

## 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25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22246061

研究課題名（和文） 既存コンクリート構造物の長寿命化に向けた総合化技術の構築

研究課題名（英文） Construction of the integrated technology for the extension of life of existing concrete structures

研究代表者

二羽 淳一郎 (NIWA JUNICHIRO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60164638

研究成果の概要（和文）： 経年劣化する既存コンクリート構造物を、適切に維持管理し、長期にわたり供用するための総合化技術を構築し、社会基盤施設の整備に貢献することを目指した。この総合化技術は、3つの要素技術から構成される。すなわち、(1)既存コンクリート構造物構成材料の劣化診断技術、(2)劣化したコンクリート構造物の残存耐荷力評価技術、(3)新材料を用いた各種の補修・補強技術、の開発である。これらの要素技術を統合し、最終的に社会基盤施設の維持管理や整備のための実用的で有用な方策を提案した。

研究成果の概要（英文）： The target of this research work is to build the integrated technology for the maintenance of deteriorating existing concrete structures and to extend the life of infrastructures. This integrated technology is comprised of three elemental technologies. Namely, they are (1) the deterioration diagnosis technology for materials of existing concrete structures, (2) the evaluation technology for remaining load carrying capacity of deteriorated structures, and (3) the development of various repairing or strengthening techniques using new materials. By integrating these three elemental technologies, we have proposed practical and useful measures for the maintenance of infrastructures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	15,300,000	4,590,000	19,890,000
2011年度	13,100,000	3,930,000	17,030,000
2012年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
年度			0
年度			0
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

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：コンクリート構造 長寿命化

## 1. 研究開始当初の背景

既存コンクリート構造物の長寿命化に関しては、従来からも数多くの研究が実施されてきているが、その多くは劣化診断のみや、補修・補強に関する要素技術のみであって、劣化したコンクリート構造物に対する定量的な残存耐力評価や、あるいは補修・補強効果を定量評価するには至っていなかった。

一方、新設のコンクリート構造物を長寿命化することは比較的容易であって、材料的には腐食しないステンレス鋼材やエポキシ被覆された高性能 PC 鋼材を使用したり、あるいは高強度で高耐久な超高強度繊維補強コンクリート (UFC) を使用することなどが考えられる。また、マルチレイヤープロテクションの概念を導入し、多層の耐久性防御策を講じておくことも有力な手法である。さらに構造設計的には、維持管理の容易な連続構造や、支承を無くした一体化構造の採用など、新設コンクリート構造物の長寿命化は技術的には十分に実現可能なレベルにある。

しかしながら、より深刻な問題は既存コンクリート構造物の長寿命化である。公共事業費の大幅な増加が望めない今日、既存コンクリート構造物の劣化状態を的確に診断し、残存耐力や変形能力を正確に評価して、必要に応じて適切な補修・補強を行い、その寿命を延伸していくことは、土木技術者が果たすべき重要な使命である。

## 2. 研究の目的

経年劣化したコンクリート構造物に対しては、材料学的な劣化診断が行われ、一般的には、データベースに基づく統計的な診断や目視による評価が行われている。具体的には、ひび割れやかぶりコンクリートの剥落、鉄筋腐食状況などの目視検査に加え、打音検査や超音波などを用いた非破壊検査が実施されている。本研究ではこれらに加え、研究代表者らが従来実施してきた画像解析や画像処理による表面ひび割れの評価と、自然電位法による鋼材の腐食損傷度予測を組合せ、迅速・正確で客観的な劣化診断を可能としていく。

経年劣化したコンクリート構造物の残存耐力の評価技術については、劣化損傷度、具体的には腐食による鋼材断面欠損量と付着劣化度を定量的に数値解析に取り込み、劣化したコンクリート構造物の残存耐力を定量評価していく。このため、コンクリートコアを採取して圧縮強度や塩化物イオン含有量を測定し、また鉄筋腐食については自然電位法による腐食損傷度予測とコンクリート中からは

つり出した鉄筋から直接断面欠損量を評価する。これらの情報に基づき、従来から開発してきた格子モデル解析や非線形 FEM 解析などに、鋼材断面欠損量および付着劣化度を定量的に取り込んで、残存耐力や変形性能を評価していく。

