

地盤変形と慣性力の影響を同時に受ける
杭基礎の損傷低減のための
最適プロポーション選定法

埼玉大学 建設工学科 齊藤 正人

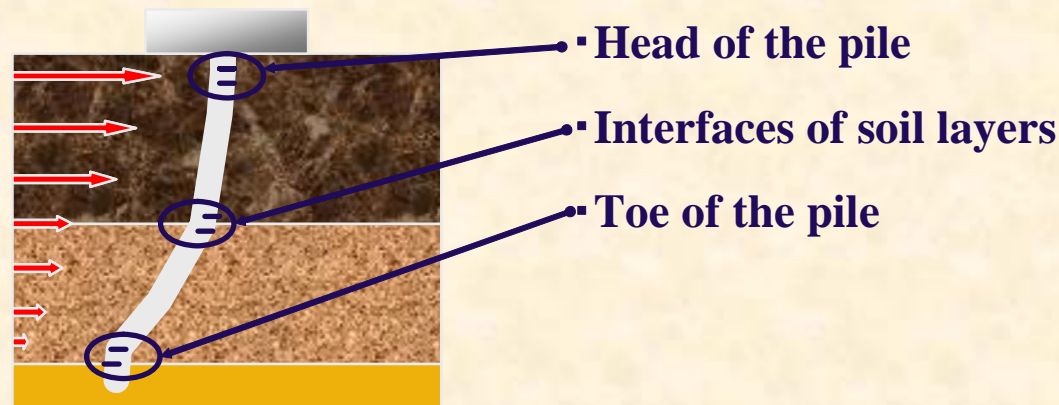
1. 地盤変形が杭基礎構造物に及ぼす影響

(ここでの主な内容)

- 地盤変形による杭基礎の地震被害
- 地盤と杭の動的相互作用について
- 杭基礎の最適プロポーション(最適杭径)選定の意義

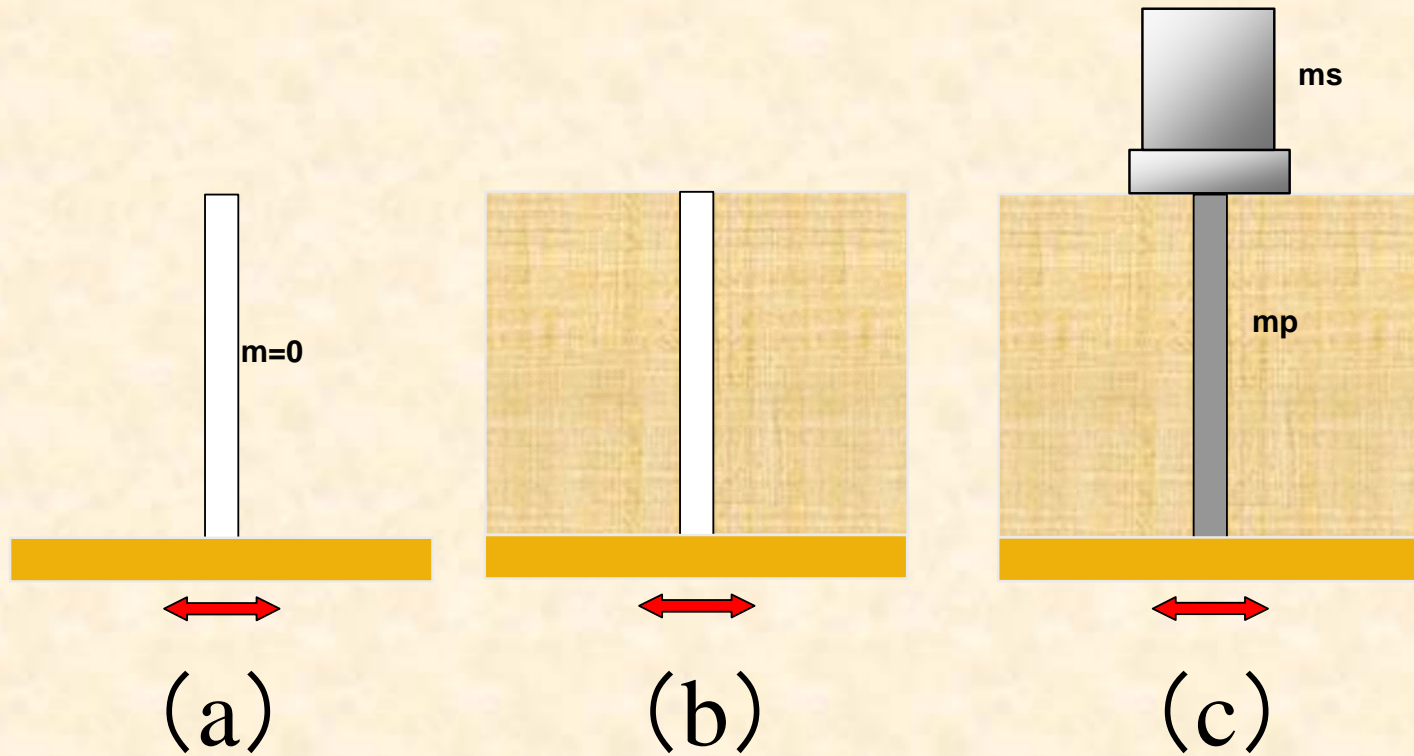
地盤変形による杭基礎の地震被害

- ・「地盤変形を受ける一様地盤の杭の損傷は、杭頭近傍で増加する。また、硬軟2層地盤ではその層境界で増加する。(Nikolaou 1997)」
- ・「杭先端支持層境界部に生じる曲げひずみは、圧倒的に地盤変形に支配されている(大平, 田蔵他1985)」



(Mylonakis et al 1997, Nikolaou et al 2001,
Ohira and Tazoh et al 1985)

地盤と杭の動的相互作用について



杭基礎の最適プロポーション(最適杭径)選定の意義

地盤変形を受ける杭の損傷を抑制するためには、杭径を大きくするべきか、小さくするべきか？

or

(発展問題として)大口径杭を少ない本数で使用すべきか？小口径杭を多数で使用すべきか？

最適な杭径の存在,あるいは不適な杭径の存在



これまで、上記疑問に対する物理的な解釈はなされていない。



本講演では、著者による近年の研究から、その特性を解説する。

2. 最適プロポーションの基本的な性質

(ここでの主な内容)

- ・慣性力のみを受ける杭との根本的な相違点
- ・杭の被害を最小にする最適杭径とは
- ・最適杭径に影響を及ぼす主要因とその性質

慣性力のみを受ける杭との根本的な相違点

3次元弾性波動論に基づく田治見の理論解

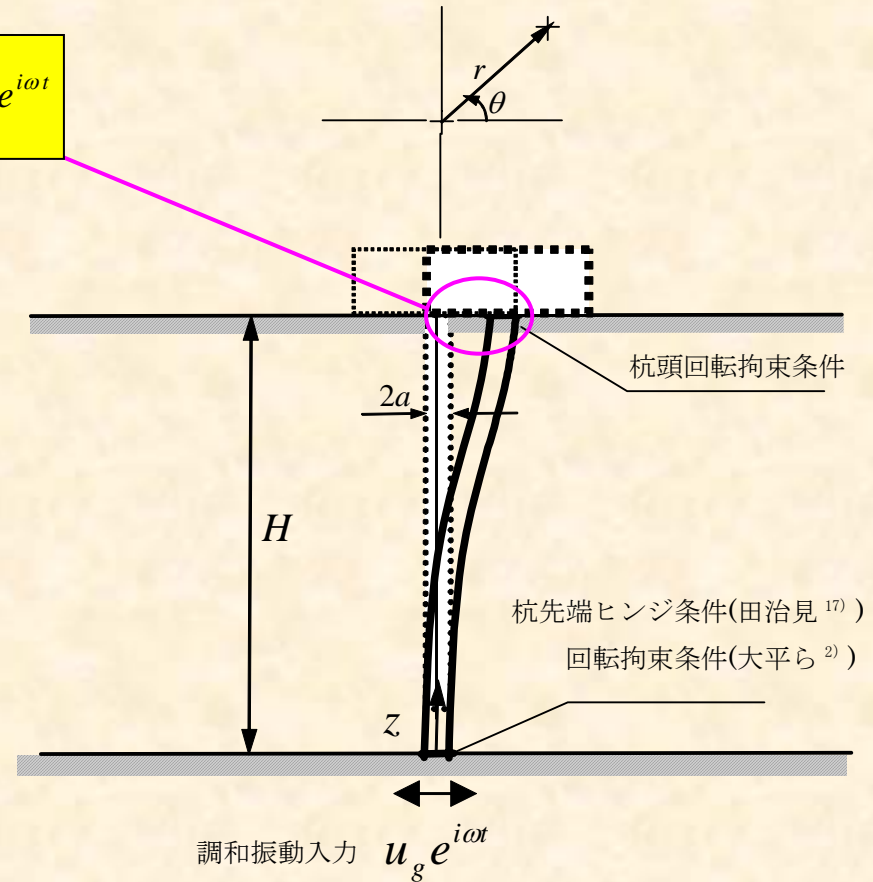
$$\tilde{\varepsilon}_p = \varepsilon_p \Big|_{\omega=\omega_g, z=H} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{a}{n^4 / (\alpha'_2 \tilde{\Omega}_n) + \tilde{\xi}_n^2} \left(\frac{n\pi}{H^2} \right) (-1)^{\frac{n-1}{2}} u_g e^{i\omega t}$$

$$\alpha'_2 = \alpha_2 = \frac{\chi}{2(1+\nu)} \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 \left(\frac{H}{a} \right)^2 \left(\frac{E_s}{E_p} \right)$$

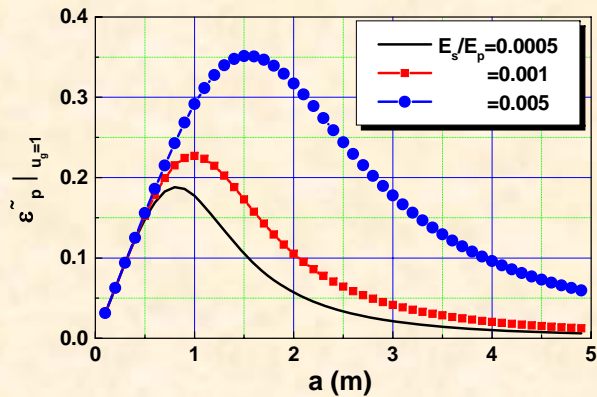
$$\tilde{\xi}_n = \sqrt{n^2(1+i2h_g) - 1}$$

$$\Omega_n = \frac{K_1(x_a) + K_1(y_a) \frac{2K_1(x_a) + x_a K_0(x_a)}{2K_1(y_a) + y_a K_0(y_a)}}{x_a K_0(x_a) + K_1(x_a) - K_1(y_a) \frac{2K_1(x_a) + x_a K_0(x_a)}{2K_1(y_a) + y_a K_0(y_a)}}$$

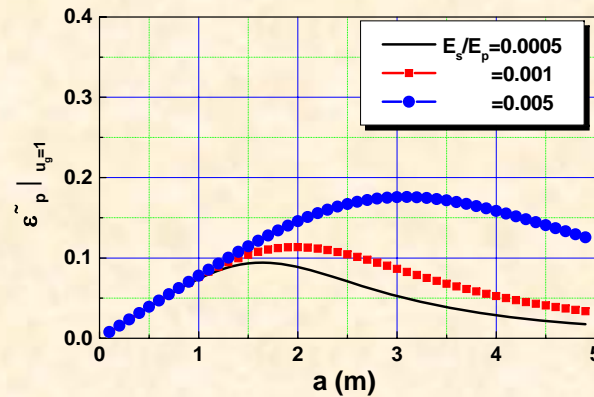
$$x_a = \frac{\omega_g \tilde{\xi}_n a}{\sqrt{1+i2h_g} V_p}, \quad y_a = \frac{\omega_g \tilde{\xi}_n a}{\sqrt{1+i2h_g} V_s}$$



