

パイピングによる破堤過程と「月輪工」の効果の評価

PIPING PROCESS TO REACH BANK BREAK AND EVALUATION OF EFFECT OF TRADITIONAL FLOOD FIGHTING TECHNOLOGY "TSUKINOWA"

高木不折¹・辻本哲郎¹・鷺見哲也²・井関明子³

Fusetsu TAKAGI, Tetsuro TSUJIMOTO, Tetsuya SUMI and Akiko ISEKI

¹正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工修 名古屋大学大学院助手 工学研究科地圏環境工学専攻

³学生会員 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程学生

The bank failure is caused by (1) slope sliding promoted by seepage; (2) development of piping due to seepage flow; (3) side-bank erosion by flood flow; and (4) surface erosion of bank by over-topping flow. Among them, the piping process was not well described based on the mechanism, though the criterion of piping was discussed. In this paper, seepage flow analysis is conducted with the development of cavity due to piping and the development of the cavity is related to the seepage discharge which transports fine material composing the levee. To prevent bank failure due to piping during flood, a supplementary dike with the shape of crescent is often constructed as a traditional flood fighting technology, which is called "Tsukinowa." The effect of this method is also evaluated by using the present analysis.

Key Words : Bank break, piping, seepage, flood fighting technology

1. はじめに

破堤様式には、越流、漏水、洗掘の3形式があり、また漏水破堤はすべりによるものとパイピングによるものに大別される。この中で、パイピングについては他の様式での破壊に比べて破堤にいたる機構が、とくにプロセスとして必ずしも十分研究されていない¹⁾。安全指標としては限界動水勾配や限界流速が主として土質力学の分野で検討されているが(たとえば、西田・青山²⁾)、プロセスについては、河野・西垣³⁾が進行性破壊と捉え、様々な様相で二次元化した実験的検討を行っているのが特筆される。本研究では、二次元浸透モデルを用いて鉛直二次元断面における浸透流解析によって、パイピングの進行をもたらす土砂の抜け出し方向を予測するとともに、浸透流量と抜け出し量とを関係づけて、パイピングによる空洞化を数値計算の中で具体化する。すなわち、空洞化の進行途上状態での浸透流解析を行い、パイピングの進行を記述することを試みた。

パイピングに対する伝統的な水防工法としてしばしば「月輪工」が採用される。これは、とくに法尻

に浸出点が現れる場合、これを囲むように三日月形状の副次的土堤を築いてパイピングの原因である外水位と内水位の差を減じようとするものである(図1のイラスト参照)。1976年の長良川洪水でも30箇所にはのぼる構築例がある¹⁾。浸出点が堤内地の平坦な場所にある場合には「釜段」となる。「月輪工」は我が国だけでなく、たとえば、1997年のオーデル川洪水の際も頻用された⁴⁾。この「月輪工」について、そのモデルを上述の数値解析に組み込み、その効果を評価することとした。また「月輪工」が効果を発揮するためには、パイピングがある限度以上進行する前に施工することが必要で、その見極めについても議論する。なお、河野・西垣³⁾も前述の理想化された条件でその進行性破壊防止の効果を実験的に検討している。

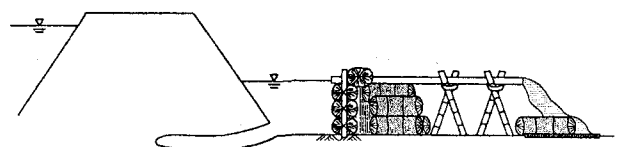


図1 パイピングと「月輪工」

2. モデル化と解析手法

本研究では、パイピングを河道側に向かって「穴」が形成される現象ではなく、浸透水によって小さな土粒子が洗い出され、粗い砂や礫だけが残る「透水性の高い水の通ridor」が形成される現象として捉える。またパイピングは3次元的に発生するものであり本来3次元で解析するべきであるが、簡単のため鉛直2次元問題として扱う。縦断方向に連続する断面でもっとも弱点の部分を取り上げているということになる。

