

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22246060

研究課題名(和文) 超高耐力複合杭基礎構造の耐震信頼性設計法の高度化と健全度評価手法の開発

研究課題名(英文) STUDY ON DAMAGE IDENTIFICATION AND SEISMIC SAFETY EVALUATION OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES

研究代表者

鈴木 基行 (SUZUKI, Motoyuki)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60124591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、鋼・コンクリート複合構造を対象として、地震後に迅速に損傷状態を点検・調査する手法(非破壊試験)の開発と、余震や将来の大地震に対する当該構造物の耐震安全性を照査できる手法の構築を目的とした。加振器を用いた周波数分析試験方法を新たに提示することによって、既存技術では難しかった複合構造の複雑な損傷状態を把握できることが示唆された。そして、この点検データを構造解析の入力値にすることで、従来の性能設計と同じ手順に従って、当該構造物の耐震安全性を照査できることを示した。

研究成果の概要(英文)：For a large ground motion, a damage identification method and seismic safety evaluation of steel-concrete composite structures were examined. Especially, the forced vibration testing method using a portable shaker was proposed. As the experimental results of the static loading tests, the seismic damages of RC specimens and steel-concrete composite specimens were identified based on the resonance frequencies measured by the forced vibration tests. Moreover, the stiffness distribution and stiffness decrease of the RC structures and composites structures were estimated. It was indicated that the seismic safety of the composite structure could be evaluated by FE analysis.

研究分野：工学

キーワード：耐震 点検 非破壊試験 振動試験 複合構造 健全性評価 構造性能評価

1. 研究開始当初の背景

複合構造は要求性能に応じて鋼とコンクリートを組み合わせる構造形式であり、鋼とコンクリートの相互拘束によって高い耐荷性能と変形性能が同時に可能となる。構造上主要な部位に複合構造を用いることで構造物の耐震性能を飛躍的に高めることができ、想定以上の大地震に対しても致命的な損傷や倒壊を回避できる。研究代表者らは、複合構造の優れた耐震性能に着目し、その活用方法のひとつとして、特に杭基礎構造への適用を検討してきた。

一方、実際に大地震が生じた際に、複合構造の損傷状態を点検・調査することは容易でない。例えば、コンクリート充填鋼管では内部のコンクリートが鋼管に覆われているため目視点検ができず、鉄骨鉄筋コンクリートでもひび割れ性状が鉄筋コンクリート構造とは異なるために、コンクリート内部の鋼材の塑性化範囲を把握することができない。複合構造を耐震部材として有効に活用するためには、耐震設計法を高度化するとともに、地震後に速やかに点検・調査できる非破壊試験法の開発が必要である。そして、地震で損傷した鋼とコンクリートの構成則と相互拘束を考慮して構造性能（剛性、耐荷力、変形性能）を再評価することにより、余震や将来の大地震に対する当該構造物の耐震性照査が可能になる。これにより、補修・補強の緊急性が判断できるなど、合理的な対策に繋がることが期待される。

2. 研究の目的

本研究は、複合構造の点検・調査に適用可能な非破壊試験法を新規に開発することを目的とする。具体的には、取扱いが容易な動電式の小型加振器を用いた周波数スイープ試験方法を開発し、構造物の点検・調査に必要な加振条件と測定精度を明らかにする。さらに構造諸元と損傷状態をパラメータとして、供試体の周波数スイープ試験を行い、損傷状態と振動特性に関する基礎データを収集・分析する。

そして、上記の周波数スイープ試験で得られる剛性および損傷状態を入力値とした構造解析手法（FEM）を提示し、地震後の構造物の耐震性照査法を構築する。

なお、本研究は複合構造を対象としているが、比較検討と研究成果の有用性の観点から、鉄筋コンクリート構造も研究対象とした。

3. 研究の方法

(1) 供試体を用いた基礎検討

①周波数スイープ試験方法の開発

杭、柱、はり、版構造など、様々な供試体諸元に対して動電式加振器を用いた周波数スイープ試験を行う。構造諸元と加振条件および測定精度を整理する。

②載荷試験

地盤に埋め込んだ杭供試体の正負交番載荷、はりの静的曲げ載荷試験、地震波を入力した柱の振動台実験など、載荷によって供試体にひび割れ・損傷を与える。段階的な損傷状態（部材変形量）に対して周波数スイープ試験を行い、損傷状態と周波数特性の関係を整理する。

これによって、地盤の拘束や、載荷パターン、載荷速度などが周波数スイープ試験の結果に及ぼす影響を検討する。また、作用軸力、鋼材量、せん断スパン比の違いが、損傷状態と振動特性の关系到及ぼす影響を整理する。

