

2 段円柱橋脚周辺の水利特性に関する研究
Local Phenomena Around Non-uniform Circular Pier

京都大学防災研究所 正員 今本 博 健

京都大学防災研究所 正員 大年 邦 雄

1. はじめに

円柱橋脚周辺の水利特性に関する従来の研究は一様円柱を対象としたものが多く、円柱径が途中で変化するものについては殆どふれられていない。しかしながら、実際の橋脚には非一様円柱が用いられることも多い。また、河床低下が進行し橋脚基礎が相対的に浮び上がりつつある現在、安全上の観点からもその洗掘特性を解明することが重要である。本報告は、非一様円柱の例として図-1に示すような2段円柱橋脚を対象とし、橋脚周辺の局所洗掘について実験的検討を行ったものであって、段高と河床高との差 ΔZ を系統的に変化させた場合の局所洗掘深の特性ならびに洗掘現象を支配する橋脚前面近傍における流れの挙動についていくつかの興味ある知見が得られている。

2. 実験装置および方法

定常で一様な流れに設置された2段円柱橋脚の洗掘深 Z_s を支配する要素としては、流速 U 、水深 H 、砂粒径 d （一様砂とする）、上部円柱径 D_1 、下部円柱径 D_2 および段差 ΔZ が挙げられる（図-1参照）。次の考察より次式が得られる。

$$\frac{Z_s}{D_2} = F \left(N_s, \frac{H}{D_2}, \frac{D_2}{d}, \frac{D_1}{D_2}, \frac{\Delta Z}{D_2} \right) \dots (1)$$

ここに、 $N_s = U / \sqrt{sgd}$ である。本研究では、式（1）右辺の各パラメーターが洗掘深に及ぼす効果を洗掘孔への土砂供給のないclear water scourの状況下で検討することとし、表-1に示す条件下で上式の各パラメーターを系統的に変化させて洗掘実験を実施した。

用いた水路は、幅50cm、高さ20cm、長さ15mの長方形断面水路で、中央部の1.5m区間を水路底より20cm深くして、その中に橋脚モデルを設置し、水路底面と同一高さまで砂粒を密に敷き詰めた。使用した円柱は塩化ビニール製で $D_1 = 2.2$ 、3.8、6.0cm、 $D_2 = 7.6$ cmであり、河床砂は中央粒径が0.015、0.053、0.076mmのほぼ均一砂である。実験では橋脚周辺での最大洗掘深および河床形状を計測したが、それには超音波河床計を使用した。

また、平坦固定床水路においては、中立浮遊粒子をトレーサーとして、図-2に示す可視化装置により円柱中心を含む縦断面（以下では中心縦断面と呼ぶ）および路床近傍の水平面におけるトレーサーの挙動を可視化した。それを基に2段円柱前方の渦の特性ならびに路床近傍の流速を検討した。なお、路床近傍の流速は直径3mmのプロペラ流速計による計測を併用している。

