

橋脚周辺洗掘の低減に関する杭の効果
Local Scour Restriction around Pier by Piles

宇都宮大学工学部 正 員 須賀 晃三
株式会社 白 石 正 員 藤田 宏一
” 小田 章治
パシフィック・C 正 員 松井 弘

1. 洗掘対策としての群杭

河床低下や河相変化が昭和40年代後半より顕著になった。その結果として、在来橋脚で根入不足となったものが、道路橋と鉄道橋を合わせると相当数にのぼる。これらの中の一部の橋脚は、洪水等により橋脚周辺の局所洗掘を受け倒壊などの被害を受けているのが現状である。そこで、根入れ不足の橋脚に対しては、従来より、ブロックによる保護工、根つぎ工や根固工などが施工されてきた。このうちブロック工に対する問題点としては、①橋脚周辺の保護工の範囲 ②施工高 ③ブロック同士のかみ合せ ④橋脚回りの掃流力に対するブロック重量 ⑤土砂の吸出しに対する布設層厚などがある。また、根つぎ工に対する問題点としては、河床低下の生じている所では、根つぎ工自身が河床より突出する為にさらに大きな局所洗掘が生じることがある等の問題点がある。これらに対しても、さらに研究の必要があると思われる。ところが、最近の河相変化による流速の増大が著しい場合に、ブロック工法が、さらには河床低下が著しい場合に、根つぎ工法が適当でない場合も出現し、他の工法の研究の必要性が高まっている。そこで、ここでは杭を用いて橋脚周辺の洗掘を軽減する方法について実験に基づいて考察を行う。

杭を用いた洗掘防止の実施例としては、水制（群杭水制、牛杓水制）、大型仮締切（局所洗掘防止対策）背割堤などがあり、その有効性が確められている。この場合に杭を群として用いる事の水理的な意味は、次の様に考えられる。① 流れの流速を低減させる。② 構造物に当る流れの流速分布を変形させる。③ 杭の後流域に土砂の堆積をさそう。また、群杭を施工する利点は次の点にあると考えられる。① 施工に対して自由度が大きい（杭の太さ、間隔、配置を自由に換えられる。）② 杭後流の広がり方を考慮する事により、少ない杭本数で広範囲をカバーできる。③ 1本の杭径が細い為に、杭自身は洗掘をほとんど受けない。④ 他の工法との併用も可能である。⑤ 杭を打った事によるマイナス効果が少ない。

2. 従来の研究と本研究の立場

杭を橋脚洗掘の対策に用いた従来の研究としては、Shen・Schneider・Karaki¹⁾、Chabert・Engeldinger²⁾、Chang・Karim³⁾および、宇民⁴⁾の研究などがある。このうち、宇民の研究は水理的な考察を詳しく行っている点で貢献度は大きく、評価される。そこで、次に宇民の研究概要と範囲を表-1示す。

表-1 宇民の研究概要

観 測 位 置	水路床状態	研 究 概 要 と 主 な 結 果
橋脚前方流れ	平坦固定床	○層流（レイノルズ数= 3.19）、乱流（レイノルズ数= 2.4×10^4 ）で理論的研究に加えて、橋脚全面の流れの可視化を行った。○馬蹄形溝に導入される流れは、主流内の対称面内近く $-r_0/5 < r_0/5$ の範囲より供給される。○馬蹄形溝が主流を排除する範囲は、 $(r_0 - r_0)/H = \alpha_1$ 、 $(r_0/H)m$ で与えられる。ここに r_0 : 橋脚半径 r_0 ; 排除半径 H : 水深 α_1, m_1 : $Rei = u_* H / \nu$ に関する関数
橋脚後方流れ		○層流、乱流状態について、橋脚後流の流れの可視化を行なった。○橋脚位置において、流れの対称面から橋脚の直径にほぼ等しい距離範囲にある流線は、後流はくり領域にまき込まれる。○乱流の場合、流下型渦の軸は水路床面にまで達しており、その軸付近に強い吸込みが存在する。
洗 掘 防 止	平坦固定床 移 動 床	○排除範囲の内側に杭を立てることにより、杭がなかった場合より排除範囲を縮小できる。○杭の最適径は橋脚径の1/10。○杭と橋脚の最適位置は、流れの対称面内に排除範囲上に設置したとき。このとき洗掘軽減率33%

