

兵庫県南部地震による北淡町を中心にした ため池の被害の要因分析

藤井弘章* 国政華奈** 難波明代** 横溝隆之**
西村伸一*** 島田清**** 堀俊男***** 西山竜朗* 脇谷芳招***

(Received November 30, 2001)

Damage factors analysis for small embankment dams due to the Hyogoken-Nambu earthquake special to Hokudan Town

Hiroaki FUJII,

Kana KUNIMASA, Akiyo NANBA, Takayuki YOKOMIZO, Shin-ichi NISHIMURA,
Kiyoshi SHIMADA, Toshio HORI, Tatsuro NISHIYAMA and Yoshiaki WAKITANI

This study was performed to clarify which factors affected damage to tame-ike (small embankment dams for irrigation in Japanese) of Hokudan Town on Awaji Island in western Japan due to Hyogoken-Nambu earthquake. Multivariate and ordinary statistical analyses were carried out using documentary data (181 damaged and 328 undamaged dams), and ordinary one was done for the results investigated in situ. The model for the multivariate analysis was created with 13 items and 94 categories for 4 groups (Location, Geology, Structure, and History of Dam). As a result, the factors causing to damage for dam are (1) the nearest fault (Nojima, Mizukoshi and D2), (2) embankment volume (the larger the more), (3) angle of crest axis to epicenter (diagonal and normal), (4) distance to the nearest fault (less than 500 m), (5) distance to the epicenter (8 to 14 km which almost agree to the location of seismic intensity 7 JMA), (6) plan view of dam axis (3 or 4 axes), (7) angle of crest axis to the nearest fault (diagonal and normal), (8) elevation of dam site (over 100 m), (9) surface geology of dam site (non-cohesive soil), (10) era of construction (prior to 1891), and (11) soil properties of embankment (constructed of sand, smaller penetration resistance).

Key words: Earth dam, earthquake damage, site investigation, statistical analysis, case study

1 はじめに

1.1 研究の目的と概要

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、多数の尊い人命を奪い、都市部の構造物に大きな被害を与えたが、農村部にも少なからぬ被害を与えた。中でも、重要な水利施設等である多くの「ため池」(灌漑用の小規模なフィルダム)は、多大な被害を蒙った。ため池は規模は小さいがアースダムつまりフィルダム(盛土したダムの意: 欧米ではEmbankment Dam)であり盛土構造物である。堤体本体の他取水施設・洪水吐等の付帯構造物からなり、それらもまた被害を受けている。しかし本研究では被害の対象をため池の堤体本体の損傷-堤体の決壊・斜面崩壊・亀裂など-のみに絞る。なお「ため池」は貯水池部分を意味することもある

るので、本論では堤体本体を「ダム」あるいは「ため池堤体」と呼ぶことにする。

本研究では淡路島のため池を対象にしている。淡路島には、ごく小さいものをいれると約24,000個のため池があるといわれる(兵庫県)。その内900個以上が被害を受けた(兵庫県, 1996)。一方で被害を受けないため池も数多くある。筆者はこの被害・無被害をわけるとして統計的、地盤工学的な研究をおこなっている(藤井ら, 1996a, 1996b, 1997a, 1997b, 1998a, 1998b, 1998c, 1999a, 1999b, 2000a; Fujii et al., 2000b)。

淡路島には1市10町があるが、被害が大きかった北部5町(淡路・東浦・北淡・一宮・津名町)である。これらの地区について、精粗はあるものの約10回の現地調査(堤体測

* 岡山大学環境理工学部環境管理工学科

** 岡山大学農業造構学研究室 平成8年度, 9年度卒業生

*** 岡山大学自然科学研究科, **** 元岡山大学環境理工学部環境管理工学科(現東京農工大学), ***** (株)ウエスコ

本論文は、*Damage factors for small embankment dams due to the Hyogoken-Nambu earthquake - Case study on Hokudan, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 6, pp.117-131(Fujii et al., 2000b)* の邦訳を基にその他の成果を加えて書き直したものである。

量, 現地密度, 透水試験, 貫入抵抗, スウェーデン式貫入試験等) をおこなった. 平成7年から8年には被害ダムを, また平成9年には無被害ダムを中心におこなった. 同時にこれらのため池堤体の土質試料を採取し, 地盤工学的な室内試験をおこなった. これらに基づいていくつかのダムに対して地盤工学的な手法による解析(安定解析, 液状化解析)ならびに数値解析(飽和-不飽和浸透流解析, 動的解析)をおこなっている. 一方で, 被害および無被害ダムに関する種々の文書資料を収集した. そして被害の有無に関する要因を仮定し, 数量化理論2類による多変量解析他の解析を北部5町のダム1788個(被害350個, 無被害1438個)について実施した. 本論では被害の大きかった北淡町のダム509個(被害181個, 無被害328個)の分析結果を中心に概述する.

1.2 従来の研究と本研究の意義

兵庫県南部地震によるアースダムの被害についていくつかの報告があるが(Hasegawa et al., 1996; Tani et al., 1996; Matsumoto et al., 1996; 辻, 1997), 被害・無被害を対比し, かつ総合的におこなった研究はない. 過去の地震については, 被害・無被害ダムを対比したいくつかの研究がある(池見, 1993). すなわち秋葉・仙波(1941)は, 1939年の男鹿地震(マグニチュード: $M = 6.8$) (東京天文台, 1998) 時の58個の被害ダムと12個の無被害ダムについて先駆的な調査をおこなって, 土性・地質学特性を論じている. また高瀬ら(1966)は, 1965年の新潟地震($M = 7.5$) (東京天文台, 1998) 時に971個のアースダムの内123個の被害ダムについて, 地質・ダムの構造・震度等について論じた. さらに谷ら(1987)は, 1968年の十勝沖地震($M = 7.9$) (東京天文台, 1998) 時の1208個のダムの内202個の被害ダムについて, また1983年の日本海中部地震($M = 7.7$) (東京天文台, 1998) の1834個のダムの内218個の被害ダムについて調査しており, 地質・ダムの構造・土性について論じている. これらは, いずれも慣用的な統計分析, つまり被害・無被害という目的変数に対し, 説明変数が単変量の統計分析(以後「単変量解析」あるいは「一般的な統計」としてよぶこととする)が用いられた.

土木構造物の地震災害に対する多変量統計解析(以後「多変量解析」と表記する)は幾つかあるが(市原ら, 1981, 1983; 久保, 1990; 岡田ら, 1990; 山田, 1986, 1992), ため池についても日本海中部地震時の952個の無被害ダムと177個の被害ダムになされている(山崎ら, 1989; 鈴木ら, 1992; 池見, 1993). これらは前述の谷ら(1987)のデータを用いた一連の研究であり, その目的は, ダムの被害予測をしようとするものであった. しかし著者ら自身も触れているように, その結果には納得し難い部分が多々ある.

上記の地震は, いずれもプレート境界型あるいは遠地型のものであり, 今回の兵庫県南部地震のように, 活断層が大きく関わっているような直下型あるいは局地型の地震ではない.

このような直下型地震について被害・無被害のアースダムを対比し, 現地調査・実験・地盤工学的解析など総合的

におこなった研究はなく, 他の土構造物についても少ない. 前述のように, ため池堤体は規模が小さいものが多いが, れっきとしたアースダムであり, 重要な土構造物である. この被害・無被害をわける要因を知ることは, 単にため池堤体だけでなく, 他の盛土構造物に対しても意義があると考えられる.

2 研究方法

2.1 現地調査ならびに室内土質試験

前項で述べたように, 被害ダムと共に無被害ダムについても現地調査をおこなった. すべてのダムを調査することは不可能であるので, 次のような方法で調査対象ダムを選んだ. まず①公共機関の情報から得た被害の大きいため池を重点的に調査した. そして②それらの被害ため池近傍の同程度の堤体規模を持つ無被害のため池を選んだ. さらに, ①②のため池の震央からの距離を考慮しつつ, それを補完する形で, ③震央からほぼ等距離にある, ほぼ同程度の堤体規模もつ被害・無被害ため池を選んだ. サンプル数は, 文書資料より同定したダム数の約5%を目途とした.

このようにして選んだダム全てについて簡単な測量をおこない, 堤体の諸元(堤高・堤長・堤頂巾・斜面勾配等), 堤軸の向き, 貯水池の大きさ等を測定した. そしてハンドオーガーで, 堤体を堤体表面30cm~50cm掘削して室内実験用の試料を採取し, その孔底の貫入抵抗をコーンペネトロメーターで測定した. 土質試料は研究室に持ち帰り, 表1の○印に記すような土質試験をおこなった. 試験項目はダムの被害状況・土性により精粗がある. また基礎地盤の地質状況を確認した. さらにほぼ同規模, ほぼ同地点の被害・無被害ダムを5箇所づつ選び, 弾性波探査をおこなって堤体内・基礎地盤内の状況を調べた. 特に被害の大きかったため池堤体については, 現地透水試験ならびにサウンディング試験をおこなった.

2.2 文書資料の収集

統計分析のために次のような文書資料を収集した.

1) 資料1 ため池台帳: 一定規模以上のため池を公式に記録したもの. 「ため池調査票」(兵庫県農林水産部, 1979a) のがある. 昭和52~54年に作成されたもので, 受益面積が5000 m² 以上のため池が記載されている. 中には不正確と思われる数値もあるが, 後述のように実測値とほぼ一致するので一つの指標として利用した.

2) 資料2 同ため池位置図(兵庫県農林水産部, 1979b): 資料1に記載されているため池の位置図. 縮尺1/10,000.

3) 資料3 被害ため池台帳: 兵庫県南部地震による被害ため池をすべて記録したもの. これには兵庫県農林水産部(1995a)作成のもの, 北淡町(1995a)作成のものがある. 被害を受けたすべてのため池が記載されており, 資料1に記載されてないため池も含まれる. 作成時期のずれもあって若干異なったものもある. 記載の異なるため池は資料1, 2, 4, 6を用いて確認した.

4) 資料4 同被害ため池位置図(兵庫県農林水産部,

1995) : 資料 3 の被害ため池の位置を記したもの。

縮尺 1/50,000.

5) 資料 5 被害状況図 (北淡町, 1995) : 被害ため池の平面図, 断面図, クラック等被害状況を図示してある。縮尺 1/500 か 1/1,000.

6) 資料 6 空中写真 (国土地理院, 1995) : 平成 7 年 1 月 18 日撮影の地震直後の空中写真。撮影高度は 1,700m である。

7) 資料 7 地質図 (通産省地質調査所, 1992a, 1992b, 1996) : 縮尺は 1/50,000.

8) 資料 8 活断層図 : 東京大学出版会発行「日本の活断層」(活断層研究会編, 1991) および, 日本地図センター発行の「都市圏活断層図」(国土地理院, 1996), 縮尺 1/25,000 のもの。両者は一致していない断層もあるが本研究ではいずれかも採用している。

9) 資料 9 成果表 : 国土地理院, 主要な地点の国家座標が示されている。

10) 資料 10 土地台帳 (北淡町, 1891) : 北淡町役場。明治 24 年 (1891 年) に作成。当時の土地分類 (ため池, 田, 畑, 山林等) が記載されている。

2.3 被害要因の選定

2.3.1 被害の定義

1 項で述べたように, 本研究では「被害ダム」とは堤体そのものであり, 堤体の完全・部分的な崩壊, クラック等様々である。これらを, 分別して目的変数として予備解析をおこなったが, 説明変数のアイテム・カテゴリーのデータ数が少なくなる故もあり統計的意味のある結果は得られなかった。そこで本研究では次の指標を定義しこれを用いて論議する。

1) 被害の有無 : 質的変量。被害をあり, なしとする。この場合「あり」とはクラックから堤体の崩壊まで含む。被害のありなしを資料 1, 3 から求めた。

2) 被害率 : 量的変量。各アイテムのカテゴリーの (被害ダム個数) / (ダム個数) の百分率。説明変数により中身が変わる。例えば, 震源距離, 震源角度, 最近断層距離などに対するものである。

3) 被害無被害比 : 被害ダムの個々の物性値 (例えば比重など) の平均値と無被害ダムのその比と定義する。

2.3.2 一般的な被害要因

ダムの被害に関わる様々な要因が考えられるが, これらは誘因 (外因) と素因 (内因) に分けられる。誘因としては各ダムでの震度, あるいは地震加速度であることはいうまでもない。しかしながら, 個々のダムについてこれらを同じ精度で同定することは不可能である。また数少ない特定の地区で同定された震度を個々のダムに適用してもあまり意味がない。逆に, 墓石や家屋の被害状況から震度が推定されるように (菊山他, 1996), ダムの被害状況からその地点の震度を推定できる可能性がある。またこの研究は, ほぼ同じ位置でありながら, つまりほぼ同じ震度でありながら, 被害・無被害を分けた要因を探ることを目的としているので, 誘因を外すことは解析の本質には影響しない。

