

令和元年6月3日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04445

研究課題名(和文) 長周期地震動を受ける高層建築物の鋼管杭基礎の動座屈挙動による累積損傷評価

研究課題名(英文) Cumulative Damage Estimation of Steel Piles under High-rise Buildings due to Dynamic Buckling Subjected to Long Period Earthquake

研究代表者

木村 祥裕 (Kimura, Yoshihiro)

東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授

研究者番号：60280997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震のような長周期地震動により建物の水平変形により鋼管杭には大きな変動軸力が作用し、地盤の液状化により地盤による水平抵抗が低下することから、杭は動的不安定現象(動的曲げ座屈)により崩壊する可能性を示した。そして一回の地震動では上部構造物が不同沈下しないものの、杭が塑性化し、さらに複数回の余震を受けることで損傷が累積し、崩壊する可能性がある。そこで、地盤特性や入力地震動特性、上部構造物の振動特性等をパラメータにし、複数回地震動を受ける、高層建築物下の鋼管杭の累積損傷を評価する

研究成果の学術的意義や社会的意義

杭基礎の損傷の再現及び杭基礎の損傷度を予測するために、様々なパラメータに対して地盤・杭基礎-建物系の縮小模型実験を行うとともに、これまでの研究成果研究業績の知見を踏まえ、地震動特性や地盤特性と杭の損傷度との関係を明らかにし、高層建築物下における鋼管杭の累積損傷度評価法を提案できた。この評価法を元に、将来の予測地震動に対する杭の残存保有性能評価法を確立することで、大地震後に新たに生じる予測地震動に対する杭の保有性能と要求性能の関係性を把握し、杭の補強や取り替えの有無を提示することができた。

以上より、大地震に対して安心・安全な社会を構築するための新たな設計法の確立に寄与することができた。

研究成果の概要(英文)：The estimation method of the steel pile's ultimate strength in the liquefied soil collapsing due to the significant earthquake is suggested. However, there are some cases, in which the steel piles do not fail and can carry the dead load of the building due to the seismic motion.

On the other hand, the steel pile, which has accumulated the damage due to long period earthquakes, might collapse when it experiences the subsequent massive earthquake. In this research, the centrifugal tests are conducted to clarify the steel piles' collapse behavior in the liquefied soil subjected to the multiple earthquakes. Moreover, the steel pile's ultimate strength and cumulative damage estimation are estimated by numerical analyses.