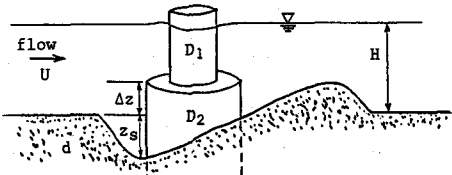


図-1 2段円柱橋脚モデル

表-1 洗掘実験条件

Run	D_1/D_2	N_s	H/D_2	D_2/d	$U(\text{cm/s})$	$H(\text{cm})$	$d(\text{cm})$
A-1	0.50	1.95	1.12	140	18.09	8.50	0.053
A-2	0.50	2.56	1.12	140	23.68	8.48	0.053
A-3	0.50	3.14	1.12	140	29.08	8.48	0.053
B-1	0.50	2.58	0.70	140	23.85	5.33	0.053
B-2	0.50	2.56	1.12	140	23.68	8.48	0.053
B-3	0.50	2.60	1.50	140	24.07	11.42	0.053
C-2	0.50	3.89	1.10	140	36.00	8.37	0.053
C-3	0.50	3.91	1.09	500	19.33	8.31	0.015
D-1	0.29	2.55	1.11	140	23.61	8.46	0.053
D-2	0.50	2.56	1.12	140	23.68	8.48	0.053
D-3	0.79	2.56	1.12	140	23.67	8.50	0.053
E-1	0.50	2.60	1.10	100	29.01	8.36	0.077
1	0.50	2.21	1.52	100	24.64	11.57	0.077
2	0.50	2.21	0.70	100	24.62	5.33	0.077
3	0.50	2.30	1.07	100	25.66	8.12	0.077
4	0.50	4.90	1.55	500	24.20	11.78	0.015
5	0.50	4.67	0.75	500	23.06	5.69	0.015
6	0.50	4.97	1.12	500	24.54	8.49	0.015
7	0.50	2.63	1.09	140	24.34	8.25	0.053

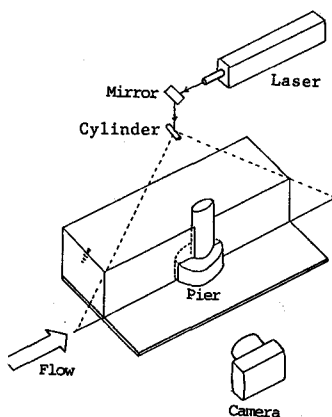


図-2 可視化実験装置

3. 実験結果および検討

3.1 洗掘特性

本研究で対象とした2段円柱橋脚においても、一様円柱橋脚と同様、橋脚側方から洗掘され始め次第に前方へと洗掘域が拡大してゆき、最終的には橋脚前面に最大洗掘深が生じる。図-3は、 $D_1/D_2 = 0.50$ 、 $\Delta Z/D_2 = -0.17$ の通水3時間後における等河床高線図を示したものであって、洗掘孔の形状は一様円柱の場合と全く同様逆円錐形であり、洗掘孔斜面の勾配も砂粒の水中静止摩擦角に等しい。すなわち、2段円柱橋脚においても洗掘孔の形状は洗掘深と砂粒の水中静止摩擦角によって規定されている。

図-4は、種々の $\Delta Z/D_2$ における橋脚前面での最大洗掘深の時間的変化を上部および下部円柱がそれぞれ単独の場合と比較したも

のであり、段面位置による洗掘過程の相違を要約すると次のようである。 $\Delta Z/D_2 > 0$ （段面が接近河床面上に露出）の場合における洗掘過程は一様円柱の場合と全く同様である。すなわち、洗掘孔内で実際に砂が流れによって洗掘されている領域は下部円柱にごく近い一部のみで、洗掘孔の斜面は洗掘深が増大すると砂粒の水中静止摩擦角を保つように砂が斜面から滑落し洗掘孔領域を拡大してゆくにすぎない。洗掘深およびその時間的変化率は上部単円柱のものより大きく下部単円柱のものよりは小さい。 $\Delta Z/D_2 = 0$ 、すなわち段面が接近河床面に一致している場合には、橋脚の後部から若干洗掘され始め、時間の経過とともにその

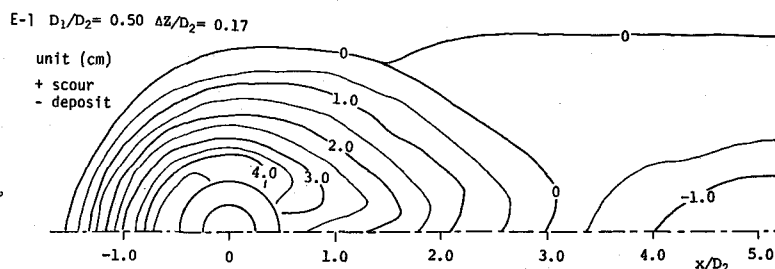


図-3 等河床高線図 (E-1)

