

津波防波堤の安定性に関する水理模型実験

真野 明*

1. はじめに

岩手県釜石湾の鷲ノ巣崎と大刀根島を結ぶ湾口では延長1,960 mの津波防波堤が建設中である(図-1)。その中央部は長さ300 m、航路水深19 mの開口部で津波時には堤内外につく水位差により高流速の流れの発生が予測される。

釜石湾に襲った三陸大津波の数値実験、水理実験の結果より、開口部での設計流速として昭和8年三陸津波と同じ津波が津波防波堤建設後に襲来するとした場合の最大流速8.2 m/sがきめられている。本研究は捨石マウンドとプレパックド堤からなる混成堤形式の津波防波堤開口部を対象として水理模型実験を行い、マウンドの安定性や、プレパックド堤にかかる流体力について検討を行ったものである。

2. 実験方法

実験は開水路に模型を設置し定常流より行った。対象とする防波堤の断面形状を図-2に、またプレパックド堤の形状を図-3に示す。代表水深は $R_p = 60$ m、プレパックド堤の高さは $H_p = 11$ m、幅は $L_p = 12$ m、航路水深は $h_p = 19$ m、代表流速はプレパックド堤の中央部断面での最大流速として $U_p = 8.2$ m/sを設定した。以下添字pは現地での値をmは模型での値を表すものとする。

この防波堤の模型を水平、鉛直縮尺 $1/\lambda = 1/50$ で制作し、時間および流速の縮尺はフル

ードの相似則より $1/\sqrt{\lambda}$ とした。なおHとUで定義したレイノルズ数は現地で $Rep = 9 \cdot 10^7$ 、模型で $Rem = 2.5 \cdot 10^5$ である。マウンド模型については、天端付近は平均粒径1.5 cmの碎石を厚さ10 cmに敷いたものとし中詰めには平均粒径0.038 cmの中砂を用いた。与えた水理条件は表-1に示すとおりであり、これらに対してマウンド形状やマウンド下流側の被覆材の種類や重量をかえ実験ケースを表-2のように設定した。測定は抵抗線式波高計、径1 cmの正逆プロペラ式流速計、小型圧力変換器によった。

3. 実験結果および考察

(1) 流速分布

流れの状況を図-4に示す。上の図が水平流速の平均値 \bar{u} の分布であり、下の図がその乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の分布である。プレパックド堤の上流側上端より流線が剥離して後流域が発達していることが分かる。乱れ強度の分布では堤上部の高さで下流側に強い分布が見られ、概略平均流速の鉛直勾配の大きいところと対応している。流速計による測定は堤の下流側 $x = 60$ mまでしか行っていないが水中に浮遊する物体の目視観測から下流側マウンド堤の全域で逆流となっていることが分かった。

平均流速の分布形を調べたのが図-5、6で横軸は流速を測線上の最大流速で割って無次元化したもの、縦軸は流速が負から正に変わる点を鉛直座標の原点にとり、さzを半値幅bで割って無次元化したものを示してある。測線や、水理条件の異なるデータが一つの曲

* 東北大学講師 工学部土木工学科

線に乗っており、相似形であることが分かる。

図-7は底面での水平方向平均流速 u_b の分布を示しており、 $x=40\text{m}$ で最大値となっている。図-8には底面での乱れ強度 $\sqrt{u_b'^2}$ を \bar{u}_b で割った相対乱れ強度を示した。 $x=20\text{m}$ で最大値をとり1に達するものもあった。

Bradbury¹⁾が高さ2Hの平板を一樣流中に垂直に立てて行った実験では逆流域の長さは2Hで、平板から1H下流側で主流方向の乱れが最大になっており、再付着点ではそれと直角方向の乱れが最大となり、しかもその大きさは主流方向の最大値の2倍にもなることが示されている。本実験では再付着点はマウンドから外れるので逆流域だけを考えればよいことになる。

(2) マウンド被覆材の被害率

$x=20\text{m}$, 40m , 60m の各測線の周りに、各々200個程度の着色した被覆材(碎石)をおき、5分間通水してその前後の写真撮影より被害率を求めた。底面粒子の移動にかんしてはシールズ数が無次元量として選ばれるが、本実験では乱れ強度の大きい $x=20\text{m}$ よりは、平均流速の大きい $x=40\text{m}$ での被害率が大きいことから、次のような補正シールズ数を定義し、被害率 $e(\%)$ に対してプロットすると図-9のようになった。

$$\Psi' = \frac{u_b^2 + \overline{u_b'^2}}{s g d} \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta + \cos \theta} \quad (1)$$

ここで s は被覆材の水中における比重、 θ は斜面勾配である。最小自乗法で実験式をもとめると次式となる。

$$\log \Psi' = 0.208 e - 1.22 \quad (\text{case 3}) \quad (2)$$

$$\log \Psi' = 0.237 e - 1.15 \quad (\text{case 4})$$

実験値はばらつき、 $x=20$ でのデータが実験式より下、 $x=40$ でのデータが上に分布する傾向があり、乱れの重みはもう少し高いようである。 $e=3\%$ を初動とすると対応する Ψ'

は各々0.12, 0.15となる。

(3) 抗力および揚圧力

図-10にはプレバックド堤表面の動圧力分布を水頭の形で示した。上の図が平面図で円柱の周りの動圧力水頭を円柱表面を零とする放射線状の座標で示してある。Jは測定点の高さを表しており、 $J=9$ が一番上の測点である。下の図が k_0-k_6 できった断面である。

堤の上流側ではよどみ点ができるので圧力が高く、堤の上面と下流側では後流域に入るため圧力がほぼ一定で零に近い。また下面は浸透流による揚圧力を受けている。抗力係数は一般に一樣流の流速を使って無次元化された量であるが、ここではマウンドにより断面積が変化しているので前述の U_m を用いた(表-3)。

