

津波防波堤開口部潜堤の耐津波安定性

谷本勝利*・木村克俊**・池上正春***・宮崎啓司****

1. まえがき

津波防波堤は通常の波浪を防ぐとともに、沖合で津波の勢力を減じ、湾内や背後地を津波から防護する施設である。チリ地震津波のあと1967年に、大船渡港で初めて湾口津波防波堤が建設された。その後、釜石港、下田港、須崎港、久慈港などにおいて、津波防波堤が建設中あるいは計画されている。津波防波堤は比較的水深の大きい地点に建設されることが多く、その場合には締切効果を高めるために開口部に潜堤を設けるのが一般的である。津波時には開口部が著しい狭窄部となり、ここに強い流れが発生する。開口部潜堤は、こうした流れに対して安定でなければならない。

本研究では、現在、最大水深が63mの湾口部に、世界最大級の防波堤が建設中の釜石港を例として、大規模な水理模型実験を実施した。その結果に基づき、津波が襲来してきた場合に開口部近傍で生ずる流れの特性と、開口部潜堤の安定性を論じるものである。

2. 実験の方法

実験で使用した水槽は、長さが50m、幅20mで、定常流とともに往復流を発生できる。図-1は実験模型の平面図である。水槽には、釜石港湾口防波堤の開口部、および開口部の法線に対して、それぞれ38°、48°で交差する南・北防波堤（以下、本堤と呼ぶ）を再現した。開口部の潜堤は後述の図-3で示す捨石マウンドと小型の矩形頂部ケーソンから成る構造形式である。模型縮尺は1/50とし、フルードの相似則を用いた。なお、一部の実験は、本堤と開口部潜堤が一直線上に並んだ「一列配置」についても検討している。

実験では定常流とともに、現地の津波周期に合わせて流速を正弦的に変化させた往復流も用いた。往復流に対しては、図-1に矢印で示す方向の流れを正流と定義す

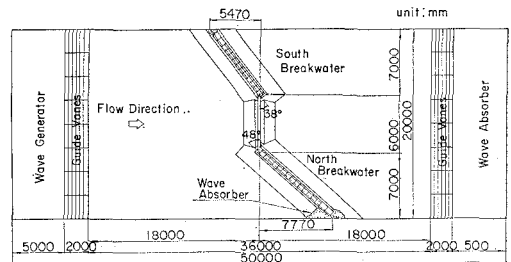


図-1 水槽平面図

る。

実施した実験は、①開口部での3次元流速分布および水面形、②捨石マウンドの安定性、③頂部ケーソンに働く流体力と滑動安定性の3種類である。

3. 開口部近傍での流れの特性

(1) 測定方法

流れはすべて2成分電磁流速計で測定した。センサーは平面2次元用および鉛直2次元用の2種類を使用した。測定レンジは0～±200 cm/sを使用し、応答性を決める時定数は0.05秒とした。なお、データは1chあたり1024点とし、サンプリング周期は0.05秒とした。

流速および水位分布の測定は釜石配置を対象として、開口部での平均流速が110 cm/sの定常流について実施した。測点間隔は、平面的には40 cmメッシュとし、水深方向には10 cm間隔を標準とした。

(2) 平面流速分布

図-2は静水面下10 cmでの平均流速ベクトルの平面分布である。下流領域では速度の早い縮流域が中央にあり、剝離領域をはさんでその両側に速度の遅い反流域が存在している。図には等流速値線も示してあるが、これによると流れに対して防波堤が突き出ている北堤側（図中のN.B.）では、南堤側（図中のS.B.）に比べて100 cm/sの等値線が中央寄りにふくむ傾向がみられる。

流速ベクトル先端の楕円は、 x 軸、 y 軸方向の半径がそれぞれ乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{v'^2}$ を示している。これによると0と100 cm/sの等値線に囲まれた部分での乱れが大きく、剝離によって生じた渦の影響が現れている。