つぎに、杭の実用化に際してさらに次のような問題点があると思われる。① 移動床では、橋脚周辺の局所流は、洗掘形状により変化するので、宇民が詳細に調べた平坦床上の流れと洗掘後の流れとの関係をさ

らに詳細に検討する必要がある。② 宇民の実験は水深・橋脚径比 $2.9/13.4 = 0.22$ で2次元性が強い条件下での実験である、そこで水深が橋脚の径に対して比較的大きい状態で流れの3次元性が強い場合の実験を行う必要がある。

③ 杭の後流域は、流れの Froude 数、Reynolds 数、により変化するので移動床実験をさらに水理条件を変えて行なう必要がある。④ 河川では、橋脚に当る流れは、河床波の形態などにより変化する。これに対して1本杭では不十分であり、群杭の効果についての検討が必要である。⑤ 杭の実用上の問題としては、杭を打つ位置の制約、流向の変化などが考えられこれらの諸条件をカバーしうる広い範囲の条件のもとでの研究が必要である。

本論文では、杭を橋脚洗掘の軽減に実用化する為の基礎資料を得る事を目的とする。そこで、①橋脚に当る流向や流れの強さの変化に対して杭を群として考え、その後流相互の干渉をはかり、単独杭の場合より、橋脚に当る流速の低減や流速分布の変形を強めることにより得られる大きな洗掘軽減効果、② 杭の最良位置を見つけるだけでなく杭を最良位置に施工できない場合に対して、杭本数、杭配列、杭と橋脚との間隔等を変え、これらが洗掘深に与える影響等を調べるために、水深が比較的大きく流れの3次元性が強い状態で流量一定のもとで移動床実験による検討を行うこととした。

3. 実験概要

実験水路は、長さ25m、幅1.2m、深さ0.8m（観測部分のみ1.1m）の二次元水路である。実験砂は、平均粒径 $d_m = 1.2\text{mm}$ 、均等係数 $D_{60} / D_{10} = 2.1$ 、比重 $G_s = 2.72$ 、水中安息角 $\theta = 33.1^\circ$ のものを30cm厚に敷き詰めた。ここでは、実験中に、補給砂を行なわない代りに、模型掘付位置より上流側の水路長を十分にとった。洗掘軽減は、杭の後流により行なわれるので杭径と橋脚径の比によりその効果は変化するものと思われるが、ここでは、群杭相互の間隔が洗掘軽減へ与える影響を見る為に、 $d/D = 0.13$ に設定した。橋脚径及び杭径は、それぞれ $D = 90\text{mm}$ 、 $d = 12\text{mm}$ の円柱を用いた。

表-2に実験ケース及び実験目的を示す。

表-2 実験条件

Run	実験目的	実験条件	杭間隔及び本数	群杭の模式図
A	杭本数による洗掘軽減効果の違いを調べ洗掘対策に必要な最小杭本数	$d/D = 0.13$	杭本数1本~5本 $L/D = 2.22$	
B	群杭の横断方向の間隔が変った時の最大洗掘深の発生位置、洗掘軽減率	$h_o/d_m = 83$ $h_o/D = 1.11$	$b/D = 0.56, 0.69$ $0.83, 1.11$	
C	杭3本の場合で中心杭の位置が変ったときの洗掘軽減効果と杭の後流相互の干渉する洗掘軽減効果	$Fr = 0.35$ $Rep = U_m \cdot D / \nu$ $= 3.1 \times 10^4$	$a/d = 0.1, 0.8, 3.7$ $5.5, 7.3, 12.5$	
D	橋脚と杭の間隔が変ったときの杭1本と3本の場合の洗掘軽減効果の違い	$\tau = 0.05$ (Clear water)	$L/D = 0.56, 1.11,$ $1.67, 2.22, 3.33$	
E	河床よりの杭長が水深より小さい場合で杭長の変化に対する洗掘軽減効果		$h_p/h = 0.2, 0.5, 0.8$	
F	Continuous sediment motion 状態での洗掘軽減効果	$d/D = 0.13$ $\tau = 0.06$ $h_o/d_m = 100$ $h_o/D = 1.33$ $Fr = 0.52$ $Rep = 5.0 \times 10^4$	$\tau = 0.07$ $h_o/d_m = 117$ $h_o/D = 1.56$ $Fr = 0.50$ $Rep = 5.3 \times 10^4$	杭1本、3本に対し $L/D = 1.11, 2.22$