測定値にばらつきが多いが平均値は0.90となっている。2次元流の場合の自由流線を用いた理論解が0.88となっており²⁾、これと比較的近い値である。揚圧力についてはマウンド形状による影響を調べるため、取扱の容易なダルシー則による等角写像の解析を行った。対称性から防波堤の半分だけを考え図-11に示すような物理平面 z 、複素ポテンシャル平面 w 、補助平面 ζ の間で Schwartz Christoffel 変換を用いると、圧力と流速の分布は次のように表される。

$$p^* = p / (w d H / 2) \\ = \int_{\xi}^0 \frac{d \xi}{\sqrt{\xi} (\xi - \xi_A) (\xi - \xi_D)} / I 1 \quad (3)$$

$$u^* = u / (k d H / 2 r) \\ = \int_0^{\xi_A} \frac{d \xi}{(1 + \xi)^{\beta/\pi} \sqrt{\xi} (\xi_0 - \xi)} \cdot \frac{(\xi + 1)^{\beta/\pi}}{\sqrt{\xi - \xi_0}} / I 1 \quad (4)$$

$$a/r = \int_0^1 \frac{d \xi}{(1 - \xi)^{\beta/\pi} \sqrt{\xi} (\xi_A + \xi)} / I 2,$$

$$c/r = \int_{\xi_D}^0 \frac{d \xi}{(1 + \xi)^{\beta/\pi} \sqrt{\xi} (\xi - \xi_A)} / I 2$$

$$I1 = \int_{\xi_D}^0 \frac{d\xi}{\sqrt{\xi(\xi - \xi_A)(\xi - \xi_D)}},$$

$$I2 = \int_0^{\xi_A} \frac{d\xi}{(1+\xi)^{\beta/\pi} \sqrt{\xi(\xi_A - \xi)}}$$

ここで H はマウンド堤上, 下流の圧力水頭差, k は浸透係数, r は浸透層の深さ, ξ_A, ξ_D は各々 x 平面の D 点, A 点に対応する x 平面上の実軸座標であり, a はマウンド天端の半幅, c はプレバックド堤の半幅である。いま, $c/r = 0.2$, $c/a = 0.55$, $\tan \beta = 1/3$ の場合の計算結果を図-12-1 に示した。上の図が p^* 及び u^* の分布を示し, 下の図は $a \rightarrow \infty$ の場合の Muskat の解 p_M, u_M との相対差異 $\epsilon_p^* = |p^* - p_M|/p^*$, $\epsilon_u^* = |u^* - u_M|/u^*$ を示した。圧力分布は直線に近く, Muskat の解との差異は 1% のオーダーであり, マウンド形状の影響は小さい。圧力分布は点対称になっているので, 揚圧力を積分した全揚力は両端を直線でむすんで積分したものと変わらない。この時プレバックド堤上面および下流側の面の圧力が一定であるとして求めると揚力係数は 0.5 となる。実験値の平均値は 0.37 となりいくぶん小さな値となる。

図-12-2 は $c/r = 0.17$, $c/a = 0.98$, $\tan \beta = 1/3$ とマウンドの天端幅とプレバックド堤の幅がほぼ等しい場合を示す。Muskat の解との差異は 5% 程度となお小さい。これらのことから圧力や流速の分布形を決める主要なパラメータは c/r であり c/a が変わっても, また case 3 と case 4 の違いのようにマウンドの勾配が多少変わっても結果はあまり変わらないことがわかる。

4. 現地への適用性に関する検討

本実験はフルードの相似則により縮尺を決めているので開口部を越流する流れの水面形などのように重力が卓越するような現象は力学的に相似である。ここでは粘性効果が大きくプレバックド堤からの流線の剥離現象とマウ

ンド堤の浸透流について検討をおこなう。

(1) 抗力係数, 背圧係数について

抗力係数は一般にレイノルズ数によって変化するが, 平板を流れて直角に置いた 2 次元流の場合や, 円板の場合の軸対称流の場合では, レイノルズ数が 10^4 以上で一定になっており, 円柱などの場合とは異なった結果となっている。これは, 平板や円板の場合に流線が必ず板の端点から剥離するため, 壁に沿って発達した境界層が層流から乱流に変化することが起こらないためである。本実験で取り上げたプレバックド堤の形状より流線は堤上流側上端の隅角部より剥離するのでレイノルズ数が現地の値に増えても抗力係数に変化は無いものと考えられる。後流域内の圧力水頭を代表流速の速度水頭で割った背圧係数は抗力係数と同様の性質を有しており, これもレイノルズ数に対して変化しないものと考えられる。水面勾配から決まる静水圧はフルード相似則により相似が保たれているので, 結局プレバックド堤の上流側, 下流側の圧力分布は動圧, 静水圧とも相似である。

(2) 再付着点について

剥離した流線は底面に再付着するが, そこでは乱れが大きくなることが知られておりマウンドの安定を考えるうえで重要な要素となる。厚板の前縁剥離泡については, 再付着点までの距離 X_r と平板厚 H_s との比はレイノルズ数が大きくなると小さくなるが $Re > 600$ ではほぼ一定で 8 の値をとること⁴⁾, また開水路の段落ち流れでは $Re > 2 \cdot 10^4$ で X_r と段の高さの比が 5 に近付くこと⁵⁾ が示されている。

本実験では再付着点はマウンドよりも下流側において変動しているが, レイノルズ数は前述の値に比べて十分に大きく, 現地においてマウンド上に再付着点ができることはないものと思われる。

