

階段状河床の洪水による変形に関する現地調査

FIELD OBSERVATION ON THE DEFORMATION OF STEP-POOL MORPHOLOGY DUE TO FLOODS

藤田正治¹・道上正規²・澤田豊明³

Masaharu FUJITA, Masanori MICHIE, Toyoaki SAWADA

¹正会員 工博 京都大学助教授 農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

²フェロー会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-0945 鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒506-1442 岐阜県吉城郡上宝村中尾)

Step-pool morphology, which is one of the most important environmental elements in mountain rivers, has been recently incorporated into channel works. From an ecological point of view, it is desirable that the materials are not covered with cement and the structure is allowed to be changeable. When we design the step-pool structure in such a sense, we should know the deformation process of the structure in floods and the critical discharge for the disappearance of the step-pool bed form. Therefore, we surveyed the changes in the step-pool structure due to the floods in the Gamata River. The structure was changed with the combination and division of the steps, but not completely destroyed by the floods. The formation and deformation process of the step-pool structure have been explained theoretically using the hydrological data.

Key Words : *step-pool morphology, river environment, bed variation, floods*

1. はじめに

階段状河床は山地河川特有の河床形態であり、良好な河川景観を構成する一要素であるとともに、生物の生息場所としても重要な環境要素の一つである。最近では、流路工内に階段状河床を人工的に造った例も見られるようになってきた。自然河川本来の姿が洪水によって変化し、河川環境がその中で一つのシステムを構築しているとすれば、人工的に階段状河床を造る場合、良好な生物環境を維持するためには、構成する石礫をセメント等で固めず、移動可能な状態にしておくことが重要であると思われる。

もちろん移動床にしておく、流量の増加に伴って、階段状河床の状態は安定、変形、破壊へと変化する。すなわち、砂礫が移動しないかまたはプール内の細砂礫のみが移動するような安定状態、段差(ステップ)を構成する石が部分的に動いたり、ステップが分裂や結合するような変形状態、ステップを構成するほとんどの石が移動し、元の階段状河床の構造がほとんどなくなってしまうような破壊状態に変化する。したがって、河床の変形を許すという立場で川づくりを進めるなら、造られた階段

状河床が洪水によって消滅するような方向に変形してしまうのか、それとも変形しながらも階段状河床形の存在が維持されていくのかと言った点やどれくらいの流量で破壊されるのかと言った点が重要であり、破壊されにくく、また変形によって容易く消滅しないようにするためにはどのような材料でどのような構造のものを造ればよいのかと言うことを明確にする必要がある。

藤田ら¹⁾は、鳥取県の千代川において階段状河床の材料特性および形状特性を明らかにするとともに、現存する安定した階段状河床の波長は5年確率程度の流量に対応する階段状河床形の波長に一致していることやその河床構造は数十年確率の流量に対しても破壊されないことを推察した。しかし、実河川で洪水によって個々のステップがどのように変形するのかについての実態については調査されていないし、その変形過程の理論的な検討もなされていない。本研究は、岐阜県の蒲田川において洪水による階段状河床の変形過程を調査するとともに、洪水の履歴を考慮して、階段状河床の形成、変形、破壊過程について水理学的に考察するものである。ただし、ここではリップとステップ・プールを区別せずに、両方を階段状河床として扱っている。