表 3 仮定した要因と解析に用いた要因

要 因	統計解析		慣用	現地調査	備考
	多変量	本解析			
ダムの位置					
最近断層	○	○	10	○	
最近断層距離	○	○	10	○	
震央距離	○	○	8	○	○(3)
ダムサイトの標高	○	○	6	○	
ダムサイトの地形					
ダムサイトの地質					
ダムサイトの表層地質	○	○	5	○	26
堅硬な地層までの深さ				○	10
ダムサイトの地質年代					○(3)
ダムサイトの土質特性					○(3)
ダムの構造					
ダムの形式					
堤高	○			○	33
堤長	○			○	33
堤頂巾				○	33
堤頂巾/堤高					○(3)
堤体量 (堤高×堤長)	○	○	6	○	
ダムの斜面勾配					
上流斜面勾配				○	33
下流斜面勾配				○	33
平均斜面勾配				○	33
堤軸					
堤軸の平面形状	○	○	4	○	
震央角度	○	○	18	○	
最近断層角度	○	○	18	○	
表面保護工					
下流側擁壁					
貯水量	○				
連続池の有無	○	○	2	○	
付属構造物					
洪水吐					
取水施設					
放水路等					
堤体および堤体用土の土質特性					
物理特性					
土粒子の単位体積重量				○	34
コンシステンシー				○	7
粒度				○	32
堤体の自然含水比					32
堤体の密度					○
土の分類					
統一分類				○	27
三角座標分類				○	32
締固め特性					
最大乾燥密度				○	
最適含水比				○	
強度特性					
内部摩擦角				○	
粘着力				○	
貫入抵抗				○	27
変形特性					
透水特性				○	2
ダムの履歴					
ダムの築造年代	○	○	3	○	
地震前の改修の有無	○	○	2	○	
地震前の漏水の有無	○	○	2	○	
貯水状況					○(3)
堤体の沈下状況					○(2)
堤体の管理状況					
計	13	94		2~34	8(20)

素因としては様々なものが考えられる。一般的にフィルダム
ダムの設計に考慮すべき事項(例えば USBR, 1960; 電力
土木技術協会, 1981) がこれにあたろう。さらに既往の研究
等(鈴木ら, 1992) を参考にして代表的な項目を表1のよ
うに選んだ。これらの項目は, 同表のように大きく5つのグ
ループ, すなわち「ダムの位置(例えば震央距離等)」、「ダ
ムサイトの地質特性」、「ダムの構造(例えば堤高等)」、「堤
体の土質特性」、「ダムの履歴(例えばダムの築堤年代等)」
に分類される。なお以後特に断らない限り素因を単に「(被

害に関わる) 要因」と呼ぶ。また「アイテム」あるいは「項
目」も「要因」と同義である。

これらの要因の中には, 他の要因と密接に関連するもの
(例えば貯水量と堤体の大きさ), 同じ精度でしかも統計的
に十分な数を得ることが不可能なもの(例えば地盤工学的
なデータ) 等がある。前者については, 多変量解析ならびに
単変量解析による予備解析(藤井ら, 1997) をおこなって
確認し, 本解析から外した。後者については, 単変量的な統
計分析のみおこなった。

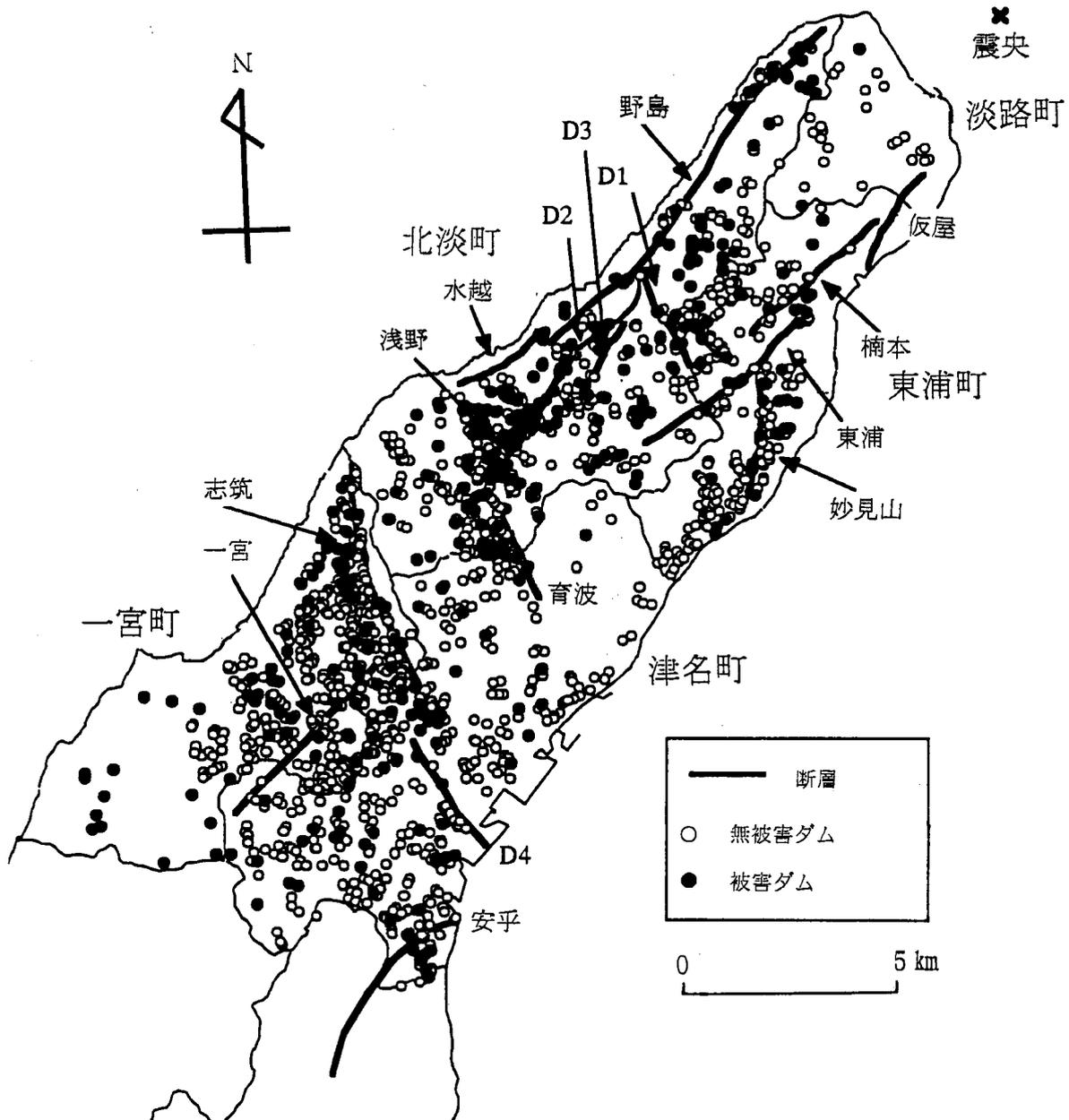


図1 北淡町を含む淡路島北部5町の活断層と
同定された被害・無被害ため池 1788 個の分布 (藤井・難波ら, 1999b)

分析に用いた最終的な項目(要因)は表1の○印でマークされた13項目である。これらの項目は多変量解析でいう「説明変数」あるいは「アイテム」にあたる。

2.3.3 分析の対象とした項目(アイテム)

ここで、分析に用いたアイテムとその出典ならびにカテゴリ分類について、表1の順序で説明する。

1) 最近断層:あるダムから最も近い断層の名前である。資料2,4,6,8を用いて同定した。北淡町内あるいはその周辺においては、図1に見られるように、13の活断層或いは撓曲がある(日本活断層研究会,1991;国土地理院,1996)。そのうち、6つの断層(野島・東浦・育波・志筑・浅野・楠木)、1つの撓曲(水越)と3つの無名断層(本研究では便宜上D1,D2,D3断層と名付けた)が北淡町のため池の被害に関係する。なお以後「断層」という場合は撓曲も含むものとする。

2) 最近断層距離・震央距離・震央角度・最近断層角度:資料2,4,6,8を用いた。「震央距離」は各ダム(堤体中央)より震央までの距離、「震央角度」は各ダムの堤軸の法線(堤体中央における下流側への法線)と震央との交角、「最近断層距離」は各ダムから各断層までの最短距離、「最近断層角度」は各断層のうち最も近い断層への堤軸の法線の交角と定義する。図2にこれらの同定方法を示した。

「震央距離」(d_E)は、震央E(x_E, y_E)と堤軸の中心C(x_C, y_C)との距離すなわち C_E である。ため池堤体が2軸以上であれば(図3参照)、最も長い軸を用いる。

「最近断層距離」(d_{NF})は、点Cと最近断層上の最近点N(x_{NF}, y_{NF})との距離である。震央角度(θ_E)は、点Cからの法線(n_C)と線 C_E との交角として定義される。

「最近断層角度」(θ_{NF})は、 n_C と最近断層上のN点からの法線 n_{NF} との交角。各ダムの中心座標C(x_C, y_C)や断層の座標を同定し、N(x_{NF}, y_{NF})、 d_C 、 d_{NF} 、 θ_E 、や θ_{NF} を算定した。震央距離と最近断層距離の正負については、断層なり震央に対して

南側にあるダムを正とした。

最近断層角度と震央角度については、ダム軸中心上の法線 n_C から時計回りを正とする。カテゴリ分類は180度表示とし10度づつ18カテゴリとした。360度表示の36カテゴリにする各カテゴリのデータ数が少なすぎるためである。このことは貯水池が、震央に対してため池堤体のどちらに位置するか、つまりダムの前面かあるいはダムの背面にあるか無視していることを意味する。この影響については5町1788個の分析結果(藤井ら,1999)を踏まえて後の項で論議する。

3) 標高:現地調査の結果標高により被害の状況が異なるダムが散見されたので加えた。資料2,4,6を用いた。

4) ダムサイトの表層地質:資料2,4,6,7を用いた。地質図(地質調査所,1992a,1992b,1996)に記載されている北淡町の地質は21種であったが、大きく次の5種のカテゴリに分類した。すなわち①花崗岩系(花崗斑岩・粗粒黒雲母花崗岩・花崗閃緑岩等)、②砂岩・礫岩系(このほか角閃石ひん岩等も含めた)、③泥岩を含む岩、④粘土土(泥・粘土を含む土)、⑤非粘性土(砂・礫など粘土を含まない土)である。

5) 堤体量:(堤高)×(堤長)を「堤体量」と定義した。予備解析の結果、堤高も堤長も同じような傾向を示すので、アイテムを減じるために設定した。なお台帳に記載されている堤高・堤長は資料間や当方の実測値と異なるものがあるが後述のようにおおむね一致したので、一つの指標として台帳(資料1,3)の記載値を用いた。

6) 堤軸の平面形状:堤軸の平面形状を図3のように、次の4種に分類した。すなわち、①一軸;谷に直交する一軸の堤体で、最も一般的なもの、②二軸;「く」の字型の堤体、③三軸;「コ」の字型の堤体、④四軸;「ロ」の字型あるいは皿池型の堤体である。資料2,4,5,6を用いた。

7) 連続池の有無:あるダムの直下流に別の貯水池があり、2つの貯水池が上流から下流へと連続的に繋がっている場合である。下流側の貯水池が満水になると、上流側のダムの法尻は浸潤される。これは地震中に被害を受ける可能性が大きいのではないかとして選んだ。資料2,4,5,6を用い

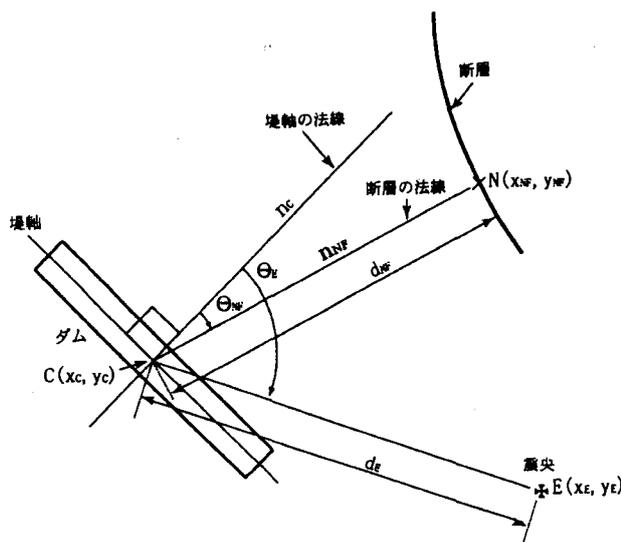


図2 震央・断層に対する距離・角度の同定

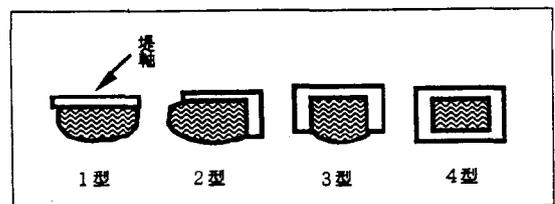


図3 ダム堤軸の平面形状の分類

た.

8) 築堤年代:前近代的な工法で建設された古いアースダムでは,老朽化つまり年と共に堤体が劣化するという考え方がある.これを知るためには正確な築堤年代が重要であるが,ため池台帳等にも築堤年代は土地の古老等から伝聞,推定による記載が多く,同じ精度とはいえない.そこで築堤年代を推定するために資料10の土地台帳(北淡町,1891)を用いることにした.土地台帳には各地番の1891年における土地分類が記載されているので,その地点が当時ため池であったかそうでない(例えば,水田,森林等)かがわかる.従って各ダムの築堤年代が,兵庫県南部地震の105年以前か以後かが明確にできる.

9) 地震前の改修・漏水の有無:一般的にダムは,改修すると強固になり,漏水があると被害を受けやすいと考えられる.資料1から求めた.

上記のアイテムのカテゴリー分類は,表2にまとめて記した.震央距離のような量的なアイテムについてはデータ数を考慮してカテゴリーを決めている.その結果表2のように,13アイテム,94のカテゴリーとなった.また表2はそれぞれのアイテム・カテゴリーに対する被害・無被害ダム個数も示している.このようなアイテムつまり要因の選定およびカテゴリー分類が正しいかどうかは後項(「4.2 分析の精度についての論議」参照)で述べる.