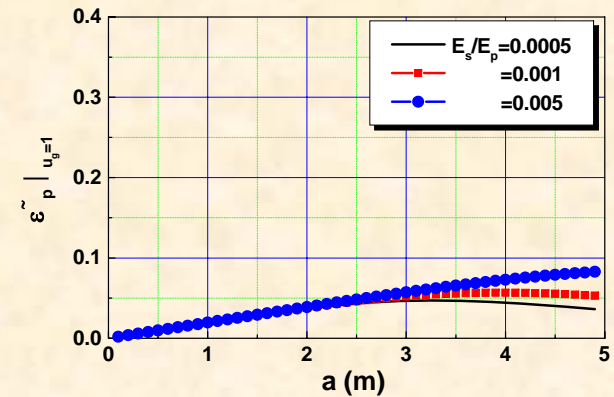
杭頭曲げひずみと杭径の関係



(a) $H=10$ m



(b) $H=20$ m



(c) $H=40$ m

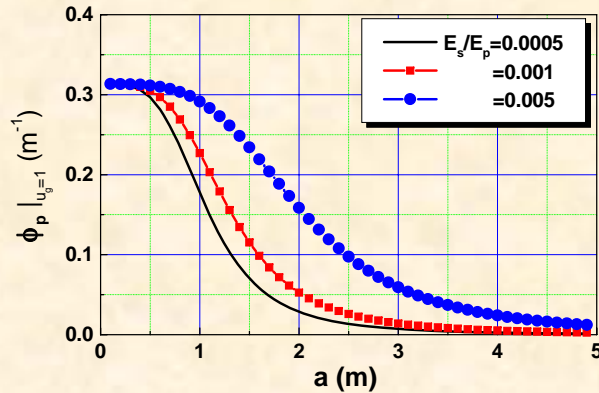
特徴1

杭頭曲げひずみを最小化する杭径はない。代わりに、曲げひずみを極大化する不適な径(不適径)が存在する。

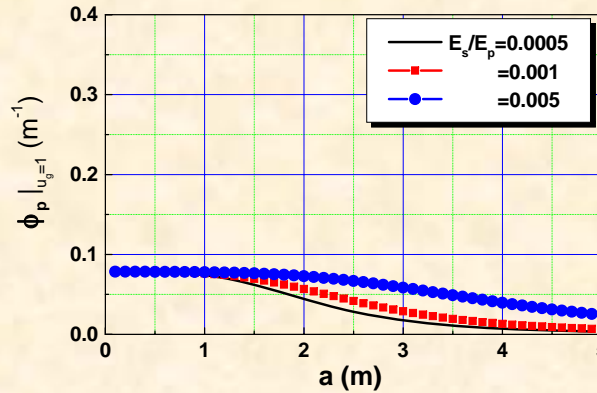
特徴2

標準的な杭径の範囲では、不適径は常に杭径大側に位置する。よって、杭径を小さくすれば、地盤変形による損傷を抑制できる。

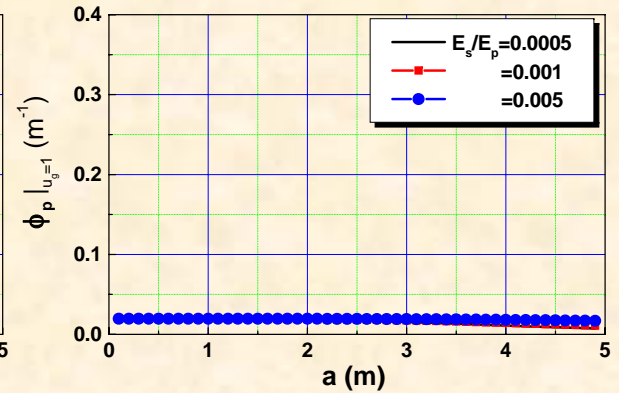
杭頭曲げひずみと杭径の関係の解釈



(a) H=10m



(b) H=20m



(c) H=40m

杭頭の曲率に関する特徴

杭径の小さい範囲

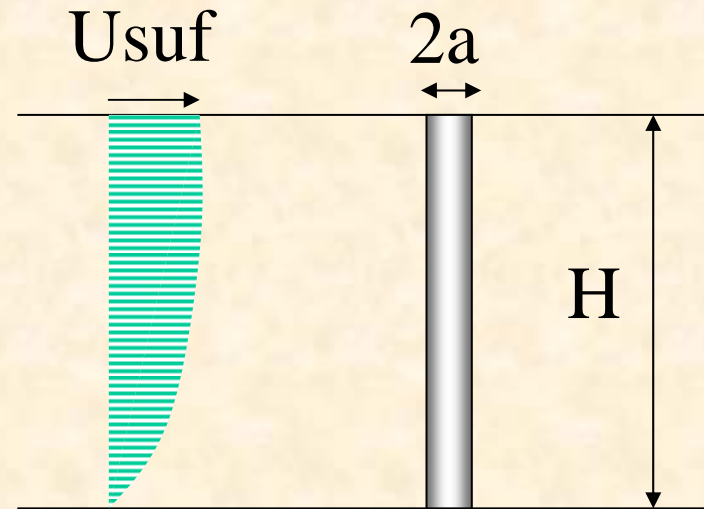
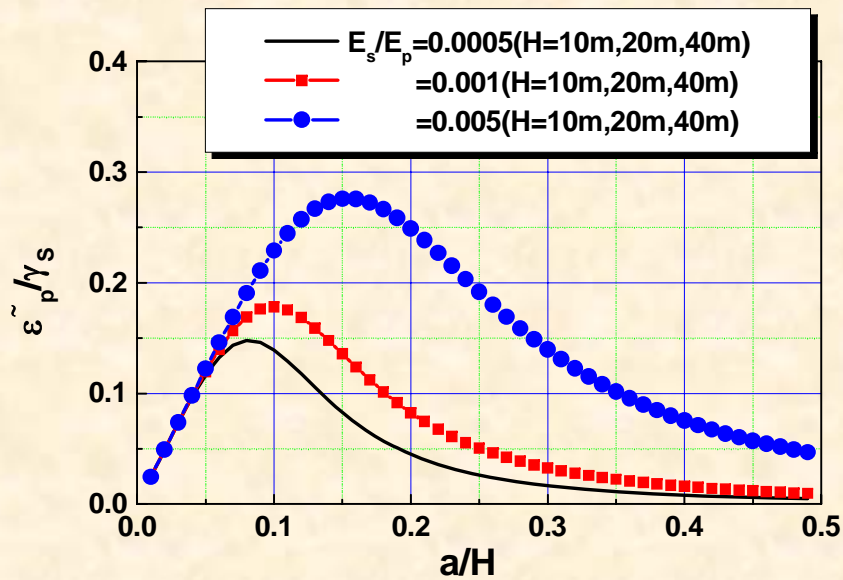
杭の柔性により、杭は地盤変形に追随する。
よって、曲率は一定値に収束する。

杭径の大きい範囲

杭の剛性により、杭は地盤変形に追随しにくくなる。
よって、曲率は減少する。



杭頭曲げひずみと杭径・杭長の正規化



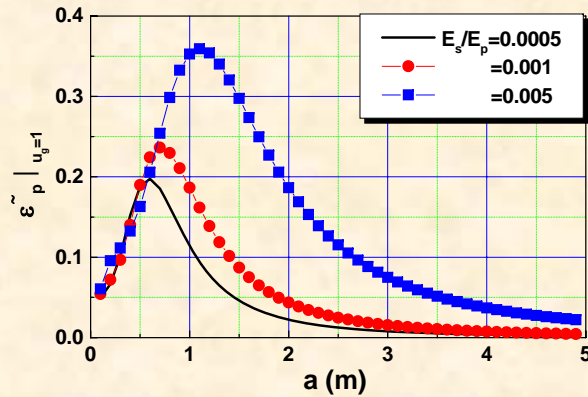
$$\gamma_s = Usuf / H$$

$$\frac{\tilde{\varepsilon}_p}{\gamma_s} = \frac{\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{n\pi}{n^4 / (\alpha'_2 \tilde{\Omega}_n) + \tilde{\xi}_n^2} \left(\frac{a}{H}\right) (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \frac{1}{\tilde{\xi}_n^2} (-1)^{\frac{n-1}{2}}}$$

