

被災事例に基づく河川堤防の安定性評価

STABILITY EVALUATION OF RIVER LEVEES ON THE BASIS OF ACTUAL LEVEE BREACHINGS

宇野尚雄*・森杉壽芳*・杉井俊夫**・中野雄治***

By Takao UNO, Hisayoshi MORISUGI, Toshio SUGII and Yuji NAKANO

In order to evaluate the stability of river levee, the application of a logit model was attempted. On the basis of actual levee breaches, the probability of collapse for river levee was evaluated with the damage potential function consisting of characteristic factors of river levees. Eleven factors were selected of many possible factors of levee, and four logit models were formulated with them. As a result, the significant characteristic factors which affected the stability evaluation were specified. And it was found that probability of collapse "P" could accurately be represented as index for the stability of river levee. This paper also shows that the predictability of these models are sufficiently effective to evaluate river levee stability in the sense of its simplicity.

Keywords: stability evaluation, river levees, logit model, probability of collapse, characteristic factors

1. ま え が き

わが国は狭い国土にあり、河川密度が高く地形も急峻で、気象的には梅雨、集中豪雨、台風を例年受ける自然条件下にあり、災害を受けやすい環境にある。そのうえ、堤防周辺の土地開発、宅地化が急速に進行するに伴い、田畑などの滞水機能が低下し、降雨の地盤への浸透能力が減少するために、洪水流出の集中が起りやすくなっている。したがって、破堤時に生じる被害も、莫大な額に達すると予想される。このように、河川堤防をとりまく環境は変容しつつあり、従来被災していた河川工作物の中でも、堤防本体の欠壊は許されないものとしての要望が強まっている。特に、昭和49.9の多摩川左岸堤（粕江地区）の破堤、昭和51.9の長良川右岸堤（安八地区）、昭和56.8利根川支川小貝川の破堤といった「越水なき破堤」の発生は堤防の安定性に対する危惧の念を醸成させた。それは計画高水位以下の洪水による破堤として衝撃的であった。これに対して、「戦後の既往最大洪水」に対応できる堤防を目標とした洪水対策は現在のところ

大河川堤防では、その目標の6割、中小河川堤防では2割程度の低い進捗度といわれる¹⁾。この状況下で、堤防災害を何人も看過できない。堤防の安全性を高めるための方法論が必要であり、そのためには第1に堤防安全性評価手法の確立、第2は相対的に低い評価の堤防の補強・対策を実施することであろう。しかし、堤防の安全性を評価するためには、①付帯構造物の評価も含めた総合判断が困難なこと、②堤防の破壊メカニズムがすべて解明されていないこと、③安全性評価に用いる情報が得られにくいことなどの障害がある。たとえば、越流破堤に対する安全率の定義は不明であり、円形すべりに対する安全率は土質力学的に確立されているが、そのために必要な堤防土質条件などは部分的にしか把握できていない。このような究明されている破壊形態に対する安全率を用いた従来の力学的アプローチのみでは不十分と考えられる。そこで著者は、多数の被災事例分析の中からさまざまな要因の影響などによる離散的現象を確率として表現を行い、堤防の安全性評価手法の開発を試みた。

分析手法として非集計ロジットモデルの適用を試みており、これにより①被災要因が特定化でき、②被災の発生度を確率的に表現できることを報告する。なお、このような統計手法として数量化理論Ⅱ類が用いられることがあるが、Ⅱ類の場合には①の被災要因を特定化する場

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 一宮市水道部(〒491 愛知県一宮市下沼4)

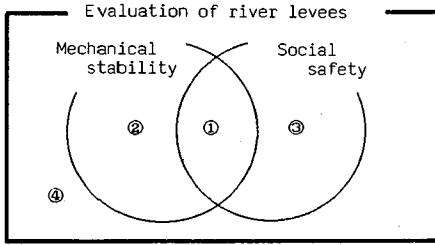


Fig.1 Conceptual evaluation of river levees.

合、特定化した要因の信頼度を求めることができないこと²⁾、および②の確率的表現ができないことのため、II類でなく非集計ロジットモデルを採用している。

2. 安定性と安全性

不確実性を含んだ自然外力に対して、情報量が十分でない堤防の安全性を定量的に評価することの困難さもさることながら、経済的制約のために、すべての堤防の強度レベルを上げることも期待できない。したがって、被災した場合の損失、被害をも考慮した評価が必要であると考えられる。そこで著者らは、堤防の安全性を評価するには、次の2側面から評価されることが望ましいと考える。第1には力学的に説明される堤防の抵抗力と外力のバランスの安定度を示す「力学的安定性 (Mechanical Stability) 評価」であり、第2に被災時の社会経済的損失をも考慮した「社会的安全性 (Social Safety) 評価」である。堤防をこの2側面から概念的に評価すると、Fig.1に示すように、①「安定かつ安全である」堤防、②「安定かつ安全でない」堤防、③「不安定かつ安全である」堤防、④「不安定かつ安全でない」堤防の4タイプに分類される。②は短期的に安定と考えられるが、不確定な外力に対して破壊すると被害が大きい堤防である。③は破堤の危険性を含んでいるが、破堤した場合の影響が少ない場合にあっては、地域によってはあり得る。このように実際の堤防は②または③のタイプが多く、安定性の定義・表現法を究明する必要がある一方、破壊時の影響を評価する社会経済的な安全性からの評価が必要となる。両者を評価する必要があるが、本報告では、前者の安定性の評価手法開発のため、ロジットモデルの選択確率を堤防の被災確率とみなして、堤防の力学的安定性を被災確率で表現する試みの成果を述べ、後者の安全性については次にその展望を述べるにとどめる。

3. 安全性評価への展望

力学的安定性が被災の発生する確率「被災発生確率 \dot{P} 」(ここでは4.以後の被災確率 P と区別している) で表わすことができたとし、その被災形態により生ずる損害被害額 C が別途に求められるならば n 地点の堤防の

