



地盤工学会中部支部
地盤力学・工学講習会(理論編)

地盤の動的挙動 - 振動と波動の基礎を理解する

10月17日(金)

名古屋工業大学 前田健一

(<http://www.cm.nitech.ac.jp/maeda-lab/>)



講義内容

1. **振動論基礎の復習** (固有周期, 減衰定数, 複素数も怖くない)
2. **波動伝播式を図で理解** (意外と分かり易い差分法)
3. **地盤材料の動的性質の整理** (材料による違い)
4. **地盤はゆれ方と被害の解釈** (事例とそのメカニズム)
5. **現地調査結果の考察** (パラメータの設定, 地盤の動的特性計測結果の紹介)

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
- - 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 - 基礎理論から応用まで -, 丸善
- 地盤工学会：入門シリーズ 地盤・耐震工学入門



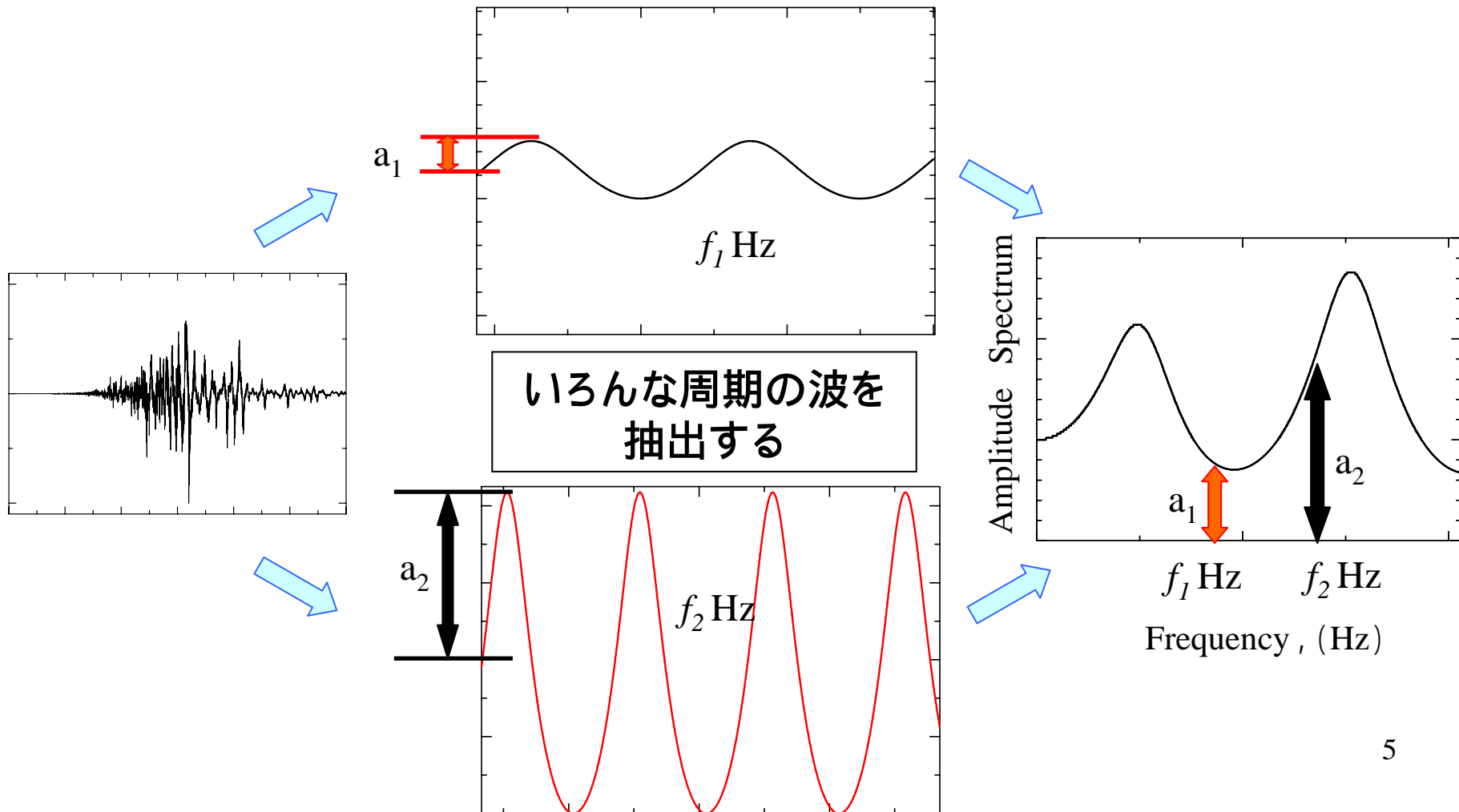
1. 振動論基礎の復習
(固有周期, 減衰定数,
複素数も怖くない)

MAEDA Lab.

Geotechnics
Laboratory 

波の成分：フーリエ級数/スペクトル

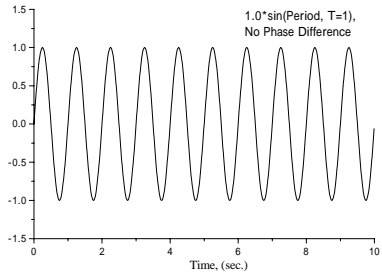
$$x_m = A_0/2 + \sum_{l=1}^{N/2-1} \left[A_l \cos \frac{2\pi l m}{N} + B_l \sin \frac{2\pi l m}{N} \right] + A_{N/2}/2 \cos \frac{2\pi(N/2)m}{N}$$



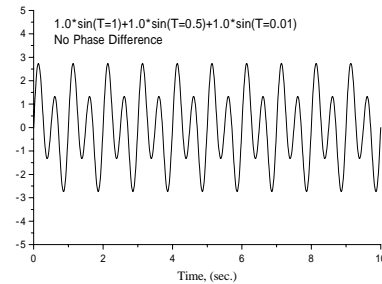
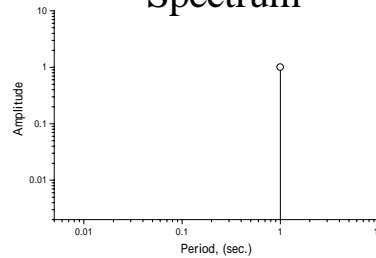


スペクトルの例

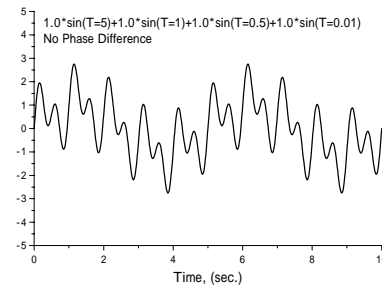
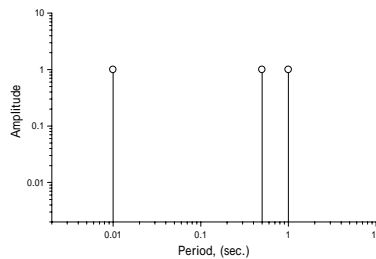
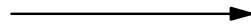
サイン波の重ね合わせ



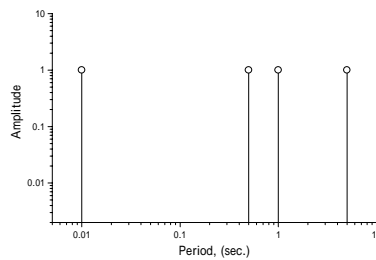
Spectrum



Fourier Transform



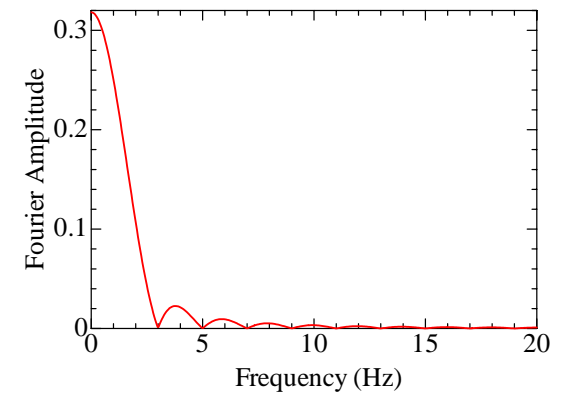
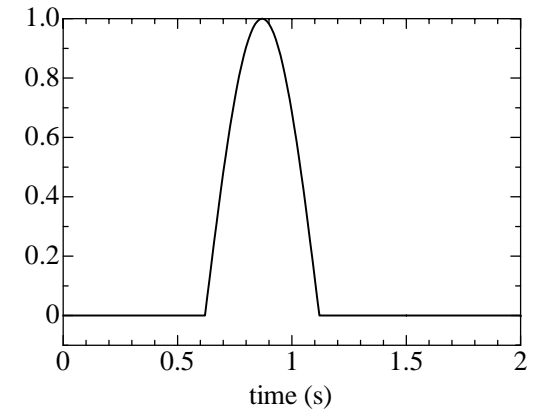
Fourier Transform



時間領域

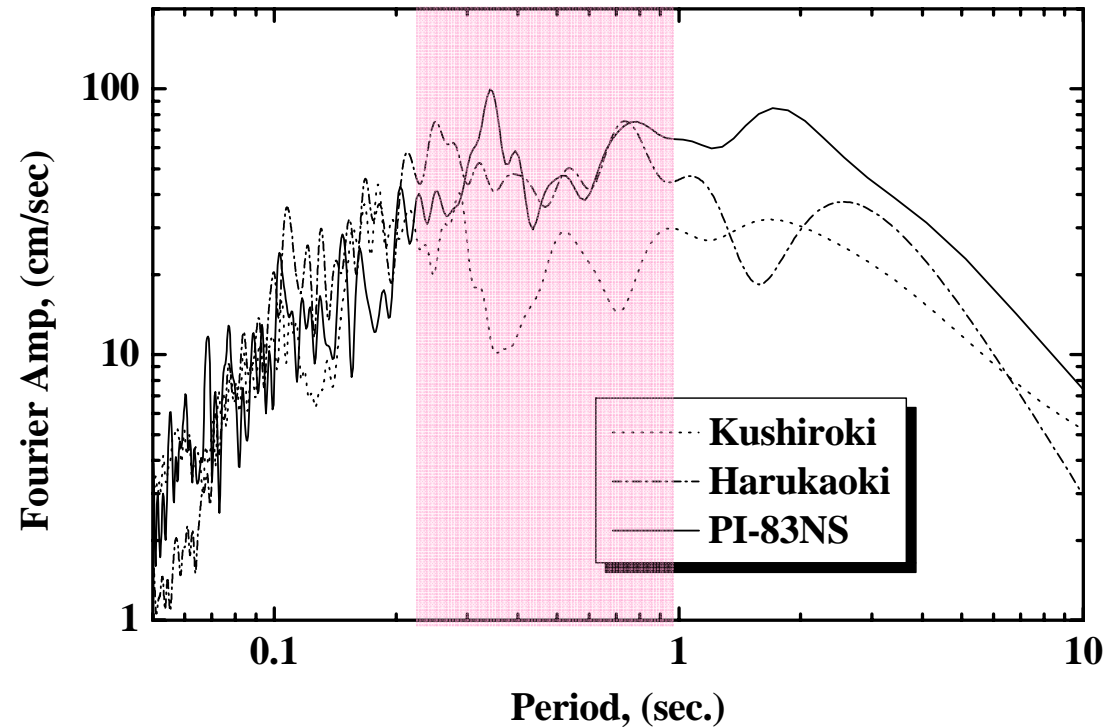
周波数(周期)領域

パルスの波は？





地震動のスペクトル例



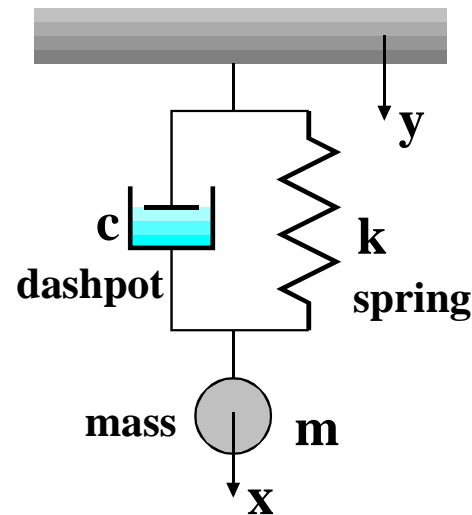
分解能: $f=1/(2\Delta t)$

$\Delta t=0.01s$ 分解できる波の
最高周波数50Hz

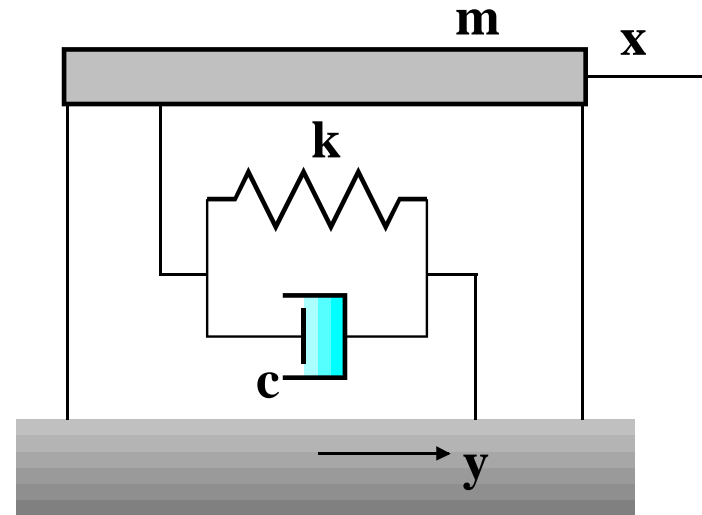
Fourier amplitude = $T/2 \times \underline{\text{amplitude}}$

$[\text{cm/s}] = [\text{s}] \times [\text{cm/s}^2]$

1質点モデル



spring-dashpot-mass system



structure system

Voigt model

釣り合い式:

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

(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

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

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

代入する

解を $x = Ae^{\lambda t}$ とおく

$$\begin{cases} \dot{x} = \lambda Ae^{\lambda t} \\ \ddot{x} = \lambda^2 Ae^{\lambda t} \end{cases}$$

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



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

$$= -h\omega \pm \sqrt{h^2 - 1} \omega_0$$

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

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

$h > 1$ の場合



過減衰振動

$h = 1$ の場合

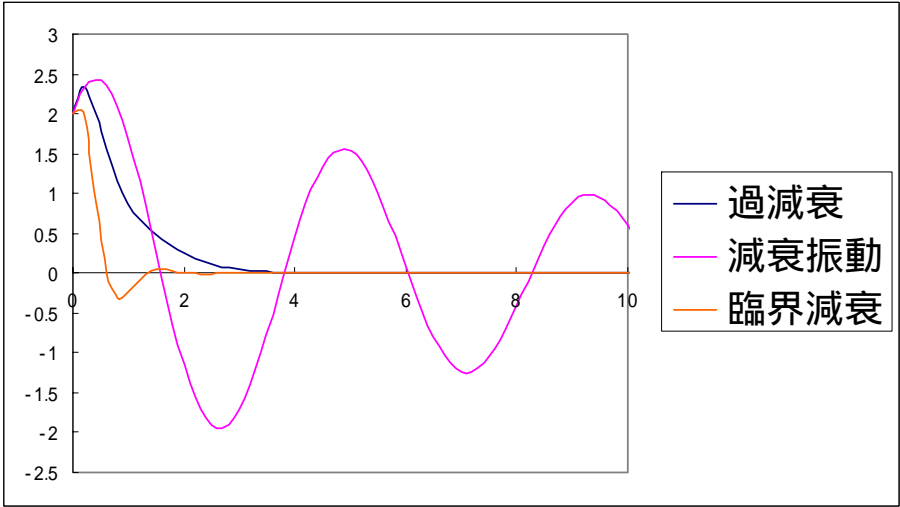


臨界減衰

$0 < h < 1$ の場合



減衰自由振動



λ_1, λ_2 は複素数

$$\underline{0 < h < 1}$$

$$\lambda_1, \lambda_2 = -h\omega_0 \pm \sqrt{1-h^2} i \omega_0$$

$$\sqrt{h^2-1} = \sqrt{1-h^2} i \quad i^2 = -1$$

$$x = e^{-h\omega_0 t} \left(A' e^{\sqrt{1-h^2} i \omega_0 t} + B' e^{-\sqrt{1-h^2} i \omega_0 t} \right)$$

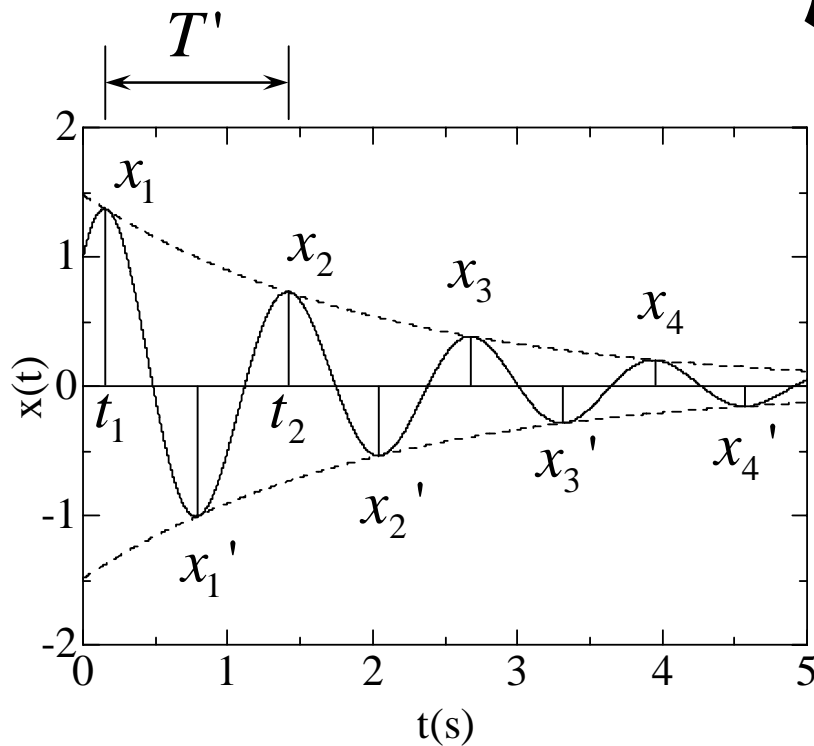
振幅の減衰効果

振動する成分

$$\underline{h=0}$$

$$x = 1 \left(A' e^{i\omega_0 t} + B' e^{-i\omega_0 t} \right)$$

周期 T



$$t_2 - t_1 = T'$$

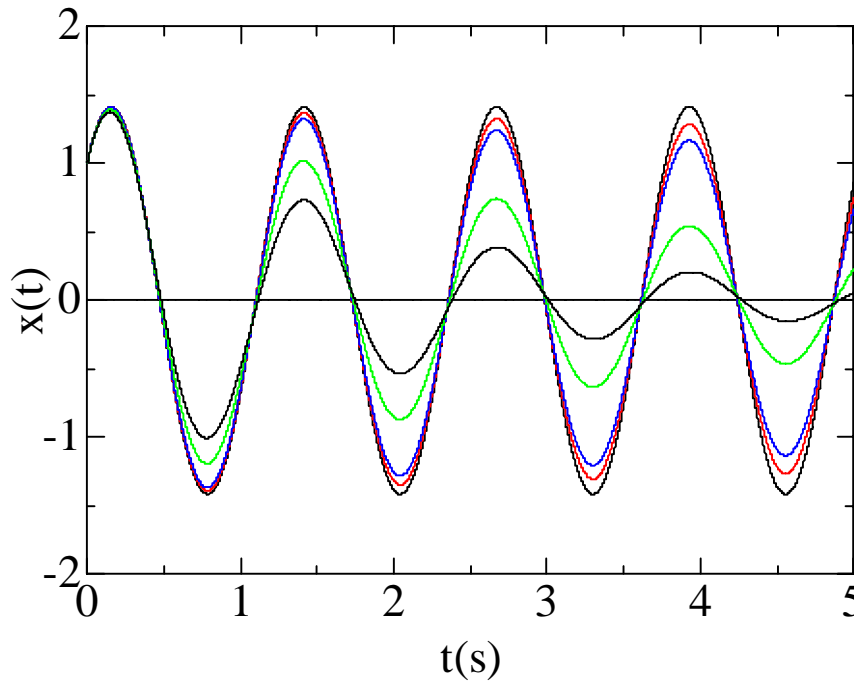
$$t = t_1 \quad x_1 = e^{-h\omega_0 t_1} \left(x_0 \cos \sqrt{1-h^2} \omega_0 t_1 + \frac{v_0 + h\omega_0 \cdot x_0}{\sqrt{1-h^2} \omega_0} \sin \sqrt{1-h^2} \omega_0 t_1 \right)$$

$$t = t_2 \quad x_2 = e^{-h\omega_0 t_2} \left(x_0 \cos \sqrt{1-h^2} \omega_0 t_2 + \frac{v_0 + h\omega_0 \cdot x_0}{\sqrt{1-h^2} \omega_0} \sin \sqrt{1-h^2} \omega_0 t_2 \right)$$

\longrightarrow = とすれば周期 T がとまる



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



$h=0$ \longrightarrow $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$
 $h=0.005$
 $h=0.01$
 $h=0.05$
 $h=0.1$

$$k / m = \omega_0^2$$

減衰振動周期

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

$$h \ll 1$$



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

建物の微振動による減衰定数 h

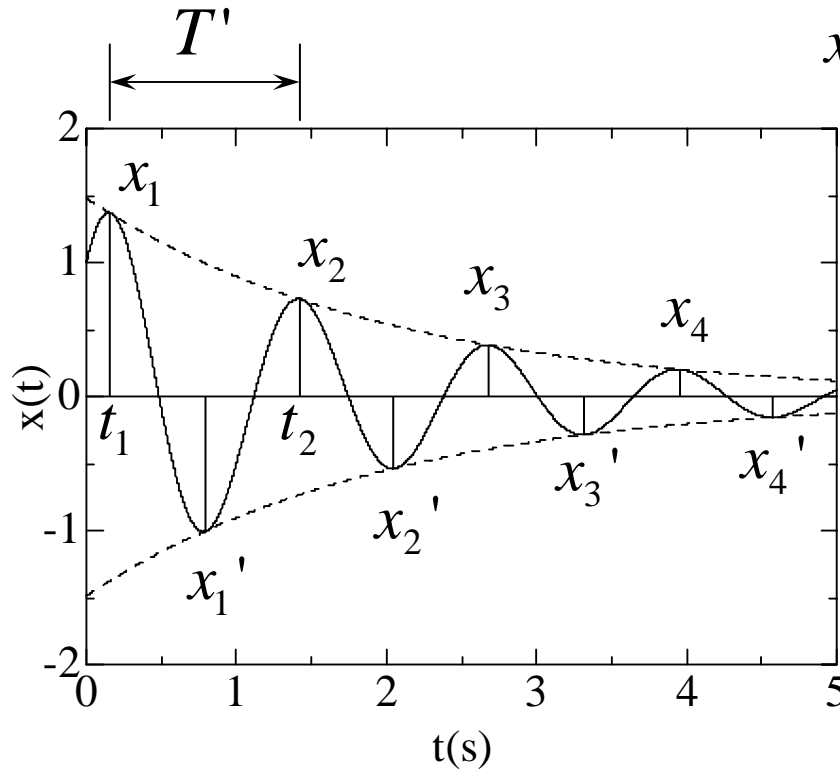
鉄骨造: 0.5 ~ 3%程度

RC造: 2 ~ 7%程度



減衰: h と d

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



粘性振動

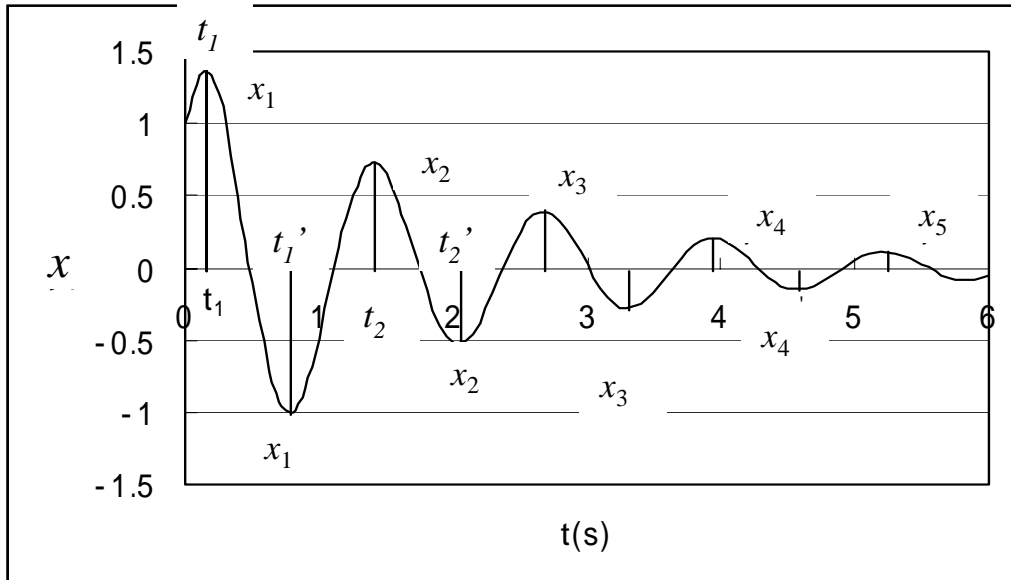
隣り合う1周期ごとの振幅の比率

全て同じになる

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

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

● 全振幅の場合



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

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

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

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

自由振動のまとめ(1)

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

$$\omega_0^2 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \longrightarrow \quad \text{基本固有周期:}$$

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

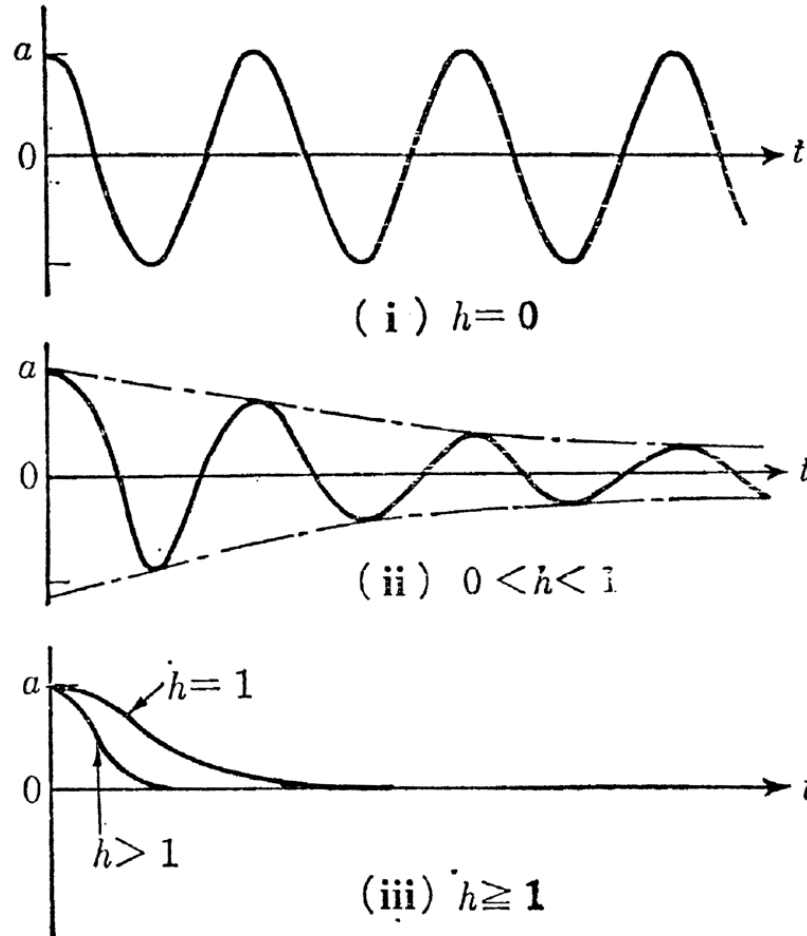
$$c_{cr} = 2\sqrt{mk} \quad \longrightarrow \quad \text{減衰定数: } h = \frac{c}{c_{cr}}$$

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

$h \ll 1$ とすると

$$T' \approx T = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad 16$$

自由振動のまとめ(2)



減衰なし

自由減衰($h < 1$)

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1-h^2}} = \frac{T_0}{\sqrt{1-h^2}}$$

臨界減衰($h=1$)

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)

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

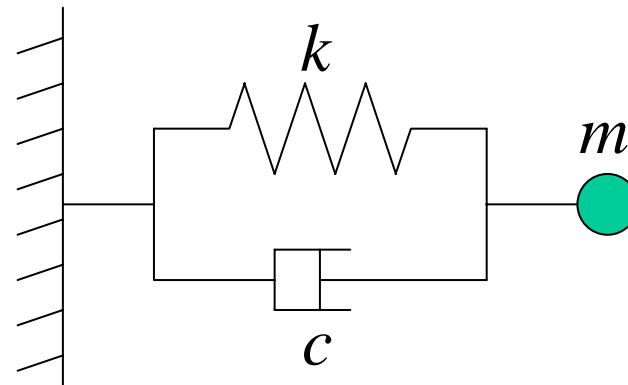
$$\longleftrightarrow \ln d = 2\pi h / \sqrt{1-h^2} \longleftarrow \text{対数減衰力}$$

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

$$T' = \frac{2\pi}{\sqrt{1-h^2}\omega} \approx T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \underline{h \ll 1 \text{ とすると}}$$



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

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

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

特殊解 $x = A \cos(pt - \theta)$

 A : 振幅 θ : 位相のずれ

$$(\omega_0^2 - p^2)A \cos(pt - \theta) - 2h\omega_0 p A \sin(pt - \theta)$$

$$\begin{cases} \sin \alpha = 2h\omega_0 p / \sqrt{(\omega_0^2 - p^2)^2 + (2h\omega_0 p)^2} \\ \cos \alpha = (\omega_0^2 - p^2) / \sqrt{(\omega_0^2 - p^2)^2 + (2h\omega_0 p)^2} \\ \alpha = \tan^{-1} 2h\omega_0 p / (\omega_0^2 - p^2) \end{cases}$$

$$\longrightarrow = \sqrt{(\omega_0^2 - p^2)^2 + (2h\omega_0 p)^2} A \cos(\underbrace{pt - \theta + \alpha}_{= 0})$$

$$\longrightarrow = (F / m) \cos pt$$

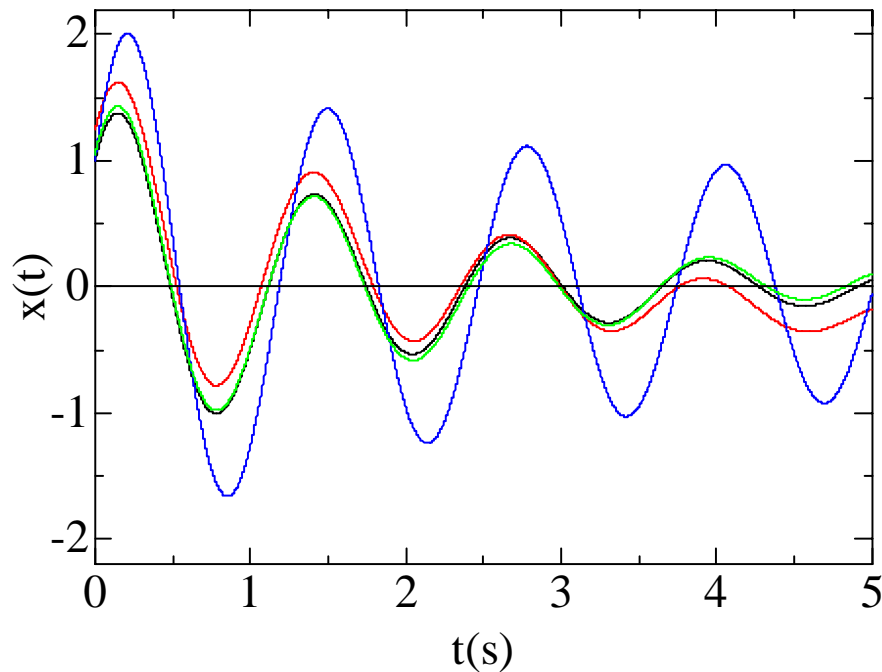
$$A = \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - p^2)^2 + (2h\omega_0 p)^2}} \cdot \frac{F}{m}$$

$$\theta = \alpha = \tan^{-1} 2h\omega_0 p / (\omega_0^2 - p^2)$$

$$x = e^{-h\omega_0 t} \left(x_0 \cos \sqrt{1-h^2} \omega_0 t + \frac{v_0 + h\omega_0 \cdot x_0}{\sqrt{1-h^2} \omega_0} \sin \sqrt{1-h^2} \omega_0 t \right)$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - p^2)^2 + (2h\omega_0 p)^2}} \cdot \frac{F}{m} \cdot \cos\left(pt - \tan^{-1} \frac{2h\omega_0 p}{\omega_0^2 - p^2}\right)$$

when $x_0 = 1$ $v_0 = 5$ $\omega_0 = 5$ $h = 0.1$ $F = 2$ $m = 0.5$

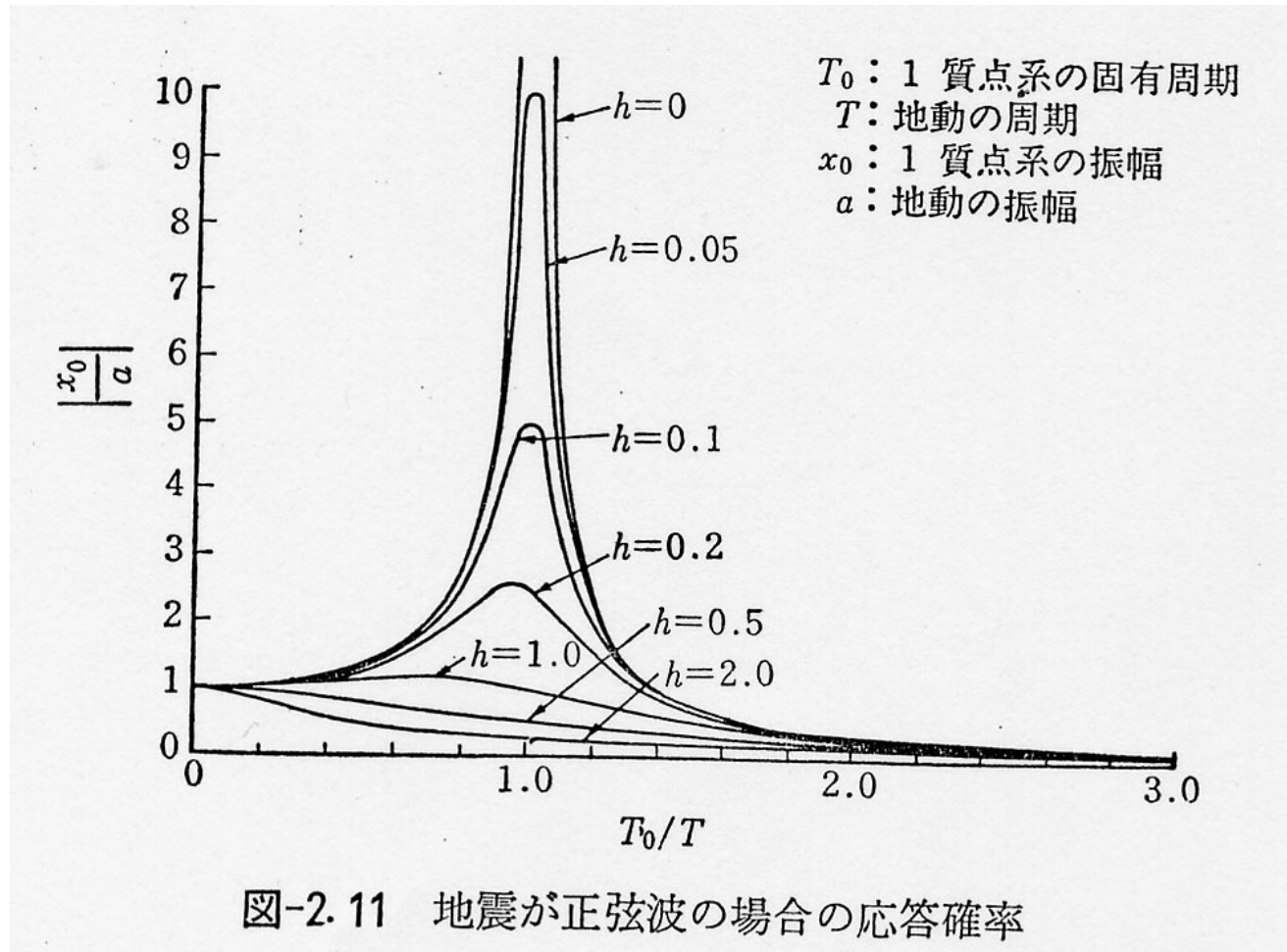


$$\omega_0 = p$$

$$\longrightarrow \frac{p}{\omega} = 1 : \text{共振}$$

$$A = \frac{1}{2h\omega_0 p} \cdot \frac{F}{m} \quad \theta = \frac{\pi}{2}$$

共振と減衰



いろいろな固有周期

- ✓ ぶらんこ
- ✓ つりがね
- ✓ 忍法
 - 「くないの術」 (司馬遼太郎, 池波正太郎...)
- ✓ 建造物の固有周期 T : $1/(10 \sim 12) \times [\text{建物の階数}]$
- ✓ お皿とコップの水はどっちがこぼれやすい?
周期は容器の直径の平方根 D に比例
スロッシング