(3) 揚圧力について

Ergun⁶⁾は浸透流の抵抗則について次の実験式を提案している。

$$f' = \frac{A}{Re'} + B,$$

ここで、

$$f' = \frac{4p}{\rho q^2} \cdot \frac{d}{L} \cdot \frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon},$$

$$Re' = \frac{q d}{\nu} \cdot \frac{1}{1-\varepsilon}$$

A = 150, B = 1.75 であり, Δp は損失圧力, q は流速, d は浸透材の代表長さ, ε は空隙率である。本実験では浸透材料として 1.5 cm の碎石と 0.038 cm の中砂を用いているので, 損失圧力水頭 6 cm, $\varepsilon = 0.4$ を与えると浸透流速は各々 $q = 4.6$ cm/s, 0.07 cm/s となり, $Re'_m = 1150$, 0.5 となる。前者は乱流, 後者は層流であることがわかる。一方現地では粒径は 75 cm, 1.9 cm となるから ε が変わらないとすると $q_p = 33$ cm/s, 5.1 cm/s, $Re'_p = 2.5 \cdot 10^3$, 980 となりいずれも乱流である。流速の比をとると $q_p/q_m = 1.01\sqrt{50}$, $10.3\sqrt{50}$ となり砂層内の流速はフルード則から予想するものとはずれてくる。揚圧力の分布にかんしてはプレパックド堤上下流の圧力差がフルード相似則によって再現できるので, 両端では一致する。内部では分布形が変わってくるが点対称であることには変わらないので, それを積分した全揚力は変わらない。また上層に粒径の大きなものを置いた場合にはそこが水路のようになって乱流状態であっても流速分布が一様化されるので揚圧力分布は直線分布に近くなる。

5. おわりに

プレパックド堤に働く流体力は剥離が比較的小さなレイノルズ数で定まった場所から発生することから, 形状が複雑であるにも関わらず取扱は容易で, 2 次元な簡単なモデル

で予想したものと大差がない。一方マウンドの安定を調べた (2) 式はまだ十分とはいえず今後検討を続ける必要がある。

最後に本実験は, 運輸省第 2 港湾建設局と東北大学との間に締結された実験受託契約にもとづくもので運輸省第 2 港湾建設局横浜調査設計事務所の諸氏より資料の提供その他の指導をえた。また実験, 解析に当たっては堀越伸幸君 (現農林省), 関島正浩君 (現電源開発) の熱心な協力をえた。ここに記して厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Bradbury, L. J. S. : Measurements with a pulsed-wire and a hot-wire anemometer in the highly turbulent wake of a normal plate. J. F. M., 77, pp. 473-97, 1976.
- 2) Milne-Thomson : Theoretical hydrodynamics, p. 743, 1968.
- 3) Muskat, M. : Flow of Homogeneous fluid through porous media, p. 208, 1946.
- 4) Lane, J. C., Leohrke, R. I. : Leading edge separation from a blunt plate at low Reynolds numbers, Trans. ASME, J. F. E., 102, pp. 494-96, 1980.
- 5) 祢津家久, 中川博次, 天野邦彦 : 開水路段落ちにおける剥離流の乱流構造に関する研究, 第 30 回水理講演会論文集, pp. 601-06, 1986.
- 6) Ergun, S. : Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Progress, 48, pp. 89-94, 1952.

表-1. 水理条件

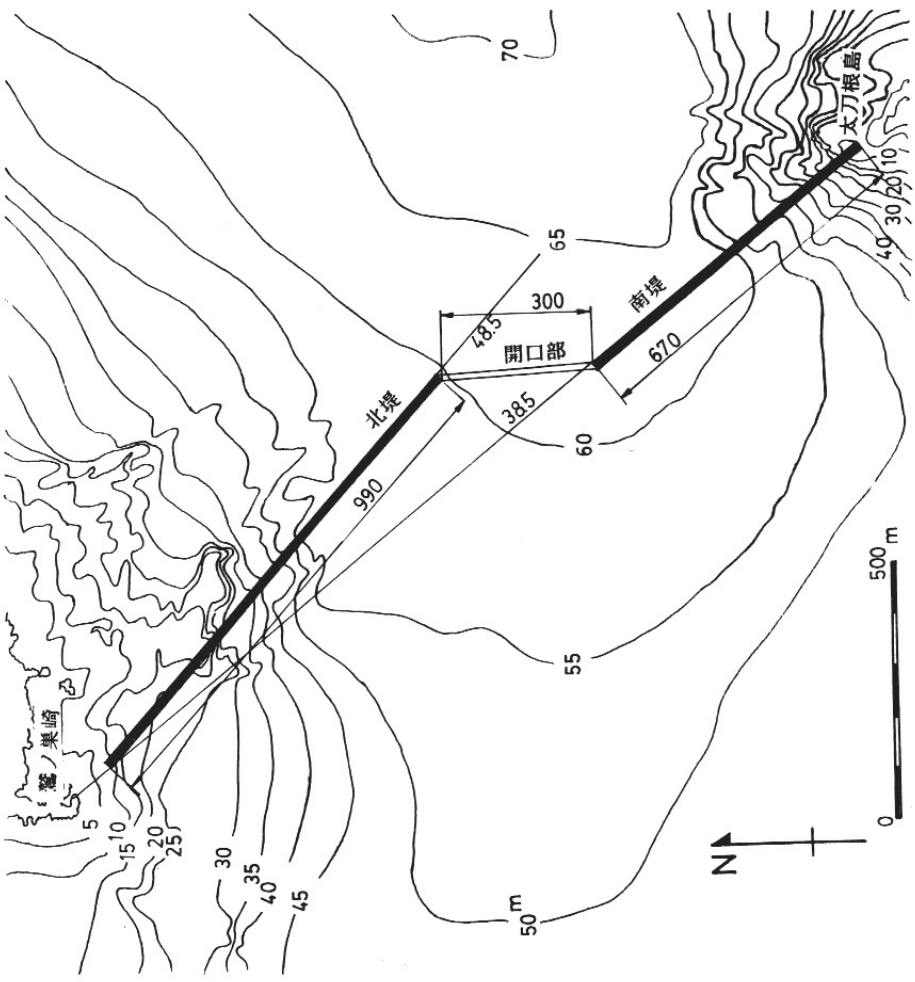
RUN	hm (cm)	Um (cm/s)	Fr = $U_m / \sqrt{gh_m}$
2	36.1	102.5	0.545
6	34.2	126.9	0.693
8	39.5	121.3	0.617
9	37.2	129.7	0.679
10	34.6	140.1	0.761
11	31.3	159.1	0.908
21	36.6	119.4	0.630
22	38.0	138.9	0.719
23	37.8	118.7	0.617
24	36.8	135.6	0.714