さらに、新しい材料を用いた各種の補修・補強技術については、従来から研究を進めてきた UFC や ECC 等を用いた新しい補修・補強方法を実用化していく。

## 3. 研究の方法

本研究における劣化診断の目的は、次のステップである、劣化したコンクリート構造物の残存耐力の評価を行うための基礎データを得ることにある。

したがって、画像解析によるひび割れ損傷度の評価や、自然電位法による腐食損傷度予測を高精度化するため、コンクリートコアを採取して圧縮強度や塩化物イオン含有量を測定し、また鉄筋腐食についてはコンクリート中からはつり出した鉄筋から直接、断面欠損量を評価することを試みる。以上より、鉄筋の断面欠損量と付着劣化度をコンクリート構造物の位置ごとに定量評価し、残存耐力の評価に結びつける。

続いて、このようにして得られた鋼材の断面欠損量と付着劣化度をコンクリート構造物の位置ごとに数値的に解析に取り込み、劣化したコンクリート構造物の残存耐力を定量評価する。この問題については、鉄筋の断面欠損と付着劣化を考慮した格子モデル解析にと実験データの比較により、定着が十分に確保されていれば、付着の劣化が直ちにせん断耐力を低下させるものではないことを確認している。しかしながら、現実のコンクリート構造物に対する検討はまだ行っていないので、劣化したコンクリート構造物の残存耐力を算定するにあたり、従来は欠けていた下記の 3 点について、所要の要素実験と解析による検証を行って、数値解析の精度を向上させることとする。

1 点目は、例えば苛酷な環境下では、コンクリート自体も経年的に劣化していくことが予測されるが、従来はコンクリートの劣化損傷を解析上、考慮していなかった。このことを解析に反映するためには、圧縮・引張の繰返し荷重下での腐食鉄筋とコンクリート間の付着特性を新たに解析モデルに導入する必要がある。したがって、関連する既往の研究を整理するとともに、要素レベルのコンクリートの劣化損傷実験を行って、その結果を定式

化し、格子モデル解析に組み込む。

2 点目は、鋼材の定着劣化の問題である。定着部は、コンクリート構造物の全体挙動に大きく影響する重要な要因であるが、従来はこれが一切劣化しないとの仮定のもとで解析を行っていた。本研究では、定着部を特別扱いせず、実構造物に見られる空間的に分布する鉄筋腐食の状態を再現するため、定着部を含めたコンクリート構造物全体に、電氣的な鋼材腐食を発生させ、得られた実験データを用いて、解析結果の精度を検証する。

3 点目は、補修・補強に使用する新しい材料（UFC、ECC あるいは短繊維コンクリートなど）と既存コンクリートとの付着特性である。新しい材料を用いて部分的に補修・補強を行ったコンクリート構造物の耐荷性能を評価するためにはその付着特性が重要であり、実際に想定される補修・補強を行って、検証用の実験データを蓄積する。

以上の 3 点を解決することにより、解析の精度を向上させ、劣化したコンクリート構造物の残存耐荷力の低下と、補修・補強による耐荷力の向上を定量的に評価可能とする。

#### 4. 研究成果

平成 22 年度は既存コンクリート構造物を構成する材料に関する劣化診断技術について、検討を行った。平成 23 年度は劣化したコンクリート構造物の残存耐荷力の評価技術について、重点的に取り組んだ。劣化したコンクリート構造物を模擬するために、電氣的に鉄筋を腐食させた供試体や、意図的に PC ストランドを切断した供試体を作成して、載荷実験を行い、残存耐荷力に関する基礎的なデータを蓄積した。電食実験の結果からは、主鉄筋の断面欠損により、明らかにコンクリート部材の耐荷力は低下するが、これを解析的に予測するには、鉄筋の断面欠損に関する情報の取得が必須であり、劣化診断技術との組み合わせにより、これを実現できる可能性が示された。意図的に PC ストランドを切断した場合、コンクリート部材の耐荷力は大きく低下するものの、破壊に直結するようなことはなく、劣化後の補修・補強を実施することにより、耐荷力を回復できることが確認された。

平成 24 年度は、UFC、ECC、連続繊維シート、短繊維など様々な材料を用いた補修・補強技術の効果を、具体的に検証した。そして、既存コンクリート構造物の長寿命化のための総合化技術の構築に結び付けた。