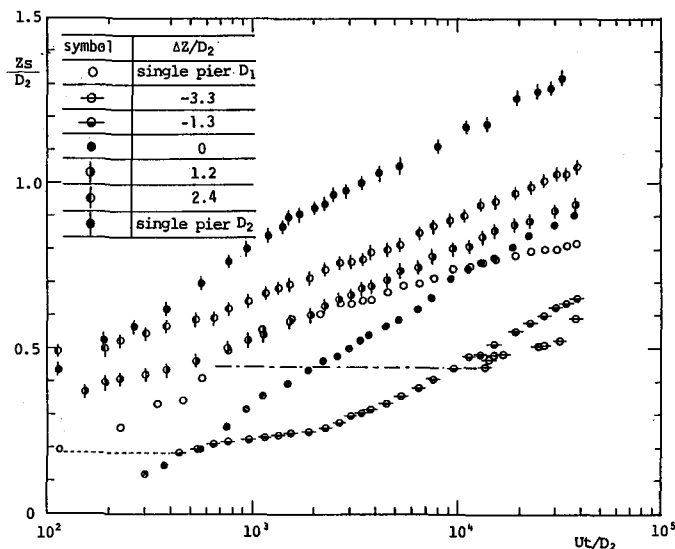


図-4 洗掘深の時間的変化 (E-1)

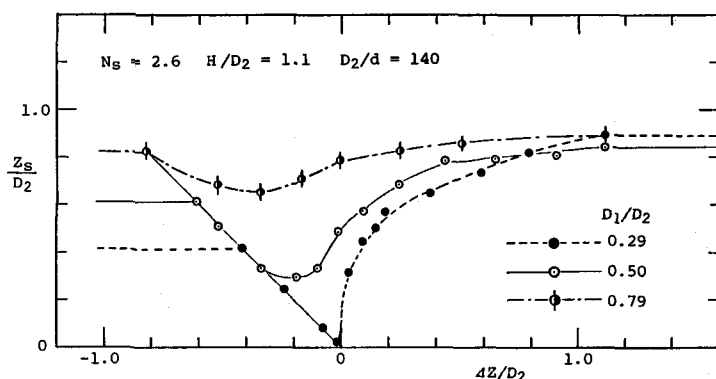


図-5 Z_s/D_2 と $\Delta Z/D_2$ の関係 (D_1/D_2 の効果)

洗掘領域は前部へと移動する。下部円柱が露出するに至って急激に洗掘深が増大し（その時間的変化率は下部単円柱でのそれにほぼ等しい）、最終的には上部単円柱の場合よりも大きな洗掘深を呈している。 $\Delta Z/D_2 < 0$ 、すなわち段面が河床面より下にある場合には、洗掘深が段面で頭打ちの状態が続くが、洗掘孔内の渦により洗掘領域は拡大していく。下部円柱が露出すると上部単円柱の場合よりも大きな洗掘速度で洗掘深が増大している。

上述した洗掘過程は2段円柱橋脚に固有のものであるが、定量的には式(1)のパラメーターに応じて異なったものとなる。

次に、各パラメーターが Z_s/D_2 と $\Delta Z/D_2$ の関係に及ぼす効果を検討すると次のようである。

1) D_1/D_2 の効果 (図-5) : D_1/D_2 には無関係に、段面が河床上にわずかに露出するだけで洗掘深は急激に増大し、この実験条件の場合には $\Delta Z/D_2 = 0.1$ 程度で上部円柱が単独の場合と同等の洗掘深となる。 $\Delta Z/D_2 (> 0)$ の増大に対する洗掘深の増大の割合は D_1/D_2 が小さい場合ほど大きく、このことから橋脚下部をモルタル等で固める工法は洗掘の観点よりみると安全性を脅かす要因となりうるということがわかる。

2) N_s の効果 (図-6) : N_s すなわち流速の増大とともに上部単円柱の洗掘深と等しくなる $\Delta Z/D_2$ は減少する。 $N_s = 3.89$ のものをみると $\Delta Z/D_2 \geq -0.15$ で上部単円柱のものより大きな洗掘深となっている。すなわち、段面が河床面より下であっても下部円柱がもつ洗掘促進効果が波及することを示唆している。

