

高水敷からの帰還流による階段状多自然型 護岸工の被災に関する実験

EXPERIMENTS ON DAMAGE OF A RICH-IN-NATURE TYPE
OF REVETMENT WITH STEPS CAUSED BY RETURNING FLOW
FROM THE HIGH WATER COURSE

神田佳一¹・藤田裕一郎²・森田佳宏³

Keiichi KANDA, Yuichiro FUJITA and Yoshihiro MORITA

¹正会員 工博 明石工業高等専門学校助教授 都市システム工学科 (〒674 兵庫県明石市魚住町679-3)

²正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³学生会員 明石工業高等専門学校 建築・都市システム工学専攻 (〒674 兵庫県明石市魚住町679-3)

In this study, experiments were carried out on damage of a rich-in-nature type of revetment caused by returning flow from high water course with the oblique angle θ . In order to obtain guideline of the reasonable design of this type of revetment, the discharge and velocity profiles for critical condition of removal of cover materials were measured under the different values of θ by changing downstream water levels. Stability of revetment was also evaluated by measurement of the variations of revetment profiles in the failure process of revetment under high water condition.

Key Words : *revetment, rich-in-nature river works, hydraulic experiments*

1. はじめに

近年の河道周辺の自然環境に対する関心の高まりとともに、都市部の河川においても良好な環境を維持しうる護岸構造物として、自然材料を用いた多自然型護岸が注目され、その合理的設計法が模索されている。その多くは、従来、強度や施工性、経済性の不利からコンクリート護岸にとって替わられた植生や栗石、蛇籠、沈床等による伝統的護岸工法と呼ばれるものであって、その設置にあたっては、特に種々の河道条件や流量条件に対する護岸の強度と防災機能を明確にすることが重要である。

筆者ら^{1), 2), 3)}は、多自然型護岸の水理・防災機能を評価し、その適用条件と合理的な設計指針を得ることを目的として、従来水理学的検討があまり行われておらず強度が比較的弱いと考えられる、詰め杭と栗石覆い工による階段式護岸を対象とした実験的

検討を進めている。流水による護岸の被災形態としては、河道の弯曲、砂州及び護岸の取付部などの水衝部における局所洗掘や側方侵食と、護岸背後からの越流・裏込め浸透などの作用による決壊に分類される。これまでの考察から、前者については、直線および弯曲河道上に設置された階段式多自然型護岸周辺の流れ特性や河床の変動特性、栗石法覆い工や根固め工の機能と強度に関する基本的な水理特性が明らかにされた^{2), 3)}。

一方、護岸背後からの流水の作用、とくに越流に関しては、堰や床止め工などの河道横断構造物の周辺や弯曲部において、上流部で水位の上昇に伴って高水敷上に達した流水が、下流部で低水路護岸上横切って流下する場合に問題となる。このような流れ場では、越流量が小さくても高水敷と低水路との水位差が大きい場合には護岸を横断する落下流となり、過大な掃流力を生じると考えられ、これに対する護

岸の安定性の評価が重要となる。このとき、高水敷上から流れは、低水護岸の延長方向に対して斜め方向に流下すると考える方が自然であって、この方向角と低水路の水位が護岸の被災特性に大きく影響していると考えられる。

本研究では、これまで水理特性の検討が進められている緩流河川を対象とした詰め杭と栗石覆い工による階段状多自然型護岸が横断構造物の下流や弯曲の岸の下流の低水路に設置された場合を想定し、その縮尺模型を水路軸に対して直角及び斜め方向に設置して実験を行い、高水敷からの帰還流に対する階段式多自然型護岸工の安定条件と被災特性について実験的に考察する。

