

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2011

課題番号：22560565

研究課題名（和文）液状化地盤における高靱性鋼管杭の連成動座屈発散現象に対する上屋応答の影響

研究課題名（英文）Effect of Structures Response on Dynamic Buckling of Steel Pile in Liquefied Soil

研究代表者

木村 祥裕 (KIMURA YOSHIHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60280997

研究成果の概要（和文）：

保有水平耐力の観点から靱性の高い鋼管杭を適用した場合でも、地盤の水平抵抗に期待して、杭基礎は設計されており、杭基礎の終局設計に対して早急な対応が必要である。液状化地盤等の軟弱地盤上にある高層建築物が都市直下巨大地震動を受けた場合に杭基礎の損傷・崩壊により倒壊に至る可能性を検討し、設計時には考慮されていない非構造部材が構造部材の地震応答性状に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In the previous papers, when slender steel piles beneath buildings experience high axial compression forces as a result of vertical loads increased by $P-\Delta$ effects with inertia forces acting on the buildings and then the soil liquefies, buckling of the piles occurred even though they are restrained laterally by the liquefied soil. In the real structures, the pile is subjected to the lateral and axial force during earthquake. This paper estimates the ultimate strength of slender piles in liquefied soil when steel pile subjected to vertical and horizontal load. The relationship between the axial force and the flexural moment of the slender piles and the soil-pile interaction is presented.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：建築構造

科研費の分科・細目：建築構造

キーワード：鋼管杭，液状化，動座屈，耐震性能

1. 研究開始当初の背景

液状化を発生する可能性がある砂地盤でも十分に地盤改良されないまま多くの高層マンションや高層事務所ビルが建設されている。その場合、高い剛性・耐力を有する杭基礎のみを用いて建築物を設計・施工される場合が多い。このような高層建築物で

は、架構の $P-\Delta$ 効果により激震時に杭基礎に大きな軸力変動が生じ、特定の杭に大きな圧縮荷重が作用する場合がある。さらに、地盤の間隙水圧比が上昇して液状化した場合、杭基礎に対する地盤の水平抵抗は急激に低下するために、杭基礎は曲げ座屈や杭頭局所変形等の損傷を生じることが明らか

にされている。

このような液状化地盤における杭の曲げ座屈の発生は杭の支持力を急激に低下させ、上屋構造の不同沈下を引き起こす。軟弱地盤上に建つ高層建築物でこのような損傷メカニズムが生じた場合、例えば小さな傾斜が生じた場合でも架構としての変形は大きくなり、復旧に多大な時間を要することから、その経済的被害は計り知れない。そして、液状化により地盤の水平抵抗が急激に低減した状態で、上屋構造の自重のみならず、架構の曲げ変形に伴う P- Δ 効果による変動軸力は杭基礎により大きな圧縮荷重として作用することから、これまで想定されていない急激な崩壊挙動を示す可能性がある。

一方、上屋構造・基礎構造の相互作用に関する研究は数多く見られ、杭基礎の終局設計の検討が行われつつあるものの、未だ途上段階である^{例えは¹⁾}。すなわち、保有水平耐力の観点から靱性の高い鋼管杭を適用した場合でも、地盤の水平抵抗に期待して、杭基礎は設計されており、杭基礎の終局設計に対して早急な対応が必要である。

しかし、上屋の応答が杭基礎の終局耐力に与える影響や基礎構造の崩壊によって上屋構造の倒壊の可能性を検討した研究は申請者以外ではほとんど見受けられない。

2. 研究の目的

これまで、液状化地盤における鋼管単杭を対象に、地盤の拘束効果及び誘発作用を考慮して、静的荷重を受ける場合の杭の全体座屈荷重の評価式を提案してきた。本研究では、これらの知見を踏まえて、激震時に液状化地盤における鋼管杭の崩壊メカニズムについて、未だ解明されていない下記の項目を明らかにした。

(1)液状化地盤において繰返し鉛直荷重を受ける鋼管単杭の杭頭局部座屈及び全体曲げ座屈の連成座屈挙動の把握

これまで、全体曲げ座屈が卓越する比較のスレンダーな杭を対象としてきたが、液状化層が薄い場合に生じうる杭頭での局部座屈と全体曲げ座屈との連成座屈について検討した。

(2)液状化地盤において動的周期鉛直荷重を受ける鋼管単杭の動座屈発散現象の解明

これまで、静的荷重を受ける場合について検討してきたが、地震動を模擬した動的荷重を受ける場合の動座屈挙動を明らかにする。静定荷重に比べてより低い荷重でも動座屈が生じ、水平変形が急激に増加してしまう可能性がある。そこで、杭の細長比や地盤反力係数、荷重周期等をパラメータとして動座屈を生じない安定荷重を明らかにした。