本実験における時間-洗掘深の関係を図1に示す。これによると、Run(F-1)は、Scour with continuous sediment motionのために、通水後初期に平衡洗掘深が現われ、以後は、河床池の影響を受け、この付近を変動する。一方、Run(A-1)はClear water Scourのために通水開始2時間たっても、まだ最終洗掘深が現

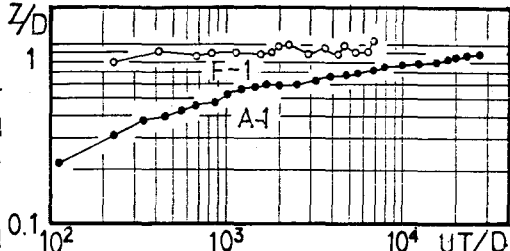


図-1 洗掘深の時間変化特性

われず洗掘深は、増加傾向にある。そこで、本研究では、便宜的に通水を30分で止め、各ケースについて洗掘深の比較を行なった。

4. 杭の本数と洗掘軽減効果

杭の洗掘軽減効果を調べるにあたり、まず、杭と橋脚との距離（L）を一定にして、杭本数を変えた場合の洗掘軽減効果の相違について調べる。まず、初めに橋脚前面に杭1本を置いた場合の実験結果と、宇民の実験との比較を表-3に示す。

表-3 本実験結果と宇民の結果との比較

	河床平均 径 (mm)	平均水位 (cm)	円 柱 橋 脚 径 (mm)	杭 径 (mm)	フルード 数	レイノル ズ 数	無次元 流 力	洗 掘 深 (杭なし) 橋 脚 径	杭橋脚間距離 橋 脚 径	洗 掘 深 (杭1本) 橋 脚 径	洗 掘 軽 減 率 %
本実験	1.2	10.0 ho/D=83	90 ho/D=1.11	12 d/D=0.13	0.35	3.2×10^4	0.05	0.73 (0.5hr)	1.11	0.51 (0.5hr)	29%
宇 民	0.5	2.9 ho/D=58	134 ho/D=0.22	13 d/D=0.10	0.50	7.6×10^3	0.117 著者推定	0.62 (2.0hr)	1.04	0.42 (2.0hr)	32.5%

宇民は、水深、橋脚径比(ho/D)が小さい所で実験しており、流れの2次元性が強いと思われるが、本実験においてho/Dを大きくして、流れの3次元性を強くした通水30分後の結果では洗掘軽減効果はあまり変わらなかった。次に、杭と橋脚間距離を $L/D = 2.22$ に一定して杭本数を変えて洗掘軽減効果を比較する。図2は、杭本数を変えたときの洗掘軽減率の比較と、その時の最大洗掘深の発生位置を示したものである。この場合杭1本の場合は、洗掘軽減率17%でその時の最大洗掘深の発生位置は、対称面より約50°である。一方杭2本の場合は、洗掘軽減率18%で最大洗掘深の発生位置は、0°つまり橋脚前面である。最大洗掘深の位置より判断すると、杭1本の場合は、宇民が示したように、馬蹄型渦の発生にかかわる主流部分が杭の後流はくり域内に含まれる為に馬蹄型渦が弱まる事による洗掘軽減効果である。

