

アーマ・レビー法尻工の水理設計

Hydraulic Design for Toe Works of Back Slope of the Armor Levee

建設省土木研究所 正 員 福 岡 捷 二

建設省土木研究所 正 員 藤 田 光 一

建設省土木研究所 正 員 〇加賀谷 均

1. はじめに

土木研究所では、越水による破堤をできるだけ少なくするための対策として、従来から、土堤表面に保護工を施した堤防、すなわちアーマ・レビーの検討を行ってきた^{1), 2)}。その結果、洪水外力に対する堤防のアーマ化の必要の程度に応じて、いろいろな型式および強度をもつアーマ・レビーの開発が行われてきた^{3) 4)}。この検討の中で、大きな超過洪水に対し、アーマ

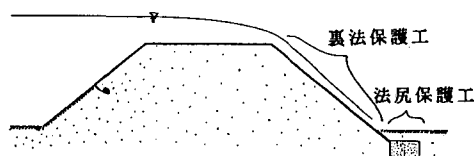


図-1 アーマ・レビーの基本構造

・レビーがその機能を十分発揮するためには、越水に対し十分な強度をもつ裏法が必要であることが明らかになった⁵⁾。この部分では、裏法を流下してきた越流水の流向が急激に変化するため、大きな力を受け、また保護工の終端にあたるため、その下流の堤内地において洗掘を生じる。この洗掘が大きくなると、法尻工の下から堤体土の吸い出しが起こり、裏法面が崩壊し、保護工の耐越水機能が損なわれる。しかし、洗掘防止のために、法尻に大規模な保護工を設置することは、堤防法尻際まで道路や人家がせまっている場合には困難である。本研究では、こうした問題を解決するため、堤内側にあまりスペースをとらずに、かつ堤内地の洗掘の影響が、裏法面に及ばないような法尻工の水理設計法について検討を行った。

法尻工のような構造物下流の洗掘問題については、従来から、岩垣・土屋らによる水門下流部における局所洗掘⁶⁾、斎藤による水平噴流による洗掘⁷⁾、鈴木・道上らによる床固め下流部の洗掘⁸⁾などの研究が行われているが、今回著者らが行った、法尻工下流部の洗掘に関する実験においては、大局的には従来の実験結果と類似しているものの、法尻工の直前面において、従来の実験では見られなかった局所洗掘孔が発生する。これは、法尻工の下からの堤体土の吸い出しに直接影響を与え、法尻工の水理設計上基本的に重要な問題となる。本研究では、この局所洗掘孔についても詳細な検討を行い、洗掘孔予測のための考え方を示す。

2. 法尻工に要求される機能とその基本構造

法尻工は、堤体と堤内地とを分離し、堤内地の洗掘が堤体に波及することを防ぐために、裏法尻に設置されるものである。法尻工に要求される機能は、次の4点である。1) 越流水を跳ねることにより、堤内地の洗掘を軽減する。2) 堤内地の洗掘が進行しても、堤体土の吸い出しを許さない。3) ブロックやシートなどによる裏法保護工末端をおさえる。4) 堤体内の水および雨水を排除するドレーンの機能をもつ。このような機能を満足する法尻工として、図-2のような基本構造が考えられる。この法尻工は次のような特徴をもつ。1) 法尻工の部材としてのふとんかごは、越水に対し十分な強度をもつと同時に、屈撓性に富み、変形に対しても柔軟に対応できる。また透水性が高くドレーンとしての機能にすぐれている。2) 法尻工の幅Bは、越流水を確実に跳ねる長さとする。

3) ふとんかごを地中に埋設し(埋設深H)、越水時における堤内地での水深を大きくとり、水クッション作用により流速の減勢を図る。4) 法尻工の高さDは、堤体土の吸い出しを防止するため、法尻工の直前面における法尻工天端からの最大洗掘深 Z_{sm1} よりも十

