

地盤工学会中部支部
イブニングセミナー(初級編③)

はじめから学ぶ揺れと波 ～ 土の動的問題もこわくない ～

平成22年度10月22日(金)
名古屋工業大学 前田健一
(<http://http://www.maeda-lab.org//>)



1

推薦図書

- 「地震と建築」大崎順彦 岩波新書
- 「活断層」松田時彦 岩波新書
- 「土質・基礎工学のための地震・耐震入門」地盤工学会
- ー 以下、授業の各講義に対応した推薦図書です
- 「新・地震動のスペクトル解析入門」大崎順彦, 鹿島出版会
- 「建築振動理論」大崎順彦, 彰国社
- 「新体系土木工学 11 建造物の耐震解析」土岐憲三, 技報堂
- 「土質動力学の基礎」石原研而, 鹿島出版会
- 「砂地盤の液状化」吉見吉昭, 技報堂出版
- 「動的解析と耐震設計 動的解析の方法」土木学会, 技報堂出版
- 「液状化はこわくない メカニズムと対策Q&A」渡辺具能 山海堂
- 「液状化対策の調査・設計から施工まで」地盤工学会
- 地盤工学会: 地盤の動的解析 ー基礎理論から応用までー, 丸善
- 地盤工学会: 入門シリーズ 地盤・耐震工学入門
- 耐震設計の基本: 考え方がよくわかる設計実務 3 大成建設土木部

2

耐震設計の変遷

まず、はじめに

3

耐震設計の流れ

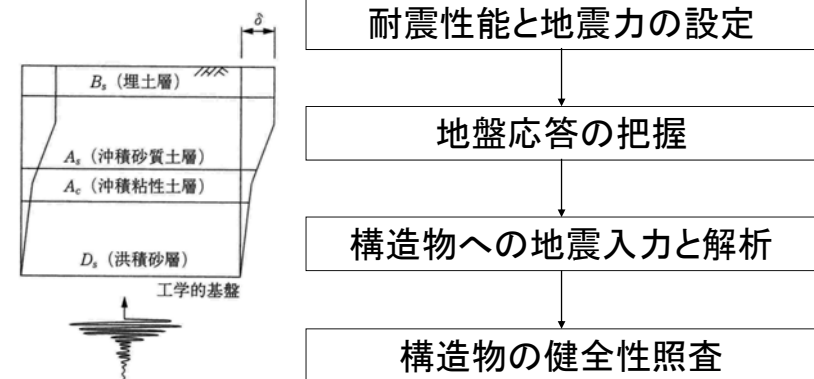
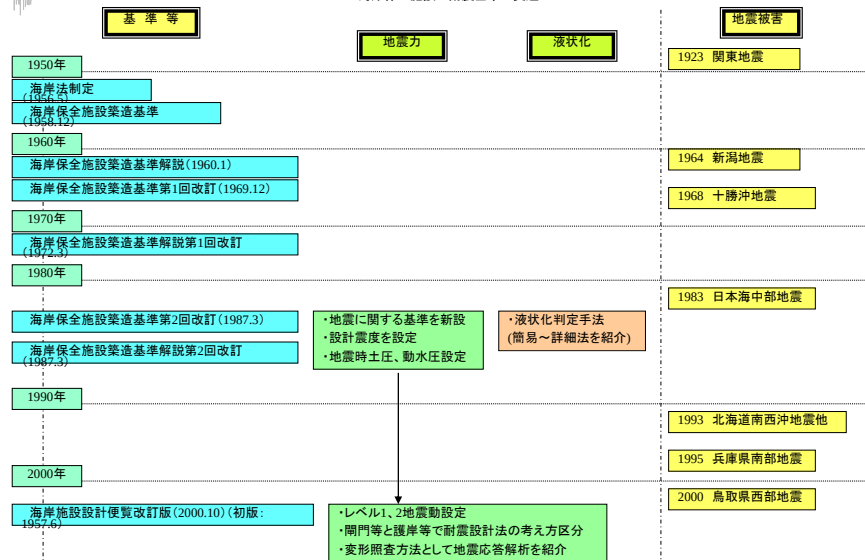


図 1-3 地盤応答の把握イメージ

4



主な地震と耐震設計法の変遷

西暦	地震名	特徴的な被害形態	耐震設計法の変遷
1891	濃尾地震	6mに及ぶ段差が出現し、岐阜・愛知の両県にわたり甚大な被害が発生	
1923	関東地震	死者・行方不明者が14万人を超え、東京は焼け野原となる	1926 「大正15年道路構造に関する細則案」にて、 地震荷重 が初めて規定される 1939 「昭和14年鋼道路橋示方書案」により、 設計震度 が標準化される
1948	福井地震	住家やRCビル、橋梁などの被害が甚大	1953 SMAC強震計 による地震動観測が開始された 1956 「昭和31年鋼道路橋設計示方書」により、 地域、地盤条件 に応じた設計震度の補正
1964	新潟地震	砂地盤の液状化による被害が続出し、昭和の大橋が落橋 石油タンクが、スロッシング現象により炎上	1972 「道路橋耐震設計指針・同解説」にて、 ・ 修正震度法 の導入、落橋防止対策の規定、 液状化判定法 の導入 ・ スロッシング の研究が本格的に着手
1978	宮城県沖地震	埋設管などのライフライン施設への被害が甚大	1979 「 水道施設耐震工法指針・解説 」の発刊 1981 「 下水道施設地震対策指針と解説 」の発刊
1983	日本海中部地震	液状化による被害	1990 「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」にて、 ・震度法と修正震度法との区別と撤廃し、 応答を考慮した震度法 に一本化 ・液状化判定法の改訂 ・RC橋脚の保有耐力照査法の明確化
1995	兵庫県南部地震	神戸市や周辺地域が内陸直下型地震に直撃され、道路や鉄道、港湾、建築物などに未曾有の被害が生じた	・きわめて大きな地震動(レベル2地震動)の考慮 ・弾性設計法から、構造物の変形性能に期待した 塑性設計法 への移行

地震応答解析の種類

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

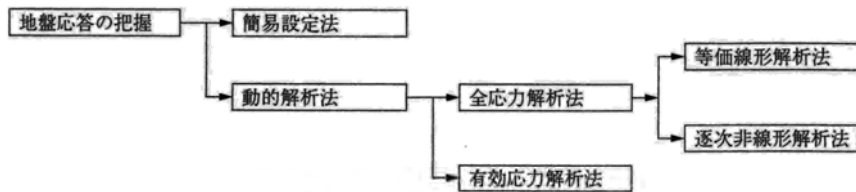
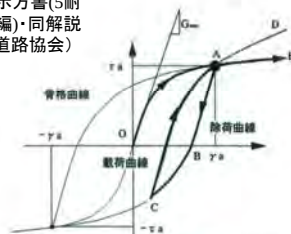


図 1-7 地盤応答の把握分類図

道路橋示方書(5耐震設計編)・同解説 (日本道路協会)



付属図 5.5.1 Masing 則による履歴法則の説明図

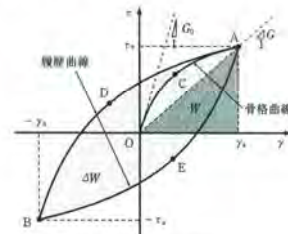


図 4.3 非線形モデル

地盤工学会: 地盤の動的解析 —基礎理論から応用まで—, 丸善

構造物への地震入力と解析についての概要

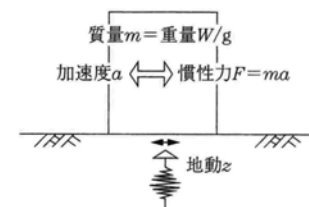


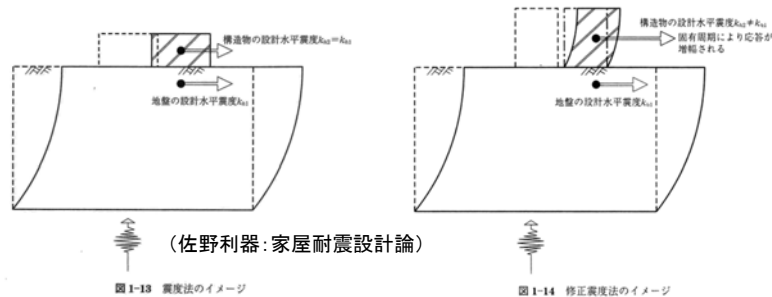
図 1-11 地上構造物への地震入力

[出典: 実務の先輩たちが書いた 土木構造物の耐震設計入門 土木学会, p. 117 より引用]

1. 震度法
2. 修正震度法
3. 保有水平耐力
4. 応答変位法
5. 応答震度法
6. 構造物の動的解析法

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

構造物への地震入力と解析についての概要



震度法(最初の提案は1915年)

地震外力を慣性力として静的に構造物に作用→設計水平震度

固有周期、共振は考慮されていない

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

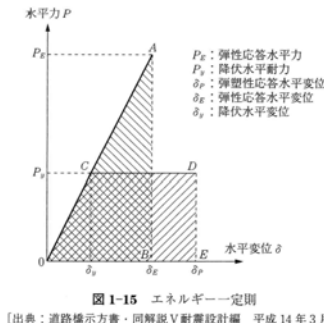
修正震度法

地盤の硬軟と構造物の固有周期(基本固有周期)による増幅率を考慮

多質点モードは考慮されない

9

構造物への地震入力と解析についての概要



保有水平耐力法

修正震度法の一つ。部材の非線形応答(塑性化による応答加速度の増幅率低下)を考慮して設計水平震度を考慮。

エネルギー一定則が成り立てば...

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

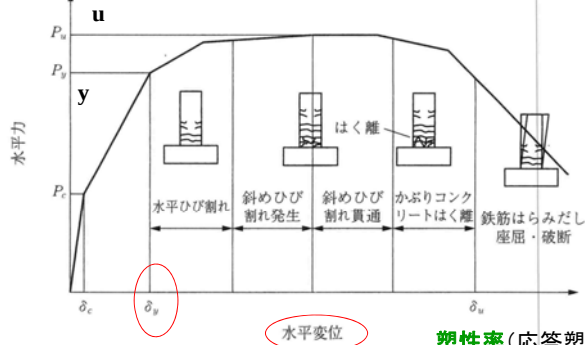
修正震度法

地盤の硬軟と構造物の固有周期(基本固有周期)による増幅率を考慮

多質点モードは考慮されない

10

構造物の健全性照査について



1. 許容応力度法
2. 限界状態法 (機能回復と必要な残存機能)

塑性率(応答塑性率=変位/降伏変位) < 許容塑性率(許容変位/降伏変位)

1. 許容応力度法

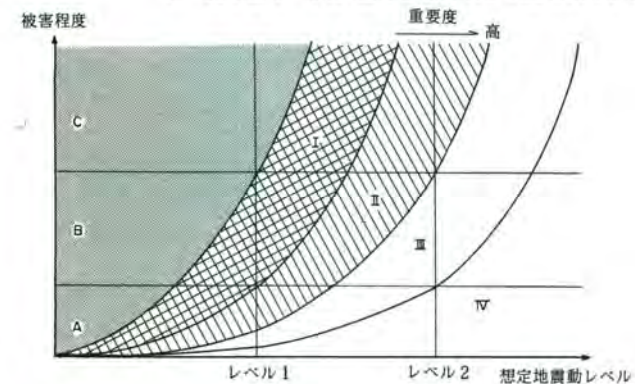
(部材に発生する応力) < (部材強度) / (安全率)

- ・ 巨大地震には不経済
- ・ 破壊までの余裕度は?
- ・ 降伏を許し、耐力以下にはおさめる合理性?