浸透現象の基礎式としては、不飽和領域まで拡張されたRichardsの式を用いる。すなわち水の圧縮性や土壌の骨格構造の変化を無視し、不飽和地下水に関するDarcy則の透水係数が体積含水率 θ の関数であると仮定している。

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right\}$$

ここに、 $C (= \partial \theta / \partial \psi)$: 比水分容量, $K(\theta)$: 不飽和透水係数, θ : 体積含水率, $\phi (= \psi + z)$: 水理ポテンシャル, ψ : 圧力水頭 (不飽和では毛管吸引力として負圧をとり, 飽和では正の水圧となる), t : 時間, x : 水平距離, z : 基準面からの鉛直差である。この方程式を解くには、土壌水分量, 圧力水頭, 透水係数の3つの変数における相互関係, θ - ψ 関係 (水分特性曲線), K - θ 関係 (不飽和透水特性) が必要である。

本研究では図2のような堤防モデルを考え、大西・西垣の浸透流解析プログラム⁵⁾を用いてパイピングの進行過程を鉛直2次元問題として解析を行った。

基礎地盤の厚さ (2.0m), 堤高 (6.0m) を一定とし、法面勾配 $m:n$ (表法, 裏法の勾配は同一とした), 天端幅 B についてはそれぞれ2通りの値を与えた。法面勾配としては日本の堤防の標準的な値である2割と、オーデル川の堤防を想定した1.5割とした。天端幅は堤高と同じ6.0mとその半分の3.0mとし、これら

のパラメータを組み合わせる4通りの堤防モデルを考えた (表1)。

堤内地側には排水路を設置した。図中の堤防敷幅 L は天端幅と勾配によって決定される。また、河川水位 H は任意の値をとることができる。本研究ではパイピングの進行過程においても一定の水位を保っているものとし、浸透流は定常状態での解析とした。なお、不透水地盤は台形堤体モデルの下端から2.0m下方に想定してある。また、土質材料は堤体、基礎地盤ともに同一とし、水平方向と鉛直方向の透水係数が等しい等方性材料であると仮定、飽和透水係数 K を $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ とした。土壌の不飽和特性、不飽和透水特性は図3に示すとおりである。図中、 $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$: 有効飽和度, θ_s : 飽和含水率または空隙率, θ_r : 残留土壌含水率, K_s : 飽和透水係数である。

表1 検討した堤防モデル

	法面勾配	天端幅	全長
Type1	2割	6m	40m
Type2	2割	3m	37m
Type3	1.5割	6m	34m
Type4	1.5割	3m	31m

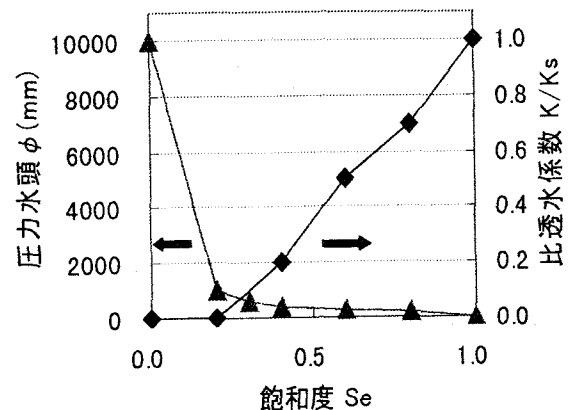


図3 堤体・基礎地盤土壌の不飽和特性

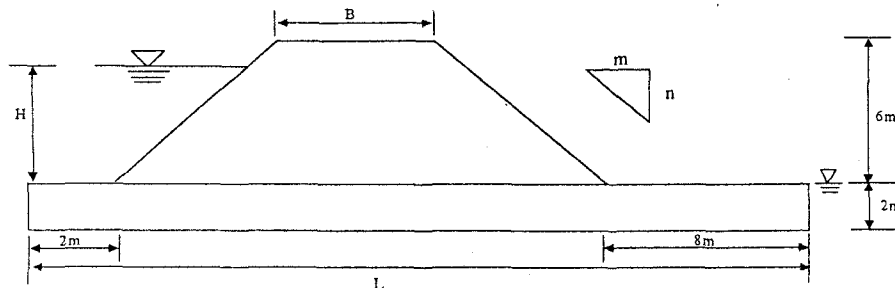


図2 堤体モデル

数値計算は有限要素法による大西・西垣⁵⁾の2次元飽和・不飽和浸透流解析プログラムを用いて行った。境界条件としては、外水位と堤内地側の排水路の水位（一定）に接している表法面や基礎地盤の右端の節点にそれぞれの水位に応じたポテンシャルを与えた。また、基礎地盤の下端は不透水層に接しているものとする。

