

第16回JICE研究開発助成成果報告会

東海・東南海・南海巨大地震における都市型構造物の杭基礎による連鎖崩壊メカニズムの解明

東北大学 未来科学技術共同研究センター  
木村 祥裕

0

研究の背景

地震動による鋼管杭の水平変形は地盤の水平剛性により拘束されている。

地震動により地盤が液状化すると

地盤の水平剛性が低下する。

地盤の水平変形拘束効果の期待ができなくなる。

上屋構造物の変動軸力が増加すると

杭に曲げ座屈を生じる可能性がある。

1

研究の背景

一方で...

地震動による鋼管杭の水平変形は地盤の水平剛性により拘束されている。

実際の設計においては

上屋構造物に対する支持力の検討がほとんどであり、現行の設計指針では局部座屈に対する径厚比制限はあるが、杭の曲げ座屈に対する細長比制限はない。

地盤の水平変形拘束効果の期待ができなくなる。

既往の研究において、液状化地盤下での鋼管杭の曲げ座屈耐力について検討してきた。

杭に曲げ座屈を生じる可能性がある。

2

研究の背景 - 既往の研究 -

鋼管杭の弾性座屈荷重式の算出

鋼管杭の静的増分解析

杭-基礎部-上屋構造物系による遠心載荷実験

地盤反力係数分布

ポテンシャルエネルギー式

$$U = \int_0^l (EIu''^2 - Pu'^2 + K_c u^2) dx$$

参考文献  
木村祥裕, 時松孝次: 液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管単杭の曲げ座屈応力度, 日本建築学会構造系論文集, 第595号, pp.77-78, 2005.9

$EI$ : 杭の曲げ剛性  
 $P$ : 鉛直荷重  
 $K_c$ : 地盤反力係数  
 $u$ : 座屈変形

2

研究の背景 - 既往の研究 -

鋼管杭の弾性座屈荷重式の算出

鋼管杭の静的増分解析

杭-基礎部-上屋構造物系による遠心載荷実験

荷重-変位関係

杭の解析モデル

水平変位-軸変位関係

静的繰返し載荷

参考文献  
木村祥裕, 時松孝次: 液状化地盤において杭頭回転拘束を受ける鋼管単杭の曲げ座屈応力度, 日本建築学会構造系論文集, 第638号, pp.721-729, 2009.4

2

研究の背景 - 既往の研究 -

鋼管杭の弾性座屈荷重式の算出

鋼管杭の静的増分解析

杭-基礎部-上屋構造物系による遠心載荷実験

遠心載荷実験試験体全体

加振後の杭

参考文献  
木村祥裕, 小野原公一, 武本大聖, 田村修次: 鋼管杭の動座屈崩壊挙動を再現した遠心載荷実験, 鋼構造年次論文報告書, 第20巻, pp.77-82, 2011.11

2

### 研究の目的

**上屋・杭基礎-地盤系の遠心载荷実験**

- ◆ 液化地盤下において変動軸力を受ける円形中空断面杭の**動座屈性状**を把握する
- ◆ 鋼管杭の**動座屈判定指標**を提案する

**上屋・杭基礎-地盤系の動的解析**

- ◆ 遠心载荷実験の試験体を再現する解析モデルを作成して**動的解析**を行い、実験結果と比較して動的解析モデルの妥当性を検討する。

**杭の動座屈耐力の評価**

- ◆ 設計指針の座屈曲線を用いて、遠心载荷実験及び動的解析により算出した**動座屈耐力**を評価する。



試験体写真

3

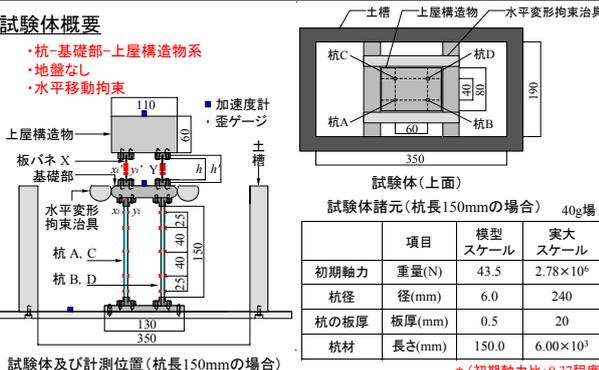
### 上屋・杭基礎系の遠心载荷実験(無地盤の場合)

- 地盤なしの場合の試験体概要
- 杭の作用軸力の算出方法
- 外力と軸応力の相関
- 遠心载荷実験における相似則の適用性の検討

### 遠心载荷実験概要(地盤なし)

**試験体概要**

- ・杭-基礎部-上屋構造物系
- ・地盤なし
- ・水平移動拘束



試験体(上面)

試験体諸元(杭長150mmの場合) 40g場

項目	模型スケール	実大スケール	
初期軸力	重量(N)	43.5	2.78×10 <sup>6</sup>
杭径	径(mm)	6.0	240
杭の板厚	板厚(mm)	0.5	20
杭材	長さ(mm)	150.0	6.00×10 <sup>3</sup>

※(初期軸力比:0.37程度)

試験体及び計測位置(杭長150mmの場合)