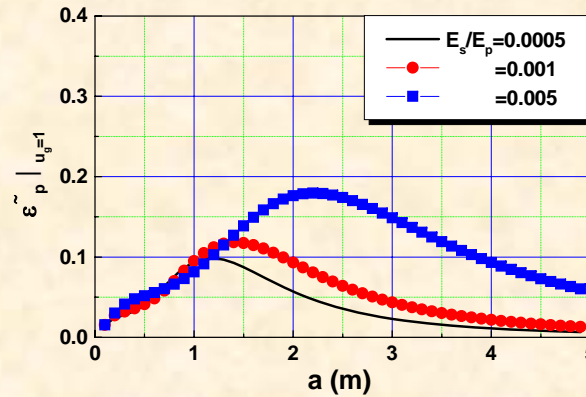
杭径長比と杭頭の正規化曲げひずみに関する統括的な特徴

杭先端を回転拘束した場合

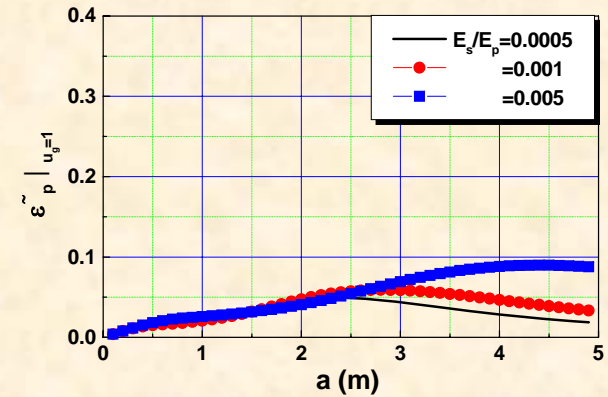
大平・田蔵らの理論解



(a) $H=10$ m



(b) $H=20$ m



(c) $H=40$ m

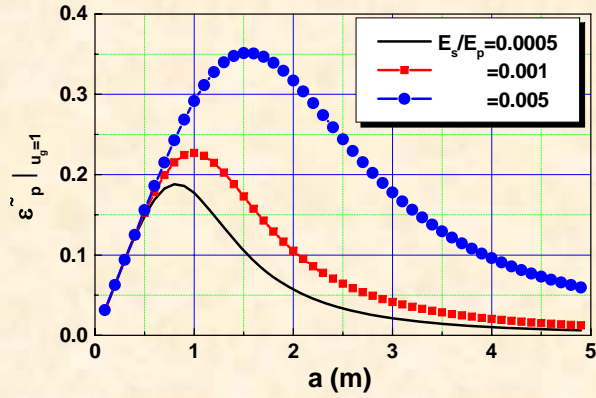
特徴1

杭先端自由条件の場合と同様に、曲げひずみを極大化する不適な径（不適径）が存在する。

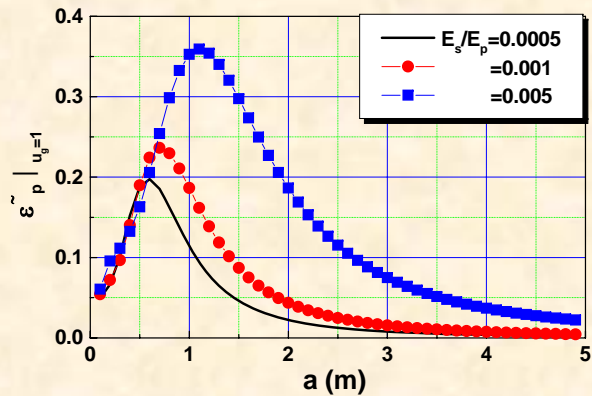
特徴2

不適径は杭先端自由条件に比べて小さくなる(0.7倍程度)傾向がある。

特徴2の解説

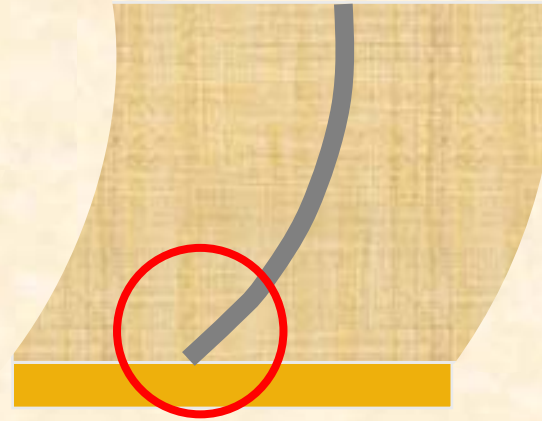


杭先端回転自由条件

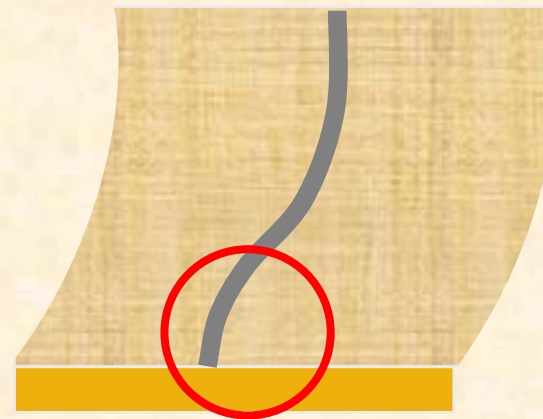


杭先端回転拘束条件

杭が地盤に追従しやすい



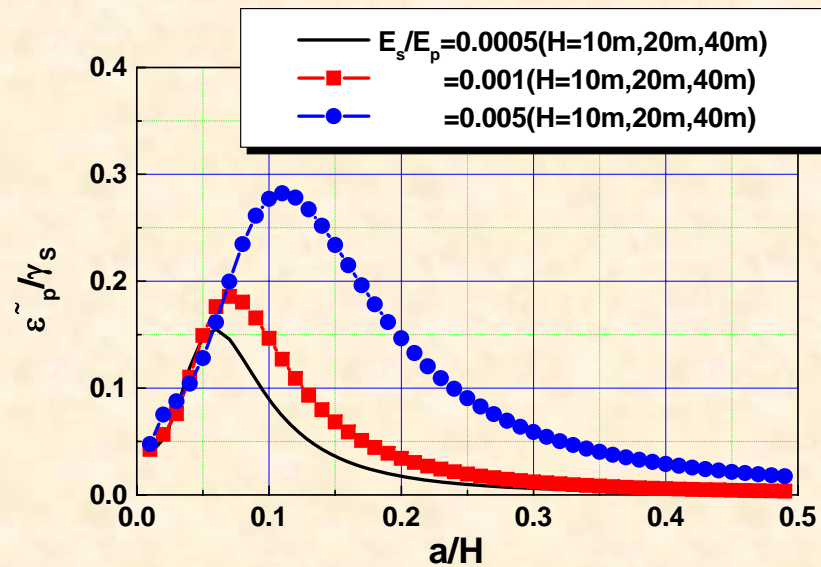
杭が地盤に追従しにくい



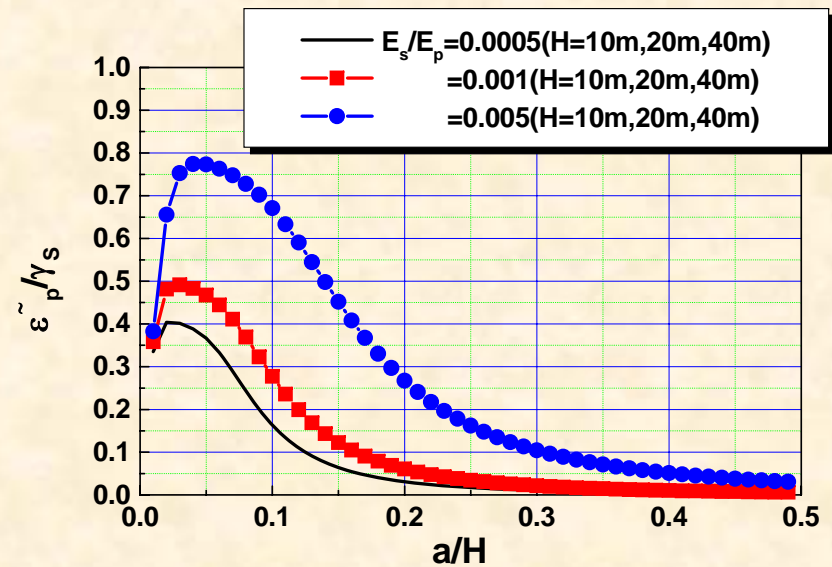
杭の見かけの剛性が増加

不適径が小径側にシフト

杭頭・杭先端曲げひずみと杭径・杭長の正規化



杭頭部

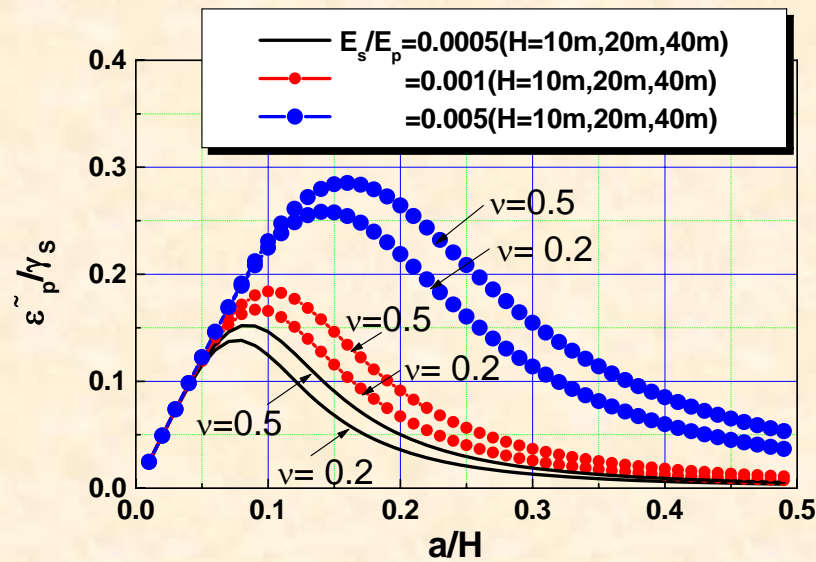


杭先端部

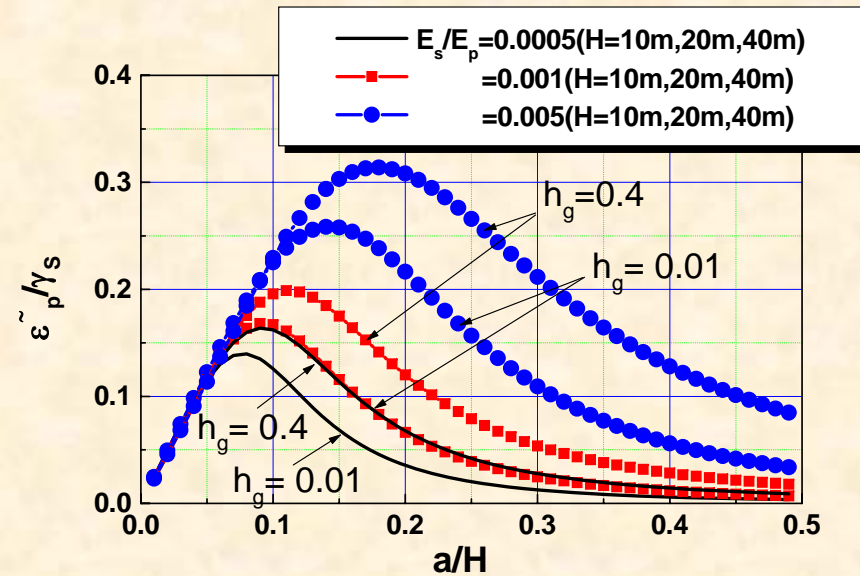
特徴3

杭の境界条件によらず，正規化曲げひずみと杭径長比の関係として統括的に表現することができる。

物理諸数値が正規化曲げひずみ-杭径長比に及ぼす影響



ポアソン比



減衰定数

ポアソン比と減衰定数の一般的な変動は、正規化曲げひずみ-杭径長比に著しい影響を及ぼさない。

ここまでのおさらい

地盤変形のみを受ける杭基礎の損傷と杭径の関係について、3次元弾性波動論に基づく理論解に基づき、その特性を明らかにした。

1. 慣性力による杭径と曲げひずみの関係とはまったく異なる
2. 地盤変形のみを受ける場合に不適径が存在する
3. 一般杭径の範囲では、不適径が常に大きい杭径側にある
4. 正規化曲げひずみと基礎径長比 a/H による統括的な特性で表現できる
5. 上記の統括的な表現は、杭の境界条件によらない
6. ポアソン比、減衰定数の影響度は小さい

杭の被害を最小にする最適杭径とは

慣性力

+

地盤変形

$$\frac{\tilde{\varepsilon}_p}{\gamma_s} = \frac{1}{\gamma_s} \frac{V}{E_p H^2} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\frac{32n^2}{\pi^3} \left(\frac{H}{a}\right)^3}{n^4 + \alpha'_2(\rho_p/\rho) + \alpha'_2 \tilde{\xi}_n^2 \tilde{\Omega}_n} + \frac{\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{n\pi\alpha'_2 \tilde{\Omega}_n}{n^4 + \alpha'_2(\rho_p/\rho) + \alpha'_2 \tilde{\xi}_n^2 \tilde{\Omega}_n} \left(\frac{a}{H}\right) (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \frac{1}{\tilde{\xi}_n^2} (-1)^{\frac{n-1}{2}}}$$

$$\left. \frac{\varepsilon_p}{\gamma_s} \right|_{z=H} = g_K \left(\frac{a}{H}, \frac{E_g}{E_p}, \frac{\rho_p}{\rho_g} \right) + f_r \cdot g_I \left(\frac{a}{H}, \frac{E_g}{E_p}, \frac{\rho_p}{\rho_g} \right)$$

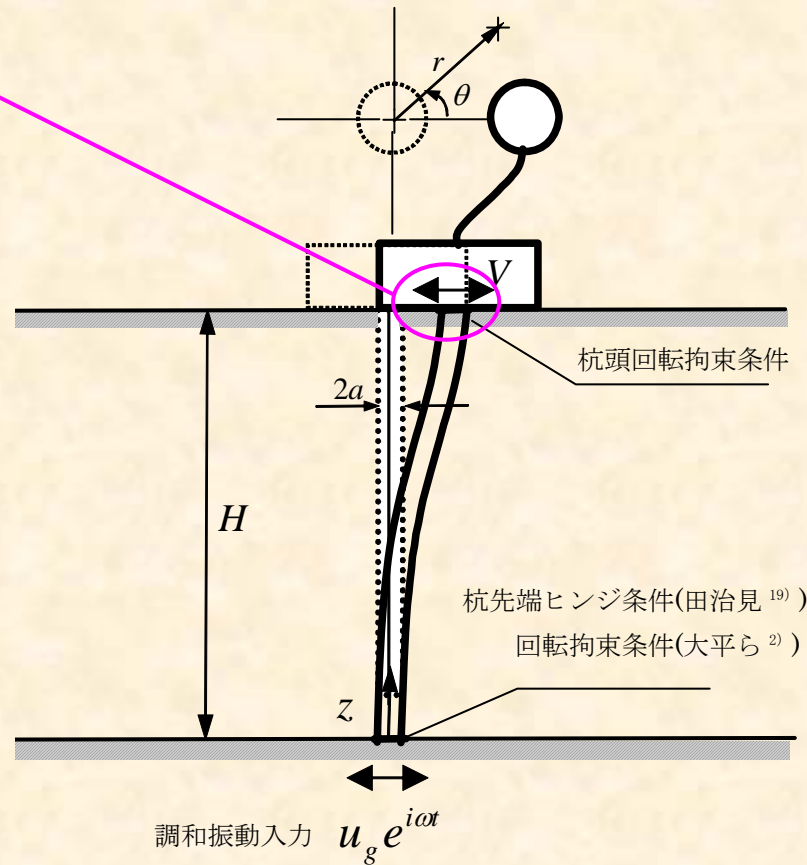
g_K : 地盤変形による正規化曲げひずみ

$f_r \cdot g_I$: 慣性力による正規化曲げひずみ

$f_r = \frac{1}{\gamma_s} \frac{V}{E_p H^2}$ 慣性力と地盤変位の相対効果を表す指標

E_g/E_p : 地盤と杭の剛性比

ρ_p/ρ_g : 杭と地盤の密度比



慣性力と地盤変形の相対効果について

ポイント

$$f_r = \frac{1}{\gamma_s} \frac{V}{E_p H^2}$$

杭頭水平力 V と地盤の平均せん断ひずみ γ_s には、通常、位相差が生じる。



複素数で表される

$$f_r = F_r e^{i\phi_r}$$

$$f_r \text{ の大きさ: } F_r = \left| \frac{1}{\gamma_s} \frac{V}{E_p H^2} \right|$$

$$V \text{ と } \gamma_s \text{ の位相差: } \phi_r = \arg\left(\frac{V}{\gamma_s}\right)$$

慣性力と地盤変形の相対効果について

$$F_r = \left| \frac{1}{\gamma_s} \frac{V}{E_p H^2} \right|$$

実範囲

$$0 \leq F_r \leq 10^{-3}$$

水平力V

応答スペクトル等を利用し、ベースシアを求めてそれを杭数で平均化する。

地盤の平均ひずみ γ_s

SHAKEなどで地盤解析を行い、最大変位を求めた後、表層地盤高さHで除す。あるいは、鉄道標準で用いられている以下の式を利用することも可能である。

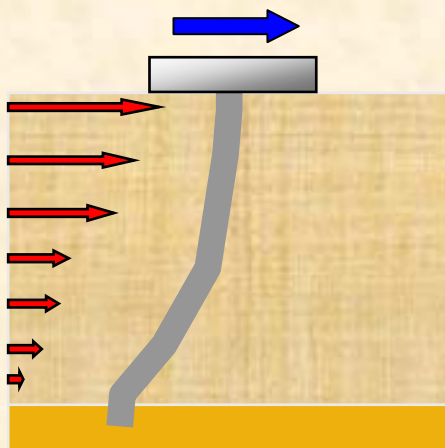
$$a_g = 0.064T_g^{2.1} \quad (\text{L1地震動})$$

