

棧粗度水路の転波列に関する実験的研究

Experimental Study on Roll-Waves in Channel with Striped Roughness

山口大学工学部 正 員 齋 藤 隆

山口大学工学部 正 員 羽田野 袈裟義

山口大学工学部 正 員 蒲 地 政 文

1. ま え が き

急勾配水路または急斜面上の流れに現われる転波列について、その現象の特異性によるところの興味からだけでなく、排水、土壌浸食、土砂流送などの水工学上の諸問題に大きな役割を演じていることから、数多くの著名な研究が行なわれている。これらの研究のほとんどは、主として転波列の発生限界を論じたもので、転波列のその他の水理学的特性、すなわち、波高、波形、周期、波速などの波としての性質および平均流速、流量、摩擦速度などの流れとしての性質についての定量的解析を行ない、水工学上の諸問題における役割について論じたものとしては、石原^{7)~9)}によるところの一連の研究があげられる。石原、岩垣、岩佐らは運動量方程式を R.F.Pressler の方法で解き、衝撃条件を用いて不連続周期解を求め、滑面水路で行なった層流、乱流領域における転波列の発生条件ならびにその他の水理学的性質をみごとに説明している。岩垣らは、転波列の発生限界に関係する要素は運動量補正係数、河床勾配、Re 数および粗度係数で、転波列の諸特性を支配する指標は $IR = 1 / (\tan \theta \cdot Re)$ であって、遷移領域における流れでは転波列は発生しないか、非常に発生しにくいこと、粗度が大きいと転波は発生しにくいことなどの興味深い結果を得ている。

近年、急勾配の小河川をしばしば棧粗度水路に改修することが行なわれている。抵抗則（平均流速分布則）に多くの疑問点が残されているが、上述した結果によると、実際の棧粗度水路での転波列の発生は極めて稀な場合であると考えられるが、河床勾配が $1/15$ 程度の小河川を棧粗度水路に改修した後、洪水波の減水期の数時間～十数時間にわたり転波列が確認された。棧粗度水路の抵抗則、とくに勾配が急で、流れの深さが棧粗度頂より棧粗度の高さ以下であるような浅い流れにおける抵抗則は不明な点が数多く残されていて、滑面水路におけるように流れの特性、とりわけ平均水深を定義することが困難である。このため、棧粗度水路における転波列にたいして理論的結果の適否を検討することが極めて困難である。本研究は、このようなことから、棧粗度水路における転波列の発生条件ならびに発生した転波列の波高、波長、周期、波速などの特性を系統的な実験によって明らかにしようとしたものである。

2. 実験装置・実験方法

実験に用いた水路は図-1に示す巾20cm、深さ7cm、長さ7mで、勾配を0~0.2と変えることが出来る鉄製可変勾配水路である。水路床には棧粗度として1辺が2cmの正方形断面柱を8cm間隔で水路全長にわたって張付けてある。

流量の測定は、実験水路上流に設置された巾30cm、深さ30cm長さ1mの水槽に取付けた30°三角堰によって行なった。

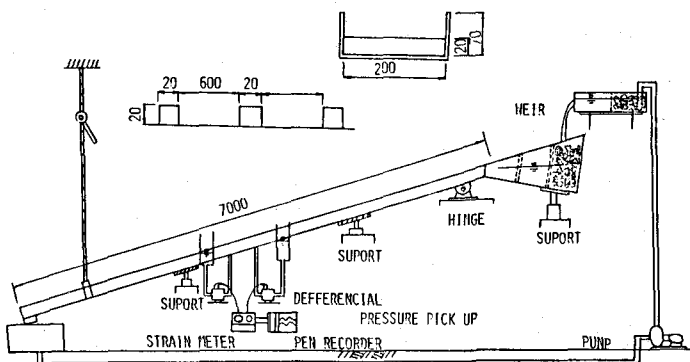


図-1 実験装置

水深の測定は、水路下流端より2.5mと3.5mの2ヶ所の栈粗度間の床面に埋め込んだ内径1mmのステンレス管を微差圧変換器に接続し、ストレインメーターからの出力をペン書きレコーダーによって記録する方法で行なった。