表-2. 実験ケース

CASE	MOUND SLOPE	ARMOR MATERIALS	FLOW CONDITIONS
1-A	1 : 4 + 1 : 2	2 t TETRAPOD	RUN 21, 22
1-B	1 : 4 + 1 : 2	4 t TETRAPOD	RUN 21, 22
2-A	1 : 3	2 t TETRAPOD	RUN 23, 24
2-B	1 : 3	4 t TETRAPOD	RUN 23, 24
3-A	1 : 4 + 1 : 2	500 kg ROCK	RUN 9, 10, 11
3-B	1 : 4 + 1 : 2	800 kg ROCK	RUN 2, 6, 9, 10, 11
4-A	1 : 3	500 kg ROCK	RUN 8, 9, 10
4-B	1 : 3	800 kg ROCK	RUN 2, 6, 9, 10, 11

表-3. 抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L

RUN	Um (cm/s)	C_D	C_L	CASE
2	104.8	0.89	0.49	CASE 3
6	132.9	0.78	0.38	CASE 3
10	143.0	0.85	0.40	CASE 3
2	102.0	1.06	0.28	CASE 4
6	126.0	0.92	0.29	CASE 4
10	145.0	0.91	0.39	CASE 4
AVERAGE		0.90	0.37	



図一 1. 金石湾口防波堤の法線

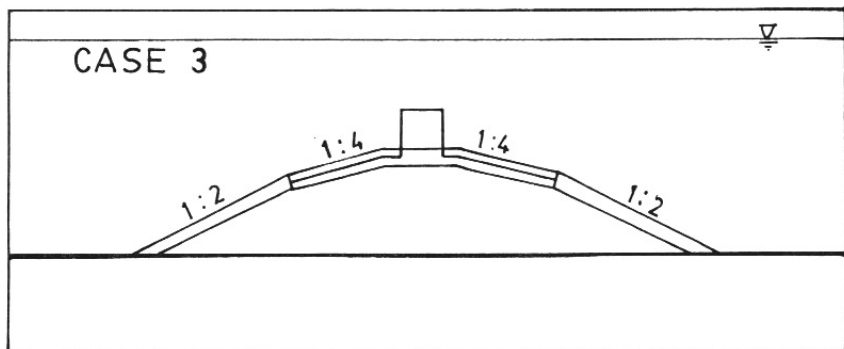
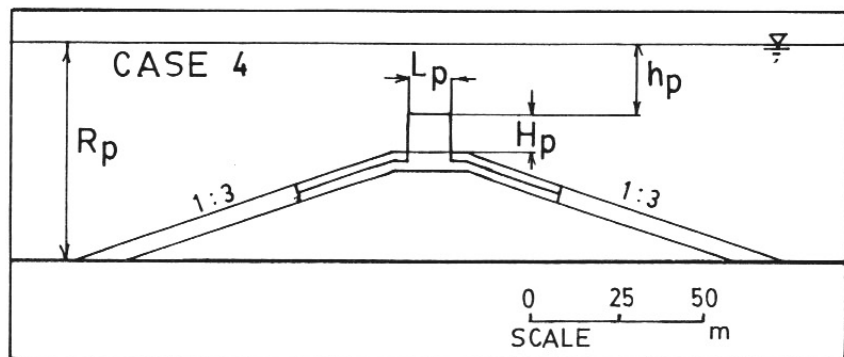


