

降雨の時間特性を考慮した 堤防浸透破壊に対する安全度評価

SAFETY ASSESSMENT FOR SEEPAGE FAILURE OF RIVER LEVEE IN CONSIDERATION OF TEMPORAL CHARACTERISTIC OF PRECIPITATION

鷲見哲也¹・立石浩行²・辻本哲郎³

Tetsuya SUMI, Hiroyuki TATEISHI and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 大同工業大学助教授 工学部都市環境デザイン学科(〒457-8532 名古屋市南区白水町40)

²正会員 修(工) 独立行政法人水資源機構川上ダム建設所(〒518-0226 三重県伊賀市阿保251)

³フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

In recent years, heavy rainfall disasters happen often in medium and small rivers due to flood levee breach. One of the factors is delay of levee improvement, but it requires long time. During levee development, soft measures (evacuation planning, flood fighting etc) are important to protect people from flood disaster and information on retardation up to levee breach is needed. The degree of safety in current levees is evaluated, and the time until flood levee breach is calculated. For evaluating the degree of safety in current levees, the degree of safety is analyzed while considering characteristics of rainfall. Levees for lower flood are durable and its degrees (in time) are evaluated. If rainfall peaks increase and antecedent rainfall is long, flow durability decrease.

Key Words : Seepage failure, temporal characteristic of precipitation, safety assessment

1. はじめに

一般に堤防整備を行うには莫大な時間と費用がかかるため、短期間で有効な整備を実現するのは困難である。そのため、ハード整備を行うのと並行して、水防、情報伝達や避難誘導などのソフト対策を行うための環境整備が進められている。そのソフト対策を有効に機能させるためには、現況堤防の安全度を把握し、堤防がどの程度の洪水まで耐えうるのか、さらに壊れるまでにどれくらいの時間があるのか、という情報を把握することが重要かつ有用であると考えられる。

堤防の安全性評価は、従来堤防の計画・設計において行われてきた。古くは経験的な知見で仕様を定めて設計されてきたが、近年は性能規定を基本とする設計手法がとりまとめられてきた¹⁾。このことから、様々な堤防を持つ安全度を照査できるようになってきているが、上記の観点から、現況堤防に対しての安全度評価についても同様の方法での検討が可能であり、必要である。

ところで、浸透破壊に限定すると、これを支配する外力は、降雨波形と河川水位波形である。しかし、河川水

位の波形も元は降雨波形を入力とし、流域の流出特性と河道特性によって決まる。そこで本研究では、外力としての降雨の規模・時間特性や流出特性の浸透破壊に対する影響について捉えることとした。

これまでに、宇野ら²⁾は堤体に与える降雨強度を変化させ、堤体に及ぼす降雨外力の評価を行った結果から、初期降雨の段階における浸透が堤体に大きく影響を与え、長時間経過後には外水位が大きく影響を与えると述べているが、降雨の時間特性等について考慮されていない。また、鷲見ら³⁾は堤防浸透における浸潤面上昇までの時間遅れと堤防の形状・材料の変化との関係について整理しているが、安全率等の基準に基づいた堤防の安全度評価については言及していない。

そこで、本研究では、モデル化した流出域・河道および堤防断面を設定し、様々な時間特性を持つ降雨波形を外力として流出解析、堤防浸透流解析およびすべり安定計算を行い、その結果を整理することで、(1)従前の方法では河川水位一定条件の下で検討していたが、非定常な降雨波形のもとでのどの程度安全側に評価されるのか、(2)流出(貯留)特性による、降雨から水位波形への

ピーク緩和の効果, (3) 水位上昇から浸透破壊までの時間遅れや安全率の緩和に対する堤防の効果, (4) 降雨の時間特性による安全率への影響, をみる。これらにより, 流域や堤防のもつ, 「遅れ」や安全率低下の緩和作用を評価し, 水防・避難活動に対する情報としての有用性を示す。

