

水制の透過性が段波通過時の 流れと洗掘に及ぼす影響

INFLUENCE OF PERMEABILITY OF A SPUR DIKE ON FLOW AND LOCAL SCOURING DURING A SURGE PASS

前野詩朗¹, Tomasz MIODUSZEWSKI², 上間矢次³
Shiro MAENO, Tomasz MIODUSZEWSKI and Yatsugi UEMA

¹正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

²学生会員 岡山大学 自然科学研究科地球・環境システム科学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

³学生会員 岡山大学 自然科学研究科環境システム学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

An experimental investigation on the influence of the structure permeability on flow pattern and local scouring process near a spur dike is presented in this paper. Detailed measurements of local velocities, pressure and scouring action, performed in cases of permeable and impermeable structure, gave materials to compare such parameters as water level, excess pore pressure, seepage force and final scour profile. Significant differences among cases were noticed in all those factors. The permeability of the spur-dike was recognized as a very important feature decreasing scouring. The values of all other parameters which may promote scouring were noticeably smaller. The experiments were conducted simulating conditions of a surge flow, which additionally exposed all measured parameters, and showed very significant differences between two examined types of spur dikes.

Key Words: spur dike; permeability; hydrodynamic pressure; excess pore pressure; liquefaction; seepage force; surge flow; scouring.

1. はじめに

近年、聖牛などの透過性を有する伝統的河川工法が着目されるようになり、水制の透過性の影響を検討した研究も行われているが、その多くは杭型の水制を適用¹⁾している。一方、写真-1に示すように、自然石を用いた透過性を有する水制は生態系にも優しいため、各地で設置されつつあるが、研究例²⁾は少なく、その詳細な水理特性を明らかにすることは工学上重要な課題となっている。

これまで、水制周辺で生じる水理現象を解明するために、Elawadyら^{3), 4)}やRahmenら⁵⁾, Sumerら^{6), 7)}などにより多くの研究がなされてきた。それらの殆どは定常的な流れ場を取り扱っているが、地震による津波が河口から数キロメートルに渡って遡上した例も報告されており、このような衝撃的な流体力が作用する場も想定した水制の水理機能特性も明らかにしておく必要がある^{8), 9)}。

以上の点を考慮して、本研究は、不透過性の水制と石礫で構築された透過性を有する水制を用いて、

移動床実験により、段波通過時における水制周辺の流れと洗掘に関する基本的な特性を明らかにするものである。なお、透過性水制の効果を検討する際には、水制周辺の流速、間隙水圧分布、過剰間隙水圧、浸透力、有効応力、洗掘深などの各種パラメータを用い、洗掘の進行状況は水中カメラを用いて観察した。



写真-1 水制

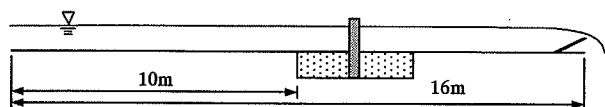


図-1 実験水路

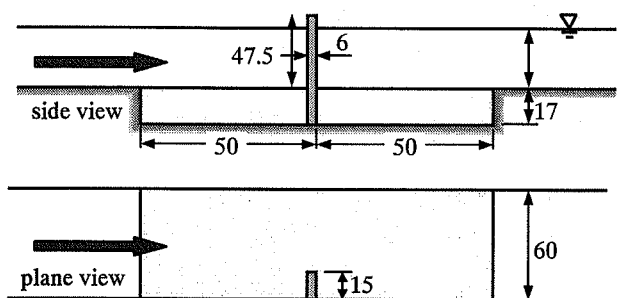


図-2 水制設置位置

表-1 実験条件

項目	Case-p, Case-i
流況	負の段波
計測対象	洗掘深・水圧・流速
流量	5(ℓ /s)
水深	30 cm
通水時間	90 秒

2. 実験の概要

本実験には、図-1に示す長さ16m、幅0.6m、高さ0.4m、勾配1/500の水路を用いた。上流側から10mの位置に長さ1m、深さ17cmで水路と同じ幅のサンドピットがあり、平均粒径1.28mmの砂を敷きつめた。水路の下流端にはゲートが設けられており、その高さを変えることによって水位の調節が可能である。図-2に示す位置に、底面15cm×6cm、高さ64.5cmの非越流型で、透過性、不透過性の二種類の水制を設置した。透過性水制はスチール製のメッシュを組み合わせた外枠の中に平均粒径1.9cmの石を詰めて作製し、不透過性水制はアクリル板を組み合わせて作製した。

表-1は実験条件を示している。本実験では、流量5(ℓ /s)を定常的に流し、水深が30cmになるように調節した後、下流端ゲートを一気に倒すことにより水路内に負の段波を発生させる。以上の流況下で、水制周辺の洗掘深、平面2次元流速分布、水制側壁に働く間隙水圧を計測した。流速の計測は図-3に白丸で示しているポイントにおいて、河床から1cmの位置で行った。間隙水圧計測ポイントは図-4に示すように、水制上流側の列をU、水制先端側の列をH、水制下流側の列をDとし、各列上のポイントから順に1～4と番号を付けた。水制上流、下流側では圧力計測ポイントが2列ずつ並んでいるが、水路側壁に近い方にWを、水制先端に近い方にHをそれぞ

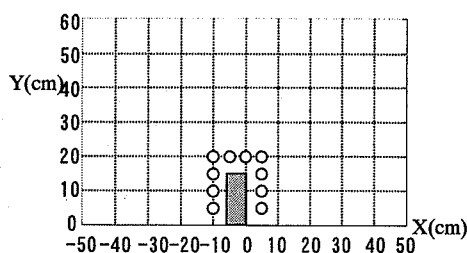


図-3 流速計測ポイント

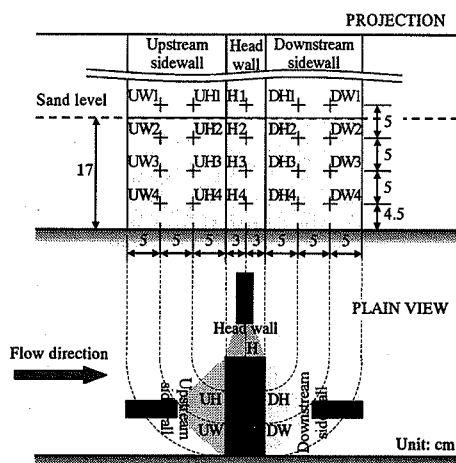


図-4 間隙水圧計測ポイント

れ加えて区別する。また、ケース名は、水制が透過性の場合はpermeableの頭文字pを付けてCase-pとし、不透過性の場合はimpermeableの頭文字iを付けてCase-iとした。

3. 実験結果

3.1 水制周辺の流速分布

図-5は、段波通過時の流速を特徴的に表している段波発生6秒後と10秒後の水制周辺の河床面上1cmの平面2次元流速分布を示している。段波発生6秒後において、不透過水制Case-iは、上流から来る流れを通さないため、透過水制Case-pに比べて水跳ね効果が大きいことがわかる。また、水制の直下流では逆流による流れも確認できる。これに対し、透過水制は、流れの一部が水制を通り抜けるため、水制上流側では不透過水制よりも水制に向かう成分が大きくなる。また、水制下流側においても逆流が生ずることはない。これらの傾向は、定常的な流れにおける透過性水制と不透過水制の傾向と一致する。次に10秒後についてみると、不透過水制Case-iの場合、段波による急激な流れが激しく水制に衝突するようになるため、水制上流側では逆流が生じている。水制下流側では水制上下流で生じる水面勾配による下降流が生じ流向は下流向きとなる。一方、透過水制Case-pの場合は、流速は大きくなるものの、6秒後