#### 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 38 件）

- (1) Wirojjanapirom, P., Matsumoto, K., Kono, K., Niwa, J., Experimental Study on Shear Behavior of RC Beams Using U-shaped UFC Permanent Formwork with Shear Keys and Bolts, 土木学会論文集E2、査読有、Vol.69, No.1, 2013, pp. 67-81.
- (2) Niwa, J., Shaky, K., Matsumoto, K., Watanabe, K., Experimental Study on the Possibility of Using Steel Fiber-Reinforced Concrete to Reduce Conventional Rebars in Beam-Column Joints, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 査読有、Vol.24, No.12, 2012, pp.1461-1473.
- (3) Nguyen, T. T. D., Matsumoto, K., Iwasaki, A., Niwa, J., Flexural Behavior of Pre-tensioned PC Beams with Ruptured Strands Strengthened by CFRP Sheets, コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.34, No.2, 2012, pp.439-444.
- (4) Tantipidok, P., Matsumoto, K., Niwa, J., The Effect of Wide Stirrup Spacing on Diagonal Compressive Capacity of High Strength Concrete Beams, コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.34, No.2, 2012, pp.487-492.
- (5) 森誠、松本浩嗣、酒井舞、二羽淳一郎、腐食を有する異形鉄筋の定着部補強方法の検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.34, No.2, 2012, pp.553-558.
- (6) 赤熊宏哉、梶原勉、三宅紀、二羽淳一郎、ビロン繊維メッシュとモルタル充填により補強したRCはりのせん断挙動、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.34, No.2, 2012, pp.1261-1266.
- (7) Jongvivatsakul, P., Matsumoto, K., Watanabe, K., Niwa, J., Investigation on the Shear of Fiber Reinforced Concrete Beams Considering Various Types of Fibers, コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.34, No.2, 2012, pp.1267-1272.
- (8) 酒井舞、森誠、松本浩嗣、二羽淳一郎、定着部腐食を有するRCはりの力学性能と補修方法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.34, No.2, 2012, pp.1363-1368.
- (9) 渡邊祥庸、瀬野健助、加川順一、二羽淳一郎、内圧充填式接合補強方法によるコンクリート中への樹脂充填性能と補修効

- 果、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.34, No.2, 2012, pp.1465-1470.
- (10) 塩見拓也、三木朋広、繰返し荷重下における腐食鉄筋の付着特性に関する実験的研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.12、2012、pp.425-430.
- (11) 宮川侑大、三木朋広、ASRが生じたコンクリートの内部ひび割れ評価および圧縮破壊挙動に関する実験的研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.12、2012、pp.503-508.
- (12) 松谷幸一郎、三木朋広、ASRによりひび割れが生じたコンクリートの引張軟化挙動に関する実験的研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.12、2012、pp.509-514.
- (13) 三木朋広、中野政弘、PRCはりの低サイクル時における残留ひび割れの蓄積に関する基礎的研究、第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、査読有、Vol.21、2012、pp.389-394.
- (14) 渡辺健、中田裕喜、谷村幸裕、逆対称曲げが作用したせん断スパンの小さい鉄骨鉄筋コンクリートはりの破壊性状、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.34, No.2, 2012, pp.1165-1170.
- (15) 轟俊太郎、渡辺健、曾我部正道、谷村幸裕、鉄筋押抜きによるかぶりコンクリートのはく落に関する検討、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.12、2012、pp.69-74.
- (16) 堀慎一、轟俊太郎、渡辺健、谷村幸裕、鋼板補強における拡底式あと施工アンカーの耐力評価法および繰返し載荷特性、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.12、2012、pp.39-44.
- (17) 本田翔平、渡辺健、谷村幸裕、鉄筋コンクリートはりにおける鋼材の付着とひび割れ進展の関連評価、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.12、2012、pp.63-68.
- (18) 高橋健、渡辺健、堀慎一、谷村幸裕、鋼材の破断に伴うPC桁のプレストレス評価に関する実験的研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.12、2012、pp.401-406.
- (19) 轟俊太郎、堀慎一、渡辺健、谷村幸裕、拡底式あと施工アンカーのせん断に対する実験的検討、第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、査読有、Vol.21、2012、pp.233-238.
- (20) 堀慎一、渡辺健、谷村幸裕、グラウト未充填区間を有するPC桁の性能項目の照査に関する感度分析、第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、査読有、Vol.21、2012、pp.431-436.
- (21) 高橋健、渡辺健、谷村幸裕、堀慎一、経時変化を考慮したPC鋼材とグラウトの付着性状に関する実験的研究、第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、査読有、Vol.21、2012、pp.437-442.
- (22) 渡辺健、榊原直輝、Weiss, J., 二羽淳一郎、若材齢モルタルの引張型基本クリーブと微視的破壊に対するAE法による関連評価、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.33, No.1, 2011, pp.455-460.
- (23) 藤枝智子、松本浩嗣、渡辺健、二羽淳一郎、AE法による圧縮クリーブ荷重を受けるコンクリートの損傷評価と破壊の局所化領域の検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.33, No.1, 2011, pp.461-466.
- (24) 酒井舞、松本浩嗣、森誠、二羽淳一郎、断面修復工法により補修した腐食を有する鉄筋定着部の力学性能、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.33, No.2, 2011, pp.601-606.
- (25) 梁田真広、松本浩嗣、二羽淳一郎、画像解析を用いたリアルタイム非接触ひずみ計測領域の広域化、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.33, No.2, 2011, pp.691-696.
- (26) 渡邊祥庸、二羽淳一郎、日野篤志、加川順一、内圧充填接合補強工法によるRC柱の補修効果の検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.33, No.2, 2011, pp.1381-1386.
- (27) Wirojjanapirom, P., Matsumoto, K., Kono, K., Niwa, J., Shear Behavior of RC Beams using U-shaped UFC Permanent Formwork with Shear Keys and Volts, コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.33, No.2, 2011, pp.1537-1542.
- (28) Jongvivatsakul, P., Watanabe, K., Matsumoto, K., Niwa, J., Evaluation of Shear Carried by Steel Fibers of Reinforced Concrete Beams using Tension Softening Curves, 土木学会論文集E2、査読有、Vol.67, No.4, 2011, pp.493-507.
- (29) Tantipidok, P., Kobayashi, C., Matsumoto, K., Watanabe, K., Niwa, J., Proposed Predictive Equation for