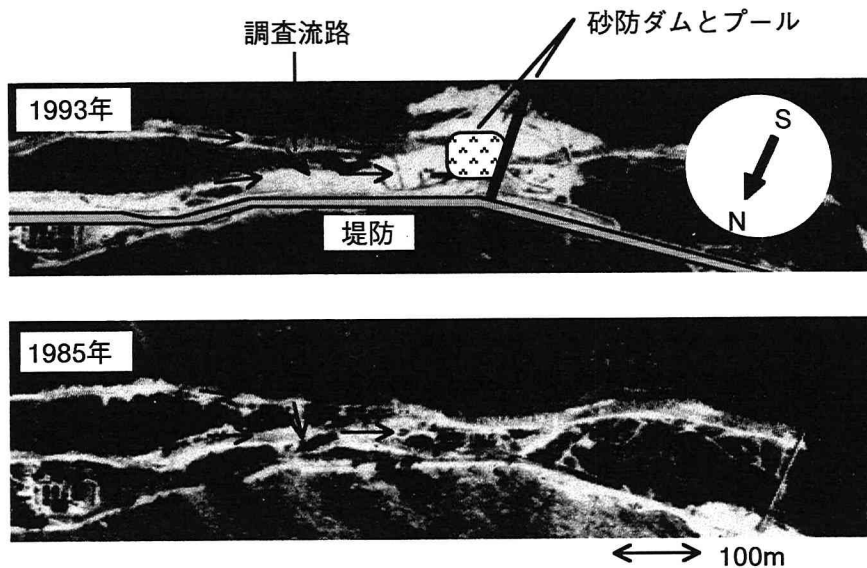


図-1 調査流路付近の河道の空中写真

2. 調査の概要

(1) 場所と実施日

1994年7月27日、1996年10月9日、1997年9月30日に神通川上流の蒲田川（岐阜県上宝村）の一つの流路で階段状河床の平面形状を測量した。この調査期間に、1995年7月13日、1996年6月27日、1997年7月13日に5～10年確率の日雨量による出水があった。これらの洪水で階段状河床の形状がどのように変化したかについて、測量結果を比較して検討する。なお、測量は平板測量によった。また、1994年には河床材料調査、1994年と1996年には縦断形状の測量も行った。

(2) 調査流路

図-1は1985年と1993年における調査地点付近の河道の航空写真を示したものである。図中の矢印で示した左岸から右岸へ向かう一つの流路が測量を行った箇所である。この流路の位置は1985年と1993年でほとんど変わっていない。しかし、流路の方向は1993年でNからWへ71度であるのに対し、1985年では41度であり、大きく異なっている。1998年5月に流路の方向を調べた結果、NからWへ66度であったので、1993年以降、流路の位置および向きはほとんど変化していない。したがって、調査流路は1985年以降の洪水で1993年までに現在のようなものと考えられる。

(3) 洪水履歴

前述のように1994年に測られた河床形状には1985年以降の洪水が影響していると考えられるので、1985年以降の洪水履歴が重要であるが、精度の良い流量データがないのが実状である。そこで、表-1に調査地点の流域の一部であるヒル谷流域における年最大日平均流量、

年最大3日間連続雨量、年最大日雨量を示す。表中のL, M, Hはそれらの発生確率年がそれぞれ2年以下、3～5年、6～10年であることを意味する。1985年以降では、1985, 1986, 1993, 1995～1997年に5年確率を超える大規模な降雨または流量が生じている。なかでも、1997年にはこの13年間で最大の洪水が生じていることが各項目を比較するとわかる。必ずしも、ヒル谷と調査地点の水文量が対応しているとは言えないが、ここではそれを仮定すると、図-1の1985年の流路は1986年の出水で変形し、それ以降1992年までは大きく変化せず、1993年の10年確率程度の出水で再び変形し、1994年調査時の流路が形成されたものと考えられる。

調査地点の流量を知る方法はないが、ヒル谷と図-1に示す砂防ダム地点の流量の同時観測を1998年4月15～17日に行ったので、その関係から表-1のヒル谷の日平均流量に対応する調査地点の流量を推定したものを表-1に示す。ただし、同時観測のときの砂防ダム地点およびヒル谷の流量は $35 \sim 125 \text{ m}^3/\text{s}$ および $0.16 \sim 0.31 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。なお、ヒル谷の日平均流量が $0.16 \sim 0.31 \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲外るとき、同時観測の結果を外挿するのは多少無理があると思われるので、両者の関係の傾向を考慮して、流量が表示した値よりかなり小さい、小さい、大きいと言うことを<<, <, >で示している。また、調査地点付近における流水幅と流量の関係からレジーム則を求めると $B=5Q^{0.5}$ であったので、この関係から単位幅流量を求めた結果も示している。もちろんこのような方法では正確に流量を推定することは難しいし、調査流路の単位幅流量は本来流路の方向を考慮して決めるべきであるのにそうしていないので正確さに欠けるが、流量の目安として以後の解析に使用するのには十分であると思われる。