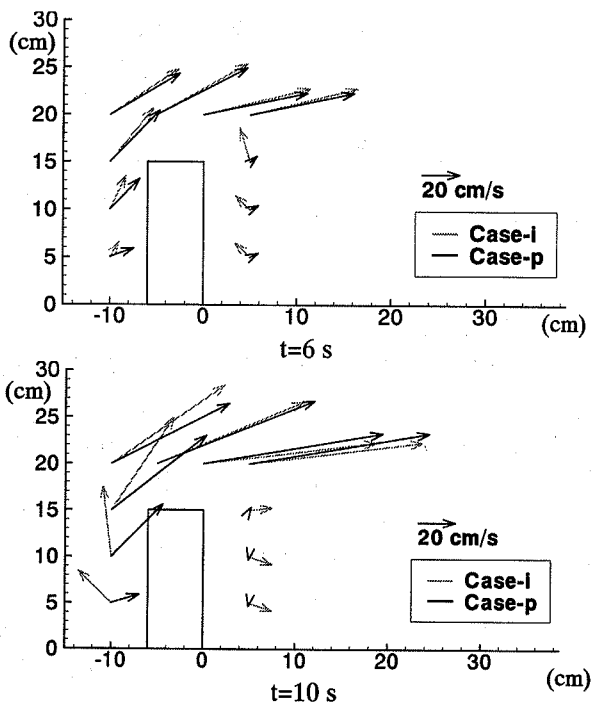


図-5 流速分布

と同様な分布を示す。

3.2 間隙水圧

(1) 変動間隙水圧

図-6は変動間隙水圧の計測結果を示している。負の段波により水位が下がっていくにつれ、水制側壁に作用する水圧が低下する様子がわかる。水圧の低下は、水制上流側では大きな違いは見られないが、先端および下流側では透過性を有するCase-pの方が緩やかである。何れの場合も、水制上流側に比べて下流側の方が急に圧力が減少する傾向にある。これは、負の段波が水制を通過するときには、まず水制下流側の水位低下が起こり、あたかも水制上流側の水が水制に堰き止められるようになるためである。図-7にUW1とDW1の間隙水圧の差を示す。水中測点の水圧は水位と一義的な関係にあると考えられるので、水圧差の小さいCase-pの方が水制上下流側での水位差が小さくなっているといえる。これは、Case-pでは流れの一部が水制を通り抜けるためである。次に、同じポイント列の一番上側に位置する水