3) H/D_2 の効果 (図-7) : 本実験条件下においては、 H/D_2 の相違による有意な差は認められず、 $\Delta Z/D_2 = -0.3 \sim -0.2$ 程度において、上部単円柱の洗掘深の約50%程度となっている。

4) D_2/d の効果 (図-8) : N_s および H/D が一定の条件下においては、 D_2/d が小すなわち粒径 d が大き

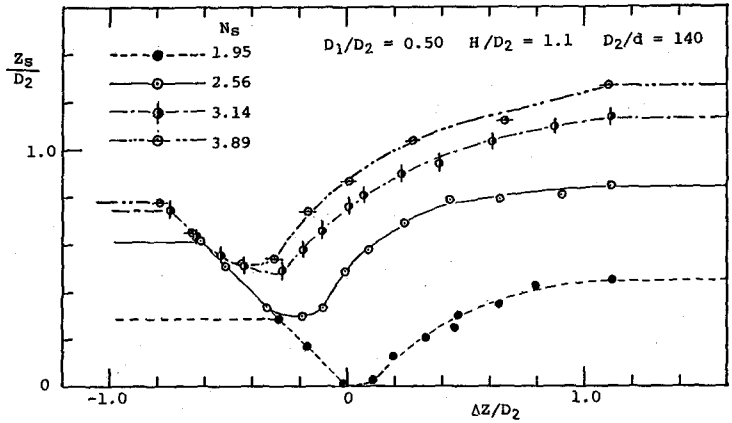


図-6 Z_s/D_2 と $\Delta Z/D_2$ の関係 (N_s の効果)

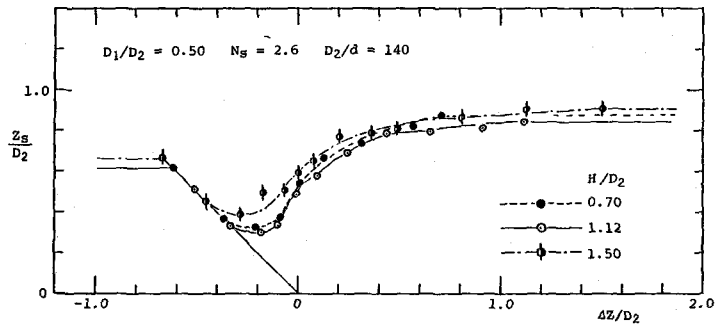


図-7 Z_s/D_2 と $\Delta Z/D_2$ の関係 (H/D_2 の効果)

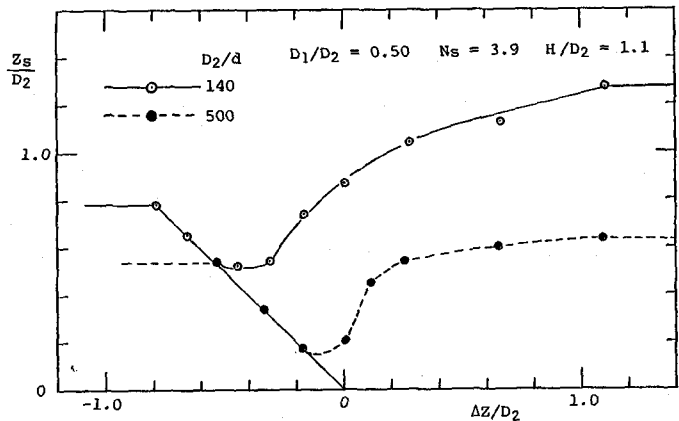
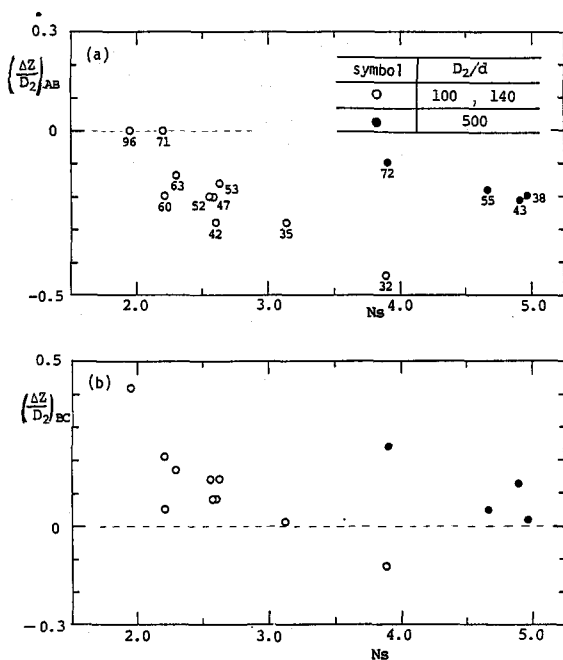
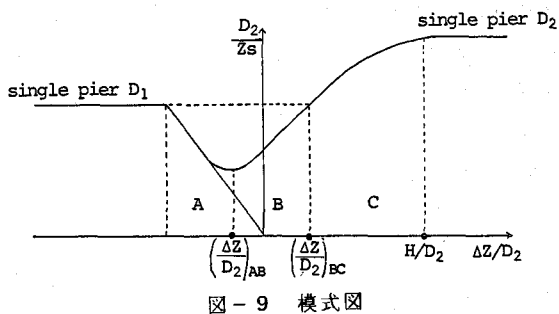