3. 堤体内動水勾配分布

パイピングの発生に寄与すると考えられる初期の動水勾配の分布を調べるため、堤防モデルのType 1からType 4について、それぞれ河川水位を2.0mから6.0mまで5通りに変えて計算を行った。

図4は計算結果の例（ $H=2.0\text{m}$ 及び 4.0m の場合）で、堤体内に出現する浸透流ベクトルを示した。ここでは流速値を透水係数で除して定義される動水勾配値でベクトルを表示している。 $H=4.0\text{m}$ の例では、浸出面が法尻より少し上にあるため、浸透水は法尻から上に向かって幅15cm程の範囲から流出し、この範囲に大きなベクトルが互いに平行に分布している。一方、 $H=2.0\text{m}$ の例では浸出面が法尻近くにあるのでベクトルが法尻に向かって集中し、水位が小さくても、法尻付近にある程度以上の動水勾配が集中しパイピングが発生する可能性が考えられる。

図5では、堤防内部に生じる最大動水勾配値が外水位によってどのように変化するかを4つの堤防モ

デルについて示したものである。この結果では最大動水勾配は法面勾配に依存し、天端幅の影響はそれほど顕著ではない。

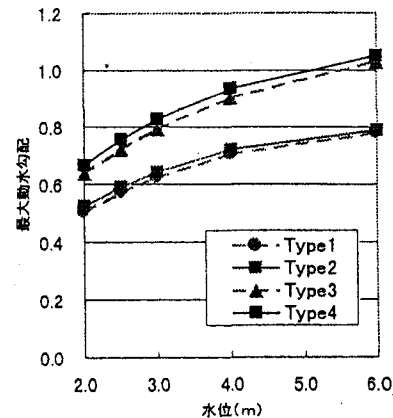


図5 最大動水勾配

4. パイピングの進行

次に、裏法尻からパイピングを発生させてその進行過程を調べる。先に述べたように、通常パイピングは空洞ではあるが、数値解析上、空洞化された部分を透水係数がもとの地盤での値に比べ極めて小さくなっているものと想定することで表現することとした。すなわち堤体の透水係数が $K=1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であるのに対し、パイプの形成されたところでは透水係数が $K=1.0 \text{cm/s}$ となっているものとして解析を行った。パイピングの進行の解析は以下のようにして行った。