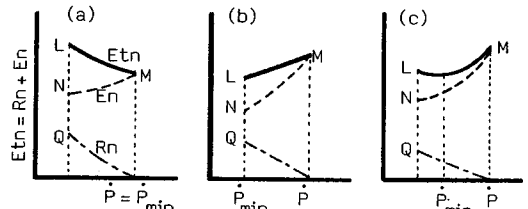
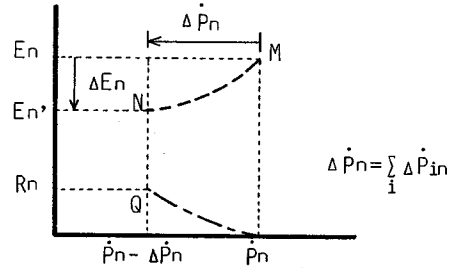


Fig.2 Probability of levee collapse and total cost.

i なる被災形態が発生する確率 \dot{P}_{in} とその損失額 C_{in} の積は被害期待値を表わし、 n 地点の堤防の被害期待値 E_n は式 (1) で表わされる。

$$E_n = \sum_i \dot{P}_{in} \cdot C_{in} \dots \dots \dots (1)$$

この被害期待値 E_n が小さいほど安全性が高く、逆に大きいほど安全性が低いと判断することができ、危険箇所の相対的評価が可能であると考えられる。一方、この被害期待値に対し、被災発生確率を $\Delta \dot{P}_{in}$ だけ下げると、改修工事費用 R_{in} 、被災発生確率の低減による被害期待値 $E'_n (= E_n - \Delta E_n)$ を用いると、次式による E_{tn} が総合期待値 (総費用) となる。

$$E_{tn} = R_n + E'_n \quad (R_n = \sum_i R_{in}) \dots \dots \dots (2)$$

このような関係を分類すると Fig.2 の3ケースが考えられる。(a) のケースでは、 E_{tn} が最小となるときの被災発生確率 \dot{P} が現状 (M点) であることから改修工事は不要、(b)、(c) のケースでは改修工事をしたほうがよいと考えられる。(c) では E_{tn} が最小となるある適量の改修が必要であるという判断が可能である。ただし (b) のケースでは、適度の改修方策が見出せないため、たとえば地域住民一人当たりの E_{tn} がある値以下になるようにする方法や、被災発生確率 \dot{P} の判定より改修量を決定する必要があると予想される。いずれにせよ、被害期待値 E_{tn} の算出には、公的、私的な費用、または物理的費用、心理的費用など種々のものを含め、試算しつつ、以下に提案する被災確率を利用した安全性評価が期待される。

4. ロジットモデルの概要³⁾と堤防評価への応用

ロジットモデルは、個人の選択行動を予測するもので

ある。本研究では、2つの選択肢をもつ2項ロジットモデルを用いた。2つの選択肢に、「被災する（または破堤する）」と「被災しない（または破堤しない）」を設定し、堤防 n が「被災する（または破堤する）」を選択する確率を被災確率 P_n とよんで両選択肢間の判別指標とみなす。

いま、被災しやすさを表わす堤防 n の被災ポテンシャル関数 U_n を考える。 $U_n > 0$ のとき堤防 n は被災し、 $U_n < 0$ のとき被災しないとする被災ポテンシャル関数を次式で定義する。

$$U_n = V_n \text{ (確定項)} + \varepsilon_n \text{ (確率項)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 V_n は得られている堤防の特性要因で説明される被災ポテンシャル関数の確定項、 ε_n は明らかにされていない要因およびデータのばらつきによる誤差を含んだ確率項（誤差項）である。

これより被災を受ける確率、被災確率 P_n は

$$\begin{aligned} P_n &= \text{Prob}(U_n > 0) \dots\dots\dots (4) \\ &= \text{Prob}(V_n + \varepsilon_n > 0) \\ &= \text{Prob}(-\varepsilon_n < V_n) \end{aligned}$$

ここで確率項 $-\varepsilon_n$ に Gumbel 分布を仮定すると、式(5)のロジットモデルが導かれる⁵⁾。

$$P_n = \frac{1}{1 + \exp(-V_n)} \dots\dots\dots (5)$$

確定項 V_n は、さまざまな形が考えられるが、次に示す線形式と仮定した。

$$V_n = \theta_0 + \theta_1 X_{n1} + \dots + \theta_k X_{nk} \dots\dots\dots (6)$$

X_{n1}, X_{n2} は堤防 n の特性要因（天端幅、のり高、……）であり、 $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots$ は最尤推定法により決定される未知の定数パラメーターである。 θ_0 は定数項であり、式(6)で明示的には取り上げられていないさまざまな要因を包含した定数（ダミー定数）としている。特性要因は、分析対象によって異なるが、選択対象の特性である選択肢特性と選択主体の特性である個人特性に分けられる。堤防問題に適用する場合、選択主体に堤防、選択対象に被災形態を対応させることから、個人特性としての堤防の特性のみによって被災するか被災しないかが判別される特殊問題と位置づけている。

被災確率 P_n は、式(4)に示すように、被災ポテンシャル関数の確率項が確定項よりも大きくならない確率、すなわち、確定性の確からしさを表わす。このように、ロジットモデルによる被災確率は、不明確な要因の特定化、情報データの不足の問題で被災するか、被災しないか、明確に表現することが困難である安定評価を確率的に表現するものである。

堤防 n が取り得る確率を \bar{P}_n （ただし被災しない堤防は被災しない確率を表わす）とし、堤防 n が実際に被災した結果を δ_n で示したとき、次式が成り立つ。

$$\bar{P}_n = P_n^{\delta_n} \cdot (1 - P_n)^{1 - \delta_n} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 δ_n はデルタ関数で堤防 n が被災したとき $\delta_n = 1$ 、被災しなかったとき $\delta_n = 0$ とする。したがって、同時確率 L^* は次式で与えられる。

$$L^* = \prod_{n=1}^N P_n^{\delta_n} \cdot (1 - P_n)^{1 - \delta_n} \dots\dots\dots (8)$$

上式は未知のパラメーター θ_k の関数、尤度関数（Likelihood Function）である。最尤推定法では L^* の対数 $L = \ln L^*$ を最大にする θ_k の値を推定することと等価であり、 L^* の対数をとると

$$\begin{aligned} L &= \ln L^* \\ &= \sum [\delta_n \ln P_n + (1 - \delta_n) \ln (1 - P_n)] \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