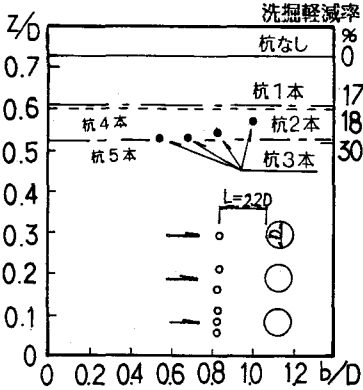


図-2 杭本数と洗掘深の関係

流速が減少する事による洗掘軽減効果である。Changらの言う杭のはくり域内に橋脚全体を含む為に一方、杭2本の場合は、最大洗掘深が橋脚前面で発生している事より判断すると、馬蹄型渦の軽減効果は少なく、洗掘軽減効果は主として流速が減少する事による効果と考えられる。したがって、杭4本では、対称軸上に杭がない為、馬蹄型渦の弱まる効果は小さく、また、杭5本では、杭の横断方向間隔を杭3本と同じにした場合は、流速低減効果は変わらない。従って群杭が、馬蹄型渦が弱まる効果と流速の減少効果の両方を持つには、最小杭本数として杭は3本必要である。

5. 杭の横断方向間隔と洗掘軽減効果

ここでは、杭3本の横断方向の間隔を変えて（橋脚と杭間隔は一定、対称軸上の杭は固定）、洗掘深に与える杭の横断方向間隔の影響について調べる。図3によると、杭3本の間隔つまり対称軸上の杭（以後中心杭と呼ぶ）は固定して、その両側の杭（以後側方杭と呼ぶ）が広がるにつれ中心杭のみを置いた場合の洗掘深に漸近する。このことは、杭の後流現象より次のように考えられる。流速低減に係わる円柱の後流は宇民の実験によると流れの対称面から円柱直径に等しい距離範囲にある流線が、後

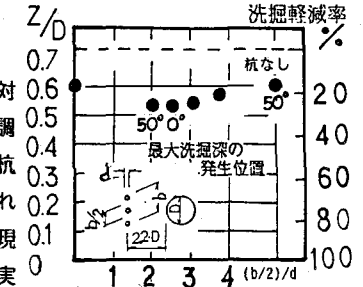


図-3 杭3本の横断方向間隔と洗掘深

図によると流れの対称面から円柱直径に等しい距離範囲にある流線が、後流はくり領域にまきこまれる。つまり1本の杭により流速が低減する範囲 B_p は、杭を中心として幅 $B_p/d = 2$ 付近といえる。また杭3本の場合では、洗掘軽減率が最も大きいケースは、 $(b/2)/d = 2.6$ となっており、 $(b/2)/d > 2.6$ より大きくなるに従がい、主流は杭後流にまき込まれず流速が低減することなく直接橋脚に当る範囲が増すこととなる。これより杭、橋脚と橋脚径比 $L/D = 2.2$ では

$B_p/d = 2.6$ 付近といえそうである。

また、この時の最大洗掘深の発生位置は杭1本の場合には、対称軸上より橋脚側方より約 50° の位置であるまた、杭3本の場合は $b/D = 0.7$ では 0° $b/D = 0.55$ では約 50° 位置に発生する。

これは、杭1本の場合は、流速を低減する幅は $B_p \approx 2d$ であり、 $B_p < D$ であるので橋脚側方には、流速が低減していない主流がそのまま当ることとなる。杭3本の場合でも、 $B_p = 0.90D < D$ の $b/P = 0.55$ の時は杭1本と同様に主流が橋脚側面に当たるため最大洗掘深は橋脚側方より生じるものと思われる。以上の事より、橋脚の流れ方向の投影幅のすべてを、杭の後流に含める事が洗掘対策上必要であると思われる。

6. 杭の縦断方向間隔

杭の縦断方向の間隔が、洗掘深に与える影響を見る為に、杭の横断方向間隔、杭と橋脚間距離を一定にして、中心杭だけを対称軸上で設定位置を変えた。

前述のように杭による洗掘軽減効果には、①対称軸近く的主流が杭後流に入る為に馬蹄型渦が弱まる事によるもの、②杭による流速低減効果によるものが考えられる。杭3本を置いた場合のその後流には中心杭を他の2本より上流に置いた場合は、中心杭の後流が広がる為に、外側の杭後流との間で干渉が生じ②による洗掘軽減効果は上がるが、一方、馬蹄型渦を弱める役目をする中心杭が橋脚より離れる為に①による洗掘軽減効果が減少する。