$$a_g = 0.344T_g^{1.1} \quad (\text{L2地震動})$$

慣性力と地盤変形の相対効果について

$$\phi_r = \arg \left(\frac{V}{\gamma_s} \right)$$

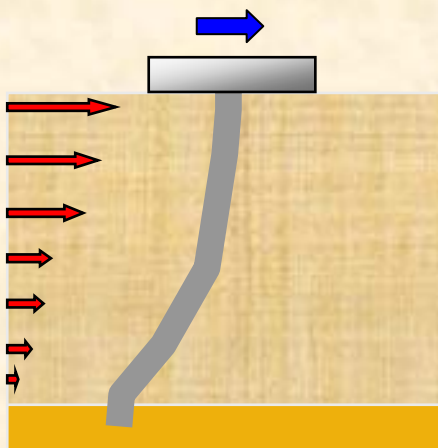
室野・西村らによる一連の研究



状態1

$$T_s/T_g < 1$$

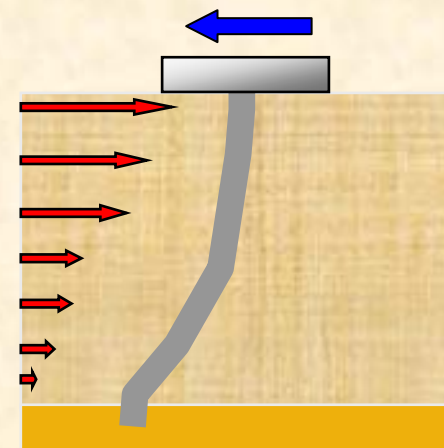
$$\phi_r = 0$$



状態2

$$T_s/T_g = 1$$

$$\phi_r = -\frac{\pi}{2}$$

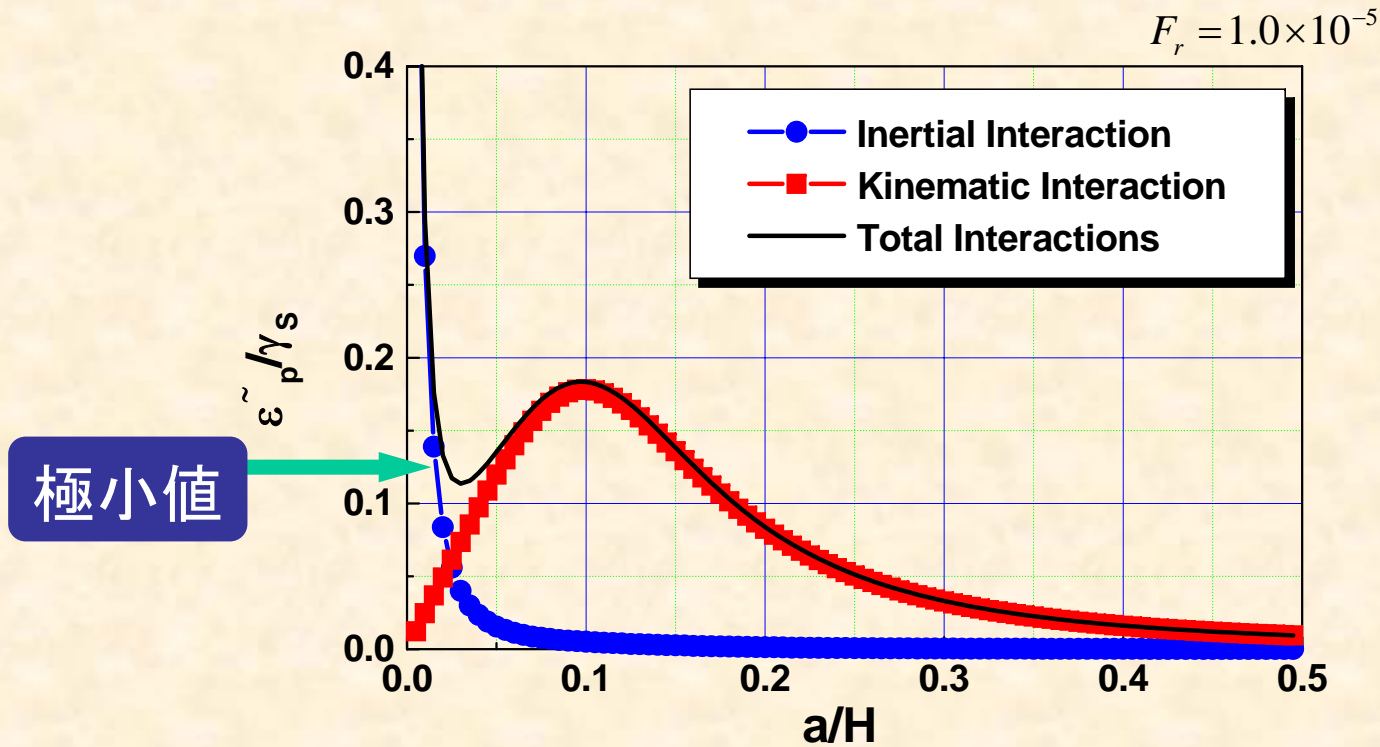


状態3

$$T_s/T_g > 1$$

$$\phi_r = -\pi \left(\approx -\frac{3}{4}\pi \right)$$

慣性力と地盤変形を受ける杭の杭頭曲げひずみと杭径長比の基本特性



$$(\phi_r = 0, E_g / E_p = 0.001, \rho_p / \rho_g = 1.25)$$

Variation in normalized bending strains as a function of a/H

最適杭径に影響を及ぼす主要因とその性質

パラメータ1

$$F_r = \left| \frac{1}{\gamma_s} \frac{V}{E_p H^2} \right|$$

慣性力と地盤変位の相対効果を表す指標(大きさ)

パラメータ2

$$\phi_r = \arg \left(\frac{V}{\gamma_s} \right)$$

慣性力と地盤変位の相対効果を表す指標(位相差)

パラメータ3

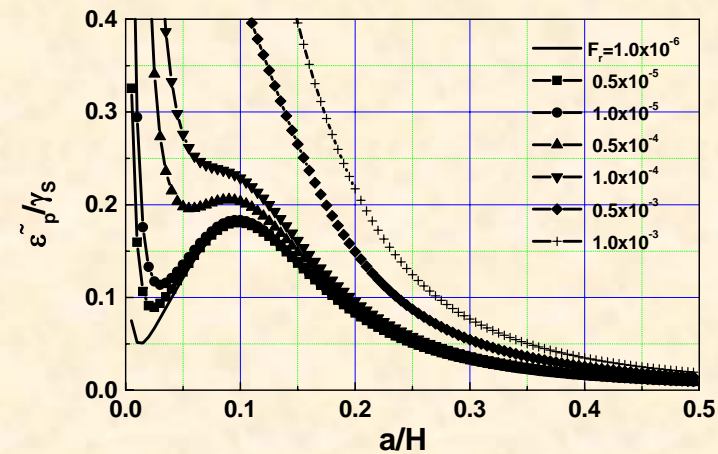
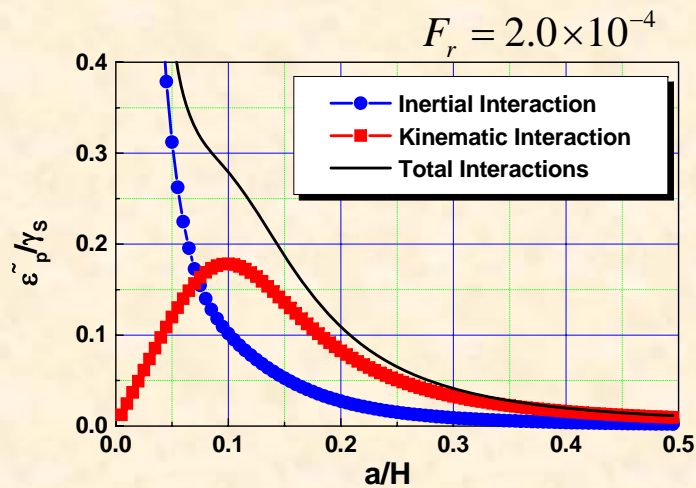
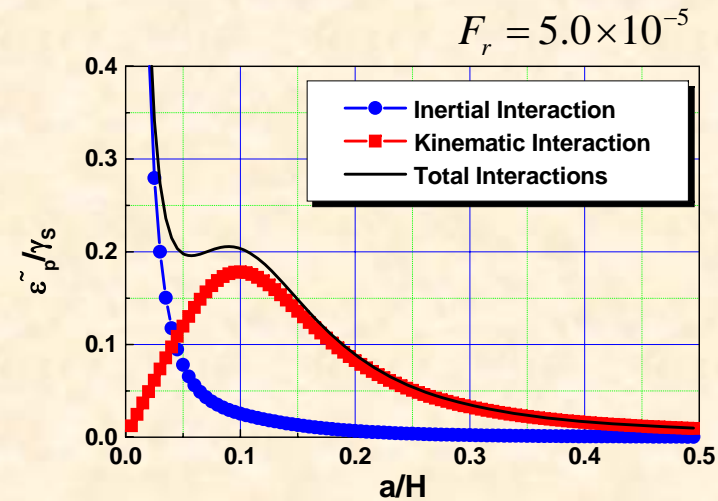
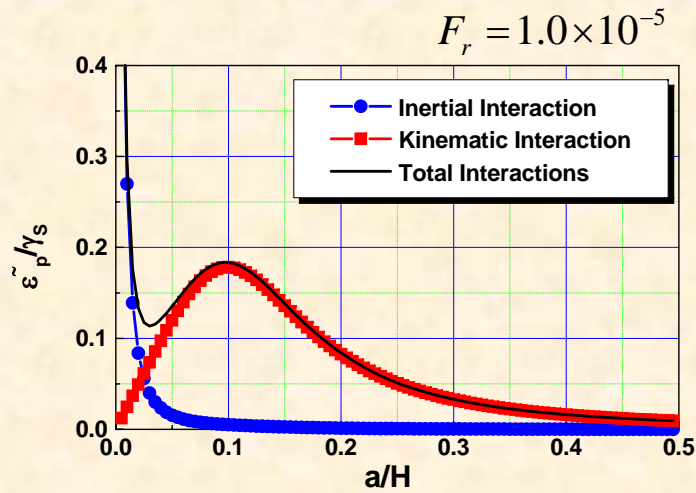
$$E_g / E_p$$

地盤と杭の剛性比

パラメータ4

杭先端回転拘束条件(大平・田蔵)

