

透過および不透過型の橋脚洗掘防護工の効果と周辺流動への影響

Effects of Permeable and Non permeable Protection Works against Bridge Pier Scour and Their Influence on Local Flow Structure

富永晃宏*, 藤原和広**, 水野伸也***, 末成健夫****

By Akihiro TOMINAGA, Kazuhiro FUJIWARA, Shinya MIZUNO, Takeo SUENARI

The effects of the protection works against the scour around bridge pier were studied experimentally, taking notice of their permeability. The scour around the pier is sufficiently diminished by the flush surface protection works. There are significant differences between the permeable and non permeable protection works in the scoured bed configuration and the flow structure behind the pier. The scour depth is smaller in the permeable case than the non permeable case. This is attributed to the reduction of the longitudinal vortices behind the pier by permeating flow.

Keywords: local scour, scour protection, bridge pier scour, permeable structure, longitudinal vortex

1. まえがき

河川における様々な構造物の周辺では、特に洪水時に急激な流れの変化が発生して局所洗掘をもたらす。従来、このような河道構造物を安定化し河道を保護するために洗掘防護工が施されてきた。橋脚周辺の局所洗掘に関しても従来多くの研究がなされ、橋脚前面の洗掘機構についてはかなり明らかになってきているが、適切な防護工については複雑な境界条件が関係するため未だ試行錯誤の状態であるといえる。防護工としては主としてコンクリートブロックの乱積みや矢板打ちによる中詰コンクリートまたは広範囲にわたる床固め工法などが用いられている¹⁾。また、海洋構造物においては捨石工がよく用いられる²⁾。橋脚の局所洗掘は橋脚前面に発生する馬蹄形渦によって土砂が巻き上げられ、これが橋脚側面の加速された流れによって下流に運ばれることによって発生する。したがって、橋脚周辺の馬蹄形渦の発生領域を防護工で覆えば洗掘は発生しないことになるが、この場合防護工前面や背後の洗掘や防護工自体の安定性に問題が移行する。コンクリートブロックを用いる場合、粗度がないフラットなものや大きな突起を有するいぼ型粗度を連設したものの、あるいは異形ブロック積みによるものがある。大粗度や異形ブロックは流勢を弱める減勢効果を有するがそれ自体が乱れを引き起こし新たな局所洗掘を誘発する可能性があり、また異形ブロックでは砂れきの吸い出し作用による空洞化が起りやすい。一方、捨石工はこの点で有利であり河床になじみやすい。捨石工

* 正会員 名古屋工業大学助教授 工博 社会開発工学科
(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

** 学生会員 名古屋工業大学大学院

*** 名古屋工業大学

**** 正会員 日鐵建材工業株式会社

内部の浸透流による洗掘については中川ら³⁾ および大谷ら⁴⁾、石野ら⁵⁾の研究があり、ある程度の層厚があれば洗掘防護効果を十分発揮することが示されている。河川においては捨石自体の流出が問題となろう。そこで本研究では、鋼製枠内に捨石を積めたブロックを用いてこの洗掘防護効果を実験的に検討し、コンクリートブロック工および捨石工の場合と比較した。また、防護工設置時の橋脚周辺の流速分布特性を調べた。

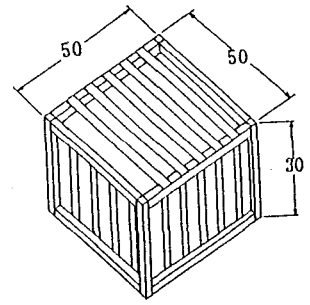


図-1 鋼製枠模型(単位mm)

