

悉皆調査に基づく農業用ため池の地震被害の予測

鈴木健一*・福田一美**・中村正博***・池見拓****

農業用ため池の地震に対する危険度を評価するため、1983年日本海中部地震に係わる秋田・青森両県のため池の悉皆調査データを数量化理論Ⅲ類により分析した。その結果、大被害のため池とその他のため池の分離が可能であることが判明した。また、従来の工学的知見との整合性という観点から評価検討を行い、大多数のため池の中から要改修ため池を選別するための簡便な地震危険度判定表を提案した。

Keywords: earth irrigation dams, seismic damage, complete survey, statistical analysis, forecast, seismic vulnerability

1. はじめに

灌漑用のため池は古くは農耕文化の発達の初期に築造されたものもあり¹⁾²⁾、その数は実に全国約25万か所にも及ぶといわれている³⁾。これらのため池は日本の農業生産を向上させるべく築造されたものである。その多くが今日まで幾多の自然災害を経てなお灌漑需要に大きく貢献しているのは、先人達の英知と努力によって維持・改修が繰り返されてきたからにはかならない。しかしながら、その大部分は土堰堤とよばれる小規模なアースダムによって貯水されたものであり、年々老朽化が進んでいるのが現状である。このような老朽ため池については毎年改修が進められているが、限られた財源の中で順次改修事業を進めていくためには、改修の優先順位が最も大きな問題となっている。改修の要否を判断する指標としては、ため池堤体や余水吐、底樋、斜樋などの老朽度や機能の低下度、地震や豪雨などの自然災害に対する危険度、あるいは堤体の決壊による下流域への影響度などがある。また、最近では副次的な機能としての洪水調節機能や公園やレクリエーション施設などいわゆる親水空間としての機能といった観点もある。このうち自然災害に対する危険度は、有史以来の決壊と改修の歴史が証明するように最も重要な改修の判断指標と考えられる。とりわけため池に壊滅的な被害をもたらすという点で、地震は注意すべき自然災害であるといえる。地震多発国の日本においては、地震に対する危険度は改修の要否を判

断する必須項目といっても過言ではない。昭和53年の「大規模地震対策特別措置法」の制定以来、ため池の地震防災対策についても鋭意検討がなされている。

ため池の地震に対する危険度を評価するためには、ため池がどのような場合に地震被害を受けやすいかを知る必要がある。それには実際の震害に基づき、被害事例と無被害事例を統計的に整理し、両者の違いを分析することが極めて有効な方法である⁴⁾⁵⁾。このような観点から1983年日本海中部地震⁶⁾⁷⁾に係わる秋田・青森両県のため池の悉皆調査データを基に、多変量解析の一手法である数量化理論Ⅱ類による一連の要因分析が行われ、地震によるため池の危険度判定表が提案された⁸⁾⁹⁾。この判定表は堤高や基礎地盤の土質などいくつかの項目から地震による被害の可能性を簡便に判定(予測)することを目的としており、極めて多数のため池から改修を必要とするため池を選別する、いわば1次の“ふるい”として一連の改修計画を円滑に推進する上で一助となるものと期待されている。

昭和59年の悉皆調査以来、この危険度判定表については検討が重られている。しかしながら、判定に必要な項目内のカテゴリーの重み(カテゴリースコア)に従来の工学的な知見に反するものがあるとの指摘もあり、未だ是認されていないのが現状である。そこで今回は、これまでに分析に用いられた同一のデータを基にして、多変量解析の一手法である数量化理論Ⅲ類¹⁰⁾¹¹⁾を適用し、別の角度から検討を加えた。

2. 地震による危険度判定表の見直し

(1) 地震による危険度判定表の問題点

表-1にこれまでに提案された地震による危険度判定表を示す。あるため池が地震により大被害を受けるか否かの判定は、各アイテム内の該当するカテゴリーのスコアを足し合わせて合成変量(サンプルスコア)を算出し、

†本論文は、参考文献16)に著者らが発表した報告をもとに、図表の取捨選択および新たな観点による検討結果の追加を行ったまとめ直したものである。

* (財)日本農業土木総合研究所

(〒105 東京都港区虎ノ門1-21-17)

** 正会員 川崎製鉄(株)エンジニアリング事業部(元(財)日本農業土木総合研究所研究員)

*** 正会員 工博(株)フジタ技術研究所 土木研究部

**** 正会員 (株)フジタ技術研究所 土木研究部

表一 地震による危険度判定表

[アイテム] カテゴリー	カテゴリー スコア	レンジ (順位)	偏相関係数 (順位)
[築造年代] 明治以前 (不明含む) 1913-1952 1953-1984	0.1206 -0.3999 -0.1813	0.5205 (8)	0.0899 (7)
[堤高 (m)] 0-5 未満 5-10 未満 10-15 未満 15 以上	-0.0778 0.0242 0.3053 0.6661	0.7440 (5)	0.0598 (8)
[堤頂幅 (m)] 0-3 未満 3-4 未満 4 以上	0.3648 -0.0758 -0.3456	0.7104 (6)	0.1186 (5)
[堤頂幅/堤高] 0.0-0.6 未満 0.6-1.0 未満 1.0 以上	0.0553 -0.3049 0.2808	0.5857 (7)	0.1046 (6)
[上流法面勾配 (割)] 0.0-1.5 未満 1.5-2.0 未満 2.0 以上	0.5819 0.1005 -0.6931	1.2750 (1)	0.2200 (1)
[基礎地盤の地質年代] 第三紀 洪積世 沖積世	0.3674 -0.5232 0.0593	0.8905 (4)	0.1586 (2)
[基礎地盤の土質] 硬岩・軟岩 粘土・砂質粘土 砂・砂質土	0.4346 -0.1536 -0.5242	0.9588 (3)	0.1390 (4)
[堤体における沈下の有無] 有 無	-1.0446 0.1188	1.1634 (2)	0.1522 (3)
判定	判別区分点 合成変量 $x = -0.70$ f	$f \leq x \Rightarrow A$ $f > x \Rightarrow B + C$	

表二 デルファイ法の結果に基づく被害判定表

[アイテム] カテゴリー	カテゴリースコアの 平均値 (○印) および標準偏差 (○—)	レンジ (順位)
[築造年代] 明治以前 1913-1952 1953~	○— ○—	3 (5)
[ダム型式] 均一 ゾーン・表面透水・コア 前刈金	○— ○— ○—	1 (10)
[地形] 山 丘陵 平地	○— ○— ○—	4 (2)
[基礎地盤の地質年代] 第三紀 洪積世	○— ○—	4 (2)
[基礎地盤の土質] 硬岩・軟岩 粘性土 砂質土	○— ○—	7 (1)
[堤体主体材料] 砂質土 粘性土 その他	○— ○— ○—	4 (2)
[堤体における沈下の有無] 有 無	○— ○—	2 (8)
[堤体における法面崩壊の有無] 有 無	○— ○—	2 (8)
[堤体における漏水の有無] 有 無	○— ○—	3 (5)
[底構の型式] 木 石 コンクリート ヒューム管 その他	○— ○— ○— ○—	3 (5)