式(9)は対数尤度関数とよばれ、 L を最大にする θ_k ($k = 1, \dots, K$) の値を Newton-Raphson 法により推定する。推定された θ_k は t 値（信頼度 95 %）で検定され、棄却された場合はその特性要因を除き、再度推定を繰り返す。

モデルの検定には、次の2つの値が用いられる。

- (1) 的中率（% right または Hit Ratio）
被災確率 50 % を基準に的中した堤防数の割合。
- (2) 尤度比 ρ^2 (likelihood)

MacFadden の決定数といい、対数尤度関数 L の θ_k ($k = 1, \dots, K$) の値をすべて 0 にしたときの L の値を $L(0)$ 、 θ_k に $\hat{\theta}_k$ （推定値）を代入したときの L の値を $L(\hat{\theta})$ とすると、尤度比 ρ^2 は次式で表わされる。

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\hat{\theta})}{L(0)} \dots\dots\dots (10)$$

ρ^2 の値は、相関係数の2乗と同じように、0と1の間にあり、1に近いほどモデルの適合度がよいことを示す指標である。しかし、回帰分析に用いる相関係数とは異なり、 ρ^2 の値が 0.2~0.4 のときには十分高い適合度をもつと判断されている。

ここで被災確率と3.で述べた被災発生確率について説明を加えておく。今回、取り扱ったデータは洪水時におけるデータをもとにしていることから、ロジットモデルによる被災確率 P_n は平常時における被災の発生する確率とは異なる。すなわち、被災確率 P_n はデータの採取方法によって条件付き確率であることに注意しなければならない。平常時における被災発生確率は、被災確率によりモデル構築データの対象となった外力の生起確率を乗じる必要がある。ここでは、被災確率を条件付き確率であることを前提として報告する。

5. モデルの構築

(1) 被災事例の形態とモデルの意味

堤防の破損には、堤防が完全に破壊し、溢れた水が広範囲の氾濫を生ずる大規模なものから、堤体の一部が滑

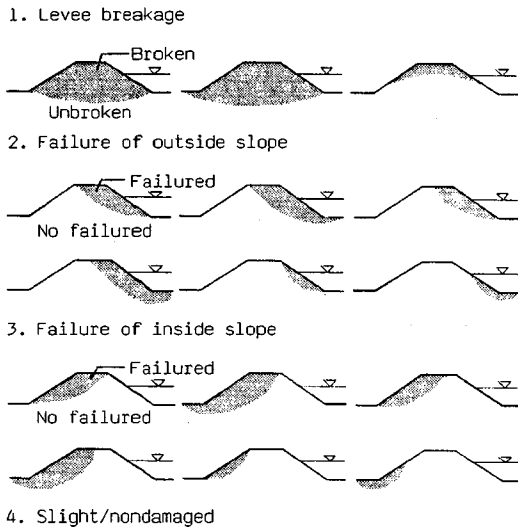


Fig. 3 Four types of levee collapse.

落する、ごく軽い被災程度のものまで多くの種類、形態が存在する。そこで、被災事例を分類するのに、破損形態を Fig. 3 に示すように、1. 破堤 (Breakage), 2. 表のり欠壊 (Outside slope failure), 3. 裏のり崩壊 (Inside slope failure), 4. 軽無被害⁴⁾ (Slight/nondamaged) の4つに現象を定性的に区別し捉え、それぞれ独立事象であると仮定を行っている。

今回用いたサンプルデータは、全国を対象にアンケートされた中小河川堤防 (川幅 200 m 以下を対象, 100 m 以下 65 % を占める) と大河川堤防 (長良川) 堤防のデータであり、越流水の有無でも分類されている。中小河川堤防の越流水なしのケースの軽無被害データは、全国のアンケート調査によって得られたものであり、無数にあると考えられる。大河川堤防のデータは、ある区間内を 400 m ピッチに区切り、個々の堤防としてサンプリングしたものである。サンプルデータの判別分類により、さまざまな評価モデルが構築されるが、今回その有用性とデータが制限されている点から4つのモデルを試作した。サンプルデータの分類と4つのモデルの判別ケースを Table 1 に表わす。モデル1は越流水があった中小河川堤防を対象としており、破堤と非破堤 (表のり欠壊、裏のり崩壊、軽無被害) を判別するために、破堤する確率を評価するモデルである。モデル2は同じく中小河川堤防で越流水があり、なんらかの被害を受けた堤防の中で破堤に至る確率を評価するものであり、モデル3はモデル2に対して、越流水がない場合のものである。また、モデル4は大河堤防で越流水がない場合の被災する確率を評価するモデルである。ここで、モデル2, 3は「被災を受けた堤防の中で」破堤に至るか否かの評価をするという条件を仮定しており、条件付き確率であることに

Table 1 Correspondence of damaged levee data to four discrimination model patterns.

(a) Middle/small-scale levees						
		Collapse type	Number	Model 1	Model 2	
With overflow	/	Breakage	120	120	120	
		Outside slope failure	19	} 76	} 31	
		Inside slope failure	12			
		Slight/nondamaged	45			
		Collapse type	Number	Model 3		
Without overflow	\	Breakage	47	47		
		Outside slope failure	118	} 137		
		Inside slope failure	19			
		Slight/nondamaged	∞			
(b) Large scale levees (the Nagara River)						
		Collapse type	Number	Model 4		
Without overflow	\	Breakage	1			
		Outside slope failure	30	} 36		
		Inside slope failure	5			
		Slight/nondamaged	87			

Table 2 Soil parameters.