2. 実験方法および実験条件

実験は、長さ13m、幅60cm、高さ40cmの勾配可変型水路で行われ、上流より5mから8mまでの3m区間に平均粒径 $d_m=0.08\text{cm}$ の砂を厚さ15cmで敷き詰め移動床とした。この移動床部の中央に直径 $D=5\text{cm}$ の円柱を設置し橋脚模型とした。流量は $Q=20\text{l/s}$ を流し、下流端で堰上げて円柱上流部で水深 $h=10\text{cm}$ となるようにした。フルード数 $Fr=0.34$ 、レイノルズ数 $Re=3.0 \times 10^5$ である。石詰めの鋼製枠の模型は鉄製で、図-1に示すような長さ5cm、幅5cm、高さ3cmの直方体とし、スリットを設けている。この中に中央粒径 $d_c=1.0\text{cm}$ の砂利を充填した。空隙率は0.57である。この高さは、ガラスビーズの防護工において層厚が3層以上になるとほとんど浸透流による河床洗掘がなくなるという中川らの結果³⁾から決定した。また、これと同寸法のコンクリートブロックを作成し、不透過ブロックとした。防護工がない場合の最大洗掘深は種々の条件によって異なるがほぼ $1 \sim 1.5D$ 、洗掘平面領域は半径 $2 \sim 3D$ と

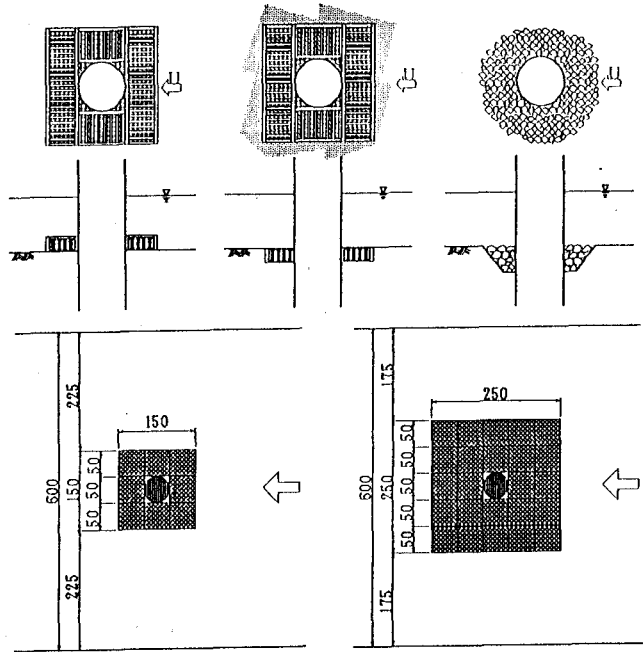


図-2 防護工設置状況図(単位mm)

推定される。ブロックの設置範囲は洗掘領域すべてをカバーする必要はないが、土木研究所の研究で防護工範囲が $1.5D$ でも十分効果があることが報告されていることから⁶⁾、円柱回りに1周と2周の2通りの設置範囲を設定した。また、これらブロックを河床面上に置く場合と河床面と同一面になるように埋設する場合の2通りを行った。さらに石詰め鋼製枠に用いたと同じ砂利を捨石として半径15cm、深さ3cmで埋設したケースも行った。防護工の設置状況を図-2に示す。

洗掘はほぼclear water scourの状態にあると考えてよいが、流れの掃流力が砂の限界掃流力にほぼ近い値となったため上流からの若干の砂の移動がみられた。通水時間は2時間として最終の河床形状をビデオ撮影するとともに代表的ケースについて竹ヒゴを用いた河床横断形計測装置で計測した。流速は河床同一面の石詰め鋼製枠とコンクリートブロックの代表的2ケースについて、円柱中心から上流に10cm、下流に15cm、左右に15cmの範囲で高さ方向に $y=2\text{cm}, 5\text{cm}, 8\text{cm}$ の3点において2成分電磁流速計を用いて2時間経過後に移動床状態のまま主流成分と鉛直成分の計測を行った。また、水深をポイントゲージで計測した。