- Diagonal Compressive Capacity of Reinforced Concrete Beams, 土木学会論文集E2、査読有、Vol.67, No.4, 2011, pp. 535-548.
- (30) Shakya, K., Watanabe, K., Matsumoto, K., Niwa, J., Application of Steel Fibers in Beam-Column Joints of Rigid-Framed Railway Bridges to Reduce Longitudinal and Shear Rebars, Journal of Construction and Building Materials, Elsevier, 査読有、Vol.27, No.2, 2011, pp. 482-489.
- (31) 塩見拓也、三木朋広、繰返し荷重を受ける腐食鉄筋とコンクリート間の付着挙動に関する実験的研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.11、2011、pp.199-204.
- (32) 渡辺健、堀慎一、田所敏弥、谷村幸裕、鋼材が破断したPCはりの曲げ補強に関する実験的研究、第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、査読有、Vol.20、2011、pp.333-338.
- (33) 藤枝智子、渡辺健、榊原直輝、二羽淳一郎、AE法を用いたコンクリートの圧縮クリープと微視的破壊の関連評価、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.32, No.1, 2010, pp.1739-1744.
- (34) 梁田真広、渡辺健、二羽淳一郎、支圧板幅と圧縮ストラット形状に着目したRCディープビームのせん断耐力に関する検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.32, No.2, 2010, pp.217-222.
- (35) 米花萌、渡辺健、二羽淳一郎、逆対称曲げRCディープビームの破壊性状に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.32, No.2, 2010, pp.661-666.
- (36) 松本浩嗣、柴田耕、二羽淳一郎、川口哲生、ストリップ型UFCパネルによるRCはりのせん断補強、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.32, No.2, 2010, pp.1507-1512.
- (37) Yamamoto, A., Watanabe, K., Li, V. C., Niwa, J., Effect of Wet-Dry Condition on Self-Healing Property of Early-Age ECC, コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.32, No.1, 2010, pp.1739-1744.
- (38) Watanabe, K., Kimura, T., Niwa, J., Synergetic Effect of Steel Fibers and Shear Reinforcing Bars on the Shear-Resistance Mechanisms of RC Linear Members, Journal of Construction and Building Materials, Elsevier, 査読有、Vol.24, No.12, 2010, pp. 2369-2375.
- [学会発表] (計 15 件)
- (1) Jongvivatsakul, P., Matsumoto, K., Watanabe, K., Niwa, J., Application of Tension Softening Curves to Investigate the Shear Carried by Fibers in Various Fiber Reinforced Concrete Beams, International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Toledo, Spain, 2013.3.12.
- (2) 松本浩嗣、佐藤孝昭、二羽淳一郎、広域化リアルタイム画像解析システムの高度化とRCはりの破壊形態評価、土木学会第67回年次学術講演会、名古屋、2012.9.7.
- (3) 中野政弘、三木朋広、PRCはりの低サイクル時における残留ひび割れの蓄積に関する基礎的研究、土木学会第67回年次学術講演会、名古屋、2012.9.7.
- (4) 本田翔平、渡辺健、谷村幸裕、コンクリートと鋼材の付着とひび割れ進展の関連評価、土木学会第67回年次学術講演会、名古屋、2012.9.7.
- (5) 刑部圭祐、松本浩嗣、二羽淳一郎、収縮を受けた高強度コンクリートはりのせん断破壊メカニズム、土木学会第67回年次学術講演会、名古屋、2012.9.6.
- (6) 大屋戸理明、渡辺健、Tantipidok, P.、日本海沿岸地域で約10年間空气中に暴露された鉄筋の腐食性状、土木学会第67回年次学術講演会、名古屋、2012.9.6.
- (7) 宮川侑大、三木朋広、ASR劣化したコンクリートの圧縮破壊挙動に関する実験的研究、土木学会第67回年次学術講演会、名古屋、2012.9.5.
- (8) Tantipidok, P., Matsumoto, K., Watanabe, K., Niwa, J., Experimental Investigation of Diagonal Compression Failure for High-Strength Concrete Beams with Wide Stirrup Spacing, fib Symposium 2012, Stockholm, Sweden, 2012.6.11.
- (9) 森誠、松本浩嗣、二羽淳一郎、直角方向の補強筋および拘束圧がコンクリート中の異形鉄筋の付着性状に及ぼす影響、土木学会第66回年次学術講演会、松山、2011.9.9.
- (10) 塩見拓也、三木朋広、腐食した鉄筋とコンクリート間の繰返し荷重下における付着挙動に関する実験的研究、土木学会第66回年次学術講演会、松山、2011.9.9.
- (11) 渡辺健、高橋健、田所敏弥、谷村幸裕、米田大樹、鉄筋のフシ性状がコンクリートとの付着に及ぼす影響、土木学会第66回年次学術講演会、松山、2011.9.9.
- (12) 渡邊祥庸、松本浩嗣、二羽淳一郎、瀬野

