

堤防の浸透破壊の時間遅れに関する考察

ON RETARDATION TIME TO THE SEEPAGE FAILURE OF RIVER DIKE

鷲見哲也¹・井関明子²・辻本哲郎³

Tetsuya SUMI, Akiko ISEKI and Tetsuro TSUJIMOTO

¹ 正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 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 1)

² 正会員 修(工) 滋賀県土木交通部河港課 (〒520-8577 滋賀県大津市京町 4-1-1)

³ 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

As the case of the river 'Shin-kawa' under Tokai heavy rainfall disaster, the prevention from dike destructions due to saturation by river water seepage is important and we need to understand unsteady phenomena of seepage with considering time scale up to dike breach after the rising of river water level. This retardation time is important both to think flood prevention activities and possible time to evacuation against the design-exceeded-flood. In this study its time scale is discussed including sensitivity analysis by various factors (c.f. hydraulic conductivity, unsaturated soil property, slope angel existence of clay soil layer and so on).

Key Words: River dike destruction, retardation time, Tokai heavy rainfall disaster, Shin-kawa

1. はじめに

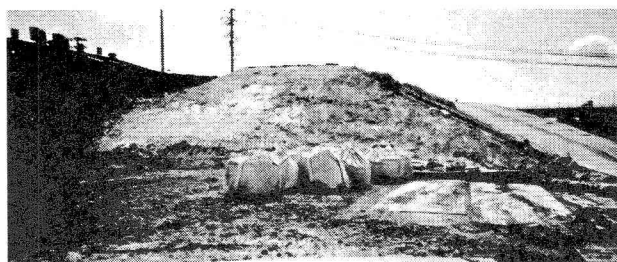
2000年9月の新川の破堤は浸透破壊であると見られている。浸透破壊は河川からの浸透と雨水の浸透水が堤体内に浸透し、裏法面付近の飽和度上昇により土質力学的安定性を失う、あるいはパイピングの様な局所的な弱体化をきっかけに同様の破壊に至るものである。本災害では長い高水位継続時間が一つの要因であるが、設計上の議論の中でこのような時間的側面についてはこれまで議論されていない。この「時間遅れ」は、水防活動の余裕の時間、あるいは計画超過洪水でも堤防の耐えうる継続時間を考えることが可能なパラメータである。これらの点は藤田・諏訪¹⁾が指摘している。

本研究では、その時間遅れについて、堤防の形状・材料との関係について簡単に整理し、議論する。ここでは、破壊の条件に関して力学的不安定性には直接触れず、裏法面付近の水理的な状況、つまり、浸出面の発生・上昇および法尻での動水勾配の時間変化について、上記のように異なった条件でどのように時間特性が異なるのかを議論する。また、方法は鉛直2次元の飽和・不飽和浸透流解析を用いて数値実験的アプローチを主体にしている。条件の変化については、堤体形状、堤体・基盤材料特性（透水特性・不飽和土壌水分特性）および、難透水層の有無、を取り上げた。