3. 防護工周辺の洗掘形状の特性

防護工がない場合の洗掘形状を図-3に示す。円柱を中心として同心円上に洗掘されているが、下流側の洗掘孔の勾配は小さい。最大洗掘深は7.5cmとなり、洗掘範囲は円柱の前と左右で半径15cm程度となっている。これらの結果は従来の研究から予測されるものとはほぼ一致する。次に、防護工を設置した場合、15cm四方と防護工がない場合の洗掘領域よりも狭い範囲の防護でも円柱自身の馬蹄形渦による円柱回りの洗掘はなくなる。しかし、防護工の影響による洗掘および円柱のかなり下流にまでおよぶ洗掘、堆積形状に違いがみられた。コンクリートブロックと石詰め鋼製枠の水利的相違点は前者が不透過性であるのに対し後者が透過性でかつ粗度が大きいという点だけである。設置範囲の異なる2ケースでは洗掘状況に顕著な差はみられなかった。そこで、それぞれのブロックを円柱回りに15cm四方に設置した4ケースと捨石を直径15cmの円内に埋設したケースの河床形状のコンターを図-4～8に示す。洗掘状況は以下のようである。

- a)河床面上のコンクリートブロック防護工(図-4) 防護工前面および側面が橋脚の洗掘と同様のメカニズムによってブロック周辺が洗掘されブロック自体が沈下している。写真-1に見られるように各ブロックは円柱前面のブロックを除いて前下がりに傾斜し、前方角のブロックは側方にも傾斜し間隔が広がっている。後方角のブロックは足元がえぐられ、なかば宙に浮いた状態にあり今にも崩れそうである。洗掘領域は防護工の両サイドの円柱位置より下流側に2列現れ、ちょうど後方ブロックの横付近で最大洗掘深が3.5cm程度となる。円柱下流の水路中央に沿って峰状に盛り上がった分布を示し⁶⁾、円柱より40cm程度下流から後方で堆積がみられる。
- b)河床面上の石詰め鋼製枠防護工(図-5) この場合、コンクリートブロックと同様に防護工周辺が洗掘されブロックが沈下するが、前面の洗掘孔は上流からの流砂によってその後埋め戻されてむしろ堆積傾向にある。砂は石詰め鋼製枠内に入り込み防護工後方にまで堆積が生じている(写真-2)。したがって、防護工の両サイドでの洗掘は小さく、むしろ円柱より40cm程度下流で最大洗掘深が現れるが、これも2.0cm程度とa)に比べて小さい。
- c)河床同一面のコンクリートブロック防護工(図-6) 通水初期にブロック前面および側面が浸食されるが、前面は根本まで洗掘されることはなく、長時間の通水により上流からの流砂により再び埋め戻される場合と洗掘されたまま安定する場合があった。ブロック自体はほとんど沈下せず安定している。洗掘領域は防護工の斜め後方から下流側に2列現れ、ちょうど後方ブロックの5cm下流付近で最大洗掘深が3.0cm程度となる。この洗掘位置はa)に比べて下流側へ移動しより中央側によっている。円柱下流の水路中央に沿ってはa)と同様に峰状に盛り上がった分布を示し後方に堆積する。
- d)河床同一面の石詰鋼製枠防護工(図-7) 防護工前面はコンクリートブロックの場合とほぼ同様に堆積がみられ、防護工内に入り込み防護工自体は安定で沈下、移動はみられない(写真-3)。洗掘領域はやはり防護工の斜め後方から下流側に2列現れるが、最大洗掘深は防護工下流端より10cmから20cm下流にやや非対称に現れ、その大きさも1.5cmから2cm程度と小さくなる。また、中央の峰状の盛り上がりはかなり平坦なものになる。
- e)河床同一面捨石防護工(図-8) 捨石の場合も前面で堆積がみられ、円柱より下流の両サイドで洗掘が生じる。洗掘形状はほぼd)と同様であるが、洗掘深はこれよりも若干小さくなる。捨石自体は数個下流側に流された程度でほぼ安定しており、沈下もみられなかった。ただし、流況によっては捨石の移動限界が問題となる場合が予想される。