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室

*** 正会員 工修 前運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 技術開発課長

**** 運輸省港湾技術研究所 前水工部 耐波研究室

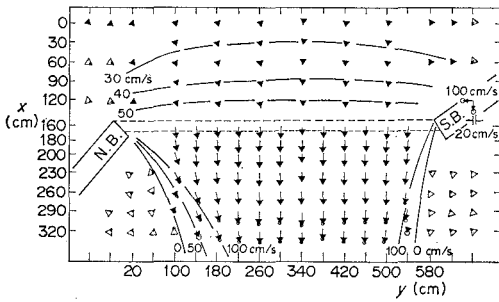


図-2 平面流速分布

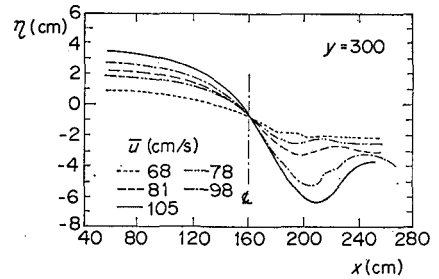


図-4 流速レベルごとの水面形

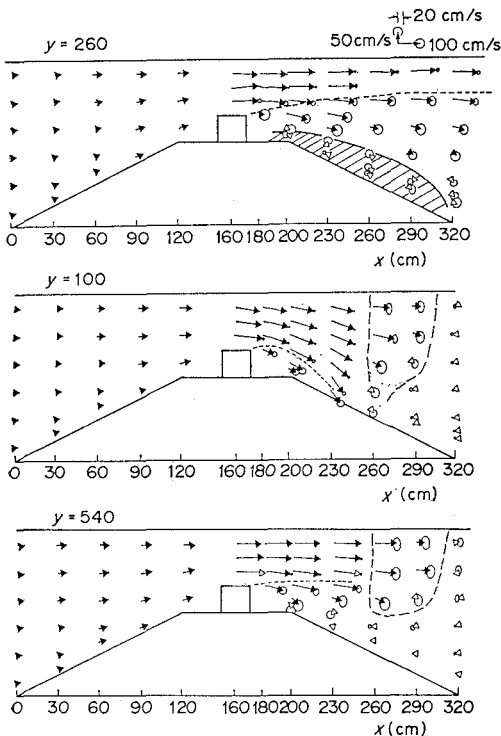


図-3 断面流速分布

(3) 断面流速分布

図-3 の上段は開口部のほぼ中央に位置する測線 $y=260$ での断面流速分布を示したものである。上流側ではマウンド頂部に近づくにつれて徐々に流速が大きくなる。これに対し下流側は、マウンド全体が弱い反流域に入っていることがわかる。ここでの平均流速は $\bar{u} = -10 \sim -20$ cm/s で、乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ は $10 \sim 15$ cm/s である。一方、同図の点線は乱れ強度が $10 \sim 15$ cm/s に相当する点を結んだもので、おおむね主流域と混合域の境界を表していると考えられる。これによると両者の境界は水面から $30 \sim 40$ cm 付近にあり、流下とともに混合域が上方に広がる傾向がある。これは頂部ケーソンからの剝離渦の発達によるためと考えられる。

本堤に近い測線として、北堤側の $y=100$ および南堤側の $y=540$ での断面流速分布を図-3 の中段、下段に示す。いずれについても $x=260 \sim 290$ の破線で囲まれた部分で乱れ強度が大きいが、これは平面的な剝離渦の影響である。図中の点線は主流域と混合域の境界と考えられるが、北堤側の $y=100$ では主流全体が下降し、マウンド上に直接混合域が存在している。この現象は石井・真野(1987)によっても指摘されている。今回の実験では流れに対して本堤が突き出ている北堤側においてこうした傾向が顕著であるけれども、流れが本堤に沿う南堤側では主流の下降はみられない。