転波の波速は水深測定をした2点間を通過する時間より求めた。個々の波高、周期、波速にはかなりのばらつきがあったので、それぞれ50波の単純平均値を測定値とした。

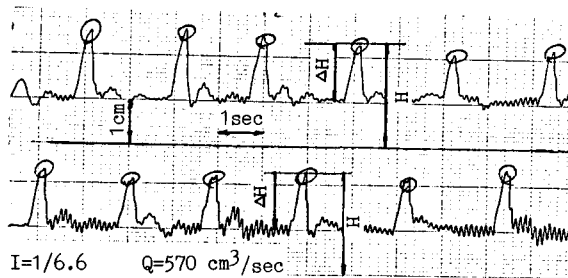


図-2 測定波形

3. 実験結果

測定した水深変化のうち、転波列が明瞭であった1例を図-2に示した。

転波の発生条件：水路床を一定にして、流量を変えていき転波列の発生を調べた結果を描点したものが図-3である。白描点は図-2に示したように明瞭に転波列が認められた場合、黒描点は転波列が認められなかった場合、半黒描点は栈粗度の存在による水面の波立ちと判別しにくかったが下流点で転波とみられる波形がみられ、水路長が短く転波が十分発達していなかった場合である。縦軸のRe数は単位巾当りの流量を動粘性係数で除した値である。図より水路勾配 $\tan \theta$ が0.04よりも緩勾配であると転波列は発生せず、これよりも水路床勾配が急になると、転波列の生起するRe数（流量）の範囲が広がっている。転波列が確認された実際の河川の河床勾配は約1/15であるので本実験の結果から推測すると、流量が約25倍程度異なる範囲で転波列が発生すると考えられ、洪水の増加期では流量の変化が大きいので転波列が発生してもきわめて短時間のことで、流量の変化が小さい洪水の減衰期に長時間転波列が確認されたものと考えられる。

波高：最大水深とその直前に生ずる最小水深の差を転波の波高として、河床勾配をパラメーターにして流量との関係を描点したものが図-4である。図より、水路床勾配が0.123より急な場合とそれよりも緩かな場合とでは流量による波高の変化が異なっている。すなわち、 $I < 0.123$ では、流量の増加に伴って波高は大きくなっていくが $I > 0.123$ では流量が増すと波高は逆に小さくなっていく傾向にある。

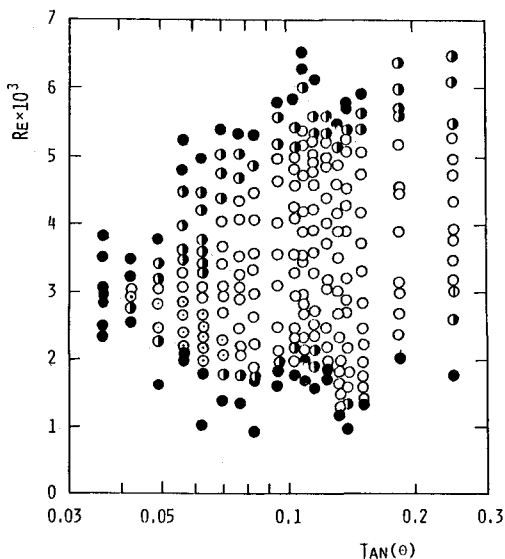


図-3 転波列の発生限界

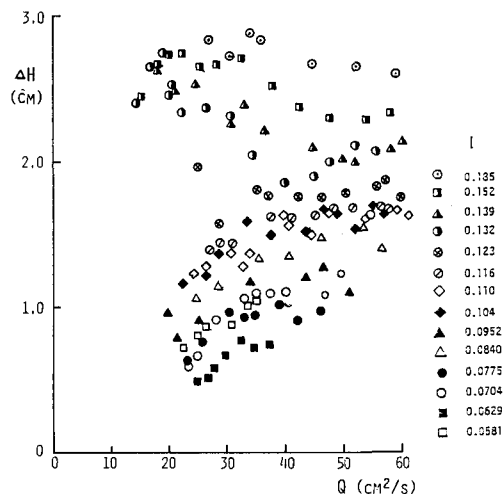


図-4 波高と流量との関係

波高を水路床を基準にして測った最大水深でもって無次元化し、石原らが転波列の諸特性を支配する指標として提示した $I_R = 1/(\tan\theta \cdot Re_0)$ に対して描点したものが図-5である。図の描点を大雑束にみると、水路床勾配 I が 0.123 以上の場合、 $\Delta H/H$ はほぼ一定値を示し、 I が 0.123 以下の場合には $\Delta H/H$ の値は I_R の値が大きくなると小さくなっているようにみられるが、各水路床勾配の描点をみると I_R の値に関わりなくほぼ一定値であるとみることができ。本実験の結果では、水路床から測った最大水深に対する転波の平均波高の大きさはほぼ水路床勾配によって規定されているようである。

