

標準型ダム越流頂近傍における流線について

斎藤 隆*・赤司 信義**・深田 三夫*
岡田 武司***・高橋 修三***

On the Stream-line in Neighbourhood of Crest of
Standard Dam Over-Flow Spillway

Takashi SAITOU, Nobuyoshi AKASHI, Mitsuo FUKADA,
Takeshi OKADA and Shūzō TAKAHASHI

Abstract

It is the purpose of this paper to devise fundamental data for analysis of flow on over-flow spillway. There are still problems on assumption that the stream-line are coaxial circle, which has been used on analysis. We attempt to obtain a new interpretation on character of stream-line with Hele Shaw model, because it is impossible to express the stream-line analytically.

We report the results of measurement on stream-line and compared water surface profile with Hele Shaw model and two dimensional experiments after Araki and Fujimoto.

It became clear that deviation of stream-line from coaxial circle is fairly large, and it is necessary to introduce on analysis of flow on over-flow spillway.

1. 結 論

近年、水資源の有効利用の要求に伴い、ダム放流施設（水理調節構造物）の流量係数をより精度良く推定する方法が要求されてきている。

ダム越流型余水吐の流量係数については、古くから数多くの人々によって実験され、検討されているが、実験のほとんどは個々のダムについての模型実験であるため、数多くの実験資料が蓄積されているにもかかわらず一般的表示は確立されているとは云い難く、ダム建設に際しては、一定規模以上のものに対して模型実験が義務づけられている。

ダム越流型余水吐の流量係数についての理論的研究としては、Laufer, Jaeger, 岩崎¹⁾, 石井・藤本^{2)~6)}, 村・荒木^{7,8)}らのものがあげられる。これらの研究は、任意断面（堤体表面に垂直）における流線が同心円をなす2次元ポテンシャル流れを基本としたもので、藤本, 荒木は流れ方向の水深変化を考慮に入れている。

越流流れは短かい区間で常流流れから射流流れに変わるので、流れの解析において、まず最初に支配断面の位置を決定する必要がある。岩崎, および藤本らは違った方法でもって支配断面の位置は越流頂点にあると推論している。著者⁹⁾は各断面における水位～流量関係を用いて検討した結果、必ずしも支配断面の位置は越流頂ではなく、同じ越流形状であっても越流水頭によって支配断面の位置が変わることを明らかにした。しかしながら、流線は同心円をなすものとして解析しているので、この前提条件の成否により当然結果は違ったものになることが考えられる。

村・荒木らは大・小2つの模型による2次元実験を行ない、また、藤本らは数多くの実験資料を解析して、越流水頭が設計水頭の2~3割以下での模型実験による流量係数の値が実際よりかなり小さくなることを見出し、越流水頭が小さい場合には、表面張力や粘性の影響が現われるので、縮尺効果のあることを指摘している。通常、越流流れにおける壁面摩擦の影響は小さいものとして無視されているが、各断面における最大流速は境界層の発達する壁面上であるので、越流水頭の小さい場合には、境界層の発達による流量の減少は無視出来なくなる。この観点から、著者¹⁰⁾らは境

* 土木工学科

** 西日本工業大学 土木工学科

*** 大学院工学研究科 土木工学専攻

界層の発達に及ぼす影響を検討し、 Re 数 $\sqrt{2gE/\nu}$ の減少によって流量係数は小さくなり、 E/E_0 (E : 越流水頭, E_0 : 設計水頭) が 0.2 以下では流量係数の低下が著しいことを明らかにした。この解析においても、流線が同心円をなすものとしているので、前述の疑問が残されている。

著者⁹⁾らが境界層の発達を考慮した計算結果と、荒木⁷⁾らが行った 2 次元実験結果の流量係数を比較してみると、 $E/E_0 < 0.2$ の範囲においては両者の一致は充分満足すべきものであるが、 $E/E_0 > 0.4$ では計算値の方が実験値よりも大きく、 E/E_0 が大きくなるとその差は大きくなっている。

流線が同心円をなすものとして測定した水深を用いて計算した断面内流速分布と、荒木ならびに藤本らが測定した流速分布とを比較してみると、壁面上と水表面における速度差は計算値の方がかなり大きい。すなわち、断面内の任意点の速度勾配は実測値より計算値の方がかなり大きな値である。

荒木ならびに藤本らの実測した水面形状より水表面の曲率半径を計算してみると、流線が同心円をなすものとした値に対してかなり大きな値となる。また、この場合、水表面の法線方向と壁面表面の法線方向とは一致しない。

流速分布、水表面の曲率半径ならびにその方向の挙動からみて、流線が同心円をなすとの仮定にはかなりの無理があるものと考えられる。越流水頭がかなり小さく流れ方向の水深変化が小さい場合には、流線が同心円をなすものとみても大きな誤差とはならないであろうが、越流水頭が大きくなると水深の変化が大きく流線が同心円をなすものとみることには無理があるものと考えられる。したがって、越流流れを解析するには、すなわち、越流流量係数の一般的表示を確立するためには、まず越流頂附近、とりわけ支配断面近傍における流線がどのようになっているのかを明らかにすることが必要である。しかしながら、越流流れの流線を解析的に求めることはきわめて大きな困難を伴う。

本文は、上述の観点から、標準越流余水吐の流量係数の一般的表示を確定するための基礎資料として越流頂附近における流線を実験的に明らかにしようとするものである。越流流れのように流れの変化が激しい場合には、速度ベクトルの測定から流線を決定する方法はかなりの誤差を伴い、曲率半径を求めるには 2 階の微係数を必要とするので誤差は飛躍的に大きくなる。したがって、流線の測定はかなり良い精度で行なう必要がある。そこで、相似則には大きな疑問があるが、ポテンシャル流動の流線を求める方法として知られて

