

津波防波堤開口部の流れの特性

石井 義裕*・真野 明**

1. ま え が き

津波防波堤の開口部は航路水深を残して海底より立ち上がる潜堤形式が多く用いられている。ここでは潜堤の頂部より剝離した流れにより、下流側のマウンド上で逆流が生じ、ここでの平均流速や乱れがマウンド被覆材の安定に大きな影響を与えることが指摘されている¹⁾。このとき剝離流線の再付着点の位置が問題になるが、高レイノルズ数に対する段落ち流れの実験では、再付着点までの距離は段の高さの6倍から8倍になることが知られており²⁾、津波防波堤の場合に再付着点がマウンド上にくることはないようである。

一方、開口部の端部では、これに水面まで達する本堤が加わるために、潜堤からの剝離現象の他に、水平方向での縮流や、本堤からの剝離現象が加わり、流れの状況は複雑になる。被覆材の安定性を調べた実験では、開口部の中央部を模擬した2次元的な模型に比べて、端部を模擬した模型での被覆材の安定限界重量が10倍程度大きくなるという結果が得られている³⁾。

本研究はこの開口部端部の流れの特性を2方向が同時計測可能な電磁流速計による乱流計測と、流れの可視化により明らかにし、被覆材が動き易くなっている原因を究明しようとするものであり、2次元模型と3次元模型の2種類の水理実験をおこなった。

2. 実験装置及び実験方法

(2) 実験装置

本実験で用いた水路は片側がガラス張りで幅1.2 m、長さ11.8 m、高さ1.4 mである。潜堤の断面を図-1に示す。マウンド上にケーソン堤を乗せた混成堤型潜堤を用いた。被覆材としては、粒径1.2 mm~2.5 cmまでの碎石を用いた。被覆材はマウンドの全面に均等に敷き詰めた。図-2には開口部の本堤を模擬して鉛直壁($b=40$ cm)を設けた3次元模型の概略を示した。開口部の中央部を模擬した2次元模型は図-2において鉛直壁を除いたものである。

(2) 実験方法

測定には電磁流速計を用いて平均流速の3成分($\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$)と乱れ成分($\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$, $\overline{w'^2}$, $\overline{u'v'}$, $\overline{v'w'}$)を求めた。座標は、図-2に示したようにケーソン堤天端中央を原点として、X, Y, Z軸を定めた。測定は、X方向に10 cm, Y方向に12 cm, Z方向1 cm~2 cmに間隔で行なった。なお、電磁流速計の周波数特性についてはHot-Film流速計と同時に計測した結果、10 Hz以上の高周波の現象については減衰が大きく、利用することが出来ないことがわかった。

測定データはサンプリング周波数10 Hz、180秒でA/D変換を行ない平均量やスペクトルを求めた。ここで、スペクトルを求めるには高速フーリエ変換を用いてデータ1024個を処理した。可視化は染料注入法で行った。染料には朱墨を用い、一定の割合で滴下したものを撮影した。

実験における基準の流速及び水位は、マウンド被覆材

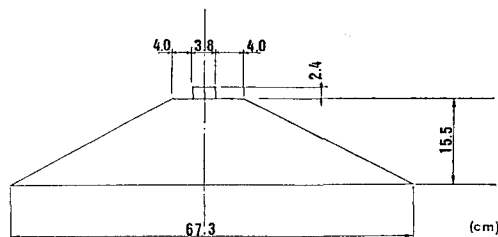


図-1 模型断面

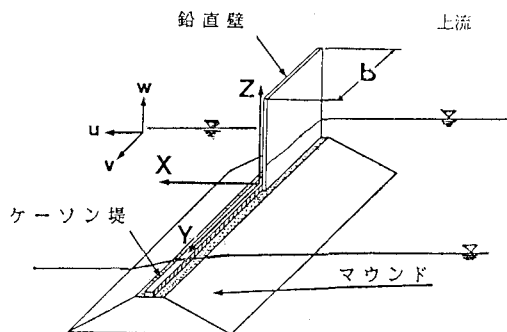


図-2 実験模型

* 学生会員 東北大学大学院 工学研究科

** 正会員 工博 東北大学講師 工学部土木工学科

が移動し始める状態を目安とした。基準流速 (U_0) は潜堤中央で 58 cm/s, 基準水深 (h_0) は潜堤天端上で 8.1 cm とした。 U_0 , h_0 を代表量として定義したフルード数とレイノルズ数は, $Fr=0.24$, $Re=4.7 \times 10^4$ となっている。