3 数量化理論2類による多変量解析

3.1 数量化理論2類について

前項で仮定した各アイテムつまり要因がどの程度被害に影響を与えているかを知らうとして数量化理論2類(田中ら,1994,1997)による多変量解析をおこなった.解析はSPSS(垂水,1990)を用いた.数量化理論2類はある「質的な外的基準」を「質的なアイテム」によって判定するための手法である.本研究の外的基準はため池堤体の被害および無被害である.判別にはあるダムが被害の傾向があるかないかを判断するために判別方程式とよばれる関数が使われる.すなわち

$$y_{im} = \sum \sum A_{jk} x_{imjk} \quad (1)$$

ここで, y_{im} はサンプルスコアと呼ばれ, x_{imjk} はダミー変数である.もしあるダム m が被害 ($i=1$) (または無被害: $i=2$) ダムで, アイテム j (例えばダムサイトの表層地質) のカテゴリー k (例えば花崗岩) に属する時, x_{imjk} は1をとる.逆にもしダムがこのカテゴリーに属していないとすれば x_{imjk} は0である.ここで, A_{jk} はカテゴリースコアと呼ばれ,被害及び無被害ダムを最も区別されるように決定される.カテゴリースコア A_{jk} はアイテム j のカテゴリー k の被害に対する寄与率を表す.各アイテム j の被害に関する寄与率は偏相関係数の値で表される.

数量化理論2類から得られる相関比は解析モデルの精度を表すが,その平方根も分析の精度を示し,重相関分析における重相関係数に相当する(田中・垂水,1997).本論では,相関比の平方根を重相関係数と呼ぶこととし, R' と記す.重相関係数あるいは相関比により,モデルの正確さが評

価される.

3.2 解析対象のダムの決定と文書データの検証

北淡町の「ため池台帳」(資料1)には5000 m²以上を灌漑している633個のダムが記録されている.一方資料3の「被害ため池台帳」には277個の被害ダムが記録されているが,その内「ため池台帳」に記載されているダムは195個のみである.つまり被害を受けたダムの内,82個は「ため池台帳」の基準に充たず,同じ母集団に入らないものである.残りのダムについて資料2と資料6,ならびに資料6の空中写真から位置を確認した結果,181個の被害ダムと328個の無被害ダムが最終的に同定された.これら合計509個のダムを分析対象とする.181個の被害ダムの内,斜面崩壊は67堤体,クラックだけは115堤体に生じていた.これらの同定された被害及び無被害ダムは図1に示した.なお,同図には北淡町だけでなく,同様の手法で同定した北

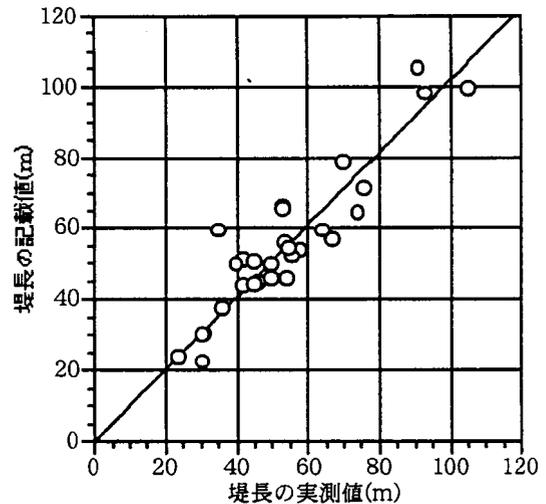


図 2a 堤長の実測値と記載値

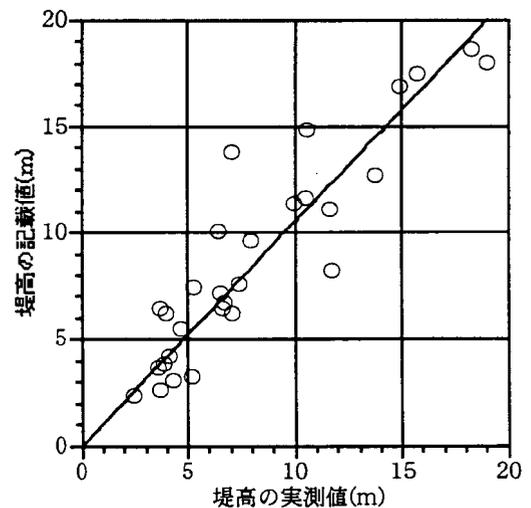


図 2b 堤高の実測値と記載値

表1 アイテム・カテゴリーとダム個数・被害率

アイテム/ カテゴリー	ダム個数		被害率 (%)		アイテム/ カテゴリー	ダム個数		被害率 (%)	
	被害	無被害				総数	被害		
最近断層					震央角度 (度)				
D2	6	3	9	66.7	0	16	21	37	43.2
水越	14	12	26	53.8	10	7	8	15	46.7
野島	44	44	88	50.0	20	4	12	16	25.0
浅野	58	97	155	37.4	30	12	14	26	46.2
D1	14	25	39	35.9	40	2	1	3	66.7
東浦	12	23	35	34.3	50	9	23	32	28.1
育波	21	68	89	23.6	60	6	26	32	18.8
D3	7	28	35	20.0	70	15	22	37	40.5
志筑	4	22	26	15.4	80	8	23	31	25.8
楠本	1	6	7	14.3	90	12	19	31	38.7
最近断層距離 (m)					100	19	20	39	48.7
-1000>	15	31	46	32.6	110	9	19	28	32.1
-1000	13	28	41	31.7	120	10	19	29	34.5
-750	32	40	72	44.4	130	15	27	42	35.7
-500	12	45	57	21.1	140	13	18	31	41.9
-250	26	45	71	36.6	150	3	18	21	14.3
0	41	56	97	42.3	160	13	20	33	39.4
250	12	20	32	37.5	170	8	18	26	30.8
500	7	13	20	35.0	最近断層角度 (度)				
750	16	11	27	59.3	0	13	24	37	35.1
1000	7	39	46	15.2	10	9	19	28	32.1
震央距離 (km)					20	12	19	31	38.7
4.0	11	11	22	50.0	30	9	16	25	36.0
6.0	8	12	20	40.0	40	10	13	23	43.5
8.0	20	24	44	45.5	50	9	11	20	45.0
10.0	17	27	44	38.6	60	7	8	15	46.7
12.0	28	48	76	36.8	70	6	12	18	33.3
14.0	43	65	108	39.8	80	5	15	20	25.0
16.0	45	100	145	31.0	90	8	14	22	36.4
18.0	9	41	50	18.0	100	10	12	22	45.5
ダムサイトの標高 (m)					110	8	14	22	36.4
0	22	25	47	46.8	120	12	22	34	35.3
50	29	56	85	34.1	130	4	18	22	18.2
100	29	58	87	33.3	140	9	24	33	27.3
150	44	77	121	36.4	150	17	33	50	34.0
200	37	69	106	34.9	160	13	30	43	30.2
250	20	43	63	31.7	170	20	24	44	45.5
ダムサイトの表層地質					築堤年代				
花崗岩	85	142	227	37.4	1891年	158	276	434	36.4
粘性土	53	90	143	37.1	1891以	11	33	44	25.0
非粘性	31	56	87	35.6	不明	12	19	31	38.7
砂岩	7	15	22	31.8	地震前の改修				
泥岩	5	25	30	16.7	あり	21	22	43	48.8
堤体量 (m³)					なし	160	306	466	34.3
30	14	70	84	16.7	地震前の漏水				
100	41	105	146	28.1	あり	24	91	115	20.9
200	36	62	98	36.7	なし	157	237	394	39.8
300	37	54	91	40.7	連続池				
500	35	28	63	55.6	あり	18	29	47	38.3
1000	18	9	27	66.7	なし	163	299	462	35.2
堤軸の平面形状					合計				
1軸	152	294	446	34.1	被害	181	328	509	35.6
2軸	17	32	49	34.7	無被害				
3軸	9	2	11	81.8	総数				
4軸	3	0	3	100.0					

部5町全体のダム1788個(被害350個,無被害1438個)(藤井ら,1999)も図示している。

分析に先立ち,ため池台帳(兵庫県,1997)に記載されている堤長と堤高の数値(記載値と呼ぶことにする)を確認するために実測値と比較した(図4a,4b)。実測値(横軸)に対して,記載値は堤高(図4b)の方が堤長(図4a)より分散している。しかし,図のように回帰直線の勾配は1.02および1.05(データが一致している場合のy=xの線より2~5%陰しい)であり,相関係数も0.91および0.92と良好であるので,分析にはため池台帳の記載値を用いた。

また26のダム(特に地質図上での地質境界付近のもの)については,現地踏査した結果いずれも地質図上の表層地質と現地踏査結果は一致していることを確認した。

表3 多変量解析の解析条件

ケース	HKC-	略称*	1	2	3	4	5	6	7	8
断層に関するアイテム										
	最近断層		○	X	○	○	○	X	○	○
	最近断層距離	断層距離	○	X	○	○	X	○	○	○
	最近断層角度	断層角度	○	X	○	X	○	○	○	○
震源に関するアイテム										
	震央距離		○	○	X	○	○	○	○	X
	震央角度		○	○	X	○	○	○	X	○
その他のアイテム										
	ダムサイトの標高	標高	○	○	○	○	○	○	○	○
	ダムサイトの表層地質	表層地質	○	○	○	○	○	○	○	○
	堤軸の平面形状	平面形状	○	○	○	○	○	○	○	○
	堤体量		○	○	○	○	○	○	○	○
	連続池		○	○	○	○	○	○	○	○
	築堤年代		○	○	○	○	○	○	○	○
	地震前の改修	改修	○	○	○	○	○	○	○	○
	地震前の漏水	漏水	○	○	○	○	○	○	○	○

備考 ○: 解析に使ったアイテム, X: 解析に使わないアイテム
*印 : 主として図中で用いることがある

4 多変量解析の結果および考察

4.1 解析条件と結果

数量化理論2類による多変量解析は,表2に示される13アイテム94カテゴリーについておこなった。特に誘因に直接関係する震源・断層に関する5アイテム(震央距離・震央角度・最近断層名・最近断層距離・最近断層角度)については表3のように組合せを変えて8ケース分析し,それぞれの相対的な影響を調べた。すなわち,すべてのアイテムを含んだケース(HKC-1),1ないし数個,断層に関するアイテムを取除いたケース(HKC-2,4,5,6)および1ないし2個の震源に関するアイテムを除いたケース(HKC-3,7,8)である。これ以外の震源・断層に関係しない8アイテムは8ケースすべてに含まれている。

図5a,5bに算定された各々のアイテムの偏相関係数を示す。また重相関係数R'を図5の凡例中および表4に示した。偏相関係数は各アイテムが被害に関わる寄与を表す。図のように,各々の要因の被害への寄与はアイテムの組合せによって変わってくる。

4.2 分析の精度についての論議

4.2.1 重相関係数と判別の中率

分析結果について論ずる前に,その精度について検討する。分析の精度は,重相関係数R'と判別の中率H_Rで評価される。

重相関係数は,図5a,5bや表4に示されるように,すべてのアイテムを含んでいるHKC-1(0.53)が最大で,断層に関するアイテムを取り除いたHKC-2(0.45)が最小である。

判別の中率H_Rは(菅,1993),

$$H_R = (U_u + D_u) / (U + D) = (U_u + D_u) / T \quad (2)$$

と定義される。ここで,U:実際の無被害ダム個数,D:実際の被害ダム個数,T:全ダム数(T=U+D),U_u:(1)式によりと正しく無被害と判定された無被害ダム個数,D_u:同じく正しく被

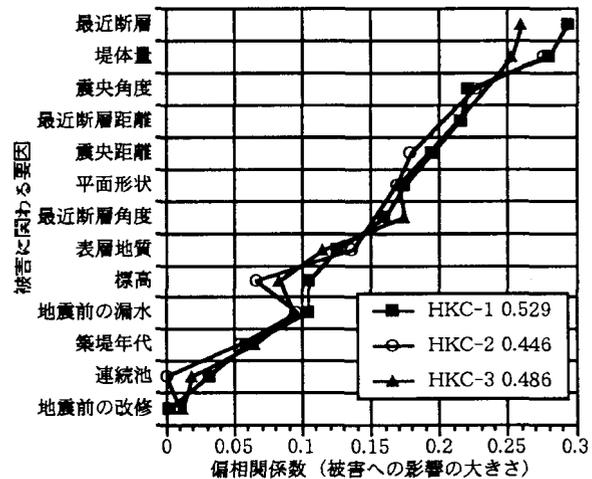


図5a 各アイテムの偏相関係数(HKC-1~3)

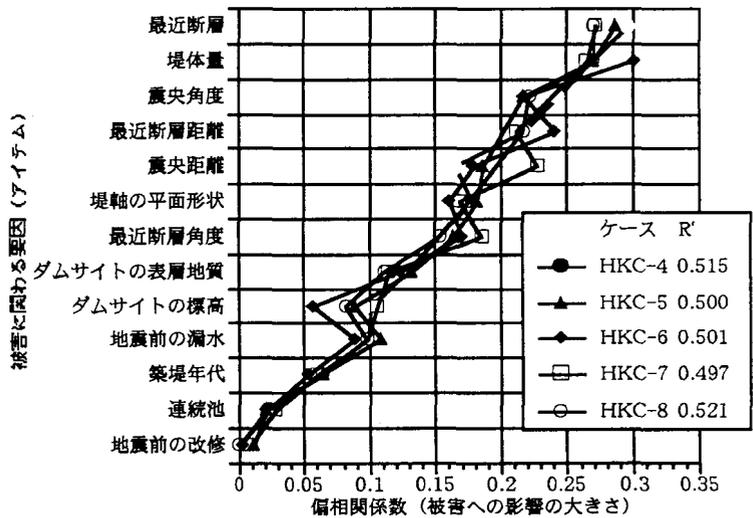


図5b 各アイテムの偏相関係数(HKC-4~8)