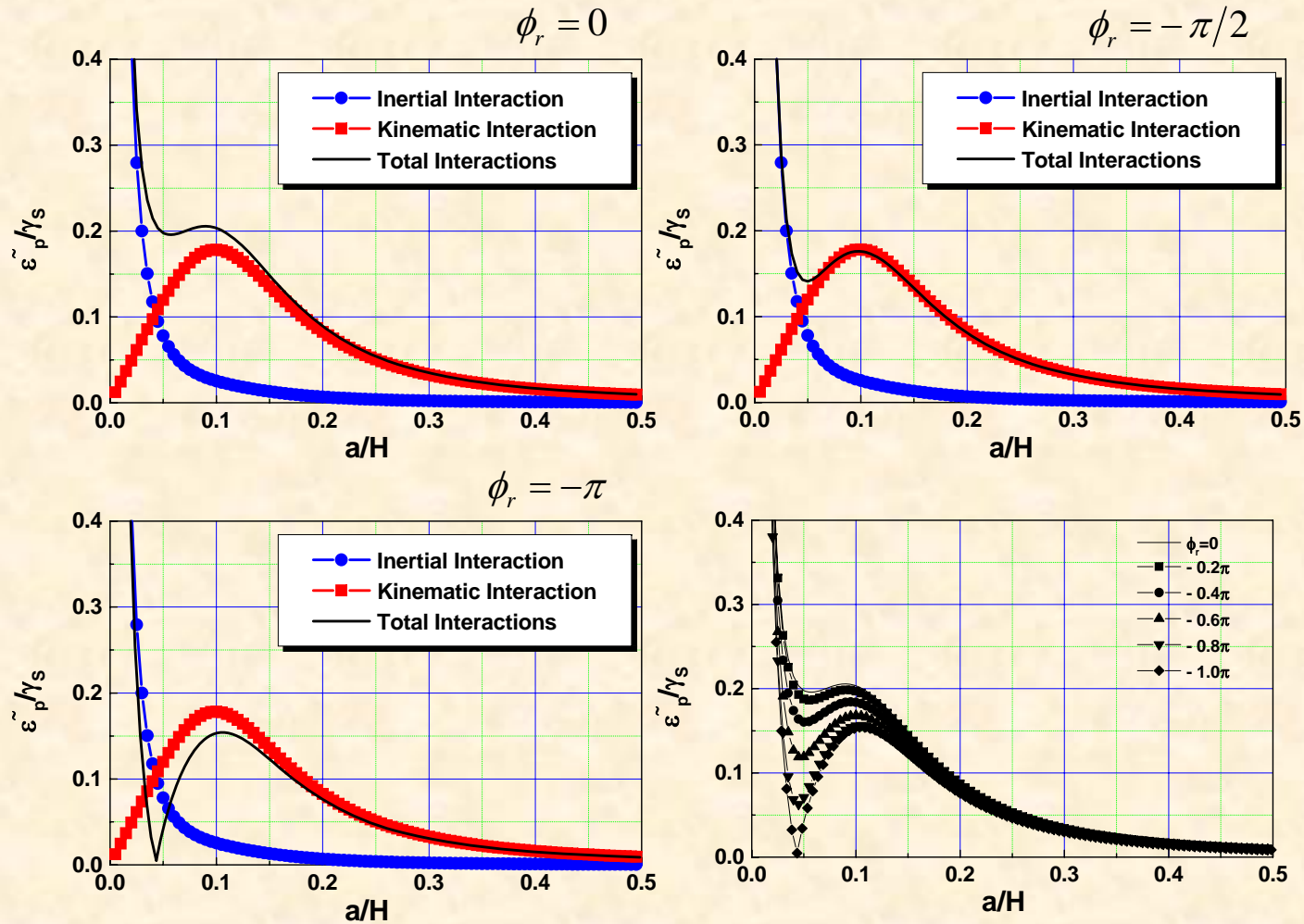
Frの違いが最適杭径に及ぼす影響



$$(\phi_r = 0, E_g/E_p = 0.001, \rho_p/\rho_g = 1.25)$$

Variation in normalized bending strains with F_r

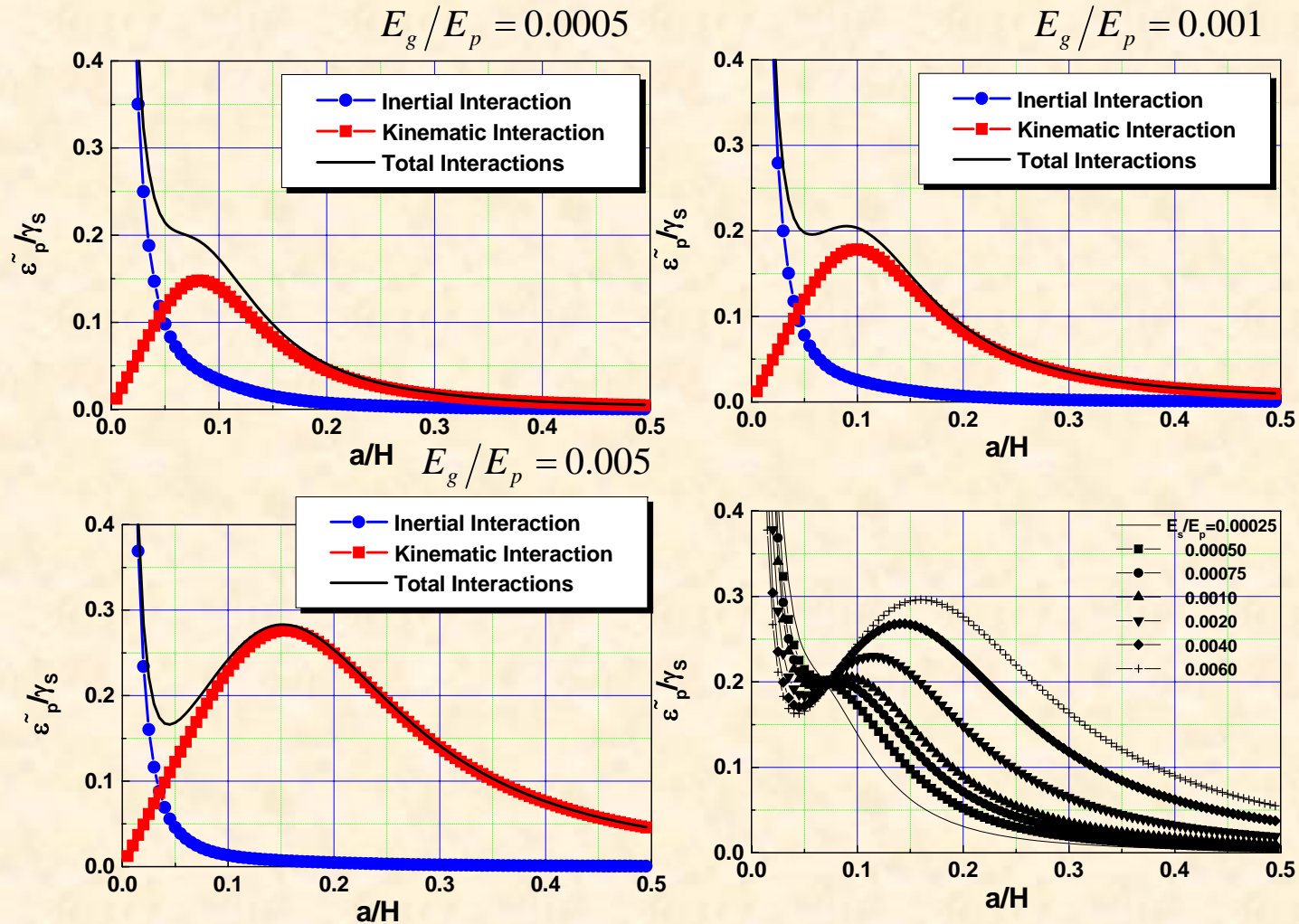
ϕ_r の違いが最適杭径に及ぼす影響



$$(F_r = 5.0 \times 10^{-5}, E_g/E_p = 0.001, \rho_p/\rho_g = 1.25)$$

Variation in normalized bending strains with ϕ_r

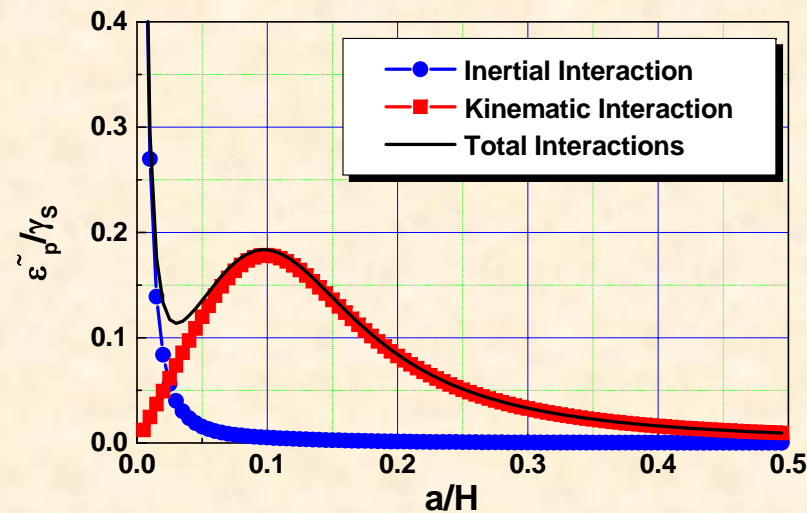
E_g/E_pの違いが最適杭径に及ぼす影響



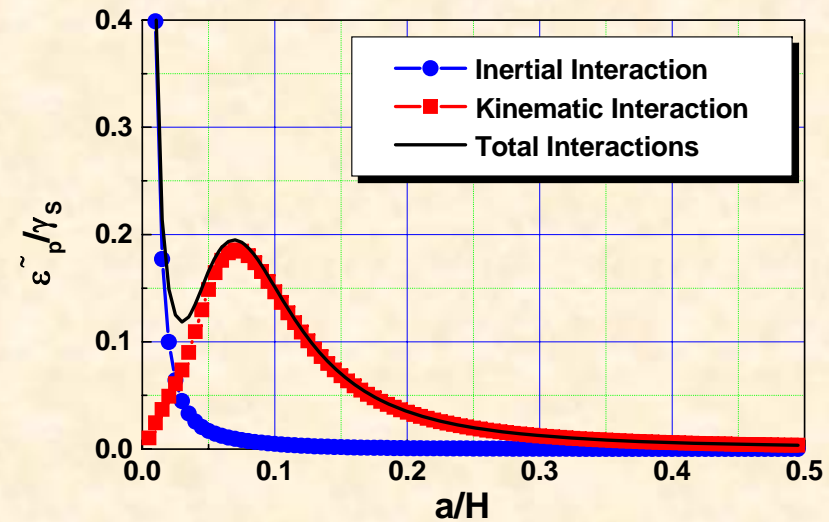
$(F_r = 5.0 \times 10^{-5}, \phi_r = 0.001, \rho_p/\rho_g = 1.25)$

Variation in normalized bending strains with E_g/E_p

杭先端境界条件の違いが最適杭径に及ぼす影響



杭先端回転自由条件

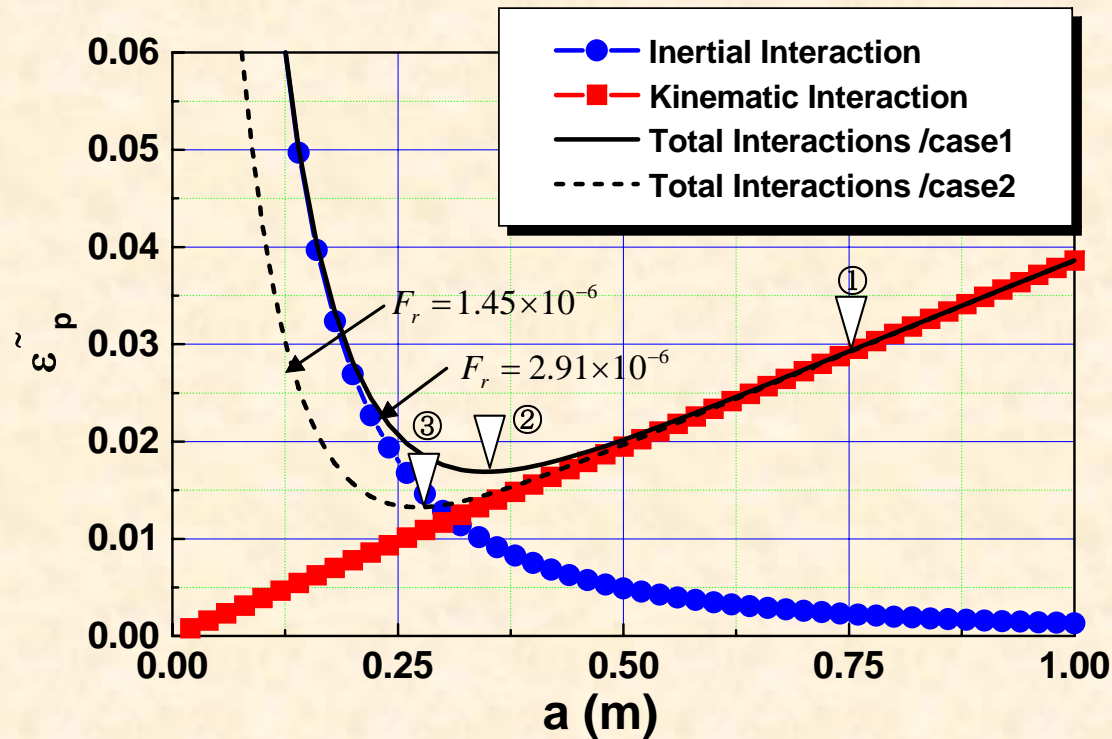


杭先端回転拘束条件

特徴

先端条件の違いは、地盤変形に起因する正規化曲げひずみに大きく影響を及ぼす。

最適杭径の有効性について



表層地盤	
高さ (H)	20 (m)
密度 (ρ)	1.5 (t/m ³)
せん断弾性波速度 (V_s)	80 (m/s)
ポアソン比 (ν)	0.49
減衰定数 (h_g)	0.10
杭基礎	
半径 (a)	0.75 (m)
ヤング率 (E)	2.5×10^7 (kN/m ²)
密度 (ρ_f)	2.5 (t/m ³)
上部構造物	
水平力 (V): case1	500.0 (kN)
: case2	250.0 (kN)

最適杭径の利用による杭頭曲げひずみの低減効果

① $a=0.75$ m ($\varepsilon = 0.029$)



② $a=0.34$ m ($\varepsilon = 0.017$)

47%の曲げひずみを低減できる

ここまでのおさらい

地盤変形と慣性力を同時に受ける杭基礎の損傷と杭径の関係について、3次元弾性波動論に基づく理論解に基づき、その特性を明らかにした。

1. 正規化曲げひずみと基礎径長比 a/H による統括的な特性で表現できる
2. 一般杭径(杭径長比)の範囲に、正規化曲げひずみを極小化する最適杭径が存在する場合がある
3. 慣性力と地盤変位の相対効果を表す指標 f_r 、地盤と杭の剛性比が、主に最適杭径に大きく影響を与える
4. 杭の境界条件の違いは、地盤変形に起因する正規化曲げひずみに影響を及ぼす
5. 最適杭径を適用すれば、杭の損傷を著しく低減できる可能性がある

3. 耐震設計への適用方法と今後の展望

(ここでの主な内容)

- ・実設計法「応答変位法」への展開
- ・簡易ノモグラムによる最適プロポーシヨンの選定方法
- ・今後の展望

実設計法「応答変位法」への展開

応答変位法の特長

応答変位法は静的解析法であり、解析的あるいは数学的な取り扱いが、3次元弾性波動論に基づく理論解や高度な有限要素解析と対比して格段に容易である。



地盤抵抗や杭体の非線形性、あるいは複雑な地盤の層構成について取り扱うことができるため、最適杭径に関する将来的な発展が期待できる。

応答変位法による曲げひずみの一般解

慣性力

+

地盤変形

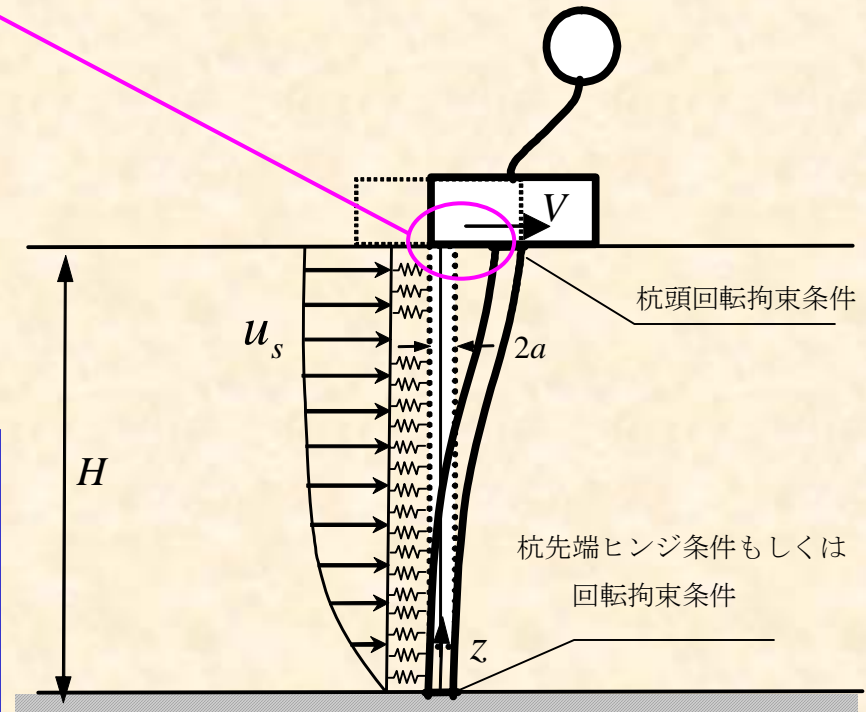
$$\frac{\tilde{\varepsilon}_p}{\gamma_s} = f_r \left(\frac{E_p}{E_g} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{H}{a} \right)^2 \beta_2 \left[e^{\lambda_p H} (\bar{A} \sin \lambda_p H - \bar{B} \cos \lambda_p H) - e^{-\lambda_p H} (\bar{C} \sin \lambda_p H - \bar{D} \cos \lambda_p H) \right] + \frac{\beta_1 \left(\frac{a}{H} \right)}{1 + \beta_0 \left(\frac{a}{H} \right)^4 \left(\frac{E_p}{E_g} \right)}$$



