

# 東海・東南海・南海巨大地震における都市型建造物の杭基礎による連鎖倒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 教授 木村祥裕

## 概要：

1995年の兵庫県南部地震、2006年の中越沖地震、2011年の東北地方太平洋沖地震、2016年の熊本地震などの巨大地震により地盤の液状化による杭基礎の被害が数多く生じた。今後30年で70%の確率で生じるといわれている東海・東南海・南海地震ではこれらの地震被害を超える規模の被害が予想されている。

本研究では、巨大地震により地盤が液状化し、都市型建造物の杭基礎の損傷により、連鎖的に倒壊する可能性を検討するために、遠心载荷実験及び有限要素解析を行う。遠心载荷実験では、地震動による上屋構造物の応答により杭に動的な変動軸力が作用し、動座屈崩壊するメカニズムを解明する。次に、このような液状化地盤と杭基礎からなる有限要素解析モデルを構築し、地盤剛性や杭細長比、上屋応答などの違いによる杭の動的崩壊挙動を定量的に明らかにする。その結果、1)遠心载荷実験における試験体を再現する解析モデルを作成して妥当性を示した。2)動的解析によって算出される動座屈応力度を、設計指針の座屈曲線により評価できることを示した。

キーワード：巨大地震、液状化、鋼管杭基礎、曲げ座屈

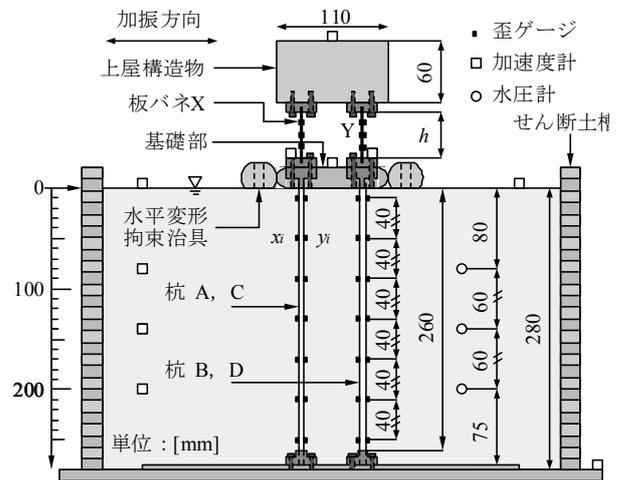
## 1. 序

地震時に上屋構造物の慣性力によって生じる転倒モーメントが偶力として杭に作用すると、大きな圧縮荷重を受けることから、杭に曲げ座屈を生じる可能性が指摘されている<sup>1)3)</sup>。そのため既往の研究では、単杭モデルを用いた静的増分解析<sup>1)</sup>及び上屋-杭基礎系の遠心载荷実験<sup>2), 3)</sup>により、円形中空断面杭の動座屈性状を明らかにしている。しかし、上屋-杭基礎系の解析モデルにより動座屈解析を行った研究は見られない。本論文では、液状化地盤における鋼管杭の動座屈挙動を明らかにするために、上屋-鋼管杭・地盤系の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、実験結果と比較することで解析モデルの妥当性を示す。また、動的解析によって算出される動座屈耐力を、文献1)と同様に設計指針の座屈曲線を用いて評価する。

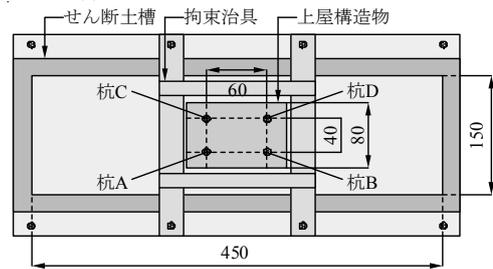
## 2. 遠心载荷実験概要

図1に試験体及び計測位置を示す。試験体は杭-基礎部-上屋構造物系とし、基礎部及び上屋構造物の幅は80mm、長さは110mmである。2.2節では地盤がない場合、2.3節では完全飽和地盤で加振中に液状化する場合を対象と

している。完全飽和地盤には、豊浦硅砂を用いた。手前



(a) 土槽全体 (模型スケール)



(b) 土槽平面図 (模型スケール)

