

令和元年5月15日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18144

研究課題名(和文)高い耐震性と優れた経済性という二律背反事象を同時に実現する橋脚基礎構造の開発

研究課題名(英文) Development of a bridge pier foundation structure that simultaneously realizes high earthquake resistance and excellent economy

研究代表者

磯部 公一 (Isobe, Koichi)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70452084

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：損傷制御設計を適用した新しい橋脚形式の鋼管集成橋脚に対し、基礎を合理化した杭基礎一体型鋼管集成橋脚を提案し、従来のフーチング形式と地震時挙動を比較することで構造成立性を検討した。杭基礎一体型では橋脚と基礎の剛性差の解消による柱基部のひずみの緩和、フーチングの省略による杭基礎の負担重量の軽減、ならびに地中梁の設置による杭体の応答ひずみや杭頭変位の抑制効果を有することを実証し、せん断パネルの塑性変形に伴うエネルギー吸収機能がより長く有効に働き、パネル降伏後も主部材に大きな残存耐力を保持するなど、特に軟弱地盤において優れた変形性能を有することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フーチングの省略と杭本数の削減による大胆なスリム化橋脚基礎構造は、高い耐震性と優れた経済性を同時に実現可能であることを明らかにした。特に、初期コストと地震ライフサイクルコストの両面から大幅なコスト縮減の達成が可能で、その経済的波及効果は大きい。また、当該構造の設計には、地上部と地中部を分離して設計していた従来設計手法とは異なり、上下部基礎工を一体で計算し、高精度に地盤と構造物の相互作用、地震時応答挙動を把握する必要がある、それを実現する高度な数値解析手法を確立した点は学術的・工学的にも大変意義深い。

研究成果の概要(英文)：A multiple steel pipes bridge pier integrated by pile foundation without a footing has been proposed to design a rational foundation of the bridge pier structure. The proposed substructures possess an excellent advantage of reduction of strain at the column through strain decentralization at footing point. In addition, reduction in footing weight contributes to decrease pile strain. The seismic performance of the proposed bridge pier structure grounded in dry sand and liquefiable sand is evaluated based on the large-scale shaking table tests and numerical simulation. As a result, the proposed structure has advantages of strain reduction of column by strain decentralization at footing point. It is recognized that it has high seismic performance and high toughness in view of the fact that the main members hold a large residual strength after yielding of the shear panels.

研究分野：地盤工学

キーワード：杭基礎 橋脚 耐震 損傷制御設計

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

1. 研究開始当初の背景

阪神大震災以降、鋼製橋脚の耐震性能の向上を目的として、種々の橋脚構造が提案されている。鋼管集成橋脚もそのような背景で開発された橋脚構造の一種で、既製鋼管4本を、履歴型ダンパー機能を有するせん断パネルにより結合した新しい形式の橋脚である。本橋脚には損傷制御設計が適用されており、死荷重や活荷重などの鉛直荷重を主部材である鋼管柱が支持し、地震慣性力などの水平荷重を二次部材である横つなぎ材が抵抗することで、地震時の損傷をせん断パネルに集約し、主部材である鋼管柱を健全に保つことができる。そのため、地震後直ちに緊急車両を通行させることが可能となり、たとえ復旧が必要な場合であっても、横つなぎ材(せん断パネル)を取り替えるだけで元の構造に戻せるため、地震ライフサイクルコストを低減できる特徴を有する。