多質点系の振動

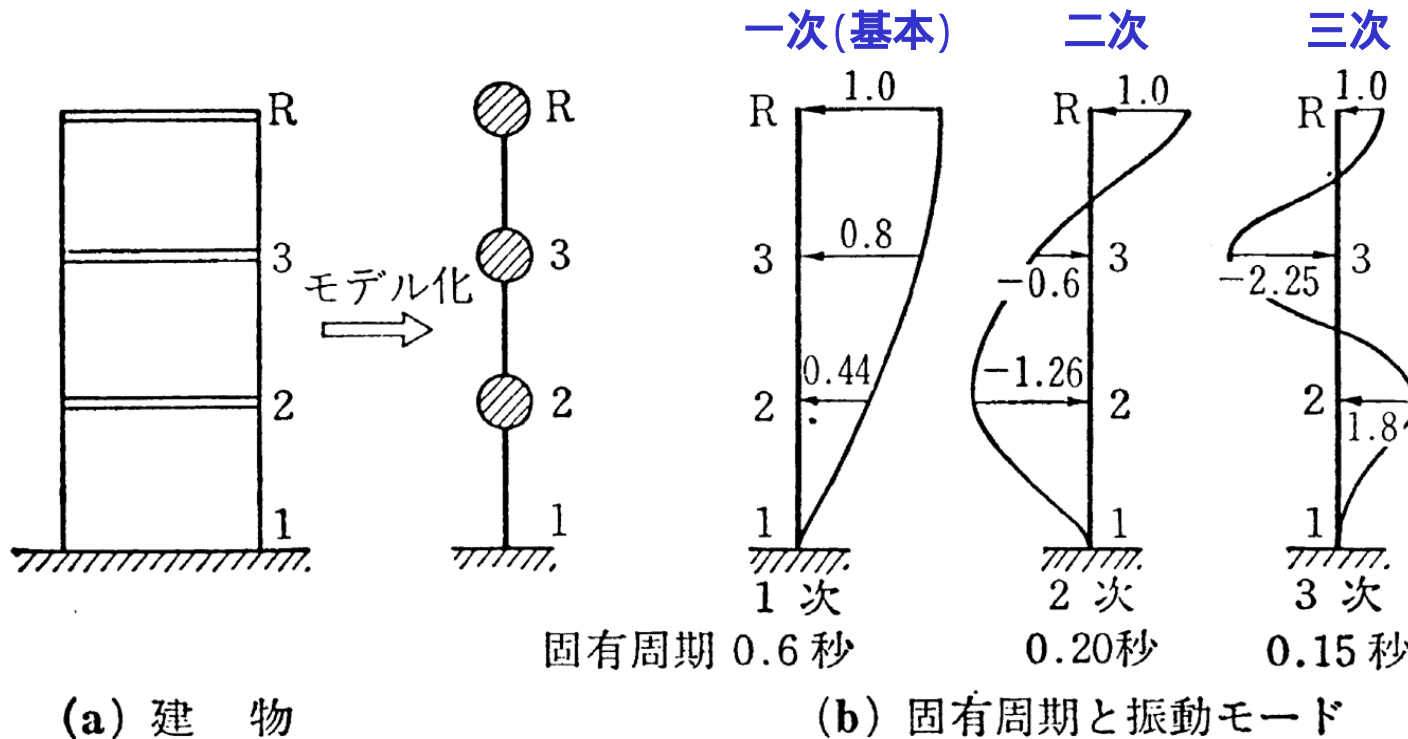


図-2.5 ある3層建物の固有周期と振動モード

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?

$$\frac{1}{2}m\dot{y}^2 + \int_0^t c\dot{y}^2 dt + \frac{1}{2}ky^2 = \int_0^t F \cos pty dt$$

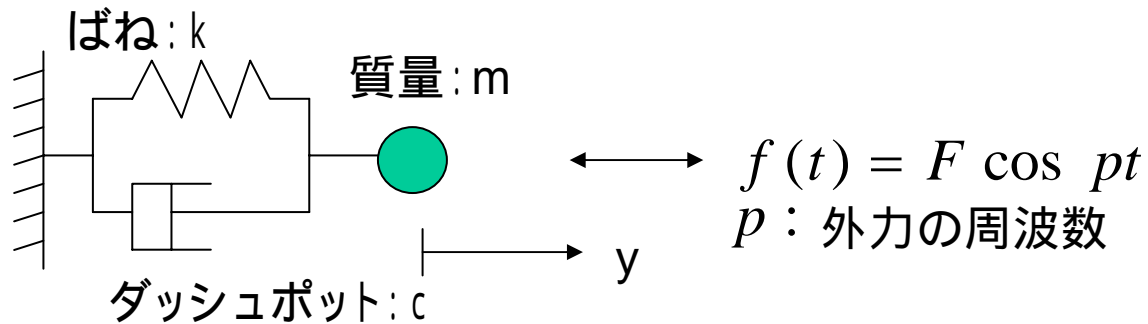
$$E + D - L = \text{const}$$

E: 振動エネルギー

D: 減衰力のなす仕事

L: 外力のなす仕事

1サイクル間に減衰力のなす仕事



$$T = \frac{2\pi}{p}$$

定常振動の解

$$y = a \cos(pt - \theta) \longrightarrow \dot{y} = -ap \sin(pt - \theta)$$

< 1サイクル間に減衰力のなす仕事 >

$$\begin{aligned} \Delta D &= \int_0^T c \dot{y}^2 dt = \int_0^{\frac{2\pi}{p}} c \dot{y}^2 dt \\ &= \pi c p a^2 \end{aligned}$$

1サイクル間に外力のなす仕事

$$\begin{aligned}\Delta L &= \int_0^{\frac{2\pi}{p}} F \cos pt \dot{y} dt \\ &= \pi c p a^2 \\ &= \Delta D\end{aligned}$$

1サイクル間に外力のなした仕事 = 減衰力によって消費された仕事

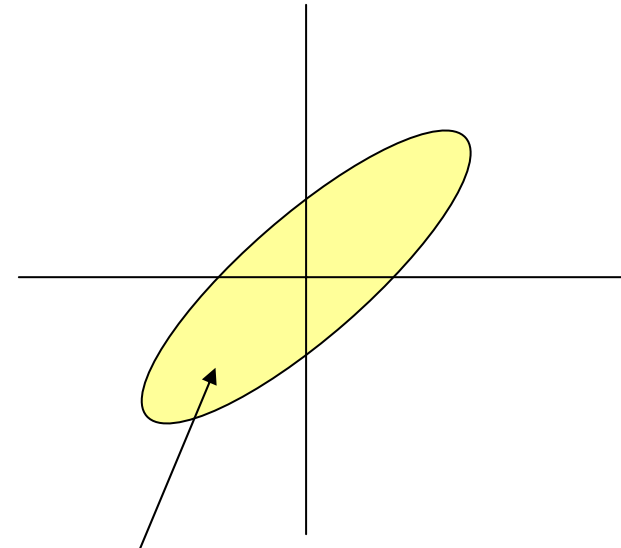
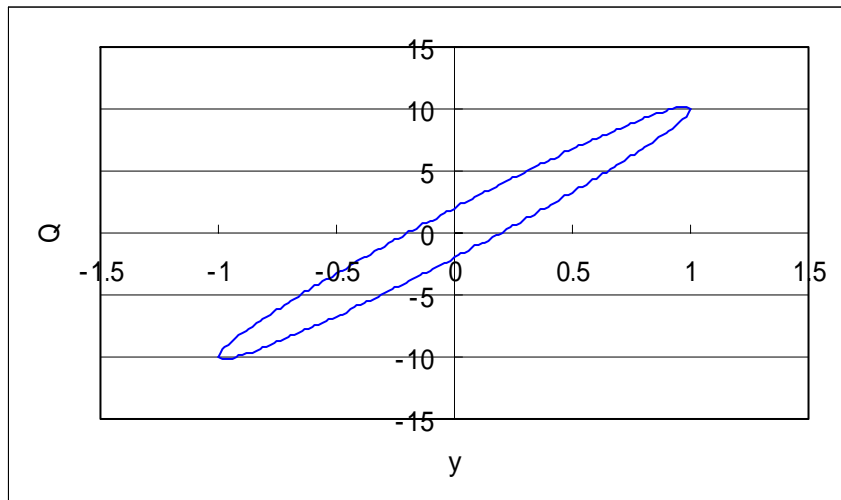
$$\Delta E + \Delta D - \Delta L = 0$$

$$\underline{\underline{\Delta E = 0}}$$

● 復元力

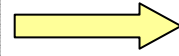
$$Q = ky + c\dot{y} = ky \pm cp\sqrt{a^2 - y^2}$$

$C = 0.4$ $k = 10$ $p = 5$ $a = 1$ とおいたとき



復元力が1サイクルになす仕事

復元力が1サイクルになす仕事

楕円の面積

$$\Delta W = \int_{-a}^a \{ f_1(x) - f_2(x) \} dx$$

$$\left[\begin{array}{l} f_1(x) = kx + cp\sqrt{a^2 - x^2} \\ f_2(x) = kx - cp\sqrt{a^2 - x^2} \end{array} \right]$$

$$= \int_{-a}^a 2cp\sqrt{a^2 - x^2} dx$$

$$= 4cp \int_0^a \sqrt{a^2 - x^2} dx$$

$$x = a \sin t \quad dx = a \cos t dt \quad \text{とおくと}$$

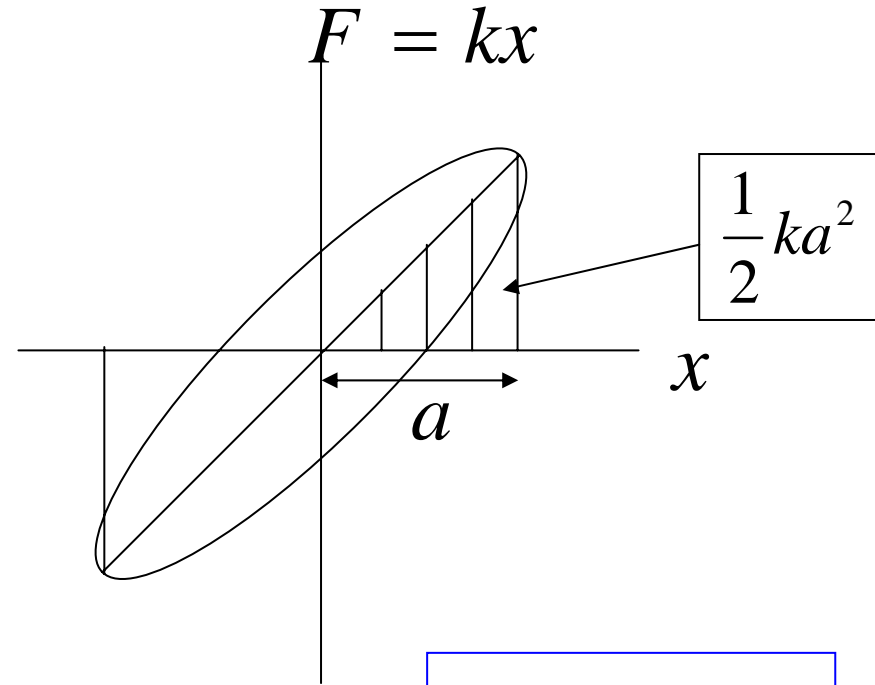
$$x : 0 \Rightarrow a$$

$$t : 0 \Rightarrow \frac{\pi}{2}$$

$$\begin{aligned}\Delta W &= 4cp \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{a^2 - a^2 \sin^2 t} \cdot a \cos t dt \\ &= 4cpa^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 t dt \\ &= 4cpa^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{2} \\ &= \pi cpa^2\end{aligned}$$

最大ポテンシャルエネルギー W

$$W = \frac{1}{2} ka^2$$



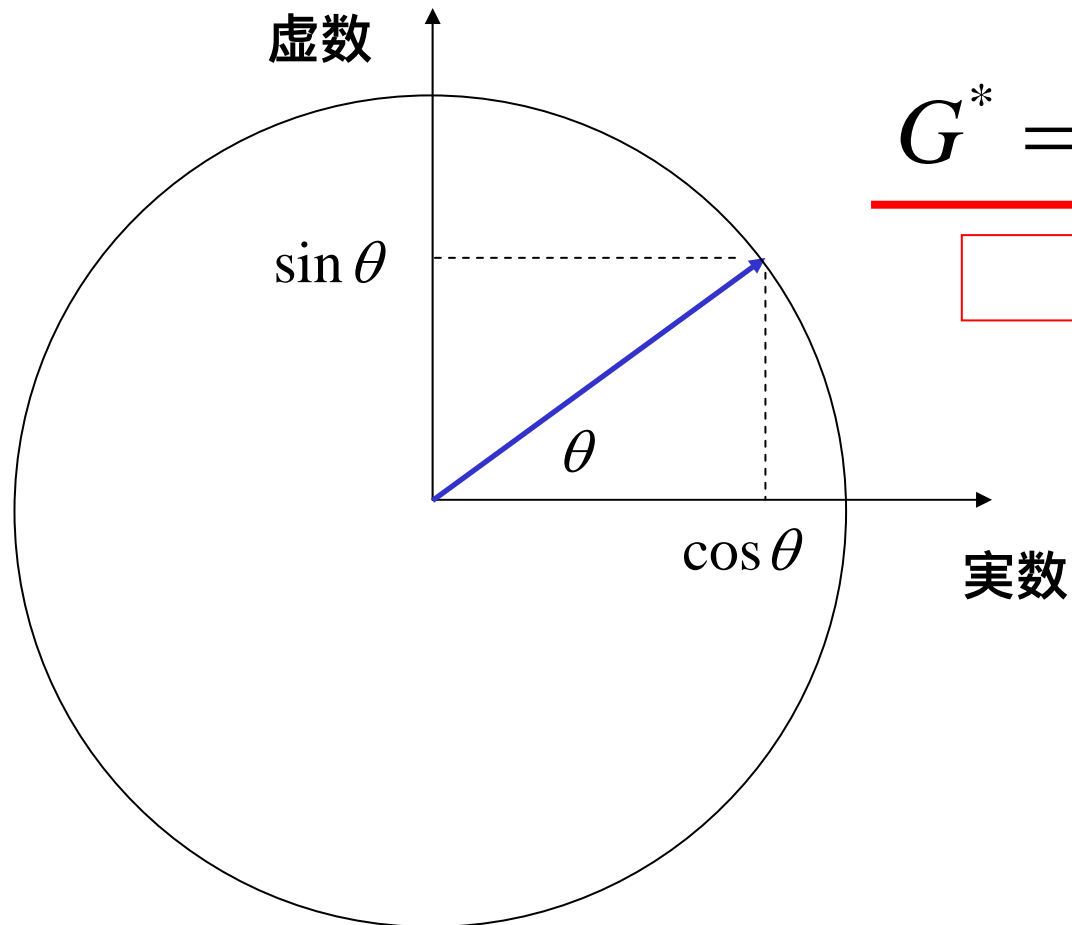
$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\pi c r a^2}{\frac{1}{2} ka^2} = \frac{\pi c r}{\frac{1}{2} k} = \frac{\pi \frac{2hk}{\omega} p}{\frac{1}{2} k} = 4\pi h \left(\frac{p}{\omega} \right)$$

$$c = \left(\frac{2h}{\omega} \right) \cdot k$$

$$\rightarrow h = \frac{1}{4\pi} \cdot \left(\frac{\omega}{p} \right) \cdot \left(\frac{\Delta W}{W} \right) = \frac{1}{4\pi} \cdot \left(\frac{\Delta W}{W} \right)$$

複素数 i : ($i^2 = -1$)

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



$$G^* = G(1 + i2h)$$

複素剛性？

複素数*i*で表した振動の式 ($i^2 = -1$)

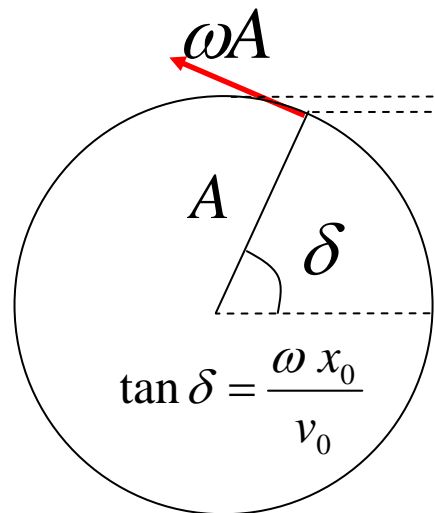
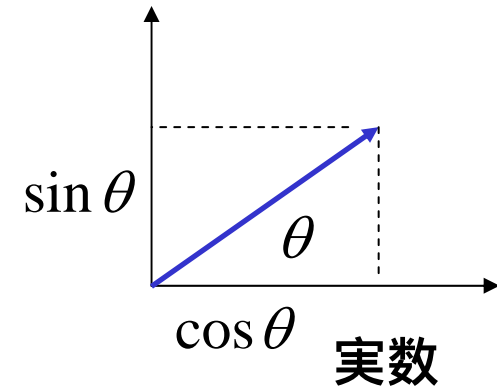
$$x = \int v dt = A' \cos \omega t + iB' \sin \omega t = Ae^{i\omega(t-\delta)} = Ae^{i\omega t} e^{-i\omega\delta}$$

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

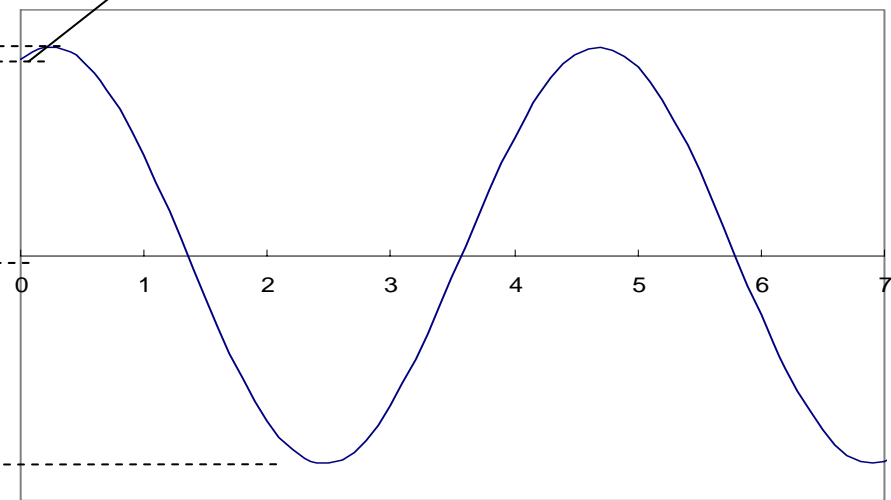
$$a = \ddot{x} = \dot{v} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 Ae^{i\omega(t-\delta)}$$

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

虚数



$x_0 \times$
変位

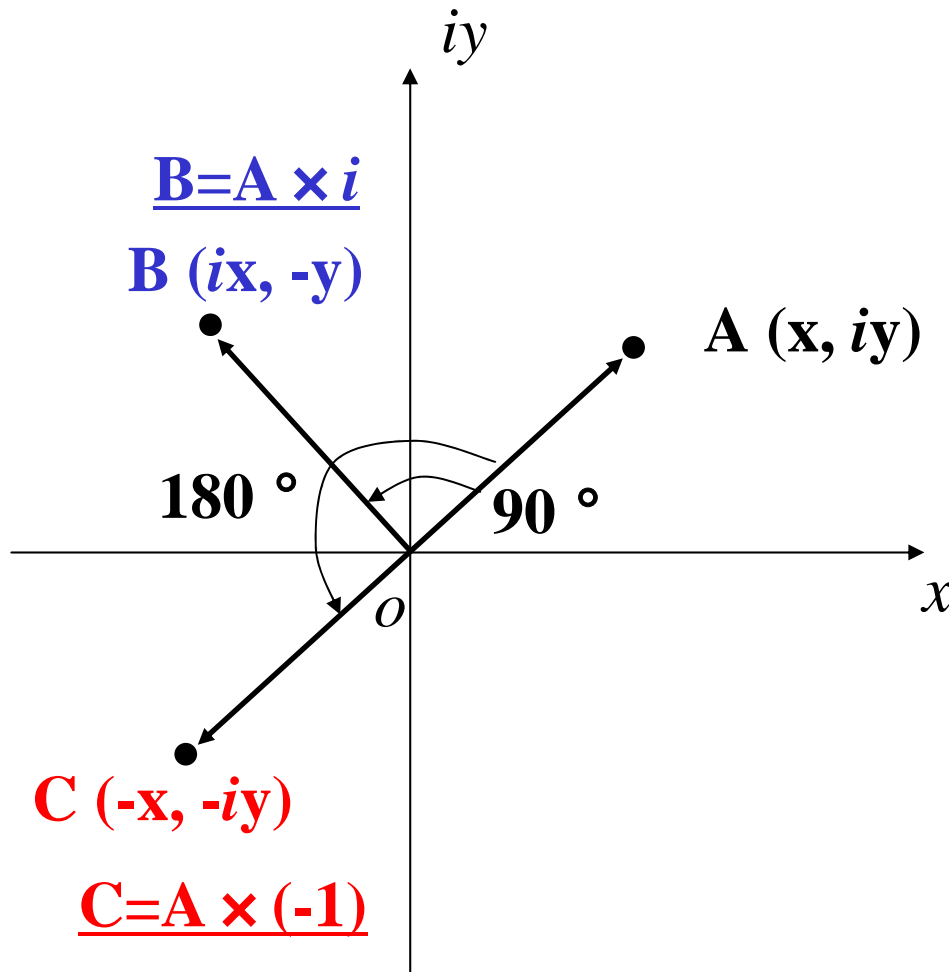


時間 t

v_0

実数

複素数 i をかけるということ



A $C: \times (-1)$ 180° 進ませる

=

(A B) 90° 位相を進ませる, and

(B C) 90° 位相を進ませる

ということは,

$$-1 = i \times i$$

だから,

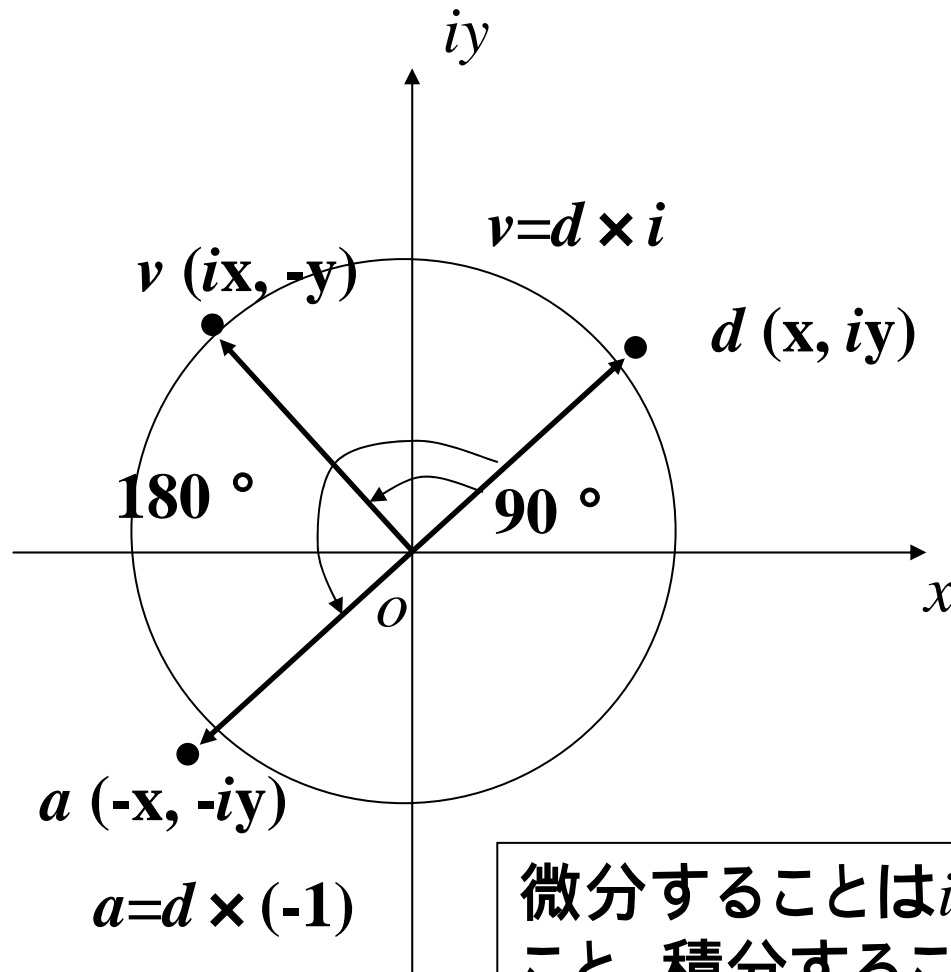
$\times i$ という操作は

位相を 90° 進ませること.

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 (位相を 90deg. 進める) こと, 積分することは i で割る (90deg. 遅らす) こと³⁵

複素数 $i: (i^2 = -1)$

$$G^* = G(1 + i2h)$$

複素剛性？

$$\tau = \underline{G\gamma} + \underline{G\dot{\gamma}}$$

粘性力：位相が進んでいる

γ と $\dot{\gamma}$ の両方 i を掛ける

$$\tau = G\gamma = G^* \gamma = G^* (1 + i2h) \underline{\gamma}$$

γ だけ

振動方程式と同じ型はたくさん.....

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

位相が進んでいる



位相が遅れている



電圧 = コイル + 抵抗 + コンデンサー

$$M = K_P \left(T_D \frac{de}{dt} + e + \frac{1}{T_I} \int e dt \right)$$

位相が進んでいる
(予測して対応)



位相が遅れている
(過去の経験)




$$e = \sigma^{target} - \sigma^{current}$$



2. 波動伝播式を図で理解 (意外と分かりやすい差分法)

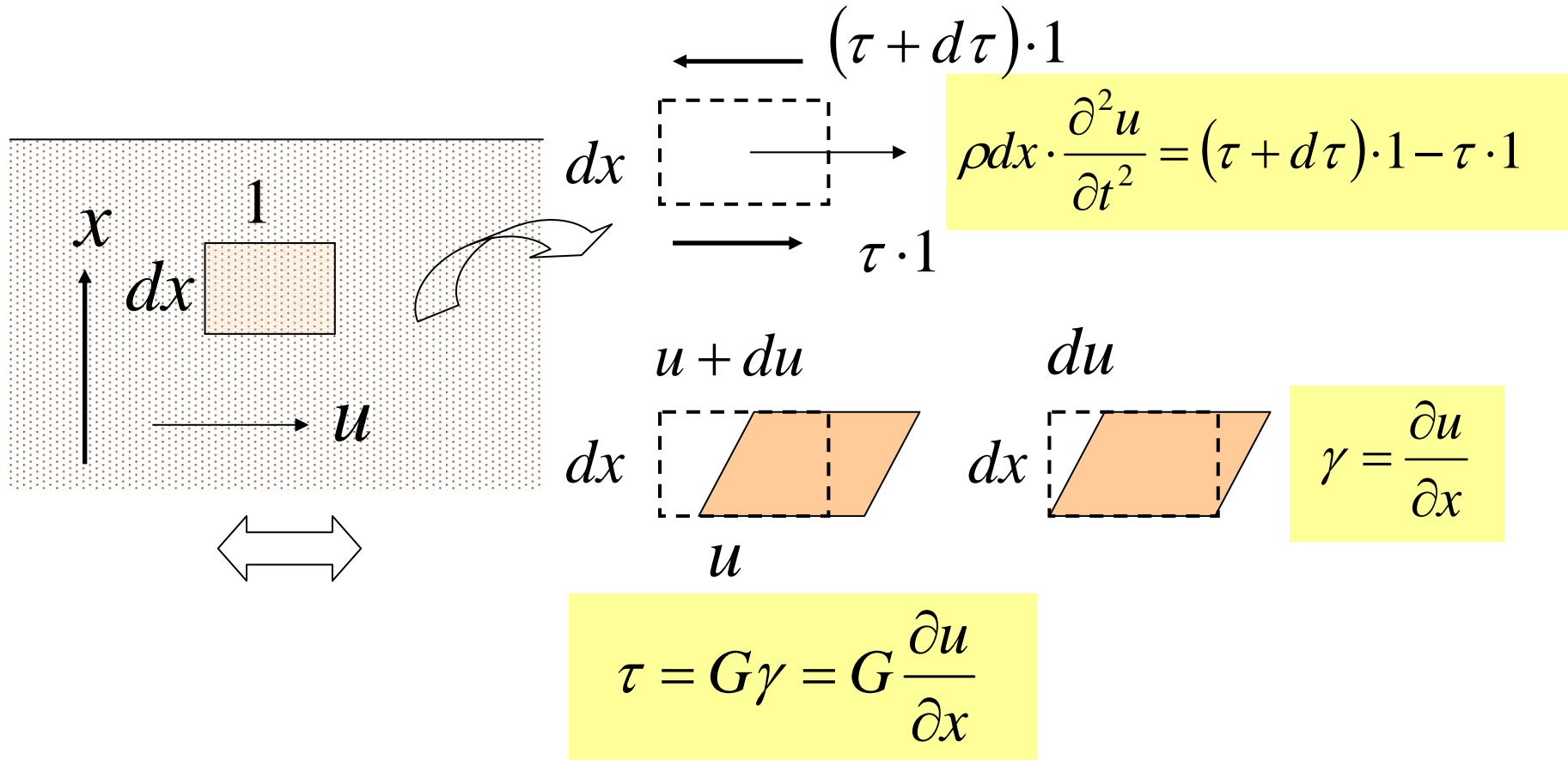
MAEDA Lab.

Geotechnics
Laboratory 



予想される地震動：日本列島を伝播する！

1次元波動方程式



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

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

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:

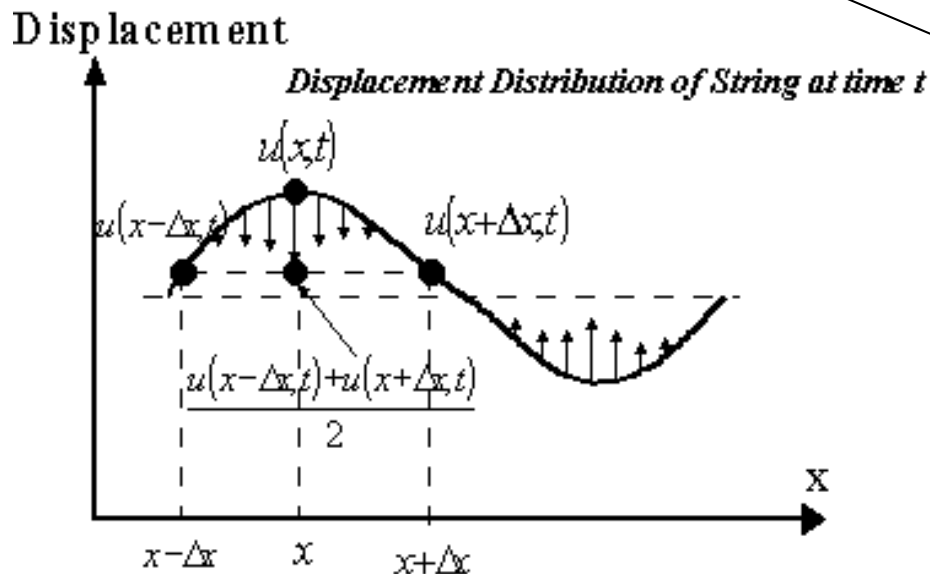
$$u(x + \Delta x, t) = u(x, t) + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} (\Delta x)^3 + \dots$$

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

波動方程式を差分で書き下すと...

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

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

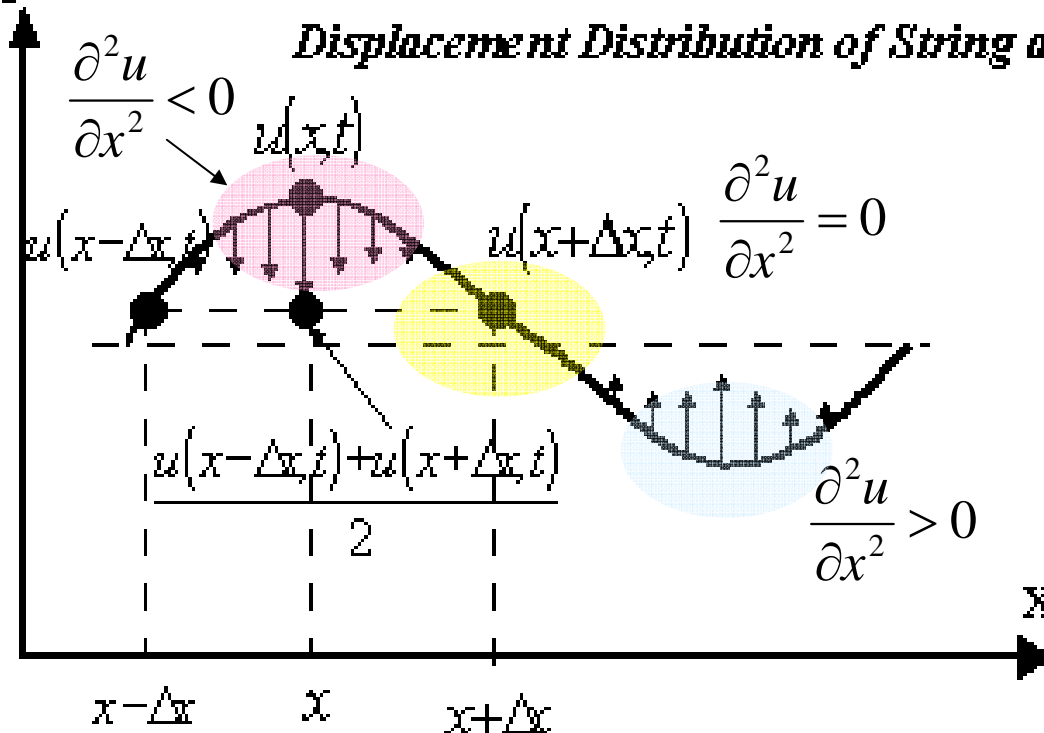


両隣の点の値
の平均値

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

両隣の点の値
の平均値

Displacement

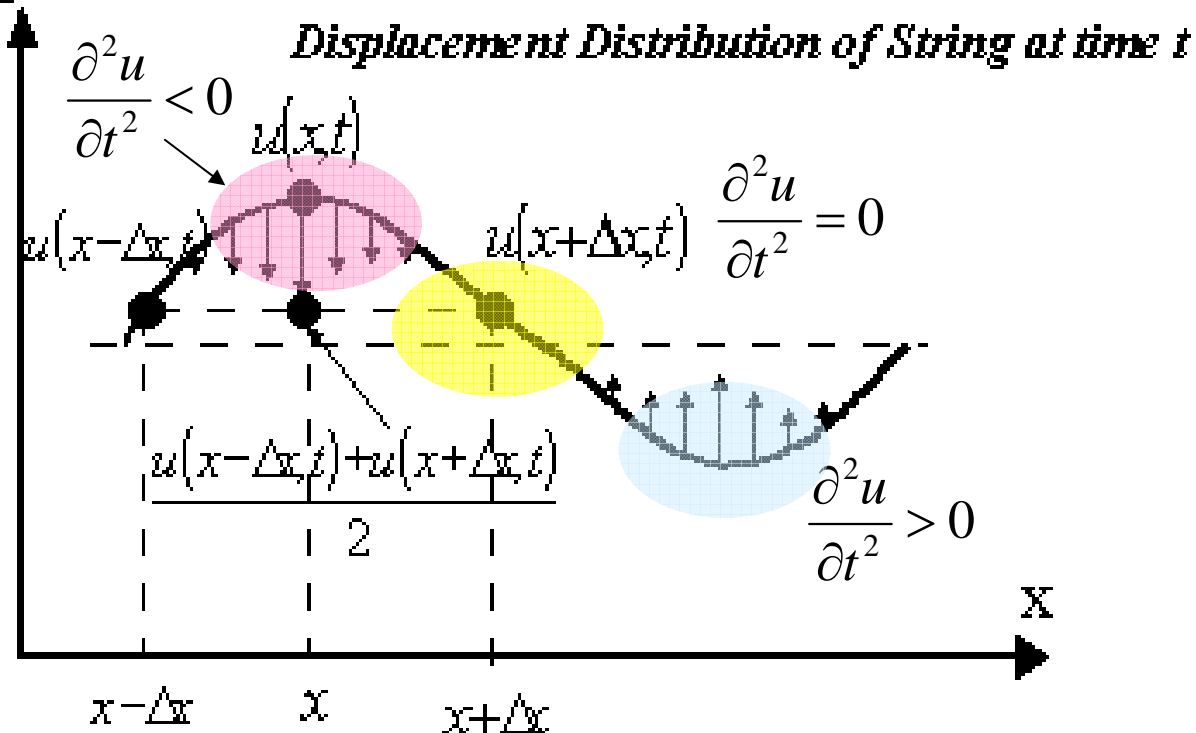


$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{2}{(\Delta x)^2} \left[\frac{u(x + \Delta x, t) + u(x - \Delta x, t)}{2} - u(x, t) \right]$$