2. 実験の概要

実験水路は、図-1に示すような、全長10m、幅1m、高さ0.35mの長方形断面であって、流水を一旦貯留して整流するための整流槽と、1段が幅3m段差0.6mの5段からなる多自然型護岸工の1/30模型を敷設した水路にて行った。水路の中央に、図-2に示すように、詰め杭と栗石覆い工からなる幅10cm、高さ2cmのステップを5段組み合わせた階段状護岸模型を、その延長方向が水路中心軸に対して、それぞれ $\theta=90^\circ$ 、 60° 及び 30° の角度を持つように設置した。路床縦断勾配は0とした。また、詰め杭模型は、直径5mmの丸鋼棒を所定の長さに切断して直線上に5段並べ立てたものであって、それらのほぼ天端の長さまで河床砂と同じ平均粒径 $d_m=1.8\text{mm}$ の粗砂（岩垣式で評価した移動限界摩擦速度 $U_{*c}=3.5\text{cm/s}$ ）を充填した。護岸の各段表面には覆い工として、平均粒径 $d_m=7.5\text{mm}$ の礫（ $U_{*c}=7.8\text{cm/s}$ ）を2層敷き詰めた。また、護岸の前面には平均粒径 $d_m=26\text{mm}$ の玉石（ $U_{*c}=14.5\text{cm/s}$ ）で模擬した根固め工を設置した。

実験はまず、Aシリーズとして、護岸の方向角 θ 及び下流端水位をパラメータとして、表-1のような実験条件のもとで、それぞれの限界流量を求め護岸周辺部の水面形を測定した。ここで、限界流量とは、護岸の強度を評価するために、護岸上の栗石覆い工や河床砂、根固め工の一部が、流水の作用によって移動し、護岸が変形する限界の流量として定義したものであって、その限界は目視によって判断した。低水路の水位は、水路下流端に設置された傾斜堰によって制御されるが、ここでは堰高 $W=2.0$ 、 5.5 及び 10cm の3通りとした。

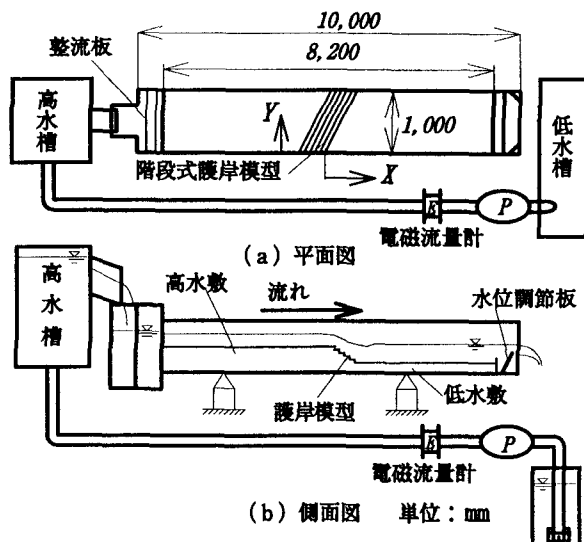


図-1 実験水路

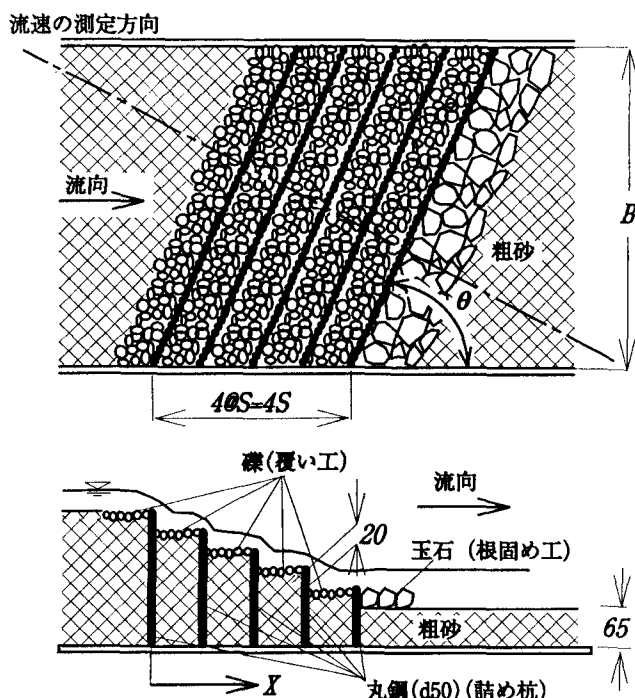


図-2 護岸模型

つぎに、この限界状態における護岸周辺部の流れ特性について検討するために、Run A 9 M, A6M対及びA3Mの3ケースについて、護岸の延長方向に対して垂直方向流速の鉛直分布を図-2中の一点鎖線上の断面において、3mm径のプロペラ流速計を用いて測定した。