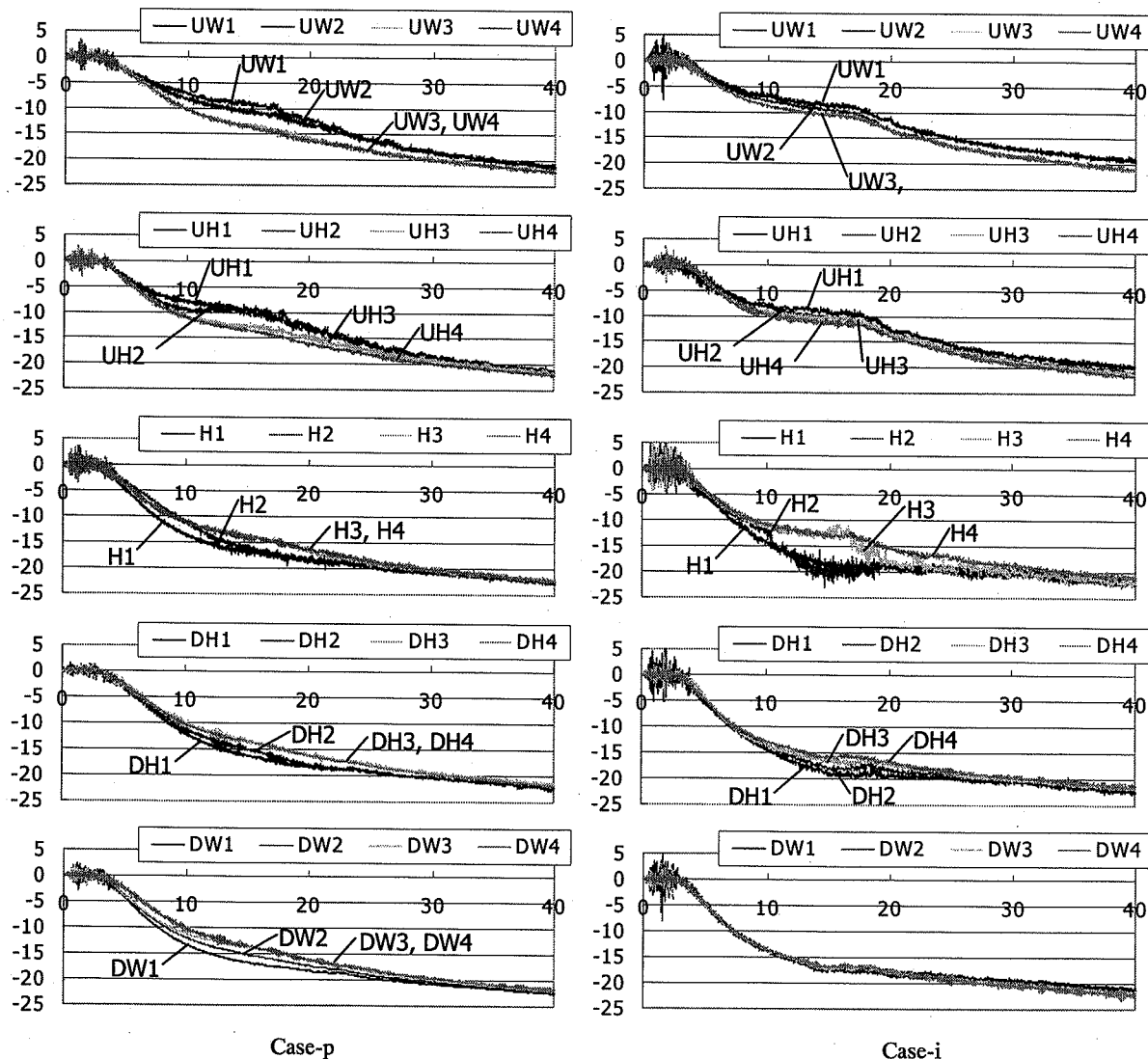


図-6 変動間隙水圧 (unit: cm)

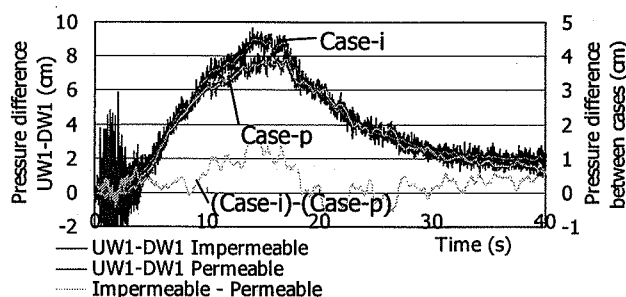


図-7 UW1とDW1の水圧差

中測点と地盤内測点の水圧差に着目すると、水中測点の圧力の低下に比べて地盤中の測点の圧力低下が追従できていないことがわかる。この傾向は不透過水制を用いたケースの水制先端部において最も顕著となっている。地盤内の各計測点における水圧から同じ列の一番上の水中計測点の水圧を減じた値は過剰間隙水圧と呼ばれ、地盤の動的安定性を論ずる上で重要な要素であり、以下にその特性を述べる。

(2) 過剰間隙水圧

図-8は、過剰間隙水圧の時間変化を示している。H列とDH列では、Case-p、Case-iの両ケースとも過剰間隙水圧の値は正になり、地盤中の水圧の方が水中の水圧よりも大きくなり、その値はCase-iの方が大きくなる。これは後で述べる地盤の有効応力の低下に繋がる。とくに水制先端部では有効応力がかなり減少し地盤支持力の低下が懸念される。一方、UH列のポイントでは両ケースとも過剰間隙水圧の値が負になり、その絶対値はCase-pの方が大きい。水制上流側で過剰間隙水圧が負になったのは、水制上流から水制に衝突する流れにより、砂層面上の水圧が上昇し、砂層内より水圧の低下が遅れたためであると考えられる。

