

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：82658

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560593

研究課題名(和文) 腐食ひび割れによる鉄筋コンクリート部材中の圧縮耐荷機構の崩壊に関する研究

研究課題名(英文) Study on Collapse of Compression Mechanism in RC member due to Corrosion Cracks

研究代表者

大屋戸 理明(OYADO, MICHIAKI)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：10425910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、鉄筋の腐食によって圧縮耐荷機構が崩壊する現象を解明し、評価することを目的とし、長期暴露試験体、電食試験体および模擬腐食試験体を用いて、影響因子と鉄筋腐食に伴う変状因子の関係を検討した。その結果、腐食に伴う圧縮耐荷機構の崩壊により曲げ耐力と変形能が低下する場合があること、長期自然暴露により劣化した場合のみならず、電食や、人為的に損傷を模擬することによっても圧縮耐荷機構の崩壊挙動を再現できること、三次元画像解析により圧縮耐荷機構の崩壊過程を把握できることを確認し、併せて鉄筋単体の最大応力以降の座屈挙動や、はり部材のモーメント-曲率関係を表現可能なモデルを求めることができた。

研究成果の概要(英文)：This study is to clarify the phenomena of collapse of the compression-bearing mechanism due to bar corrosion. In this study, the relationship between the mechanical factor and the material factor has been investigated. According to the experimental result, it was obtained that the collapse of the compression-bearing mechanism due to bar corrosion could lead to the decrease of the bending strength and the deformation capacity. As well as the long-term exposed specimen, the artificially damaged specimens could simulate the phenomena. It was also obtained that the spatial motions of the concrete surface of the specimens could be traced using the 3D photo analysis method. Following these informations, it was clarified that the newly developed analysis model could express the buckling motion of reinforcing bar, and also obtained that the conventional design model of concrete could be applied to express the moment-curvature relationship of the tested beam specimens.

研究分野：工学

キーワード：コンクリート構造 腐食 強度 変形能

### 1. 研究開始当初の背景

持続可能な社会経済活動を支える上で、既存の社会資本の安全性を確保することは喫緊の課題であり、構造物の材料劣化に伴う構造性能の低下を明確に把握することが求められる。特にコンクリート構造物における鉄筋の腐食については、安全性への影響が多いため、その影響度を的確に評価する必要がある。

RC 部材は引張力を鉄筋が負担し、圧縮力をコンクリートが受け持つことで外力に抵抗するので、鉄筋の力学性能とコンクリートの耐荷性能の両方を評価することが必要不可欠である。しかしながら既往の研究の多くは、腐食が鉄筋の引張性能を低下させるという観点のみから検討されていた。一方、腐食に伴うコンクリート圧縮耐荷機構の崩壊の影響、特に破壊形態や曲げ靱性への影響に着目した研究例は数少なく、かつその検討は定性的な内容に留まらざるを得ない状況にあった。これは、腐食鉄筋の引張強度特性など、検討の前提となる必要な知見の集積が十分でなかったことに加え、腐食生成物の膨張圧が鉄筋周囲のコンクリートに損傷を与えるという認識が十分でなく、鋼材の腐食によってコンクリートそのものに損傷を生じることはないと考えられていたことが原因の一つである。

### 2. 研究の目的

鉄筋の腐食によって損傷を受けたコンクリートについて、圧縮耐荷機構の変化が生じるかどうかを確認するためには、腐食によってコンクリートの顕著な圧縮破壊を生じた事例を収集する必要がある。実際、これまでに筆者らが行った研究例において、数は少ないながらもそれが疑われる事例が得られていた。この実験では、腐食による引張鉄筋の力学性能の低下に比例して曲げ耐力が低下する結果が得られた一方、その破壊形態については圧縮側コンクリートが著しく損傷して終局に至っており(図1参照)、試験体によっては部材降伏以降ただちに荷重が低下に転じ靱性に乏しい挙動を示したのも確認された。このように、数は少ないながらも実例が存在しており、耐荷メカニズム上もこれまで着目されなかった本分野を進展させることが必須となると考えられた。