いる Hele Shaw 流れを用いて流線の測定を行なった。なお、相似則については Hele Shaw 流れと 2 次元実験結果とを比較し、実験的に検討を行なった。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。垂直に立てた高さ 50 cm × 長さ 70 cm の平行板の一方は 10 mm 厚のガラス板で、他方は内側に 1 cm 方眼をきざんだ 10 mm 厚のアクリル樹脂板を張り付け、両壁面の状態を同じにしてある。

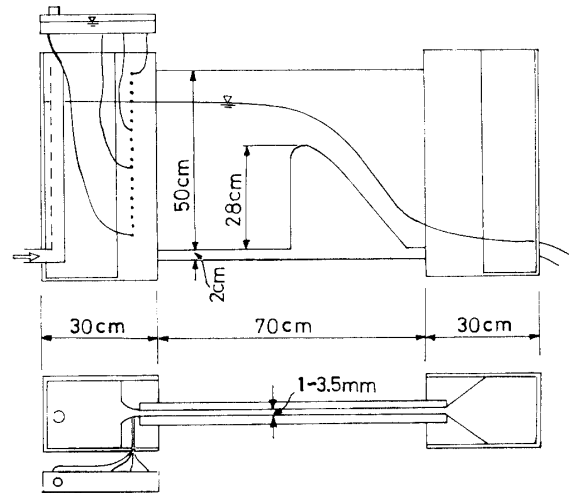


Fig. 1 Schematic View of experimental apparatus.

ダム模型は設計水頭が $E_0 = 10$ cm の Randolph ($Y/E_0 = 0.53 \times (X/E_0)^{1.80}$), ならびに Harrord ($Y/E_0 = 0.50 \times (X/E_0)^{1.83}$) の歪のない高さ 28 cm のものである。模型の厚さは、適切な厚さを決めるため、1 mm, 2 mm, 3.5 mm の 3 通りに変えて、各測定結果を比較した。各厚さの模型による測定結果を比較し、水面形状ならびに流線の測定精度から、1 mm 厚が最も良いものと判断し、1 mm 厚の模型でもって系統的に実験をした。

色素としては、写真撮影のことを考慮して、過マンガン酸カリの水溶液を用いた。色素の注入は上流側水槽のベルマウス部分に高さ方向に 10 mm 間隔であけてある $\phi 1$ mm の穴から行なった。色素注入量は色素タンク上部のバルブと色素タンクと注入孔とを接続している塩化ビニール管に付けたピンチコックによって調節した。

本実験の場合は、通常の Hele Shaw 流れの場合と違って、自由水面が存在するので、表面張力の影響を無視することはできない。表面張力の影響を除くため、

上流側水槽の水表面に中性洗剤を連続的に流した。

流線は、流れが定常状態になったのを確認してから、適当な間隔で3~4点から色素を流し、側面から写真に撮影した。これを2~3回繰り返して1つの水頭で7~12本の流線の測定をした。流線の読取りは焼付けた写真の流線をペンタグラフでもって1mm方眼紙上に実物大に拡大してから行なった。

3. 実験結果とその検討

Hele Shaw 流れと荒木ならびに藤本らが行なった2次元実験での越流水頭 E とダム頂点の水深 h との関係と比較したものが Fig. 2 である。図より両者はよく一致している。Hele Shaw 流れでは平行板の間隔、ダム模型の高さ、ならびにダム上流の流下距離によって Fig. 2 の関係は異なるはずであるが、本実験の場合は越流水位を上流側水槽の水位と同じとみてもよいであろう。以下、本実験の越流水位は上流側水槽の水位として整理する。

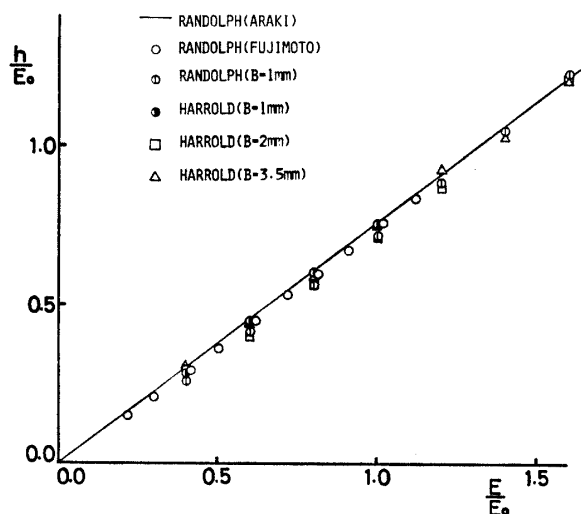


Fig. 2 Relation of Over-flow depth and depth at crest of Over flows.

Fig. 3 は Hele Shaw 流れと、2次元実験での堤体上の水面形状を設計水頭 E_0 を規準長として描点したものである。図中の数字は越流水頭 E と E_0 の比である。両者の結果は良く一致している。水面形状と堤体形状とが一致しているので、その間にある流線は、両者の間での違いはないものと考えられる。すなわち、Hele Shaw 流れと2次元実験での流線は幾何学的に相似であるとみなしても大きな誤りはないものと考えられる。