加速度

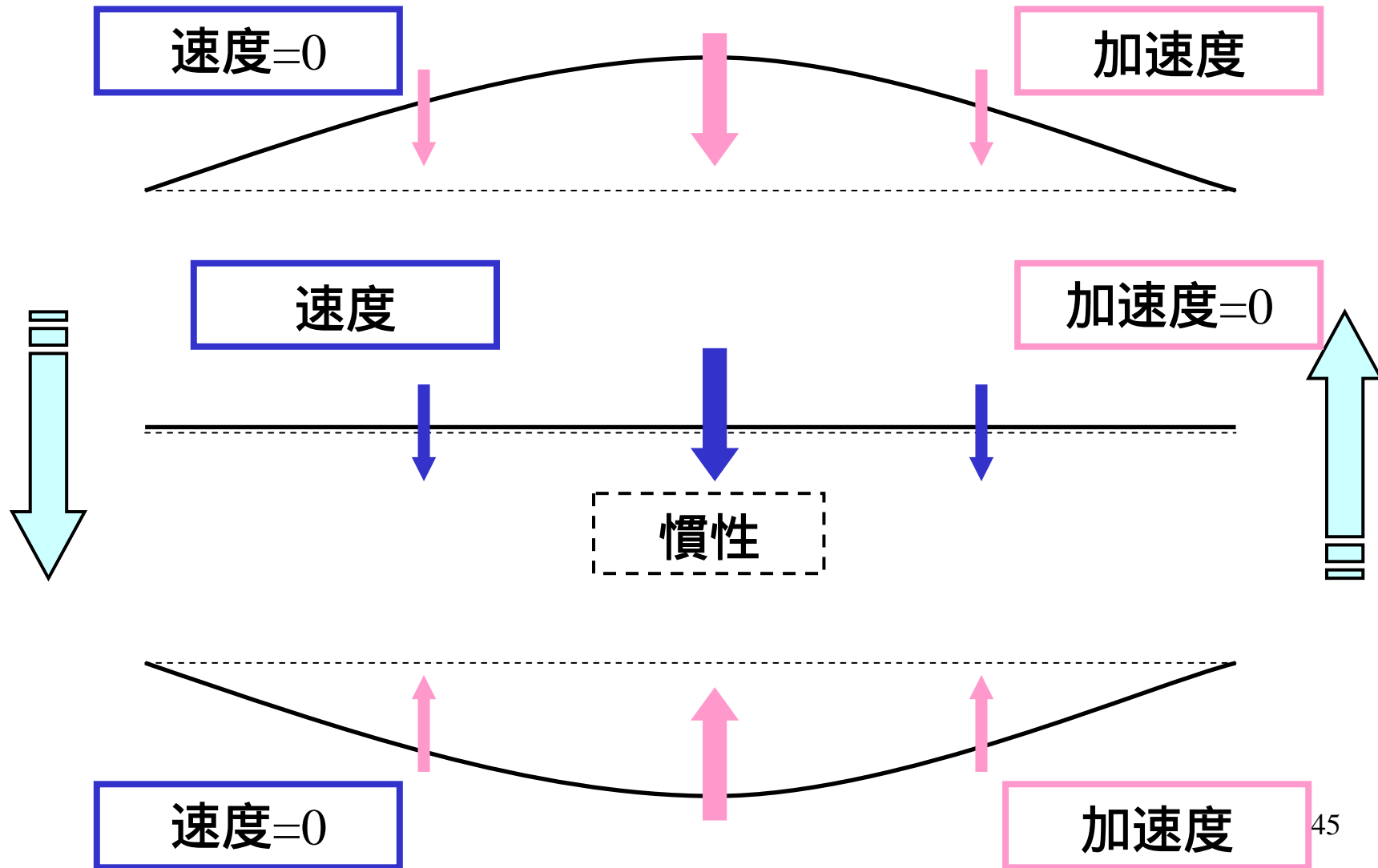
両隣の点の値の平均値

Displacement





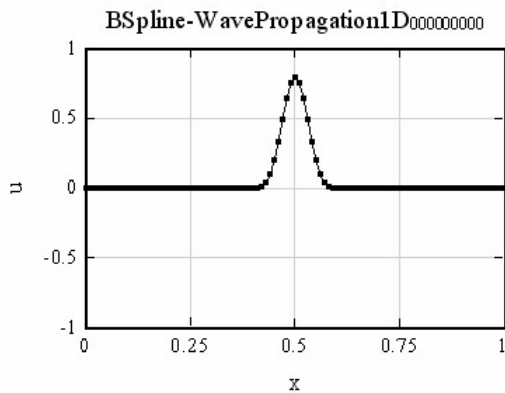
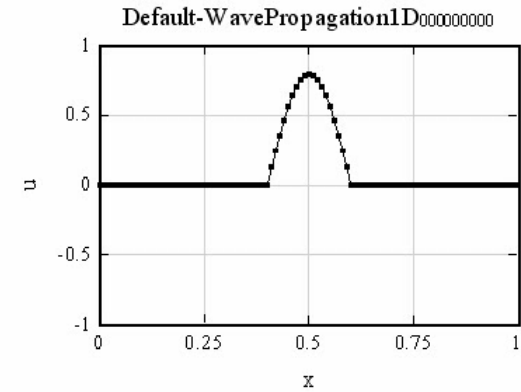
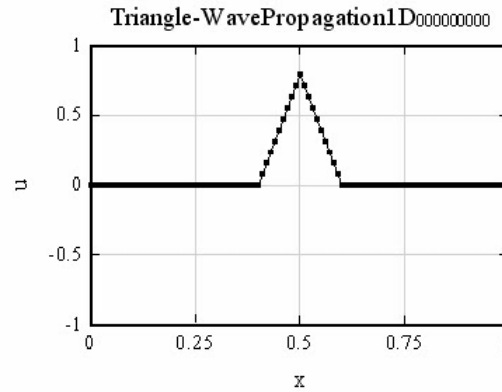
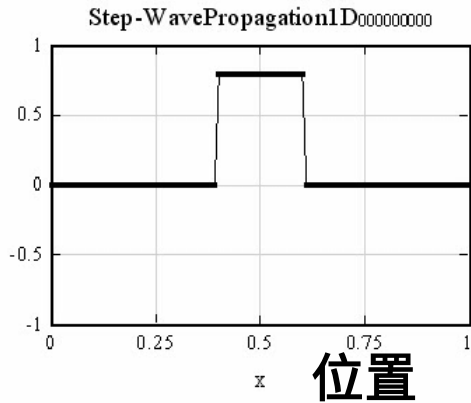
一次元弦の振動





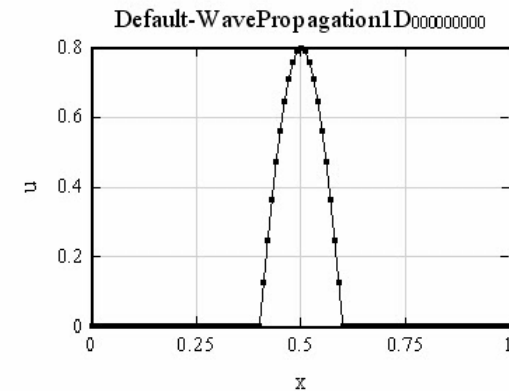
計算例 (動画)

変位



CFL条件

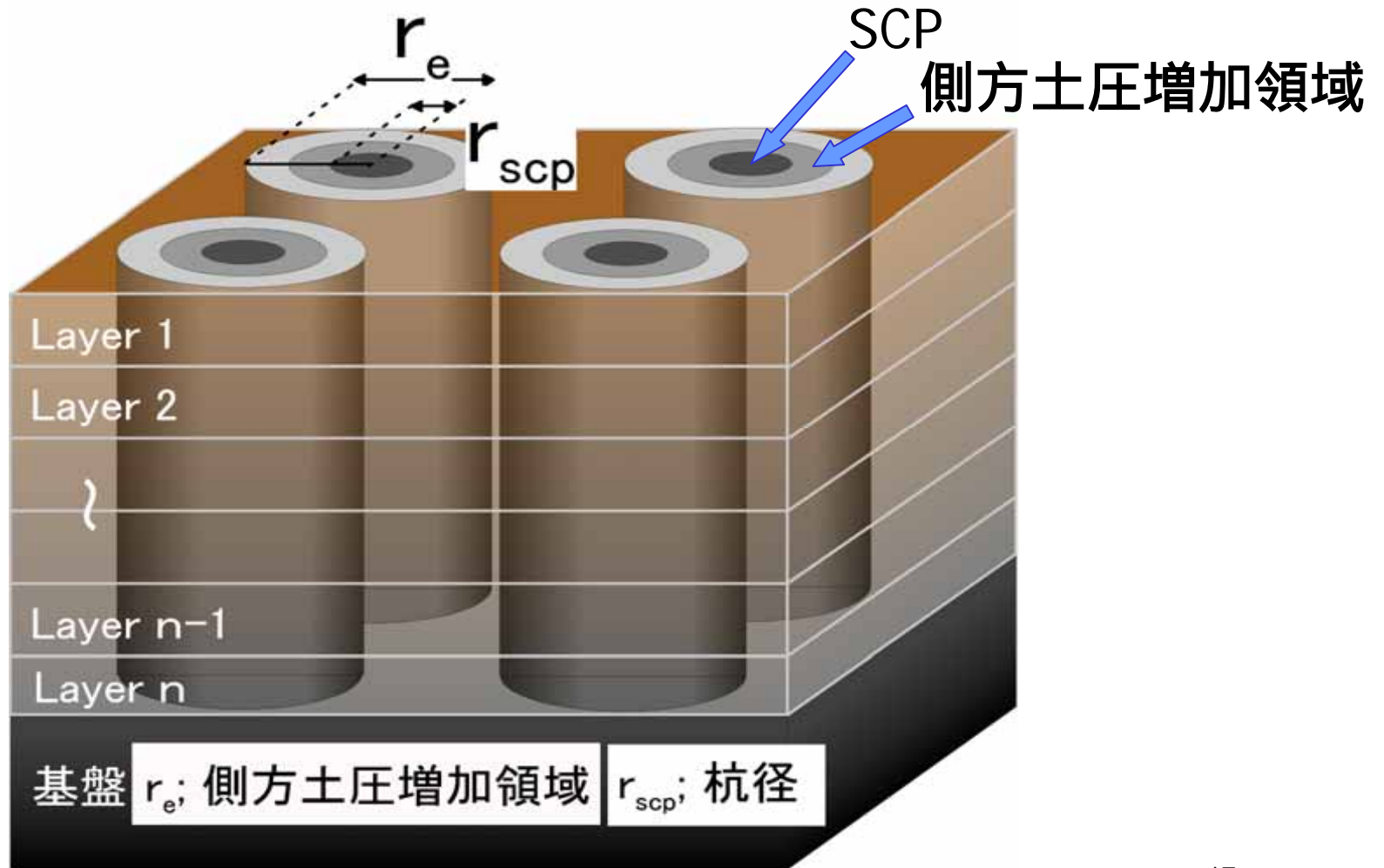
$$\underline{\Delta t < \Delta x / V}$$



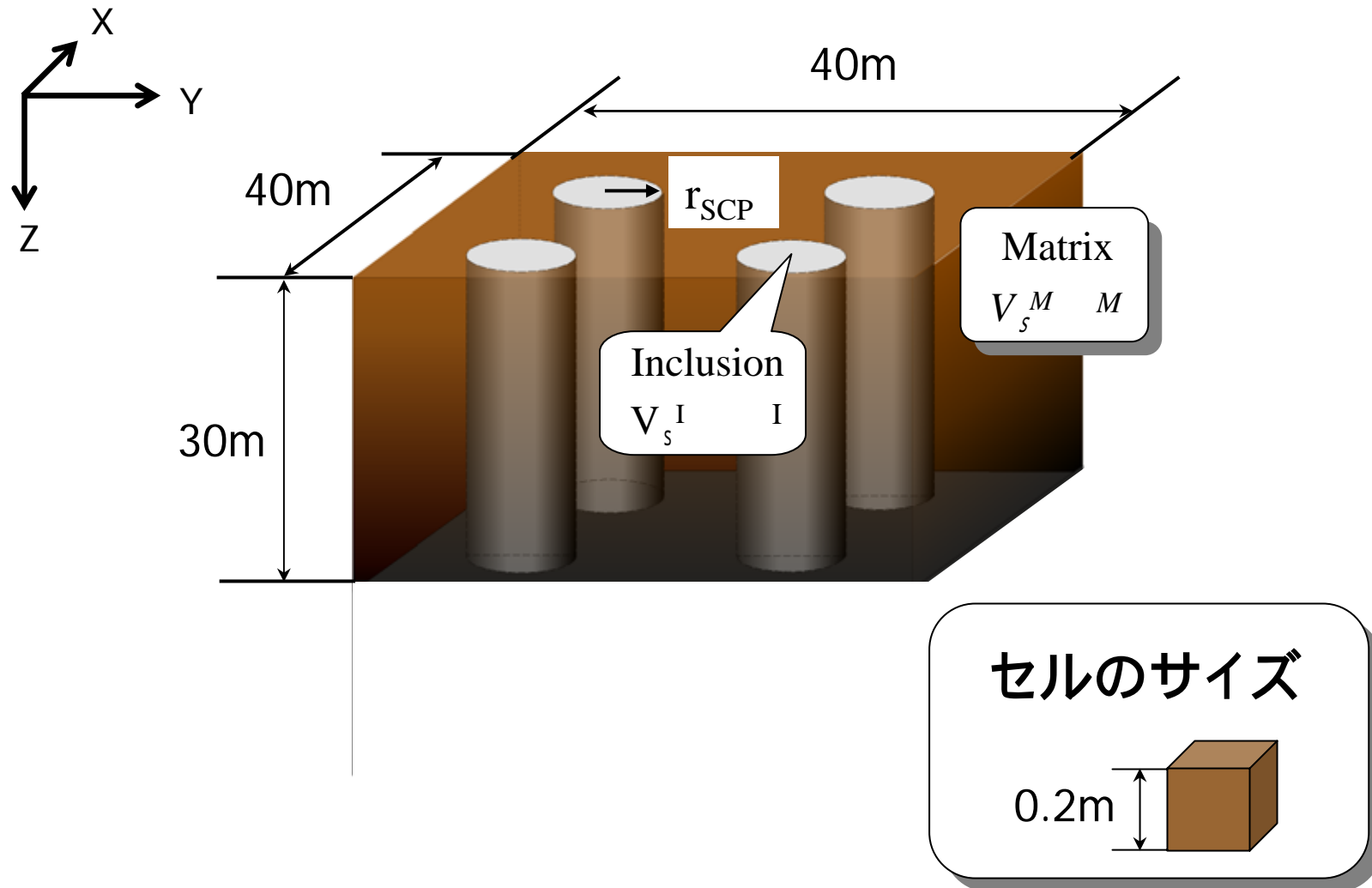
- 進行波と後退波
- 初期値のなめらかさ

時間と空間の刻
みバランス

不均質な改良地盤

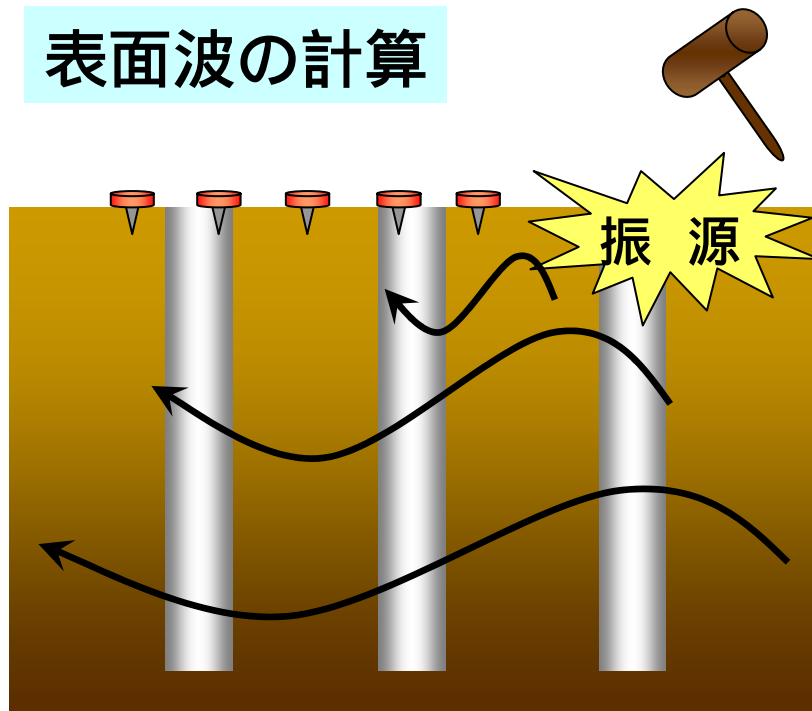


差分法による三次元粘弾性波動場解析

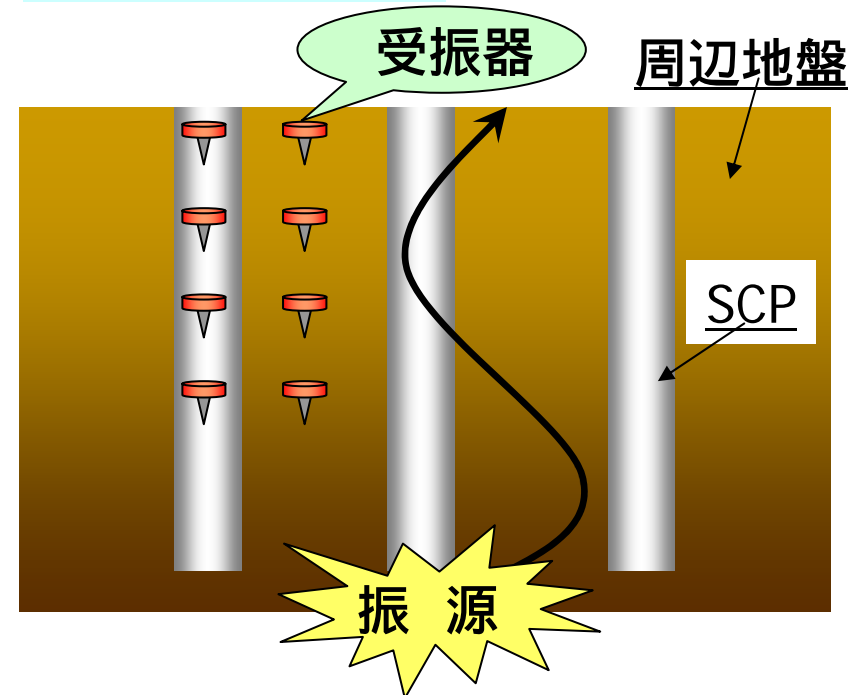


実体波と表面波三次元波動場解析 (振源と受信点)

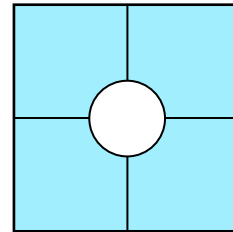
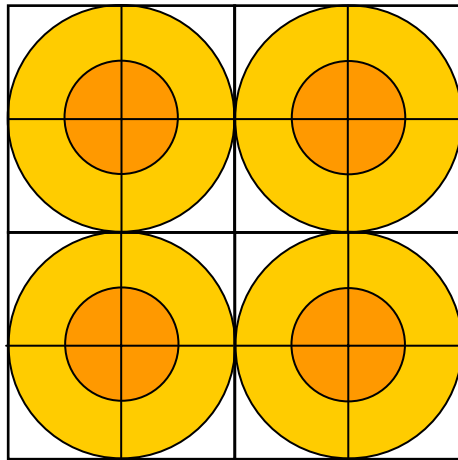
表面波の計算



実体波の計算



差分法による表面波伝播結果



$$V_S^M = 100(m/s)$$

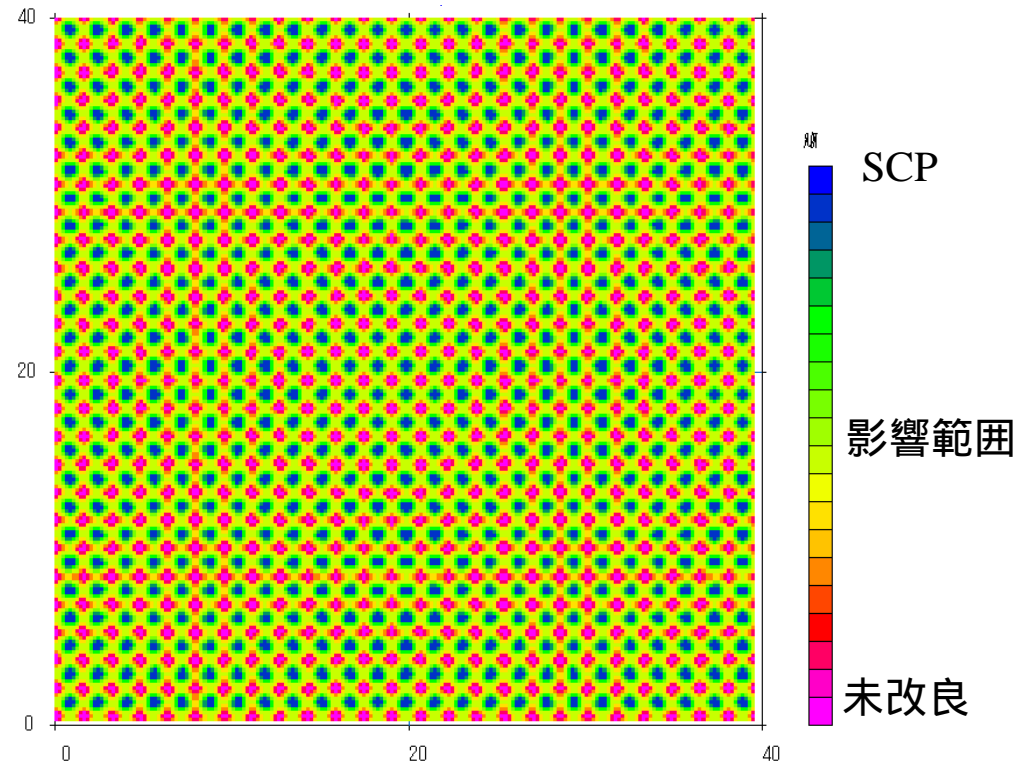
$$V_S^{I1} = 300(m/s)$$

$$a_s = 20\%$$

約 $\frac{1}{25}$ 倍速で再生

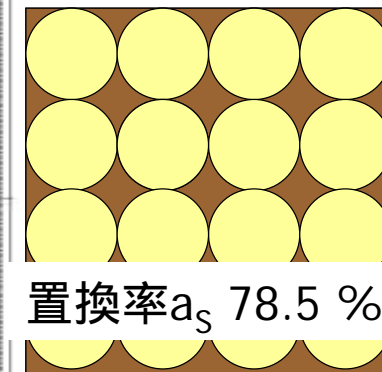
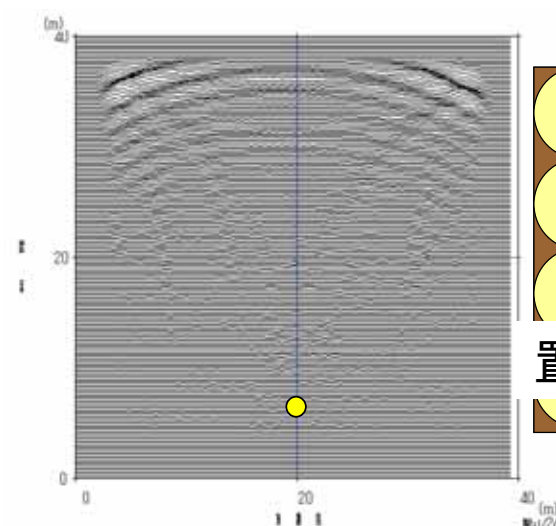
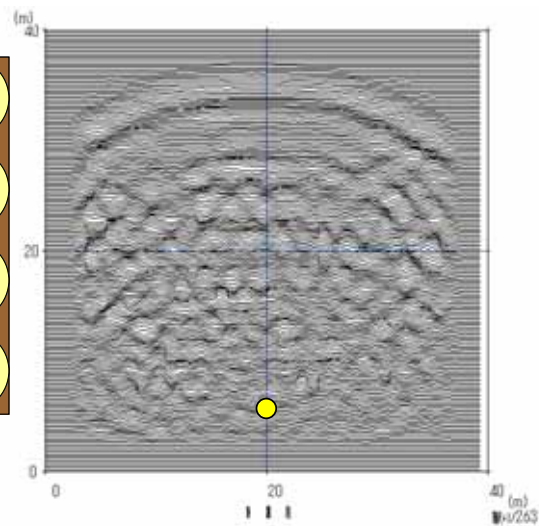
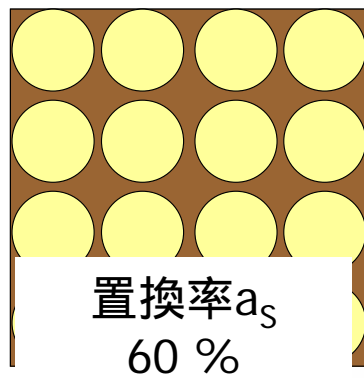
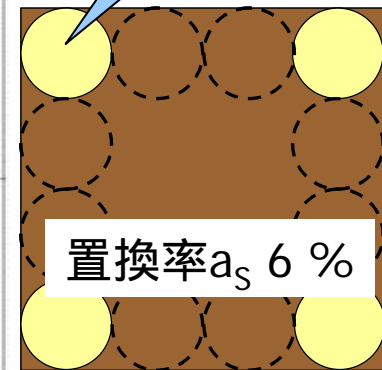
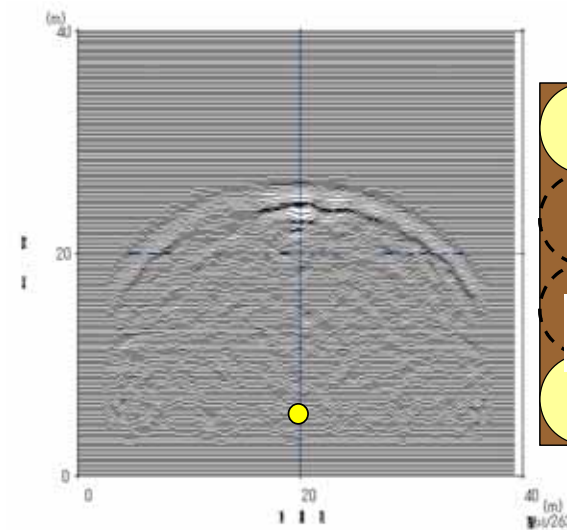
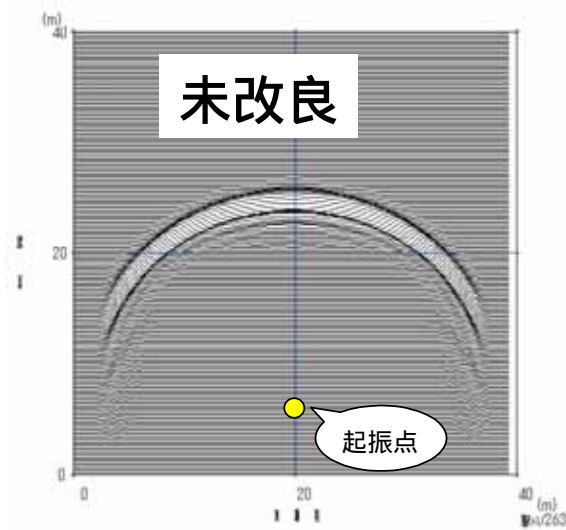
影響範囲をSCP径の2倍にする場合

置換率が20%で影響範囲が近接した状態になり、より不均質な状態になる





地表面の波動 (at 221.9sec)





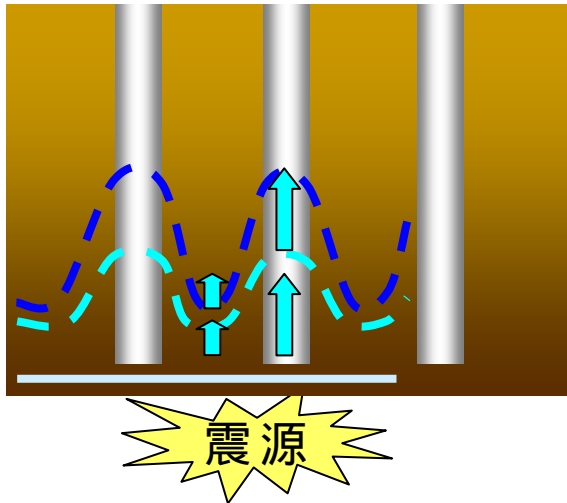
差分法による実体波伝播結果

$$V_s^M = 100(m/s)$$

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

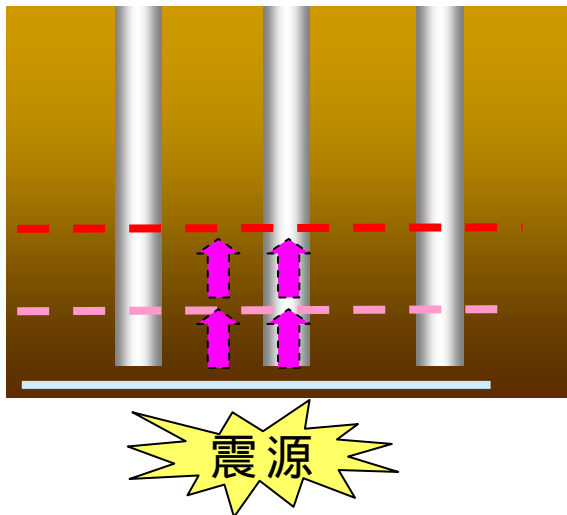
$$a_s = 20\%$$

約 $\frac{1}{25}$ 倍速で再生



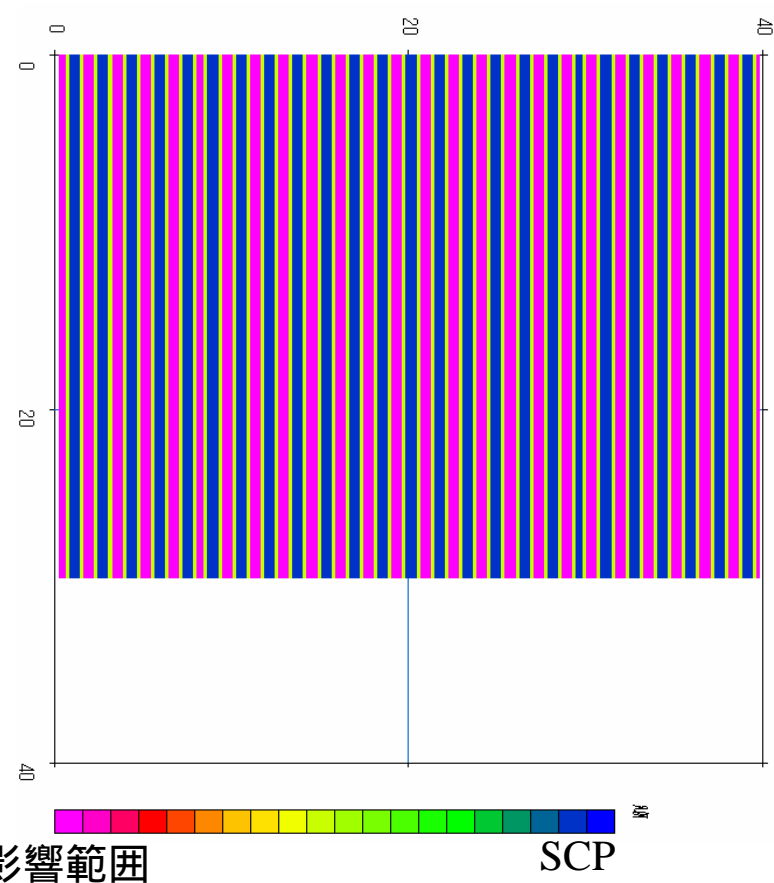
相互作用の考慮

なし

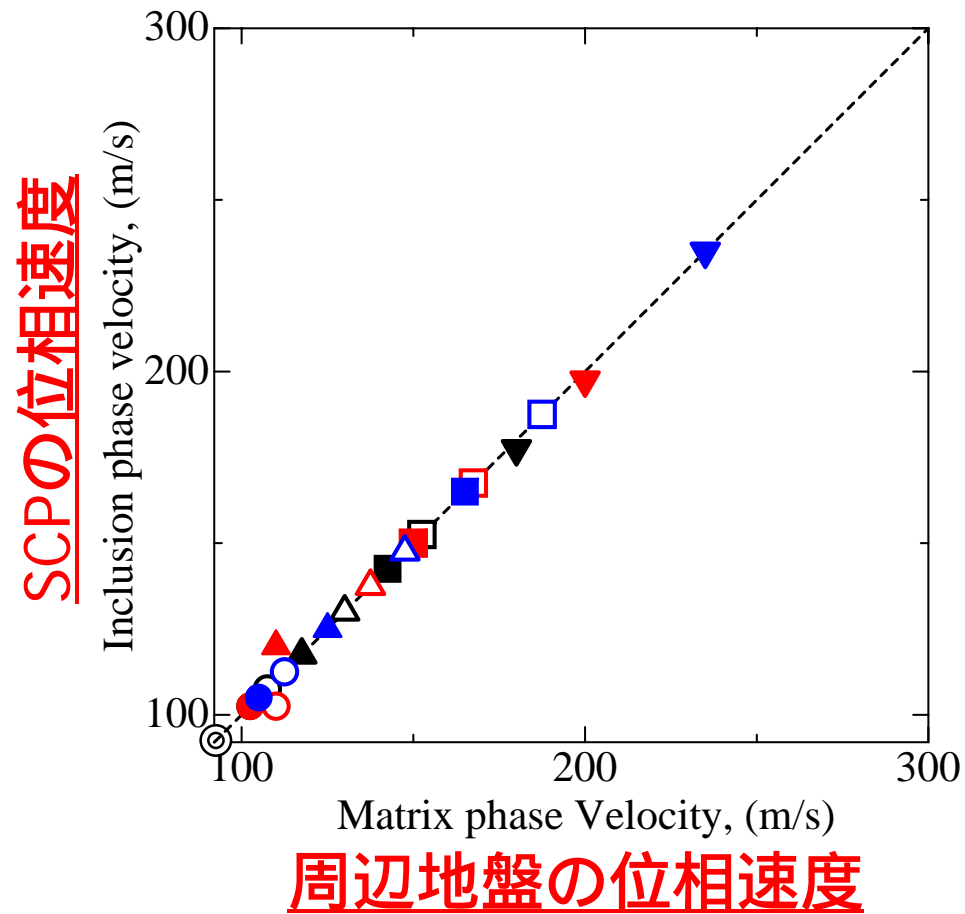


相互作用の考慮

あり



SCPと周辺地盤に伝わる位相速度の比較



解析条件

	V_s^M : 100m/sec V_s^I : 220m/sec	V_s^M : 100m/sec V_s^I : 250m/sec	V_s^M : 100m/sec V_s^I : 300m/sec
a_s 0 %	◎	◎	◎
a_s 6 %	●	●	●
a_s 12.5 %	○	○	○
a_s 25 %	▲	▲	▲
a_s 40 %	△	△	△
a_s 50 %	■	■	■
a_s 60 %	□	□	□
a_s 78.5 %	▼	▼	▼

低

置換率

高

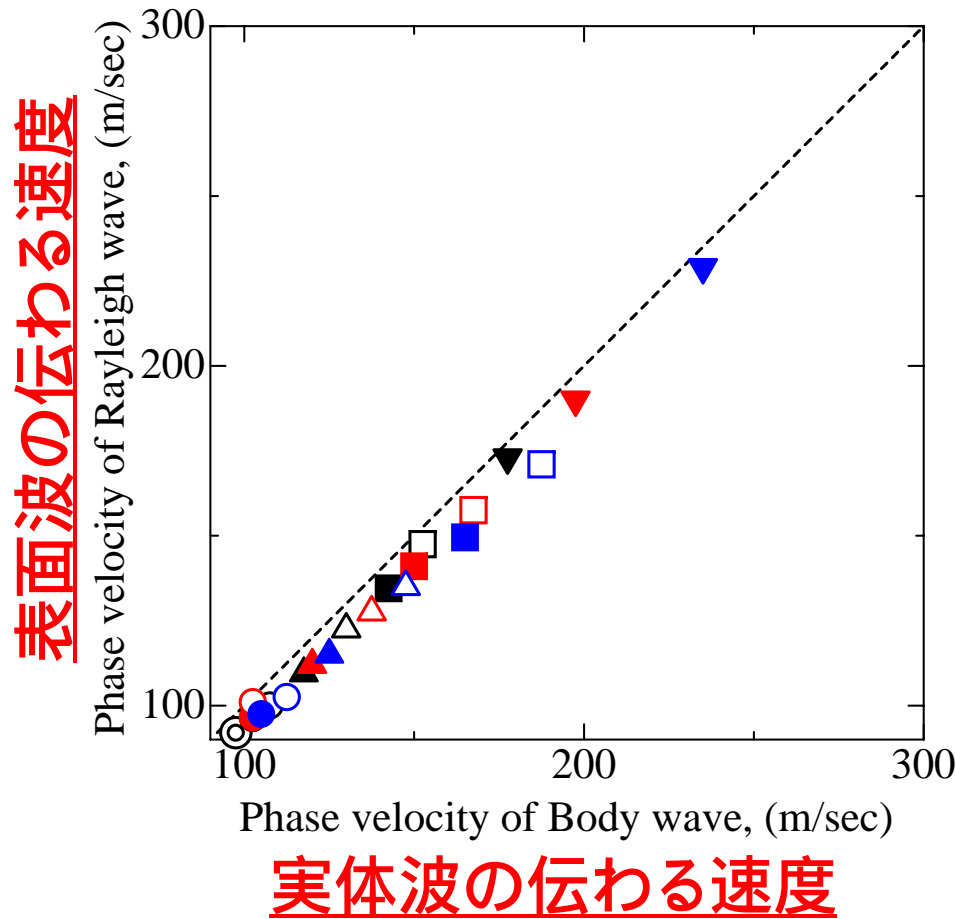
小

剛性比

53

大

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



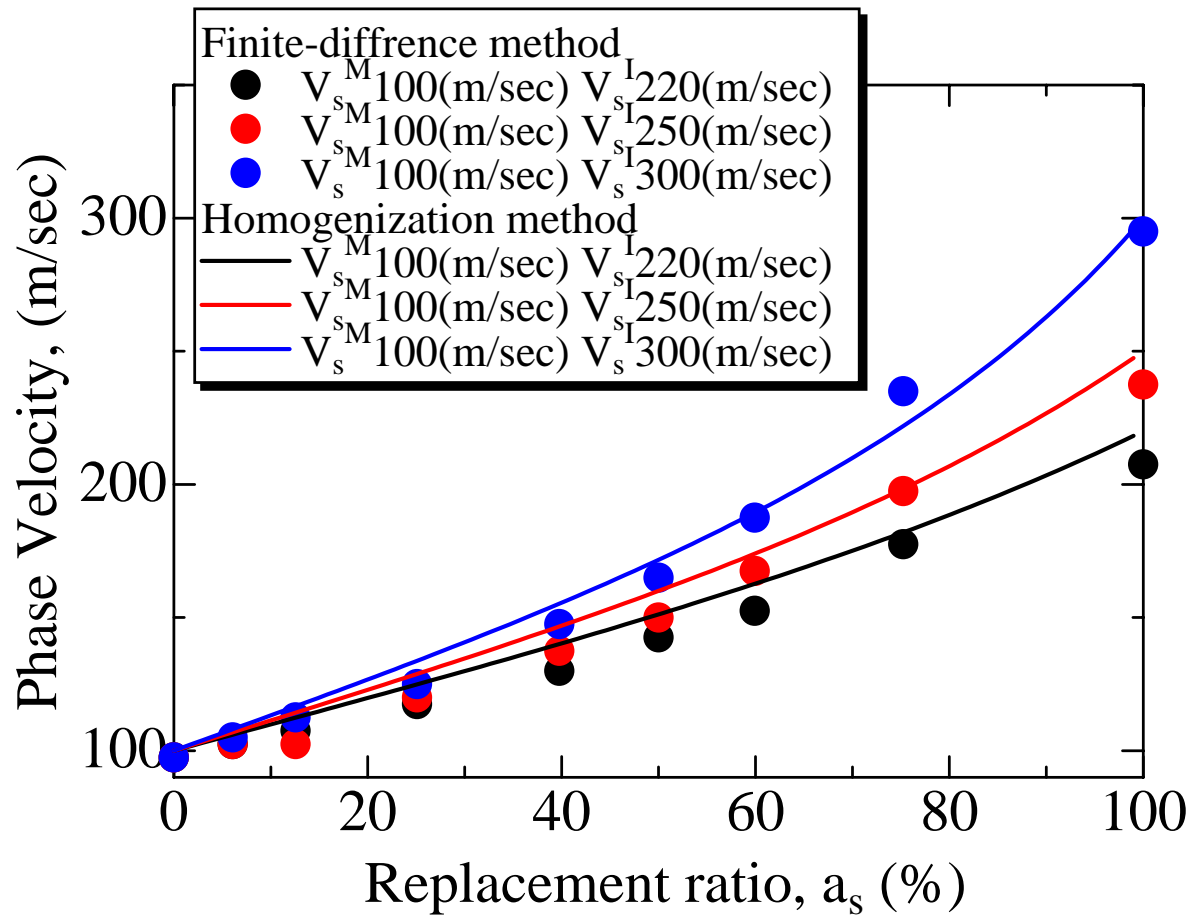
解析条件

	$V_s^M: 100\text{m/sec}$ $V_s^I: 220\text{m/sec}$	$V_s^M: 100\text{m/sec}$ $V_s^I: 250\text{m/sec}$	$V_s^M: 100\text{m/sec}$ $V_s^I: 300\text{m/sec}$
$a_s 0\%$	◎	◎	◎
$a_s 6\%$	●	●	●
$a_s 12.5\%$	○	○	○
$a_s 25\%$	▲	▲	▲
$a_s 40\%$	△	△	△
$a_s 50\%$	■	■	■
$a_s 60\%$	□	□	□
$a_s 78.5\%$	▼	▼	▼