11

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

重要度に応じた耐震性能の設定



被害程度

A: 無被害または軽微な被害

B: 短期間の応急復旧で機能回復

C: 著しい被害を受けるが崩壊はしない

埋立地の液状化対策ハンドブック: 沿岸開発技術研究センター

12

講義内容

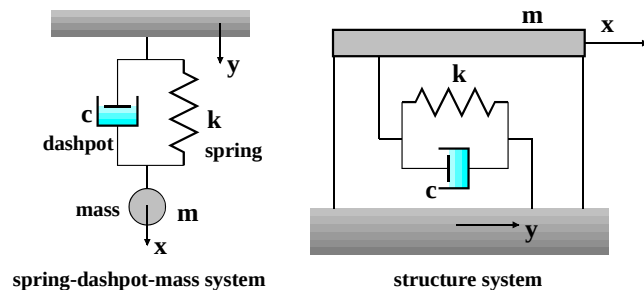
1. いろんな揺れを力学する (固有周期, 減衰定数, 共振, 複素数だって怖くない)
2. 波を観る (図と式をつなぐ差分法)
3. 地盤材料の動的性質の整理 (材料による違い)
4. どんな地盤がゆれやすいのかを考える (事例とそのメカニズム)
5. 現地調査結果を整理する (地盤の動的特性計測結果の詳細, パラメータ)

13

1. いろんな揺れを力学する (固有周期, 減衰定数, 共振, 複素数だって怖くない)

14

1 質点モデル(1)



Voigt model

釣り合い式:

$$m(\ddot{x}(t) + \ddot{y}(t)) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0$$

(慣性力: 絶対加速度) + (減衰制振力: 相対速度) + (復元力: 相対変位) = 0

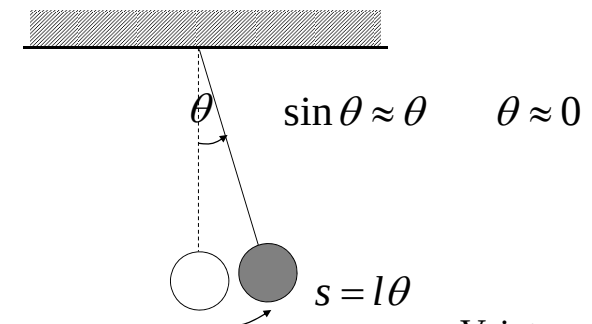
そのままの状態をつづける

変化をさまたげる

もとにもどす

15

1 質点モデル(2)



Voigt model

釣り合い式:

$$m\ddot{s}(t) + c\dot{s}(t) + mg s(t)/l = 0 \quad \ddot{\theta}(t) + \frac{c}{m}\dot{\theta}(t) + \frac{g}{l}\theta(t) = 0$$

(慣性力: 絶対加速度) + (減衰制振力: 相対速度) + (復元力: 相対変位) = 0

そのままの状態をつづける

変化をさまたげる

もとにもどす

16

自由振動

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0$$

$$k/m = \omega_0^2 \quad c/m = 2h\omega_0$$

よって以下の式が導ける

$$h = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

h : 減衰定数

$$\ddot{x} + 2h\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

$$\ddot{\theta} + \frac{c}{m} \dot{\theta} + \frac{g}{l} \theta = 0$$

解を $x = Ae^{\lambda t}$ とおく

$$\dot{x} = \lambda Ae^{\lambda t}$$

$$\ddot{x} = \lambda^2 Ae^{\lambda t}$$

$$\lambda^2 + 2h\omega_0 \lambda + \omega_0^2 = 0$$

17

$$\left. \begin{matrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{matrix} \right\} = -h\omega_0 \pm \sqrt{(h\omega_0)^2 - \omega_0^2}$$

$$= -h\omega \pm \sqrt{h^2 - 1} \omega \quad h = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

ゆえに一般解は $y = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t}$ と表せる

解の性質は h の値によって異なる

① $h > 1$ の場合

過減衰振動

② $h = 1$ の場合

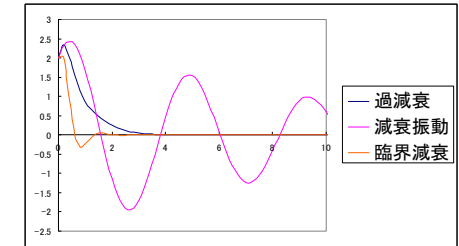
臨界減衰

③ $0 < h < 1$ の場合

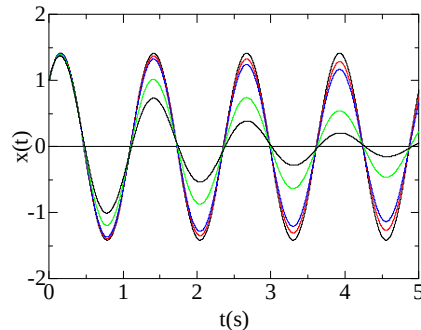
減衰自由振動

λ_1, λ_2 は複素数

18



$$x_0 = 1 \quad v_0 = 5 \quad \omega = 5$$



$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

減衰振動周期

h が大きくなれば、固有周期は伸びる

$$T' = \frac{2\pi}{\omega_0} \frac{1}{\sqrt{1-h^2}} = T_0 \frac{1}{\sqrt{1-h^2}} = \frac{2\pi}{\omega'}$$

建物の微振動による減衰定数 h

鉄骨造: 0.5~3%程度

RC造: 2~7%程度

$$h \ll 1$$

$$\longrightarrow T' \approx T_0 = 2\pi / \omega_0$$

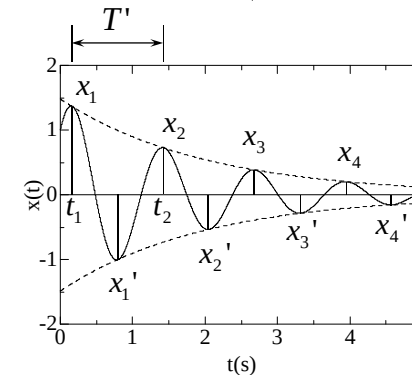
19

減衰: h と d

$$x_0 = 1 \quad v_0 = 5 \quad \omega = 5 \quad h = 0.1$$

粘性振動

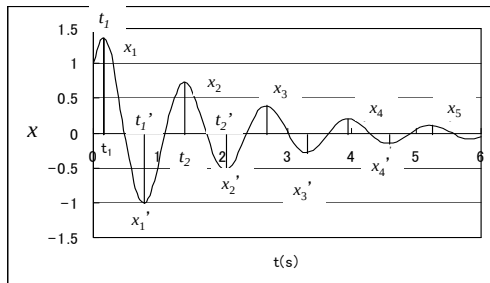
隣り合う1周期ごとの振幅の比率
全て同じになる



$$\text{振幅比 } d = \frac{x_1}{x_2} = \frac{x_2}{x_3} = \frac{x_3}{x_4} \dots \dots \quad (\text{片振幅})$$

$$= \frac{x_1 + x_1'}{x_2 + x_2'} = \frac{x_2 + x_2'}{x_3 + x_3'} = \frac{x_3 + x_3'}{x_4 + x_4'} \dots \dots \quad (\text{全振幅})$$

20

減衰: h と d 

$$t_1' - t_1 = T'/2$$

$$t_2' - t_2 = T'/2$$

$$d = \frac{x_1 + x_1'}{x_2 + x_2'} = \frac{e^{-h\omega t_1} + e^{-h\omega t_1'}}{e^{-h\omega t_2} + e^{-h\omega t_2'}} = \frac{e^{-h\omega t_1} + e^{-h\omega(T'/2 + t_1)}}{e^{-h\omega t_2} + e^{-h\omega(T'/2 + t_2)}}$$

$$= \frac{e^{-h\omega t_1}(1 - e^{-h\omega T'/2})}{e^{-h\omega t_2}(1 - e^{-h\omega T'/2})} = \frac{e^{-h\omega t_1}}{e^{-h\omega t_2}} \rightarrow \text{片振幅も同じ結果!}$$

21

自由振動のまとめ(1)

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \rightarrow \ddot{x}(t) + \frac{c}{m}\dot{x}(t) + \frac{k}{m}x(t) = 0$$

$$m\ddot{s}(t) + c\dot{s}(t) + s(t)mg/l = 0 \rightarrow \ddot{\theta}(t) + \frac{c}{m}\dot{\theta}(t) + \frac{g}{l}\theta(t) = 0$$

$$\omega_0^2 = \sqrt{\frac{k}{m}} \rightarrow \text{基本固有周期: } T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$\omega_0^2 = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$c_{cr} = 2\sqrt{mk} \rightarrow \text{減衰定数: } h = \frac{c}{c_{cr}}$$

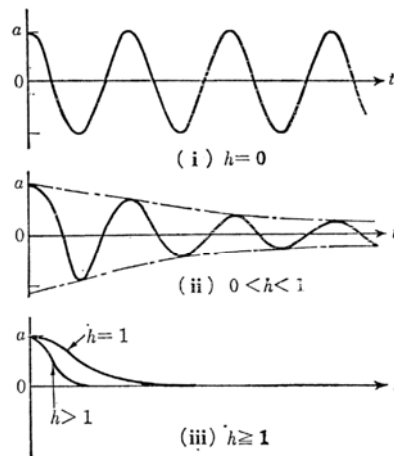
$$T' = \frac{2\pi}{\sqrt{1-h^2}\omega_0}$$

 $h \ll 1$ とすると

$$T' \approx T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

22

自由振動のまとめ(2)



減衰なし

(i) $h=0$ 自由減衰($h < 1$)(ii) $0 < h < 1$ 臨界減衰($h=1$)(iii) $h \geq 1$ 過減衰($h > 1$)図-2.8 自由振動波形と h

自由振動のまとめ(3)

$$d = \frac{x_1}{x_2} = \frac{e^{-h\omega t}}{e^{-h\omega(t+T')}} = e^{\{(-h\omega t) - (-h\omega(t+T'))\}} = e^{h\omega T'} = e^{2\pi h / \sqrt{1-h^2}}$$

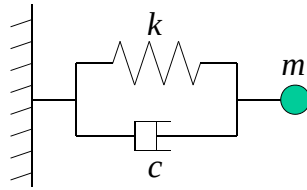
$$\ln d = 2\pi h / \sqrt{1-h^2} \leftarrow \text{対数減衰力}$$

$$h = \left(\frac{\ln d}{2\pi} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{\ln d}{2\pi} \right)^2}$$

$$T' = \frac{2\pi}{\sqrt{1-h^2}\omega} \approx T = \frac{2\pi}{\omega}$$

 $h \ll 1$ とすると

外力がある場合



強制振動

$$f(t) = F \cos pt$$

 p : 外力の周波数

$$(-m\ddot{x}) + (-c\dot{x}) + (-kx) + f(t) = 0$$

慣性力 減衰力 復元力 外力

$$\longrightarrow m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

 x の値

$$(-m\ddot{x}) + (-c\dot{x}) + (-kx) = 0 \text{ の一般解と特殊解を足し合わせたもの}$$

$$\longrightarrow \ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = (F/m)\cos pt$$

$$\text{特殊解 } x = A\cos(pt - \theta) \quad A : \text{振幅}$$

 θ : 位相のずれ

25

1 質点系の調和加振

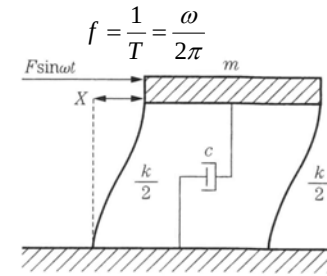


図 2-1 外力による 1 質点系の強制振動図

[出典：建築構造学大系 24 振動理論 大崎順彦著，
彰国社，p. 32 より引用に加筆]

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$\text{静的応答} \quad X_s = F/k$$

動的応答

$$X = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right\}^2 + \left\{2h\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right\}^2}} X_s$$

$$X = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right\}^2 + \left\{2h\left(\frac{f}{f_0}\right)\right\}^2}} X_s$$

$$\text{増幅率} \quad \alpha = X/X_s$$

26

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

共振と減衰

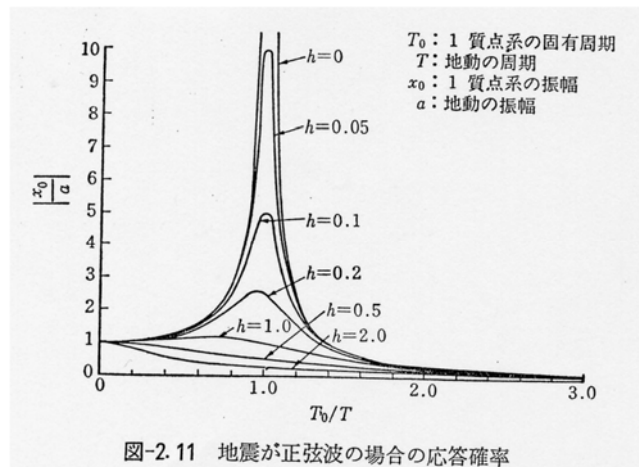


図-2.11 地震が正弦波の場合の応答確率

「土質・基礎工学のための地震・耐震入門」土質工学会 27

固有周期・固有モード

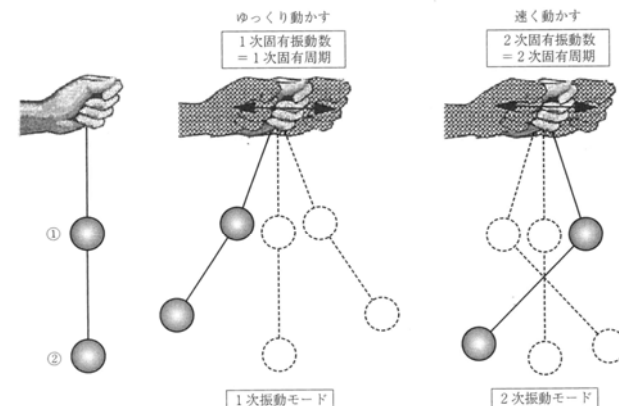


図 2-5 固有振動数と固有モードの説明 (2 自由度系)