鋼管集成橋脚に対し、基礎部分を合理化した杭基礎一体型鋼管集成橋脚を提案し、従来のフーチング形式と地震時挙動を比較することで構造成立性を検討してきた。当該構造は、鋼管集成橋脚の柱部における地震エネルギー吸収による基礎構造への伝達荷重の軽減に着想を得ており、鋼管集成橋脚の鋼管柱1本と杭1本をそれぞれ接続することで、フーチングを介さず上部構造や橋脚からの荷重を基礎に直接伝達することができる。そのため、杭基礎に対するフーチング分の重量負担の軽減、橋脚と基礎の剛性差の解消による橋脚と基礎の接合部の応力集中の緩和、工期短縮、材料コスト縮減、狭隘施工条件下での施工を可能とするなど、多大な利点が考えられ、経済合理性に優れている。これらの利点と改善効果を実験的に確認するために、1/20サイズで作製した模型に対し大型振動台実験を実施し、杭基礎一体型鋼管集成橋脚の変形特性、耐震性能の検証を行った。その結果、事前の数値解析による予測に反し、フーチングの省略化と杭本数の半減にもかかわらず、フーチング型鋼管集成橋脚よりも杭基礎一体型鋼管集成橋脚の方が大規模地震に対して応答変位量を抑制できることが明らかとなった。これは、杭基礎一体型は橋脚と杭の接合部の応力集中の緩和に加え、せん断パネルのエネルギー吸収の有効機能領域が長くなったことで、主部材である柱および杭に大きな残存耐力を保持できたことに要因があると考えられ、当該構造が極めて優れた耐震性能を示すに至っている。しかし、実験コストや模型作製の制約により、入力地震動と構造物の固有振動数の関係性や地盤構成などに関して限定された条件下での実験となったことから、上記結果の普遍性には疑問の余地がある。また、実験後に行った土-水連成三次元的弾塑性FEM解析による再現解析でも低拘束圧下の地盤材料の剛性・液状化強度の過小評価により、各構造の地震時応答挙動を十分な精度で再現できるまでには至っていない。さらに、杭頭の応答変位を抑制する目的で設置した地中梁の剛性・強度が当該構造の終局状態に大きく影響することも示唆される一方、地震後早期復旧の観点から、地震による杭頭付近の表層地盤の過大变状後の剛性・強度に関する修復性についても検討が必要である。以上から、当該構造には更なる合理化の余地が残されている。

2. 研究の目的

本研究の達成目標は、下記の課題を明解にし、当該構造の最適設計解を導く簡便な方法論を提案することである。当該構造はフーチング省略構造であるため、上下部基礎工一体設計という従来よりも高度な設計、解析手法が求められる。ゆえに、実務での適用を念頭に置き、模型実験で妥当性を検証した上下部基礎工一体解析結果の成果に基づいて、地盤と構造の相対剛性、地震動の卓越周波数と構造の固有振動数の比を入力としたノモグラムの作成を最終成果目標とする。

- [A] 低拘束圧下の地盤材料の剛性、液状化強度に関する構成モデルの改善と再現解析の高精度化
- [B] フーチング型との対比による杭基礎一体型鋼管集成橋脚の適正条件の明確化
- [C] 地中梁の剛性・強度変化に対する当該構造の終局状態への影響評価と、それに基づく残留変位量の抑制や杭の損傷回避を目指した地中梁のフェイルセーフ機能の可能性の検証
- [D] 杭頭付近の表層地盤の過大变状からの地盤の剛性・強度の修復性の確認

3. 研究の方法

- [A] 低拘束圧下の地盤材料の剛性、液状化強度に関する構成モデルの改善と再現解析の高精度化
→過年度に実施した再現解析で不十分であった低拘束圧下の模型地盤の剛性および液状化強度のモデル化の改善を、関連文献1)を参考に行い、再現解析の精度の向上させる。
- [B] フーチング型との対比による杭基礎一体型鋼管集成橋脚の適正条件の明確化
→[A]で向上した再現解析結果に基づき、応答変位、パネルのエネルギー吸収量、残留変位量、残留耐力などを比較項目として、従来のフーチング型よりも変形性能が優れる地盤および構造条件を整理し、実務での利用を想定してノモグラムにまとめる。
- [C] 地中梁の剛性・強度変化に対する当該構造の終局状態への影響評価と、それに基づく残留変位量の抑制や杭の損傷回避を目指した地中梁のフェイルセーフ機能の可能性の検証
→地中梁の剛性・強度差による杭の損傷程度への影響に関する数値実験により、地中梁の変形程度から地中の杭の損傷レベルとの相関性をまとめ、損傷程度の推定手法を検討する。
- [D] 杭頭付近の表層地盤の過大变状からの地盤の剛性・強度の修復性の確認
→関連する既存データを活用しながら、大規模地震直後、仮修復後、再造成後の地盤の剛性・