さらに、Bシリーズの実験として、洪水時における護岸周辺の河床変動特性と護岸の被災過程に対する検討を行うために、表-2に示すように、各護岸配置に対して洪水時を想定した流量 $Q=5\text{l/s}$ 及び

表-1 実験条件 (Aシリーズ)

実験番号	θ (deg.)	堰高 W(cm)	限界流量 Q_c (l/s)	Q_c/L_r (l/s/m)
Run A6L	30	2.0	4.0	0.020
Run A6H	60	2.0	3.4	0.029
Run A3M	30	5.5	4.2	0.021
Run A6M	60	5.5	3.7	0.032
Run A9M	90	5.5	3.3	0.033
Run A3H	30	10	9.5	0.048
Run A6H	60	10	7.3	0.063

表-2 実験条件 (Bシリーズ)

実験番号	θ (deg.)	堰高 W(cm)	流量 Q (l/s)	限界水深 h_c (cm)
Run B31	30	5.5	5.0	1.4
Run B32	30	5.5	7.0	1.7
Run B61	60	5.5	5.0	1.4
Run B62	60	5.5	7.0	1.7
Run B91	90	5.5	5.0	1.4
Run B92	90	5.5	7.0	1.7

7l/sを通水し、その時の護岸材料の流送状態及び水面形状を測定するとともに、護岸被災後（通水後30分）の河床形状を詳細に計測した。

3. 実験結果及び考察

3.1 護岸材料の流送に対する限界流量

ここでは、河床砂や護岸材料が流水の作用によって流送され、護岸形状が変形する限界の条件における限界流量 Q_c について考察する。

表-1の右から2列目に各実験条件における限界流量を示している。また、 Q_c と護岸延長 $L_r=B/\sin\theta$ (B は水路幅)との関係を示せば、図-3のようである。同図には、Bシリーズの実験における流量 Q と護岸延長 L_r の設定条件も示している。後述するように、護岸の変形が最も顕著な箇所は、最上列及び上から2列目の詰め杭前面の覆い工であって、いずれの場合も流量を0から徐々に増加させると、それらの内の数個が流れによって剥がされ、下流に流送され始める。

図-3より、下流部低水路の水位が低い程、すなわち高水敷との水位差が大きい程、限界流量 Q_c は小さくなることが明らかである。

また、水路下流端の堰の高さが等しい場合、護岸

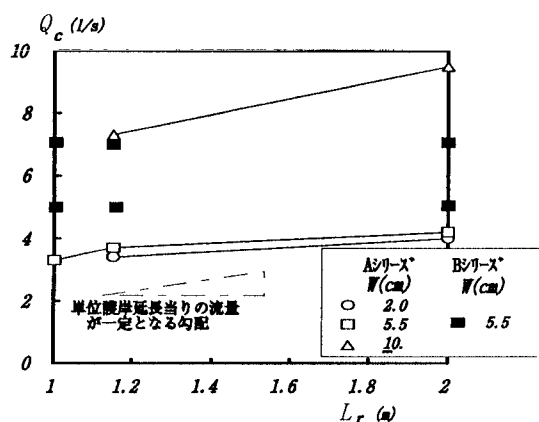
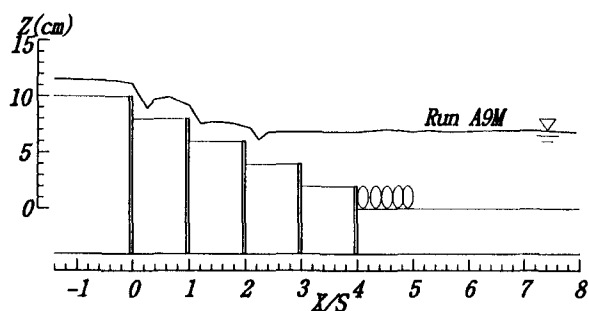