(2) 実構造物の現場試験

提案技術を早期に実用化に繋げるため、本研究では実構造物を対象とした現場試験も実施する。ここでは構造諸元、加振条件および測定精度を整理する。また、作業性や測定時間など、現場試験において改善が必要な項目を整理し、その解決を図る。

(3) 構造性能評価および耐震性照査

構造解析（FEM）に必要な入力値として点検項目を整理する。さらにFEMをベースにした構造性能評価手法の構築と、耐震性照査に最低限必要となる点検精度を明らかにする。

4. 研究成果

主な研究成果として、加振器を用いた周波数スイープ試験方法の開発と、地盤に埋め込んだ複合構造杭の損傷状態と固有振動数の関係に関する研究概要を以下に示す。

(1) 実験概要

杭長 10m、外径 400mm、内径 260mm の既製杭（プレストレス 5.5N/mm²、中詰コンクリートなし）と複合開発杭（プレストレス 22N/mm²、中詰コンクリートあり）を供試体とする。コンクリートの材料特性を表-1に示す。

本研究では、小型加振器を用いて加速度正弦波を一定振幅で発生させ、周波数を連続的に変化させて構造物の応答を測定する周波数スイープ試験を行う。地盤に埋め込まれた2体の杭供試体の正負交番載荷実験において、写真-1に示すように、杭頭部からの杭長方向に加振および応答加速度の測定を行う。事前検討として、既製杭に対して、気中での振動試験も行った。

表-1 コンクリートの材料特性

	動弾性係数 (N/mm ²)	密度 (kg/m ³)
既製杭・杭体	46500	2410
開発杭・杭体	47000	2410
・中詰	21200	2050

(2) 気中における杭の振動試験

実験状況を写真-1に示す。既製杭に対して、掃引周波数 100~800Hz の測定を 2 分間で行った。図-1に示す共振曲線（周波数-応答加速度関係）より、1~3 次の共振点が得られた。1~3 次の固有振動数の実験結果と理論値を併せて表-2に示す。理論値は、次式を用いて算定した。

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

ここで、 f は縦振動による固有振動数、 n はモード次数、 L は杭長、 E_d はコンクリートの動弾性係数、 ρ は密度である。理論値の算定では、鉄筋の影響を無視した。

表-2より、実験結果と理論値が概ね対応しており、写真-1の振動試験の妥当性を確認することができた。



写真-1 既製杭の振動計測（気中）

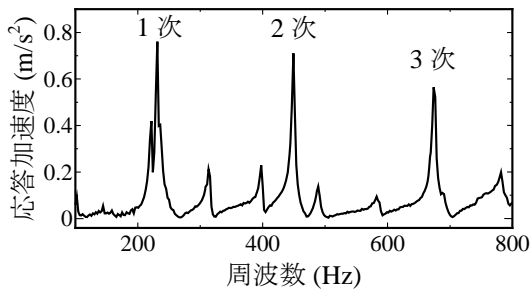


図-1 既製杭の共振曲線（健全時・気中）

表-2 健全時の固有振動数

(a) 既製杭			
モード 次数	実験結果 (Hz)		理論値 (Hz)
	気中	地盤中	
1次	231	236	220
2次	449	440	440
3次	675	641	660

(b) 開発杭			
モード 次数	実験結果 (Hz)		理論値 (Hz)
	気中	地盤中	
1次	---	207	202
2次	---	407	404

(3) 地盤中における杭の振動試験

① 健全時の振動特性

正負交番载荷実験の直前に地盤中に埋め込まれた杭の振動試験を行った。共振曲線の一例と固有振動数をそれぞれ図-2と表-2に示す。気中における図-1の共振曲線と比較して、地盤中における図-2の共振曲線では減衰の増加が見られた。しかし、1~3次の固有振動数については、気中と地盤中では差異がなかった。これより、地盤による拘束は、杭の固有振動数（縦振動）に影響しないことが示された。

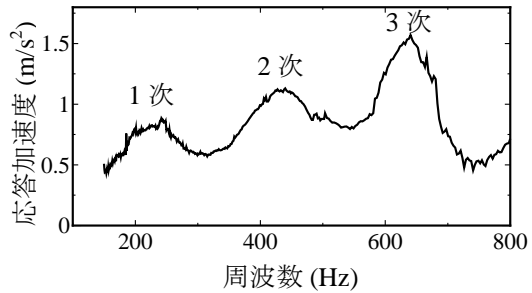


図-2 既製杭の共振曲線（健全時・地盤中）

② 正負交番载荷実験中の振動特性

所要の载荷ステップにおいて正側の最大変位点から除荷をし、水平荷重が零となったときに杭の振動試験を行った。このとき、杭頭部は水平ジャッキから離されており、载荷フレームや反力杭などの影響は受けない。式