波速：波速と単位巾当りの流量 ($\propto Re$) との関係を描点したものが図-6である。描点全体の散乱と各水路床勾配ごとの描点の散乱の度合はほぼ等しくて、波速と流量との間には強い相関が認められる。図-3に示した転波が発生する最大流量と最少流量付近における上・下流で測定した波形を比較してみると、下流における波高の方が大きくて、転波が十分発達するには水路長が短かったようである。

図-7は、石原らが提示した無次元波速と指標 I_R との関係を描点したものである。岩垣らがManningの抵抗則を用いて理論的に解析した結果と乱流領域における実験結果とを比較した結果によると、運動量補正係数を1.05あるいはそれより少し大きい値を用いると両者はよく一致している。この結果によると、転波の発生限界において無次元波速は2.5程度で、 Fr 数が大きくなると無次元波速の値は大きくなっていく。図-7に示した本実験の場合、無次元波速の値は1~2.5ときわめて小さな値となっている。本実験における流況をみると、転波の後部における栈粗度頂からの水深はきわめて小さくて、栈粗度頂がときどき露出するような状態である。したがって、流量のほとんどは転波の波頂部分に集中して流

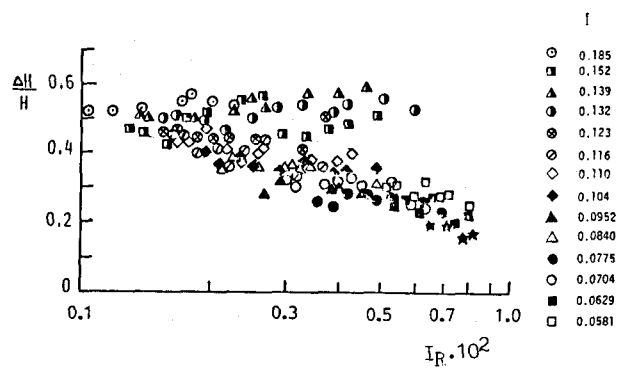


図-5 $\Delta H/H$ と I_R の関係

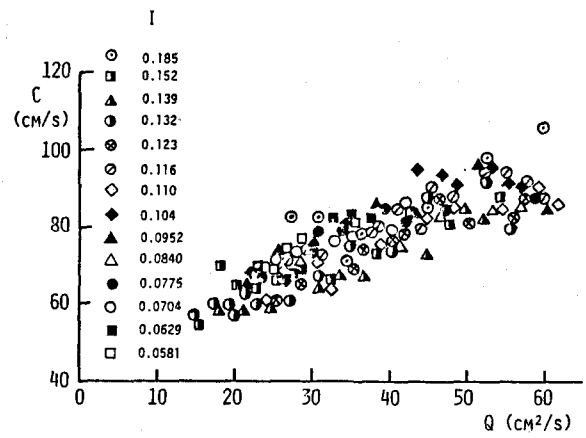


図-6 波速と流量との関係

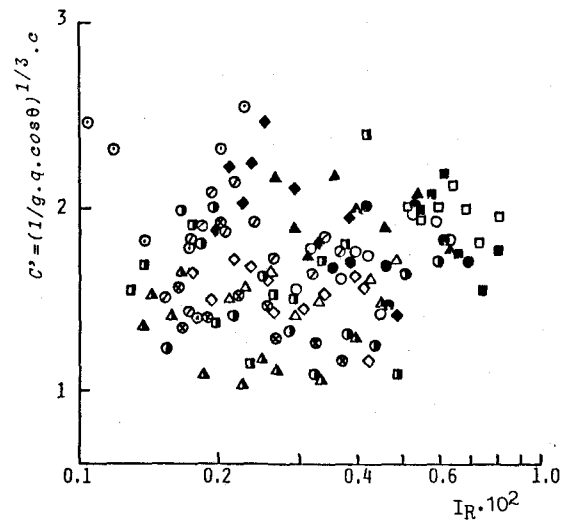


図-7 無次元波速と I_R との関係

れている。このことは、転波の波頂付近における平均流速と波速との差はほとんどないものとみられる。

岩垣らの理論に従うと、無次元波速は運動量補正係数とFr数の関数である無次元進行流量の1/3乗に比例する。進行流量は波速と波頂における平均流速の差に水深を乗じたものであるから、上述したように、本実験の場合、波速と平均流速との差がきわめて小さいため、無次元波速の値が小さいものと考えられる。このことの妥当性を検討するためには、棧粗度水路、とくに急勾配で相対水深が1以下であるような流れの抵抗則を明らかにすることが必要で、この問題の解明するのに残された大きな課題である。

周期：無次元周期を指標 I_R に対して描点したものが図-8である。図において、各水路床勾配ごとの描点を追跡してみると、ある I_R の値で極小値をとる下に凸な曲線になっているとみられる。この無次元周期が極小値を示す指標 I_R の値は水路床勾配が小さいほど大きい値となっている。岩垣らの滑面水路における実験によって検証されている理論値と比較してみると、指標 I_R はFr数の自乗と逆比例の関係であるので、各水路床勾配ごとの実験描点の挙動は岩垣らの理論と一致しているが、図-8の表示方法では明らかに水路床勾配がパラメーターとして残されている。また、無次元波速値の大きさを較べてみると、岩垣らの滑面水路における実験結果では、乱流領域ではその値は0.1～0.2であるが、本実験の結果では0.3～4ときわめて大きな値となっている。この結果は、前述した無次元波速の値が岩垣らのものに較べて小さく、後述する無次元波長が岩垣らのそれに較べて大きいので、両者の比として与えられる無次元周期は結果として大きな値をとることになったのである。