図-3 各堰高における限界流量とBシリーズの設定条件

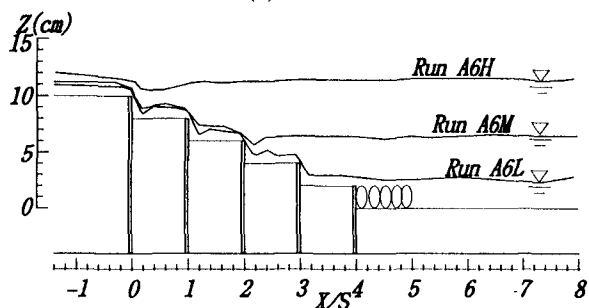
延長 L_r が大きいほど、即ち水路軸に対する護岸延長の角度 θ が小さいほど限界流量 Q_c は大きくなっている。これは、低水路の水位が高水敷の高さと同程度以下の場合には、詰め杭前面で落差による鉛直方向の流れが顕著になり、それに伴って平面的な流れの方向は水路中央部では詰め杭の延長方向に対して直角方向になると考えれば説明できる。すなわち、護岸上での流路幅は護岸延長にほぼ等しくなると考えられるので、単位幅流量は見掛け上小さくなる。河床に作用する流体力は、単位幅流量に関連づけられるので、限界状態におけるこの単位幅流量が等しいとすると、限界時の全流量 Q_c は護岸延長に比例することになる。実験結果から、限界流量を護岸延長で除した単位幅流量 $q_c=Q_c/L_r$ を求めれば、表-1の右端列のようであって、水路側壁等の影響を考慮すれば、 q_c の値は、同じ下流端堰高さに対してほぼ等しいものと考えられる。

次に、各限界状態での水面形を示せば、図-4のようである。ただし、護岸法肩からの流下距離 X は、護岸1段の水路軸方向の間隔 S で無次元表示している。いずれの θ に対しても、水路下流端の堰高が $W=2$ cmの場合には、護岸上の流れは全体的に射流であって、各ステップを越流した流れが詰め杭前面ではほぼ垂直に落下し、水位は護岸形状と同様の階段状の変化を示す。

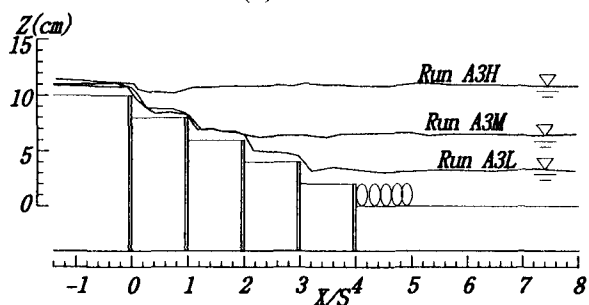
低水路の水位が高水敷と同程度になると ($W=10$ cm)、水位は最上段の詰め杭前面で一旦落ち込むが、その後すぐに回復し、水位変化は小さい。最上段の詰め杭前面では、主流水脈が護岸から剥離し、ほぼ水平に流下して弱い波状跳水を形成する。その下部では、剥離に伴う渦が卓越し、これが限界時には覆い工を移動させる要因となると考えられる。