(1)より、残存剛性率 $(f/f_0)^2$ を指標として、水平変位と1次の固有振動数との関係を整理する。ここで f_0 は载荷前の固有振動数、 f は各载荷ステップ後の固有振動数である。既製杭と開発杭の軸方向鉄筋の降伏変位は、それぞれ 60mm と 165mm である。図-3より、いずれの供試体でも振動試験は鉄筋降伏前のひび割れによる剛性低下を示した。また、プレストレスが大きい開発杭では、既製杭よりも剛性低下が小さいことが示された。

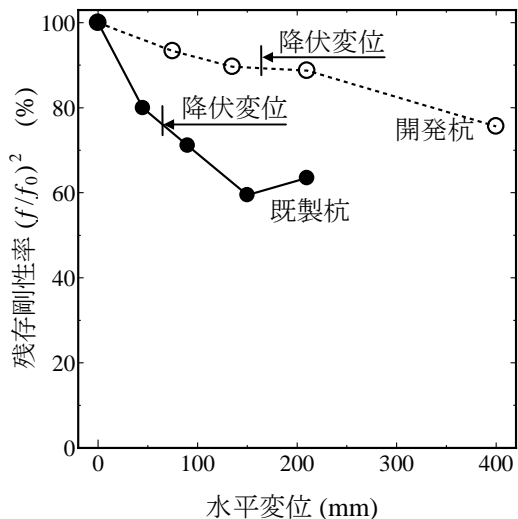


図-3 水平変位と残存剛性率の関係

(4) まとめ

本研究では、小型加振器を用いて杭頭部に正弦波（調和振動）を与えることにより、地盤中の杭の振動特性を評価した。杭の正負交番載荷実験中に振動試験を行い、水平変位（載荷ステップ）の増加に伴って杭の固有振動数と残存剛性率が低下することを示した。

本研究は国内外にない非破壊試験の新規技術を提示するものであり、既存技術よりも高い精度で複合構造の点検・調査を可能にする。特に、地盤中に埋め込まれて目視点検ができない複合杭基礎構造に対しても適用可能であり、地震時の損傷状態を簡便に推定し、余震や今後の大地震に対する当該構造物の耐震性を照査できると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計14件）

- ① 五十嵐亜季, 内藤英樹, 土田恭平, 鈴木基行: 強制加振試験によるコンクリート開水路の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 37, 2015, 掲載決定
- ② 諸橋拓実, 上田博之, 安部誠司, 内藤英樹, 鈴木基行: 反共振周波数を指標とした構造ヘルスマモニタリングに関する基礎的研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 61A, 2015, pp. 110-118
- ③ Seiji Abe, Hiroyuki Ueta, Motoyuki Suzuki and Hideki Naito: Seismic Damage Evaluation of RC Members Based on Vibration Characteristics, Proceedings of 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 査読有, 2014, pp.357-362
- ④ Hiroyuki Yashima, Kouichi Sando, Hideyuki Koga, Motoyuki Suzuki and Hideki Naito: Evaluating Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Deteriorated by Freezing and Thawing Action, Proceedings of 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 査読有, 2014, pp.241-246
- ⑤ 内藤英樹, 長谷川俊, 上田博之, 鈴木基行: 強制加振試験によるRC部材の曲げひび割れの検知, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 36, No. 2, 2014, pp. 781-786
- ⑥ 土屋祐貴, 八嶋宏幸, 内藤英樹, 王蓓, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 凍結融解によって劣化したRCはりのせん断耐力, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 60A, 2014, pp. 751-760
- ⑦ 秋山充良, 内藤英樹, 三浦稔, 浅沼大寿, 荒川岳, 武田篤史, 佐藤啓, 鈴木基行: 高強度RC杭の開発とその構造性能評価に関する実験的研究, 土木学会論文集E2, 査読有, Vol. 69, No. 1, 2013, pp. 118-137
- ⑧ 渡辺孝和, 長谷川俊, 内藤英樹, 鈴木基行: 固有振動数の低下に着目したRC部材の地震時損傷評価に関する基礎的研究,

コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 2, 2012, pp. 901-906

- ⑨ 内藤英樹, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 凍結融解作用を受けた腹鉄筋のないRCはりのせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 1, 2012, pp. 916-921
- ⑩ 内藤英樹, 大竹雄介, 渡邊孝和, 鈴木基行, 中野聡, 岩城一郎, 木皿尚宏: 反共振周波数に着目したはりの損傷位置同定に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 58A, 2012, pp. 150-161
- ⑪ Takakazu WATANABE, Hideki NAITO, Yusuke OHTAKE and Motoyuki SUZUKI: A Method for Determining the Location of Cracks in Concrete Beam Using Anti-Resonance Frequency Change, Proceedings of ATEM'11, 査読有, OS11F024, CD-ROM, 2011
- ⑫ 内藤英樹, 大竹雄介, 齋藤知廣, 鈴木基行: 振動試験に基づくコンクリート部材の損傷同定に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 33, No. 2, 2011, pp. 949-954
- ⑬ 大竹雄介, 内藤英樹, 中野聡, 鈴木基行: 小型起振機を用いたコンクリート橋の強制振動試験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 32, No. 2, 2010, pp. 1459-1464
- ⑭ 齊木佑介, 内藤英樹, 平岡拓朗, 鈴木基行: 共鳴振動法によるコンクリート内部の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 32, No. 1, 2010, pp. 1715-1720