健助、加川順一、内圧充填接合補強工法による断面欠損を有するRCスラブの補修効果、土木学会第66回年次学術講演会、松山、2011.9.7.

(13)堀慎一、渡辺健、田所敏弥、谷村幸裕、岡山準也、PC鋼材が破断したPC桁の曲げ耐力と破壊挙動に関する一考察、土木学会第66回年次学術講演会、松山、2011.9.7.

(14)Watanabe,K., Yonehana,M., Niwa,J., Tanimura,Y., Shear Resistant Mechanism of Reinforced Concrete Beams for Seismic Design of Railway Structures, International Symposium on Bridge and Structural Engineering (IABSE), Venice, Italy, 2010.9.22.

(15)Watanabe,K., Tsunoda,M., Niwa,J., Influence of Local Steel Corrosion on Shear Failure Mechanism of RC Linear Members, International Conference on Concrete under Severe Environmental Conditions and Loadings (CONSEC), Merida, Mexico, 2010.6.8.

[図書] (計2件)

(1) 二羽淳一郎編、都市構造物の耐震補強技術、朝倉書店、2012、117頁.

(2) 辻幸和、二羽淳一郎、PC橋梁の新たななる挑戦、技報堂出版、2011、100頁.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

二羽 淳一郎 (NIWA JUNICHIRO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：60164638

### (2)研究分担者

松本 浩嗣 (MATSUMOTO KOJI)  
東京工業大学・理工学研究科・助教  
研究者番号：10573660

三木 朋広 (MIKI TOMOHIRO)  
神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・  
准教授  
研究者番号：30401540

渡辺 健 (WATANABE KEN)  
公益財団法人鉄道総合技術研究所・構造物  
技術研究部・研究員  
研究者番号：40450746

### (3)連携研究者

なし

以上