1. 実験結果及び考察

(1) 2次元模型

図-3 に平均流速の分布を示す。ケーソン堤天端上流端から剝離が生じており、潜堤後背のマウンド上で逆流が生じている。マウンド表面から積分した等流量線 $\phi = \int_0^h \bar{u} dz$ を考える。 h はマウンド表面より鉛直上方に正とする。図-4 には $\phi/(U_0 d_0)$ の等値線を示した。ここで U_0 は基準流速, d_0 はケーソン堤の高さとする。 $\phi=0$ を剝離流線とした。 $\phi < 0$ の範囲が後流域となる。後流域では水表面での流量の約 30% の流量が流れている。剝離した流線は底面に再付着し、そこでは乱れが大きくなることが知られている。本研究ではケーソン堤からの剝離流線は閉じておらず、マウンド上に再付着点があることはない。図-5 にはレイノルズ応力 ($-\overline{u'w'}$) の分布を示した。ケーソン堤天端とはほぼ同じ高さで最大になっている。これより、ケーソン堤からの剝離流線はレイノルズ応力が最大になる高さで一致しており平均流速 $\bar{u}$ の鉛直方向の勾配が最大になる位置ともほぼ一致していることが分かる。

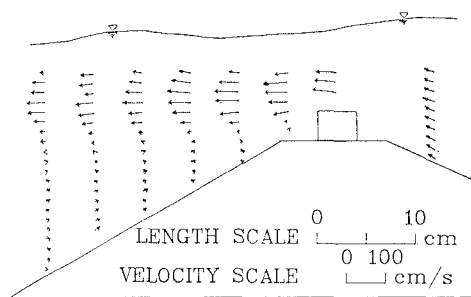


図-3 平均流速分布

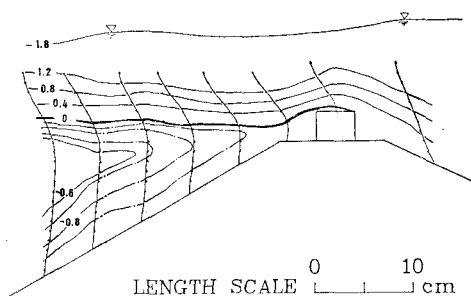


図-4 流線

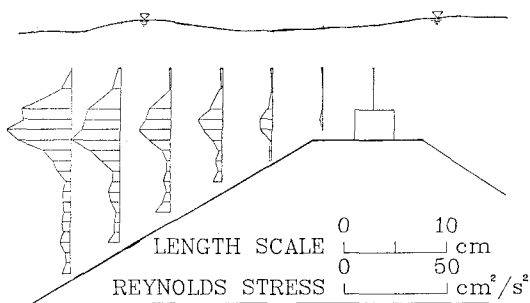


図-5 $-\overline{u'w'}$ 分布

流速変動の周波数特性についてみる。 X 方向及び Z 方向のスペクトルは同じような特性を示しているの、ここでは X 方向のスペクトルについて述べることにする。図-6 には剝離流線の外側と内側の2つのパワースペクトルを示す。図-6 からわかるように、剝離流線の外側では 10^{-1} Hz 付近で急激に減少したのち高周波まではほぼ同じ大きさのパワーが続いている。これに対して剝離流線の内側では低周波から高周波に至るまでなだらかに減少している。パワーは周波数の -2 乗程度で減少している。剝離流線の内側では $0.1 \sim 1$ Hz のパワーが大きくなっており、流速の変動が大きいことを示している。これは後流域の中には様々な大きさの渦が存在していることを示していると考えられる。

(2) 3次元模型

3次元模型では鉛直壁を設けたことにより、ケーソン堤からの剝離に加え鉛直壁からの剝離が生じている。そのため2次元模型に比べ流況が複雑になってくる。そこで、鉛直壁からの剝離流線の位置を染料注入法により測定し、図-7 に示した。鉛直壁からの剝離流線はレイノルズ応力 ($-\overline{u'v'}$) の最大値の位置と対応している。その鉛直壁からの剝離流線を撮影したものが写真-1である。写真-1 をみると鉛直壁からは Z 方向に軸をもつ渦