(3)縮小模型振動台実験による上屋応答の

変動軸力による杭基礎の全体曲げ座屈崩壊メカニズムの再現

(1)、(2)では鋼管単杭の性能評価を行ったが、ここでは上屋と杭基礎を模擬した縮小模型振動台実験により、杭の動座屈による崩壊メカニズムを再現し、(1)、(2)の性能評価の妥当性を検証した。

(4)水平・鉛直荷重を受ける鋼管杭の塑性変形性能と鉛直荷重支持限界性能評価

(1)~(3)では上屋の P- Δ 効果による変動軸力のみでも、鋼管杭が座屈する可能性を示し、その性能評価を行ってきたが、杭にはさらに水平荷重も作用する。(1)~(3)の知見を準用して、水平・鉛直荷重が作用した場合の杭の性能評価に、塑性変形性能及び鉛直荷重支持限界性能を用いる。

3. 研究の方法

(1)液状化地盤において繰返し鉛直荷重を受ける鋼管単杭の杭頭局部座屈及び全体曲げ座屈の連成座屈挙動の把握

既往の研究では、地盤が液状化した場合、水平抵抗が急激に低下することから、鉛直荷重のみでも杭基礎の崩壊を生じる可能性を示した。その際、全体曲げ座屈が卓越する比較のスレンダーな杭を対象としてきた。

本研究では、液状化層が薄い場合に生じうる杭頭での局部座屈と全体曲げ座屈との連成について検討する。鋼管杭には上屋構造の鉄骨柱に比べて大きな径厚比が用いられることが多く、比較的に早期に杭頭で局部座屈が発生する一方、液状化地盤では地盤による水平抵抗の喪失により、全体曲げ座屈を生じる可能性がある。さらに、上屋応答による変動軸力により鋼管杭が繰返し荷重を受ける場合、単調荷重と異なり局所的に応力集中する可能性がある。

(2)動的周期鉛直荷重を受ける鋼管単杭の動座屈発散現象の解明

既往の研究及び(1)では、静的荷重を受ける場合について検討してきた。一方、動的鉛直荷重を受ける圧縮部材では、不安定領域で、静定荷重に比べてより低い荷重でも動座屈を生じることもありうる。このとき、発散現象により急激な水平変形が増幅し、地震後、杭に大きな残留変形を生じる可能性がある。

本研究では、鋼管杭が動的荷重を受ける場合の動座屈挙動を明らかにする。地震時に上屋応答による動的軸力変動や上下動等の影響により、杭には動的鉛直荷重が作用する。

(3)縮小模型振動台実験による上屋応答の変動軸力による杭基礎の全体曲げ座屈崩壊メカニズムの再現

上屋・基礎系の鉄骨構造物を対象として、上屋構造・基礎構造の相互作用を検討し、

特に基礎構造の崩壊機構の形成に対する上屋応答の影響を解明する。既往の研究及び(1)、(2)で、液状化地盤における鋼管単杭について座屈崩壊の可能性を指摘し、その評価方法を提示した。(1)で示したように巨大地震時に液状化した地盤では杭基礎への水平変形拘束が低下するため、杭基礎の全体崩壊を誘発するとともに、上屋構造の水平変形によって杭頭での局部座屈を生じる。また、(2)で示したように地震時の軸力変動により静的座屈荷重よりも低い値で、動座屈を生じる。

本研究では、上屋構造と杭基礎を模擬した縮小模型振動台実験により、杭の動座屈による崩壊メカニズムを再現し、(1)、(2)の崩壊メカニズムが架構において形成されるかを検証した。

そこで、上屋・基礎系の鉄骨構造物の縮小模型振動台実験を行う。写真1は申請者が代表であった研究において機械切削により作成した縮小模型振動台実験である。縮小模型試験体については、鋼材を機械加工により切削し、製作したものであり、板厚を $\pm 0.01\text{mm}$ 以下の精度を有する。そのため、試験体単価を抑え、杭細長比や上屋の固有周期をパラメータとして、より多くの実験が可能となる。事前の地震応答解析により、動的応答下において上屋構造と基礎構造の剛性比の違いが杭基礎の崩壊メカニズムに及ぼす影響を明らかにした。