強度変化に対する耐震性への影響評価を遠心模型実験により行う。遠心模型実験では既存設備、備品を利用し、大きな設備投資を行わずに効率的に実施する。

4. 研究成果

鋼管集成橋脚に対し、基礎部分を合理化した杭基礎一体型鋼管集成橋脚を提案し、従来のフーチング形式と地震時挙動を比較することで構造成立性を検討した結果、杭基礎に対するフーチング分の重量負担の軽減、橋脚と基礎の剛性差の解消による橋脚と基礎の接合部の応力集中の緩和、工期短縮、材料コスト縮減、狭隘施工条件下での施工を可能とするなど、多大な利点が考えられ、経済合理性に優れること、杭基礎一体型鋼管集成橋脚はせん断パネルの塑性変形に伴うエネルギー吸収機能がより長く有効に働き、せん断パネル降伏後も主部材に大きな残存耐力を保持するなど、特に軟弱地盤において優れた変形性能を有することを明らかにした。これは、液状化するような軟弱地盤では地震時の応答変位が大きいことから、フーチングのような抵抗面積の大きな構造体が地中に存在したときには、大きな抵抗となるのに対し、フーチングを省略した本構造では抵抗面積が減少し、周辺地盤がすり抜ける受動杭のような振る舞いをするに起因している。地盤の応答変位に起因したフーチングおよび杭による抵抗力を、種々の地盤に対して新たに実施した模型実験とその数値解析により定量的に評価した。最後に、地震後早期復旧の観点から、地震による杭頭付近の表層地盤の過大变状後の剛性・強度の修復性に関する基礎的な知見を得た。

以上の成果に基づき、新しく提案した耐震性と経済性を同時に実現する橋梁構造を効率的かつ合理的に設計するためのデータを整備することができた。これらをまとめた論文は、平成30年度土木学会論文賞、第53回地盤工学研究発表会優秀論文発表者賞、平成29年度地盤工学会北海道支部賞の受賞に至った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- 1) Quang, N. P., Ohtsuka, S., Isobe, K. and Fukumoto, Y.: Group effect on ultimate lateral resistance of piles against uniform ground movement, *Soils and Foundations*, 59(1): 27-40, 2019.2. (査読有)
- 2) 曾我恭匡, 杉山裕樹, 磯部公一, 木村亮: 杭基礎一体型鋼管集成橋脚の振動台実験, 橋梁と基礎, Vol.53, pp.35-40, 2019.2.
- 3) 磯部公一, 富澤幸一: 既設杭基礎の地盤改良併設による耐震補強技術, 材料, Vol.67, No.1, 24-27, 2018.1. (査読有)
- 4) 磯部公一, 澤村康生, 杉山裕樹, 篠原聖二, 曾我恭匡, 小林寛, 木村亮: 振動台実験による杭基礎一体型鋼管集成橋脚の耐震性能評価, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.72, No.4, 327-338, 2016.11. (査読有)

〔学会発表〕(計45件)

- 1) 中川修一, 磯部公一: 模型実験による押込・引抜双方向の複合荷重に対する小径スパイラル杭の支持力評価, 土木学会北海道支部平成29年度論文報告集, 第74号, 2019.1.
- 2) 門前史孝, 磯部公一, 江川拓也: 複雑な地盤堆積環境における火山灰質土の液状化挙動に関する数値解析, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第59号, pp.137-144, 2019.1.
- 3) 中川修平, 磯部公一: 押込・引抜双方向の複合荷重に対する小径スパイラル杭・斜杭の支持力評価法の検討, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第59号, pp.57-64, 2019.1.
- 4) 江川拓也, 畠山乃, 磯部公一: 火山灰質地盤における杭基礎の耐震性能に関する検討 - 液状化層厚の影響に関する一考察 -, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第59号, pp.37-42, 2019.1.
- 5) Hamidou Hamadoum, 磯部公一, 保科隆: Evaluation of the End Bearing Capacity of a single pile in layered ground using Rigid Plastic Finite Element Method with the non-linear strength property, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第59号, pp.31-36, 2019.1.
- 6) Hamidou, H. and Isobe, K.: Bearing Capacity of an Incompletely End-Supported Pile Based on Rigid Plastic Finite Element Method (RPFEM), Sustainability Issues for the Deep Foundations (Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures, Egypt 2018 - The Official International Congress of the Soil-Structure Interaction Group in Egypt (SSIGE)), Cairo, Egypt, pp.85-103, 2018.11.
- 7) Quang, N. P., Ohtsuka, S., Isobe, K. and Fukumoto, Y.: Ultimate lateral resistance of pile group in clayey soils against various direction of ground movement, Proceedings of the 1st Vietnam Symposium on Advances in Offshore Engineering - Energy and Geotechnics, Hanoi, Vietnam, pp.408-414, 2018.10.
- 8) Nakagawa, S., Yamauchi, R., Isobe, K. and Tomisawa, K.: Evaluation of Bearing Capacity of a Small-Diameter Spiral Pile Subjected to Combined Load Using Model Tests, Proceedings of the First International Conference on Press-in Engineering, Kochi, Japan, pp.117-124, 2018.9.
- 9) Hatanaka, Y. and Isobe, K.: Seismic amplification of clay ground and long-term consolidation after earthquake, Proceedings of the 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2018 (ICPMG2018), London, England, pp.891-896, 2018.7.
- 10) Egawa, T., Yamanashi, T. and Isobe, K.: Investigation on the aseismic performance of pile

