京都大学計算科学ユニット
第2回研究交流会
2012年6月26日

地盤の変形・破壊に伴う加速度発生・伝搬シミュレーション

名古屋大学
減災連携研究センター
大学院工学研究科 社会基盤工学専攻

野田 利弘

発表の流れ

① はじめに

土質力学／地盤力学のこれまでと現状

② 二相系混合体理論の飽和土への適用

「基礎方程式の速度型」と増分型構成式の導入

③ 解析事例1

人工島の造成と耐震性評価

④ 解析事例2

加速度発生と伝搬のシミュレーション

土質材料の特徴

自然材料であるがゆえに

・現場ごとに土が異なる
・不均質、非一様
・極めて複雑な挙動
・初期条件も境界条件も十分分からない

このような土質材料に対して、地盤力学では
どのような解析(数値シミュレーション)を行ってきたか？

地盤工学では

これまでは、もっぱら、

設計･･･破壊と変形は別々に扱う。

予測･･･（T. W. Lambe, 1973）

Class-A : 事前の地盤情報のみによる予測解析

Class-B:施工中の情報をもとに以後の予測を行う解析（動態観測手法）

Class-C : 施工後の情報をもとに行う解析

土質力学のこれまで　･･･教科書から

1948年のTaylorの教科書以降、目次立てはほとんど変わっていない。つまり、

透水･･･Laplace（楕円型）

圧密･･･熱伝導（放物型）

破壊･･･剛塑性つり合い（双曲型）

⇒お互いに参照することなく、

問題対蹠的。別々の理論の「寄せ集め」!?

動力学は現れてこない。

⇒**静力学と動力学は別々に発展**

土質力学のこれまで　・・・研究現場その1～構成式編

砂の力学と粘土の力学は別々

(a)砂の力学・・・

・ゆるい砂と密な砂の挙動は、別々の構成式または別々の材料定数で説明

・ゆるい砂の構成式では、液状化は説明できても、締固めはできないし、排水時のせん断挙動もできない

・液状化後の圧密沈下はできなくてもよい

(b)粘土の力学・・・

・正規圧密人工粘土にしか使えない構成式を自然堆積粘土の圧密解析に使用する

・粘土の「2次圧密」は、はじめから（時間依存性を仕組んだ）粘塑性モデルで説明するから、与えられた粘土が2次圧密するかどうかは視野の外

(c)中間土の力学・・・

・無数の構成式を作る訳にも行かず手付かず

研究現場その2～地盤解析・シミュレーション編

「専用プログラム」による解析がほとんど

「素焼きの中の水の流れ専用」・・・変形しない
「圧密変形専用」・・・支持力はできない
「粘土地盤支持力専用」・・・進行性破壊は「今後の課題」
「液状化専用」・・・粘土はできない
「静的専用」、「動的専用」 etc, etc.

専用プログラム・・・
地盤に何が発生するかを教えない。
予期した現象しか現れない。

これまでの土質力学「体系」は？

地盤力学（土質力学）は、
極端に専門化・細分化しているのではないか！？

学問の進歩には、
専門化・細分化はつきものだが、
行き過ぎると弊害がある。

このため、
地盤工学に本来必要とされている諸問題にも
十分対応できていないのではないか？

これに対し、何を目指しているか

・連続体力学・弾塑性力学を基礎にした地盤力学理論の体系化、

・学術的・工学的実践のための数値解析コードの開発

一言で言えば・・・

All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration

砂～粘土、泥岩までの全ての土を統一的に捉え、

変形から破壊に至るまでの全ての力学現象を扱って

動的・静的を問わずあらゆる外力条件下で解析する

もっと具体的に言うと、

動的でも静的でもある外力が
粘土、砂、中間土地盤に作用したとき、
壊れるか変形だけで済むか、液状化か締固めか、
地震の後にはどうなるか、つまり、
一体何がどのように起こるかを教えてくれるプログラム
⇒困ったときに答えを出してくれるプログラム

そのために何をしているか？　～支配方程式～

① SYS Cam-clay model（上・下負荷面カムクレイモデル）
（「エンジン」）の開発

土骨格の骨格構造（*構造・過圧密・異方性*）の働き
が記述できる弾塑性構成式（材料非線形性）
→砂～中間土～自然粘土を一貫して説明

② 水～土連成有限変形計算（「シャーシ」）の開発

水～土連成有限変形理論
（慣性力対応, 幾何的非線形性）
→変形か破壊か、動的か静的か、
計算事象を特定しない

本日は、名大地盤研の計算事例を2つ示します。
その前に支配方程式から、お話しします。

② 二相系混合体理論の飽和土への適用

「基礎方程式の速度型」と増分型構成式の導入

（1）幾何形状変化の影響（幾何的非線形性）

（2）増分型構成式の使用（材料非線形性）

ここでは**有限変形理論**に基づくupdated Lagrangianによる定式化をする。

それで，**速度型運動方程式**を用いることになる。

（躍度（加加速度）が現れる。）

二相系混合体理論の飽和土への適用

（**西村直志**　地盤工学ハンドブック）

(a) *u-p* formulationに基づく飽和土の運動方程式

$$\rho_s \dot{\boldsymbol{v}}_s + \rho_f \dot{\boldsymbol{v}}_f = \mathrm{div}\,\boldsymbol{T} + \rho \boldsymbol{b}$$

ρ_s, ρ_f :固相（土骨格）と液相（間隙水）の密度　　ρ :混合体（飽和土）の密度

$\dot{\boldsymbol{v}}_s, \dot{\boldsymbol{v}}_f$:固相と液相の加速度　　$\boldsymbol{T}$:全応力　　$\boldsymbol{b}$:単位質量あたりの物体力

ここで　$\dot{\boldsymbol{v}}_s >> \dot{\boldsymbol{v}}_f - \dot{\boldsymbol{v}}_s$　を仮定し，次式を得る

$$\rho \dot{\boldsymbol{v}}_s = \mathrm{div}\boldsymbol{T} + \rho \boldsymbol{b}$$

・・・ *u-p* formulation

混合体（飽和土）の運動方程式であるが、見かけ上、固相（土骨格）の運動だけを決めているかのように、扱われる。

(a)' *u-p* formulationに基づく飽和土の速度型運動方程式

増分形構成式を用いるため，この式について
土骨格から見た物質時間微分をとると，次式。

$$\rho \dot{\boldsymbol{v}}_s + \left\{ n \mathrm{D}_s \rho^f + \rho^f \left(\mathrm{tr} \boldsymbol{D}_s \right) \right\} \left(\boldsymbol{v}_s - \boldsymbol{b} \right) = \mathrm{div}\, \dot{\boldsymbol{S}}_t$$

ρ^f :水単体の密度

$\boldsymbol{D}_s$:固相のストレッチング

D_s :固相から見た物質時間微分

ここに，

$$\dot{\boldsymbol{S}}_t = \mathrm{D}_s \boldsymbol{T} + (\mathrm{tr}\, \boldsymbol{D}_s) \boldsymbol{T} - \boldsymbol{T} \boldsymbol{L}_s^T$$

$\boldsymbol{L}_s$:固相の速度勾配

(b) 水～土骨格連成式

(b-1)飽和土の連続式（土骨格と間隙水の幾何学的制約条件）

土粒子は非圧縮，水は圧縮

$$\mathrm{div}\,\boldsymbol{v}_s + \mathrm{div}\{n(\boldsymbol{v}_f - \boldsymbol{v}_s)\} = -\frac{n}{\rho^f}\mathrm{D}_f \rho^f$$

$= 0$（水が**非圧縮**の場合）

D_f :液相から見た物質時間微分

(b-2)間隙水の平均的な流速式　・・・「ダルシー則」

液相の運動に等方性を仮定

$$n(\boldsymbol{v}_f - \boldsymbol{v}_s) = -\frac{k}{\gamma_w}(\mathrm{grad}\, u - \rho^f \boldsymbol{b}) - \dot{\boldsymbol{v}}_s \times \frac{\rho^f k}{\gamma_w}$$