Four type of soils	Cohesion (kN/m ²)	Unit weight (kN/m ³)
1. Sandy soil	9.8	17.6
2. Sand	4.9	17.6
3. Clayey soil	19.6	17.6
4. Sand and gravel	0.98	17.6

注意する必要がある。すなわち、越流水がない場合に与えられる堤防の破堤する確率を評価するには、モデル3で算出される被災確率とモデル4で算出される確率との積によって表現される。これは、多項選択モデルの1つである Nested Logit Model⁵⁾ の考え方を基本としている。

(2) 特性要因の選択

特性要因は被災ポテンシャルを構成し、堤防の安定に影響する要因であり、その選択は重要である。1つの堤防を表現する特性は無数にあるが、実際に入手することの可能なデータは限られている。また得られるすべてのデータを特性要因としてモデルに入力することは実用的でなく、総データ数と特性要因の間に自由度の制約や要因の相関性の問題を含むため、統計上の誤差や必要計算時間も考慮しなければならない。そこで昭和40年以降に起こった堤防災害についてのアンケート調査⁴⁾ に用いられている堤防特性の中から次のような規準で要因を選択した。「①入手しやすい情報であること。②相互の要因間に高い相関がある場合は、多重共線性を生じるため、片一方の要因のみを選択する。③力学的に判明されている要因はできるだけ取り込み、相関を生じる場合は、後述の安定数のように組合せ要因とする。④ダミー変数型の定性的な要因は特性要因数を増加させるため、可能なかぎり定量的な数値変数型の要因を選ぶ。」

この規準のもとで、後述するように11要因を選択しているが、そのうち、天端舗装、表のり構造、漏水の有

Table 3 Correlative coefficient (Model 1).

Characteristic factors	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 Width of levee crest	1.000	0.531	0.568	-0.235	0.135	0.151	-0.181	-0.119	0.016	-0.005	0.003
2 Inside height of levee crest	0.531	1.000	0.912	-0.446	0.173	0.073	-0.039	-0.002	-0.022	-0.071	-0.033
3 Area of levee section	0.568	0.912	1.000	-0.266	0.148	0.095	0.000	-0.076	-0.007	-0.055	-0.066
4 Soil strength parameter (Stability number)	-0.235	-0.446	-0.266	1.000	-0.275	0.031	-0.005	-0.116	-0.062	0.039	-0.017
5 Ratio of flow capacity to flood discharge	0.135	0.173	0.148	-0.275	1.000	0.003	0.025	0.015	0.119	0.079	-0.006
6 Permeable structure of outside slope protection	0.151	0.073	0.095	0.031	0.003	1.000	0.141	0.005	-0.086	0.095	-0.042
7 Permeable pavement of levee crest	-0.181	-0.039	0.000	-0.005	0.025	0.141	1.000	-0.179	0.006	0.053	-0.101
8 Recognized seepage of water	-0.119	0.002	-0.076	-0.116	0.015	0.005	-0.179	1.000	0.065	-0.072	-0.031
9 State of river channel: Concave levee line	0.016	-0.022	-0.007	-0.062	0.119	-0.086	0.006	0.065	1.000	-0.315	-0.390
10 State of river channel: Convex levee line	-0.005	-0.071	-0.055	0.039	0.079	0.093	0.053	-0.072	-0.315	1.000	-0.207
11 State of river channel: Existence of accompanying structure	0.003	-0.033	-0.066	-0.017	-0.006	-0.042	-0.101	-0.031	-0.390	-0.207	1.000

無、河道状況の要因は2者択一的な定性的データで、ダミー変数の形で入力される。堤体土質は、入手した堤体の情報が[土砂, 砂, 粘土多し, 砂礫・玉石]という4種類に分類された定性的データであるため、データの組合せによる集約を行い、 $c/\gamma H$ という安定数で表わしている。Taylorの安定数 $c/\gamma H$ であるが、堤体の安全率低減の要素であることが判明しており、堤体の土質強度を示す特性要因として用いた⁶⁾。すなわち、現在の定性的データに対し、 c/γ を Table 2 のように仮定することにより、入手しやすい H (裏のり高) との組合せで $c/\gamma H$ は連続数値変数として適用した。

上述したように相互の要因がある場合は、多重共線性を生じるため、片一方の要因のみを選択するべきであるが、あえて相関性のある要因をも含めてモデルの構築を行った。t 値が低くなる原因として①要因が被災に対する説明力をもたない場合、②他の要因と相関性があり、重共線性を生じる場合、が挙げられる。そこで、このように相関性を含めてモデルを構築する際に、棄却された要因は単に被災に対して説明力をもたず、無関係と判断するには注意が必要である。

Table 3 は、モデル1を構築する際に用いたデータの要因の相関を示しており、堤体断面積と裏のり高要因間では0.912と高い相関がみられる。要因の棄却方法は、t 値が1.96 (信頼度95%) に満たない要因について、t 値の一番小さい要因を棄却し、残る要因で再びパラメータ推定を行い、このSTEPを順次繰り返す。すべての要因のt 値が1.96以上になったところで終了する。Fig. 4 はSTEPごとのt 値の変化を示すものである。t 値が2.82であるにもかかわらず、天端舗装要因を棄却したことについては、ダミー一定数との相関性が高い、すなわち、天端舗装がされていない(透水性構造)状態の堤防がほとんどで、0-1変数である天端舗装要因

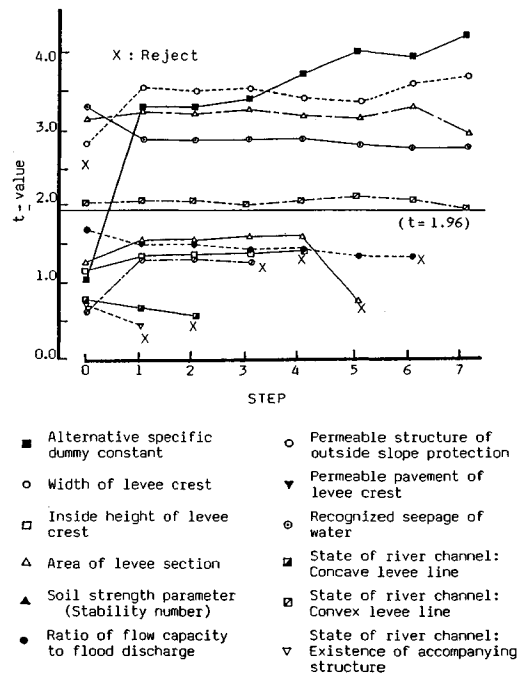


Fig. 4 Process of rejecting.

は、ほぼ1となりダミー一定数と同じ扱いになるためである。このことはSTEP 0-1において天端舗装要因を棄却したことにより、ダミー一定数のt 値が急増していることから判断できる。第4STEPで、裏のり高を棄却したことより、堤体断面積との重共線性が除かれたにもかかわらず、t 値が低くなったのは、堤体断面積の要因は被災に対して説明力をもたないことが推察される。STEP 5-6では天端幅、堤体土質要因のt 値が上昇しているが、2つの要因と堤体断面積との間に弱い相関性がみられ、ここで重共線性が消えたためと考える。以上、

Table 4 Analytical results for the four logit models.