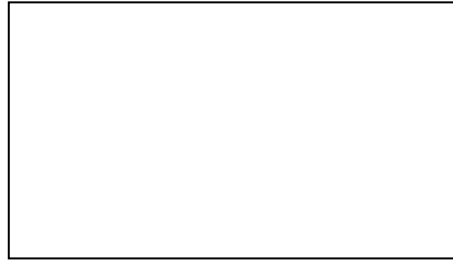
↑ 低
 置換率
↓ 高

小 ←→ 大
 剛性比

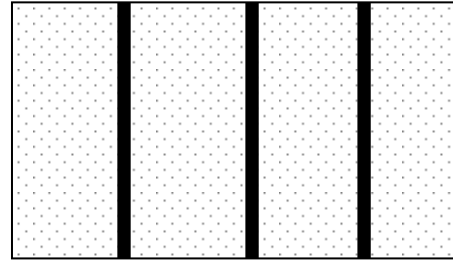
差分法解析による位相速度と 均質化法による理論計算結果の比較



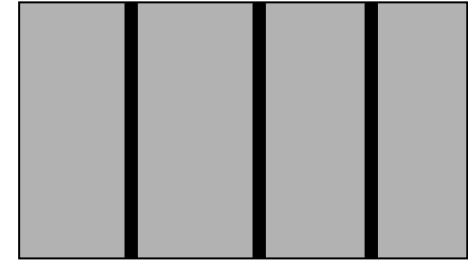
複合地盤の効果



もとの地盤
(絹豆腐)



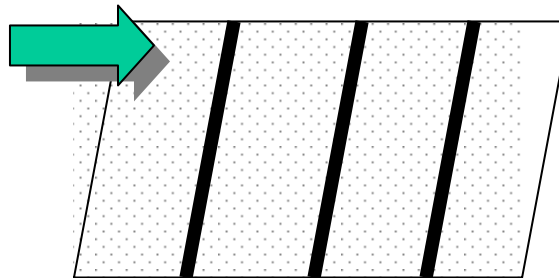
改良体と密度増加
のみ(硬い棒と木綿
豆腐)



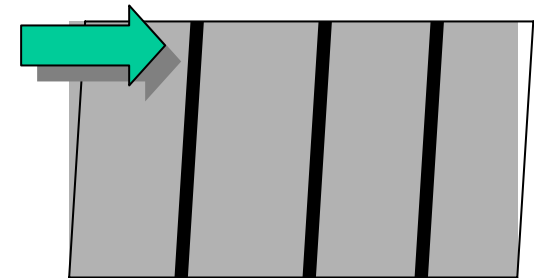
応力履歴を考慮(硬
い棒とコンニャク)



ぐにゅぐにゅ



ぷるん



プリプリ

液状化対策工法の評価について

ある層の液状化の危険性...

強度に期待する効果...

$$\text{液状化安全率 } F_L = \frac{\text{液状化に対する強さ } R_{\max}}{\text{地震による力の大きさ } L_{\max}}$$

$F_L \geq 1$ 液状化しない

$F_L < 1$ 液状化する

複合地盤効果....

地盤全体では...

$$\text{液状化危険度 } P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) \cdot w(z) dz$$

$$w(z) = 10 - 0.5z \quad (\text{深さ方向に対する重み関数})$$

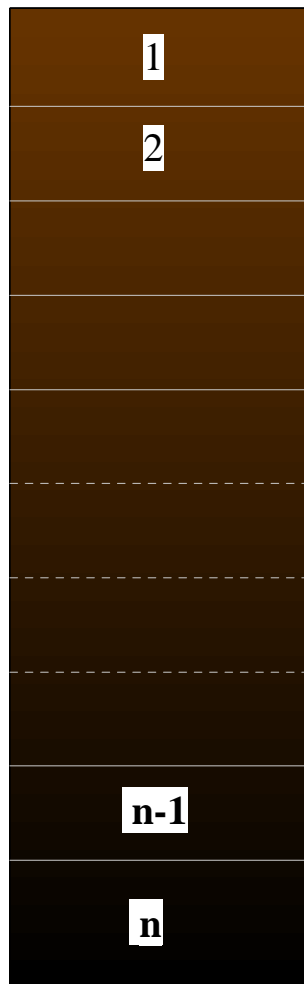
$0 < P_L \leq 5$ 液状化危険度はかなり低い。

地面に小さな亀裂ができる。沈下量 $\leq 10\text{cm}$

$5 < P_L \leq 15$ 液状化危険度が高い。

小規模な噴砂が発生。沈下量 $\leq 30\text{cm}$

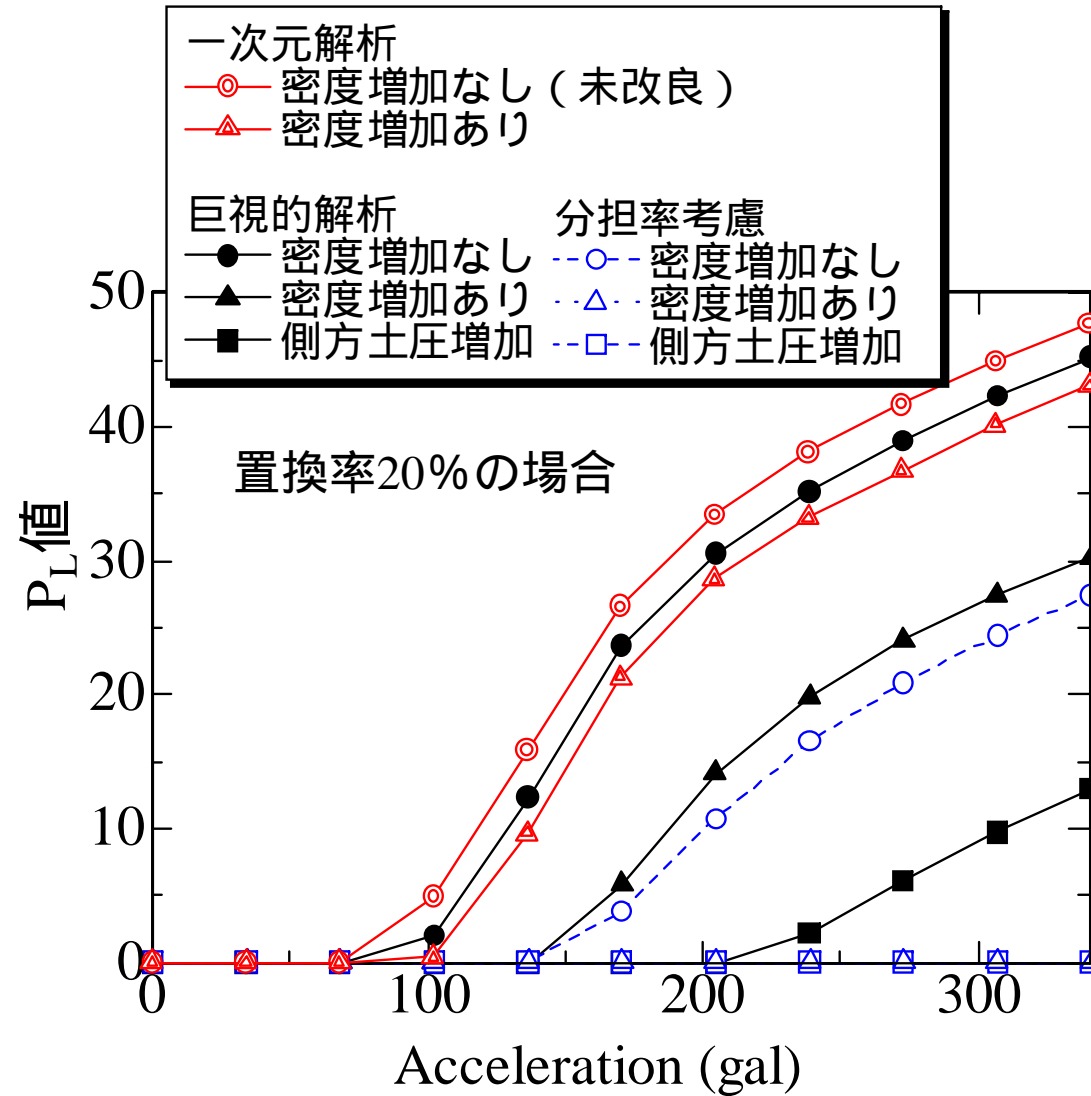
$15 < P_L$ 液状化危険度がかなり高い。大規模な噴砂が発生。地面に大きな亀裂ができ、地盤が流動する。



基盤



均質化法地震応答解析結果





3. 地盤材料の動的性質の 整理(材料による違い)



弾性波速度と弾性係数

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

横波: $V_s = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho} = \sqrt{E/2(1+\nu)/\rho}$

硬いところは
早く伝わる

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

$$\lambda = V \cdot T$$

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

波の速度 V , 周波数 f , 周期 T , 波長



V_p

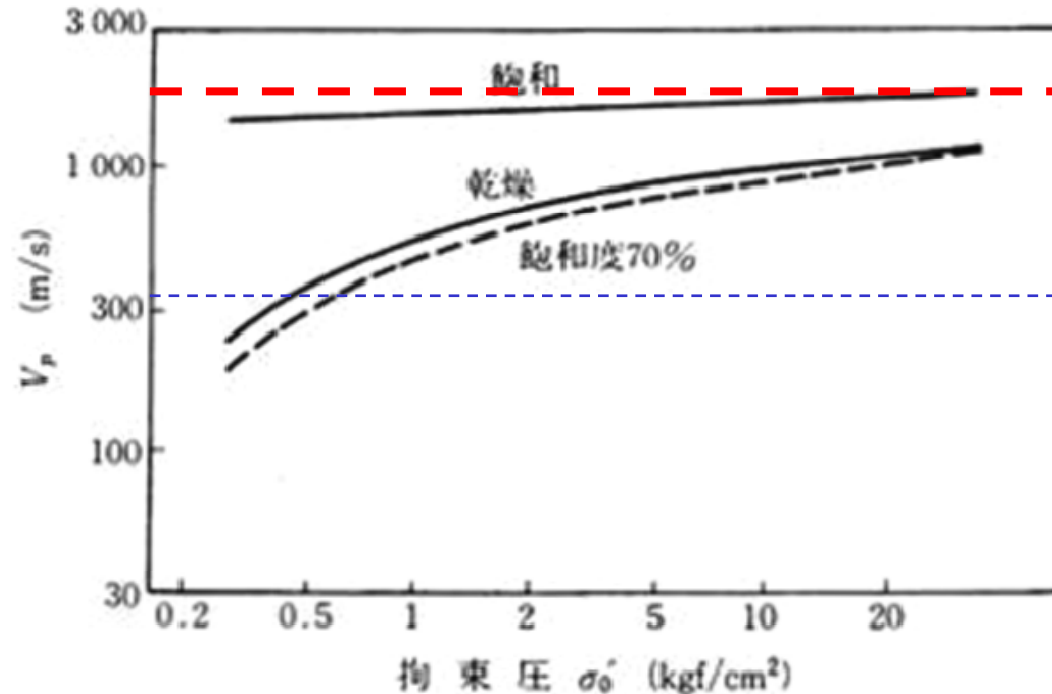
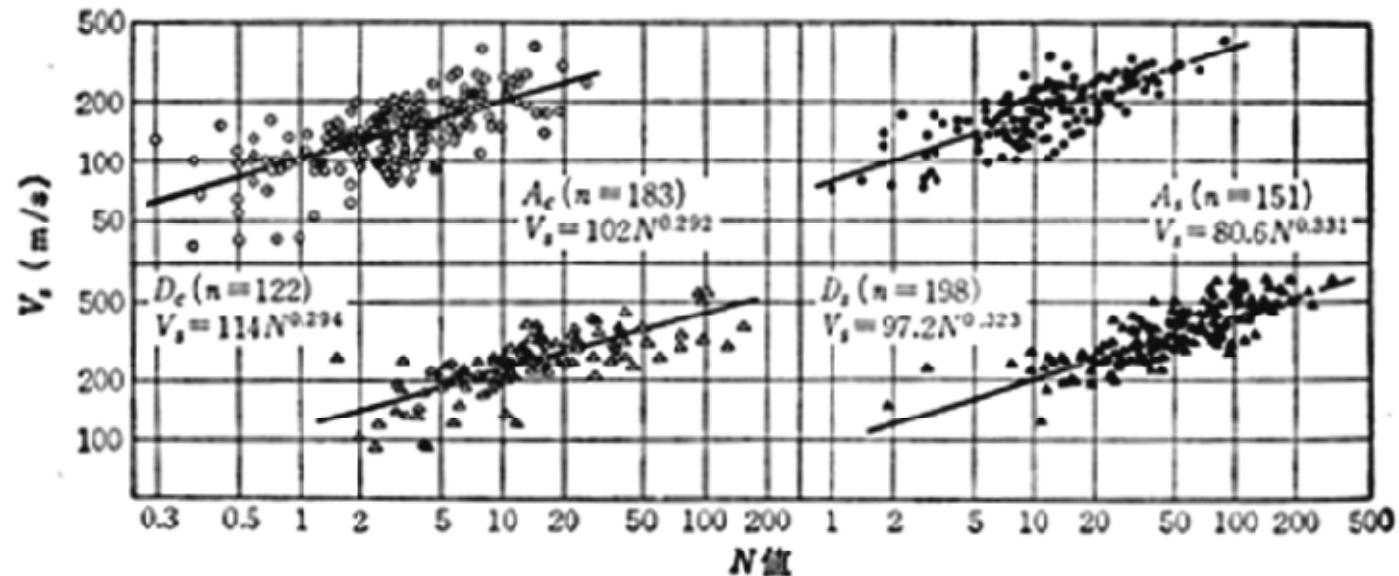


図-32 飽和度と拘束圧がP波速度に与える影響¹¹⁾

空気の V_p (音波) 340m/s , 水の $V_p=1500$ m/s

V_s とN値



(注) n : 標本数, N : N値, A_c : 沖積粘土層, A_s : 沖積砂層, D_c : 洪積粘土層, D_s : 洪積砂層

図-3.57 N値と $V_s = \sqrt{G_{max}/\rho}$ の関係 (今井の原図)

「新体系土工学 構造物の耐震解析」(技報堂出版)土岐憲三

例えば, $V_s = 90N^{1/3}$; $N = 27$ $V_s = 270\text{m/s}$

$N = 30$, $V_s = 300\text{m/s}$

様々な材料の V_p と V_s

媒質の種類別		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
	砂 礫		250~350		1.8~2.1
洪積層	関東ローム	1,000~2,000 (1,500)* ~2,000	140~200		1.2~1.6
	粘性土		160~250		1.4~1.8
	砂質土 砂 礫		200~350 300~600		1.7~2.1 1.8~2.2
岩	泥 岩	2,000~3,000	600~1,000	0.30~0.40	2.2~2.6
	砂 岩	2,000~3,500	700~2,000		2.5~2.7
石	花崗岩	4,000~5,700	2,100~3,300	0.25~0.35	2.6~2.8
	玄武岩	4,400~6,700	2,500~3,800		2.8~3.0
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
		5,950	3,240	0.289	7.86

土の場合 鉄

*飽和

非排水繰返し試験で得られる変形・破壊挙動

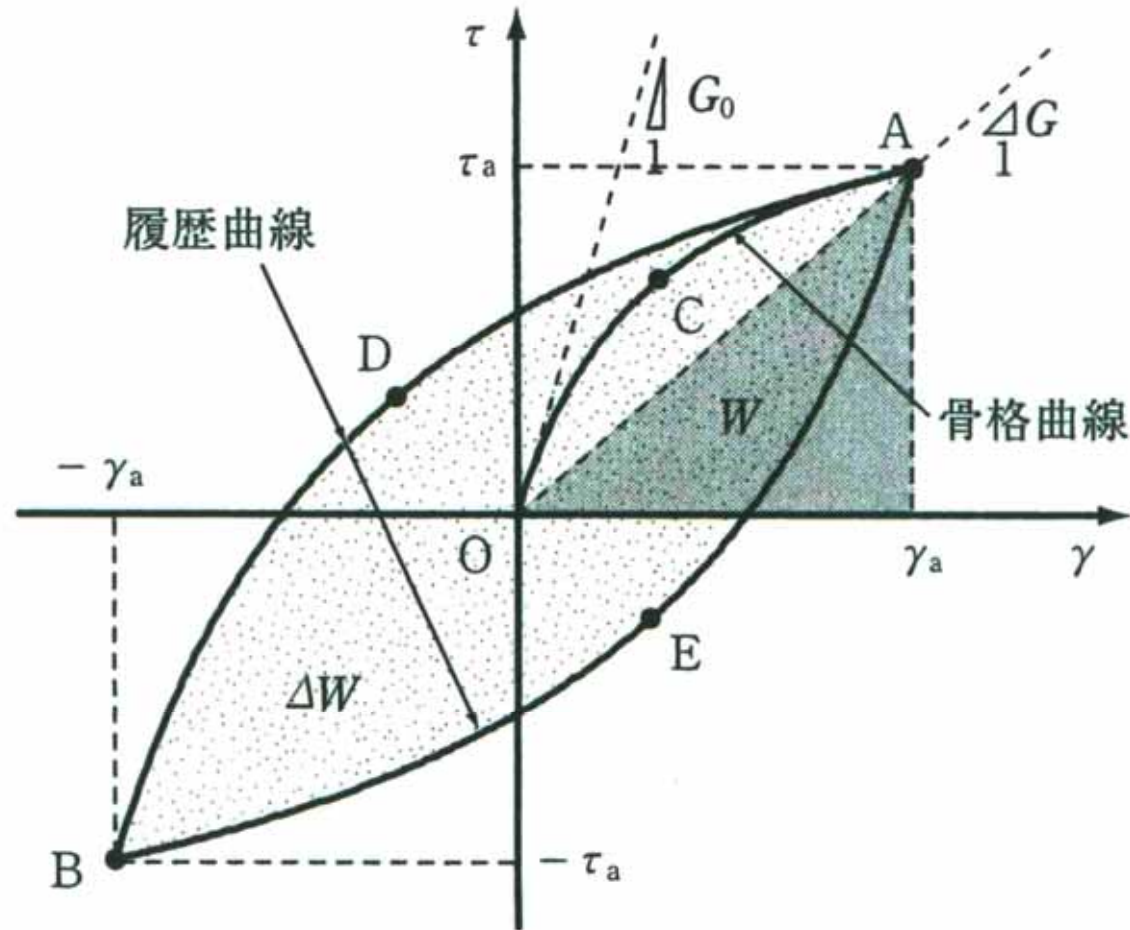


図 4.3 非線形モデル

せん断剛性と減衰定数

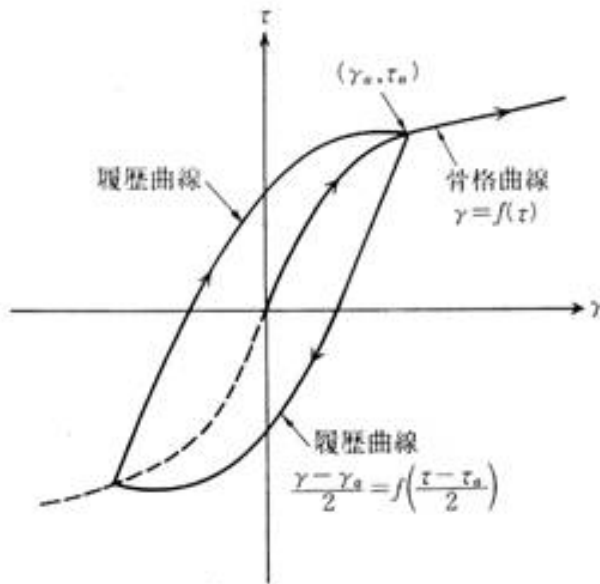


図-58 非線形の応力ひずみ関係

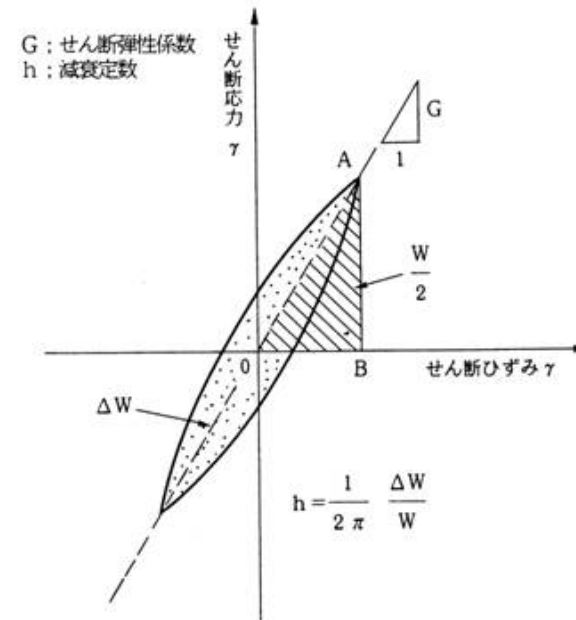
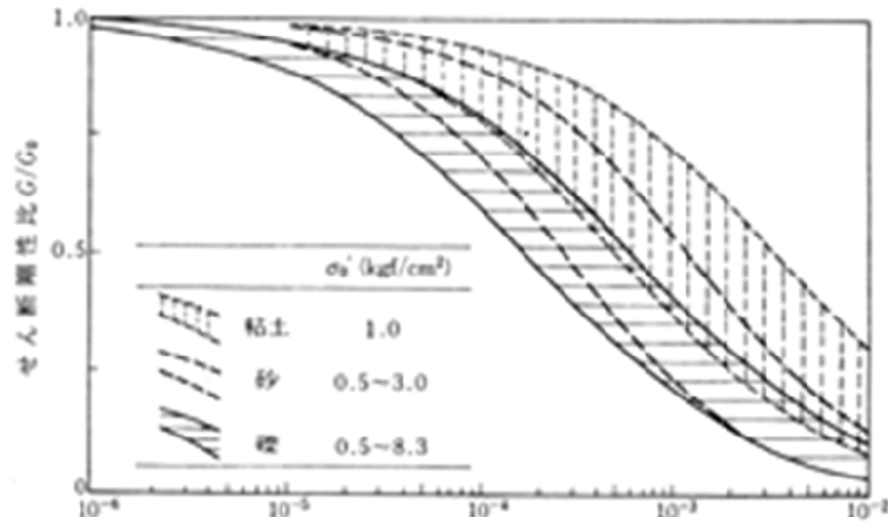


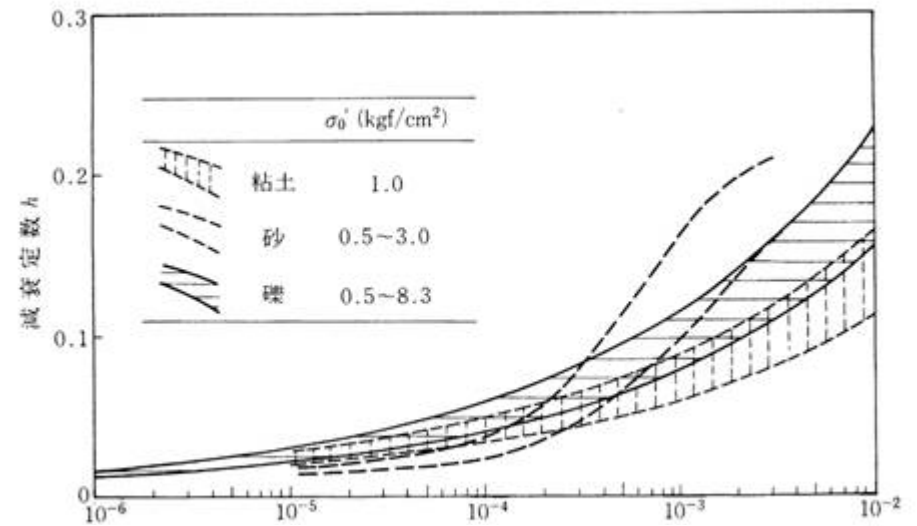
図-4.3.3 応力～ひずみ関係の等価線形モデル化

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



4. 地盤のゆれ方と被害の解釈 (事例紹介とそのメカニズム)

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

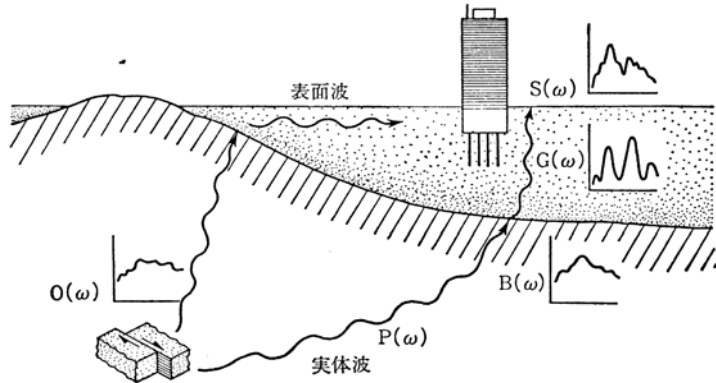


図-1.12 地震波伝ばの概念図

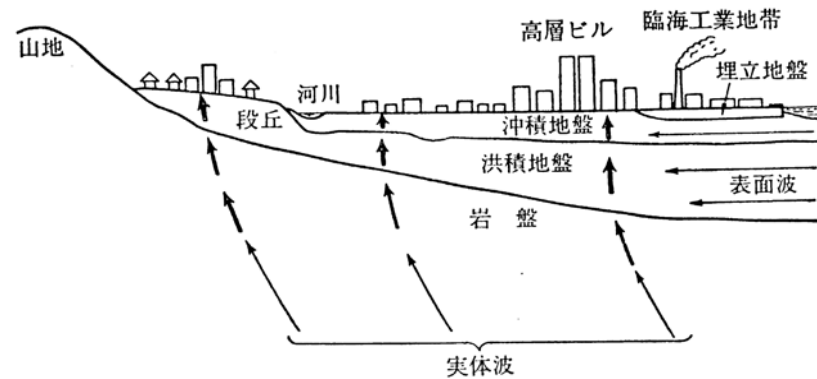
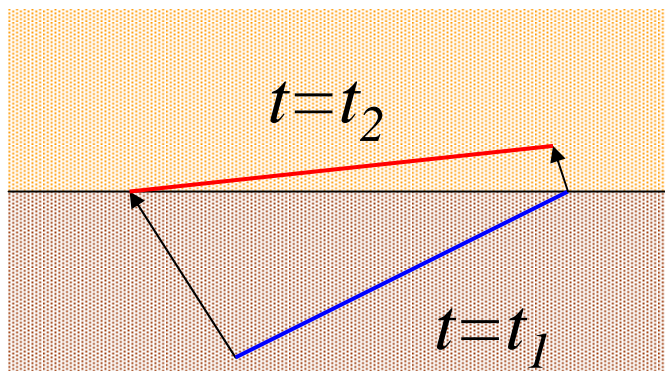


図-3.1 地盤の模式図と地震波の到達経路

「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)

重複反射理論

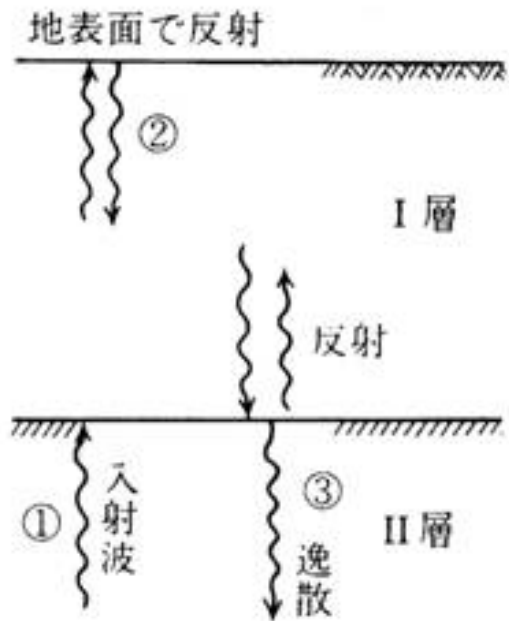
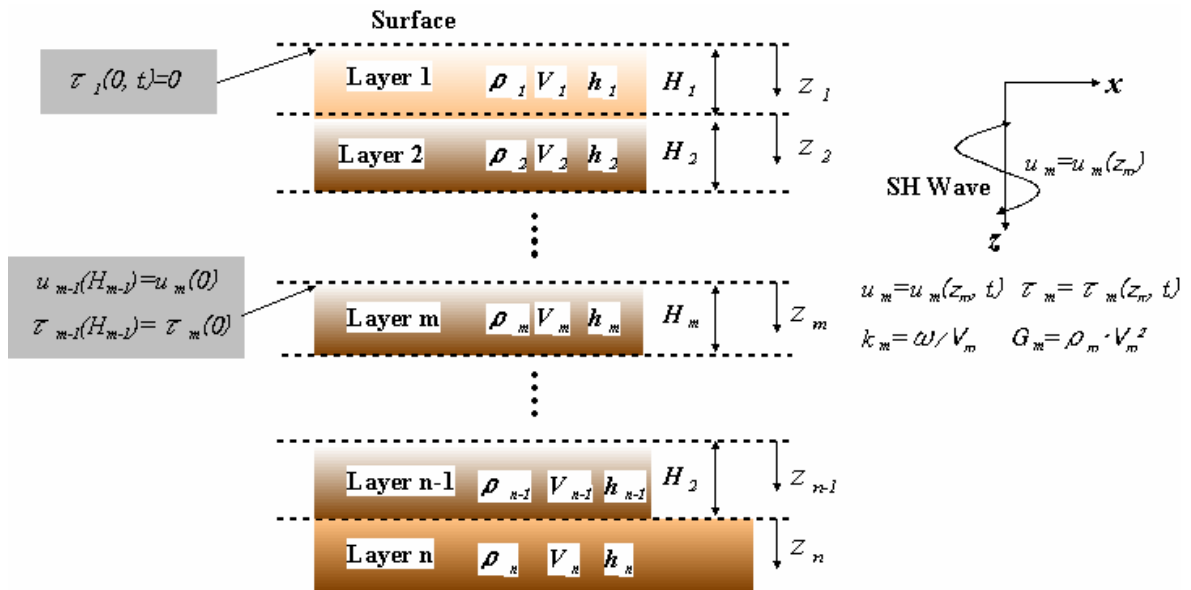


図-25 逸散減衰の概念

「やさしい土質力学
原理」地盤工学会



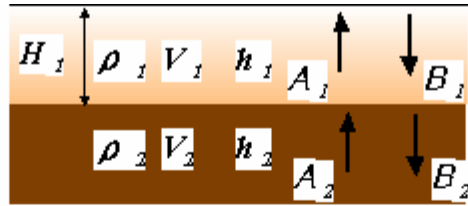
Multi-Layer System and Coordinate System

一番興味があるのは

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

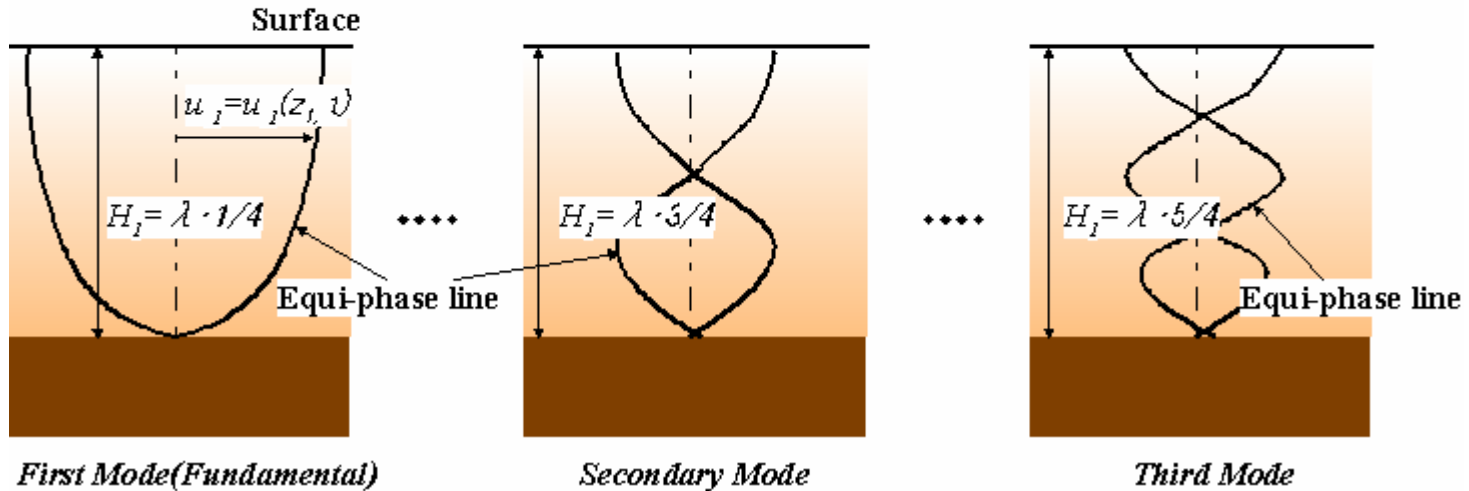
= 増幅特性

単純な地盤の振幅



$$k_m = \frac{\omega}{V_m} \quad \text{: 波数}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$



$$A_1 = B_1 = \frac{1}{\cos(k_1 H_1) + i \alpha_1 \sin(k_1 H_1)} A_2$$

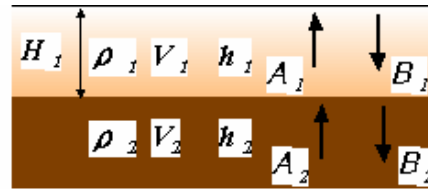
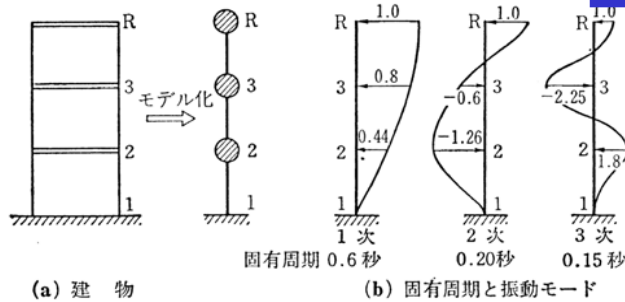
インピー
ダンス比

$$\alpha_{m-1} = \frac{G_{m-1} k_{m-1}}{G_m k_m} = \frac{\rho_{m-1} V_{m-1}}{\rho_m V_m}$$

インピーダンス

が小さくな
るほど増幅
する

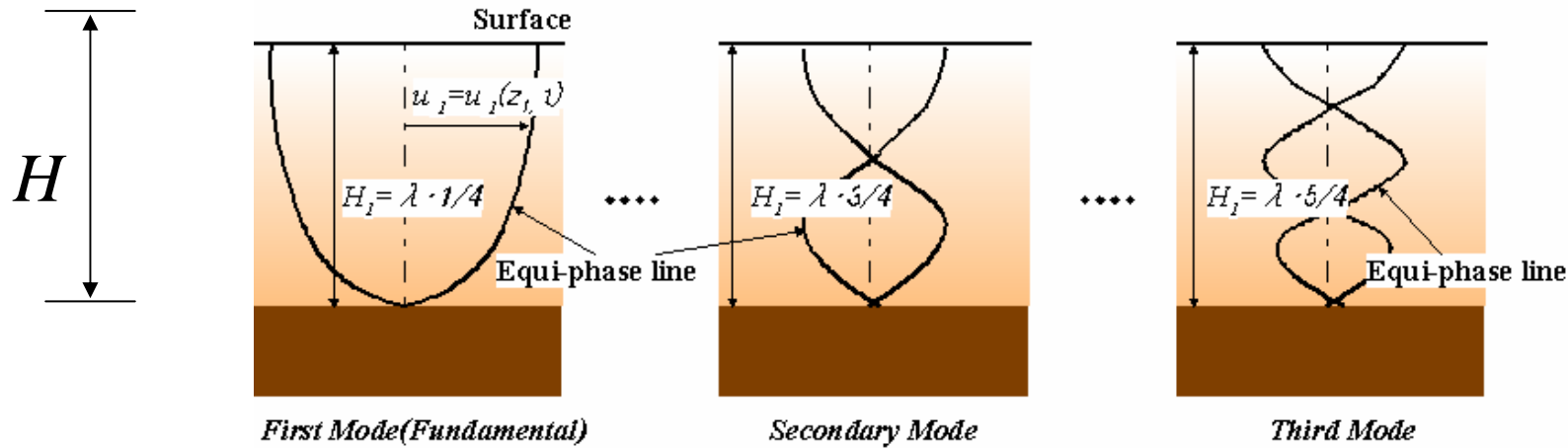
二層地盤の固有周期



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

$$G = \rho V_s^2$$

図-2.5 ある3層建物の固有周期と振動モード



1次モード(基本モード)

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

2次モード

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

3次モード

$$f_3 = \frac{5}{4} \frac{V}{H} = 5f_1$$

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

軟らかく厚いそうはゆっくりゆれる

液状化すると?
 $G \rightarrow 0$

多層の場合

地盤の特性を現すひとつの指標として

$$T_G = \frac{\lambda_1}{V_1} + \dots + \frac{\lambda_n}{V_n} = \frac{4H_1}{V_1} + \dots + \frac{4H_n}{V_n} = \sum_{j=1}^n \frac{4H_j}{V_j}$$

$$T_G = \frac{4 \sum_{j=1}^n H_j}{V_{ave}}, \quad V_{ave} = \frac{\sum_{j=1}^n V_j H_j}{\sum_{j=1}^n H_j}$$

Vは力学的特性, Hは幾何学的特性
は共振という条件から.