洪水時の流砂に関する調査は行っていないが、洪水期

表-1 ヒル谷流域の水文量と調査地点の流量の推定値

年/月/日	年最大日平均流量 (m ³ /s)	年最大3日間連続雨量 (mm)	年最大日雨量 (mm)	流量 (m ³ /s)	単位幅流量 (m ² /s)
1997/7/13	0.355 (H)	234 (H)	139 (H)	> 160	> 2.53
1996/6/27	0.190 (M)	178 (M)	125 (H)	48	1.38
1995/7/13	0.326 (H)	144 (M)	138 (H)	> 140	> 2.37
1994/9/30	0.022 (L)	65 (L)	55 (L)	<< 40	<< 1.26
1993/7/15	0.337 (H)	226 (H)	87 (L)	> 147	> 2.42
1992/7/18	0.061 (L)	68 (L)	45 (L)	<< 40	<< 1.26
1991/7/18	0.211 (M)	132 (L)	93 (L)	61	1.56
1990/9/20	0.135 (L)	118 (L)	88 (L)	< 40	< 1.26
1989/9/20	0.159 (L)	99 (L)	81 (L)	< 40	< 1.26
1988/9/12	0.140 (L)	132 (L)	78 (L)	< 40	< 1.26
1987/7/25	0.070 (L)	79 (L)	40 (L)	<< 40	<< 1.26
1986/7/17	0.332 (H)	158 (M)	115 (M)	> 145	> 2.41
1985/7/13	0.310 (M)	221 (H)	100 (M)	128	2.26

の前に人工的に掘削されている調査地点下流の砂防ダムの堆砂域が、1995～1997年においては一洪水ではほぼ満砂状態になったことから、その洪水時には調査流路上を砂礫が活発に移動したと思われる。

3. 調査結果

(1) 河床の変形

図-2は階段状河床の平面形状の測量結果を示したもので、ステップを構成する巨礫とステップの位置も示している。ステップの落差について詳細に計測した1994年の結果には、落差50cm以上のステップと50cm未満のステップを区別して描いているが、1996、1997年においても落差の大きさの範囲は1994年とそれほど変化していない。図-3は平面図中の測線Ⅰ、Ⅱに沿った河床縦断形状を示したものである。縦軸は基準線からの高さを表わすが、2回の測量で基準線の位置は異なる。この図より、平均河床勾配は1994年から1996年でほとんど変化していないことがわかる。

さて、図-2よりこの3年間で流路幅が約7mから約13mに増加していることがわかる。とくに1997年7月13日の洪水でかなり拡幅されたものと考えられる。この拡幅に伴って、いくつかのステップの河岸の部分は壊されたが、河岸の部分が消失したまま存在しているステップや河岸部と新たに接合したステップの存在が図-2から確認できる。

全体的なステップ構造の変化を見ると、階段状河床が完全に破壊されたというよりは、むしろ、ほとんどのステップは元の状態を保っていたり、分裂、合体等の変形

が生じている程度である。たとえば、1994年の河床形状に示すA点のステップは1994年から1996年にかけて右岸側は保存されているが、左岸側は変形している。その後、1997年まではほぼ同じ形を維持している。B点のステップは3年間でほとんど変形していない。C点のステップは1994年には小さなステップであったが、その後大きなステップに発達している。D点付近の2つのステップは1996年に合体したが、1997年に中央部が部分的になくなっている。

このように、2～5年確率の洪水と1986年と1993年の10年確率程度の洪水を経験して形成された1994年の階段状河床は、10年確率程度の洪水と1985年以降最も規模の大きい洪水を数回受けたにもかかわらず、破壊されることはなく、階段状河床の骨格構造を維持したまま、多少の変形によって新たな形状に移行している。

(2) 階段状河床形の幾何特性と河床材料

図-4は1994年の調査時の河床材料の粒度分布を調べた結果である。粒度分布は河床をステップの部分、大きな石で構成されている部分、細砂で構成されている部分に分け、前2者は写真や布巻尺で、後者はふるいによって粒度分布を測り、それぞれの面積割合で全体の粒度分布を求めた。ステップの構成材料の粒径は20～200cmであり、平均すると150cm程度である。ステップ以外の箇所は2～80cmくらいの礫で河床が構成されており、その平均粒径は45cmである。