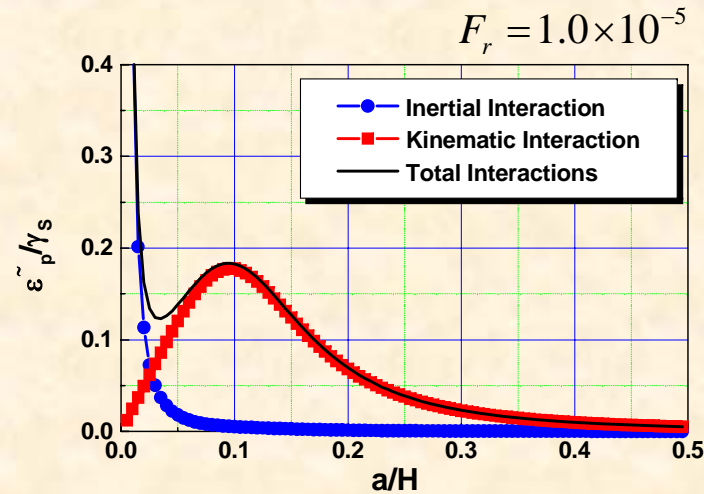
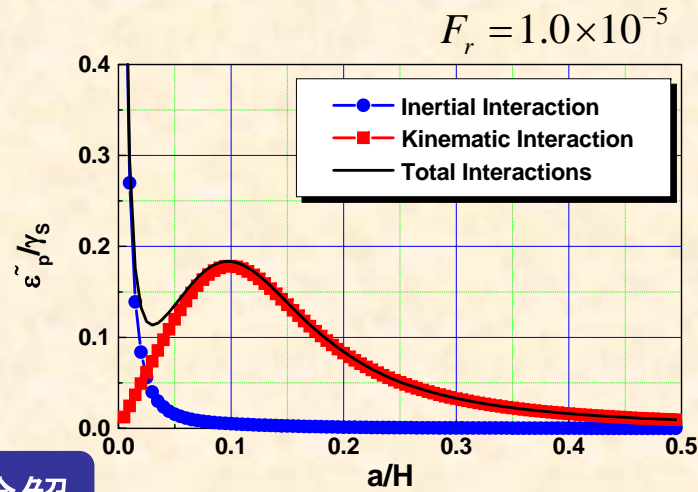
$$f_r = \frac{1}{\gamma_s} \frac{V}{E_p H^2} \quad \text{慣性力と地盤変位の相対効果を表す指標}$$

E_g / E_p : 地盤と杭の剛性比

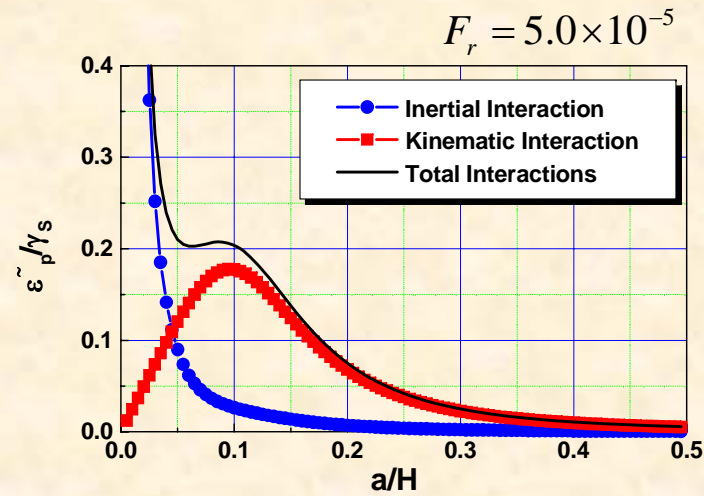
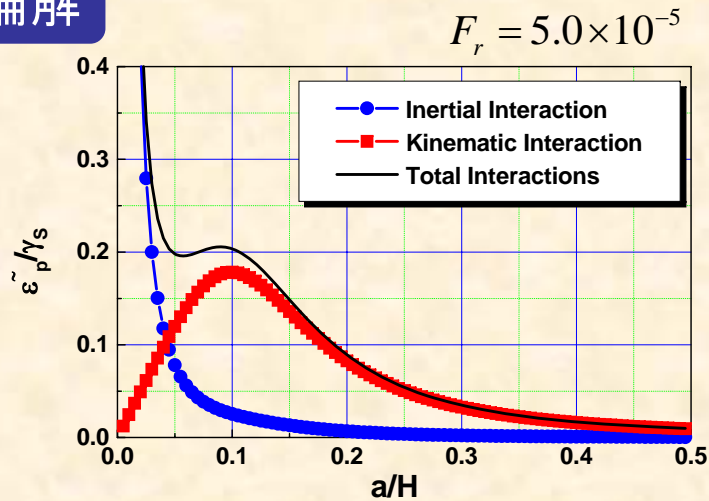
$$\lambda_p^4 = \frac{Kd}{4E_p I}$$



Frの違いが最適杭径に及ぼす影響



理論解

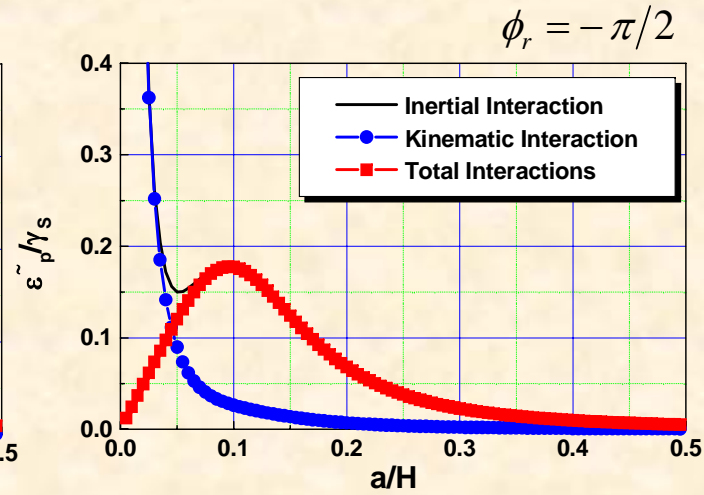
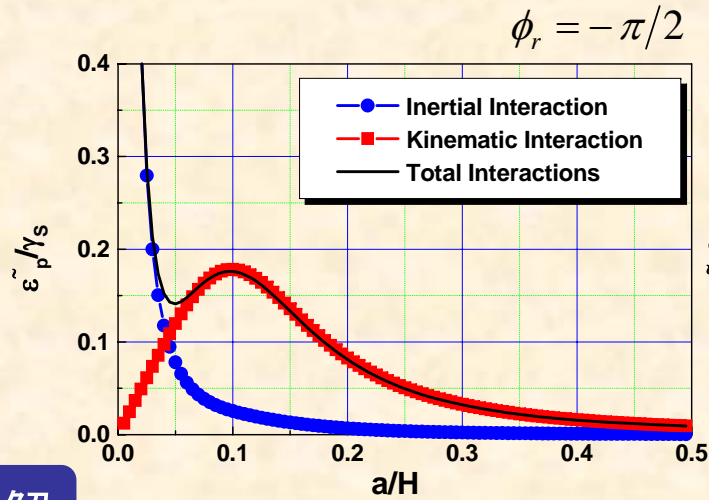


応答変位法

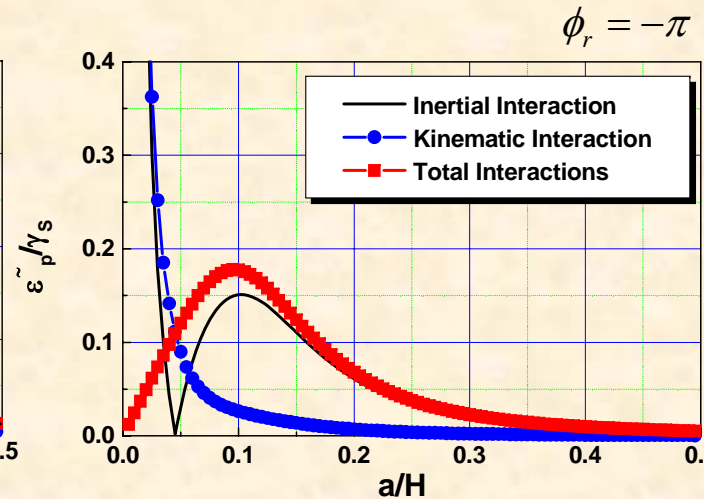
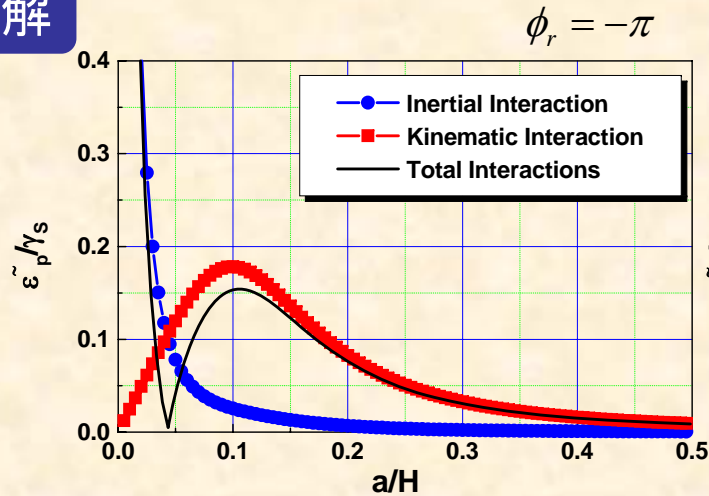
$$(\phi_r = 0, E_g/E_p = 0.001, \rho_p/\rho_g = 1.25)$$

Variation in normalized bending strains with F_r

ϕ_r の違いが最適杭径に及ぼす影響



理論解

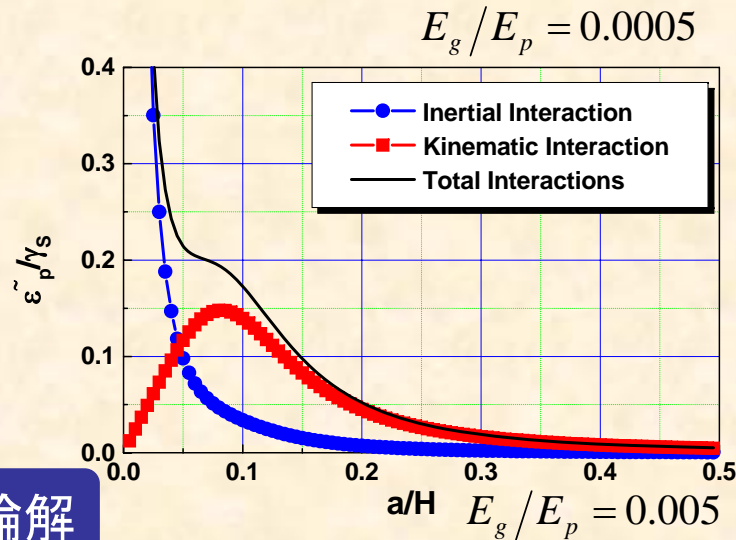


応答変位法

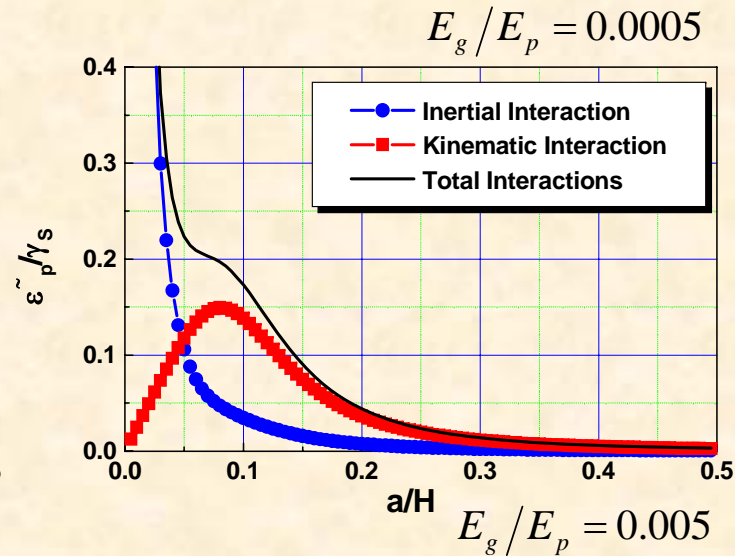
$$(F_r = 5.0 \times 10^{-5}, E_g/E_p = 0.001, \rho_p/\rho_g = 1.25)$$

Variation in normalized bending strains with ϕ_r

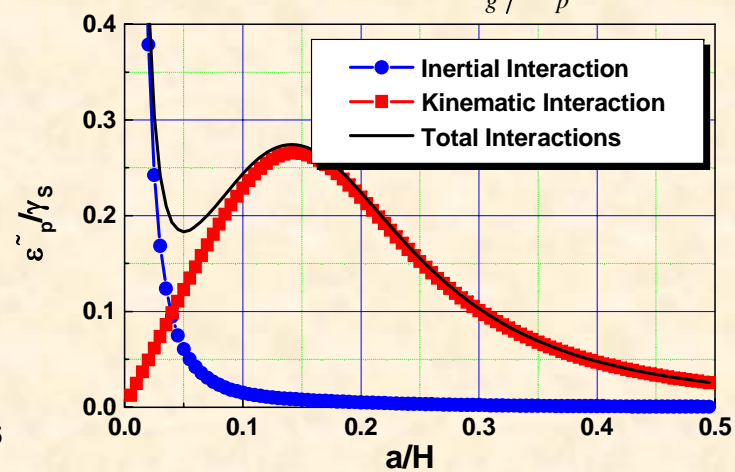
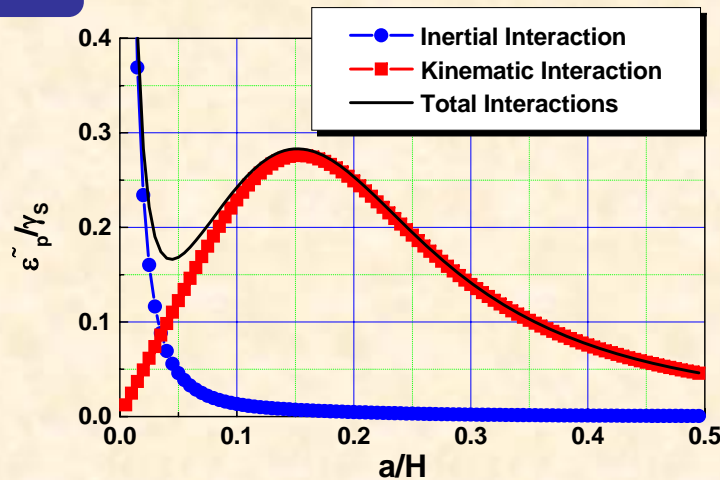
Eg/Epの違いが最適杭径に及ぼす影響



理論解



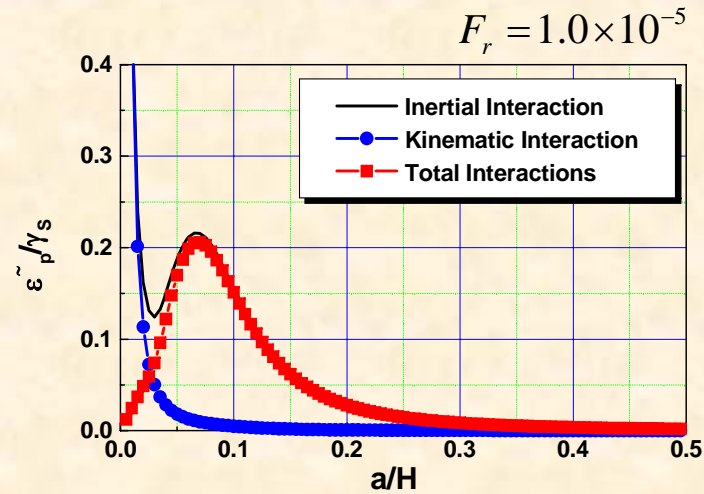
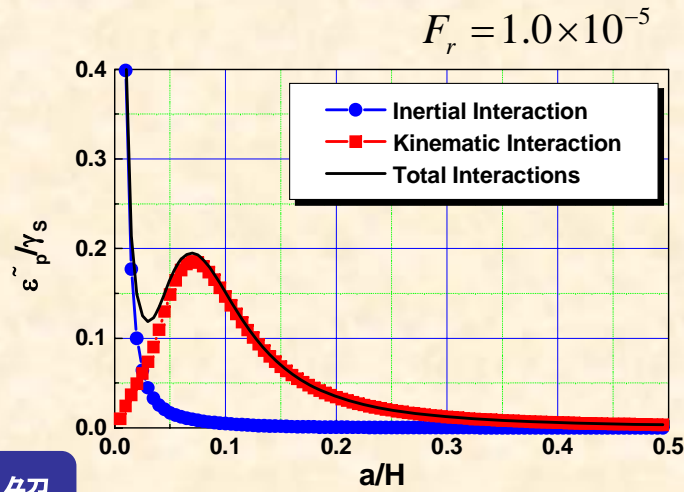
応答変位法



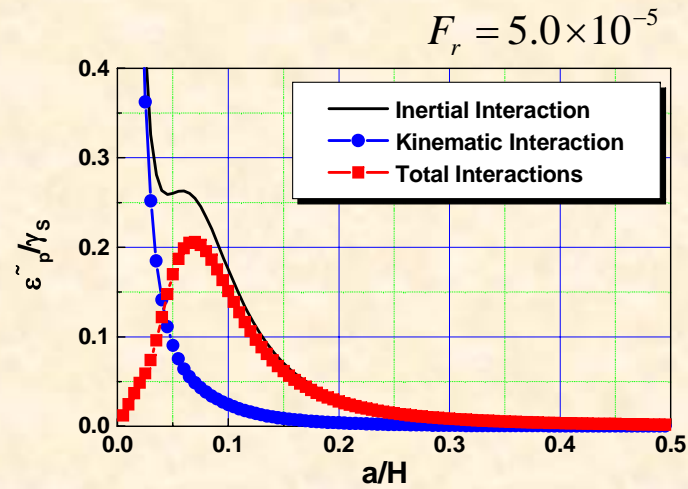
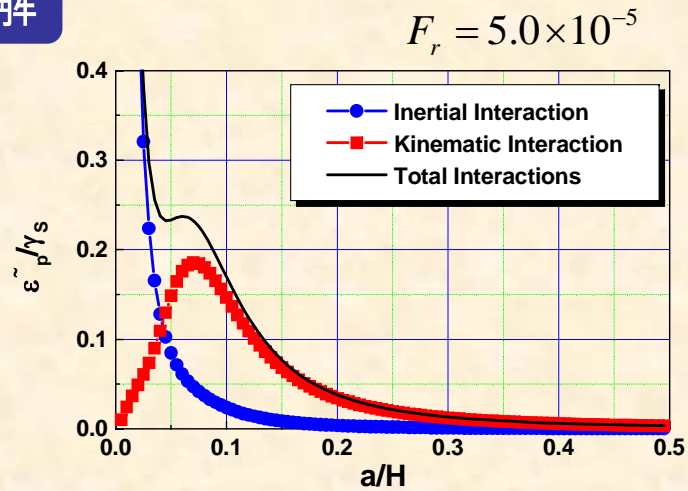
$(F_r = 5.0 \times 10^{-5}, \phi_r = 0.001, \rho_p/\rho_g = 1.25)$

Variation in normalized bending strains with E_g/E_p

杭先端境界条件の違いによる影響(固定条件)



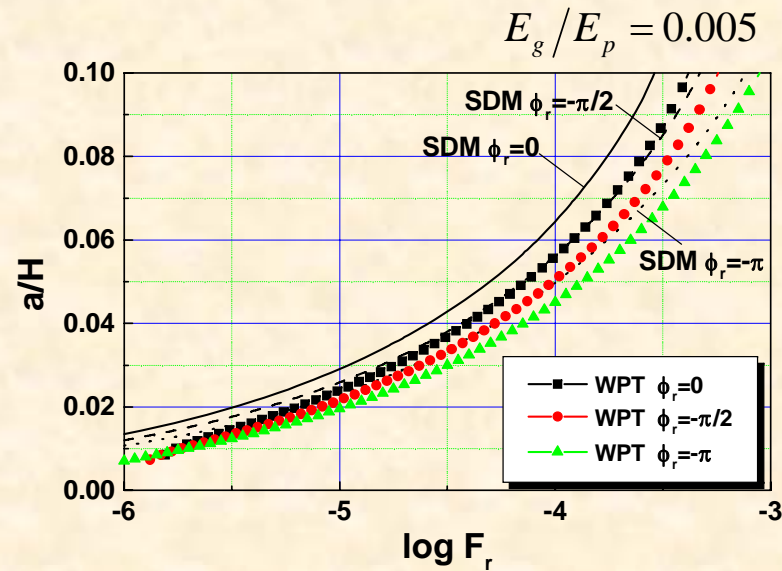
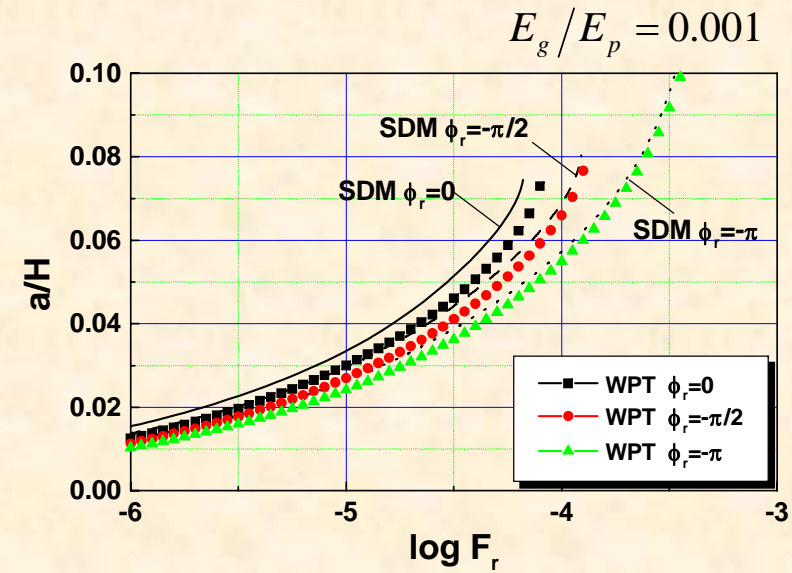
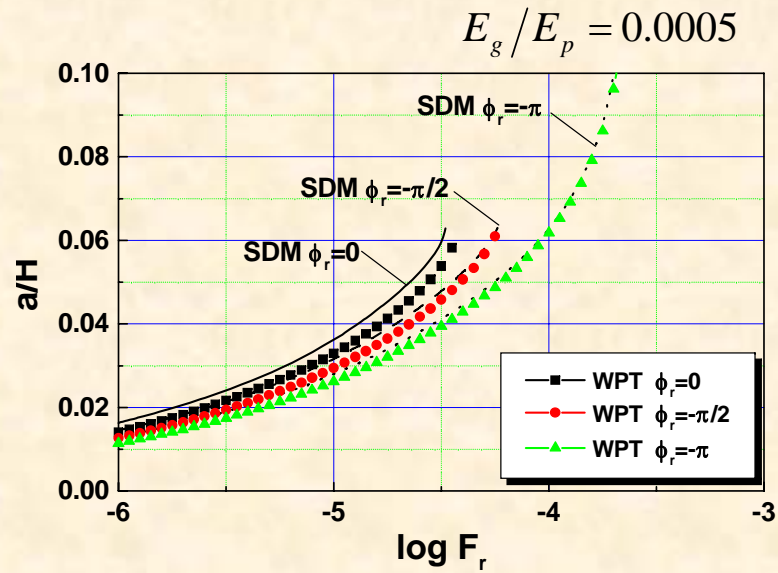
理論解



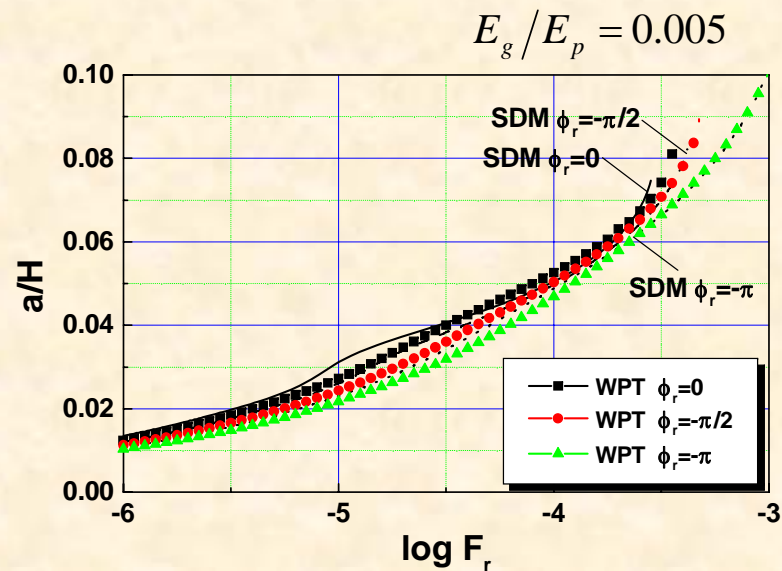
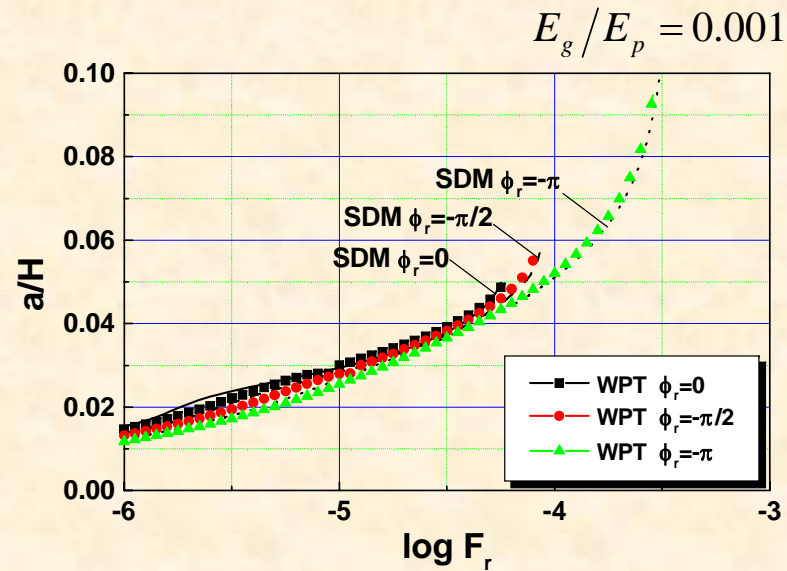
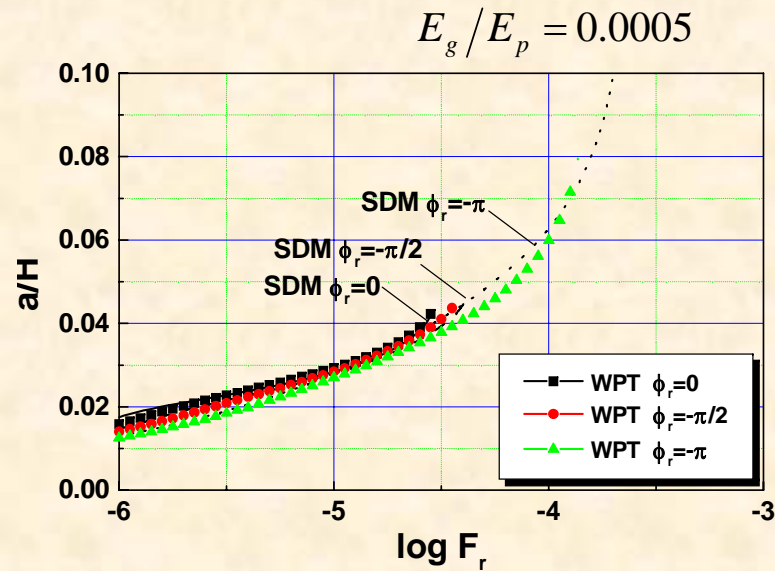
応答変位法