2. 外力条件・流出解析

(1) 本研究での前提条件と外力の考え方

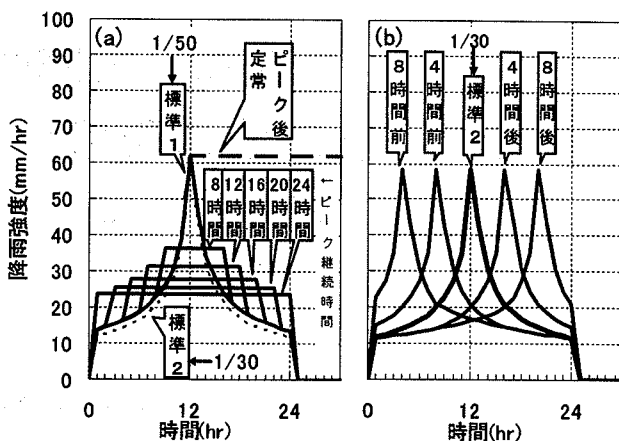
本研究では簡単のため, 諸量の地域分布を考慮せず様とし, 降雨規模(総降雨量)と降雨の時間分布を変化させて検討する。流域平均降雨のDD特性や流出特性については, 流域の水文情報がある新川(愛知県)を参考にした⁴⁾⁵⁾。本研究では, 実際生じた破堤現象を扱うのではなく, 流域, 河道および堤防に関する情報を, 新川の規模でモデル化して考えるために集め, あくまでも仮想モデルとして作成している事を断っておく。

降雨波形は, 堤体への直接外力となる河川水位波形に変換される入力としての側面と, 堤体表面への浸透降雨外力という側面を持つが, 本研究は水位と降雨を別々にしないで, 降雨外力に統一して扱うこととする。このことは, 「ある確率規模では総雨量は有限であるから, 水位が非現実的挙動をとらないこと, つまり, 高い水位をとり続けられないこと」を保障する。仕様設計を指針としていた頃には, 河川水位一定の下で定常解析によって安全度照査を行っていた。性能設計となった現在の設計指針(案)では, 既往の複数の水位波形から, 満杯水位(または計画高水位)をピーク水位とし, その継続時間を限定した水位波形のモデルとしている⁹⁾。しかし, 降雨波形と水位波形との関係は考慮されていない。また, 水位波形モデルは一定期間継続するピークを持った台形としているが, ピーク後は河川水位低下による堤外側すべりを考慮するため, 既往出水のうち水位低下が最も急であった低下速度を採用している。既往出水から得た水位-継続時間特性を保持するようにモデル波形を作成するため, ピーク後低下速度が急であるほど, ピーク前上昇速度は緩やかになり, 水位上昇側, つまりピークより前の水位上昇速度のあり方については考慮されていない。本研究では, 水位波形は元来降雨波形に依存していることから, 降雨に立ち戻って再考し, 水位の変化特性は流出特性というフィルタを通した結果として解釈することとする。

(2) 降雨波形の設定

新川では2000年9月の東海豪雨において堤防天端高まで水位上昇したが, そのときの久地野地点での流域平均降雨波形は1/50降雨確率の中央集中型波形で近似できることを利用し, 降雨波形モデルを作成する⁹⁾。

降雨継続時間は24時間とした。降雨波形の作成に際し,



(a) ピーク継続の変化 (b) ピーク発生時刻の変化

図-1 解析で使用する降雨波形

降雨波形には中央集中波形を用い⁴⁾⁵⁾, 新川久地野地点流域降雨量のDD特性を使って, ほぼ満杯流量となる確率年1/50(「標準1」と, それより低い規模である確率年1/30(「標準2」)から作成した2つの波形を標準とした。また, 降雨の時間特性について標準波形と比較するため, 以下の2とおりの変化を考える。

- 24時間総降雨量一定のまま, 1/50の「標準1」の波形からピーク継続時間を変化させた波形。例えば, ピーク4時間継続の場合は, ピーク前後4時間の波形を平均して一定とした波形(図-1(a))。
- 24時間総降雨量一定のまま, 1/30の「標準2」の波形のピークを前後に移動させた波形(図-1(b))。

特別なケースとして, 「標準1」(1/50)において, 降雨強度をピーク後一定とし, 河川水位もピーク水位後一定で与えた場合(ピーク後定常外力)についても比較対象とする。こうした降雨外力に対する応答を議論してゆく。