(4) 水位分布

図-4 は開口部中央の測線 $y=300$ における水面形を各流速レベルごとに線種を違えて示したものである。水面勾配は頂部ケーソンのやや上流側から徐々に急になり、港内側のマウンドの法肩付近で水位が最低になっている。下流側の水位低下量は流速レベルとともに大きくなり、水面勾配も急になる。水面勾配 $\tan \theta$ は u の2乗に比例し、頂部ケーソン上の水深 d に対して次式で表される。

$$\tan \theta = k \bar{u}^2 / (gd) \dots \dots \dots (1)$$

本実験の条件に対しては、 $k = 0.08 \times 10^{-4}$ となる。

4. マウンド部の安定性

(1) 移動パターン

図-5 は、マウンド全体を $1.0 \sim 7.0$ gf (現地換算 $125 \sim 875$ kgf) 砕石で被覆し、設計津波を上回る条件の周期流を作用させた後のマウンドの状況である。図のコンターは流れの作用前の初期地形と作用後のマウンド地形の差から求めた洗掘深さと堆積高さを示している。マウンド材の移動は流れに対して本堤が突き出ている港内北側(正流時)および港外南側(逆流時)のみで顕著である。

図-6 は定常流によるマウンド表面近傍の流速分布で、ベクトルの長さは平均流速の大きさ $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}$ を表し、ベクトルの方向は平面的な流向に合わせてある。また、楕円は乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{v'^2}$ の大きさを示している。これによると、マウンドの洗掘が顕著だった北堤側

で平均流速が大きいのにに対し、洗掘が生じなかった南堤側では乱れ強度は同程度であるが、平均流速はそれほど大きくない。

図-7 は測点 $x=230$, $y=140$ におけるマウンド面上 5 cm での合成流速の平均値と標準偏差を、開口部中央での流速に対してプロットしたものである。なお、周期流に対してはピーク付近の約20秒間のデータに対する値である。これによると、マウンドに作用する平均流速は、開口部での流速の65%程度であり、この関係は周期流および定常流とともに同じである。また、標準偏差 σ を平均値 $\bar{X}$ で除して求められる変動係数 $(\sigma/\bar{X})$ は 0.16~0.20 で、流速レベルによらずほぼ一定である。

(2) 被覆材重量と被害率

洗掘が顕著となった港内側の北堤近傍および港外側の南堤近傍の2箇所を対象として、被覆材の重量を変化させた安定実験を行い、必要重量に関する検討を行った。使用した被覆材は14.5~21.8 gf の碎石 (S2) および異形ブロック B1, B2, B3 (14.5, 38.0, 73.6 gf) の合計4種類で、被覆層は原則として2層積みとした。図-8 は各種被覆材を対象として被害率 D と開口部における周期流のピーク時の流速 u_{peak} の関係を示したものである。なお、周期流は5波を連続して作用させた。被覆は図の斜面部分とし、このうち○印で示す格子 (30 cm × 30 cm) を検査対象とした。被害率は移動した被覆材の個数をその領域に属する被覆材の総数で除して求めた。被害率は流速とともに増加し、重量の小さい被覆材ほど増加率が大きい傾向がある。被害率ごとのマウンド状況としては、被害率 D が10%以内では主として2層のうちの表層の被覆材の移動である。さらに被害が進行し、 D が50%以上に達すると大部分の被覆材が移動して下層材が露出する。

流れに対する法面被覆材の必要重量は以下の C.E.R.C の式 (1977) で求められる。

$$W = \frac{\pi w r u_d^6}{48 y^6 g^3 (w_r/w_0 - 1)^3 (\cos \alpha - \sin \alpha)^3} \dots (2)$$

ここに、 W はマウンド被覆材の所要重量、 u_d はマウンド被覆材に作用する流速、 w_0 は流体の単位体積重量、 w_r はマウンド被覆材の単位体積重量、 g は重力加速度、 α はマウンド傾斜角、 y はマウンド被覆材の安定状況を示す定数である。岩崎ら (1984) は2次元水路において、頂部ケーソンがない潜堤のマウンド被覆材の安定実験を行っている。この場合には天端付近での被覆材の初期移動に対して、 $y=1.08$ が適用できることを示している。