予め定められた判別区分点との大小関係をもって判断される。すなわち、判別区分点よりも合成変量が小さい場合には、そのため池は被害を受ける可能性が高いと判定される。したがって、各アイテム内のカテゴリースコアは、いわばどのカテゴリーが相対的に地震被害に対する影響が強いかを表す尺度であり、ここではカテゴリースコアの小さいカテゴリーが地震被害に寄与すると考える。

この判定表が是認されない大きな理由の一つは、いくつかのアイテムについてカテゴリースコアの序列（大小関係）に従来より一般的に考えられている傾向と異なる場合があるということである。

(2) 専門家の意見と判定表の相違点

昭和61年度の「ため池等施設整備対策調査¹²⁾」ではデルファイ法によるアンケート調査が実施され、専門家の意見の集約が行われた。質問事項は表-2に示す調査項目中の各要因がどの程度の耐震性を有しているかを問うもので、各回答者は独自に5点（耐震性が極めて高い）から1点（耐震性が極めて低い）までの1点刻みの点数を各要因の耐震性に依りて付けることにより回答を行うというものであった。調査項目内の要因の点数付けを基に、2回にわたるアンケートの結果が専門家16名の意見の大勢として表-2のようにまとめられた。

ここではデルファイ法により集約された意見を従来か

らの工学的知見と考え、危険度判定表の各アイテムごとに数量化理論Ⅱ類によるカテゴリーの相対的な序列と専門家の意見との差異を把握するとともに、問題点の整理を行った。デルファイ法による調査に設問がない場合には、推測の範囲で考えられる解釈をいくつか加えた（以下、「A」<「B」という表記は、カテゴリーAのカテゴリースコアがカテゴリーBのそれよりも小さく、カテゴリーAがカテゴリーBよりも耐震性が低いことを意味する）。

a) 築造年代

◇判定表：「1913~1952 (大正~S 27年)」<「1953~1984」<「明治以前 (不明含む)」
◇専門家：「1913~1952 (大正~S 27年)」<「明治以前 (不明含む)」<「1953~1984」

「1913~1952 (大正~S 27年)」の危険性が最も高い点については、一致している。大正時代から戦後の食料増産期に築造されたため池は、特に施工基準、施工条件などが悪いことが理由として考えられる。しかし、「1953~1984」の比較的新しい時代に造られたため池が「明治以前 (不明含む)」のものよりも危険性が高い点については、専門家の意見と異なる。

b) 堤高

◇判定表：「0~5 m 未満」<「5~10 m 未満」<「10~15 m 未満」<「15 m 以上」

◇専門家：※設問なし

判定表では堤高が低いほど危険性が高くなっている。小規模なものの施工が容易であるため、施工基準を考慮せず経験的に築造されている場合が多い。また、決壊による影響の度合いは小規模なものほど小さく、日常の維持管理も不十分となりやすいことなどが理由として考えられる。しかし、物理的に堤高の高いほうが危険性が高いのでは、との指摘もある。

c) 堤頂幅

◇判定表：「4 m 以上」<「3~4 m 未満」<「0~3 m 未満」

◇専門家：※設問なし

判定表では堤頂幅が大きいものほど被害を受けやすくなった。クラック等の発生確率の面から見れば、堤頂長や堤頂幅が大きいほうが単純に被害の可能性は高いという見方もある。また、断面の形状から見て堤高に対して異常に堤体の幅が厚いものについては、透水性の比較的高い材料を築堤材として用いているか、押え盛土のように既存の堤体を補強するために腹付けされた可能性もある。安定問題上からは堤高や法面勾配とも密接に関係すると考えられる。

d) 堤頂幅/堤高

◇判定表：「0.6~1.0 未満」<「0~0.6 未満」<「1.0 以上」

◇専門家：※設問なし

堤頂幅/堤高は堤体の安定性を表す指標と考えられ、この値が大きいほど安定性があると解釈されてきた。「1.0 以上」が最も危険性が低いという点は納得できるが、「0.6~1.0 未満」が「0~0.6 未満」よりも危険性が高いという結果の解釈には苦慮する。

e) 上流法面勾配

◇判定表：「2.0 以上」<「1.5~2.0 未満」<「0~1.5 未満」

◇専門家：※設問なし

判定表では勾配が緩いほど危険性が高くなっている。これは斜面の安定問題の経験上、一般的な認識と矛盾する。堤体材料の品質を加味して解釈すると、堤体の材料が悪いものほど経験的に緩い法面勾配で築造されるという理由付けがこれまで行われたが、コンセンサスは得られていない。判定表の一項目として独り歩きすると、背後の関連する情報は考慮されにくく、使用する際に抵抗があるようだ。なお、「老朽ため池整備便覧¹³⁾」によれば、軟弱地盤上のため池の施工については上・下流とも法面勾配を3割以上にするとされている。したがって、堤体の法面勾配は地盤の状況にも関連性があると考えられる。

f) 基礎地盤の地質年代

◇判定表：「洪積世」<「沖積世」<「第三紀」

◇専門家：「沖積世」<「洪積世」<「第三紀」

「第三紀」が最も危険性が少ないという点では一致するが、「洪積世」が「沖積世」よりも危険性が高いという点で専門家の同意が得られていない。

g) 基礎地盤の土質

◇判定表：「砂・砂質土」<「粘土・砂礫質粘土」<「硬岩・軟岩」

◇専門家：「砂・砂質土」<「粘土・砂礫質粘土」<「硬岩・軟岩」

両者は一致している。問題はない。

h) 堤体における沈下の有無

◇判定表：「有」<「無」

◇専門家：「有」<「無」

両者は一致している。問題はない。

以上のように、「基礎地盤の土質」と「堤体の沈下の有無」の2項目以外は、それぞれ何らかの問題をもって、そこで今回は、従来の工学的知見と震害調査から得られた統計的傾向との整合性という観点から危険度判定表の見直しに必要な分析を実施した。