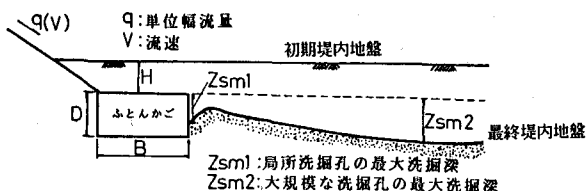


図-2 法尻工の構造および記号の説明

分大きくする。

3. 法尻工の水理設計の基本的な考え方

法尻工の設計に必要な諸量は、高さ D 、幅 B 、埋設深 H および越流水の力による破壊や転動に抵抗できる材質および重量である。材質および重量については、法尻工の部材として、ふとんかごを用いた実験により、鉄線の破断、ふとんかごの変形・転動、詰石の流出などについての検討を行った。また、長期間にわたる腐食に耐える材質のものとして、鉄線のかわりにプラスチックネットを用いたふとんかごについても同様の検討を行った。その結果、ふとんかごを用いた法尻工が、越水に対し十分な強度をもつことが明らかになった（5節）。法尻工の高さ D は、堤内地の洗掘による法尻工の下からの堤体土の吸い出しを防ぐのに十分な大きさでなければならない。すなわち、高さ D は、法尻工の直前面の法尻工天端からの洗掘深 Z_{sm1} よりも大きいことが必要条件となる（ $D > Z_{sm1}$ ）。したがって、法尻工下流の洗掘特性を明らかにするための検討を行った。実験によれば、高さ D は0.5m以上あれば十分安全であるという結果が得られている（6節）。法尻工の幅 B は、法尻工下流の洗掘を軽減させるため、越流水が直接堤内地に当たらないような長さが必要である。したがって、少なくとも越流水深より大きな長さをとっておく必要がある。なお、 B を長くすれば流速の減勢区間も長くなるため、洗掘深をさらに減少させることができる。埋設深 H は、水クッションによる越流水の流速の減勢効果を期待するような場合には重要となってくる。すなわち、越水が始まれば法尻工天端までは容易に洗掘されるが、 H が大きいと法尻工天端までの水深も大きくなるため、越流水が法尻工に当たるまでに、水クッションにより流速を減勢させる効果も大きくなるからである。しかし、法尻工の幅 B および埋設深 H は、堤内地の土地利用の制約から、必ずしも流速を十分減勢させるほどの大きさを求めることは困難である。そこで、ここでは法尻から堤内側へのスペースを限定した場合について、幅 B と埋設深 H の検討を行った（7節）。

4. 実験の概要

実験は、幅2.3mの水路に、堤防高さ2.0m、天端幅4.0m、裏法勾配2割の大型堤体模型を製作し、越流水による法尻工下流の洗掘状況を調べるものである。模型の表法および天端はコンクリートで造られ、裏法面は防水シートで覆われている。したがって河川水および越流水による浸透や侵食を一切許さない構造となっている。これは、堤体表面を止水構造にするという、アーマ・レビーの基本方針に基づいていると同時に、裏法から先に崩壊することがないようにして、法尻に注目した実験ができるようにしたものである。裏法尻には、高さ0.5m、幅1.2mのふとんかごあるいはコンクリートブロックによる法尻工を、初期堤内地盤高から0.2mの深さに設置している。法尻工の強度の検討にあたってはふとんかごを用いたが、洗掘特性の検討にあたってはコンクリートブロックを用いた。ふとんかごの場合、詰石や鉄線による表面の凹凸が激しいため、越流水が不規則に跳ねて、これが洗掘形状にも影響を与える。法尻工下流の洗掘形状の基本的理解には、コンクリートブロックのように表面がなめらかなものが適している。裏法および法尻工の下流7.0m区間は、平均粒径 $d_m=1.0\text{mm}$ の砂の移動床とした。単位幅当りの越水流量 q は、実際に現地で生じうるような規模を想定して、 $0.1\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m} \sim 0.8\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の範囲で検討を行った。越水時間は、法尻工の強度の検討においては、3時間程度（総越流量 $6000\text{m}^3/\text{m}$ ）とし、洗掘特性の検討においては、それぞれの流量について堤内地の洗掘がほぼ平衡状態に達する20分間とした。