研究分野：耐震構造

キーワード：鋼管杭 動座屈 累積損傷評価 液状化 高層建築物 遠心載荷実験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、震源地から300km以上も離れた東京湾沿岸部でも広範囲にわたり地盤が液状化し、建物が損傷していなくても杭基礎の破壊により建物が傾き、建て替えや補修を余儀なくされた。一方、高層建築物の上層階では数mの水平振幅が生じており、それに伴う転倒モーメントは、中低層建築物に比べて数倍となり、大きな変動軸力が杭基礎に生じたものと思われる。参考文献1)では東北地方太平洋沖地震により2.5°傾斜した高層建物が「倒壊」と判定されたが、1978年の宮城沖地震で地盤の液状化により既にRC杭基礎が損傷を受け、2011年の地震により損傷が顕在化したケースである。液状化地盤における杭基礎の損傷は、杭頭部以外にも曲げモーメントが卓越する杭地中部でも生じるが、不同沈下等の被害が見られない上部構造物において、損傷の可能性のある杭基礎を特定し、調査することは極めて困難である。そのため、上部構造物が地震後の継続使用に対して著しい機能低下を生じない限り、費用対効果の面から杭基礎、特に杭地中部の被害調査は行われぬのが現状である。そして、東北地方太平洋沖地震は、長い継続時間により、従来の地震動では液状化しなかった地域でも地盤が液状化を生じ、多くの建物が傾斜する被害を生じた。東北地方太平洋沖地震の速度応答スペクトルでは、震源から300km以上離れた浦安市で周期1秒、2秒、3.5秒程度で安全限界を超える100m/s以上を記録している。近い将来に発生が予想される東海・東南海・南海地震が生じれば、液状化による長周期化した地盤と長い固有周期の高層建築物が連成すれば、2秒から4秒程度の周期帯で東北地方太平洋沖地震時に超高層建築物で生じた数mの水平振幅をはるかに上回る非常に大きな水平変形を生じる可能性がある。一方、高靱性鋼管杭は、水平力に伴う杭の曲げモーメントに対して大変形時まで耐力を保持でき、地盤により杭の水平変形拘束効果が期待できることから、現行の建築基礎構造設計指針では降伏軸力の70%~80%といった高圧縮軸力が作用した場合でも杭の曲げ座屈は考慮されていない。しかし、長い継続時間の地震動により地盤が液状化し、水平抵抗が急激に低下するとともに、長周期地震動により高層建物では大きな水平変形に生じ、それに伴う変動軸力により外杭には設計時に想定した圧縮軸力を上回ることがある。これらの要因により、杭が動的不安定現象(動的曲げ座屈)を生じることで杭基礎上の高層建築物は傾斜し、機能不全となる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、軟弱地盤上に建つ、現行の設計法により設計された、長周期である高層建築物が、東海・東南海・南海地震などの長周期地震動を受けるとき、鋼管杭基礎の要求性能と保有性能の関係を明らかにする。すなわち、(1)液状化層厚(杭曲げ座屈長さ)、(2)地盤密度 D_r 、(3)上部構造から作用する一定軸力と変動軸力の割合、(4)軸力に対する水平力の割合等をパラメータとして、一回の大地震で杭が動的曲げ座屈を生じる条件を明らかにする。次に、想定された地震動が一回生じたとき、杭で塑性化するものの、顕著な曲げ座屈変形を生じないケースであっても、複数回の地震動で杭に損傷が蓄積して崩壊を生じる可能性を検討する。複数回地震動を受ける場合の杭の累積損傷の過程において、地震後の地盤の締め固めにより水平剛性の変化や上部構造物の応答値が変化することで、一回の地震動で動的曲げ座屈により崩壊する場合との違いを明らかにする。遠心載荷装置を活用し、杭基礎の損傷の再現及び杭基礎の損傷度を予測するために、様々なパラメータに対して地盤・杭基礎-建物系の縮小模型実験を行うとともに、これまでの研究成果の知見を踏まえ、本研究では地震動特性や地盤特性と杭の損傷度との関係を明らかにし、高層建築物下における鋼管杭の累積損傷度評価法を提案する。そして、この評価法を元に、将来の予測地震動に対する杭の残存保有性能評価法を確立することで、大地震後に新たに生じる予測地震動に対する杭の保有性能と要求性能の関係性を

把握し、杭の補強や取り替えの有無を提示することができる。

3. 研究の方法

長周期地震動を受ける高層建築物が液状化地盤上に建つとき、共振により上部構造に大きな水平変形が生じ、杭には大きな変動軸力が作用する可能性がある。そこで、(1)液状化地盤における高層建築物下の鋼管杭の遠心載荷実験により、鋼管杭の動的曲げ座屈の発生条件を明らかにし、(2)非液状化層を有する実地盤による杭の材端回転拘束効果を考慮し、液状化層における鋼管杭の曲げ座屈耐力式を誘導し、遠心載荷実験および有限要素解析によりその妥当性を検証し、(3)これらの実験により鋼管杭が崩壊する場合、崩壊しないものの、塑性歪を受けた杭が複数回の地震動を受けることで、塑性歪が蓄積する過程を明らかにする。最終的には(4)複数回の地震動を経験した鋼管杭に内在する累積損傷度評価法と、予測地震動に対する杭の残存保有性能評価法を確立する。

(1)遠心載荷実験による高層建築物において杭頭補剛された鋼管杭の動的不安定挙動の解明

遠心載荷実験試験体の上屋構造は、板パネと重りで構成された一質点系であったが、ここでは高層建築物の長周期化(3秒程度)を模擬するために、車輪を有する重りを傾斜のついたレールの上に載せ、“ゆっくり”とした揺れを再現することで、建物の水平変形に伴う高変動軸力を杭に作用させるものを作成する。想定される地震動レベルに対して、高層建築物と地盤との相互作用を考慮し、杭の初期圧縮軸力及び地震時の建物の転倒モーメントによる杭の変動軸力により、杭が動的曲げ座屈を生じ、鉛直支持能力喪失過程を明らかにする。その際、軟弱で液状化を生じやすい地盤から比較的安定した地盤を対象に、地震力の大きさを変化させる。