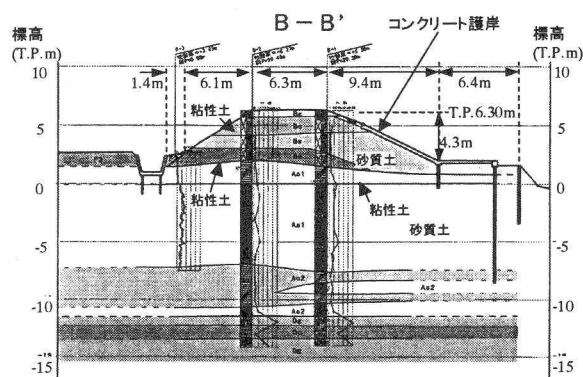
2. 新川破堤と破堤までの遅れ時間

2000年9月11日から12日にかけての豪雨により、新川左岸堤（庄内川合流点上流約16km地点）で12日午前3:30頃破堤した（図-1、破堤断面の様子）。愛知県緊急堤防強化検討委員会²⁾の調査・検討の中で明らかになった点は、①8時間以上という計画高水位を越えた継続時間（図-2）、②堤体材料の不均一性と古い堤防特有の川砂の層の存在、であった。表法面には計画高水位付近まで護岸が張られ、それを長時間にわたって超えていた外水が、それを乗り越えて浸透し、降雨浸透が相まって裏法面周辺の飽和度上昇・土質強度の低下をもたらし、滑り破壊に至らしめた、という見方が有力である。現地土層調査及び2次元飽和・不飽和浸透流解析とすべり破壊解析に基づいて検討を行い、この事が説明された。この検討は破堤に至る過程・機構の説明として行われたものであるが、結果として破堤に至るまでの遅れ時間を示すこととなった。実務においてそのような「時間」を想定する考え方はこれまでの水防・治水にはなかった（藤田・諏訪¹⁾の指摘）。

無論、水防活動を行ってきた経験からそのような時間については無意識にあったと言えよう。3日にわたって高水位が続き破堤に至った昭和51年の長良川破堤など



(a)現地での断面（不均一、砂分多い）



(b)コア調査結果（諸元は概数）

図-1 新川破堤部断面（下流側）

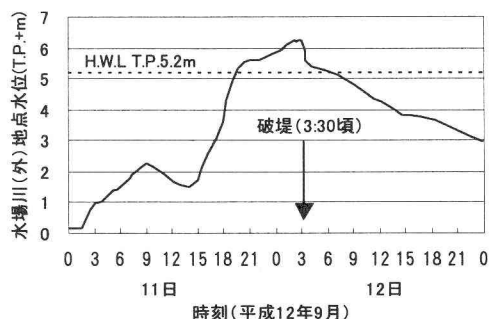


図-2 新川水位の時間変化（水場川排水機場）

代表的な例がある。高水位の継続時間は堤防設計を考慮する場合の具体的な指標には現在のところない。堤防設計指針³⁾には、外水位継続時間を勘案する旨の記述はあるものの、堤防が持つねばり強さを評価する、ということにはなっていない。しかし、堤防の整備には時間がかかり、現況堤防や暫定改修堤が最終的に破堤に至る外水位が続いた場合にどの程度の時間を持ちこたえるのか、あるいは現況の設計に従った場合にそれを越える外水位・降雨にどの程度の時間耐えられるのかという検討はなされていない。

浸透破壊に至る要因を整理すると、図-3 の様に描ける。堤防設計指針はこれらすべての要因を網羅し、2次元浸透流解析（非定常計算含む）を通じて、すべりとパイピングに対する安全度を「最も危険な時点に対して」評価することとしている。そこで、本論はこの方法をほぼ踏襲しながらも「時間遅れ」「ねばり強さ」が各要素によってどのように影響を受けるのか、ということに