5. ふとんかごを用いた法尻工についての実験結果の概要

図-4は、法尻工下流の洗掘深の縦断変化を示したものである。その結果、3時間以上の越水を受けた後でも、また $q=0.8\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の越水を受けた場合にも法尻工天端

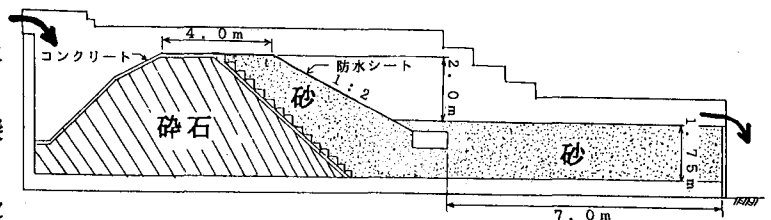
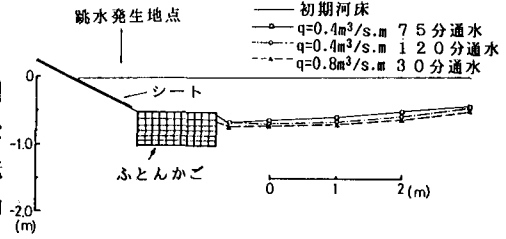


図-3 堤体模型側面図

からの最大洗掘深は0.2m程度で、堤体土が吸い出されるまでには至らなかった。また、水跳ね機能を損ねる程のふとんかご内の石の移動も見られず、越流水によって生じる引張力に対しても、鉄線およびプラスチックネットが十分な強度を持っていることが確認された。しかし、堤内地の洗掘による堤体土の吸い出しに対する安全性については、力学的考察にもとづいた定量的な評価が必要である。そのため、法尻工下流の洗掘機構についてさらに詳細な検討を行う。

