

研究種目：基盤研究 (A)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19206049
 研究課題名（和文） 超高耐力複合杭基礎構造の開発と液状化時の地盤反力特性を考慮した耐震信頼性設計法
 研究課題名（英文） Development of High-Strength Pile Foundation and Reliability Seismic Design Considering Liquefied Ground
 研究代表者
 鈴木 基行 (SUZUKI MOTUYUKI)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：60124591

研究成果の概要（和文）：

本研究は、液状化地盤などにおいても地震時の杭基礎の損傷を回避することを目的として、高強度コンクリートを用いた超高耐力杭基礎構造の開発に取り組んだ。杭供試体の曲げ載荷実験と正負交番載荷実験、および杭を埋め込んだ土槽の遠心力載荷試験を行うことによって、提案する超高耐力杭基礎構造の高い耐震性能を確認した。さらに、これらの実験データを基にして、地盤と杭基礎の連成を考慮した耐震設計法を提示した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, high-strength concrete pile is investigated not to be damaged by large earthquakes even if it is embedded in liquefied ground. As the experimental results of static loading tests of proposed pile specimens and centrifuge tests of the pile embedded in soil, high seismic performance of the proposed high-strength concrete pile is indicated. Moreover, seismic design of the proposed high-strength concrete pile considering soil effect is proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2008年度	15,700,000	4,710,000	20,410,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	34,000,000	10,200,000	44,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：耐震構造，高強度コンクリート，耐震設計法，液状化地盤，杭基礎構造

1. 研究開始当初の背景

橋梁は、地震後における救助・救急活動および被災地への緊急物資の輸送路として非

常に重要な役割を担うため、地域社会生活に支障を与える地震後の機能低下をできるだけ抑制する必要がある。この思想を受け、現

行の各種耐震設計規準では、兵庫県南部地震級のレベル2地震動の作用に対し、橋脚基部に主たる塑性化を限定的に発生させ、修復を行い得る範囲で地震エネルギーの吸収を図り、支承部、基礎などは基本的に弾性限界を超えさせない損傷シナリオを基本としている。しかしながら、液状化の影響により地盤の水平反力が十分に期待できないような場合には、経済性への配慮から、基礎の降伏を許容せざるを得ない場合が多々存在する。この場合、何よりも危惧されるのは、基礎に生じる地震時の変形および地震後の残留変形による車両走行性への影響であり、軟弱地盤地点に架かる橋梁の修復作業のために道路や鉄道ネットワークの機能麻痺が長期にわたり生じることである。そのため、液状化の発生の有無に関わらず、基礎構造は恒久的に弾性限界内までの応答しか許容せず、修復が容易な橋脚基部に主たる塑性化を生じさせる耐震設計が望まれる。

2. 研究の目的

本研究は、交通ネットワークの弱部となり得る液状化地盤に架かる橋梁に着目し、その地震後の機能低下の回避を目的として、超高耐力を有する鋼・コンクリート複合杭基礎構造の開発と、液状化地盤の震動予測精度の向上により、液状化地盤中の新しい杭基礎構造の耐震設計法を構築することを目的とする。これにより、恒久的に弾性限界までの応答しか許容しない、新しい杭基礎構造の耐震設計法の構築が可能となる。

具体的には、以下に示す個別検討項目の達成を目的として研究に取り組む。

- (1) 超高耐力を有する鋼・コンクリート複合杭基礎構造の開発
- (2) 地震応答多連オンライン実験システムの開発と液状化地盤の震動予測精度の向上
- (3) 地盤との連成を考慮した超高耐力複合杭基礎の耐震設計法の提示

3. 研究の方法

本研究は、超高耐力を有する鋼・コンクリート複合杭基礎構造の開発として、高性能材料（コンクリート、鋼材）を用いた高耐力杭体を作製し、曲げ載荷実験と正負交番載荷実験により、その耐震性能を確認する。

また、液状化地盤の震動予測精度の向上を目的として、模型杭を埋め込んだ土槽の遠心力載荷試験を行い、杭と地盤との連成作用を明らかにする。

これらの構造と地盤の検討を統合化する

ことにより、地盤と杭基礎の連成を考慮した超高耐力杭基礎構造の耐震設計法を提示する。

上記2.に示した個別検討項目(1)～(3)に関する詳細な研究方法を以下に示す。

(1) 超高耐力を有する鋼・コンクリート複合杭基礎構造の開発

高強度構成材料（鉄骨、鉄筋、コンクリート）の使用と高プレストレス力の導入によって、コンクリート部材の耐力の飛躍的向上が可能となる構造形式を開発する。

はじめに、提案する構造形式を実現可能とするため、高プレストレス力に対して安全かつ簡便な定着具を検討する。

さらに、この定着具を用いた超高耐力複合杭体を作製し、気中における曲げ・せん断実験を行う。そして、これらの実験データを整理した後に、地震荷重を模擬した繰り返し荷重下での耐震性能を確認するため、超高耐力複合杭体の正負交番載荷実験を行う。