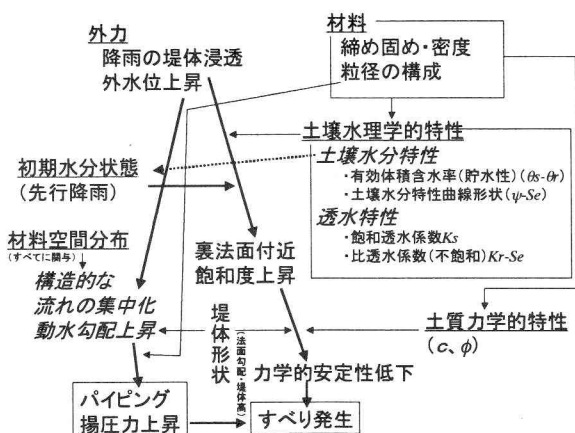


図-3 浸透破壊に至る要因

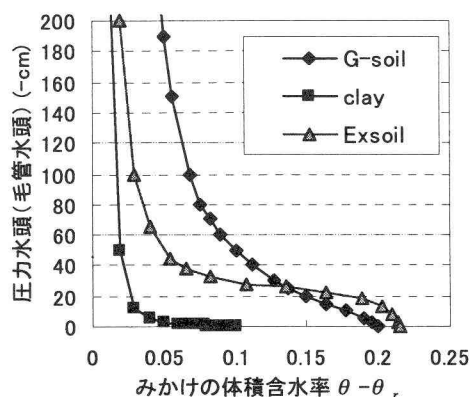


図-4 材料の土壌水分特性

ついて計算を試み、紹介することとする。しかし、外力条件と堤体・基盤の条件は多くあり、本論ですべてを述べることはできない。ここでは降雨浸透の影響を無視し、外水は越流しない程度で長時間続くものと仮定する。また、堤体と基盤の材料は基本的に同じ物と仮定した。条件の変化は、堤体形状、堤体・基盤材料特性（透水特性・不飽和土壌水分特性）および、難透水層の有無を取り上げ、裏法面での浸潤面上昇と動水勾配といった水理量の変化を扱うこととし、土質工学的なすべりの安全率については扱わず、別に論を譲ることとする。

3. 解析方法・条件

(1) 理論と計算方法

堤体浸透は一般に鉛直2次元で取り扱い、その飽和・不飽和浸透流の解析は次式の Richards 式を数値的に解くことが一般的である。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] \quad (1)$$

ここに、 θ は体積含水率、 ψ は毛管ポテンシャル（圧力水頭）、 $\phi(\psi+z)$ は全水頭、 $K(\theta)$ は不飽和透水係数、

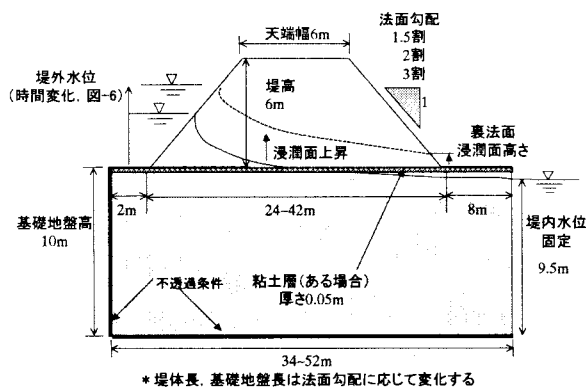


図-5 堤体モデル

表-1 計算条件

	諸条件	ケース	ケース名
固定条件	堤体高	6.0m	-
	基礎地盤高	10.0m	-
	天端幅	6.0m	-
	裏法小段幅	8.0m	-
	堤内側境界条件	水位9.5m	-
	堤外側境界条件	水位15mに上昇	1時間後から 5時間後までに上昇
可変条件	法面勾配	1.5割	slope-1.5
		2割	slope-2(標準)
		3割	slope-3
	透水係数 K_s (cm/s)	1.372×10^{-2}	標準値
		1.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}
		1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
		1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}
	堤防材料 (土壌水分特)	実験砂	Exsoil(標準)
		指針モデル	G-soil
	粘土層の有無	無	normal(標準)
基盤上貫入		clay-full	
初期条件 (初期堤外水)	11.0m	w=11.0m(標準)	
	13.0m	w=13.0m	

$C(\psi)=d\theta/d\psi$: 比水分容量である。この式を大西・西垣の有限要素法解析プログラム⁴⁾を用いて解くこととした。また、Richards の式を解くのに必要な土壌の不飽和特性である不飽和透水特性 ($K-\theta$ 関係) は、簡便のためいづれの材料についても次式の一般化 Kozeny 式で固定し、べき定数 B も 3.0 とした。

$$K = K_s K_r = K_s S_e^\beta \quad (2)$$

ここに、 $K_s(S_e)$ は比透水係数、 $S_e=(\theta-\theta_r)/(\theta_s-\theta_r)$ は有効飽和度、 θ_s 、 θ_r はそれぞれ飽和及び残留体積含水率である。もう一つの不飽和特性である土壌水分特性 ($\psi-\theta$ 関係) は、河川堤防設計指針で示された砂 (以後 G-soil と称す) 及び粘土の曲線 (図-4) を採用し、さらに、細砂質の多い土壌として同図中に Exsoil (平均粒径 0.4mm, 均等係数 $U_c=D_{60}/D_{10}=2.683$ に配合した実際の砂) として記した。これも含め本研究では堤体材料は3種類考える。Exsoilについては、 θ_s は室内計測で得た値とし、 θ_r は便宜上0とした。 K_s は実測の値から標準値を $1.327 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ とした。これは堤体材料としては高い値であるが、設計としてではなく、現況の堤体は古い時期に洪水時に自然堤防的に形成されたもの