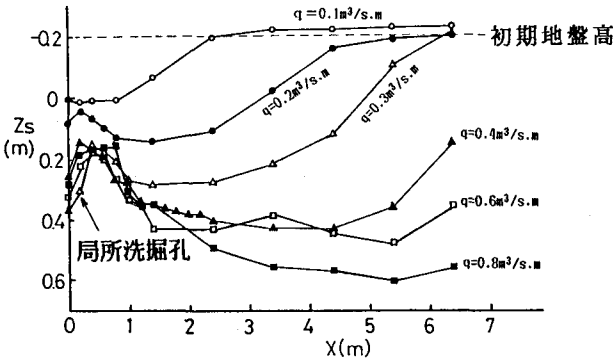


図一四 法尻工下流の洗掘状況

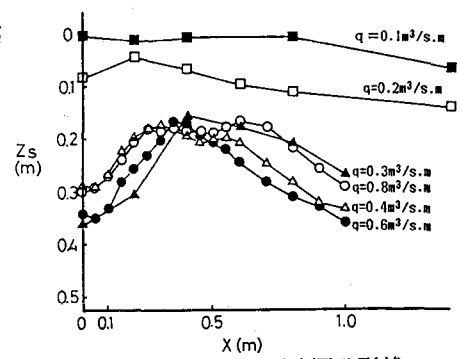
6. 法尻工下流の洗掘特性

6.1 洗掘形状

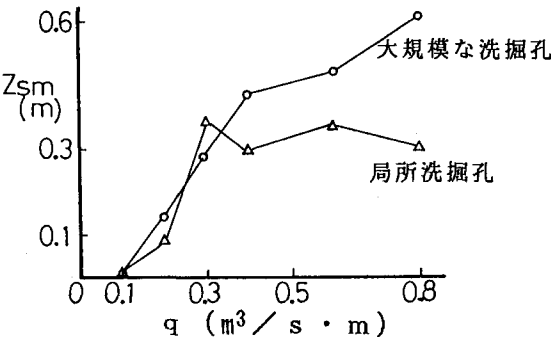
法尻工下流の洗掘特性の解明にあたっては、その機構を精度よく調べるために、コンクリートブロックによる法尻工により検討を行った。図一五は、各越水流量における堤内地の洗掘形状を示したものである。なお、洗掘深 Z_s は法尻工天端を0とし、深さ方向をプラスとしている。これによると、法尻工下流の洗掘は、流量の増加とともに進行し、それにともなって、最大洗掘深の発生位置は下流側に移行している。また、法尻工の直前面には特徴的な局所洗掘孔の発生がみられる。図一六は、局所洗掘孔を拡大して示したものであり、図一七は、局所洗掘孔およびその下流の大規模な洗掘孔の最大洗掘深 Z_{sm1} 、 Z_{sm2} と越水流量との関係を示したものである。この図によると、大規模な洗掘孔の最大洗掘深 Z_{sm2} は、流量の増加とともに大きくなるが、局所洗掘孔の最大洗掘深 Z_{sm1} は、ある越水流量までは単調増加し、これ以上の流量になるとほぼ一定になる。すなわち、今回堤内地材料に用いた平均粒径1.0mmの砂の場合には、越水流量が $q=0.3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 以上になると、局所洗掘孔の最大洗掘深は、0.3m~0.4mで一定になる。法尻工の設計においては、この局所最大洗掘深が重要であり、また越水しても破堤しない場合には、 $q=0.8 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 以上の越水流量は通常は起こり



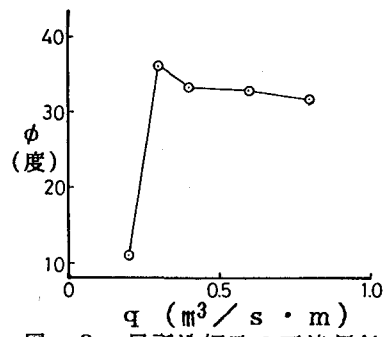
図一五 洗掘形状



図一六 局所洗掘孔形状



図一七 越水流量と最大洗掘深の関係



図一八 局所洗掘孔の下流側斜面の角度

得ないことから、法尻工の高さDは、0.5m以上あれば安全であると判断される。図-8は、局所洗掘孔の下流側斜面の角度を示したものである。これは、従来からいわれている水中安息角とほぼ一致している。

6. 2 従来の研究との比較

法尻工下流の洗掘形状と、従来から行われている噴流あるいは床固め下流部の流れによる洗掘特性との類似点および相違点を明らかにするため、洗掘孔形状を無次元化表示して比較してみた。図-9は、洗掘孔形状を深さ方向については最大洗掘深 Z_{sm2} 、長さ方向については洗掘孔の長さ L で無次元化し、斎藤の水平噴流の実験結果⁷⁾とともに示したものである。これを見ると、法尻工の直前面の局所洗掘を除いて大局的には水平噴流による洗掘特性とよく似た性質を示すことがわかる。図-10は、洗掘孔形状を深さ方向および長さ方向ともに最大洗掘深 Z_{sm2} を基準長として無次元化表示したものである。これによると、岩垣・土屋ら⁶⁾による下流水深が十分大きい水門下流の洗掘現象は、下流水深が小さい法尻工下流の洗掘孔形状とはかなり違っている。しかし、鈴木・道上ら⁸⁾が行った床固め下流部の洗掘のように、下流水深が小さい場合とはよく似た洗掘孔形状を呈している。ただし、床止工下流の場合にも局所洗掘孔の発生はみられない。下流水深の影響を把握するため、下流水深と噴出口の大きさとの比を示したのが表-1である。これによると、今回の著者らの下流水深に関する実験条件は、岩垣・土屋らと鈴木・道上らとの中間に位置していることがわかる。法尻工の直前面における局所洗掘孔の発生を支配する原因としては、砂の平均粒径、噴出口における流速（構造物の大きさに起因するスケールの効果）などが考えられる。そこで、表-2に砂の平均粒径、表-3に噴出口での流速を示した。これによると、平均粒径は従来の実験の範囲内にあるが、流速は従来の実験に比べて大きいことがわかる。したがって、この高流速に起因して、法尻工の直前において局所的な渦が発生し、この渦によって局所洗掘孔が形成されていると考えられる。この渦の存在と局所洗掘孔の関係については、ガラ