(a) $\theta=90^\circ$

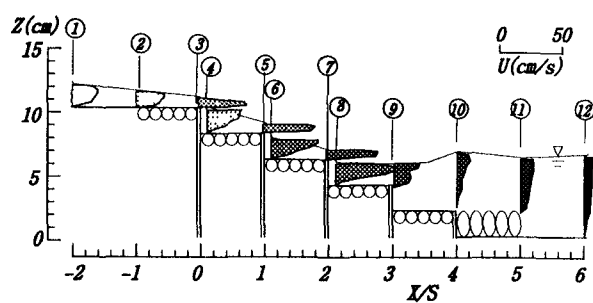


(b) $\theta=60^\circ$

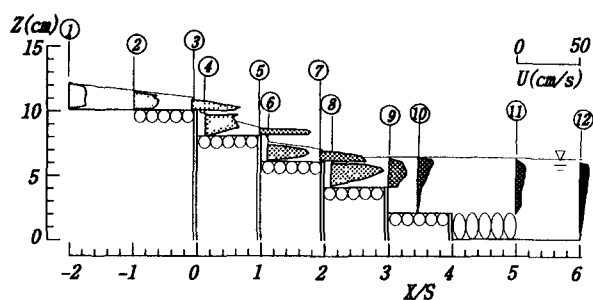


(c) $\theta=30^\circ$

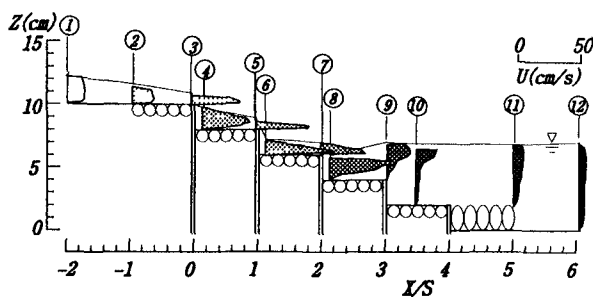
図-4 水面形状



(a) Run A9M($\theta=90^\circ$)



(b) Run A6M($\theta=60^\circ$)



(c) Run A3M($\theta=30^\circ$)

図-5 鉛直流速分布の縦断方向変化

3.2 限界状態における流速分布

図-5は、護岸材料の流送に関する限界状態において、護岸の方向に垂直で、かつ護岸の中心を通る測線（図-2の一点鎖線）における鉛直流速分布の縦断変化を、 $\theta=90^\circ$ 、 60° 及び 30° のそれぞれに対して表したものである。水路下流端の堰高は、いずれも $W=5.5\text{cm}$ であって、低水路部の水位は上から2段目と3段目の覆い工の高さの中間にある。

これらの図より、上流部から護岸部へ接近するにつれて、流速が水位の低下とともに大きくなっていることが分かる。また、水位が下流低水路部のそれよりも高い護岸の最上部及び2列目の詰め杭上（③、⑤断面）では、護岸形状に対応した水位変化に伴ってより流れが加速され、鉛直方向にはほぼ一様な高速の流れが杭前面の覆い工部に落ち込んでいる。この水面勾配の最も大きい落ち込み部では、鉛直流速による大きな動圧力が作用しているものと考えられ、水平方向の流速成分も覆い工近傍で大きな値を示し

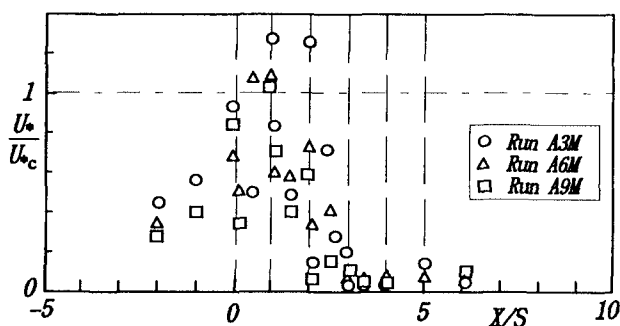


図-6 底面摩擦速度の流下方向分布

ている（④、⑥断面）。一方、 $X/S=3$ より下流の護岸法先部（⑩、⑪断面）では、小さな波状の水面変化に伴って主流水脈が河床近傍から離れ、河床付近の流速値は急激に減少するが、顕著な逆流域は見られない。