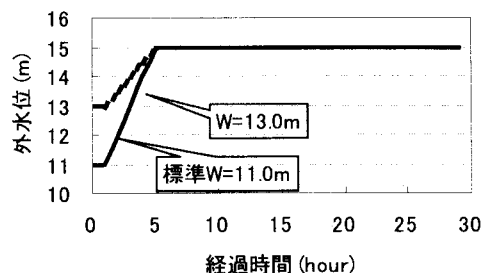


図-6 外水位の時間変化(境界条件)

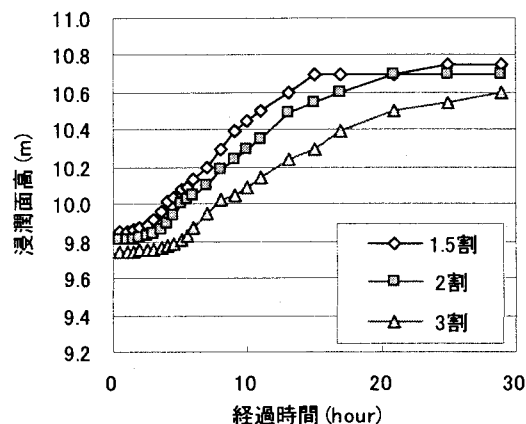


図-7 裏法面での浸潤面高さの時間変化
(法面勾配による違い, Exsoil)

や本川の掘削浚渫砂を積み増したものを含むことが多く、この程度の材料の層の存在は驚くに当たらない。（新川破堤現場の図-1中B₂層にあたるサンプルの透水係数を筆者らが測定した結果、 $5.6 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ であった。）本論では危険側の数値で考え、これを標準として扱う。

(2) 堤防のモデルについて

図-5 の様な解析堤体モデルを想定した。基礎地盤高、堤体高及び天端幅はそれぞれ 10m, 6m および 6m に固定し、法面勾配、材料条件を変化させた。法面勾配は表法、裏法ともに同一とし、1.5 割、2 割、3 割の 3 ケースを考えた。堤体土壌について先述した 2 つの砂 (Exsoil 及び G-soil) の 2 種類を用いた。また堤体材料の分布としては単一の砂材料からなる堤防モデルと、基礎地盤と堤体の間に粘土層が存在するモデルを考えた。堤防モデルの固定条件、可変条件を表-1 に示す。境界条件のひとつである外水位上昇については、計算開始から 1 時間は基礎地盤の上端から 1.0m の高さに固定し、その後 1.0m/hr の速さで、地盤高から 5.0m (堤防高-1.0m) まで上昇させ、その後その水位が維持されると仮定し、長時間高水位が続く状況を想定した。(図-6 参照) また、堤内地側は一定水頭とし、その水位は基礎地盤高より 0.5m 低い位置に固定した。これ以降、外水位、浸潤面高の値は基礎地盤の下端を基準 ($z=0$ m) とした値で示すこととする。

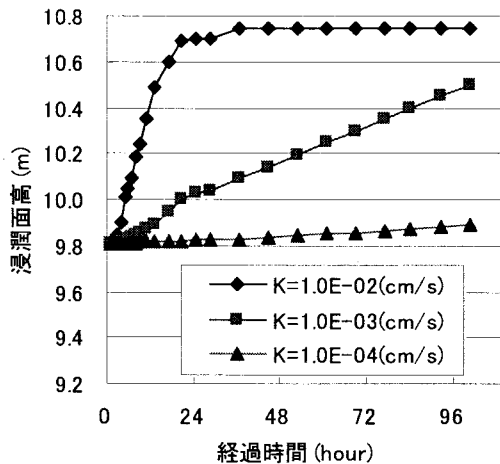


図-8 浸潤面高さの時間変化
(飽和透水係数による違い, Exsoil)