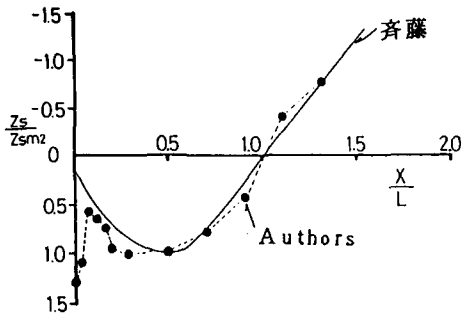


図-9 洗掘孔形状 (最大洗掘深、洗掘孔長で無次元化)

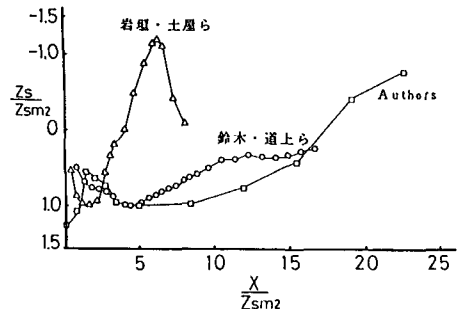


図-10 洗掘孔形状 (最大洗掘深で無次元化)

表-1 下流水深と噴出口との比

著者	h_o/B_o
斎藤 ⁷⁾	1 ~ 3.0
鈴木・道上ら ⁸⁾	1.08 ~ 1.12
岩垣・土屋ら ⁶⁾	2.3 ~ 6.0
Authors	3.4 ~ 4.9

表-2 砂の平均粒径

著者	d_m (mm)
斎藤	0.27 ~ 4.35
鈴木・道上ら	0.64
岩垣・土屋ら	0.22 ~ 7.5
Authors	1.0

表-3 噴出口での流速

著者	U_0 (m/s)
斎藤	0.35 ~ 2.0
鈴木・道上ら	0.45 ~ 0.66
岩垣・土屋ら	0.61 ~ 3.36
Authors	4.3 ~ 5.0

ス張り大型水路を用いた実験により詳細に検討している。法尻工下流の流況の概略を図-11に示す。

7. 法尻工の幅Bおよび埋設深Hの検討

設計にあたっては、堤内側に大きなスペースをとらない法尻工の開発が望まれている。

したがって、ここでは、法尻からのスペースを1.2mに限定した場合について幅Bと埋設深Hの検討を行った。法尻工のタイプは、図-12に示すように、A, B, Cの3種類である。タイプAの法尻工は、他のタイプに較べて、越流水を確実に跳ねることをねらったものである。しかし、埋設深が浅いため、下流水深は小さくなり、水クッションによる流速の軽減効果はあまり期待できない。タイプBは、タイプAよりも埋設深を0.2m深くしたものである。この場合、タイプAに較べて、流速の減勢機能は増大するが、水跳ね機能は逆に低下する。タイプCは、タイプBよりもさらに埋設深を大きくしたものである。この場合、越流水の水跳ね機能は極端に小さくなり、水クッションのみで洗掘をおさえることになる。図-13は、法尻工としてタイプA, B, Cを設置した場合のそれぞれの洗掘形状を示したものである。洗掘深の基準高は、法尻工天端を0とし、深さ方向をプラスとしている。それぞれのタイプを比較すると、タイプAは、全体的な洗掘に比べ、法尻工の直前面の局所洗掘が著しく大きくなっている。これは、下流水深が小さく流速が減勢されないため、前述した局所洗掘孔が発達したためである。タイプBは、最大洗掘で比較すれば、3つのタイプのなかで最も小さい値を示している。これは、水跳ね機能と流速の減勢機能の両者がうまく噛み合った結果といえる。タイプCは、水跳ね機能がないため、法尻工直下流が著しく洗掘されている。以上から、裏法からの越流水を効果的に跳ね得るようなBとHを定める必要があることがわかる。