図-2. 防波堤開口部断面，マウンド形状

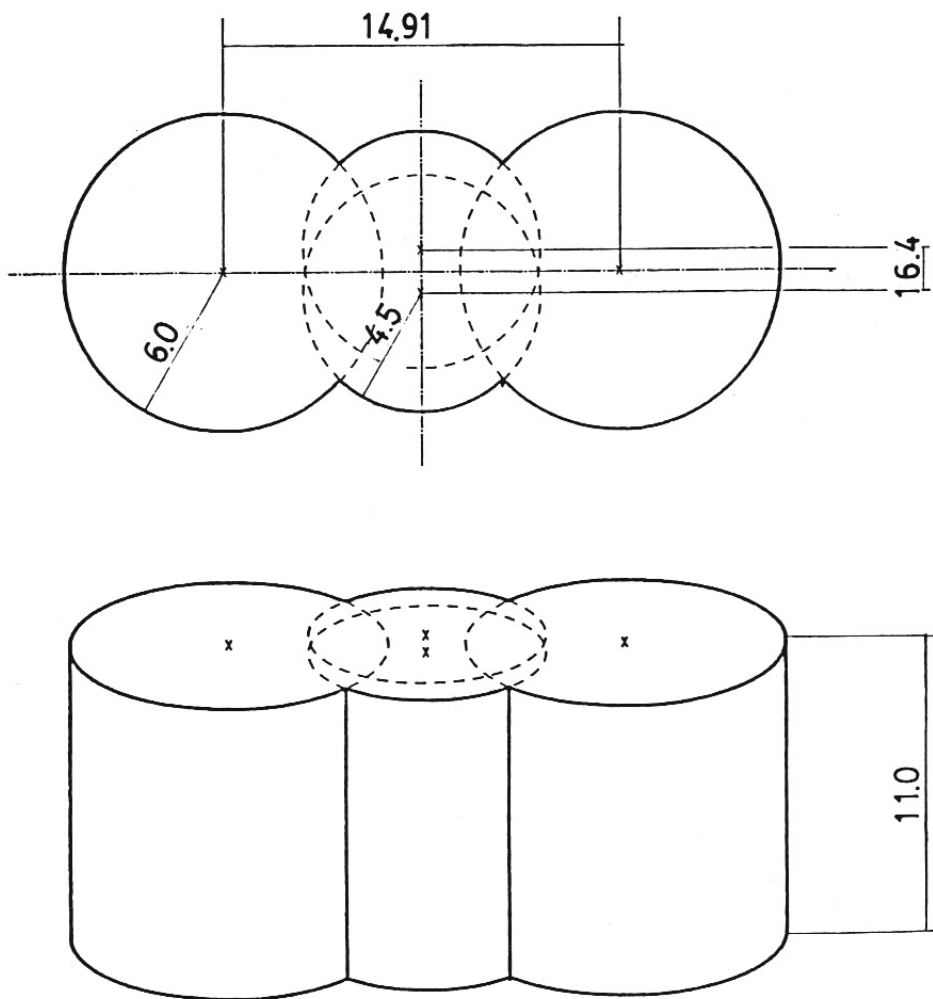


図-3. プレパックド堤 (単位m)