表-2 液状化継続時間 (unit: s)

	Case-p	Case-i
H2	3.16	1.12
H3	1.98	3.42
H4	-	7.04
DH2	7.00	5.10

3.3 地盤の液状化

正の過剰間隙水圧が存在するとき、地盤は上向きの力を受けるため、有効応力が減少し、極端な場合には液状化が発生する¹⁰⁾。図-9は無次元有効応力を示している。図中の鉛直線は、その横の矢印中に記してあるポイントが洗掘によって水中に現れた時間である。無次元有効応力が0となる液状化が、過剰間隙水圧が正の値になった水制先端側および下流側のポイントで生じることがわかる。洗掘が最も急激に進行した不透過水制の場合、水制先端のH列では全ての測点が液状化し、その後洗掘により測点が水中に現れている。一方、透過水制の場合には、H4は液状化まで至らないことがわかる。水制下流側のDH列では、DH2は不透過水制の場合には液状化後洗掘が進み水中に現れるが、透過水制のDH2では、液状化するものの測点が水中に現れることはない。

表-2は、液状化が生じてから、ポイントが水中に現れるか、有効応力の値が正になるまでの時間を液状化継続時間として示している。H列では洗掘の進行が特に速いため、H2とH3では液状化継続時間が短くなっている。一方、DH2では、両ケースとも最終洗掘深さとDH2の距離が短いため、DH2上の土被り厚が小さくなり、液状化継続時間が長くなったものと考えられる。

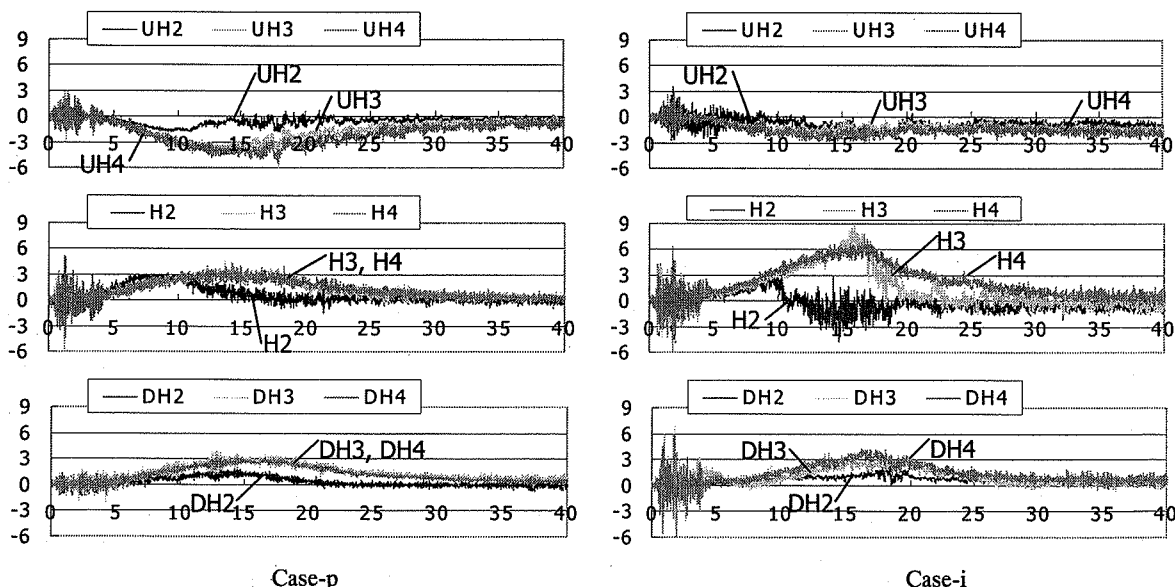


図-8 過剰間隙水圧 (unit: cm)