3. 数理化理論Ⅲ類による分析

(1) 分析に用いたデータ

分析に用いたデータは、1983年日本海中部地震に係わる悉皆調査データである。調査されたため池の被害程度はランクA、ランクB、ランクCの3段階に分けられた。すなわちランクAは堤体が決壊したものおよび決壊と同等の被害を受けたもの、ランクBは被害を受けたがその程度がランクAに至っていないもの、ランクCは無被害のものと定義された。なお、決壊と同等の被害とは、①法面すべりが起こったもの、②幅5cm以上の縦断クラックのはいつたもの、③横断クラックの入ったもの、④30cm以上の天端沈下の起こったもの、⑤漏水の発生したものを意味する。内容の不備など分析に不適当なデータを削除した結果、当初調査した1824か所のデータのうち1185か所のため池のデータが分析にかけられた。調査項目、すなわち分析のアイテム数は被害程度も含めて25個、カテゴリー数は全部で68個となっている。被害程度によるサンプルの内訳は、ランクAの大被害が151個、ランク(B+C)の小被害または無被害が1034個となっている。なお、調査から判明したため池堤体の被害の種類および件数の詳細については参考文献8)を参照されたい。

地震被害に関する検討では、当該構造物が受けた地震動の強さは当然考慮にすべき重要事項であり、この種の悉皆調査では、その調査範囲とともに地震動の強さも明確にしておくことが必須と考えられる。今回の悉皆調査は日本海中部地震の震央から半径150km以内にある市町村で実施され、被害ため池が存在した市町村内の無被

害ため池を含むすべてのため池について地震前の状況が調査された。調査対象地域はおおむね気象庁震度階Vの範囲に相当している。

地震動の影響については、地震動の強さを表す一つの尺度として震央距離をアイテムに取り込んだ検討が実施されている¹⁴⁾。この検討結果によれば、おおむね震央距離120 km未満に位置するため池は、120 km以上のそれよりも被害を受けやすいという傾向が得られている。また、この結果は悉皆調査の集計から得られたため池の被害率からも裏付けられている。しかしながら、被害予測に用いる項目ということを念頭においた場合、地震がいつ、どこで起こるか明確に特定できない現状を鑑みれば、震央距離を被害予測のための判定表のアイテムとして用いることは、実用上不可能であろう。さらには震央距離をアイテムとして加えた場合と加えない場合の数量化理論Ⅱ類による分析結果を比較したところ、震央距離を除く重要なアイテムは両者で共通しており、判別の中率も前者の74%に対して後者は72.5%で、今回のデータに関しては震央距離を除いた場合でも判別の精度は遜色ないことが分かっている¹⁴⁾。このような観点から、震央距離は今回の分析対象アイテムからは除外している。

(2) 判定表見直しの方針

これまで一連の分析に使用された数量化理論Ⅱ類は名義尺度や度数尺度などの質的データを対象として、外的基準(予測されるべき変量)を判別することを目的とした「予測モデル」である。これに対して今回適用した数量化理論Ⅲ類は同様に質的データを対象とするが、測定対象や変量との距離関係、類似関係などを扱う「記述モデル」であり、変量の特徴を明らかにしたり、測定対象を分類したりするための分析方法である^{10), 11)}。

図-1に判定表見直しの基本フローを示す。分析の手順としては、以下のように考えた。

a) 数量化理論Ⅲ類によりデータの諸特性(ここでは変量すなわちアイテム・カテゴリをさす)およびサンプル(ここでは各ため池をさす)を多次元空間に布置する。数量化理論Ⅲ類では、類似した特性をもつサンプル、すなわちここでは該当するアイテム・カテゴリのパターンが似通っているサンプル同士はお互いに空間内の近接した場所に布置され、アイテム・カテゴリの該当パターンが異なっている場合には空間内の互いに離れた場所に布置されることになる。

b) このような布置空間は、互いに直交するいくつかの軸で定義されるから、一般的にはこのうち適当な2つの軸を取り出して、空間の状況を把握し易いようにそれらの軸で形成される平面上で理解することになる。この平面上でのサンプルの布置の状況を予めわかっているサンプルの属性を考慮して眺めてみる。ここではその属性は被害程度による分類、すなわち大被害のランクAと

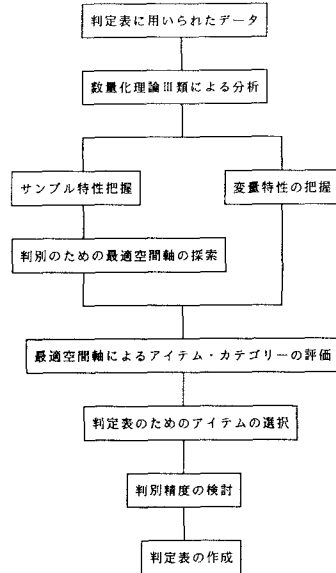


図-1 危険度判定表見直しの基本的フロー

その他のランク(B+C)をさす。2つの軸の組合せを変えながら、この両者が明瞭に分離されている平面を見つけ出す。

c) 2つのサンプル集団(ランクAとランク(B+C))の分離が明瞭な平面上で、今度はアイテム・カテゴリの布置の状況を見る。ここで、アイテム・カテゴリ相互の位置関係が従来の知見を満足し、なおかつ2つのサンプル集団の分離(判別)に寄与するアイテムを意図的に選択する。あるアイテムを構成するいくつかのカテゴリの相互の位置関係、特に序列および相互の距離は重要な選択ポイントとなる。すなわちカテゴリ相互の序列は工学的知見との整合性を測る尺度となり、カテゴリ相互の距離はサンプル集団の分離に対する影響の度合を示す。もちろん、判定表の項目として適当かどうかアイテム選択の条件として加味する必要がある。

d) 選択されたアイテムを構成する各カテゴリについて、そのカテゴリが布置されている点の座標値をカテゴリスコアとして採用し、判定表を作成する。実際には後述のように、平面から1つの軸へ投影された点の値をここでは使っている。

e) 最後に、もう一度分析に用いたデータに判定表を適用し、作成した新しい判定表の精度を検討する。

4. 分析結果の検討

(1) サンプルの空間布置

数量化理論Ⅲ類はサンプル(測定対象)とアイテム・カテゴリ(変量)の相関を最大にするという最適化の基準に基づいて、サンプルおよびアイテム・カテゴリを空間内に布置する分析モデルである。最適化手法の解

法は最終的に固有値問題に帰着する。ここでは1~3次までの3つの次元を空間布置の検討対象とした。なお、3次までの累積寄与率は0.36となっており、全分散すなわち全体のばらつきのうち36%程度までをその次元までで表現できるということを意味している。

