

## 8. 貯水土木構造物における地盤災害と耐震設計

本研究部会では、今回の地震で被災した貯水土木構造物の中で、特に農業用ため池に焦点を絞って、その被害の特徴と被災メカニズムについてまとめた。その要点と成果についてはすでに報告している<sup>1)</sup>。

本報告は、前報告<sup>1)</sup>では十分に示せなかった被災ため池の堤軸方向と主震動方向の関係と、菅田谷池を対象とした液状化による過剰間隙水圧を考慮した安定検討について、その結果を示すものである。

### 8.1 被災ため池の要因分析

今回の地震によるため池の被害は、想定震源断層の近くにあったため池は言うに及ばず、震源から遠く離れていて建築物等の被害がなかった小野市などにまで及んでいる。ため池の被害は様々な要因に起因しており、これまで、震源断層からの距離、地形・地質などの要因について検討を行い、本土側および淡路島北部において、地質境界にあるため池が多く被災していることを明らかとしてきた<sup>1)2)3)</sup>。今回、被災ため池の堤軸方向と主震動方向の関係について、本土側の神戸市、明石市、淡路島の北淡町、津名町を対象として分析を行った。

#### (1) 被災ため池の堤軸方向

図 8.1.1 は本土側の神戸市および明石市において被災したため池の堤軸方向（右に池を見た場合）を整理したものである。被災ため池の堤軸方向は、神戸市においては2つのピーク（N・NE方向とW・NW方向）が、明石市においては1つのピーク（W・NW方向）が認められる。図 8.1.2 は淡路島北部の津名町と北淡町において被災したため池の堤軸方向を示したもので、NNE・NE方向（SSW・SWは同方向）にピークが認められる。

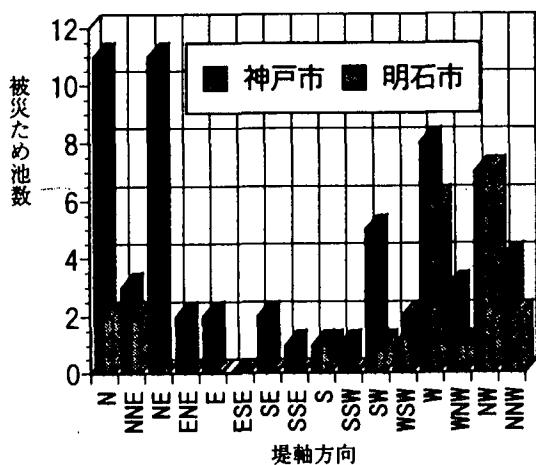


図 8.1.1 本土側被災ため池の堤軸方向

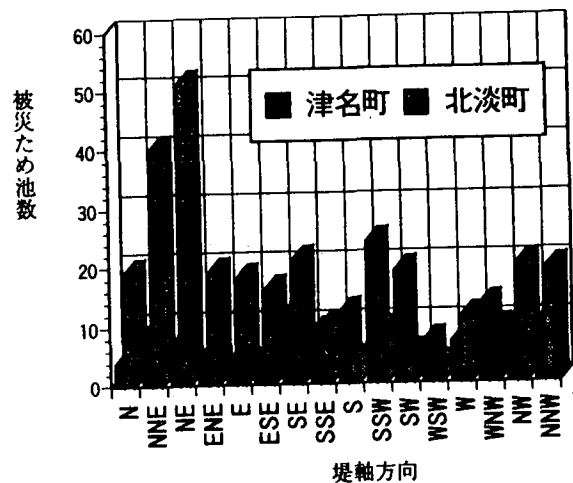


図 8.1.2 淡路島北部被災ため池の堤軸方向

#### (2) 想定断層および主震動方向との関係

図 8.1.3 は淡路島における断層と想定震源断層、神戸市北区および加古川大堰における地震動の主震動方向、本土側および淡路島北部の被災ため池の堤軸方向をGIS上で表示したものである。これによると、想定震源断層に極めて近い北淡町および津名町における被災ため池の堤軸方向は想定震源断層の方向とほぼ一致している。つまり、想定地震断層に直交する方向の地震動の影響を強く受けている。一方、地震動の主震動方向は想定地震断層近くではこれに直交する方向にあり、地震動の主震動方向と堤軸の方向とは関連を持っていることが分かる。