1994年の階段状河床形の波長は、すべてのステップを対象にすると約4mであるが、50cm以上の落差のステップについて見ると約6mである。ステップの高さは

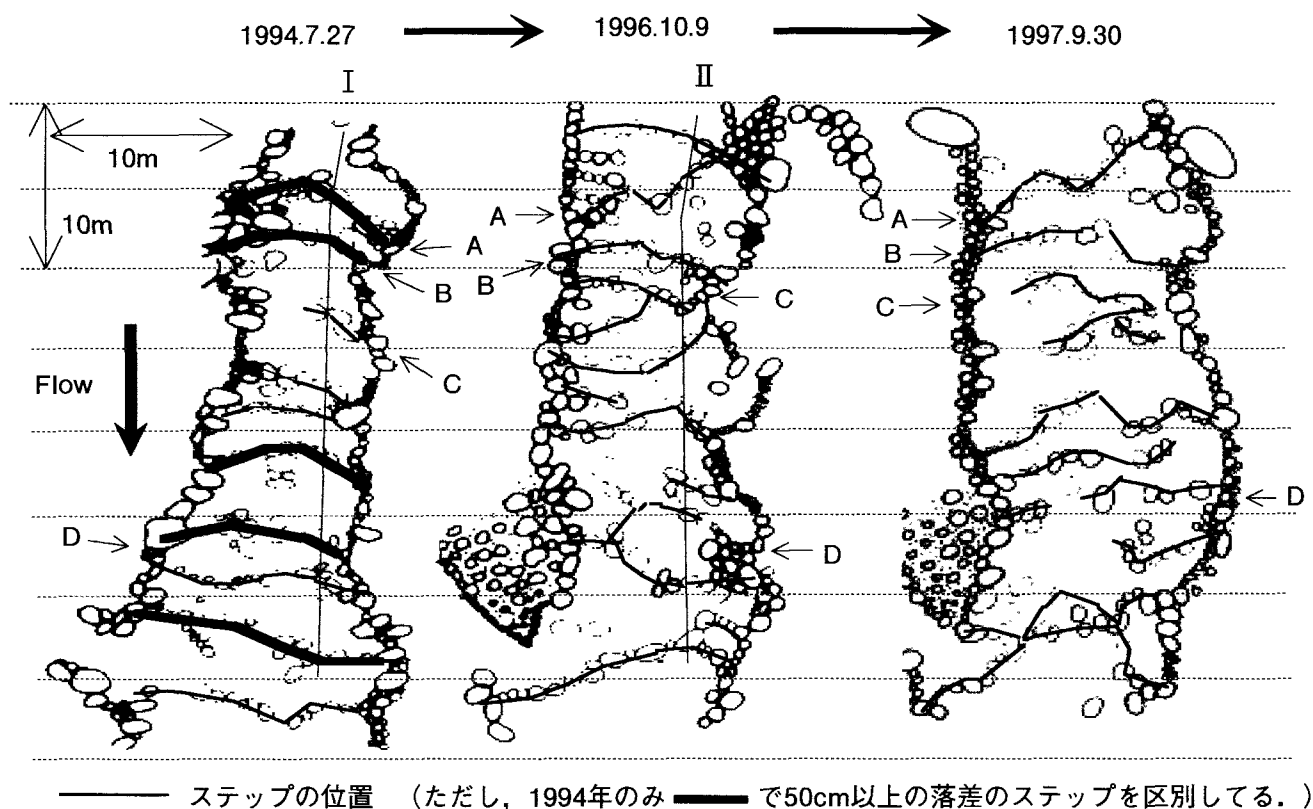


図-2 階段状河床形状の平面図

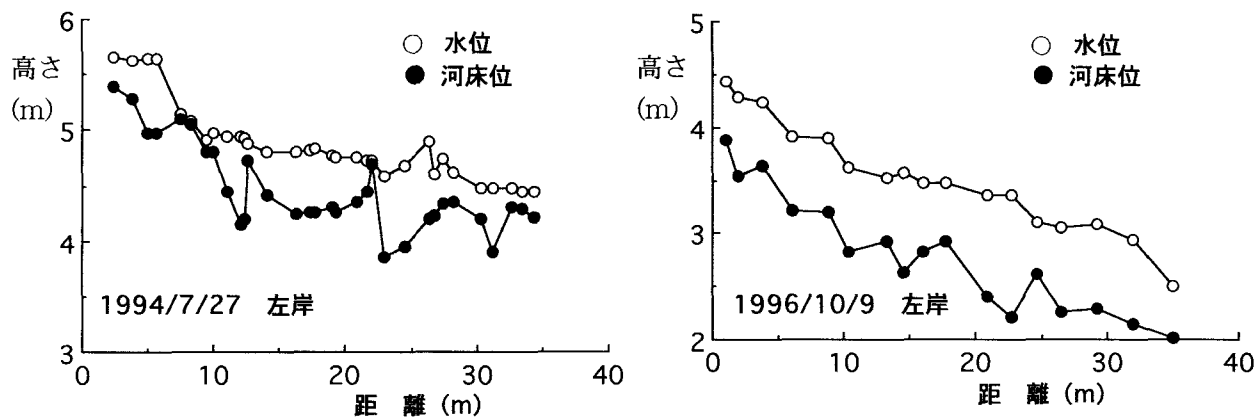


図-3 河床縦断形状

図-3より20~100cm程度で、ステップを構成する材料の最小粒径から平均粒径の間となっており、藤田らの結果¹⁾と同様になっている。1996および1997年の階段状河床形の波長や波高も1994年のものとほぼ同じであることが図-2および図-3から伺える。

4. 考 察

(1) 従来の研究

ここでは、1994年の階段状河床形がどのような流量によって形成され、1994年以降の洪水によってどのように変形するのかを水理学的に検討する。階段状河床形の形成や破壊に関しては芦田・江頭・安東²⁾、芦田・江

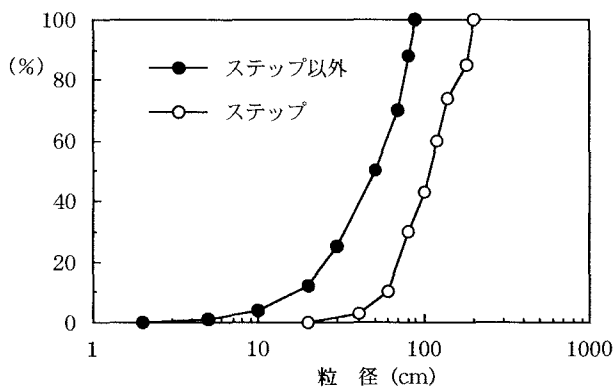


図-4 河床材料の粒度分布

頭・澤田・西本³⁾、江頭・芦田・西本⁴⁾、長谷川・上林⁵⁾、Whittaker and Jaeggi⁶⁾ など多くの研究者によって取り上げられている。その中でも、芦田らの研究成果^{2)~4)}は実験や実河川の階段状河床の形状や発生領域を無理なく説明しているの、本論文の解析は芦田らの研究成果を適用することにする。

芦田らによると、階段状河床形の発生条件²⁾は、

- ① 河床材料が混合砂であること
- ② 流れが射流であること
- ③ 初期河床の平均粒径 d_m あるいはそれよりも大きい粒径 βd_m の礫が移動して、分級現象が活発であること
- ④ 最大粒径程度 γd_m の礫は形成過程を通して停止すること