図1 試験体及び計測位置

表 1 試験体パラメータ

試験体	杭材	杭長 $l$ (mm) (細長比)	杭径 (mm)	板厚 (mm)	板バネ長さ $h$ (mm)	地盤の 相対密度 (%)	入力波	入力最大 加速度 ( $m/s^2$ )	軸力比
A-1	アルミ	6000 (76.8)	240	20	1800	無地盤	sweep	2.5	0.37
A-2					1400			4.5	
A-3					1800			2.5	
A-4		9600 (123)			30	1800		1.8	
B-1		1400				3.0			
B-2		1800				3.0			

※実大スケール

の 2 本の杭について左側を A, 右側を B とし, それぞれの奥の杭を C, D とする。また, 板バネについて左側を X, 右側を Y とする。歪ゲージは, 図 1 のように杭の両面をそれぞれ  $x_i, y_i$  とし, 杭については  $i=1\sim 7$ , 板バネについては上端から  $i=1\sim 3$  とする。また, 加速度計は土槽底部 (杭下端), 基礎部, 上屋上部の 3 箇所に, そして 2.3 節ではこれらに加えて地盤中に加速度計, 水圧計を地表面から 80, 140, 200mm の位置にそれぞれ設置している。本実験では, 杭の動座屈挙動を抑えるために, 基礎部の水平変位を固定し, 上屋及び基礎部の自重と上屋の水平力による転倒モーメントに伴う偶力を軸力として杭に作用させることとした。そのため, 実現象と一対一に整合するシミュレーションではなく, 液状化地盤における杭の動座屈挙動の確認に限られている。試験体は, 板バネの曲げ剛性に比べ基礎部の曲げ剛性が非常に大きい。そのため, 板バネ基部の曲げは生じず, また, 動座屈発生までは高い軸剛性を有する杭が基礎部のロッキング振動を抑えていることを確認している。杭に作用する軸力としては, 上屋構造物, 板バネ, 基礎部の自重に加え, 上屋構造物の水平変形による転倒モーメントによる変動分である。遠心载荷実験は, 京都大学防災研究所の遠心载荷装置を用いて 40g 場で行った。以下, 実大スケールで示す。

表 2 に試験体一覧を示す。A シリーズは地盤がない場合, B シリーズは完全飽和地盤を付与した場合である。試験体の初期軸力比は, 実構造物における鋼管杭の設計軸力を参考に 0.37 程度とした。杭長は地盤なしの場合 6000mm, 9600mm とし, 地盤ありの場合では 10400mm とした。

入力波として用いた sweep 波は, 加振開始から 50 秒間で入力波の周期を 2.0 秒から 0.3 秒まで変化させている。入力時の加速度振幅は, 杭が弾性保持するレベル, 動座屈により崩壊するレベルを想定し,  $1.0\sim 5.5m/s^2$  とした。図 2 に入力波の時刻歴を示す。また, この一質点系の加速度応答スペクトルを図 3 に, 基礎部と上屋構造物の伝達関数  $G_u$  を図 4 に示す。図 3 で減衰定数を  $h=0.02$  としている。上屋構造物の固有周期は, 試験体の質量と板バ

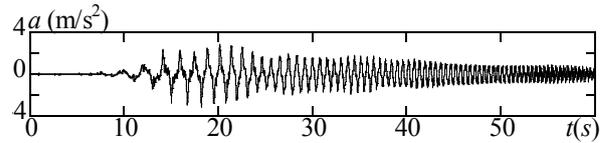


図 2 入力波時刻歴

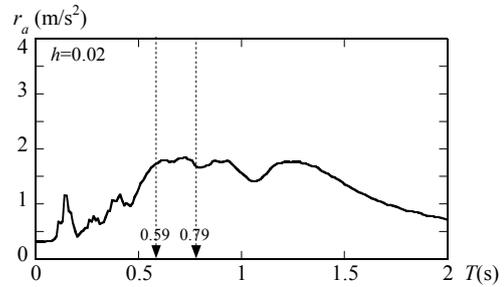


図 3 入力波応答スペクトル

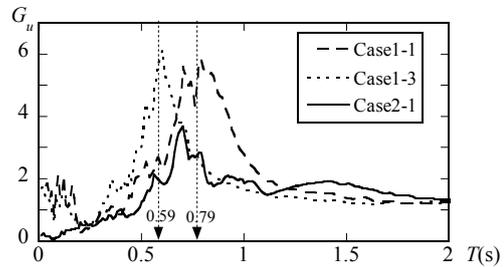


図 4 基礎部と上屋構造物の伝達関数

ネの曲げ剛性からなる一質点系として理論的に算定すると, 板バネ長さ 1400mm, 1800mm の場合, それぞれ 0.58sec, 0.78sec である。また, 図 4 の基礎部と上屋構造物の伝達関数  $G_u$  が卓越する周期は, 板バネ長さ 1400mm, 1800mm の場合, 0.59sec, 0.79sec となっており, 一質点系の固有周期に概ね等しいことから, これらを図中の ▼ で示している。