Notation	Characteristic factors (Variables)	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
θ_0	Alternative specific dummy constant	2.156 (4.199)	4.538 (5.298)	1.962 (1.967)	-3.502 (2.637)
θ_1	Width of levee crest (m)	-0.439 (3.713)	-0.628	/	/
θ_2	Inside height of levee crest (m)	/	/	-0.839 (2.165)	0.742 (2.328)
θ_3	Area of levee section (m ²)	/	/	0.037 (2.014)	-0.014 (2.425)
θ_4	Soil strength parameter (Stability number) [0]	-1.919 (3.008)	-3.094 (3.591)	-2.195 (2.044)	/
θ_5	Ratio of flow capacity to flood discharge [0]	/	/	-1.201 (2.608)	/
θ_6	Permeable structure of outside slope protection ($X_6=1$)	/	/	/	/
θ_7	Permeable pavement of levee crest ($X_7=1$)	/	/	/	/
θ_8	Recognized seepage of water through the levee and its foundation ($X_8=1$)	1.590 (2.784)	/	/	1.443 (2.643)
θ_9	State of river channel : Concave levee line ($X_9=1$)	/	/	/	/
θ_{10}	State of river channel : Convex levee line ($X_{10}=1$)	0.981 (1.967)	2.429 (2.177)	/	/
θ_{11}	State of river channel : Existence of accompanying structure ($X_{11}=1$)	/	/	/	/
% right (Hit ratio) of model		0.699	0.868	0.755	0.732
Likelihood of model		0.185	0.455	0.241	0.223

相関がみられる要因のうち、一方の要因を削ると他方は次に t 値が大きく変動し、また、どの要因とも相関性のみられない要因は t 値の変動も少ないことから棄却の順序は変えても、最終的に同じ要因が残るといえる。

6. モデルの要因分析

(1) 推定された要因の有用性

以上のような特性要因でモデルの構築を行った結果、得られた係数パラメーターを Table 4 に示す。カッコ内は t 値を示しており、信頼区間 95% ($t=1.96$) で有意とされなかった特性要因は棄却されている。このパラメーター推定結果から要因の有用性について考察すると、次のようである。

① 天端幅 (X_1 : Width of levee crest)

越流水がある際には、天端幅は抵抗力要因として大きく効いており、越流水に強いことが考えられる。中小河川では、天端幅が大きくなると道路等に利用されることも多くなり、舗装が施され、越流災害を受けにくいことも推定される。

② 裏のり高 (X_2 : Inside height of levee crest) と堤体断面積 (X_3 : Area of levee section)

モデル 1, 2 の越流水があるケースでは、天端幅要因の方が強く棄却されてしまったが、モデル 3, 4 の越流水のないケースでは逆に残っている。しかし、裏のり高はモデル 3 では $\theta_2 = -0.839$ が、モデル 4 では $\theta_2 = 0.742$ と符号が逆になり、堤体断面積はモデル 3 では $\theta_3 = 0.037$ 、モデル 4 では $\theta_3 = -0.014$ と逆になった。これは、モデル 3 が軽無被害を除く被災例中の破堤の判別であるのに対し、モデル 4 では全体中の被災(破堤(1例)

+表のり欠壊+裏のり崩壊)の判別であるため、逆の符号の結果となっているだけで同義であると考えられる。

③ 堤体土質 $c/\gamma H$ (X_4 : Soil strength parameter)

モデル 1~3 のすべてに効くことが明瞭である。モデル 4 において棄却されたのは大河川堤防の土質データが不足しており、堤体表面からの観察によるのみ作成されたデータに基づくものであり、データの欠陥によるものと考えられる。中小河川堤防のケースのように 4 種類の分類でも十分な説明力をもっているといえる。

④ 流下能力/被災時流量 (X_5 : Ratio of flow capacity of flood discharge)

河川流量の程度を表わすもので、堤防に与える影響としては外力が小さければ、あるいは被災時流量に対して流下能力が大きければ、この値が大きくなるように定義した要因であって、堤防にとっては抵抗力要因とみなせる値である。この要因が採択されたものはモデル 3 のみであるが、越流水のないケースでは、これが外力要因として効いたものだと考える。この意味ではモデル 4 でも棄却されずに残るべきであるが、大河川堤防では、この外力に十分抵抗できる構造になっているのではないかと推察される。

⑤ 表のり構造 (X_6 : Permeable structure of outside slope protection) と天端舗装 (X_7 : Permeable pavement of levee crest)

これらの要因は、透水性構造と不透水性構造の 2 つに分類したものであるが、結果的にこれらの特性要因が 4 つのモデルのいずれでも棄却されたことは、河川水の表のり面からの浸透水、雨水の天端からの浸透による影響があつてしかるべきなので、①これらの構造差が安定に

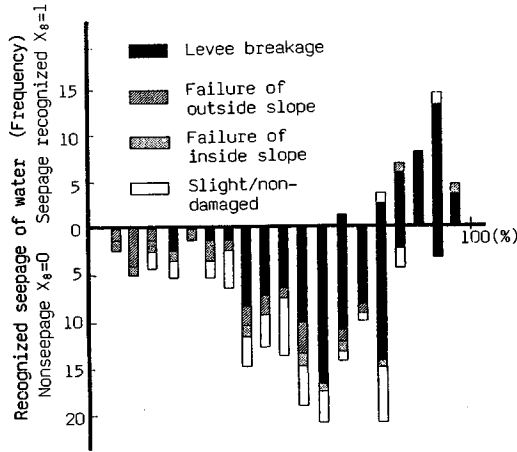


Fig. 5 Effect of factors on the probability of collapse : Model 1 (Recognized seepage of water).