である。また、階段状河床形の波長は反砂堆の波長と等しいものとして、Kennedy⁷⁾の式で求められるとしている。

つぎに、江頭・芦田・西本⁴⁾は階段状河床形の破壊過程において、河床波によるエネルギー損失とアーマールコート⁸⁾の発達に重要な役割を果たすことを示した。すなわち、河床波による形状損失によって有効掃流力が減少し、アーマールコートの発達により移動限界掃流力が増加することによって、階段状河床形の破壊流量は形成流量に比べて大きくなる。

(2) 1994年の河床形状形成の支配流量

混合砂礫が平坦に敷かれたような状態を仮想して、その状態から1994年に調査された階段状河床形に発達するのに必要な流量を、階段状河床形の波長がKennedyの反砂堆の波長の式で計算できることを使って、以下の条件のもとに推算する。

- ① 河床勾配は1994年および1996年に観測した平均河床勾配の0.05とする。
- ② 初期河床の構成材料の平均粒径と最大粒径を正確に決めることはできないが、現在の河床は粗粒化されていることと、1994年の調査でステップ以外の部分の平均粒径が45cm、ステップの部分の平均粒径が150cmであったことから、平均粒径は10cmと30cmの2種類を設定し、最大粒径は150cmとする。
- ③ 相当粗度高と平均粒径の比は1とする。

このような仮定のもとに単位幅流量を1.0、2.5、5.0 m^2/s としたときの水理量を等流条件のもとに計算する。この結果と1994年に調査された全てのステップの間隔と高さ50cm以上のステップの間隔を使って、フルード数 Fr と階段状河床形の波数の関係を示すと図-5のようになる。図中にはKennedyの式も描かれている。河床材料の平均粒径を10cmから30cmに変えても、全てのステップを対象にすると流量1 m^2/s のとき、大きなステップを対象にすると2.5 m^2/s のときデータがKennedyの式にほぼ一致している。したがって、