そこで本研究では、腐食が RC 構造物の構造性能に及ぼす影響を明らかにするため、腐

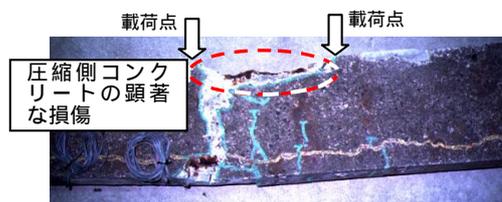


図1 既往の研究における腐食 RC 試験体の破壊状況

食鉄筋が周辺の内部コンクリートに損傷を生じさせる現象に着目して、これによって圧縮耐荷機構が崩壊する現象が生じるかどうかや、その場合にどのような性状を示すかを明らかにし、評価することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では3種類の梁部材を用いて載荷試験を行った。まず、確実にコンクリートの圧縮耐荷機構の崩壊挙動を得ることを目的として、長期自然暴露により劣化した試験体を用いた曲げ載荷試験を行った。次に、人為的に圧縮耐荷機構の崩壊が再現できるかどうかを確認するため、電食により腐食させた試験体を用いた載荷試験を行った。また、腐食によって試験体に生じる鉄筋の損傷とコンクリートの損傷をそれぞれ独立して変動させ、各因子による梁の挙動への影響を把握するため、鉄筋切削やコンクリートの欠損を付与した模擬腐食試験体を用いた載荷試験を行った。ここで、長期自然暴露試験体と模擬腐食試験体の載荷試験では、コンクリートの圧縮破壊時の挙動を精緻に把握することを目的として、三次元画像解析による計測手法を適用した。

さらに、部材構成要素の挙動を要素試験により確認した。まず、腐食もしくは切削を施した鉄筋の一軸圧縮試験を行い、鉄筋断面が欠損した場合の座屈挙動を確認した。さらに、鉄筋とコンクリートの合成要素の一軸圧縮試験を行い、破壊形態について考察した。

これらの成果を総合して、RC 梁部材の圧縮耐荷機構が崩壊する現象を整理し、挙動を評価した。

### 4. 研究成果

#### (1) 暴露梁試験体の曲げ挙動

##### 実験概要

圧縮域のコンクリートに確実に破壊を生じさせるため、20年超の長期自然暴露により劣化させた試験体を用いることとした。今回使用した試験体は、図1に示した圧縮側コンクリートの顕著な破壊が生じた試験体と同一のものである。図1は暴露12年時点の曲げ載荷試験の結果を示しているが、それよりも今回の試験体は暴露期間が長いことから、高い確率で圧縮破壊過程の観察が可能と判断した。これにより、人為的に劣化状態を模擬するのとは異なり、実際の劣化状態での挙動を把握することも可能となる。

試験体形状寸法を図2に示す。暴露試験では、まず暴露前に載荷により曲げひび割れを発生させ、別の試験体と組み締め付けて曲げひび割れを保持し、東京近郊に暴露するという方法で実施されている。また、一部の練り混ぜ水に大量の塩分を導入し、かつ全ての試験体について暴露開始当初17ヶ月間、定期的に塩水を散布している。