影響するほどの構造になっていないこと (のり面や天端の一部にしか施工されていないこと), ②これらの施工は画一的にほとんどの地点で施工されている河川と施工されていない河川があり, 同一河川堤防では有意の差を生むデータとなっていないこと, に起因すると考えられる。

⑥ 漏水の有無 (X_8 : Recognized seepage of water)

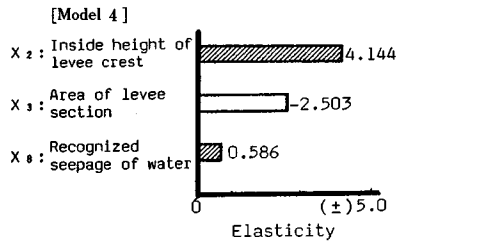
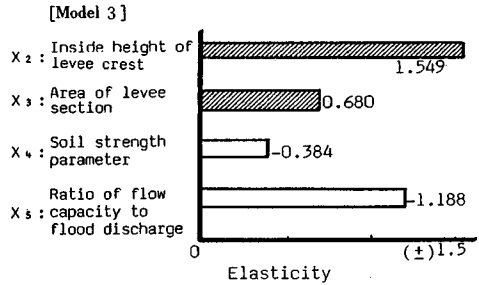
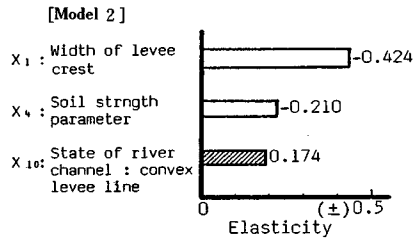
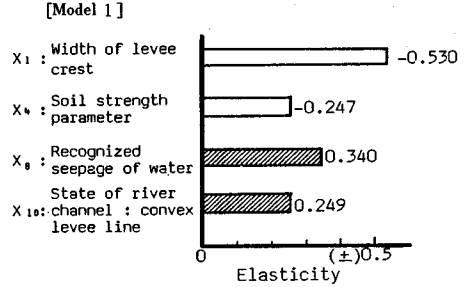
この情報がモデル1, 4で残り, かなり有効な要因であることをロジットモデル分析は教えてくれた。Fig. 5は縦軸に漏水の有無, 横軸に被災確率をとっており, 漏水がある場合の破堤の占める割合が高いことがわかる。モデル2, 3で棄却された原因は, モデル2, 3が被災形態の軽無被害を除いた被災堤防中の破堤を判別する分析であるため, 漏水の有無は軽無被害とそうでない被災を受ける判別によく効いたといえよう。

⑦ 河道状況 State of river channel (X_9 : Concave levee line, X_{10} : Convex levee line, X_{11} : Existence of accompanying structure)

凸岸部である要因のみが, モデル1, 2で棄却されなかった。これは, データを詳細に見直してみると越流水のあるケースでは, 上流の越流した堤内側からの逆流水により破堤を引き起こす傾向がみられ, モデルに反映されているものと考えられる。

(2) 要因の影響度

構築されたモデルには, いくつかの特性要因 (支配因子) が含まれており, 推定されたそのパラメーターの符号により, 外力的または抵抗力的に働く要因のいずれかであるかが判明された。しかし, さらに進んで残った要因の中でどれが最も強く効いてくるのかなどの問題は検討されていない。すなわち, 特性要因の単位, 次元の相違より, 推定された θ_k の値だけでその要因の影響度は



▨: Positive elasticity □: Negative elasticity

Fig. 6 Factor elasticities for collapse probability.

判断できない。このため, 弾性値という値をもって要因の影響度を試算した。弾性値 (Elasticity) とは「説明変数 (特性要因) の元の値に対する比率と, それをもたらす被説明変数 (被災確率) の変化量の比率との比」であり⁷⁾, その絶対値が大きい特性要因ほど影響度が強いと考えられる。特性要因 X_{nk} , 被災確率 P_n と定義する。

$$P_n = f(X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk}, \dots, X_{nk}) \dots \dots \dots (11)$$

また, X_{nk} が ΔX_{nk} だけが変化したときの P_n の変化量を ΔP_n とすると

$$\Delta P_n = f(X_{n1}, \dots, X_{nk} + \Delta X_{nk}, \dots, X_{nk}) - f(X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk}, \dots, X_{nk}) \dots \dots \dots (12)$$

となり, したがって弾性値 E_{Xnk} は

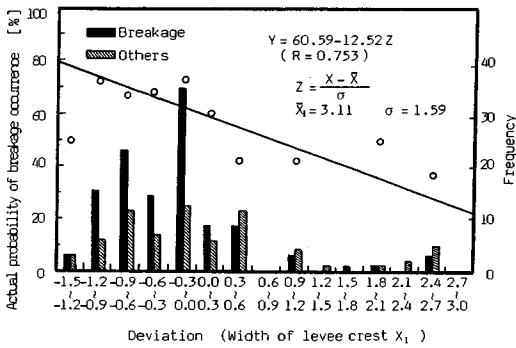


Fig.7 Influence of the factor (X_1) on actual probability of breakage occurrence.

Table 5 Gradient of the characteristic factors influence on actual probability of breakage occurrence.

Characteristic factors (Variables)	Gradient of the factor	Correlative coefficient:R
Width of levee crest	-12.52	0.753
Inside height of levee crest	0.38	0.034
Area of levee section	-3.72	0.217
Soil strength parameter (Stability number)	-9.89	0.782
Ratio of flow capacity to flood discharge	-1.75	0.098

$$E_{x_{nk}} = \frac{\Delta P_n / P_n}{\Delta X_{nk} / X_{nk}} \dots \dots \dots (13)$$

と定義される。Fig. 6 は各特性要因について4つのモデルの弾性値を算出した結果を表わしたものである。弾性値の符号は外力的要因(正)、抵抗力的要因(負)を表わし、その絶対値は取り上げる要因を1%増加させた場合に被災確率が何%変化するか比率を示しており、試算の結果、弾性値により次のことがいえよう。越流水があるケースでは、天端幅がモデルの特性要因の中でも最も効いており、安定性を考えるうえで重要な要因である結果となった。このことは、天端幅が大きくなることは、その要素に伴い他の要素(堤体断面積や天端舗装など)も安定性を増やす方向へ変化することからも理解される。また漏水ありは負の抵抗力的要因として強い影響を与えるものであり、越流がある場合には、破堤につながるとして注意が必要であることをこの結果は示唆している。越流がないケースでは、裏のり高による影響が高く、水位の関係による浸透水による破壊、洗掘などが考えられる。