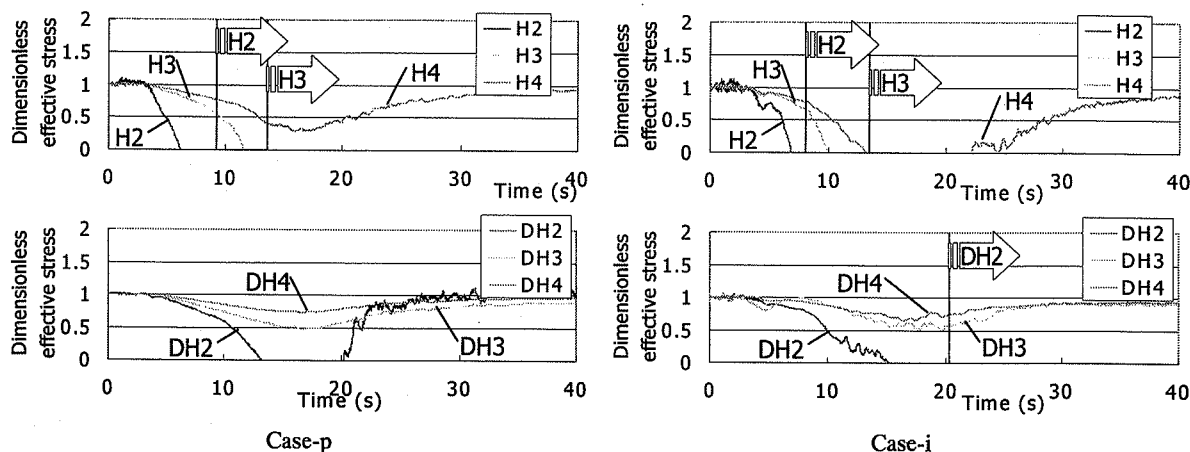


図-9 無次元有効応力

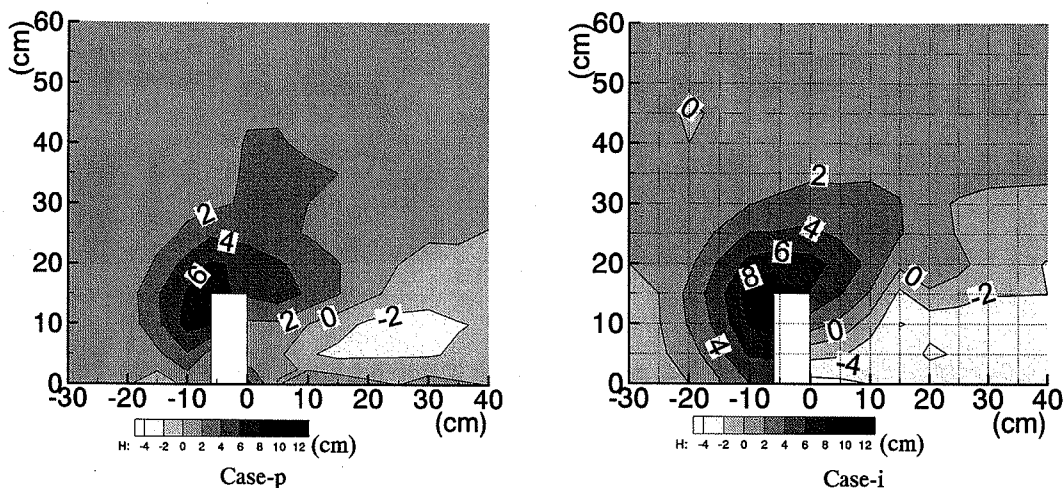


図-10 最終洗掘深

3.4 水制周辺の洗掘

段波通過時の水制周辺の水中ビデオカメラによる観察の結果、洗掘は、水制先端付近で砂が巻き上げられるようにして始まり、やがてその砂は水制下流側に堆積されていくことが確認できた。洗掘が進むにつれて、水制上流側で砂が洗掘孔の形に沿うようにずり落ちていく現象も確認された。不透過性水制の場合には、水制先端で発生する強度の渦を伴う流れにより、砂粒子は激しく巻き上げられる。一方、透過性水制の場合には不透過性水制の場合よりも渦の強度も小さく、砂粒子の巻き上げがかなり抑制されることがわかった。