- foundations in volcanic ash ground, Proceedings of the 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2018 (ICPMG2018), London, England, pp.879-884, 2018.7.
- 11) 富澤幸一, 磯部公一: 杭静的水平抵抗に及ぼす周辺体の剛性及び離隔の影響度, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1403-1404, 2018.7.
 - 12) Hamidou HAMADOUM, 磯部公一: Bearing capacity of an incompletely end-supported pile based on RPFEM, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1397-1398, 2018.7.
 - 13) 江川拓也, 山梨高裕, 磯部公一: 火山灰質地盤における杭基礎の耐震補強技術に関する検討 囲い形地盤改良の耐震補強効果に関する遠心力模型実験, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1373-1374, 2018.7.
 - 14) Quang N. Pham, 大塚悟, 福元豊, 磯部公一: Group effect on ultimate lateral resistance of piles against uniform ground movement, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1359-1360, 2018.7.
 - 15) 中川修平, 山内稜, 磯部公一: 小径スパイラル杭の複合荷重に対する支持力評価法の模型試験による検証, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1329-1330, 2018.7.
 - 16) 畑中佑太, 磯部公一: 粘性土地盤が直上砂地盤の地震時挙動に及ぼす影響に関する遠心模型実験, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.419-420, 2018.7.
 - 17) Hamidou HAMADOUM, 磯部公一: Evaluation of bearing capacity of incompletely end-supported piles based on Rigid Plastic Finite Element Analysis, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 58 号, pp.345-352, 2018.1.
 - 18) 中川修平, 磯部公一, 山内稜: 複合荷重に対するスパイラル杭の支持力特性に関する模型実験, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 58 号, pp.337-344, 2018.1.
 - 19) 江川拓也, 山梨高裕, 富澤幸一, 磯部公一: 火山灰質地盤における杭基礎の耐震性能に関する検討 - 囲い形地盤改良の耐震補強効果に関する遠心力模型実験 -, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 58 号, pp.147-154, 2018.1.
 - 20) 畑中佑太, 磯部公一, 鬼村果穂: 粘性土地盤が直上砂地盤の地震時挙動に及ぼす影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 58 号, pp.139-146, 2018.1.
 - 21) 磯部公一, 西井優, 畑中佑太, 門前史孝: 振動台模型実験による種々の地盤のせん断剛性のひずみ依存性と過剰間隙水圧の影響評価, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 58 号, pp.129-138, 2018.1. <平成 29 年度地盤工学会北海道支部賞受賞 >
 - 22) 門前史孝, 磯部公一: 杭に作用する流動力と液状化地盤の残留強度に関する一考察, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 58 号, pp.125-128, 2018.1.
 - 23) Isobe, K. and Yamauchi, R.: Numerical simulation on bearing capacity of a small diameter spiral pile in soft ground subjected to combined load, Proceedings of the 15th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Wuhan, China, USB, 2017.10.
 - 24) Quang, N. P. Ohtsuka, S., Isobe, K. and Fukumoto, Y.: Group effect on ultimate lateral resistance of piles in clayey soils against horizontal ground movement, Proceedings of the 15th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Wuhan, China, USB, 2017.10.
 - 25) Yamauchi, R. and Isobe, K.: Bearing capacity characteristics of a small diameter spiral pile in soft ground subjected to combined load, Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017, South Korea, pp.2889-2892, 2017.9.
 - 26) Isobe, K., Sawamura, Y., Kimura, M. and Soga, Y.: Evaluation of seismic performance of a bridge column integrated by multiple steel pipes with directly-connected piles based on shaking table tests, Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017, South Korea, pp.2785-2788, 2017.9.
 - 27) 磯部公一, 西井優, 澤村康生, 木村亮, 曾我恭匡, 杉山裕樹, 篠原聖二: 三次元弾塑性有限要素解析による杭基礎一体型鋼管集成橋脚の耐震性能評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会 - 532, pp.1063-1064, 2017.9.
 - 28) 曾我恭匡, 杉山裕樹, 篠原聖二, 磯部公一, 澤村康生, 木村亮: 鋼管集成橋脚の地震時応答特性に関する解析的評価, 第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.149-156, 2017.7.
 - 29) 西井優, 磯部公一, 木村亮, 澤村康生, 杉山裕樹, 曾我恭匡, 篠原聖二: 数値解析による杭基礎一体型鋼管集成橋脚構造の耐震性能評価, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1291-1292, 2017.7.
 - 30) 山内稜, 磯部公一, 中川修平: 小径スパイラル杭の H-V-M 複合荷重に対する支持力特性とその推定方法の提案, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1271-1272, 2017.7.
 - 31) 江川拓也, 林憲裕, 富澤幸一, 磯部公一: 火山灰質地盤における杭基礎の耐震補強技術に関する検討—液状化層の堆積状況の影響に関する遠心力模型実験—, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1233-1224, 2017.7.
 - 32) 富澤幸一, 磯部公一, 木村亮: 泥炭性軟弱地盤における既設杭基礎の耐震補強技術の実験的検討 (その 4: 復元力・修復性), 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1229-1230, 2017.7.
 - 33) 畑中佑太, 磯部公一: 遠心模型実験による粘性土地盤の地震波応答特性の検証, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.341-342, 2017.7.