式 (2) でマウンド被覆材の重量 W と作用流速 u_d が与えられれば y は逆算できる。図-9 は今回の実験結果を用いて、係数 y を被害率 D に対してプロットしたものである。

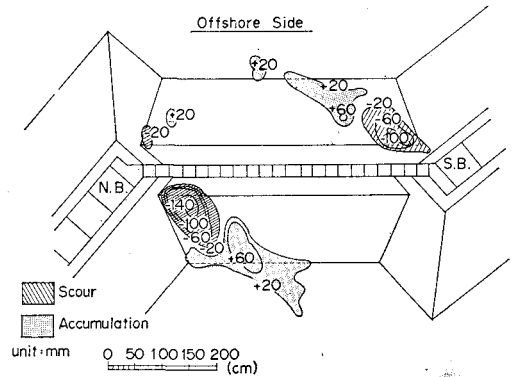


図-5 マウンドの洗掘・堆積状況

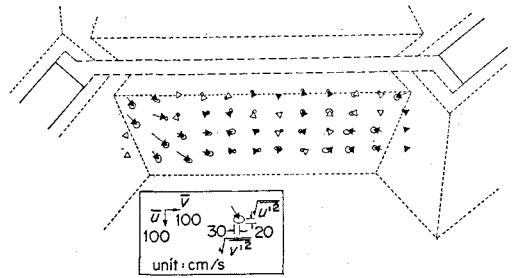


図-6 マウンド近傍での流速分布

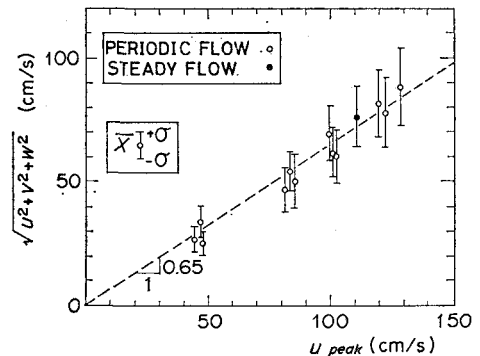


図-7 開口部での流速とマウンド近傍流速の関係

である。ここでマウンド上の流速 u_d は、図-7 の結果を用いて頂部ケーソン上における周期流のピーク値の0.65倍とした。図中には y と D の平均的な関係を点線で示してある。これによると安定限界 (被害率0%) に対する y の値は0.8~0.9であり、「露出石」の場合のイシュバッシュ定数 $y=0.86$ にはほぼ一致する。また、 y と D の関係には碎石と異形ブロックの差が特に見られないが、これは粒度分布に幅がある碎石のほうが密に積めるため、異形ブロックと同程度のかみ合せが得られたものと考えられる。

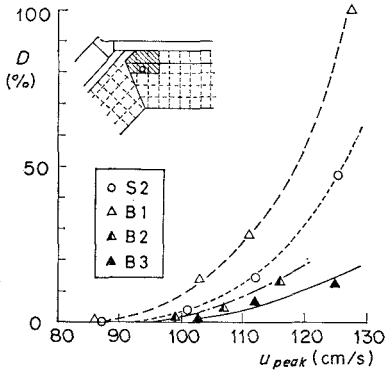


図-8 マウンド被覆材の被害率

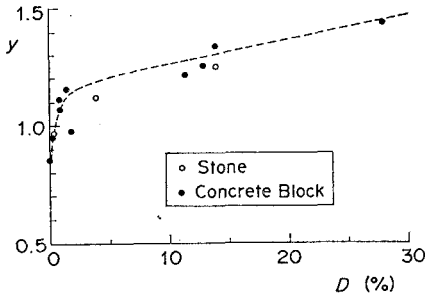


図-9 定数 y と被害率 D の関係

5. 頂部ケーソンに働く流体力と安定性

(1) 流体力係数

潜堤頂部ケーソンに働く流体力に関する実験は一列配置の防波堤を対象として実施した。流れは定常流および周期流を対象として、ともに開口部での流速が120~130 cm/s 程度までの実験を行った。周期流は現地周期10分、20分、40分の3種類とした。一般に流速 u の定常流中に置かれた物体に作用する抗力 F_H および揚力 F_V は次式により求められる。