(2)液状化層における鋼管杭の動的曲げ座屈耐力に及ぼす非液状化地盤による回転拘束効果

非液状化層は杭全長の一部(数m~20m程度)で生じることから、液状化層における杭が動的曲げ座屈を生じる際、液状化層の上下の地盤が座屈する杭の回転抵抗として働き、杭の曲げ座屈長さを低減できる可能性がある。ここでは、エネルギー法による変分原理を用いた研究業績の手法を参考にし、液状化層以外における地盤を境界条件における回転拘束とした杭の曲げ座屈荷重式を誘導する。非液状化層厚を有する地盤・鋼管杭基礎-上屋構造の遠心載荷実験を行い、曲げ座屈耐力式の妥当性を実験により得られた杭の動的曲げ座屈耐力により検証する。

(3)複数回地震動を受ける鋼管杭の動的不安定化の進展

(1),(2)では、大地震を一回経験したとき、杭が動的曲げ座屈を生じる条件を検証しているが、一回の地震動により杭には塑性歪が蓄積していくものの、損傷が顕在化せず、地震後、上部構造物の転倒モーメントにより生じた変動軸力が除荷され、長期荷重に対して杭が鉛直支持能力を保持できることになる。本震とほぼ同程度もしくは杭を塑性化させる大きさの余震が作用した場合、または上部構造物の耐用年数内(50年間以内)で同程度の地震動が生じた場合、杭の塑性歪は蓄積し、動的不安定性が増し、急激な水平変形を生じる可能性があることから、遠心載荷実験により再現する。

(4)経験した地震動により鋼管杭に内在する損傷度と予測地震動による杭損傷予測法の確立

(1)~(3)の知見をふまえ、1回の地震動による鋼管杭の塑性歪の蓄積と動的不安定化の進展、そして動的曲げ座屈による上屋構造物の不同沈下の発生と機能不全に至るまでの傾斜を、地震動の大きさ、地震動の回数、地盤特性(地盤密度、液状化後の地盤周期など)、上屋構造物の特性(杭に作用する初期軸力比、変動軸力比、水平力(重量、固有周期)など)のパラメータから明らかにする。

4. 研究成果

(1)遠心載荷実験による高層建築物において杭頭補剛された鋼管杭の動的不安定挙動の解明

これまでに、全長にわたり、中空断面とした杭試験体模型を製作し、遠心載荷実験を行い、動的曲げ座屈性状、および液状化地盤による杭の水平変形拘束効果を明らかにした。しかし、実建物における鋼管杭には、RC 基礎梁との固定度を高めるために杭頭部にコンクリートが充填され、その充填領域は、RC 基礎梁形状によるが、慣例的に鋼管直径の 1~3 倍程度とされてきた。コンクリートの充填効果は、基礎梁と固定度を高めるだけでなく、曲げモーメントの大きい杭頭部の局部座屈発生の抑制効果と曲げ座屈に対する座屈長さを短くする効果が期待できるものの、これまでこのような効果は実験等により確認されていない。そこで、実際の杭頭部を模擬した鋼管杭の動的曲げ座屈挙動を明らかにするために、コンクリート充填長さ、杭の細長比、地盤密度をパラメータとした遠心載荷実験を行い、コンクリート充填による杭頭補強効果を検証するとともに、座屈長さ低減効果を把握した。

鋼管の曲げ座屈耐力を踏まえて、杭全体の曲げ座屈とコンクリート充填領域外の杭の局部座屈による連成座屈を明らかにした。連成座屈は、上述の座屈が個別に生じる場合よりも耐力低下が著しく、脆性的な損傷を生じることから、上部構造物の傾斜・倒壊を招く危険がある。曲げ座屈は、杭長（液状化層厚）における細長比、液状化地盤剛性、作用軸力の大きさが大きく影響し、局部座屈は、径厚比と作用軸力・曲げモーメントの大きさが影響する。そこで、遠心載荷実験及び有限要素法による弾塑性大変形解析によりこれらのパラメータについて両座屈が連成する領域を見出し、局部座屈と曲げ座屈の連成の発生の可能性と発生条件を明らかにした。