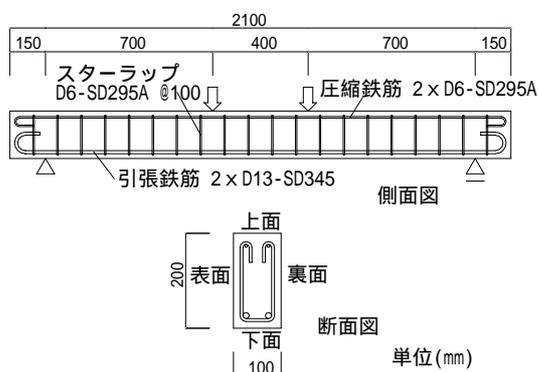


図2 暴露梁試験体形状寸法

### 実験結果

載荷前の試験体について外観調査を行った。腐食によるひび割れは暴露 12 年時点同様、軸方向鉄筋に沿うものが顕著であり、特に上面と表・裏面のひび割れが著しく大きかった。ひび割れ幅は目測で 5mm 程度以上であり、かつ一部のかぶり厚は脱落寸前で、また剥落箇所の起線となり計測できないまでに劣化が進行していた。スターラップ周りの変状については、ひび割れは表面に少なく裏面に多く、その幅は軸方向ひび割れに比べて小さいものの、スターラップに沿う浮き・剥落は特に裏面で顕著であった。

荷重 - 変位関係を、暴露 12 年時の結果 (A ~ C) と併せて図 3 に示す。試験体 A は、試験体 B・C よりもコンクリートの弾性係数や強度がやや小さい試験体である。今回実験を行った試験体は、暴露 12 年時の 3 体のどれよりも耐力が小さく、降伏後の変位 20mm の

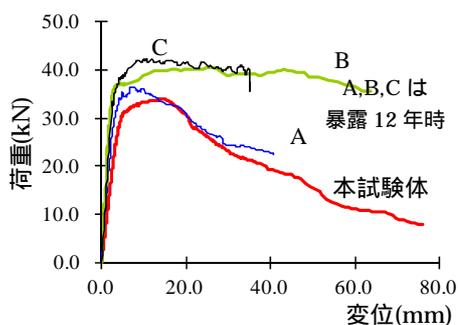


図3 荷重 - 変位関係



図4 等曲げスパンの破壊状況

時点以降は荷重低下を呈しており、部材変形能力に乏しい結果となっている。鉄筋は破断していないので、載荷荷重の低下は鉄筋の負担力の減少によるものではなく、コンクリートの負担力の減少によると見られる。破壊状況を図 4 に示す。等曲げ区間のコンクリートが圧縮側のみならず側面の引張鉄筋位置に至るまで剥落し、集中的に損傷を生じている。圧縮側の鉄筋は腐食によって著しく欠損し、もとより局部的に消失している箇所もあるが、大きく変形して座屈していた。スターラップは元々閉鎖型の配筋とされていないこともあり、側方に向けて拡幅する方向に変位していた。これらの破壊形態より、本試験体ではコンクリートの劣化が部材曲げ性能に影響を与えていることが推測される。最終破壊時には、表層部のみならず内部の深い位置にまで損傷が進行してブロック状にコンクリートが分離し、容易に手で取り除ける状態となっていた。

### (2) 電食梁試験体の曲げ挙動

#### 実験概要

圧縮破壊が先行する RC 部材を人為的に再現できることを確認するため、電食試験体による載荷試験を行った。

試験体は図 5 に示す RC 梁 4 体とした。コンクリートの圧壊を先行させるため、引張鉄筋には D16 (SD490) を 3 本、圧縮鉄筋には D10 を 2 本用いた。パラメータは圧縮鉄筋の腐食の程度 (健全、腐食の程度小・中・大) とした。腐食の程度は、積算電流量を小・中・大と変動させることにより制御した。電食試験では、等曲げ区間の圧縮鉄筋のみが腐食するように電食槽を設置した。載荷試験は、図 5 に示す位置を載荷点・支点位置とし、2MN ユニバーサル万能試験機を用いて、変位制御により一方向単調載荷を行った。載荷試験後、等曲げ区間の圧縮鉄筋を取り出し、10% クエン酸二アンモニウム溶液により除錆して、質量減少率とノギスによる最小径を測定した。さらに、等曲げ区間の圧縮鉄筋の断面積を、3D スキャナにより 1mm ピッチで計測した。