つぎに、このような流れが対数則に従っていることには疑問があるが、取り敢えずニクラゼの完全粗面における流速分布式を河床近傍の流速に適用し、

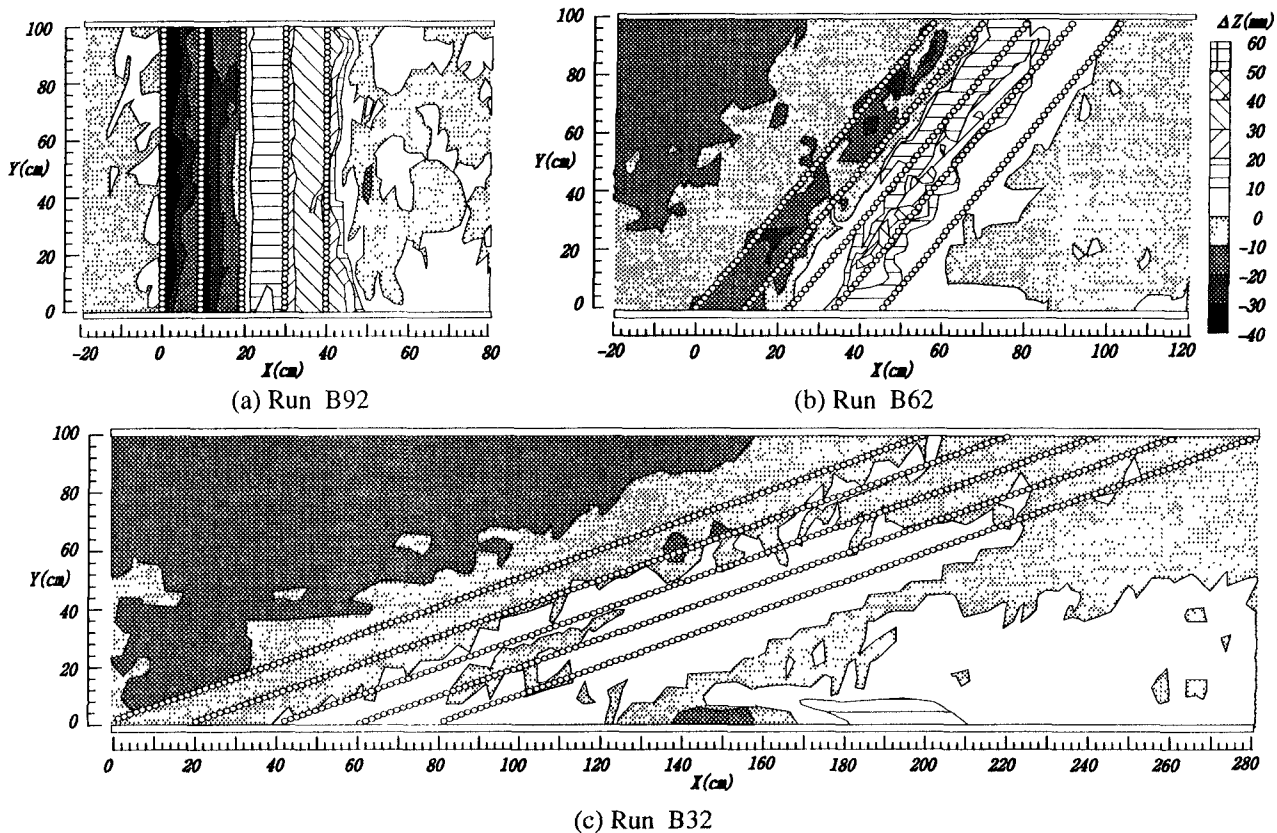


図-7 通水30分後の護岸周辺部における河床変動量 ΔZ の等値線図

底面の摩擦速度 U_* の流下方向分布を求めれば、図-6のようである。ただし、 U_* は岩垣式による覆い工の限界摩擦速度 U_{*c} で無次元表示している。図中の破線は詰め杭の位置を表している。