図-8 Z_s/D_2 と $\Delta Z/D_2$ の関係 (D_2/d の効果)

いほど洗掘深も大きい。また、上部単円柱と同等の洗掘深を呈する $\Delta Z/D_2$ は $D_2/d = 140$ および 500 に対してそれぞれ約 -0.10 および 0.25 程度であって、一定の N_s に対しては D_2/d が小さいほど $\Delta Z/D_2$ の増大による Z_s そのものの増大が顕著であるため、橋脚の安全性についての慎重な配慮が不可欠であることを示している。

以上に示した2段円柱橋脚における洗掘特性を上部・下部円柱の段面の高さに着目して要約すると図-9のようになる。すなわちAで示される $\Delta Z/D_2$ の領域は下部円柱が上部円柱橋脚の基礎としての効果をもつ領域であり、洗掘深は段面で頭打ちの状態である。Bで示される $\Delta Z/D_2$ の領域は、下部円柱が護床工的作用として上部単円柱よりも洗掘を抑制する領域である。Cは下部円柱が著しく洗掘を促進する領域である。このように領域区分される $\Delta Z/D_2$ の境界値は、前述したパラメーターに応じて変化する。いま、 $D_1/D_2 = 0.5$ の場合のみを取上げ、領域AとBおよび領域BとCの境界に対応する $\Delta Z/D_2$ をそれぞれ $(\Delta Z/D_2)_{AB}$ および $(\Delta Z/D_2)_{BC}$ と表わし、パラメーターとの関係を示すと図-10のようになる。図においては、 H/D_2 はその効果が微小であるとして削除している。 $(\Delta Z/D_2)_{AB}$ は N_s の増大とともに減少する傾向にあり $N_s = 2 \sim 4$ に対して $(\Delta Z/D_2)_{AB} = 0 \sim -0.45$ となる。なお図中



に併記した数値は、上部単円柱の洗掘深と比較した場合の軽減率を示しており、 $D_2/d = 100 \sim 140$ のものについてみると $N_s = 2.2$ に対して $60 \sim 70\%$ 、 $N_s = 3.9$ に対して 30% 程度洗掘深が軽減されることを意味している。一方、 $(\Delta Z/D_2)_{BC}$ も N_s の増大とともに減少する傾向にあり、 $N_s = 2.25$ では $\Delta Z/D_2 = 0.2$ であっても下部円柱が洗掘を促進する効果は波及していないが、 $N_s = 3.9$ では $\Delta Z/D_2 = -0.12$ すなわち段面が河床高より下であっても下部円柱が洗掘を促進させる効果が及び始めることがわかる。

3.2 流況特性

局所洗掘は局所流成分に起因するが、その局所流成分は時間的に変化する河床形状に応じてまた変化するため、洗掘の進行に伴う局所流特性を明らかにすることは現象の三次元性および非定常性により極めて困難である。