4

### 遠心载荷実験概要(地盤なし)

**実験概要**

- ・杭-基礎部-上屋構造物系
- ・地盤なし
- ・水平移動拘束

地震動により上屋に**慣性力**が作用する。

↓

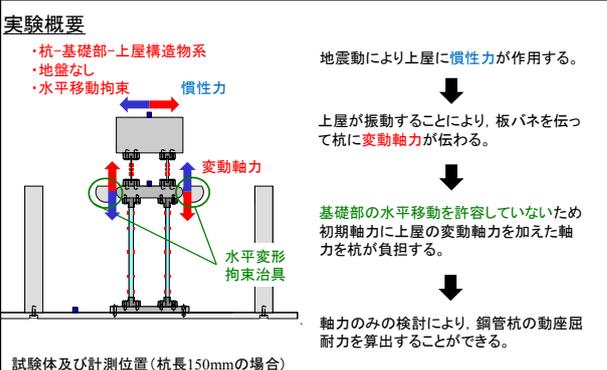
上屋が振動することにより、板バネを伝って杭に**変動軸力**が伝わる。

↓

基礎部の水平移動を許容していないため初期軸力に上屋の変動軸力を加えた軸力を杭が負担する。

↓

軸力だけの検討により、鋼管杭の動座屈耐力を算出することができる。



試験体及び計測位置(杭長150mmの場合)

5

### 遠心载荷実験概要(地盤なし)

**試験体/パラメータ**

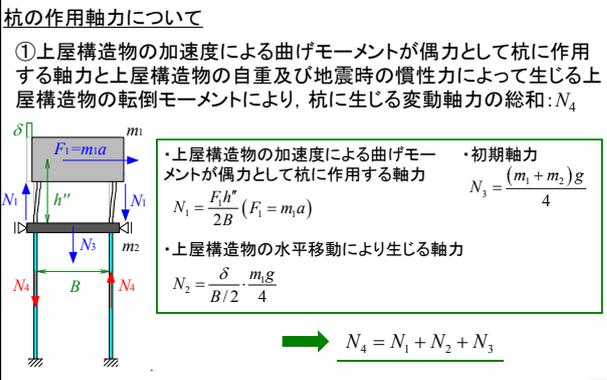
試験体	杭材	杭材長さ l (mm) (細長比)	文献	初期軸力比	板バネ長さ h (mm)	入力波 (最大加速度) a (m/s <sup>2</sup> )	加振後の杭の性状
Case1-1	アルミ	6000 (76.8)	14)	0.37	1800	sweep (1.0) (2.5)	弾性崩壊
Case1-2	アルミ		-	0.37	1800	sweep (4.5)	崩壊
Case1-3	アルミ		14)	0.37	1400	sweep (1.0) (2.5)	弾性崩壊
Case1-4	アルミ	9600 (123)	-	0.37	1400	sweep (3.0)	崩壊
Case1-5	アルミ		14)	0.37	1800	sweep (1.0) (1.8)	弾性崩壊
Case1-6	アルミ		-	0.37	1400	sweep (1.0)	弾性
Case1-7	真鍮	-	-	0.13	1400	sweep (1.0) (5.5)	弾性崩壊

6

### 遠心载荷実験における相似則の適用

**杭の作用軸力について**

① 上屋構造物の加速度による曲げモーメントが偶力として杭に作用する軸力と上屋構造物の自重及び地震時の慣性力によって生じる上屋構造物の転倒モーメントにより、杭に生じる変動軸力の総和:  $N_4$



・上屋構造物の加速度による曲げモーメントが偶力として杭に作用する軸力

$$N_1 = \frac{F_1 h''}{2B} \quad (F_1 = m_1 a)$$

・初期軸力

$$N_3 = \frac{(m_1 + m_2)g}{4}$$

・上屋構造物の水平移動により生じる軸力

$$N_2 = \frac{\delta}{B/2} \cdot \frac{m_2 g}{4}$$

→  $N_4 = N_1 + N_2 + N_3$

7

遠心载荷実験における相似則の適用

杭の作用軸力について

①上屋構造物の加速度による曲げモーメントが偶力として杭に作用する軸力と上屋構造物の自重及び地震時の慣性力によって生じる上屋構造物の転倒モーメントにより、杭に生じる変動軸力の総和： $N_4$

②板バネの軸歪による杭の作用軸力： $N_b$

杭の作用軸力 $N_b$ の算出方法

$$N_b = \frac{\varepsilon_{bc} + \varepsilon_{bc'}}{2} EA_b / 2 + M_2 / 4$$

基礎部の自重  
板バネの軸力

( $A_b$ :板バネの断面積,  $\varepsilon_{bc}, \varepsilon_{bc'}$ :板バネの両側の歪値)

板バネ  
板バネ拡大図

遠心载荷実験における相似則の適用

杭の作用軸力について

①上屋構造物の加速度による曲げモーメントが偶力として杭に作用する軸力と上屋構造物の自重及び地震時の慣性力によって生じる上屋構造物の転倒モーメントにより、杭に生じる変動軸力の総和： $N_4$

②板バネの軸歪による杭の作用軸力： $N_b$

③杭の軸歪から求めた杭の作用軸力： $N_p$

軸歪  $\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_{pxl} + \varepsilon_{pyl}}{2}$  (%)

アルミ材の応力-歪関係

杭  
杭拡大図

遠心载荷実験における相似則の適用

杭の作用軸力について

①上屋構造物の加速度による曲げモーメントが偶力として杭に作用する軸力と上屋構造物の自重及び地震時の慣性力によって生じる上屋構造物の転倒モーメントにより、杭に生じる変動軸力の総和： $N_4$

②板バネの軸歪による杭の作用軸力： $N_b$

③杭の軸歪から求めた杭の作用軸力： $N_p$

上記の3つの方法から算出した杭の作用軸力を比較することで遠心载荷実験における相似則は、**非弾性範囲においても適用できる**ことを明らかにする。

遠心载荷実験における相似則の適用

杭の作用軸力

Case1-2 Case1-3 Case1-5

$N_4$  応答時刻歴  
 $N_b$  応答時刻歴  
 $N_p$  応答時刻歴

杭長6m 板バネ45mm Sweep波450gal  
杭長6m 板バネ35mm Sweep波250gal  
杭長9.6m 板バネ45mm Sweep波180gal