以下、水面形状ならびに流線の特徴を調べていくが、

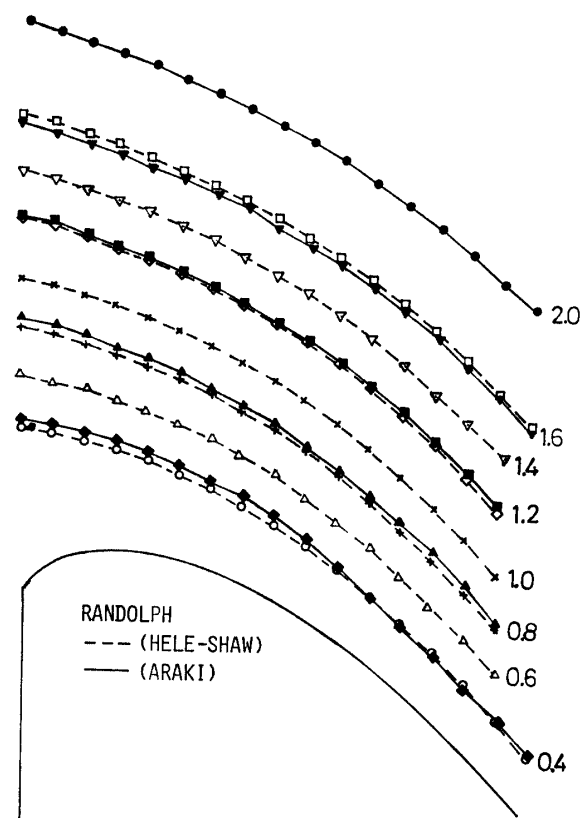


Fig. 3 Water Surface profile.

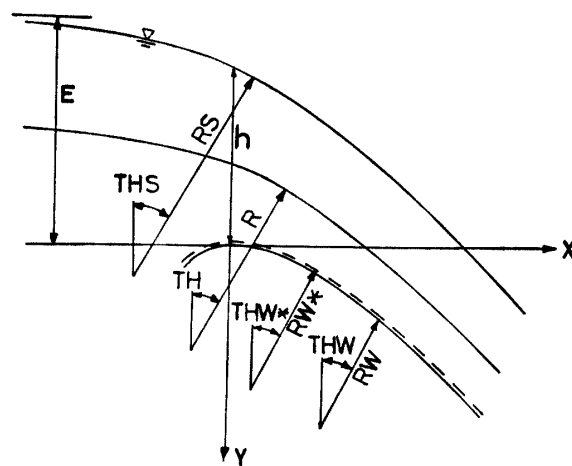
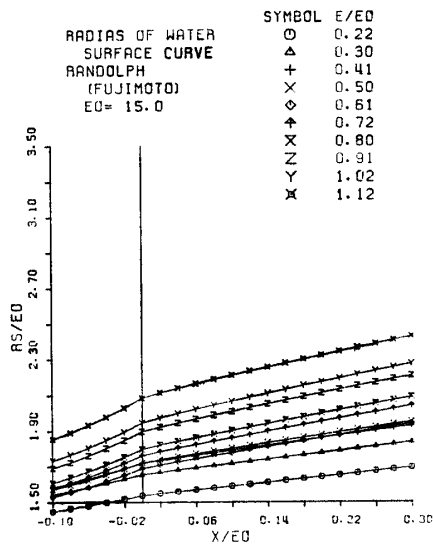


Fig. 4 Schematic View of Over-flow and notation used in this Report.

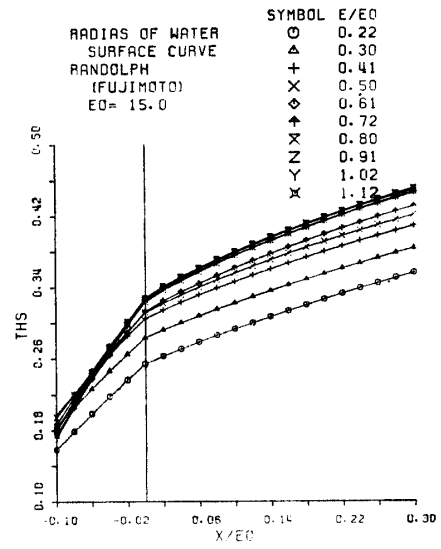
本文で用いる代表的な記号を Fig. 4 に示す。記号末尾に*が付いているのは仮想壁面流線についての諸量である。

Fig. 5 は、水面形状が2次曲線で近似できるとして $X/E_0 = -0.4 \sim 1.5$ の間の15~18の測点を用いて最少2乗法で水面形状の関数形を決め、その関数から各点の曲率半径を求めて描点したものである。

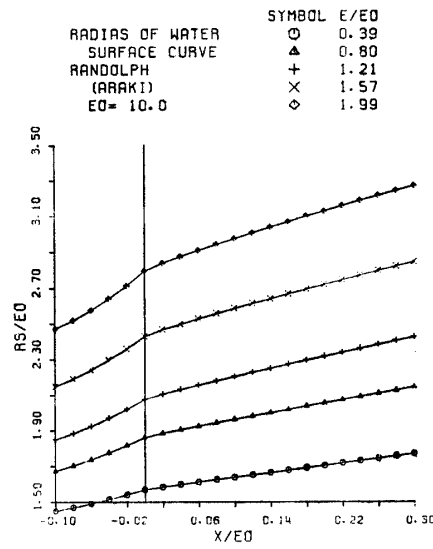
Fig. 6 は、曲率半径と同様にして求めた水表面の法



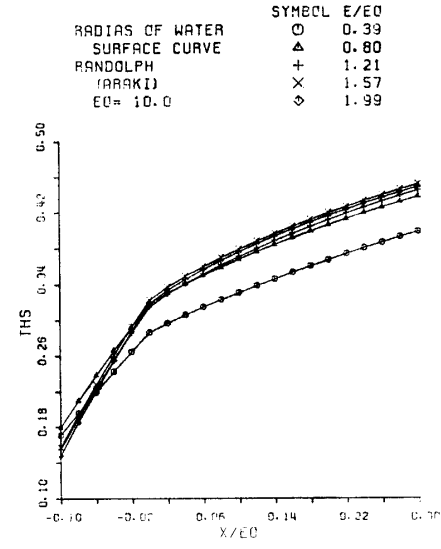
(a)