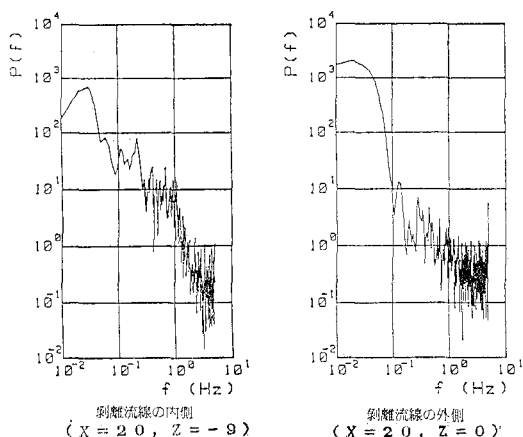
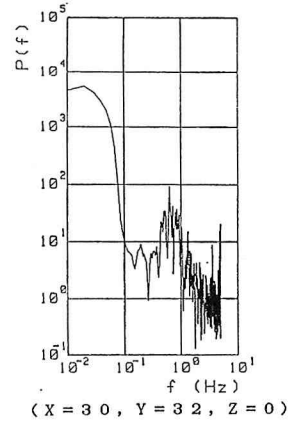


図-6 パワー・スペクトル

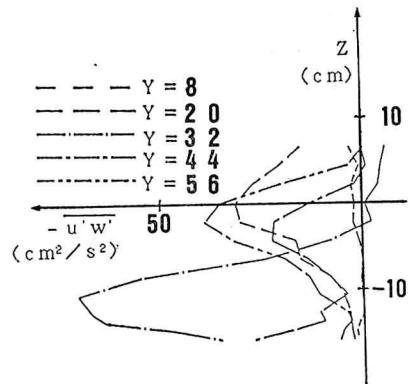
が生じていることが分かる。この渦はケーソン堤から離れるに従って渦の間隔が大きくなっている。また、渦の大きさもだんだんと大きくなっていることがわかる。渦ベクトルの方向はZ軸の負の方向になっており、上から見ると反時計回りになっている。ここで写真—1より渦の通過周波数を計算する。渦の中心間隔を渦の位置の流速で除すると、定点における渦による変動周波数が求まり、0.3~0.4 Hzで渦が通過していることが分かる。図—8にはケーソン堤からの剝離流線の外側で鉛直壁からの剝離流線の近くにはおけるパワースペクトルを示す。剝離流線からY方向に十分に離れた位置では2次元模型と同様のスペクトルになる。図—8では 3×10^{-1} Hz~1 Hzにかけて大きなパワーを持っている。これは、鉛直壁からの剝離流線の近くで特に著しい。この周波数は、写真から読み取った渦の通過周波数と一致している。従って、



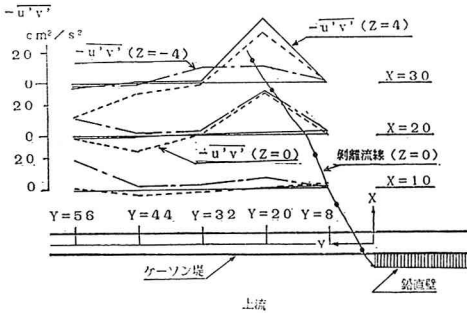
図—8 パワー・スペクトル

パワースペクトルには鉛直壁からの渦が表れている。また、ケーソン堤からの剝離流線の内側におけるパワースペクトルについても同様である。パワースペクトルによって、渦が存在することがわかるので渦の空間分布についてみる。鉛直壁のすぐ近く ($X=10$ cm) ではケーソン堤とはほぼ同じ深さまで特有のスペクトルが存在している。ケーソン堤から離れるとマウンド表面近くまで渦が存在している。これは、後述するようにレイノルズ応力 ($-\overline{u'w'}$) のピークがマウンド近くまで下がっている位置とほぼ一致している。

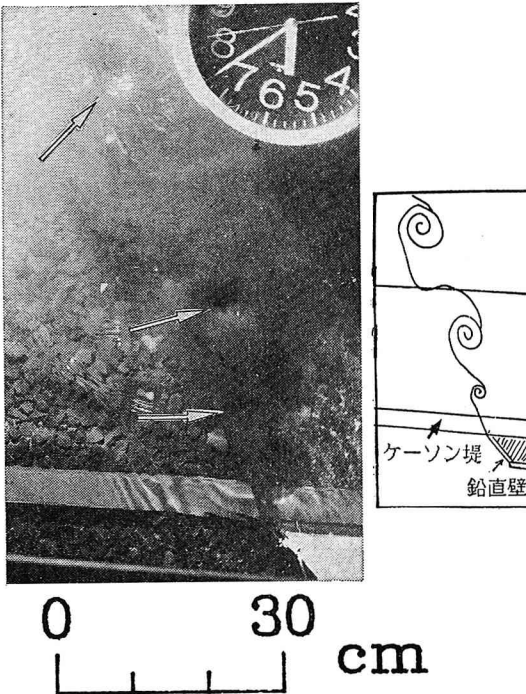
図—9には、レイノルズ応力 ($-\overline{u'w'}$) の分布を示す。X方向については、被覆材が最も移動し易く、レイノルズ応力が最も大きな値をとる $X=30$ cm の断面について示した。なお、図—9~図—11においては図—9で用いた記号を用いている。鉛直壁から十分に離れた位置では2次元模型同様にケーソン堤天端の高さのところまで最大である。鉛直壁からの剝離流線に近い $Y=32$ cm では応力の最大値の位置がさがり、マウンド表面の近くで最大値をとる。ここでレイノルズ応力と剝離流線との関係を調べるためにX軸方向のレイノルズ方程式を考える。



