式で計算される安定重量(安全率 1.2)の約 0.7 倍, 0.8 倍および 1.0 倍の値の3種に変化させており, これをそれぞれ W_1, W_2, W_3 と呼ぶ。なお, 対象とした構造形式は消波型, 反射型の2種とした。

一方, 規則波による波力実験は消波型のみを対象とし, 各壁面(P1~P9)での波圧を測定している。実験周期は, 不規則波実験と同じ $T=1.90$ s とし, 波高は $H=20\sim 40$ cm の5種類とした。測定対象は波がほぼ定常状態での9~10波とした。

3. 波力特性

(1) 前面台形斜面壁での波圧特性

図-3は無堤時の通過波高に多重反射による波高増幅率を乗じて求めた入射波の代表波高($H_{\max}, H_{1/10}, H_{1/3}$)とそれに対応する波圧の代表値との関係をプロットしたものである。波圧は測点P9での値(p_{m9} と表示する)で, 3波群の結果を平均して示してある。図中の曲線はそれぞれ最小自乗法であてはめた2次曲線であるが適合度は高い。正・負の波圧を比較すると, 負の波圧の絶対値が大きくなっている。消波型と反射型では, 反射型が正・負ともに絶対値でやや大きいけれども, 波高が40 cm程度になると違いがなくなる傾向がある。

以上は代表値同志の関係であるが, 不規則波の1波ごとの入射波高が推定されると, 入射波高と波圧や滑動量の関係が求められて便利である。そこで図-3に示した最小自乗法による関係を用いて, 実測された測点P9での波圧から入射波高を推定することにした。

図-4は反射型に対して, これらの関係を用いて推定した1波ごとの入射波高 H_I' と波圧測点P7のピーク値(p_{m7})の関係を示したものである。図中, 有限振幅重複波第4次近似理論²⁾(マウンド無視)による波圧強度, および正のピーク値に対しては合田式(マウンド考慮)による波圧強度も示してある。ともに, 周期は有義波周期とし, 通常の直立壁があるものとして計算した値である。両者を比較すると波高の小さい条件では有限振幅重複波理論, 大きい条件では合田式による計算値がやや大きい。これは有限振幅重複波理論では波高がある程度大きくなるにつれて, 正の波圧に双峰性が現われて伸びが鈍化するのに対し, 合田式では波圧係数 α_2 の効果によって伸びが増大するためである。実験値と比べると正の波圧はほぼ平均的な関係で, 負の波圧はほぼ上限に近い関係がある。なお, 波高の大きい条件で負の波圧が一定