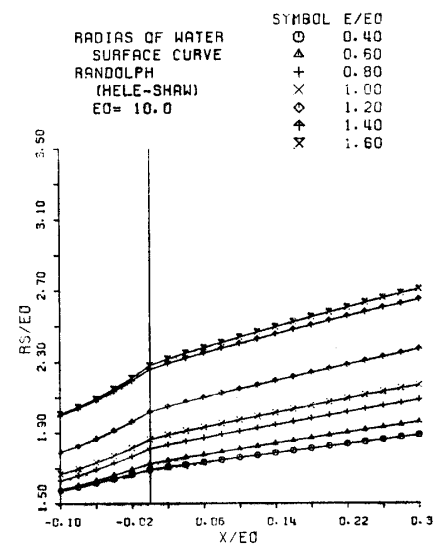
(a)



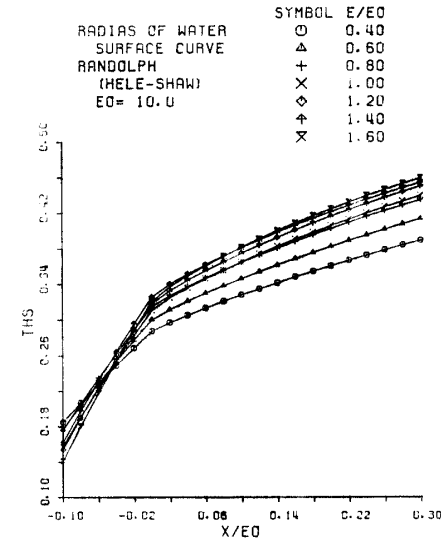
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 5 Radius of Curvature of water Surface.

Fig. 6 Angle between perpendicular line and normal line of water Surface.

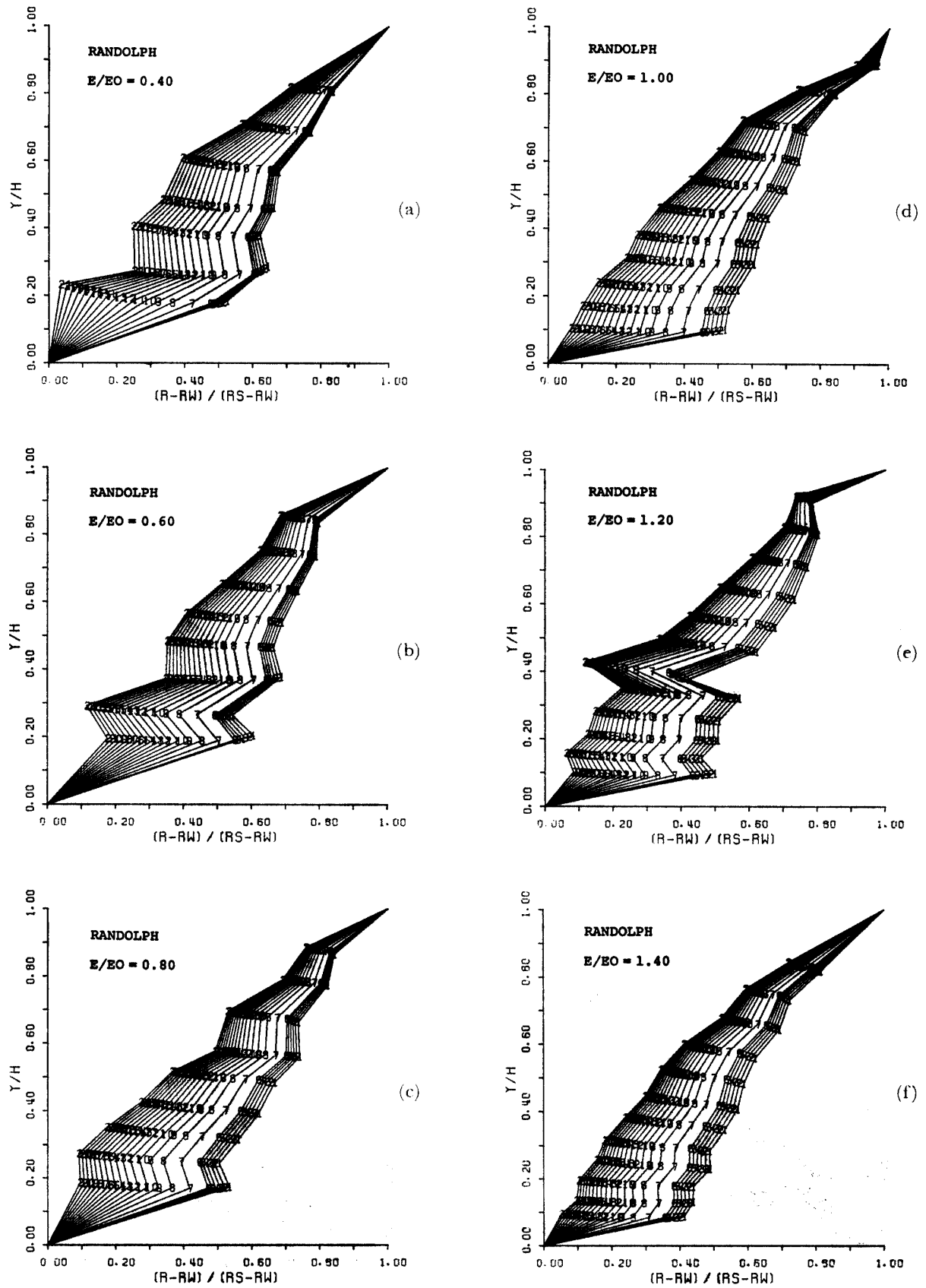


Fig. 7 Distribution of Curvature radius of Stream-line.