$$F_H = (w_0/2g) C_D A_H u^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$F_V = (w_0/2g) C_L A_L u^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 w_0 は流体の単位体積重量、 g は重力加速度、 C_D 、 C_L はそれぞれ抗力、揚力係数で、 A_H および A_L は対象物体の水平、鉛直投影面積である。

水平力に関しては、抗力とともに水面勾配の影響を考慮しなくてはならない。水面勾配 $\tan \theta$ によってケーソンに作用する水平力強度 f_s は次式で表わされる。

$$f_s = w_0 B \tan \theta \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 B は頂部ケーソンの堤幅である。式 (1) の関係を用いることにより、水面勾配を考慮した前水平圧力強度 f_{HT} は次式で表わされる。

$$f_{HT} = (w_0/2g) C_D u^2 + w_0 B \tan \theta$$

$$\begin{aligned} &= (w_0/2g) (C_D + 2kB/d) u^2 \\ &= (w_0/2g) C_D^* u^2 \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、 $C_D^* (=C_D + 2kB/d)$ を水面勾配の影響を考慮した「見かけの抗力係数」と定義する。

図-10 は f_{HT} と頂部ケーソン上の流速の関係で、定常流 (図中 S.F.) に対しては平均流速、周期流 (図中 P.F.) に対してはピーク時の流速を用いている。データにはばらつきは見られるが、測定位置や周期による傾向的な差異は見られない。図中には適当な C_D^* に対して計算した両者の関係を点線で示しているが、実験結果は見かけの抗力係数 C_D^* が1.0~1.5の範囲である。動水圧のみによる抗力係数は、 C_D^* の値から水面勾配の影響分 $2kB/d (=0.3)$ を差引き、 $C_D = 0.7 \sim 1.2$ 程度と推定される。岩崎ら(1984)は2次元水路実験によって $C_D = 0.94$ を得ているが、この値は今回の実験結果のほぼ中間に対応している。

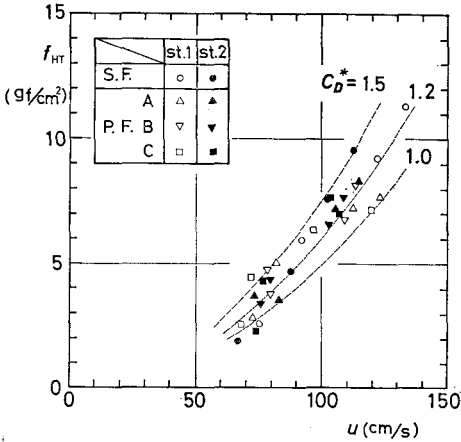


図-10 全水平圧力と流速の関係

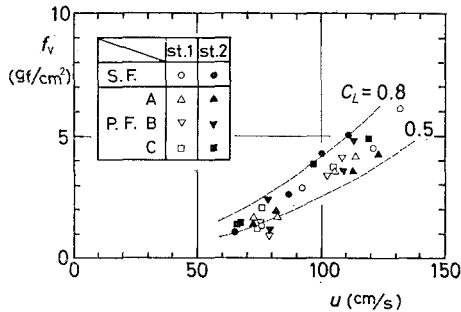


図-11 鉛直圧力と流速の関係

図-11は揚力に関する実験結果を示したものである。抗力の場合と同様に、測定位置や周期による傾向的な差異は認められず、揚力係数 $C_L = 0.5 \sim 0.8$ である。