また、中心杭を近づけて設置した場合は、上記と逆の現象が予想される。

図4は、中心杭の位置が同じで、杭1本又は杭3本を置いた場合の橋脚前面の洗掘深を示す。これによると、中心杭の位置による洗掘軽減率の傾向を考察すると杭1本の場合は、杭が橋脚より遠ざかると急激に洗掘軽減効果が低下する

図5は、中心杭の位置が同じで、杭1本又は杭3本を置いた場合の橋脚前面の流速分布の関係に比べ杭3本の場合は、中心杭が遠ざかった場合でも、洗掘軽減効果はあまり変わらない。この事は杭1本の場合は、主に馬蹄型渦を弱める事により洗掘軽減を行なっているの、杭の位置が一定値より遠ざかると、後流が拡散する事によりこの効果が急激に低下するためと思われる。また、杭3本の場合は、中心杭が遠ざかり、馬蹄型渦を弱める効果は低下しても、中心杭が遠ざかるにつれその後流が拡散し、側方杭の後流と干渉し流速を低減させる、この為に洗掘軽減効果は急激に変化しないものと思われる。図5は、杭3本の場合について、中心杭の位置を変えたときの対称軸上で橋脚前面位置の流速分布を示す。これによる

と中心杭を橋脚より離せると、橋脚前面での流速もしだいに増し、杭2本の場合（中心杭がない場合）のそれに近づいていく。

この流速分布を用いて杭3本の場合について、中心杭の位置が変わった時の洗掘軽減率を、(I)流速の軽減による効果領域、(II)流速分の変形による効果領域とに分離をする。計算フローを図6に示す。

実際には、洗掘軽減効果は、(I)と(II)が非線形に作用していると思われるが、ここでは、これらを

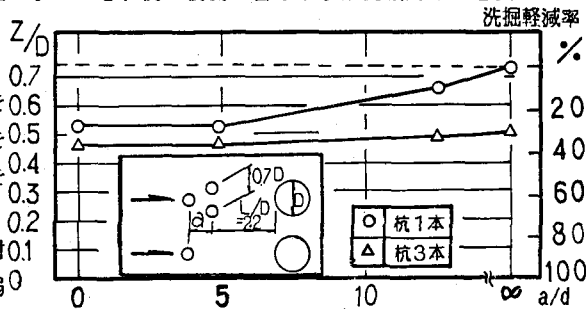


図-4 中心杭の位置と洗掘軽減率の関係

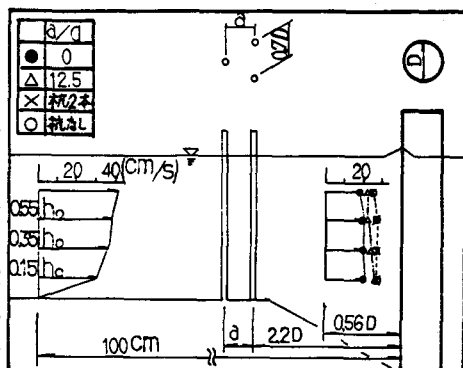


図-5 中心杭の位置と橋脚前面の流速分布の関係

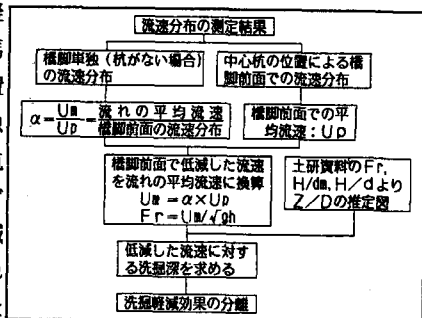


図-6 洗掘軽減効果の分離フロー

線形と仮定して扱った。図 7 により、杭 3 本の場合の橋脚前面での洗掘軽減は、流速の減少による効果が流速分布の変形による効果より、若干大きいと思われる。

7. 杭と橋脚との距離

これまでの議論は、橋脚と杭との距離（ L ）が一定の条件で行ったが洗掘軽減効果は、杭の後流により、行われるので、杭と橋脚間距離によりその効果は当然変化するものと思われる、ここでは杭相互の間隔を一定にして、杭と橋脚との距離のみを変え、洗掘軽減効果への影響を見る。

