

## ため池耐震性調査結果の概要（中間報告）

北海道農政部農村整備課	赤坂 浩
株式会社 ルーラルエンジニア	○玉山 政宏
”	大沢 正人
内外エンジニアリング北海道株式会社	依岡 進
上山試錐工業株式会社	神山 裕幸

はじめに

2011年3月の東北地方太平洋沖地震や2018年9月の胆振東部地震における「農業用ため池」の被災事例は記憶に新しいところである。また、近年全国規模で多発する集中豪雨が原因となった「農業用ため池」の被災事例も数多く報告されている。

こうした背景から北海道においては「ため池一斉点検」の結果を受け、決壊時に人的被害を与える可能性のある133箇所の「防災重点ため池」を抽出し、土質調査などを行ってその構造的な安定性を確認するための「ため池耐震性点検」を実施中である。

本報文は昨年度までに行われた「ため池耐震性点検」等の内、資料を収集した21か所の「ため池施設」で得られた検討の結果をまとめたものである。

### 1. ため池耐震性調査の概要

ため池耐震性調査は、現在、下表の内容で進められている。

表-1 ため池耐震性調査の概要

調査項目	調査内容
資料調査	ため池一斉点検の記録、施設台帳(改修履歴)、設計図等を収集する。
現地踏査	収集資料に基づいて、漏水・変状等の状況を現地確認する。
ボーリング調査	堤体および基盤の土質をコアボーリングにより把握する。
地下水位調査	ボーリング孔内の地下水位観測から堤体内の浸潤線を把握する。
室内土質試験	堤体と基盤までに成層する中間層の物理性(含水比、粒度組成など)、力学性(3軸圧縮試験)の室内試験を行って、耐震性検討に用いる土質常数を設定する。
耐震性検討	レベルⅠ地震動を対象とした「安定解析(円弧すべり)」を行い、所定の安全率が確保されるか否かを判定する。また、堤体と基盤岩との間の中間層に対して液状化の可能性を評価し、可能性がある場合はFL値法による簡易判定を行う。

### 2. ため池の概要

#### 2-1 ため池の位置と遮水タイプおよび規模

今回検討の対象とした21か所のため池は、石狩、空知、上川、胆振、日高、留萌の6振興局にあり、そのうち強震地域に位置するものが4箇所、中震地域が13箇所、弱震地域が4箇所である。

ため池の遮水タイプは均一型が9箇所、中心遮水型が7箇所、傾斜遮水型が5箇所である。(図-1)

ため池の規模は、堤高が4.6~29.7m(平均13.2m)、堤長が45.0m~485.4m(平均139.3m)の範囲にある。

傾斜遮水型のため池は、堤高が10m以下の小規模なものが多く、平均では6.6mである。

均一型および中心遮水型の堤高の平均はそれぞれ

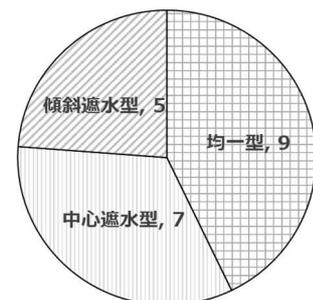


図-1 ため池の遮水タイプと資料数

13.9m、16.9m であり、20m を超える規模のため池は中心遮水型の 3 か所である。

堤長は概ね堤高の 10 倍程度のものが多く、平均値は 137.2m である。(図-2)

### 2-2 のり勾配

堤体の安定において主要な要素となる「まえ法(上流側)」の勾配は  $n=1:1.87\sim 2.96$  の範囲にある。

堤高が高くなるのに従ってのり勾配は緩やかに設定されているが、遮水タイプごとの平均値は、均一型が 1:2.47、中心遮水型が 1:2.61、傾斜遮水型が 1:2.24 である。

(図-3)

### 2-3 ため池の地盤

農業用ため池の多くが平野部に隣接する丘陵の辺縁部やこれを開析して流下する溪流部に位置していることから、地質的な基盤となる岩盤の多くは新第三紀の泥岩や砂岩および凝灰岩などである。

堤体の直下には河床堆積層と考えられる未固結な礫、砂、粘土などの中間層が成層する場合が多く、平均的なその厚さは 5.3m である。また、この中間層の平均的 N 値は 15 であるが、中には 10 未満の値を示すため池も 3 割近くある。(図-4)