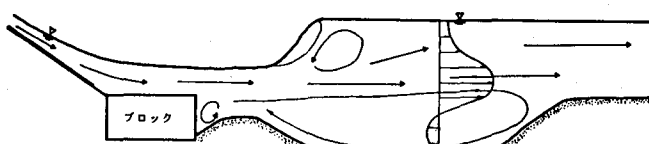


図-11 法尻工下流の流況概略図

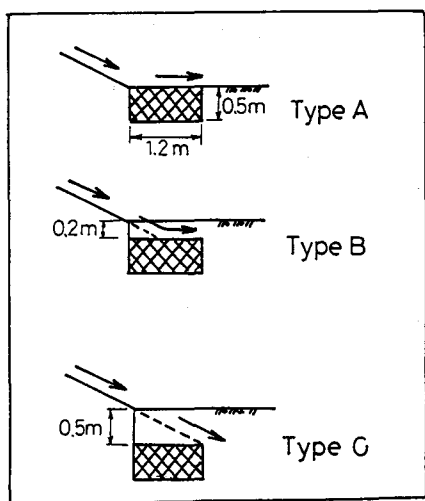


図-12 法尻工のタイプ

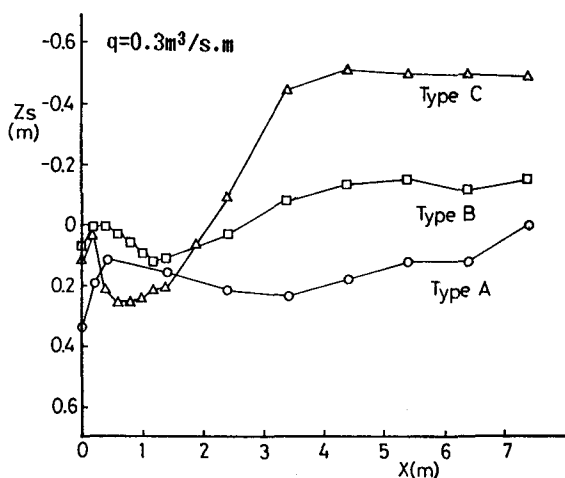


図-13 法尻工のタイプ別洗掘形状

8. 局所洗掘孔の最大洗掘深 Z_{s1} についての考察

以上の実験結果から、法尻工の水理設計に必要な知見がほぼ示された。しかし、法尻工にとって危険な直前面の局所洗掘孔の深さ Z_{s1} については、限定された実験条件（特に粒径について）での結果しか得られておらず、より一般的に Z_{s1} を予測する手法を検討する必要がある。前述したように、局所洗掘孔の下流側斜面の角度は安息角になっており、このことは、この斜面に上方から土砂が供給され、洗掘孔底部への砂の崩落が生じていることを示している。また、洗掘孔の底には平坦な部分が存在しており、中川・鈴木⁹⁾、辻本¹⁰⁾らの橋脚前面の土砂移動に関する考察から類推して、ここでは、図11に示した洗掘孔内に形成され

る渦により 砂が強くまき上げられていると考えられる。以上より、局所洗掘孔付近では、次のような土砂移動が起こっていると考えられる。(図14参照)局所洗掘孔の下流側からは、大規模な洗掘孔の底面に生じる逆流によって土砂が入り、局所洗掘孔内に入ったこの土砂の一部は洗掘孔下流側斜面に堆積し、残りは洗掘孔外へ出る。一方、局所洗掘孔の底では、渦により砂がまき上げられ、一部は下流側斜面に沈降するものの、残りは洗掘孔外に放出される。下流側から局所洗掘孔に供給される流砂量と渦により洗掘孔外に放出される流砂量の差によって洗掘深の時間変化が決る。 Z_{sm1} が平衡に達した状態では、両者が等しくなることから、平衡状態に達した Z_{sm1} を表現する次式が得られる。