$\gamma_w = \rho^f g$:水の単位体積重量

(c) 有効応力原理, (d)土骨格の構成式

(c)有効応力原理

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{T}' - u\boldsymbol{I}$$

(d)土骨格の弾塑性構成式　・・・　SYS Cam-clay model

$$\mathring{\boldsymbol{T}}' = L[\boldsymbol{D}_s]$$

$$\mathring{\boldsymbol{T}}' = \mathrm{D}_s\boldsymbol{T}' + \boldsymbol{T}'\boldsymbol{\Omega}_s - \boldsymbol{\Omega}_s\boldsymbol{T}'$$

：有効応力についてのGreen-Nagdhi速度

今日はこの構成式(名大)については、説明を省略します。

(e) 適合条件式, (d)境界条件

(e)適合条件式

$$\boldsymbol{L}_s = \frac{\partial \boldsymbol{v}_s}{\partial \boldsymbol{x}}$$

(f)境界条件

$$\Gamma = \Gamma_{\boldsymbol{v}} + \Gamma_{\boldsymbol{t}} = \Gamma_{\boldsymbol{q}} + \Gamma_h$$

解くべき常微分連立一次方程式

速度型運動方程式･･･弱形式と有限要素法の適用,

水～土骨格連成式･･･田村武の方法(1978年)の適用　等

$$\begin{bmatrix} \mathrm{M} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d^2}{dt^2} \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{v}\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\mathrm{L}^{\mathrm{T}} + \mathrm{L_c}^{\mathrm{T}}) \\ \mathrm{L}' & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{v}\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathrm{K} & 0 \\ -\mathrm{L} & \mathrm{H} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{v}\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\dot{\boldsymbol{f}}\} \\ \{\dot{f}_u\} \end{Bmatrix}$$

解くべき連立一次方程式

陰的解法の適用

加速度に線形性を仮定する「線形加速度法」の拡張的方法であるWilsonのθ法に倣い，

躍度に線形性を仮定

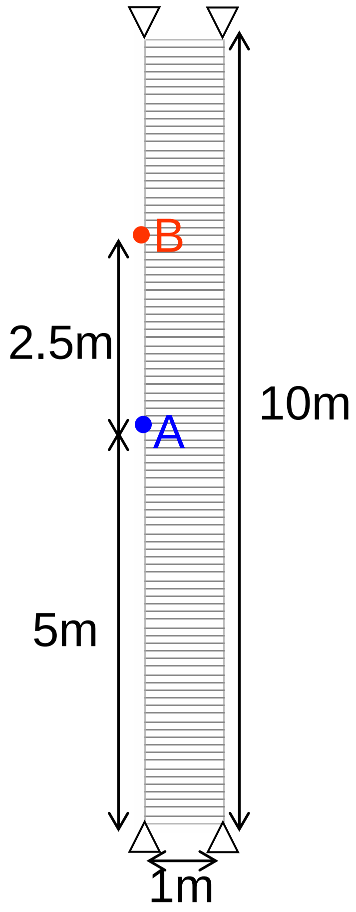
$$\{\ddot{v}\}\big|_{t+\tau} = \{\ddot{v}\}\big|_{t} + \frac{\tau}{\theta\Delta t}\left(\{\ddot{v}\}\big|_{t+\theta\Delta t} - \{\ddot{v}\}\big|_{t}\right)$$

これにより

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{(\theta\Delta t)^2}\mathrm{M} + \frac{1}{6}\mathrm{K} & -2\left(\mathrm{L}^{\mathrm{T}} + \mathrm{L_c}^{\mathrm{T}}\right) \\ -\mathrm{L}_{\theta 1} & \mathrm{H}\times\theta\Delta t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \left\{\ddot{v}(\theta\Delta t)^3\right\}\big|_{t+\theta\Delta t} \\ \{u\}\big|_{t+\theta\Delta t} \end{Bmatrix}$$

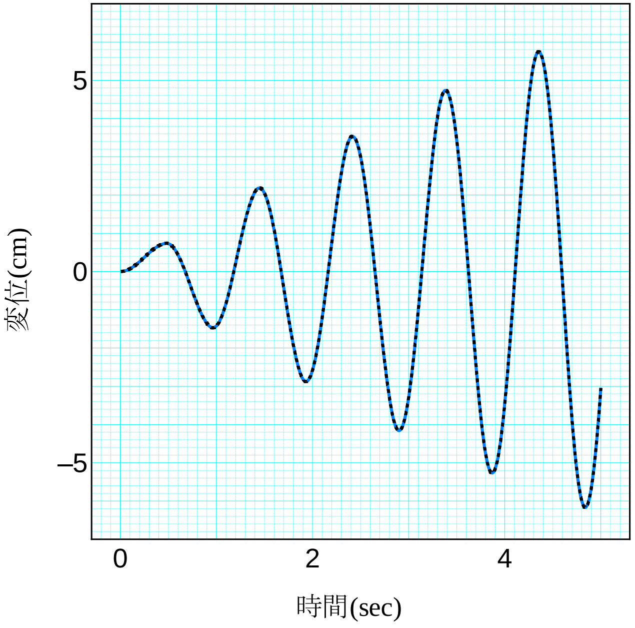
$$= \begin{Bmatrix} \left\{\dot{f}(\theta\Delta t)\right\}\big|_{t+\theta\Delta t} - \mathrm{K}\left[\{v(\theta\Delta t)\}\big|_t + \left\{\dot{v}(\theta\Delta t)^2\right\}\big|_t + \frac{1}{3}\left\{\ddot{v}(\theta\Delta t)^3\right\}\big|_t\right] - 2\left(\mathrm{L}^{\mathrm{T}} + \mathrm{L_c}^{\mathrm{T}}\right)\left[\{u\}\big|_t + \frac{1}{2}\{\dot{u}(\theta\Delta t)\}\big|_t\right] \\ \left\{\dot{f}_u(\theta\Delta t)\right\}\big|_{t+\theta\Delta t} + \mathrm{L}\{v(\theta\Delta t)\}\big|_t + \mathrm{L}_{\theta 2}\left\{\dot{v}(\theta\Delta t)^2\right\}\big|_t + \mathrm{L}_{\theta 3}\left\{\ddot{v}(\theta\Delta t)^3\right\}\big|_t \end{Bmatrix}$$

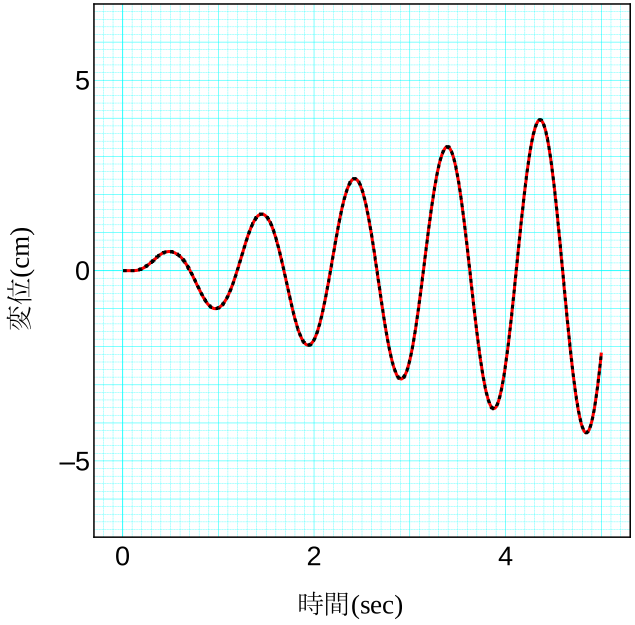
検証（微小変形一相系弾性体）



要素大きさ　1.0m×0.1m
要素数　1×100=100要素
側面：xフリー,y固定
中央部(A点)に応力制御でsin波

検証（微小変形ー相系弾性体）





---- A点の変位（理論解）
— A点の変位（GEOASIA）

---- B点の変位（理論解）
— B点の変位（GEOASIA）

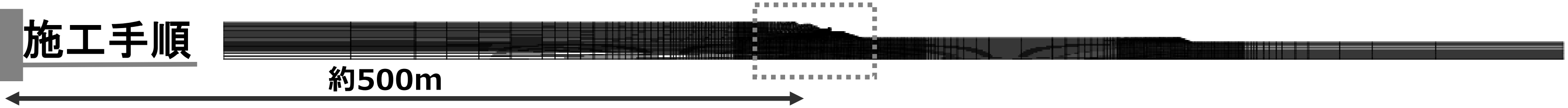
③ 解析事例　その1

名古屋港の人工島
ー築造に伴う変形、そして地震が来たらー

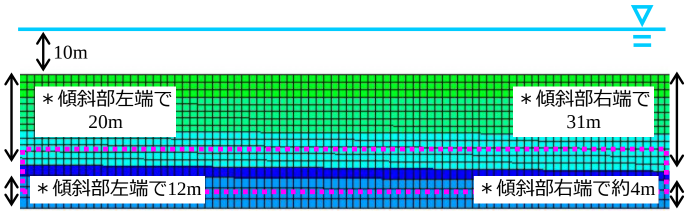
地震動を与えて、地盤の挙動を予測・評価する

海上埋立人工島の立体的モデル化

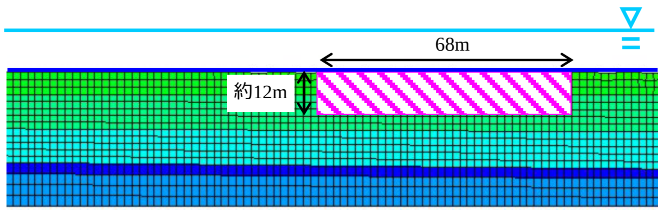
施工手順



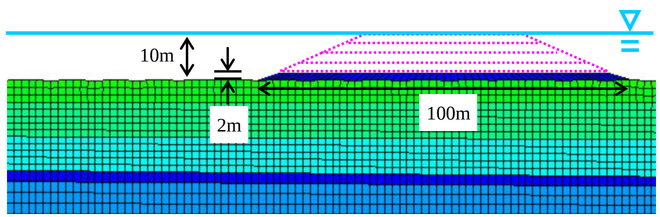
Process.01
（～昭和47年）:
海底地盤の再現



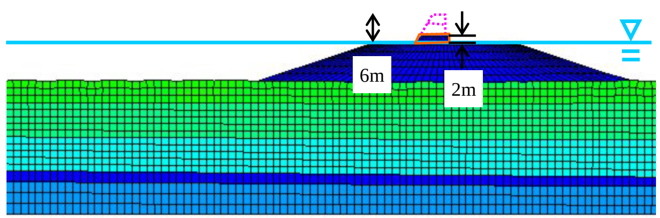
Process.02
（昭和48年）:
サンドドレーン打設



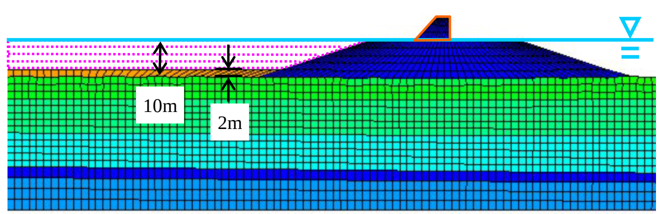
Process.03
（昭和49～50年）:
捨石マウンド



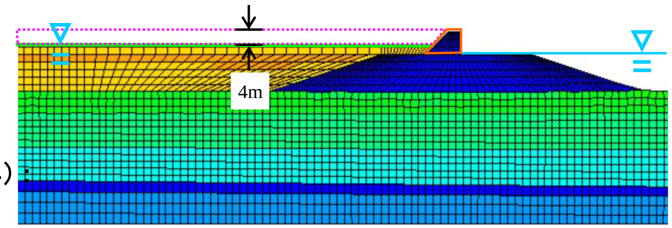
Process.04
（昭和51年）:
ケーソン



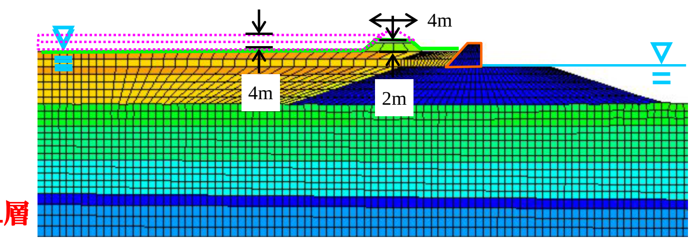
Process.05
（昭和52～61年）:
埋立BcL層



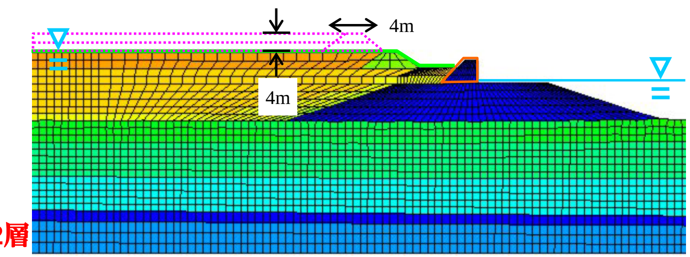
Process.06
（昭和62～平成2年）:
埋立BcC2層



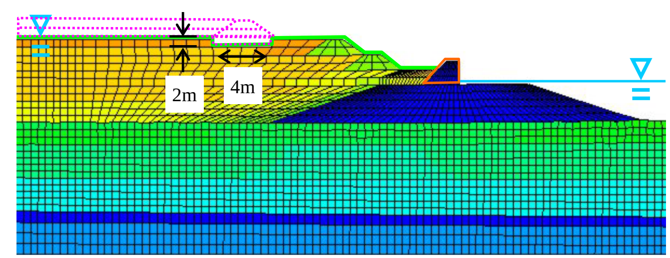
Process.07
（平成3～7年）:
築堤＆埋立BcC1層



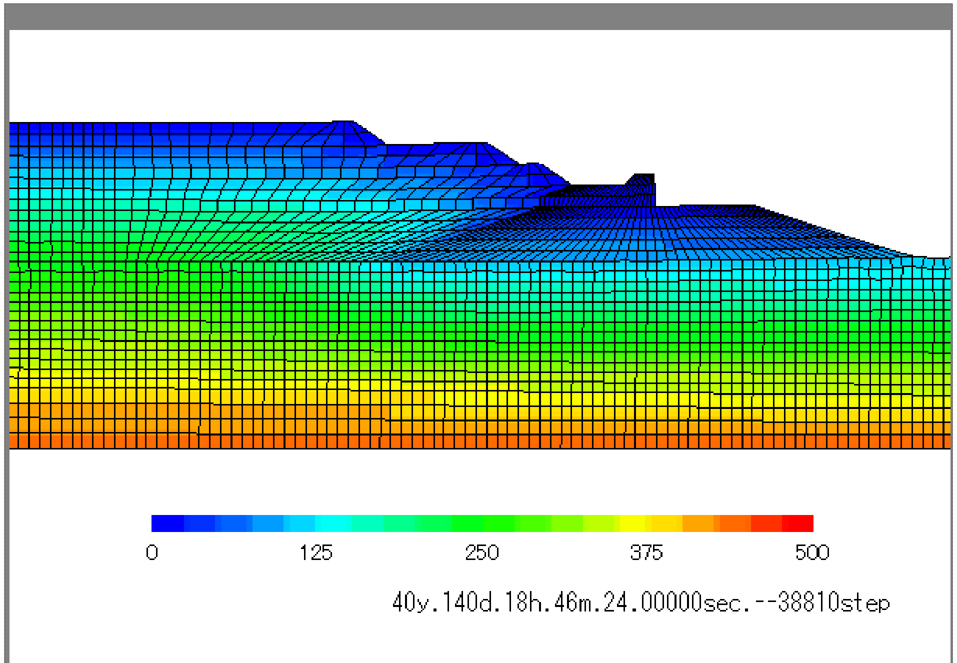
Process.08
（平成8～12年）:
築堤＆埋立BcU2層



Process.09
（平成13～18年）:
地盤改良＆築堤
＆埋立BcU1層

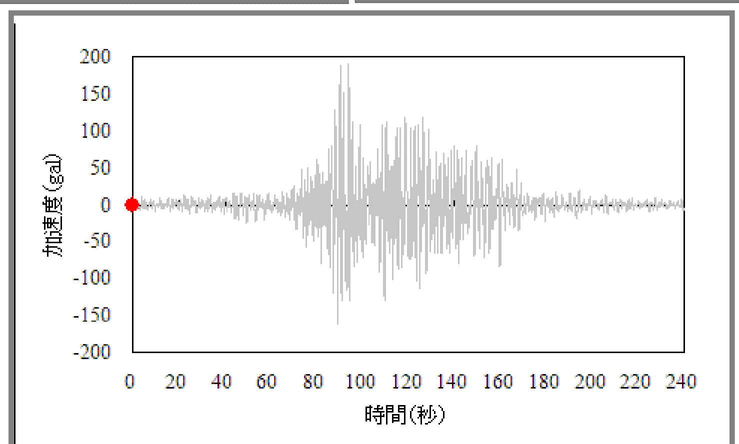


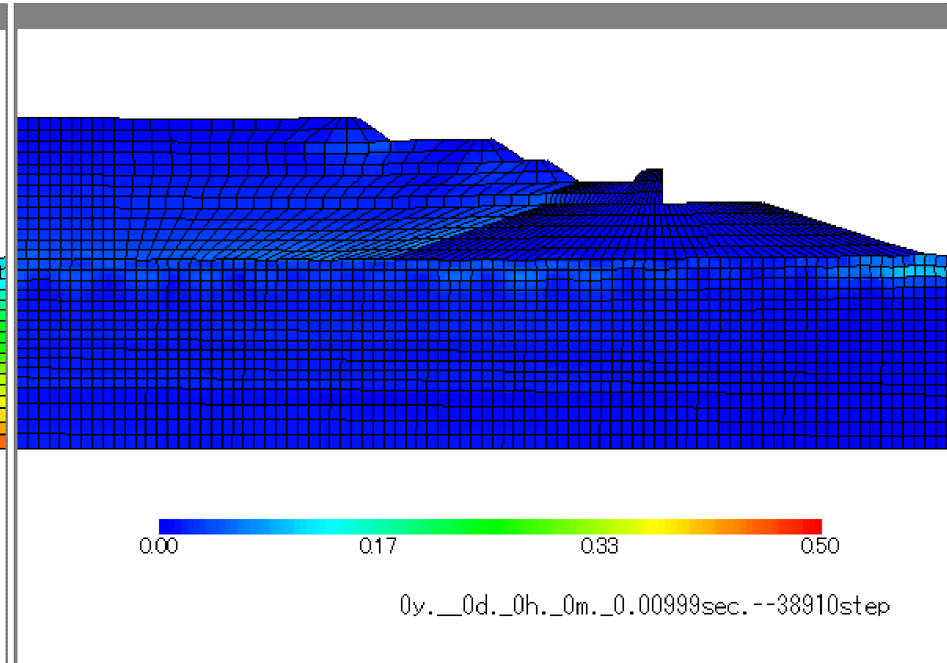
レベル2海溝型



護岸

間隙水圧分布





護岸

せん断ひずみ

④ 解析事例　その2

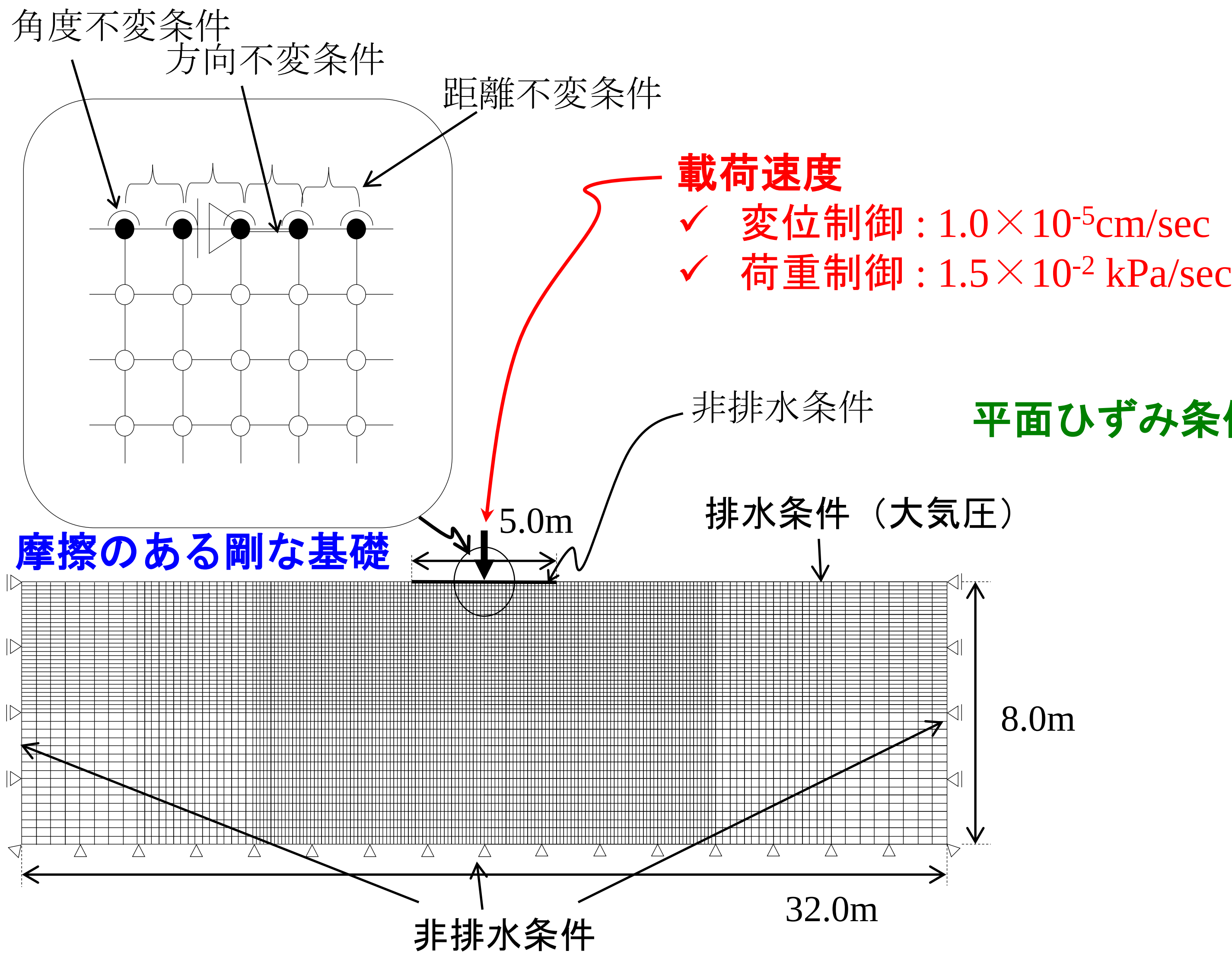