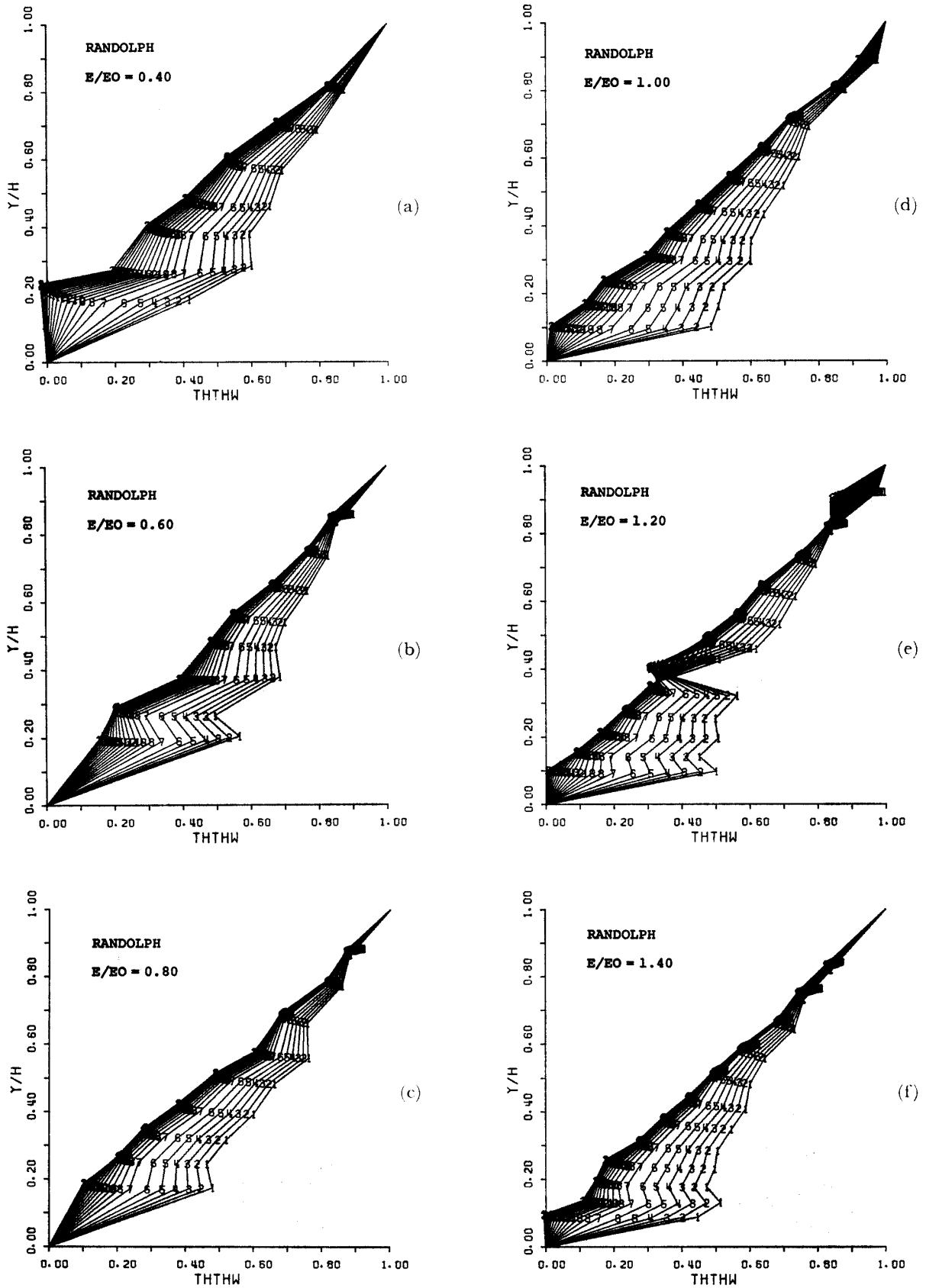


Fig. 8 Distribution of Angle between perpendicular line and normal line of Stream line.