(3) 流出域の設定

先に設定した降雨波形を流量波形に, さらに水位波形に変換するために流出解析を行う。流出域については新川の久地野地点上流域(総面積 $4=94\text{km}^2$)を参考として, 以下の方法に従ってその流出特性を持ったモデルとする。解析方法は, 次の一価非線形貯留関数法を用いた。

$$s = kq^p \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = r_{\text{ave}} - q(t + T_l) \quad (2)$$

ここに, s : 貯留高 (mm/hr), k, p : 貯留関数の定数, q : 流出高 (mm/hr), r_{ave} : 流域平均雨量 (mm/hr), T_l : 遅れ時間 (hr) である。有効降雨は $f_l-R_{\text{sat}}f_{\text{sat}}$ モデルを採用した。千葉は, 新川の久地野上流域の面積及び土地利用状況の面積割合から, 一次流出率 $f_l=0.6$, 飽和雨量 $R_{\text{sat}}=90\text{mm}$, 飽和流出率 $f_{\text{sat}}=0.95$ を求めている⁹⁾。本研究でもこの値を用いた。一方, 流出流量は式(3)で表す。

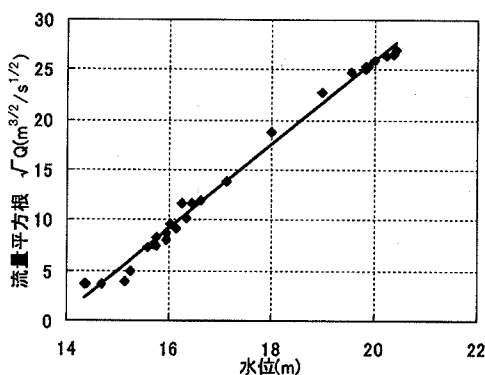


図-2 H-√Q図

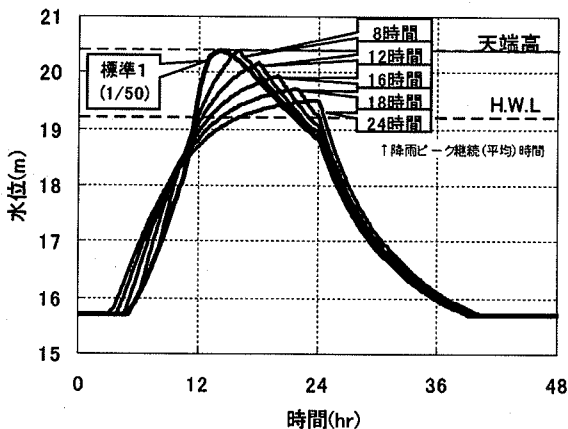


図-3 水位ハイドログラフ (降雨ピーク継続時間の違い)

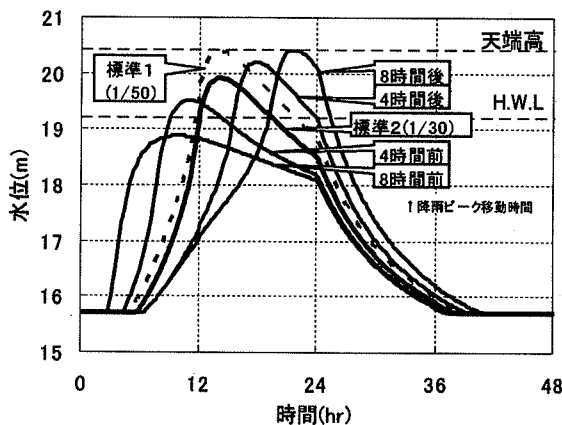


図-4 水位ハイドログラフ (降雨ピーク時刻の違い)

$$Q = \frac{1}{3.6} [f_1 q_1 + (f_{sat} - f_1) q_{sat}] A + Q_i \quad (3)$$

ここに、 q_1 : 不浸透域からの流出高 (mm/hr), q_{sat} : 浸透域からの流出高 (mm/hr), A : 流域面積 (km²), Q_i : 基底流量 (m³/s) である。流出高は不浸透域・浸透域でそれぞれ計算し、降雨強度 r_{ave} については、浸透域のみ累加雨量が飽和雨量 R_{sat} を超えたときに与える。