サンプルの空間布置の状況を把握しやすくするために、1次と2次、1次と3次、2次と3次のそれぞれ2本の軸で構成される3枚の平面上にサンプルを布置してみた。これらの平面をここではそれぞれI-II平面、I-III平面およびII-III平面と呼ぶことにする。図-2の(a)~(c)にサンプルの布置図を示す。

図-2(a)を例にとると、ランクAのサンプルはII軸を境にして第1・第4象限側に布置されている。これに対してランク(B+C)のサンプルは原点付近と第2・第3象限にその大部分が集中していることがわかる。すなわち、ランクAとランク(B+C)の高密度部分が明瞭ではないが分離されていることがわかる。特に、I軸上でみると、ランクAの集団は軸の正の方向に、ランク(B+C)の高密度部分は軸の負の方向に偏っている傾向にある。このように、数量化理論Ⅲ類によるサンプルの空間布置によって、被害に関する属性によるサンプルの分離がある程度可能であることが判明した。また、I・III軸上では軸の正の方向にランクAすなわち大被害の集団が、軸の負の方向にランク(B+C)すなわち大被害以外の集団が偏る傾向が把握できた。

(2) 判別のための最適空間軸の探索

これまで、数量化理論Ⅲ類の固有値計算によって得られた直交する座標軸により、サンプルの布置状況や属性による分離状況を把握してきた。次の段階として、ここでは判別のための最適な空間軸、すなわち被害の属性による2つの集団が前述の座標軸を使うよりも明瞭に分離してみえる軸を探し出すことにした。このような1本の軸上での評価が、最終的には被害サンプルと無被害サンプルを判別するための尺度となる。図-3に最適空間軸の概念を示す。最適空間軸を求める手順は次のように考えた。

a) 図-4のようにX-Y軸平面上に布置された点P(x, y)について、X軸から角度θ(0 ≤ θ ≤ 90°)だけ回転した新しい座標系X'-Y'への座標変換を考える。点Pの新座標は次の式から得られる。

$$x' = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta$$

$$y' = -x \cdot \sin\theta + y \cdot \cos\theta$$

このとき新しい座標軸X'を最適空間軸と考えれば、新座標値x'が新しいサンプル値やカテゴリースコアとなる。

b) 新しい座標軸X'が最適空間軸であるか否かの判断指標としては、相関比を用いる。相関比は2つの集団の分離の程度を評価する指標で、次の式で定義される。

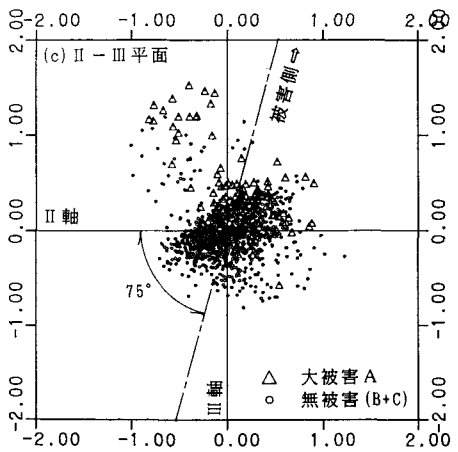
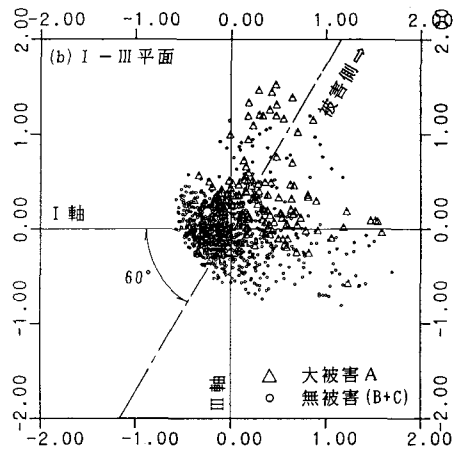
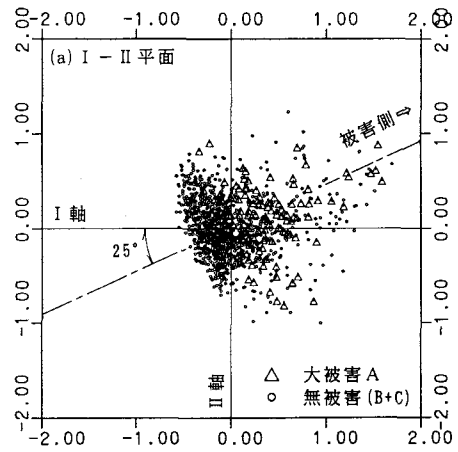


図-2 サンプルの空間布置

$$\text{相関比 } \eta^2 = \frac{\text{級間分散 } v}{\text{全分散 } V} \quad (0 \leq \eta^2 \leq 1)$$

$$\text{全分散 } V = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2$$

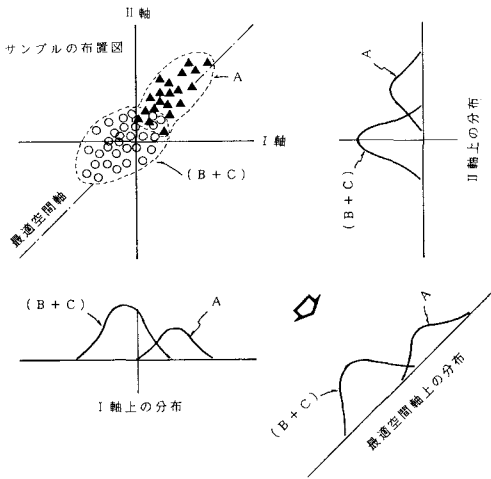


図-3 最適空間軸の概念

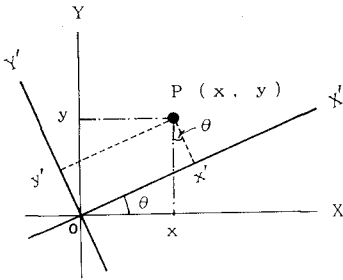


図-4 座標軸回転による座標変換

$$\text{級間分散 } v = \frac{n_1}{n}(\bar{f}_1 - \bar{f})^2 + \frac{n_2}{n}(\bar{f}_2 - \bar{f})^2$$