図 8 は、杭と橋脚間距離による洗掘深の変化を示したものである。杭 1 本の場合は $L/D > 1.7$ までは L/D が小さくなるに従い洗掘深は、減少するが、 $L/D < 1.7$ では洗掘深はほぼ一様となる。

Chabert, Chang らが示した最適な杭位置は $L/D = 1 \sim 1.5$ という結果とほぼ一致している。また、宇民の実験値では、彼のいう排除範囲上に杭を設置した場合つまり $L/D = r_0/D$ で軽減率が最大値を示している。

本実験の排除範囲を宇民の提案した式により計算すると $r_0/D = 0.94$ となり、本実験値とほぼ一致している。一方、杭 3 本の場合では L/D が小さくなるにしたがい洗掘深もほぼ比例的に減少していく。杭 3 本と杭 1 本のこのような洗掘減少傾向の違いは、次のように考えられる。

橋脚・杭間距離（ L ）が大きくなれば、杭の後流は拡散するために、橋脚をおおう杭の後流範囲は広がるが、杭 1 本の場合は、洗掘軽減を主に対称軸付近の流速の減少と流速分布の変形により馬蹄型渦を弱めることで行っているの、 L/D が小さくなるとこの効果が小さくなると思われる。 $L/D \approx 1 \sim 1.5$ の時に丁度、馬蹄型渦を発生させる橋脚前面の主流範囲（宇民によれば $-D/10 < y < D/10$ ）に杭の後流範囲が一致と思われる。杭 3 本の場合は、洗掘軽減を馬蹄型渦を弱める事と橋脚全体に当る流速を低減する事の双方により行っているの、橋脚・杭間隔が小さくなると洗掘軽減効果は、増加するが、 L/D が大きくなっても、杭 1 本の場合ほど洗掘軽減効果は低下しないものと考えられる。

8. 杭が水面より低い時の効果

以上の考察は、杭が水面より出ている場合の洗掘軽減効果について述べたものである。しかし、洪水時に杭を突出させておく事は、杭に流木などがかり流れを堰上げる等の問題がある。これに対処する為に杭を水面より低く設置した場合の洗掘軽減効果について考察を行う。河床よりの杭の突出量（ h_p ）を変えた時の洗掘軽減率を図 9 に示す。これによると、杭本数や L/D に関係なく、 $h_p/h = 1.0, 0.8$ では、洗掘軽減率に大差はなく、 $h_p/h < 0.8$ では、洗掘軽減率は h_p にほぼ比例して低下する。

宇民の実験によると流速分布を持った流れの中に円柱を置いた場合は、水深方向に流れのはくり点の位置が変るためにその後流に上昇流が発生している。杭を水面より低く設置した場合は、杭天端より上の流れ