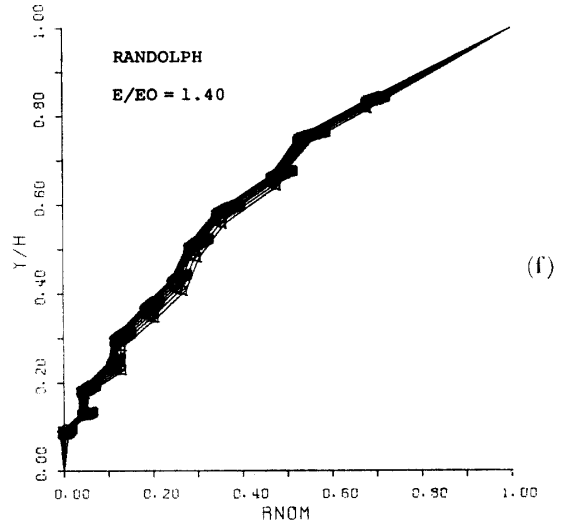
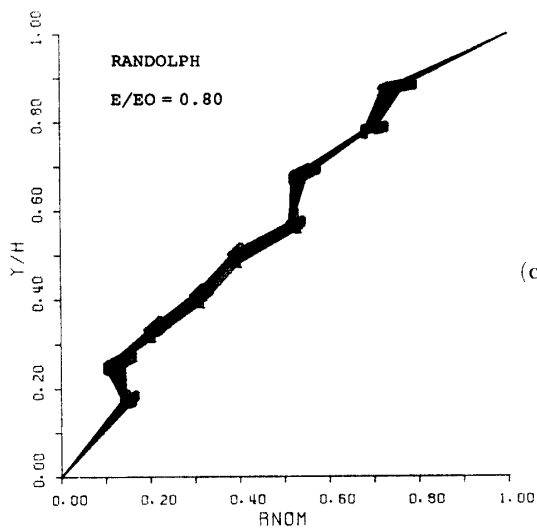
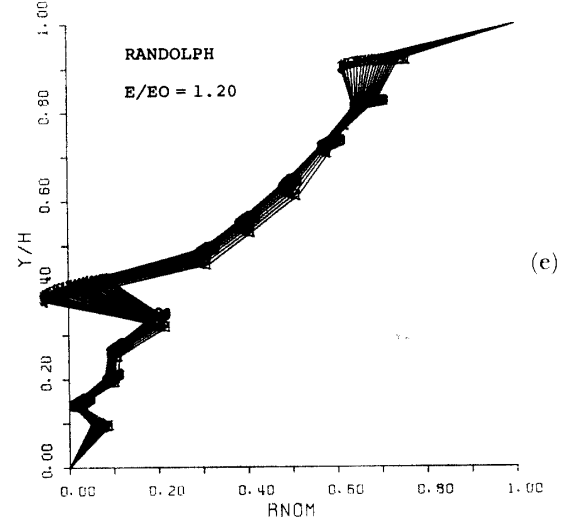
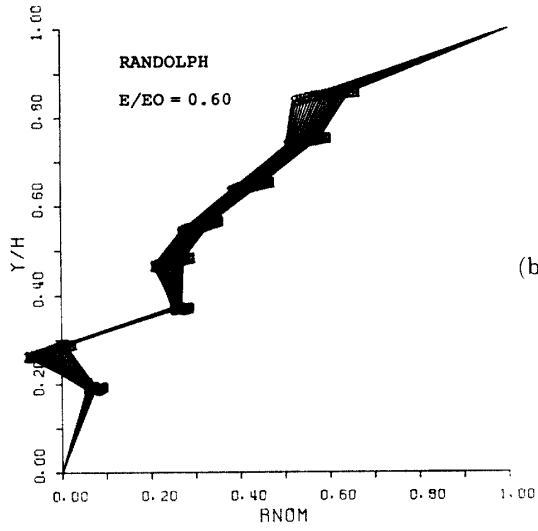
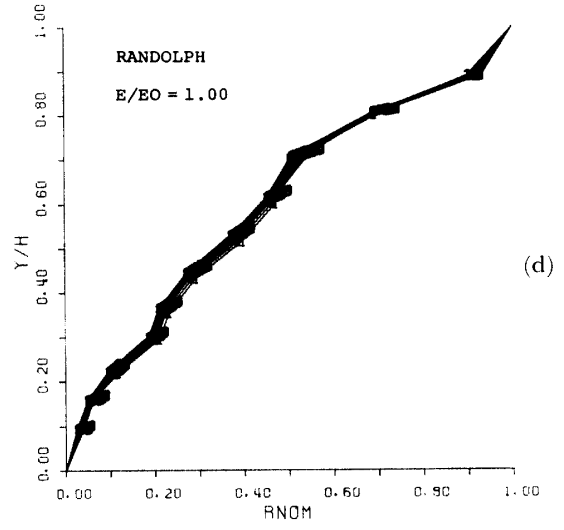
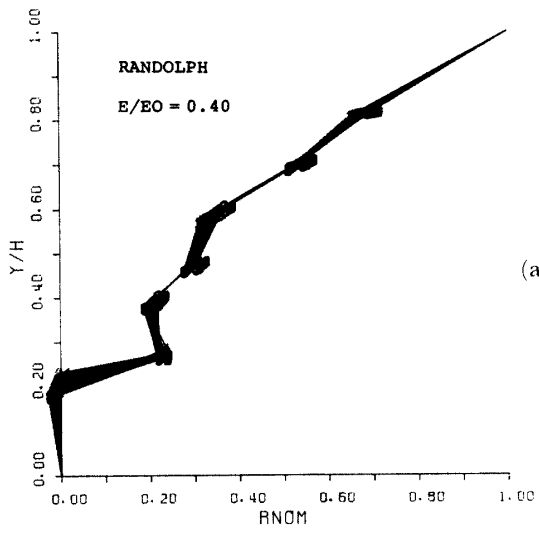


Fig. 9 Normalized Radius of curvature of Stream line.