図—9 $-\overline{u'w'}$ 分布 ($X=30$ cm)



図—7 $-\overline{u'v'}$ 分布と剝離流線



写真—1 鉛直壁から生じる渦

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \Omega_2 \bar{w} - \Omega_3 \bar{v} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial X} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial X} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \left(\frac{\partial \bar{u}'^2}{\partial X} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial Y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial Z} \right)$$

ここで、 Ω_2 , Ω_3 はそれぞれ Y 方向, Z 方向に軸をもつ渦度である。図-10 には Z 軸方向に軸を持つ渦度 $\Omega_3 \equiv -\partial \bar{u} / \partial Y$ の分布を示した。 $Y=32$ cm で大きな値を示している。鉛直壁から $\Omega_3 < 0$ の方向で Z 方向に軸を持つ渦が生じている。図-11 には v の分布を示した。ここでも $Y=32$ cm で大きな値を示すことが分かる。ここで、レイノルズ方程式において Ω_3 及び $\partial \bar{u}'w' / \partial Z$ を除く他の項の値が一定であると仮定する。このとき、 $\Omega_3 \bar{v} < 0$ より $\partial \bar{u}'w' / \partial Z < 0$ となり、 $-\bar{u}'w'$ はマウンド上で大きな値を示すと考えられる。

一方、これらの積 ($\Omega_3 \bar{v}$) は渦度の輸送量を示す。 $\Omega_3 \bar{v}$ と、 $\partial (\bar{u}'w') / \partial Z$ の変化量 ($Y=56$ cm の断面での値を基準として各断面の値から差し引いたもの) との相関を示したものが図-12 である。 $Y=32$ cm の測線のデータは良い相関を示している。すなわち、鉛直壁から生じた渦度が縮流の効果によって、剥離流線より堤中央方向に輸送され、見かけ上の力が作用する。これによってレイノルズ応力 ($-\bar{u}'w'$) の勾配が小さくなり応力のピークの位置が下がるものと考えられる。

図-5 と 図-9 よりマウンド表面近くでのレイノルズ応力 ($-\bar{u}'w'$) の大きさを比較する。2次元模型では、

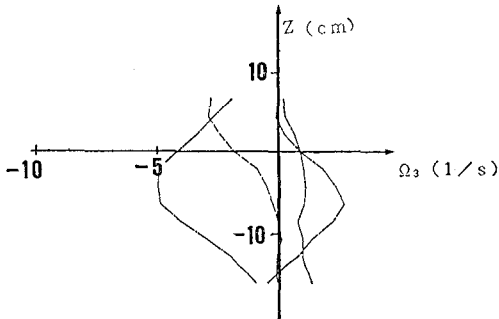


図-10 Ω_3 分布 ($X=30$ cm)

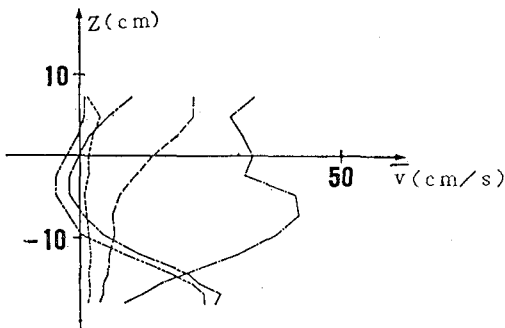


図-11 v 分布 ($X=30$ cm)

X の値に依らずほぼ一定の値を示しているため、マウンド被覆材が一樣に移動する。3次元模型においては、鉛直壁からの剥離流線の近くでは、2次元模型の2~10倍の値を示しているため、マウンド被覆材が移動し易くなっている。