$$(\phi_r = 0, E_g / E_p = 0.001, \rho_p / \rho_g = 1.25)$$

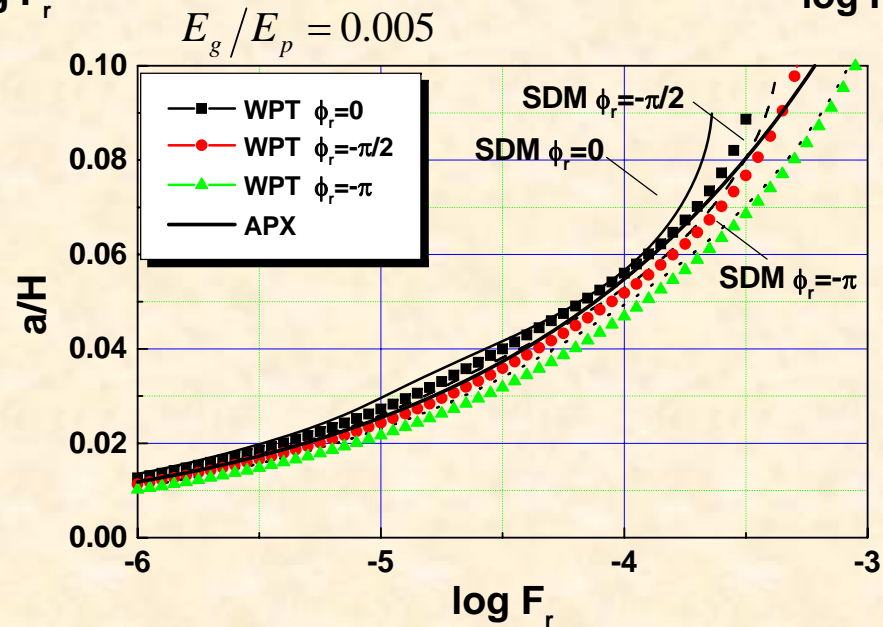
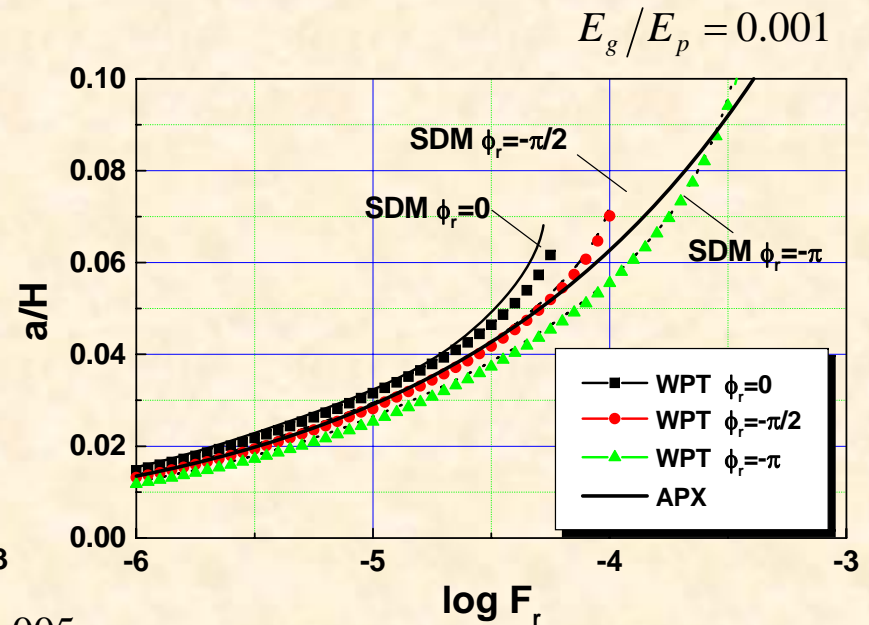
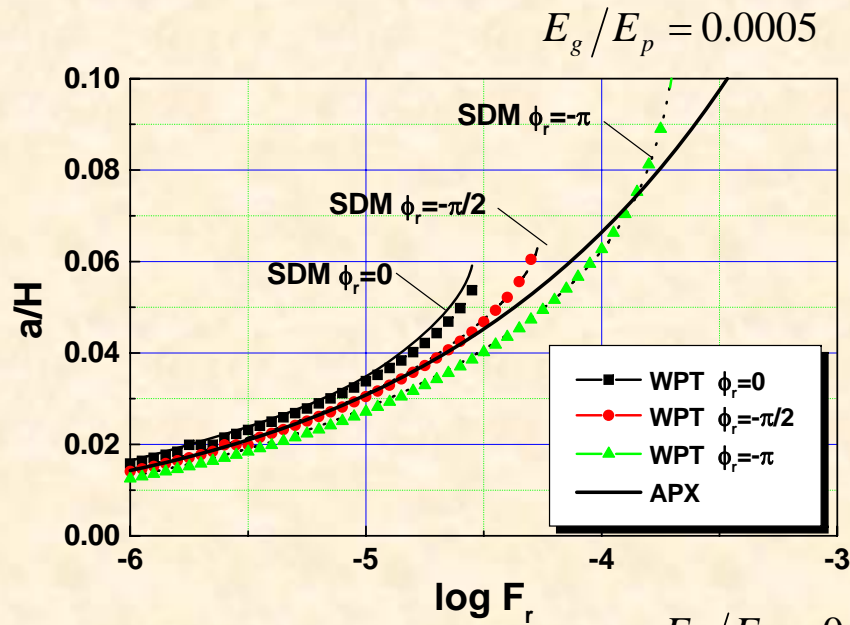
最適杭径 (杭径長比) の理論解との整合性 (杭先端自由条件)



最適杭径（杭径長比）の理論解との整合性（杭先端固定条件）

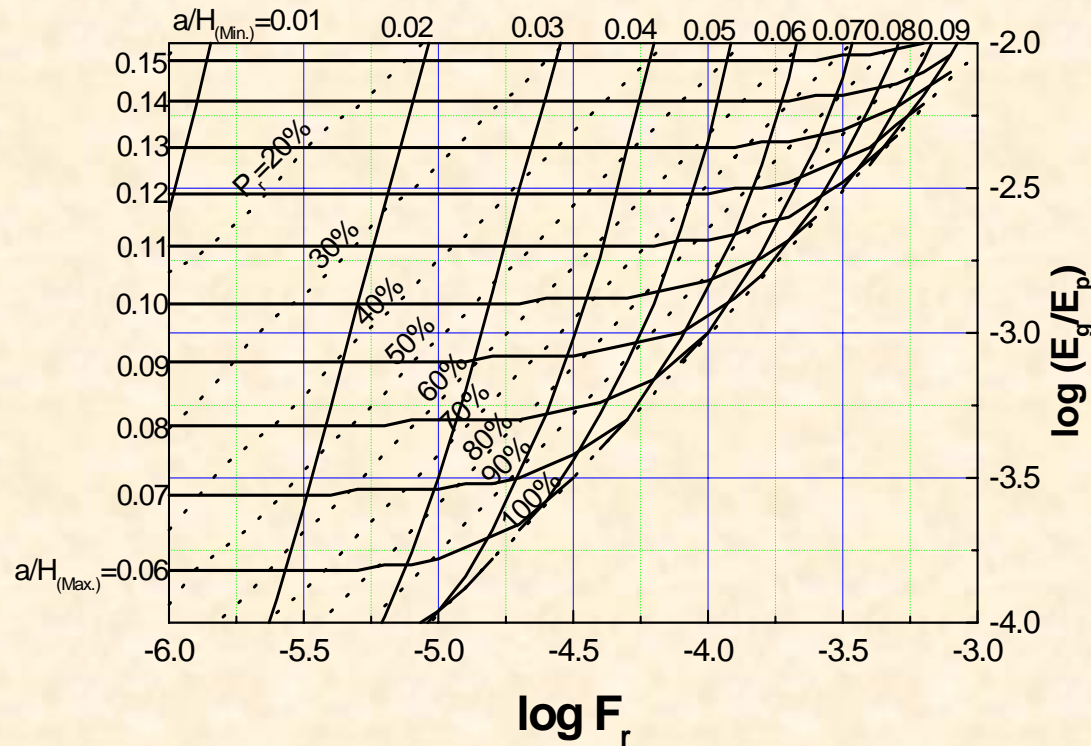


最適杭径 (杭径長比) の近似解の精度

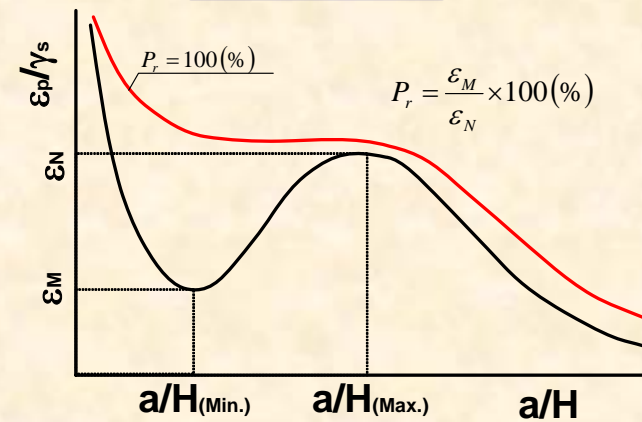


* 杭先端回転ばね
拘束の例

簡易ノモグラムによる最適プロポーションの選定方法



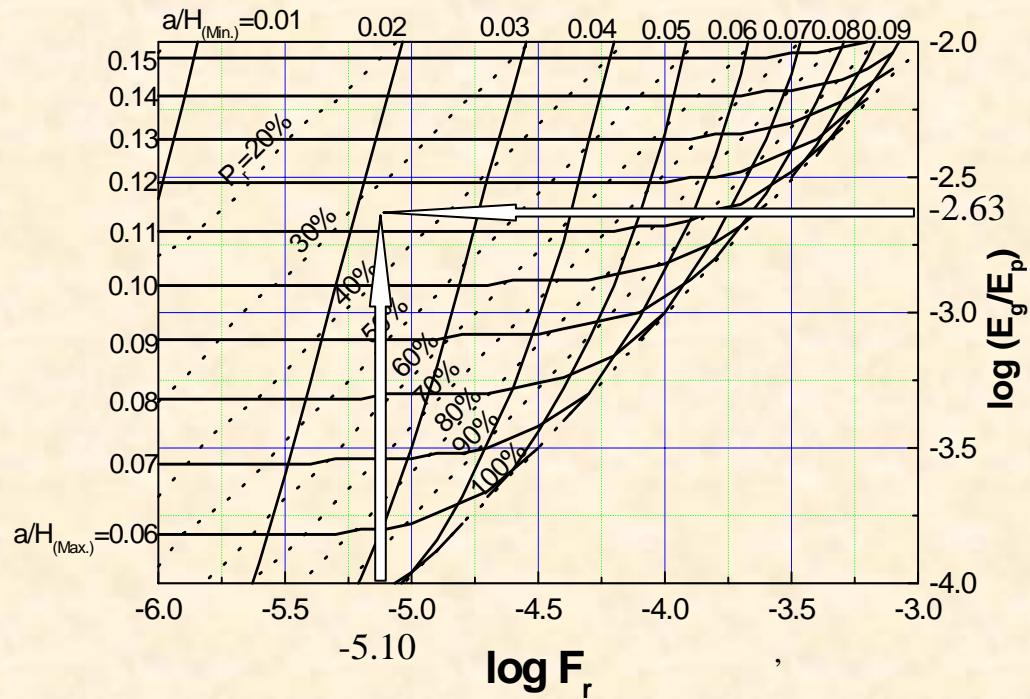
Prの定義



現在の杭径長比から最適杭径(径長比)に変更した場合の、正規化曲げひずみの低減比率Dr

$$D_r = \frac{P_r}{\frac{100 - P_r}{a/H_{(Max.)} - a/H_{(Min.)}} (a/H - a/H_{(Max.)}) + 100}$$

ノモグラムの利用方法



諸数値：

$$H = 20 \text{ m}$$

$$E_p = 2.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$E_g = 5.8 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma = 5.0 \times 10^{-3}$$

$$V = 400.0 \text{ kN}$$

$$\phi_r = -\pi/2 \quad \text{と仮定する.}$$

$$\log F_r = \log \frac{1}{\gamma_s} \frac{V}{E_p H^2} = -5.10$$

$$\log E_g / E_p = -2.63$$

$$a/H_{(Min.)} = 0.023$$

$$a/H_{(Max.)} = 0.115$$

$$P_r = 34\%$$

仮に杭径を0.8mとすれば、低減比率は0.76と算定される。つまり、杭径0.8mから最適杭径に変更すれば、曲げひずみは24%低減

ここまでのおさらい

1. 応答変位法においても理論解と同様に、正規化曲げひずみと基礎径長比 a/H による統括的な特性で表現できる
2. 応答変位法と理論解の最適杭径の整合性は高い
3. 応答変位法から導かれる最適杭径長比の近似解はある程度の精度で評価可能である
4. 最適杭径・不適径・効果について、より高精度な理論解に基づく評価を行う場合、簡易ノモグラムが有効な手段である

今後の展望

1. 種々の境界条件

- ・杭頭回転自由条件(1柱1基礎形式など)
- ・互層地盤における層境界ひずみ
- ・その他

2. 非線形性の影響

- ・地盤材料のひずみ振幅依存性
- ・局所的な破壊
- ・滑り・剥離
- ・杭の材料非線形性
- ・その他