

地盤（実務向け）

Digitally explore the Earth

さい ひ
蔡 飛

技術士（建設部門、総合技術監理部門）

群馬大学大学院 理工学府 環境創生部門 准教授

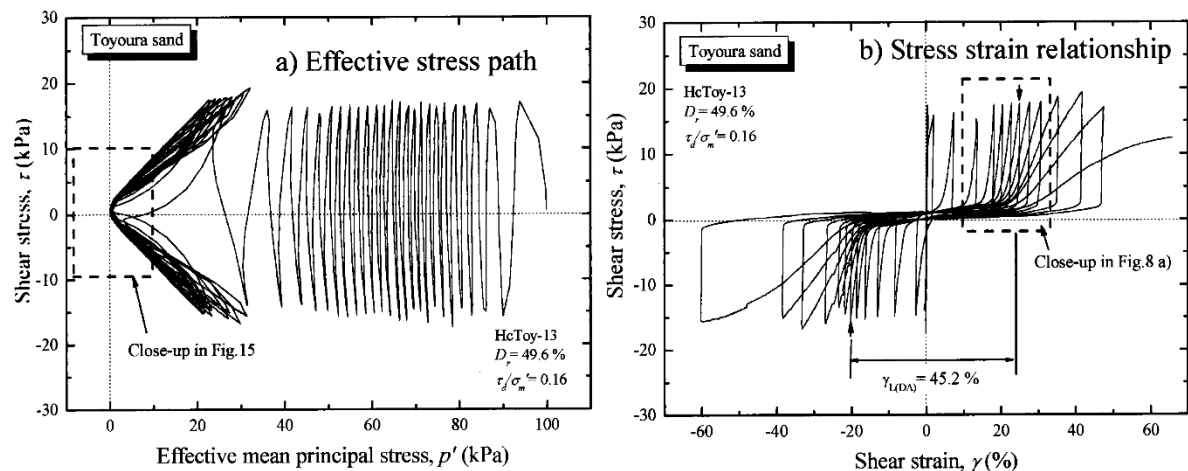
内容

- 液状化による変形における解析手法
- 動的有効応力解析の方法
- 構成則
- 解析の手順

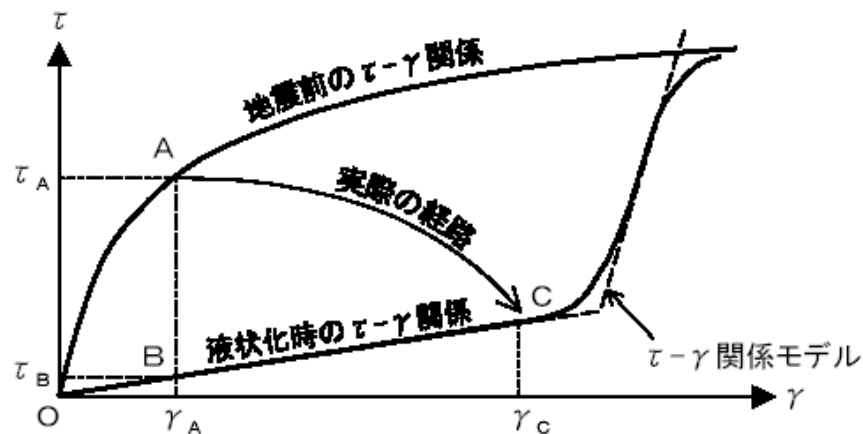
液状化による変形における解析手法

- 液状化による自重変形解析
- 動的有効応力解析

液状化による自重変形解析

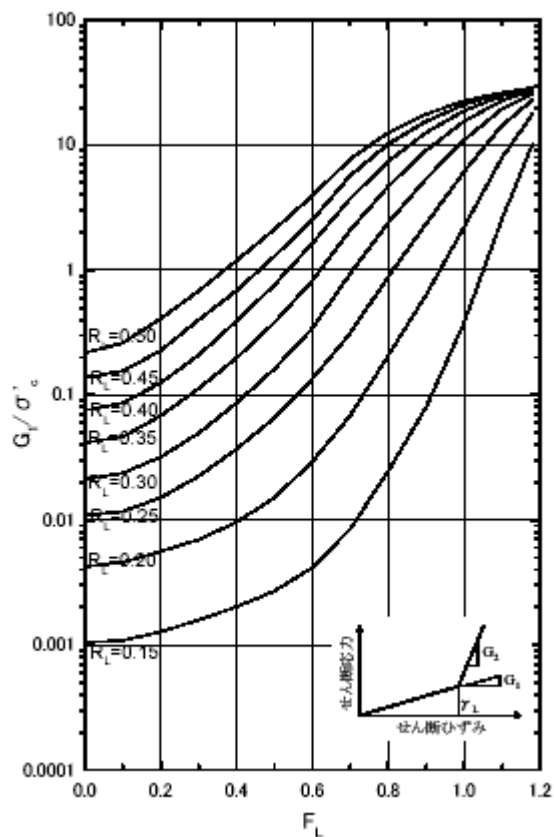


Dr=49.6%の豊浦砂の繰返し中空ねじりせん断試験



$$\gamma_L = \left(\frac{1300}{G_1} \right)^{0.5587}$$

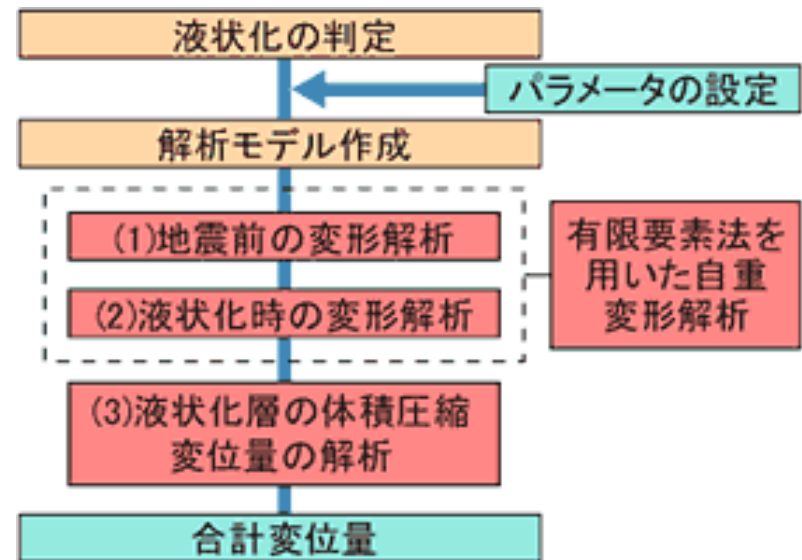
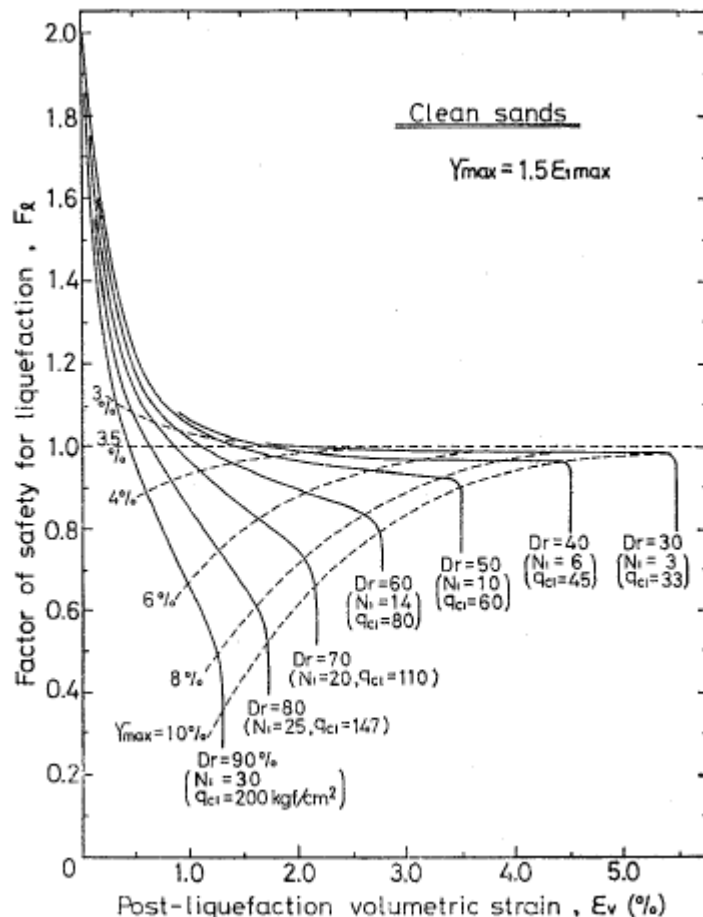
$$G_2 = \frac{2000}{\gamma_L}$$



液状化が生じる地層のせん断剛性の低減の例

地震前と液状化時のせん断応力～せん断ひずみ関係の模式図

液状化による自重変形解析



液状化自重変形解析フロー

液状化による体積ひずみとFLと換算N1との関係

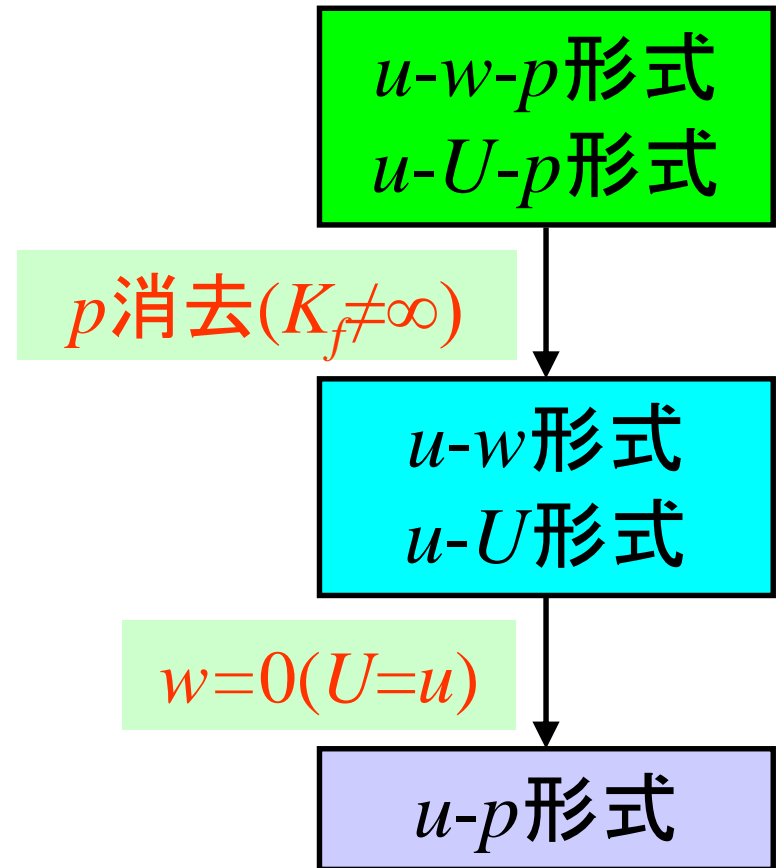
u - p 形式の液状化解析

方法	一つの節点 での未知量
u - w - p 形式	5(2D), 7(3D)
u - U - p 形式	5(2D), 7(3D)
u - w 形式	4(2D), 6(3D)
u - U 形式	4(2D), 6(3D)
u - p 形式	3(2D), 4(3D)

u : 土骨格の変位

U : 水の変位、 $w=n(U-u)$

p : 間隙水圧



液状化解析の支配方程式 (u - w - p 定式化)

土粒子と水との混合体(飽和土)の運動量保存則:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \ddot{u}_i + \rho_f (\ddot{w}_i + \dot{w}_j \dot{w}_{i,j}) - \rho b_i = 0$$

圧縮を正とする。

水の運動量保存則:

\dot{w} : 水と土粒子と間の見かけの相対速度

$$p_{,i} + R_i + \rho_f \ddot{u}_i + \frac{\rho_f}{n} (\ddot{w}_i + \dot{w}_j \dot{w}_{i,j}) - \rho_f b_i = 0$$

R_i : 透水力(土粒子と水の相互作用)

$$k_{ij} R_j = \dot{w}_i$$

水の質量保存則:

$$-\dot{w}_{i,i} = -\dot{\varepsilon}_{ii} + \frac{n\dot{p}}{K_f} + \frac{(1-n)\dot{p}}{K_s} + \frac{K_T}{K_s} \left(\dot{\varepsilon}_{ii} - \frac{\dot{p}}{K_s} \right) + n \frac{\dot{\rho}_f}{\rho_f} + \dot{s}$$

$$\alpha = 1 - \frac{K_T}{K_s} \cong 1$$

正味流入量

体積膨張

水の圧縮

土粒子の
圧縮

有効接触応力
の変化による
土粒子の体積
変化

水密度の
変化

点源

$$\frac{1}{Q} = \frac{n}{K_f} + \frac{\alpha - n}{K_s}$$

$$\dot{w}_{i,i} - \alpha \dot{\varepsilon}_{ii} + \frac{\dot{p}}{Q} + n \frac{\dot{\rho}_f}{\rho_f} + \dot{s} = 0$$

K_f : 水の体積弾性係数

K_s : 土粒子の体積弾性係数

K_T : 土の接線体積弾性係数

液状化解析の支配方程式 (u - U - p 定式化)

\dot{w} : 水と土粒子と間の見かけの相対速度

水の水速度 : $\dot{U} = \dot{u} + \frac{\dot{w}}{n}$

$$\dot{w} = n(\dot{U} - \dot{u})$$

土粒子と水との混合体(飽和土)の運動量保存則:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \ddot{u}_i + \rho_f (\ddot{w}_i + \dot{w}_j \dot{w}_{i,j}) - \rho b_i = 0$$

水の運動量保存則:

$$p_{,i} + R_i + \rho_f \ddot{u}_i + \frac{\rho_f}{n} (\ddot{w}_i + \dot{w}_j \dot{w}_{i,j}) - \rho_f b_i = 0$$

水の質量保存則:

$$\dot{w}_{i,i} - \alpha \dot{\varepsilon}_{ii} + \frac{\dot{p}}{Q} + n \frac{\dot{\rho}_f}{\rho_f} + \dot{s} = 0$$

液状化解析の支配方程式 (u - w 、 u - U 定式化)

水の質量保存則より:

$$p = -Q \left(\alpha u_{i,i} + w_{i,i} + n \frac{\Delta \rho_f}{\rho_f} + s \right) \cdots (1)$$

$$\dot{w} = n(\dot{U} - \dot{u}) \cdots (2)$$

(1)と(2)より

$$p = -Q \left\{ (\alpha - n) u_{i,i} + n U_{i,i} + n \frac{\Delta \rho_f}{\rho_f} + s \right\}$$

土粒子と水との混合体(飽和土)の運動量保存則:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \ddot{u}_i + \rho_f (\ddot{w}_i + \dot{w}_j \dot{w}_{i,j}) - \rho b_i = 0$$

水の運動量保存則:

$$p_{,i} + R_i + \rho_f \ddot{u}_i + \frac{\rho_f}{n} (\ddot{w}_i + \dot{w}_j \dot{w}_{i,j}) - \rho_f b_i = 0$$

液状化解析の支配方程式 (u - p 定式化)

Darcy法則より:

$$\dot{w}_i = k_{ij}^{-1} R_j$$

水の運動量保存則:

$$p_{,i} + R_i + \rho_f \ddot{u}_i + \frac{\rho_f}{n} (\ddot{w}_i + \dot{w}_j \dot{w}_{i,j}) - \rho_f b_i = 0$$

$$\dot{w}_i = k_{ij}^{-1} (-p_{,j} - \rho_f \ddot{u}_j + \rho_f b_j)$$

水の質量保存則:

$$\left\{ k_{ij}^{-1} (-p_{,j} - \rho_f \ddot{u}_j + \rho_f b_j) \right\}_{,i} - \alpha \dot{\varepsilon}_{ii} + \frac{\dot{p}}{Q} + n \frac{\dot{\rho}_f}{\rho_f} + \dot{s} = 0$$

土粒子と水との混合体(飽和土)の運動量保存則:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \ddot{u}_i - \rho b_i = 0$$

非連成液状化解析

土粒子と水との混合体(飽和土)の運動量保存則:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \ddot{u}_i - \rho b_i = 0$$

振動による過剰間隙水圧のモデル:

Martin-Finn—Seedモデル

YUSAYUSAのモデル

Bowlモデル

東畑・井合モデル

全応力解析

土の運動量保存則:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \ddot{u}_i - \rho b_i = 0$$

のみ

動的解析

方法	プログラム
等価線形解析	SHAKE、FLUSH
全応力解析	SADAP、 UWLC
有効応力解析 (非完全連成)	TARA、FLIP
有効応力解析 (完全連成)	DYNAFLOW、DIANA、 LIQCA、 UWLC

u - p 形式の支配方程式

力の釣り合い式 (固相＋液相)	$\sigma_{ij,j} + \rho \ddot{u}_i - \rho b_i = 0$
力の釣り合い式 (液相)・連続式	$(k_{ij}(-p_{,j} - \rho_f \ddot{u}_j + \rho_f b_j))_{,i} + \alpha \dot{\varepsilon}_{ii} + \frac{\dot{p}}{Q} = 0$
土骨格の構成式	$\Delta \sigma'_{ij} = D_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl}$
有効応力の原理	$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + p \delta_{ij}$
ひずみの適合条件	$\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2$

u - p 形式の有限要素法による離散化

全体系:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} - \mathbf{Q}\mathbf{p} = \mathbf{f}^u$$

間隙水:

$$\mathbf{Q}^T \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{H}\mathbf{p} + \mathbf{S}\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{f}^p$$

\mathbf{M} =質量マトリクス

\mathbf{K} =剛性マトリクス

\mathbf{Q} =関連マトリクス

\mathbf{H} =浸透マトリクス

\mathbf{S} =圧縮マトリクス

\mathbf{u} =変位

\mathbf{p} =間隙水圧

\mathbf{f}^u =全体系における外力ベクトル

\mathbf{f}^p =間隙水における外力ベクトル

未知量の種類:

変位加速度、変位速度、変位

間隙水圧速度、間隙水圧

u - p 形式の時間積分: Newmark法

$$\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} = \ddot{\mathbf{u}}_n + \Delta\ddot{\mathbf{u}}_n$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_n + \ddot{\mathbf{u}}_n\Delta t + \theta_1\Delta\ddot{\mathbf{u}}_n\Delta t$$

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \Delta\dot{\mathbf{u}}_n\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{\mathbf{u}}_n\Delta t^2 + \theta_2\Delta\ddot{\mathbf{u}}_n\Delta t^2$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = \dot{\mathbf{p}}_n + \Delta\dot{\mathbf{p}}_n$$

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \dot{\mathbf{p}}_n\Delta t + \bar{\theta}_1\Delta\dot{\mathbf{p}}_n\Delta t$$

数値積分を無条件安定するため:

$$2\theta_2 \geq \theta_1 \geq 1/2 \qquad \bar{\theta}_1 \geq 1/2$$

u - p 形式の時間積分: Newmark法

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} + \frac{1}{2}\theta_2\Delta t^2\mathbf{K} & -\bar{\theta}_1\Delta t\mathbf{Q} \\ -\bar{\theta}_1\Delta t\mathbf{Q}^T & -\bar{\theta}_1/\theta_1(\bar{\theta}_1\Delta t\mathbf{H} + \mathbf{S}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\ddot{\mathbf{u}}_n \\ \Delta\dot{\mathbf{p}}_n \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_{n+1}^u \\ -\bar{\theta}_1/\theta_1 \boldsymbol{\Psi}_{n+1}^p \end{Bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{n+1}^u = \mathbf{M}_{n+1}\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + \int_{\Omega} \mathbf{B}_{n+1}^T \boldsymbol{\sigma}' d\Omega - \mathbf{Q}_{n+1}\mathbf{p}_{n+1} - \mathbf{f}_{n+1}^u$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{n+1}^p = \mathbf{Q}_{n+1}\dot{\mathbf{u}}_{n+1} + \mathbf{H}_{n+1}\mathbf{p}_{n+1} + \mathbf{S}_{n+1}\dot{\mathbf{p}}_{n+1} - \mathbf{f}_{n+1}^p$$

残差を消去するために繰り返し計算が必要！

内部減衰のモデル化

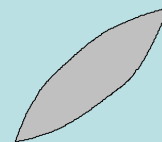
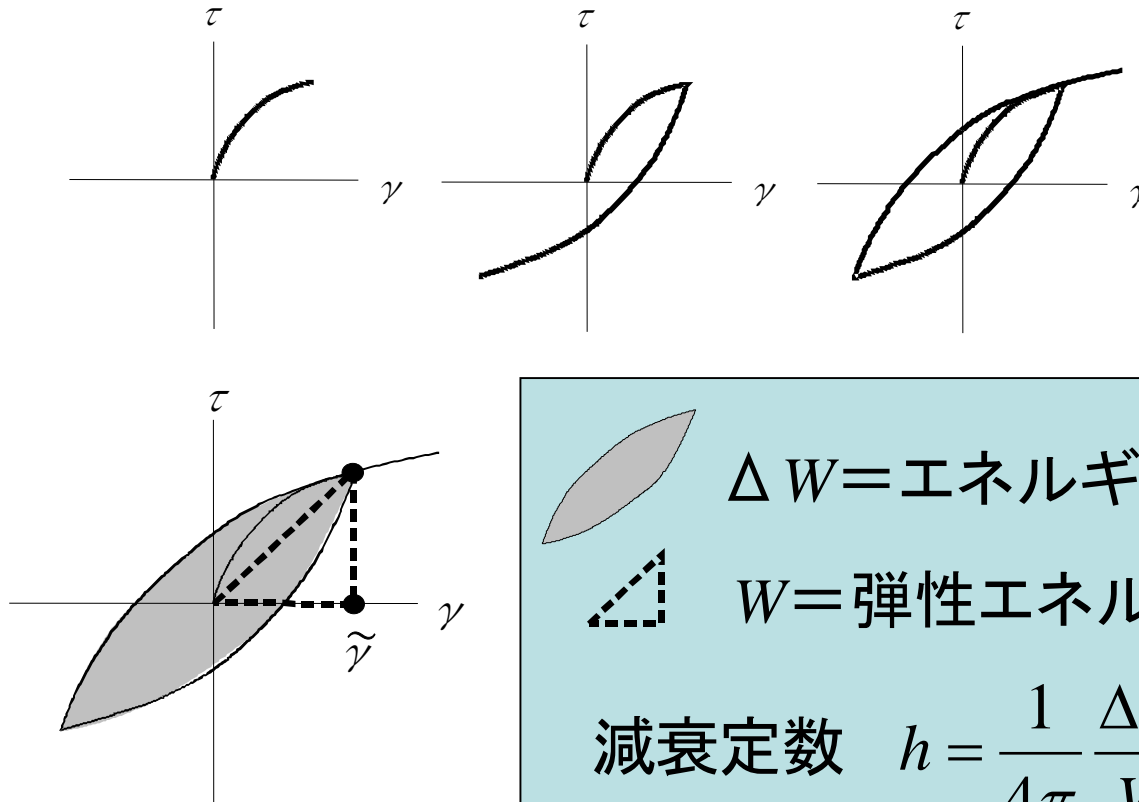
内部減衰: 連続体内部で消費されるエネルギー

- **履歴減衰** = 塑性化に起因する.
基本的に速度非依存.
- **粘性減衰** = 弾性振動中にも発生.
速度依存型.

実現象に合うよう, これらを組み合わせる.

履歴減衰のモデル化

非線形の応力ひずみ履歴から得られる効果.



ΔW = エネルギー損失



W = 弾性エネルギー

減衰定数
$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}$$

履歴減衰のモデル化

非弾塑性タイプ構成則：Masing則

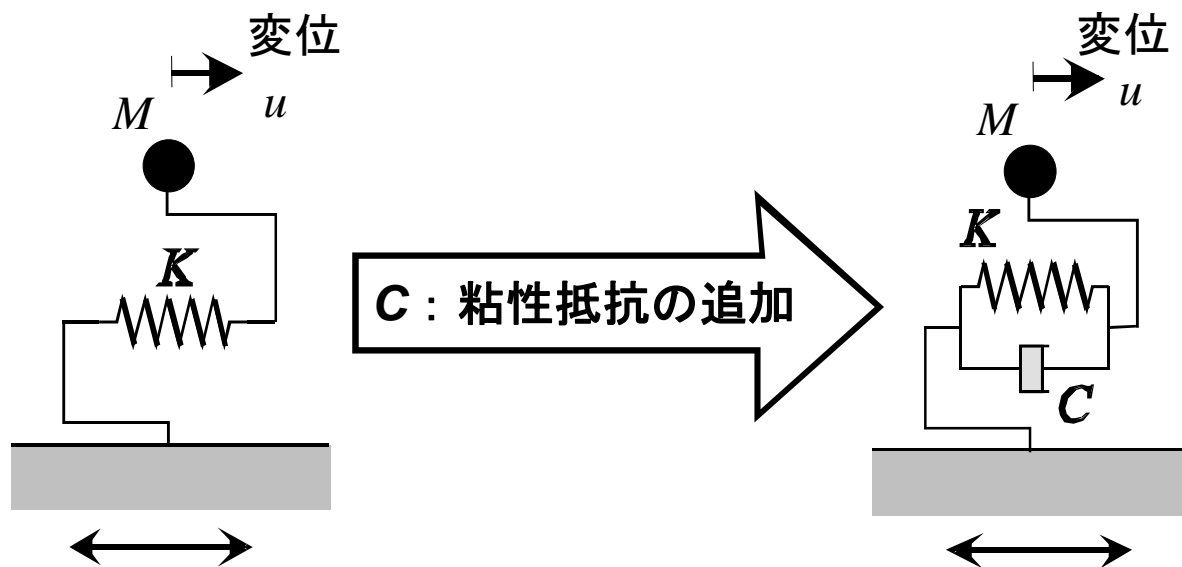
弾塑性タイプ構成則：その能力が問われる。

→繰返し載荷による硬化・軟化・複雑なダイレイタンシー特性が考慮されているか。

粘性減衰のモデル化

全体系の運動方程式に粘性抵抗力を導入する

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} - \mathbf{Q}\mathbf{p} = \mathbf{f}^u$$

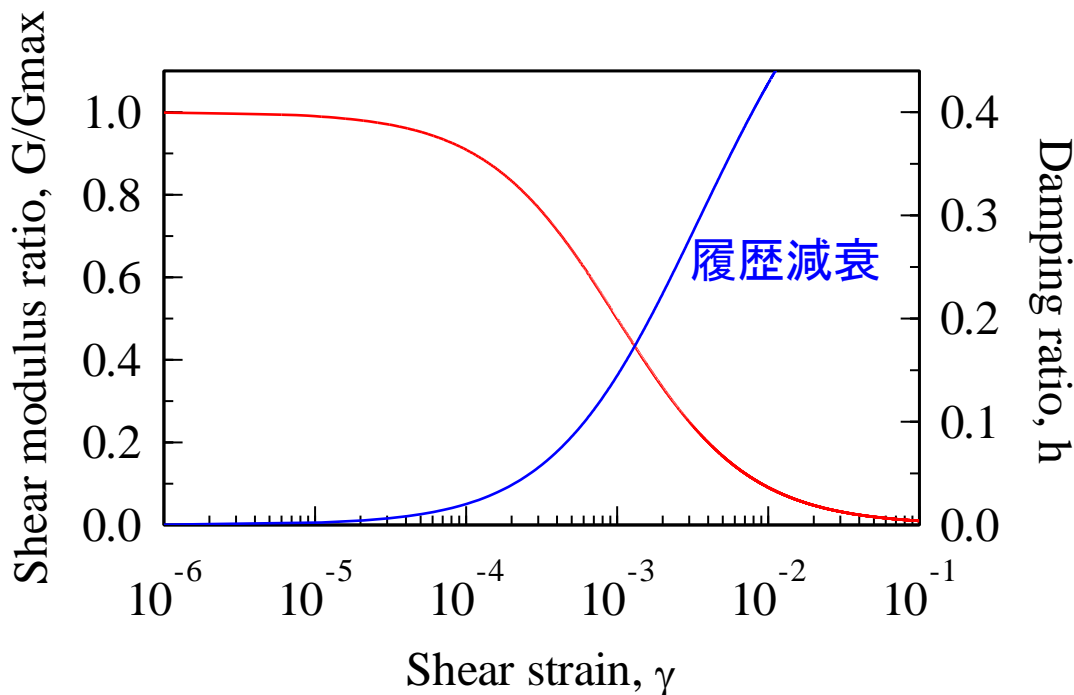


粘性減衰のモデル化

Rayleigh減衰を用いることが多い.

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$$

$$h_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}$$



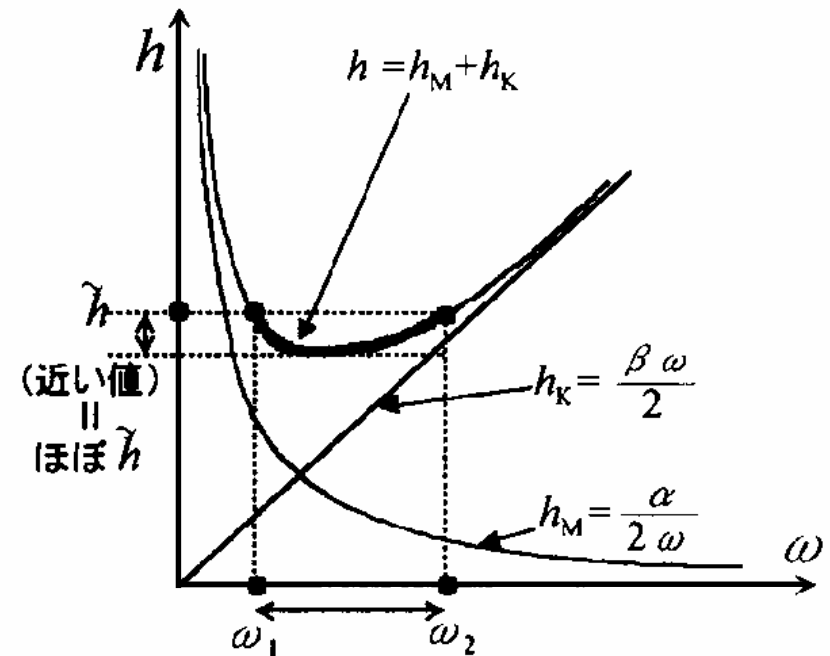
せん断弾性係数・減衰定数とせん断ひずみの関係
(HDモデル、 $\gamma_r=0.001$)

Rayleigh減衰のモデル化

$$h_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad \omega = 2\pi/T$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{4\pi}{T_1 + T_2} \tilde{h} \\ \beta = \frac{T_1 T_2}{\pi(T_1 + T_2)} \tilde{h} \end{cases}$$

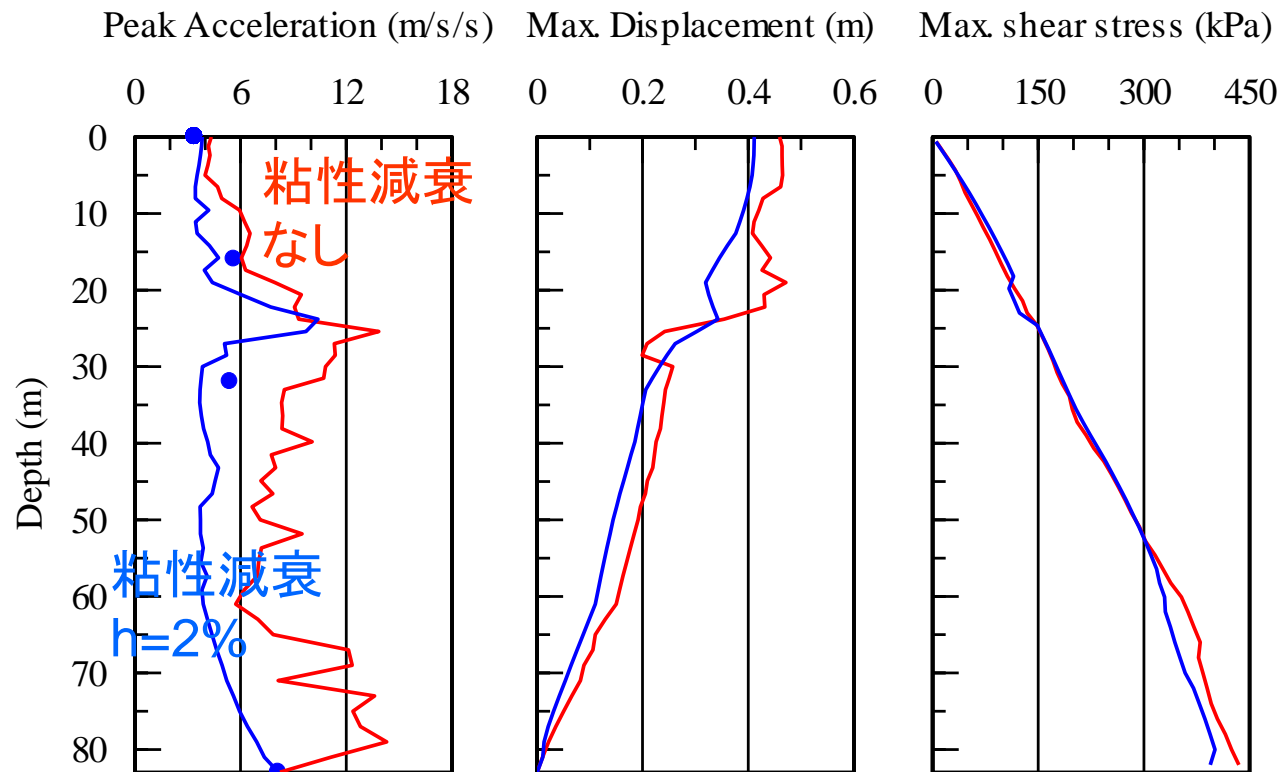
\tilde{h}	α	β
0.01	0.05712	0.0005787
0.02	0.1142	0.001157
0.03	0.1714	0.001736
0.04	0.2285	0.002315
0.05	0.2856	0.002894



固有周期を意識せずにレイリー減衰の α 、 β を決定した例。(周期帯0.2～2.0sに着目した場合)

粘性減衰の影響

ポートアイランド鉛直アレー観測地点



液状化解析のフロー

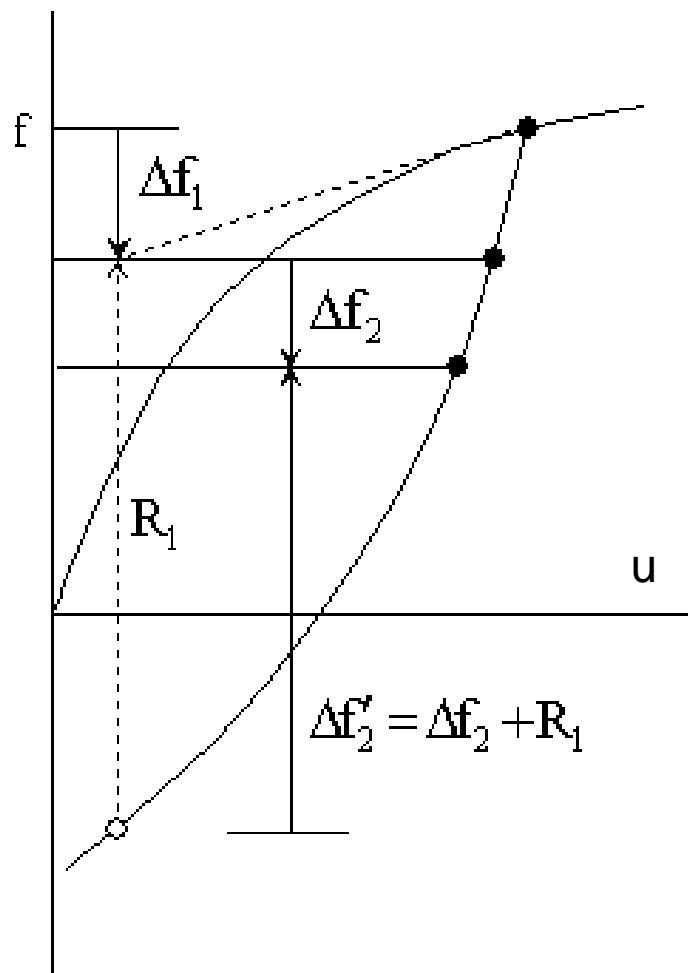
1. 初期応力等の初期条件を設定
2. 時間増分ステップ: $n=n+1$
3. 初期合成法により残差の反復計算: $k=k+1$
4. 残差を計算。
5. 連立方程式を解き、加速度及び水圧の微増分を求め。
6. ステップ $n+1$ の加速度及び水圧の増分を計算。
7. Newmark法によりステップ $n+1$ の速度,変位,水圧を計算。
8. ひずみ,ひずみ増分を計算。
9. 構成式より応力増分を計算。
10. 残差計算の収束判定(NO: GOTO STEP 3)
11. 解析終了の判定(NO: GOTO STEP 2)
12. 解析終了し、結果を出力

動的非線形解析法

動的非線形解析中には、ステップ毎に残差が生じ、この残差を処理するには一般に二つの方法がある。

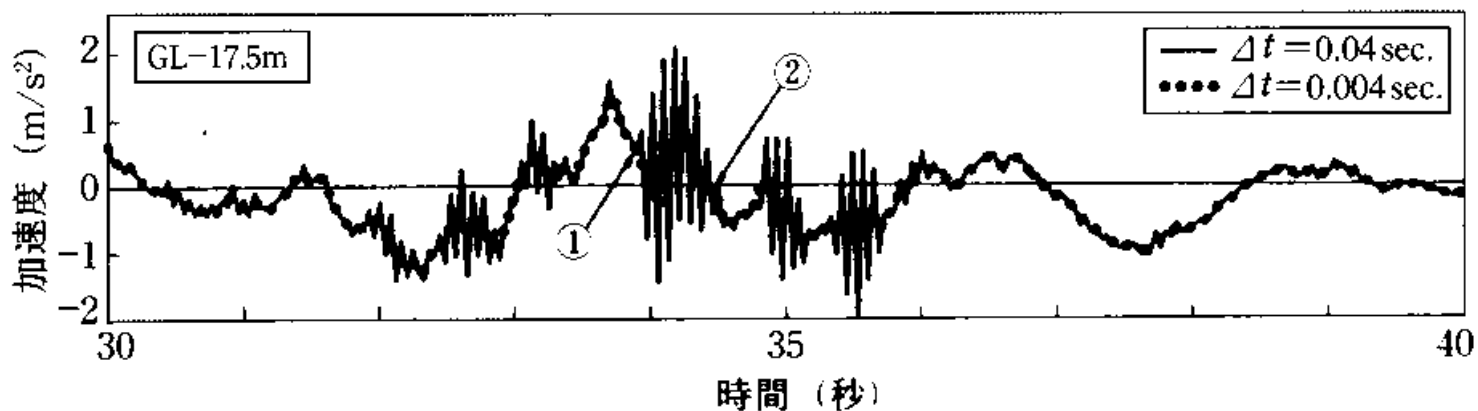
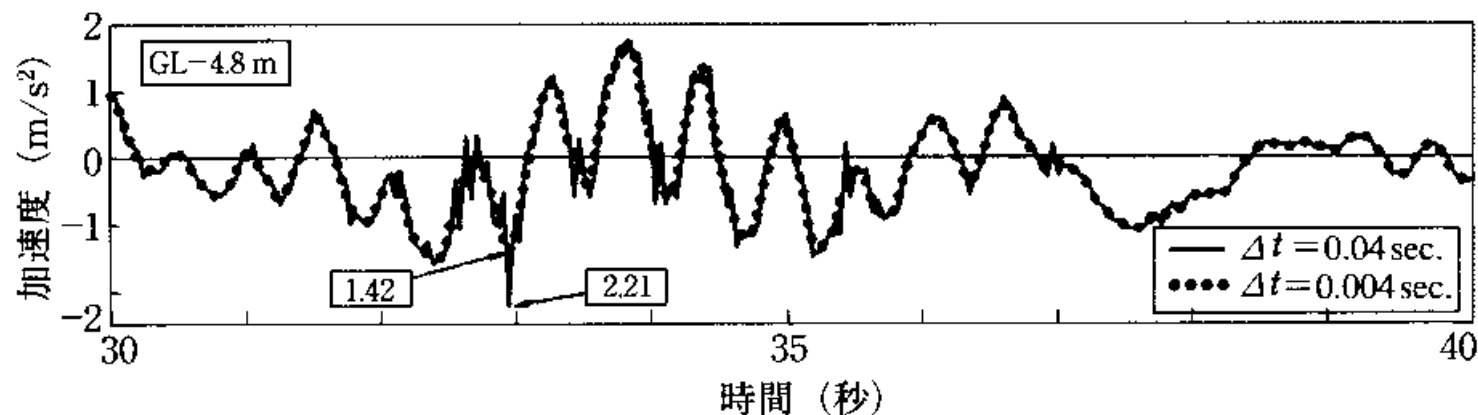
- 次のステップに残差を持ち越す
- 該当ステップで繰返し計算により残差を解消

動的非線形解析法

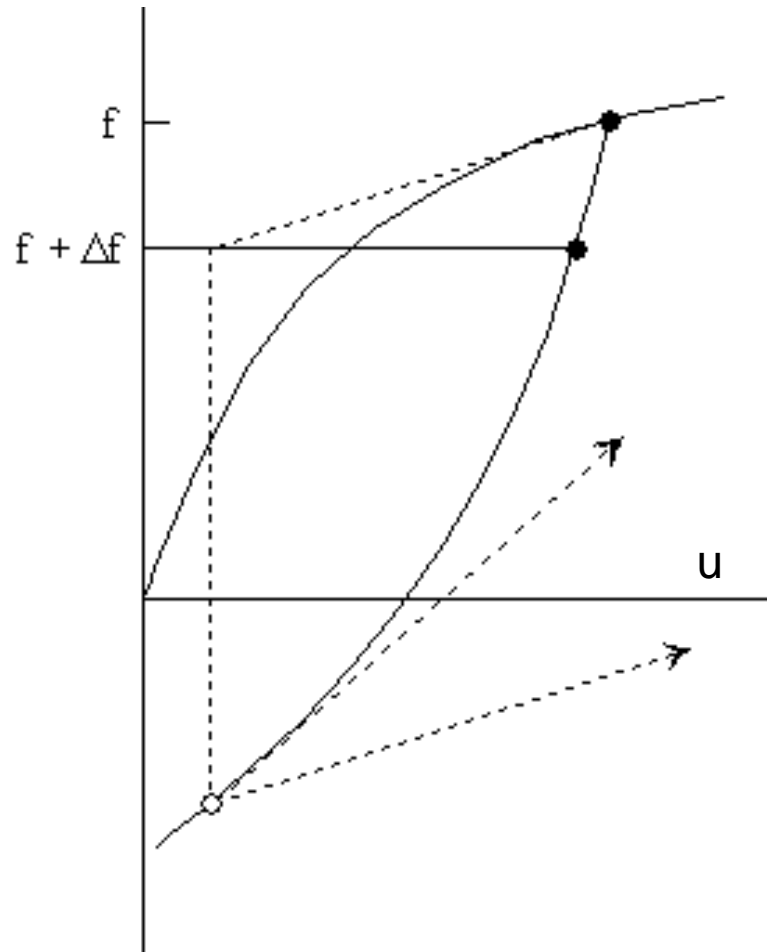


次のステップに残差を持ち越す方法：
次のステップに前ステップの残差を加えた荷重の方向と実際の荷重の方向と逆になる可能性があるから、十分小さな時間増分を用いなければならない。

動的非線形解析法

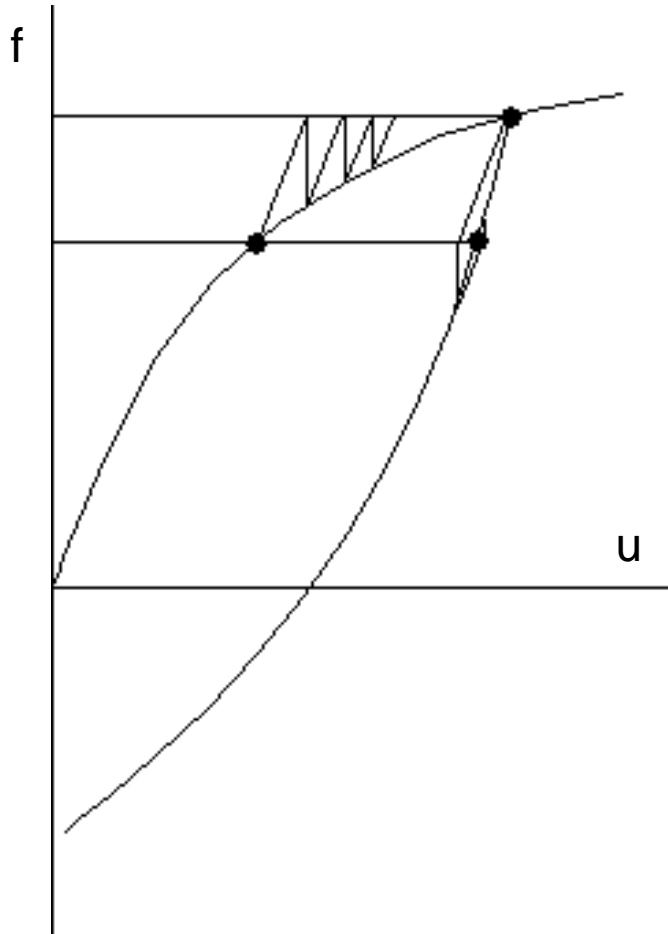


動的非線形解析法



接線剛性法：
(Newton-Raphson法)
この方法には、材料の特性が大きく変わると(例えば、除荷のとき)計算発散の可能性が極めて高い。

動的非線形解析法



初期剛性法：
載荷、除荷ともに計算収束ができる。ただし、収束の速度が遅い。

ライン・サーチとBFGS法を用い、収束計算を加速させる(梁など要素があり場合には上手く機能できない場合もある)。

u - p 形式の支配方程式

力の釣り合い式 (固相＋液相)	$\sigma_{ji,j} - \rho \ddot{u}_i + \rho b_i = 0$
力の釣り合い式 (液相)・連続式	$(k_{ij}(-p_{,j} - \rho_f \ddot{u}_j + \rho_f b_j))_{,i} + \alpha \dot{\varepsilon}_{ii} + \frac{\dot{p}}{Q} = 0$
土骨格の構成式	$\Delta \sigma'_{ij} = D_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl}$
有効応力の原理	$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + p \delta_{ij}$
ひずみの適合条件	$\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2$

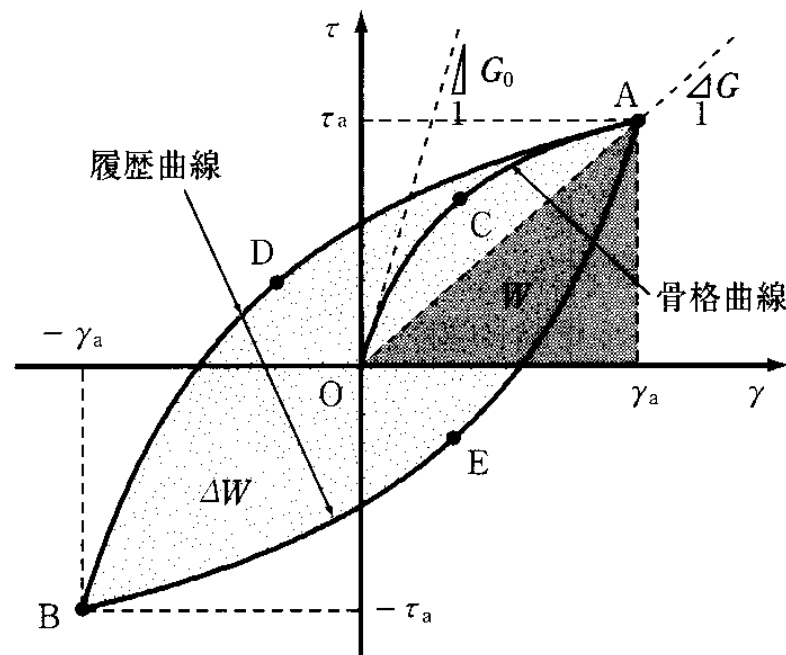
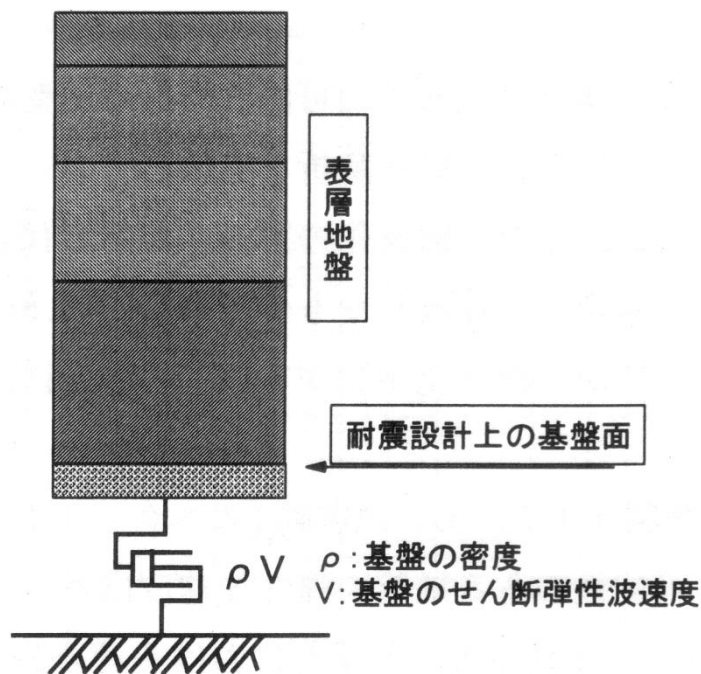
砂の繰り返し非排水時の挙動特性

- 応力～ひずみ関係
- ダイレイタンスー（体積変化・過剰間隙水圧）
- ヒステリシス
- ...

構成則

構成則の タイプ	応力～ ひずみ	ヒステリシ ス	体積変化・ 間隙水圧	構成則の パラメータ
非弾塑性	骨格曲線	Masing則	経験式	少
弾塑性	降伏関数 塑性ポテ ンシャル	載荷・除荷 硬化則	弾塑性構 成則の結 果	多

非線形弾性モデルと弾塑性モデル



一次元動的解析

非線形弾性解析では、水平残留変位のみ

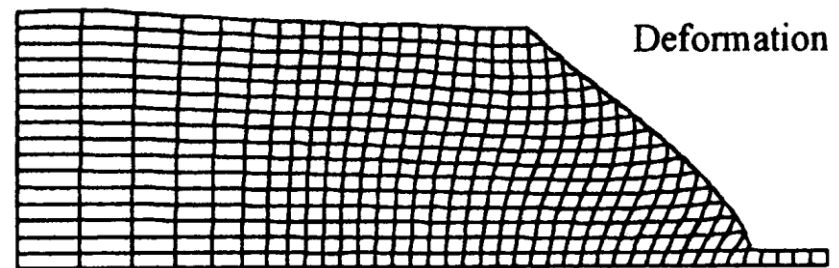
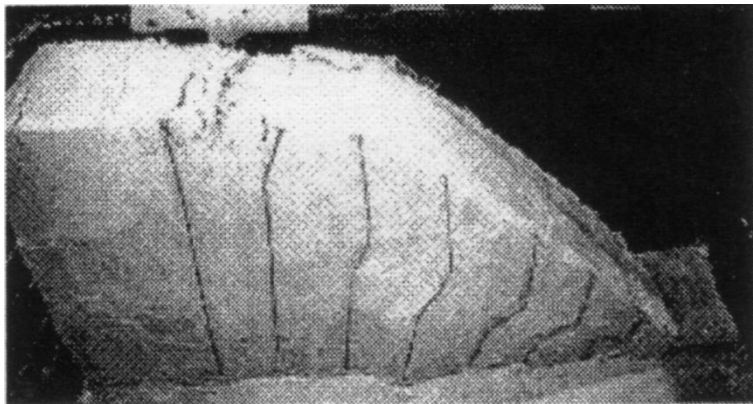
弾塑性解析では、鉛直残留変位もあり

非線形弾性モデルと弾塑性モデル

UWLCでは、HDモデル、ROモデル、UWモデルは弾塑性化された。

UWモデルの弾塑性化に関する詳細は以下の論文を参照下さい。

Wakai, A. & Ugai, K. (2004) : a simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, Soils and Foundations, Vol.44, No.4, pp.83-97.



砂の弾塑性モデル(PZ-Sandモデル)

- 応力～ひずみ関係
- ダイレイタンスー(体積変化・過剰間隙水圧)
- ヒステリシス
- ...

を表現できる。

PZ-Sandモデルには、15個のパラメータが必要で、**要素試験シミュレーション**(UWLC同梱プログラム)とそのチュートリアルにより、静的三軸試験(CD、CUB)及び繰返し三軸試験結果を用いて同定できる。

要素シミュレーション

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} & 1 \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} & 1 \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} & 1 \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} & 0 \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} & 0 \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_2 \\ \Delta \varepsilon_3 \\ \Delta \varepsilon_{12} \\ \Delta \varepsilon_{23} \\ \Delta \varepsilon_{31} \\ \Delta p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta \sigma_1 \\ \Delta \sigma_2 \\ \Delta \sigma_3 \\ \Delta \sigma_{12} \\ \Delta \sigma_{23} \\ \Delta \sigma_{31} \\ \Delta \varepsilon_v \end{Bmatrix}$$

三軸CD試験： $\Delta \sigma_1$ で制御、 $\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = \Delta \sigma_{12} = \Delta \sigma_{23} = \Delta \sigma_{31} = \Delta p = 0$

三軸CU試験： $\Delta \sigma_1$ で制御、 $\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = \Delta \sigma_{12} = \Delta \sigma_{23} = \Delta \sigma_{31} = \Delta \varepsilon_v = 0$

これまでのまとめ

- 液状化解析の支配方程式と離散化
- 液状化解析の注意すべき事項
 - 内部減衰が必要
 - 時間増分を自動的に決める
 - 残差計算のために初期剛性法が必要
- 弾塑性モデル

解析手順

- 問題のモデル化
- 数値解析の実行
- 解析結果の検討

ステップ1. 問題のモデル化

- 与えられた問題の明確化、モデル化
- 解析手法の検討(使用ソフトの選定)
- 構成式の選定、物性値の設定
- 入力地震波の選定
- 解析ケースの設定

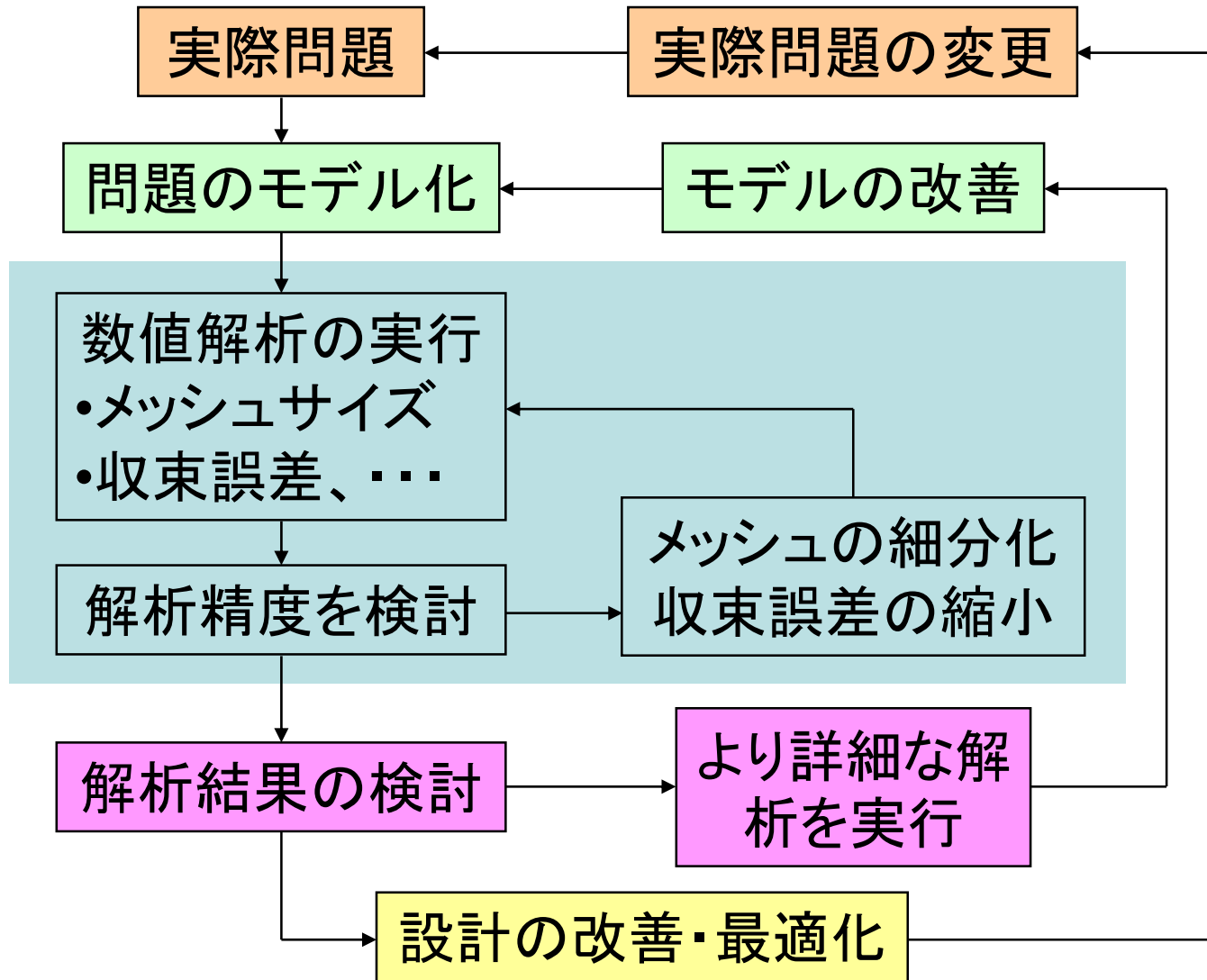
ステップ2. 数値解析の実行

- メッシュ分割
- 収束条件の選定
- データの入力
- 解析の実行
- 解析精度の検討

ステップ3. 解析結果の検討

- 計算ケースの検討
- 解析結果に基づく考察

解析の手順



液状化解析による フィルダムの変形性能評価

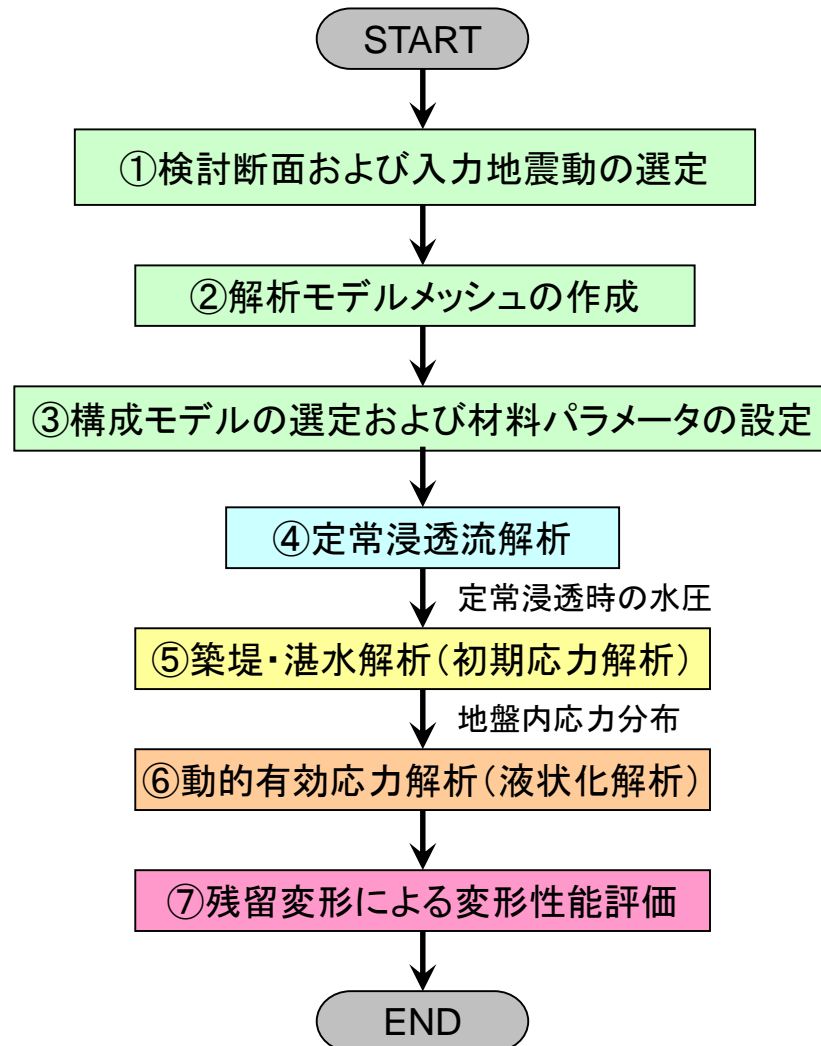
はじめに

- 土構造物の液状化時耐震設計法として、円弧すべり計算時に地震時の過剰間隙水圧を考慮する Δu 法が用いられてきた。
- 現在は、設計に動的有効応力解析による精査が取り入れられ、変形性能照査が行われるケースが増加している。
- しかしながら、変形性能評価が解析コードの選定や液状化パラメータの設定に大きく依存することから、解析結果の信頼性に対し、不安定な要素が残されているのが現状である。

目的

- 液状化解析によるフィルダムの変形性能評価手法を提案する。
- 1971年2月9日のSan Fernando地震により、Lower San FernandoダムとUpper San Fernandoが大きく被災した。この2つのダムを同時に対象とし、提案した手法の有用性を検証する。

検討手法のフロー



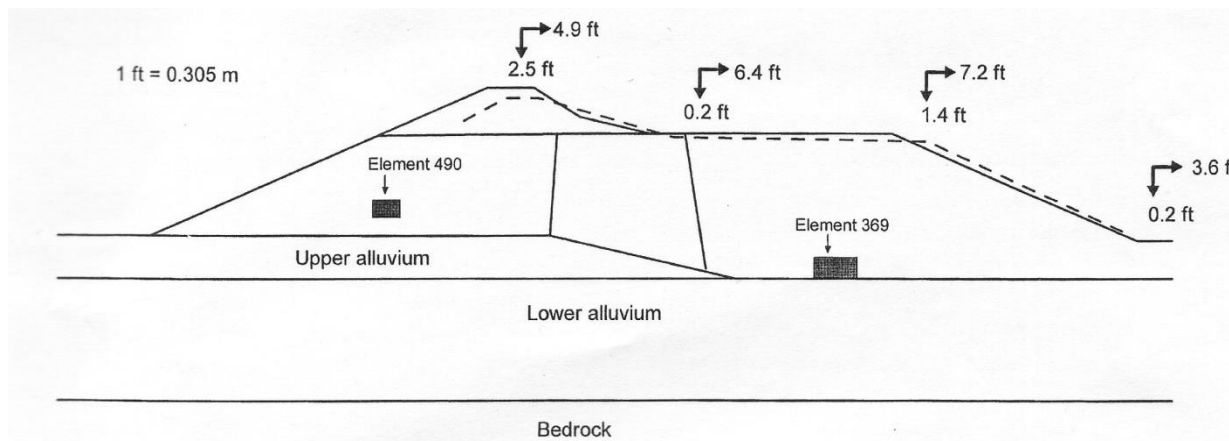
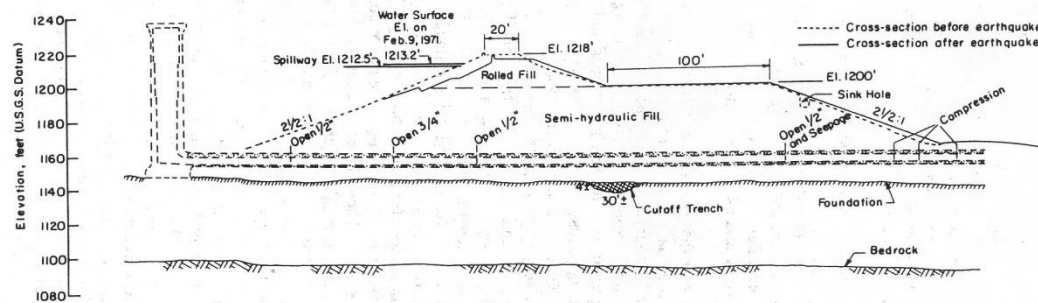
●定常浸透時の水圧を体積力法により外力として与える。

●初期せん断応力が適切に評価された地盤内応力分布を動的有効応力解析に引き継ぐことにより解析精度を向上させる。

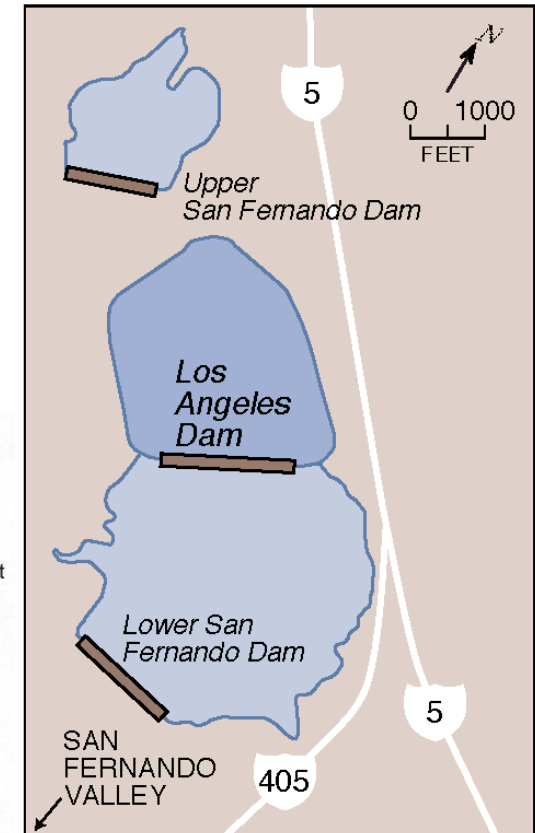
●動的有効応力解析では、上流側水面下を排水境界とする。

Upper San Fernandoダムは大きな変位が生じた。

坝高约24.4m

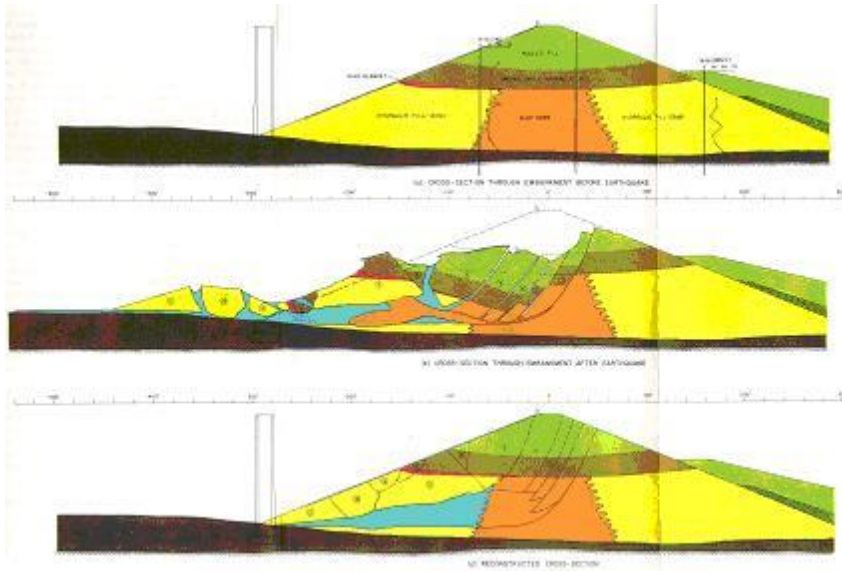


Upper San Fernandoダムの
標準断面(上)と変位状況(下)

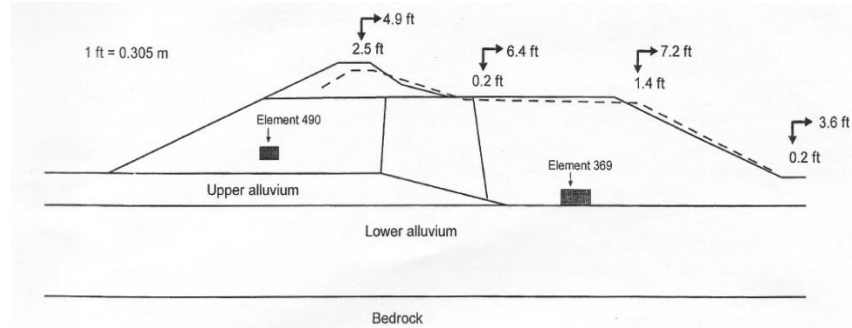


1971年2月9日のサンフェル
ナンド地震で被災した2つの
ダムの材料と施工方法はほ
ぼ同じ。

2つのSan Fernandoダムの被災状況



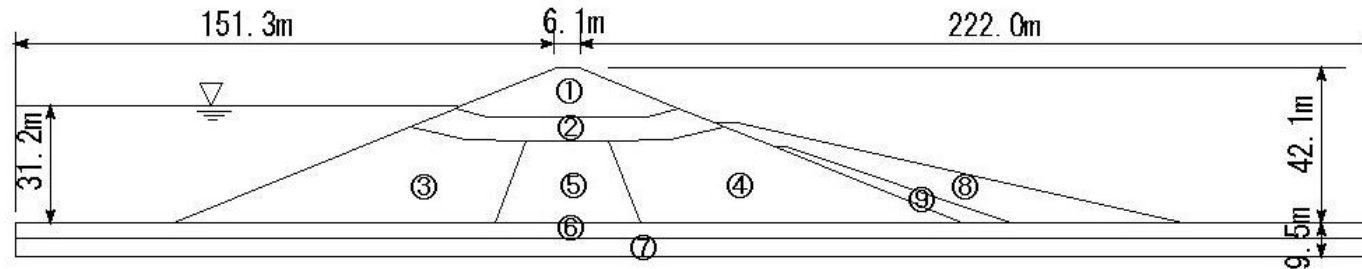
Lower San Fernandoダムの崩壊状況



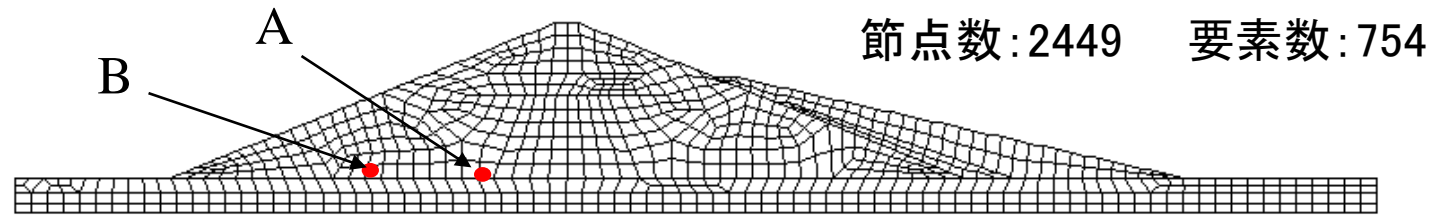
Upper San Fernandoダムは、変形が生じたものの崩壊には至らなかった

Lower San Fernandoダムは、大きく崩壊し、下流側の8万人の住民は一時的に避難しなければならなかった

Lower San Fernandoダムの解析モデル



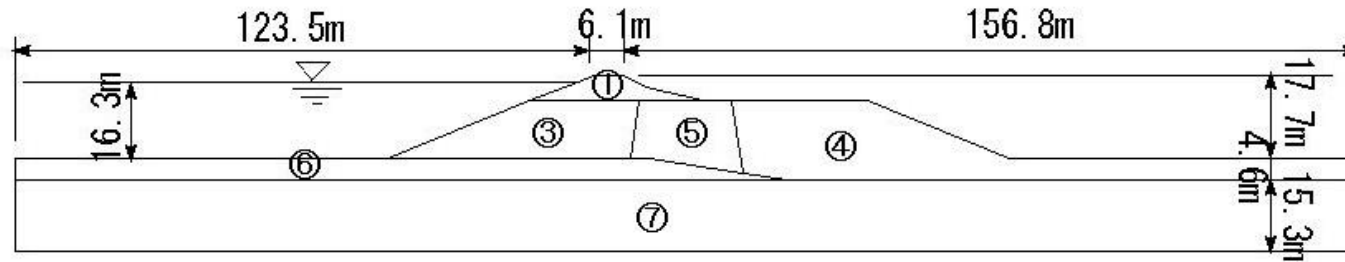
Lower San Fernandoダムの解析モデル



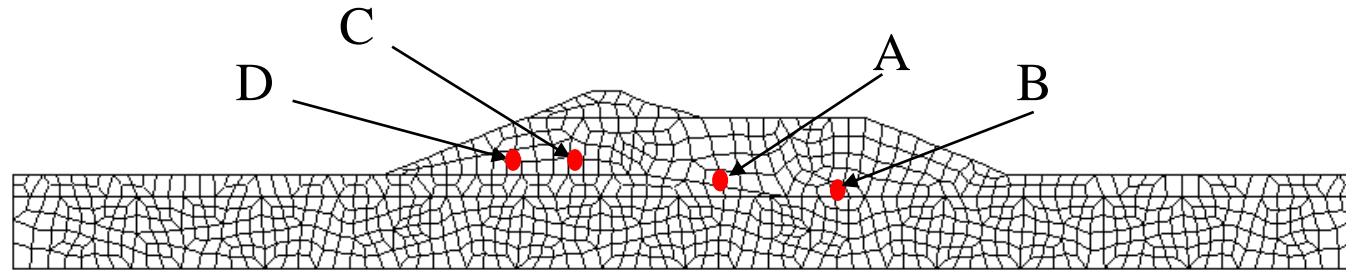
Lower San Fernandoダムの有限要素メッシュ

- ①転圧盛土, ②③④水締め砂質盛土, ⑤コア材料, ⑥上部沖積土, ⑦下部沖積土, ⑧転圧盛土, ⑨ロックブランケット

Upper San Fernandoダムの解析モデル



Upper San Fernandoダムの解析モデル



節点数: 2730 要素数: 851

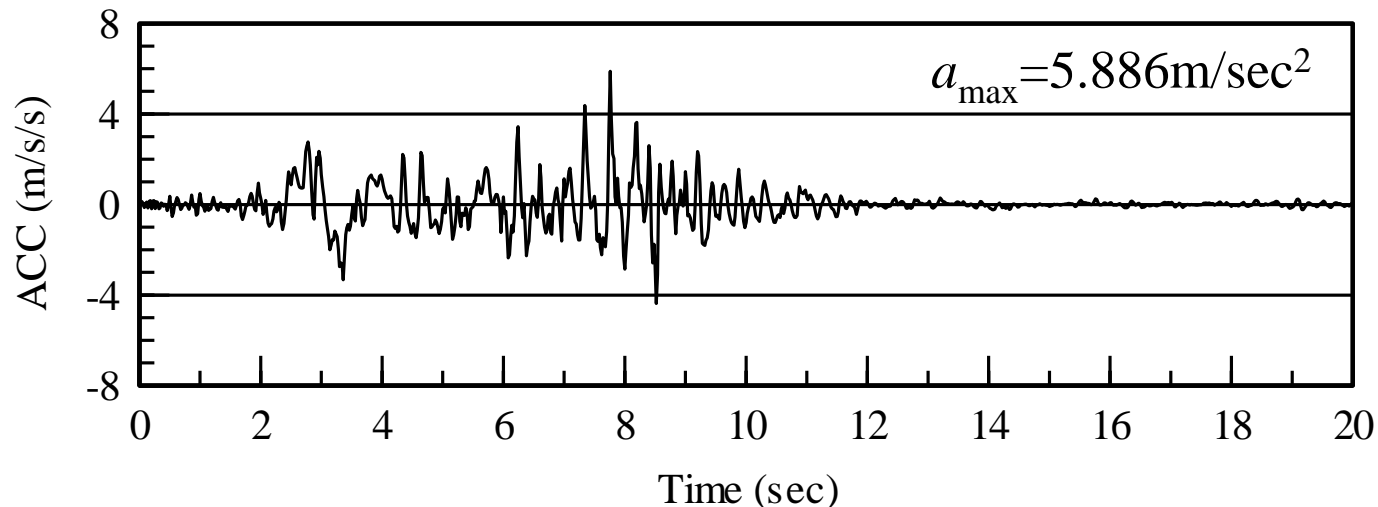
Upper San Fernandoダムの有限要素メッシュ

①転圧盛土, ③④水締め砂質盛土, ⑤コア材料, ⑥上部沖積土,
⑦下部沖積土

入力地震動

● Lower San FernandoダムとUpper San Fernandoダムの中心地点からおよそ6km北に位置するPacoimaダムで観測された修正Pacoima Recordを用いた.

● 地震動終了後の過剰間隙水圧消散過程を考慮したダムの残留沈下量についても検討を実施した. そのため, 動的有効応力解析の際には, 地震動発生から終了までの解析時間を100秒とした.

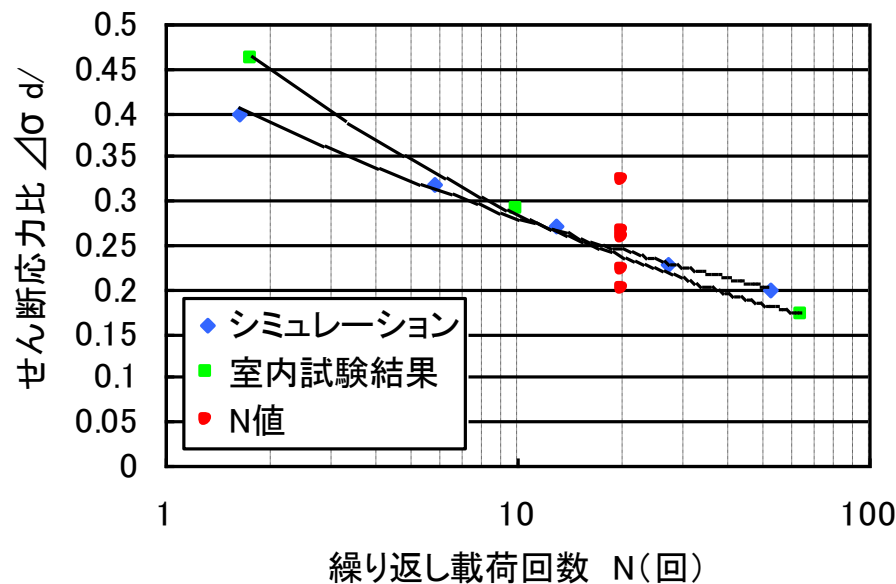


修正Pacoima Recordの時刻歴

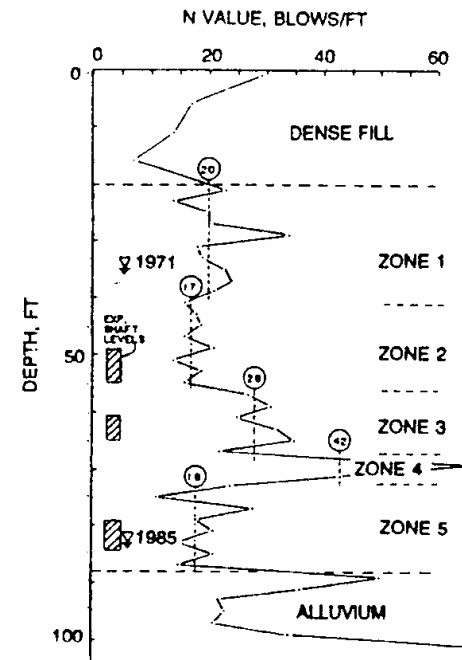
液状化パラメータの同定

●液状化解析プログラムに付属されている要素試験シミュレーションプログラムを用いて、液状化強度曲線をマッチングすることによりパラメータを設定した。

●標準貫入試験結果も分かっているため、道路橋示方書に示されるN値より得られる液状化強度比を併せて図示した。

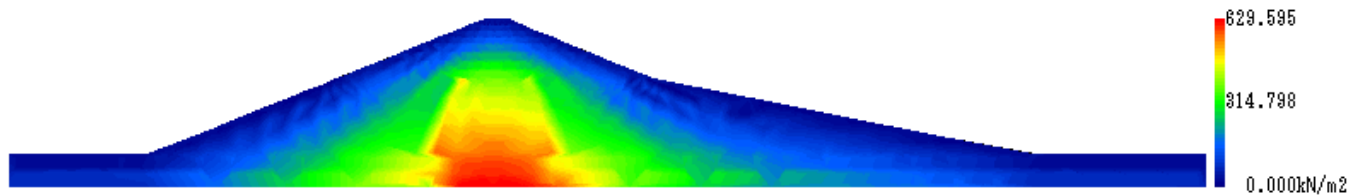
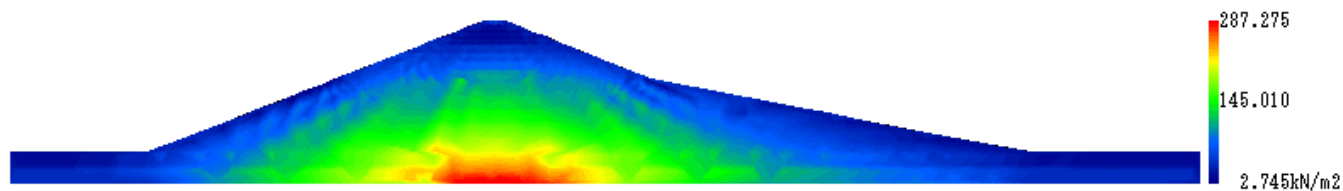
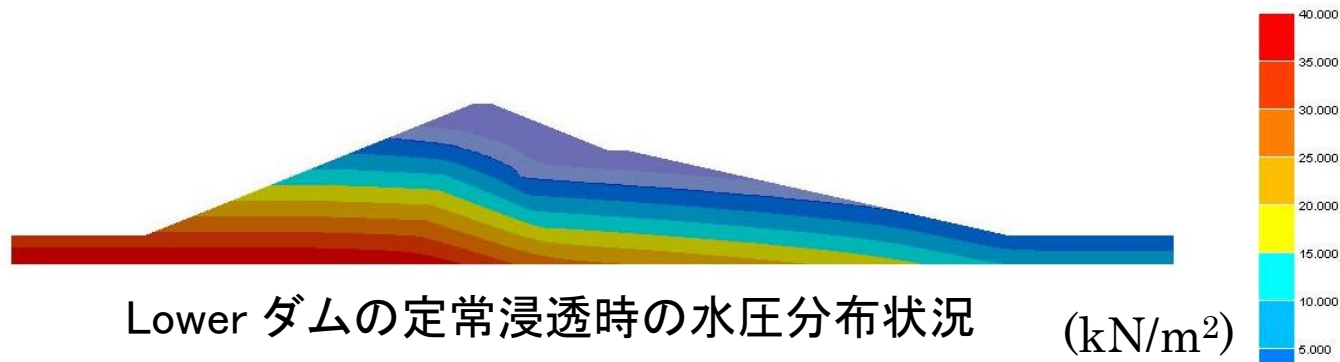


液状化強度曲線

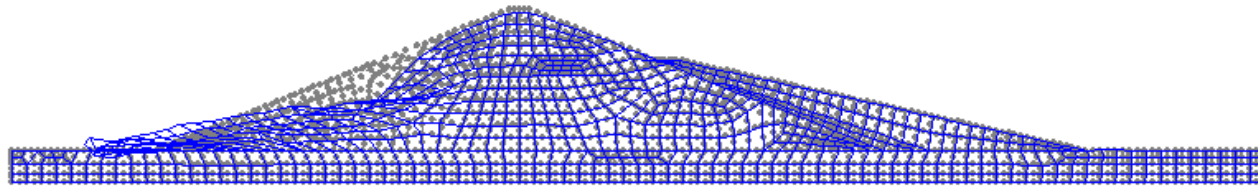


検討地点の標準貫入試験結果

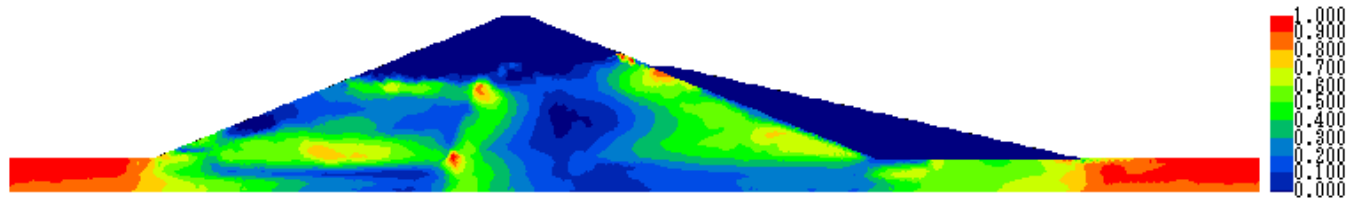
Lowerダムの解析結果(1)



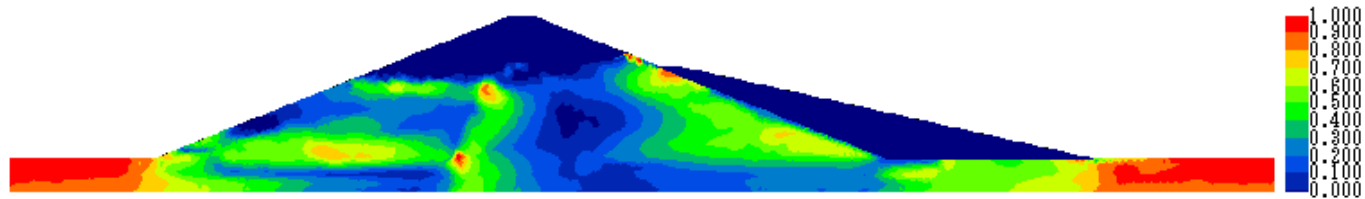
Lowerダムの解析結果(2)



Lowerダムの残留変形 ($t=100$ 秒) 変形倍率: 1.0倍



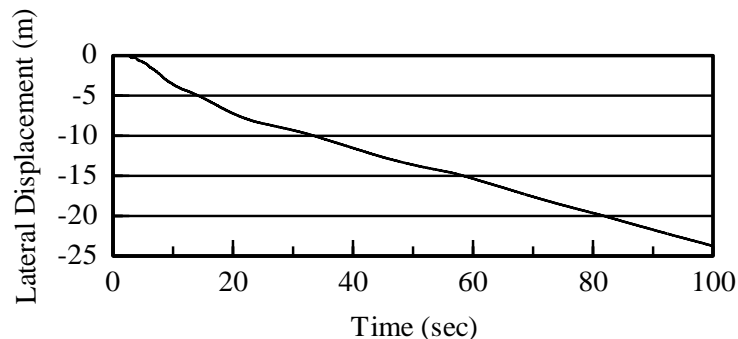
(a) $t=10$ 秒



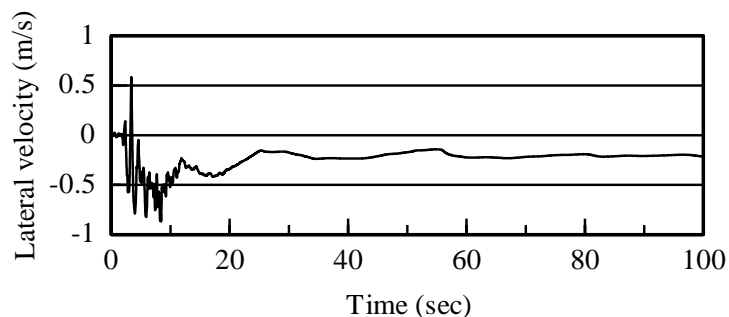
(b) $t=60$ 秒

Lowerダムの地震による過剰間隙水圧 比

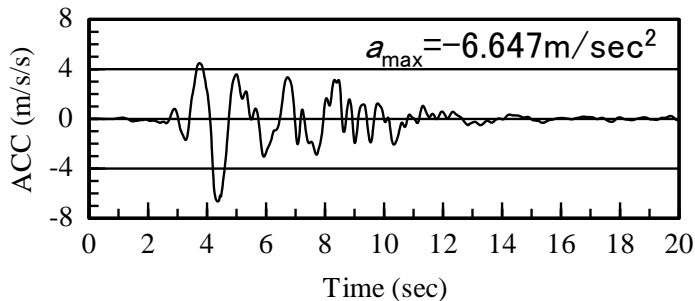
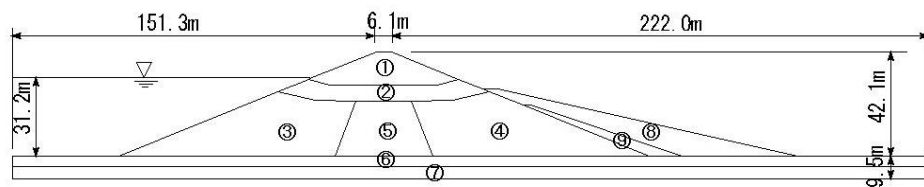
Lowerダムの解析結果(3)



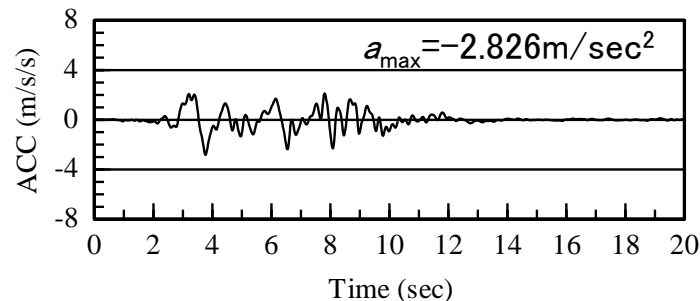
Lowerダム上流側法尻の水平変位の時刻歴



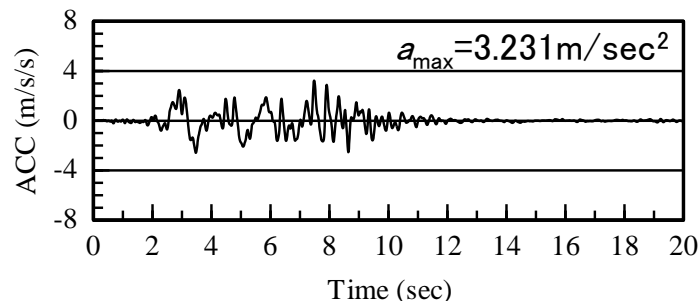
Lowerダム上流側法尻の水平変位速度の時刻歴



Lowerダム天端中心(H=51.6m)

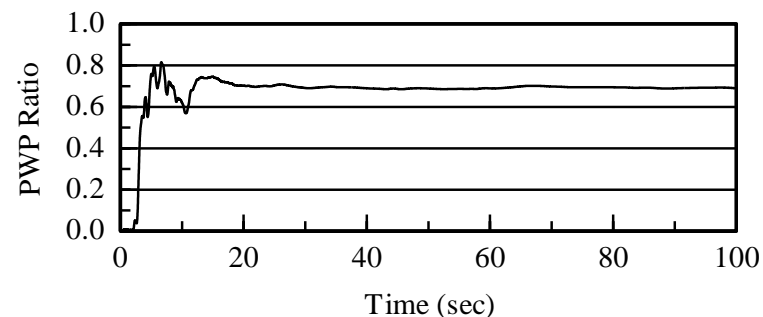
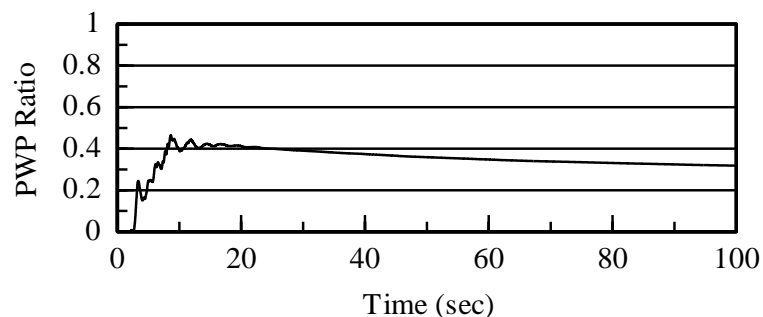
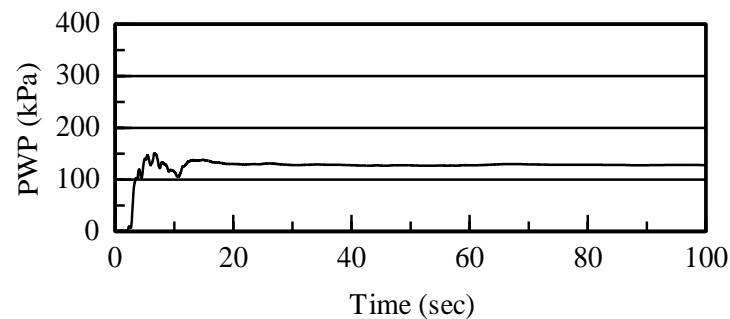
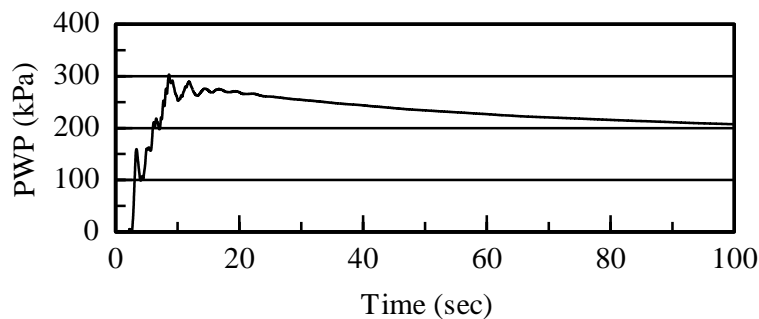


Lowerダムのコア天端中心(H=35.0m)



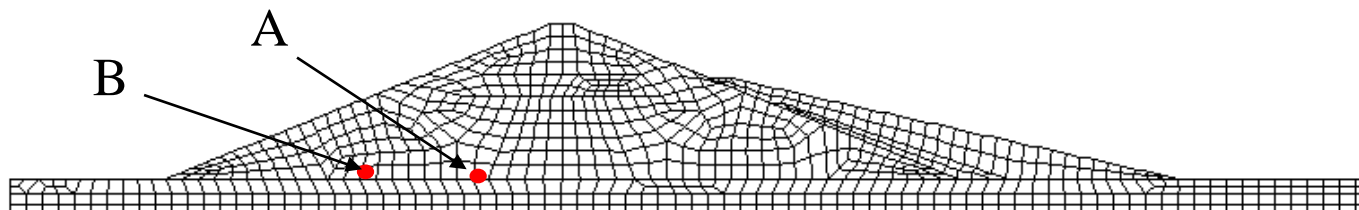
Lowerダムのコア底部中心(H=9.5m)

Lowerダムの解析結果(4)

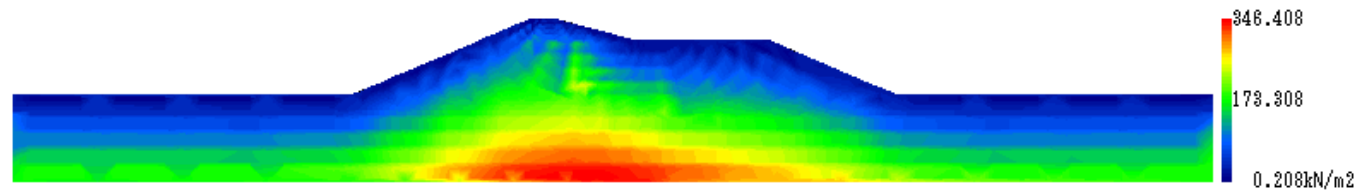
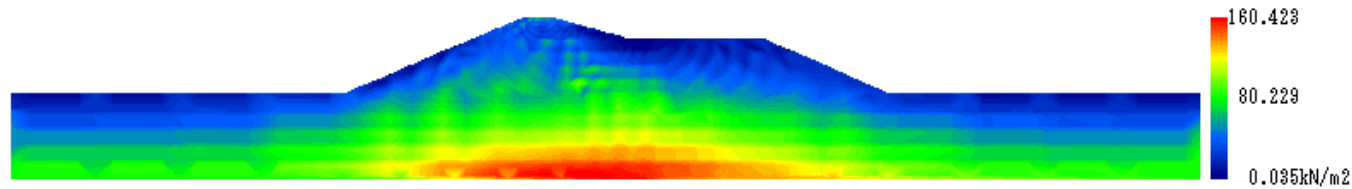
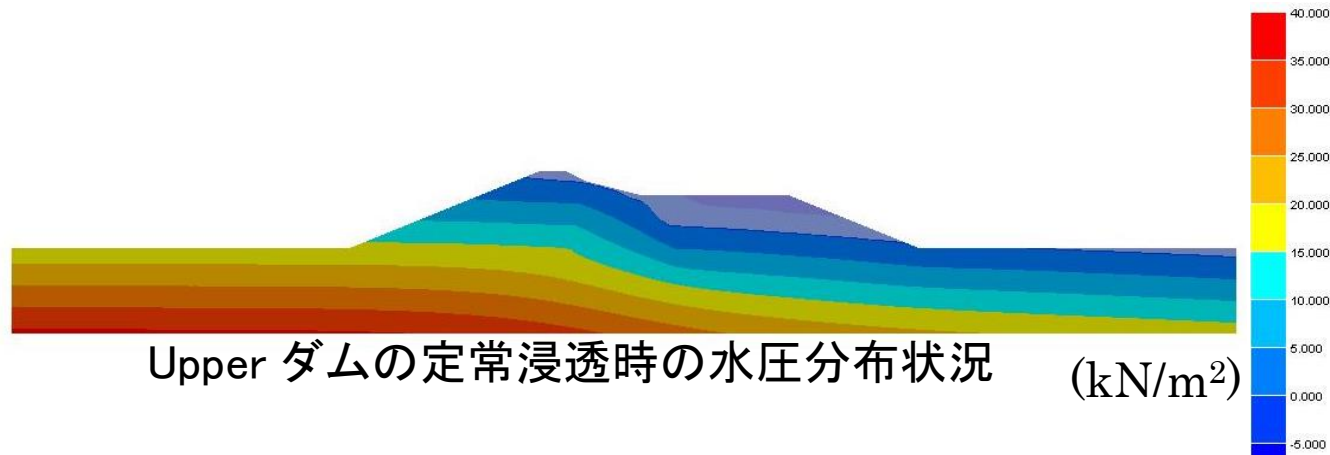


Lowerダムの点Aでの過剰間隙
水圧と過剰間隙水圧比時刻歴

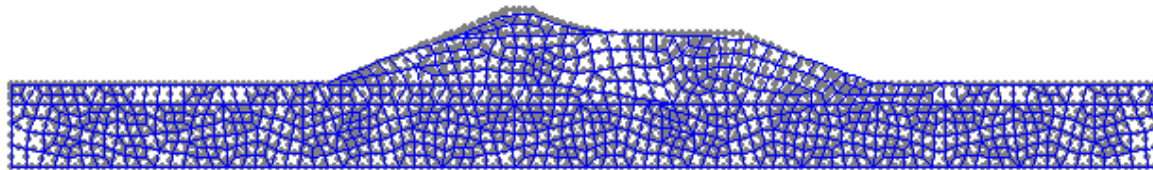
Lowerダムの点Bでの過剰間隙
水圧と過剰間隙水圧比時刻歴



Upperダムの解析結果(1)