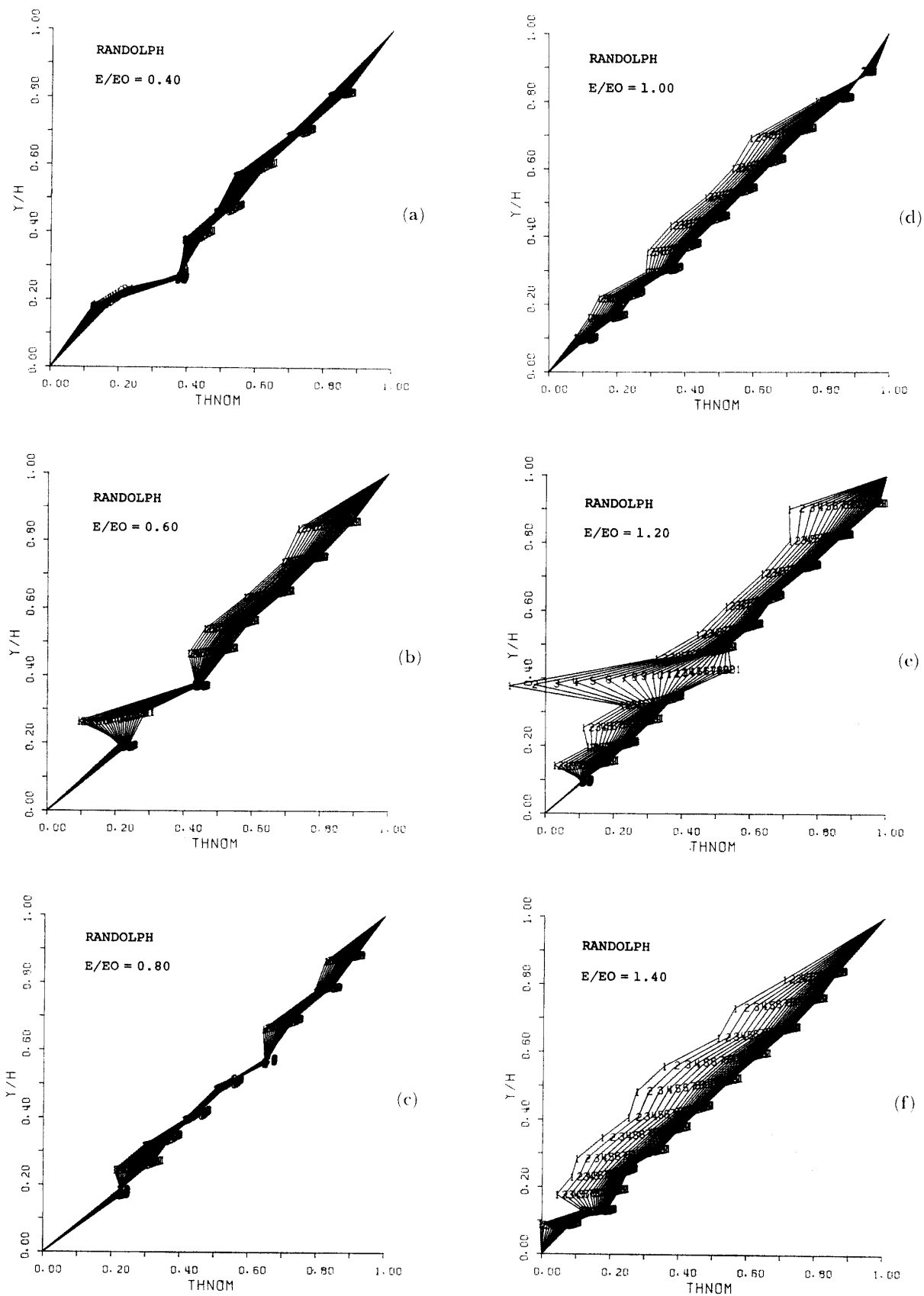
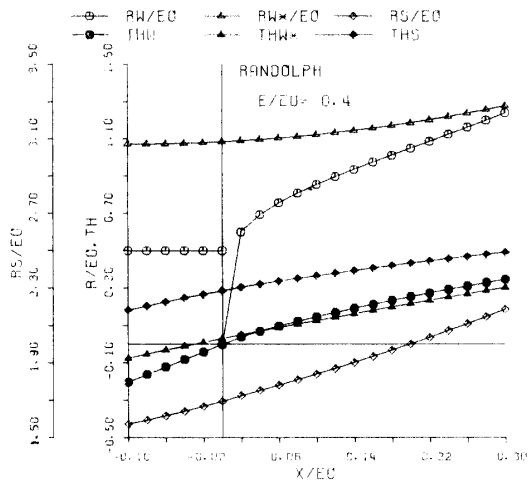
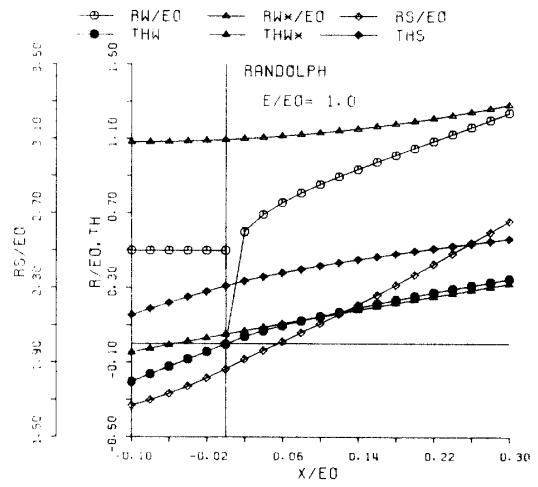


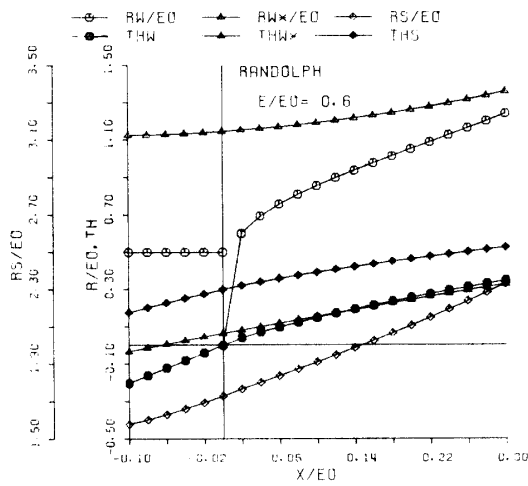
Fig. 10 Normalized Angle between perpendicular line and normal line of Stream-line.