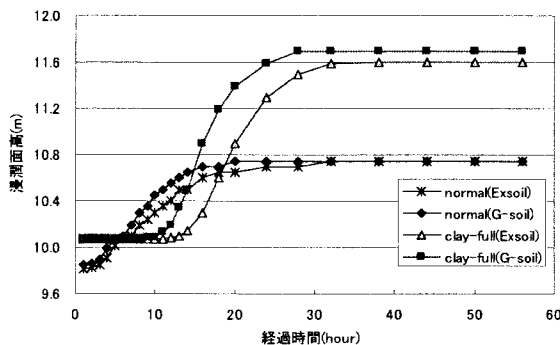


図-9 浸潤面高さの時間変化 (土壌水分特性による違い)

この解析プログラムでは、入力データとして初期ポテンシャル分布が必要となる。そこで、初期の外水位状態で定常計算を行い、その結果得られた各節点のポテンシャルを初期条件として用いた。

4. 計算結果と考察

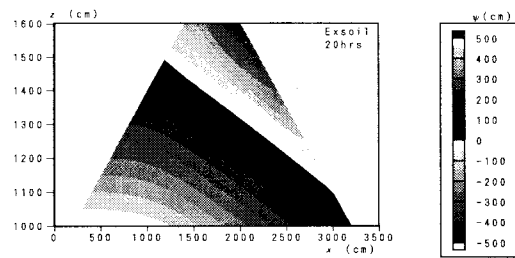
計算結果については、裏法面に現れる浸潤面の高さの上昇 (図-5) が堤体の不安定化に対応することから、その時間変化をモニターして、危険度が高まる時間スケールを捉えることとする。

(1) 法面勾配による違い

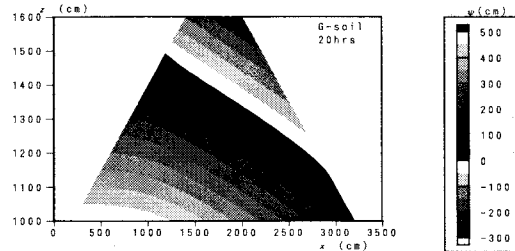
法面勾配による違いを図-7 に示す。ここでは材料は堤体・基盤とも Exsoil である。裏法面での最終的な浸潤面はほぼ同じ高さまで達するが、法面勾配が緩くなるにつれて、浸潤して裏法面まで外水が到達する距離が長くなることから勾配の緩い方が浸潤面上昇が遅く、また、勾配から安全度の低下も少なく収まる。2 割勾配では、危険度の高まる時間として半日程度と見なせる。

(2) 堤体材料による違い

堤体材料については、飽和透水係数と土壌水分特性



(a) Exsoil



(b) G-soil

図-10 圧力ポテンシャル線の比較

(粘土層あり、材料による違い、20 時間後、堤体部のみ)

Exsoil と G-soil) の違いを検討した。

a) 透水係数の違い

飽和透水係数のオーダーだけを変えた場合を図-8 に示す。浸潤面上昇は、透水係数にほぼ反比例して遅くなる。この事に関する理論的考察を後の c) において述べる。

b) 土壌水分特性

土壌水分特性については、図-4 の曲線において G-soil が Exsoil に比べて滑らかであり、高いサクションでも多くの水分を持つことから、平均粒径が多少小さく、良い粒度 (広い粒径分布) を持ったものであることを示している。この違いによる裏法面浸潤線高さの変化を図-9 に示す。粘土層のない場合については、浸潤面高さの上昇の早さには土壌水分特性による違いは殆ど見られず、G-soil の方がやや早い。粘土層が貫入している場合については、いずれの土壌も最終的な浸潤面高さは粘土層なしに比べて高く、粘土層による流れの拘束が影響している。また G-soil (滑らかな土壌水分特性曲線) の方が早い浸潤面上昇を見せており、初期条件ですでに毛管力の働く領域 (毛管圧で 2m までの間) において、均一砂に近い Exsoil に比べて高い飽和度を保持しており、堤外側の圧力上昇をより早く伝播する効果が出ている。図-10 の圧力ポテンシャル線図 (時刻 27 時) の比較では、G-soil の方が裏法面付近上部の圧力を早い段階で押し上げて上げているのが分かる。換言すれば、Exsoil の方が毛管帯で水を貯留する余裕が大きいため、水分輸送・圧力伝播を遅らせている。このように、土壌水分特性の違いは、裏法面付近の水分を上昇させる時間特性に大きく影響しうると言える。ここでは、①飽和透水係数は同じで有効体積含水率もほぼ同じ土壌である、②しかし土壌水分特性の形状が異なる、という違いが、上記の様な遅れ

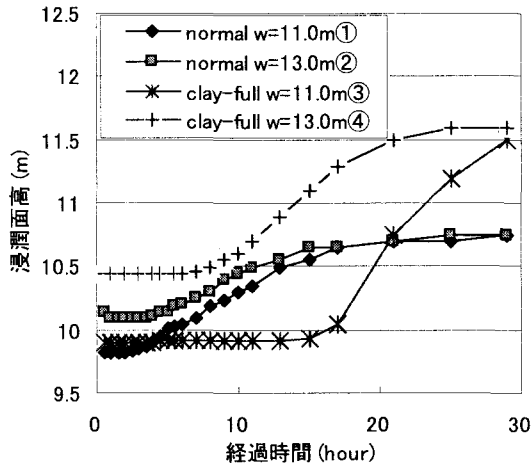


図-11 浸潤面高さの時間変化(G-soil, $K_s=1 \times 10^{-2}$ cm/s)
(粘土層の有無と初期条件による違い)

の違いとして現れる、ということが分かった。

c) 理論的考察(飽和透水係数と有効飽和度の影響)

いま、図-6 の外水位の境界条件が時間的勾配を持って変化するのではなく、時刻0に瞬時に、あるいは無視しうる程短い時間で最高水位となったとしよう。この場合、境界条件は時間スケールに依存しない。その様な前提で式(1)を眺めると、水の体積変化と時間に関する項は透水係数 K と比水分容量 C である。前者は飽和透水係数 K_s と比透水係数 K_r (式(2)にて飽和度の関数) の積で表され、後者は見かけの体積含水率 θ が有効体積含水率 $\theta_s - \theta$ と飽和度に対する比水分容量 $C^*(\psi) = dS_d/d\psi$ との積で記述される。今、 $K_r(S_e)$ と $C^*(\psi)$ を固定し、有効体積含水率と飽和透水係数を可変パラメータとすると、Richards 式(1)は、時間 t を $t = tK_s/(\theta_s - \theta)$ に変換して、次のように書き換えられる。

$$C^*(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r(S_e) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_r(S_e) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] \quad (3)$$

これは、体積含水率を飽和度に変換した Richards 式である。土壌水分特性の形状が同じで不飽和透水特性の関数が変わらなければ、この解は先に述べた境界条件において同じ解を得る。時間 t での現象の変化を基準にすると、飽和透水係数に比例して早く進行し、有効体積含水率が大きいほど貯留効果を発揮して反比例して遅く進行する。サクシオンに対して同じ保水特性・比透水特性形状を持った材料においては、この様に時間スケールを考えることができる。設計指針では、土壌水分特性(つまり比水分容量も)の形状はどの材料もほぼ同じ形状を仮定しているの、比透水係数の関数も同様とみなせば、上記のような単純な時間スケールの変換はほぼ成り立つ。

d) 粘土層の有無と初期土壌水分による違い

粘土層の有無の違いを、図-11 に示す。この中で、

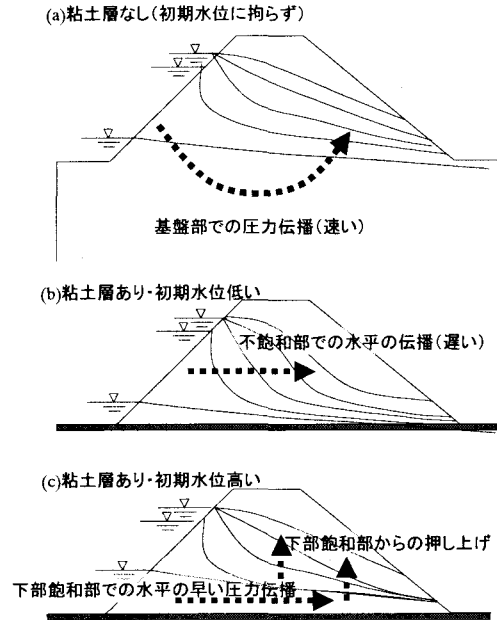


図-12 粘土層の有無と初期条件による浸透機構の違い

初期条件を変えた場合についても検討している。図中、 $w=11.0m$ とあるのは初期外水位が堤脚から $1m$ の高さにある場合でこれまでと同じ初期条件・境界条件を表す。①と③を比較すると、粘土層がないと浸潤面上昇は早くから起こるものの最終の高さは低い。一方粘土層が完全に堤体の下を貫入した場合は浸潤が遅いものの上昇は急に起こり、最終高さも高い。ここに至った場合は前者よりも危険度は高く見積もられる。前者は基盤の飽和部を回り込んでの圧力伝播が浸潤面上昇に有効であるからであり、後者は粘土層上の不飽和部に水を供給し、裏法面までに到達したときに急に危険度が高まるからである。

次に、同図中で $w=13.0m$ とあるのは、初期水位をさらに $2m$ 高くして定常計算を行い、その結果飽和度の高い初期条件とした場合である(②と④、境界条件は図-6を参照)。興味深いのは、①粘土層なしの場合は初期水位が低い時とそれほど変わらない事、②その一方で、粘土層がある場合は低い初期水位よりもかなり早く上昇すること、の2つである。これは、前者が「基盤飽和部の圧力伝播」方式の浸潤面押し上げの構造が変わらないのに対し、後者が、粘土層上部の初期飽和度が高い部分が外水位上昇による圧力伝播を受け持ったことによる浸潤面上昇の加速が促された、ということである(図-12)。粘土層の有る場合には初期水分状態(先行降雨)は遅れ時間に大きな影響があるということがわかる。しかし初期状態に拘わらず、粘土層がある場合の方が遅れ時間の拡大に有効である。ただし、最終的な安全度は粘土層がある場合の方が危険側になる可能性がある。

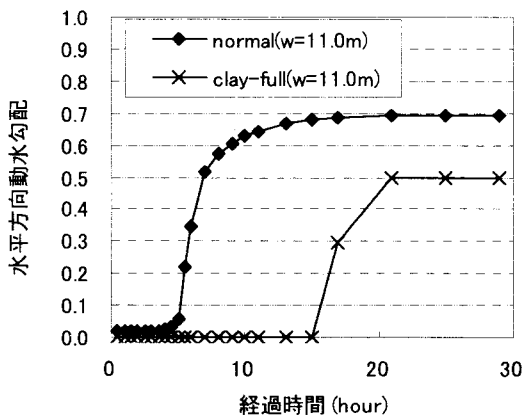


図-13 裏法面での水平方向の最大動水勾配
(G-soil, 図-11 に対応)

パイピング等への応答も見つかるため、動水勾配の時間変化も見てみる。標準の初期状態からの裏法面での水平動水勾配の最大値の時間変化を図-13に示す。最大値は法尻付近で発生しており、その最終的な大きさは粘土層のない方が法尻での流れの集中によって大きな値となる。時間特性については図-11と比較すると、法面での浸潤面が上昇するのに対応して動水勾配も上昇を見せており、時間特性にはこの両者は殆ど同じと見て良い。ただし、パイピングの進行を考える場合はそこから進行する時間を伴うので決定的な破壊に有効性を持つまでにはその時間を勘案しなければならない。

本論文での堤体に関する仮定は、基本特性を得る目的に対応した単純化の為、新川堤防と直接比較できる条件（降雨の考慮、堤体材料分布、堤外法面被覆など）とはなっていないが、同様の解析により、より複雑な条件の変化に対するこの時間特性を示すことができると考える。

5. まとめ

本研究では、外水の浸透に起因して破堤に至るまでの時間について、透水性、不飽和土壌水分特性、堤防形状、粘土層の有無という要素による違いについて、浸透流解析を通して定性的に理解した。以下に要点をまとめる。

- 1) Richards 式から得られる理論的考察から、急激な外水位上昇に対する裏法面付近の水分上昇に至る時間スケールは、土壌水分特性・比透水係数の関数形が同一の仮定の下では、飽和透水係数に反比例し、有効体積含水率(体積含水率の変動幅)に比例する。
- 2) 細砂層(飽和透水係数で 10^2 cm/s オーダー)であっても、少なくとも数時間は耐えるだけの時間的余裕がある。新川のように内部に砂層があって表面付近が中間土によって守られていれば、それ以上の時間的余裕を得ることが出来る。
- 3) 水平粘土層が入った堤防では、裏法面付近の水分上昇は粘土層のないものに比べて遅くなるが、最終的

な破堤危険性は高くなる。

- 4) 逆に粘土層がない堤防では、基盤部の圧力伝播による早い水位の押し上げが時間的余裕を少なくする。

降雨条件、材料分布の不均一性、護岸被覆工の有無等、他の要素についても考慮する余地は大きく、同様の検討を行ってゆく必要がある。それを認識する一方で、堤防の設計＝定常仮定は 100%守るべき外力に対する設計としての重要性を認めながら、未改修の堤防や超過規模の外力に対して、どの程度の守れる余裕が見込めるのかという事を、破堤に至るまでの時間で考えようという方向は有効であると考え。その点で、本論で示した(設計指針にある手法をほぼ踏襲した)計算方法等を用いて現況未改修堤防・超過規模洪水に対する防水活動・避難行動に対する評価を時間という量で行い、治水行政機関、水防関係者、および周辺住民が理解することは重要であると考え。堤防は延長が長く、また不均一性が大きい(例えば三木ら⁵⁾など)ことから、破堤に対して危険側にある部分の評価をどのように行い示せるのかということ、そして、上記の各要素と遅れ時間との定量的な関係付けの2点が今後の技術的な問題として残る。

砂だけで作られた堤防は数時間の高水位に対して持ちこたえることができることがわかったが、洪水の非定常性の時間スケールを堤防内部の非定常浸透の現象の遅さ(それは、堤体が不飽和から飽和へと変化する時間スケールであるが)が緩和して変化の時間スケールを引き延ばしている、という認識に立ってその役割を理解し、現況堤防・未改修堤防そのものの安全度を再認識することが求められていると考える。

謝辞：本研究を進めるに当たり、新川破堤現場の視察や情報提供等、愛知県河川課にご協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤田光一・諏訪義雄：減災システム整備における河川堤防技術、河川技術に関する論文集、第6巻、pp.1-6, 2000.
- 2) 愛知県建設部：愛知県河川堤防緊急強化検討委員会中間報告、2001.
- 3) 建設省河川局治水課：河川堤防設計指針、第3稿、241p, 2000.
- 4) 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—手法とプログラミング解説—, 1981.
- 5) 三木博史・中山修・佐古俊介・掘越信雄：河川堤防の堤体土質特性に関する考察、河川技術に関する論文集、第6巻、pp.37-40, 2000a.
- 6) 三木博史・中山修・佐古俊介・掘越信雄：堤体土質不確実性を考慮した河川堤防の設計について、河川技術に関する論文集、第6巻、pp.41-44, 2000b.

(2001. 4. 16 受付)