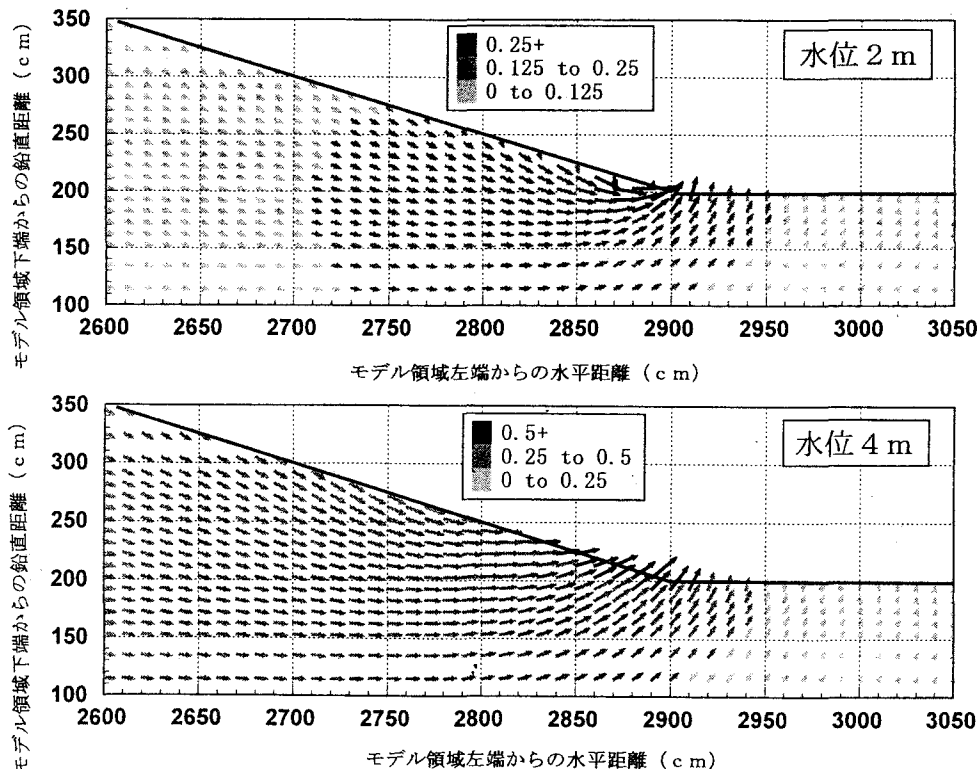


図4 堤体内浸透流ベクトルの分布状態

まず、プログラムの計算結果から動水勾配のベクトル図を描きそれによって流線方向を定める。パイピングの拡大は流線方向と反対の方向とする。パイピングの進行をこのように仮定してその部分を高い透水係数材料に置き換えた計算を実行する。パイプの幅はパイピングの進行に伴って変化しないものとする。各計算ステップごとにパイプからの浸出流量を計算する。この流量によって小さな土粒子が流れ次の計算ステップに進むと仮定する。洗い出される土粒子の量は次式によって与えられるものとした。

$$\frac{Q_w}{Q} = \alpha Q$$

ここに、 Q_w ：単位時間当たり輸送（吐出）される土砂量（実質体積）， Q ：浸透流量で、 α は経験定数とする。上式は河川のwash loadの流砂量式として採用される式⁶⁾で、土砂の不飽和濃度での輸送という共通点からこの式形を用いることとした。本研究では $\alpha=1.0 \times 10^{-5} \text{ s} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3$ を試行的に用いた。堤体材料中10%が浸透流によって流され得る粒径であるとし、またこれを失うことがパイピングによる空洞化と判断した。

以下では、Type 3の堤体モデルを対象とした計算例で得られた特性を説明する。図6は、パイピングの進行の各段階での動水勾配ベクトルの分布状況を示したもので、各段階でパイピングが次にどの方向に向かうかがこれによって示される。ここでは、初期、中期、後期の各段階の代表的な計算例が示されているが（パイピングの先端部を拡大して表示）、流速ベクトルは、初期段階では全体的に下に向かい、中期ではほぼ水平に、そして後期には上に向かっていく。パイピングはこの向きと反対に進行すると考え、その方向にパイピングの進行を想定した。こうした解析でのパイピング進行経路の概略は図7に示すようである。

図8には堤体から土砂が流されてできたパイプ状空洞の先端の位置（初期状態からの水平進行距離）と空洞先端（パイプ最奥部）の最大動水勾配の関係を示したものである。水平距離が10m程度になるまでは動水勾配は約1.0~1.4程度の値をとっているが、水平距離が10mを越えると急激に増加し、空洞が堤体を突き抜け河道に到達する手前の段階では動水勾配の値が5.0を越えている。この段階に達すれば堤体中の土粒子は次々と洗い流され、空洞がすぐに河道にまで達してしまうと考えられる。実際の現象が3次元的事実であることやパイプが先端に向かって細くなっていることを考えると、より大きな動水勾配がパイプ先端に作用すると思われる。なお、図中の最も右側の点は、パイプが外水まで達したときの値である。