「標準1 (1/50)」の降雨を与えた時のピーク流量が東海豪雨災害時の久地野地点推定流量と等しくなるように k , p を設定し、 $k=27.9$, $p=0.6$, $Q_i=0$ とした。また、流量を水位に変換するために、東海豪雨時の破堤前までに観測された水場川水位観測所の水位と久地野地点での推定

流量を基に、図-2のようにH-Q関係を作成して得た。出水中はこのH-Q関係が保持されるものと仮定するとともに、流出点 (久地野) から当該地点(水場川合流点)までの間の流量波形の変形は無視している。新川水場川合流点では、平水時流量で上記のH-Q関係とは整合しない上、干満の影響が現れることから、簡単のため、流量からの変換水位が15.7mより低い場合は15.7mとした。

(4) 流出解析の結果と考察

上記の方法により図-3の水位波形を得た。平水時図-3(a)では、「標準1 (1/50)」の水位ピークは降雨ピークから2時間遅れているが、これは流域貯留特性の表れのひとつである。さらに「標準1」と「ピーク継続時間8時間」とを比較すると、ピーク時刻の発生時刻に違いがあるものの、ピーク流量はほとんど同じである。流域の貯留性が鋭い降雨ピークを均すことで、8時間程度に均された降雨のものと同様にまで水位上昇を抑えていることがわかる。以上から、流域からの流出の段階で外力ピークを緩和し、さらに水位上昇を遅らせている役割に留意する。換言すれば、流域特性によっては、降雨から流出への平滑化の効果が変わる事を意味しており、小流域や都市化した流域ではその効果は小さく期待しにくい。

図-3(b)は「標準2 (1/30)」を基準にした、降雨ピーク時刻の違いを見た水位波形の変化であるが、降雨ピークが遅れるほど、つまり先行する降雨量が増える程ピーク水位は上昇し、8時間遅れでは天端に達し、1/50に匹敵している。

このようにDD特性 (降雨強度-継続時間特性) が同じ降雨でも流域の貯留性によって、ピーク先行降雨量が水位を支配してしまう事が、重要な点である。一方、ピーク流量を合理式で考えればよいような小流域・または都市化域の場合、このような流域貯留性による効果を意識する必要性は薄くなると考える。

本研究では降雨の時間特性をピークの継続性や遅れという形で整理したが、どのような量に整理することが、目的に応じた (越水、浸透破壊) 河川水位変化特性を抽出するのに最も有効なのかを考える必要がある。これは水文学的な課題として残される。

3. 安全率の計算方法

(1) 浸透流解析

堤防の浸透流解析には、河川堤防設計指針 (案) (国交省¹⁾) に従い、非定常の飽和・不飽和解析を行った。数値計算には、有限要素法を用いた大西・西垣らプログラム (AC-UNSAF2D) を利用した⁷⁾。非定常の飽和・不飽和浸透流は次式のRichards式を支配方程式としている。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_r K_s \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_r K_s \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = (\beta S_s + c) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (4)$$

ここに、 K_r : 相対透水性係数、 K_s : 飽和透水性係数、 ψ : 圧

力水頭, β' : 0 (飽和領域), 1 (不飽和領域), S_g : 比貯留係数 (飽和時のみ), c : 比水分容量 ($=d\theta/d\psi$), である。 c および K_s は土壌水分特性および不飽和透水特性によって決まるが, 河川堤防設計指針に記載されているものを用いた。 堤体の飽和透水係数は一様に $K_s=4.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ とした。

(2) すべり解析

本解析では, すべりに対する安定のみを対象として扱う。 本解析では河川堤防設計指針で提示されている簡便分割法を採用した。 浸透流解析結果 (水圧分布, 浸潤線) を用いて, 各時刻において円弧の中から最も危険なものを抽出し, すべり破壊に対する最小安全率について算出する。 算定式は全応力法に基づいて導出される。 すべり解析は均質な土の堤防では Taylor の図表を用いた手法を用いるが, 不均質な材料や土の強さが一様でない堤防は分割法が用いられる。 本研究では堤体材料は均質とするが, 設計指針に従い分割法を採用した。

分割法は, 図-5に示すように, すべり面と斜面とで挟まれる土の部分等を間隔の鉛直の平行線で分割し (分割片の幅 b), その各々の部分における堤体側のせん断強さとすべり側のせん断応力の回転モーメントの平衡度合いを安全率で評価する手法である。

$$F_s = \frac{\sum \{cl + (W - ub) \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi'\}}{\sum W \sin \theta} \quad (5)$$

ここに, W : 分割片の重量, θ : すべり面の傾斜角, l : 分割片の円弧の長さ ($=b \cos \theta$), u : すべり面の間隙水圧, c : 有効応力表示によるすべり面に沿う土の粘着力, ϕ' : 有効応力表示によるすべり面に沿う土の内部摩擦角である。

式(5)から明らかだが, 理論上安全率 F_s が1以下ならばすべり破壊が起こることを意味する。 なお, 本研究では, $b=25\text{cm}$ として断面分割し, 粘着力 $c=0.1\text{tf/m}^2$, 内部摩擦角 $\phi=25^\circ$ とした。

(3) 堤体形状の解析条件の設定

本研究における堤体および基礎地盤の断面形は, 新川堤防を参考に図-6の様に与えた。 基礎地盤下端を基準面とした。 実際に破堤した新川の堤体には, 堤外側法面の H.W.L. までコンクリート護岸被覆されていたが, 本研究では未整備堤防の堤体モデルとして考えるため, これを考慮せず, 矢板のみを配置し, 一様な土層とした。

初期条件は河川水位及び地下水位 (浸潤線) は15.7m とし, 堤体内部の水圧分布は初期地下水位における静水圧分布とした。 そして, 境界条件としては, 堤外側側面 (対称中心線), 堤内側側面および下面は不透過条件を与え, 各ケースでの河川水位と降雨強度を河道内および領域上面に与えた。

計算結果については, 堤体内部への水分浸透の度合いを見るために, 堤体中央線での浸潤線高の高さをモニタ

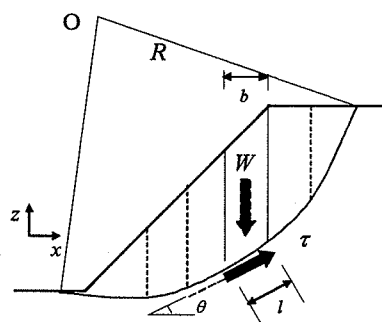


図-5 分割法による円弧すべり解析

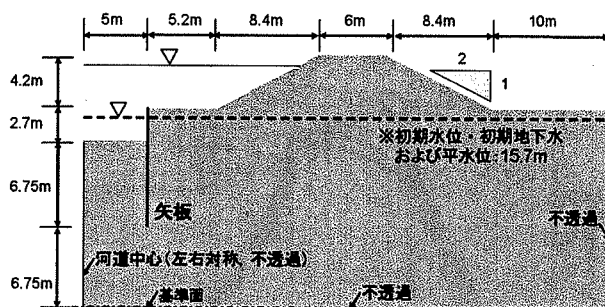


図-6 モデル化された断面形状

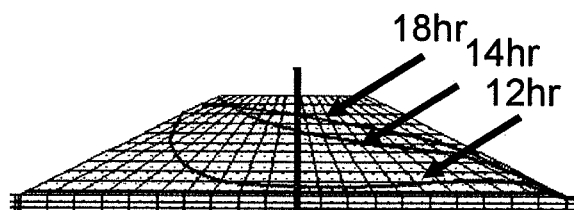


図-7 「標準1」(1/50)での浸潤線の例

することとし, これとすべり安全率の時間変化を出力して現象と過程を議論する。 図-7に「標準1」のケースでの浸潤線変化の例を示す。

4. 結果と考察

(1) 外力の規模と非定常性について

「標準1 (1/50)」と「標準2 (1/30)」および, 「標準1・ピーク後定常」の3ケースについて, 浸潤線高と安全率の時間変化の比較を図-8および図-9にそれぞれ示す。 両図から, 堤体中心での浸潤線高と安全率の時間変化のタイミングは同じであることがわかる。 図-7と合わせて見ると, 裏法面末端付近は雨水の表面浸透により早期から水位上昇しているものの, 堤体全体での飽和域増加とすべり安全度低下の時間的特性は, 表法面からの河川水浸透が支配している。

