

令和3年度 福岡県ため池管理保全支援センター 第2回Web研修会

農業用ため池堤体の安定計算について (耐震性能照査)

令和4年1月19日

NTCコンサルティング(株) 藤井 睦

○ ため池とは？---ダムとの違い

- ◆ 一般には，堤高 $H \geq 15\text{m}$ の堰堤は【ダム】。
よって，それ以下の規模のものは【ため池】。
- ◆ 準拠すべき基準類は，【ダム】では『土地改良事業計画設計基準 設計ダム[フィルダム編]』（以下「設計基準」）。
これに対し，【ため池】では『土地改良事業設計指針[ため池整備]』（以下「整備指針」）。
- ◆ ため池堤体は，土質材料のみで盛立てられていることがほとんど。
よって，形態としてはアースフィルダムと同じ。
- ◆ 一般に築造年次が古く，中には江戸時代，さらに遡ると平安時代(日本最古)に築造されたものもある。
よって，堤体の断面形状(内部構造を含む)，もしくは，築堤に用いられた材料などに関する資料が現存しない場合が多い。

○ ため池とは？---ダムとの違い

- ◆ 「整備指針」に記載されている，ため池の堤体安定性検討の方法は，「設計基準」におけるダム堤体の安定計算手法と同じ。

よって，堤体安定性検討に必要なとなる物性値は，
基本的にはアースフィルダムと同じ。

- ◆ 下流域の住居，農地，もしくは社会資本整備状況にもよるが，ため池が決壊した場合には多大なる損害が生じ，人命を損ねる場合がある。

よって，ため池堤体で最も避けるべきは，【決壊】である。これはアースフィルダムと同じ(ただし貯水量によって被害・損害規模は異なる)。

ダムとため池では，堤体の規模，設計基準(≡整備指針)，事業主体(≡管理主体)，もしくは管理精度が異なるが，『貯水する盛土構造物』という点では全く同種のものである。

仮に決壊等の事態が生じれば，その被害は同じであると考えなければならず，ため池の安定性検討について，ダムに対して『レベルの低いもの』として考えてはならない。

東北地方太平洋沖地震による ため池堤体破損事例

報告事例①

堤体上流斜面の全景写真



報告事例①

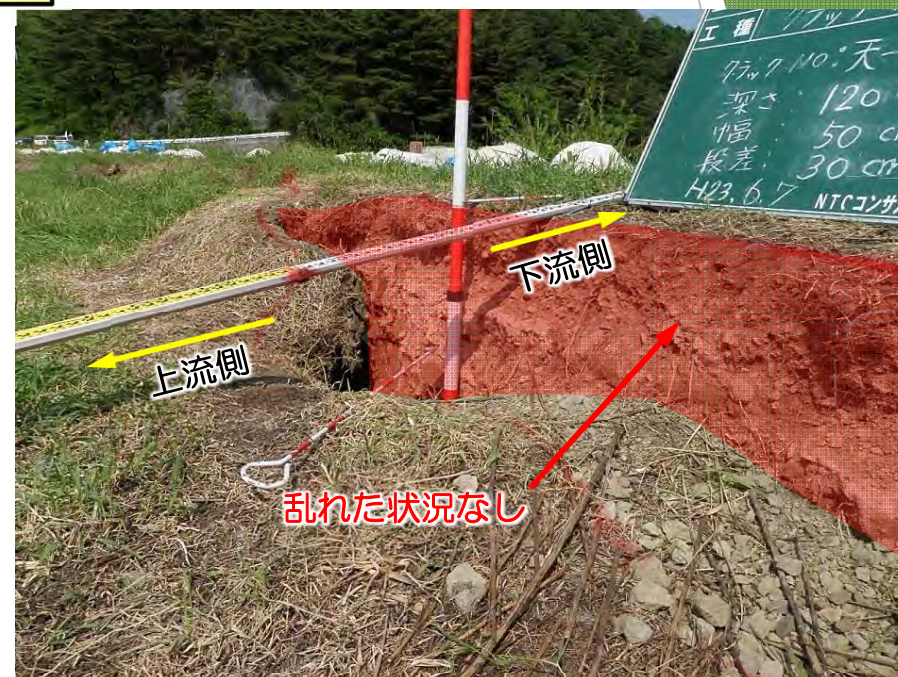
堤体天端中央部付近に発生した開口亀裂



- ◆ 堤体天端部中央付近には，堤頂のほぼ全線にわたって開口亀裂が発生しており，開口幅は最大で20cmに及ぶ。

報告事例①

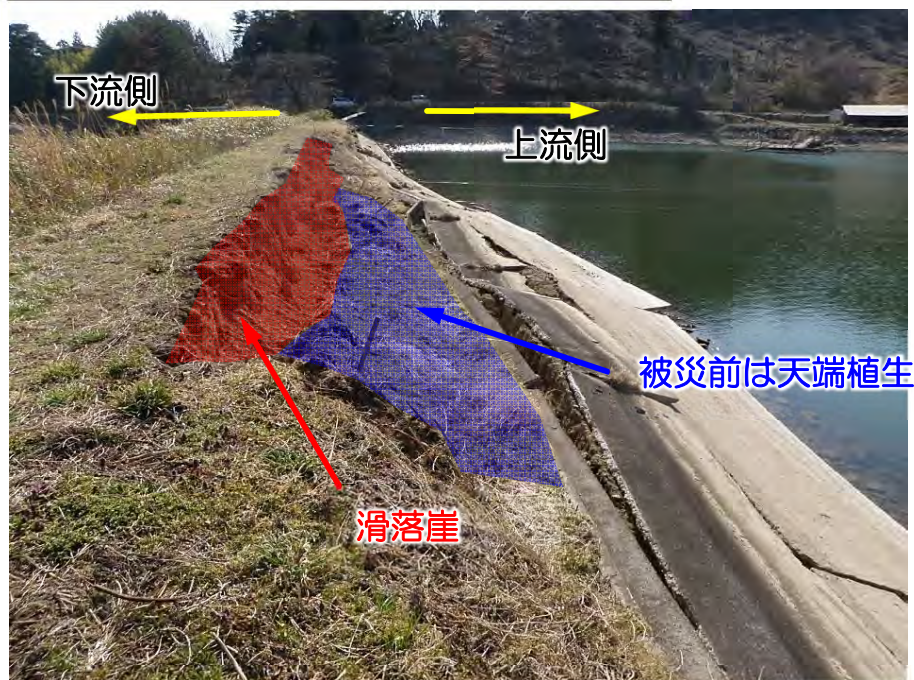
堤体天端中央部付近に発生した開口亀裂



- ◆ 開口亀裂の一部には、最大20～30cmの段差(上流落ち)が生じている。
- ◆ 堤体天端部中央付近の開口亀裂から覗く亀裂面は、乱れ、もしくはセン断によって脆弱化した状況は認められず、引張応力によるテンションクラックの様相を呈する。

報告事例②

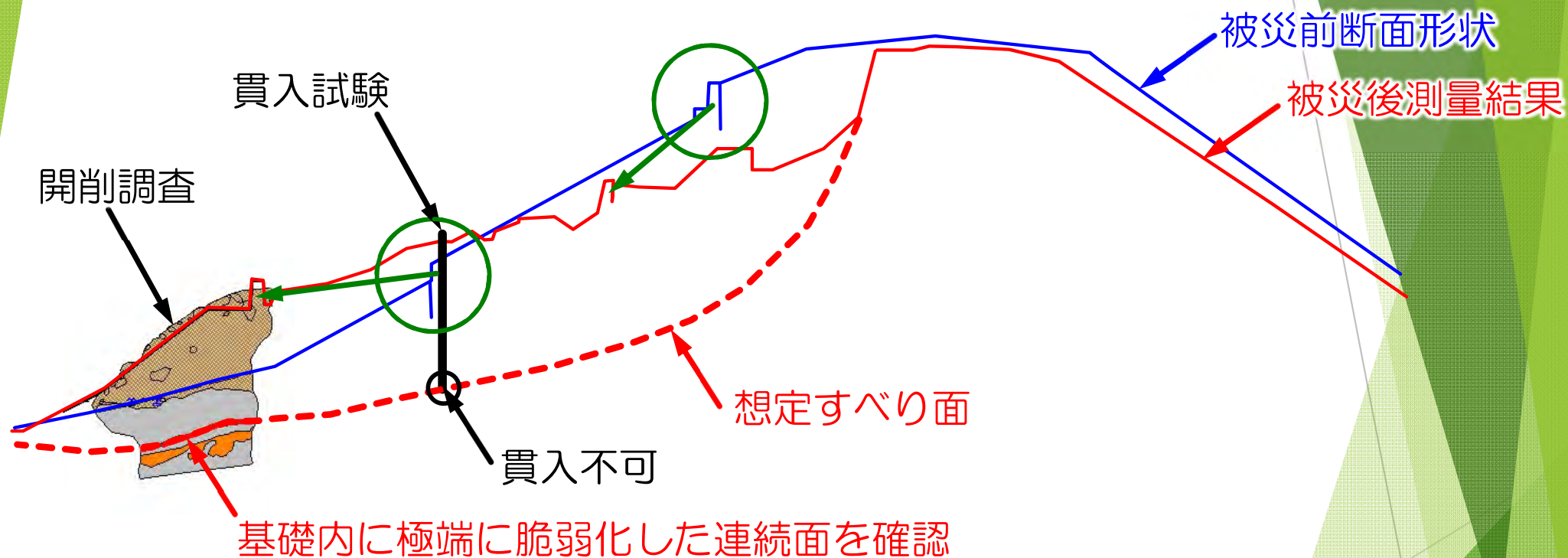
堤体上流斜面のすべり崩壊



- ◆ スべり土塊の頭部位置(滑落崖頭部)は、天端上流法肩付近であり、約1m程度堤体内部の土質部分がすべり面として露頭している。なお、天端幅は3mである。
- ◆ 上流法肩からコンクリートスラブ上端の縁石コンクリートの区間では、約1.5m幅で緩傾斜がついており、天端面と同様に植生が施されている。上記写真中で滑落崖の下位に見られるすべり土塊上部の植生部は、この緩傾斜部分に当たる。

報告事例②

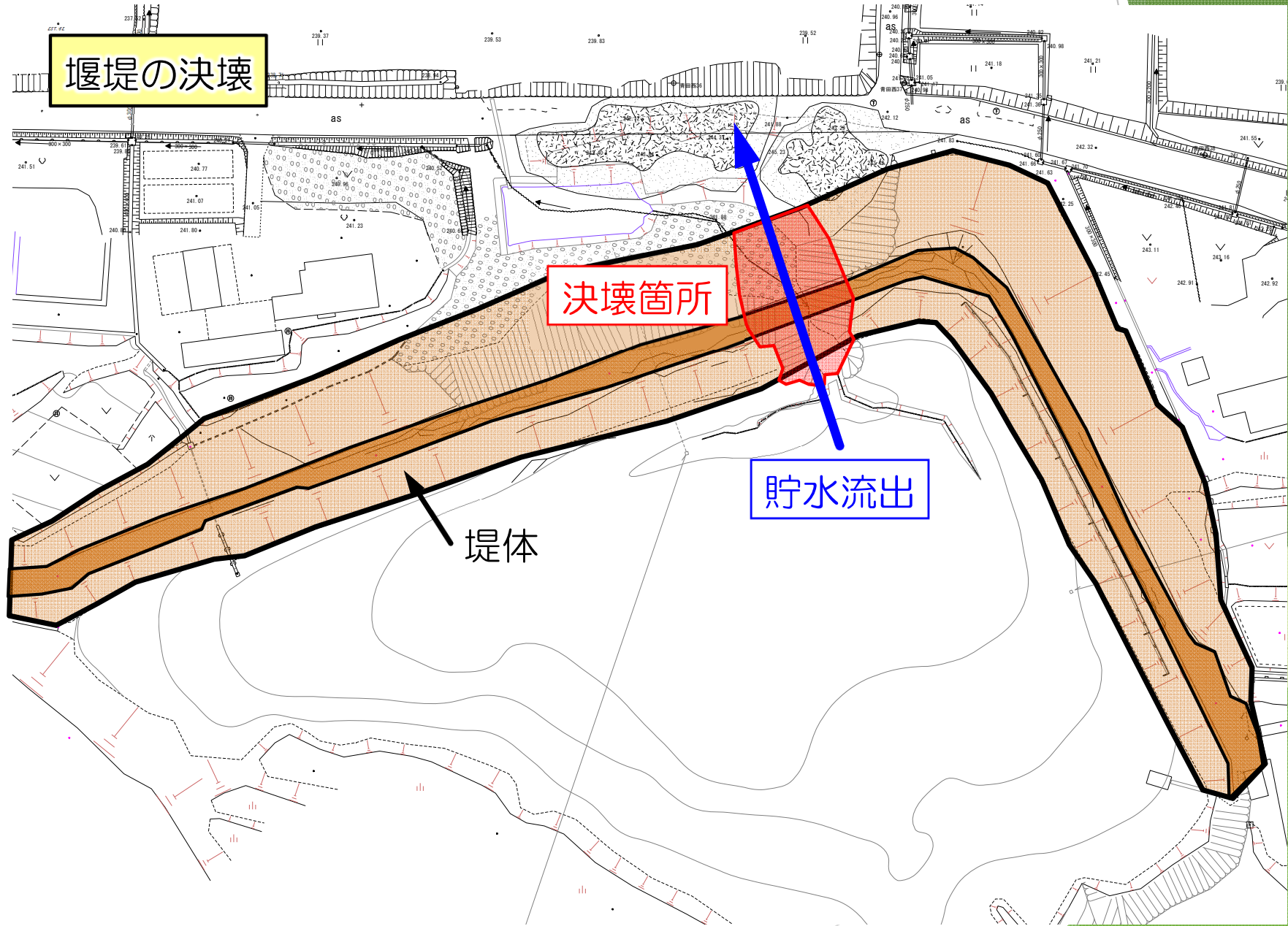
堤体上流斜面すべり崩壊部の想定すべり面



- ◆ 開削調査(堤体上流斜面法先付近)で確認された軟弱層の深度位置は、測量結果から推定した想定すべり面と位置的に一致している。これらのことから、堤体～基礎を通過するすべり崩壊が生じていると判断される。

報告事例③

堰堤の決壊



報告事例③

決壊箇所を下流側から望む

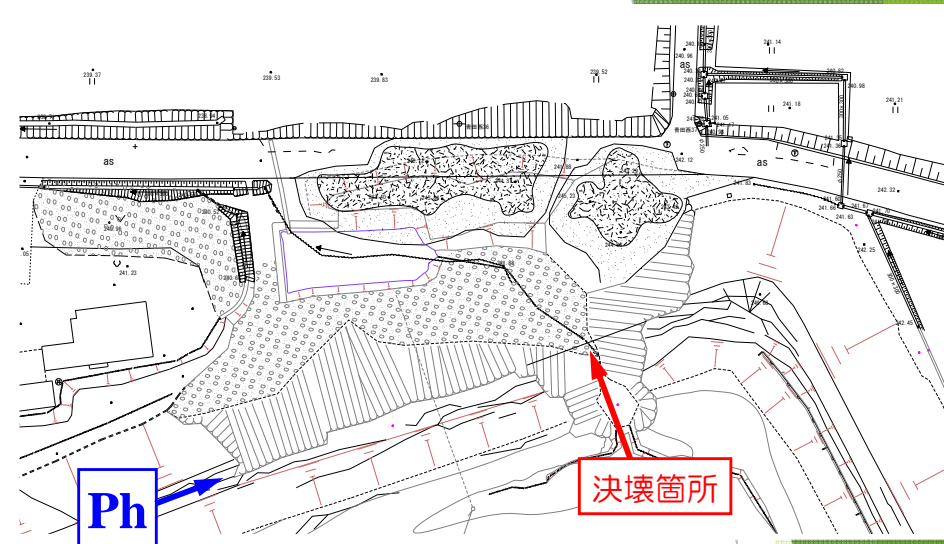


決壊箇所を上流側から望む



報告事例③

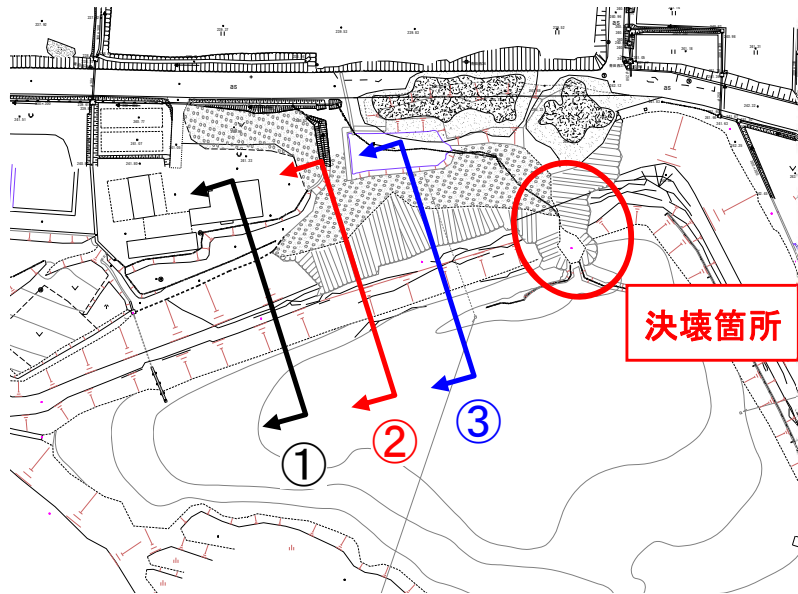
決壊部左岸側堤体の状況



- ◆ 決壊箇所に対して左岸側となる堤体部天端の状況としては、最も狭いところで本来天端幅に対して半分程度が残存するのみである。
- ◆ 残存している天端部分についても、数条の開口亀裂が見られるとともに、崩壊部分も一部オーバーハング形状を呈しているなど、二次崩壊の危険性が高いように見受けられる。

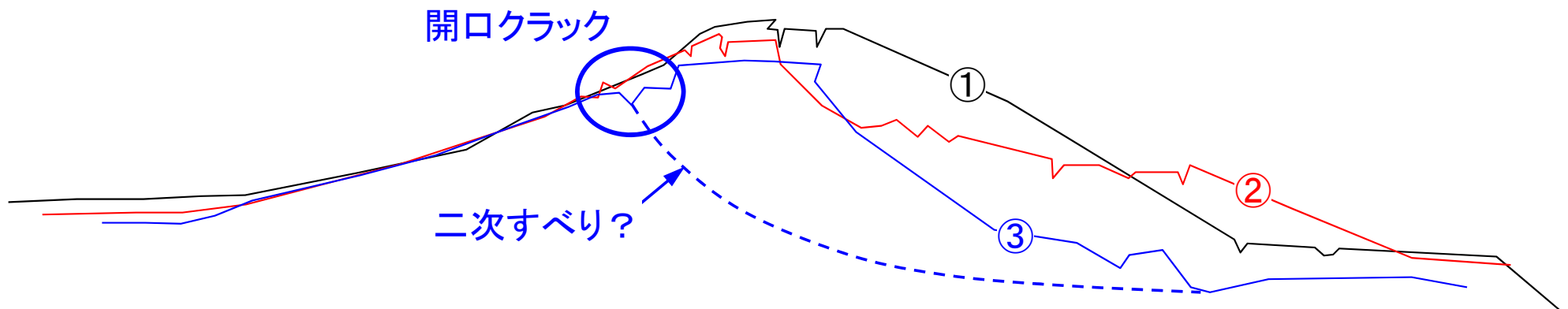
報告事例③

決壊部左岸側堤体の測量結果と
二次すべりの推定



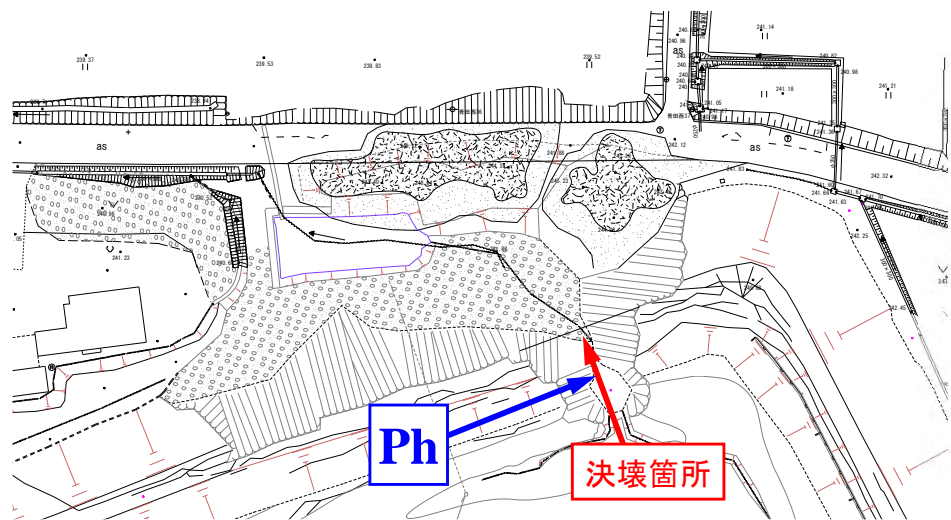
決壊箇所の左岸側堤体上下流方向の測量結果を示すものである。

- ①では、堤体天端には開口クラックが生じているものの、ほぼ被災前の状態を残す。
- ②では、天端堰堤軸付近を始点として下流斜面が大きくすべり崩壊し、崩壊土砂により堤趾付近が埋められている。
- ③では天端が大きく沈下しており、すべり崩壊土砂は決壊部分により下流側に押し流されて残存していない。下流斜面の形状は、すべり面が露出した結果である。上流斜面に上盤落ち段差を有する開口クラックが生じていることから、図中の二次すべりが予想される。



報告事例③

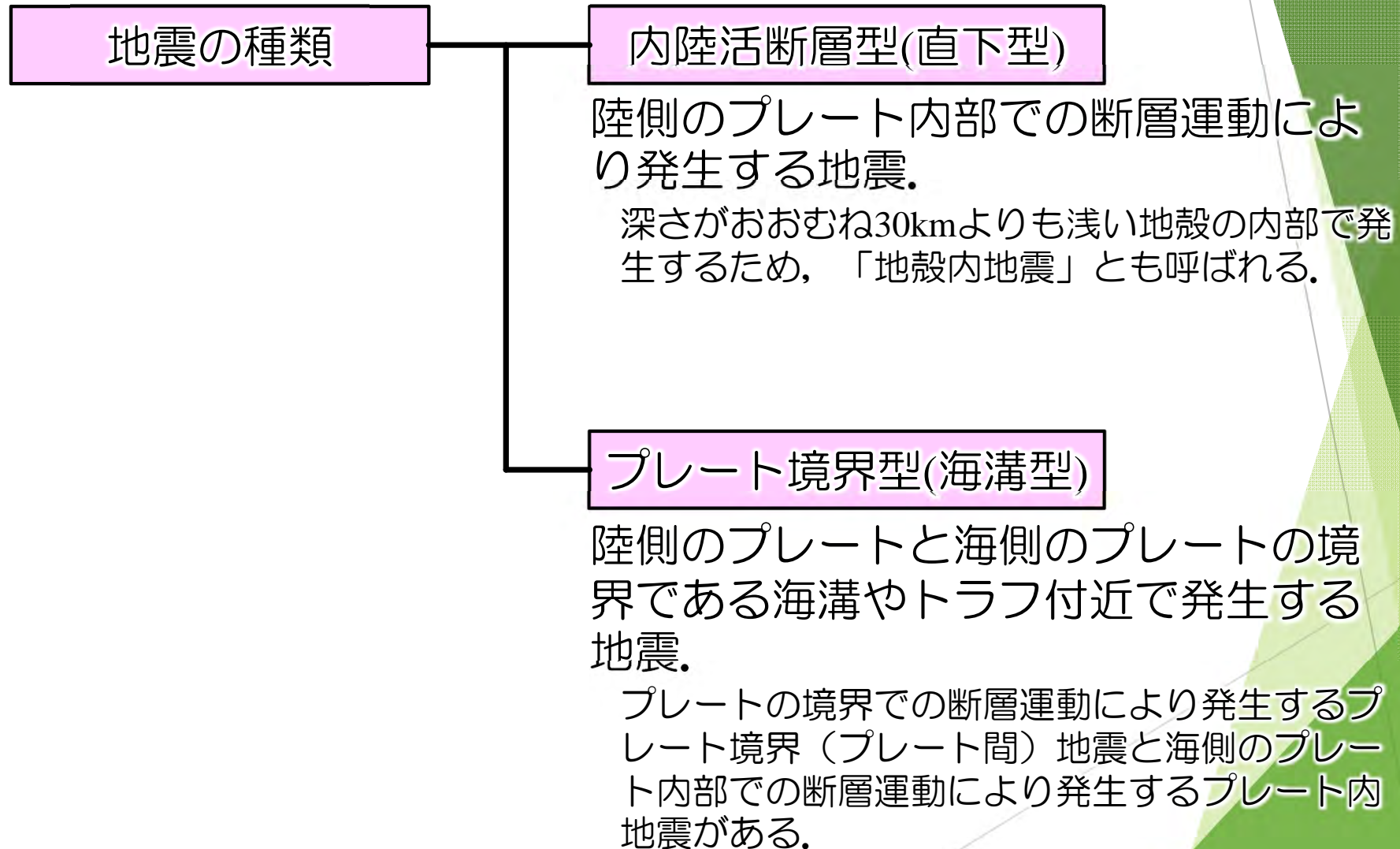
決壊部と決壊部右岸側堤体の状況



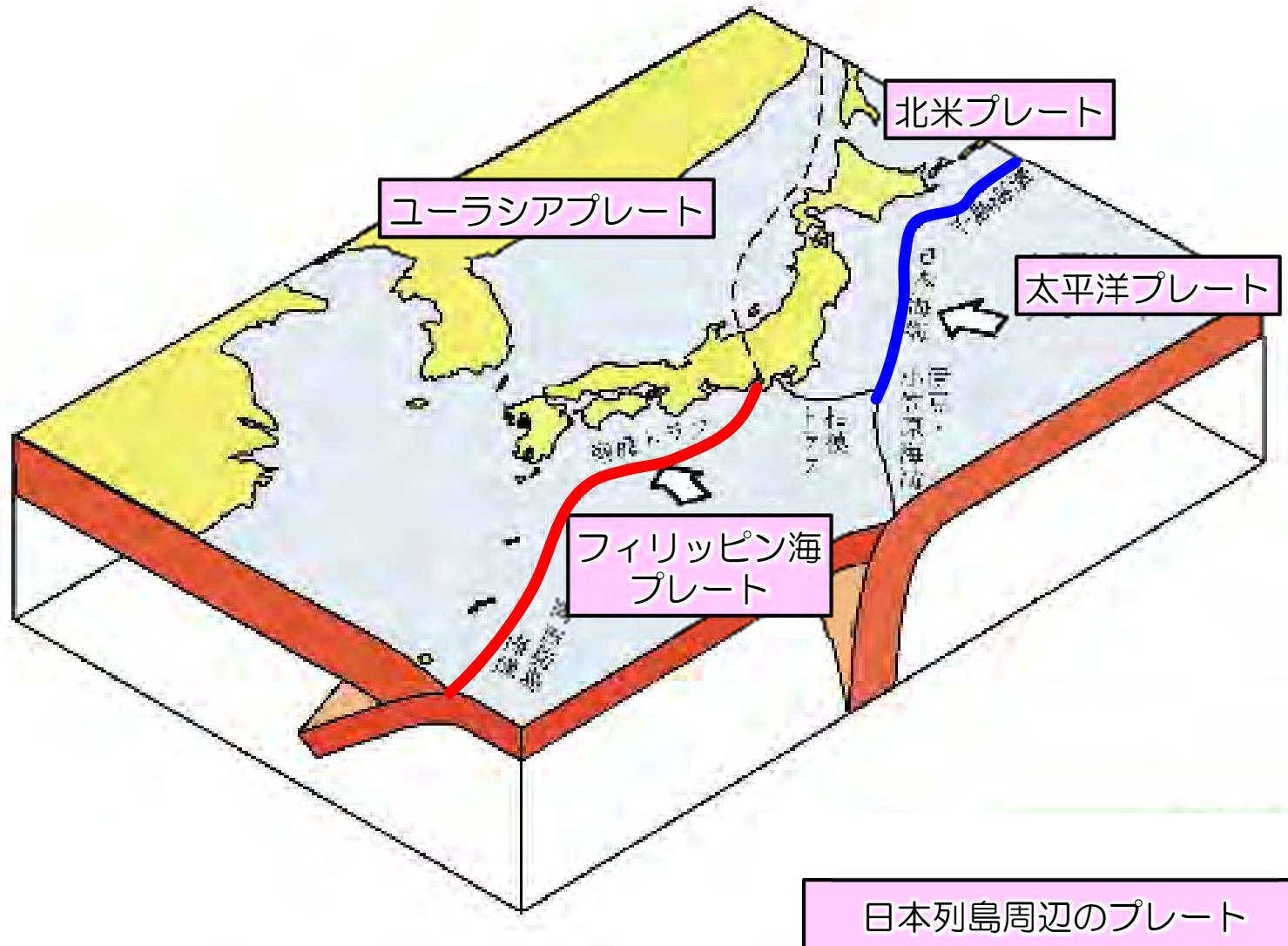
- ◆ 決壊箇所に対して右岸側となる堤体の崩壊状況を撮影したものである。
- ◆ 写真中に黄色点線で示すように、すり鉢状の明確な円弧すべり面が残存している。
- ◆ すべり土塊についても、写真中に赤色点線で示すように下流斜面表面であったと考えられる植生が、しっかりと残った形で確認される。



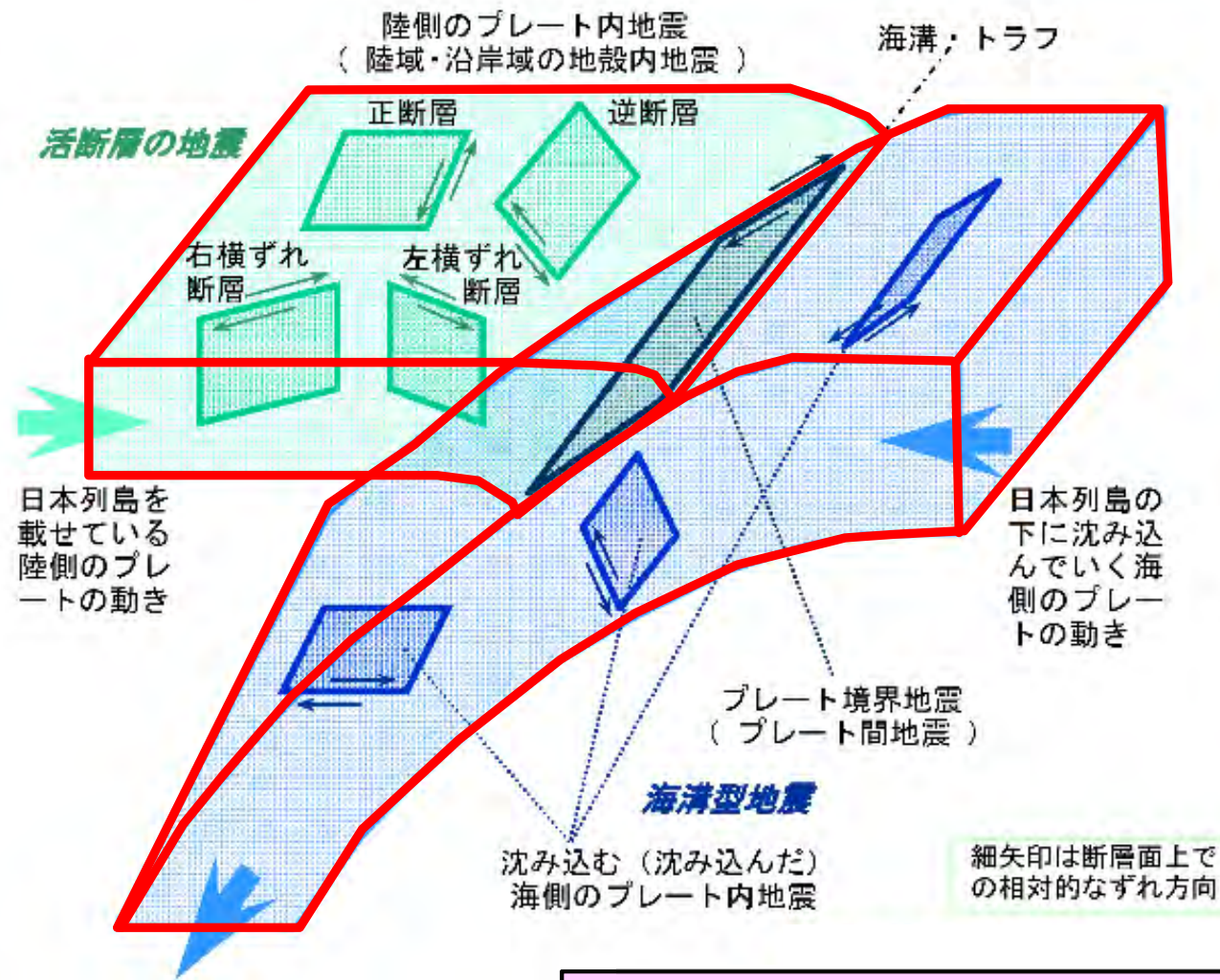
○ 地震の種類---発生機構・震源位置の違い



○ 地震の種類---発生機構・震源位置の違い



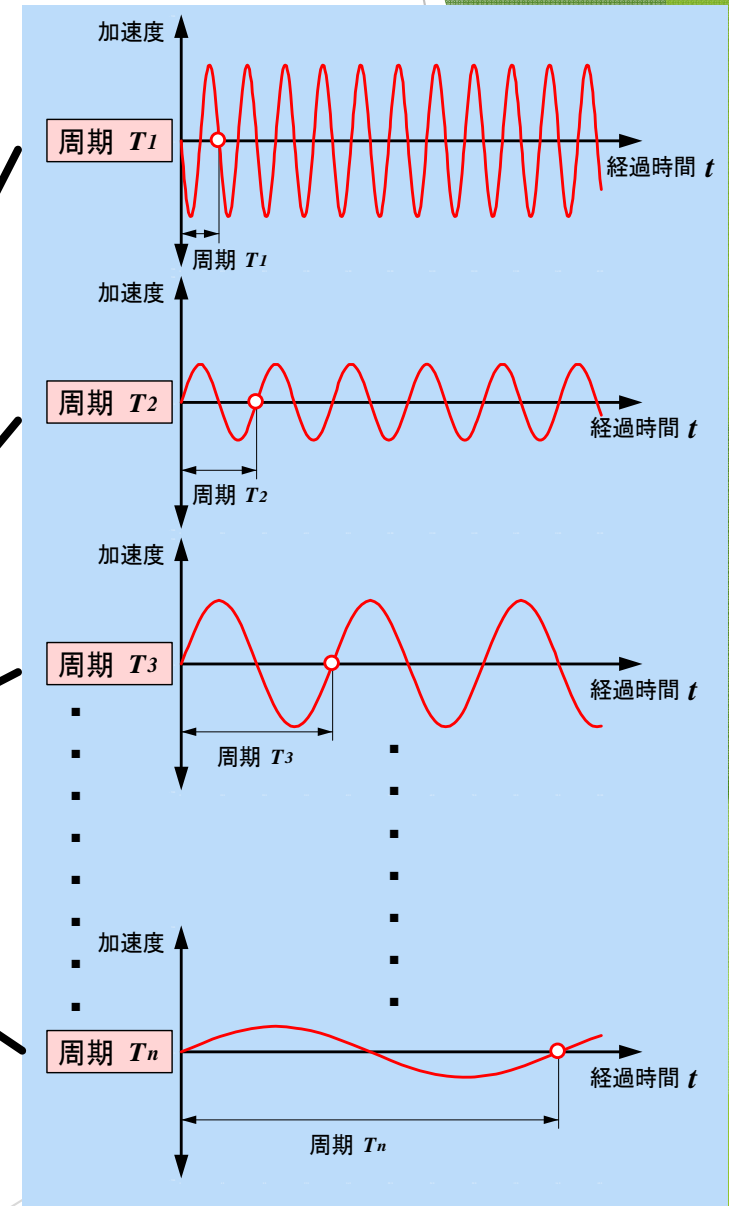
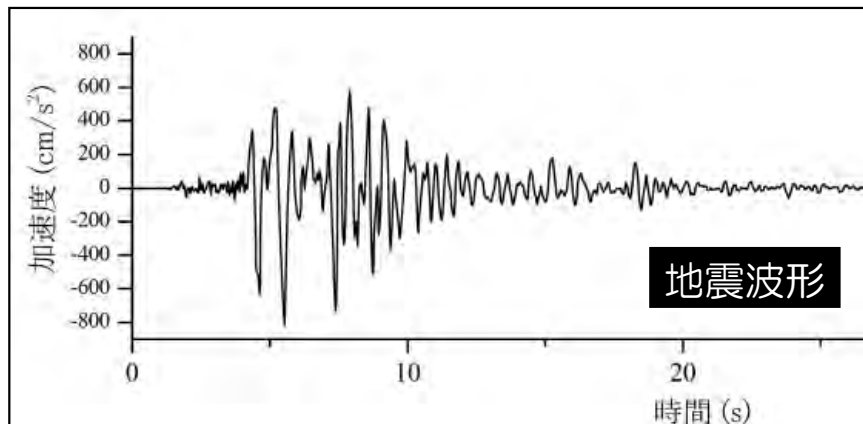
○ 地震の種類---発生機構・震源位置の違い



日本列島周辺で発生する地震のタイプ

○ 地震波の特性

- ◆ 地震による振動は、音、もしくは光と同じ、「波」で伝達される。
- ◆ 地震波にはさまざまな周期の波が含まれていて、地震波はさまざまな周期の振動の集まり(複合波)ととらえられる。



○ 応答の特性

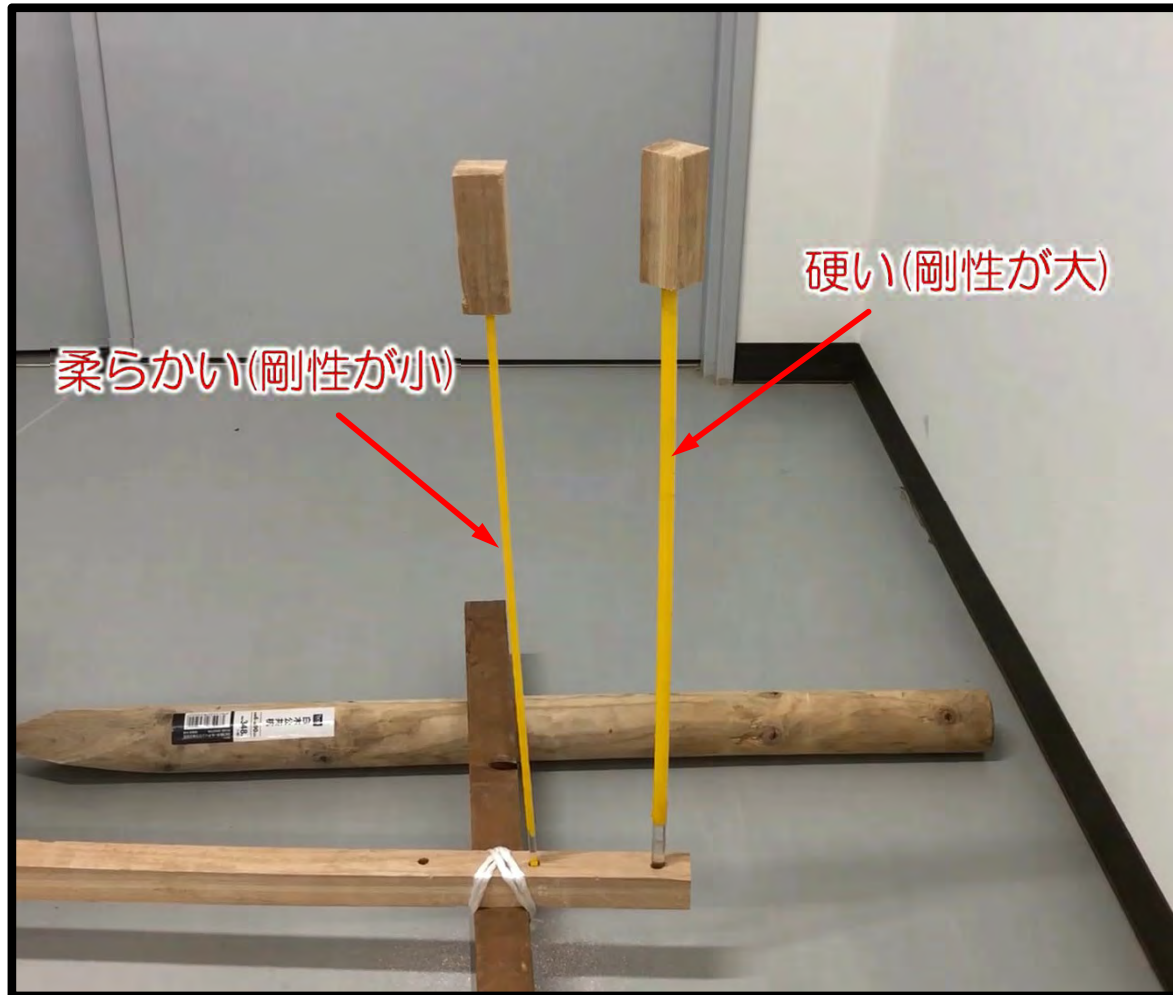
- ◆ 地震の大きさや揺れの大きさを表すものとして、《震度〇》(震度階)があるが、概ね加速度の大小と相関する。
- ◆ ただし、仮に震度階が大きい地震であっても、ため池堤体に対して必ずしも有害な地震となるわけでは無い。
- ◆ ため池堤体を含めたあらゆる構造物には、【固有周期】があって、それに近い周期の波が卓越して大きい場合には、震度階が小さい地震であっても、ため池堤体が被災する場合もあり得る。



- ◆ ため池堤体が地震によって揺れるのは、まずは堤体の基礎地盤が揺れて、それに応えるようにして揺れるため、《応答地震動》と呼ばれる。なお、基礎地盤の地震動は、これに対して《入力地震動》と呼ばれる。
- ◆ ため池堤体の応答特性は、その固有周期によって異なり、固有周期は、主に堤体の①剛性(硬さ)、②規模(大きさ、高さ)、または③重量(重さ)によって異なる。

○ 応答の特性

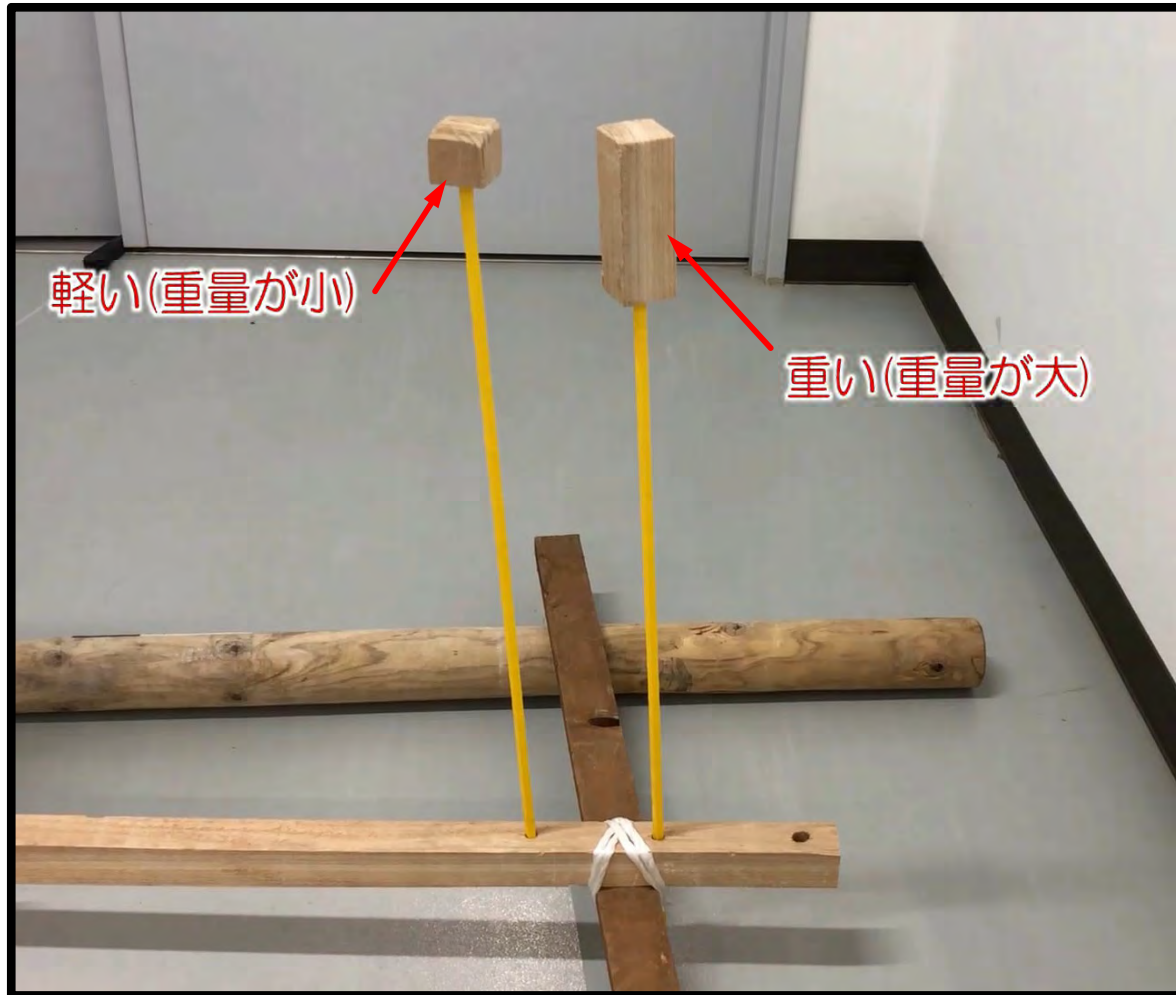
① 建造物の剛性(硬さ)による応答特性の違い (重量, 規模は同じ)



- ◆ ゆっくり揺らすと, 柔らかい方(剛性が小)が大きく揺れる.
- ◆ 小刻み(早く)揺らすと, 硬い方(剛性が大)が大きく揺れる.

○ 応答の特性

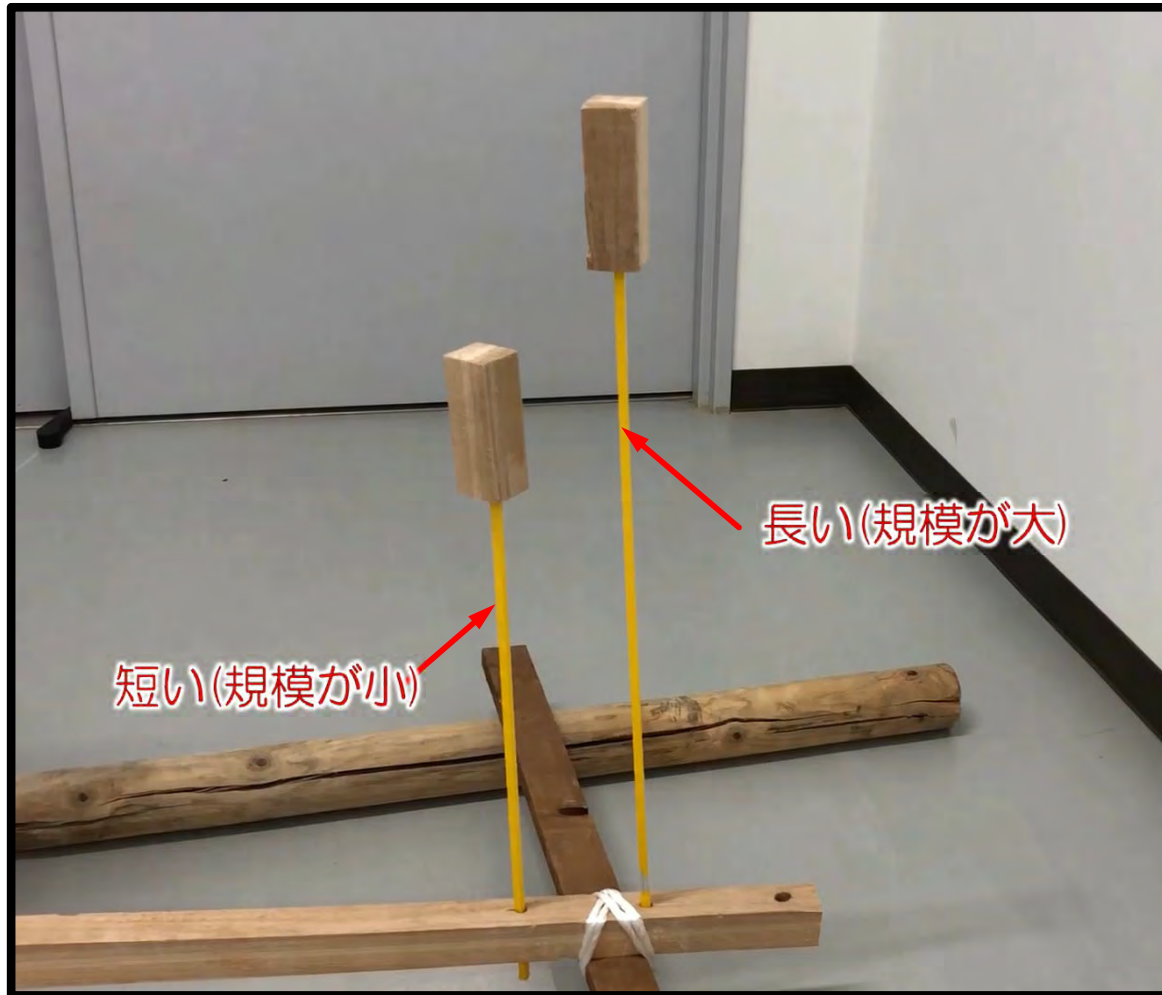
② 建造物の**重量**(重さ)による応答特性の違い (剛性, 規模は同じ)



- ◆ ゆっくり揺らすと, 重い方(重量が大)が大きく揺れる.
- ◆ 小刻み(早く)揺らすと, 軽い方(重量が小)が大きく揺れる.

○ 応答の特性

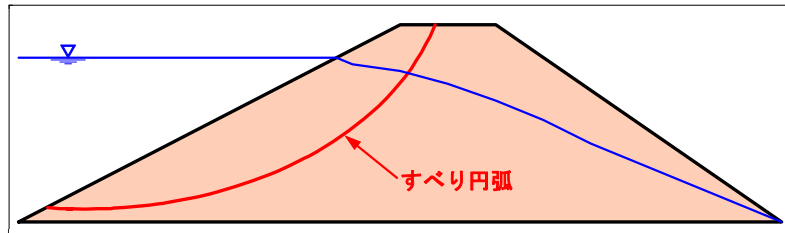
③ 構造物の規模(大きさ)による応答特性の違い (剛性, 重量は同じ)



- ◆ ゆっくり揺らすと, 長い方(規模が大)が大きく揺れる.
- ◆ 小刻み(早く)揺らすと, 短い方(規模が小)が大きく揺れる.

○ ため池(ダム)の堤体耐震性能照査の種類

耐震性能照査



ため池(ダム)の堤体の耐震性能照査は、堤内に仮定したすべり円弧を対象とする。



堤体の地震時の破壊形態として、【円弧すべり】が発生し、これが甚大な被害に繋がると懸念される。

いわゆる《堤体安定計算》

静的解析

- ◆ 地震による慣性力を、すべり土塊に対して水平方向の静的荷重として与える。
- ◆ 地震の大きさは、【地震係数 kh 】(地域特性)により規定。

⇒【レベル1地震動】を想定

動的解析

- ◆ 地震による慣性力は、地震時動的応答解析を実施し、すべり土塊に対して時刻歴で水平方向に動的荷重として与える。
- ◆ 地震の大きさ・揺れ方は、そのため池(ダム)地点毎に特有な地震動(入力地震動)を各種資料から設定。

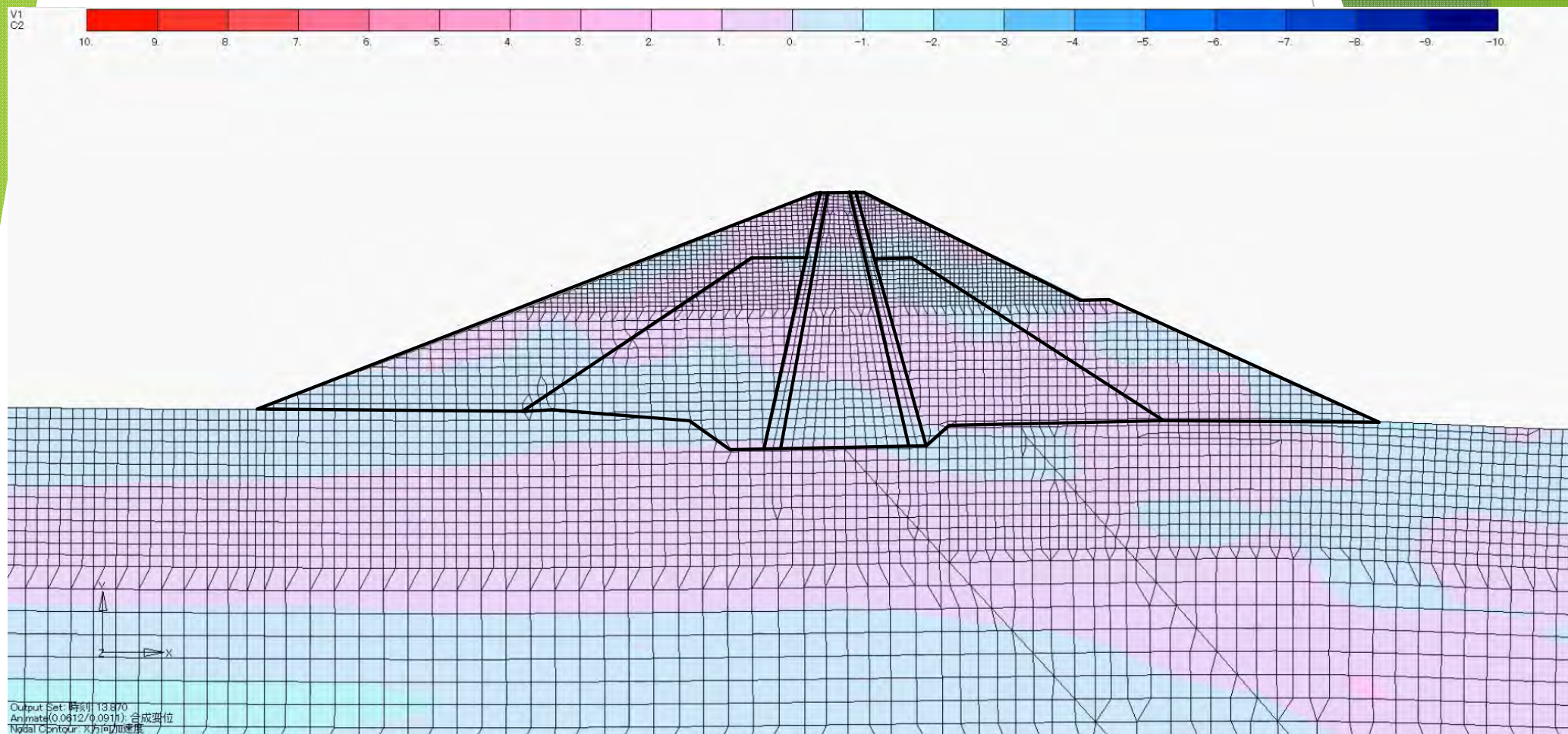
⇒【レベル2地震動】を想定

○ 検討の対象とする地震の種別---レベル1, 2

区分	定義	耐震性能目標
レベル1 地震動	ため池の耐用年数中に一度以上受ける可能性が大きい地震動.	堤体は概ね 弾性的な挙動 で応答し, ほとんど 無傷 で耐えられることを目標.
レベル2 地震動	ため池がある地点において, 現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動.	地震時に損傷が生じたとしても, ため池の 貯水機能が維持 されるとともに, 生じた損傷が 修復可能な範囲 にとどまることを目標. 《貯水機能が維持》決壊等により, 制御できない貯水の流出が生じない. 《修復可能な範囲》適用可能な技術, 妥当な経費・期間でため池の継続使用を可能とする範囲.

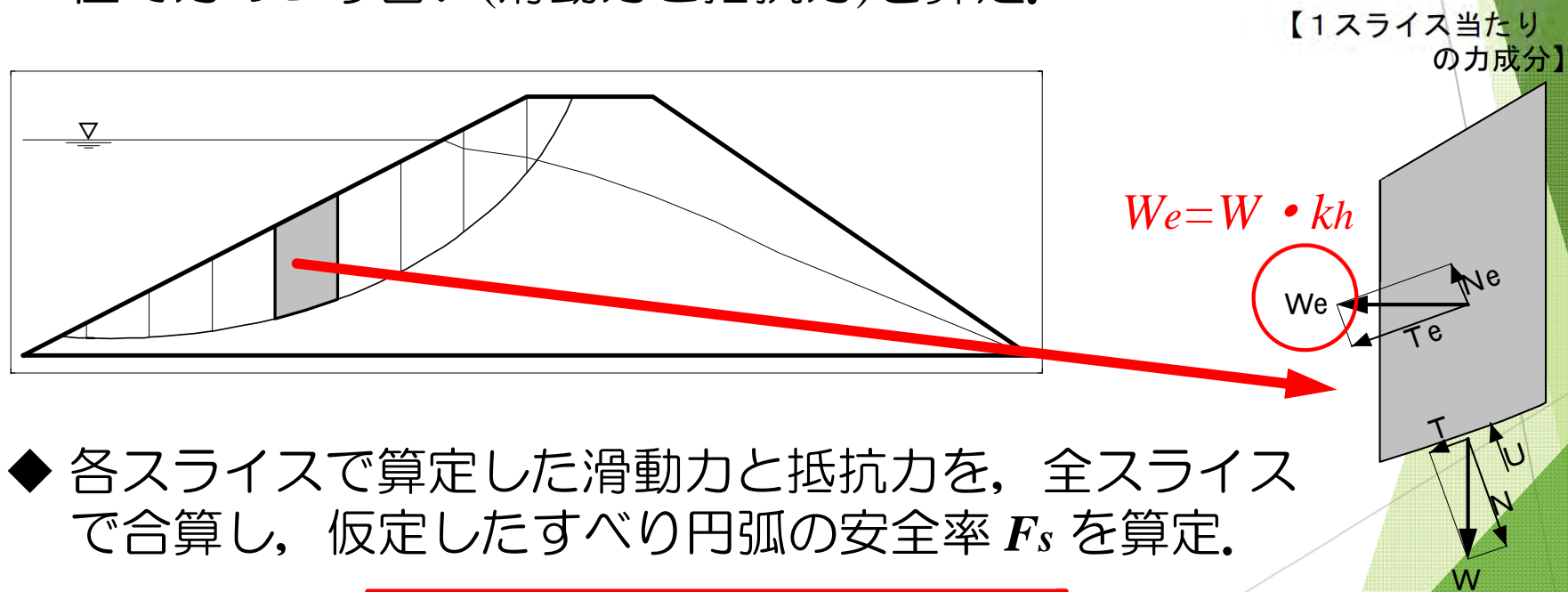
○ 地震応答解析(動的解析)

【解析結果例】



○ 静的解析(レベル1)の方法

- ◆ 準拠すべき基準類は【ダム】では「設計基準」, 【ため池】では「整備指針」. ただし, 両方とも同様な方法であるため, 詳細な記載がなされている「設計基準」に準じる方が分かりやすい.
- ◆ まずは堤内を通過するすべり円弧を仮定(円弧の中心,半径).
- ◆ 次に, すべり土塊を数個の短冊状のスライスに分割し, スライス単位で力のつり合い(滑動力と抵抗力)を算定.



- ◆ 各スライスで算定した滑動力と抵抗力を, 全スライスで合算し, 仮定したすべり円弧の安全率 F_s を算定.

$$F_s = \frac{\sum\{c \cdot L + (N - U - N_e) \cdot \tan\phi\}}{\sum(T + T_e)}$$

抵抗力

滑動力

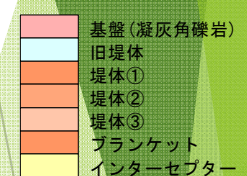
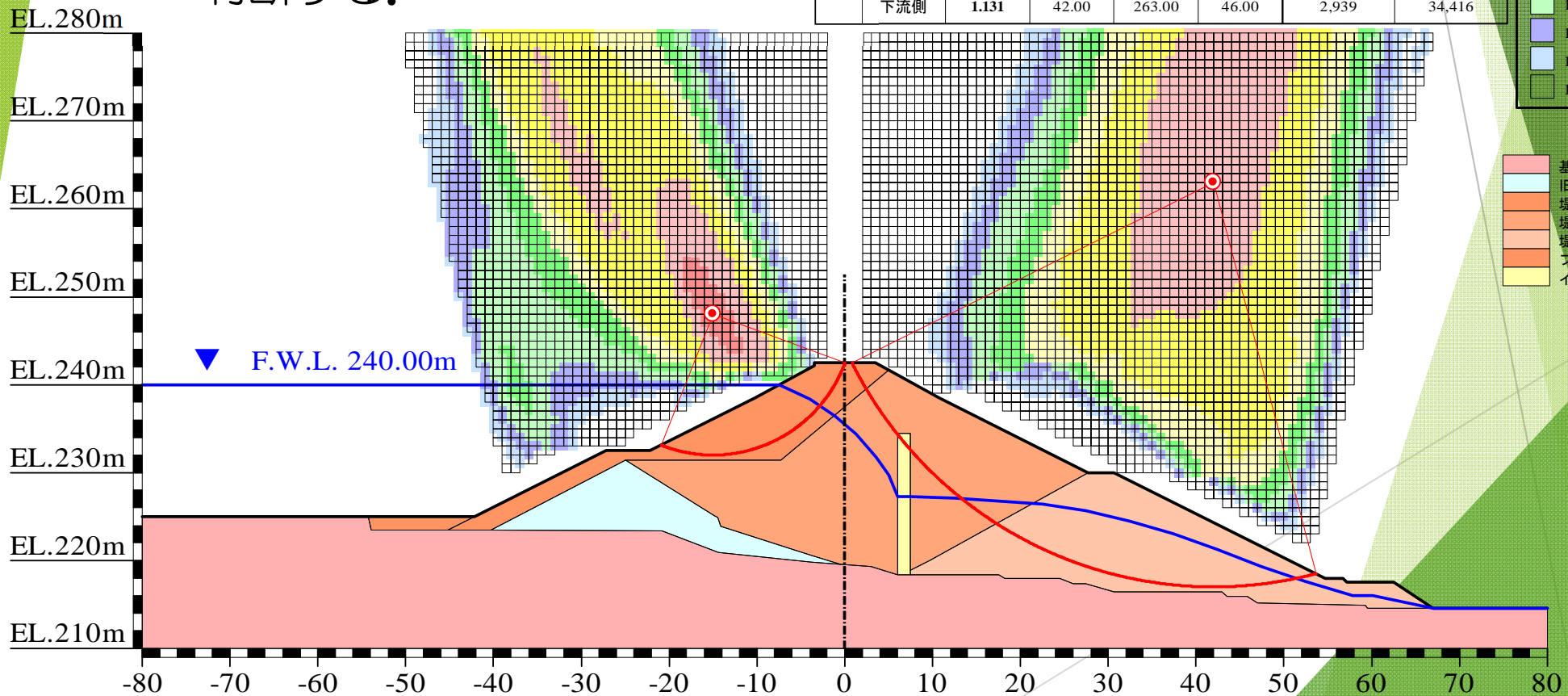
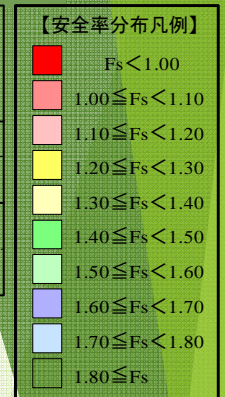
○ 静的解析(レベル1)の方法

◆ 複数のすべり円弧で算定した安全率 F_s の内、最少となる安全率 $F_{s_{min}}$ により耐震性能を照査する。

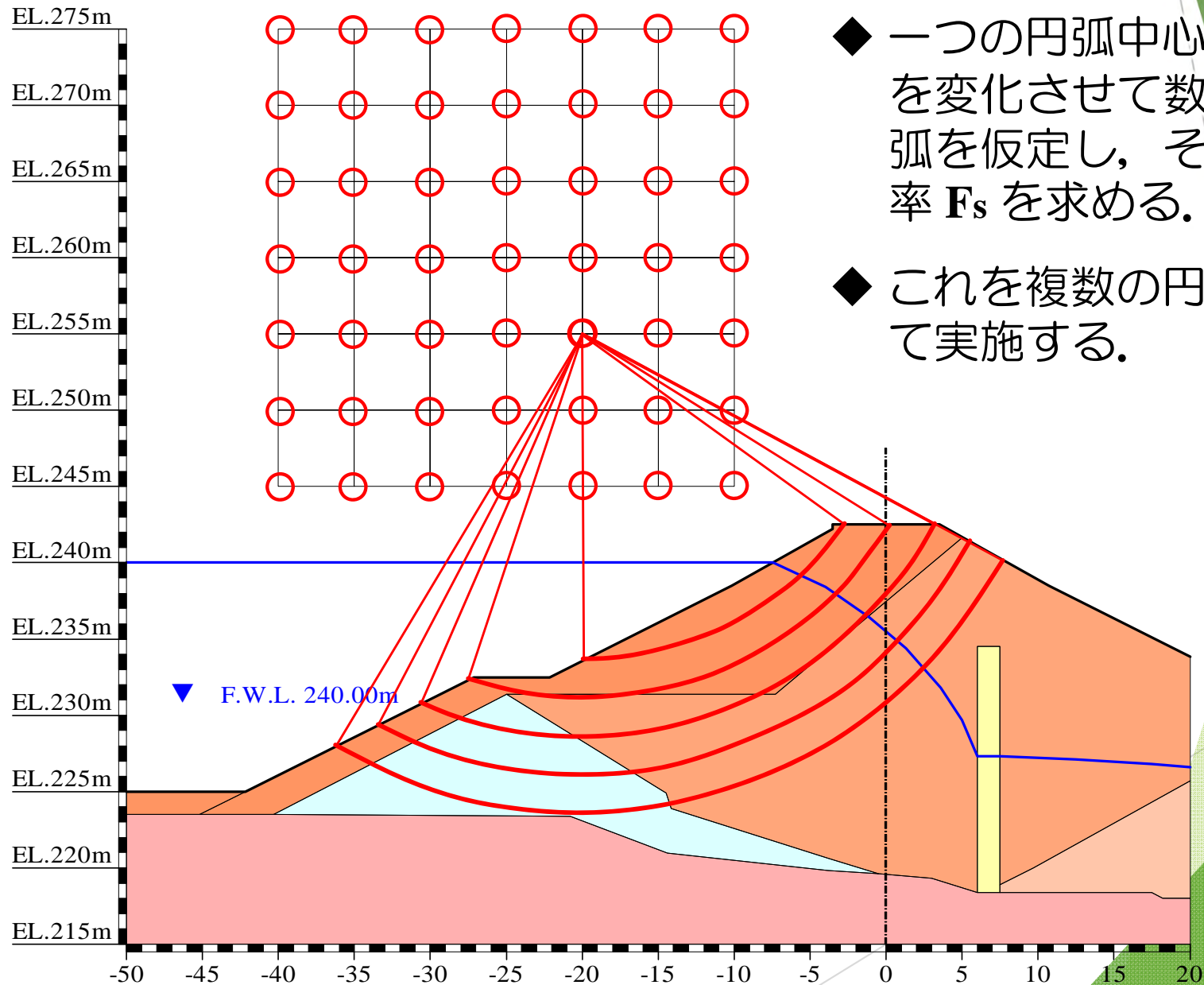
◆ 一般には $F_{s_{min}} \geq 1.20$ の場合に、
『耐震性能を有する』
『耐震補強の必要なし』と判断する。

【常時満水位時(F.W.L.)】

貯水位条件 : W.L.=240.00m.....F.W.L.240.00+0.00(hw)+0.00(he)		《計算条件》			【安全率分布凡例】		
地震係数 : kh = 0.120 (100%)		中心点Grid間隔 ΔXY : 1.0 m			■ $F_s < 1.00$		
		半径縮小間隔 ΔR : 1.0m			■ $1.00 \leq F_s < 1.10$		
		最小スライス幅 B : 0.5m			■ $1.10 \leq F_s < 1.20$		
計算結果	対象斜面	最小安全率 $F_{s_{min}}$	Fsmin算出の臨界円諸元			計算円弧(想定すべり面)個数	
			円弧の中心座標		半径 R(m)	中心点個数	円弧個数
			X(m)	Y(m)			
上流側	1.070	-15.00	248.00	16.00	1,992	16,404	
下流側	1.131	42.00	263.00	46.00	2,939	34,416	



○ 静的解析(レベル1)の方法



- ◆ 一つの円弧中心に対し，半径を変化させて数個のすべり円弧を仮定し，それぞれで安全率 F_s を求める.
- ◆ これを複数の円弧中心に対して実施する.

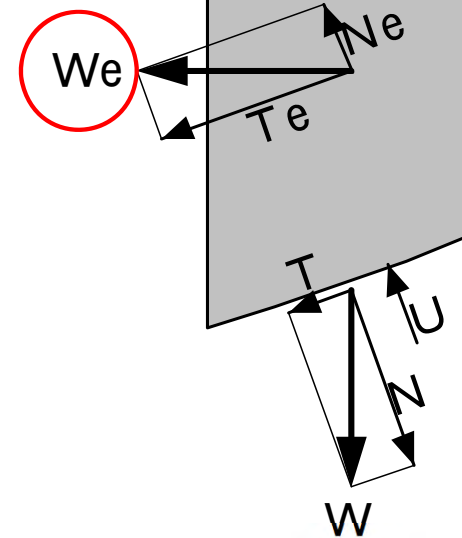
○ 静的解析(レベル1)に関する留意点

◆ 静的解析(レベル1)による耐震性能照査は，地震慣性力を静的荷重として取り扱う。

◆ 本来地震動(地震慣性力)は，瞬時の繰返し荷重(上流方向⇔下流方向)であるのに対し，これをすべる方向への静的荷重として取り扱うということは，いわば”綱引き”のように，常にすべる方向に慣性力(綱引きの引っ張る力)が作用している状況。

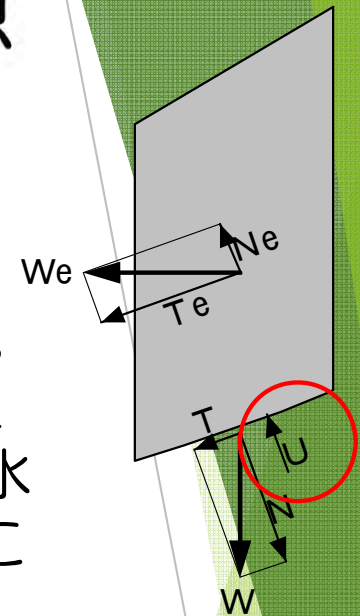
◆ 【動的解析(レベル2)】に比較し，条件として想定する地震の規模は小さいが，このような『静的荷重としての取り扱い』は，かなり《危険側》の設定である。

$$W_e = W \cdot kh$$

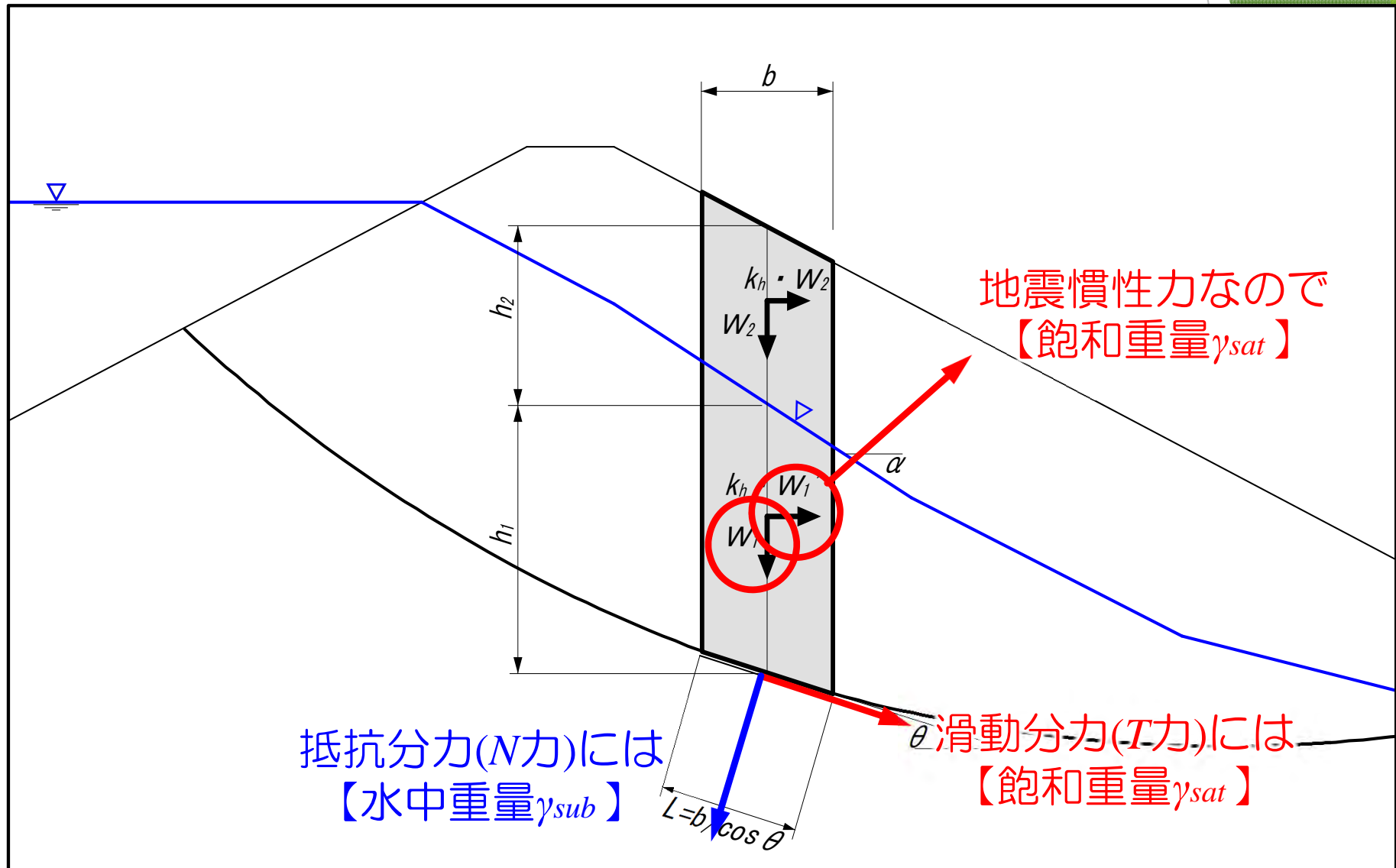


○ 静的解析(レベル1)に関する留意点

- ◆ 各スライスの力のつり合い算定(滑動力と抵抗力)では、すべり面には堤内水位に準じた揚圧力 U を考慮する。
- ◆ しかし、「ため池整備指針」に示されている方法では、この揚圧力 U を直接入力することはなく、スライス土塊の単位体積重量として《飽和重量 γ_{sat} 》, もしくは《水中重量 γ_{sub} 》の使い分けによって間接的に考慮する。これを【水中・飽和重量方式】と言う。
- ◆ 下流側斜面を計算する場合に、堤内浸潤面以下の単位体積重量の設定には特に注意した方がよい。滑動力(T 力), もしくは地震慣性力(We 力)の算定には《飽和重量 γ_{sat} 》, 抵抗力(N 力)算定には《水中重量 γ_{sub} 》を用いる必要がある。
- ◆ これは、「ため池整備指針」に記載されている《水急降下時(上流斜面計算)》の単位体積重量の設定方法と同じである。市販の安定計算ソフトを用いる場合には、特に注意しなければ、必ずしもこのような設定にならないケースが散見されるため、注意が必要である。



○ 静的解析(レベル1)に関する留意点



○ため池の安全性評価に必要な条件

⑤地震慣性力

すべり土塊に作用。
地震係数 kh は地域
毎に設定。

②盛土の物性値

単位体積重量，せん断強度。特にせん断強度の大小は，安定計算結果に大きく影響する。

①堤体の形状,内部構成

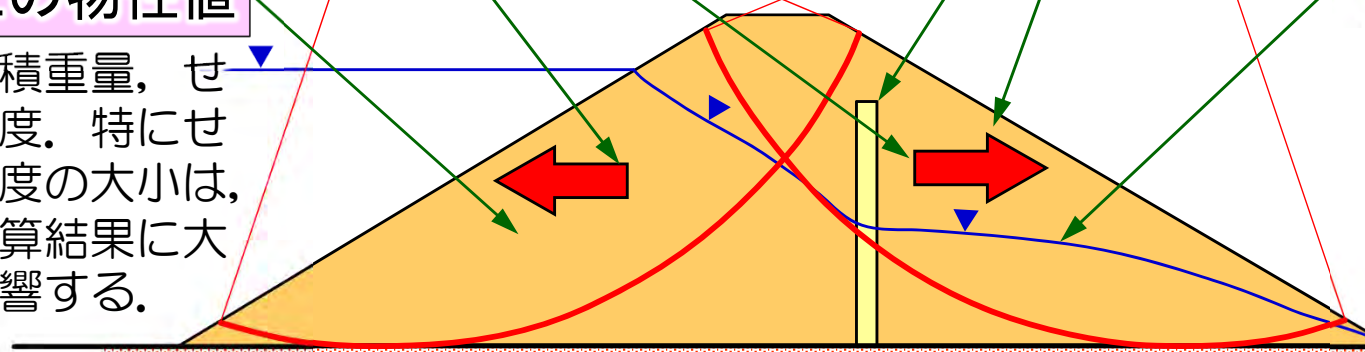
基礎深度，もしくは堤体内部の構成(図中のインターセプターの有無など)。

③堤内水位

アースフィルダムでは，堤体下流域にまで浸潤線が存在することを前提とすべき。その高さによって，特に下流斜面の安定計算に与える影響は多大。

④基礎の条件

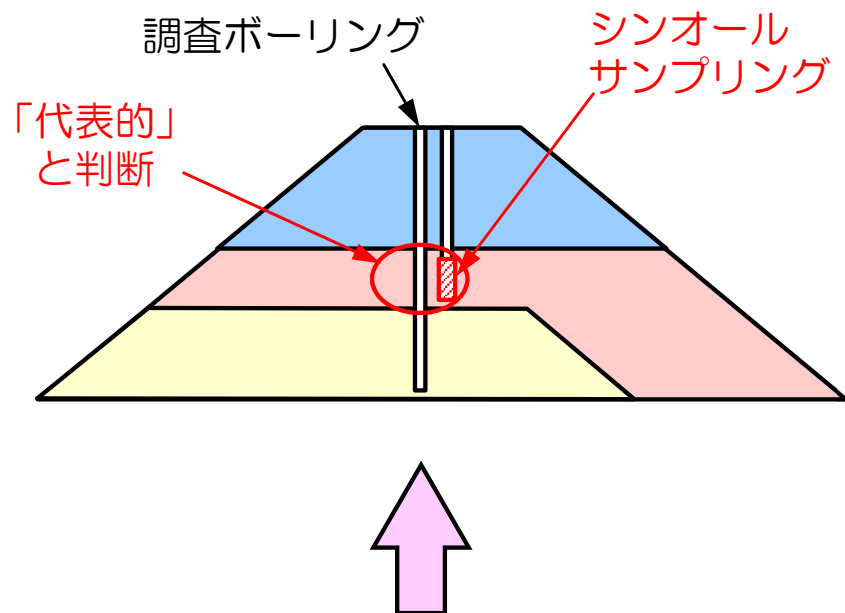
岩盤基礎 or 堆積層？河床砂礫等の堆積層の場合には，それを通過するすべりに対しても検討が必要(→せん断強度の把握)。また，液状化についても検討が必要(→粒度分布等の把握)。



○ 耐震性能照査を実施するための調査

- ◆ 静的・動的を問わず，精度よく耐震性能照査検討を行うためには，解析に用いる各種パラメータとして最も妥当な値を用いることが重要。
- ◆ この『最も妥当な値』とは，現位置試験，もしくは室内材料試験と言った各種調査の精度を上げることはもちろんであるが，**堤体全体を代表しうる調査位置，調査方法，もしくは室内試験条件**から得られた値であるのかといった問いかけを，常に念頭に置くことが重要。
- ◆ これは，ため池の場合には，築造年次が古いほど盛土に使用されている材料は均一ではなく，また，密度状態にも大きなばらつきがあるためである。ある個所で材料を採取して室内試験を実施しても，他の場所での試験結果と大きく異なると言ったことが，しばしば見られる。

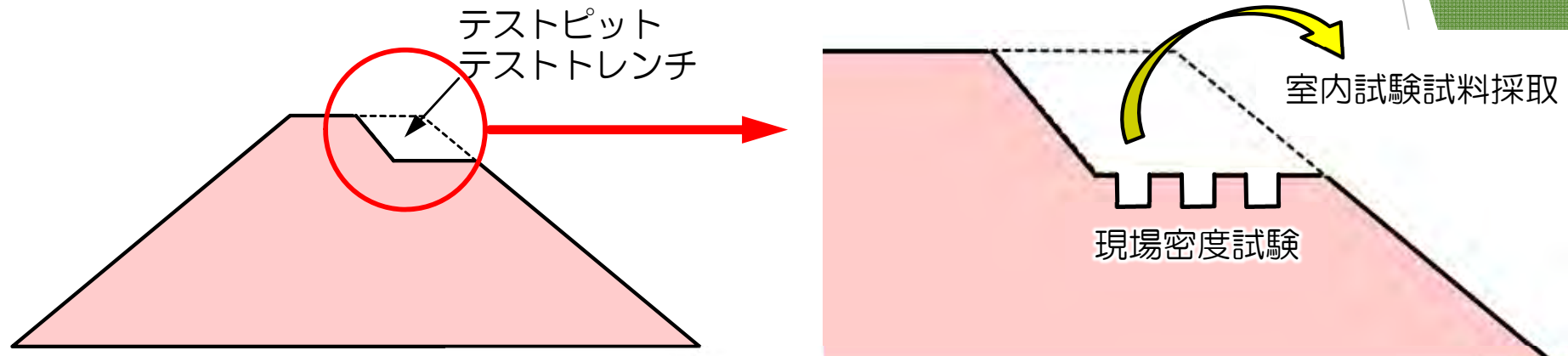
不攪乱供試体(試料)の問題点



供試体採取位置が
堤体全体を代表していない。

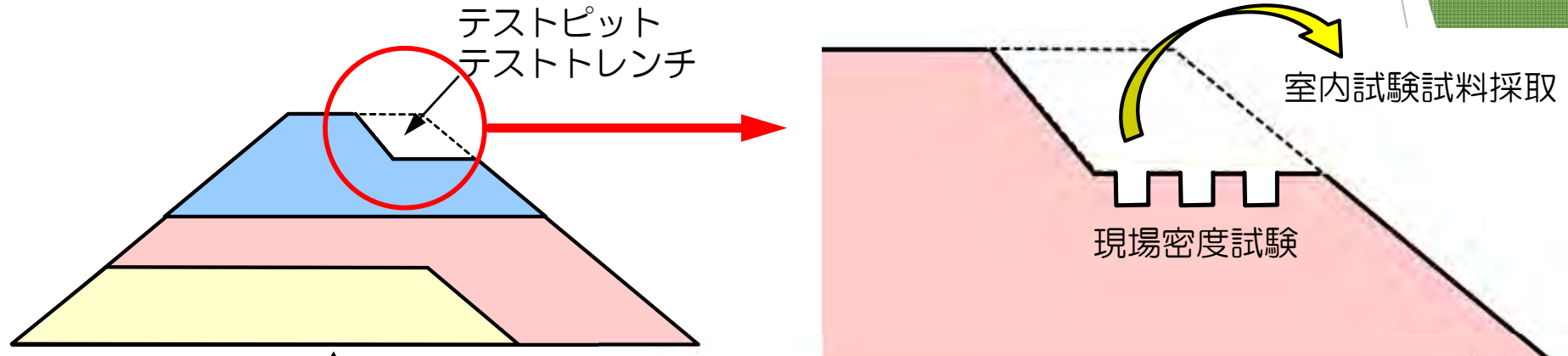
- ◆ 不攪乱供試体を採取する際には、通常、調査ボーリングを先行して実施し、代表性があると思われる深度区間を選定。
- ◆ その後、シンオールサンプラー等を用いて上記深度から不攪乱供試体を採取。
- ◆ ただし、ため池堤体が「不均一」であることを前提にすると、供試体採取位置が堤体全体に対して【代表性】を有する具体的な根拠はないのが現実である(調査ボーリングコアによる代表性の確認は客観性がない)。

テストピット調査(試料採取)の問題点



- ◆ 攪乱試料を採取する際には、通常、堤体天端、もしくは下流法面にテストピット、もしくはテストトレンチを掘削して、その掘削ズリを室内に搬入する。
- ◆ 同時に、テストピット、もしくはテストトレンチ底盤にて現場密度試験を実施し、堤体の密度・含水比状況を把握する。
- ◆ 再構成供試体は、室内に搬入した試料を用い、現場密度試験結果で得られた密度・含水比状況となるように締固めにより作成する。