[出典：実務の先輩たちが書いた 土木構造物の耐震設計入門 土木学会，p. 15 より引用]

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

28

多質点系の振動

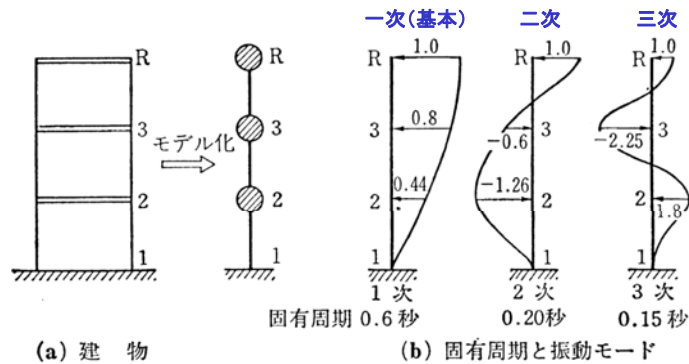


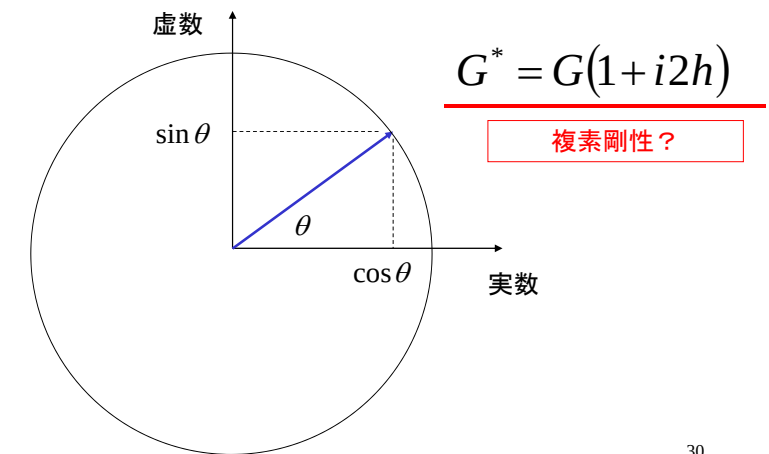
図-2.5 ある3層建物の固有周期と振動モード

2階建ては2個のモード、3階建ては3個のモード、... 連続体では無限のモード？

「土質・基礎工学のための地震・耐震入門」土質工学会 29

複素数 i : ($i^2 = -1$)

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$$



30

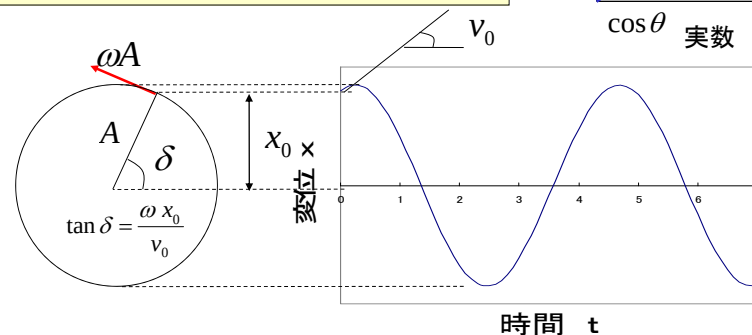
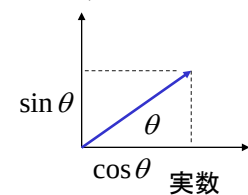
複素数 i で表した振動の式 ($i^2 = -1$)

$$x = \int v dt = A' \cos \omega t + iB' \sin \omega t = Ae^{i\omega(t-\delta)} = Ae^{i\omega t} e^{-i\omega\delta}$$

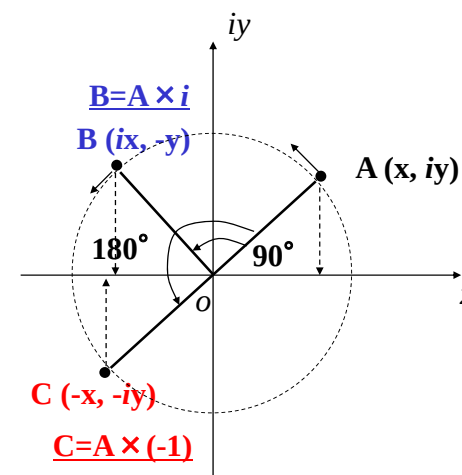
$$v = \dot{x} = \frac{dx}{dt} = i\omega A e^{i\omega(t-\delta)}$$

$$a = \ddot{x} = \dot{v} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A e^{i\omega(t-\delta)}$$

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$$



複素数 i をかけるということ



$A \rightarrow C$: $\times (-1)$ 180° 進ませる

=

$(A \rightarrow B)$ 90° 位相を進ませる, and

$(B \rightarrow C)$ 90° 位相を進ませる

ということは、

$-1 = i \times i$

だから、

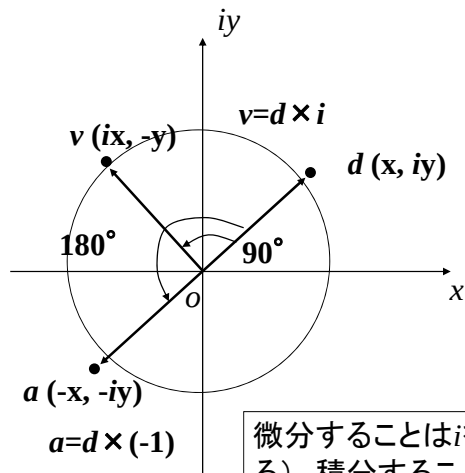
$\times i$ という操作は

位相を90° 進ませること。

32

複素数表示の意味

$$v = Ae^{i\omega t} \\ = A(\cos \omega t + i \sin \omega t)$$



微分 $a = \frac{dv}{dt} = \underline{i\omega} \cdot Ae^{i\omega t}$

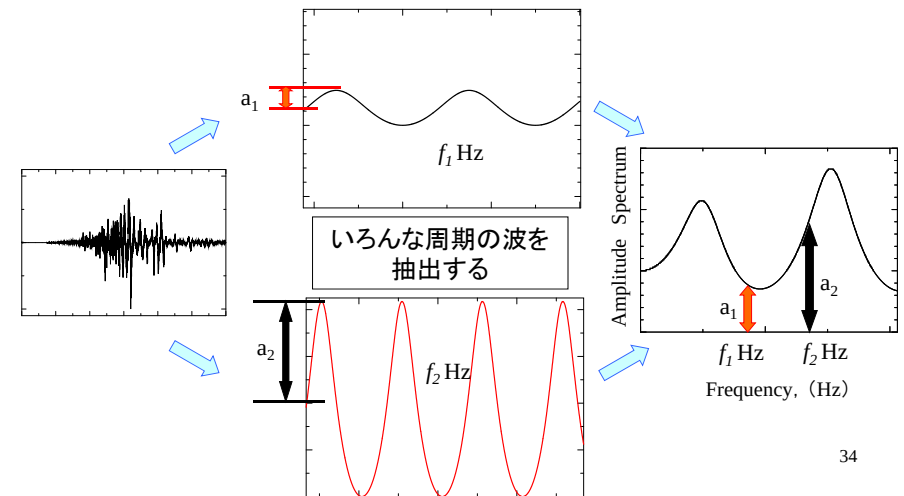
$$v = Ae^{i\omega t}$$

積分 $d = \int v dt = \frac{1}{\underline{i\omega}} \cdot Ae^{i\omega t}$

微分することは*i*を掛けること(位相を90deg.進める), 積分することは*i*で割ること(90deg.遅らす)

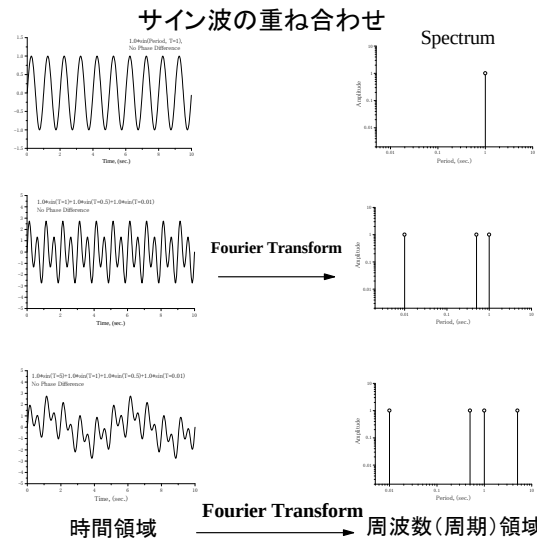
波の成分: フーリエ級数/スペクトル

$$x_m = A_0/2 + \sum_{l=1}^{N/2-1} \left[A_l \cos \frac{2\pi l m}{N} + B_l \sin \frac{2\pi l m}{N} \right] + A_{N/2}/2 \cos \frac{2\pi(N/2)m}{N}$$

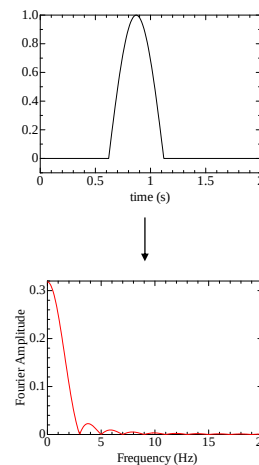


34

スペクトルの例

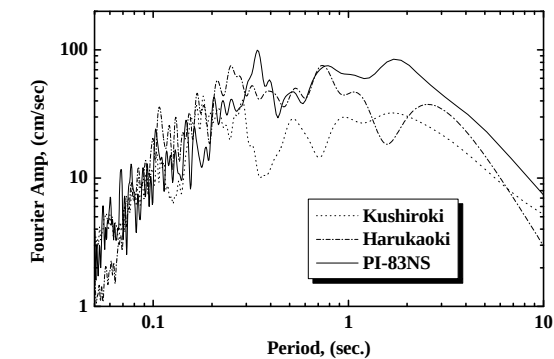


パルスの波は?