図-10は、通水終了後の洗掘形状を示している。この図より、透過性の有無に依らず、洗掘孔の形状は水制先端部の上流側を頂点とした円錐形状になり、最大洗掘深の現れる位置もほぼ一致することがわかる。最大洗掘深についてみると、透過性を有するCase-pの方が洗掘は浅くなり、洗掘が及ぶ範囲は小さくなる。

3.5 浸透力

図-11は水制側壁に沿った等圧線と洗掘形状を示

している。間隙水は水圧が高い方から低い方へ流れるので、図中に示す矢印の向きに浸透力が働くことがわかる。その浸透力は、水制先端の側壁から水制下流側の側壁に向かって、上向きに押し上げるようなものである。不透過水制Case-iの方が等圧線の間隔が狭く作用する浸透力は大きい。水制先端部と水制下流側で液状化が起こっており、粒子間の噛み合いが弱くなった砂地盤に浸透力が働くことによって洗掘をより容易にしていると考えられる。この傾向は、不透過水制の場合の方が顕著である。

4. 結 論

本研究では、水制の透過性が段波通過時の流れと洗掘現象に及ぼす影響を検討した。その結果、以下のことが明らかにされた。

- (1) 段波通過時に上流から激しく水制に衝突する流れにより、不透過性水制の場合、構造物先端付近で定常流場の流れとはかなり異なる局所的な流れが生じる。一方、透過性水制では、流れが水制内を通過するため定常流場に近い流れ場が形成される。
- (2) 段波のような急激な流体力が作用する場では地