以上のロジットモデルによる分析を確認するため、数値変数型要因の破堤に対する影響をモデル1について調べた。要因相互を比較するため、それぞれ要因を無次元化し、偏差(0.3間隔)でデータを整理し、要因別にみた数値変数型要因の偏差別破堤発生率を求める。これよ

り、各要因の破堤発生率に与える影響を定量化することを考え、数値変数型要因と破堤発生率間の単回帰を行った。Fig. 7(天端幅)、Table 5の結果、回帰線勾配および回帰における相関係数Rから天端幅要因、ついで堤体土質要因が破堤の発生率と相関が高く、逆に裏のり高、流下能力/被災時流量、堤体断面積といった要因は相関が低く、ロジットモデルの要因の棄却、前述の弾性値分析の傾向とも一致し、ロジットモデルがデータの傾向を正しく表わしていることが明らかにされた。

7. 評価モデルの適用

被災事例データを用いて、評価モデルを構築し、さらにモデル分析を行ってきたが、次にこのモデルを用いて、他の堤防を対象とした安定性評価を行った結果について報告する。モデルの適用方法については、さまざまな方法が提案⁷⁾されているが、今回、次の2つの方法を用いた。

[方法1] モデルをそのまま適用する方法

今回の堤防評価モデルでは、堤防の形状(天端幅、裏のり高、堤体断面積など)の特性要因を含んでいるため、適用先で堤防規模に大きな差が生じる場合は、パラメータの大きさが問題となるため、方法1は堤防規模、地域特性が類似する堤防への適用に適すると考えられる。

[方法2] 被災ポテンシャル関数の定数項のみを修正する方法

被災の有無(選択結果)がわかっている必要があるが、シェアSと各変数の平均値 \bar{X} より連立方程式(14)を解き、修正項 β を求める。

$$S = \frac{1}{1 + \exp\{-\sum \theta_k \bar{X}_{nk} + \beta\}} \dots \dots \dots (14)$$

ただし、シェアSを集計データ的に考えるため、全堤防数に対する被災した堤防数の割合の現況値を用いる。 \bar{X}_k は被災ポテンシャルの各要因の平均値を用いる。

$$V_n = \ln \frac{S}{1-S} \dots \dots \dots (15)$$

式の左辺を次のようににおいてこれより β を求める。

$$V_n = \theta_0 + \theta_1 \bar{X}_{n1} + \dots + \theta_k \bar{X}_{nk} + \beta \dots \dots \dots (16)$$

【適用事例】

伊自良川堤防[0.0 km~6.0 km 区間]を400 m間隔で区切り、30個の堤防断面を考え、この堤防を対象に越流水がない場合に被災を受ける確率を評価する。この伊自良川と同河川流域にある長良川堤防をもって構築したモデル4の適用を考える。なお、伊自良川堤防は、表裏のり崩壊が9例、軽無被害21例が発生している。方法1によるモデル4の被災ポテンシャル関数は、次式で表わされる。

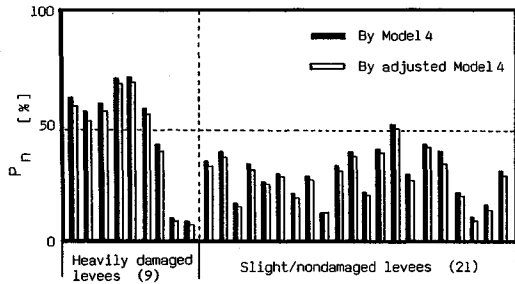


Fig. 8 Comparison of the probabilities evaluated by Model 4 and that by adjusted Model 4.

$$V_n = -3.502 + 0.742 X_2 - 0.014 X_3 + 1.433 X_6 \dots (17)$$

また方法 2 による被災ポテンシャル関数を求めるため、修正値 β を求めると、現況値シェア $S=0.30$ ($=9/30$) より、 $\beta = -0.143$ となり、よって修正モデルの被災ポテンシャル関数は、次の式 (18) で表わされる。

$$V_n = -3.645 + 0.742 X_2 - 0.014 X_3 + 1.443 X_6 \dots (18)$$

これら方法 1, 2 のモデルを用いて安定性評価を行った結果を Fig. 8 に表わす。修正モデルによる若干の被災確率の低下がみられるが、的中率はともに 90% と変わらず、修正モデルによる影響は少ないと考えられる。そこで、伊自良川堤防を方法 1 によって評価した結果を河川堤防の位置を示す図上に表わしたのが Fig. 9 である。この結果から、明らかに被災確率 50% 以上の堤防箇所を表裏のり崩れが生じていることがわかり、的中率も 90% と非常に高い。これはモデル 4 を構築した長良川堤防と同河川流域内にあること、また同じ被災時期のデータであるので、雨量等の外力も類似していることも大き

Table 6 Comparison of characteristic factors of the Nagara River and that of the Ijira River.

Characteristic factors (Variables)	Middle/small-scale levees (without overflow)	Levee of the Nagara River	Levee of the Ijira River
Width of levee crest (m)	3.8	6.5	4.9
Inside height of levee crest (m)	2.5	7.9	5.7
Area of levee section (m ²)	24.5	252.5	131.7
Recognized seepage of water through the levee and its foundation (%)	14.1	15.4	26.7

Table 7 Recalculated coefficients of characteristic factors of Model 4.