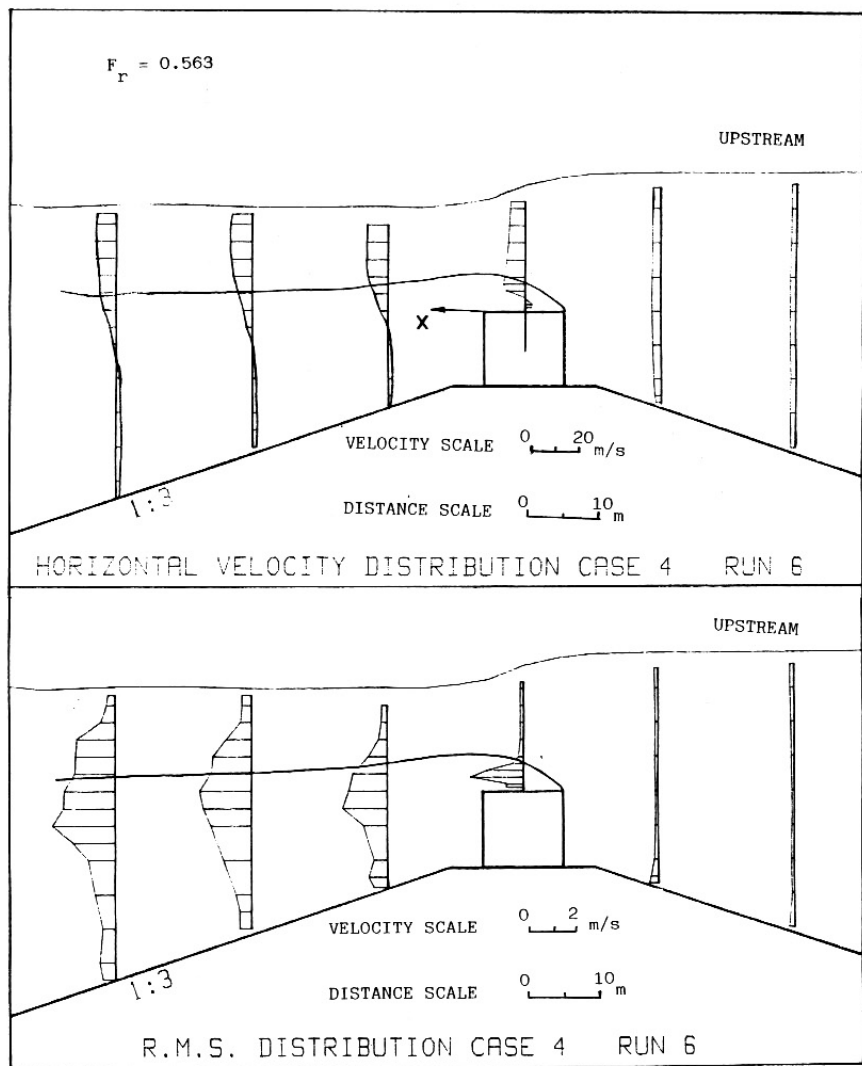


图-4. 水平流速分布：平均流速，乱れ強度

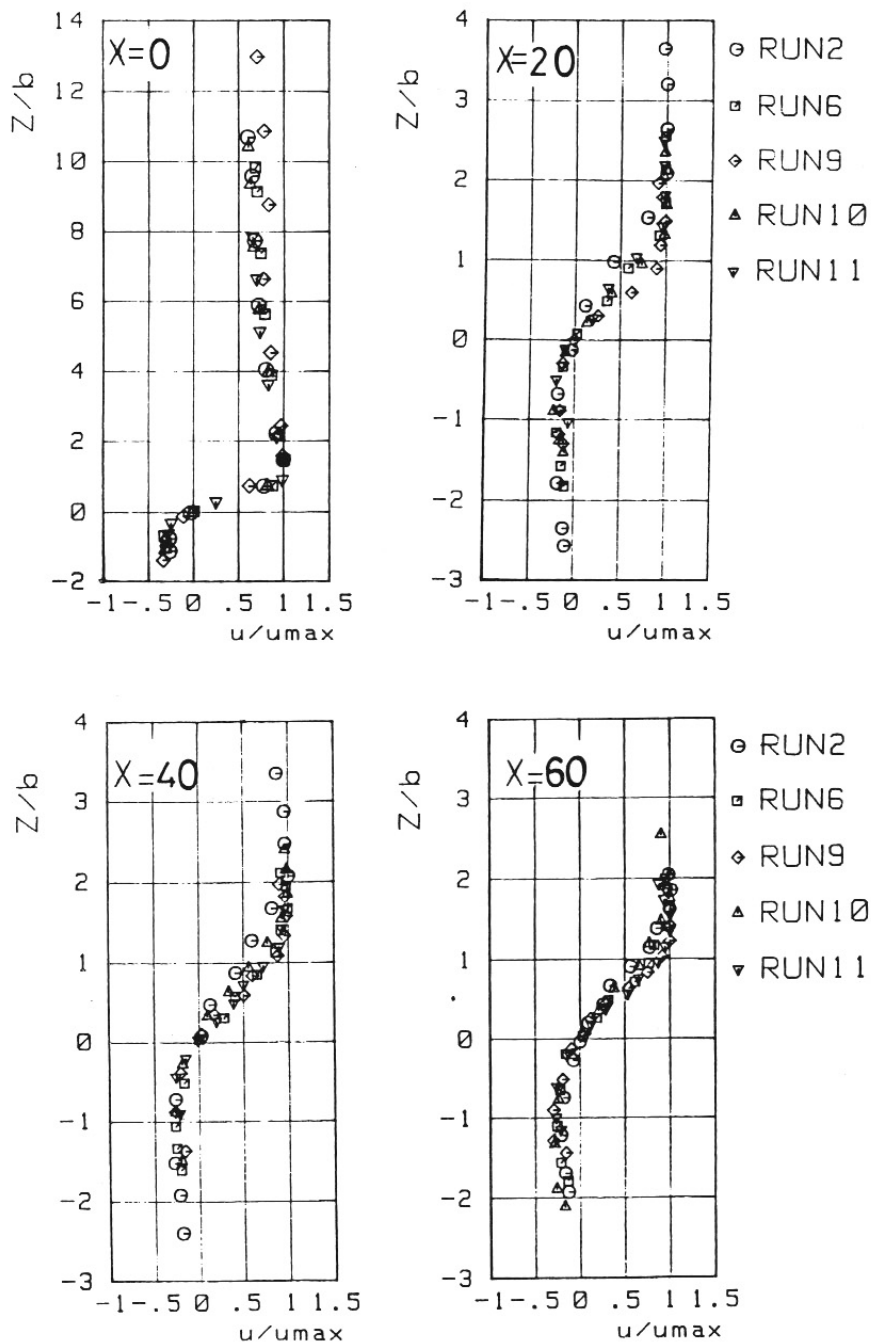


図-5. 平均流速分布の相似形 (1)

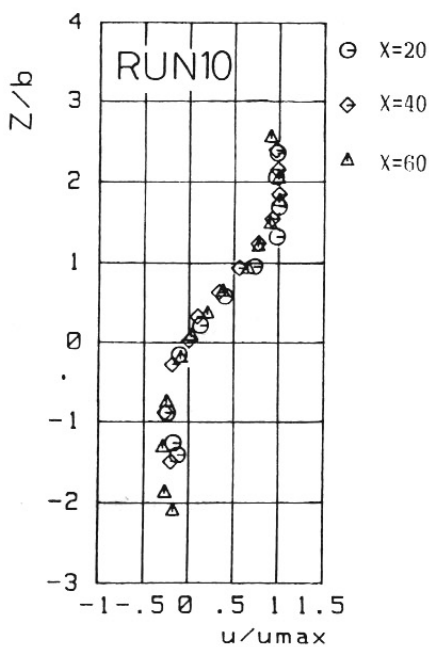
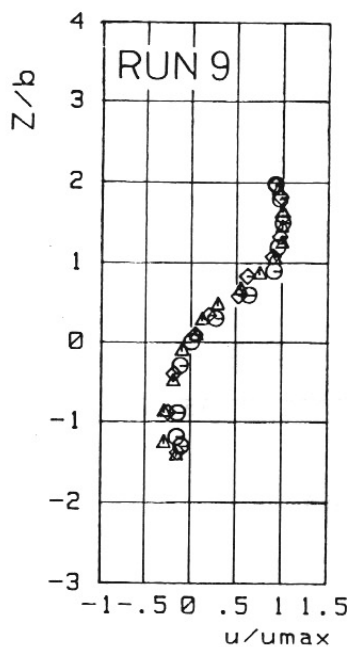
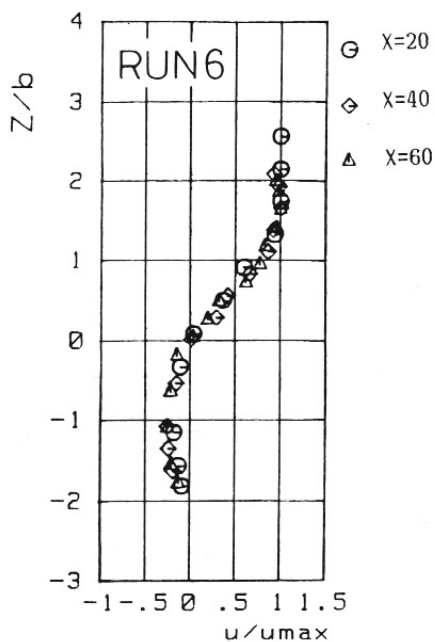
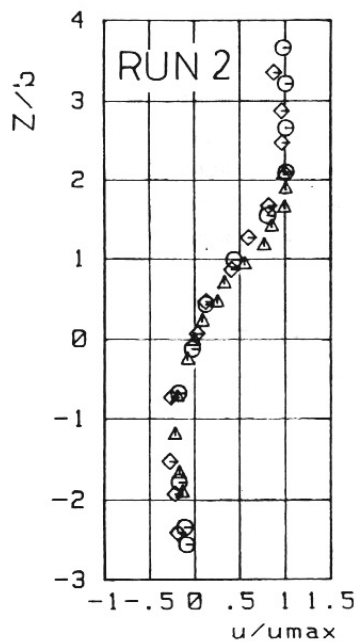


図-6. 平均流速分布の相似形 (2)

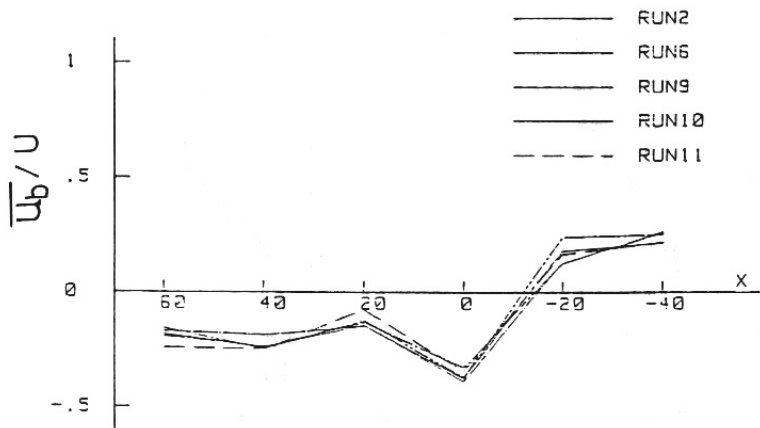


図-7. 底面における平均流速分布

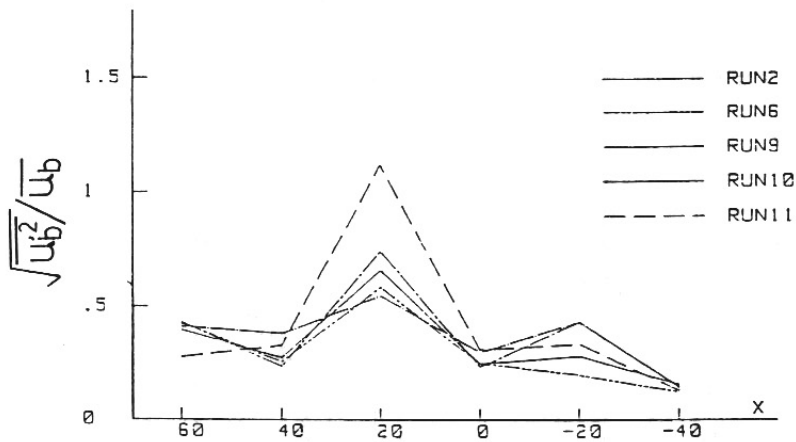


図-8. 底面における相対乱れ強度

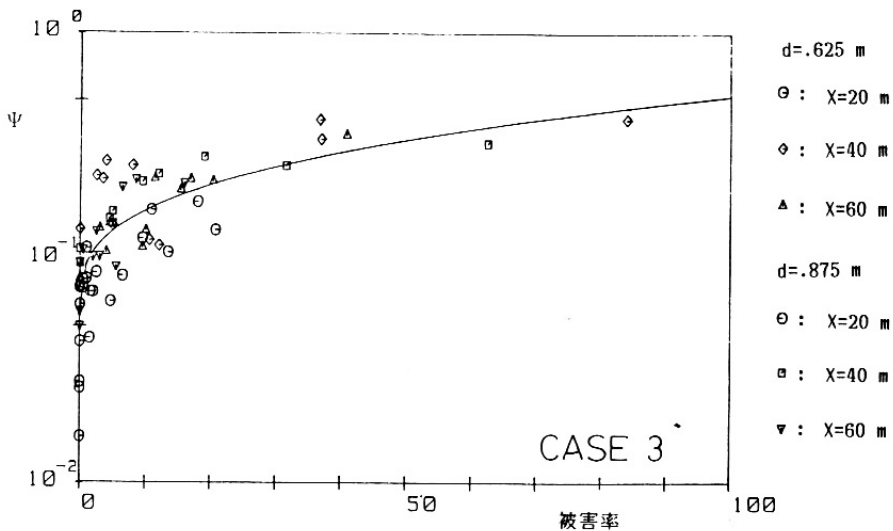
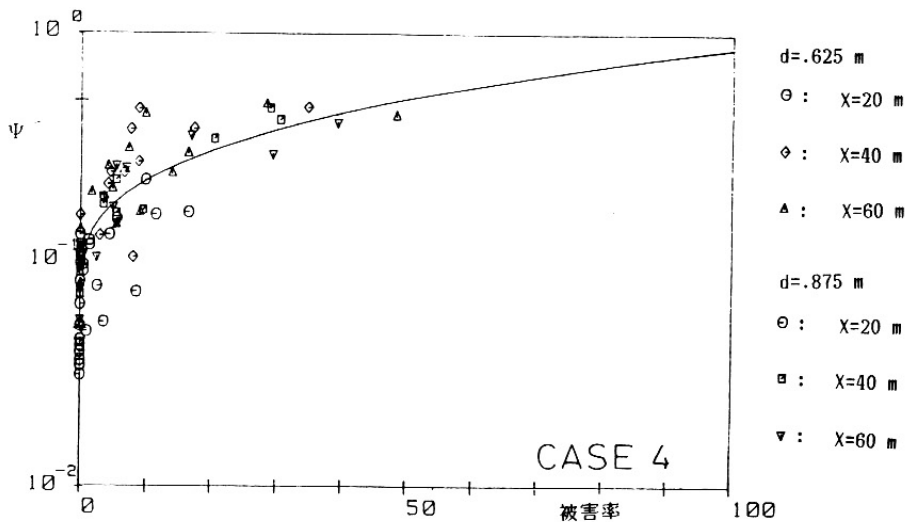


図-9. 被害率と補正シールズ数 ψ' の関係

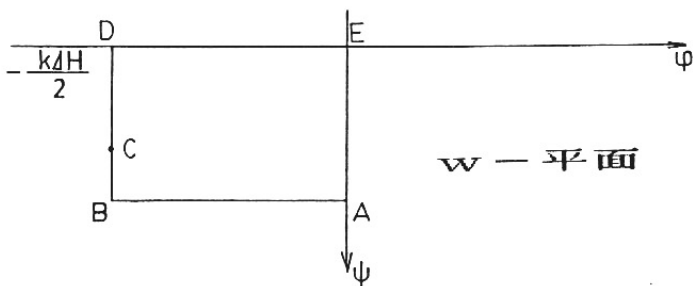
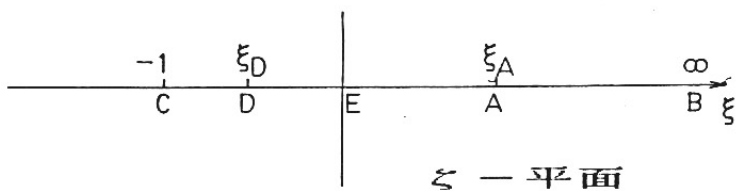
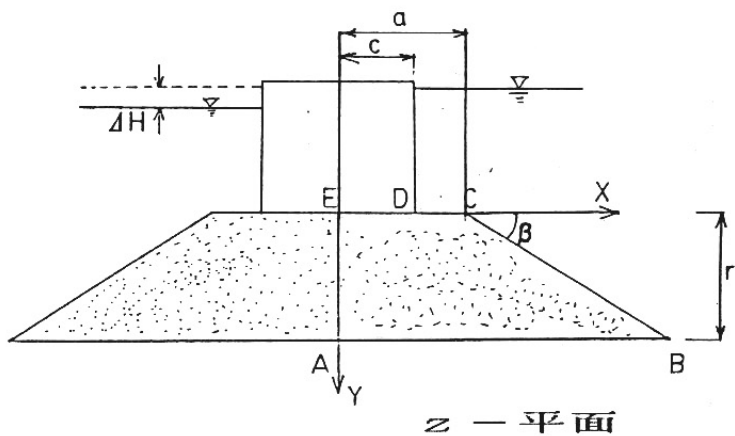


图-11. 等角写像

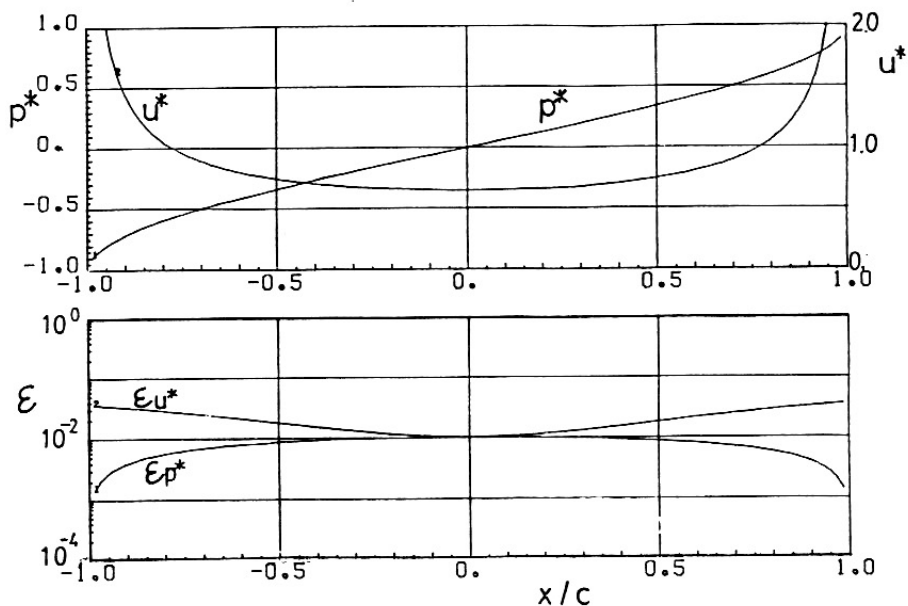


图-12-1 揚压力, 流速分布 ($c/r=0.2$, $c/a=0.55$)

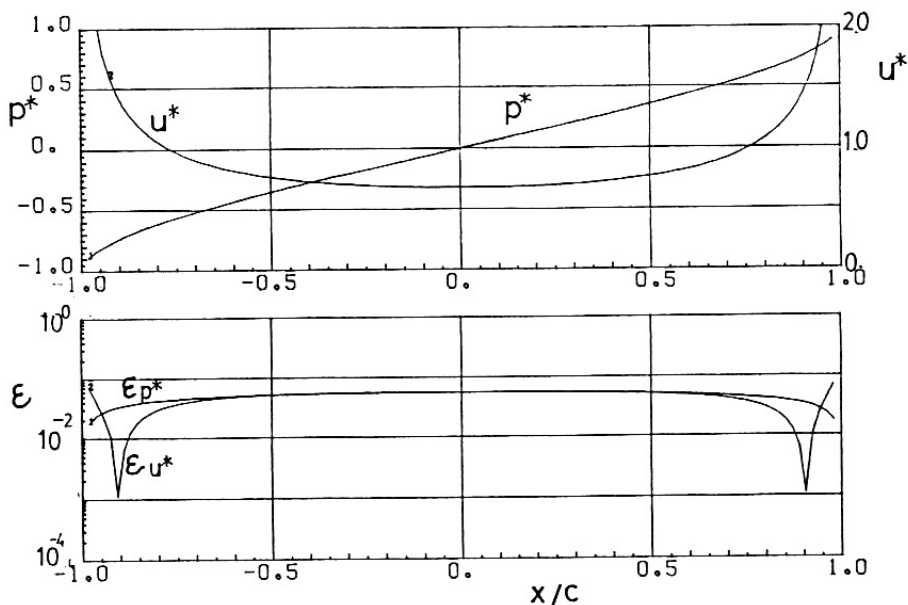


图-12-2 揚压力, 流速分布 ($c/r=0.17$, $c/a=0.98$)