以上の結果、河床面上に防護工を設置する場合は防護工自体による局所洗掘が大きく、安定を失う傾向にある。捨石工を河床面上に設置したケースは土木研究所で実験が行われているが⁵⁾、本実験と同様な橋脚下流の洗掘形状がみられた。また、防護工が透過型であるか不透過型であるかによって防護工の沈下状況および周辺の洗掘状況に大きな相違がみられ、透過型の方がかなり洗掘深が小さくなることがわかった。この防護工がある場合の橋脚下流の洗掘は河床埋め込みの捨石工でもみられたことから、防護工の角の影響ではなく、円柱による下流側の局所流の影響であると考えられる。この点について次に流速分布から検討する。

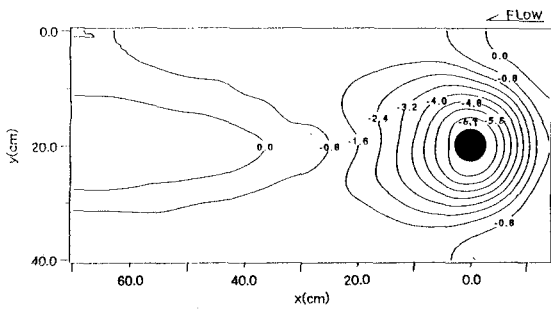


図-3 洗掘形状(防護工なし)

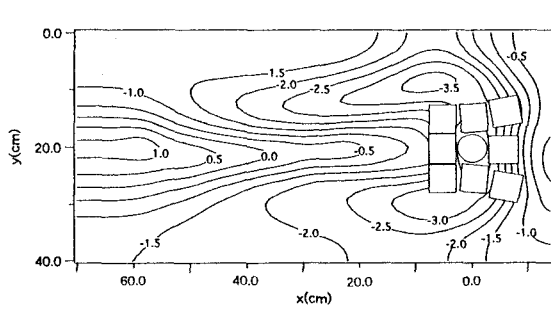


図-4 洗掘形状(河床面上のコンクリートブロック)

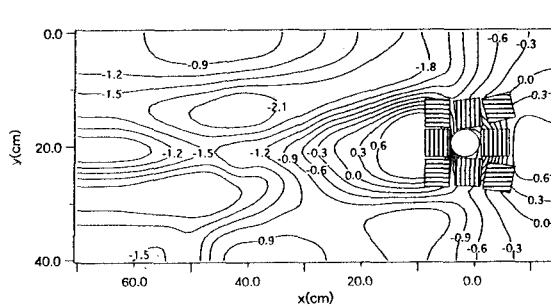


図-5 洗掘形状(河床面上の石詰め鋼製樁)

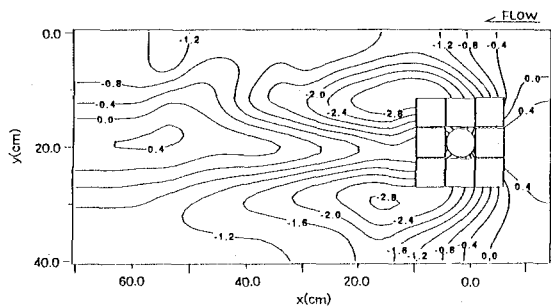


図-6 洗掘形状(河床同一面のコンクリートブロック)

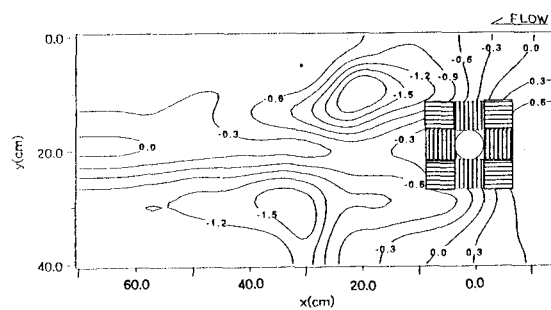


図-7 洗掘形状(河床同一面の石詰め鋼製樁)