(4)水平・鉛直荷重を受ける鋼管杭の塑性変形性能と鉛直荷重支持限界性能評価

(1)~(3)では、上屋のP- Δ 効果による変動軸力や上下動といった鉛直荷重のみが杭に作用した場合でも鋼管杭が座屈する可能性を示し、その性能評価を行ってきた。本研究では、(1)~(3)の知見を準用して、液状化地盤で水平・鉛直荷重を受ける杭の終局状態及び限界性能を把握した。地盤の液状化や側方流動により杭基礎は水平方向に大変形を生じることから、塑性変形性能及び累積塑性変形倍率を用いた。地震時の上屋構造における塑性化等に伴う剛性変化、架構のP- Δ 効果により杭基礎の連成座屈崩壊の発生メカニズムを検討するために、有限要素による弾塑性大変形解析を行った。

4. 研究成果

液状化地盤等の軟弱地盤上にある高層建築物が都市直下巨大地震動を受けた場合に杭基礎の損傷・崩壊により倒壊に至る可能性を検討し、設計時には考慮されていない非構造部材が構造部材の地震応答性状に及ぼす影響を明らかにした。さらに、上屋・基礎-地盤系における構造物全体の真の保有性能を把握した。入力地震動、地盤条件、上屋の形状等の各々で耐震上の問題がない

場合でも、条件の組み合わせによっては構造物の倒壊に至る可能性を示し、その要因を明示した。非構造部材を冗長部材として捉え、上屋・基礎-地盤系の相互作用を考慮した統合的構造物の真の耐震性能(倒壊時性能)を明らかにした。

以下に本研究で得られた成果を示す。

(1)杭細長比、杭径厚比、地盤反力係数、繰返し荷重回数・振幅等のパラメータに対して両者の連成座屈メカニズムを明らかにした。

(2)有限要素による弾塑性大変形解析により、解析モデルを作成し、杭の細長比や地盤反力係数、荷重周期等をパラメータとして動座屈が生じない安定荷重を明らかにした。その際、杭の幾何学的非線形性、杭と地盤の材料非線形性を考慮したモデルを用いた。

(3)上屋構造に対して基礎構造の剛性が小さい場合、応答低減効果が期待できる一方、基礎構造での水平変形が大きくなるため、損傷が集中する可能性がある。上屋の応答が杭基礎の崩壊を誘発する場合と抑制する場合の現象を再現し、これらの発生メカニズムを明らかにした。

(4)高靱性杭基礎の終局性能を把握した。

- ・間隙水圧比(液状化による地盤水平剛性の低下率)と杭の座屈荷重低下率
- ・上屋の水平剛性・保有水平耐力と杭基礎の水平剛性・保有水平耐力の関係
- ・上屋及び杭基礎の固有周期の割合
- ・上屋の塔状比及び杭基礎の作用軸力

これらの関係から杭基礎の限界塑性変形性能を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

(1)木村祥裕, 時松孝次: 液状化地盤において一定軸力及び水平力を受ける鋼管杭の最大耐力と終局曲げモーメント, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第77巻, 675号, pp.775-781, 2012

(2)木村祥裕, 武本大聖: 液状化地盤において鉛直及び水平荷重を受ける鋼管杭の終局挙動, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文集, 査読有, 第18巻, pp.473-478, 2010

(3)木村祥裕, 中澤泰典, 御幡結, 松尾陽平, 山田和生: 中低層座屈拘束型ブレース架構の層二次剛性と層間変形集中の関係, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文集, 査読有, 第18巻, pp.343-348, 2010

(4)木村祥裕, 吉野裕貴, 王ロテキ: 繰返し軸荷重を受ける偏心補剛H形鋼部材の座屈性状, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文集, 査読有, 第18巻, pp.205-208, 2010

〔学会発表〕（計 8 件）

(1) 吉野裕貴, 木村祥裕 : モーメント勾配を考慮した H 形鋼梁の横座屈荷重に及ぼす補剛材の影響(その 1), (その 2), 日本建築学会九州支部研究報告会, 北九州, 2012.3.4

(2) 木村祥裕, 天本朱美, 武本大聖, 時松孝次 : 液状化地盤において鉛直及び水平荷重を受ける鋼管杭の終局挙動 その 1, その 2 終局時の作用モーメントと軸力の関係, 第 45 回地盤工学研究発表会講演集, 松山, 2010.8.20

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況（計 0 件）

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 祥裕 (KIMURA YOSHIHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 : 60280997

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :