

河川堤防における降雨・洪水の外力評価について

岐阜大学工学部 正会員 宇野尚雄 杉井俊夫
 岐阜大学大学院 学生会員 ○亀井雄介

1. まえがき

本研究は河川堤防の安定性を評価する上で統一的に考え難い降雨や洪水といった外力を、堤防の安全率の変化から評価することを試みるものである。本報告では洪水波形を固定しており、降雨のパターン及び累積雨量について、単純化されたモデル堤防を対象とした解析結果より検討を行っている。

2. 解析の概要

1) 堤防条件と外水位条件

堤防形状は、昭和35年建設省が淀川堤防（大塚地区）で実施した浸透破壊実験で使用された断面（法面勾配：1割5分、天端幅：2m、堤高：4m）と同一とし、上記の淀川実験堤防と同じ単断面規模で考えたモデル（不透水性基礎上）で均質断面とする。また長良川砂質土の透水実験で得られた近似式をもとにして、土質に対する透水係数および

表1 透水係数と体積含水率

土質		透水係数 (cm/s)	体積含水率
砂	$h_p \geq 0$	1.90×10^{-3}	0.4
	$h_p < 0$	$0.19 / (h_p^2 + 100)$	$0.4 / (1 + 2.5 \times 10^{-3} h_p^2)$

体積含水率を表1のように定める。堤体の安全性低下を浸透水によるもの限定して考えると、浸透を生じさせる洪水継続時間という外力条件が堤体の浸透性および断面形状と密接な関係をもつことになる。ここで多種の洪水パターンを考える必要があるが、今回は24時間で水位350cmに達し一定となる外水位（図1）に固定して解析を行った。

2) 降雨条件
 降雨パターン、累積雨量の違いを調べるために、4日間総降雨量7600mm, 6570mm, 3500mmに対し、図2に示す4つの降雨パターンA1, A2, B, Cを設定した。これらの雨量は実際に起こり得る大雨の約10倍の総降雨量であるが、今回の堤防を設定した場合（堤防規模、透水係数、強度定数）、外水位の影響が大きくなりすぎないこと、かつ4日以内に安全率Fsが1.0を割る4日間連続降雨量を設定した。

3) 解析方法

飽和・不飽和浸透流解析を行い、Crank-Nicolsonの陰解法を使って基礎式の差分式表示をし近似解を求める。距離間隔は高さ方向50cm水平方向は法面部で75cm中央部で50cmとする。表法尻地点における格子点の座標を(0,18)としている。初期の圧力水頭の分布は底面で0とし、堤体内ではどこでも全水頭が0すなわちどの点でもその高さに等しい大きさの負の圧力水頭を与える条件とする。また斜面安定解析では全重量・間隙水圧法により、逐次近似法

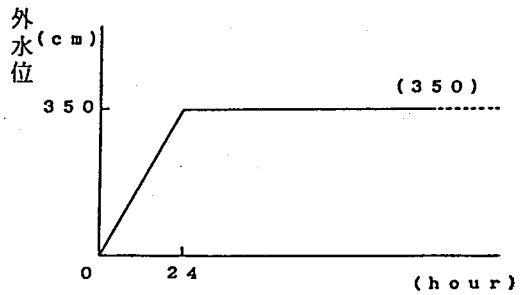


図1 ハイドログラフ

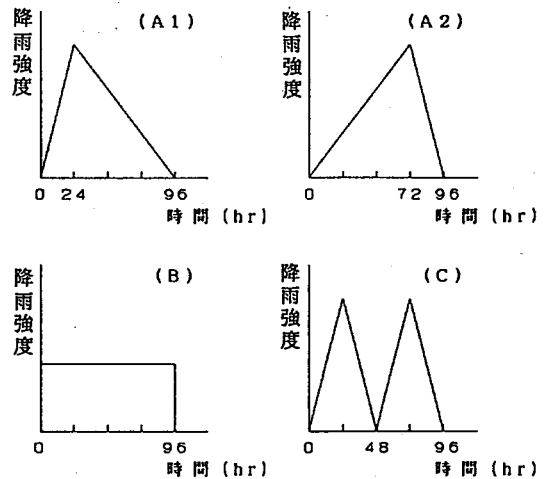


図2 降雨パターン

Evaluation of the rainfall for river levee stability during flood : T. Uno, T. Sugii and Y. Kamei (Gifu University)

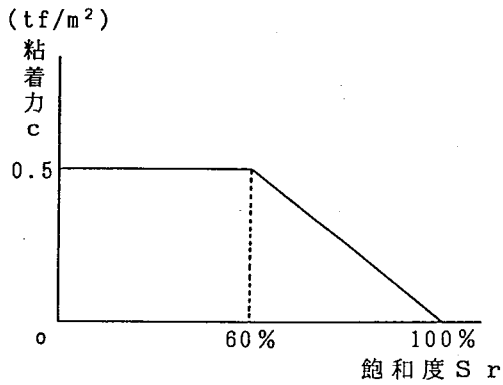


図3 c~Sr関数形

を用いて安全率 F_s を求める。なお、浸透解析は 300 秒間隔ごとに行うものとする。水の浸透に伴う土性変化を考慮した解析で、 c 、 ϕ のうち ϕ は一定 (30°) とし c の強度低下を図 3 に示す関数を仮定した¹⁾。

降雨強度 r_t と浸透能の大小により境界条件を堤内への浸透と表面を流出とに分類している。

- (I) $r_t > k_t$ の場合、地表面に飽和した条件を与えるが満水はせず、表面流の影響は無視している。
- (II) $r_t \leq k_t$ の場合、 $v_t = k_t \cdot i$ (浸透能) と考え、降雨強度が浸透能より小さく、直接地盤に浸透する。

3. 降雨の評価

1) 降雨による安全率の経時変化

図 4 (a), (b), (c) は 4 日間総降雨量 7600 mm, 6570 mm, 3500 mm についてそれぞれ 4 つの降雨パターンの経時的な累積雨量の関係である。図中の直線は、堤体土の飽和透水係数 0.0019 cm/s に相当する降雨 (降雨強度 68.4 mm/hour) と時間の関係を表す。また、図 5 には降雨 7600 mm/4days で外水位 350 cm を考慮した場合の 3 日後までの安全率 F_s ~ 時間の関係を示し、比較のために降雨ナシ (外水位のみ) も同時に載せた。いま、安全率 F_s が 1.0 を割る時刻 $t_{(F_s=1)}$ で外力を評価するならば、この場合、B の降雨が最も早く安全率 1.0 を割り、危険であることを示しているといえよう。最初の降り始めは B が最も降雨強度 (図 4 (a) 中の傾き) が大きく、12 時間後より A1 と C が最大となっている。しかし、破壊時 (約 25 時間経過時) には、累積雨量としては A1, C の方が多くなっているにもかかわらず、B が最も危険となるのは降雨強度と飽和透水係数の

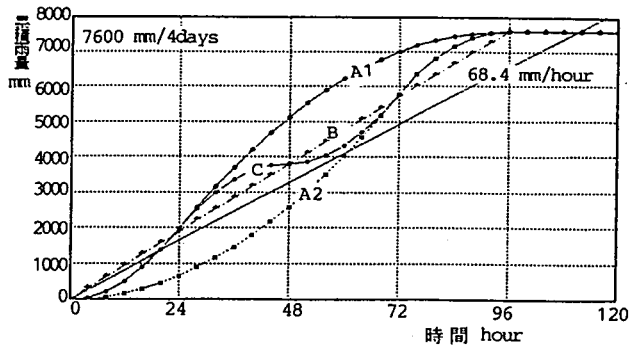


図4 (a) 7600 (mm/4days) 累積雨量 (mm) ~ 時間 (hr)

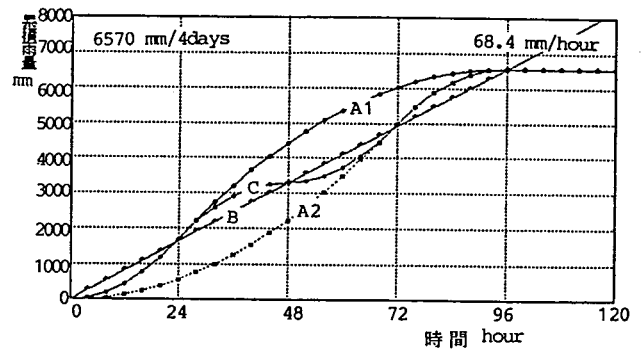


図4 (b) 6570 (mm/4days) 累積雨量 (mm) ~ 時間 (hr)

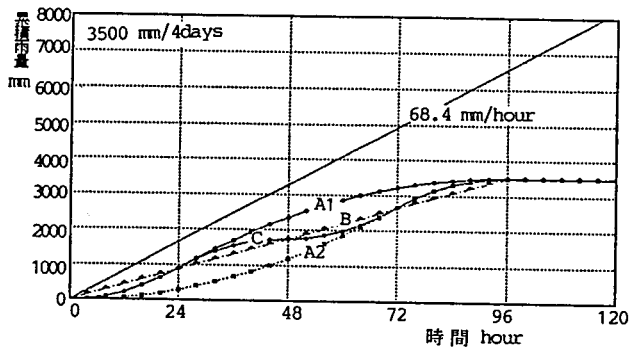


図4 (c) 3500 (mm/4days) 累積雨量 (mm) ~ 時間 (hr)

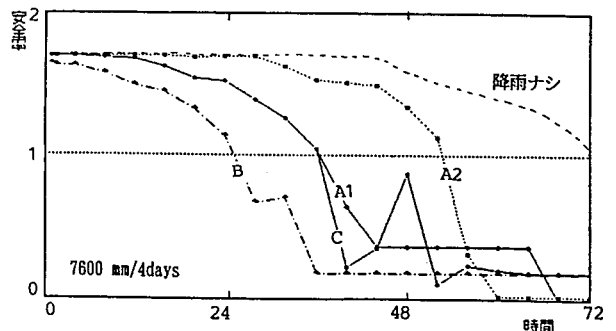


図5 7600 (mm/4days) 安全率Fs~時間 (hr)

関係にあると考えられる。それを示すために図6(a), (b)に降雨7600mm/4daysにおけるBとA1, Cの堤体内の飽和度分布の違いを示す。この図からBの方がA1, Cより降雨により飽和されていることが示される。このように破壊時のA1, Cの降雨強度は飽和透水係数よりかなり大きくなっており、降雨量は表面流として流れてしまうため地盤に浸透する雨量としては飽和透水係数に近いBの方が影響が高いと推察される。

表2は、それぞれの解析ケースについて、解析結果をもとに安全率 F_s が1.0を割る時刻 $t_{(F_s=1)}$ とそのときの累積雨量をまとめたものである。6570mm/4daysにおけるBパターンの降雨は先の図4(b)で示すように、飽和の透水係数0.0019cm/s(68.4mm/hour)に相当する降雨であり、有効に堤体内に浸透するものと考えられ、 $t_{(F_s=1)}$ は最も早く、破壊時までの累積雨量も最も小さい。

図7に4日間総降雨量と $t_{(F_s=1)}$ の関係を示す。これによると4日間総降雨量が大きくなるほど同じ降雨パターンの場合では $t_{(F_s=1)}$ は小さくなり、また降雨量が大きくなるほどパターンの違いによるバラツキが大きい。これは、降雨量が小さいほど外水位の影響が大きく支配的になるためである。次に、堤防の浸透能以上の降雨は堤体内に浸透しないことを考え、破壊時までの堤体内に浸透した降雨量を $t_{(F_s=1)}$ との関係を図8に示した。6570mm/4daysよりも大きい降雨、すなわち浸透能よりも強い降雨強度を持った降雨では、異なる4パターンも一つの直線上にのり、 $t_{(F_s=1)}$ と降雨浸透量の間に比例関係がみられる。一方、弱い強度の降雨では、外水位の影響の方が強くなるため、堤体内への降雨浸透量には左右されないことがこの図よりわかる。

2) 降雨による破壊規模

図9(a), (b), (c)はそれぞれ降雨の異なる場合の $t_{(F_s=1)}$ 時のすべり面(破壊規模)を示す。いずれもCパターンを除いて、ほぼ規模的には変わらず表層破壊であることがわかる。これより、Cを除く降雨パターン

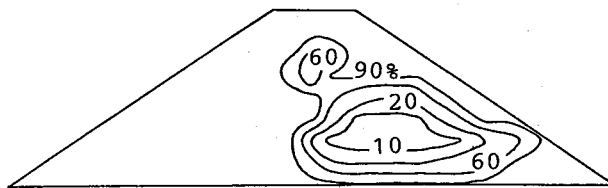


図6(a) 7600 (mm/4days) Bパターン, 破壊時の飽和度分布

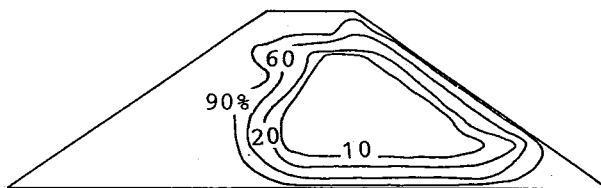


図6(b) 7600 (mm/4days) A1, Cパターン, 破壊時の飽和度分布

表2 解析結果

	A1		A2		B		C	
	$t_{(F_s=1)}$ (hour)	累積雨量 (mm)	$t_{(F_s=1)}$ (hour)	累積雨量 (mm)	$t_{(F_s=1)}$ (hour)	累積雨量 (mm)	$t_{(F_s=1)}$ (hour)	累積雨量 (mm)
7600(mm/4days)	36.4	3759.8	52.6	3103.5	25.2	1995.8	36.2	3378.5
6570(mm/4days)	36.1	3214.3	57.0	3143.6	25.2	1723.7	36.0	2907.0
3500(mm/4days)	60.4	2879.0	64.3	2129.2	64.5	2354.3	64.7	2205.3
降雨なし(外水位のみ)	75.3							

注: $t_{(F_s=1)}$ は安全率 F_s が1.0を割る時刻

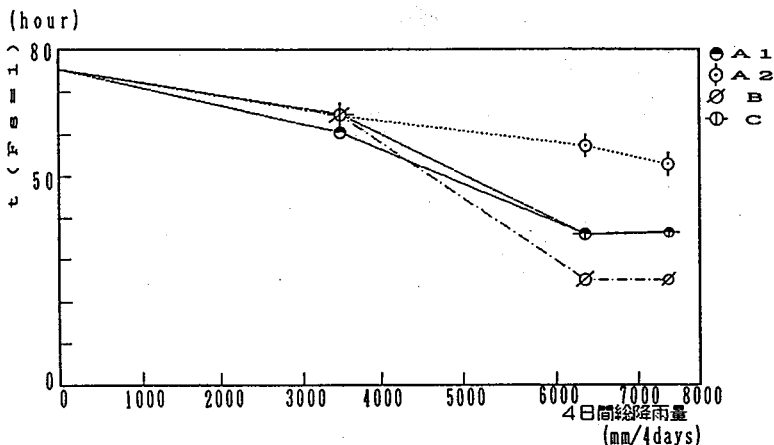


図7 $t_{(F_s=1)}$ (hr) ~ 4日間総降雨量 (mm/4days)

では降雨量の評価要因として $t_{(Fs=1)}$ を考えることは有効であると思われる。一方、Cパターンのような破壊規模が異なる降雨に対しては、 $t_{(Fs=1)}$ だけで評価することは難しく、破壊規模をも評価要因として考慮していかなければならないと考えられる。

4. あとがき

(1)安全率の低下には、累積降雨量よりも降雨強度（降雨変化量）の大きさが強く影響する。飽和透水係数の大きさに近いものほど安全率の低下が早くなるが、降雨強度が飽和透水係数を越えた場合には表面流として流れてしまい、安全率の低下への影響は大きくなる。

(2) $t_{(Fs=1)}$ を基準に外力評価を考えると、降雨量が大きくなるにつれ、同じ降雨パターンの場合では $t_{(Fs=1)}$ が小さくなることが確認された。また降雨パターンが異なる場合には降雨量の増加に伴い、パターンによる $t_{(Fs=1)}$ の違いが明確に現れる傾向が得られた。

(3)降雨が浸透能に対し強い降雨強度をもつ場合、異なる降雨パターンでも堤体内への降雨浸透量と $t_{(Fs=1)}$ との間に比例関係がみられ、降雨強度が弱い場合には、降雨浸透量に影響されないことがわかった。

(4)降雨に関する外力評価において降雨変化量考えた累積降雨量の関数形を考察することにより降雨パターンの定量的表現法とパターン評価の必要性を確認した。

【参考文献】

1) 宇野尚雄・田中進・杉井俊夫：洪水時の堤防の安定性変化，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，土質工学会，不飽和土の工学的性質に関する研究委員会，pp. 285～292, 1987.

2) 宇野尚雄・杉井俊夫・亀井雄介：降雨・洪水をうける堤防の安全率変化と外力評価，第26回土質工学研究発表会講演概要集，1991.

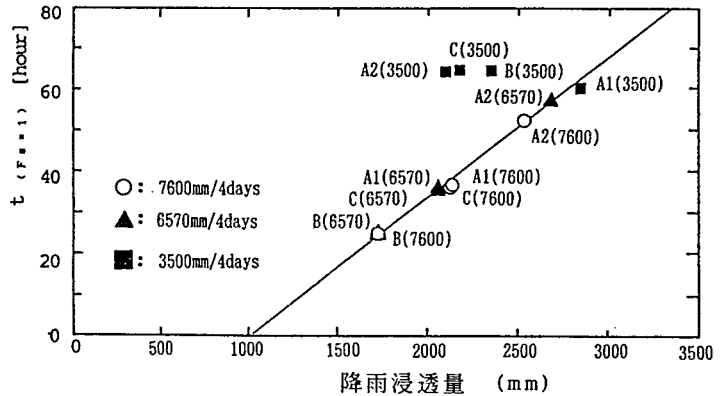


図8 $t_{(Fs=1)}$ (hr)～降雨浸透量 (mm)

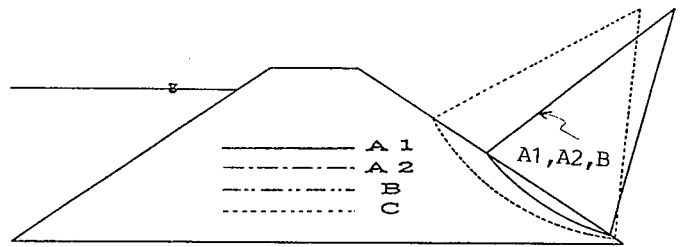


図9 (a) 7600 (mm/4days) $t_{(Fs=1)}$ 時のすべり面

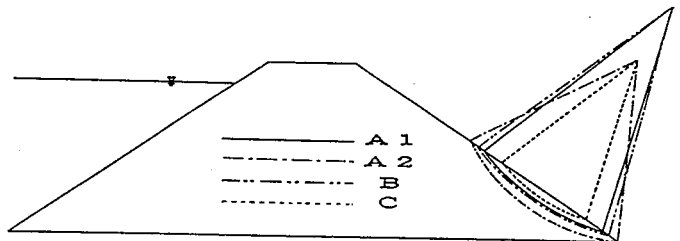


図9 (b) 6570 (mm/4days) $t_{(Fs=1)}$ 時のすべり面

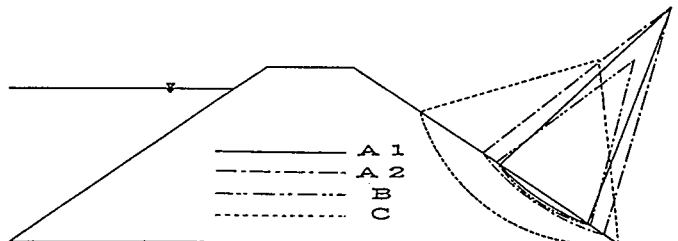


図9 (c) 3500 (mm/4days) $t_{(Fs=1)}$ 時のすべり面