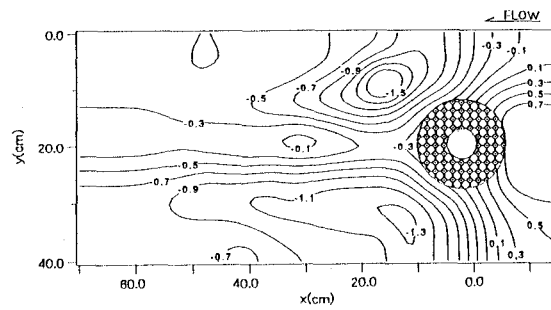


図-8 洗掘形状(河床同一面の捨石工)

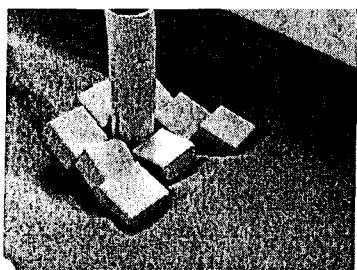


写真-1 洗掘状況
(河床面上コンクリートブロック)

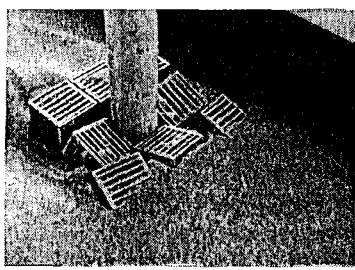


写真-2 洗掘状況
(河床面上石詰め鋼製樁)

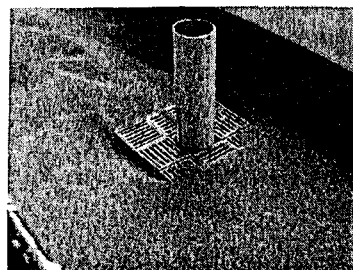


写真-3 洗掘状況
(河床同一面石詰め鋼製樁)

4. 円柱回りの流速分布特性

河床面上に防護工がある場合はコンクリートブロックと石詰鋼製枠で大きな違いがみられたが、防護工ブロックが沈下、移動し流れが複雑になること、また防護工として適当でないと判断されることから、実用的と考えられる河床埋め込みの防護工について両者の流速分布の相違点を検討した。まず、図-9に河床埋め込みの防護工における円柱の直上流と直下流の水深の横断方向分布の変化を示す。コンクリートブロックと石詰鋼製枠では上流水深はほぼ同じであるが、下流水深は石詰鋼製枠の方が約1mm程度小さくなる。これは浸透流の影響と抵抗の増大によるものと考えられる。円柱下流5cmと10cmにおける主流に直角な横断面内の