### 2-4 堤体の土質

多くのため池では昭和 40~50 年代に用水需要の増加などに伴って「かさ上げ」を含む改修が行われている。ダムタイプの差異や改修方法の違いがあるため、堤体の土質を単一の指標で比較することは難しいが、ここでは堤体の主要な部分を構成する建設当初の「旧堤体」の土質について比較を行った。

#### (1) 粒度組成と土質区分

堤体土の粒度組成はため池毎に変化が大きい、全体としてはシルト・粘土分が平均で 56.6% と卓越し、過半が F(細粒土)に区分される土質材料である。礫分の平均的な含有量は 15.8%、同じく砂分は 28.1% であり、礫質土に区分されるものが 2 試料、砂質土に区分されるものが 5 試料である。(図-5)

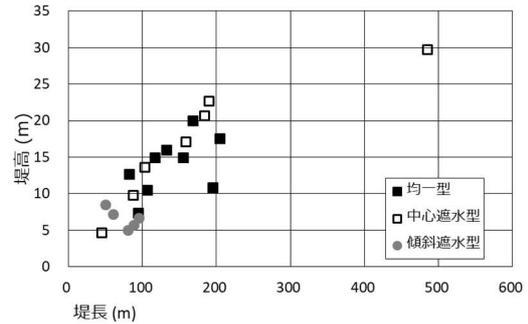


図-2 検討対象とした「ため池」の規模

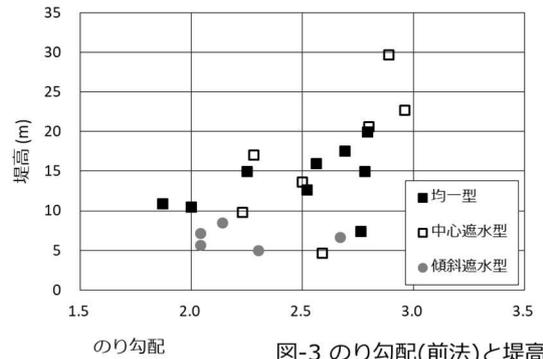


図-3 のり勾配(前法)と堤高

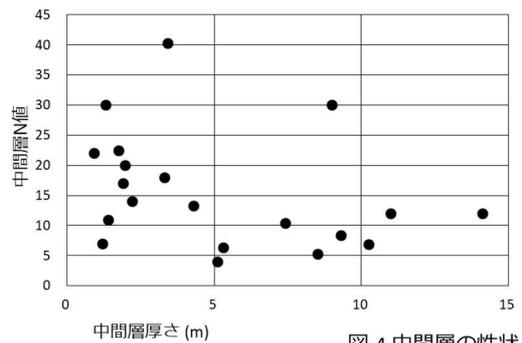


図-4 中間層の性状

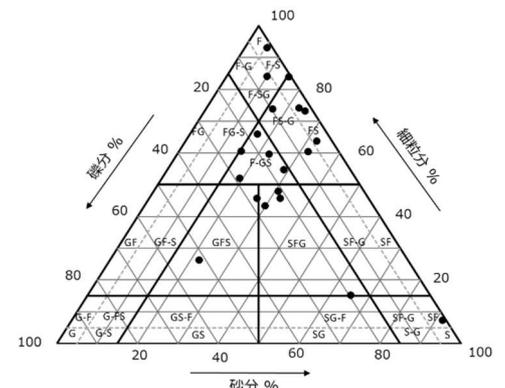


図-5 堤体土の工学的分類

(2) 湿潤重量

湿潤重量は  $\rho = 15.3 \sim 20.3 \text{ (kN/m}^3\text{)}$  の範囲にあり、平均値は前記した土質区分の傾向を反映して  $18.3 \text{ (kN/m}^3\text{)}$  である。(図-6)

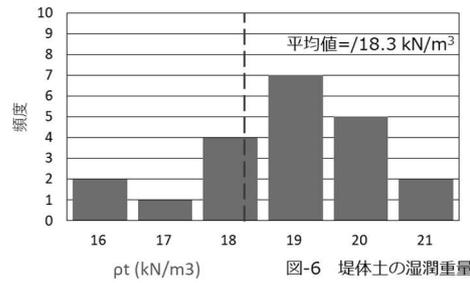


図-6 堤体土の湿潤重量

(3) 粘着力

堤体盛土の強度常数は、トリプルチューブコアサンプラーなどで採取した不かく乱試料に対する「圧密非排水 3 軸圧縮試験(CU)」から求めている。

円弧すべり法での安定解析は間隙水圧を考慮した「有効応力法」で行うことから、上記した試験結果も供試体内で発生する間隙水圧を減じた有効応力で整理し、側圧0におけるせん断強度を表す、「(みかけの)粘着力」と、有効応力の変化に伴って増減するせん断強度の変化割合を示す「内部摩擦角」とを求めている。