遠心载荷実験における相似則の適用

杭の作用軸力

Case1-2 Case1-3 Case1-5

$N_4$  応答時刻歴  
 $N_b$  応答時刻歴  
 $N_p$  応答時刻歴

杭長6m 板バネ45mm Sweep波450gal  
杭長6m 板バネ35mm Sweep波250gal  
杭長9.6m 板バネ45mm Sweep波180gal

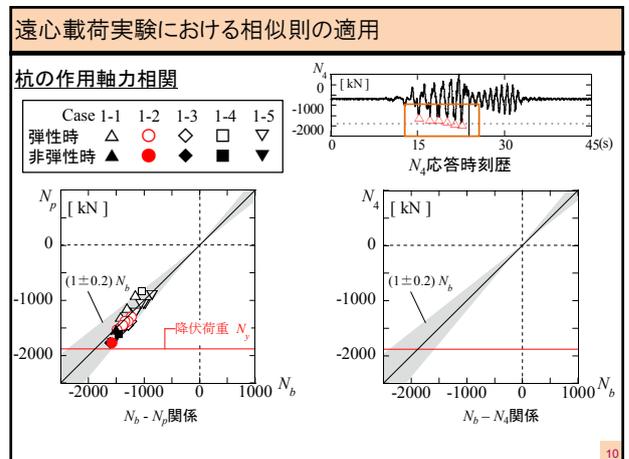
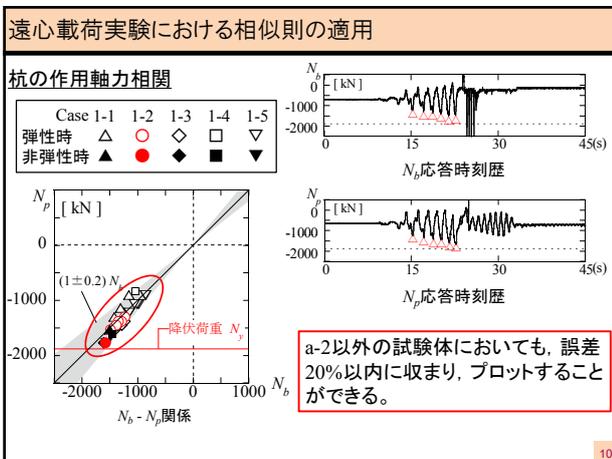
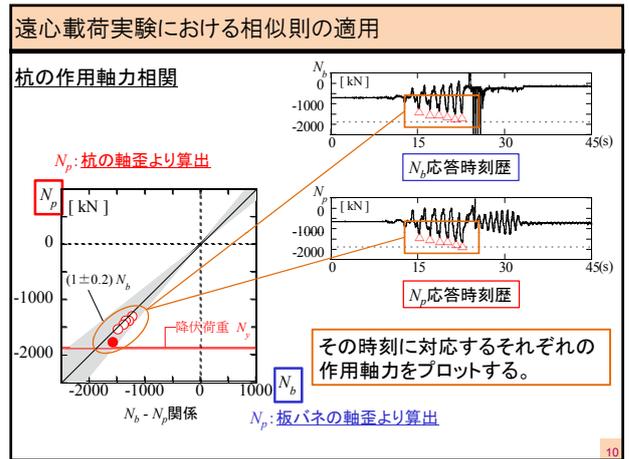
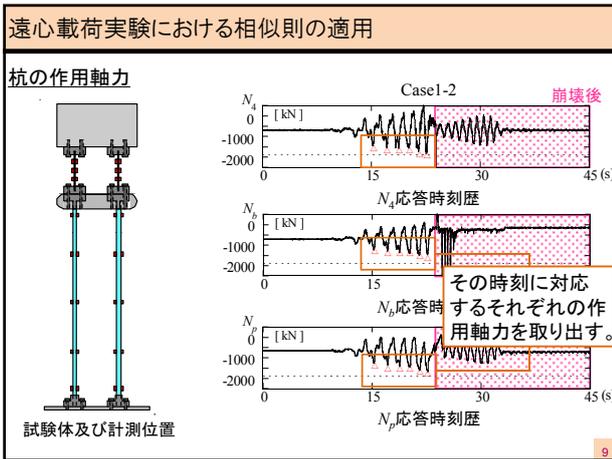
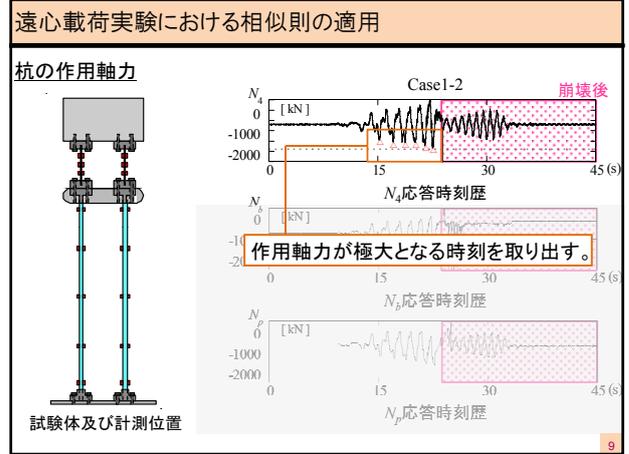
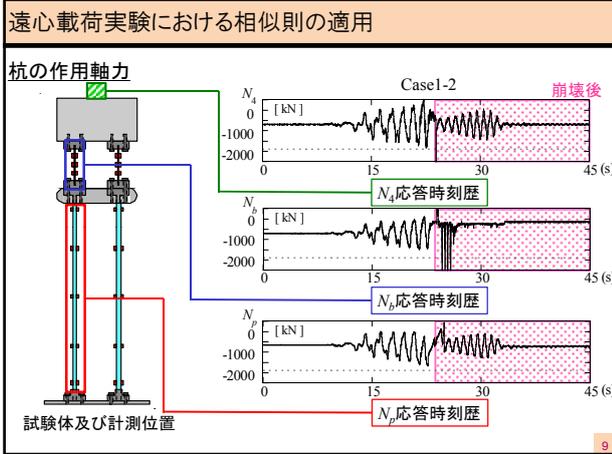
遠心载荷実験における相似則の適用