35

地震動のスペクトル例

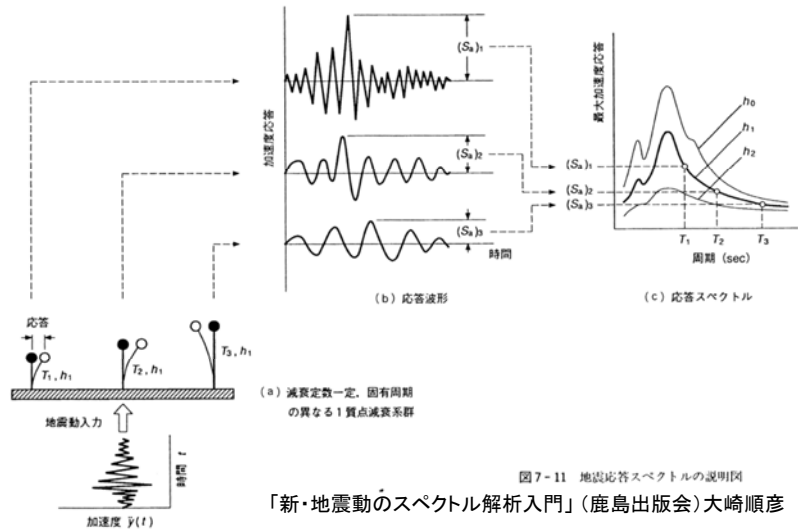
分解能: $f=1/(2\Delta t)$

$\Delta t=0.01s \rightarrow$ 分解できる波の
最高周波数50Hz

Fourier amplitude = $T/2 \times$ amplitude[cm/s]=[s] $\times$ [cm/s²]

36

応答スペクトルとは



応答スペクトル同士の関係

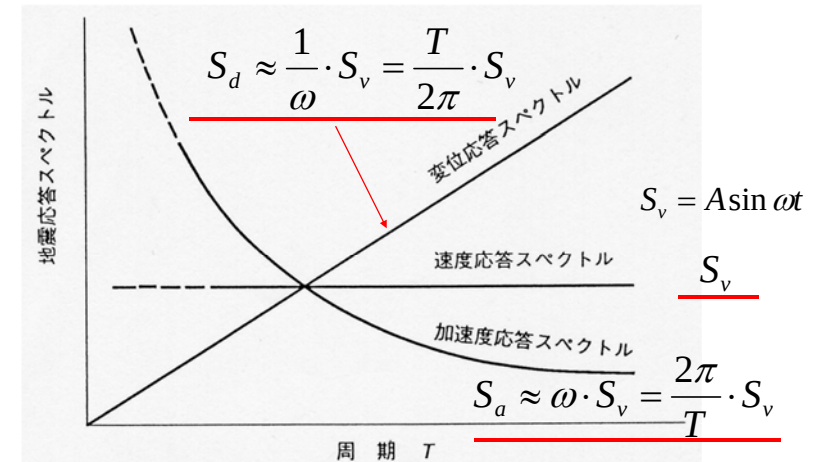


図7-16 地震応答スペクトルの概略の形

「新・地震動のスペクトル解析入門」(鹿島出版会)大崎順彦³⁸

2. 波を観る(図と式をつなぐ差分)

1次元波動方程式

$\rho dx \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\tau + d\tau) \cdot 1 - \tau \cdot 1$

$\gamma = \frac{\partial u}{\partial x}$

$\tau = G\gamma = G \frac{\partial u}{\partial x}$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$V = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

波動方程式

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad u = u(x, t)$$

加速度 — この意味を考える

メモ: Taylor展開:

$$u(x + \Delta x, t) = u(x, t) + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} (\Delta x)^3 + \dots$$

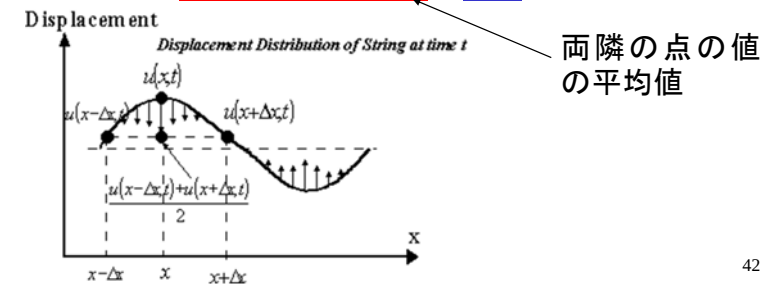
$$u(x - \Delta x, t) = u(x, t) - \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} (\Delta x)^2 - \frac{1}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} (\Delta x)^3 + \dots$$

41

波動方程式を差分で書き下すと...

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{1}{2\Delta x} [u(x + \Delta x, t) - u(x - \Delta x, t)]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &\approx \frac{1}{\Delta x^2} [u(x + \Delta x, t) + u(x - \Delta x, t) - 2u(x, t)] \\ &= \frac{2}{(\Delta x)^2} \left[\frac{u(x + \Delta x, t) + u(x - \Delta x, t)}{2} - u(x, t) \right] \end{aligned}$$

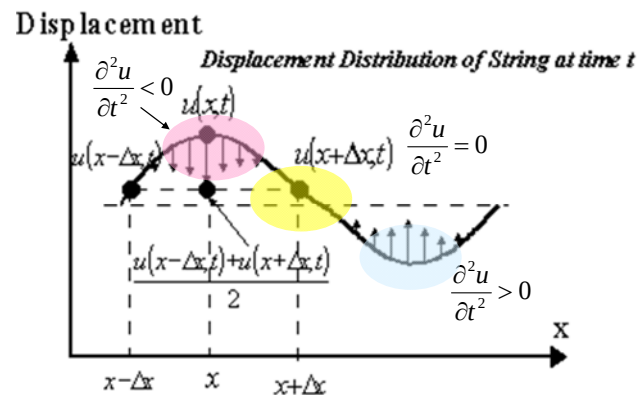


42

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{2}{(\Delta x)^2} \left[\frac{u(x + \Delta x, t) + u(x - \Delta x, t)}{2} - u(x, t) \right]$$

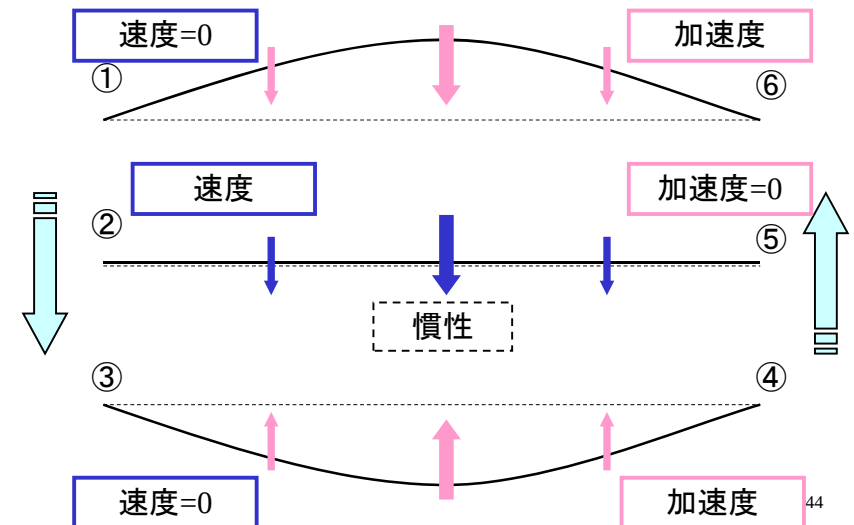
加速度

両隣の点の値の平均値



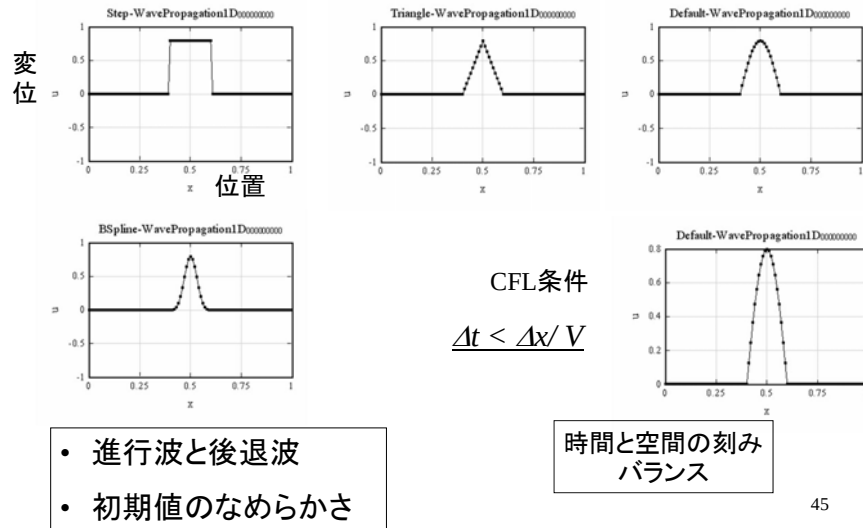
43

一次元弦の振動

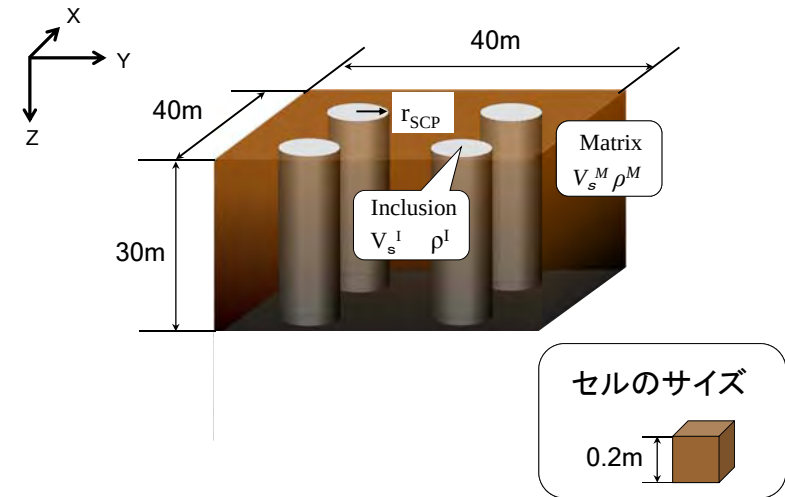
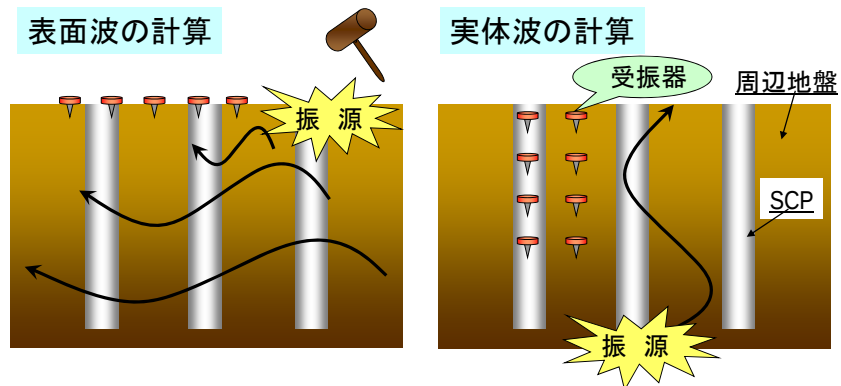


44

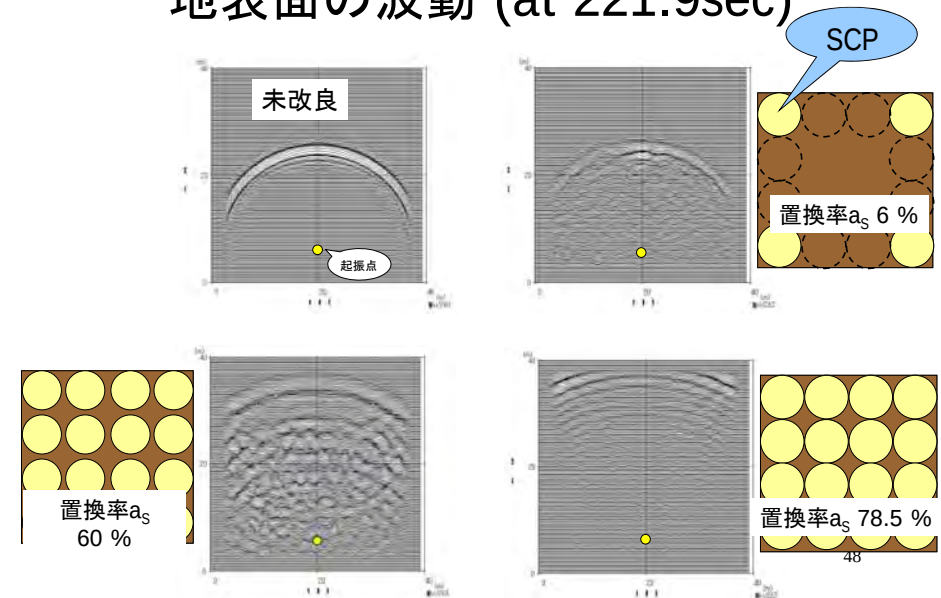
計算例(動画)



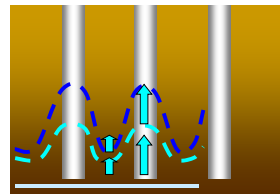
差分法による三次元粘弾性波動場解析

実体波と表面波三次元波動場解析
(振源と受信点)

地表面の波動 (at 221.9sec)