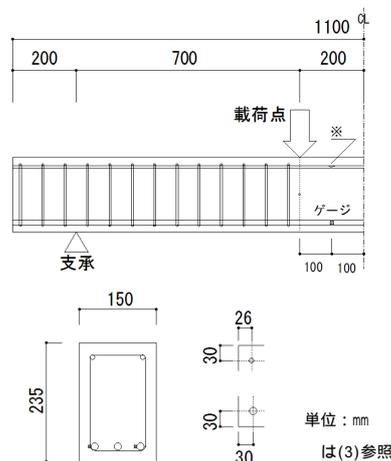


図5 電食・模擬腐食試験体形状寸法

### 実験結果

電食試験体の腐食ひび割れは対象区間の圧縮鉄筋に沿って発生し、最大幅は腐食小と中の試験体では0.05mm以下であったが、腐食大の試験体では0.30mmとやや大きい値であった。腐食中と大の試験体では、圧縮側のみならず引張側にも腐食ひび割れが確認された。腐食大の鉄筋の質量減少率は目標値を下回っており、対象部位以外の鉄筋で腐食が進行したことが推察された。

破壊性状については、健全試験体では曲げ圧縮降伏の挙動を呈した後、等曲げ区間外（載荷点近傍）の上面で圧壊した。電食試験体では等曲げ区間のコンクリートが圧壊し、(1)の自然暴露試験体と同様、圧縮縁から中立軸近傍に至るまでの広い範囲で剥落を生じて終局に至った。

荷重 - 変位関係を図6に示す。健全試験体に比べ電食試験体では最大荷重が低下している。また、腐食試験体は最大荷重到達後ただちに荷重が低下に転じ、靱性に乏しい挙動を示している。

なお、引張鉄筋の歪については、健全試験体と腐食小の試験体では一部の引張鉄筋が降伏歪（ $\epsilon_s = 2940\mu$ ）に達したものの最大でも3100 $\mu$ 程度に留まり、腐食中・大の2体では全ての引張鉄筋が降伏歪に達しなかった。

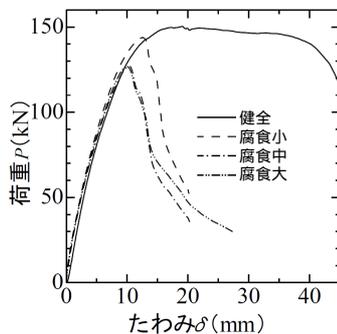


図6 荷重 - 変位関係

### (3) 模擬腐食梁試験体の曲げ挙動

#### 実験概要

鉄筋と梁の損傷状況を詳細に変動させてその影響を把握することを目的とし、あらかじめ圧縮領域に腐食を模擬した損傷を付した梁試験体を作成し、曲げ試験を行った。

試験体の諸元を表1に示す。試験体は電食試験体と同一の諸元の6体である。腐食を模擬し、(図5の断面位置にて)切削した鉄筋を配した試験体を2体、腐食ひび割れを模擬してコンクリート中にアクリルシート（ $t=0.2\text{mm}$ 相当）をエポキシ系接着剤により固定しスリットとして内蔵させた（図7）試験体を4体計画した。腐食ひび割れの模擬は、スリットの向きを横方向（梁幅方向）としたものを基本とし（B3-SC、B6-SCR）、間欠配置としてスリットの量を1/2に減じた試験体（B5-SI）と、上方向にも分散させてL型に配置した試験体（B4-US）を計画した。

表1 模擬腐食試験体諸元

試験体名	鉄筋切削	スリット	
		側方	上方
B1-N			
B2-NR	有		
B3-SC		有	
B4-US		有*	有*
B5-SI		有*	
B6-SCR	有	有	

\*間欠配置(50mm間隔)

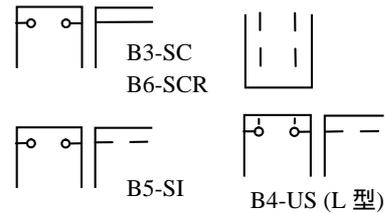


図7 スリットの設定

### 実験結果

破壊状況に関し、健全試験体 B1-N とスリットの量の少ない試験体 B5-SI では、曲げ降伏の挙動を呈した後、せん断スパンの最も載荷点寄りの圧縮領域で破壊した。その他の試験体はすべて等曲げ区間の圧縮領域で破壊した。