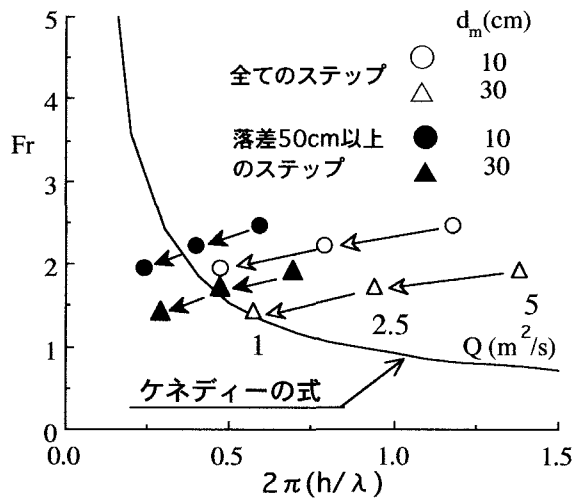


図-5 階段状河床の波数とフルード数の関係

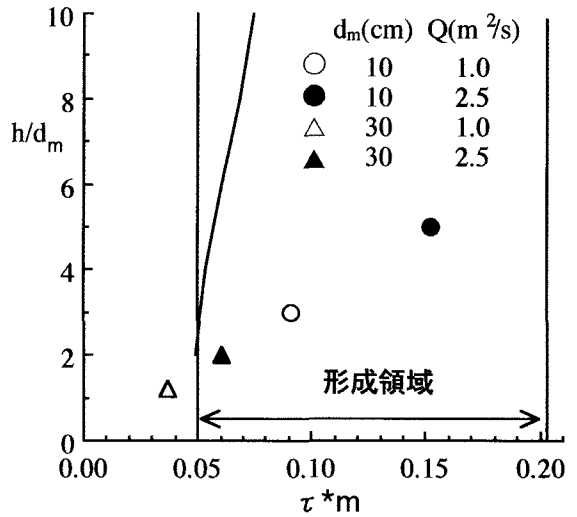


図-6 階段状河床の形成領域

1994年の大小のステップ構造の形成には、1 m^2/s と2.5 m^2/s 程度の流量が関係している。これらの流量はそれぞれ表-1の1987～1992年までの小流量と1986年および1993年の大流量に良く対応しており、このことは50cm未満の段差のステップが小洪水、50cm以上の段差のステップが1986年および1993年の大洪水に関与して形成されたことを示唆するものである。

図-6は、芦田らの階段状河床の形成条件①～④を h/d_m と τ^*m の関係に直して描かれる形成領域の図に、平均粒径が10cmと30cmに対する流量1.0 m^2/s および2.5 m^2/s のときの水理量をプロットしたものである。ただし、 $\beta=1.0$ とし、最大粒径の移動限界の線は平均粒径10cmに対してEgiazaroffの式⁹⁾を用いて算定されたものである。ここに、 h ：平均水深、 d_m ：平均粒径、 τ^*m ：平均粒径に対する無次元掃流力である。この図より平均粒径が30cmのときは形成領域と非形成領域の境界に水理量がプロットされている。一方、10cmの場合は形

成領域内にプロットされている。したがって、初期河床状態の平均粒径は10cm程度であったと推測される。

(3) 1996および1997年の河床の変形

平均粒径が移動するが最大粒径が移動しないとき階段状河床が変形し、最大粒径が移動するとき破壊するとする。また、ここでは、前述した調査結果と解析結果より、アーマーコートの発達により平均粒径が10cmから45cmになったと仮定して解析を進めることにし、河床波の形成による形状損失の増加については詳細な情報がないので考慮しないことにする。

変形領域と破壊領域は図-7に示したようになり、単位幅流量を1, 2.5, 5.0, 8.0 m^2/s に変化させたときの水理量の変化は図中に示すようになる。これより、2.5 m^2/s 以上になると階段状河床が変形し、8.0 m^2/s 以上になると破壊することになる。表-1に示した1995年および1997年の洪水の単位幅流量は2.5 m^2/s に近く、理論的には階段状河床が破壊されず変形することになるが、実際でも前述したようにその様な状態となっている。破壊流量として推定された単位幅流量8.0 m^2/s の発生確率は既存の水文データからはわからないが、2.5 m^2/s が10年確率程度であることを考慮すると、数十年確率程度とかなり大きいものと推察される。