## 8.2 菅田谷池の被災メカニズムの検討

前報告<sup>4)</sup>では、液状化により崩壊したと考えられる井出の尻池と地震動により崩壊したと考えられる菅田谷池を対象に解析・検討を行い、井出の尻池については、有効応力を考慮した地震応答解析により、液状化の過程と堤体が下流側へすべり破壊する状況を説明できることを、前法面（上流側）のみがすべり崩壊した菅田谷池については、震度法と全応力による地震応答ではその崩壊を説明できず、噴砂等の状況が見られなくても過剰間隙水圧の上昇を考慮する必要があることを指摘した。これらの結果を受けて、今回、菅田谷池について、震度法により過剰間隙水圧の上昇を考慮した検討を行った。

### 8.2.1 被災概要

菅田谷池は兵庫県小野市の南東部、標高 90m の丘陵地に築造された堤長  $L=98\text{m}$ 、堤高  $H=12.0\text{m}$  の均一型アースダムである。被災状況は図 8.2.1 に示すとおりで、地震時に貯水位は半分程度あり、堤長のほぼ全長にわたって前法面がすべり崩壊し、頂部には約 4m の段差が生じた。当地域の最大加速度は断層距離と水平加速度の関係<sup>4)</sup>から、震源断層距離を 26.4km として、200Gal 程度（硬質地盤で 160Gal、軟質地盤で 230Gal）と推定され、池敷内に噴砂が見られないこと、比較的加速度が小さいことなどから液状化には至らなかったと考えられる。

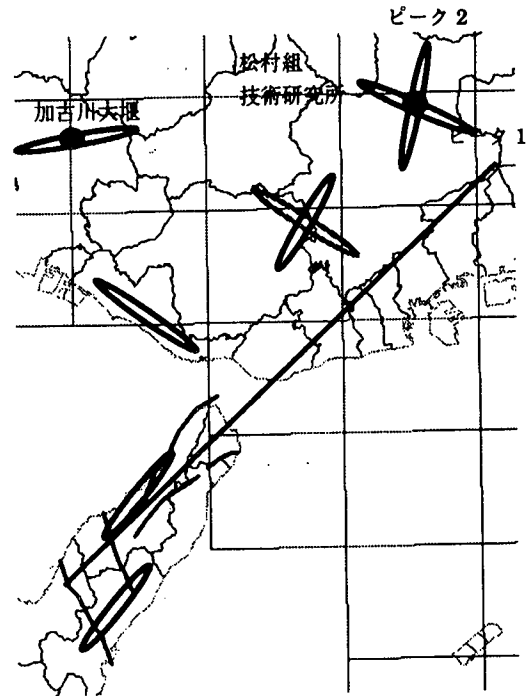


図 8.1.3 堤軸方向と主震動方向

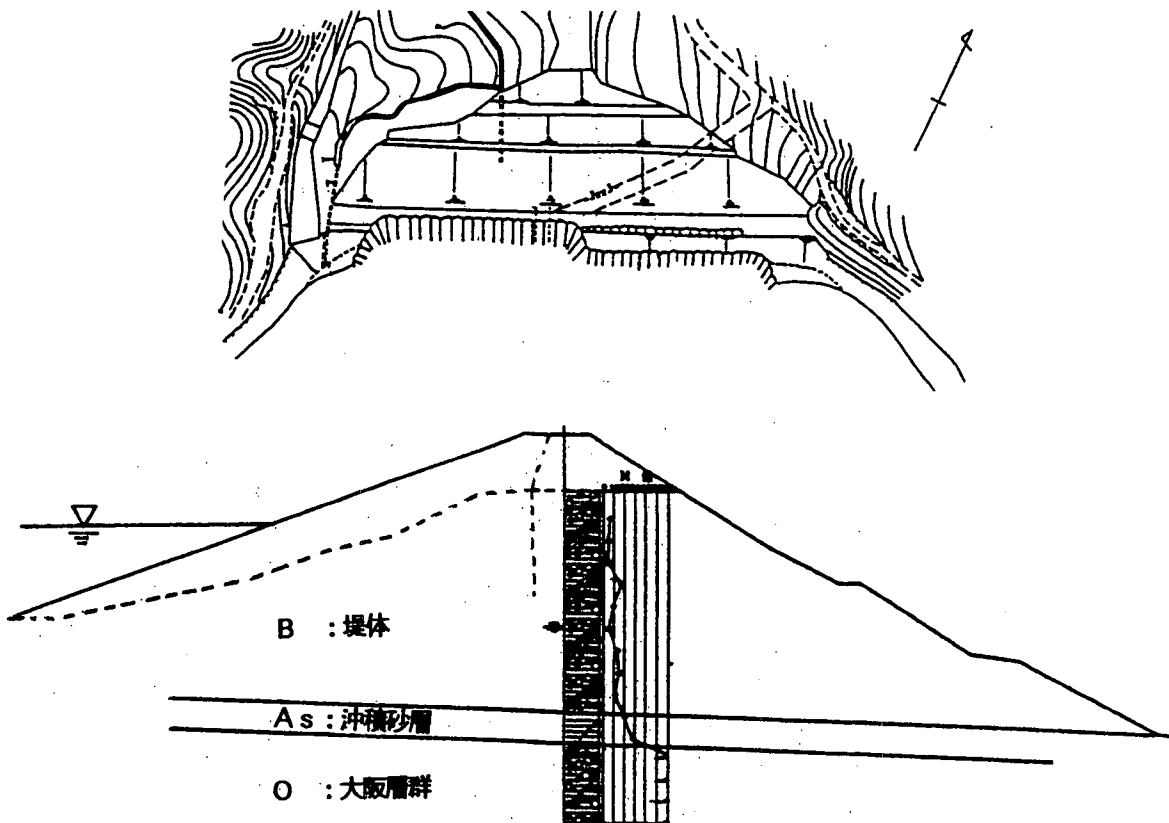


図 8.2.1 被災状況平面・断面図<sup>5)</sup>

## 8.2.2 震度法による検討

### (1) 過剰間隙水圧の推定方法

地震動によって発生する過剰間隙水圧は、「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案）<sup>6)</sup>」に示される下式により推定した。

$$\begin{aligned} Lu &= FL^{-7} \quad (FL \geq 1.0) \\ Lu &= 1 \quad (FL < 1) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (8.2.1)$$

ここに  $Lu = \Delta u / \sigma v'$

図 8.2.2 に過剰間隙水圧比  $Lu$  と液状化に対する抵抗率  $FL$  の関係を示す。液状化の抵抗率  $FL$  は「道路橋示方書 V 耐震設計編<sup>7)</sup>」に示される次式より推定した。

$$FL = R / L \quad \dots \dots \dots (8.2.2)$$

$$R = Cw \cdot RL \quad (Cw = 1.0) \quad \dots \dots \dots (8.2.3)$$

$$L = rd \cdot Kh \cdot \sigma v / \sigma v' \quad \dots \dots \dots (8.2.4)$$

ここに、 $R$  : 動的せん断強度比       $L$  : 地震時せん断強度比  
 $RL$  : 繰り返し三軸強度比       $Cw$  : 地震動特性による補正係数 (=1.0)  
 $rd$  : 地震時せん断応力の深さ方向の低減係数       $Kh$  : 水平震度  
 $\sigma v$  : 全上載圧       $\sigma v'$  : 有効上載圧

上式は水平地盤に適用されるものであるが、ここでは  $\sigma v$  を円弧すべり法におけるスライスの高さが与える土被り圧とし、 $\sigma v'$  は静水圧を考慮した有効土被り圧として、スライス毎に  $FL$  値を求め、式(8.2.1) から過剰間隙水圧  $\Delta u$  を求めた。また、 $Kh$  は、同示方書では地震の規模と地域特性に応じて与えられるが、ここでは、0.05~0.25 の範囲で 0.05 きざみで与えた。

### (2) 安全率の算定式

安全率  $Fs$  は「改訂ダム設計基準：日本大ダム会議<sup>8)</sup>」の算定式に過剰間隙水圧による項を加えた次式により求める。

$$Fs = \frac{\Sigma (c' \cdot l + (N - U - Ne - Ue) \tan \phi')}{\Sigma (T + Te)} \quad \dots \dots \dots (8.2.5)$$

ここに、 $c'$ 、 $\phi'$  : スライスのすべり面の材料の強度定数  
 $l$  : スライスのすべり面の長さ  
 $N$ 、 $T$  : スライスのすべり面上に働く荷重の垂直分力および接線分力  
 $Ne$ 、 $Te$  : スライスのすべり面上に働く地震力の垂直分力および接線分力  
 $U$  : スライスのすべり面上に働く間隙水圧による力  
 $Ue$  : スライスのすべり面上に働く過剰間隙水圧による力 ( $Ue = \Delta u \cdot l$ )

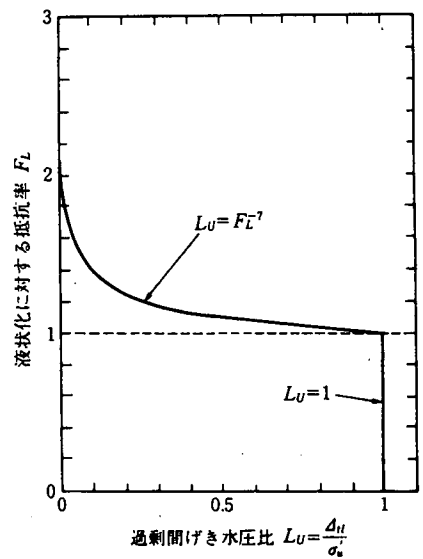


図 8.2.2  $Lu$  と  $FL$  の関係<sup>6)</sup>

### (3) 物性値の設定

被災後に堤体および基礎のボーリング、PS検層、現場密度・透水試験、室内土質試験等の調査がなされている。基礎地盤は大阪層群上部垂層群の粘土混じり砂礫層と薄い沖積砂層で、堤体はN値が4～17の砂質土である。表8.2.1に強度定数および「道路橋示方書・耐震設計編」に基づきN値から推定した液状化強度を示した。堤体材料の物理特性、動的物性値については前報告を参照されたい。

表 8.2.1 入力物性値

項目	堤体*				池敷層	沖積砂層	大阪層群
	① 1m～3m	② 3m～5m	③ 6m～9m	④ 9m～			
$\rho$ , t/m <sup>3</sup>	1.73 (不飽和)		1.94 (飽和)		1.94	2.06	2.06
$c'$ kN/m	29.4	9.81			4.9	0	0
$\phi'$ 度	26.5				0.0	36	36
N値	5	5	11	13	0	20	50
補正N値	14	10	17	17	—	—	—
RL **	0.21	0.21	0.28	0.28	—	0.28	0.5

\* ○数字は土被りに応じたゾーン番号, 数字は表面からの深度

\*\* RL : 繰返し三軸強度比

### (4) 前報告の結果

震度法と地震応答解析による検討から次のことが分かっている。

〔震度法による検討：前報告図-6.3.11<sup>1)</sup> 参照〕

- ・Fs と kh の関係は基準によって異なる。崩壊が生じた前法面の限界水平震度 (Fs=1.0) ダム基準<sup>8)</sup>で 0.29, 土地改良基準<sup>9)</sup>で 0.24 である。
- ・ダム基準では kh が 0.3 までの範囲で前法面の安全率が後法面よりも大きく, 土地改良基準では kh が 0.16 以下で前法面の安全率が大きい。しかし, kh が 0.16 以上でもその差はわずかである。
- ・当該地点の地表面の最大加速度を 200Gal 程度と推定され, 野田・上部<sup>10)</sup> の水平最大加速度と実効震度の関係についての知見〔地表面加速度  $\alpha$  が 200Gal 以下では加速度の震度換算値, 200Gal 以上では  $1/3 \cdot (\alpha/\text{重力加速度})^{1/3}$  で表される〕によると, 堤体に作用した実効震度は 0.2 程度と考えられた。
- ・震度法による限界水平震度は推定震度 0.2 よりも大きく, この程度の震度では前の裏面の崩壊を説明できない。

〔応答解析による検討：前報告図-6.3.14<sup>1)</sup> 参照〕

- ・応答解析 (FLUSH による全応力解析) による応力を用いた前法面の Fs は震度法による結果と概ね一致し, 後法面の Fs は震度法によるものより大きくなった。
- ・この解析からは, 実際に作用したであろう最大水平震度は 0.18 程度であったと推定される。これは, 断層距離と水平加速度の関係から推定した加速度 (200Gal 程度) の震度換算値と概ね一致する。
- ・前法面の水平震度が 0.18～0.2 程度である場合, 応答解析による応力を用いた安全率は 1.1 以上あり, 全応力法による応答解析では崩壊現象を表現できない。
- ・別途実施した有効応力解析に基づく過剰間隙水圧を考慮した場合, 前法面は安全率が 1 以下となったが, 後法面は 1 以上で安定を保ち, 間隙水圧の上昇を考慮することで前法面の崩壊を説明できた。

これらのことから, 菅田谷池の崩壊は堤体材料のせん断強度が低いことと, 間隙水圧の上昇が崩壊の原因であったと推定された。

## (5) 検討結果

図 8.2.3, 図 8.2.4 は震度法による安全率と水平震度の関係を示している。臨界円の形状は震度によって変わるので、図に示す関係は、崩壊形状に近い水平震度  $k_h = 0.1$  の臨界円 (図 8.2.5) を用いた結果である。図 8.2.3 は式(8.2.1) の過剰間隙水圧  $\Delta u$  をそのまま用いた場合の、図 8.2.4 は  $\Delta u$  を 50% とした場合の関係である。同図には参考に、前報告に示した応答解析 (FLUSH) による応力を用いたすべり安全率 (図 8.2.5 の臨界円) と水位急低下時の安全率 (各震度ごとの臨界円) も示してある。

○印は応答解析に基づくもので、動的応力と静的応力 (浮力を考慮した自重による応力) を合成し、すべり面上の垂直応力とせん断応力を算定して求めた安全率と等価瞬間水平震度 (すべり土塊に働く水平慣性力に等価な震度) との関係、最も安全率が低くなる時刻とその前後の時刻について示したものである。△印は○印の応力に、別途実施した有効応力に基づく応答解析から求めた過剰間隙水圧を考慮した関係である。+印は水位急低下時の関係で、設計では水位急低下時の水平震度は設計震度の 1/2 として計算するので、図には  $k_h = 0.1$  で計算した安全率を  $k_h = 0.2$  の位置に示してある。