- 34) 長谷川拓也, 大塚悟, 磯部公一, 西達也, 佐藤豊: 柏崎平野の地震後地盤沈下に関する地形・地質調査, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.337-338, 2017.7.
- 35) 山内稜, 磯部公一, 中川修一: 小径スパイラル杭の複合荷重に対する支持力評価手法とその精度検証, 土木学会北海道支部平成 28 年度論文報告集, 第 73 号, 2017.2.
- 36) 畑中佑太, 磯部公一: 粘性土地盤の地震波増幅作用に関する遠心模型実験, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 57 号, pp.263-272, 2017.2.
- 37) 江川拓也, 林憲裕, 富澤幸一, 磯部公一: 火山灰質地盤における杭基礎の耐震性能に関する検討 - 液状化層の堆積状況の影響に関する遠心力模型実験 -, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 57 号, pp.255-262, 2017.2.
- 38) 山内稜, 磯部公一: H-V-M 複合荷重に対する小径スパイラル杭の支持力特性, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 57 号, pp.241-250, 2017.2.
- 39) 西井優, 磯部公一, 澤村康生, 木村亮, 杉山裕樹, 篠原聖二, 曾我恭匡: 杭基礎一体型鋼管集成橋脚構造の周波数特性に関する数値解析的検討, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 57 号, pp.231-240, 2017.2.
- 40) 山内稜, 磯部公一: 複合荷重を受ける小径スパイラル杭の支持力特性, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.1375-1376, 2016.9.
- 41) 富澤幸一, 磯部公一, 三浦清一: 泥炭性軟弱地盤における既設杭基礎の耐震補強技術の実験的検討 (その 3: 保有水平耐力), 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.1351-1352, 2016.9.
- 42) 畑中佑太, 西間友洸, 磯部公一: 繰返しせん断履歴を受けた構造を有する粘土の体積圧縮挙動の評価, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.409-410, 2016.9.
- 43) 金田陽樹, 北田宗一郎, 磯部公一, 大塚悟: 柏崎平野の中越沖地震後の地盤沈下発生メカニズムに関する基礎的研究, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.405-406, 2016.9.
- 44) 西間友洸, 畑中佑太, 磯部公一: 遠心模型実験を用いた高位構造粘土地盤の地震後圧密沈下挙動の解明, 土木学会第 71 回年次学術講演会 - 061, pp.123-124, 2016.9.
- 45) 畑中佑太, 西間友洸, 磯部公一: 構造を有する粘土の繰返しせん断履歴による体積圧縮挙動, 土木学会第 71 回年次学術講演会 - 061, pp.121-122, 2016.9.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8 桁):

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。