等曲げスパンの圧縮領域で破壊した試験体（B1-N と B5-SI 以外）は、(1)(2)の自然暴露試験体・電食試験体と同様、圧縮領域のみならず中立軸近傍に至るまで広い範囲でコンクリートの剥落が発生し、鉄筋が座屈して破壊に至った。鉄筋の座屈は、載荷点間を座屈長さとして、スリットの方や鉄筋の切削位置に関係なく、断面図上で隅角部の斜め上方向に膨み出す形態で破壊に至った。

試験体の荷重 - 変位関係を図8に示す。対象区間全長にわたりスリットを配置した試験体 B3-SC は、健全試験体 B1-N よりもやや小さい変位で耐力低下を生じており、耐力低下の負勾配も急である。スリットを間欠配置とし、スリットの軸方向長さ合計を半減した試験体 B5-SI では、健全試験体 B1-N と同等以上の耐力・変形能を示していることから、コンクリートの損傷量が小さい（スリットを半減した）場合に変形能に影響を与えないことが示唆される。また、スリットの方に着目すると、上方と側方の両方にスリットを配置した試験体 B4-US は、側方だけに連続してスリットを配置した試験体 B3-SC と同等以下の変位で耐力低下を生じていることから、損傷の量が同程度であれば損傷の方向自体は変形能に影響を与えないか、むしろ損傷方向を（L型として）増やすことが変形能を低下させる要因となりうるということが示唆される。

一方、圧縮鉄筋の切削の影響について観察すると、健全試験体 B1-N に対し、圧縮鉄筋を切削した B2-NR は、より小さい変形能となっており、かつ負勾配も急となっている。側

方にスリットを設けた場合も同様に、圧縮鉄筋が切削されていない試験体 B3-SC よりも切削した B6-SCR のほうが小さい変形能を示している。

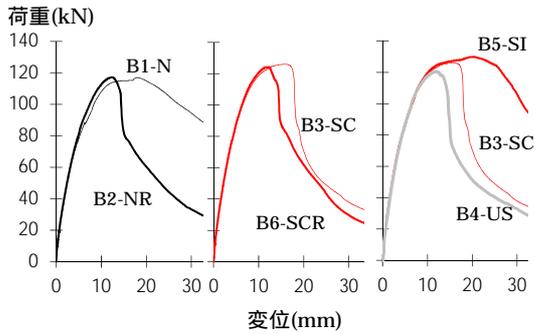


図 8 荷重 - 変位関係

#### (4) 腐食鉄筋の座屈挙動

##### 実験概要

切削および電食によって腐食を模擬した鉄筋の座屈試験を行い、応力 - 歪関係について検討を行った。さらに、最大応力以降の応力 - 歪関係のモデル化を行った。

試験片は、健全・切削・電食鉄筋の 3 種類を用いた。健全鉄筋は、D16(SD345)と D10(SD295)を用い、パラメータは試験長とし、6d から 20d までを 2d 間隔 (d は鉄筋径、計 8 種類) で変動させた。切削鉄筋は、健全鉄筋と同じ D10 を用い、試験長は 16d とし、中央部のみ (C)、上下 2 力所 (U-D) または 3 力所 (U-C-D) の 3 種類を切削箇所とした。切削量は切削深さにより調整し、切削率を 15%、30%、45% と変動させた。また、(2) の電食試験体から圧縮鉄筋 (D10) を取り出し、同様に試験を行った。