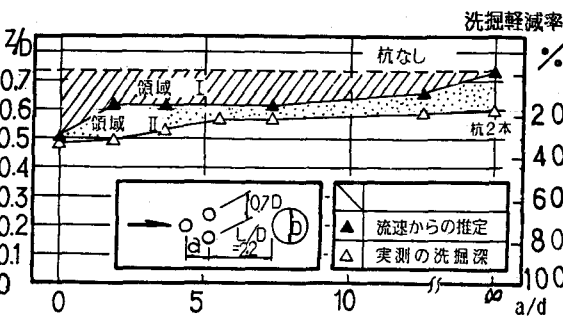


図-7 洗掘軽減効果の分離

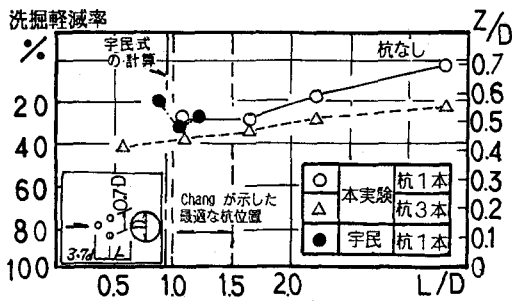


図-8 杭・橋脚間距離と洗掘軽減率

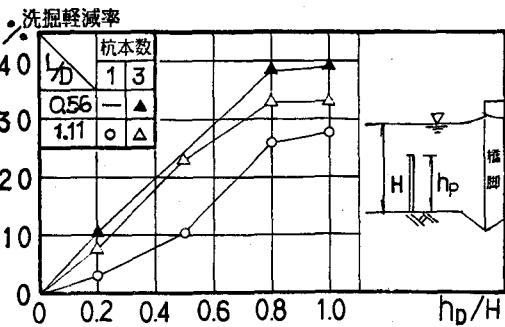


図-9 杭の長さ洗掘軽減率の関係

と杭の後流との間に、流速の差が生じるためにこの部分にも上昇流が発生するものと思われる。この上昇流が橋脚前面の下降流を軽減するために $h_p = 1.0h$ と $0.8h$ では洗掘軽減率は変わらないものと考えられる。

9. 水理量が変わったときの洗掘軽減効果

以上の考察は、Clear water scour の場合について、行なってきたがここでは、Continuous sediment motion の場合について、無次元掃流力 τ_* を変え、群杭による洗掘軽減効果の変化を調べる。図10によると Continuous sediment motion の場合は、橋脚・杭間距離が変わっても、Clear water Scour の場合より洗掘軽減率が減少している。この理由は、主流の流速が大きくなると主流に対する流速軽減率が減少する。主流の流速分布が水深方向に一樣となるため杭の後流での上昇流が弱くなるなどが考えられる。

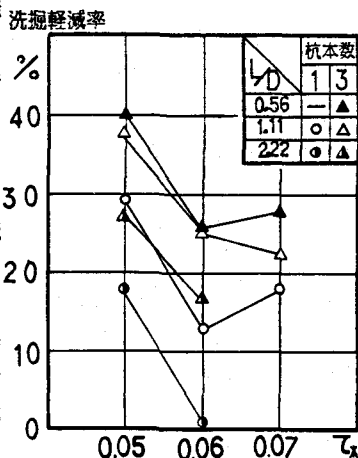


図-10 τ_* と洗掘軽減率の関係

10. ま と め

- (i) 群杭による橋脚洗掘の軽減を計るには、杭本数の最低単位は3本である。
- (ii) 杭3本の横断方向の間隔は、杭の後流に橋脚幅全てを含むように配置する。
- (iii) 杭3本の内の対称軸上の杭は、橋脚前面に生じる馬蹄型渦を弱めることにより洗掘軽減を計り、外側の2本は、橋脚をその後流域に含める事により流速を減じ洗掘軽減を行なう役割を持っている。これら二つの洗掘軽減効果は同等である。
- (iv) 杭3本の場合は、洗掘軽減を①馬蹄型渦を弱めることによる効果、②流速を低減することによる効果の両方より行なうので、中心杭の位置が最適位置よりずれても洗掘軽減効果は余り変わらない。
- (v) 杭を水面に水深の2割低く設けても、杭天端付近に生じるとされる上昇流のため洗掘軽減効果は変わらない。

今後の課題

今後は、群杭の実用化に向けてさらに ①水理量を種々変えそれらの洗掘軽減に及ぼす影響を見る ②流向に対する洗掘量の変化 等を課題とした。

参考文献

- 1) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki: Mechanics of local scour supplement methods of reducing scour, Civil Engineering Department Report CER66HWS36, Colorado State Univ., 1966, PP13-18
- 2) Chabert, J. and P. Engeldiger, Etude des affouillement autor des piles de ponts, Laboratoire National D'Hydraulique, 6 Quai Watier, CHATOU, Series A, 1956, PP45-53
- 3) Chang, F. M. and M. Karim: An experimental study of reducing scour around bridge piers using piles, South Dakota Department of Highways, 1972
- 4) 宇民正: 橋脚周辺の流れの機構と洗掘防止法に関する研究, 学位論文, 1975
- 5) 土研資料第1797号: 橋脚による局所洗掘深の予測と対策に関する水理的検討, 1982年 3月, PP. 46 ~ 49