害と判定された被害ダム個数, U_d : 実際は無被害なのに、誤って被害と判定されたダム個数 ($U_d = U - U_u$), D_u : 実際は被害を受けているのに誤って無被害と判定されたダム個数 ($D_u = D - D_d$) である。

表4に各ケースの U_u, D_d, U_d, D_u と H_R を示した。判別の中率 H_R は、全てのケースにおいて70%以上、特にHKC-1, -4, -5については74%~75%であり、この解析は正しいように見える(菅, 1993)。

4.2.2 判別の中率とデータ数 - 確率的判別の中率の定義

前項のように、各ケースの結果は判別の中率の数値からすれば悪いとはいえない。しかし他の解析で得た判別の中率と比較ができるであろうか。ここで判別の中率の意味を考えてみる。

T 個からなるダム群を数量化理論2類で解析をおこなう場合、被害ダム個数(D)と無被害ダム個数(U)の数はわかっている。今から無作為に D 個を選び、被害ダムを正しく選ぶ確率は D/T 、同じく U 個を選び無被害ダムを正しく選ぶ確率は U/T である。したがって正しく選ばれる確率的な被害ダム個数 D_d ならびに無被害ダム個数 U_u はそれぞれ、

$$D_d = D \cdot D/T$$

$$U_u = U \cdot U/T$$

となる。これらを(2)式に代入し H_{RS} とすれば、

$$H_{RS} = (D^2 + U^2) / T^2 \tag{3}$$

となる。すなわち、 H_{RS} は確率的に得られる判別の中率であるので、 H_{RS} を「確率的判別の中率」と定義する。

北淡町では $D = 181, U = 328$ であるから、(3)式により H_{RS} は54.1%となる。同式からわかるように、確率的判別の中率は D と U によって大きく変わってくる。あるいは D と U との比によって変わってくるといなおしてよい。すなわち D と U の差が大きければ大きい程「確率的判別の中率」は大きくなる。一般的に言えば、それぞれの外的基準に属す

る個体数によって、確率的判別の中率は一つだけ算定できる。したがって判別の中率は、この確率的判別の中率と比較して論ずべきである。異なった2つの解析結果をそれぞれの判別の中率だけで論ずることは意味がないといえよう。確率的判別の中率 H_{RS} と比較する手段として、次のような指数、

$$R_A = H_R / H_{RS} \tag{4}$$

を求め、 R_A を「相対精度」と定義する。表4には R_A も記している。すべてのケースで R_A は1.3以上でありこれら一連の解析結果は必要条件を充たしているといえる。

4.2.3 レンジ

図6はカテゴリースコアの「レンジ」 R を示している。レンジは、分析した各ケースの各アイテムについて、アイテム j のカテゴリースコアの最大値 $A_{jk}(max)$ と最小値 $A_{jk}(min)$

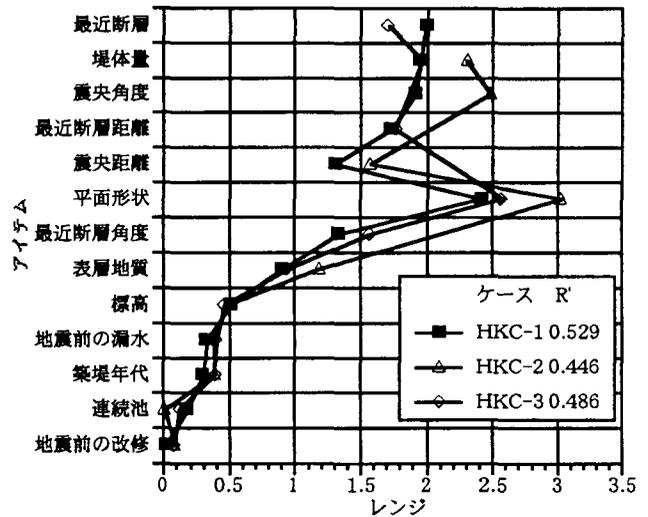


図6 各アイテムのレンジ

表4 多変量解析の解析精度の検討

実状 モデル	式(1)により判別されたダムの数				計 T	相関比	重相関係数 R'	判別の中率 H_R (%)	相対精度 R_A
	無被害 無被害	無被害 被害	被害 無被害	被害 被害					
	U_u	U_d	D_u	D_d					
HKC-1	250	57	78	124	509	0.280	0.529	73.5	1.36
HKC-2	237	59	91	122	509	0.199	0.446	70.5	1.30
HKC-3	246	57	82	124	509	0.237	0.486	72.7	1.34
HCK-4	248	55	80	126	509	0.266	0.515	73.5	1.36
HKC-5	252	52	76	129	509	0.250	0.500	74.9	1.38
HKC-6	243	57	85	124	509	0.257	0.507	72.1	1.33
HKC-7	240	57	88	124	509	0.247	0.497	71.5	1.32
HKC-8	247	55	81	126	509	0.253	0.503	73.3	1.35
確率的算定	211.4	116.6	116.6	64.4	444.6	-	-	54.1	1.00
正確に算定	328	0	0	181	509	1.000	1.000	100.0	1.85

の差,

$$R = A_u(max) - A_u(min). \quad (5)$$

である. アイテムやカテゴリーが正しく選ばれていれば, 各アイテムのレンジ大きさの順位は各アイテムの偏相関係数の順位にほぼ一致する. 図6に見られるようにHKC-1, HKC-2 および HKC-3 の順位は, アイテム「堤軸の平面形状」を除いて図5aに殆ど一致する. 「堤軸の平面形状」だけがこの条件に合致しないが, これは表1に見られるように4軸のカテゴリーのデータが3個しか無く, しかもそれが全て被害ダムのためである. しかし, 堤軸数の被害に与える傾向を知るためにあえて選んでいる.

これらのことから, サンプル数を考えれば (菅, 1993), 相関比, 重相関係数, 判別の中率, 相対精度, 偏相関係数, そしてレンジから, このモデルは信頼できるとしてよい.

5 各アイテムの被害への影響

5.1 概要

本項では, 各アイテムの被害に対する影響を, 多変量解析と単変量分析により論議する.

各アイテム(要因)の各カテゴリー毎の「被害率」を表2に表5に堤体諸元, 室内試験で求めた土質常数の「被害無被害比」を示す.

多変量解析結果を引用する論議においては, 13アイテムを含むケースHKC-1の結果を中心に述べる. 各アイテムの影響について, 表1に示した5つにグループ化した項目と同じ順序, つまり「ダムの位置」, 「ダムサイトの地質」, 「ダムの構造」, 「堤体の土質特性」, 「ダムの履歴」の順で論ずる.

被害に関して最も重要な要因は図5からわかるように, ダムの位置 (最近断層・最近断層距離・震央距離), ダムの構造 (堤体量・震央角度・堤軸の平面形状・最近断層角度) に関するもので, これらのアイテムは第1位から7位までを占める.

5.2 堤体の位置

5.2.1 最近断層

最近断層は図5に見られるように, 13アイテムの内最も影響がある. 最近断層のカテゴリースコアを図7に示す. 負の値が被害に関係し, 一方正の値は無被害に寄与していることを示す. 解析条件に関わらず野島断層, 水越撓曲とD2断層が負の大きな値を示し被害に最も関係しているといえる. 一方表2にみられるように, これら三つの断層 (即ち野島, 水越, D2) の被害率は50%以上で平均値(36.4%)よりかなり高い. 浅野断層のカテゴリースコアは条件にもよるが被害と無被害の境界にあり被害率は37.4%と平均値よりやや高く, 多変量解析の結果と一致している.

野島断層は震源断層といわれているが, 図1に見られるように, 上記の水越撓曲, D断層, 浅野断層は野島断層の延長上にあることに注目したい. すなわち, この3断層もまた野島断層のように, 今回の地震時に動いた可能性

があるということがいえる. 他の断層はカテゴリースコア, 被害率共に小さく被害には関係していないとしてよい.

5.2.2 最近断層距離

HKC-1の最近断層距離の被害への寄与は図5のように4位である. このカテゴリースコアを図8に示す. 図のように, 負の値は最近断層から0mと-250m (北側) に生じている. ところが, さらに絶対値の大きい負のカテゴリースコアが750m (-1.2~-1.3) と-750m (-0.2~-0.3) に起こっている. これらのカテゴリーについては, その被害率 (表2)も平均被害率よりかなり高い(750m;59.3%, -750m;44.4%). すなわち, 被害が最近断層の近傍より離れた位置で大きいことになる. これは, あるダムの被害は最近断層より他の断層に影響されて生じている可能性がある. すなわち, あるダムの最近断層は被害に関わる断層とは限らないからである.

ここで, 野島断層付近のある領域のダムの被害率を考える. すなわち, 図9に示すようなハッチの領域 (断層の両端では断層に直交) とする. 図10はこの領域のダムの野島断層への距離と被害率の関係を示している. 図に見られる

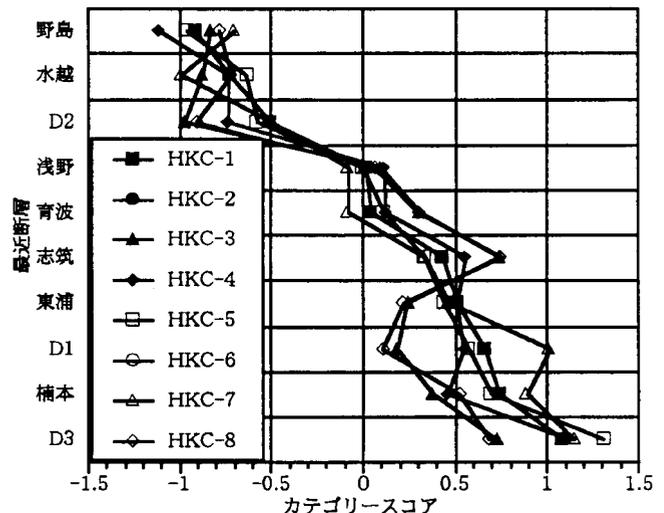


図7 最近断層のカテゴリースコア

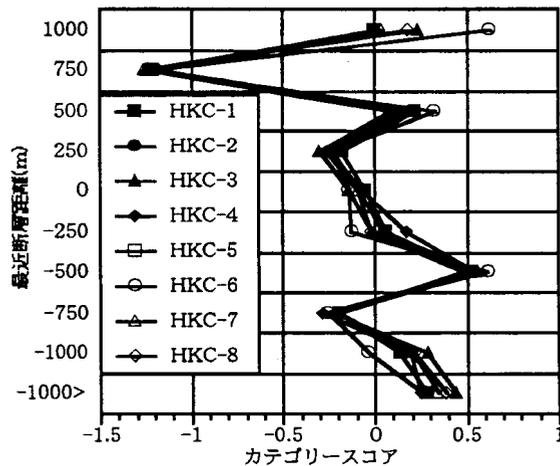


図8 最近断層距離のカテゴリースコア

ように、被害率の最大値は-500m以遠の категорияに生じているが、データ数は3個であるから信頼性は少ないといえよう。これを除くと被害率は-500~500mにおいて平均値より高く、0mの categoryつまり断層直上から両側に距離と共に減少している。一方、志筑断層及び育波断層の被害率は断層への距離が近いほど小さい(藤井, 1996)。したがって図8において-750mと700mの categoryが大きいのは、最近断層ではなく野島断層とか水越撓曲といった他の、影響力のある断層に起因するものと思われる。

5.2.3 震央距離・ダムサイトの標高

震央距離の被害への寄与はHKC-1の場合5位(図5a)である。この categoryスコアを図11に示す。被害の傾向は図に見られるようにアイテムの組合せで大きく変わり、必ずしも震央に近い程被害が大きいわけではない。すなわち「最近断層」のアイテムを除いた場合のHKC-2およびHKC-6の場合、被害は震央より16km以内のダムが categoryスコアが負値を示し被害に関係する。そして category-8kmを除き、被害は震央に近い程大きい傾向を示している。一方、震央距離の被害率は、表2のように14km以内で平均値より高く、両ケースと同様な傾向を示す。図12に震央距離の category分けは異なるが、震央距離と被害率の関係を示した。上記と同じく震央距離に近い程被害は大きい。一方、HKC-1については震央距離8km以上16km以内の categoryスコアは負値で被害に関連するが、震央に近い8km以内では正値であり、無被害側となっている(図11)。同様の傾向が、アイテムとして最近断層を含んでいる場合(HKC-4,5,7)にも見られる。この震央から離れた地域で被害が大きいという傾向は矛盾しているようにみえるが、この地帯(震央から10~14km)は、気象庁発表の震度7地帯と殆ど一致している(気象庁, 1998)。すなわちこの解析結果は誤りでないことがいえる。さらにダム

の被災状況から、震度を推定できることを意味している。

ダムサイトの標高(9番目)の categoryスコア(図13)は、HKC-1については、標高100m以上のダムが被害を受けやすく、100m以下の被害を受け難いことを示している。同様の傾向が最近断層を含んでいるケースに見られる。

一方、ダムサイトの標高の被害率(表2)はダムサイトが50m未満の場合平均より高い。これは多変量解析において断層名を除いた組合せのケース(HKC-2, HKC-6)の結果と一致している。