When Model 4 is applied to Levee of the Ijira River	Factor	θ_k (t-value)
	Alternative specific dummy constant	1.464 (0.689)
	Inside height of levee crest (X_2)	-1.170 (1.322)
	Area of levee section (X_3)	0.018 (0.839)
	Recognized seepage of water through the levee and its foundation (X_6)	4.873 (2.802)

な原因と考えられる。Table 6 はモデル 4 を構築した長良川堤防と伊自良川堤防の特性を比較するものである。なお、中小河川堤防は比較対比するために挙げた。これより、天端幅、裏のり高の規模は中小河川堤防のそれに比べ、差異は小さい。また、堤体断面積は半分程度とかなり小さいとみられるが、これは影響度分析で述べたように、堤体断面積の影響度は裏のり高の影響度に比べて小さいためである。漏水ありについてみると、伊自良川の被災があった箇所では 77.8% ($=7/9$) で漏水が認められ、被災がない箇所では 4.8% ($=1/21$) しか漏水が

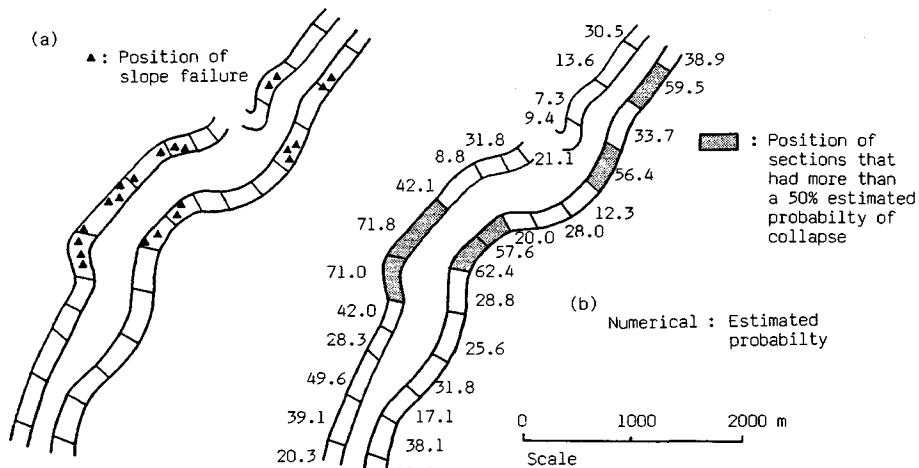


Fig. 9 Correspondence of actual positions of slope failure to sectional positions that had more than a 50% estimated probability of collapse during the flood period of September, 1976.
(a) Actual positions (b) Estimated probability

認められなかったことがわかった。さらにこれは、適用先の伊自良川堤防データをもとに、モデル4と同一変数組で再推定した結果、Table 7からもわかる。カッコ内は t 値を示すが、漏水あり要因のみが信頼区間95%で有意とされており、これより伊自良川堤防への適用で90%ものの中率が得られた理由として、漏水ありの情報が必要な理由となったことが推察された。

8. あとがき

本報告では、堤防の安全度を「安定性 (Mechanical Stability)」と「安全性 (Social Safety)」という2面から捉え、被災事例に基づいたロジットモデルによる「安定性評価」の開発を試みてきたが、その結果得られた内容を要約すると次のようになる。

第一にロジットモデルにより棄却されずに残された要因について、推定されたパラメーターの符号と実際に解釈される符号とが一致しており、被災形態の違いによる外力・抵抗力となり得る特性要因の抽出が可能であることが判明した。これは、力学的な破壊メカニズムの究明されていない解析点に大きな手がかりとなると考えられる。第二に入手しがたい情報である堤体土質は4種類の分類であったが、安定数 $C/\gamma H$ の形で定量的に表わす方法を検討することによって十分な説明力をもっていることが判明した。第三にモデルの特性要因の影響度を弾性値により判断すると、越流水があるケースでは天端幅が重要な要因である結果が得られ、ここで得られた影響度の傾向は、堤防修復時の対策指針に役立つものと考えられる。また、越流水のある場合などの漏水が破堤に結び付く要因であることが示唆されたことは、非常に注目できることであり、容易に発見できる危険信号として今後、漏水の力学的背景が究明されるべきであると考えられる。第四に、構築されたモデルを他の堤防に適用させた結果では、モデルの構築に用いた堤防の特性が含まれ、規模に大きな相違がない場合、そのままのモデルを適用することが可能であり、また異なる堤防への適用には、モデルの修正が必要であることなどが得られた。

以上の結果から、安定性評価手法の開発で、ロジットモデルを適用することにより、離散的現象・データから、堤防の危険性を定量的に評価することが、かなり有望で

あることが結論された。しかし、堤防に関するデータの不足のため、限られたケースのモデルや有力な要因の欠落の問題があり、その取捨選択法の検討のうえに堤防資料の蓄積が望まれる。今回の報告では、2項ロジットモデルを用いた評価法について述べたが、多項選択モデル (Nested Logit Model) への発展により、被災形態 (破堤、表のり欠壊、裏のり崩壊、軽無被害) の判別とそれぞれにみあう損失額の算定と外力の発生確率を考慮した被災発生確率 \hat{P} より、「安全性の評価」から危険箇所、修正箇所の決定判断が期待される。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、堤防資料入手にご配慮頂いた京都大学防災研究所 村本嘉雄教授、建設省土木研究所 吉野文雄室長に深甚の謝意を表します。また、ロジットモデルにおいて協力を得た計量計画研究所の林山泰久氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 建設省木曾川工事事務所：河川シンポジウム木曾・長良・揖斐一きょう・きょう・あす一報告書、1986。
- 2) 大橋健一・青山吉隆：土木計画学への数量化理論Ⅱ類適用の信頼度に関する実験的研究，土木学会論文集，第353号/Ⅳ-2，1985。
- 3) 森杉壽芳：非集計行動モデルの推定と検定，土木計画学会講習会テキスト，pp.25～66，1984。
- 4) 吉野文雄：洪水による河川堤防の実態と要因に関する研究，自然災害特別研究(1)，No.5820025(代表 村本嘉雄)中間報告，pp.4～9，1984。
- 5) 太田勝敏：非集計行動モデルの理論展開，土木計画学会講習会テキスト，pp.9～23，1984。
- 6) 宇野尚雄・田中 進・杉井俊夫：洪水時の堤防安定性変化，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，pp.285～292，1987。
- 7) 森地 茂：非集計行動モデルによる予測，土木計画学会講習会テキスト，pp.139～143，1984，1987。
- 8) 宇野尚雄・森杉壽芳・杉井俊夫：堤防安定性評価のためのロジットモデル，地盤工学におけるリスク評価手法に関するシンポジウム概要集，pp.15～20。
- 9) Uno, T., Morisugi, H., Sugii, T. and Ohashi, K.: Application of a Logit Model to Stability Evaluation of River Levees, Journal of Natural Disaster Science, Vol.9, No.1, pp.61～77, 1987.

(1988.1.29・受付)