θ の値によらず、摩擦速度 U_* の縦断分布は、河床位が低水路部の水位よりも小さく、階段状の水位変化に伴って越流水による落ち込み部が形成される上から2段目及び3段目のステップ上($X/S=1, 2$)で最大となり、その上・下流で急激に減少するほぼ対称な分布形を示している。その最大値は、 $U_*/U_{*c}=1.0\sim 1.2$ 程度であって、護岸上部の法覆い工が流送される限界の条件に対応しているものと考えられ、目視による観察結果と一致する。

3.3 洪水後の護岸材料の変動特性

ここでは、護岸材料の移動限界を越える掃流力が作用する流量条件において、護岸や河床材料の変動特性について考察する。

図-7は、 $\theta=90^\circ, 60^\circ$ 及び 30° の各護岸模型に対して、流量 $Q=7\text{ l/s}$ を30分間通水した後の護岸周辺部における河床の変動量 ΔZ (河床上昇を正とする)のコンターラインを描いたものである。

また、図-8は、Bシリーズの全ての実験結果について、水路中心線上の水面形と河床の縦断形状を示したものである。河床形状については、護岸の延長方向に平均したものを太い実線で、初期の河床形状を破線で表し、同図には単位護岸延長当りの流量 q の値も併記している。両図より、以下のことが窺える。

まず、変動量 ΔZ の平面分布をみると、いずれの θ に対しても、河床変動量は側壁近傍を除いて護岸の延長方向に対してほぼ一様であると考えられる。 $\theta=90^\circ$ の場合、流量が限界流量を僅かに越えたところで(Run B91)、護岸2段目の法覆い工の一部が剥離し、その下部の河床砂が吸い出される。その結果、最上段の詰め杭前面に洗掘穴が形成され、その下流部に流送された砂が堆積している。さらに流量が増加すると(Run B92)、最上部の詰め杭前面の洗掘量はさらに増大し、2列めの詰め杭前面においても同様な洗掘穴が発達している。このような河床変動特性は、前節で述べた底面摩擦速度の分布特性と対応しており、越流直下の護岸材料の流失に対する危険度が最も高いことを示唆している。 $\theta=60^\circ$ 及び 30° の場合にも同様な傾向が認められるが、洗掘量は θ が小さ