エネルギーと増幅

質点の運動エネルギー

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2$$

↑ 質量 ↑ 運動速度

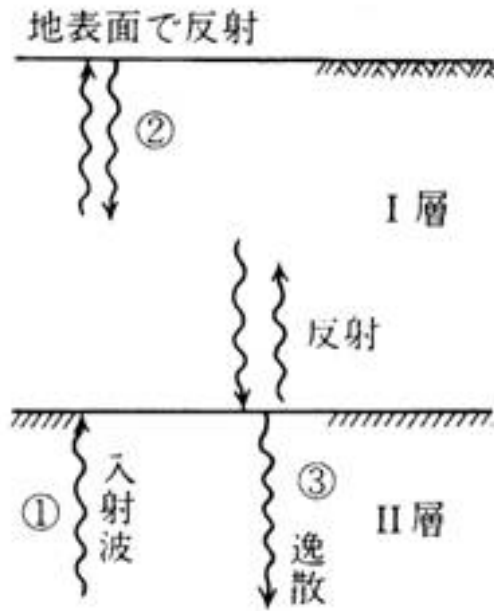


図-25 逸散減衰の概念

「やさしい土質力学
原理」地盤工学会

揺れながら進む波動の運動エネルギー

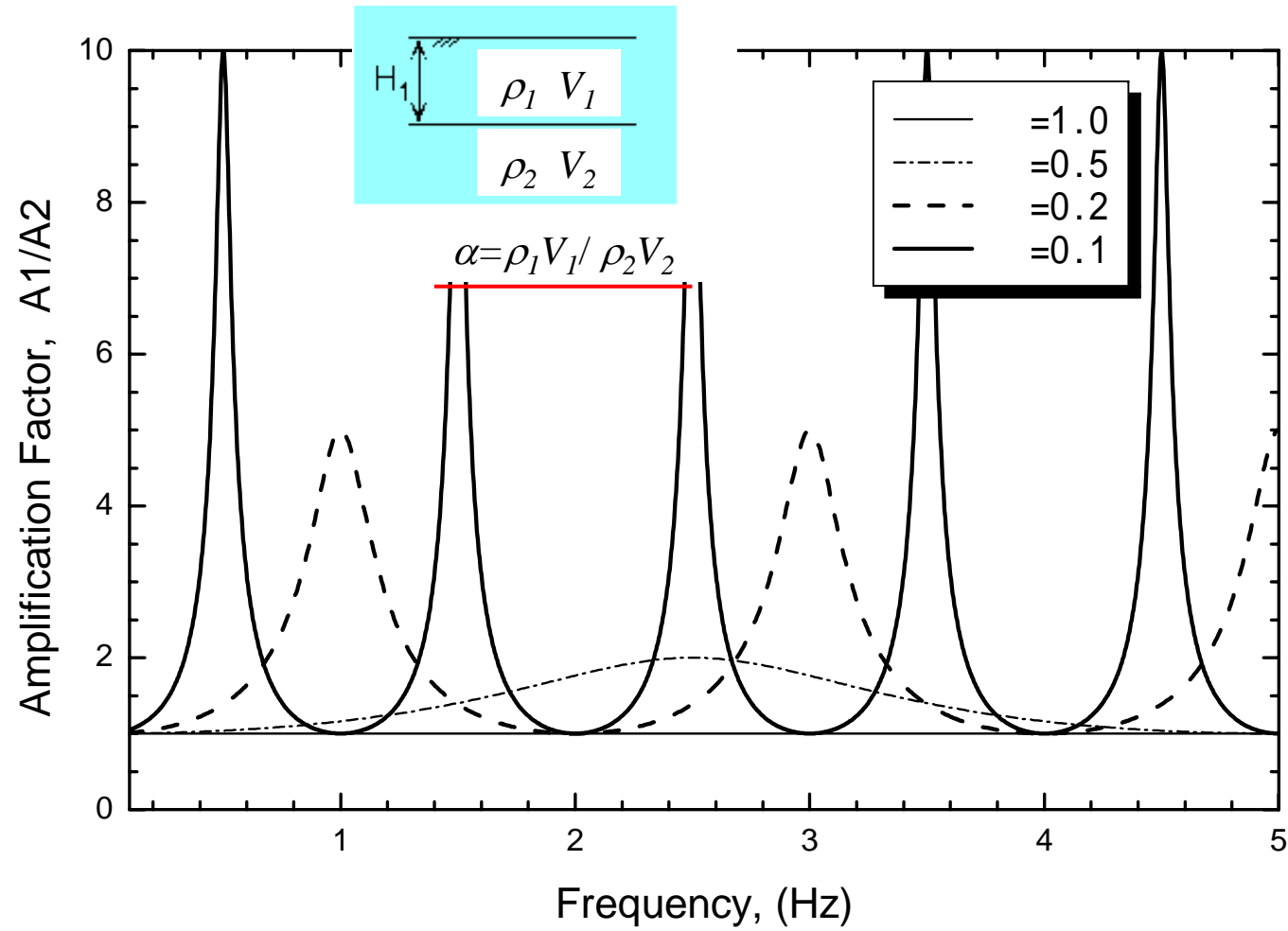
$$E_k = \frac{1}{2} \rho \cdot V_s \cdot \omega^2 \cdot |A|^2$$

↑ 波の長さ(質量) ↑ 運動速度 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) $v \propto \sqrt{h}$ ⁷³



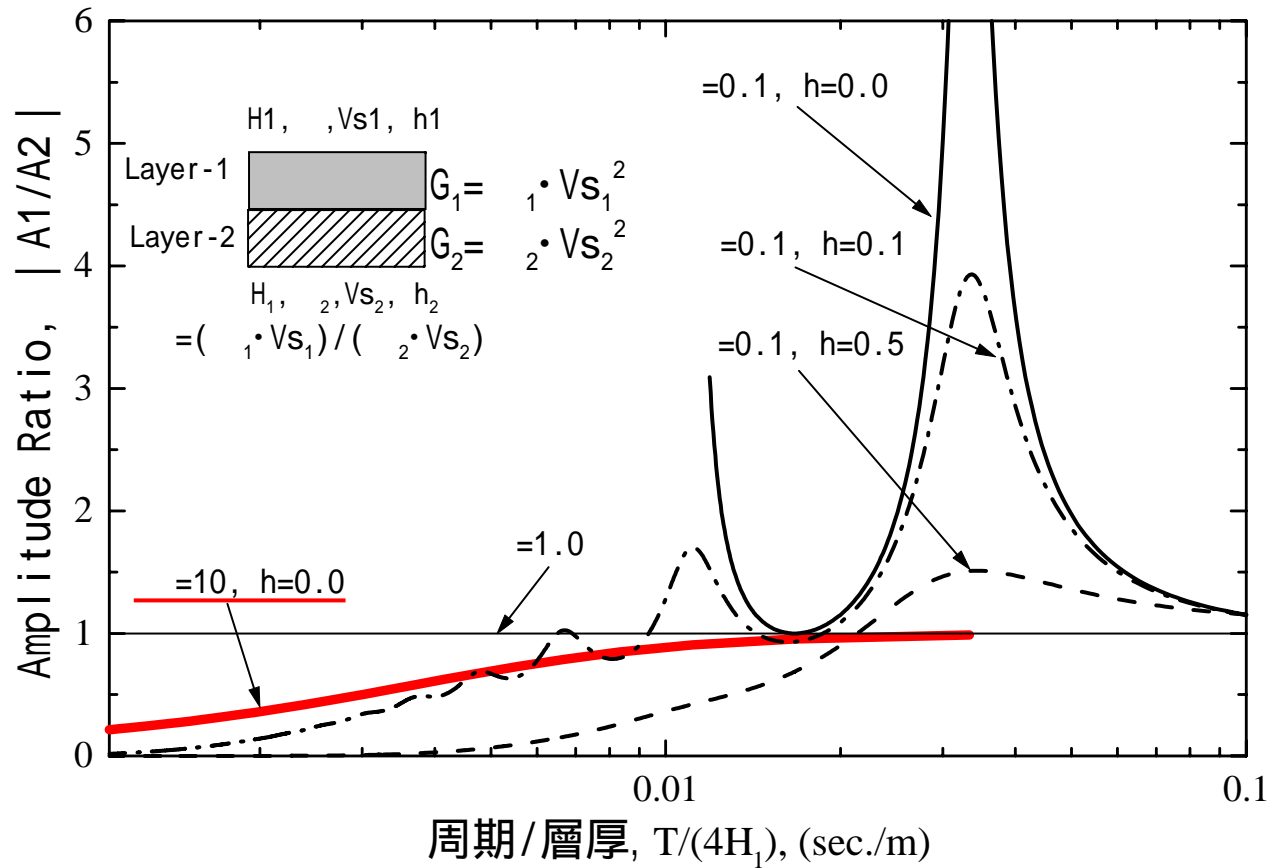
重複反射の計算例(1)



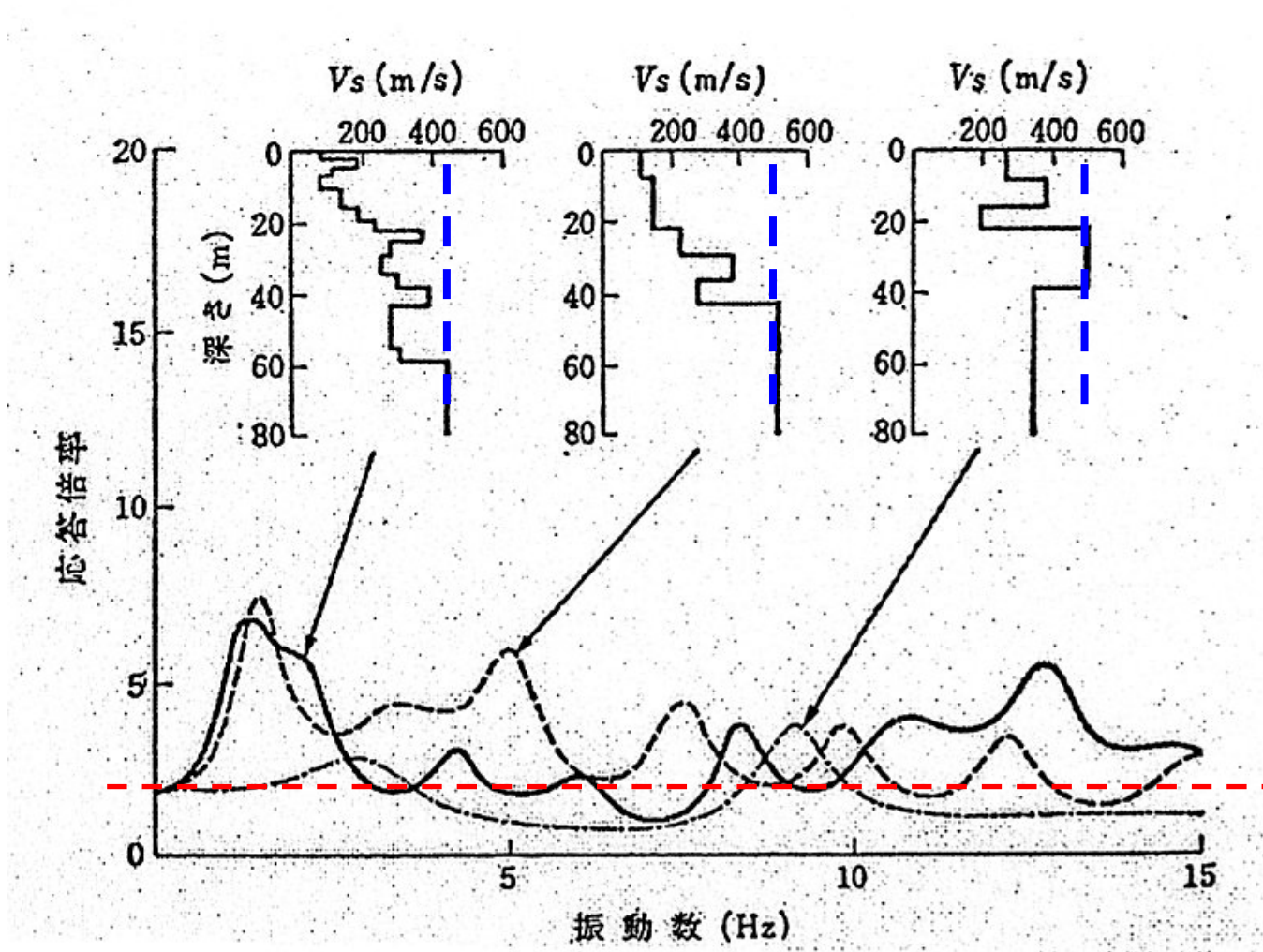


重複反射の計算例(2)

重複反射理論 による増幅率とインピーダンス比



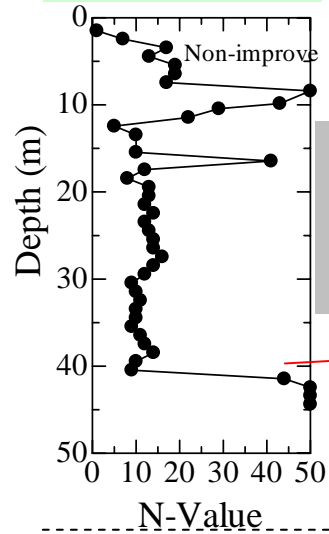
重複反射の計算例(3)



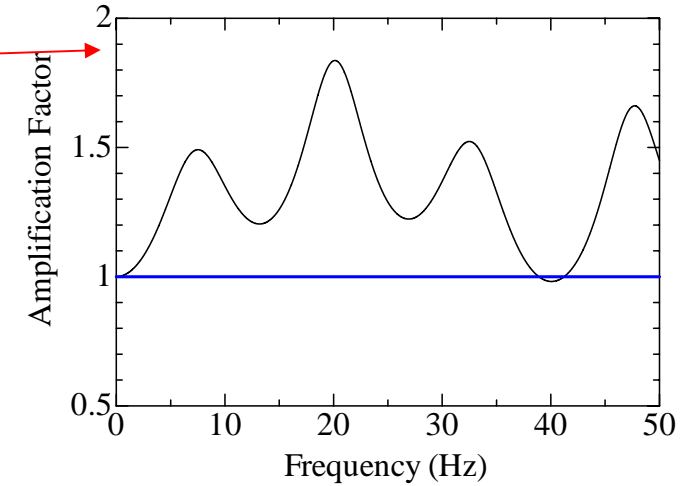
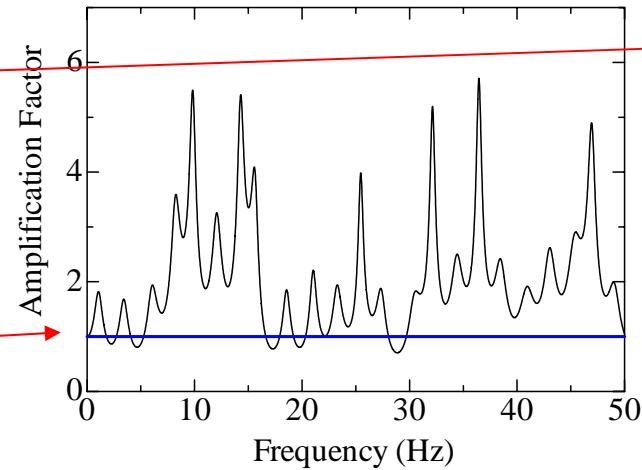


重複反射の計算例(4)

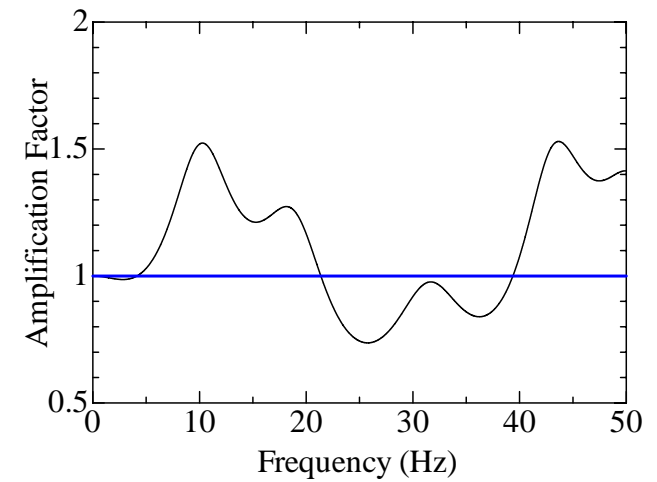
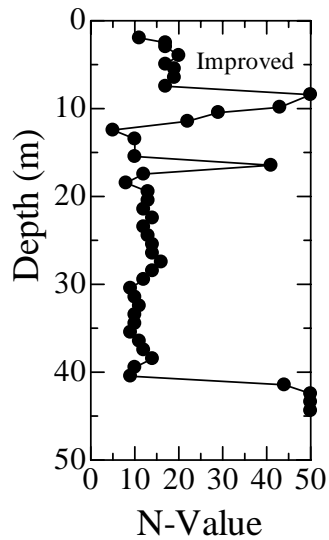
未改良地盤



基盤
はどこ?



改良地盤





応答スペクトルとは

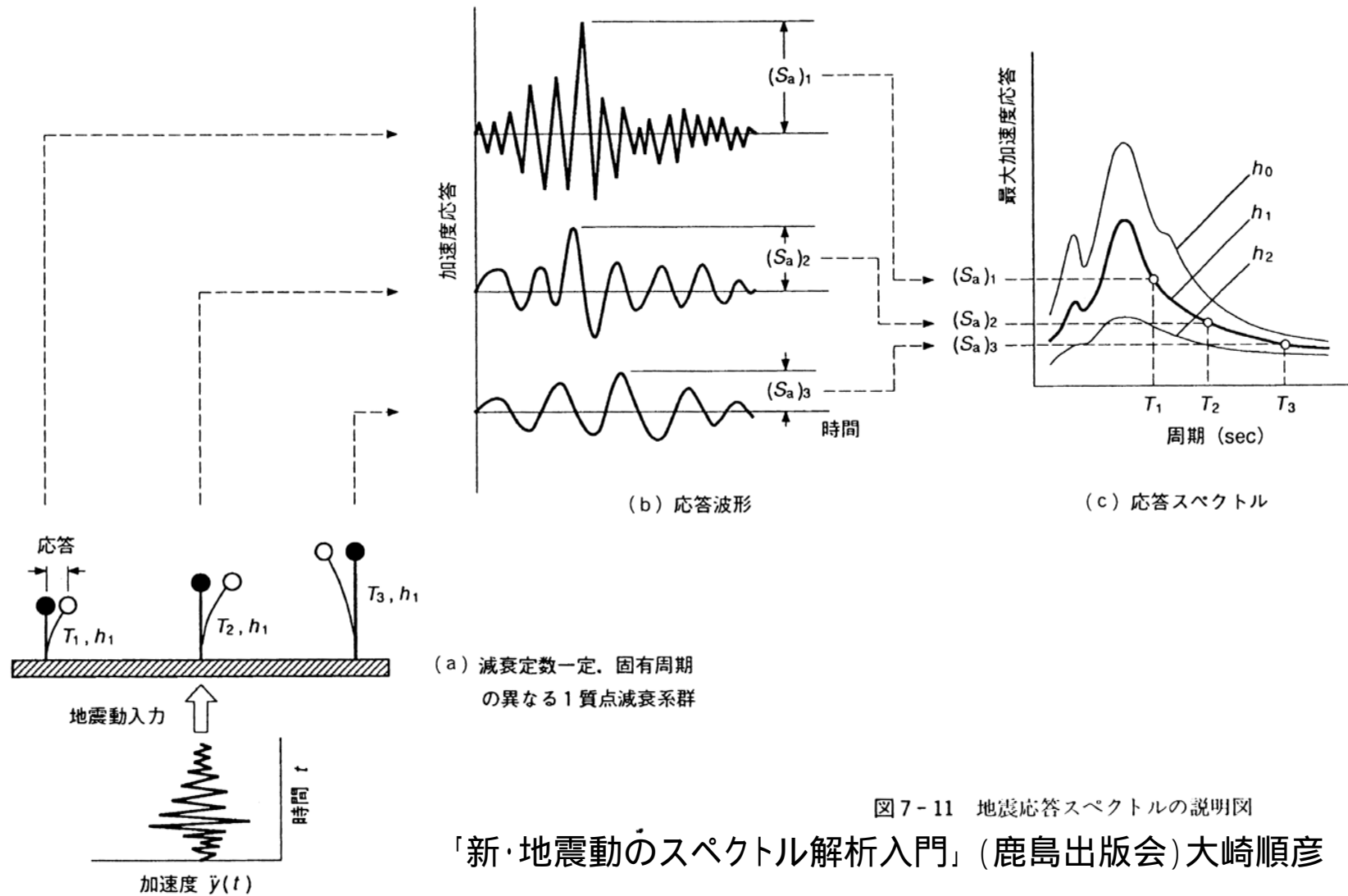


図7-11 地震応答スペクトルの説明図

「新・地震動のスペクトル解析入門」(鹿島出版会)大崎順彦

応答スペクトル同士の関係

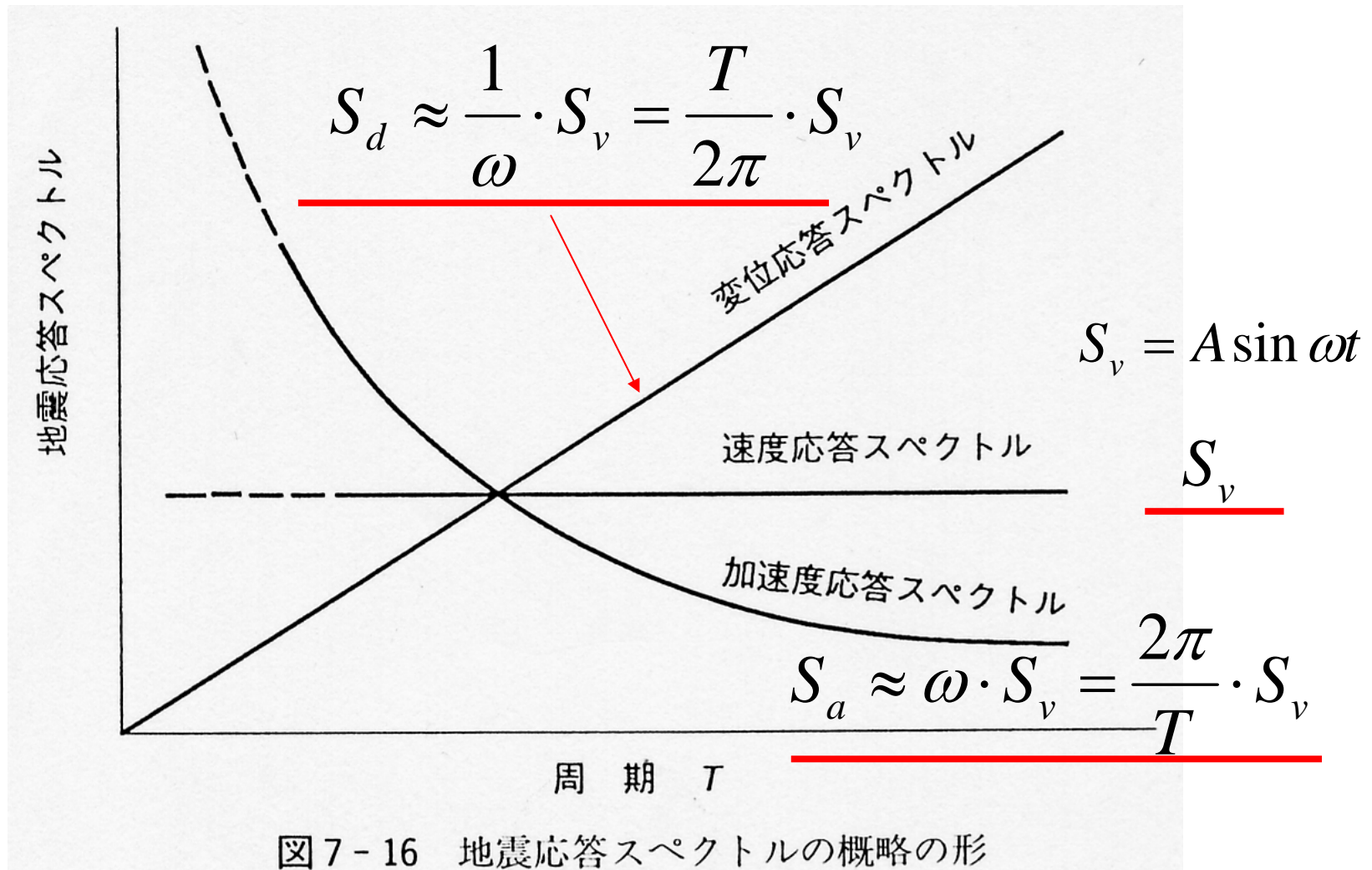
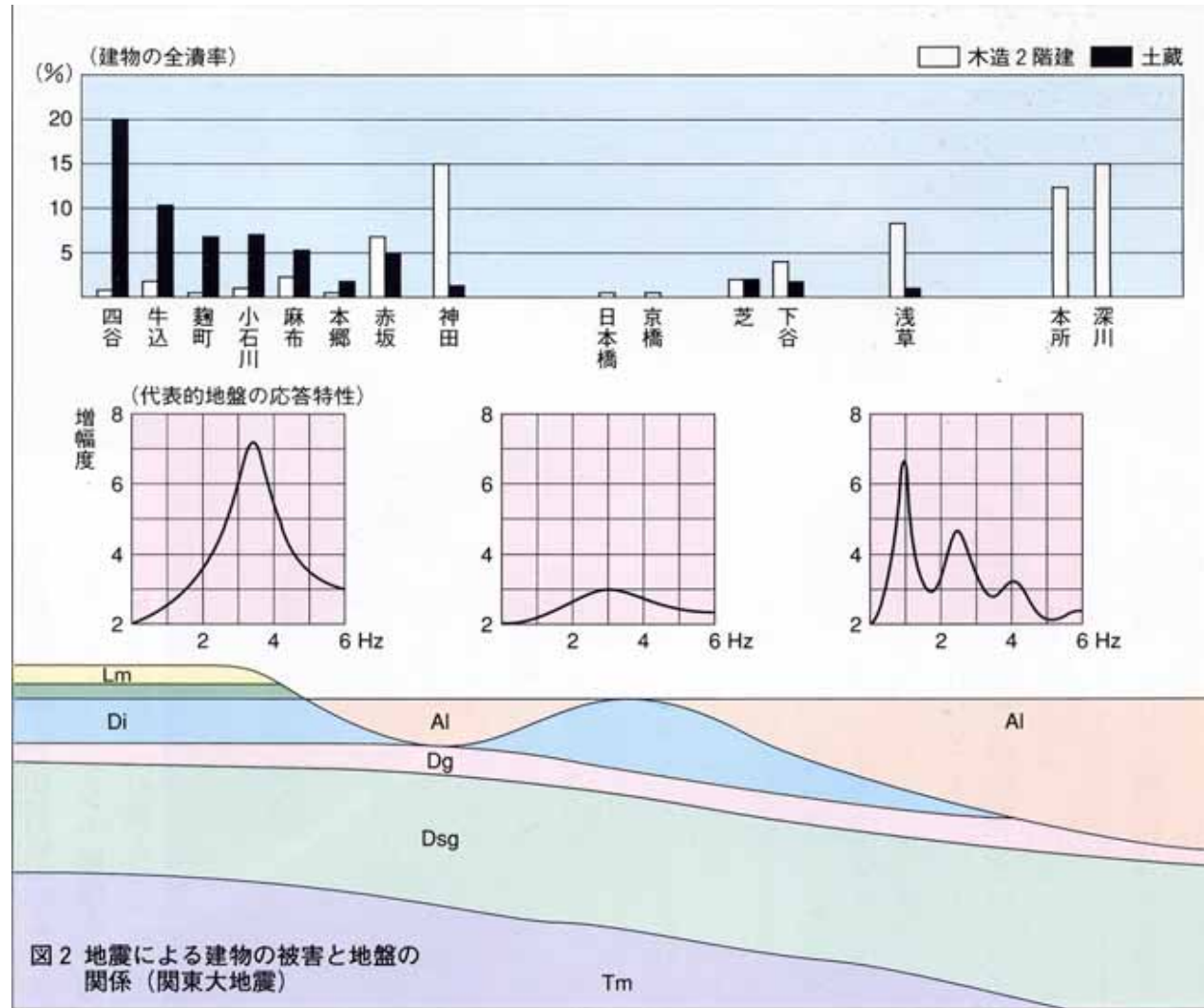
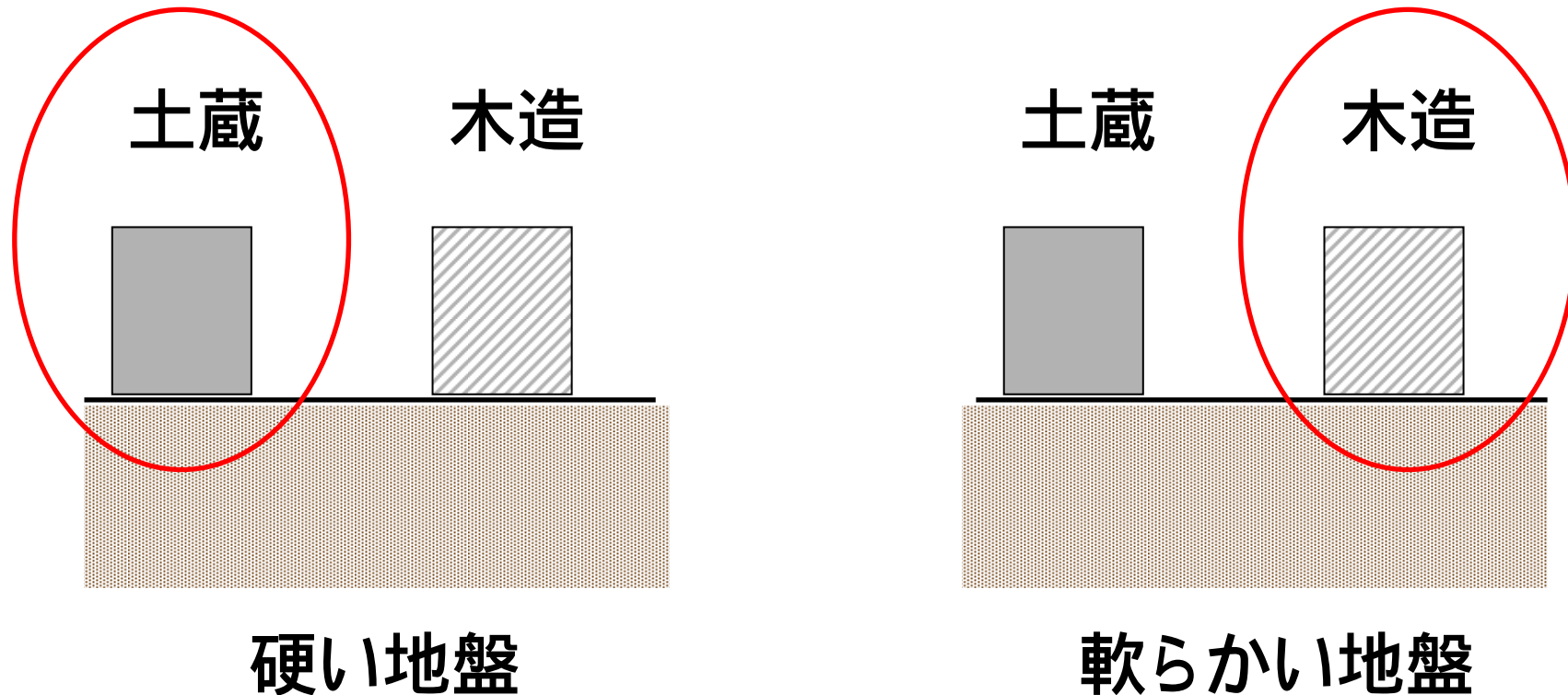