橋脚周辺の局所洗掘は、馬蹄渦および橋脚前面に沿う下降流に大きく支配される。馬蹄渦による循環は洗掘の進行とともに増大するが、その増大速度は減少し平衡状態に漸近する。循環の増大速度は、下降流によって供給される流量によって規定される。下降流の強さは主として橋脚径および接近流速によって規定され水深は下降流の強さに対しては支配的でなくしたがって洗掘に及ぼす影響も微小である。このことは図-

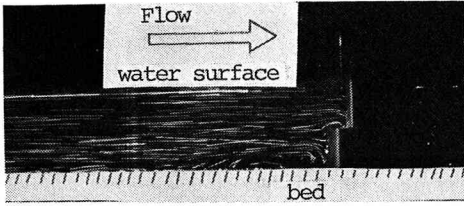


写真-1 中心縦断面内の流況

7からも推察される。

本研究で対象とした2段円柱橋脚の洗掘に対して、も上述した馬蹄渦および下降流が支配的な影響を及ぼすと考えられる。また、段面の位置に応じて路床近傍の流速も変化すると考えられる。したがって、この場合には、馬蹄渦、下降流および路床近傍流速の特性を把握することが必要である。ここでは、平坦固定床上に設置された2段円柱を対象として、これらの局所流況を検討することとした。

写真-1は、2章で述べた方法により撮影した中心縦断面内流況の一例である。 D_1/D_2 、 $\Delta Z/D_2$ 、 U および H/D_2 を系統的に変化させた条件下で同様な撮影を行ったが、ここでは $D_1/D_2 = 0.5$ について、 $\Delta Z/D_2$ の変化に対応する流況の変化を検討する。

図-11は、種々の $\Delta Z/D_2$ における中心縦断面内の流況を上部および下部単円柱のものと比較したものである($D_1 = 2.0\text{cm}$ 、 $D_2 = 4.0\text{cm}$ 、 $H = 8.0\text{cm}$ 、 $U = 4.5\text{cm/s}$)。円柱前面には表面に沿う下降流が認められるが、 $\Delta Z/D_2 = 0.125$ の場合には段面に下降流がぶつかり河床面に達していない。また下部円柱の前面に形成される渦も小さい。一方、 $\Delta Z/D_2$ が大きくなると下部円柱の表面に沿う下降流が河床面にぶつかり、とともに前面の渦も大きくなっている。現段階では下降流および渦の強さを定量的に評価できておらず、今後の課題である。

図-12は、段面の位置を系統的に変化させた場合の路床近傍の最大流速 $U_{\max}$ (円柱側面で生じる)と接近流速 U の比 $U_{\max}/U$ の変化を示したものである。なお、計測高さは $z = 0.4\text{cm}$ であり、 $D_2 = 8.0\text{cm}$ としている。これをみると、 D_1/D_2 には無関係に $\Delta Z/D_2 \geq 0.3 \sim 0.4$ において $U_{\max}/U = 1.6 \sim 1.7$ の一定値であって、路床近傍流速でみるかぎり、段高が下部円柱径の30~40%になると下部円柱が単独の場合と同様であることがわかる。一方、 $\Delta Z/D_2 \leq 0.3 \sim 0.4$ においては、 $\Delta Z/D_2$ とともに $U_{\max}/U$ は増大するが、 $\Delta Z/D_2 = 0.05 \sim 0.2$ においては上部単円柱($\Delta Z/D_2 = 0$ としている)場合よりも路床近傍流速は小さいようである。