5.3 ダムサイトの表層地質

ダムサイトの表層地質の被害への寄与は、HKC-1の場合13個のアイテムの内8番目で、その categoryスコア(図14参照)は、表層地質が土質地盤(粘性土および非粘性土)のとき被害を受けやすい傾向を示している。そして、土質地盤でも非粘性土地盤上のダムは粘性土地盤上のものより

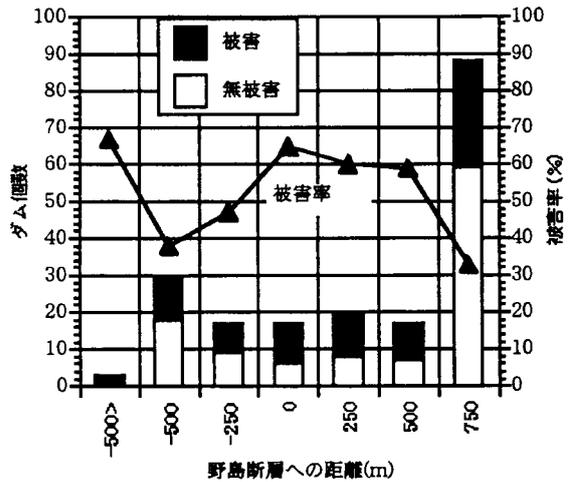


図10 野島断層周辺のダムの被害率

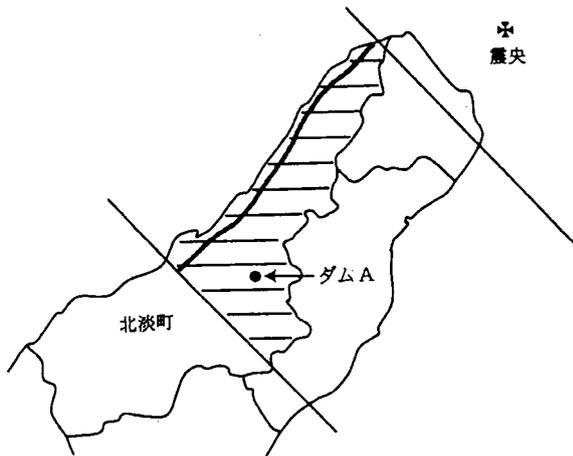


図9 野島断層周辺の領域の設定

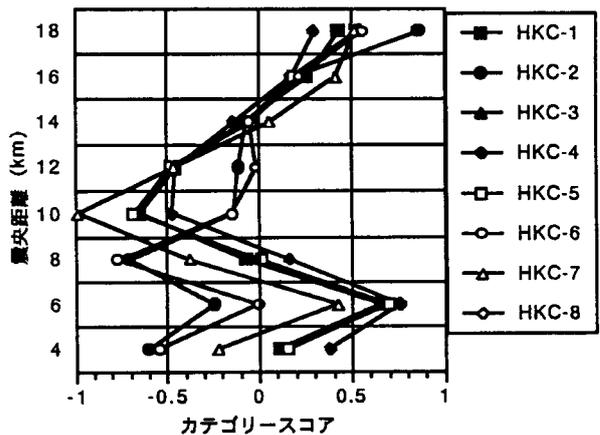


図11 震央距離の categoryスコア

被害傾向が大きい. 一方このアイテムの被害率は, 表2のように花崗岩と粘性土が平均被害率より高い. これは震央に関するアイテムを取り去ったケースHKC-3の結果と似ている.

ここで, ダムサイトの表層地質で分別した震央距離と被害率の関係を図12のように作成する. 同図から花崗岩の被害率はおおむね震央距離のデータと共に減少しているが, 粘性土の被害率は距離にあまり影響されていない. つまり淡路島は花崗岩地帯が多いので, 単変量解析だと花崗岩地帯の被害が大きいという結果が出てしまう. すなわち予測されるように, これらの結果は土質地盤上のダムは岩盤上のものより被害を受けやすいことを示している.

被害ダム・無被害ダムを5個ずつ選び弾性波探査した結果, 堅固な層までの深さは被害ダムが無被害ダムより遙かに大きいことを示している (藤井ら, 1998c).

5.4 堤体の構造 - ダムの大きさ

5.4.1 統計結果による論議

堤体量は2番目に重要な要因である (図5参照). そのカテゴリースコアは図15のように, 体積が大きくなればなる程被害を受けやすい. その傾向は解析条件が変わっても同じである. 被害率も表2に見られるように同じ結果を示している. さらに, 堤高と堤長の被害率は図16と図17のようになり, 堤高が高い程, 堤長が長い程ダムは被害を受けることを示している.

また堤高および堤長の被害無被害比の平均値は表5のように, 被害ダムが無被害ダムより約30% (被害無被害比: 堤高1.28, 堤長1.34) 大きい. 一方, 現地調査したダムについて被害無被害比も, 同表のように被害ダムは無被害ダムより堤高が60%高く, 堤長が40%長い (被害無被害比: それぞれ, 1.59, 1.44). 平均堤頂幅も, 被害ダムは無被害ダムより約60%幅広である (被害無被害比: 1.63). このように文書データならびに現地調査結果とも, 堤高, 堤長, 堤頂幅が大きい程被害が大きいことを示す. これらの結果は高瀬 (1966), 谷ら (1987), 山崎ら (1989) もこのような傾向があることに触れている. この可能性については次項で考察する.

表5の平均勾配は無被害ダム (1:1.44) が被害ダム (1:1.60) 急であるという結果がでている. これは, 斜面勾配が1.5割前後の小さなアースダムにとっては, 0.1割の差は被害要因としては重要でないということがいえよう.

5.4.2 数値解析による検討

地震によるフィルダムの動的挙動についての研究は古くから数多くあるが (例えば松村, 1934; 畑中, 1952; Watanabe et al., 1995), 前項のように長く高いダムが被害を受けやすいという挙動には触れていない. 藤井・有本ら (2000a) は数値モデルを用いてこれを検討している. 数値解析は動的弾塑性FEMプログラム (若井, 1999; 田中ら, 1996) を使用し, 基本的な堤体モデルを堤高10m, 堤長50m, 堤頂幅5m, 勾配1.5割 (4292要素, 5340節点) としている. 地震

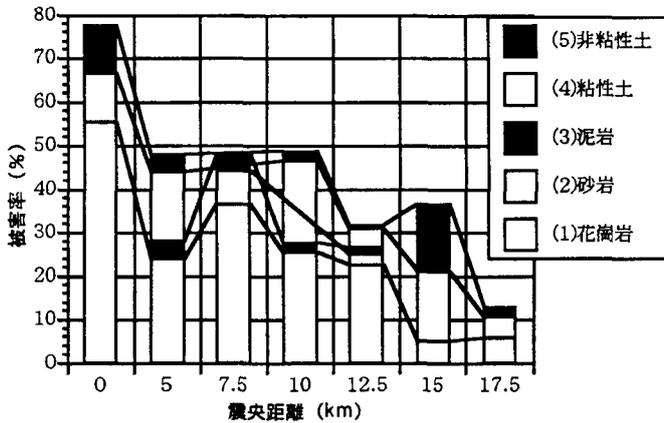


図12 表層地質を考慮した震央距離と被害率

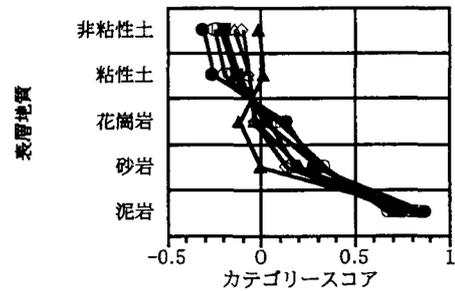


図14 ダムサイトの表層地質のカテゴリースコア

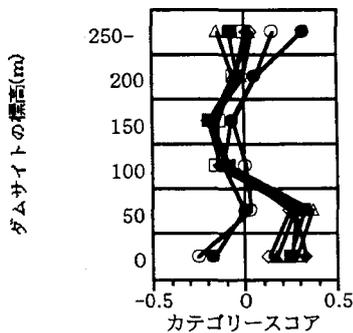


図13 ダムサイトの標高のカテゴリースコア

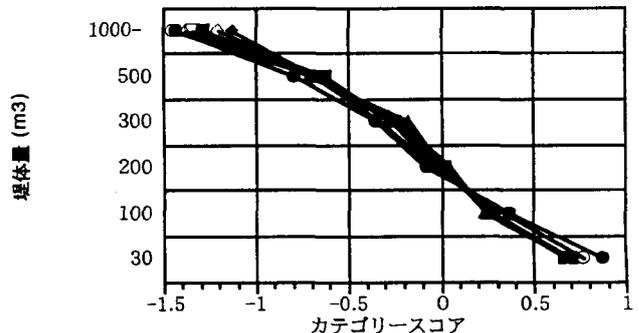


図15 堤体量のカテゴリースコア

波は実地震波形に類似させた正弦波(最大加速度3.0m/s,周期0.75sec)を与えた.そして地震波の入射角を堤軸の法線方向から与えるものを基本とし,これらの各条件を変えて解析している.そして,被害の目安として,降伏した(塑性化した)要素の全体要素に対する百分率(「降伏率と定義」と「塑性化した体積」)を用いる.図18は堤高および塑性化した体積と降伏率の関係を示す.堤高が高いほど降伏率は大きくなり塑性領域が広がっている.堤高25mになると,堤体の約8割の要素が降伏する.また,図19は堤長と降伏率および塑性化した体積を示す.この場合堤高が長くなると,降伏率は減少しているが,塑性域の体積は増加している.この塑性域の増加がクラック,滑りなど被害につながると考えられる.よって堤高は高いほど,堤長は長いほど,幅が広いほど被害を受けやすいことを示し,数値解析結果は統計分析結果を裏付けるとしてよい.

5.5 堤体の構造

- 堤軸の方向 (震央角度と最近断層角度)

5.5.1 統計結果による論議

堤軸の法線の震央ならびに最近断層に対する角度,つまり震央角度と最近断層角度の被害に対する寄与は,それぞれ3位と7位である(図5参照).そのカテゴリースコアは

図20,図21のように,いずれも特定の角度のカテゴリーで被害の傾向を示している.図22にHKC-1の震央・最近断層角度両者の負のカテゴリースコアを合わせて,絶対値の大きさの順に示した.この図にはまたHKC-4(最近断層角度を除いたケース)と,HKC-7(震央角度を除いたケース)のカテゴリースコアも示している.HKC-1の震央角度については,データ数は3個と少ないが,40度が被害に最も関係し,そして30,0,160,100,70と140度と続く.最近断層角度は100度が被害に最も関係し,50,40,170,20度と続くこれらのカテゴリーの被害率(表2)は平均値より大きく,カテゴリースコアの傾向とほぼ一致している.

北淡町のダム の震央角度と最近断層角度の間には図1にみられるように相関がある.例えば,図9のダムAが野島断層に正対していれば($\theta_{NF} = 0$ 度又は180度),図2を参考に,その堤軸はほぼ震央の方向を指すことになる($\theta_E \approx 90$ 度).このことは幾つかの角度のカテゴリーは互いに影響しているといえる.

既に述べたように偏相関係数は,震央角度が最近断層角度より大きい.そして負のカテゴリースコアは,図22のように震央角度の方が最近断層角度より大きい.さらにHKC-4(震央角度を含むが最近断層角度を含まない)は,表4のように重相関係数(0.515),判別率(73.5%),相対

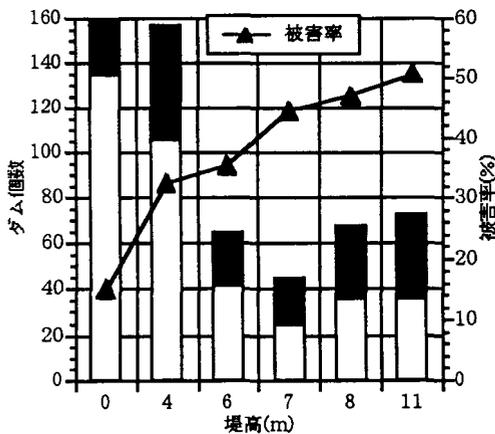


図16 堤高と被害率

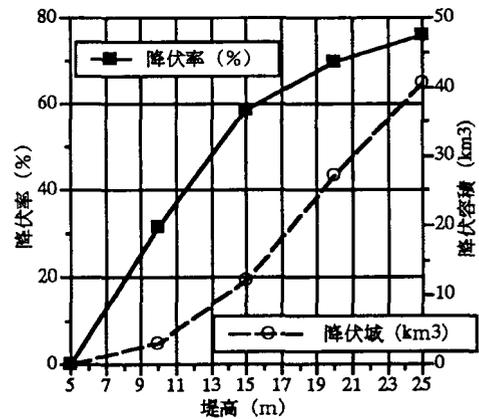


図18 数値解析による堤高と堤体の降伏状況

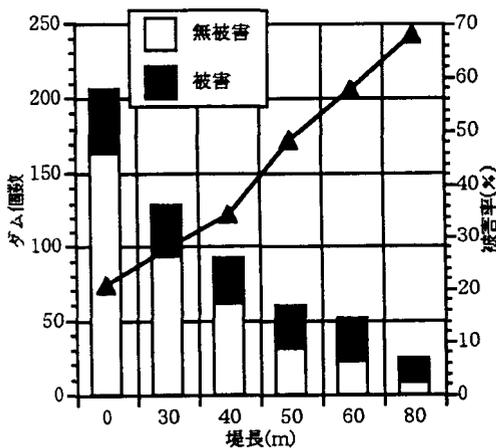


図17 堤長と被害率

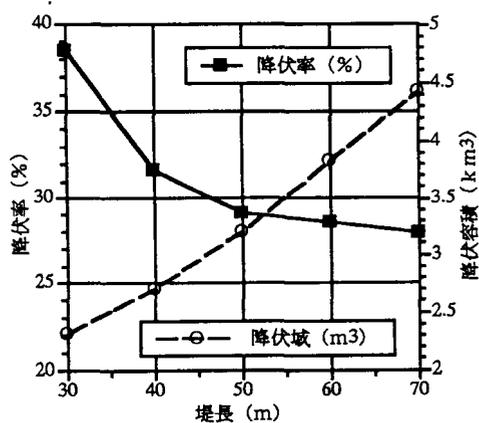


図19 数値解析による堤長と堤体の降伏状況

精度 (1.36) で, HKC-7 (震央角度を含まず最近断層角度を含む) のそれらの値 (0.497, 71.5%, 1.32) よりわずかではあるが大きく, 統計的な精度はより高いといえる. 従って, 最近断層角度の方が震央角度の影響を受けたと考えられる. 実際, 北淡町の多くのダムの野島断層や浅野断層に関する最近断層角度は, 震央角度より約 70-80 度大きい (藤井 1997a). この関係を考慮すると被害に係る最近断層角度は 40 度のみ残る. 一方 HKC-4 によれば, 震央角度に対して被害傾向のカテゴリー順位は 40 度そして 30, 0, 160, 100, 140 度である. 同様に, 最近断層角度に対する被害傾向のカテゴリー順位は 40, 50, 100, 170, 20 度である. ただし表 5 にみられるように, 震央角度 40 度のカテゴリーには 3 個しかデータがないので断言はできない.