(2) 液状化層における鋼管杭の動的曲げ座屈耐力に及ぼす非液状化地盤による回転拘束効果

液状化層における地盤の水平拘束効果、液状化層以外の地盤による回転拘束効果を考慮した座屈荷重式を、建築学会の鋼構造限界状態設計指針の曲げ座屈細長比 λ_c に適用した座屈曲線により、このような杭の弾塑性曲げ座屈応力度を求めた。非液状化地盤による回転拘束効果と液状化地盤の水平変形拘束効果を考慮した弾性座屈荷重式によりこれらの効果を定量的に明らかにした。そして、有限要素法による弾塑性大変形解析により鋼管単杭の弾塑性曲げ座屈耐力を求め、ここで提案する弾性座屈荷重式及びそれを適用した λ_c の座屈曲線の妥当性を検証した。

非液状化層厚をパラメータとして非液状化層による液状化層の杭の動的曲げ座屈に対する回転拘束効果を明らかにした。

(3) 複数回地震動を受ける鋼管杭の動的不安定化の進展

本研究では(1),(2)の知見を踏まえて、一回の地震動では動的曲げ座屈を生じなかったケースのうち、複数回、同じ入力地震動を受ける鋼管杭に塑性歪が蓄積していく過程を明らかにする。杭に作用する初期圧縮軸力及び地震時の変動軸力による杭頭及び杭地中部での損傷発生過程と杭の鉛直支持能力喪失過程を明らかにする。パラメータは、地盤特性($D_r=30\sim 90\%$)、杭細長比(断面と杭長)、上部構造物の固有周期と地震動特性(地震力の大きさと卓越周期など)とし、特に地震動特性や地盤特性により、一回の地震動で杭が損傷するレベルと、一回では損傷が顕在化しないものの、複数回により杭の損傷が蓄積し、顕在化する地震動レベルの組み合わせに着目し、上屋構造物の不同沈下等による機能不全に至るまでの傾斜との関係を明らかにする。

(4) 経験した地震動により鋼管杭に内在する損傷度と予測地震動による杭損傷予測法の確立

(1)~(3)の知見をふまえ、1回の地震動による鋼管杭の塑性歪の蓄積と動的不安定化の進展、そして動的曲げ座屈による上屋構造物の不同沈下の発生と機能不全に至るまでの傾斜を、地震動の大きさ、地震動の回数、地盤特性(地盤密度、液状化後の地盤周期など)、上屋構造物の特性(杭に作用する初期軸力比、変動軸力比、水平力(重量、固有周期)など)のパラメータから明らかにし、傾斜するまでの杭の損傷度指標を提案し、杭の累積損傷指標として疲

劣破壊指標D値を適用し、塑性履歴回数や振幅、杭の塑性変形能力との相関性を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- (1) Yoshihiro Kimura, Atsushi Suzuki and Kazuhiko Kasai: Estimation of Plastic Deformation Capacity for I-shaped Beams with Local Buckling under Compressive and Tensile Forces, Japan Architectural Review, pp.26-41, Vol.2, Issue 1, 2019.1, 10.1002/2475-8876.12066, 査読有
- (2) 木村祥裕, 宮夢積, 廖望: 柱梁接合部により反り拘束されるH形鋼梁の横座屈荷重に及ぼす連続補剛材による座屈変形拘束効果の解明, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻751号, pp.1353-1363, 2018.9, 査読有
- (3) 安藤素子, 古川幸, 木村祥裕: 修正D値法による層中間ピン柱脚骨組の地震応答性状の考察, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文報告集, 第26巻, pp.242-246, 2018.11, 査読有
- (4) 吉野裕貴, 木村祥裕: 勾配曲げを受ける偏心補剛H形鋼梁の横座屈に対する必要補剛力, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文報告集, 第26巻, pp.65-68, 2018.11, 査読有
- (5) 宮夢積, 木村祥裕: 勾配モーメントを受けるH形鋼梁の反り拘束下での弾性横座屈荷重, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文報告集, 第26巻, pp.61-64, 2018.11, 査読有
- (6) 阿部叶子, 鈴木敦史, 木村祥裕, 笠井和彦: 変動軸力と座屈モードを考慮したH形鋼梁の保有性能評価, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文報告集, 第26巻, pp.57-60, 2018.11, 査読有
- (7) 後藤大輝, 的場萌子, 木村祥裕: 液状化地盤におけるSC杭の終局メカニズム, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文報告集, 第26巻, pp.11-14, 2018.11, 査読有

〔学会発表〕(計 13 件)

- (1) Hiroki Goto, Moeko Matoba and Yoshihiro Kimura: Centrifuge Test of Superstructure-SC Pile-Liquefied Soil System and SC Piles' Dynamic Buckling Behavior, 8th International conference on Geotechnique, Construction Materials & Environment (GEOMATE) 2018, pp.486-491, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018.11
- (2) 後藤大輝, 的場萌子, 木村祥裕, 田村修次: 液状化地盤におけるSC杭の終局耐力評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.643-644, 2018.9
- (3) 吉野裕貴, 廖望, 木村祥裕: H形鋼梁の横座屈時の必要補剛力と屋根折板の曲げ耐力 その3 必要補剛力と屋根折板の曲げ耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1119-1120, 2018.9
- (4) 廖望, 吉野裕貴, 木村祥裕: H形鋼梁の横座屈時の必要補剛力と屋根折板の曲げ耐力 その2 曲げ応力分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1117-1118, 2018.9
- (5) 中村祥子, 廖望, 吉野裕貴, 木村祥裕: H形鋼梁の横座屈時の必要補剛力と屋根折板の曲げ耐力 その1 実験装置概要及び荷重変位関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1115-1116, 2018.9
- (6) 阿部叶子, 木村祥裕, 鈴木敦詞: 交番繰り返し軸力作用下でウェブせん断座屈を生じるH形鋼梁の塑性変形能力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1089-1090, 2018.9
- (7) 安藤素子, 木村祥裕, 古川幸: 層中間ピン柱脚中低層鉄骨魚骨型骨組の地震応答に対する修正D値法の適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.821-822, 2018.9
- (8) 村田裕磨, フヤクシーモン, 木村祥裕: 梁の局部座屈に伴う劣化を考慮した層中間ピン柱脚骨組のFEM解析 その2 梁の局部座屈変形量を用いた残存性能評価, 日本建築学会大

会学術講演梗概集，pp.819-820，2018.9

- (9) フヤクシーモン，村田裕磨，木村祥裕：梁の局部座屈に伴う劣化を考慮した層中間ピン柱脚骨組の FEM 解析 その 1 梁の局部座屈現象に基づく終局耐震性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.817-818，2018.9
- (10) 後藤大輝，的場萌子，木村祥裕，田村修次：液状化地盤において動座屈崩壊する SC 杭の遠心載荷実験，第 53 回地盤工学研究発表講演集，pp1421-1422，2018.7
- (11) 的場萌子，木村祥裕，田村修次：液状化地盤において長時間地震動を経験する鋼管杭の終局メカニズム，第 53 回地盤工学研究発表講演集，pp1387-1388，2018.7
- (12) 後藤大輝，的場萌子，木村祥裕：上部構造物・SC 杭基礎-液状化地盤系の遠心載荷実験，日本建築学会東北支部研究報告集構造系，第 81 号，pp.93-96，2018.6
- (13) 的場萌子，木村祥裕：長時間または複数回地震動により動座屈崩壊する鋼管杭の遠心載荷実験，日本建築学会東北支部研究報告集構造系，第 81 号，pp.89-92，2018.6

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：田村 修次

ローマ字氏名： Tamura Syuji

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：環境・社会理工学院

職名： 准教授

研究者番号(8桁): 40313837

研究分担者氏名：古川 幸

ローマ字氏名： Furukawa Sachi

所属研究機関名：東北大学

部局名：工学研究科

職名： 助教

研究者番号(8桁): 30636428

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：