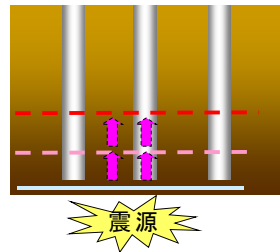


差分法による実体波伝播結果



相互作用の考慮

なし



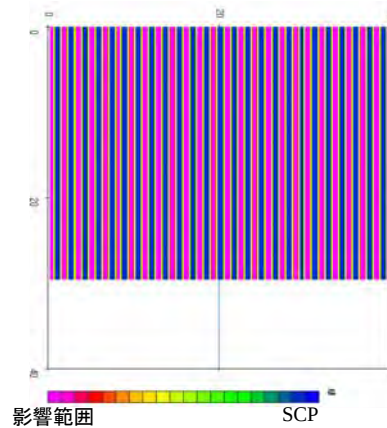
相互作用の考慮

あり

$$V_s^M = 100(\text{m/s})$$

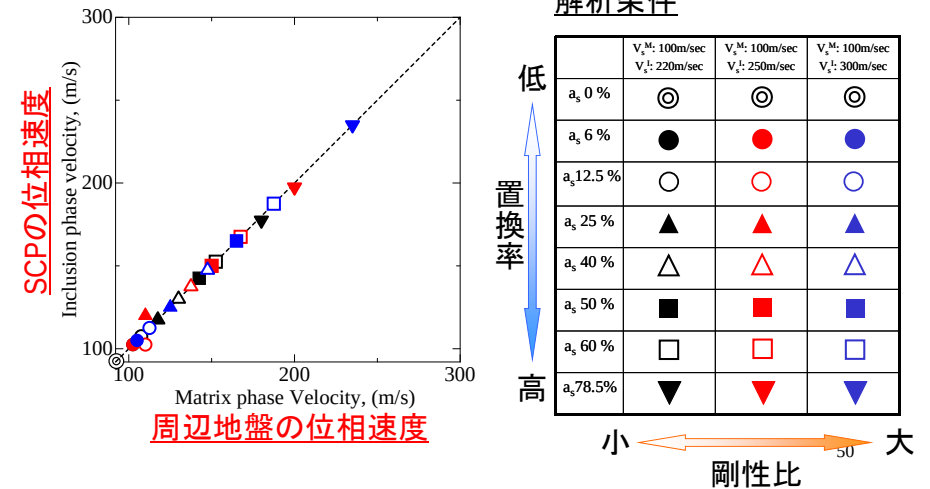
$$a_s = 20\%$$

$$V_s^{I1} = 300(\text{m/s})$$

約 $\frac{1}{25}$ 倍速で再生

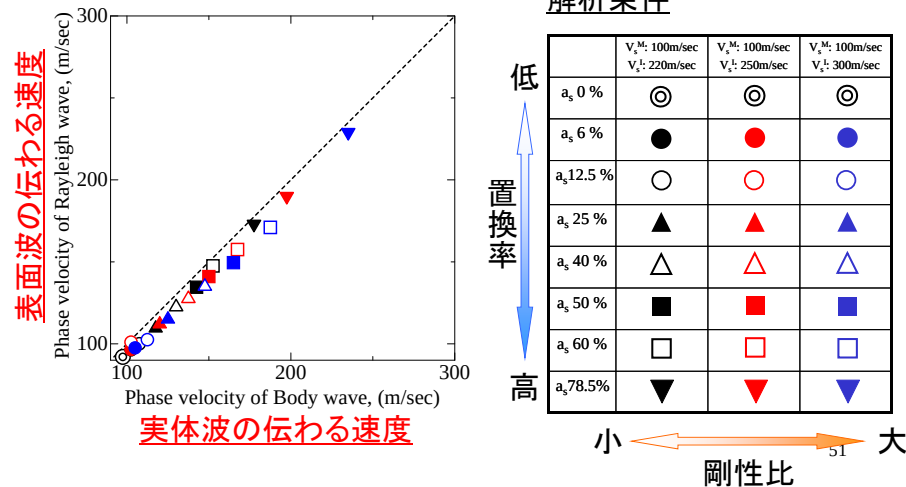
SCPと周辺地盤に伝わる位相速度の比較

解析条件

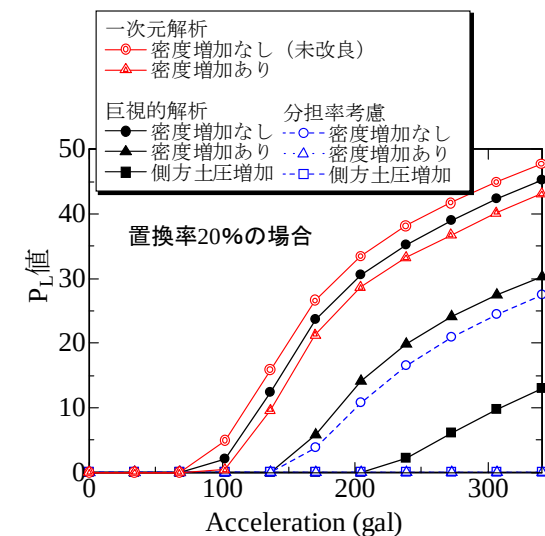


表面波（Rayleigh波）による計算結果と実体波による計算結果の比較

解析条件



均質化法地震応答解析結果



3. 土の立場を知る(揺れを考える上での土の特徴, 弾性から液状化)



53

非排水三軸試験で得られる変形・破壊挙動

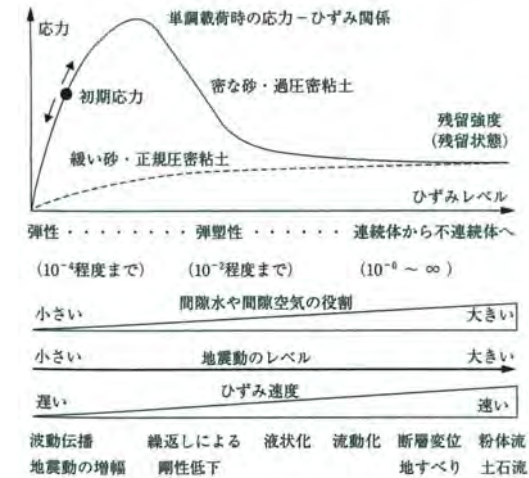
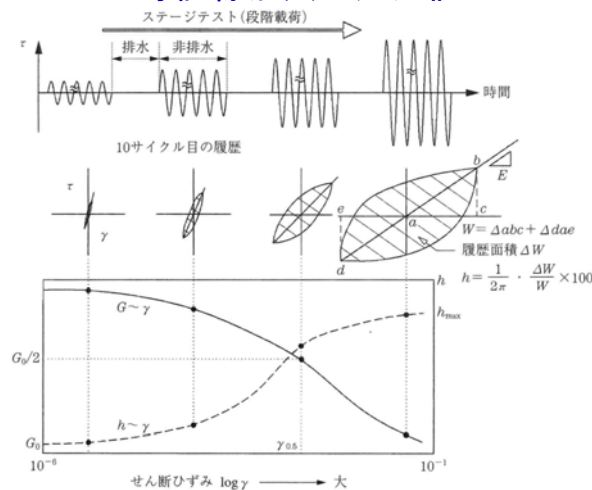


図 2.42 土に発生するひずみレベルと地盤の動的挙動

地盤工学会：地盤
の動的解析 一基
礎理論から応用ま
で、丸善

54

等価線形法の入力値

図 4-13 振動三軸試験と $G \sim \gamma$ 曲線, $h \sim \gamma$ 曲線のイメージ

[出典：地盤液状化の物理と評価・対策技術 吉見吉昭，福武毅芳著，技報堂出版，p. 26 より引用に加筆]

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

55

入力地震動 $2E$ と $E+F$

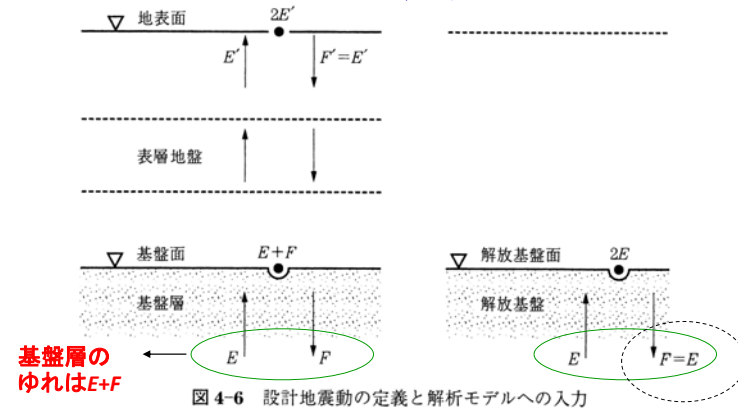


図 4-6 設計地震動の定義と解析モデルへの入力

[出典：トンネルライブラリー第9号 開削トンネルの耐震設計

実際に入ってくる地震動はE !

土木学会，p. 33 より引用]

$E+F$ 入力：地下数メートルの基盤で得られた観測地震動→地震動が境界条件→剛体基盤

$2E$ 入力：E=与えられた地震動/2

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

56

弾性波速度と弾性係数

$$\text{縦波: } V_p = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho} = \sqrt{E(1-\nu)/(1+\nu)(1-2\nu)/\rho}$$

$$\text{横波: } V_s = \sqrt{G/\rho} = \sqrt{E/2(1+\nu)/\rho}$$

$$V_p/V_s = \sqrt{2(1-\nu)/(1+\nu)}$$

$$\lambda = V \cdot T$$

$$V = f \cdot \lambda = \frac{1}{T} \cdot \lambda$$

波の速度 V , 周波数 f , 周期 T , 波長 λ

57

様々な材料の V_p と V_s

媒質の種類		P波速度 V_p (m/s)	S波速度 V_s (m/s)	ポアソン比 ν	密度 ρ (g/ml)
沖積層	粘性土	250~700 (1,500)*	80~160	0.35~0.50	1.3~1.7
	砂質土		60~200		1.6~2.0
洪積層	砂 礫	1,000~2,000 (1,500)* ~2,000	250~350		1.8~2.1
	関東ローム		140~200		1.2~1.6
岩石	粘性土	2,000~3,000 2,000~3,500 4,000~5,700 4,400~6,700	160~250	0.30~0.40	1.4~1.8
	砂質土		200~350		1.7~2.1
	砂 礫		300~600		1.8~2.2
	泥 岩		600~1,000		2.2~2.6
	砂 岩	2,000~3,000 2,000~3,500	700~2,000	0.25~0.35	2.5~2.7
	花崗岩		2,100~3,300		2.6~2.8
	玄武岩	4,000~5,700 4,400~6,700	2,500~3,800		2.8~3.0
	玄武岩				
上部マントル		7,500~8,000	4,300~4,600	≈0.25	≈3.3
空気(乾燥, 0℃, 1気圧)		331	—	—	0
水(蒸留, 23~27℃)		1,500	—	—	1.0
氷		3,230	1,600	0.338	0.338
コンクリート		3,100	1,960	0.167	2.3
鉄		5,950	3,240	0.289	7.86

*飽和土の場合

「おもしろジオテクノート」(技報堂)⁵⁸

せん断剛性と減衰定数

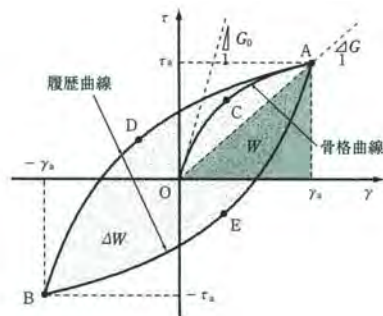


図 4.3 非線形モデル

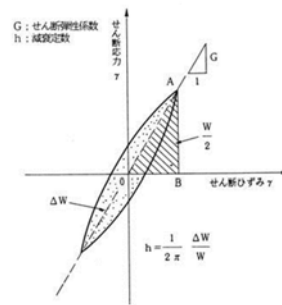
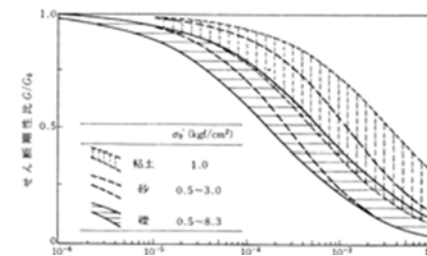
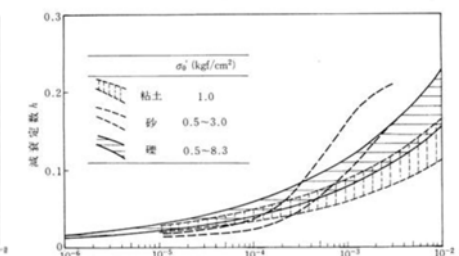


図-4.3.3 応力～ひずみ関係の等価線形モデル化

「やさしい土質力学原理」地盤工学会⁵⁹

様々な材料のせん断剛性と減衰定数

せん断剛性比 G/G_0 ～せん断ひずみ γ G/G_0 減衰定数 h ～せん断ひずみ γ h

「やさしい土質力学原理」地盤工学会⁶⁰

4. どんな地盤がゆれやすいのか考える(事例紹介とそのメカニズム)