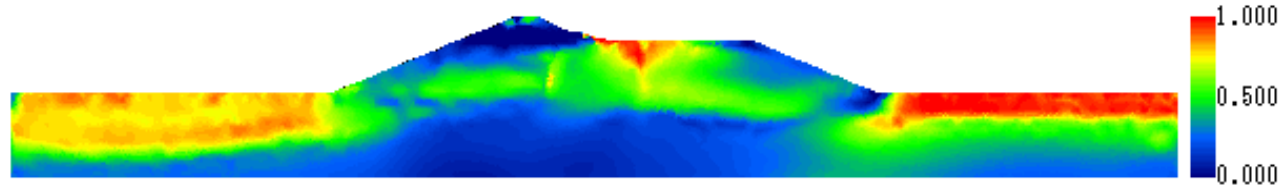


Upperダムの解析結果(2)

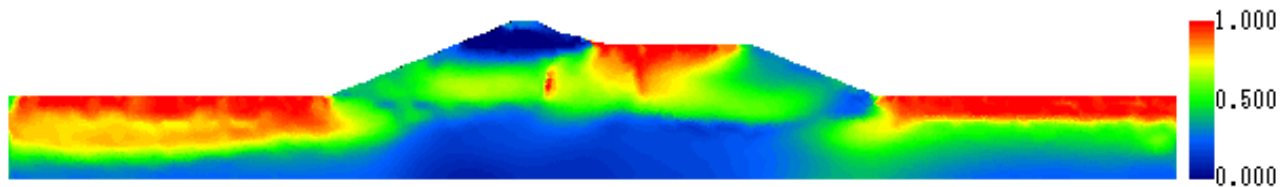


変形倍率: 1.0倍

Upperダムの残留変形 ($t=100$ 秒)



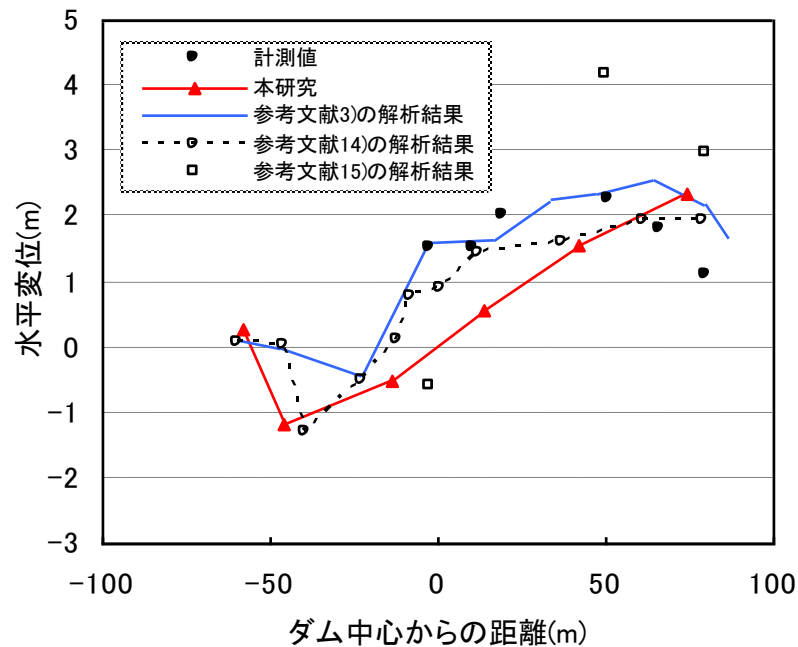
(a) $t=10$ 秒



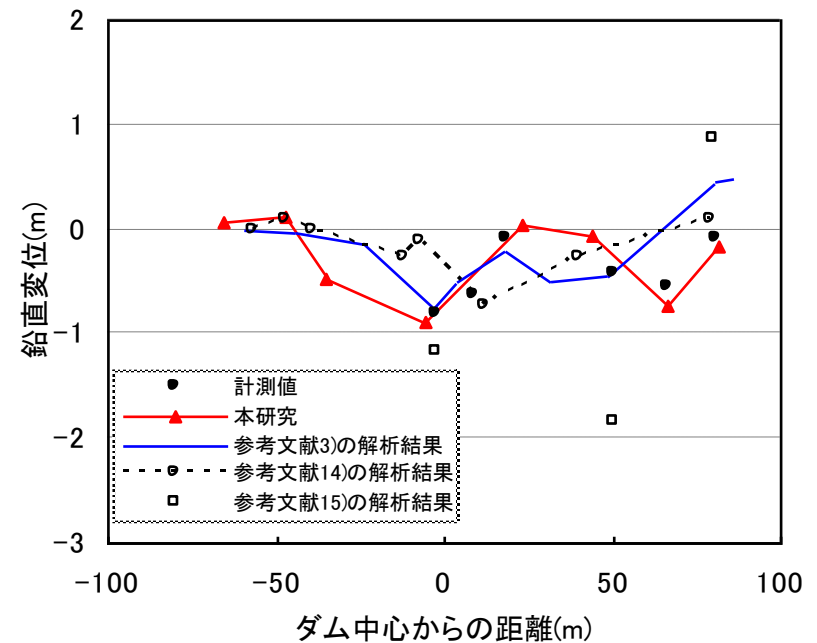
(b) $t=60$ 秒

Upperダムの地震による過剰間隙水圧比

Upperダムの解析結果(3)



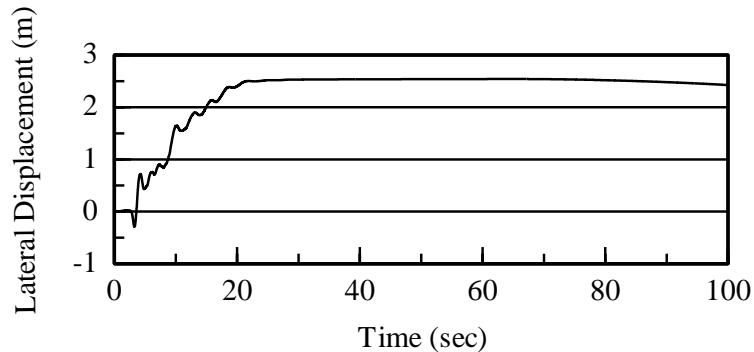
水平変位



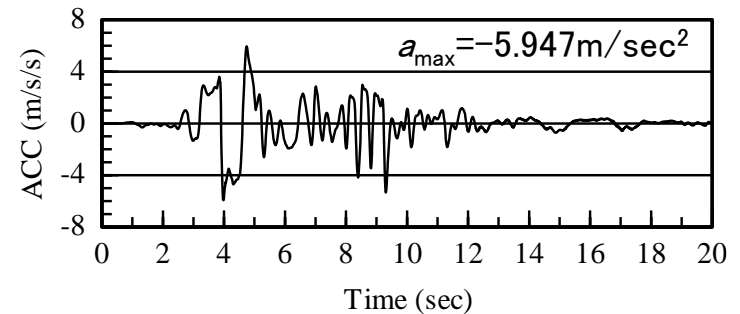
鉛直変位

Upperダム表面の残留変位

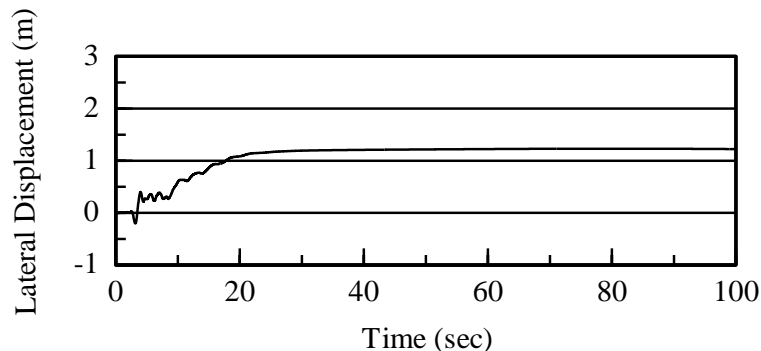
Upperダムの解析結果(4)



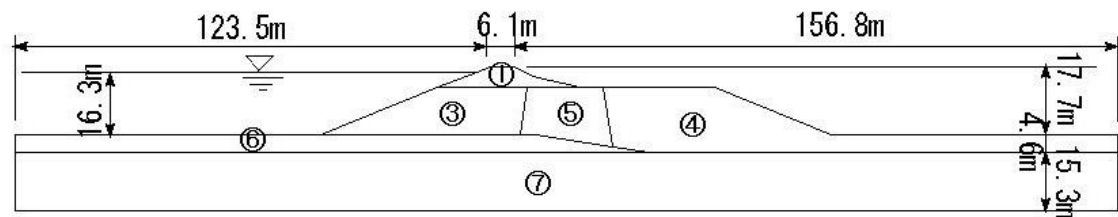
Upperダム下流側裏小段での水平変位の時刻歴



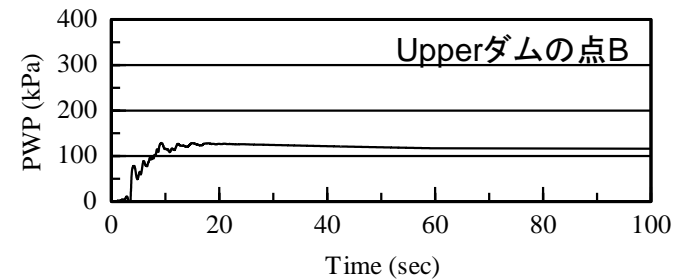
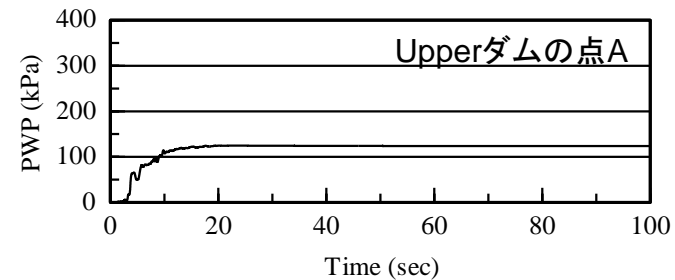
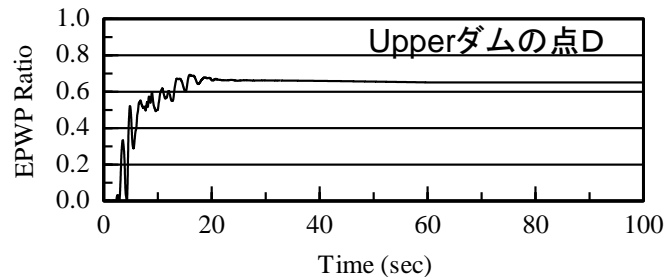
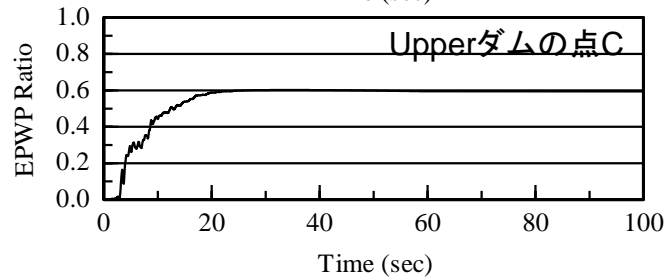
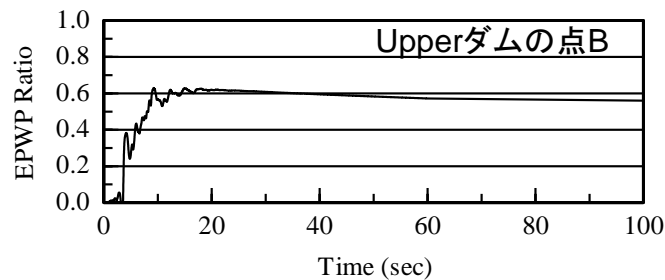
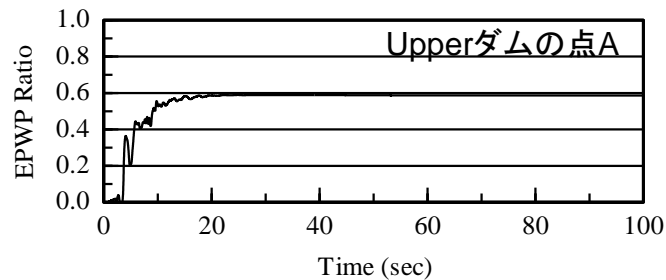
Upperダム天端中心の加速度時刻歴 (H=37.6m)



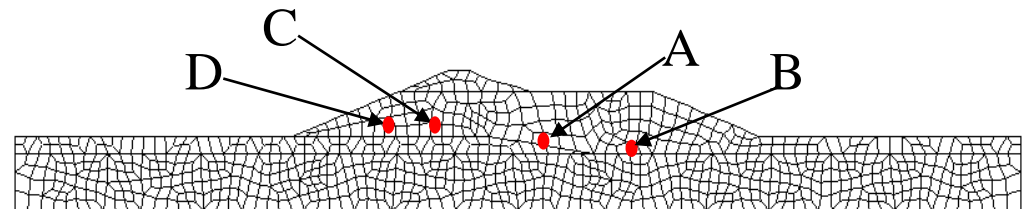
Upperダム下流側法尻付近の水平変位の時刻歴



Upperダムの解析結果(5)



Upperダムの点A, Bでの過剰間隙水圧時刻歴



Upperダムにおける点A, B, C, Dでの過剰間隙水圧比時刻歴

結論

- 1971年2月9日のSan Fernando地震において被災した2つのダムを同時に対象として、浸透流解析、築堤・湛水解析および動的有効応力弾塑性解析を行い、観測記録との比較・検討を実施した上で残留変形が生じるメカニズムを解析的に明らかにした。
- 崩壊に至ったLower San Fernandoダムと残留変形が生じたものの崩壊には至らなかったUpper San Fernandoダムの両者において観測記録と解析結果は良く整合することがわかった。
- 要素試験シミュレーションより精度の高い液状化パラメータが得られることを明らかにするとともに、N値から妥当なパラメータが得られる可能性を示した。
- 実施した解析により、提案した手法を用いて合理的なフィルダムの変形性能評価を実施できることを示した。

まとめ

- 液状化解析の支配方程式と離散化
- 液状化解析の注意すべき事項
 - 内部減衰が必要
 - 時間増分を自動的に決める
 - 残差計算のために初期剛性法が必要
- 弾塑性モデル
- 解析手順