〔学会発表〕（計22件）

- ① 高田瞬: 繊維シート巻立てしたRCはりの損傷評価手法, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2015. 3. 7, 東北学院大学 (宮城県・多賀城市)
- ② 五十嵐亜季: 加振器を用いたコンクリート水路の点検手法, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2015. 3. 7, 東北学院大学 (宮城県・多賀城市)
- ③ 諸橋拓実: 移動型加振源を用いたRCはりの損傷位置同定に関する基礎的検討, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014. 9. 12, 大阪大学 (大阪府・豊中市)
- ④ 内藤英樹: 鋼板および繊維シート補強したRCはりの損傷評価, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014. 9. 12, 大阪大学 (大阪府・豊中市)
- ⑤ 五十嵐亜季: 強制加振試験に基づくコンクリート水路の健全性診断, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014. 9. 10, 大阪大学 (大阪府・豊中市)
- ⑥ 内藤英樹: 鋼板および繊維シートによって補強されたRCはりの損傷評価, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2014. 3. 8, 八戸工業大学 (青森県・八戸市)
- ⑦ 諸橋拓実: RC桁を対象とした構造ヘルス

- モニタリング技術の開発，土木学会東北支部技術研究発表会，2014. 3. 8，八戸工業大学（青森県・八戸市）
- ⑧ 上田博之：振動試験に基づく RC 橋脚の地震時損傷評価に関する基礎的研究，土木学会第 68 回年次学術講演会，2013. 9. 6，日本大学（千葉県・船橋市）
 - ⑨ 八嶋宏幸：凍結融解によって劣化した RC はりのせん断耐力評価，土木学会第 68 回年次学術講演会，2013. 9. 6，日本大学（千葉県・船橋市）
 - ⑩ 上田博之：振動特性の変化に着目した RC 橋脚の地震時損傷評価に関する基礎的研究，土木学会東北支部技術研究発表会，2013. 3. 9，東北大学（宮城県・仙台市）
 - ⑪ 八嶋宏幸：凍結融解を受けた RC はりのせん断特性に関する研究，土木学会東北支部技術研究発表会，2013. 3. 9，東北大学（宮城県・仙台市）
 - ⑫ 長谷川俊：せん断スパン比が異なる RC はりの変形量と固有振動数の関係，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012. 9. 7，名古屋大学（愛知県・名古屋市）
 - ⑬ 上田博之：局所振動試験に基づく RC はりのひび割れ位置の同定，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012. 9. 7，名古屋大学（愛知県・名古屋市）
 - ⑭ 土屋祐貴：凍結融解を受けたスターラップのない RC はりのせん断耐力，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012. 9. 6，名古屋大学（愛知県・名古屋市）
 - ⑮ 岩岸現：周波数特性に着目したコンクリートはりの損傷位置の同定，土木学会第 66 回年次学術講演会，2011. 9. 7，愛媛大学（愛媛県・松山市）
 - ⑯ 柏宏樹：小型起振機による実道路橋の起振実験，土木学会第 66 回年次学術講演会，2011. 9. 9，愛媛大学（愛媛県・松山市）
 - ⑰ 渡辺孝和：地盤に埋め込んだ RC 杭の損傷と固有振動数の関係，土木学会第 66 回年次学術講演会，2011. 9. 7，愛媛大学（愛媛県・松山市）
 - ⑱ 齋藤知廣：周波数特性の変化に着目したコンクリートはり部材の損傷位置の同定，土木学会東北支部技術研究発表会，2011. 3. 5，東北工業大学（宮城県・仙台市）
 - ⑲ 内藤英樹：小型起振機を用いたコンクリート部材の縦振動計測，土木学会東北支部技術研究発表会，2011. 3. 5，東北工業大学（宮城県・仙台市）
 - ⑳ 大竹雄介：小型起振機による橋梁上部工の強制振動試験，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010. 9. 3，北海道大学（北海道・札幌市）
 - ㉑ 渡辺孝和：反共振周波数に着目したコンクリート部材の損傷位置同定，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010. 9. 1，北海道大学（北海道・札幌市）
 - ㉒ 齊木佑介：共鳴振動試験によるコンクリ

ート内部の空隙の検出，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010. 9. 1，北海道大学（北海道・札幌市）

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

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