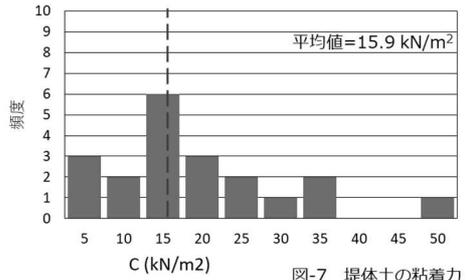


図-7 堤体土の粘着力

堤体盛土の粘着力は  $C' = 0.4 \sim 46.5 \text{ kN/m}^2$  と幅広く分布するが、平均値は  $C' = 15.9 \text{ kN/m}^2$  である。(図-7)

(4) 内部摩擦角

粘着力と同様に、有効応力で求められた堤体土の内部摩擦角は  $\Phi' = 20.9 \sim 30.5^\circ$  の範囲にあり、平均値は  $\Phi' = 29.4^\circ$  である。

(図-8)

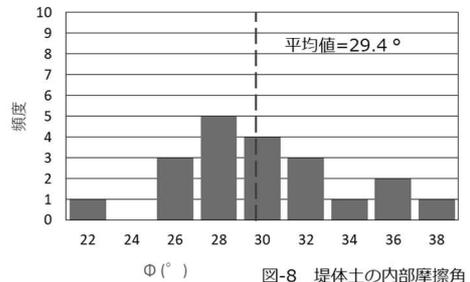


図-8 堤体土の内部摩擦角

(5) 透水係数

堤体土の透水係数は、現場透水試験、室内透水試験、粒度組成からの推定(20%粒径)など、求め方が多様であり一様に比較することには注意が必要であるが、得られている透水係数は  $k = 2.2 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-9} \text{ m/s}$  の範囲にあり、平均的には  $k = 2.66 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  である。これは、遮水材料に求められるオーダーである  $k = 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  と比べるとやや大きな値であるが、多くがランダム材を対象とした試験であることがその要因と考えられる。(図-9)

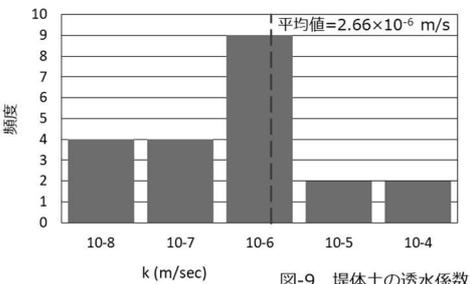


図-9 堤体土の透水係数

透水係数は細粒分(シルト・粘土)の増加に伴って緩やかにではあるが低下する傾向を示している。(図-10)

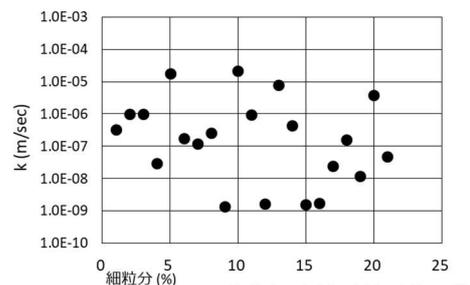


図-10 堤体土の細粒分割合と透水係数

(6) N 値

堤体の安定度を評価するのに際して N 値を直接的に用いる例は少ないが、堤体の硬さや締まりの程度を評価する目的で傾向を整理した。

なお、堤体 N 値は堤体深度内で行った標準貫入試験(@1m)の単純平均としている。

全体の 70%近くは N 値が 4～9 の範囲にあり、平均的には N 値=6.6 であったが、これは粘性土のコ

ンシステンシーとしては「中位～硬い」に区分される状態にある。(図-11)

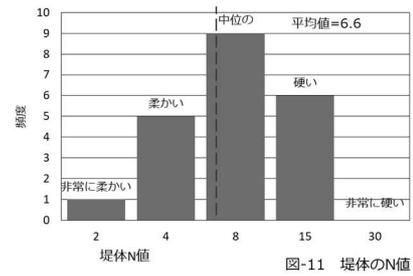


図-11 堤体のN値

3. 安定解析の結果

3-1 安定解析の手法

(1) 有効応力法

土中の間隙水圧を考慮した有効応力法に基づいて任意のすべり面に対するせん断力とせん断抵抗の総和を求め、この比の最小値をもって最小安全率としている。

$$F_s = \frac{\sum (C' \times l + (N-U-Ne) \cdot \tan \phi')}{\sum (T+Te)}$$

F<sub>s</sub> : 安全率

N : すべり面上に働く荷重の垂直分力

T : すべり面上に働く荷重の接線分力

U : すべり面上に働く間隙水圧

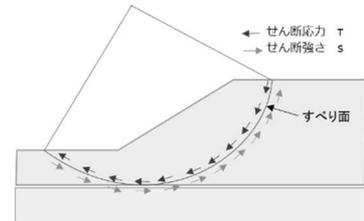
Ne : すべり面上に働く地震時慣性力の垂直分力

Te : すべり面上に働く地震時慣性力の接線分力

φ' : すべり面における堤体の内部摩擦角

C' : すべり面における堤体の粘着力

l : すべり面長



(2) 地震時水平力・設計水平震度

地震時水平力は、設計基準において定められた地域ごとの設計水平震度を用いている。

表-2 地域区分と設計水平震度

地域区分	設計水平震度	本検討の対象地域
強震地域	0.15	日高
中震地域	0.15	石狩, 空知, 上川, 胆振
弱震地域	0.12	留萌

(3) 貯水位

安定解析を行う際の貯水位および対象となる「のり面」は下記の通りである。

常時満水位 : 上流、下流

水位急降下時 : 上流

(4) 浸潤線

ボーリング観測孔で測定された地下水位と、設計基準に示されているダムタイプごとの標準水位を比較し、何れかの高い水位を採用することとしているが後者のケースが多い。

(5) 土質常数

ため池耐震性調査でのボーリング調査、室内土質試験のほか、既往の土質調査資料や経験的な数値を用い、設計者の総合的な知見に基づいて設定されている。

### 3-2 安定解析の結果

#### (1) ダムタイプと最小安全率

安定解析で求められた最小安全率の平均値をダムタイプ別に表-3に整理した。

表-3 最小安全率

貯水位	のり面	全体平均	均一型	中心遮水型	傾斜遮水型	Fs<1.2	
						か所数	%
常時満水位	上流	1.178	1.160	1.275	1.074	9	43
	下流	1.219	1.219	1.290	1.106	8	38
水位急降下時	上流	1.271	1.295	1.317	1.162	8	38

最も低い平均最小安全率が算出されたのは、傾斜遮水型の常時満水位の上流側のり面で、5か所ため池の平均値はFsmin=1.074である。

また、常時満水位の上流のり面でFs<1.20となり堤体に必要な安全率を下回る結果となったのは全体の43%にあたる9か所であった。ダムタイプごとの最小安全率の平均値、最大値、最小値を図-12に示す。

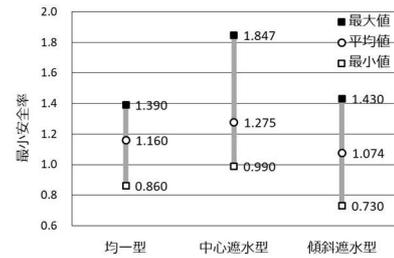


図-12 ダムタイプと最小安全率 (常時満水位-上流のり面)