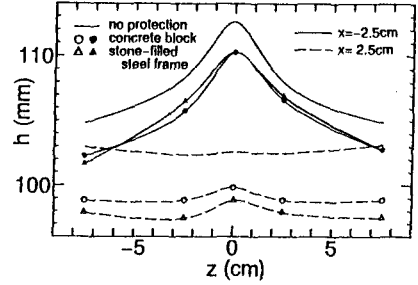


図-9 円柱上下流の水深横断分布

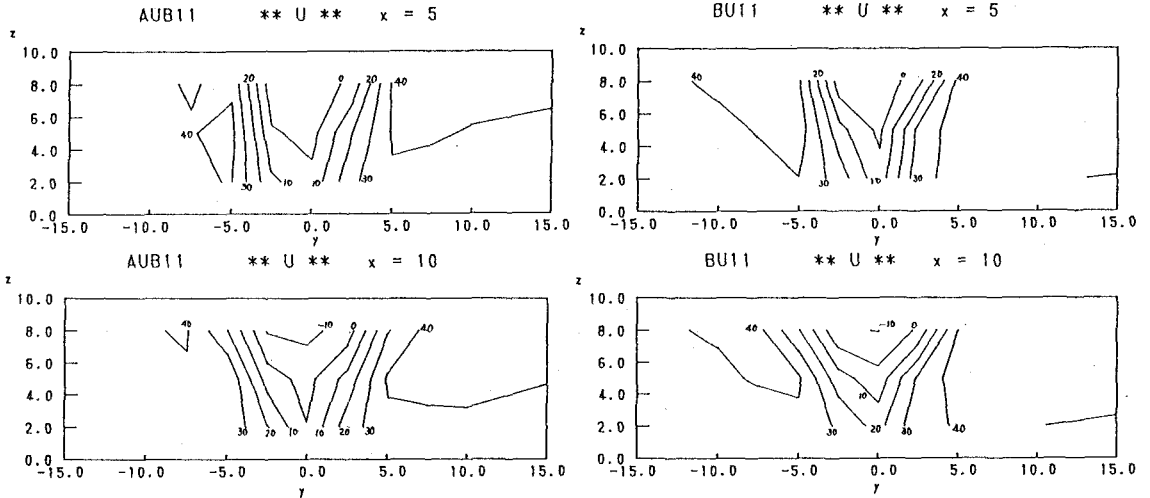


図-10 主流速Uの横断面コンター

(AUB11-コンクリートブロック, BU11-石詰鋼製枠)

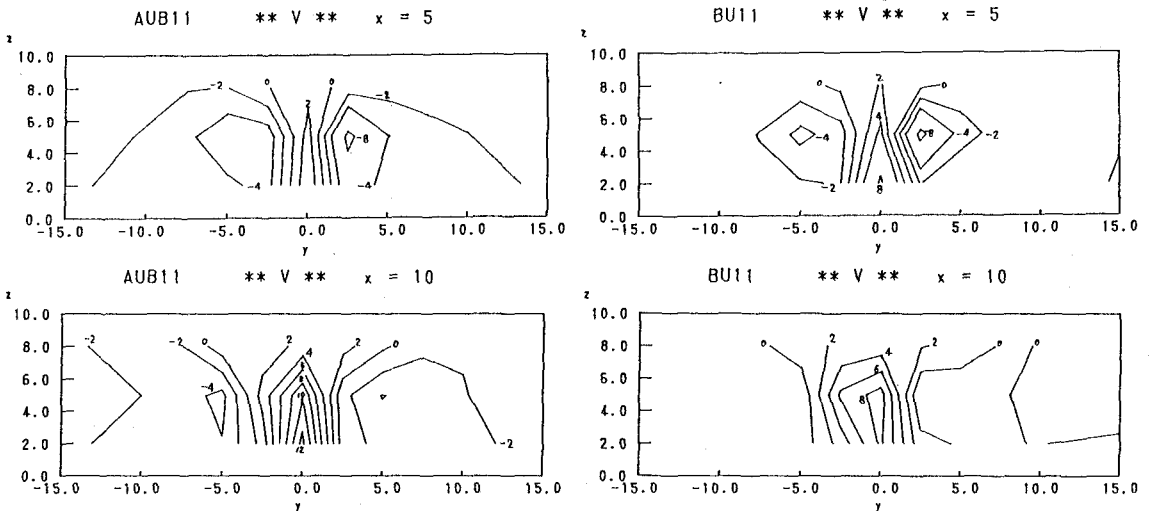


図-11 鉛直流速 Wの横断面コンター

(AUB11-コンクリートブロック, BU11-石詰鋼製枠)