61

構造物別被害

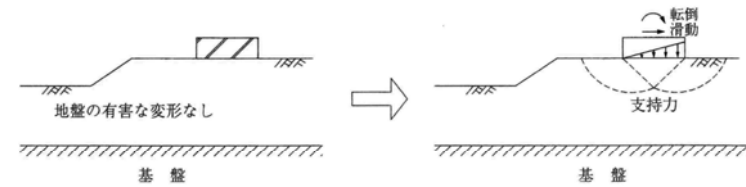


図 1-24 地盤に有害な変形が生じない場合(安定検討)

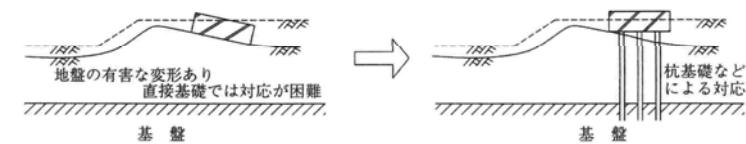


図 1-25 地盤に有害な変形が生じる場合(他の基礎形式にて対応)

62

考え方がよくわかる設計実務3 耐震設計の基本(大成建設) インデックス出版

表層の地震動=震源断層のメカニズム×地殻中の地震波伝播
×地殻中の地震波伝播×局所的な地盤による増幅と減衰

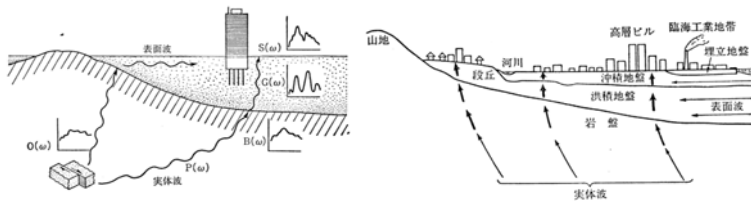
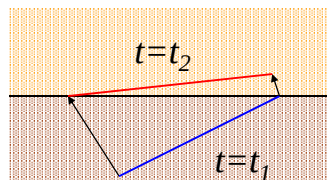


図-1.12 地震波伝播の概念図

図-3.1 地盤の模式図と地震波の到達経路

「土質・基礎工学のための地震・耐震入門」土質工学会



やわらかい地盤(波がゆっくり伝わる)

硬い地盤(波が速く伝わる)

63

重複反射理論

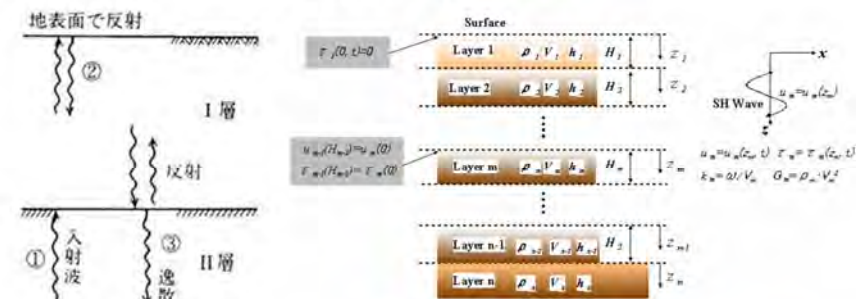


図-25 逸散減衰の概念

Multi-Layer System and Coordinate System

「やさしい土質力学
原理」地盤工学会

一番興味があるのは

$$A_1/A_n = (\text{表層の振幅})/(\text{基盤の振幅})$$

=増幅特性

64

(a) 建物

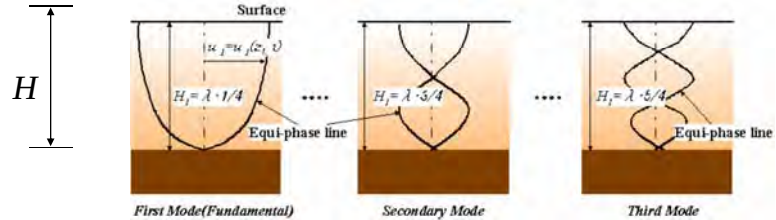
(b) 四有間橋と橋脚モーメント

(c) 四有間橋と橋脚モーメント

(d) 四有間橋と橋脚モーメント

$$V = f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{T}$$

$$G = \rho V_s^2$$



2次モード

3次モード

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{4} \frac{V}{H}$$

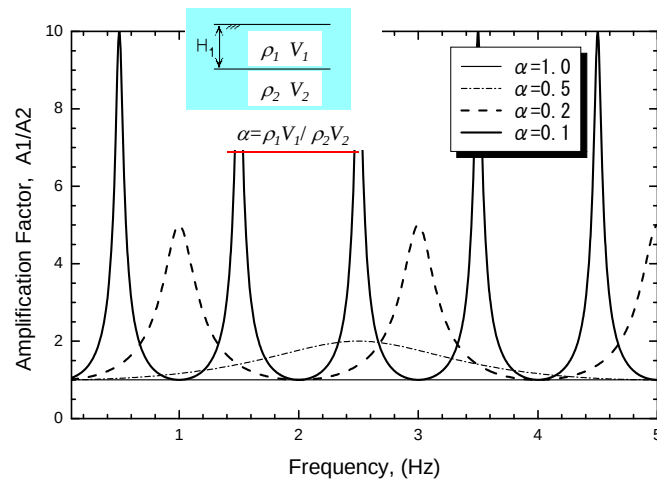
$$f_2 = \frac{3}{4} \frac{V}{H} = 3f_1$$

$$f_2 = \frac{5}{4} \frac{V}{H} = 5 f_1$$

$$T_1 = \frac{4H}{V} = 4H \cdot \frac{1}{\sqrt{G/\rho}}$$

軟らかく厚いそうはゆっ
くりゆれる

液状化すると？
 $G \rightarrow 0$



おなじみの質点の運動エネルギー

$$E = \frac{1}{2} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{質量}}}{m} \underset{\substack{\nwarrow \\ \text{運動速度}}}{V^2}$$

揺れながら進む波動の運動エネルギー

$$E = \frac{1}{2} \underbrace{\rho \cdot V_s}_{\text{波の長さ} \rightarrow \text{質量}} \cdot \underbrace{\omega^2}_{\text{運動速度}} \cdot \underbrace{|A|^2}_{\text{ゆれの振幅}}$$

Eが保存されるとき、例えば軟らかい層(G が低く V_s が小さい層)に入射するとゆれの振幅 A は大きくなる⇒海の波...(深さと波高) 66

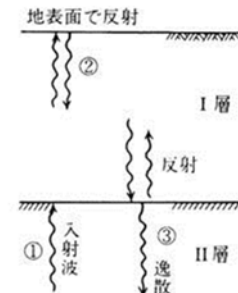
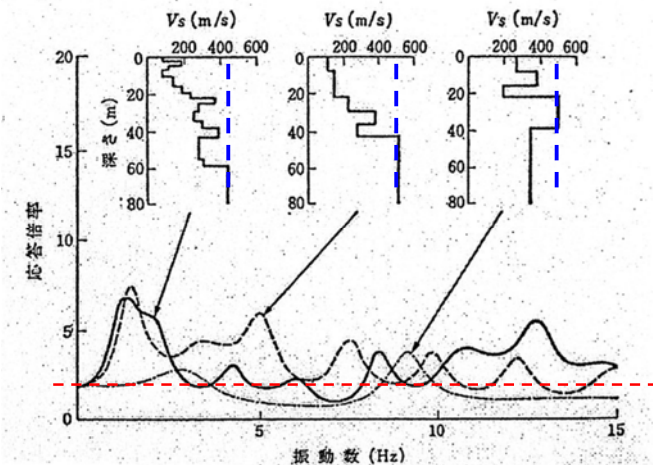
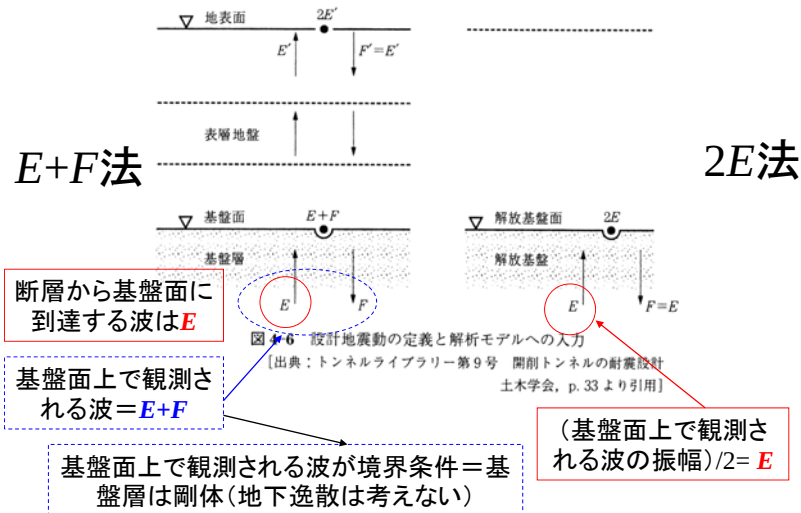


図-25 逸散減衰の概念

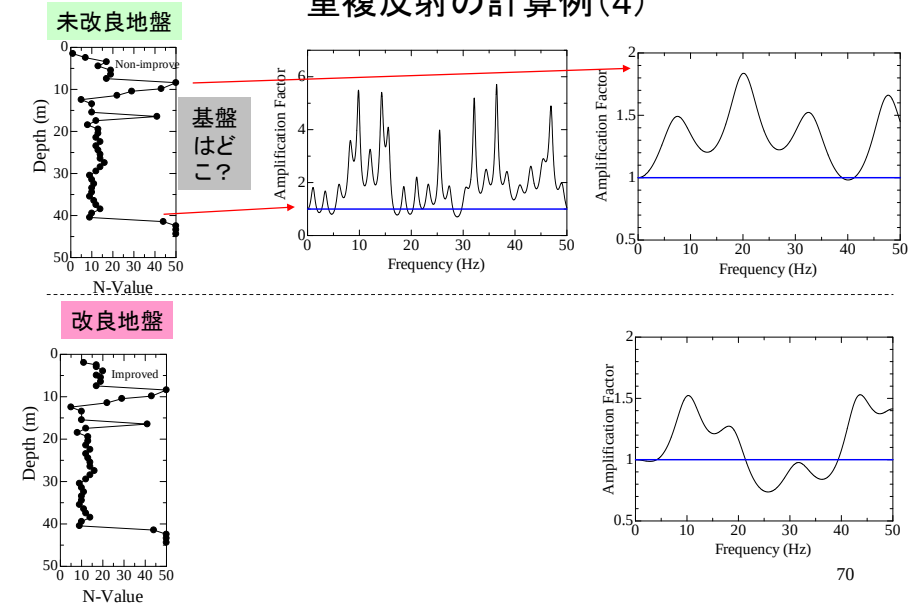
「やさしい土質力学
原理」地盤工学会

設計用地震動の入力方法：2E法とE+F法



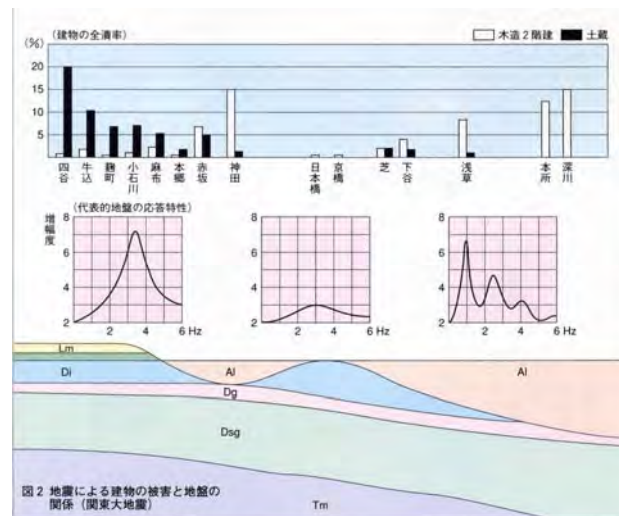
69

重複反射の計算例(4)



70

関東大地震：日本に高層ビルがたつようになった理由？



71

「おもしろジオテクノート」(技報堂)