5.5.2 北部 5 町の例 (自然 99)

前項で述べたように, 震央角度・最近断層角度については, いくつかの曖昧な点が残る. すなわち, 北淡町のみだとデータ数が少ないので 180 度表示しているため, 貯水池が堤軸に対して震央側か反対側にあるかを無視していること, ならびに被害の大きい 40 度のカテゴリーのデータ数が少ないこと等である.

藤井ら (1999b, 2000a) はこの問題について, 淡路島北部 5 町の 1788 個のダムについて北淡町同様, 数量化理論 2 類による多変量解析ならびに単変量解析をおこない検討している. この結果を円グラフで示す (図 23, 図 24). 図 23a, 24a が 360 度表示の震央角度および断層角度のカテゴリースコアの, 図 23b, 24b が 180 度表示のものである. また図 23c, 24c は同様に被害率を表している. なおカテゴリースコアの図は被害率の図に合わせ, + を逆にして図示している. 震央角度のカテゴリースコアの 360 度表示 (図 23a) と 180 度表示 (図 23b) を比較すると, 前者は 280 度が大きく, その点対称の位置にある 100 度では小さい. 後者は 100 度 (280 度も含んでいる) が大きい. これは震央に対する堤軸と貯水池の関係が被害に大きく影響することを示す. 図 24 の断層角度も震央角度同様に差がでている. 被害率 (図 23c, 図 24c 参照) についても傾向は異なるものの, 点対称上の角度の値には大きさに差がある. 堤体の法線が断層および断層に反対向きのもの, ほぼ直交しているものの被害が大きいといえる. また, 40 度付近の被害は特に大きいというわけではない. このことは, 最近断層距離も踏まえ (5.8 項) で論議する.

5.5.3 数値解析による検討

藤井・有本ら (2000) は, 5.4.2 項で述べたモデルならびに手法で入射角の影響を知ろうとしている. 地震波については, ①: 一方向からのみ作用した場合 (一方向波) と, ②: ①の波とこれに直交する波が同時に作用する場合 (二方向波) を仮定し入射角を変えて計算している. ②は実際の被害率の分析から, 震源方向と断層方向の両方の影響が見られるからである. また, 震源断層 (この場合野島断層) は, 震源から始まりが南へ発達したと言われている (Miyatake, 1999) ので, 震源から直接発生した波と, 断層から発生した波が同時に到達するものとして合成したもので

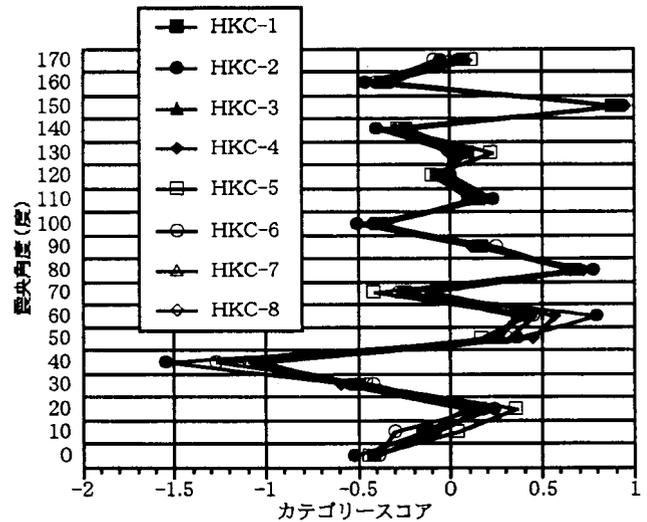


図 20 震央角度のカテゴリースコア

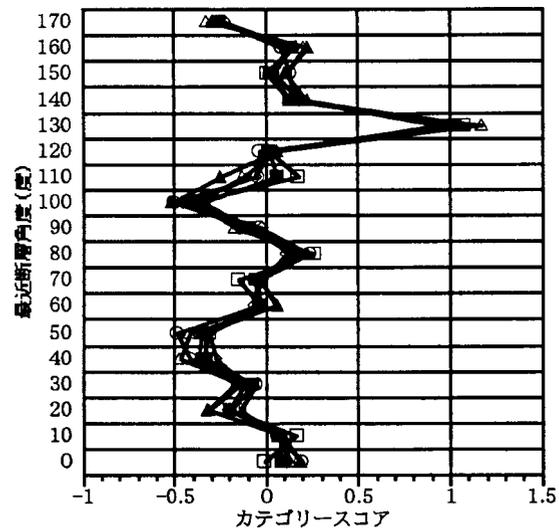


図 21 最近断層角度のカテゴリースコア

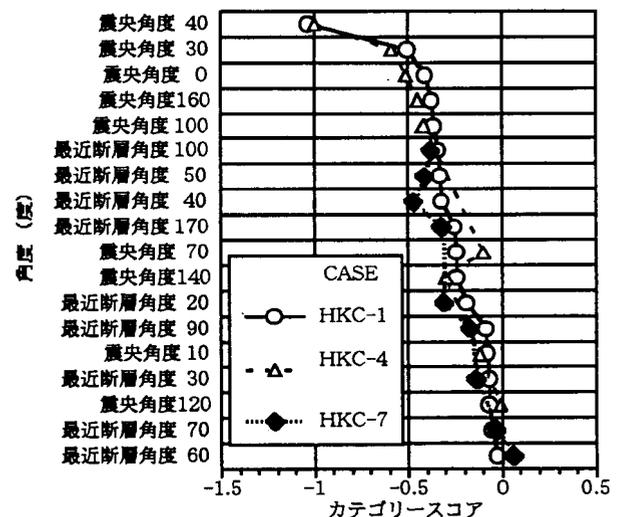
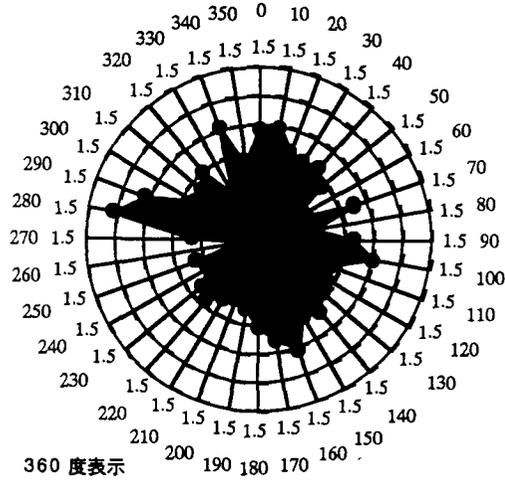
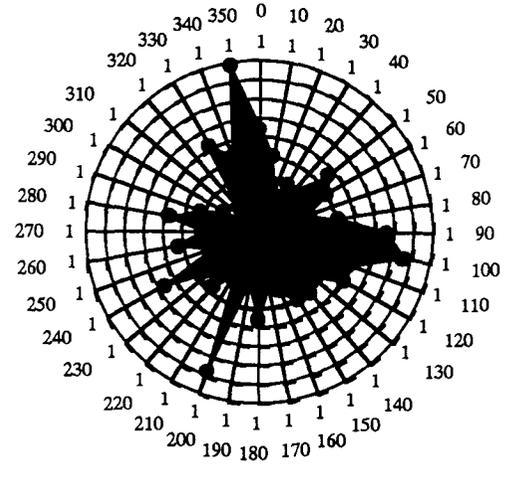


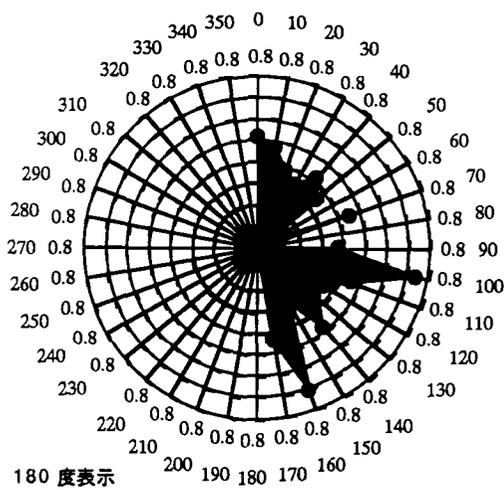
図 22 震央角度と最近断層角度のカテゴリースコア



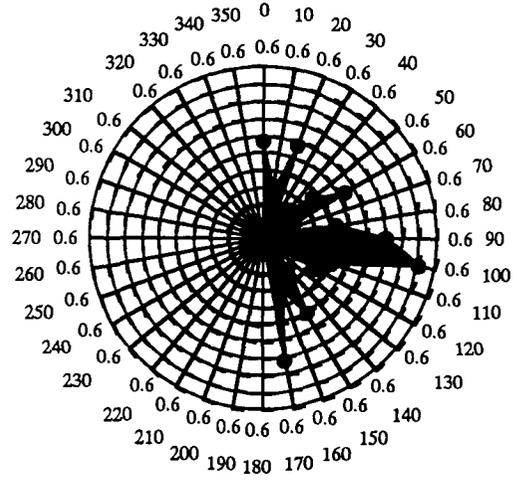
a カテゴリースコア 360 表示



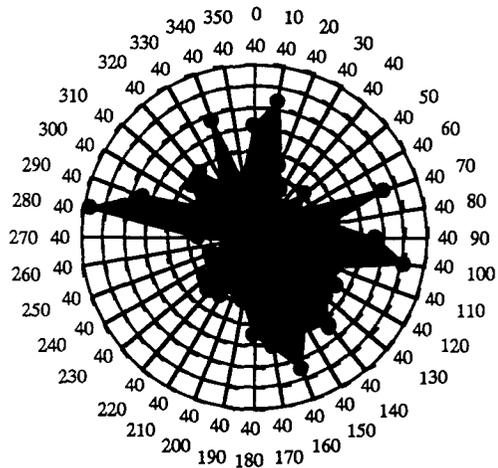
a カテゴリースコア 360 表示



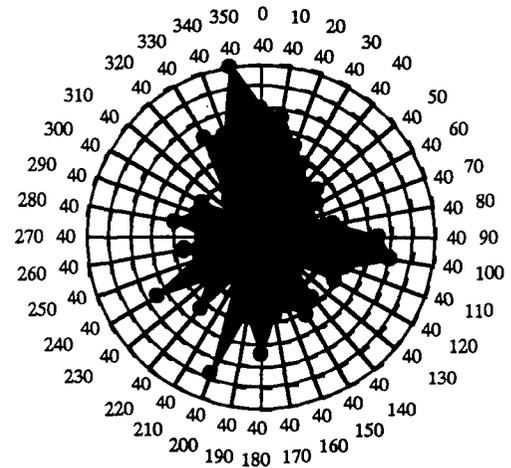
b カテゴリースコア 180 表示



b カテゴリースコア 180 表示



c 被害率 360 度表示



c 被害率 360 度表示

図 23 震央角度の 180 表示と 360 度表示の比較 (1788 データ)

図 24 最近断層角度の 180 表示と 360 度表示の比較 (1788 データ)

ある。ただし断層からの加速度は震源からの加速度の1/2としている。

図25は、地震波の入射角を堤体法線を基準として反時計回りに変化させた場合の降伏率の計算結果である。一方向波では、ダム堤体は堤軸に垂直な横断面方向からの地震波の方が、堤軸方向(入射角90度)からの地震波よりも降伏を引き起こしやすいことがわかる。また二方向波の場合、45度方向からの地震波のとき降伏率が増加する。すなわち北淡町の被害の傾向は起こりうることを示している。

5.5.4 堤軸の平面形状と連続池

堤軸の平面形状(6位)のカテゴリースコア(図26a参照)は、3軸以上の軸を持つダムがより被害を受けやすいことを表している。一方3軸と4軸のダムの被害率は、データ量は少ないが80%以上(表2参照)であり、多変量解析の結果に一致している。即ち、予測されるように複雑な軸を持つダムは、単純な軸のそれらよりもより被害を受けやすい。