(2) 地震応答多連オンライン実験システムの開発と液状化地盤の震動予測精度の向上

本検討項目は以下の①②によって行う。

①地震応答多連オンライン実験システムの開発

地盤の拘束条件（K0 圧密条件）を再現できる中空ねじり試験装置を含む複数の要素試験をオンラインで連結する技術を確立する。多連オンライン基本システムを構築し、K0 対応型中空ねじりせん断試験装置の製作する。これによって、多様な地盤の構成や拘束条件を反映した地盤実験が可能となり、液状化地盤などの力学的特性を明らかにすることができる。

②地盤が超高耐力杭基礎の地震応答特性に及ぼす影響の解明

超高耐力杭基礎を模擬した小型の杭供試体を作製し、遠心力振動試験によって、周辺地盤が超高耐力杭基礎の地震応答特性に及ぼす影響を明らかにする。さらに、杭基礎・地盤系の地震応答解析によって耐震性能を検討する。

(3) 地盤との連成を考慮した超高耐力複合杭基礎の耐震設計法の提示

実施した超高耐力杭の正負交番載荷実験に基づき、部材の使用限界、修復限界、終局限界を設定する。これらの3つの限界状態に対応する耐力算定手法と変形性能評価手法を構築する。さらに(2)②の検討と併せて、地盤との連成を考慮した超高耐力複合杭基礎の耐震設計法を提示する。

4. 研究成果

本研究によって得られた研究成果を以下に列挙する。

(1) 超高耐力を有する鋼・コンクリート複合杭基礎構造の開発

高強度構成材料（鉄筋、コンクリート）の使用と高プレストレス力を導入したコンクリートはり供試体を作製し、曲げ載荷試験を行った。また、提案する構造形式による超高耐力杭供試体を作製し、正負交番載荷実験を行った。これらの実験によって、提案する超高耐力杭基礎構造は地震荷重を模擬した繰り返し荷重下においても高い耐震性能を有することが確認できた。

(2) 地震応答多連オンライン実験システムの開発と液状化地盤の震動予測精度の向上

地盤の拘束条件（圧密条件）を再現できる複数の要素試験をオンラインで連結する技術を確立した。また、KO 対応型中空ねじりせん断試験装置を導入し、上記の連成システムに組み込んだ。これによって、多層地盤の連成を考慮した地盤実験の小スペース化・省力化が可能となった。

さらに、超高耐力杭の液状化地盤中の挙動を検討するため、遠心力模型振動実験を実施した。実験では、高耐力杭を精緻にモデル化し、実際の杭体の曲げ変形特性を反映したミニチュア模型杭を用いた点に新規性がある。杭と地盤の動的相互作用が考慮された破壊挙動を実験的に検討したところ、杭体の強度を増すことによって、液状化地盤中で最大曲げモーメントが発生する場所や杭の塑性化に違いが生じることが明らかになった。また、実験結果の数値再現解析を行い、細部の挙動を検討した。

(3) 地盤との連成を考慮した超高耐力複合杭基礎の耐震設計法の提示

上記(1)「超高耐力を有する鋼・コンクリート複合杭基礎構造の開発」によって得られた実験結果を整理することにより、超高耐力杭基礎構造の使用限界、修復限界、終局限界を設定した。これらの3つの限界状態に対して、それぞれの耐力算定手法と変形性能評価手法を提示した。

さらに、上記(2)「地震応答多連オンライン実験システムの開発と液状化地盤の震動予測精度の向上」の研究成果と総合化することにより、地盤－杭基礎－構造物の連成を考慮した超高耐力複合杭基礎の耐震設計法を提示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計8件）