### 3. 動的解析

#### 3.1 解析モデル概要

図 5(a), (b) に解析モデルを示す。骨組の解析モデルは, 実験の試験体を再現するため, 上部構造-板バネ-基礎部-杭材から構成されており, 板バネ, 基礎部及び杭材は梁

要素, 上部構造は4節点シェル要素である。杭下端は固定端であり, 基礎部の水平移動は拘束されているが回転は許容されている。なお, 図5における杭長 $l$ は, 後述する表1に示す試験体の杭長と等しくした。質量の配置を図5(a)の●のように設定し, 試験体の固有周期と概ね等しいことを確認している。また, 既往の研究<sup>1)</sup>における静的増分解析では, 単杭モデルによる検討を行っており, 本論文においても図5(b)に示す単杭の解析モデルによる検討を比較として行った。単杭モデルの両端は固定端である。

図6に, 遠心载荷実験において杭材として用いたアルミ材の材料試験結果及び解析における杭材の材料特性を示す。材料試験結果より, アルミ材は明瞭な降伏点を持たないRound House型であることから, 降伏応力度 $\sigma_y$ を0.2%オフセット法により求めた。降伏応力度 $\sigma_y$ , 引張強度 $\sigma_u$ , ヤング率 $E$ , 歪硬化勾配 $E_{st}$ は図中の表に示すとおりである。歪硬化勾配 $E_{st}$ は, 降伏応力度 $\sigma_y$ と, 引張強度 $\sigma_u$ を結んだ直線の傾きにより算出した。

図7に杭材の初期不整を示す。初期不整は弾性固有値解析から得られる1次, 2次モードを元にsine関数で表し, 最大値を $l/1500$ ,  $l/5000$ としている<sup>1)</sup>。

図8に地盤を付与した解析モデル, 図9に地盤モデルの詳細, 図10に地盤モデルの復元力特性と文献4)による地盤反力の履歴曲線を示す。地盤を付与した骨組モデルの解析においては, 2本の杭それぞれに図8に示すようなモデルを用いる。図10の縦軸は地盤反力 $p$ , 横軸は杭の水平変位 $y$ であり, それぞれ基準反力 $p_1$ 及び基準変位 $y_1$ で除して無次元化している<sup>1)</sup>。図中の実線は図9に示す地盤モデルの中央の節点に $y/y_1 = \pm 1.5, \pm 2.5, \pm 4.0$ の繰り返し水平変位を与えたときの履歴を示しており, 点線は文献4)に基づく地盤の履歴<sup>4)</sup>を示している。この地盤の履歴において, 変位が生じても地盤反力がほとんど生じない領域が見られる。これは繰り返し変形により地盤が緩んだことを示唆している。このような地盤の複雑な挙動を再現するため, 地盤モデルは図9に示すような横材・縦材・杵材からなるモデルとした。ここで, 地盤モデルは, 杭両側に半無限の地盤を想定しているため, 杭間の地盤の影響は考慮しない。横材及び縦材は弾性体であり, 杵材は弾塑性体としている。縦材・横材のヤング率を小さくすることにより, ひし形のモデルが膨らむときにはほとんど反力が生じず, 引張られる際に杵材の剛性により反力が生じる。杵材が塑性化すると, 再度同様の変位が生じても反力はほとんど生じず, 図10に示すような履歴となる。解析における地盤剛性の求め方としては, 文献5)を参考に, 地盤の相対密度から土槽中間における $N$ 値を算出し, その値を地盤反力係数 $K_c$ <sup>1)</sup>に換算する方法を採用した。地盤反力係数分布は三角形分布を仮定している。解析において, 加振開始時から液状化地盤を想定して地盤剛性を設定しており, 液状化による地盤反力係数 $K_c$ <sup>1)</sup>の低減率は基礎構造設計指針<sup>6)</sup>を参考に