古典的な？支持力問題

ー地盤の破壊に伴う加速度の発生と伝搬ー

・・・　地震!?

地震応答解析に限らず、支持力問題のように、これまで(準)静的問題として扱われてきた問題においても、慣性力を考慮すること(すなわち運動方程式を時間積分すること)が重要であることを示すこと。

解析条件



有限要素メッシュと境界条件

材料定数　と　初期条件

土骨格の構成式: SYS Cam-clay model

材料定数

弾塑性パラメータ		
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.23
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.01
限界状態定数	M	1.15
p'=98.1(kPa) における比体積	N	2.75
ポアソン比	ν	0.1
発展則パラメータ		
構造劣化指数	a	0.2
	$(b=c=1.0)$	
過圧密解消指数	m	5.0
回転硬化指数	b_r	10^{-3}
回転硬化限界	m_b	1.0
透水係数	k (cm/sec)	2.8×10^{-8}
土粒子の密度	ρ_s (t/m^3)	2.75

初期条件

構造の発達程度	$1/R^*_0$	4.0
過圧密比	$1/R_0$	1.0
異方性	ζ_0	0.75
応力比	$\eta_0 (= q_0/p'_0)$	0.75

構造の高位な
自然堆積粘土

2種類の支配方程式

➡ 慣性項なし (準静的解析)

- **速度型力のつり合い式**

$$\rho_w(\mathrm{tr}\boldsymbol{D})\boldsymbol{v} = \mathrm{div}\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{t}} + \rho_w(\mathrm{tr}\boldsymbol{D})\boldsymbol{g} \qquad \text{where} \quad \dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{t}} = \dot{\boldsymbol{T}} + (\mathrm{tr}\boldsymbol{D})\boldsymbol{T} + \boldsymbol{T}\boldsymbol{L}$$

- **水～土連成式**

$$\mathrm{div}\boldsymbol{v} + \mathrm{div}\left(-k\,\mathrm{grad}h\right) = 0$$

Asaoka et al. (1994): Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, *S&F*, **34**(1), 91-106.

➡ 慣性項あり

- **速度型運動方程式**

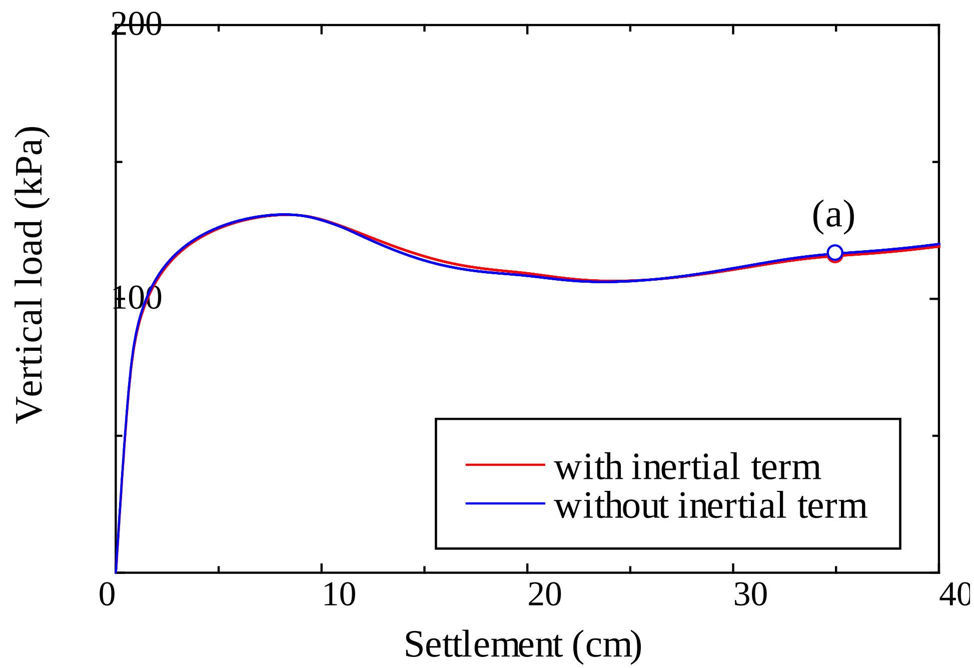
$$\boxed{\rho\ddot{\boldsymbol{v}}} + \rho_w(\mathrm{tr}\boldsymbol{D})\dot{\boldsymbol{v}} = \mathrm{div}\dot{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{t}} + \rho_w(\mathrm{tr}\boldsymbol{D})\boldsymbol{g}$$

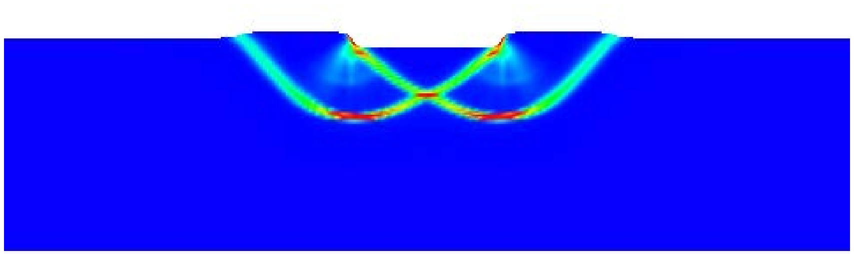
- **慣性項を有する水～土連成式**

$$\boxed{-\frac{k}{g}\mathrm{div}\dot{\boldsymbol{v}}} + \mathrm{div}\boldsymbol{v} + \mathrm{div}\left(-k\,\mathrm{grad}h\right) = 0$$

Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, *S&F*, **45**(6), 771-790.

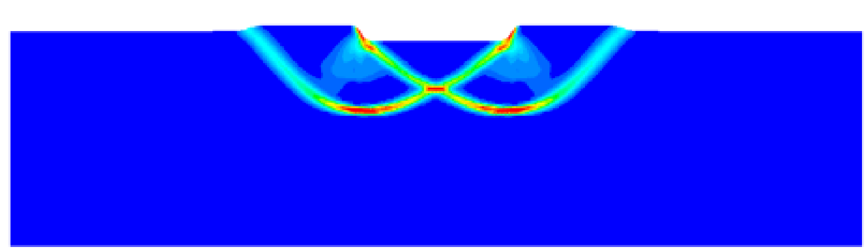
支持力問題（変位制御）





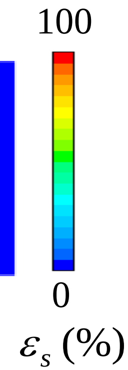
(a) Settlement 35cm

慣性項あり



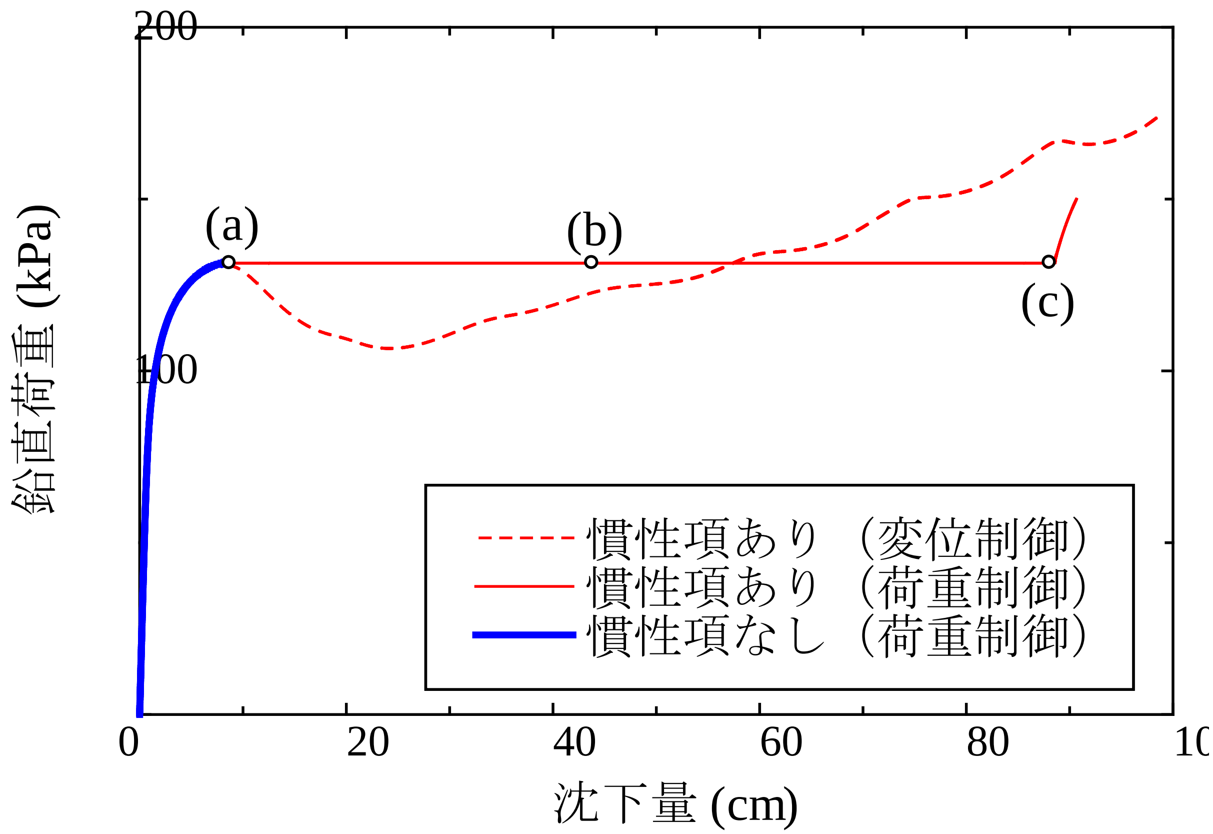
(a) Settlement 35cm

慣性項なし



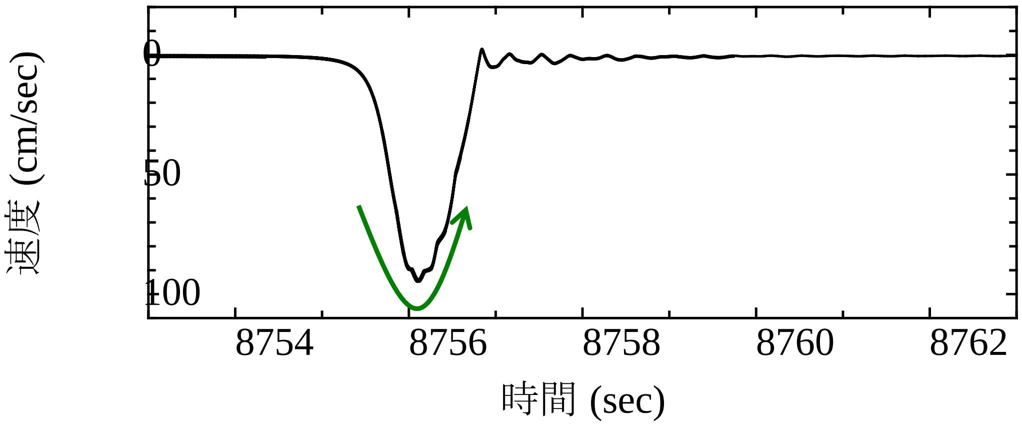
- 変位制御下では、慣性項の有無は解析結果にほとんど影響を与えない。
- 変位制御下では、地盤内ではごく僅かな加速度運動しか生じていない。

支持力問題（荷重制御）

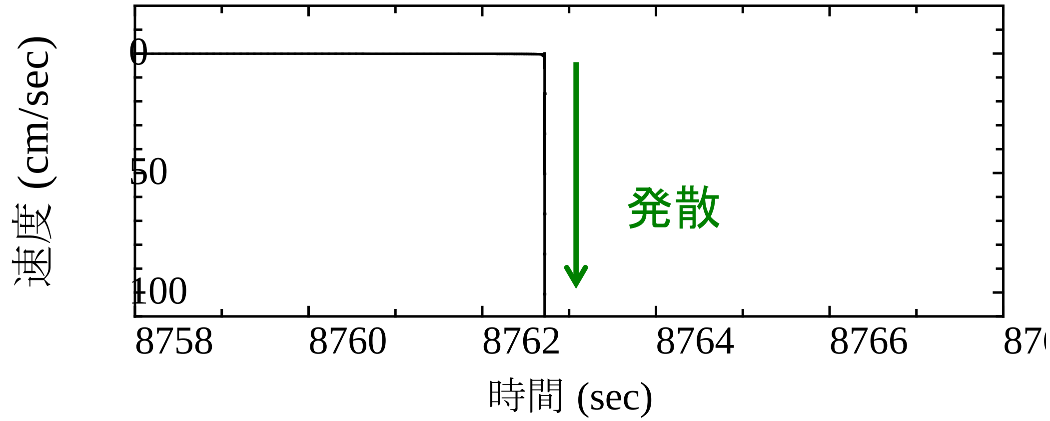


荷重制御下では、
慣性項がないと、荷重が変位制御のピーク値に到達した時点で計算を続行できなくなる。
一方、慣性項があると、荷重が変位制御のピーク値に到達後も計算を続行することができ、荷重がほぼ一定のまま沈下が生じる。

支持力問題（荷重制御）



慣性項あり



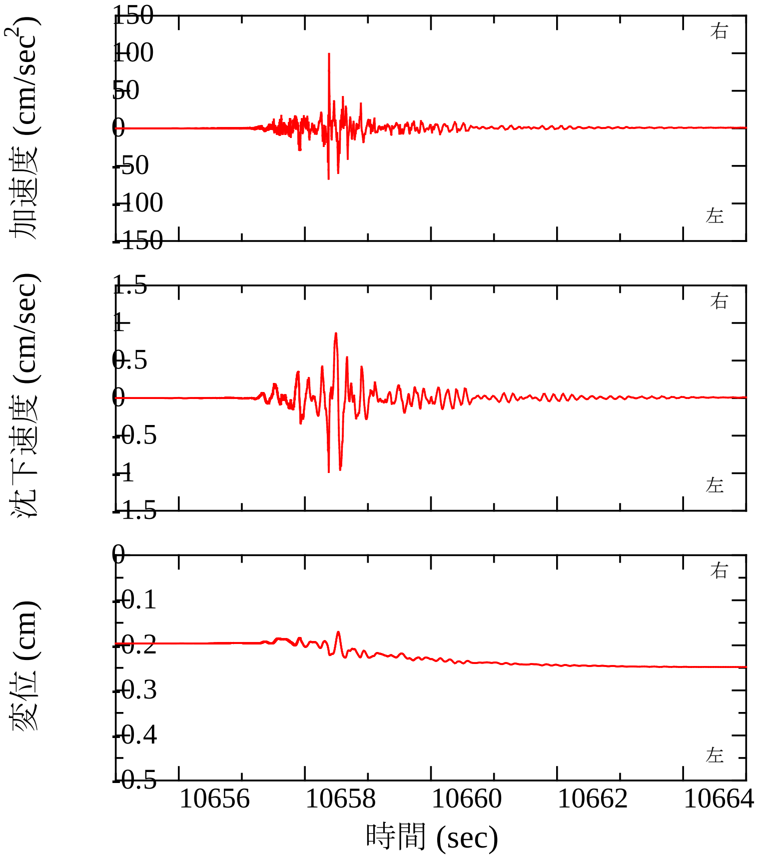
慣性項なし

基礎中央節点の鉛直方向の速度の時刻歴

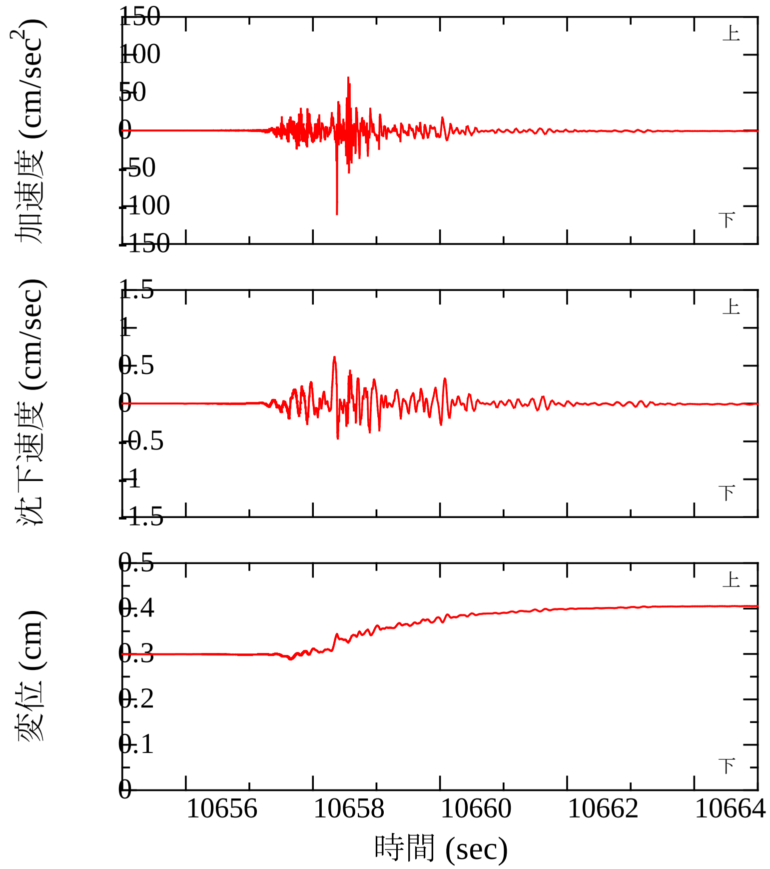
慣性項は運動の変化を抑制し、計算を安定化させる。

支持力問題（荷重制御）

破壊に伴う周辺地盤の振動

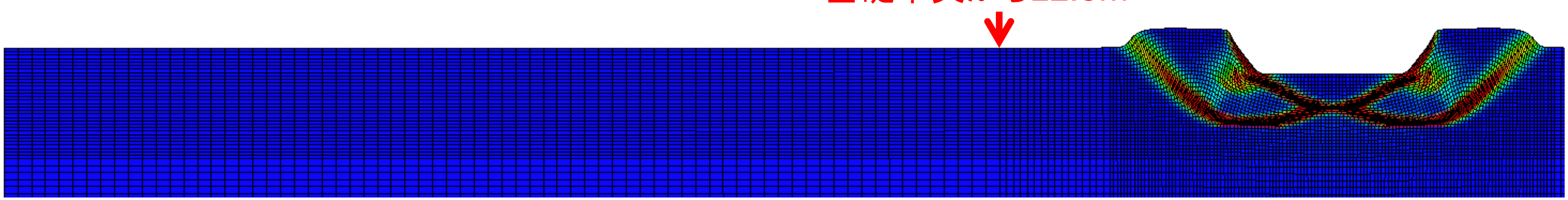


(a) 水平成分



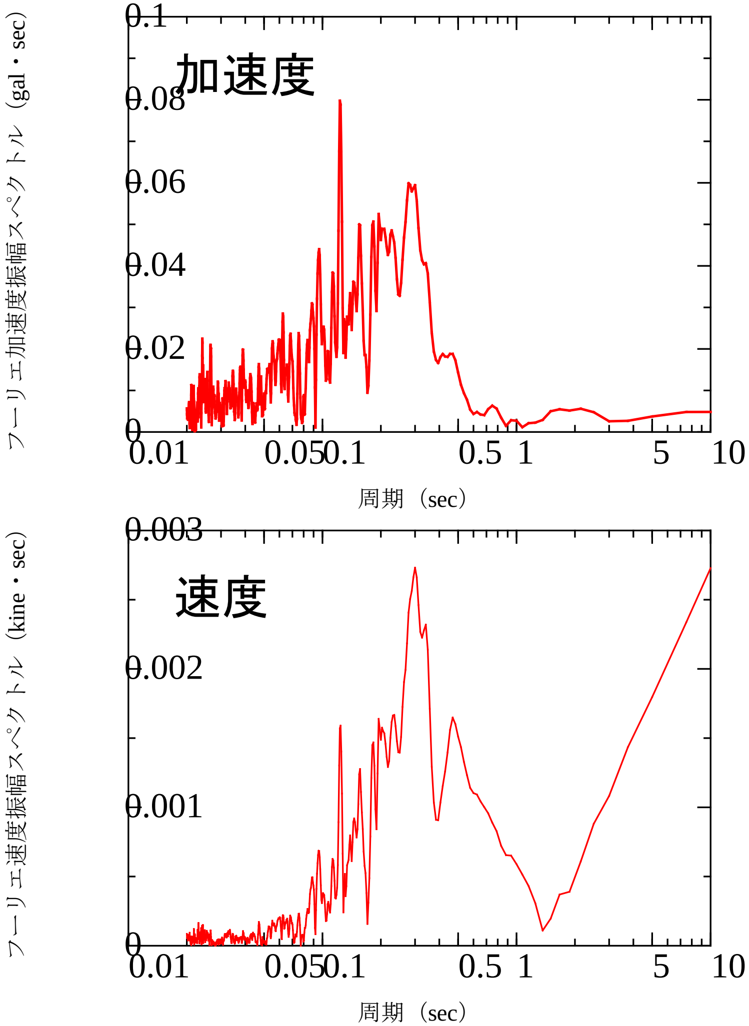
(b) 鉛直成分

基礎中央から12.5m

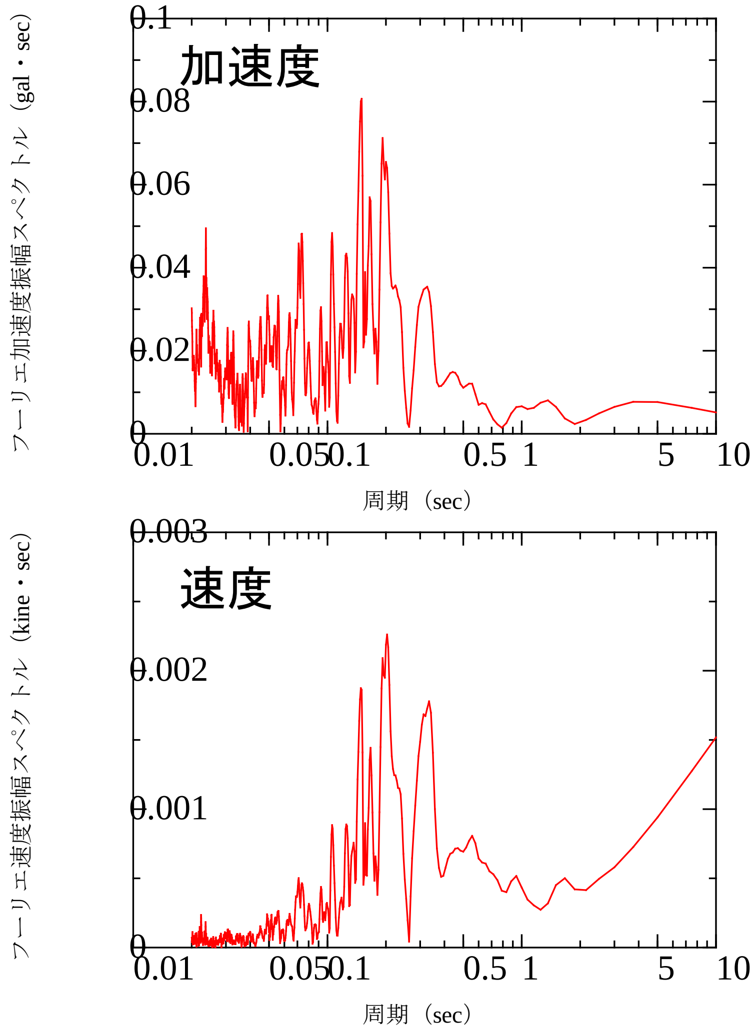


支持力問題（荷重制御）

破壊に伴う周辺地盤の振動のスペクトル



(a) 水平成分



(b) 鉛直成分

非常に短周期の成分が卓越

解析条件

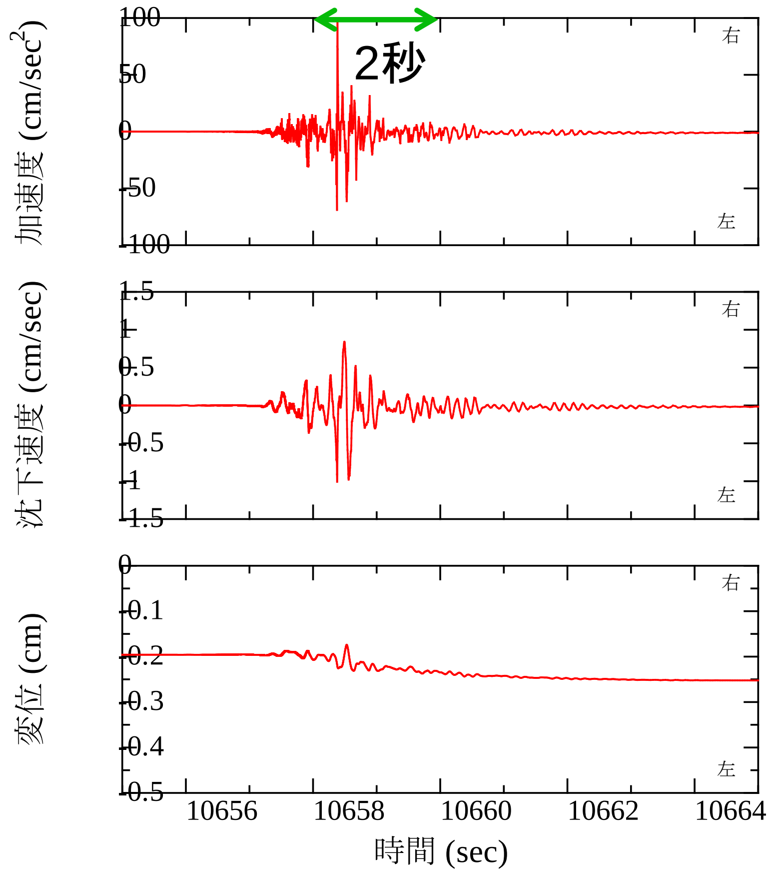
スケールを300倍にするとどうなるのか？

	(A) Model	(B) Prototype
解析領域	幅96m×高さ16m	幅28800m ×高さ 4800m
載荷幅	5m	1500m
載荷速度（変位制御） （荷重制御）	1.0 x 10^{-5}m/sec 0.015kPa/sec	3.0 x 10^{-3}m/sec 4.0kPa/sec
初期の地表面荷重	98.1kPa	29430kPa

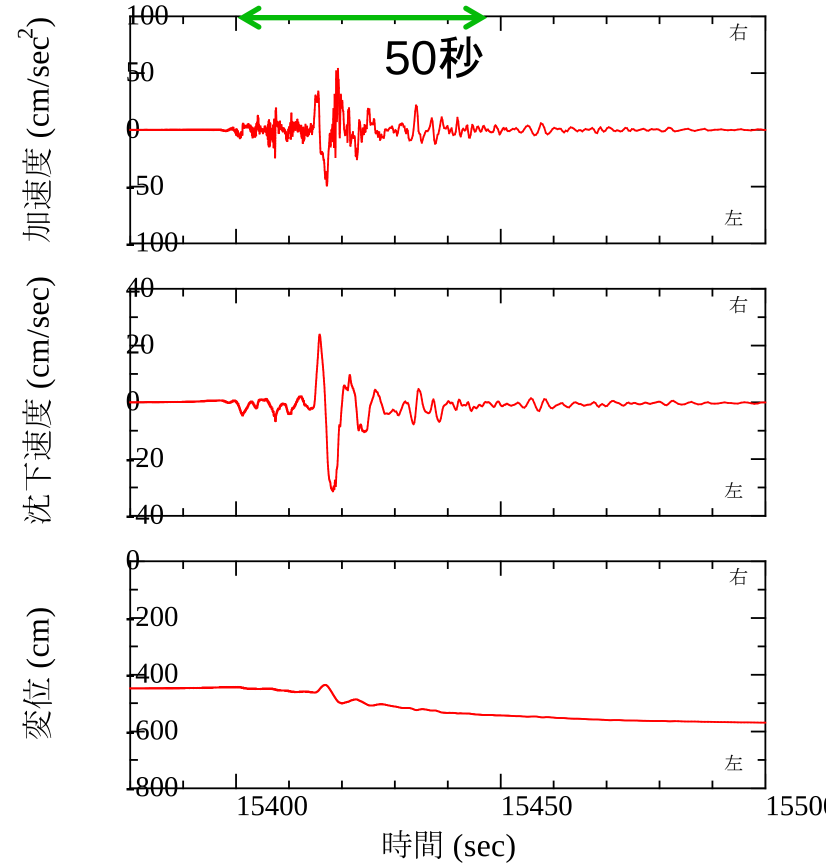
＊荷重制御の載荷速度＝変位制御のピーク荷重／変位制御時にピークに至るまでの時間　によって設定
＊以下に示す結果は全て荷重制御による

スケール効果

水平成分の加速度・速度・変位の時刻歴



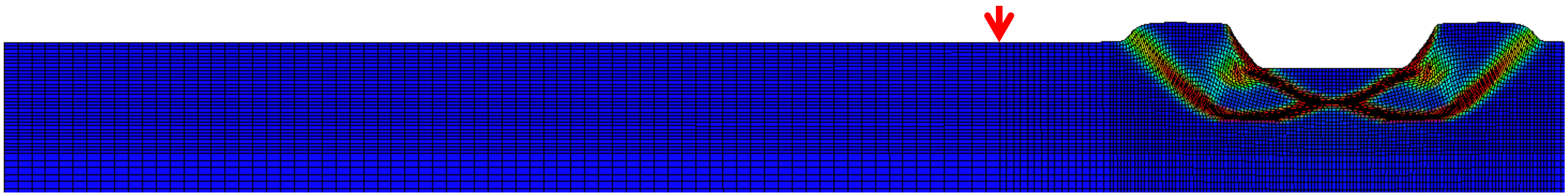
300倍



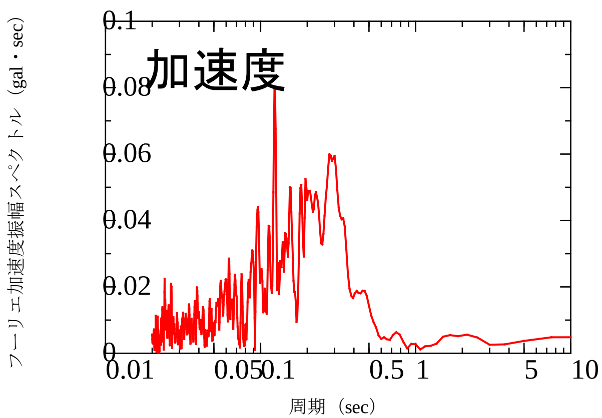
(a) Model（基礎中央から12.5m）

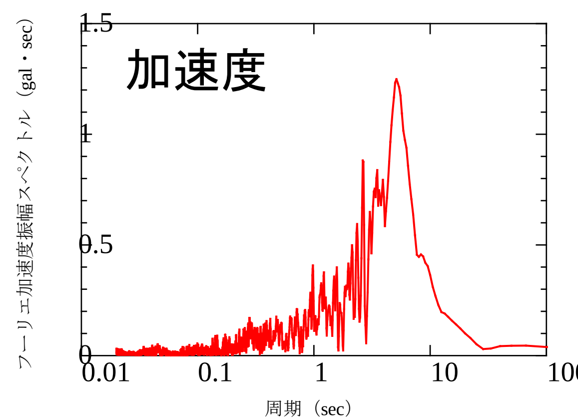
(b) Prototype（基礎中央から3750m）

基礎中央から12.5m or 3750m

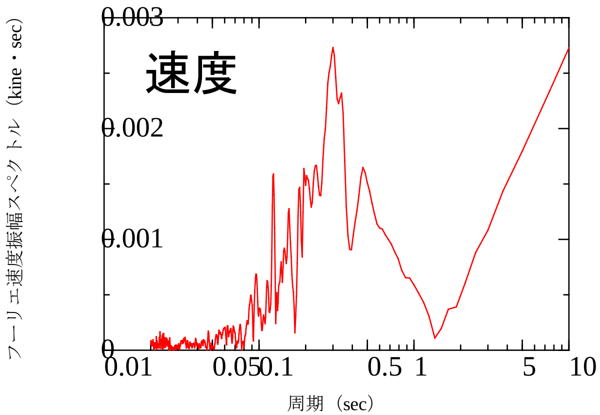


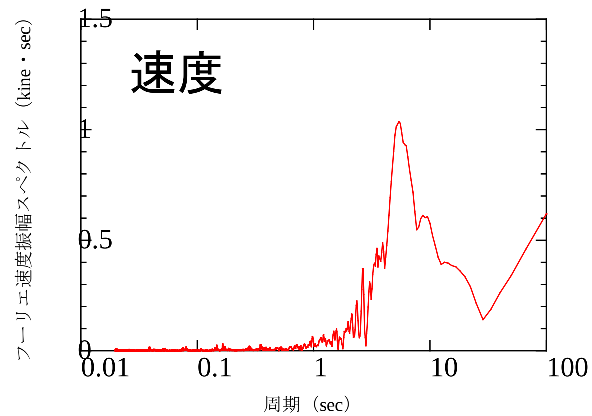
スケール効果　水平成分のスペクトル





長周期化





300倍

(a) Model（基礎中央から12.5m）

(b) Prototype（基礎中央から3750m）

基礎中央から12.5m or 3750m