図7-16 地震応答スペクトルの概略の形

日本に高層ビルがたつようになった理由？

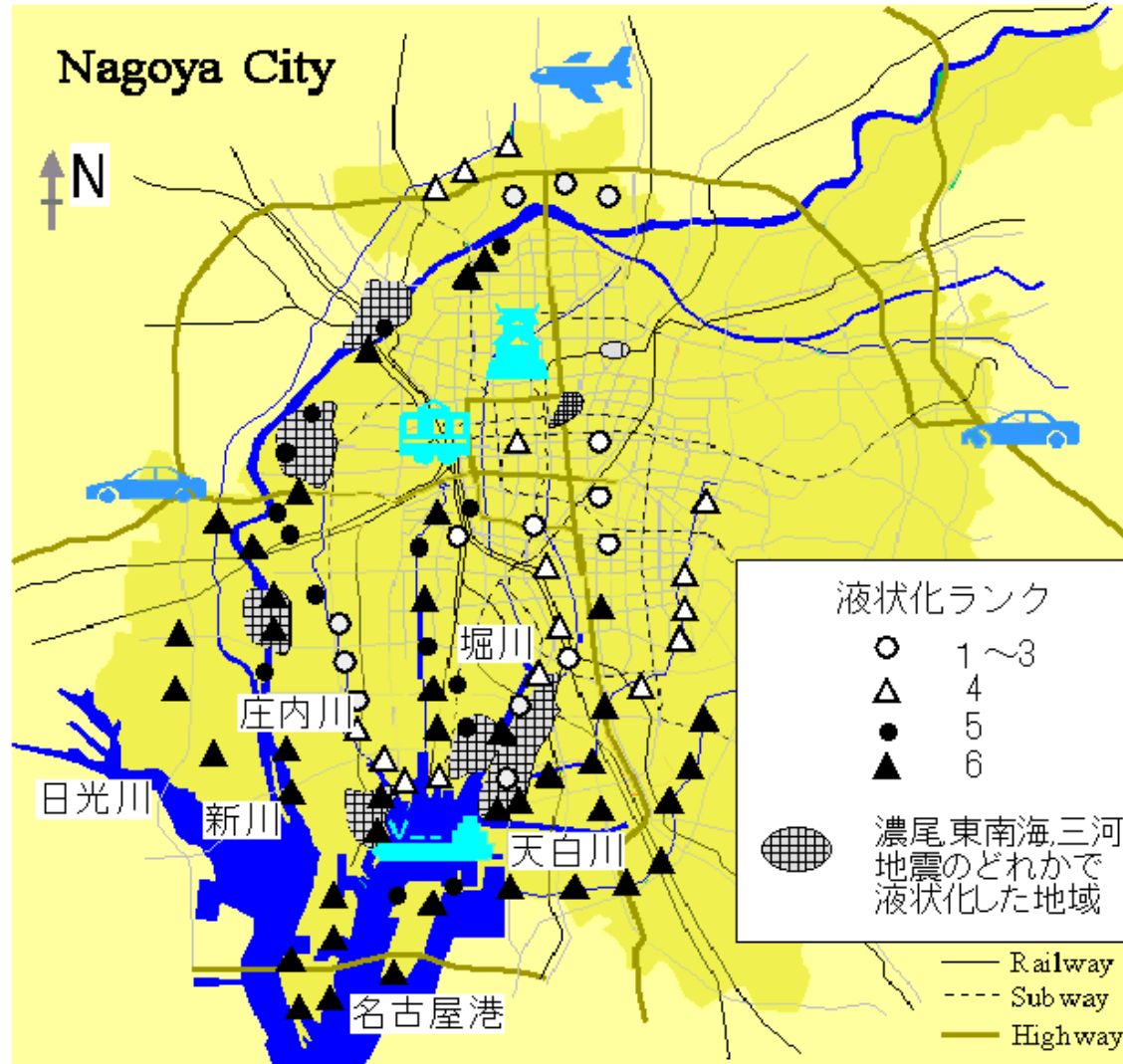


高層ビルはどこに建てるか？





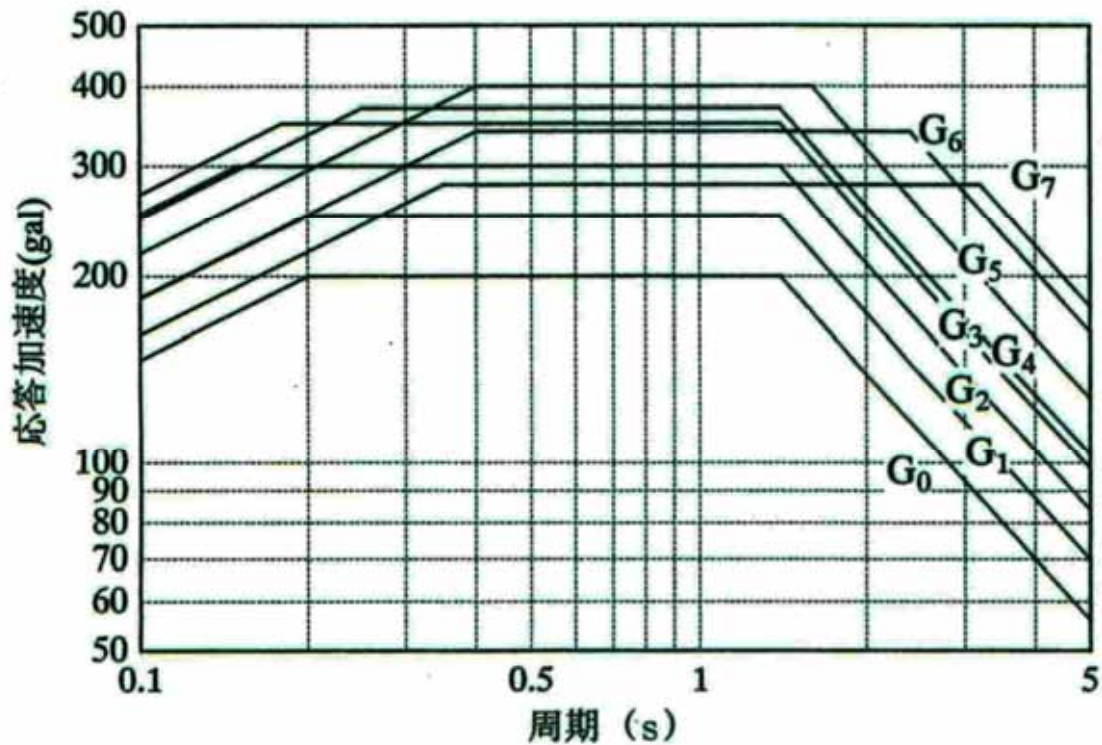
名古屋市の場合は？ (液状化危険度分布から)



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」)



周期と地盤種別



解説図 5.7.1 地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトル (L1 地震動)

鉄道構造物等設計
標準・同解説 耐震
設計 (鉄道総合技
術研究所)

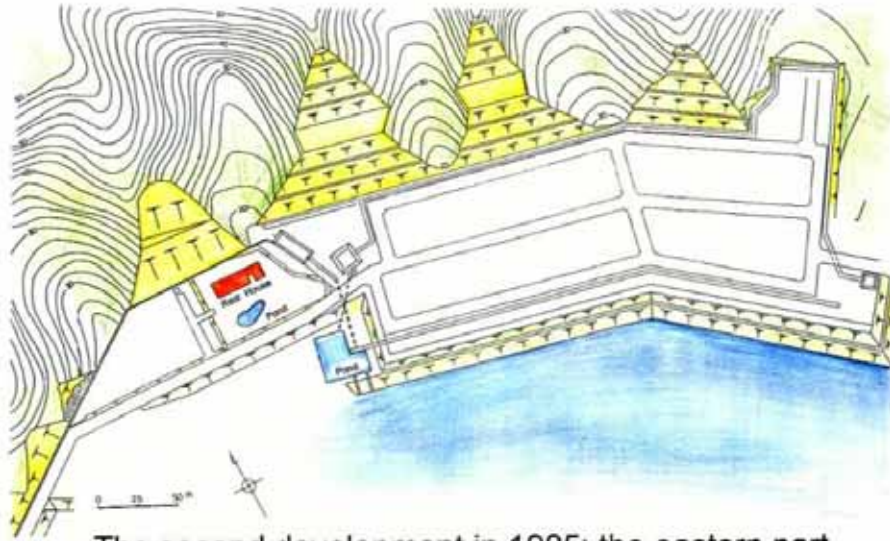
地盤種別

表 5.7.1 耐震設計における地盤種別

地盤種別	固有周期 (sec)	地盤条件
G 0	—	岩盤
G 1	—	基盤
G 2	~0.25	洪積層
G 3	0.25~0.5	普通地盤
G 4	0.5 ~0.75	普通~軟弱地盤
G 5	0.75~1.0	軟弱地盤
G 6	1.0 ~1.5	軟弱地盤
G 7	1.5 ~	極めて軟弱な地盤

鉄道構造物等設計
標準・同解説 耐震
設計 (鉄道総合技
術研究所)

斜面：きりどともりど



The second development in 1985: the eastern part.
(this part was prepared for resort houses)

硬さが違う ゆれも違う 強度も違う 被害も違う





きりどともりど:地震によるローカルな破壊(中越地震)



破壊の連鎖： 硬い地盤はいい

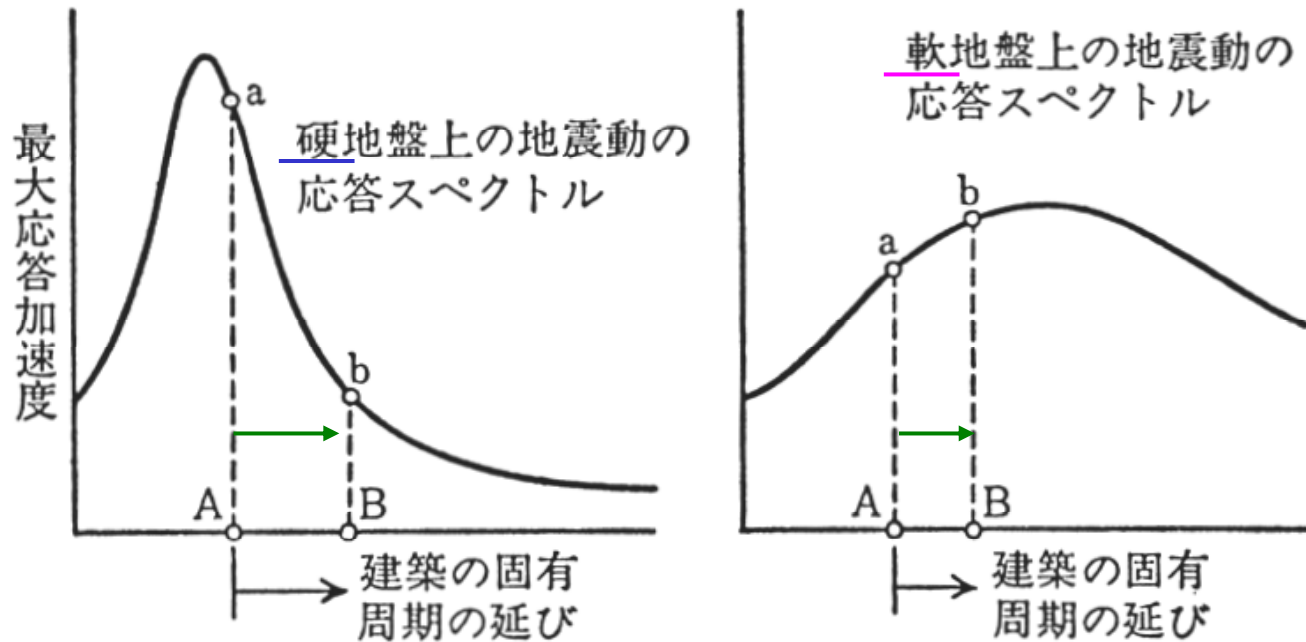


図 VII-9 固有周期の延びと作用する力の変化

極端に軟らかくなる液状化(記録)



新潟空港ターミナル;新潟地震(1964年)

液状化はほんとうに悪者！？



写真29 昭和39年（1964）新潟地震での傾斜した川岸町アパート（壁にひび割れもなく、窓ガラスも割れていない）（新潟日報社提供：文献1-1）

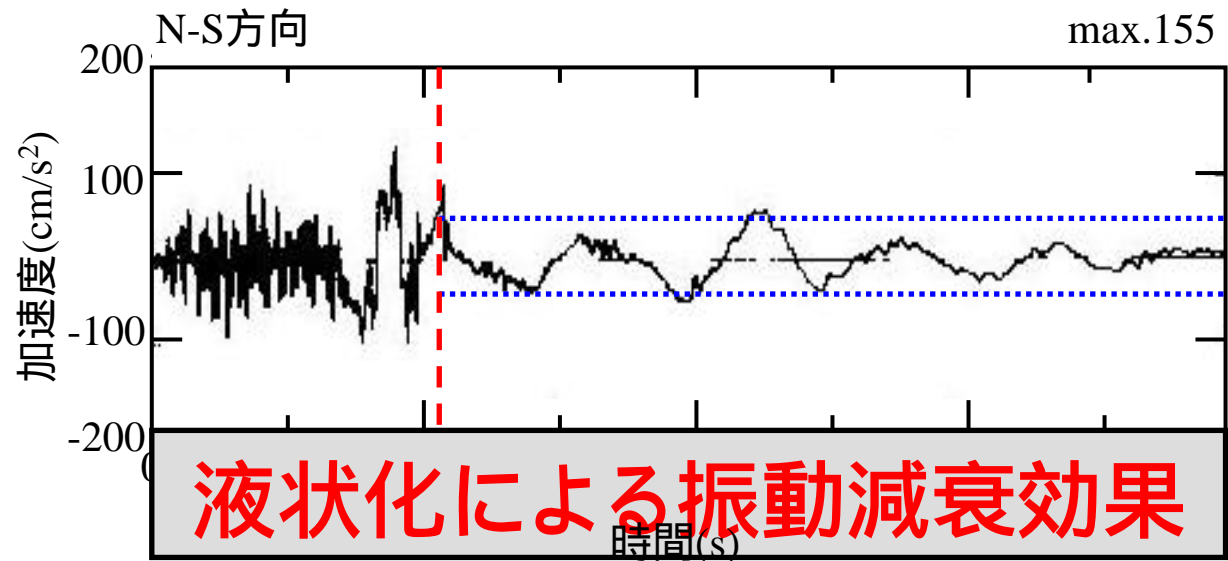


写真30 トルコのアダバサーリでの地震被害（地盤がよいところでは地震の揺れにより建物に見る影もないほどの被害）



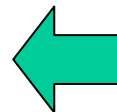
液状化地盤にはこのような記録が存在する。

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⁾



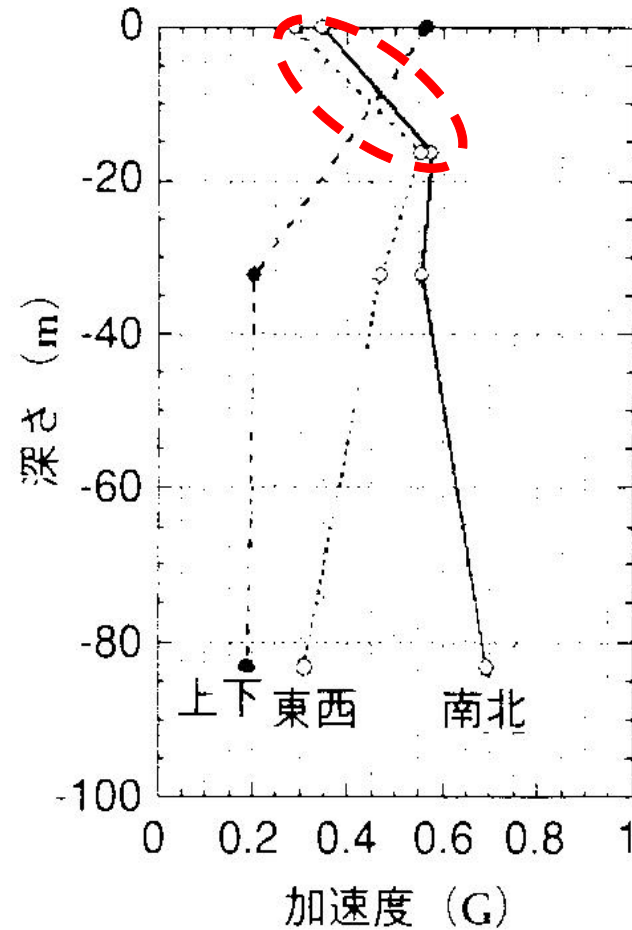
10秒以降

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

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

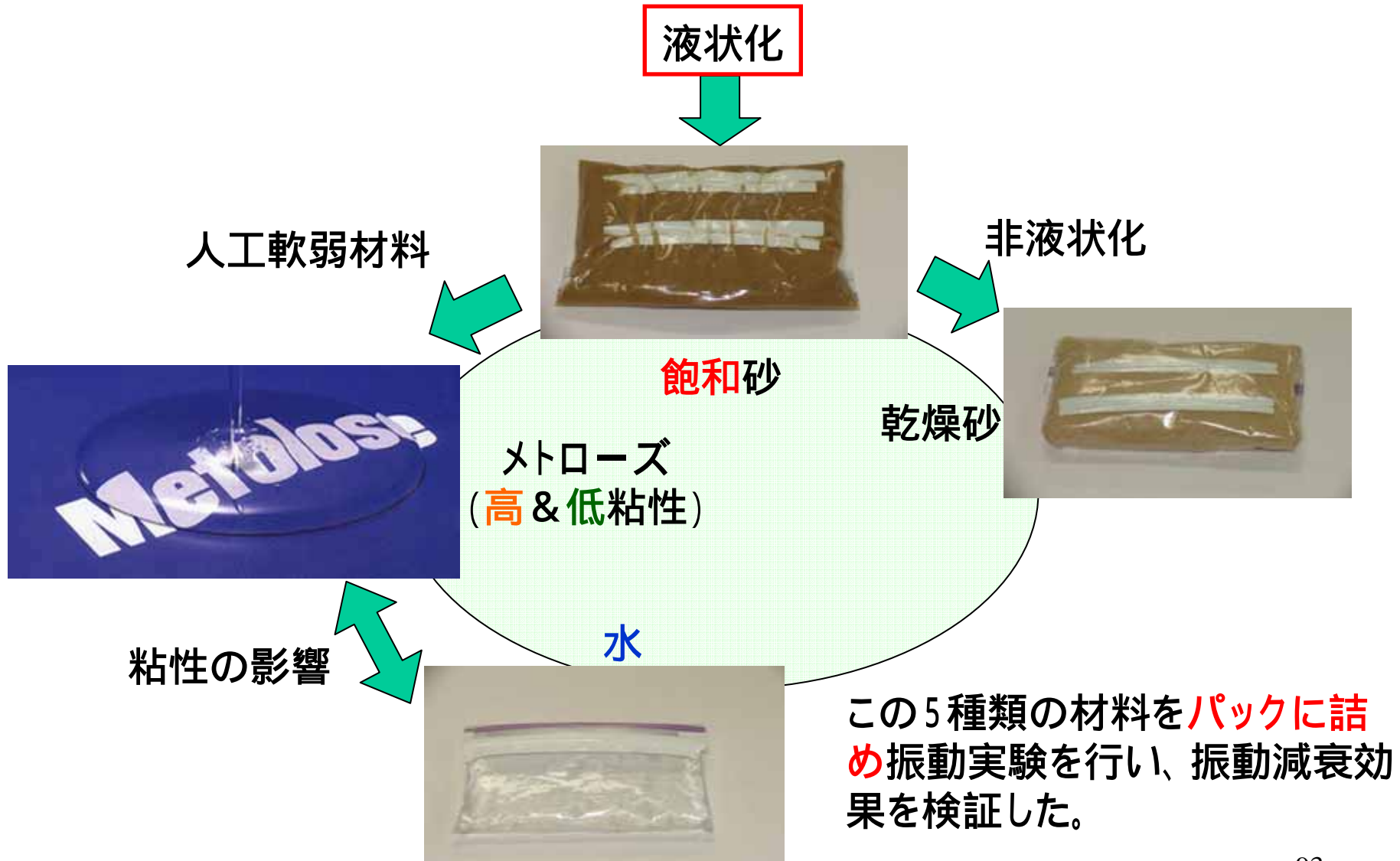


加速度の減少

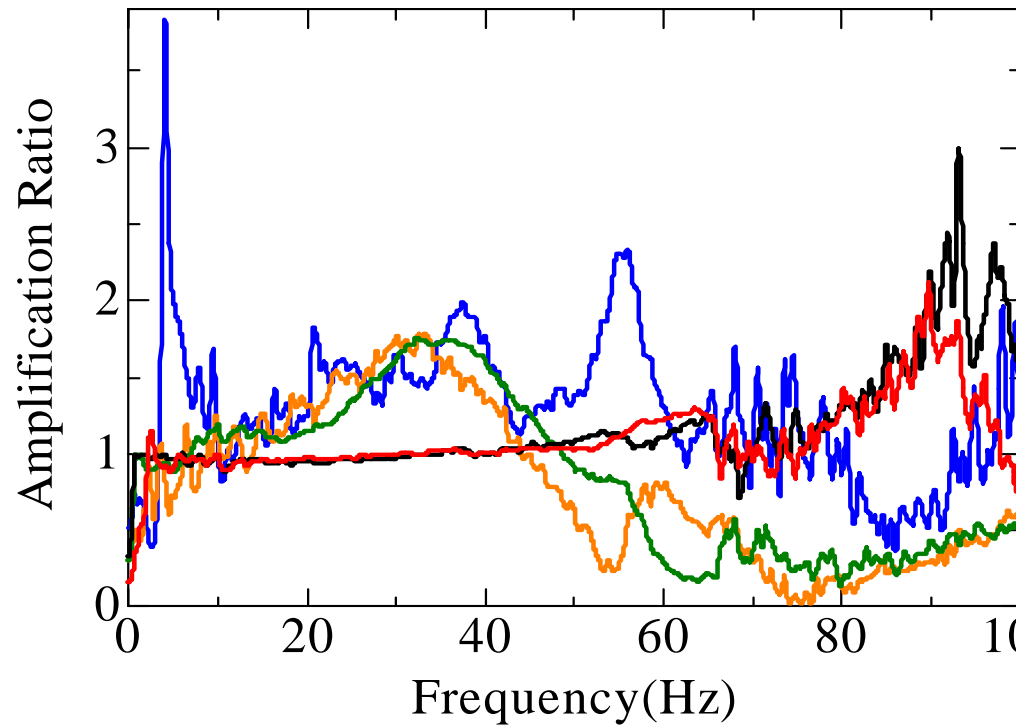
この他にも、液状化による
振動減衰効果の事例は多く
存在する。

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

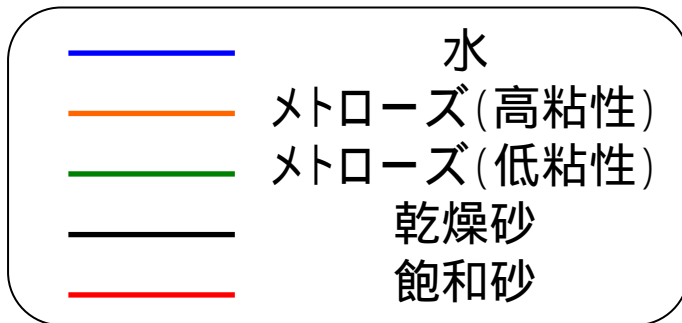
減衰材料の検討



加速度増幅特性：材料での比較



- ・水：増幅
減衰パックの影響
- ・メトローズ：水より減衰
粘性が高いほど効果あり
- ・乾燥砂：高周波数以外は増加なし
低周波数で有効
- ・飽和砂：ピーク値は小
パック内の液状化



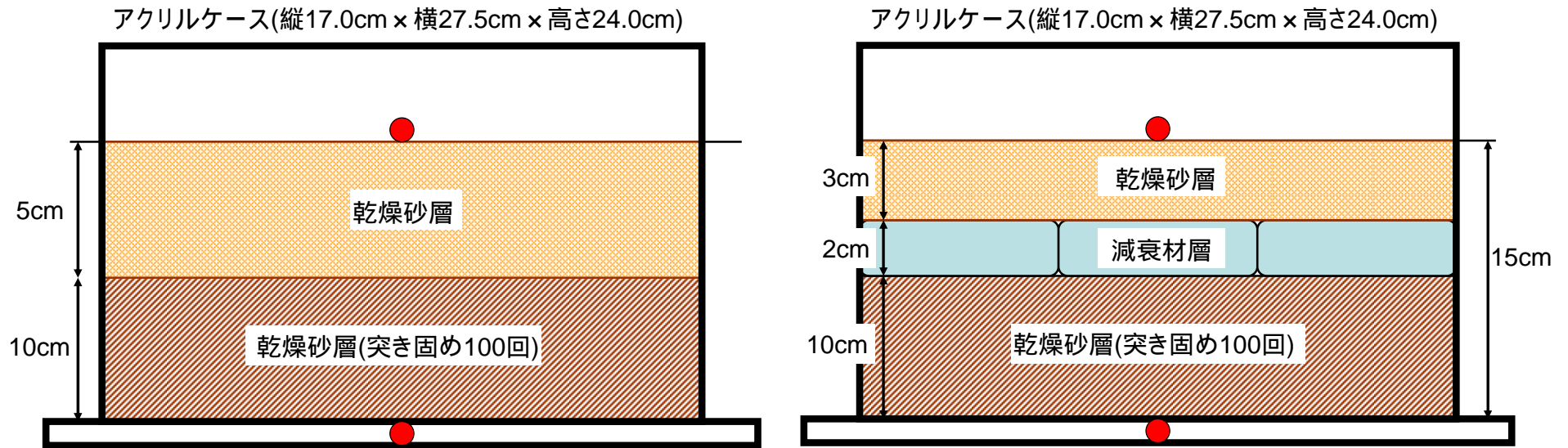
各材料とも、異なる周波数において
震動減衰効果が見られた。



模型地盤詳細

● : 加速度計設置位置

● : 加速度計設置位置



減衰材なし



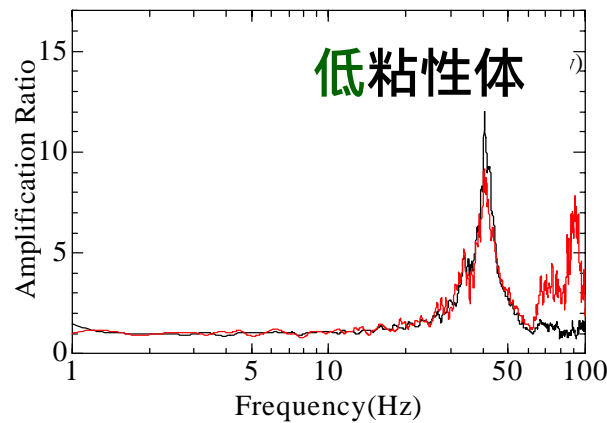
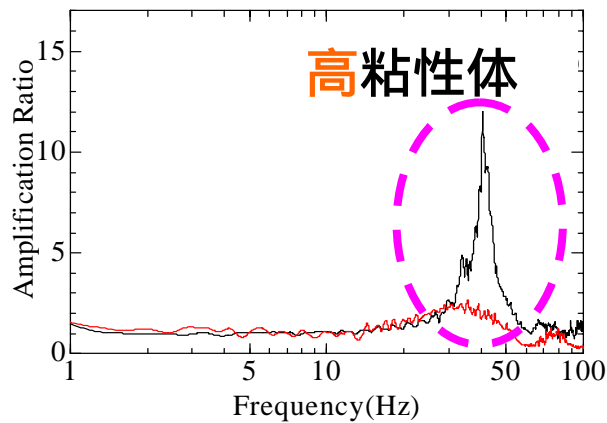
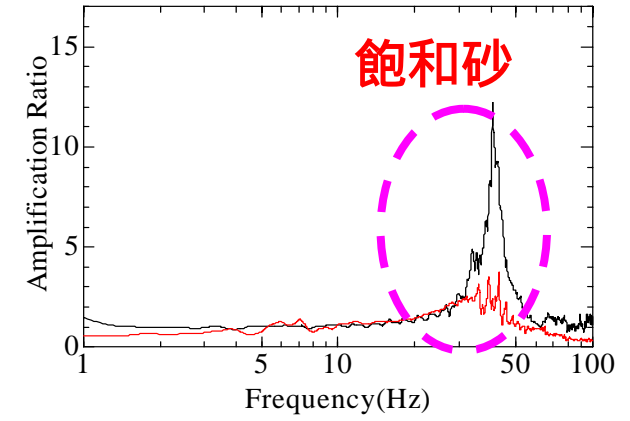
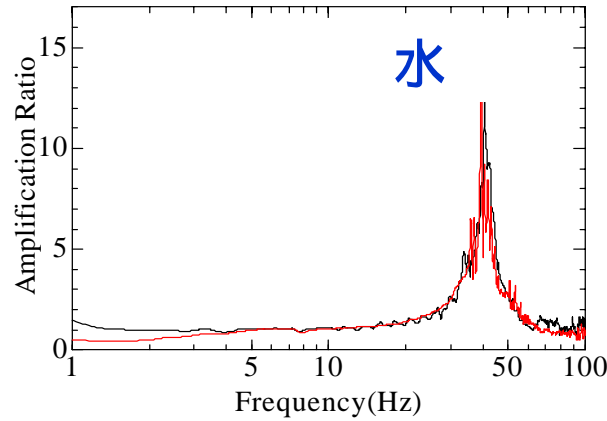
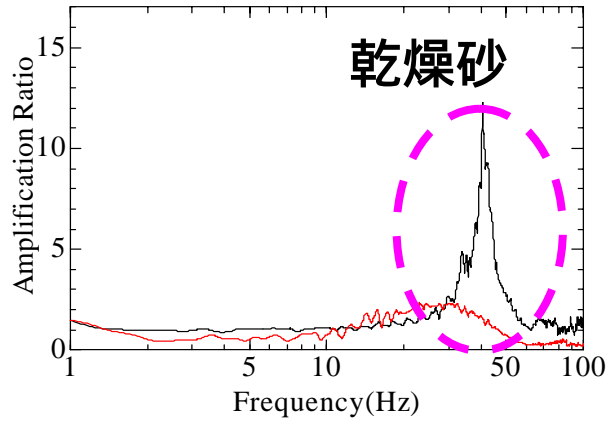
減衰材あり

加速度の増幅率を比較することによって、
減衰材による震動減衰効果を見る



実験結果：応答加速度増幅特性の比較

最大加速度 342(gal)



減衰材なし —
減衰材あり —

特徴 ・高周波数において大幅な減衰 — — —

液状化地盤の地震時土圧

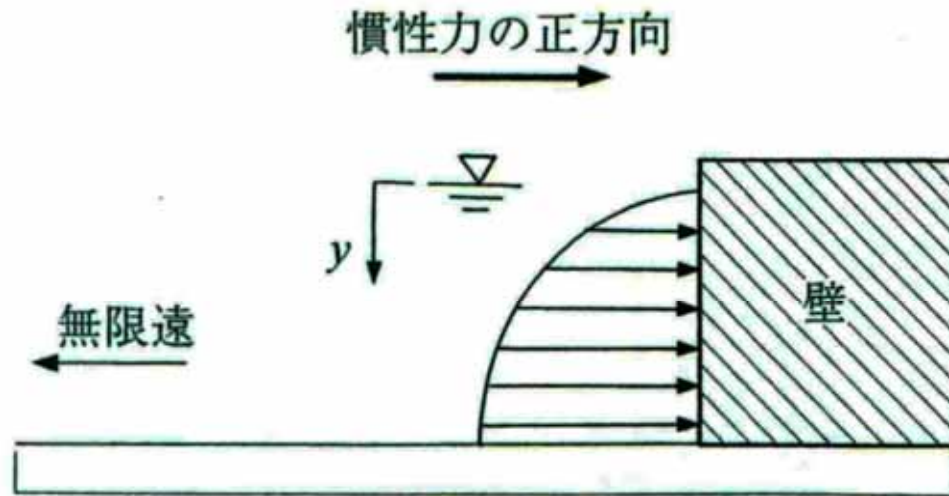


図-5.32 Westergaardの動水圧理論

$$p(y) = \frac{7}{8} K_h \gamma_w \sqrt{hy}$$

地盤・耐震工学入門,
(地盤工学会)

地中の流動力の算定

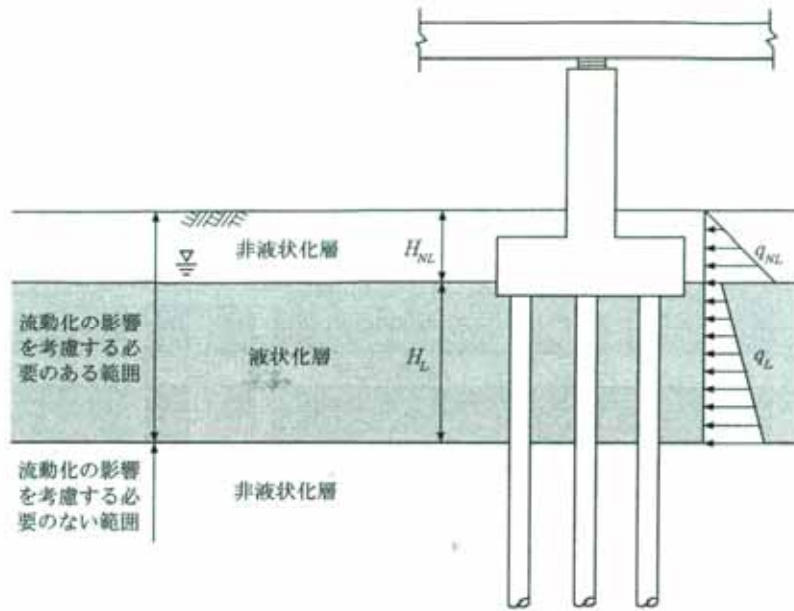


図-8.3.1 流動力の算定モデル

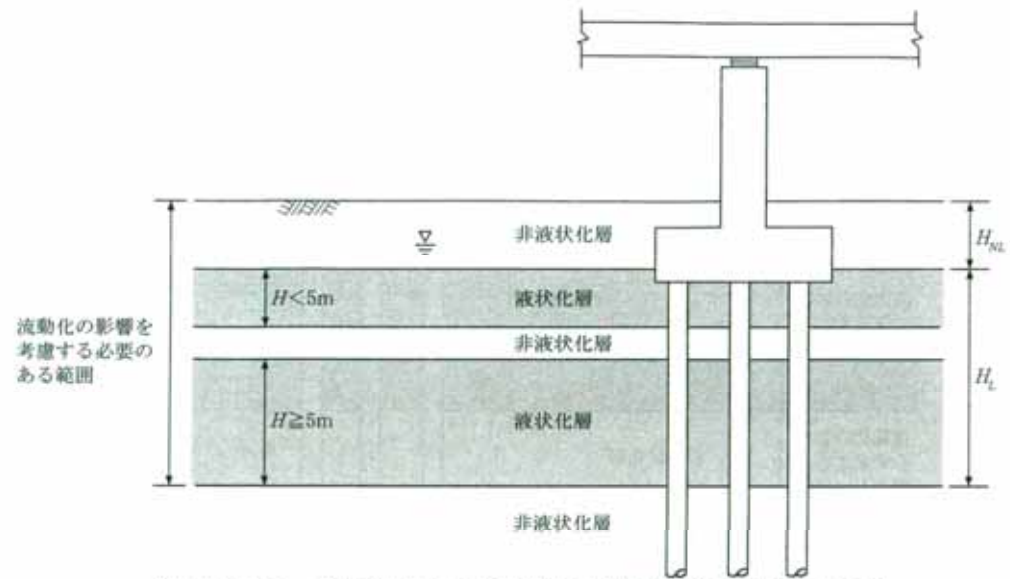


図-解 8.3.2 液化化層と非液化化層が互層状態で存在する場合の流動化の影響を考慮する必要がある範囲の例



5. 地調査結果の考察

(解析パラメータの設定, 地盤の動的特性計測結果の紹介)



設計震度よりも大きな地震に耐えた！

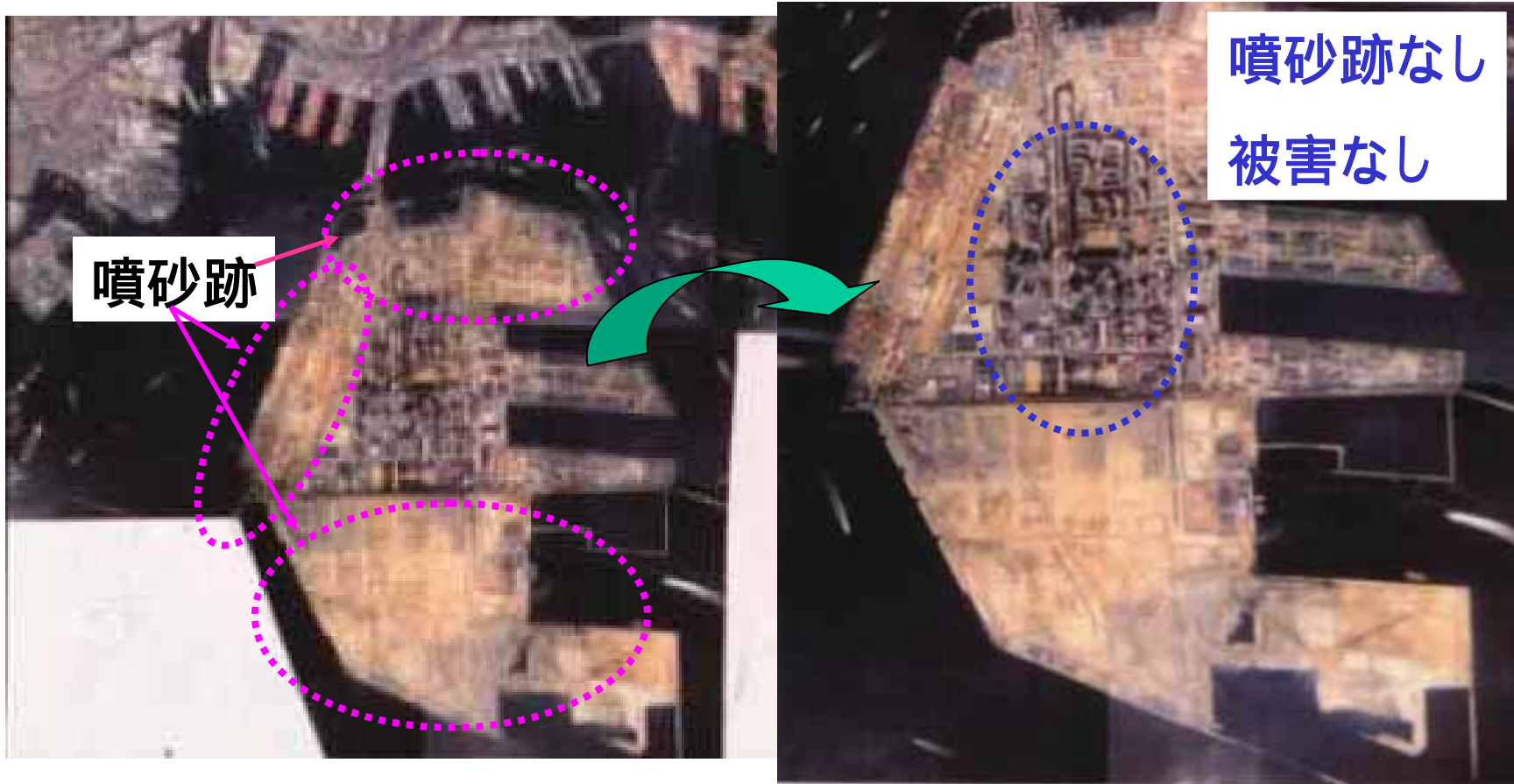


未改良

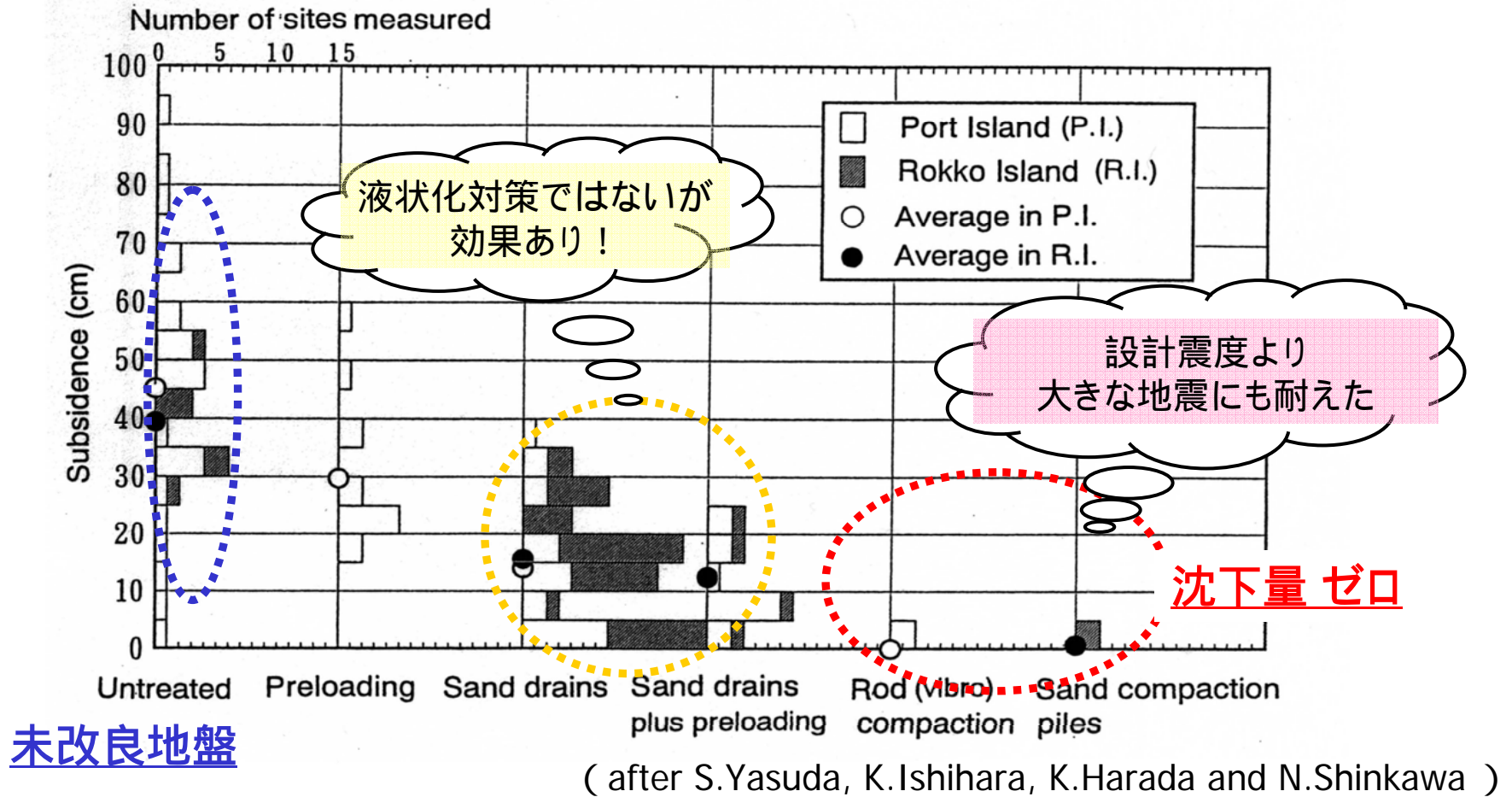


改良

神戸人工島で液状化したところ，しなかったところ

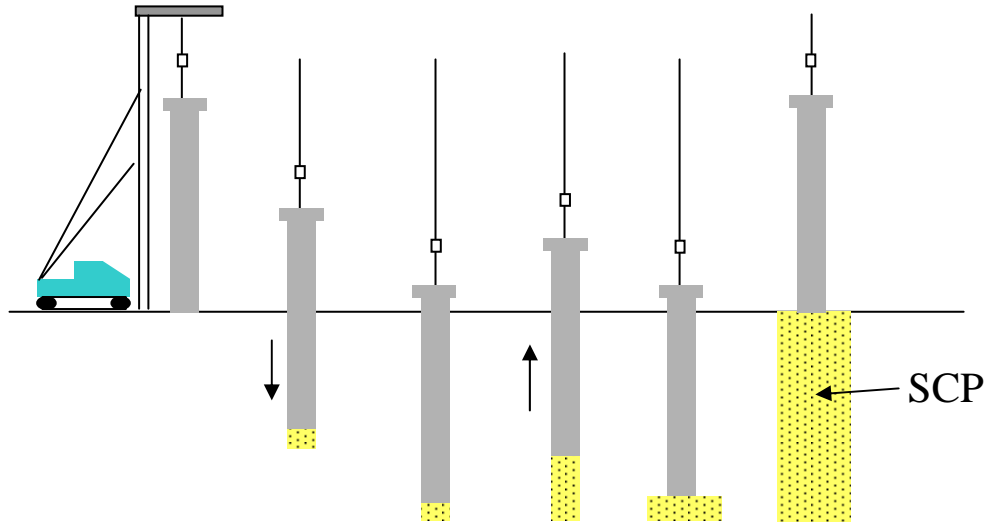


液状化対策地点での地震後の沈下量

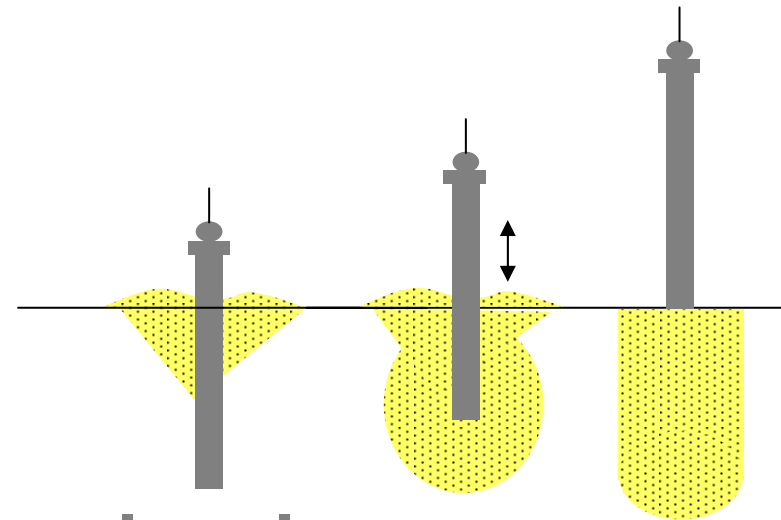


液状化対策工法のいろいろ

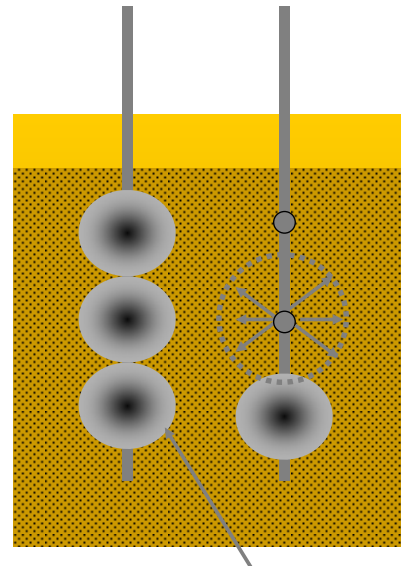
SCP工法: 締固め



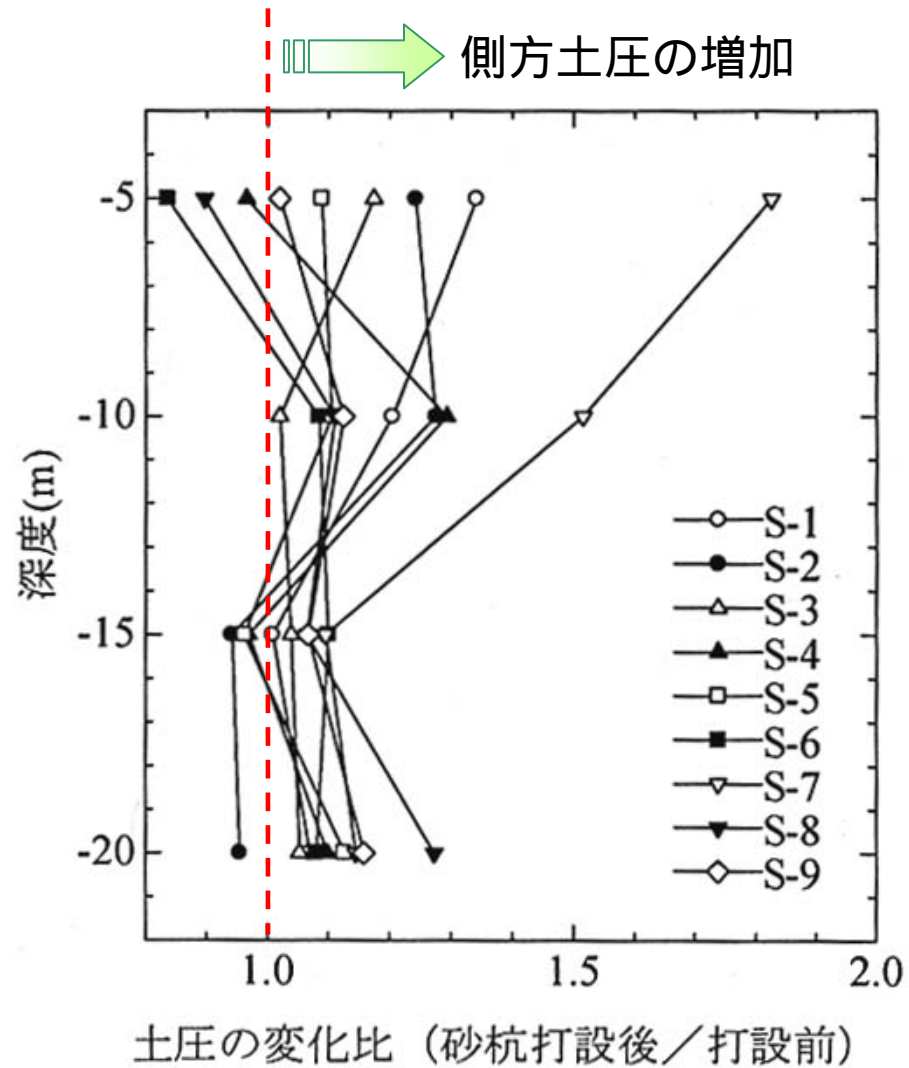
ロッドコンパクション: 締固め



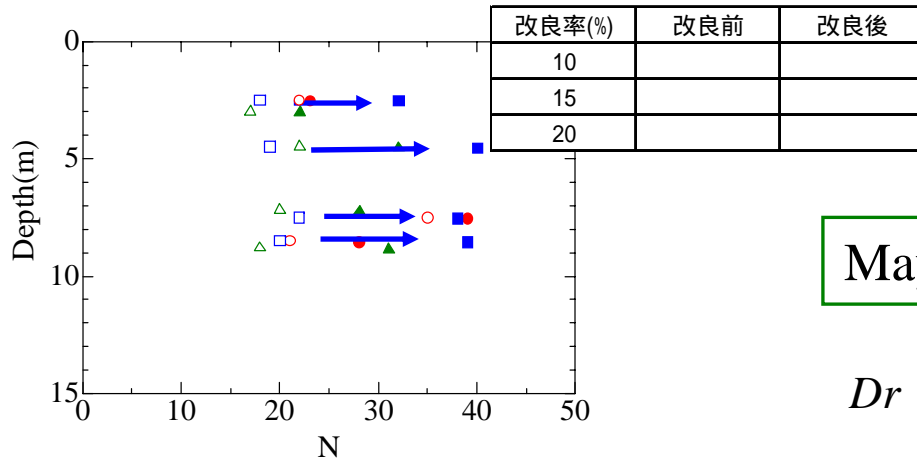
薬液注入, 固化処理



SCP打設に伴う側方土圧の変化



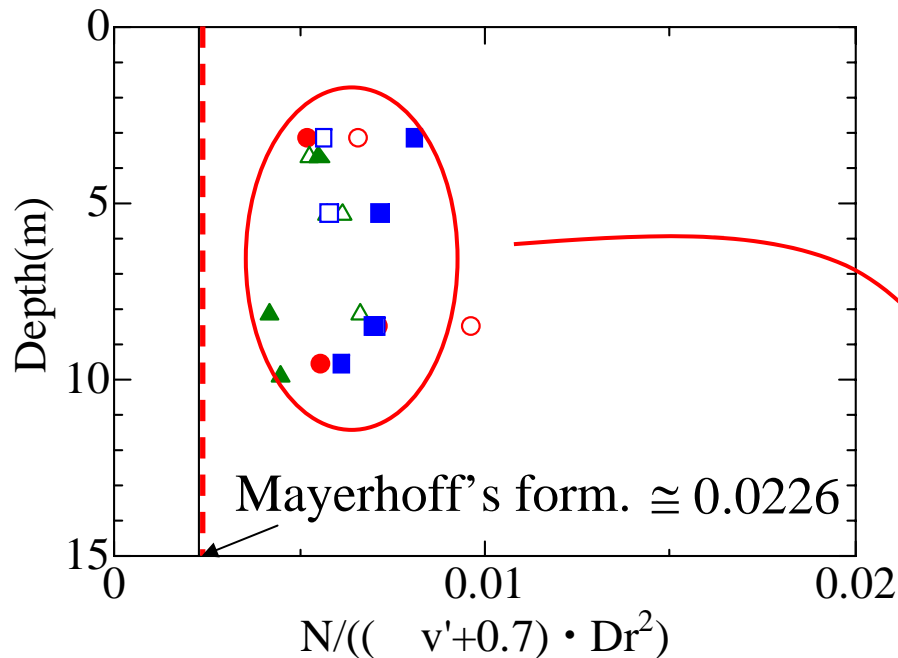
N値と側方土圧の関係 ~ 改良前後のN値とMayerhoff提案式 ~



N値は地盤改良により改良率に比例し増加する

Mayerhoffの提案式で整理

$$Dr = 21 \left(\frac{N}{\sigma_v' + 0.7} \right)^{\frac{1}{2}}$$



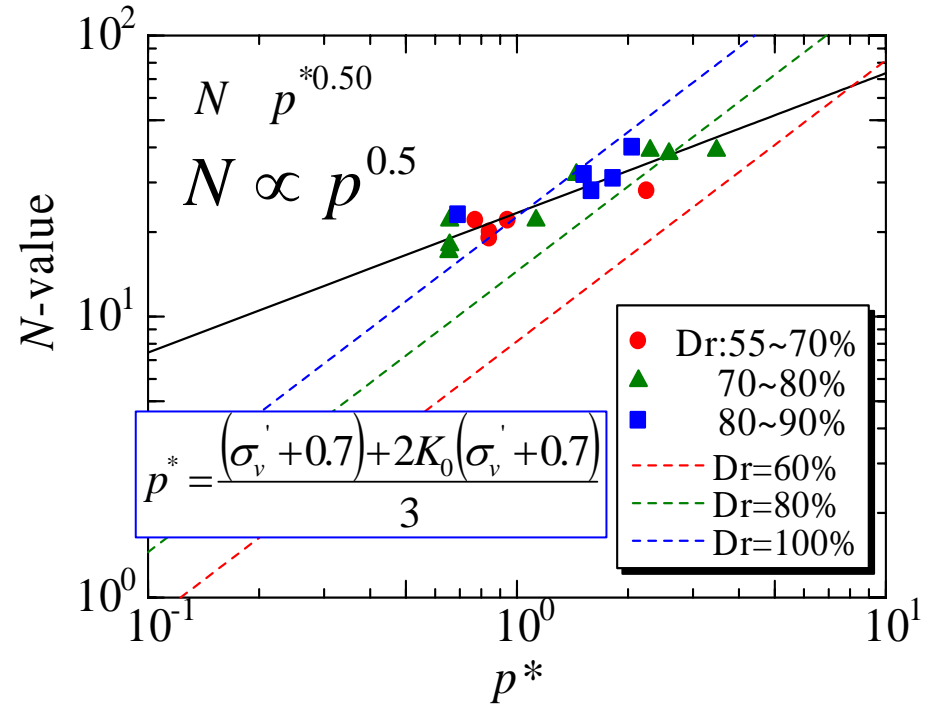
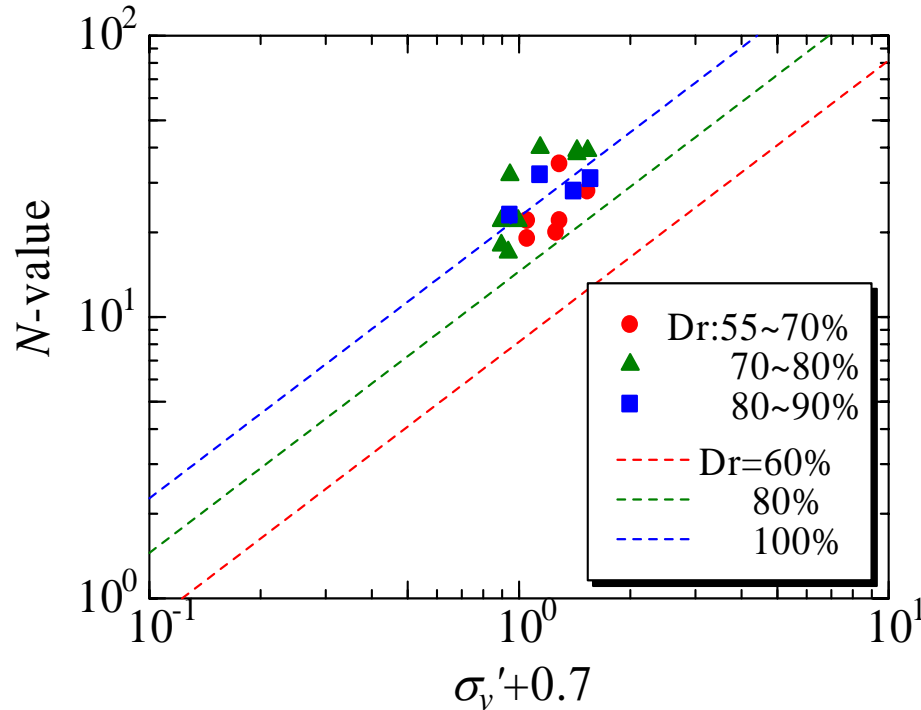
$$N = \frac{(\sigma_v' + 0.7) \cdot D_r^2}{21^2}$$

$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_v' + 0.7 : \text{鉛直土被り圧の関数} \\ D_r : \text{相対密度} \end{array} \right.$

鉛直土被り圧だけでは正規化されていない
側方土圧の影響を考慮する¹⁰⁵

N値と側方土圧の関係 ~ N値と平均応力の関係 ~

情報提供: 株式会社不動テトラ様



経験式 $\longrightarrow V_s \propto N^{\frac{1}{3}}$
 弾性論 $\longrightarrow G \propto V_s^2$
 実験式 $\longrightarrow G \propto p^{\frac{1}{3} - \frac{1}{2}}$

} $N \propto p^{0.50 - 0.75}$

N値には鉛直土被り圧だけでなく側方土圧の影響も含まれている

目標N値を下げる or 改良後の液状化強度を高く評価できる

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

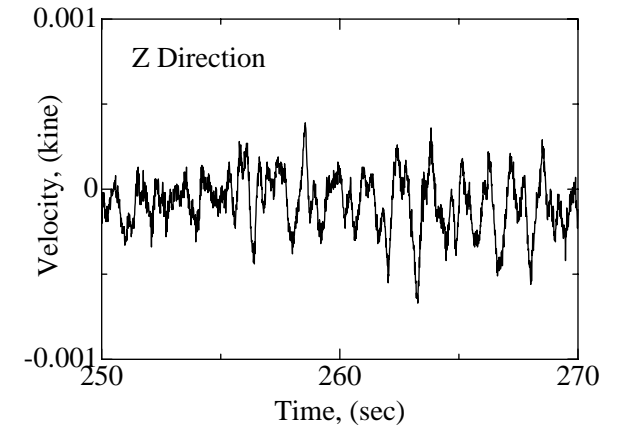
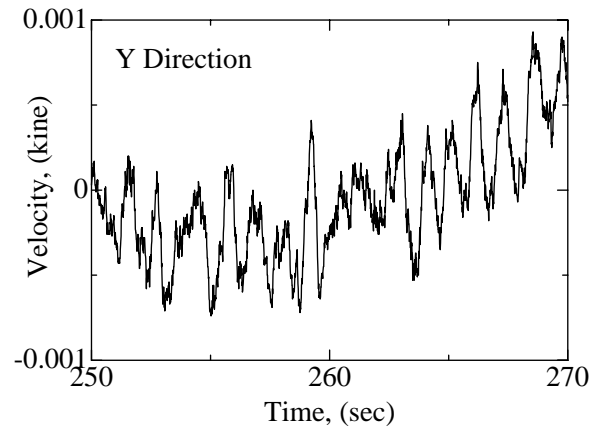
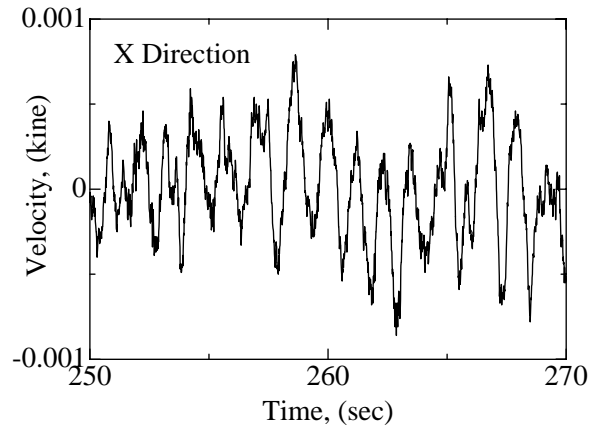
- ・ 港 1箇所
- ・ 空港 1箇所
- ・ 護岸 3箇所



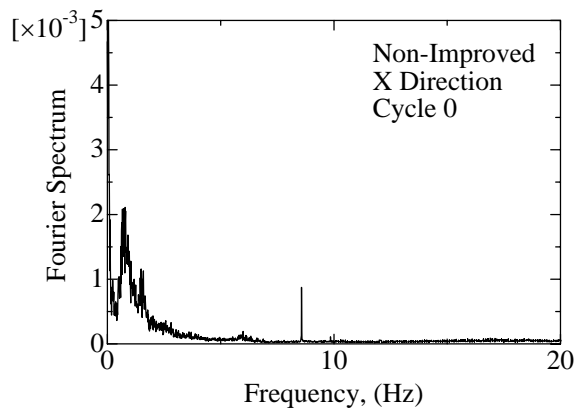


微動計計測結果の整理

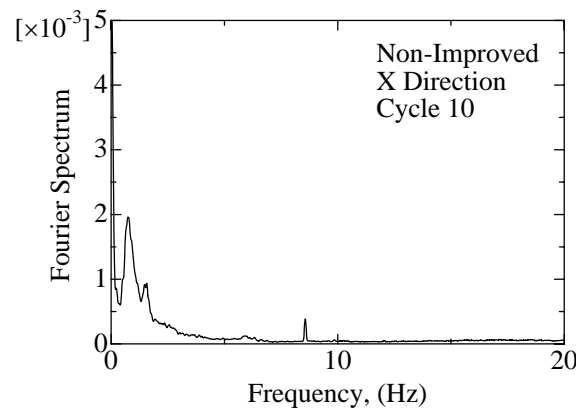
時刻暦



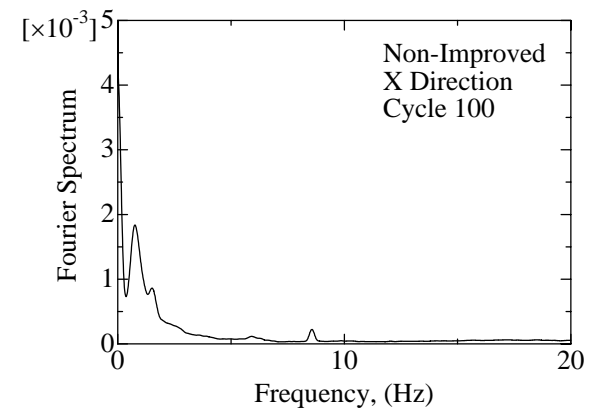
スペクトルと平滑化



フーリエ変換より求められた
フーリエスペクトル



10サイクルのHanning
ウィンドウを適用

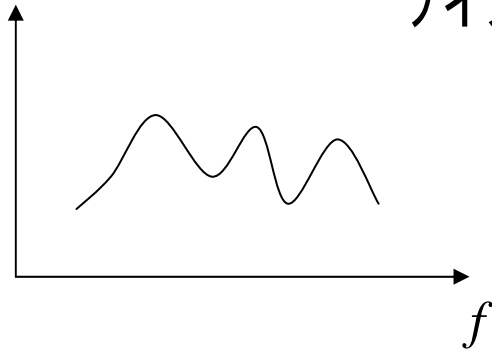


100サイクルのHanning
ウィンドウを適用

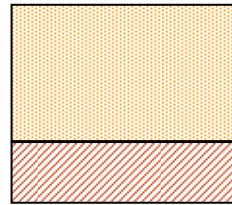


伝達関数

スペクトルH

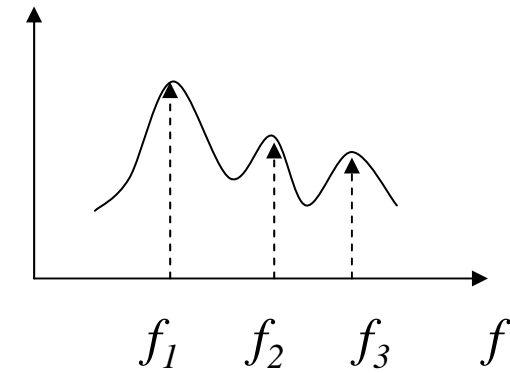


ノイズ



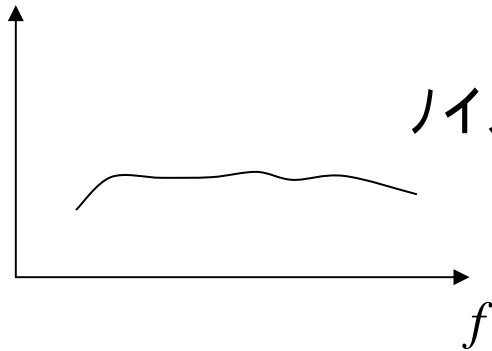
スペクトル比

H/V



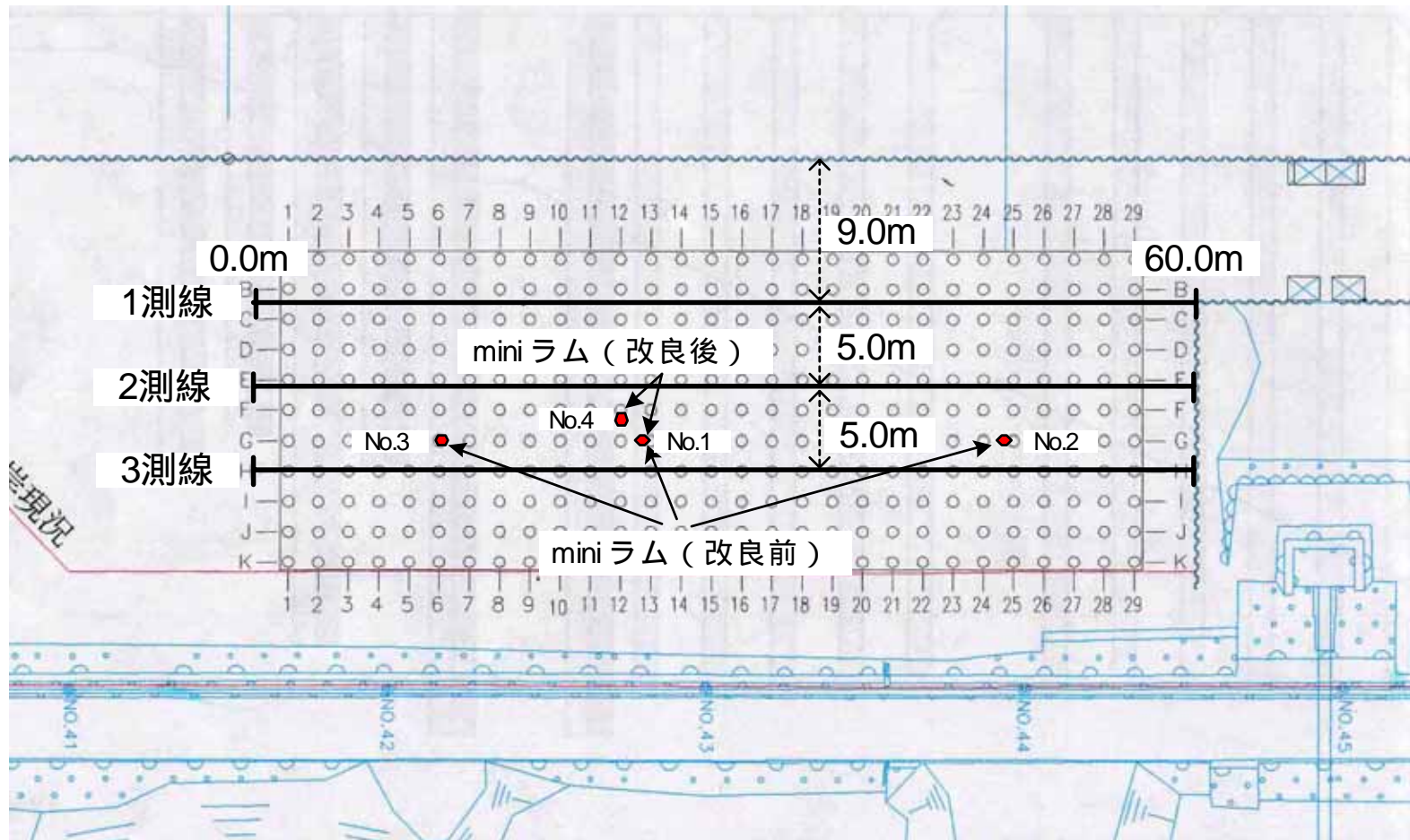
ノイズ

スペクトルV



対象地盤の波の
伝達特性

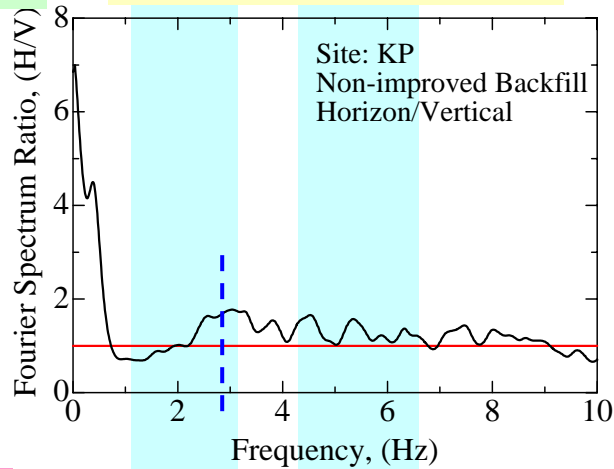
鵜工区 表面波探査 測線配置図



実際の地盤でえられたスペクトル： 地盤改良(1)

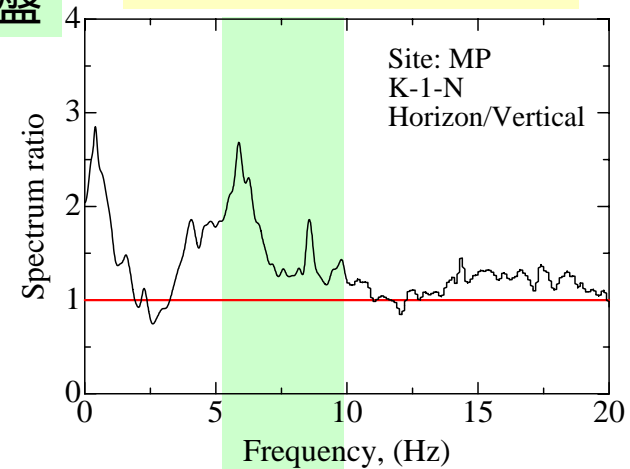
未改良地盤

水平方向と鉛直方向の
パワースペクトル比

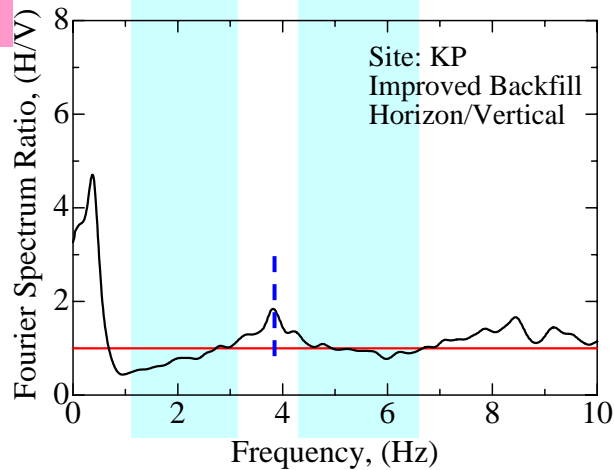


未改良地盤

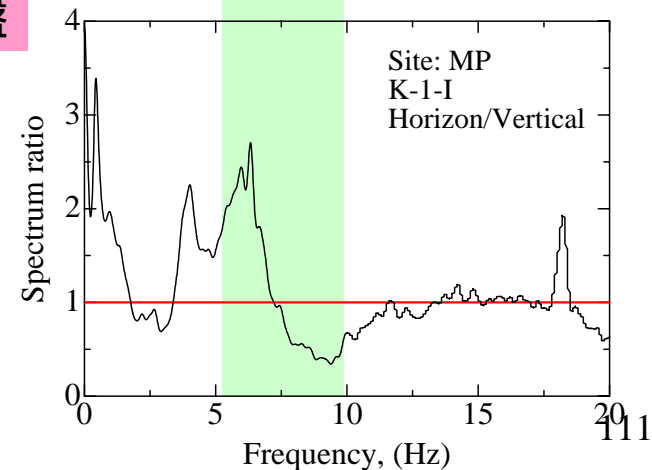
水平方向と鉛直方向の
パワースペクトル比



改良地盤

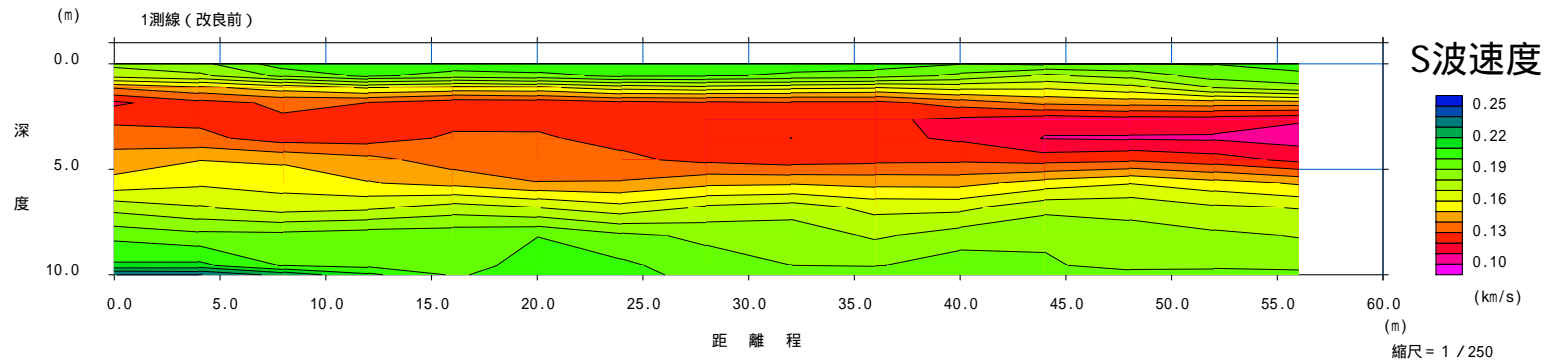


改良地盤

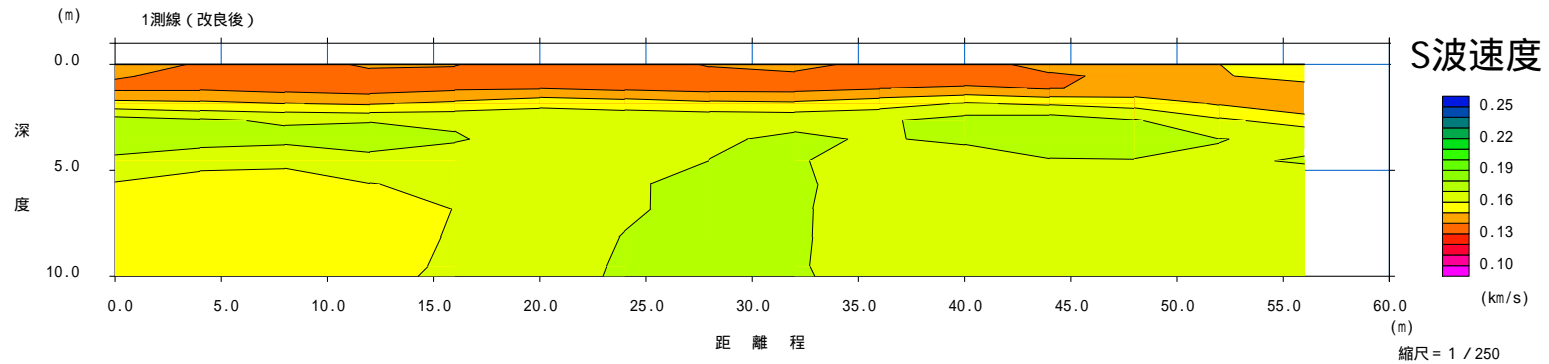


表面波探查解析結果 (S波速度構造)

改良前

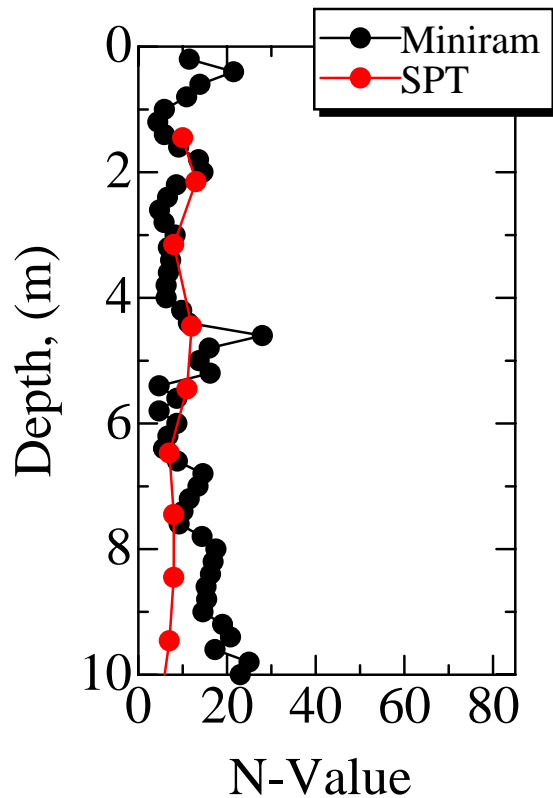


改良後

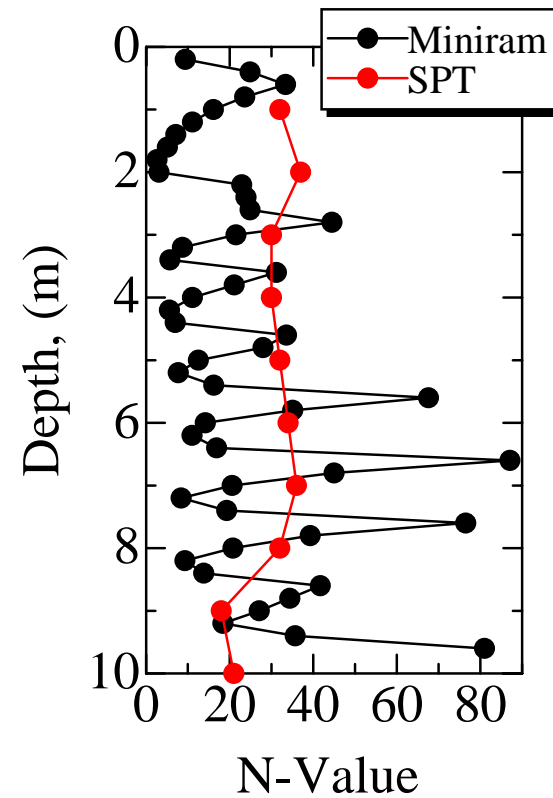


ミニラム試験とSPTとの比較

未改良



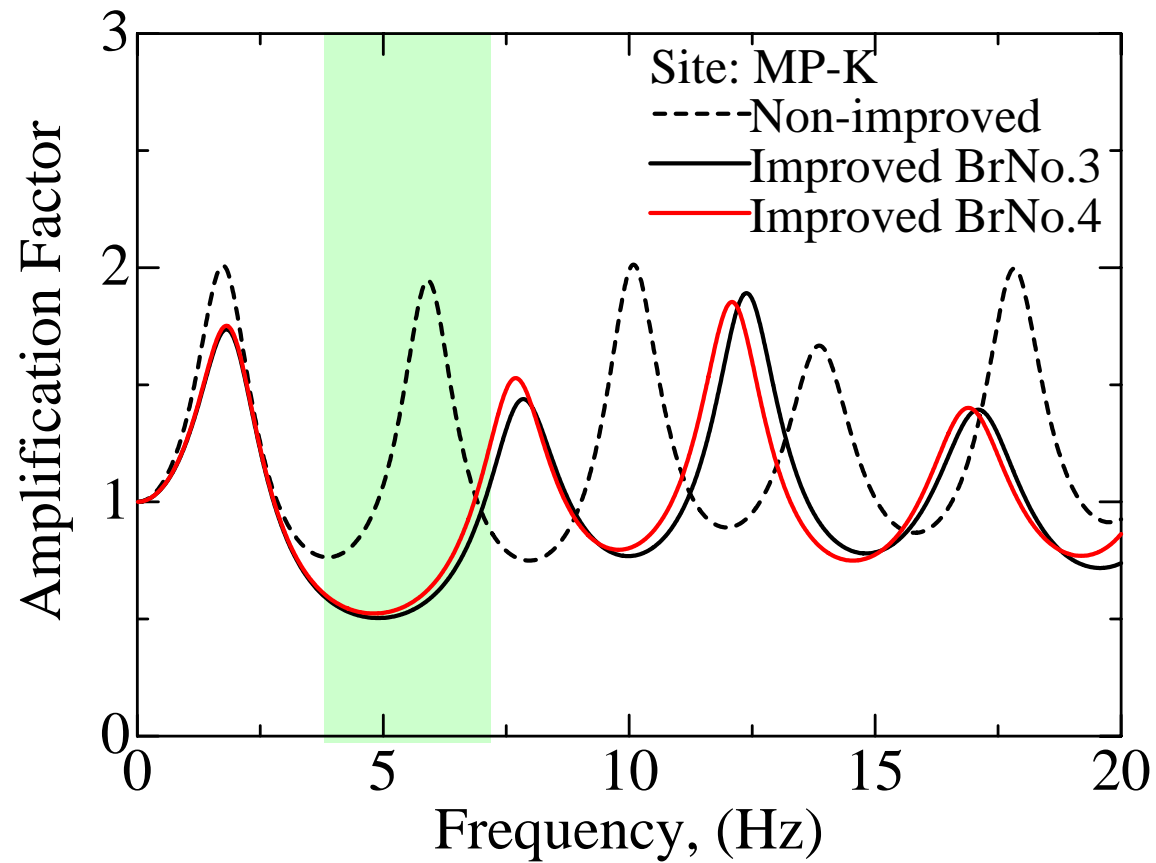
改良後 (SCPの間)



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!!¹¹³

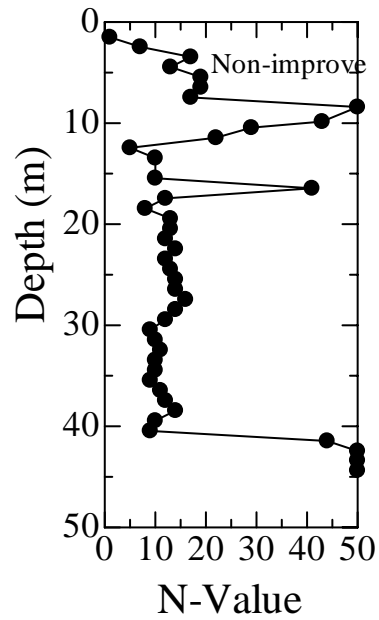


重複反射理論による解析結果(1)

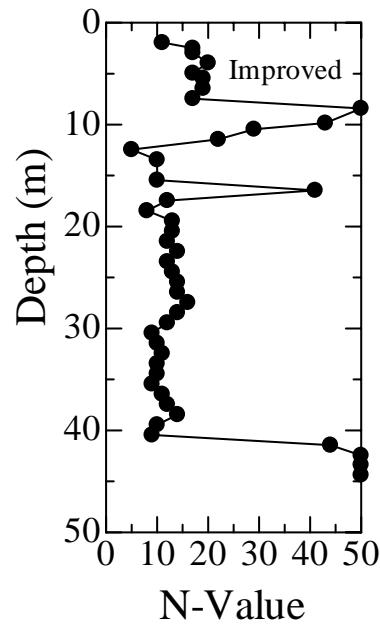


実際の地盤でえられたスペクトル：地盤改良(2)

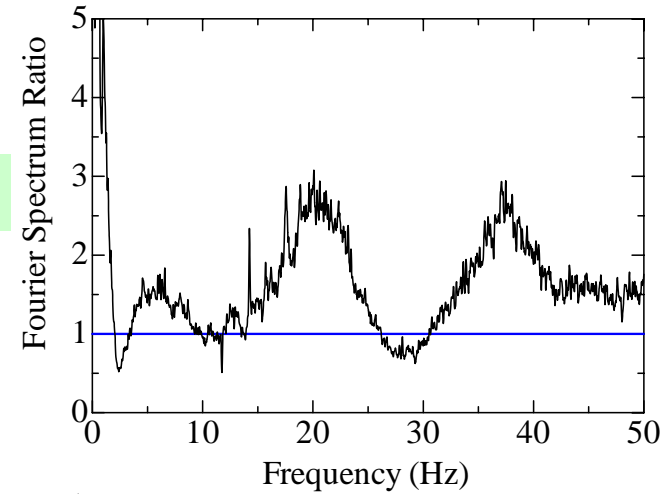
未改良地盤



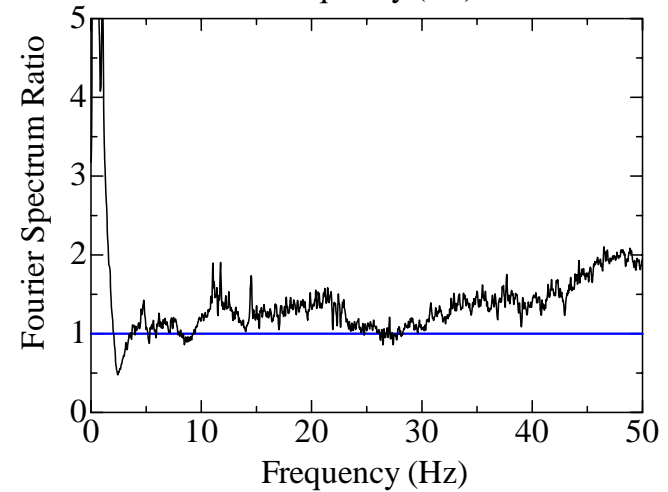
改良地盤



未改良地盤

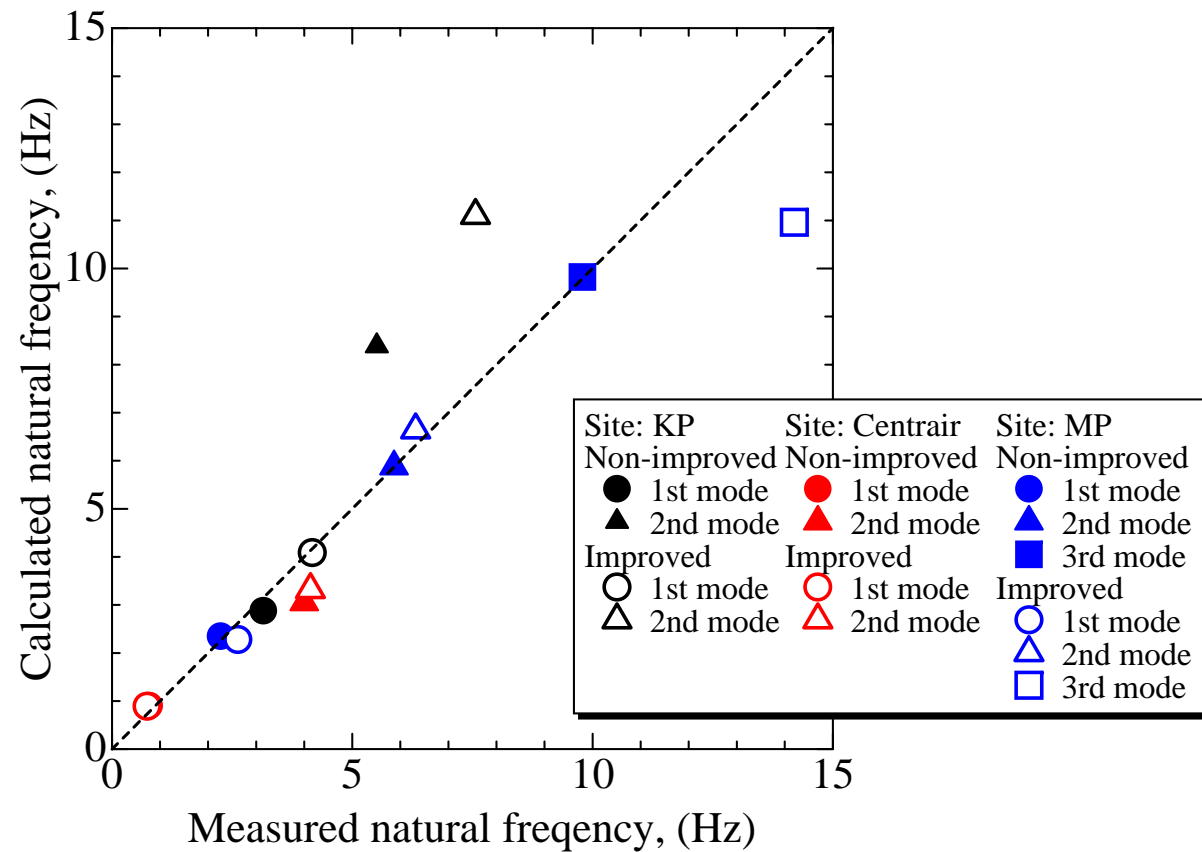


改良地盤

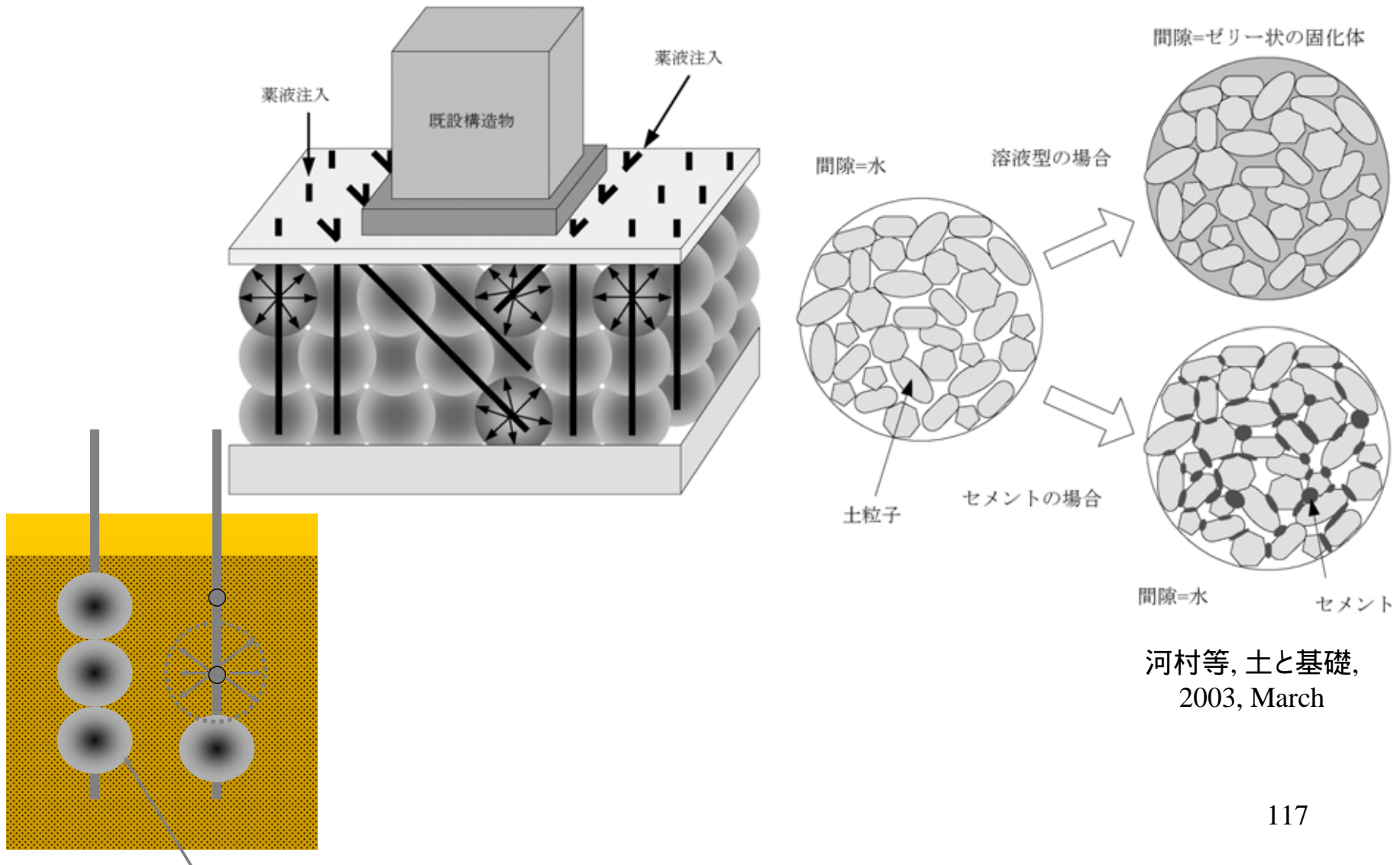




計算値と実測値における固有振動数の比較

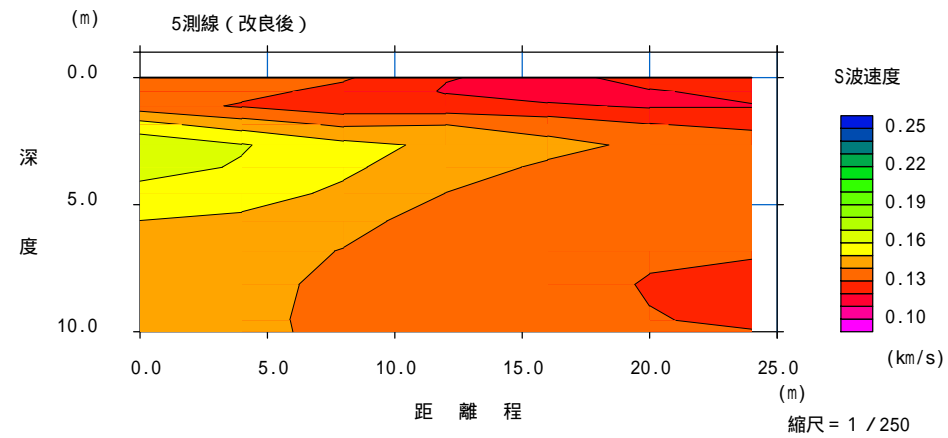
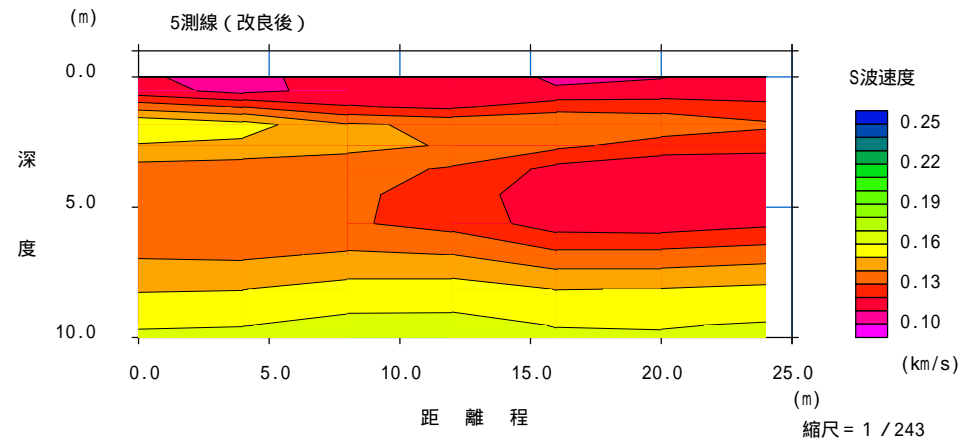


薬液注入：既存構造物

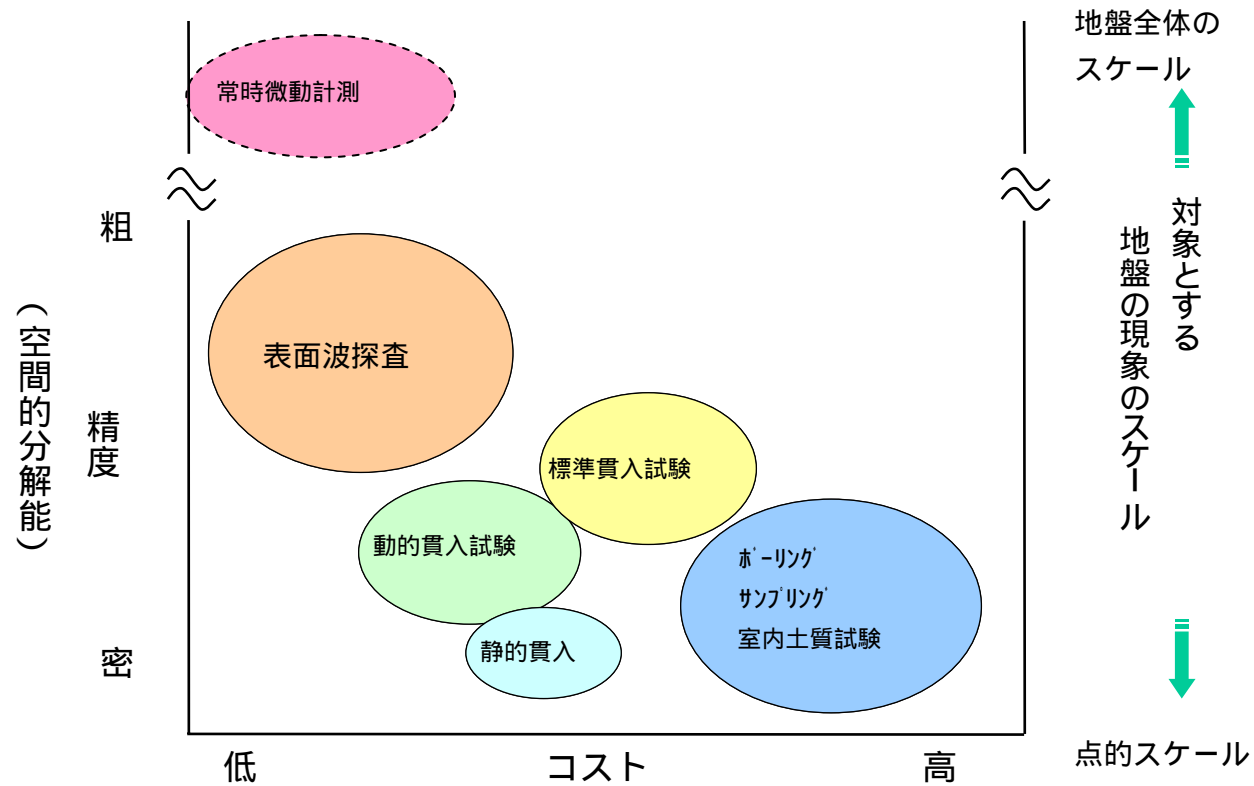


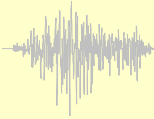


表面波計測：溶液型



地盤調査の分解能とコスト

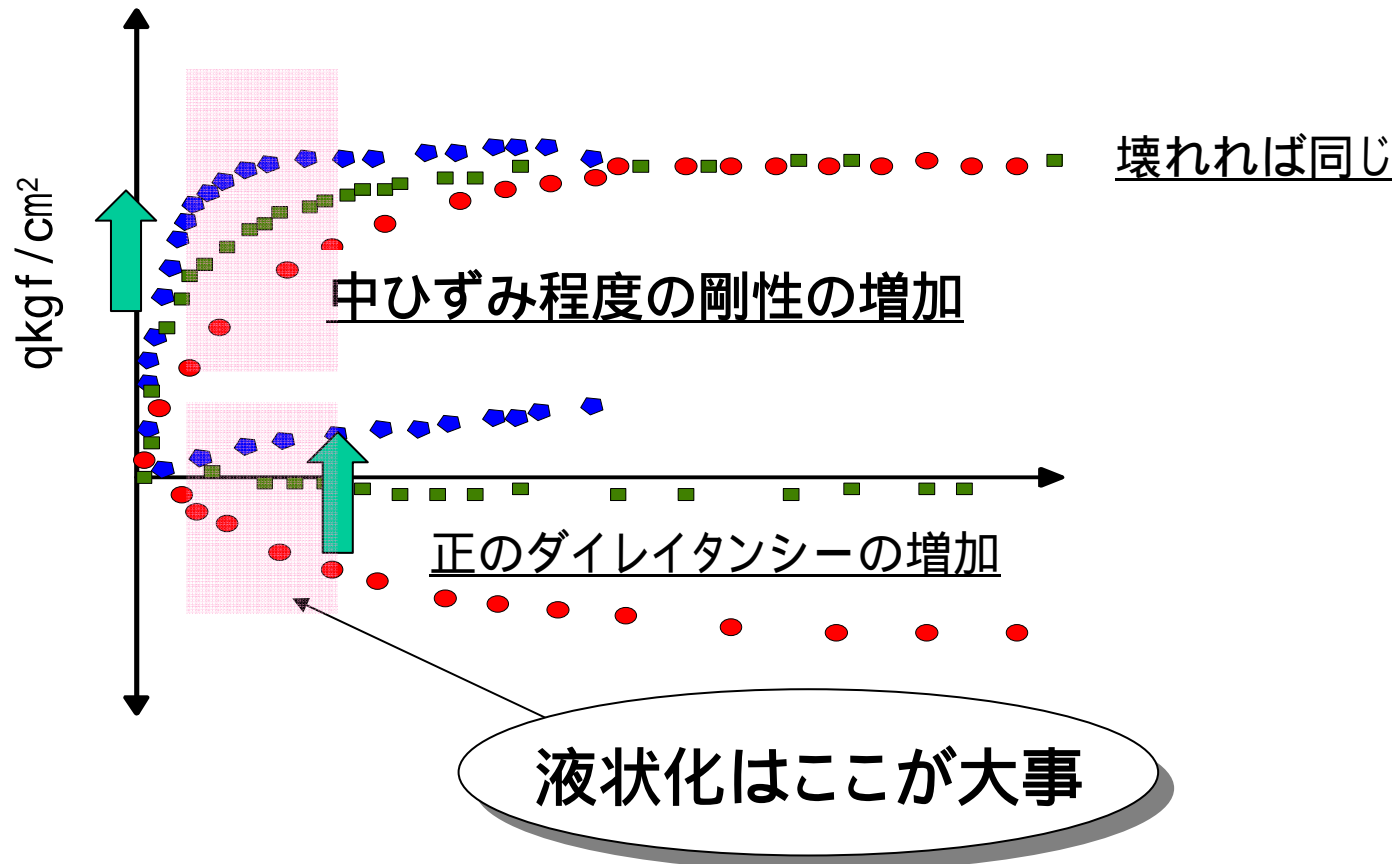




プレローディング工法（過圧密効果）

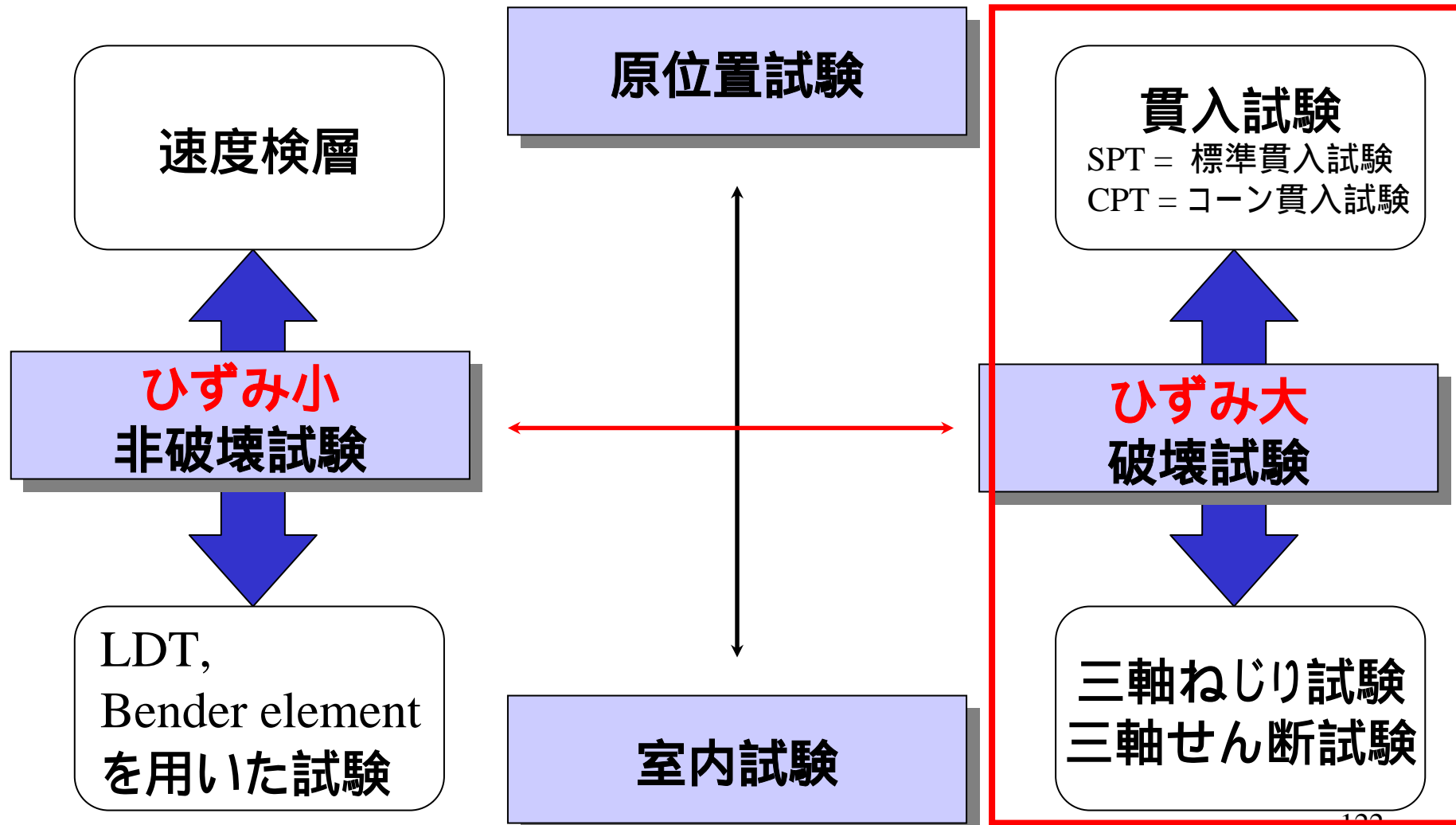
「標準貫入試験 (SPT) では
効果がわからなかった？」

プレロードによる過圧密履歴



- 標準貫入試験(SPT) 過圧密履歴の感度？
- サンプリングして(たくさんのお金をかけて)調べたら、OK！
- 静的コーン貫入試験(CPT) 過圧密履歴の感度

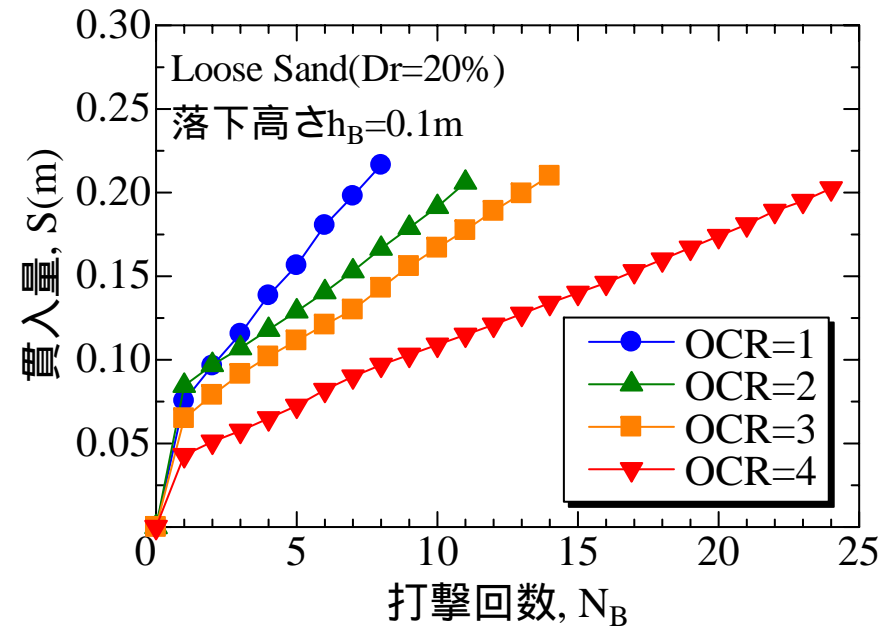
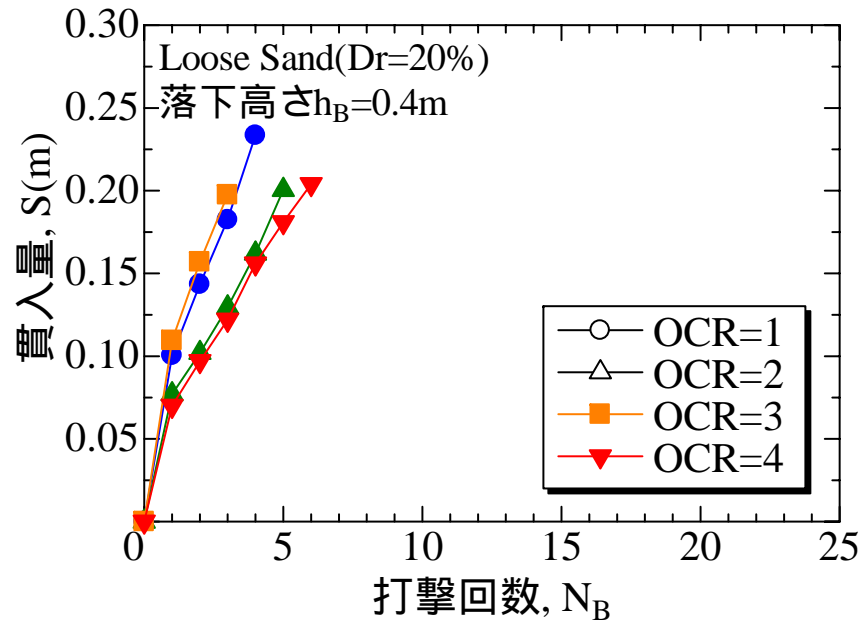
地盤調査



動的貫入試験機



動的エネルギー (落下高さ) の影響

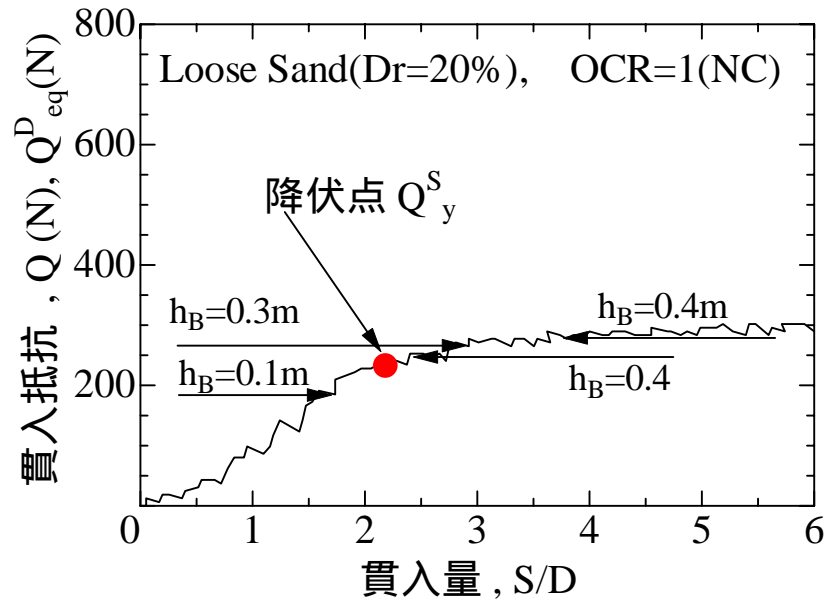


エネルギー大 (落下高さ: 高い)

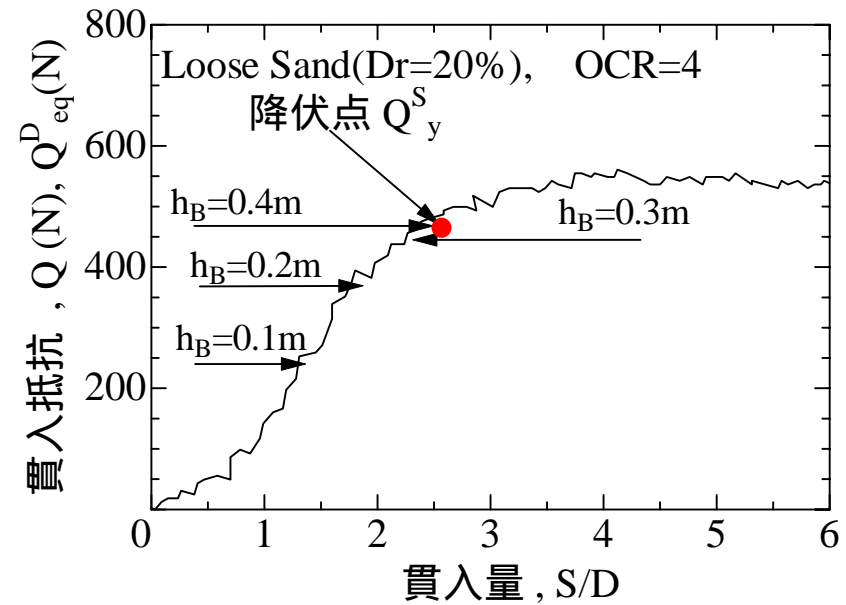
エネルギー小 (落下高さ: 低い)

過圧密 (視たいもの) の特性にあったエネルギー
レベルでみる (途中の過程 静的)

動的エネルギーと静的降伏値との関係



正規圧密 (OCR=1)



過圧密 (OCR = 4)



最後に！

地震がないのに地震防災の研究・仕事 in イギリス



イギリスにたった一つの6自由度振動台 設計コードも発信



交通振動もやった方がいい！