$$L_1 \cdot p_1 \cdot d \cdot p_{e1} = q_{B2} \cdot p_{e2} \quad (1)$$

ここで、 L_1 ：局所洗掘孔底部の平坦部分の幅、 p_1 ：平坦部分からまき上げられる砂のpick-up rate (局所洗掘孔内に形成される渦による洗掘孔底部直上の流速 u_1 と粒径によって決る)、 d ：砂の粒径、 p_{e1} ：まき上げられた砂が局所洗掘孔外へ放出される確率、 p_{e2} ：下流からの砂が局所洗掘孔内に堆積する確率、 q_{B2} ：下流からの流砂量、である。 q_{B2} は、局所洗掘孔の下流側斜面の頂上付近の逆流強度により決り、これを代表する流速を u_2 とする。 u_2 は、段落ち流れの逆流強度から推定することが可能と考えられる。この逆流強度は、主流の流速だけでなく段差にも関係する。局所洗掘孔の形状が相似であると仮定すれば、 Z_{sm1} と段差との関係が既知となるので、従来の実測の結果から逆流強度と主流速及び段差との関係を与えればよい。 u_1 は、円柱前面に形成される渦の強度についての辻本の解析結果¹⁰⁾から類推して、 u_2 と同じオーダーを持つと考えることができるが、両者の比については明らかとなっていないので実験的に調べる必要がある。 L_1 は、局所洗掘孔内の渦径にほぼ等しいと推定されるので、この渦径と Z_{sm1} との関係を実験的に明らかにすることにより得ることができると考えられる。 p_{e1} と p_{e2} については、step lengthとの対応がまず考えられるが、図14からわかるように、まき上げられた砂を運ぶ流速が鉛直上向き成分を持つなど流れの二次元性が強く、また洗掘孔下流側斜面が大きな傾きを持っていることから、従来から検討されている平坦河床での結果をそのまま用いることはできない。まき上げられた砂粒の経路を渦の流速と重力の効果を考慮して追跡するか、あるいはこの現象を浮遊砂の輸送過程ととらえ¹¹⁾、浮遊砂の拡散解析を行い、これらを通して、 p_{e1} 、 p_{e2} と洗掘孔の大きさ、粒径、渦の強度との基本的な関係を明らかにする必要がある。これらが可能となれば、実験的検討と合わせて、 p_{e1} 、 p_{e2} の評価が可能になると考えられる。

<参考文献> 1)福岡正己：河川堤防強化による新治水方式について、土木研究所報告，第138号，1970。 2)北野 章：青木 清・山村和也・久楽勝行：堤防補強法の一試み，土木技術資料，Vol.12, No.6, 1970。 3)須賀堯三・石川忠晴・葛西敏彦：越流水による堤防の破壊特性その3，第25回水理講演会論文集，1981。 4)加藤善明：橋本 宏・藤田光一：堤防の耐越水化に関する実験的研究，第29回水理講演会論文集，1985。 5)加賀谷均・福岡捷二・藤田光一：防水シートを用いたアーマ・レビー（耐越水堤防）の開発，第41回年次学術講演会，1986。 6)岩垣雄一・土屋義人・今村正孝：水門下流部における局所洗掘に関する研究(1)，京大防災研究所年報，第8号，1965。 7)斎藤 隆：水平噴流による洗掘に関する研究，土木学会論文報告集，第282号，1979。 8)鈴木幸一：道上正規・川津幸治：床固め直下流部の流れと局所洗掘について，第26回水理講演会論文集，1982。 9)中川博次・鈴木幸一：橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究，京大防災研究所年報，第17号B，1974。 10)辻本哲郎：流砂量変動に伴う円柱周辺の局所洗掘深の変動，土木学会論文集第375号II-6, 1986。 11)赤司信義・斎藤隆：鉛直もぐり噴流による洗掘深の予測について，第28回水理講演会論文集，1984

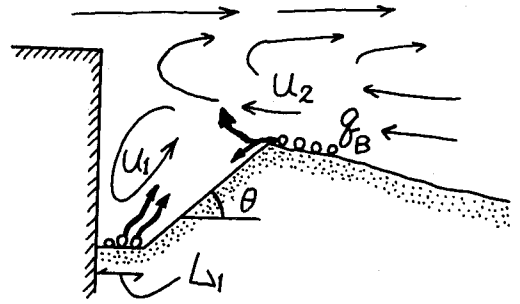


図14 局所洗掘孔付近の砂移動の機構