貯水位の条件に依らず最小安全率の平均が低い傾向を示すのは「傾斜遮水型」であり、中心遮水型が相対的に高い値を示す結果となった。

#### (2) 水位急降下時の最小安全率

図-13は常時満水位の最小安全率と水位急降下時の最小安全率を比較したものである。

全体に水位急降下時の最小安全率が常時満水位の最小安全率を上回るケースが多く、これはダムタイプの差異に依らず同様な傾向を示している。

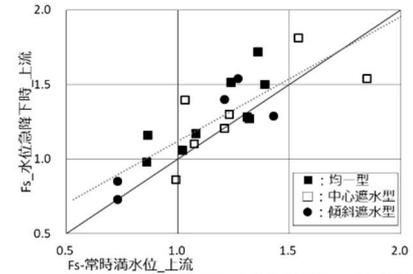


図-13 水位急降下時の最小安全率

#### (3) 下流のり面の最小安全率

図-14は常時満水位の上流のり面の最小安全率と下流のり面の最小安全率を比較したものである。

全体に下流のり面の最小安全率が上流のり面の最小安全率を上回るケースが多く、ダムタイプの差異に依らず同様な傾向が確認される。

前記した水位急降下時の安全率の結果と合わせて考えると、多くの堤体で最小安全率を示すのは

「常時満水位の上流側のり面」のケースが多く、堤体の安定性を比較・評価する際の参考になるものと考えられる。

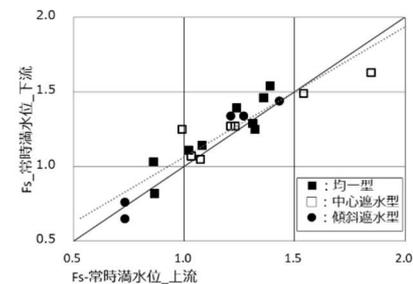


図-14 上流のり面の最小安全率

### 3-3 安全率に影響する要因

安定解析の安全率に影響する要因について、常時満水位の上流のり面で求められた安全率に着目して検討を行った。

(1) 堤高

堤高と最小安全率の関係を図-15 に示した。

堤高と最小安全率との間に明瞭な関係は認められず、堤高が低いことをもって安定性が高いとは必ずしも判断できないことが分かる。

(2) 中間層

多くのため池は基盤岩の上位に成層した堆積層（中間層）の上に建設されている。

この中間層の厚さを堤高で除した値と最小安全率との関係を見たのが図-16 である。

図中には中間層を通るすべり円弧が最小値を示さず、堤内で発生するすべり円が最小値となるケースも示したが、全体として（中間層/堤高）の比率が大きくなるのに従って最小安全率が低下する傾向を示し、この値が 0.6 を上回る付近から必要安全率を下回る割合が高いことが示されている。

また、中間層が薄く（中間層/堤高）の値が 0.1 前後であっても、他の条件によっては必要安全率を下回る場合のあることにも注意が必要である。

(3) 堤体盛土の強度

堤体盛土の粘着力 ( $C'$ ) と内部摩擦角 ( $\Phi'$ ) と最小安全率の関係を、図-17、図-18 に示した。

堤体盛土の粘着力と最小安全率との間には明瞭な正の相関が認められ、特に  $C' > 15$  ( $\text{kN/m}^2$ ) の範囲では必要安全率を下回るケースは見られなかった。