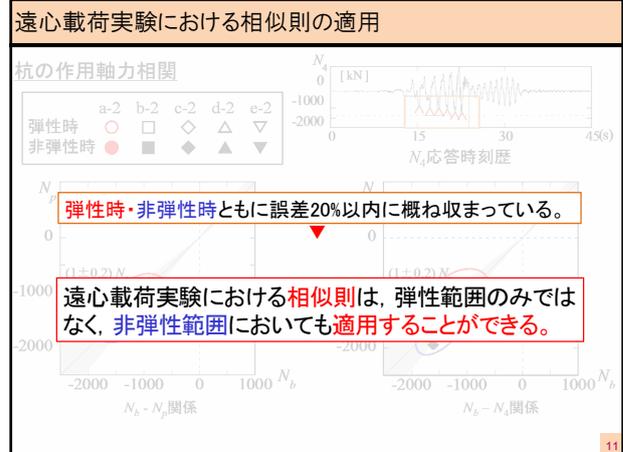
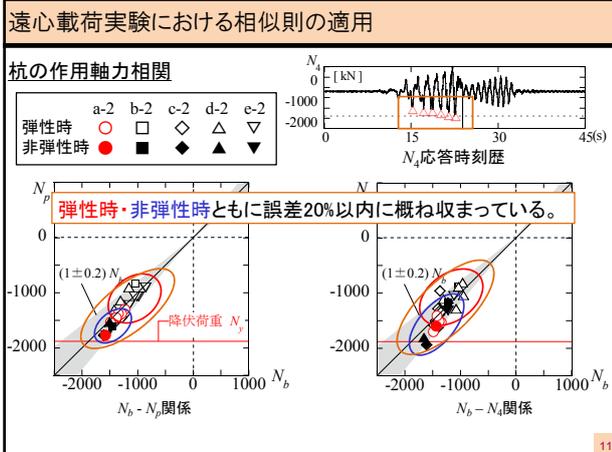
杭の作用軸力

Case1-2

$N_4$  応答時刻歴  
 $N_b$  応答時刻歴  
 $N_p$  応答時刻歴

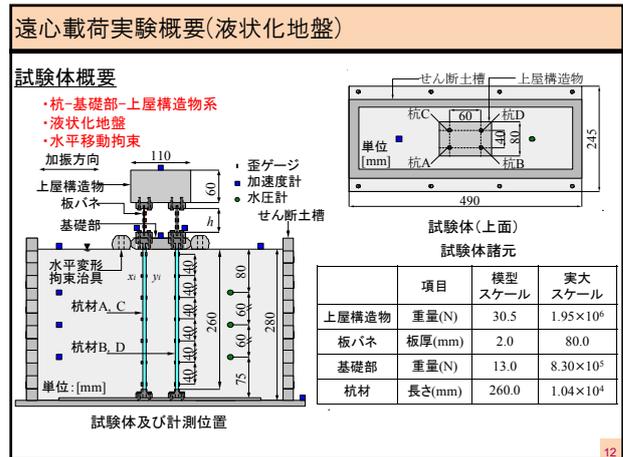
試験体及び計測位置





### 上屋・杭基礎-地盤系の遠心载荷実験(液状化地盤の場合)

- 試験体の座屈性状について
- 地盤なしの場合の座屈性状の相違について

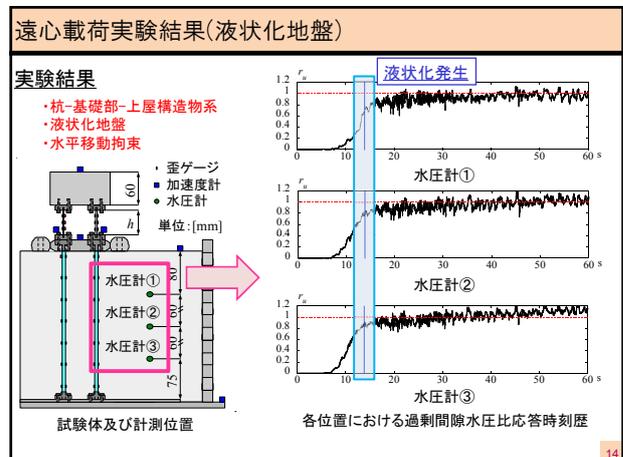


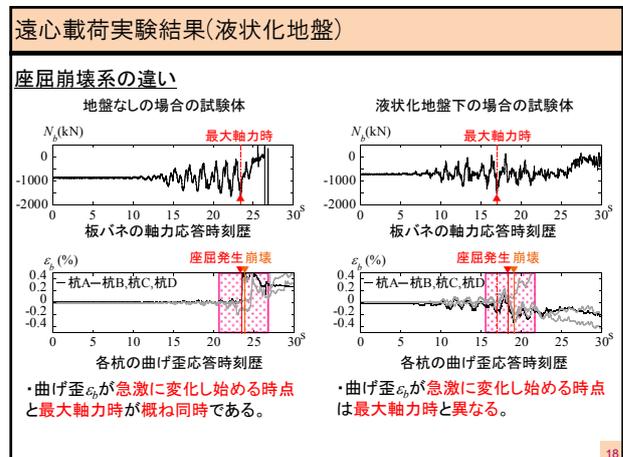
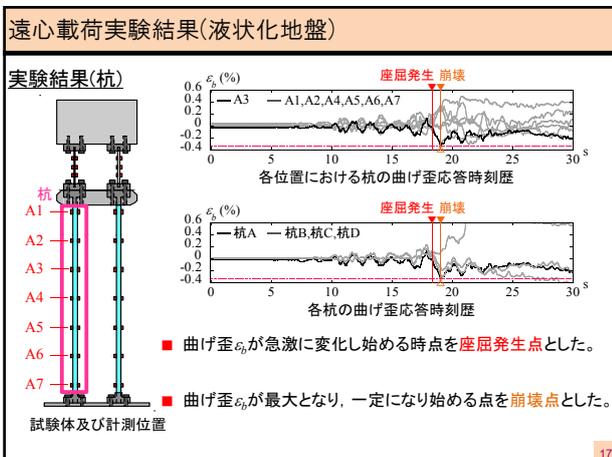
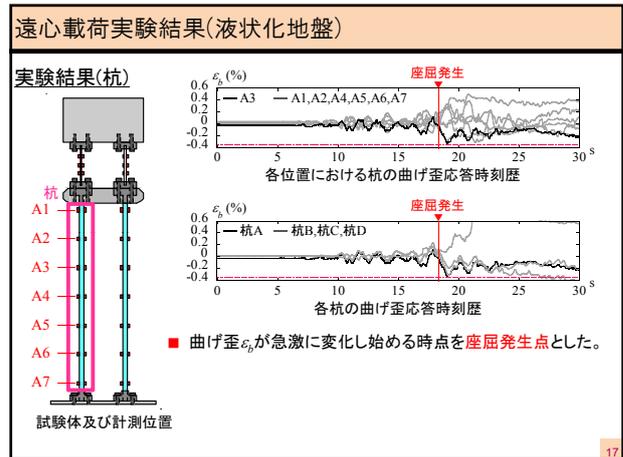
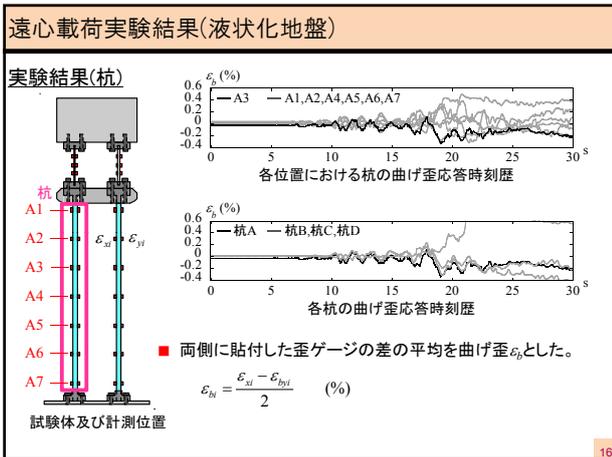
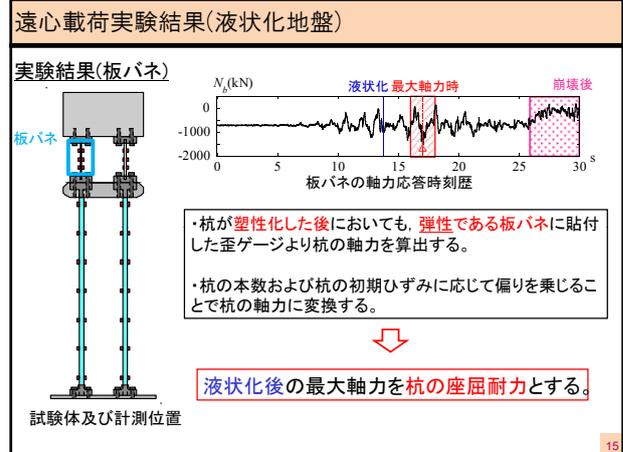
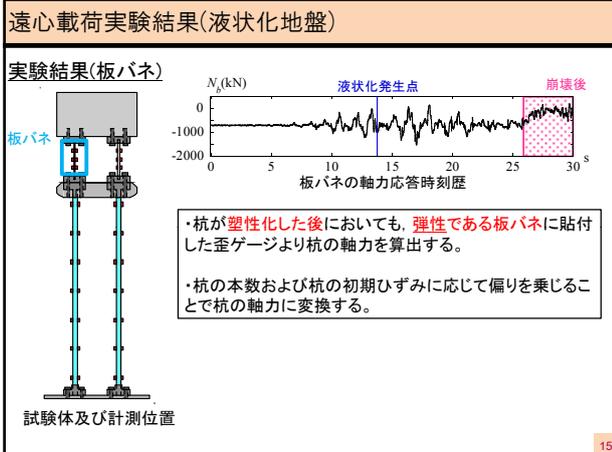
### 遠心载荷実験概要(液状化地盤)

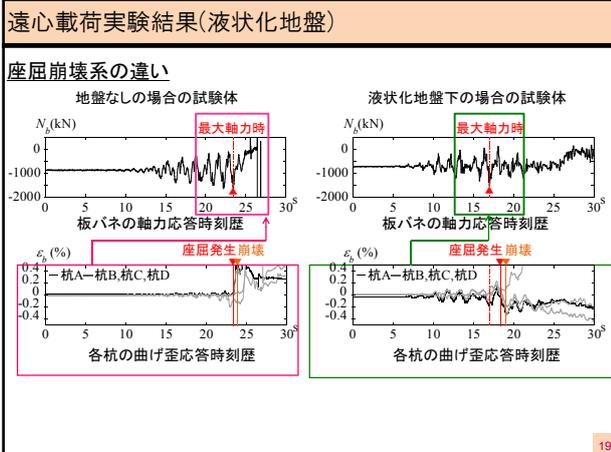
#### 試験体パラメータ

試験体	杭材	杭材長さ l (mm) (細長比)	文献	初期軸力比	板バネ長さ h (mm)	地盤の相対密度 Dr(%)	入力波 (最大加速度) a (m/s <sup>2</sup> )	加振後
Case2-1	アルミ	10400 (133)	15)	0.37	1400	30	sweep (3.0)	崩壊
Case2-2	アルミ			0.37	1800	30	sweep (3.0)	崩壊
Case2-3	アルミ			0.37	1400	60	sweep (3.0)	崩壊
Case2-4	アルミ			0.37	1400	30	臨海波 (11.0)	崩壊
Case2-5	真鍮			0.13	1400	30	sweep (3.0)	塑性化

13







### 上屋・杭基礎-地盤系の動的解析

- 解析モデル概要
- 無地盤の遠心載荷実験結果と動的解析結果の比較
- 地盤モデル概要
- 液化化地盤下の遠心載荷実験結果と動的解析結果の比較

### 解析モデル概要

実験の試験体(無地盤の場合)

材料	アルミ
ヤング率E(N/mm <sup>2</sup> )	65800
降伏応力度σ <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	136
降伏荷重N <sub>y</sub> (kN)	1880
上屋重量M <sub>1</sub> (kN)	976
基礎部重量M <sub>2</sub> (kN)	416

解析モデル諸元

解析モデル

(a)骨組 (b)単杭

$$u_1 = \frac{l}{1500} \sin \frac{\pi}{l} x$$

$$u_2 = \frac{l}{5000} \sin \frac{2\pi}{l} x$$

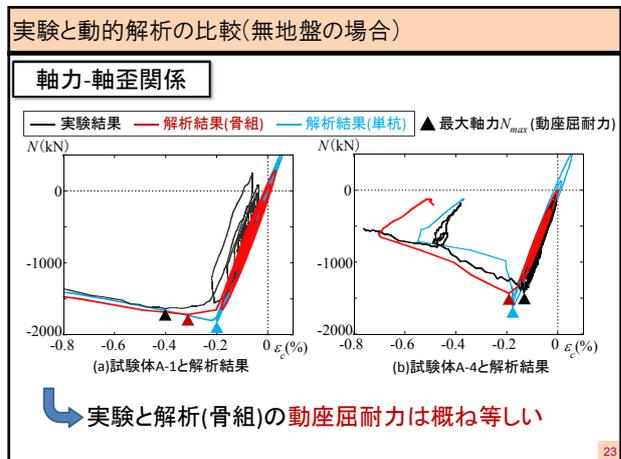
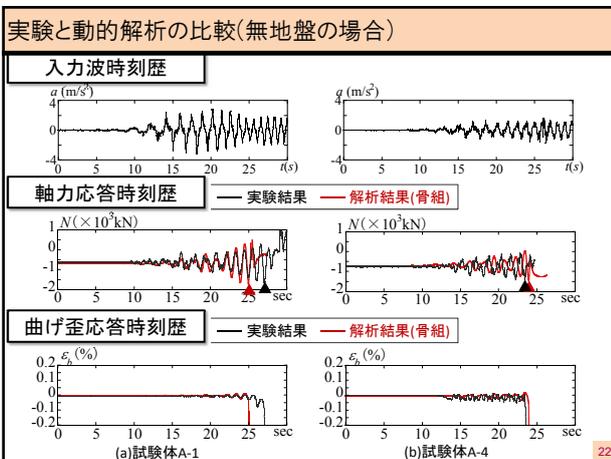
初期不整