連続池(12位)のカテゴリースコア(図26b参照)は、もしダムが下流側に連続池を有する場合、僅かではあるが被害傾向を示している。表2の被害率もこれらの結果に合致している。

5.6 堤体の土質特性

土質特性はアースダム堤体の被害を論ずる時重要であることはいうまでもないが、このアイテムは多変量解析に取り上げていない。これは現地調査したデータ量が、表1あるいは表5に見られるように北淡町では30個そこそこ、淡路島の北部5町全体としても100個足らずしか調査してい

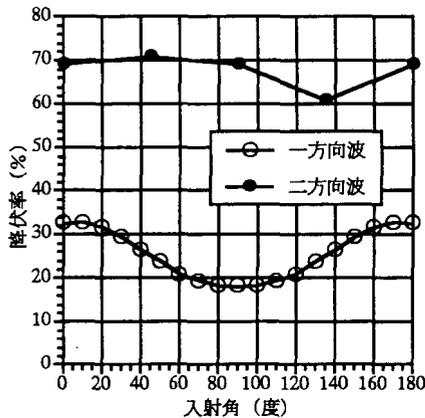


図25 数値解析による入射角と降伏率(%)

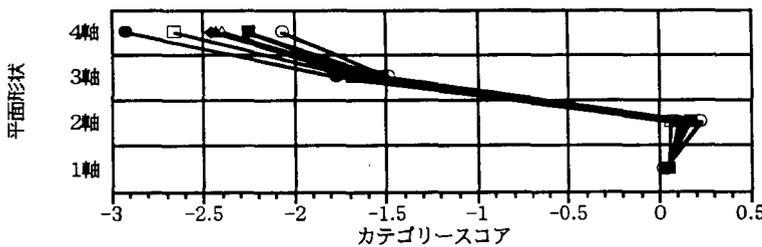


図26a 堤軸の平面形状のカテゴリースコア

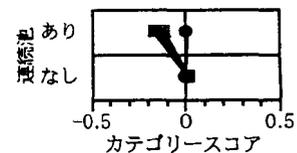


図26b 連続池のカテゴリースコア

ないからである。従ってここでは単変量的な統計結果について論ずることとする。

図27は16個ずつの被害及び無被害ダムから得た土質試料の土の三角座標分類図であり表6のように同定される。同表から堤体材料が砂の場合、その被害率(約60%)は平均被害率(この場合50%)よりも高い。他の町の結果(藤井ら,1998c)も、細粒土のダムは砂よりも被害少ないことを示している。これらの特性は秋葉ら(1941)や谷ら(1987)らによっても指摘されているところである。

表5には現地における被害及び無被害ダムの土の平均比重と平均コーン貫入抵抗も示している。真比重はすべてのダムでほぼ同じである。一方、12個の被害ダムの平均コーン貫入抵抗(292 kpa)は15個の無被害ダムのそれ(325 kpa)よりも約10%低い。しかしながらよく締固められた現代のフィルダム堤体のコーン貫入抵抗は、SF土(シルト砂)

表5 現地調査したアイテムの平均値と被害/無被害比

	無被害 平均値	無被害 平均値	被害・ 無被害比	総数
ダムの構造				
堤高(m)	6.9	11.0	1.59	
堤長(m)	47.7	68.7	1.44	
堤頂幅(m)	3.57	5.83	1.63	
下流斜面勾配(割)	1.44	1.6	1.11	
サンプル数	16	17		33
堤体の土質特性				
土粒子の比重	2.62	2.65	1.01	
サンプル数	17	17		34
貫入抵抗(kPa)	325	292	0.90	
サンプル数	15	12		27
備考				
文書データ				
堤高(m)	6.5	8.3	1.28	
堤長(m)	37.5	50.4	1.34	
サンプル数	328	181		509

表6 三角座標法による土質分類

分類	記号	ダムの個数		被害率 (%)	
		無被害	被害		
礫	G	3	2	5	40.0
礫質土	GF	0	0	0	-
砂	S	5	7	12	58.3
砂質土	SF	8	7	15	46.7
細粒土	F	0	0	0	-
計		16	16	32	50.0

に対しては750-1500kpa, フィルターゾーンの砂に対しては約300kpaであること(藤井ら,1970;1980)を考えれば,被害ダムは現代施工のそれらよりかなり弱いといえる. また調査結果から,これらの被害ため池堤体は締固めが十分でなかったこと,強度の劣化があるのではないかと推定される.

5.7 履歴

ダムの履歴のアイテムには,地震前の漏水,築堤年代,地震前の改修が含まれるが,これらの偏相関係数は,それぞれ10位,11位,13位であり被害への寄与は少ない(図5参照). 各々のカテゴリースコアを図28に示す.

図28aの築堤年代のカテゴリースコアは,1891年以前のダム(少なくとも地震の105年以前に建設)は被害を受け易いことを示している.このアイテムの被害率は,1891年以前に築造されたダムが1891年以後のものよりも高い(36%対25%)ことを示し,多変量解析の結果と一致している.

図28bのカテゴリースコアは,地震前に漏水のなかったダムの方が,わずかではあるが被害を受けやすいと結果がでてい.これは,表2の被害率も同様な結果(無被害約40%,被害21%)がでてい.漏水の確認を同じ精度で,しかも小さいダムではおこなうことは非常に困難だったと推定される.したがって,このアイテム記載値の信頼性は大きくない.たとえデータが正しいとしても,偏相関係数もカテゴリースコアも小さく影響は少ない.

最後に図28cは,HKC-1については改修していない時や被害傾向を示す.改修に関する被害率(表2)はHKC-1の結果と異なるが,震央角度のアイテムを含んでいないHKC-3,-7の結果と似ている.

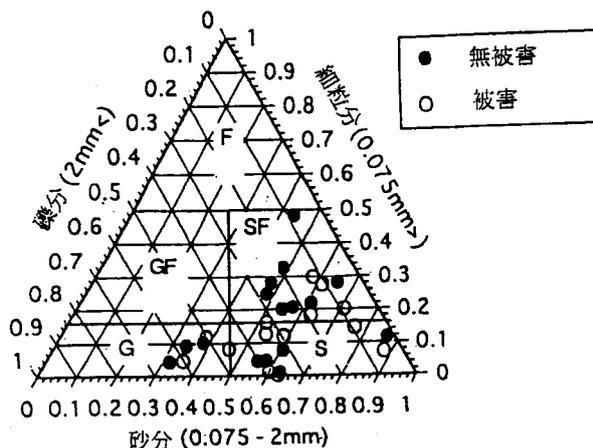


図27 堤体用土の三角座標分類

5.8 総合的な論議

5.8.1 震源と断層の影響について

データ数は少ないものの,最近断層角度が40度代で,北淡町では被害が大きい傾向がでていたが(5.5.1項参照)5町ではそれ程顕著ではなかった(5.5.2項参照).しかし,数値解析の結果はその可能性を示した(5.5.3項参照).一方,最近断層距離の影響はごく近傍のダムに限られていることがわかる(図8,図10参照).したがって震源断層のある北淡町では断層の影響が大きく表れるが,5町のような広い地域になると断層より震源の影響の方が強くなることが考えられる.また数値解析の仮定でも述べたように震源,断層の双方が影響しているとすれば(地震工学的にはありうる:Miyatake, 1999),最近断層角度の40度で被害が大きいということは十分ありうる.

多変量解析においては前述のカテゴリースコアの各図に見られるように,震源あるいは断層に関するアイテムの組合せにより,カテゴリースコアの傾向が変わるものと変わらないものがある.表7はそれらの関係をまとめたもので

表7 震源と断層に関わるアイテムとその影響

	最近断層	最近断層距離	最近断層角	解析に含まれるアイテム	
				震央距離	震央距離
最近断層名		×	×	○	×
最近断層距離	×		×	×	×
最近断層角度	○	×		○	○
震央距離	○	×	×		×
震央角度	○	○	○	×	
標高	○	×	×	×	×
表層地質	×	×	×	○	○
堤体量	×	×	×	×	×
平面形状	×	×	×	×	×
連続池	○	○	○	×	×
築堤年代	×	×	×	×	×
地震前の改修	×	×	○	×	○
地震前の漏水	×	×	×	×	×

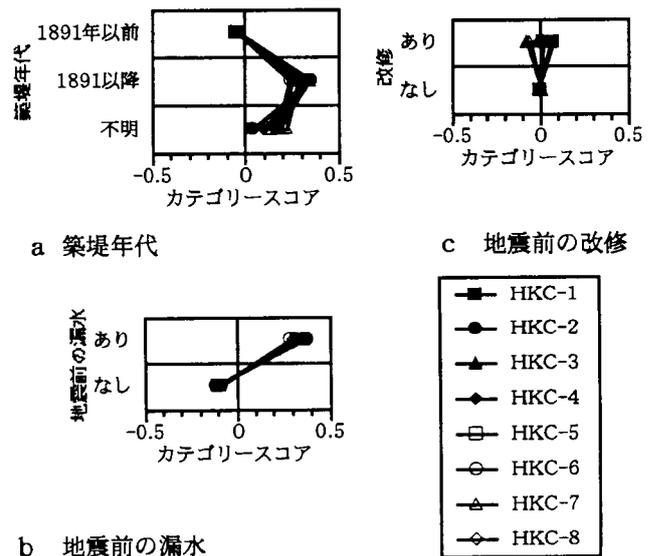


図28 履歴に関するアイテムのカテゴリースコア

ある. 変わらないアイテムとしては, 最近断層距離(図8), 堤体量(図15), 堤軸の平面形状(図26a), 築堤年代(図28a), 地震前の漏水(図28b)がある. これらのアイテムのカテゴリースコアの傾向は, 表2の被害率の傾向と同じである. 一方, 震源あるいは断層に関するアイテムの組合せにより正負が逆になったり, その傾向が変わったりするアイテムは, 最近断層(図7: 震央距離を含むか含まないかにより, 以下アイテムのみ記す), 震央距離(図11: 最近断層を), 最近断層角度(図21: 最近断層あるいは震央に関するアイテムを), 震央角度(図20: 最近断層に関するアイテムを), ダムサイトの標高(図13: 最近断層名を), ダムサイトの表層地質(図14: 震央に関するアイテムを), 連続池(図26b: 最近断層に関するアイテムを), 地震前の改修(図28c: 最近断層角度あるいは震央角度を)がある. したがって, これらのアイテムについては, 単変量の慣用的な統計分析結果のみで被害への関連を論ずると誤った解釈がなされる可能性があることに注意したい.

このような結果から断層も震源も関係しつつ, それぞれが被害に影響を与えていることがわかる. また, 機械的な統計だけでなくその物理的・工学的意味を考慮してアイテムの組合せを変えたり, 結果の解釈をおこなう必要があるといえよう.

5.8.2 日本海中部地震・鳥取県西部地震の結果との比較

序論で述べたように, 多変量解析を用いて先進的な分析が日本海中部地震についてなされた(山崎ら, 1989; 鈴木ら, 1992; 池見, 1993). そこで兵庫県南部地震(気象庁1995, 1997)の結果と日本海中部地震(気象庁, 1983)のそれとの間の比較をここでおこなってみる. 表8に見られるように, 二つの地震の特性は全く異なる. また, 表1のカテゴリースコアの欄や備考欄あるいは表8にみられるように, 解析のアイテムやカテゴリースコアも異なる. さらに, データの取得方法も異なるようである. 当然その結果も異なる. したがって, これらの両方の地震との間の比較は, 多変量解析として同じ数量化理論2類を用いているにも関わらず, 同じ視点からは論議できない. しかしながら, 一般統計解析結果(谷ら, 1987)は, 幾つかのアイテムについて, この研究の一部と同じ結果を示している. 即ち, (1) 被害率

は60km~100kmの範囲では震央から近くに位置しているとき大きい: (2) 砂質土で築堤された堤体は粘性土でのそれよりもより被害を受けやすい: (3) 高いダムほどより被害を受ける等である.

また中国地方では, 平成12年10月に鳥取県西部地震が発生して数十個のダムが被害を受けたが, 淡路島に比べ絶対数が少なく多変量解析による分析は不可能であった. ただし, 干拓堤防の被害状況と入射角の関係は, 兵庫県南部地震と同様, 堤軸が震源に正対(震央角度が0度)の部分の被害が多かった(藤井ら, 2001a, 2001b, 2001c).

5.8.3 今後の地震への適用の可能性

いつ地震が起こり, その震央がどこかということをおぼつかない. しかし近い将来において動く可能性のある活断層が同定されたとすると, HKC-3の分析結果が使うことができるであろう. すなわち, 震央に関するアイテムを取り去ったケースである. また現地調査の結果も利用できよう. すなわち被害を受けやすいダムは同じ土性ならば, (1) 堤高が高く, 堤長が長い, (2) 断層に対して斜交, あるいは垂直, 直交に面しているもの, (3) 断層に近い, (4) 複雑な軸を持つ, (5) 砂又は粘土地盤に建設され, 特に堅硬な地盤までが深いもの, (6) 100年以上前に建設されたものである. そして(7) 築堤用土が砂或いは砂質土で建設され, 特にそれらがよく締固められていないダムである.

最後に, 兵庫県南部地震のような近地(境界内)地震については必要な要因は, あるダムからの最近断層, その距離, その角度等の位置である. 同時に図5や表4, 表7に見られるように, 震央に関するアイテムも又重要であり両者は影響しあい, かつ独立して影響する.