これに対して堤体盛土の内部摩擦角と最小安全率との間には負の相関が認められる。

上記した関係は、堤体盛土の粘着力と内部摩擦角との関係を見た図-19 に示された傾向から理解が可能と思われる。

すなわち、粘着力と内部摩擦角との間には負の相関があり、一方の強度常数のみが増大する傾向にはないことが要因となっている。

堤体の盛り立てに利用された近隣の土取場では、新第三紀に属する軟岩やこれらの風化層、段丘堆積層などを採取していることが多い。

採取された堤体盛土材の土質も FS-FG(粘質土)に分類されるものが大半を占めていることから、強度常数間に類似した傾向が現れる要因の一つと考えられる。

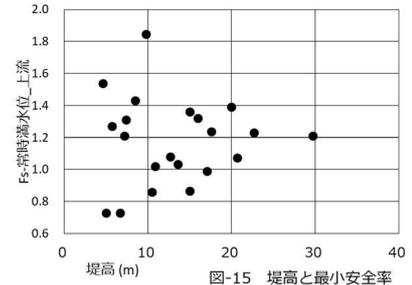


図-15 堤高と最小安全率

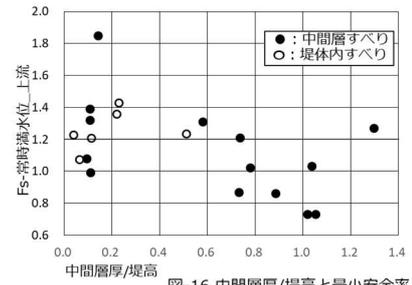


図-16 中間層厚/堤高と最小安全率

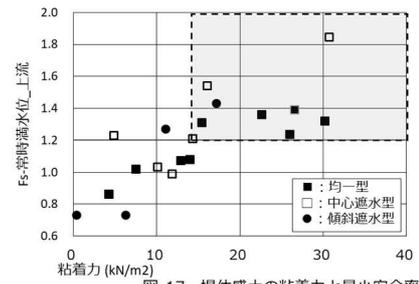


図-17 堤体盛土の粘着力と最小安全率

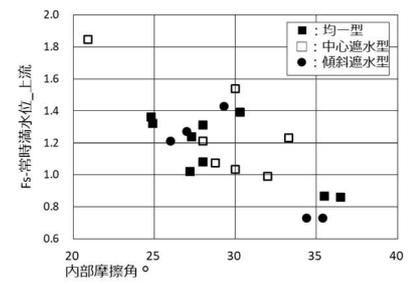


図-18 堤体盛土の内部摩擦角と最小安全率

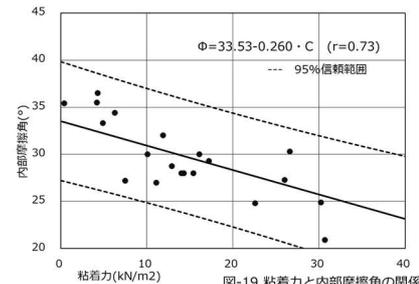


図-19 粘着力と内部摩擦角の関係

### 3-4 液状化

対象としたため池の多くは砂礫、砂、粘土などの堆積層や、基盤岩の強風化部を基盤としている。

この中には比較的緩い状態で堆積した「砂質土」も含まれていることから、地震時の液状化に対する検討が行われている。

液状化判定を行う必要がある土質を下表に示す。

表-4 液状化判定を行う必要がある土質 「ため池整備」

地下水位面と現地盤の距離	10m 以内
現地盤面からの距離	20m 以内
粒度特性	$D_{50} \leq 10\text{mm}$ かつ $D_{10} \leq 1\text{mm}$
細粒分特性	$FC \leq 35\%$ 、又は $FC > 35\%$ かつ $I_p \leq 15$

上記の指標で液状化の可能性があるると判定された土質については、液状化せん断強度比  $R$  と、地震時に加わる繰返しせん断応力比  $L$  との比から液状化に対する抵抗率 ( $F_L$ ) を求め、これが 1 以下の場合に液状化の可能性があるると判断している。

$$F_L = R/L = R_{\max}/L_{\max} \quad R, R_{\max} : \text{液状化強度比 (N 値, 粒径などから求める)}$$

$$L, L_{\max} : \text{繰返しせん断抵抗比 (地表最大加速度などから推定)}$$

ため池耐震性調査を行った 21 か所のため池について評価した結果を図-20 に示す。

全体の 30%に相当する 7 か所は液状化に該当する土層が存在せず、他の 14 か所の内、 $F_L$  値が 1.0 以内となり液状化の可能性があるると判断されるものは、全体の 20%に相当する 4 か所であった。

$F_L$  値と中間層の厚さとの間には緩やかではあるが負の相関(図-21)が認められ、中間層が厚く成層するため池では液状化に対する検討がより重要であることが示唆されている。

液状化の可能性が想定されるため池については今後より詳細な検討が進められるが、現状で得られている土質データには地層構成を含め不足する情報もあることから、適切な補足調査を行う必要があるものとする。

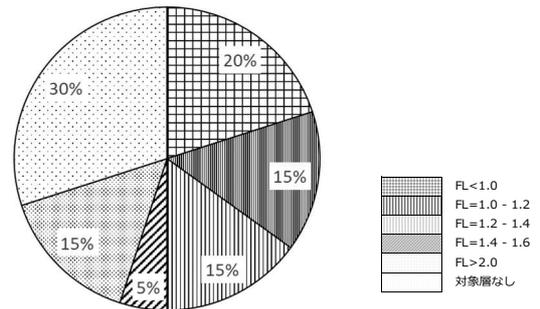


図-20 中間層の液状化

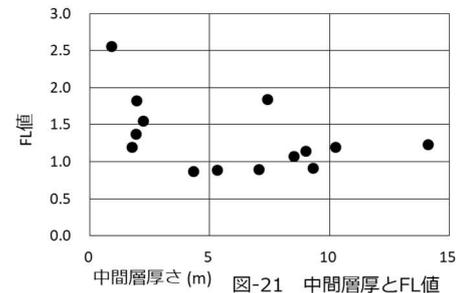


図-21 中間層厚と  $F_L$  値

### 4. まとめ

ため池耐震性調査の結果の一部を整理し、堤体や地盤の現況、安定解析の結果などについて、全般的にみられる傾向と特徴的な事象について紹介した。

本報文中で整理した事項が、今後進められる耐震性調査の中で、限られた調査資料の評価や解析時の条件設定などの際の参考となれば幸いです。

本報告をまとめるのにあたっては、各種資料を提供頂いた各振興局や関連機関にご協力を頂きました。ここに記して、謝意を表すものです。