ここに、 n ：総サンプル数

n_1 ：集団1のサンプル数

n_2 ：集団2のサンプル数

f_i ：サンプル*i*の変数値

\bar{f} ： f_i の平均値

\bar{f}_1 ：集団1内の f_i の平均値

\bar{f}_2 ：集団2内の f_i の平均値

c) 0～90°の間で5°刻みで座標変換を行い、各サンプルの新しい座標値 x' からそれぞれの θ について相関比を求め、相関比が最大となる場合の X' 軸を最適空間軸とする。

d) 前述の数量化理論Ⅲ類で得られた3つの平面、すなわちⅠ-Ⅱ平面、Ⅰ-Ⅲ平面、Ⅱ-Ⅲ平面についてそれぞれ最適空間軸を求める。

相関比による最適化の結果、Ⅰ-Ⅱ平面ではⅠ軸を25°回転した軸が最適空間軸となった。また、Ⅰ-Ⅲ平面ではⅠ軸を60°、Ⅱ-Ⅲ平面ではⅡ軸を75°それぞれ回転した軸が最適空間軸となった。サンプルの空間布置を示す図-2(a)～(c)には、それぞれの最適空間軸が一点鎖線で書き込まれている。いずれの最適空間軸でも

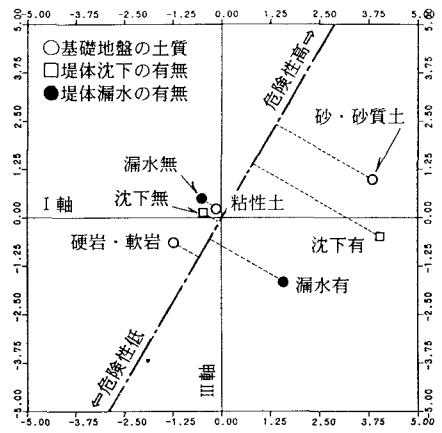


図-5 カテゴリーの空間布置（Ⅰ-Ⅲ平面）

ても、ランクAに属する大被害のサンプル集団はランク(B+C)に属するそれ以外のサンプル集団よりも向かって右上寄り、つまり同軸の正の方向に位置している。したがって、これらの最適空間軸上では正の方向が被害、負けの方向が無被害という傾向を示すことになる。

(3) 最適空間軸によるアイテム・カテゴリーの評価

数量化理論Ⅲ類では、サンプルを布置したのと同じ座標空間にアイテム・カテゴリーも布置される。最適空間軸によりアイテム・カテゴリーを評価するため、ここではサンプルを布置した3つの平面にアイテム・カテゴリーを布置してみた。一例として、図-5にカテゴリーの空間布置を示す。この図では基礎地盤の土質、堤体の沈下の有無および堤体の漏水の有無の3つのアイテムについてそれぞれのカテゴリーを布置している。

最適空間軸上への各カテゴリーの投影から同軸上でのカテゴリーの序列や距離関係を調べ、それらが従来の工学的な知見に合致しているかどうかをここでは評価する。アイテム内のカテゴリーの序列関係は、最適空間軸上では相対的に正の側にある(値が大きい)ものの危険性がより高いという評価基準から判断することになる。また、カテゴリー相互の投影値が最適空間軸上で比較的近接している場合には、それらはカテゴリー分類上意味を持たず、そのようなアイテムは判別に寄与しないと判断する。図-5によれば、「基礎地盤の土質」では砂・砂質土が最も危険性が高く、硬岩・軟岩は最も安全であると判断され、従来の工学的知見と一致する。また、3つのカテゴリー間の相互距離も比較的大きいため、被害を判断するための項目として適当であると評価される。「堤体の沈下の有無」についても同様にして選択の基準に適合する。しかしながら「堤体の漏水の有無」については、漏水無の方が漏水有に比べて危険性が高いため、従来の工学的知見との整合性から不適合と評価することになる。

表-3 最適空間軸によるカテゴリー値

No	[アイテム] カテゴリー	カテゴリー値 ※()内はレンジ		
		I-II平面	I-III平面	II-III平面
1	[被害程度] 小被害 無被害 大被害	-0.3333 2.2817 (2.6150)	-0.5933 4.0621 (4.6554)	-0.5265 3.6051 (4.1316)
2	[築造年代] 明治以前 (不明含む) 1913-1932 1933-1994	-0.0320 -0.2635 1.6093 (1.8788)	-0.1759 0.1620 2.0142 (2.1901)	-0.4444 1.0706 2.9411 (2.7855)
3	[ダム型式] 均一型 サウ・表面遮水・P型	-0.0403 1.1865 (1.2288)	-0.0682 2.0053 (2.0735)	-0.1007 2.9586 (3.0593)
4	[堤高 (m)] 0~5 未満 5~10 未満 10~15 未満 15 以上	-0.1793 0.3213 -0.0028 0.2442 (0.5006)	-0.3363 0.2761 0.7586 2.2366 (2.5729)	-1.1206 1.1426 2.7197 4.9347 (6.0553)
5	[堤頂長 (m)] 0~50 未満 50~100 未満 100 以上	-0.5395 0.0567 0.6707 (1.2102)	-0.9613 0.1760 1.0800 (2.0413)	-1.2520 0.5767 0.8854 (2.1374)
6	[堤頂幅 (m)] 0~3 未満 3~4 未満 4 以上	-0.8942 0.3940 0.6319 (1.5261)	-0.8968 0.1875 0.8482 (1.7450)	-1.2441 0.1980 1.2409 (2.4850)
7	[堤頂幅・堤高] 0.0~0.6 未満 0.6~1.0 未満 1.0 以上	-0.4260 -0.0503 0.5058 (0.9318)	-0.1585 -0.0359 0.2074 (0.3659)	1.0223 -0.2941 -0.7526 (1.7749)
8	[上流法面の配 (割)] 0.0~1.5 未満 1.5~2.0 未満 2.0 以上	-0.7608 -0.2125 0.9797 (1.7405)	-1.0818 -0.7089 1.7615 (2.8433)	-1.7044 -0.6975 2.3954 (4.0998)
9	[下流法面の配 (割)] 0.0~1.5 未満 1.5~2.0 未満 2.0 以上	-0.7997 -0.1734 0.9710 (1.7707)	-1.1171 -0.3935 1.5788 (2.6959)	-1.6152 -0.4534 2.1127 (3.7279)
10	[基礎地盤の地質年代] 新 第 沖 積 世	-0.5625 0.8031 -0.0930 (1.3657)	-1.1696 1.0771 0.4740 (2.2467)	-0.1731 0.5999 -0.4261 (1.0260)
11	[基礎地盤の土質] 硬岩・軟岩 粘土・砂質粘土 砂・砂質土	-0.6802 0.3255 3.4676 (4.1478)	-1.1857 0.1241 2.8076 (3.9933)	-0.4076 0.0452 0.9532 (1.3608)
12	[堤体主体材料] 砂質土 粘性土 砂礫質粘土	4.2519 -0.4177 (4.6696)	2.9726 -0.2920 (3.2646)	0.8013 -0.0787 (0.8800)
13	[地 形] 山 丘 台 原状地・干拓地・ 三角州性低地	-0.8904 0.1959 1.0772 -0.2261 (1.9676)	-0.5516 -1.1474 1.1123 0.4579 (2.2597)	0.4204 -0.5083 0.4028 -0.4022 (0.9287)