加力には 500kN 万能試験機を用い、単調圧縮載荷を行った。計測項目は圧縮力および軸方向変形である。加力方法を図 9 左に示す。

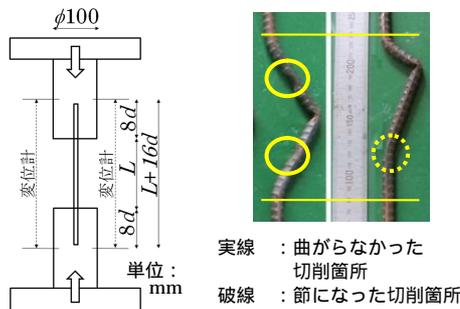


図 9 鉄筋の座屈試験

##### 実験結果

座屈試験の結果、断面減少率の増加に伴って、最大応力の低下が見られた。また、最大応力以降の曲線は、座屈モードの腹の位置によって異なり、試験区間の中心ではなく端部に近い位置で腹となる場合に勾配が緩やかとなる傾向が見られた。加力後の試験片の外

観を図 9 右に例示する。

切削鉄筋の断面減少率と座屈荷重比 (健全鉄筋の座屈荷重に対する比) の関係を図 10 に示す。2 種類の降伏荷重 (1) 切削位置の断面減少を考慮、(2) 切削断面の偏心荷重による全塑性モーメントを考慮) と比較した結果、試験結果は概ね (1) と (2) の間にあり、(2) の値で安全側に評価できることが確認された。

本研究の実験と既往の試験結果 (D13) を用いて、座屈挙動のモデル化を行った。最大応力以降の応力 - 歪関係を次式で表す。降伏棚がある健全鉄筋の座屈開始時歪  $\epsilon_b$  は実験結果から求め、 $\beta$  の値を鉄筋ごとに最小二乗法により求めた。

$$\sigma = \sigma_b (\epsilon_b / \epsilon)^{\beta (1 - \alpha / 100)} \quad (1)$$

$$\beta = 0.051 (L/d) \quad (2)$$

ここに、 $\alpha$ : 断面減少率 (%)

試験結果とモデルを比較した結果を図 11 に例示する (応力を  $\sigma_b$  で基準化)。提案したモデルによって、座屈開始時以降の応力 - 歪関係が概ね再現できることが確認される。

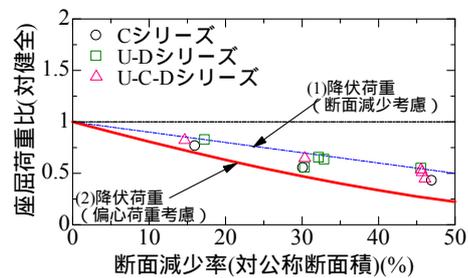


図 10 鉄筋座屈試験荷重 - 変位関係

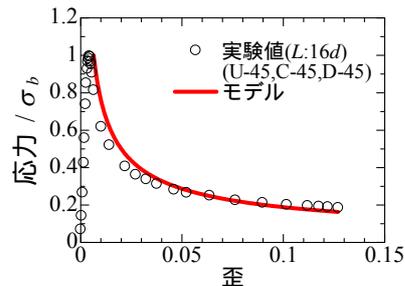


図 11 鉄筋座屈試験結果とモデルの比較例

#### (5) 腐食部コンクリートの座屈挙動

圧縮破壊時のコンクリートの挙動を検討するにあたっては、その変形の推移を把握することが重要となる。しかし、従来の変位計による計測では、三次元的に任意の方向に変位する多くの標点を同時に観測することは不可能である。そこで本研究では、デジタル画像を用いた変位解析手法を採用し、圧縮破壊を生じるコンクリート表面の三次元挙動の把握を試みた。

暴露梁試験体と模擬腐食梁試験体の載荷試験において、試験体表面に標点をマーキングし、複数台のデジタルカメラによって異なる

る方向から一定時間間隔で画像を撮影した(図12)。取得した画像を解析し、それぞれのカメラで独立して標点を追尾した。これとは別に、同じ位置・方向から同一の立方体枠を撮影し、空間上の基準軸を定義すると同時に、それぞれのカメラの画像で特定した二次元画像内の位置を空間座標に変換するための関数を定義した。これらの作業を経て、標点の空間座標の時系列変化を算出した。