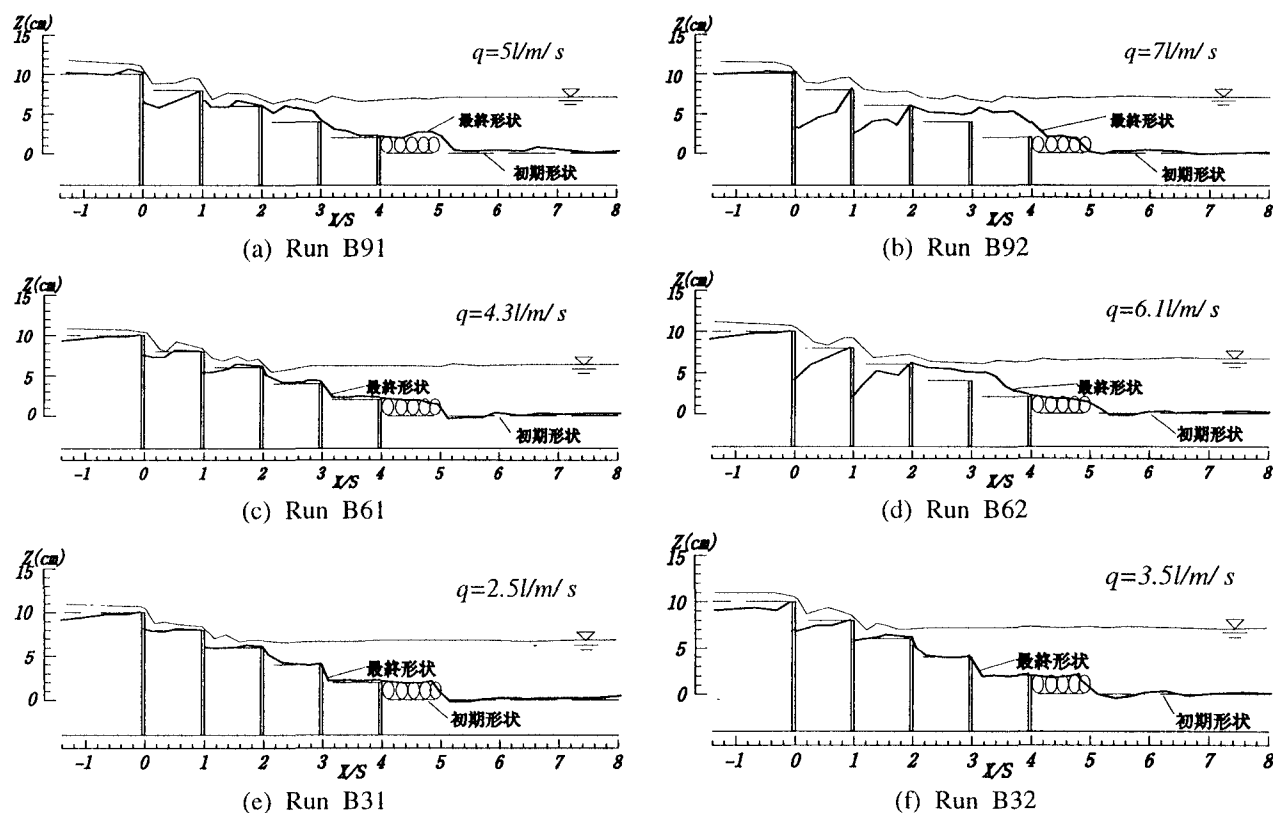


図-8 被災後の河床の縦断形状

くなるほど、すなわち、 q の値が小さいほど減少している。特に $\theta=30^\circ$ については、 $Q=7\text{ l/s}$ とした場合 (Run B32) においても、覆い工の剥離よりもその下部の河床砂の吸い出し現象が顕著に見られた。

以上の結果及び下流水位によって護岸上の流況が変化することを考え合わせると、斜め段落ち部における護岸法覆い工の流失を伴う河床変動量は、各段の高さと下流部の低水路水位及び護岸の単位延長当りの越流流量によって規定されるものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、高水敷からの流水の作用に対する階段状多自然型低水護岸工の水理特性について、実験的に検討したものである。以下に得られた主要な結果をまとめる。

- (1) 流水が垂直及び斜め方向に護岸を横断する場合について、河床砂や護岸材料が移動しない限界の流量を求め、護岸の傾斜角 θ 及び低水路の水位との関係を示した。また、この関係について水面形及び流速分布から流水の作用形態を明らかにし、底面摩擦速度の流下方向変化との対応を考察した。

- (2) 護岸材料の移動限界を越える掃流力が作用する洪水時の流量条件において、 θ が護岸の被災形態に及ぼす影響を明らかにするとともに、主流水脈が下流からの背水の影響を受けずにほぼ鉛直に落下する2段目及び3段目が、護岸の強度上の最も弱点となりうることを指摘した。

最後に、本研究は、財団法人河川環境管理財団河川整備基金助成から補助を受けて実施したことを付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田裕一郎・村本嘉雄・井澤 寛：多自然型護岸の水理機能に関する一実験，京都大学防災研究所年報，第37号，B-2，pp.441-458，1994。
- 2) 藤田裕一郎・澤井健二・神田佳一：多自然型護岸周辺の流れ特性に関する実験，水工学論文集，第39巻，pp.557-564，1995。
- 3) 神田佳一・藤田裕一郎・澤井健二：直線河道における階段式多自然型護岸周辺の水理特性，明石工業高等専門学校研究紀要，第38号，pp.25-34，1995。

(1997.9.30受付)