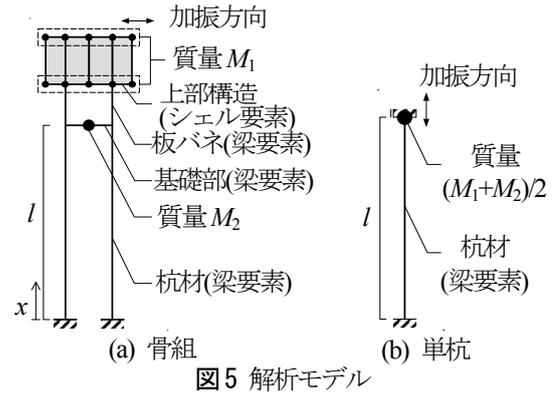


図5 解析モデル

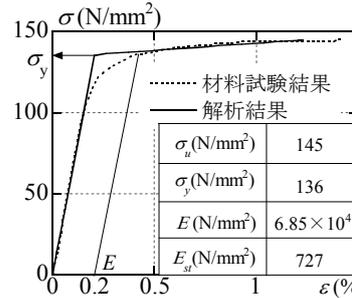


図6 材料特性

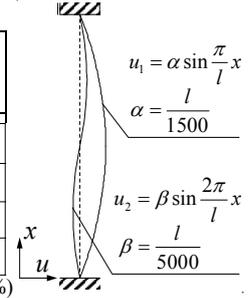


図7 初期不整

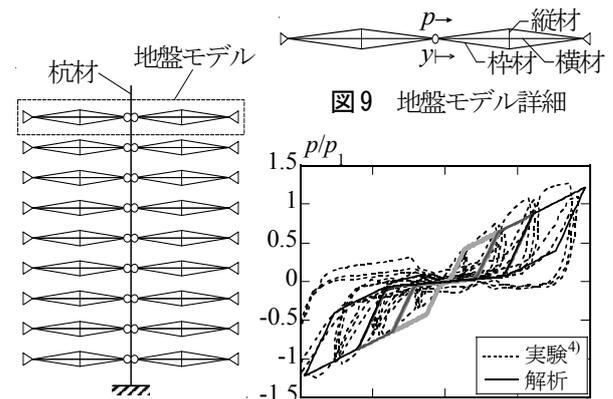


図8 地盤を付与した解析モデル

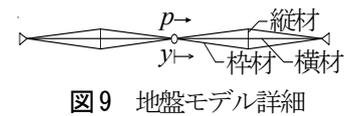


図9 地盤モデル詳細

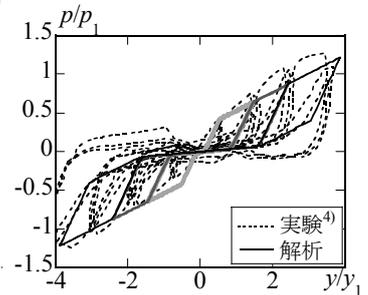


図10 地盤の復元力特性

0.05とした。地盤の質量は考慮しておらず, 解析において地盤モデルは抵抗要素としてのみ機能するものとしている。

表1に文献2), 3)における試験体諸元を示す。解析モデルは, 実験結果と比較するために実験の試験体と同じ断面形状とした。

### 3.2 無地盤下の遠心载荷実験と動的解析

図11(a), (b)に杭に作用する軸力応答時刻歴を示す。図中の▲は解析における最大軸力時, ▲は実験における最大軸力時であり, このときの軸力を動座屈耐力とした。実験結果, 解析結果ともに, 加振に伴う上屋構造物の曲げ変形により作用軸力が増幅し, 最大軸力に達した後急激に軸力が低下している。

図 12(a), (b) に軸力-軸歪関係を示す。縦軸は杭に作用する軸力  $N$ ，横軸は杭の平均軸歪 $\varepsilon_c$ である。試験体 A-1 において、実験結果及び骨組の解析結果は、塑性化後に緩やかに作用軸力が増加し、最大耐力に達した後、徐々に耐力が低下しているが、単杭の解析結果は、弾性時に最大耐力に達し、塑性化後の耐力の増加は見られない。細長比が大きい試験体 A-4 においては、杭の曲げ剛性が小さいことから、実験結果、解析結果ともにほぼ弾性範囲で最大耐力を迎え、その後耐力が低下している。また、動座屈耐力は、骨組の解析結果と実験結果は概ね等しいものの、単杭の解析結果は実験結果に比べて大きい。これは、骨組と単杭の杭頭の固定度の違いが影響しているものと思われる。