以上に示した2段円柱周辺の流況を考慮に入れると、前述した洗掘特性をある程度説明することが可能であるが、定量的な検討は今後の課題である。

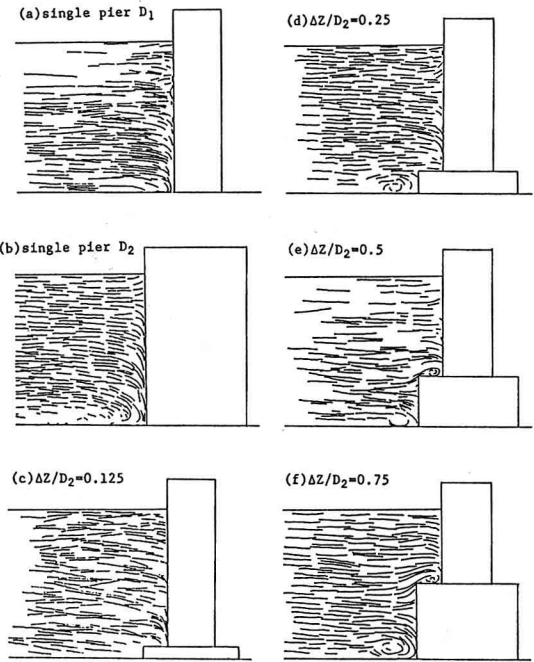


図-11 中心縦断面内の流況

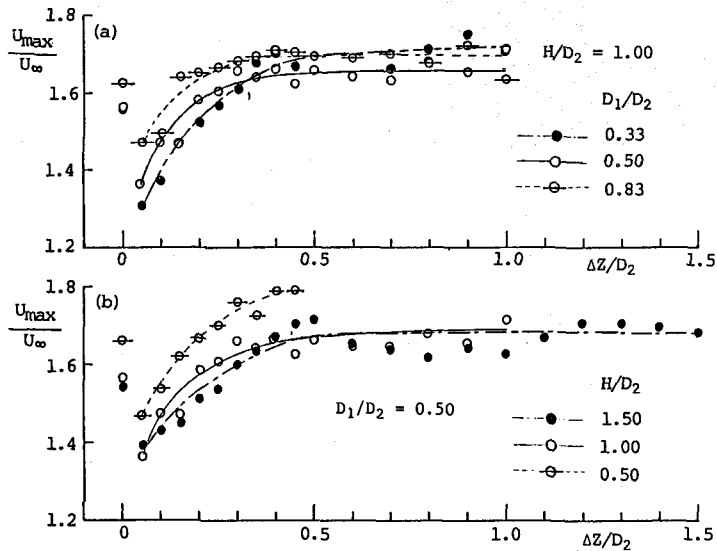


図-12 路床近傍流速の段高による変化

4. おわりに

下部が拡幅された橋脚のモデルとして2段の円柱橋脚を取上げ、局所洗掘特性に及ぼす下部円柱の効果について実験的検討を加えた。段の位置が河床面より若干高くなっただけで洗掘を促進させる場合と逆に抑制する効果を及ぼす場合のあることがわかった。このような洗掘特性を円柱中心を含む縦断面内における流れの挙動および路床近傍の流速を検討することにより定性的に説明することができた。

本研究により得られた主要な成果を要約して結論とする。

- 1) 2段円柱橋脚においても洗掘孔の形状は洗掘深と砂粒の水中静止摩擦角によって規定される。
- 2) 段面が接近河床面上に露出している場合の洗掘過程は一様円柱の場合と全く同様であるが、洗掘深およびその時間的变化率は上部単円柱のものより大きく下部単円柱のものよりは小さい。
- 3) 段面が接近河床面に一致している場合には、橋脚の後部から若干洗掘され始め、時間の経過とともにその洗掘領域は前部へと移動し、下部円柱が露出するに至って急激に洗掘深が増大する。
- 4) 段面が河床面より下にある場合には、洗掘深が段面で頭打ちの状態が続くが、洗掘孔内の渦により洗掘領域は拡大していく。下部円柱が露出すると上部単円柱よりも大きな洗掘速度で洗掘深が増大する。
- 5) 段面が河床高より下であっても下部円柱が洗掘を促進させる効果が及び始めることがある。
- 6) $\Delta Z/D_2$ が小さい場合には、段面に下降流がぶつかり河床面には直接達しない。また下部円柱の前面に形成される渦も小さい。一方、 $\Delta Z/D_2$ が大きくなると下部円柱の表面に沿う下降流が河床面にぶつかりるとともに前面の渦も大きくなっている。