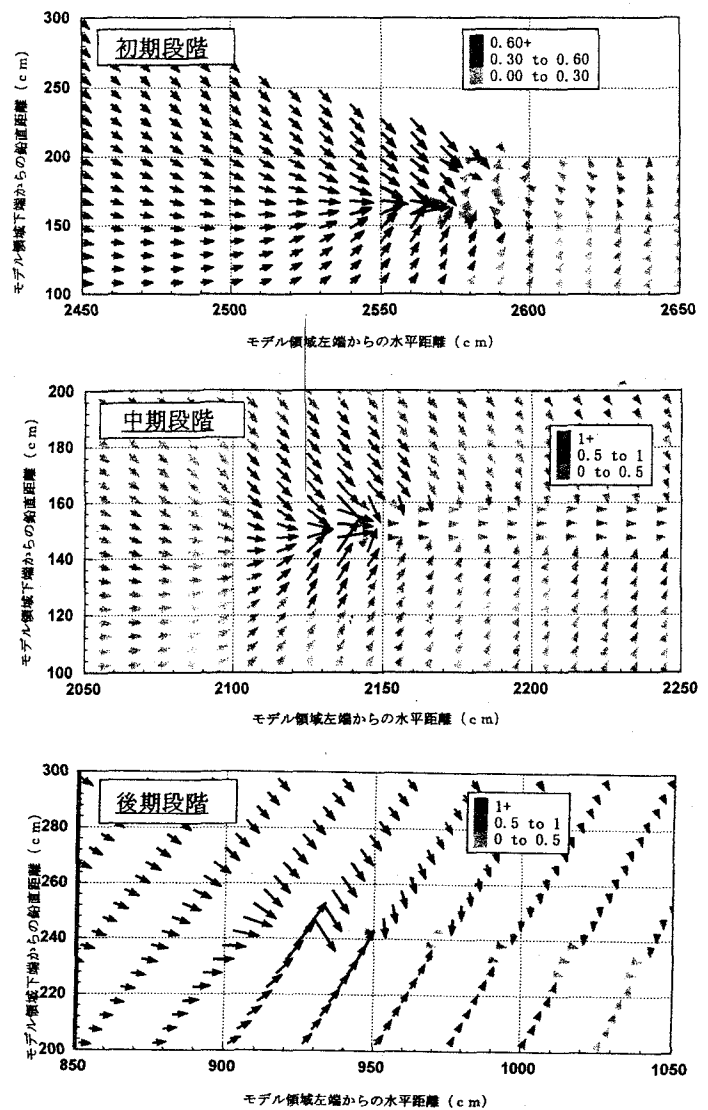


図6 パイピング進行の各段階での動水勾配分布

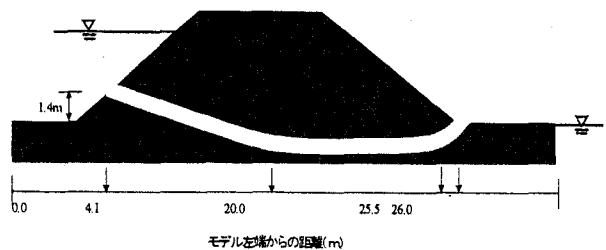


図7 パイピング進行経路

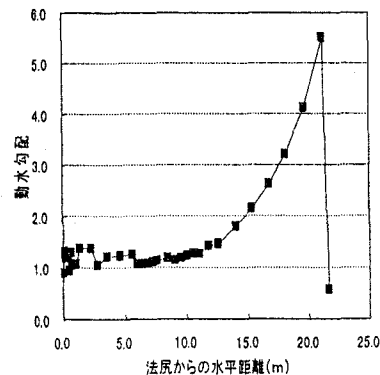


図8 パイピングの進行に伴う動水勾配の変化

図9はパイプ先端の動水勾配の経時的変化を示したもので、経過時間が26時間あたりを過ぎると急激に増加する。図8、9の両方からパイピング現象はある段階までは徐々に進行するが、ある段階に到達すると土砂の洗い流される量が急激に増え、短時間にパイプの発達が進むと推測できる。この閾値は動水勾配1.5程度と設定するのが良いように思われるが、さらに検討が必要である。なお、図10には浸出流量の時間的変化を示すが、浸出流量でパイピングの進行をモニターすることが現場では有効である。なお、浸出水の土砂濃度はより鮮明なモニター指標となる。