20

### 試験体諸元

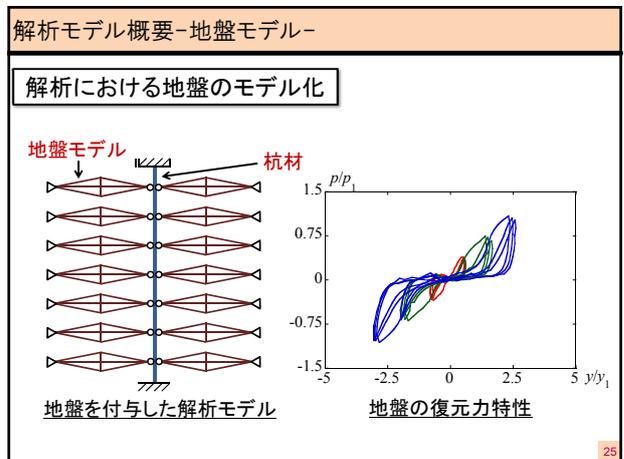
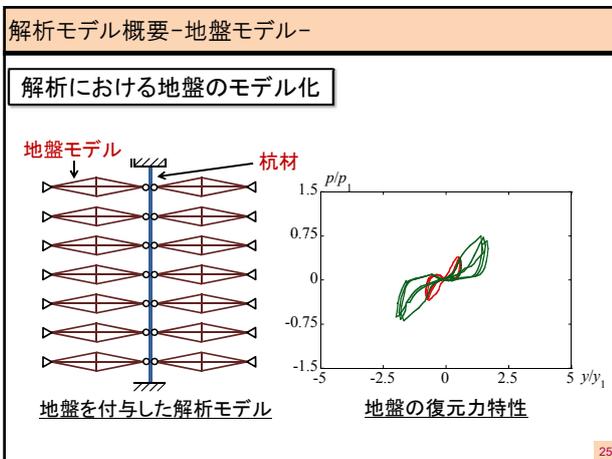
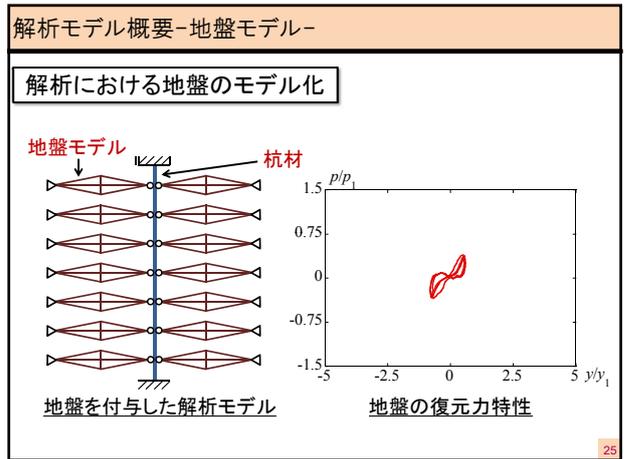
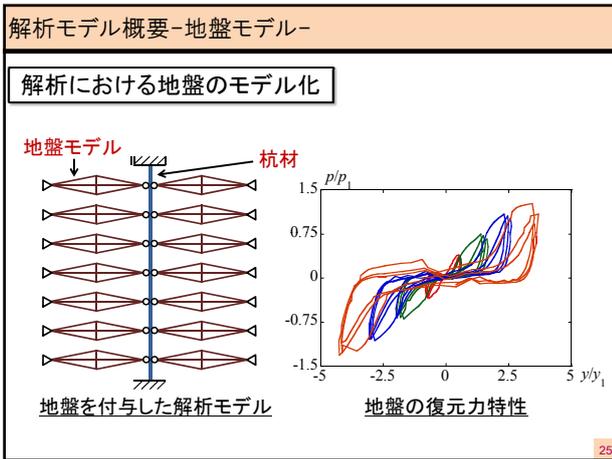
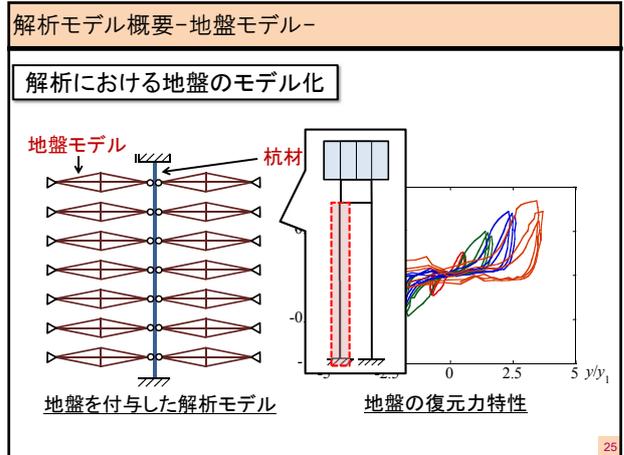
試験体	杭材	杭長 (細長比) l(mm)	杭径 (mm)	板厚 (mm)	板パネ (mm)	軸力比	地盤の 相対密度 (%)	入力波	入力最大 加速度 (m/s <sup>2</sup> )	
A-1	アルミ	6000 (76.8)	240	20	1800	0.37	地盤なし	sweep	2.5	
A-2					1800				4.5	
A-3					1400				2.5	
A-4					1800				1.8	
B-1	アルミ	10400 (133)	240	20	1400	0.37	30	臨海波	11.0	
B-2					1800					3.0
B-3					1400					60
B-4					1400					30