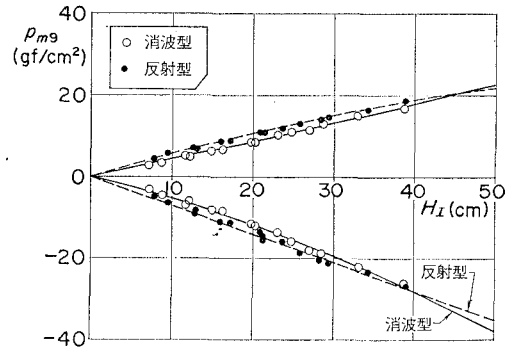


図-3 入射波高と波圧 p_{m9} の代表値の関係

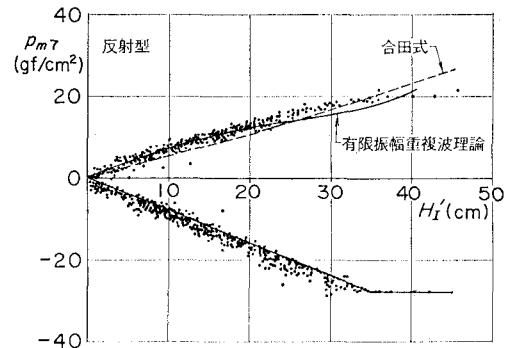


図-4 推定入射波高と波圧 p_{m7} の関係

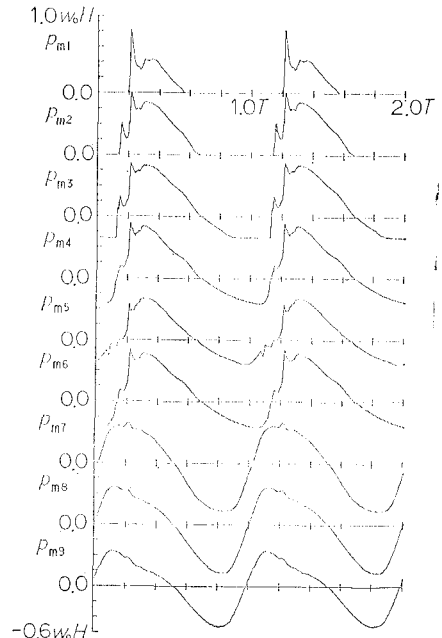


図-5 壁面に働く波圧の記録例(消波型)

になるのは波圧計位置が露出するためである。

(2) 消波型の各壁面に働く波力

図一5 は $H=30$ cm の条件での消波型の壁面波圧の記録例を示したもので、静水状態での水压を 0 として、水压増を正と定義している。この場合、遊水室内の波圧 $p_{m1} \sim p_{m6}$ には立ち上がり急な波圧が現われており、これらは同時に最大になっている。これは第一列のスリット壁で打ち上げられた水塊が後壁の上方に衝突することによって生じたものである。 p_{m5} および p_{m6} は底版を下向きに押す力であり、ケーソン底版に働く揚圧力を打ち消すことになる。なお、 p_{m2} および p_{m3} にはその前にも小さなピークが現われているが、これはスリットを通過した波面が作用したことによる。

一方、外側の台形壁面に働く波圧 $p_{m7} \sim p_{m9}$ には衝撃的なピークは現われず、波圧の最大値は遊水室内壁よりは明らかに早いタイミングで生じることがわかる。このためケーソンの安定性に関しては全体に同時に働く波力が重要となる。

(3) 滑動合成波力

図一6 は消波型に対して、壁面の波圧から求めた滑動合成波力と波高の関係をプロットしたものである。正と負の絶対値を比較すると、全体的に正のほうが卓越している。これは、壁面の下方では負の波圧が卓越する場合であっても静水面付近では正の波圧が卓越し、かつ静水面上には正の波圧しか作用しないこと、さらに負の場合には鉛直波力が滑動をしにくくするように下向きに働くことが理由と考えられる。

同図には反射型の滑動合成波力の計算値も示してある。消波型の実験値は正については前述した波圧の位相差と遊水室で下向きの波圧の効果によって、計算値より小さい傾向がある。一方、負については傾向は合っているものの、波高が大きくなるにつれて、絶対値で実験値がやや小さくなる。これは理論と実験の条件の違いにもよるが、波高が大きくなるにつれて遊水室からの落下水の跳ね返りが強くなり、壁面での波圧がそれほど低下しないことによると考えられる。

また、図中には滑動実験で変化させた 3 種のケーソン重量に対する摩擦抵抗力 $\pm \mu W_{1-3}$ (μ は 0.6) も示してある。これと滑動合成波力の交点で求められる滑動限界波高は正方向の値が小さく、特にその傾向は反射型で顕著である。

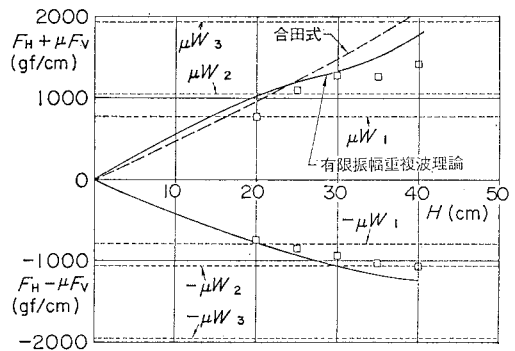
4. 滑動安定性

滑動実験を実施した 3 種のケーソンのうち、安定重量に相当する W_3 の場合には全く滑動は観察されなかった。ここでは W_1 およ

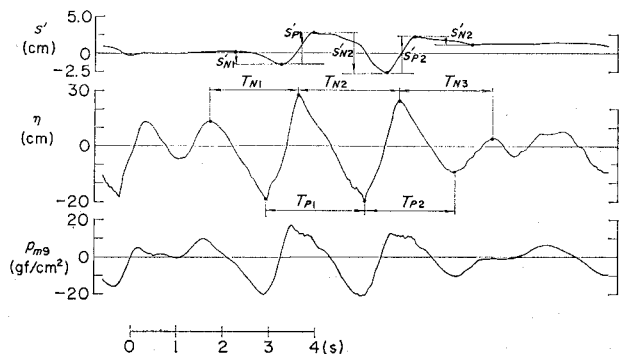
び W_2 の実験結果に基づいて考察する。

図一7 は消波型の W_2 (安定重量 W_3 の 0.8 倍のケース) についての、変位 s' と壁面水位 η および測点 P9 での波圧 p_{m9} の記録例である。ここに、変位は岸向きの方向を正と定義しているが、ケーソンは正・負両方に変位することがわかる。このため、碎波帯内でのケーソンのように滑動が岸向きに一方的に累積されるのではなく、前後に揺れて残留変位が大きくなることが特徴的である。なお、一波ごとの変位は、水位波形の T_p (正の変位の場合) または T_N (負の場合) を区間として、変位波形の極大・極小値の差で定義した。

図一8, 9 は、それぞれ消波型、反射型の W_2 のケースについての、一波ごとの滑動量と推定入射波高の関係を示している。いずれにおいても、正については合田式、負については有限振幅重複波理論による滑動限界波高を矢印で示してある。これらの計算値が正の滑動の卓越を示唆するのにに対し、実験結果ではそうした違いは認められず、ケーソンは波によって前後にほぼ同じように揺られることを表している。データの平均的な関係を破線で示してあるが、消波型と反射型を比較すると、特に正の波別滑動量は前者が後者に比べて小さい。すなわち、同



図一6 滑動合成波力



図一7 変位記録の例 ($H_{1/3}=24.0$ cm, 重量 W_2)

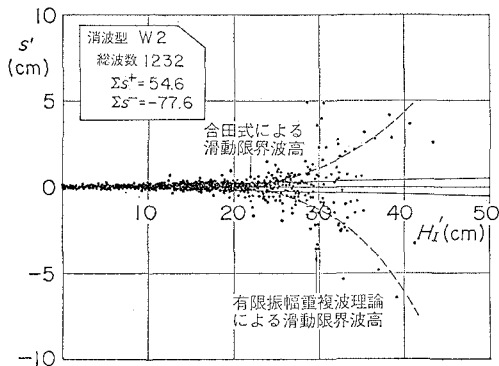


図-8 波別滑動量 (消波型)

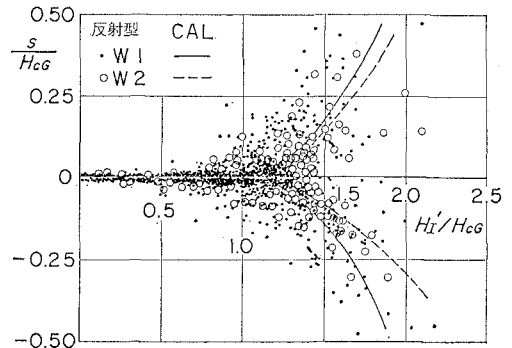


図-10 無次元波別滑動量 (反射型)

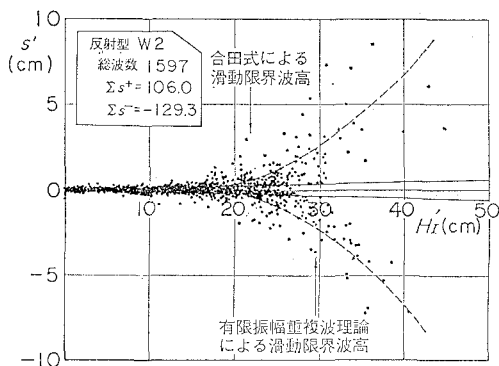


図-9 波別滑動量 (反射型)

じ重量であっても消波型の滑動安定性が高いことを示している。

さらに、実験結果では波高が小さくても若干の変位があり、データの上下限が波高とともに拡大する傾向がみられる。これは前述したように、変位量にロッキング等による変位を含んでおり、その影響は波高に比例すると考えられる。同図の実線はこうした傾向を最小自乗法で表したものである。また、図中の $\Sigma s^{\pm}$ はこれによって補正した波別滑動量の正・負別の集計値である。

図-10 は反射型に対して、上述した補正後の波別滑動量と入射波高の関係である。ただし、正負ともに、正の滑動に対する合田式による滑動限界波高で割って無次元化してある。W1 と W2 の二つの重量に対する結果を併せてプロットしているが、変動は大きいものの、両者に傾向的な違いは認められない。なお、図中の計算曲線については後述する。

5. 滑動モデルによる考察

(1) 滑動モデル

4. で滑動実験結果について述べたが、ここでは簡単な滑動モデルを構築し、その計算結果に基づいて若干の

考察を行う。重複波力を受ける壁体の滑動に対しては、合田⁹⁾ が剛基礎を仮定して滑動距離の計算を行っているが、波圧は微小振幅波に基づいたもので、しかも岸向きの滑動のみを対象としている。ここでは、滑動モデルとしては合田と同じ剛マウンドとするけれども、波の有限振幅性を考慮し、岸沖両方向の滑動距離を計算して実験結果と比較する。

滑動開始後の壁体の運動方程式は次式で表される。

$$(W/g + M_a)\ddot{x} = F_H \mp \mu(W_0 - F_V) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 W は空中重量、 W_0 は水中重量、 M_a は水中を加速度運動するときの付加質量である。 $\ddot{x}$ は壁体の加速度で、水平変位 x は岸向きが正である。 F_H, F_V はそれぞれ水平、鉛直波力で、右辺の干は F_H の符号士に対応する。 g は重力加速度、 μ は摩擦係数で今回のモデルでは静止摩擦係数 (0.6) を用いた。

付加質量は壁体の両面を考える必要があり、しかも前面での水位変化を考慮しなければならない。ここでは、直立壁のピストン運動に対する造波理論の関係を準用して次のように与える。

$$M_a = C_m \{ (h' + \eta')^2 + h'^2 \} W_0 / g \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \min \{ \eta_s, h_c \} ; \eta_s \geq 0 \\ &= \max \{ \eta_s, -h' \} ; \eta_s < 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 h' 、 h_c は壁体の静水時での下端水深および天端高、 η_s は壁面水位で時間とともに変化する。また、 C_m は付加質量係数で、微小振幅造波理論による値をそのまま用いて 0.54 とする。

滑動開始時刻 $t=0$ においては $\dot{x}=x=0$ であり、この初期条件のもとに式 (1) を数値積分し、速度 $\dot{x}$ および滑動変位 x が求められる。そして、速度が 0 となるとき、すなわち滑動が終了するまでの変位を計算した。

(2) 計算波力の補正

有限振幅重複波理論による計算波力は、水底から直接直立壁があるとして求めたものであり、断面条件が実験とは異なる。そのため、以下の点を考慮して計算波力を

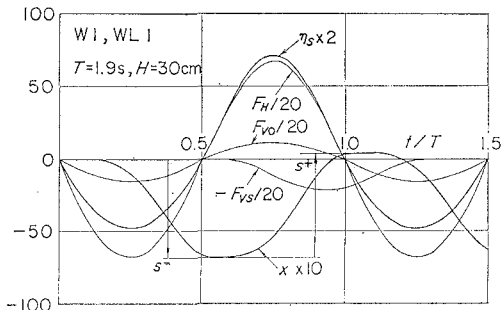


図-11 計算による波力と滑動量の時間変化

図-11 は実験で使用した反射型ケーソン (W_1) の条件に対して、(2) で補正した有限振幅重複波理論により波力を求めて滑動変位を計算した例である。波は周期 $T = 1.90$ s, 波高 $H = 30$ cm である。図には壁面水位 η_s , 水平波力 F_H , 鉛直波力 F_V , 滑動変位 x の 1.5 周期分の時間変化を示している。計算による滑動量は負の方向に -6.8 cm であるのに対し、正の方向は 7.1 cm でわずかに正の滑動量が大きくなっている。重量 W_1 , W_2 に対して、波高を変化させたときの計算結果を前出図-10 上に実線および破線で示したが、実験値とよく合っていることがわかる。

補正する必要がある。

- ① マウンドの有無
- ② 波の不規則性
- ③ 越波の影響

まず、①、②について検討する。図-4 に示した台形壁面での不規則波圧特性によると、負の波圧の計算値は絶対値で実験値よりやや小さい傾向にあり、若干過小評価している可能性がある。一方、正の波圧は波高が大きくなるにつれてマウンドの影響により波力のピークがやや増大している。さらに、その時間変化は図-7 の記録にみられるように、波高が大きいときの水位波形はやや前傾しており、波圧の波形も非対称で最初のピークが大きい。以上のことを考慮して、滑動合成波力の時間変化は有限振幅重複波理論による前面水位に比例するものとし、正のピークは合田式、負のピーク値については水平波力のみ 1.1 倍して与えることにした。

③の越波の影響としては、上部工への打ち込み波圧と背後伝達波の二つの要因が考えられる⁴⁾。このうち、打ち込み波圧は波の峰のとき鉛直下向きに作用するので、滑動量を小さくする効果が大きい。ここではケーソン上部工に働く波力を、越波量に比例する波力として次式で計算した。

$$F_{vs} = w_0 Q(t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Q(t) = (2/3)(2g)^{1/2} K \int_0^t (\eta_s - h_0)^{3/2} dt; \eta_s \geq h_0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

流量係数 K については高田⁵⁾ がさまざまな検討を行っている。ここでは今回の実験条件に比較的近い $K = 0.32$ を適用した。

(3) 計算結果

6. ま と め

大水深混成堤の直立部に働く波力と滑動安定性について考察した。その主要な結果は以下のとおりである。

- ① 大水深重複波条件のもとでは、波の峰のときの正の波力のみならず、谷の時の負の波力が重要である。
- ② 安定重量の約 70% および 80% に重量を減じた条件での滑動実験結果によると、ケーソンは大きな波の作用によって前後に揺れるように滑動し、碎波の作用を受ける通常の防波堤のように滑動が岸向きに一方的に累積されることはない。
- ③ 消波型と反射型の滑動特性を比較すると、消波型の滑動量がとくに正方向で小さい。
- ④ 剛マウンドを仮定した滑動モデルで、反射型の滑動量を計算した。その結果、前面での波力のピーク値だけでなく、その時間変化や越波による二次的な波力を考慮することにより、実験での滑動を再現できた。

参 考 文 献

- 1) 大堀晃一・小谷 拓・久米秀俊：釜石港湾口津波防波堤の設計に関する技術研究，第 10 回海洋開発シンポジウム論文集，1987，pp. 45～50。
- 2) 合田良実・柿崎秀作：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究，港湾技術研究所報告第 5 巻第 10 号，1966，57 p。
- 3) 合田良実：構造物に働く波力，土木学会水理委員会水工学シリーズ，67-10，1967，pp. 10-1～34。
- 4) 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司：大水深混成堤の耐波安定性に関する研究（第 1 報）—台形型直立部に働く波力および滑動安定性—，港湾技術研究所報告第 27 巻 1 号，1988，pp. 3～29。
- 5) 高田 彰：有限振幅重複波の時間波形と越波量の相関特性，土木学会論文報告集，第 201 号，1972，pp. 61～76。