No	[アイテム] カテゴリー	カテゴリー値 ※()内はレンジ		
		I-II平面	I-III平面	II-III平面
14	[堤体の沈下の有無] 有 無	4.4160 -0.5021 (4.9181)	1.6255 -0.1848 (1.8103)	0.0025 -0.0002 (0.0027)
15	[堤体の漏水の有無] 有 無	2.0190 -0.5872 (2.6062)	-0.6519 0.1896 (0.8415)	-1.2532 0.8645 (1.6177)
16	[法面損傷の有無] 有 無	3.5475 -0.7597 (4.3072)	1.3618 -0.2916 (1.6534)	0.0221 -0.0047 (0.0288)
17	[はらみ出しの有無] 有 無	7.5277 -0.3524 (7.8801)	2.0841 -0.0976 (2.1817)	-0.5905 0.8645 (0.6181)
18	[下流法面の乾燥度] 湿潤 普通 乾燥	2.8512 -0.3011 -0.9665 (3.8177)	0.5993 -0.1554 1.4483 (1.6037)	-0.9497 0.0063 2.0258 (2.9755)
19	[下流法面の 好湿性植物の有無] 有 無	0.6362 -0.5166 (1.1528)	-0.7318 0.5942 (1.3260)	-1.0978 0.8914 (1.9892)
20	[地すべり等 地山崩壊の有無] 有 無	5.7321 -0.0488 (5.7809)	0.3001 -0.0026 (0.3027)	-0.9674 0.0276 (0.9756)
21	[底槽の型式] 橋 コンクリート ヒューム管 その他 不明	-1.0188 0.9912 -0.4093 0.0479 1.7508 (2.7696)	-2.5237 -0.0145 -0.1987 0.1333 6.0736 (8.5973)	-3.0864 -0.1222 0.1179 0.6013 4.4490 (7.5354)
22	[余水吐の クラックの有無] 有 無	3.6702 -0.4251 (4.0953)	-0.0793 0.0092 (0.0885)	-1.1544 0.1337 (1.2881)
23	[取水施設の クラックの有無] 有 無 不明	4.4157 -0.5968 0.7684 (5.0125)	-1.0489 -0.3346 9.8313 (10.880)	-2.5446 -0.0682 8.2193 (10.764)
24	[底槽のクラックの有無] 有 無 不明	5.2417 -0.5510 0.6425 (5.7927)	-0.8437 -0.3841 9.2711 (10.115)	-2.6923 -0.1246 7.7509 (10.443)
25	[取水施設の 使用している 廃止している] 有 無	-0.1544 1.7323 (1.8867)	-0.3179 3.5655 (3.8834)	-0.1938 2.1740 (2.3678)

表-3に3つの最適空間軸によるカテゴリー値を示す。表中のレンジは、あるアイテム内のカテゴリー値の最大値と最小値の差であり、このレンジが大きいほどそのアイテムはサンプルの判別に寄与すると考えられる。なお、これまでの危険度判定表やデルファイ法による被害判定表の場合とは逆に、カテゴリー値の大きい方が危険性が高いと判断される点については注意を要する。

表-4に評価結果を示す。表の中で○印は従来の工学的知見あるいは一般的な見解と合致する場合を、×印は合致しない場合を示している。また、?印は従来の工学的知見に統一した見解がない場合を、▼印はレンジが小さく、そのアイテムが判別に寄与しない場合を示している。なお、被害程度を除く24個のアイテムのうち[2.(2) 専門家の意見と判定表の相違点]の中で検討されていない幾つかのアイテムについては、「アース・ロックフィルダムの耐震性判定指針」(昭和59年度大規模地震対策調査報告書¹⁵⁾)を参考にして判断した。また、「老朽ため池整備便覧」やこれまでの学会発表に対する有識者の意見等も参考にした。

(4) 選択したアイテムによる判別の精度

次の段階では、従来の工学的知見との整合性が比較的良好なI-II平面の結果とI-III平面の結果をもとに、それぞれ適当なアイテムを7~8個選択し、実際にそれらのアイテムのカテゴリー値を使った場合のサンプルの判別の精度を調べることにした。I-II平面による場合をケース1、I-III平面による場合をケース2とし、以下で判別の精度について検討する。

a) ケース1

I-II平面内の最適空間軸による評価結果から次の8つのアイテムを選択した。

[選択した8アイテム]

- ① 堤頂長, ② 基礎地盤の土質, ③ 堤体主体材料,
- ④ 堤体の沈下の有無, ⑤ はらみ出しの有無,
- ⑥ 下流法面の乾燥度, ⑦ 地すべり等地山崩壊の有無,
- ⑧ 取水施設の使用状況

採用しなかったアイテムについては、次のように判断した。「堤体の漏水の有無」および「下流法面の好湿性植物の有無」については、いずれも堤体の漏水に関係が

表-4 最適空間軸によるアイテム・カテゴリーの評価結果

アイテム	I-II平面	I-III平面	II-III平面
1. 被害程度	-	-	-
2. 築造年代	×	×	×
3. グム型式	×	×	×
4. 堤高	?	?	?
5. 堤頂長	○	○	○
6. 堤頂幅	×	×	×
7. 堤頂幅/堤高	×	×	○
8. 上流法面勾配	×	×	×
9. 下流法面勾配	×	×	×
10. 基礎地盤の地質年代	×	×	×
11. 基礎地盤の土質	○	○	○
12. 堤体主体材料	○	○	○
13. 地形	×	○?	×
14. 堤体の沈下の有無	○	○	○▼
15. 堤体の漏水の有無	○	×	×
16. 法面損傷の有無	○	○	○▼
17. はらみ出しの有無	○	○	×
18. 下流法面の乾燥度	○	×	×
19. 下流法面の好湿性植物の有無	○	×	×
20. 地すべり等地山崩壊の有無	○	○	×
21. 底樋の型式	×	×	×
22. 余水吐のクラックの有無	○	×	×
23. 取水施設のクラックの有無	○	×	×
24. 底樋のクラックの有無	○	×	×
25. 取水施設の使用状況	○	○	○