1. Naito, H., Akiyama, M. and Suzuki, M.: Ductility Evaluation of Concrete-Encased Steel Bridge Piers Subjected to Lateral Cyclic Loading, *Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, 査読有り, Vol.16, No.1, 2011, pp.72-81
2. 阿部遼太, 秋山充良, 佐藤啓, 鈴木基行: 炭素繊維シートで被覆した高強度 RC 杭体の正負交番載荷実験, *コンクリート工学年次論文集*, 査読有り, Vol.32, No.2, 2010, pp.877-882
3. M. Akiyama, M. Suzuki, R.Abe: Flexural strength of prestressed reinforced concrete piles using high-strength material, *Proceeding of 3rd fib International Congress*, 査読有り, 2010, CD-ROM
4. 青木直, 秋山充良, 佐藤啓, 鈴木基行: 炭素繊維シートで被覆した高強度 RC 杭体の単調曲げ載荷実験, *コンクリート工学年次論文集*, 査読有り, Vol.31, No.2, 2009, pp.553-558
5. 浅沼大寿, 秋山充良, 佐藤啓, 鈴木基行: 高強度 RC 杭体へのプレストレス導入による曲げ耐力の改善, *コンクリート工学年次論文集*, 査読有り, Vol.30, No.3, 2008, pp.1003-1008
6. Ryosuke Uzuoka, N. Sento and K. Kazama: Seepage and Inertia Effect on Rate-dependent Reaction of a Pile in Liquefied Soil, *Soils and Foundations*, 査読有り, Vol.48, No.1, 2008, pp.15-26
7. Ryosuke Uzuoka, N. Sento, M. Kazama, F. Zhang, A. Yashima and F. Oka: Three-dimensional numerical simulation of earthquake damage to group-piles in a liquefied ground, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 査読有り, Vol.27, No.5, 2007, pp.395-413
8. 内藤英樹, 姜一圭, 秋山充良, 鈴木基行: SRC 部材の修復および終局限界状態に対応した変形性能評価法と橋脚の耐震設計への適用, *コンクリート工学年次論文集*, 査読有り, Vol.29, No.3, 2007, pp.1351-1356

〔学会発表〕（計 10 件）

1. 荒川岳：炭素繊維シートで被覆した高強度 RC 杭の荷重－変位関係，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010 年 9 月 3 日，札幌
2. 高橋啓久：曲げ耐力が異なる鉄筋コンクリート杭の液状化地盤中の挙動について（その 1）－模型杭作製及びその力学的性質と遠心模型振動実験の概要－，土木学会第 64 回年次学術講演会，2009 年 9 月 4 日，福岡
3. 近江健吾：曲げ耐力が異なる鉄筋コンクリート杭の液状化地盤中の挙動について（その 2）－遠心模型振動実験結果と 3 次元有効応力解析－，土木学会第 64 回年次学術講演会，2009 年 9 月 4 日，福岡
4. 伊藤貴晴：液状化地盤中の杭の応答に及ぼす杭の曲げ耐力の影響，第 44 回地盤工学研究発表会，2009 年 8 月 20 日，横浜
5. 青木直：炭素繊維で被覆した高強度 RC 杭の正負交番載荷実験，土木学会第 64 回年次学術講演会，2009 年 9 月 2 日，福岡
6. 伊藤貴晴：液状化地盤中の杭の応答に及ぼす杭の曲げ耐力の影響に関する遠心模型振動実験，土木学会東北支部技術研究発表会，2009 年 3 月 7 日，多賀城
7. 内藤英樹：軸方向鉄筋および H 形鋼の局部座屈を考慮した SRC 橋脚の地震応答解析，土木学会第 63 回年次学術講演会，2008 年 9 月 11 日，仙台
8. 浅沼大寿：プレストレスを導入した高強度 RC 杭体の曲げ耐力算定法とそれを用いた杭基礎の地震時安全性評価に関する研究，土木学会第 63 回年次学術講演会，2008 年 9 月 10 日，仙台
9. 青木直：高強度構成材料を用いた RC 杭体へのプレストレスの導入による構造性能の改善，土木学会第 63 回年次学術講演会，2008 年 9 月 10 日，仙台
10. 秋山充良：高強度構成材料を用いた RC 耐震柱部材へのプレストレスの導入による構造性能の改善，土木学会第 62 回年次学術講演会，2007 年 9 月 12 日，広島

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 基行 (SUZUKI MOTOYUKI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60124591

(2)研究分担者

風間 基樹 (KAZAMA MOTOKI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20261597

(3)連携研究者

渦岡 良介 (UZUOKA RYOSUKE)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40333306

秋山 充良 (AKIYAMA MITSUYOSHI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00302191

仙頭 紀明 (SENTO NORIAKI)
日本大学・工学部・准教授
研究者番号：40333835

内藤 英樹 (NAITO HIDEKI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50361142