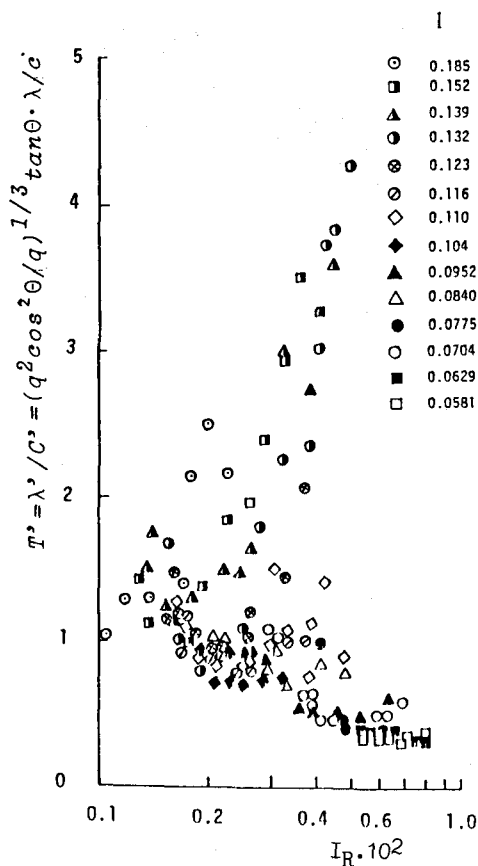


図-8 無次元周期と I_R の関係

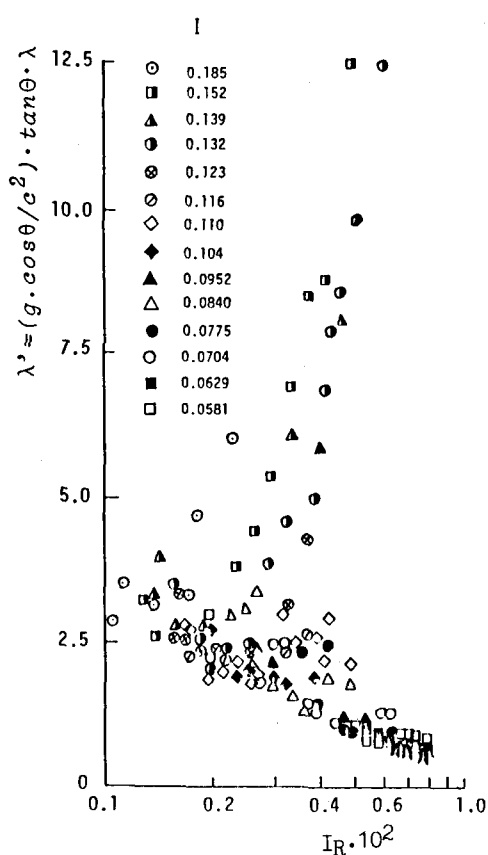


図-9 無次元波長と I_R の関係

波長：波長の直接測定は極めて困難であるので、波形測定をした2点間を50波の転波が通過する時間より波速を求め、同じ50波の転波が下流測定点を通過する平均周期を乗じて波長とした。無次元波長と指標 I_R の関係を描点したものが図-9である。図-7に示した無次元波速の値があまり大きく変わらないことから、各水路床勾配ごとの実験描点の挙動は図-8に示した無次元周期のそれと同じである。各水路床勾配ごとの描点の挙動は岩垣らが理論的に解析した結果と同じような挙動となっているが、岩垣らの滑面乱流域における無次元波長の実験値 $0.6 \sim 0.8$ に較べて $0.6 \sim 12.5$ と大きな値である。

4. む す び

棧粗度水路の抵抗則についての研究は数多く行なわれ、有用な結果が得られている。しかしながら、これらの研究は河床勾配が緩やかで、本実験で明らかにした転波が発生するような急勾配水路については全く研究されていないと云える。著者らは、ほぼ均一とみなせる軽粒骨材を河床に張りつけた粗面水路を用いて、現在直接壁面せん断力の測定を行なっている。この結果、実験数が少ないのであるが、粗度配列ならびに粗度密度が全く同じであっても仮想壁面位置は河床勾配ならびに粒径を規準長にした相対水深によって極めて複雑な挙動をすることが明らかとなった⁹⁾。実験的検証を必要とするが、このような結果の定性的傾向が棧粗度水路の流れにもあるのではないかと考えられる。この推測にたてば、棧粗度水路の抵抗則として対数則あるいはManning則などを適用するためには、仮想壁面位置や相当粗度が河床勾配ならびに粗度高さを基準長にしたような相対水深によって複雑に変えることが必要になる。本研究で実験的に調べた転波の諸特性が滑面水路における結果に較べて複雑であるのは棧粗度水路の抵抗則が上述のような複雑な挙動をすることに起因しているのではないかと考えられる。したがって、棧粗度水路における転波列を解明していくためには、棧粗度水路の比較的浅い流れの抵抗則を確立することが残された基本的課題である。

謝辞：本研究の実験およびその資料整理にあたって現在大本組に勤務している中村和則君に協力していただいたことを付記し、こゝに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) H. Jefferys : The flow of water in an inclined channel of rectangular section, Phil. Mag., Ser. 6, Vol. 49, 1925