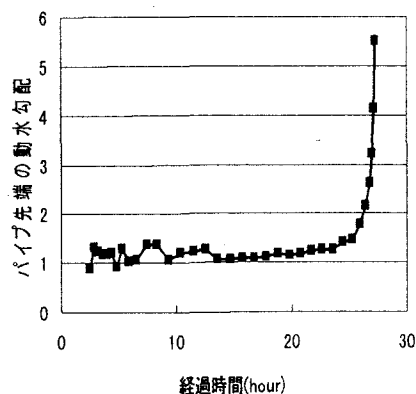


図9 パイピングの進行に伴う動水勾配の変化

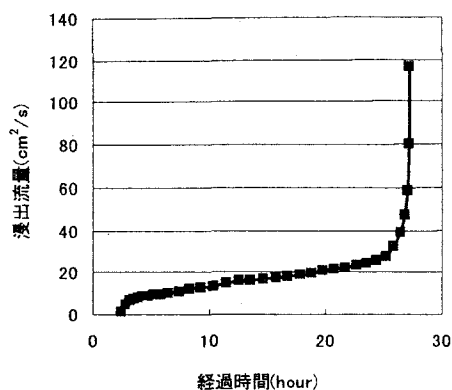


図10 パイプ出口からの浸出量の時間的変化

5. 「月輪工」の評価

裏法尻に設置される「月輪工」の効果についても、これを図11のように2次元的なモデルに置き換えて検討した。「月輪工」の幅は2.0mとし、その水深 h

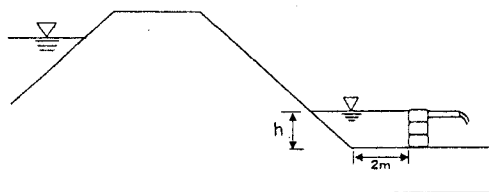


図11 「月輪工」のモデル

を0.75mから1.5mと変化させた。また、パイピングの進行を6段階に分け、各段階で「月輪工」を設置した状態のパイプ先端の動水勾配、パイプからの浸出流量を計算、「月輪工」を設置しない場合と比較、検討を行った。

図12は「月輪工」を用いたときにパイプ先端の動水勾配が「月輪工」がないときに比べてどれほど減少しているかを示したものである。図中の h は月輪内水位を表している。この図から月の輪の水位が大きいほど動水勾配の減少量が大きく、効果が大きくなることがわかる。しかし、水位が大きくなると月の輪から周辺の地盤に水が浸透し、月の輪のすぐ横から漏水してくる水の量が増加するため(図13参照)、「月輪工」の内水位が大きすぎるとかえって危険であると思われる(そのため「月輪工」内部地面では