主流速 U コンターを図-10に示す。円柱後方では底面近くの方が高速で水面近くが遅く逆流が現れている。周辺の後流域境界では鉛直方向にほぼ様な分布となっている。後流域の幅を $U=30\text{cm/s}$ 以下の領域で比べると、 $x=5\text{cm}$ の位置で石詰鋼製枠の方が約 6.5cm 、コンクリートブロックの方が約 7.7cm と石詰鋼製枠の方が小さくなっており、特に底面近くで石詰鋼製枠の方が高速になっているのがわかる。この傾向は $x=10\text{cm}$ でも同様で石詰鋼製枠の方が底面近くでの流速が速く、水面近くの逆流域は小さくなる。次に、鉛直方向流速 W のコンターを図-11に示す。円柱背後の中央線に沿って上昇流、円柱の両外縁部で下降流が顕著に認められる。このことから円柱によって左右に分けられた流れが円柱外縁に沿って下降しながら流下し、円柱後方の底面近くで中央に集まって上昇流となり、下流に安定な一対の縦渦を形成することを示している。この縦渦が円柱下流の両側の洗掘と中央の峰を形成したと考えられる。このような橋脚背後の流れパターンは宇民が詳細に検討している⁷⁾。今回計測されたパターンはほぼこのような構造に一致するものである。両防護工を $x=5\text{cm}$ で比較すると、コンクリートブロックの方が下降流の範囲が広くまた強いが、石詰鋼製枠では中央の上昇流が強い。この石詰鋼製枠の底面近くの上昇流の強さは大谷らが示した浸透流の湧き上がり⁴⁾によるものと考えられる。一方、 $x=10\text{cm}$ ではコンクリートブロックの方が中央の上昇流が強くなり、また外縁の下降流も依然として残っており、縦渦の強度は石詰鋼製枠に比べて大きいといえる。以上より、防護工が透過性の場合、浸透流の底面からの湧き上がりが円柱外縁からの下降流を弱め、その結果下流の縦渦の強度が弱くなり結果として洗掘も小さくなったものと推測される。しかし、本実験では移動床状態ということもあり十分な計測が行われていないため明確な結論は下せないが、今後、透過性構造物のこのような組織渦構造に果たす役割について検討することは意義がある。

5. あとがき

橋脚の洗掘防護工について特に防護工の透過性に着目していくつかの実験的検討を行った。その結果、透過性か不透過性かによって橋脚下流の洗掘形状および流れ特性に大きな違いがあることがわかった。透過性の防護工では橋脚下流の洗掘が不透過性に比べて小さくなることがわかり、これは橋脚下流の縦渦が浸透流によって弱められることによるものと推測された。本研究は限られた範囲の実験しか行っておらずさらに広範囲の実験が必要であろう。また、透過性構造物の流れや河床変動に及ぼす影響を基本的に明らかにしていく必要があると考える。

<参考文献>

- 1) 中川博次：河川構造物の健全度評価法と被災軽減法に関する研究，文部省科研費報告書，1986。
- 2) 平野茂，坂巻明人，石野和男，遠藤伸治，牧田鈴子：急潮流下海洋構造物の洗掘防止工内の浸透流に関する現地計測，海岸工学論文集，第37巻，p494-498，1990。
- 3) 中川博次，村上正吾，仙波秀治，金崎伸夫：河川構造物周辺の局所洗掘防護工に関する研究，土木学会関西支部年講Ⅱ-52，1989。
- 4) 大谷英夫，石野和男，勝井秀博：橋脚の捨石洗掘防護工の効果，大成建設技術研究所報，第25号，p355-364，1992。
- 5) 石野和男，後藤英一，中川良隆，岡田凌太：急潮流下海洋構造物周辺の捨石洗掘防止工に関する研究，土木学会論文集，No. 462/VI-18，p33-42，1993。
- 6) 須賀堯三，西田祥文，高橋晃，坂野章：橋脚による局所洗掘深の予測と対策に関する研究，土木研究所資料，第1797号，p1-97，1982。
- 7) 宇民正：橋脚後流域の流れパターンについて，京都大学防災研究所年報第17号B，p701-715，1974。