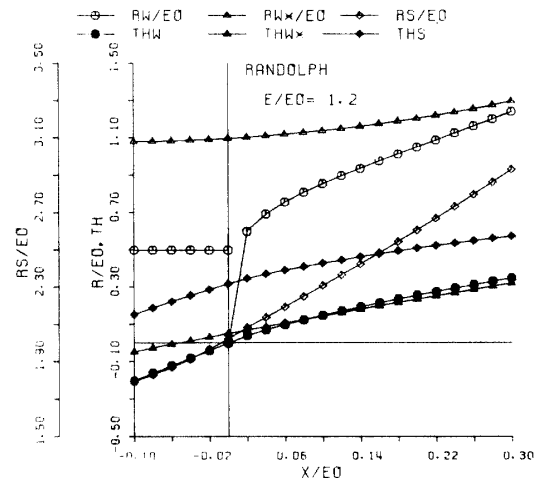
(a)



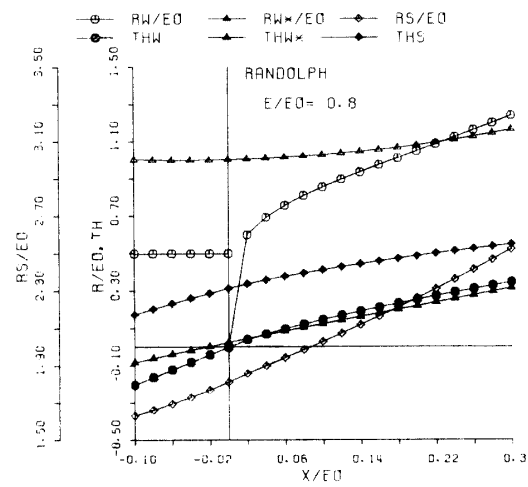
(d)



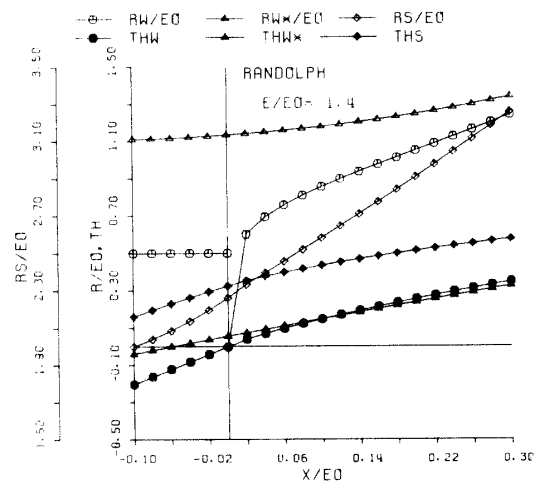
(b)



(c)



(e)



(f)

Fig. 11 Radius of Curvature and Angle between perpendicular line and normal line of Stream line used to normalize.

線が鉛直線となす角を描点したものである。Fig. 5, 6の横軸 X は壁面の位置で、描点の位置は壁面に垂直な面上である。

Fig. 5, 6より、曲率半径 RS 、法線角 THS とも越流水頭ならびに流下距離が大きい程大きな値となっている。流線が同心円をなしているならば、Fig. 6の描点は越流水頭に関係なく一つの曲線となるはずで、従来の解析においてなされたこの様な仮定は満足していないことが明らかである。

Fig. 7, 8 は水面形状と同様に、各流線を2次曲線でもって近似し、壁面に垂直な断面における曲率半径ならびに流線の法線と鉛直軸となす角の分布を描点したものである。図中の数字は、Fig. 5, 6の各描点位を上流側から順番に番号を付けたもので、断面位置を表わす。番号6は越流頂点位置である。

流線の曲率半径 R 、ならびに法線の鉛直軸となす角 TH の壁面に垂直な断面における分布が2次曲線で近似できるとし、壁面上の仮想流線の曲率半径 RW^* ならびに法線の鉛直軸となす角 THW^* を最少2乗法によって求め、 $(R-RW^*)/(RS-RW^*)$ ならびに $(TH-THW^*)/(THS-THW^*)$ と Y/H (H : 水深) との関係を描点したものが Fig. 9, 10 である。

Fig. 9より、 $RNOM=(R-RW^*)/(RS-RW^*)$ は流線の測定誤差に帰因するとみられる描点の散乱を考慮すればほぼ Y/H の2次関数として与えられるようである。

Fig. 10より、 $THNOM=(TH-THW^*)/(THS-THW^*)$ は、越流頂点より上流側を除くと、ほぼ Y/H の一次関数として与えることができるようである。

Fig. 6~9で R ならびに TH を規格化する際に用いた水面の曲率半径 RS ならびに法線角 THS 、およ

び壁面ならびに仮想壁面流線の曲率半径 RW 、 RW^* ならびに法線角 THW 、 THW^* を越流水頭 E/E_0 ごとに描点したものが Fig. 11 である。

4. 結 語

標準越流余水吐を越流する流れを解析するための基礎資料をとの考えより、ほとんど考察を加えずに実験資料を提示したが、従来の全ての解析において用いられてきた、壁面に垂直な断面における流線は同心円をなしているとの仮定は、本実験から、満足されていないことを明らかにした。

本実験で得られた水面形状ならびに流線に関する結果を、測定精度を考慮して、越流流れの解析に導入して流量係数、壁面圧力分布について検討し、これらの一般的表示を確立していく準備を行なっている。

参 考 文 献

- 1) 岩崎敏夫：土木学会論文集，No. 43 (1957)
- 2) 石井文雄，藤本 成：土木研究所報告，No. 127 (1966)
- 3) 石井文雄，藤本 成：土木研究所報告，No. 130 (1967)
- 4) 藤本 成：土木研究所報告，No. 132 (1967)
- 5) 藤本 成：土木技術資料，10-2 (1968)
- 6) 藤本 成：土木技術資料，12-6 (1970)
- 7) 村 幸雄，荒木正夫：土木研究所報告，No. 93 (1955)
- 8) 荒木正夫：土木学会誌，39-9 (1956)
- 9) 斎藤 隆，他4名：山口大学工学部研究報告，31-1 (1980)
- 10) 斎藤 隆，他3名：Tech. Rep. of Yamaguchi Univ. 2-4 (1980)

(昭和56年4月15日 受理)