これらの結果から、次のことが分かる。

- ・  $\Delta u$  の上昇を考慮すると、前法面では  $k_h = 0.1$  程度から、後法面では  $k_h = 0.2$  程度から、安全率が低下する。安全率の低下は前法面の方が大きく、水平震度が大きくなると前法面の安全率が後法面よりも低くなる。
- ・ 前法面の限界水平震度  $K_{hc}$  (安全率が 1 となる  $k_h$ ) は、 $\Delta u$  を 100% 考慮した場合に 0.15 程度、 $\Delta u$  を 50% 考慮した場合に 0.2 程度であり、当該地点の推定水平震度は 0.2 程度であることから、 $\Delta u$  を考慮することで前法面のみの崩壊を説明できる。
- ・ このことから、完全液化化に至らない場合でも、計算値の 50% ~ 100% の  $\Delta u$  を考慮して震度法により検討する方法が有効と考えられる。
- ・ ダム基準による水位急低下時の  $K_{hc}$  は 0.11 程度で、 $\Delta u$  を 100% 考慮した場合よりも小さい。このことから、水位急低下時の条件できっちりと設計しておけば、地震時の過剰間隙水圧の上昇に対して、ある程度まで対応できると考えられる。

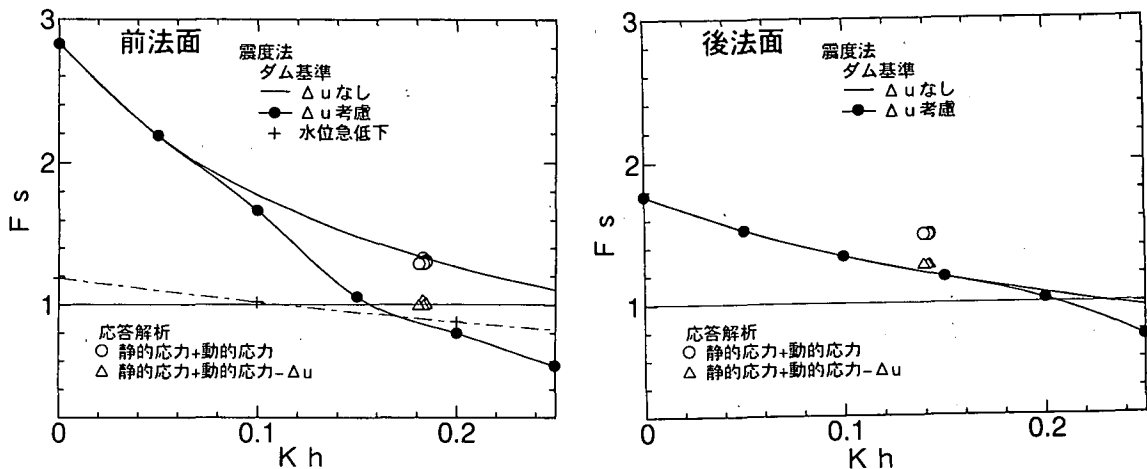


図 8.2.3  $\Delta u$  を 100% 考慮した場合の安全率と水平震度の関係

## 8.3 結論

本検討の結論は以下のとおりである。

- (1) 被災ため池の堤軸方向は想定地震断層の方向と平行するものが多く、想定地震断層に直交する方向の地震動の影響を強く受けている。

- (2) 観測された地震動の主震動方向は想定地震断層近くではこれに直交する方向にあり、地震動の主震動方向と堤軸の方向とは関連を持っている。
- (3) 剰間隙水圧の上昇を考慮した震度法によるすべり安定計算を行うことで、前法面の崩壊を説明できた。このことから、完全液状化に至らない場合でも堤体の安定性検討に、この方法は有効であると考えられる。
- (4) ダム基準では、水位急低下時の安全率は $\Delta u$ を100%考慮した場合よりも小さく、この条件できっちり設計することで、過剰間隙水の上昇に対してある程度まで対応できると考えられる。