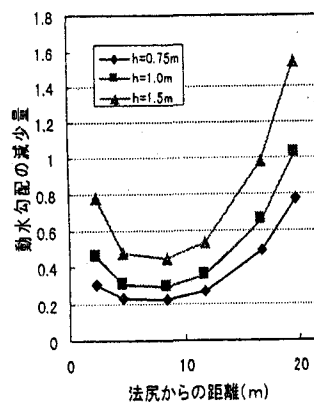


図12 「月輪工」による動水勾配の減少

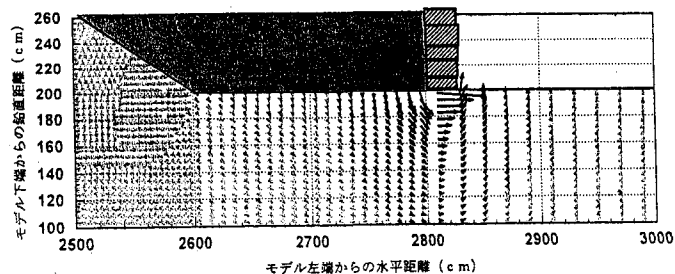


図13 「月輪工」設置時の空洞先端での動水勾配

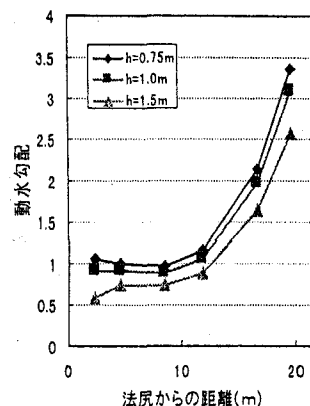


図14 「月輪工」設置時の空洞先端での動水勾配

遮水シートを用いるのが望ましい)。また、図12では法尻からの距離が10mを越すと動水勾配軽減効果は大きいものの、動水勾配の絶対値を先ほど議論した閾値の1.5までに抑えようとする図14に示されるようにパイピングが10数メートル程度に達するまでしか効果は期待できない。

これらの結果から、「月輪工」の設置はパイピングの進行速度を小さくするのに効果的で、その動水勾配の減少特性から見れば、出来るだけ早い設置が破堤にいたるまでの時間を稼ぐのに効果的であると言える。

6. 結 論

本研究では、洪水による河川堤防の破壊現象のうち、これまで十分研究が進んでいない堤体内の浸透水による土粒子の洗い出し、あるいはパイピング現象による破壊の進行形態について検討した。簡単のため、鉛直2次元の浸透流解析の枠組みを使うことにした。ポイントは、次の5点である。(1)パイピングの進行を堤体内の透水係数の極めて高い部分(空洞化の数値計算でのモデル化)の拡大と想定し、(2)動水勾配ベクトルの方向に土砂が洗い出されて空洞が拡大するという想定で、(3)拡大過程の各段階での浸透流解析を実施した。(4)拡大に要する時間は、堤体内の微細材料の洗い出しで浸出流量(パイプ内流れ)に対応した土砂吐出量から逆算、(5)吐出量はウォシュロードの類似の関係で想定した。こうした想定に基づき、パイピング進行過程の特徴を知ることが出来、また、パイピングに対する水防工法として伝統的に使われる「月輪工」の評価も試みた。これらの結果をまとめると、

(1) 動水勾配は、堤防の法面勾配と外水位に依存し、法面勾配が小さいほど、また水位が大きいほど動水勾配は大きくなる。しかし、水位が小さいときの方が裏法尻に局所的に集水する。

(2) パイピングの進行過程においては浸出流量などの指標(土砂吐出量がより明確な指標となる)にその値を超えるとパイピングの進行は急激に速くな

る閾値が存在する。

(3) 「月輪工」は堤体内の動水勾配を減少させる効果があるが、効果をあげるには早めの設置が必要である。

本研究ではパイピング現象を2次元モデルに置き換えて解析を行ったが、実際の現象は3次元で起きるものであり、今回の数値計算だけでは不十分な点が多い。また、パイピングの進行過程の定量評価になう浸出量の土砂含有量の合理的評価も不十分である。今後、3次元性をどのように考慮するか、浸出流量がどのように土砂を洗い出すかについて、実験と数値計算の両面から検討してゆきたいと考えている。

なお、本研究を進めていく中で、東北大学工学研究科・泉典洋助教授からオーデル川災害や物理モデルの作成においてアドバイスいただいたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 村本嘉雄：洪水時における河川堤防の安全性と水防技術の評価に関する研究，文部省科学研究費・自然災害特別研究研究成果報告書，145p., 1986.
- 2) 西田一彦・青木千影：不撓乱まさ土のパイピング現象，土質工学会論文報告集，Vol.21, No.2, pp.141-150, 1981.
- 3) 河野伊一郎・西垣誠：土中侵食による河川堤防の進行性破壊，浸透・漏水破堤の防止工，「洪水時における河川堤防の安全性と水防技術の評価に関する研究」成果報告書，文部省科学研究費・自然災害特別研究研究(代表：村本嘉雄)，pp.54-66, 1986.
- 4) 猪俣純・長瀬由雄：1997年の東欧の洪水について，河川，No.625，日本河川協会，pp.19-25, 1998.
- 5) 大西有三・西垣誠：有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析-手法とプログラム解説-，1981.
- 6) たとえば，中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理，新体系土木工学，23，技報堂，356p., 1986.

(1999.4.26受付)