「標準1」での基本的な特徴を見ると, 降雨のピークから約2時間後に水位のピークを迎えるが, 図-9においてすべり安全率が1を下回るまでには, 河川水位のピークの14時からさらに約2時間かかる。 つまり堤防は, 水位のピークに達した後, 破堤に至るまである程度の時間的余裕を持つということがいえる。 これは堤防断面の不

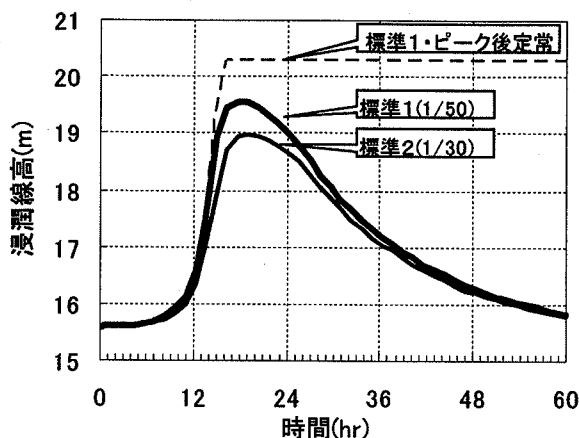


図-8 浸潤線高の時間変化 (標準ケース)

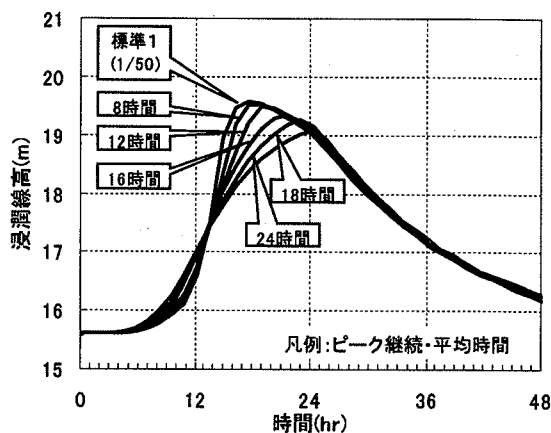


図-10 浸潤線高の時間変化 (ピーク継続時間の違い)

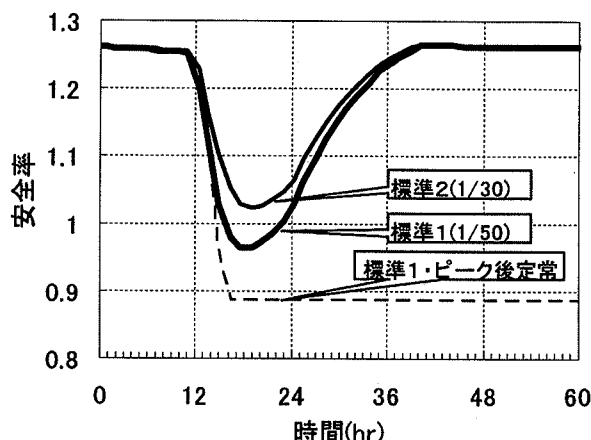


図-9 安全率の時間変化 (標準ケース)

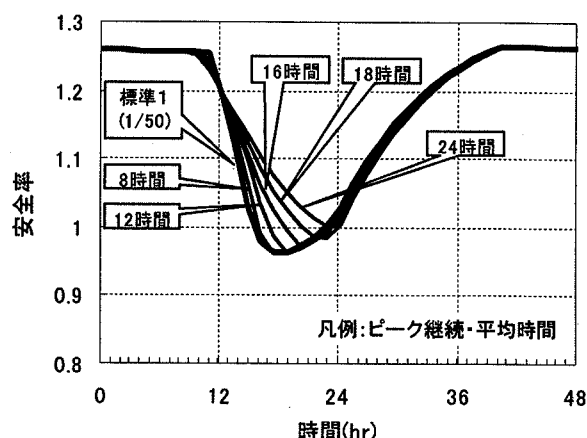


図-11 安全率の時間変化 (ピーク継続時間の違い)

飽和領域が飽和するまでに稼いだ時間であり、堤防の持つ特徴を表している。その特徴を現況堤防の持つ機能として過小評価せずに認識しておくことには意義がある。

次に出水規模の比較をする。標準2 (30年確率) では、50年確率の標準1に比べ、安全率最低値の発生時刻は1時間程度遅れ、安全率は1を切らない。つまり似たような降雨波形であれば、安全度が上がるとともに、ある同じ安全率まで下がるまでの時間は降雨規模が小さいほど時刻が遅くなり、安全な時間帯は長くなる。

最後に「標準1」と「ピーク後定常」とを比較し、降雨の非定常性に伴う効果を見てみる。「ピーク後定常」では、「標準1」に比べ、安全率が速く減少し降雨のピークから約4時間後に0.88に達してその後一定となる。安全率1を切るのは、「標準1」に比べて1.5時間程度早い。このことは次の2つの事を示している。

- ・14時に水位ピークを迎えても、その後低下すれば破堤までに2時間程度の余裕がある。
- ・14時に水位ピークを迎え、その後もその水位が続けば、破堤までの時間は1時間しかない。

このような事から、降雨から水位高さとその継続性をリアルタイムで予測できれば、避難や水防活動について判断するための時間情報を持つことができる。

(2) 降雨ピーク継続時間が異なる場合

浸潤線高と安全率の時間変化について、降雨ピークの継続時間による違いを図-10および図-11にそれぞれ示す。これらは、図-1(a)の降雨波形と、図-3の河川水位を外力としたものである。

図-11の安全率の最小値で見ると、12時間継続の平滑化の最小値は、8時間継続および「標準1」のものとはほぼ同じ値となっている。図-3でのピーク水位はこれらの間で30cm程度の差があるにもかかわらず、安全度は変わらないことから、堤防には継続時間の短い外力に対して、浸透を遅らせ安全度を低減する効果があることがわかる。これも堤体の不飽和浸透の過程によって生じていると考えられる。

(3) 降雨ピーク発生時刻が移動する場合

浸潤線高と安全率の時間変化について、降雨ピークの継続時間による違いを図-12および図-13にそれぞれ示す。これらは、図-1(b)の降雨波形と、図-4の河川水位を外力としたものである。

河川水位と同様、ピーク時刻が遅くなるほど最小安全率は下がり、8時間後の降雨ピークのケースでは約0.97で、標準1 (1/50) とほぼ同じとなった。図-13の最小

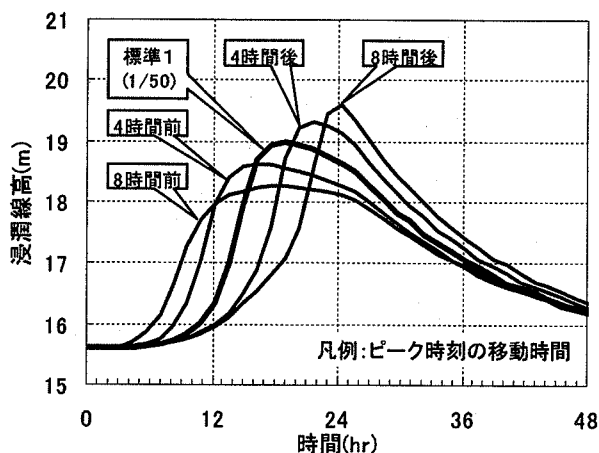


図-12 浸潤線高の時間変化 (ピーク発生時刻の違い)

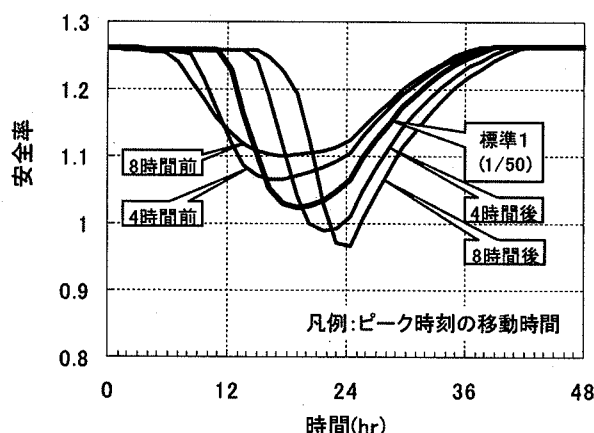


図-13 安全率の時間変化 (ピーク発生時刻の違い)