画像解析により取得した変位を横軸に、荷重を縦軸にとって、梁側面の側方移動について検討した(図13、標点は右図参照)。梁側面は荷重の増加に従わずかに(最大で0.5mm)側方に変位し、部材降伏時点で減少に転じて一旦0まで戻り、最大荷重後に再び増加に転じて破壊に至っている。最大荷重の前後で挙動に明確な変化が確認され、梁側面の側方移動が耐力低下に重要な影響を与えていることが確認された。



図12 三次元計測用 画像撮影状況

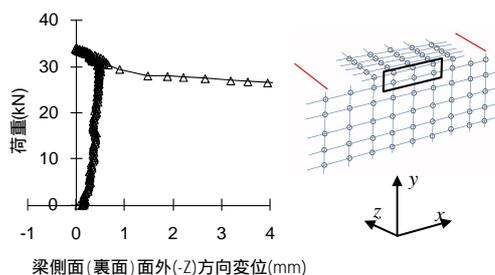


図13 梁側面の側方移動

#### (6) まとめ

腐食に伴って周辺コンクリートに内部ひび割れを生じる場合に着目し、圧縮耐荷機構の崩壊過程を詳細に分析した。得られた結果と今後の課題を以下に列挙する。

腐食に伴う圧縮耐荷機構の崩壊により、曲げ耐力と変形能が低下する場合がある。

長期自然暴露により劣化した場合のみならず、電食や、損傷を模擬したスリットや鉄筋切削を施すことで、人為的に圧縮耐荷機構の崩壊挙動を再現できる。

鉄筋単体の座屈試験により、最大応力以降の座屈挙動の関係式を求めた。

三次元画像解析により、圧縮耐荷機構の崩壊過程をトレースすることができた。

本研究により得られた成果の国内外における位置づけとインパクトについては、腐食

した RC 部材の力学性状の評価において、圧縮耐荷機構の崩壊挙動を考慮することの必要性を明確に示したこと(まとめの )がまず第一に挙げられる。次いで、この解明のために種々の現象を明らかにしたこと(まとめの )、圧縮耐荷機構の変化を測定する手法として三次元画像解析の有効性を示したこと(まとめの )が挙げられる。特に三次元画像解析については、腐食した RC 部材のみならず、圧縮力下にある対象物の挙動を把握するのに極めて有効であり、今後広範に利用されることが期待される。

今後の展望として、鉄筋とコンクリートの合成要素試験等により、圧縮降伏挙動を正確に把握し、またパラメータを精緻化して、詳細な表現式を開発する必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

小川哲史、金久保利之、大屋戸理明：実構造物から採取した腐食鉄筋の力学性状の評価、コンクリート工学論文集、vol.25、pp.23-33、2014。(http://dx.doi.org/10.3151/crt.25.23)

鈴木健二、金久保利之、八十島章、大屋戸理明：圧縮鉄筋が腐食した RC 梁部材の曲げ挙動、鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化シンポジウム論文集、pp.259-264、2013。

Oyado,M.,Kanakubo,T.and Yasojima,A., Effect of Corrosion Cracks in Compression Zone on Bending Performance of Deteriorated RC Members, Concrete Solutions 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Concrete Repair,pp.515-522,2014.

[学会発表](計7件)

大屋戸理明、金久保利之、八十島章：26年間長期暴露した鉄筋コンクリート梁の劣化性状と曲げ性能、土木学会第68回年次学術講演会、2013.9.6、日本大学生産工学部津田沼キャンパス(千葉県習志野市)

金久保利之、武田惇志、鈴木健二、八十島章、大屋戸理明：腐食を模擬した切削鉄筋の座屈性状、土木学会第69回年次学術講演会、2014.9.10、大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

大屋戸 理明 (OYADO MICHIAKI)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：10425910

(2)研究分担者

金久保 利之 (KANAKUBO TOSHIYUKI)

筑波大学・システム情報工学研究科・准教授

研究者番号：90261784

八十島 章 (YASOJIMA AKIRA)

筑波大学・システム情報工学研究科・助教

研究者番号：80437574