深いため「下流法面の乾燥度」に代表させた。「法面損傷の有無」については、「堤体のはらみ出しの有無」に代表させた。「余水吐のクラックの有無」、「取水施設のクラックの有無」および「底樋のクラックの有無」については、直接的に堤体の老朽度や状況等に無関係な事象であることや、クラックを見つけることが難しいなどの点から削除した。

b) ケース 2

I-III平面内の最適空間軸による評価結果から次の7つのアイテムを選択した。

〔選択した7アイテム〕

- ① 堤頂長, ② 基礎地盤の土質, ③ 堤体主体材料,
- ④ 堤体の沈下の有無, ⑤ はらみ出しの有無,
- ⑥ 地すべり等地山崩壊の有無, ⑦ 取水施設の使用状況

採用しなかったアイテムについては、次のように判断した。「地形」については、カテゴリーの序列は大筋では従来の知見を満足するもの「台地」と「扇状地・干拓地・三角州性低地」の序列が逆となっている点で採用しなかった。「法面損傷の有無」については「はらみ出しの有無」で代表させた。

表-5 サンプルスコアのばらつきと判別の精度

(a) ケース 1

	平均値	分散	級間分散	相関比	判別の比率
大被害 A	2.4082	29.1509	—	—	—
その他 (B+C)	-0.3514	17.8778	—	—	—
全体 (A+B+C)	0.0003	20.1610	0.8467	0.0420	57.5%

(b) ケース 2

	平均値	分散	級間分散	相関比	判別の比率
大被害 A	1.8689	10.0506	—	—	—
その他 (B+C)	-0.2728	6.3441	—	—	—
全体 (A+B+C)	0.0001	7.3263	0.5100	0.0696	59.5%

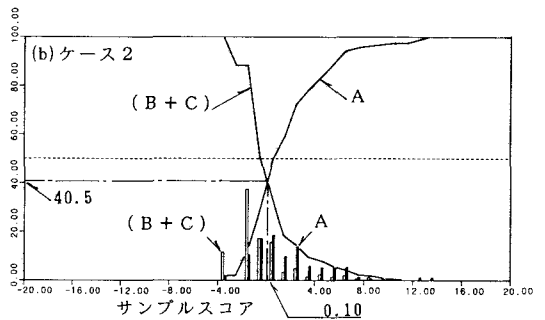
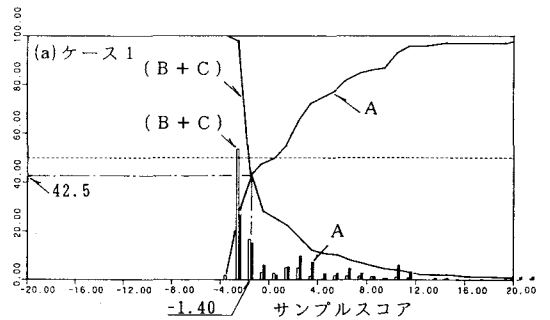


図-6 サンプルスコアの分布 (度数百分率と累積度数百分率)

c) ケース 1 と ケース 2 の 比較

各ケースごとに選択したアイテムのカテゴリー値からサンプルスコアを算出した。表-5は各ケースのサンプルスコアのばらつきの程度や判別の精度を示したものである。ランク A とランク (B+C) の2つの集団の分離という観点からは、各集団ごとのばらつきが小さく、かつ2つの集団が離れている方がより分離状況は良いと考えられる。ランク A, ランク (B+C) の分散から、両集団内のばらつきは両者ともケース 2の方が小さくなっている。また、ケース 2の方が相関比は大きく、分離の度合いが相対的には良好なことを示している。

表一六 新しい危険度判定表

【アイテム】 カテゴリー	カテゴリー スコア	レンジ
【堤頂長 (m)】 0 ~ 50未満 50-100未満 100 以上	-0.9613 0.1760 1.0800	2.0413
【基礎地盤の土質】 硬岩・軟岩 粘土・砂礫質粘土 砂・砂質土	-1.1857 0.1241 2.8076	3.9933
【堤体主体材料】 砂質土 粘性土・砂礫質粘土	2.9726 -0.2920	3.2646
【堤体の沈下の有無】 有 無	1.6255 -0.1848	1.8103
【はらみ出しの有無】 有 無	2.0841 -0.0976	2.1817
【地山崩壊の有無】 有 無	0.3001 -0.0026	0.3027
【取水施設の使用状況】 使用している 廃止している	-0.3179 3.5655	3.8834
判 定	サンプルスコア \geq 判別区分点 (=0.1) ↓ 大被害の可能性有	

※) この危険度判定表は、震央距離約 150 km 以内、気象庁震度階 V 程度の地震による調査データを基に作成されたものである。

図一六 は計算されたサンプルスコアの分布を被害による属性で分けて示したものである。図中の棒グラフは度数百分率、折れ線グラフは累積度数百分率を示している。累積度数百分率から得られる判別の中率を比較すると、ケース 1 は 58%，ケース 2 は 60% で、ケース 2 の方がやや判別の精度は高くなっている。また、2つの集団の度数百分率分布もケース 2 の方が自然な形状となっている。以上のことから、ケース 2 の方が新しい危険度判定表としては適当であると判断される。

(5) 新しい危険度判定表の提案

検討の結果得られた新しい危険度判定表を表一六に示す。あるため池が地震により大被害を被る可能性があるか否かの判定は、7つのアイテムについて当該ため池が該当するカテゴリースコアを足し合わせてサンプルスコアを計算し、判別区分点 0.10 との大小関係から判断する。すなわち、スコアが 0.10 より大きい場合には大被害を受ける可能性が高いと判定される。

なお、ここでの判別区分点の決定は、林らの提案した方法¹¹⁾ によっている。すなわち、図一六に示す累積度数百分率分布の交点から得られるもので、ランク A、ランク (B+C) 双方の判別の中率が等しくなるような最適化のもとで得られたものである。しかしながら、このような判定表が多数のため池の改修計画に資するためには、大被害を受ける可能性が極めて高く、改修・補強の必要性が高いため池をある程度絞り込むという役割も重要であると思われる。したがって、実用面においてはランク A の判別の中率の方を高くするように判別区分点

を設定するという方法も考えられよう。ちなみに、ランク A の判別の中率が最も高くなるのは判別区分点を 1.5 に設定した場合で、この場合ランク A の判別の中率は 70% と林の方法による場合よりも 10% 程度高くなる。一方、この場合のランク (B+C) の判別の中率は 59% で林の方法による判別の中率は 1% 程度下回るにすぎない。