6 おわりに

この研究は1995年1月17日の兵庫県南部地震による淡路島の北淡町を中心としたダム(ため池堤体)に被害を与える要因を明らかにしようとしたものである. 現地調査結果および文書データを用いて, 一般的な統計解析ならびに多変量解析をおこなった. 多変量解析は数量化理論2類を用い, 被害ダム181個, 無被害ダム328個を対象とした. その結果次のような知見が得られた:

1. 多変量解析のモデルは, ダムの位置, ダムサイトの地質, ダムの構造, ダムの履歴について, 13アイテムと94カテゴリースコアを作成した. 分析の精度を知る指標として確率的判別率・相対精度を定義し算定した. 全アイテムを用いた解析の, 重相関係数は0.53, 判別率率は74%, 相対精度は1.30で, データ数を考えれば信頼できよう.
2. 多変量解析の偏相関係数によると, 最も被害に関する最も重要な要因は, ダムの位置(最近断層名, 最近断層距離, 震央距離とダムサイトの標高)とダムの構造(堤体量, 震央角度, 最近断層角度, 堤軸の平面形状)のグループに含まれる. これらのアイテムは, 第1位から第7位を占める. 続いて表層地盤の地質特性とダムサイトの標高がくる. ダムの履歴(地震前の漏水, 築堤年代, そして地震前の修復)に関する要因および下流貯水池への連続の有無の影響

表8 兵庫県南部地震と日本海中部地震の比較

地震名	兵庫県南部地震	日本海中部地震
発生		
発生年月日	1995.1.17	1983.5.26
震源		
緯度(N)	34.6	40.4
軽度(E)	135.0	139.1
深度(km)	16	14
マグニチュード(JMA)	7.2	7.7
地震のタイプ	プレート内	プレート境界
多変量解析したダム		
対象地区	北淡町	北部5町
ダム個数	被害数 181 無被害数 328 総数 509	350 1483 1788
被害率(%)	35.6	15.7
震央距離(km)	4~20	4~30
それらの震度(JMA)	6~7	5~7
アイテム数	13	8
カテゴリースコア	94	20

響はかなり小さい。

3. ダムの位置のグループでは、最も重要な要因は最近断層が何かということである。そして最近断層が野島、水越、D2断層のとき被害に最も影響する。最近断層に対して500m以内の範囲のダムは最も被害を受けやすい。野島断層に関する被害率は-500mから500mの間で高い。震央への距離については、被害率はほぼ震源に近いほど被害が大きい傾向をしめす。しかし多変量解析では約8~14kmが被害を受けやすい。それらは殆ど震度7の位置に相当する。

4. 構造のグループで最も大きな被害を与えるのは、ダム軸が最近断層・震央に対し斜交のもので、震央に対して垂直・殆ど直角のもの、断層に対して垂直・殆ど直角のものも可能性がある。更に、ダムの体積が大きい程（堤高が高く、堤長が長く、堤頂幅が広い）被害を受けやすく、3軸以上のダム、非粘性土或いは粘性土地盤上に築かれたダム、そして1891年以前に作られたダム、も被害を受けやすい。

5. 細粒土で築造されたダムは被害を受け難い。また被害ダムの土の強度は無被害ダムより少なくとも10%低い。

謝辞： 著者は公私共に非常事態の中で資料を快く提供して頂いた兵庫県農林水産部、洲本土地改良事務所、北淡町そして淡路島の他の町役場の関係各位、また貴重な文献を頂いたり御助言を賜った京都大学の岡田教授、神戸大学の内田教授、高知大学の篠教授、農業工学研究所の谷博士、株式会社フジタの池見博士、中村博士、東京大学地震研究所の宮武助教授に対して心から謝意を表す。また多変量解析に関する助言と文献を頂いた岡山大学の垂水教授、田中教授に感謝する。著者はまた現地調査に協力頂いたウエスコ(株)の金丸氏、オーエス調査(株)の大内氏、現地調査に協力してくれた平成8~10年度在籍の岡山大学農業造構学研究室の学生ならびに林(現榊原)美緒さん、データ整理・校正等をしてくれた吉次彩恵さんに謝意を表す。

最後に著者はパーデュー大学のA.G.アルシャフル教授による英文原稿の御閲読ならびに懇切なる御助言に対して心から謝意を表す。

この研究の一部は文部省科学研究費、ならびにウエスコ学術基金の援助を受けた。ここに謝意を呈する。

参考文献

秋葉満寿次・仙波秀男(1941): 秋田県男鹿地震と溜池被害, 農業土木研究, 1, pp.31-59.
 藤井弘章(1973): フィルダムの締固めに関する実験的研究, 京都大学學位論文
 Fujii, H., et al. (1981): "Stress in situ by various compaction equipment and their compaction efforts", Proc. Int. Conf. on Compaction (Organized by Ecole Nationale des Pont et Chaussée and Laboratoire Central des Pont et Chaussées, Paris), 3, pp. 265-268.
 藤井弘章・島田清・西村伸一他(1996a): 兵庫県南部地震による被災ため池の事例-主として井出の尻池の事例, 農業土木学会中国四国支部講演会講演要旨.
 藤井弘章他(1996b): 兵庫県南部地震による北淡町のため池の多変量解析, 自然災害学会講演会講演概要集
 藤井弘章・国政華奈・難波明代他(1997a): 兵庫県南部地

震による淡路島のため池被害の要因分析, 農業土木構造物の耐震信頼設計に関する研究, 科研研究成果報告書(代表: 藤井弘章), pp. 1-61.

藤井弘章他(1997b): 兵庫県南部地震による淡路島のため池被害の要因分析, 地震工学研究会講演論文集, 2, pp. 1141-1144.

藤井弘章, 難波明代他(1998a): 兵庫県南部地震による淡路島北部ため池堤体の被害要因分析, 農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp. 536-537.

藤井弘章, 難波明代他(1998b): 兵庫県南部地震によるため池被害の要因分析-北部4町の事例, 都市直下型地震シンポジウム論文集, pp. 231-234.

藤井弘章, 他(1998c): 兵庫県南部地震によるため池被害の要因分析-主として土性について, 自然災害学会講演会講演概要集

藤井弘章, 他(1999a): 兵庫県南部地震による淡路島北部5町のため池被害の要因分析, 自然災害学会講演会講演概要集, pp. 67-68.

藤井弘章, 他(1999b): 兵庫県南部地震による淡路島北部5町のため池被害と断層, 都市直下型地震シンポジウム論文集, pp. 491-494.

藤井弘章・西村伸一・有本慎一(2000a): 兵庫県南部地震によるため池堤体の構造と被害に関する分析 - 北淡町の場合, 第30回地盤工学会研究発表会講演集, pp.2327-2329.

Fujii, H., et al. (2000b): Damage factors for small embankment dams due to the Hyogoken-Nambu earthquake - Case study on Hokudan, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 6, pp.117-131

藤井弘章・西村伸一・天満龍介(2001a): 鳥取県西部地震による中海干拓堤防の被害分析, 農業土木学会大会講演会講演集, pp.418-419.

藤井弘章・西村伸一・天満龍介(2001b): 干拓堤防への鳥取県西部・芸予地震の影響, 自然災害学会講演会講演概要集, pp.17-18.

藤原悌三(1995): 平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究, 平成6年度文部省科学研究費(総合研究A)研究成果報告書.

藤原悌三(1997): 平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証, 平成7年度文部省科学研究費(総合研究A)研究成果報告書.

Hasegawa, T. and Murakami, A. (1996): "Damage to agricultural facilities", Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations, pp. 255-261.

畑中元弘(1952): 土堰堤の振動に関する3次元の考察-自由振動について-土木学会誌, (37)10, pp.1-6.

兵庫県(1977a): ため池調査票.

兵庫県(1977b): ため池調査票位置図(1/10000).

兵庫県(1995a): 被害ため池台帳.

兵庫県(1995b): 被害ため池台帳位置図(1/10000).

兵庫県農林水産部農地整備課(1996): 兵庫県南部地震農地農業用施設 震災記録誌.

- 北淡町 (1891): 土地台帳.
- 北淡町 (1995a): 被害ため池台帳.
- 北淡町 (1995b): 被害状況図.
- 池見拓・中村正博 (1989): 農業用ため池の地震被害の統計的予測, フジタ工業技術研究所報, 25, pp.7-12.
- 池見拓 (1993): ため池堤体の地震危険度評価に関する統計的研究, 京都大学学位論文, pp.1-181.
- 市原松平・山田公夫 (1981): 地震時における名古屋市水道管の相対的危険度, 土木学会論文報告集, 316, pp. 51-63.
- 市原松平・山田公夫 (1983): 想定地震による名古屋市の木造家屋の被害予測, 土木学会論文報告集, 340, pp. 145-154
- 国土地理院 (1995): 空中写真(淡路島北部, 1995.1.18撮影), 日本地図センター.
- 国土地理院(1997b): 成果表活断層研究会編(1991):新編日本の活断層一分布図と資料, 東京大学出版会.
- 菊山浩喜・横山俊治他(1996):墓石・灯籠の転倒調査から推定される1995年兵庫県南部地震の地震動, 土と基礎, 44 (2), pp.42-44.
- Kimura, M. (1996): Damage Statistics, pp.1-5, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations Japanese Geotechnical Society
- 気象庁 (1984): 昭和58年(1983年)日本海中部地震調査報告-災害時自然現象報告書, 気象庁技術報告, 106.
- 気象庁 (1995): 災害時地震・津波速報 平成7年(1995年)兵庫県南部地震.
- 気象庁 (1997): 平成7年(1995年)兵庫県南部地震調査報告-災害時自然現象報告書-, 気象庁技術報告, No.119.
- 久保慶三郎 (1983): 土木構造物の震害予測, 土と基礎, (31) 5, pp.7-13.
- 国土地理院 (1996): 1:25,000都市圏活断層図, IX近畿圏西部地区.
- 国土地理院編(1994):日本の市区町村位置情報要覧(平成六年度版).
- 高知大学農学部震災調査グループ (1996):兵庫県南部地震淡路島における震災調査報告.
- Matsumoto, N. Nakamura, A., Sasaki, T. and Iwashita, T. (1996): Effects on dams, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, pp. 273-281.
- 松村孫治(1934):地震動による土堰堤の変形, 土木研究所報告, 28, pp.1-67.
- 三宅一郎・山本嘉一郎(1995):新版SPSSX I 基礎編, 東洋新報社.
- Miyatake, T., and T. Inoue(1999):Simulation of earthquake rupture processes and strong ground motion, ACES Inaugural workshop, Brisbane & Noosa, QLD, pp.255--259.
- 守谷正博・高岡恭三・山下進 (1968): 十勝沖地震によるアースダムの被害調査とその考察, 土と基礎, 541, pp. 39-45.
- 乗富一雄 (1984): 1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究突発災害研究成果報告書.
- 岡田勝也・福島弘文 (1990): 地震時における橋台裏盛土の沈下量評価手法の提案, 土木学会論文集, 418, pp. 249-255.
- 岡田篤正・鬼木史子 (1995): 1995年兵庫県南部地震の地表地震断層,
- 地学団体研究会 (1996): 地学事典, 平凡社.
- 篠和夫・藤井弘章他(1996):阪神・淡路大震災による水利施設の被害, 農業土木学会誌, (63)11, pp.39-44..
- 菅民郎 (1993): 多変量解析の実践, 現代数学社.
- 鈴木健一・福田一美・中村正博・池見拓 (1992): 悉皆調査に基づく農業用ため池の地震被害の予測, 土木学会論文集, 441, pp.67-76.
- 電力土木技術協会 (1981): 改訂新版最新フィルダム工学, 電力土木技術協会.
- 高瀬国雄・天野充・山下進 (1966):地震によるアースダムの被害, 土と基礎, (14)10, pp.3-9.
- Tanaka, Y., Tarumi, T. and Myung-Hoe Hue (1994): Research and applications of quantification methods in East Asian countries", New approaches in classification and data analysis (edited by E.Diday et al), Springer-Verlag, pp. 64-71.
- 田中豊・垂水共之(1997):多変量解析ハンドブック, 共立.
- 谷茂・長谷川高士 (1987): 日本海中部地震を中心とした溜池の地震被害, 農業土木学会誌, (55)10, pp.17-25.
- 谷茂・長谷川高士 (1991): 溜池の地震時安全性の評価法, 農業土木学会論文集, 152, pp. 55-64.
- Tani, S. (1996): Damage to earth dams, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations, pp.263-
- 垂水他(1995):新版SPSSX 解析編 2, 東洋新報社.
- 東京天文台 (1998): 理科年表.
- 地質調査所(1992):明石地域の地質.
- 地質調査所(1992):洲本地域の地質.
- 地質調査所(1996):淡路島北部地質図, 日本地図センター.
- 辻誠一 (1996): 兵庫県南部地震によるため池被害について, 材料施工研究部会報, 34, 農業土木学会材料施工研究部会.
- USBR (1960): Design of Small Dams, US Government P.O.
- 山崎晃・三宅克之・中村正博・池見拓 (1989): ため池の地震被害の分析, 土木学会論文集, 404/I-2, pp.361-366
- 山崎晃・三宅克之・中村正博・池見拓 (1987): 農業用溜池の地震時における被害予測. 農業土木学会誌, (55)6, pp. 543-550.
- 山田公夫 (1992): 想定地震による名古屋市沖積地盤の液状化予測, 土木学会論文集, 455, pp.37-45.
- 山田公夫 (1986): 数量化理論による木造家屋震害予測モデルの東南海地震への適用, 土と基礎, (34)6, pp.59-65.
- Watanabe, H. and Kawakami, T. (1995): Characteristics of elementary dynamic behavior for three dimensional seismic response of a fill dam, Soils and Foundations, (35)1, pp. 45-54.