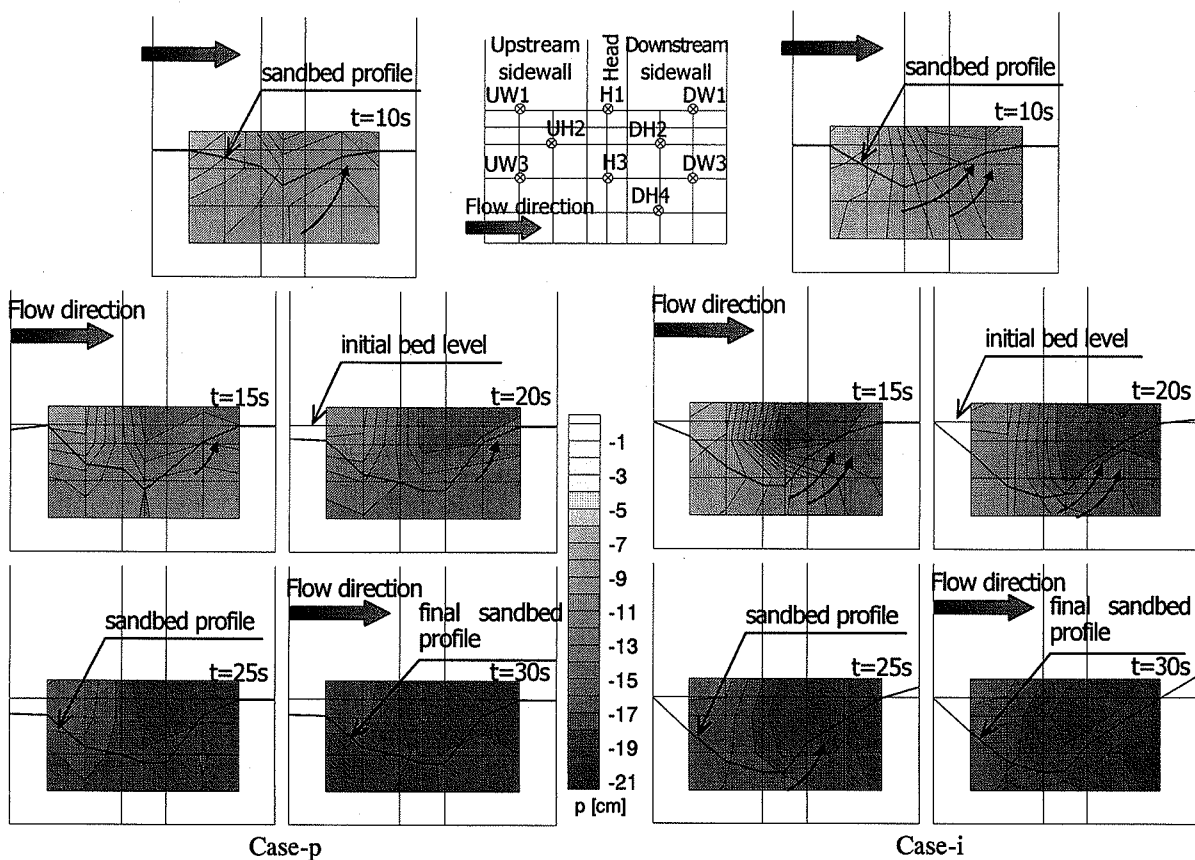


図-11 水制側壁の等圧線および河床形状（矢印は浸透力の向きの概略を示す）

盤上の水圧が急激に変化し、地盤内の水圧が追従できずに過剰間隙水圧が発生する。また、過剰間隙水圧の発生は水制を透過性にするにより抑制できる。

(3) 透過水制は段波通過時に水制先端部で発生する渦の強度を抑制する効果がある。したがって、洗掘量を抑制させる効果を有する。

(4) 不透過性水制のケースでは、地盤を押し上げるような向きに浸透力が強く働くため、洗掘が容易進行する。

参考文献

- 1) 富永晃宏, 中居 毅, 内藤 健, 中村尚子: 開水路湾曲部に設置した透過水制の流れと河床変動に及ぼす影響, 水工学論文集, 第48巻, pp.547-552, 2004.
- 2) 道奥康治, 石垣泰輔, 前野詩朗, 南條雅志, 池松健: 透過型水制の周辺・内部の流れに関する実験と解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.799-804, 2004.
- 3) Elawady, E., Michiue, M. and Hinokidani, O.: Experimental Study of Flow Behavior Around Submerged Spur-Dike on Rigid Bed, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, vol. 44, pp. 539-544, 2000.
- 4) Elawady, E., Michiue, M. and Hinokidani, O.: Movable Bed Scour Around Submerged Spur-Dikes, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, vol.

45, pp. 373-378, 2001.

- 5) Rahman, M., Murata, H., Nagata, N., Muramoto, Y.: Local Scour Around Spur-Dike-like Structures and their Countermeasures Using Sacrificial Piles, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, vol. 42, pp. 991-996, 1998.
- 6) Sumer B.M., Fredsoe J., Christiansen N., Hansen S.B.: Bed Shear Stress and Scour Around Coastal Structures, *Proceedings of 24th International Coastal Engineering Conference ASCE*, Kobe, Japan, vol. 2, pp. 1595-1609, 1994.
- 7) Sumer B.M., Whitehouse J.S., Torum A.: Scour Around Coastal Structures: a summary of recent research, *Coastal Engineering*, vol. 44 pp. 153-190, 2001.
- 8) 前野詩朗・小川 信・上間矢次: 段波通過時の水制周辺の局所洗掘の解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.817-822, 2004.
- 9) Tomasz Marek Mioduszewski and Shiro Maeno : Experimental study of scouring process and behavior around a spur dike during the surge pass, *Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.858 - 863, 2003.
- 10) Nago, H. and Maeno, S. : Pore Pressure and Effective Stress in a Highly Saturated Sand Bed under Water Pressure Variation on its Surface, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.9, No.1, pp.23-35, 1987.

(2004. 4. 7受付)