- 2) H. Thomas : The Propagation of Waves in steep prismatic conduits, Proc of Hydraulic Conference, Uni. of Iowa Studies in Engineering, Bull. 20, 1940
- 3) H. J. Putman : Unsteady flow in open Channels, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 29, No. 2, 1948
- 4) F. F. Escoffier : A graphical method for investigating the stability of flow in open channels or in closed conduits flowing partly full. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 31, No. 4, 1950
- 5) R. F. Dressler : Mathematical solution of the problem of roll-waves in inclined open channels, Communication on Pure and Applied Mathematics, Vol. II, No. 213, 1949
- 6) 栗原道徳, 椿東一郎 : 浅い水路に於ける転波について, 九大流体工学研究所報告, 第6巻第1号, 1949
- 7) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 石原安雄 : 薄層流に関する研究 (第3報) - 雨水波列について -, 土木学会誌第36巻第1号, 1949
- 8) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 岩佐義朗 : 急斜面上の層流における転波列の理論 - 薄層流に関する研究 (第5報) - 土木学会論文報告集, 第19号, 1954

- 9) 岩垣雄一，岩佐義朗：転波列の水理学特性について—薄層流に関する研究（第7報）—，土木学会誌
第40巻第1号，1955
- 10) 斉藤隆，羽田野袈裟義，本名元：粗面開水路の河床高さと抵抗係数について，土木学会年次学術講演
会講演概要集，1984