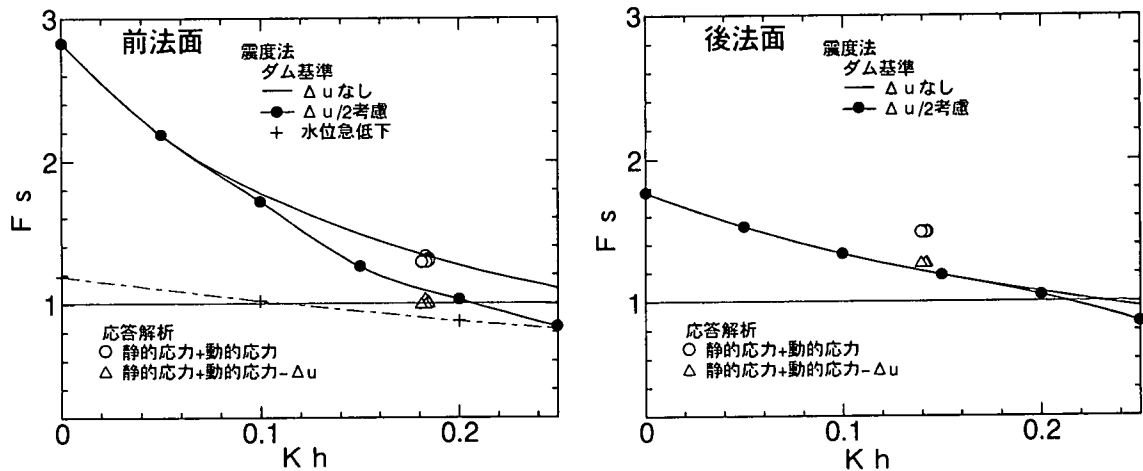


図 8.2.4  $\Delta u$ を50%考慮した場合の安全率と水平震度の関係

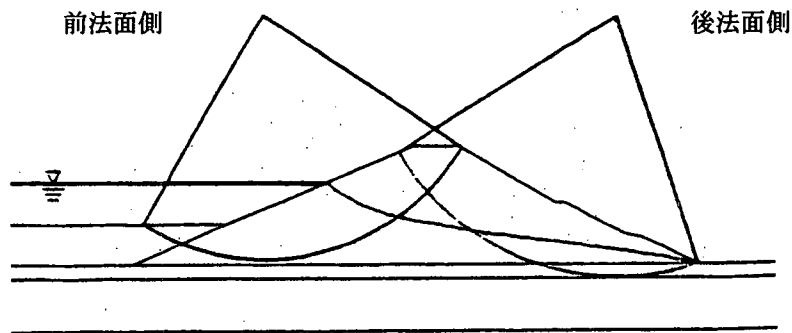


図 8.2.5 臨界円の形状

【参考文献】

- 1) 阪神・淡路大震災調査研究委員会：大震災に学ぶ，第2編，pp.200-220，1998.6
- 2) 奥村他：GISによる兵庫県南部地震の被災ため池の原因究明－堤軸・主震動方向の関係－，平成10年度農業土木学会大会講演要旨集，pp.810-811，1998
- 3) 村田他：GISによる兵庫県南部地震の被災ため池の原因究明－地形・地質との関係－，平成10年度農業土木学会大会講演要旨集，pp.808-809，1998
- 4) 土岐憲三他：兵庫県南部地震の震源特性と地盤震動特性，土木学会誌，pp.32-43，1995.6
- 5) 立石卓彦：被災ため池の現地調査と土質試験結果，土木学会関西支部 阪神・淡路大震災調査研究委員会 地盤・基礎分科会 貯水土構造物研究部会資料，1996.7
- 6) 設省土木研究所：河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル(案)，土木研究所資料第3513号，1997.10
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，pp.91-97，1996.12
- 8) 日本大ダム会議：第2次改訂 ダム設計基準，1978.8
- 9) 農林水産省：土地改良事業計画設計基準 設計 ダム，1981.4
- 10) 野田節男他：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，vol.14, No.4, pp.67-111，1976