次に、平均流速の分布について考える。鉛直壁からの剥離流線から十分に離れた位置では2次元模型と同様にマウンド上で逆流域が生じている。図-13 には剥離流線に近い $Y=32$ cm の流速分布を示す。ここではマウンド上で逆流域が消えている。

図-14 にマウンド表面での渦動粘性係数と混合距離の分布を示す。渦動粘性係数及び混合距離は、 $\bar{u}$ の Z 方向の勾配を用いて Z 方向の混合を考えた。鉛直壁からの

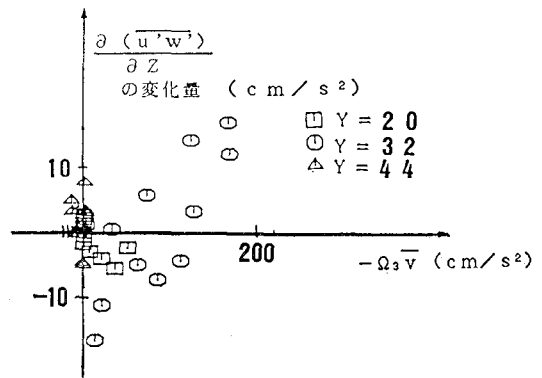


図-12 $\partial(\bar{u}'w')/\partial Z$ と $-\Omega_3 \bar{v}$ との相関

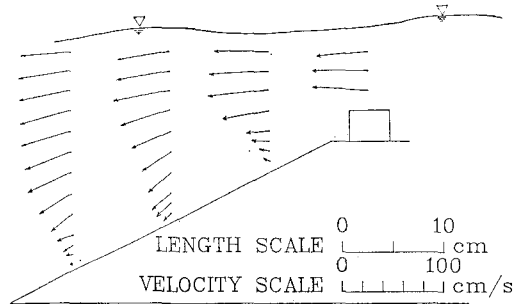


図-13 平均流速分布 ($X=30$ cm)

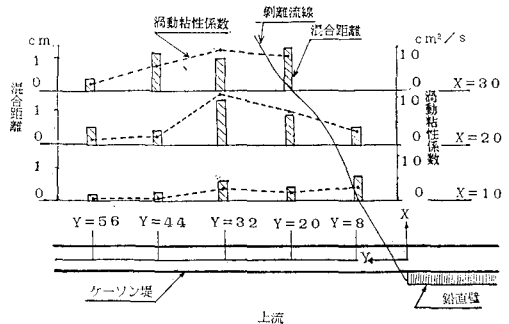


図-14 渦動粘性係数と混合距離の分布

剝離流線の近くでは2次元模型に比べて渦動粘性係数が3~10倍、混合路離が2~5倍と大きな値を示している。鉛直壁から生じた渦により、マウンド近くにおいて大きなスケールで流塊の混合が生じていると考えられる。

4. あとがき

本研究によって得られた主な結果は次の通りである。

(1) 2次元模型においては、ケーソン堤からの剝離流線とレイノルズ応力 ($-\overline{u'w'}$) 最大の位置が一致しておりその高さは潜堤の天端高さと同じである。

(2) 鉛直壁からの剝離流線の近くでは $-\overline{u'w'}$ のピークの位置がマウンド表面近くへ押し下げられている。

(3) 開口部では端部の鉛直壁から、0.2~0.4 Hz の渦が表れている。

これは、渦が縮流により堤中央部に輸送されたことにより、ケーソン堤からの剝離流線がマウンド近くに押し下げられて、マウンド近くにレイノルズ応力のピークが

生じると考えられる。鉛直壁から剝離流線の近くでは渦動粘性係数と混合距離が大きな値を示している。以上の機構より開口部の端部でマウンド被覆材が移動し易くなるものと考えられる。

謝 辞： 本研究を行うにあたり、東北大学工学部首藤伸夫教授、澤本正樹助教授より貴重な助言を得た。また、東北大学工学部佐藤栄司技官には実験にあたり助力を得た。ここに記して厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 関島正浩・堀越伸幸・真野 明： 津波防波堤開口部潜堤の安定性，昭和59年度東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 128~129, 1985.
- 2) Eaton, J. K. and Johnston, J. P.: A review of research on subsonic turbulent flow reattachment, AIAA Journal, Vol. 19, No. 9, pp. 1093~1100, 1981.
- 3) 蓬田 博・真野 明： 津波防波堤開口部の水理特性，昭和60年度東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 59~60, 1986.