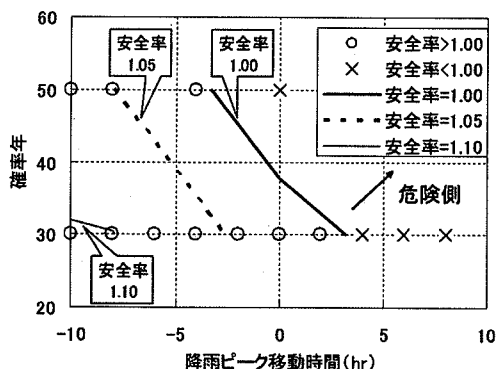


図-14 最小安全率の条件による違い
(確率年と降雨ピーク時刻移動による変化)

安全率の発生時刻を見ると、「標準2」(降雨ピーク遅れ時間なし)では降雨ピークの12時から7時間遅れの19時となっている一方で、降雨ピークを8時間遅らせて20時に降雨ピークを迎えたケースでは24時に最小安全率となっており、降雨ピークから最小安全率となるまでの時間はかなり小さくなっている。また安全率1を下回っているのは22時ごろで、水位のピーク(21-22時)を迎えてから破堤までの時間は全くないことになる。以上から降雨ピークまでの先行降雨が長くなるほど、降雨のピークから破堤に至るまでの時間的余裕が減少するが、

これは流域と堤体が持つ貯留性が失われるためである。

降雨ピークの遅れと降雨規模との同等性を評価するために、各条件での安全率の値から、確率年とピーク移動時間の平面上に等安全率線を図-14に描いた。等安全率線の傾きから、5~7時間程度の降雨ピークの遅れが30年と50年の確率年の違いにあたると言える。この横軸は降雨波形の時間特性を代表しているが、河川水位に関する議論と同様に、何で代表すべきなのかについては、今後さらに検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

以下に結果と議論をまとめる。

- (1) 堤防の安全度低下の度合いや降雨ピーク時刻からの遅れ時間特性に対しては、流域が持つ河川水位への応答の緩和作用や遅れといった変換作用と、堤防が持つ同様の作用が重要である。それに、元の外力としての降雨の特性が加わる。
- (2) 本研究の条件では、流域が持つ貯留性によって降雨ピークを8時間まで平滑化しても、ピーク流量やピーク水位において同等と見なせる。堤体安全度の応答は、堤体浸透でさらに平滑化され遅れる。
- (3) 降雨ピーク時刻が遅くなり、それに先行する降雨が長くなるほど、貯留性が発揮されなくなり、河川水位・安全度ともに危険側に移行し、破堤までの時間的な余裕を減少する。

本研究では、降雨を外力としてみた場合、流域(流出特性)と堤防の持つ遅れの効果を示した。今後は、異なった流出・河道特性での比較検討を試みる一方で、安全度を支配する降雨時間特性の整理方法の提案も含め、具体的な応用を視野に入れた検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局: 河川堤防設計指針(案), 2002.
- 2) 宇野尚雄・亀井雄介: 堤体の安定に及ぼす降雨外力評価, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.415-416, 1993.
- 3) 鷲見哲也・井関明子・辻本哲郎: 堤防の浸透破壊の時間遅れに関する考察, 河川技術論文集, Vol.7, pp.97-102, 2001.
- 4) 愛知県氾濫シミュレーション技術検討会: 新川の氾濫解析の課題と方策 降雨関連資料, 2001.
- 5) 愛知県河川堤防緊急強化検討委員会: 愛知県河川堤防緊急強化検討委員会報告書, pp.3-8, 2001.
- 6) 千葉晃史: 降雨特性が治水システムの安全度に及ぼす影響に関する研究, 平成15年度名古屋大学大学院修士論文, pp.3-12, 2004.
- 7) 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—プログラム解説およびユーザーマニュアル—, 1999.

(2006. 4. 6 受付)