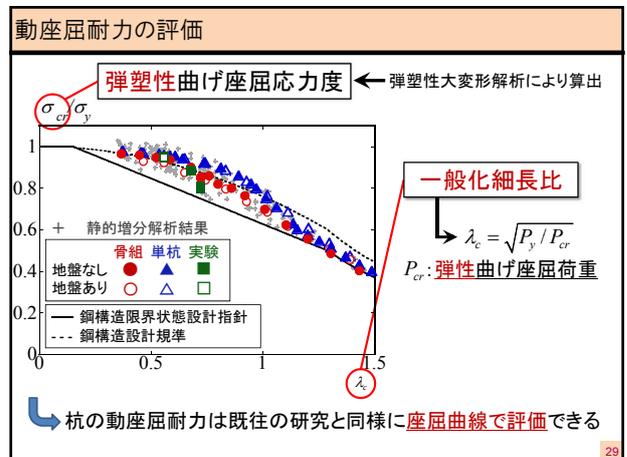
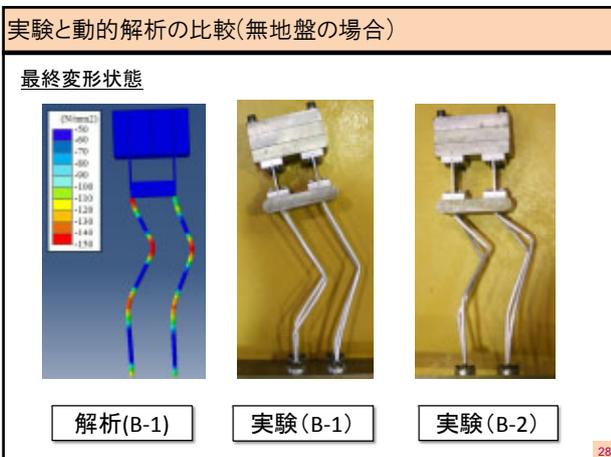
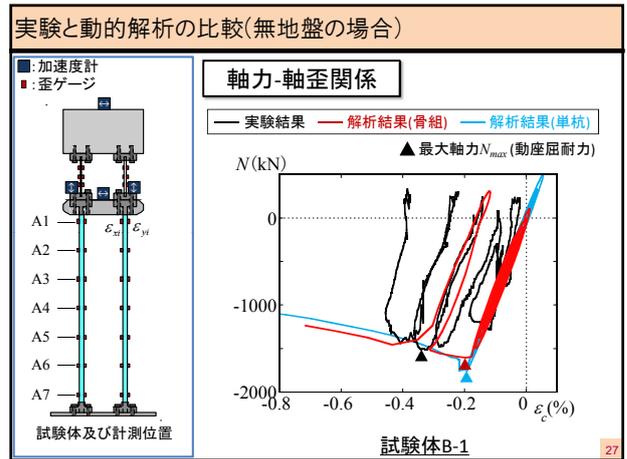
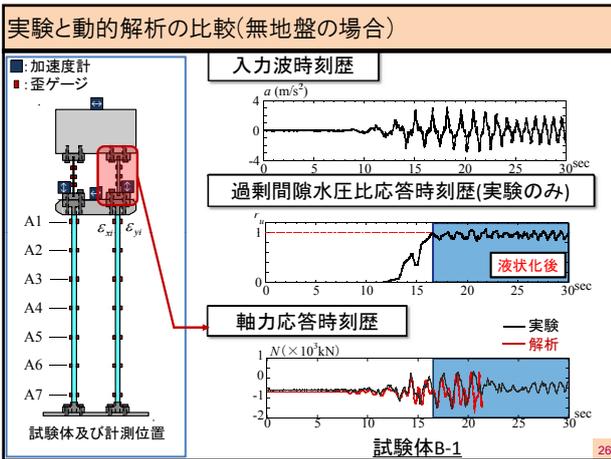
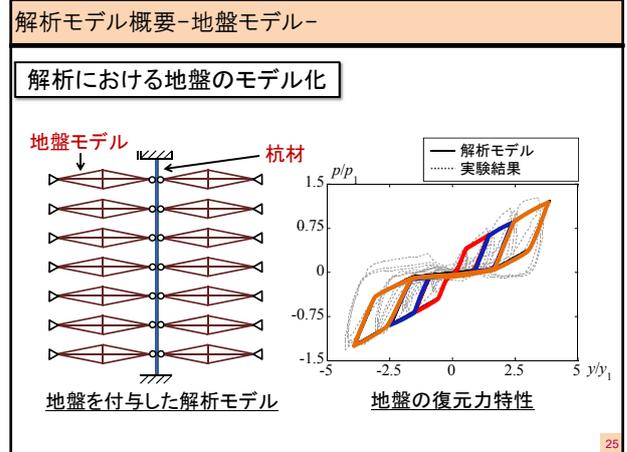
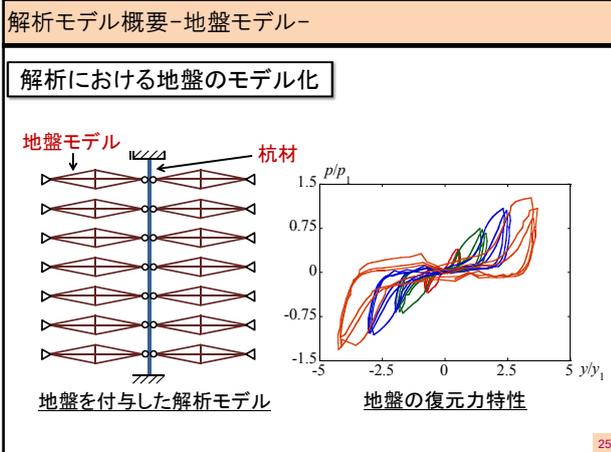
21



試験体諸元

試験体	杭材	杭長 (細長比) l(mm)	杭径 (mm)	板厚 (mm)	板バネ (mm)	軸力比	地盤の 相対密度 (%)	入力波	入力最大 加速度 (m/s <sup>2</sup> )
A-1	アルミ	6000 (76.8)	240	20	1800	0.37	地盤なし	sweep	2.5
A-2					1800				4.5
A-3					1400				2.5
A-4					1800				1.8
B-1	アルミ	10400 (133)	240	20	1400	0.37	30	臨海波	11.0
B-2					1800		30		
B-3					1400		60		
B-4					1400		30		





## まとめ

- ◆遠心载荷実験により、上屋と基礎部の自重及び上屋の変動軸力を受ける杭の動座屈発生メカニズムを明らかにした。また、遠心载荷実験において杭が塑性化する範囲まで相似則が適用できることを示した。
- ◆遠心载荷実験で用いられた試験体を再現する解析モデルを作成して動的解析を行い、上屋構造物の曲げ変形に伴う変動軸力を受ける円形中空断面杭の座屈性状を明らかにした。
- ◆遠心载荷実験及び動的解析によって算出される座屈応力度を、設計指針の座屈曲線により評価できることを示した。

29

## 今後の課題

- ◆複数の杭が配置された大規模構造物を想定した遠心载荷実験を行い、地盤の液状化に伴う杭の損傷の進展と構造物の傾斜・倒壊過程を明らかにする。
- ◆東海・東南海・南海地震を想定した複数回地震動を受ける構造物下の杭の損傷過程を明らかにし、大地震に対する杭の設計クライテリアを明らかにする。

29