テストピット調査(試料採取)の問題点



供試体採取位置が
堤体全体を代表していない。

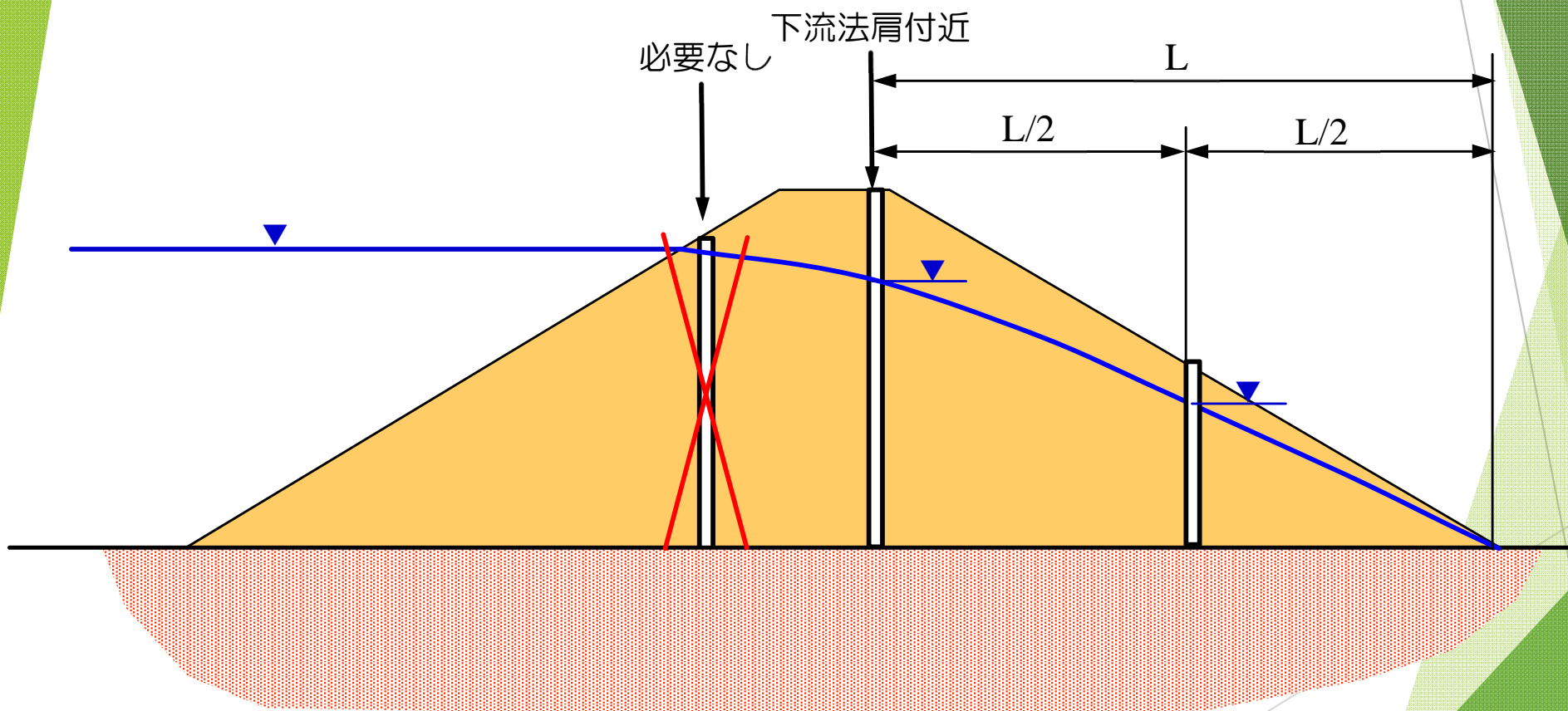
- ◆ 供試体の再構成条件として、現場密度試験結果を用いることにより、堤内の状況を再現しているものと考える。
- ◆ ただし、ため池堤体が「不均一」であることを前提にすると、供試体採取位置が堤体全体に対して【代表性】を有する具体的な根拠はない。
- ◆ 加えて、テストピット、もしくはテストトレンチは堤体表面部付近にしか掘削できないため、堤体深部における圧密効果を見込むことができない。

○ 耐震性能照査を実施するための調査

- ◆ また、解析に用いるパラメータの他に、堤内浸潤線の高低によって堤体の安全率は大きく影響を受ける。特に下流側の検討においてはせん断強度などよりも影響は大きく、浸潤線水位が±1m変わっただけで、安全率が大きく変わることはよくある。
- ◆ よって堤内浸潤線、すなわち堤内水位については、適切な位置に堤内水位観測孔を設け、経年的な観測結果に基づいて決定することが望ましい。
- ◆ また、ため池(≡均一型アースフィルダム)においては、堤内に複数枚数の地下水面を有していることが多い。水位観測孔の開口部分の深度によっては、いろいろな高さの孔内水位(≡地下水面)が観測され、必要以上に高い水位、もしくはいびつな堤内浸潤線形状が設定されることも多い。
- ◆ 安定計算に用いるべき堤内浸潤線は、本来貯水池からの浸透水によって形成されている浸潤線である。よって、堤内水位観測結果をフルイにかけ、適切な観測結果のみを用いた堤内浸潤線設定が重要となる。

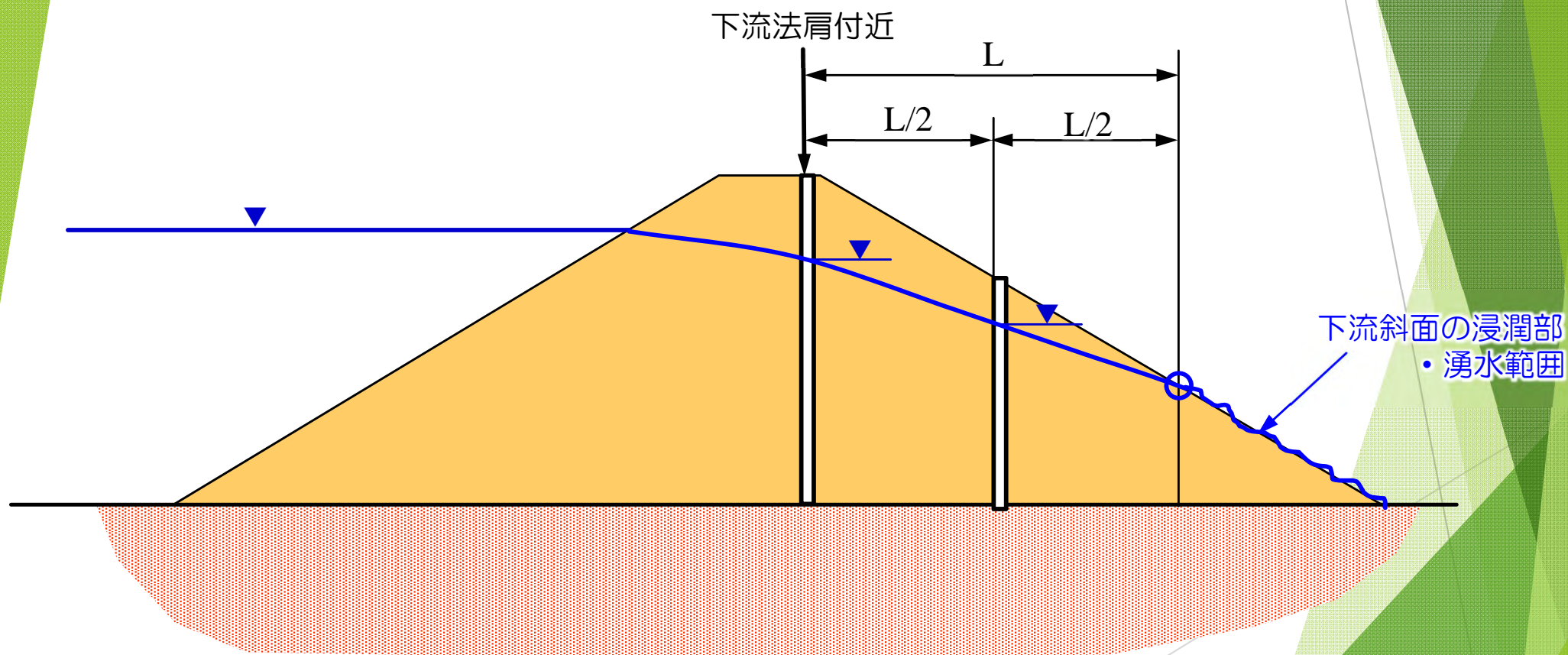
堤内水位観測孔の配置

堤体下流斜面に浸潤部や湧水範囲が認められない場合



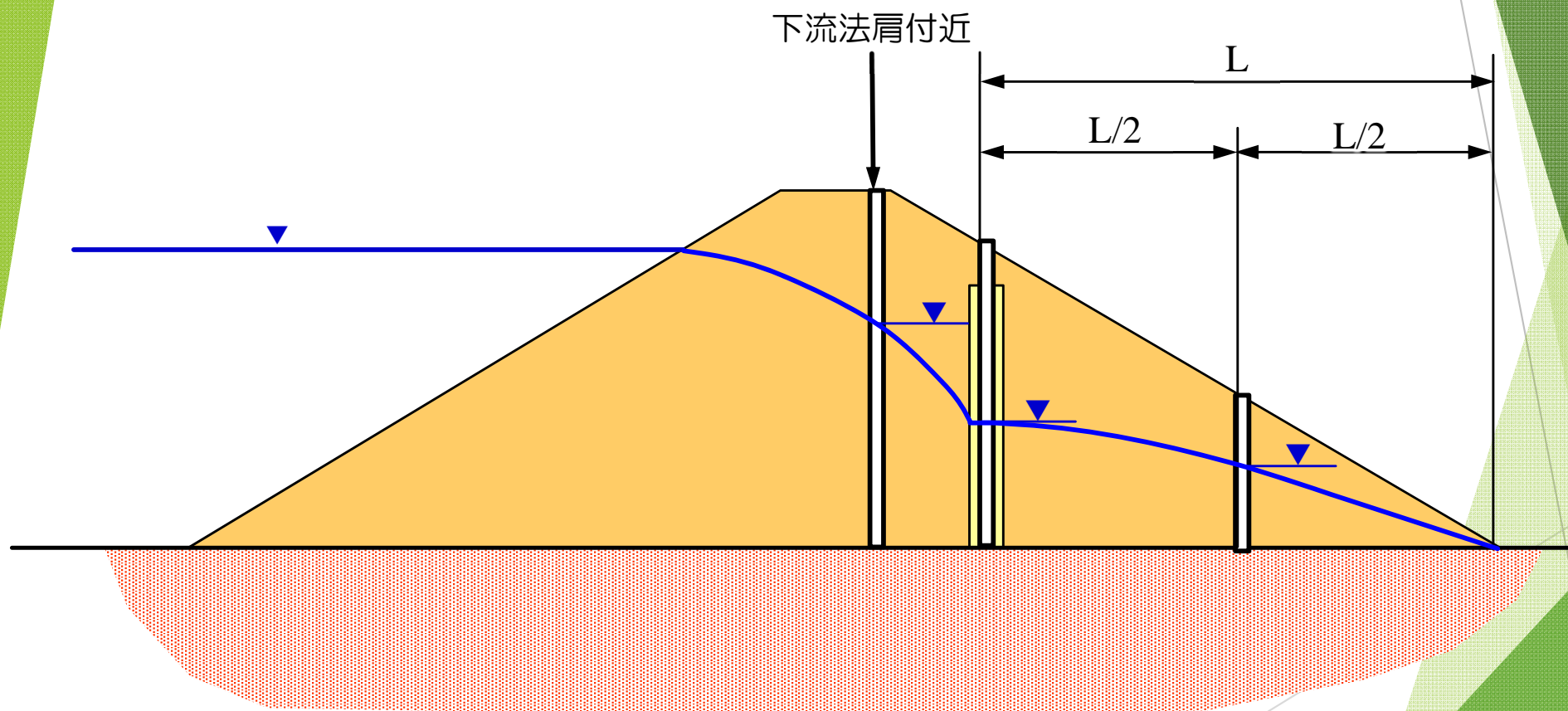
堤内水位観測孔の配置

堤体下流斜面に浸潤部や湧水範囲が認められる場合



堤内水位観測孔の配置

堤内にインターセプター(チムニードレーン)が設けられている場合



○ まとめ

- ◆ ため池の耐震性能照査方法として、主に【静的解析(レベル1)】の方法と調査における留意点について述べてきた。
- ◆ 耐震性能照査において与える地震動の大きさから、『動的解析の方が危険側』,もしくは、『レベル2でクリアするならレベル1では必ずしもクリアされなくていい』との声がしばしば聞かれる。
- ◆ 私の個人的な見解かもしれないが、これは全くの【誤解】であると言いたい。両方法については、ほぼ同様な取り扱いが必要である。
- ◆ 静的解析(レベル1)での照査指標のハードルの高さ、もしくは、常にすべる方向に”綱引きの引っ張る力が作用している状況”と言った地震動の考慮の仕方から、この検討手法が必ずしも《安全側》であるとは言えない。
- ◆ さらに重要なことは、「土地改良設計基準 ダム」にてこの検討手法が規定された後、約50年の長きにわたり、この手法で設計されたダムは、幾度となく巨大地震に見舞われながらも、決壊などの大きな被害を被っていないことである。ダム工学が経験工学の側面が強い分野である以上、このような実績は大切に受け止めるべきである。

○ おわりに

- ◆ ため池は，農業用水の供給源ばかりではなく，周辺環境・生態系への調和，もしくは，近隣住民の憩いの場所など，その役割は多面的であり，わが国においては非常に貴重な社会資本である。
- ◆ また，地震の発生に起因した決壊などの災害が生じた場合，下流域に対する影響は計り知れない。よって，ため池の耐震性能を照査し，その安全性を確認することは極めて重要である。
- ◆ 一方で，その耐震性能照査が，適切な方法，もしくは適切なパラメータ(≡調査結果)で行われることなく，『耐震性能を有する』と判断される場合には，これも極めて危険な状況である。
- ◆ 我々技術者は，このようなため池の重要性，およびその耐震性能を適切に照査することの重要性を十分に認識し，この貴重な社会資本を末永く維持する努力を惜しまないことが望まれている。

ご静聴 ありがとうございました。