### 3.3 液状化地盤下の遠心载荷実験と動的解析の比較

図 13(a), (b)に杭に作用する軸力応答時刻歴を示す。液状化後における最大軸力を動座屈耐力とした。また、図 14(a), (b) に軸力-軸歪関係を示す。縦軸及び横軸は、図 12 と同様である。地盤を付与した杭の解析において、座屈後に杭の水平変位が大きくなると、ひし形地盤モデルの形が伸びきり、再度地盤モデルが膨らむときにひし形の形状を保持できなくなることから、最大軸力後の履歴は図 14 のように一度ループしたところで解析が止まっているが、座屈耐力及び最大耐力以降の座屈挙動については、実験結果を概ね捉えている。

図 15(a)~(c)に解析と実験の最終変形状態の比較を示す。図 15(a)は解析モデルの軸心力コンター図である。実験、解析ともに杭頭から杭中間部にかけて曲げ変形が大きくなっており、概ね同様の変形状態を示している。

## 4. 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動座屈耐力評価

### 4.1 実験と解析における動座屈耐力の比較

図 16(a), (b)に実験と解析の動座屈耐力の比較を示す。図の縦軸は実験の動座屈耐力  $N_{cr0,db}$ ，横軸は解析の動座屈耐力であり、それぞれ降伏荷重  $N_y$  で除して無次元化している。また、網掛け部分は誤差 $\pm 10\%$ の範囲を示している。図 16(a)において、全てのプロットが網掛け部分に収まっていることから、実験と骨組による解析の動座屈耐力は概ね等しい。単杭は杭頭が完全固定であるのに対し、骨組は基礎部の回転が許容されているため、基礎部全体が回転するとき、杭頭で剛体回転が生じる。そのため、単杭よりも骨組の方が杭頭の固定度が小さくなっている。したがって、骨組による解析に比べて単杭による解析の動座屈耐力が大きくなっており、図 16(b)において、一部のプロットが網掛け部分から外れている。以上より、本論文における骨組の動的解析により、遠心载荷実験の動