以上のように、芦田らの理論は実河川の階段状河床の形成や変形条件を十分説明しうるものであり、これに基づいて階段状河床形の構造を設計したり、変形過程の予測や破壊流量の予測が行えるものと考えられる。

5. おわりに

本研究は階段状河床形の幾何学的な構造が洪水によってどのように変形するのか、またどのような洪水のとき破壊されるのかについて現地調査と理論的な解析から検討した。得られた結果は以下のようである。

- (1) 調査した流路の階段状河床の構造は、流路形成時の最大流量に対応した波長の長いステップと通常の洪水に対応した波長の短いステップからなる。
- (2) 流路の拡幅に伴って、いくつかのステップの河岸の部分は壊されたが、河岸の部分が消失したまま存在しているステップや河岸部と新たに接合したステップの存在が見られた。
- (3) 調査された階段状河床は、形成過程で経験した洪水と同規模およびそれよりも大きな洪水を数回受けたにもかかわらず、破壊されることはなく元の階段状河床の骨格構造を維持したまま、多少の変形によって新たな形状に移行している。
- (4) 階段状河床の形成および変形条件が過去の洪水履歴を使って水理学的に説明できた。その延長として破壊流量を推定すると数十年以上の確率の流量となった。

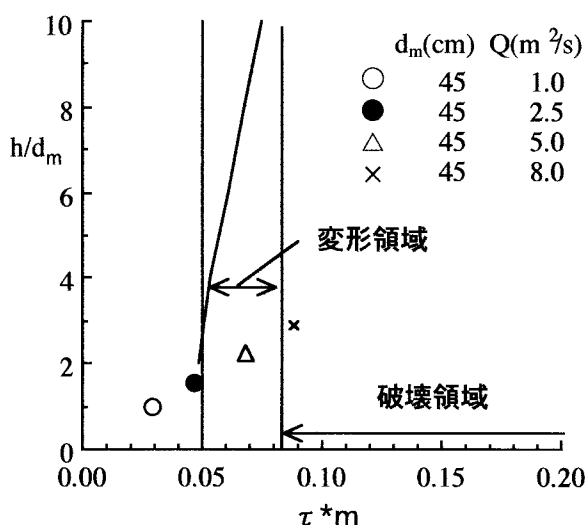


図-7 階段状河床の変形および破壊領域

これらの結果は、階段状河床形を保全したり、造成したりするときの一つの設計指針を与えるものであり、移動床の状態でも洪水でたやすく破壊されることのないという可能性が示された。最後に、本調査にあたり、池見拓氏、須藤達美氏、永瀬恭一氏（以上株フジタ）、檜谷治助教授（鳥取大学工学部）、平井淳一君（当時鳥取大学工学部学生）にご協力いただいた。また、本研究は愛媛大学工学部鈴木幸一教授代表の科学研究費（基盤研究(C)(2)）の援助のもとに行われた。ここに関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤田正治, 道上正規: 千代川における淵の構造と魚類の生息, 水工学論文集, 第40巻, pp.181-187, 1996.
- 2) 芦田和男, 江頭進治, 安東尚美: 階段状河床形の形成機構と形状特性に関する研究, 第28回水理講演会論文集, pp.743-750, 1984.
- 3) 江頭進治, 芦田和男, 澤田豊明, 西本直史: 山地河道における階段状河床形の形状特性, 第29回水理講演会論文集, pp.537-542, 1985.
- 4) 江頭進治, 芦田和男, 西本直史: 階段状河床波と流砂の挙動, 第30回水理講演会論文集, pp.223-229, 1986.
- 5) 長谷川和義, 上林悟: 渓流における淵・瀬（ステップ・プール）の形成機構とその設計指針, 水工学論文集, 第40巻, pp.893-899, 1996.
- 6) Whittaker, J.G. and Jaeggi, M.N.R.: Origin of step-pool systems in mountain streams, Proc., ASCE, Jour. of Hydraulic Div., Vol.108, No. HY6, pp.758-773, 1982.
- 7) Kenedy, J.F.: The mechanics of dunes and antidunes in erodible bed channels, J. Fluid Mech., Vol.16, Part 4, pp.521-544, 1963.
- 8) Egiazaroff, I.V.: Calculation of nonuniform sediment concentrations, Proc. ASCE, Hy.4, 1965.

(1998.9.30受付)