破壊の連鎖：良い地盤はいい

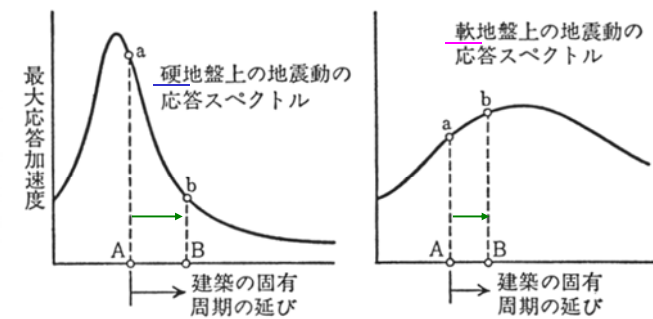


図 VII-9 固有周期の延びと作用する力の変化

「地震と建築」(岩波新書)大崎順彦から

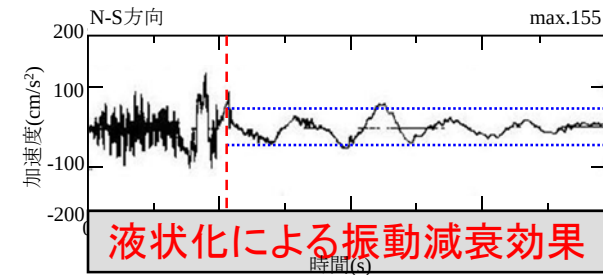
72

名古屋市の場合は？（液状化危険度分布から）



濃尾地震(1891, M=8.1), 東南海地震(1944, M=8.0), 三河地震(1945, M=7.1)のいずれかで液状化した地域も含まれている(地盤工学会,「最新名古屋地盤図」)

液状化地盤にはこのような記録が存在する。

新潟地震(1964)の際の新潟市川岸町における地盤の加速度記録¹⁾

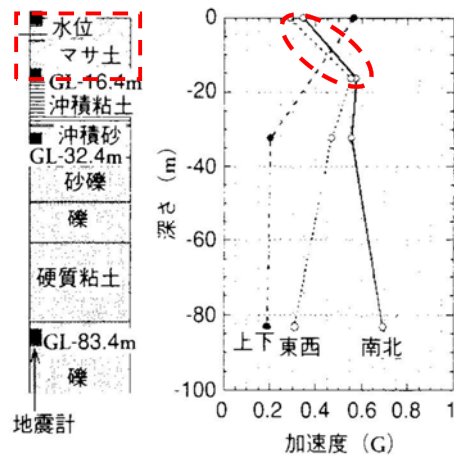
10秒以降

振幅の減衰

地盤が液体状となりせん断波を伝えにくくなったため

出典:新・地震動のスペクトル解析入門(1994)

神戸ポートアイランド:深さ方向加速度



埋立土のマサ土

液状化

加速度の減少

この他にも、液状化による
振動減衰効果の事例は多く
存在する。

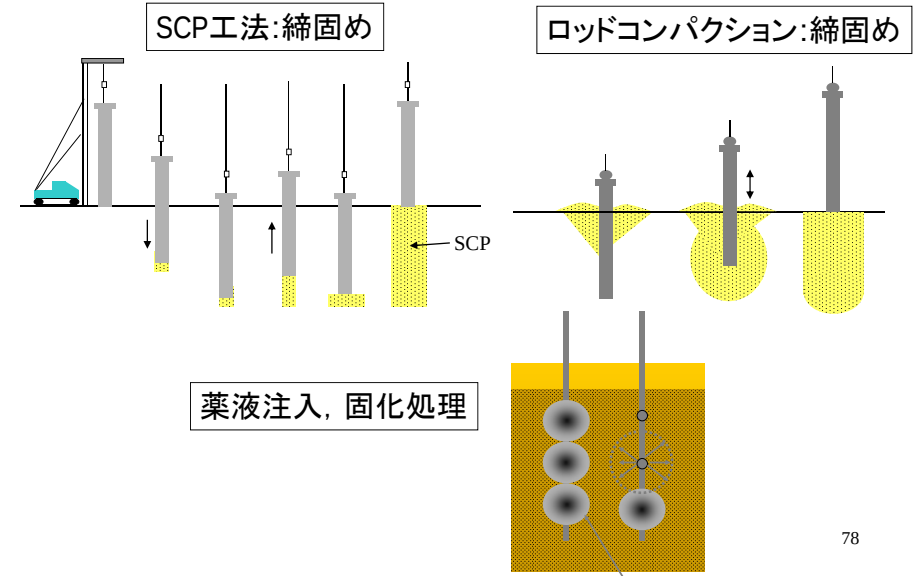
出典:Nonlinearity in site amplification and soil properties during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake,Special Issue of Soils and Foundation(1998)

減衰材料の検討

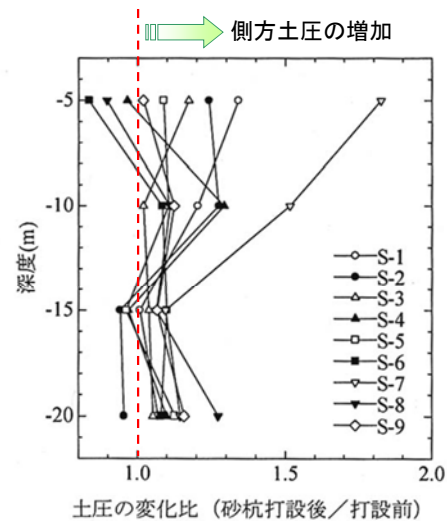


5. 現地調査結果を整理する(地盤の動的特性計測結果の紹介, パラメータ入力)

液状化対策工法のいろいろ



SCP打設に伴う側方土圧の変化



現場での地盤調査

調査方法

- ・ 常時微動観測
- ・ 表面波探査
- ・ 貫入試験

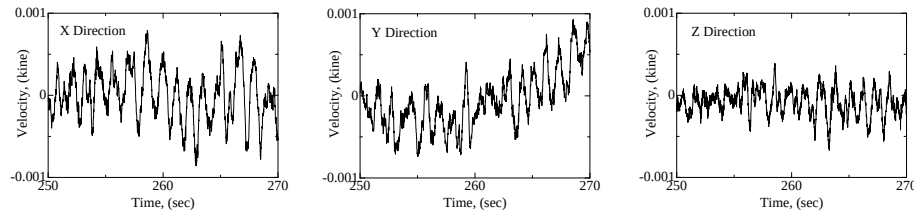
調査地点

- ・ 港 1箇所
- ・ 空港 1箇所
- ・ 護岸 3箇所

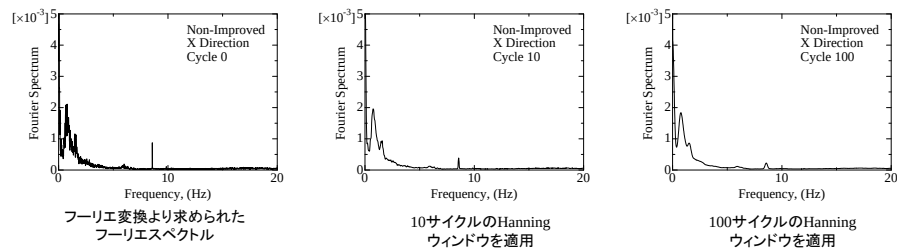


微動計測結果の整理

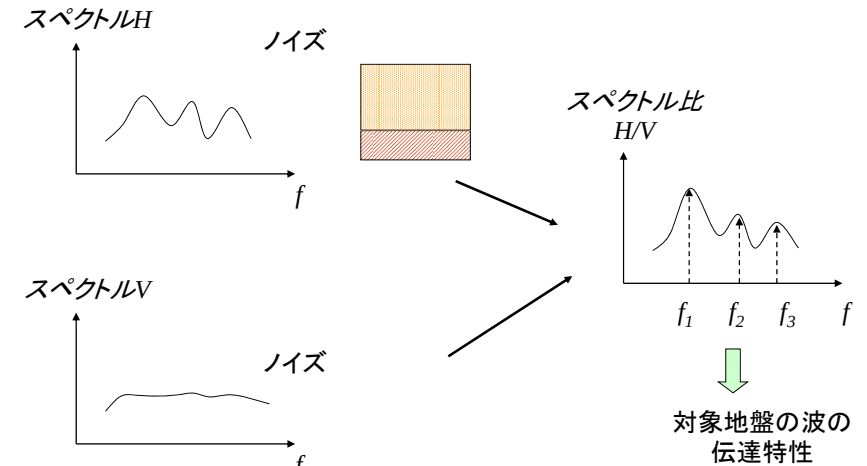
時刻歴



スペクトルと平滑化

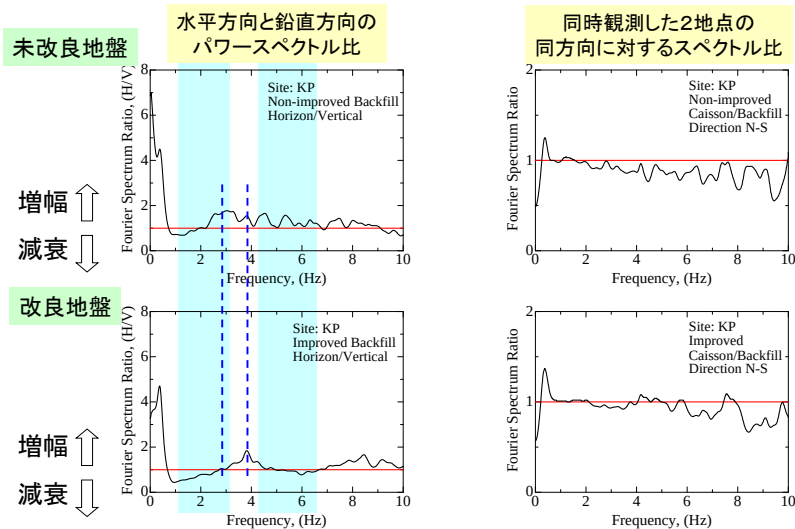


伝達関数



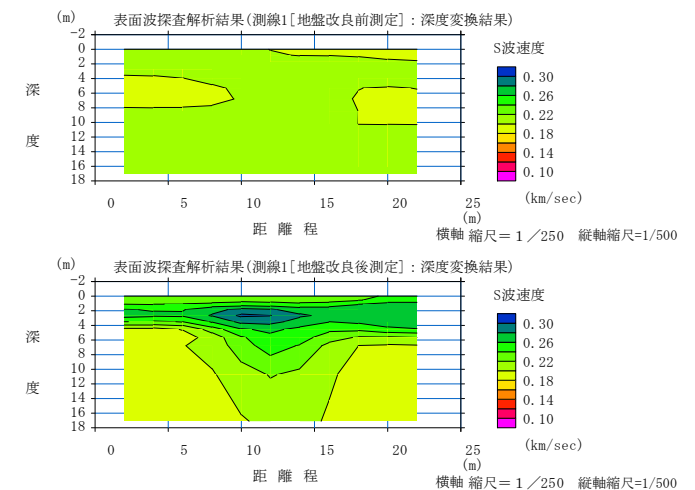
82

KP地点: フーリエスペクトル比より求めた固有振動数



83

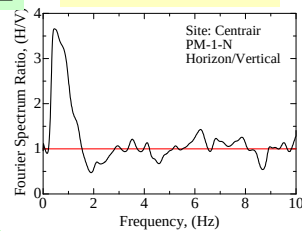
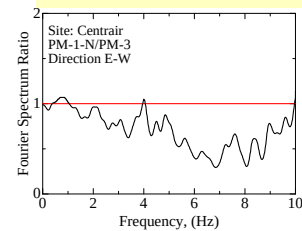
C: 表面波探査解析結果(測線1)



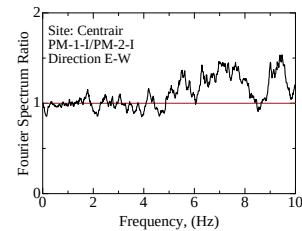
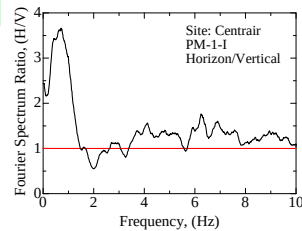
84