座屈挙動を再現できることを示した。

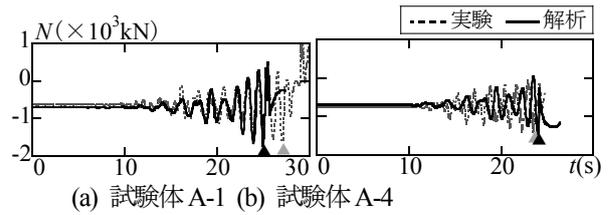


図 11 軸力応答時刻歴

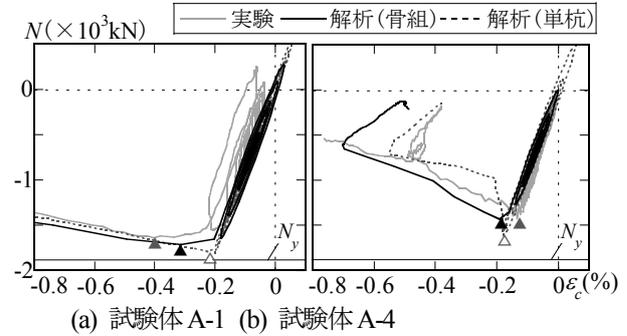


図 12 軸力-軸歪関係

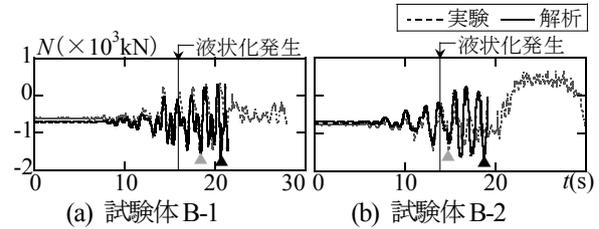


図 13 軸力応答時刻歴

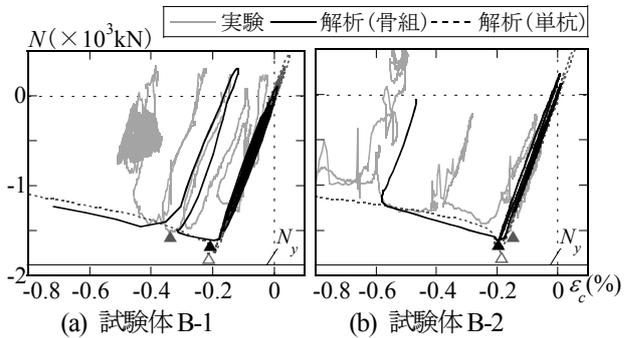


図 14 軸力-軸歪関係

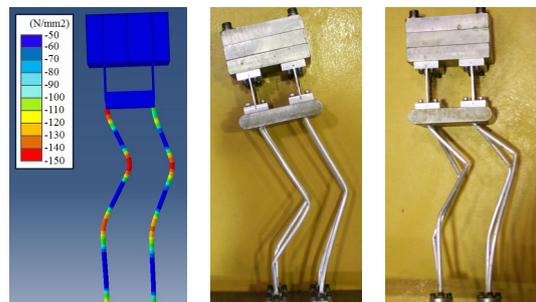


図 15 試験体の最終変形状態

### 4.2 円形中空断面杭の動座屈耐力評価

図 17 に解析及び実験から求められる動座屈応力度と、鋼構造限界状態設計指針<sup>7)</sup>及び鋼構造設計規準<sup>8)</sup>による座屈曲線との比較を示す。縦軸は、杭の動座屈耐力  $N_{cr,d}$  を杭の断面積  $A$  で除して求めた動座屈応力度  $\sigma_{cr}$  を、降伏応力度  $\sigma_y$  で除したものである。横軸は一般化細長比  $\lambda_c$  である。杭の弾性座屈荷重  $N_{cr,s}$  は、無地盤の場合は両端固定の弾性座屈荷重式を用い、液状化地盤の場合は文献9) による弾性座屈荷重式により算出する。単杭の解析結果は、一部鋼構造設計規準の座屈曲線を上回っているが、骨組の解析結果は概ね両座屈曲線の間にとまっており、杭の動座屈耐力は鋼構造限界状態設計指針<sup>7)</sup>の座屈曲線を下限値として安全側に評価できる。

- 4) 時松孝次, 鈴木比呂子, 佐伯英一郎: 実大杭の杭頭および地中水平載荷試験に基づく地盤反力変位関係, 日本建築学会構造系論文集第, 562 号, pp53-pp58, 2002.12
- 5) 田村修二, 肥田剛典: 地震時土圧と側面摩擦力を考慮した応答変位法による杭応力評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 670 号, pp2115-pp2121, 2011.12
- 6) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針・同解説, 2001.10
- 7) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 1998.10
- 8) 日本建築学会: 鋼構造設計規準, 2005.9
- 9) 木村祥裕, 田村修次, 岸野泰典: 遠心載荷実験による液状化地盤下での円形中空断面杭の動座屈性状, 鋼構造年次論文報告集, 第 21 巻, pp294-pp299, 2013.11

5. 結

- 1) 遠心載荷実験における試験体<sup>2), 3)</sup>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解析モデルの妥当性を示した。
- 2) 動的解析によって算出される動座屈応力度を、文献 1)と同様に設計指針<sup>7)</sup>の座屈曲線により評価できること示した。

[参考文献]

- 1) 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, pp73-pp78, 2005.9
- 2) 木村祥裕, 小野原公一, 武本大聖, 田村修次, 肥田剛典: 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集, 第 19 巻, pp77-pp82, 2011.11
- 3) 木村祥裕, 田村修次, 小野原公一, 栗木周: 遠心載荷実験による液状化地盤における鋼管杭の動座屈崩壊挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第 20 巻, pp795-pp798, 2012.11

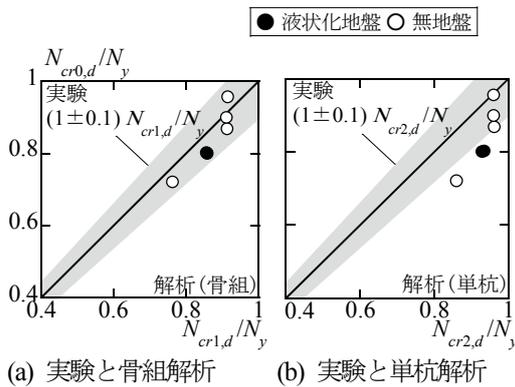


図 16 実験と解析の動座屈耐力の比較

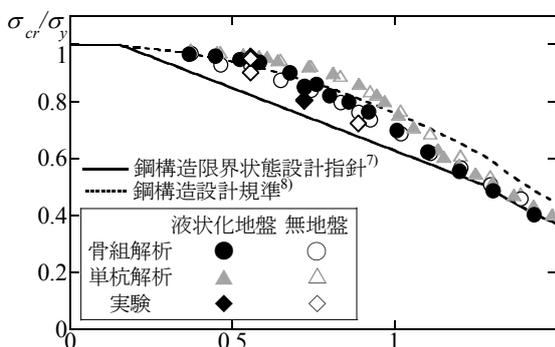


図 17 動座屈応力度と設計式の比較