(2) 滑动安定性

頂部ケーソンの滑动安定性に関しては一列配置および

釜石配置の両方を対象とした。滑動実験に用いた頂部ケーソンは底版がコンクリート製で、中詰めの重量を調整して頂部ケーソンの水中重量を変化させた。安定実験では頂部ケーソンの水中重量を $W_1 \sim W_4$ の4種類としたが、添字は1から順に重量が大きくなることを示している。安定実験は定常流で行い、その流速を徐々に増して頂部ケーソンの変化を観察した。

一般に滑動限界時には次の関係が成り立つ。

$$F_H + \mu F_V = \mu W' \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 F_H および F_V はケーソン単位幅あたりの水平および鉛直力で、 μ はコンクリートと捨石マウンド間の摩擦係数 (=0.6)、 W' は単位幅あたりのケーソンの水中重量 (浮力分を差引いた重量) である。図-12は流速 $\bar{u}$ の増大とともに生じた頂部ケーソンの変化をその重量 $\mu W'$ ごとに示したものである。同図にはいくつかの圧力係数に対する滑動限界曲線を示してある。釜石配置の実験結果については、 W_2 および W_3 の場合は $C_D^* = 1.2$, $C_L = 0.6$, W_4 の場合は $C_D^* = 1.5$, $C_L = 0.8$ の計算曲線にほぼ一致している。

6. ま と め

以上、津波防波堤開口部潜堤の設計法に関して、実験結果を中心に考察した。その主要な結果をまとめると次のとおりである。

① 流れに対して本堤が突き出ている側では、頂部ケーソンを越えた流れが押し下げられ、マウンド面に強い流れが作用する。

② 開口部近傍の水面勾配は頂部ケーソンの直上で最も急となる。水面勾配と開口部の平均流速の関係を示した。

③ マウンドの洗掘は①の流れによって生じ、洗掘箇所はマウンド近傍での平均流速の大きい部分と一致した。また、マウンド近傍流速と安定限界重量の関係については、C.E.R.C. の式 (1977) とほぼ一致した。

④ 頂部ケーソンに作用する流体力は頂部ケーソン上での流速に対して、動水圧とともに水面勾配の影響を含

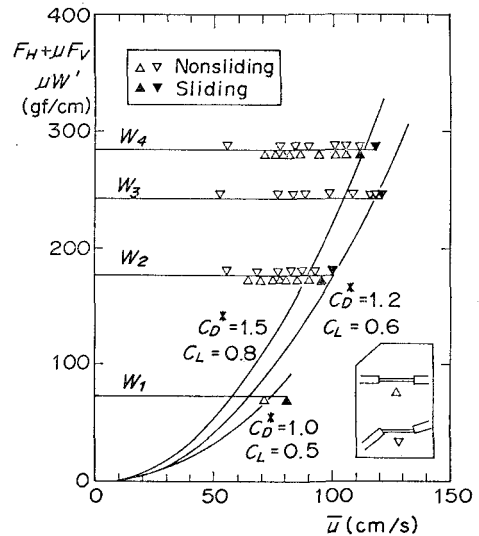


図-12 頂部ケーソンの滑動安定性

めた「見かけの抗力係数」 $C_D^* = 1.0 \sim 1.5$ 、および揚力係数 $C_L = 0.5 \sim 0.8$ を用いて算定できる。また、これらの係数の妥当性を滑動実験によって確認した。

現在、現地においては全体のおよそ50%のマウンド造成が終了し、堤幹部に設置される高さ30mの巨大ケーソンの製作が開始されている。開口部のマウンド被覆材および頂部ケーソンの製作は1995年以降に開始される予定である。本報告の取りまとめに際しては、当所の耐波研究室高橋重雄室長に多くの助言を得た。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 石井義裕・真野 明 (1987): 津波防波堤開口部の流れの特性, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 182~186.
- Coastal Engineering Research Center (1977): Shore Protection Manual, Vol. II, pp. 7~215.
- 岩崎敏夫・真野 明・中村武弘・堀越伸幸 (1984): 潜堤マウンド材およびプレバックド堤に作用する定常流流体力に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 527~531.