C: フーリエスペクトル比より 求めた固有振動数

未改良地盤

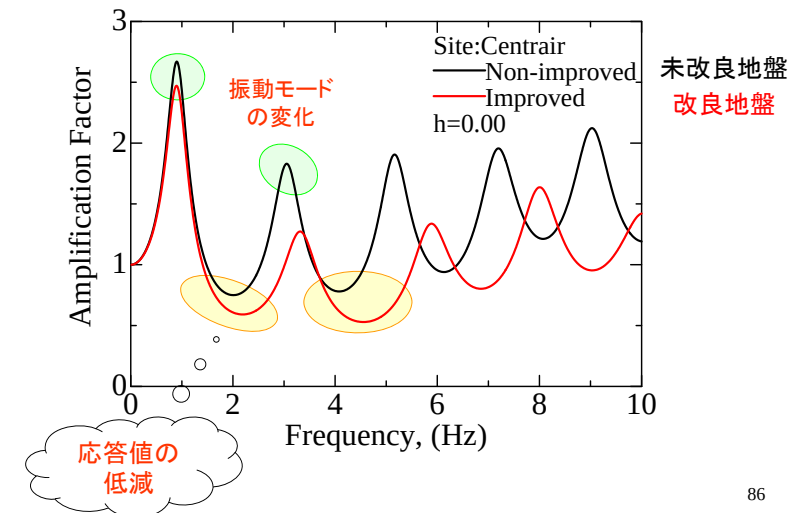
水平方向と鉛直方向の
パワースペクトル比同時観測した2地点の
同方向に対するスペクトル比

改良地盤



85

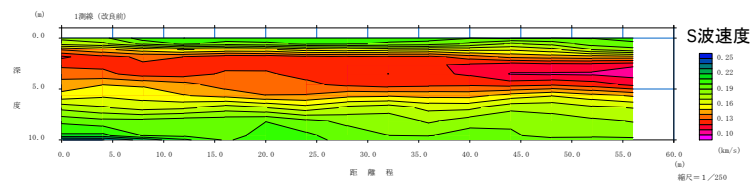
重複反射理論による解析結果



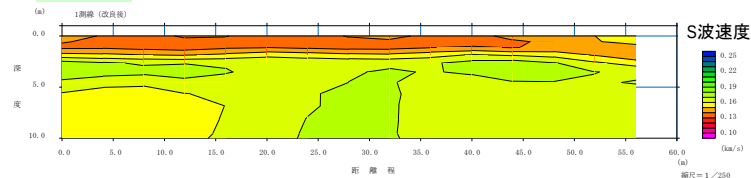
86

表面波探査解析結果 (S波速度構造)

改良前



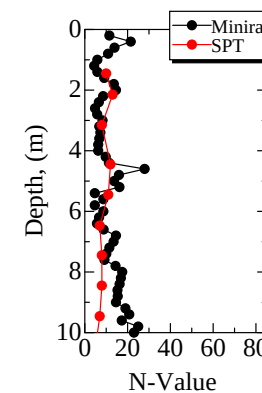
改良後



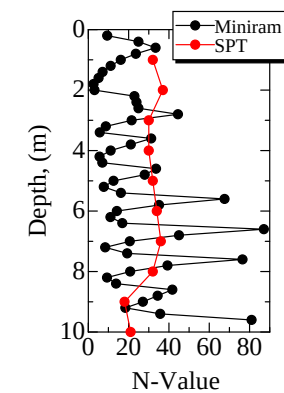
87

ミニラム試験とSPTとの比較

未改良



改良後 (SCPの間)

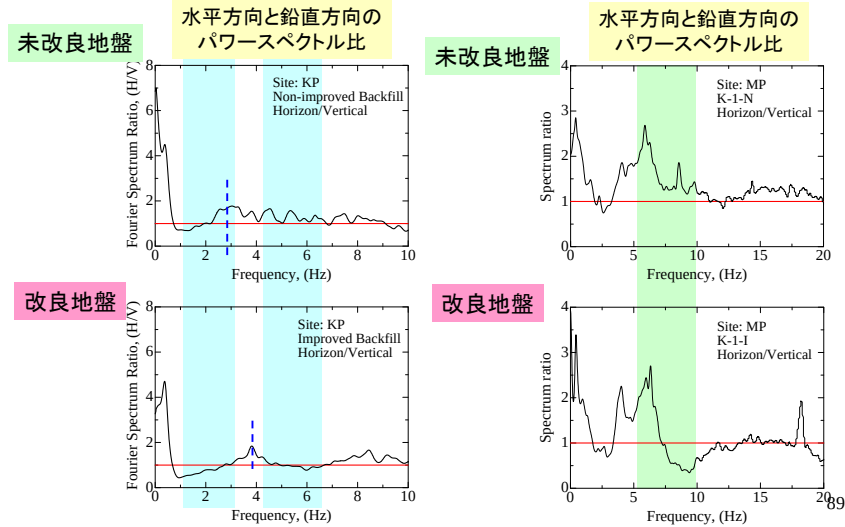


周期的

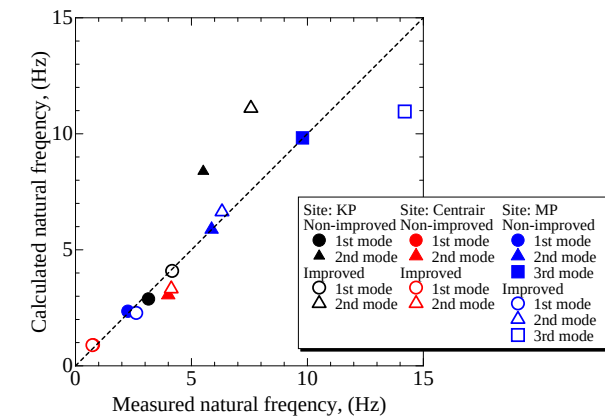
同じ貫入試験でも、地盤へのエネルギーの違いにより結果は違う!!

88

実際の地盤でえられたスペクトル：地盤改良(1)

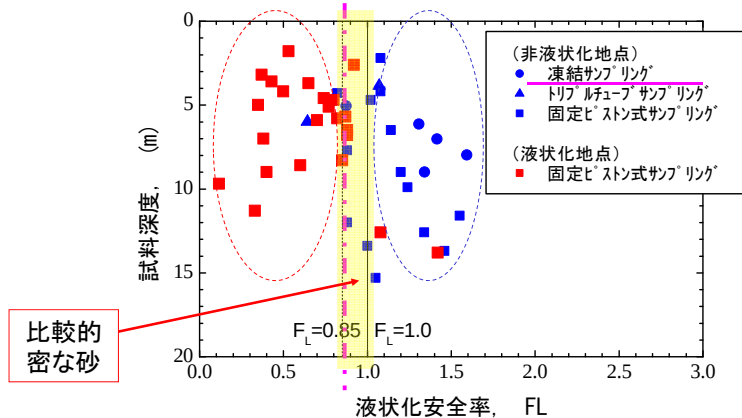


計算値と実測値における固有振動数の比較



90

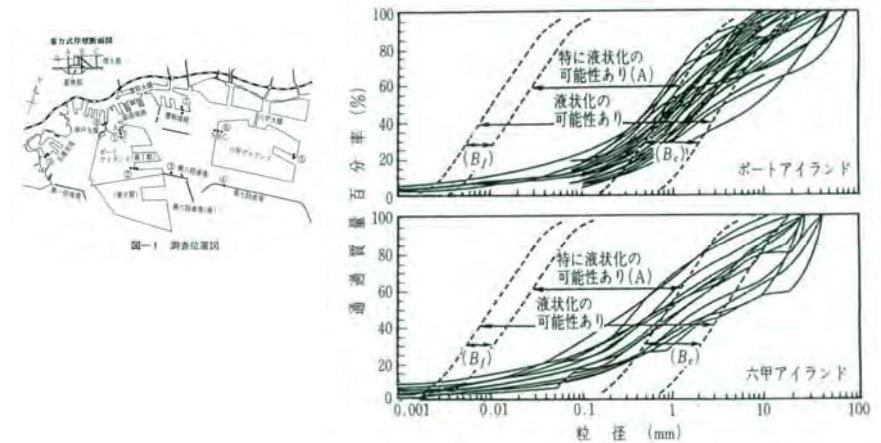
液状化予測の事例解析： てきとうに密な地盤が救われない？



- ✓ 強度の見積もり？(密な砂のねばり)
- ✓ 不規則波？
- ✓ 外力の見積もり？

91

粒度が良いと液状化しない？(大きな石から粘土まで)

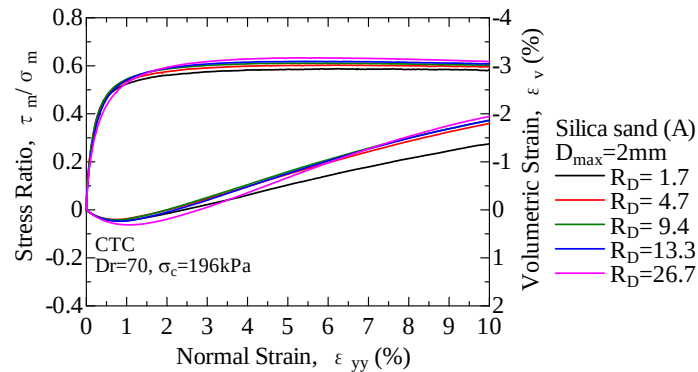


図一 2 粒径加積曲線 (地震前)

善、山崎(1996):土と基礎, 44-2

92

粒度分布が良い土は良い土か？締め固めないと同じ



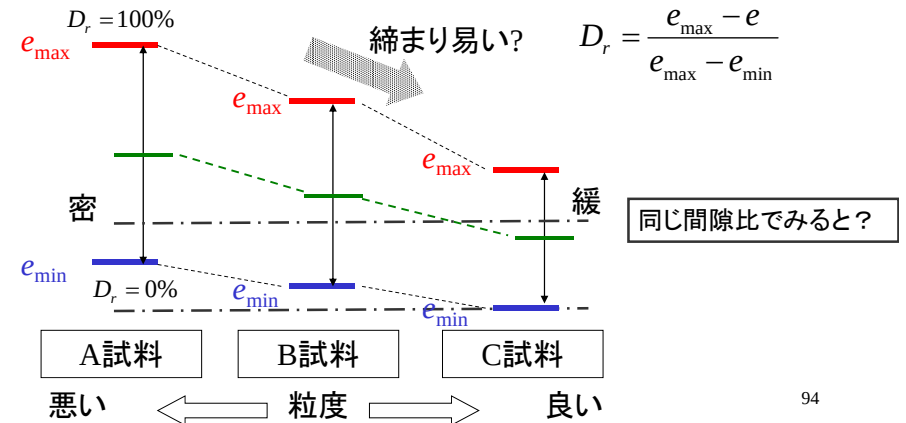
相対密度 D_r をそろえると、粒度が良くても悪くても強度は同じ！

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

93

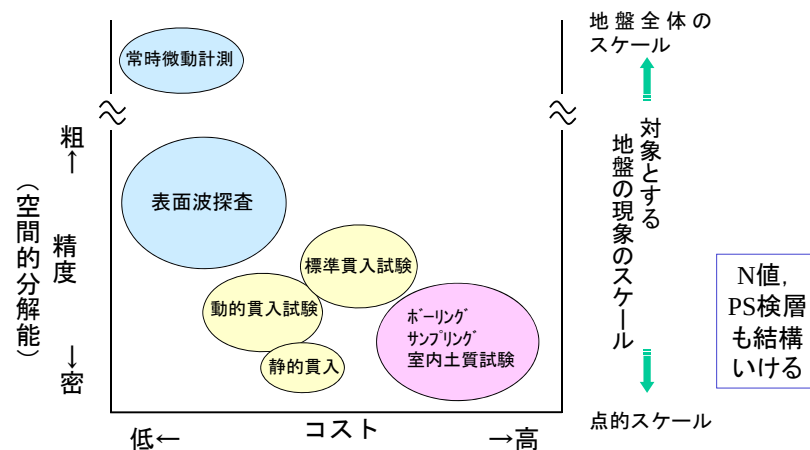
粒度分布が良い土は良い土か？締め固めないと同じ

粘土: $I_p = w_L - w_p$; 砂は $e_{max} - e_{min}$ $\Rightarrow e_{max} \approx 1.62e_{min}$



94

地盤調査の分解能とコスト



性能設計は緻密で高度な計測と複雑な計算をしなければ実現しないものではない?? (技術力は衰退?? 魅力のないものに??)
 $\Rightarrow$ 現象をとらえるポイント?? (このほうが技術力が必要)

性能照査

- データベース → ???
- 実物大実験 → 調査の重要性
- 試験施工 → 調査の重要性
- 遠心模型実験 → こだわりの必要性
- 数値計算 → 調査とモデルの適合性

96