5. まとめ

悉皆調査データに基づくため池の危険度判定表は、昭和 60 年度に初めて作成されて以来これまでに検討が重ねられてきた。今回の論文では、従来の工学的な知見との整合性という観点からこの危険度判定表の見直しに関する分析について述べた。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 数量化理論Ⅲ類によるサンプルの空間布置では、アイテム・カテゴリーの該当パターンの類似度によってサンプル相互の位置関係が決まる。この性質を利用すれば、サンプルの属性による分類、すなわち大被害を受けた集団と大被害を受けなかった集団の分離が可能であることがわかった。さらに 2つの集団が最も明瞭に判別できる空間内の軸をもとめ、この最適空間軸を判別に最適な尺度と考えた。

(2) 数量化理論Ⅲ類では、サンプルが布置されたのと同じ空間内にアイテム・カテゴリーも布置される。サンプル判別の最適空間軸上で、各カテゴリーの序列や距離関係が従来の工学的知見と合致するか否かを検討した結果、いくつかのアイテムについて整合性が見られた。これらの中から危険度の判定に必要と考えられる 7~8 個のアイテムを選択し、元のデータにより判別の精度を検討した。

(3) 数量化理論Ⅲ類による一連の分析から、最終的に 7 個のアイテムによる新しい危険度判定表が提案された。各アイテム内のカテゴリー値の大小関係は、すべて従来の工学的知見を満足している。採用された 7 個のアイテムを列挙する。

堤頂長、基礎地盤の土質、堤体主体材料、
堤体の沈下の有無、はらみ出しの有無、
地すべり等地山崩壊の有無、取水施設の使用状況

(4) 従来の危険度判定表では、数量化理論Ⅱ類による数段階にわたる分析から、数学的に最適と考えられる基準に従ってアイテムが選択された。これに対して今回の数量化理論Ⅲ類による分析では、従来の工学的知見との整合性を考慮しながら、より判別精度の高い結果を採用した。但し、今回の危険度判定表は、震央距離 150 km 以内でおおむね気象庁震度階 V の範囲のデータを基に作成されたものであることに留意する必要がある。

最後に、ため池に限らず構造物の地震被害に関する従

来の工学的知見は、多くの先達が地道な震害調査を重ねて得られた貴重な財産であるといえよう。その意味で、今回の調査研究がそのような知識の集積に少しでも貢献できれば幸いである。悉皆調査は地震被害の要因を把握するために極めて重要な方法であると考えられる。今後ともこの種の調査が実施され、有益なデータの収集と分析により震害軽減に寄与する多くの知見が蓄積されることを期待する。

謝 辞：本論文は、平成元年度に関東農政局防災課から(財)日本農業土木総合研究所に委託された調査の内容を京都大学 角屋 睦教授を委員長とする「ため池等施設整備対策調査検討委員会」で行われた検討を踏まえて、著者らの責任において取りまとめたものである。1983年日本海中部地震に係わる農業用ため池の悉皆調査では、農林水産省構造改善局防災課、青森県および秋田県の関係各位に多大なるご協力を賜った。ここに、記して深謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 湯川清光：古代のフィルダム／日本のフィルダム 1700年のあゆみ (前編), 農業土木学会誌, 第49巻, 第7号, 1981.7.
- 2) 湯川清光：フィルダム建設の発展経過／日本のフィルダム 1700年のあゆみ (後編), 農業土木学会誌, 第49巻, 第9号, 1981.9.
- 3) 森田昌史：ため池整備の現状と課題, 水と土, 第50号, 1982.
- 4) 山崎 晃・三宅克之・中村正博・池見 拓：地震を受けたため池の悉皆調査に基づく被害率, 土木学会論文集,

- 第404号/I-11, 1989.4.
- 5) 山崎 晃・三宅克之・中村正博・池見 拓：ため池の地震被害の分析, 土木学会論文集, 第404号/I-11, 1989.4.
- 6) 土木学会日本海中部地震震害調査委員会：1983年日本海中部地震震害調査報告書, 土木学会, 1986.10.
- 7) 1983年日本海中部地震調査委員会：1983年日本海中部地震被害調査報告書, 土質工学会東北支部, 1986.5.
- 8) 松本 勇・深沢嘉勇・山崎 晃・川崎照太郎：日本海中部地震に係わる農業用ため池の悉皆調査, 第21回土質工学研究発表会, 1986.6.
- 9) 山崎 晃・三宅克之・中村正博・池見 拓：農業用ため池の地震時における被害予測, 農業土木学会誌, 第55巻, 第6号, 1987.6.
- 10) マーケティング・サイエンス研究会編：マーケティング調査—数量化理論の解説と応用—, 有斐閣双書, 1974.
- 11) 林知己夫・樋口伊佐夫・駒沢 勉：情報処理と統計数理, 産業図書, 1982.3.
- 12) (財)日本農業土木総合研究所：昭和61年度ため池等施設整備対策調査報告書, 1987.3.
- 13) 構造改善局建設部防災課・老朽ため池研究会：老朽ため池整備便覧, 公共事業通信社, 1982.
- 14) 山崎 晃・三宅克之・中村正博・池見 拓：ため池の地震被害の要因解析における震央距離に関する一考察, 土木学会第42回年次学術講演会, 1987.9.
- 15) (財)日本農業土木総合研究所：昭和59年度大規模地震対策調査報告書, 1985.3.
- 16) 鈴木健一・福田一美・中村正博・池見 拓：ため池の地震被害に関する悉皆調査データの分析, 土木学会第45回年次学術講演会, 1990.9.

(1990.10.19 受付)

AN ESTIMATION METHOD OF SEISMIC DAMAGE TO EARTH IRRIGATION DAMS BASED ON A STATISTICAL ANALYSIS OF COMPLETE SURVEY

Kenichi SUZUKI, Kazuyoshi FUKUDA, Masahiro NAKAMURA and Hiroshi IKEMI

In order to evaluate seismic vulnerability of earth irrigation dams, it is very useful to study the differences between damaged and undamaged dams based on a statistical analysis of past seismic damage. From the point of view, the Type III Quantification Analysis, one of multivariate analyses, was carried out. The number of analyzed dams, which experienced the Nihonkai-Chubu Earthquake of 1983, was totally 1185 and the data including 1034 lightly or non-damaged dams were obtained by the complete survey in the area where 151 heavily damaged dams existed. The number of items and their categories are 25 and 68 respectively. It becomes clear that it is possible to distinguish heavily damaged dams from lightly or non-damaged ones by using this method. Moreover, considering the coordination between empirical knowledge of the earthquake engineering and the statistical tendency from this analysis, a standard table made up of 7 items is proposed. The standard aims to inspect seismic vulnerability of earth irrigation dams due to future disastrous earthquakes and to select dams which require repairs and reinforcement from tremendous numbers of earth irrigation dams in Japan.