

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14867

研究課題名（和文）鉄筋腐食した鉄筋コンクリート造柱の限界変形評価に関する研究

研究課題名（英文）Drift Capacity Evaluation for Reinforced Concrete Columns Deteriorated by Corrosion of Reinforcements

研究代表者

松川 和人（Matsukawa, Kazuto）

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：50709186

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）：鉄筋腐食を生じたRC造部材の限界変形能力評価法の確立を目的として、鉄筋単体の引張試験、柱の静的加力実験を行った。まず、(部材の変形能力に関わる)鉄筋の破断伸びを支配するパラメータを分析し、断面欠損部の長さが支配要因のひとつであると特定した。また、これに基づき鉄筋の破断伸びを評価する手法を開発した。その後の部材実験では、健全試験体と断面欠損部の長さを鉄筋の切削により制御した試験体の比較により、鉄筋腐食部材が脆性的な破壊を生じることを実験的に明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

古い年代に建設された建築物では、経年劣化が問題となることがある。様々な劣化現象の中でも、RC造建築物の構造性能に特に大きな影響を与えるのは、鉄筋の腐食である。鉄筋腐食を生じると、一般に、強度や変形能力が損なわれる。こうした現象を評価することは、例えば戦後建設された著名な建築物の保存や、海沿いの劣化した建築物の安全性評価に有用であるが、これまでは鉄筋腐食建築物の強度評価に関する研究が多く、変形能力はほぼ手つかずの状態であった。本研究は、その点をカバーし、よりよいインフラ、建築物の保全と活用につながるものである。

研究成果の概要（英文）：In order to establish a method for evaluating the drift capacity of RC members with corroded rebar, tensile tests of individual rebars and static loading tests of RC columns were performed. First, the parameters governing the elongation capacity of rebars (which is related to the drift capacity of the member) were analyzed, and the length of the defected section was identified as one of the governing factors. Based on this analysis, a method was developed to evaluate the elongation capacity of rebars. In the column tests, it was experimentally clarified that a RC column specimen made with the corroded rebar suffered brittle failure by comparing control specimen.

研究分野：鉄筋コンクリート造建築物

キーワード：鉄筋コンクリート造 劣化 柱 鉄筋腐食

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1 . 研究開始当初の背景

古い年代に建設された建築物では、経年劣化が問題となることがある。様々な劣化現象の中でも、RC 造建築物の構造性能に特に大きな影響を与えるのは、鉄筋の腐食である。鉄筋腐食を生じると、一般に、かぶりコンクリートの剥落を生じて鉄筋コンクリートとしての一体性が損なわれる。また、腐食した鉄筋は断面積そのものと、その長さ方向の均一性が損なわれるため、変形能力が低下する。鉄筋の変形能力の低下は部材の安定した塑性変形能力の低下を引き起こし、建築物の安全性を低下させる要因となる。しかしながら、鉄筋腐食部材の構造性能に関する研究は、強度に関するものが主体であり、変形能力に関してはまったくの手つかずと言ってよい状況にある。

鉄筋腐食 RC 造部材の実験研究においては、試験体製作後に電食する方法が採用され、試験体破壊後に計測した質量減少率により腐食の程度を表現するものが多い。しかし、質量及びその減少率は部材性能を直接的に表現できる物理量ではないため、おのずと限界がある。それにもかかわらず、鉄筋腐食部材に関する実験的研究において、質量減少率により腐食の程度が表現されてきた理由として、

- 腐食鉄筋の断面積ははつり調査を行わない限り試験体破壊前に計測することは不可能であること
- 試験体破壊後は腐食鉄筋に降伏による絞りが生じ断面積が変化するため、破壊前の断面積を知ることは不可能であること

が挙げられる。すなわち、健全部材とは異なり、鉄筋腐食部材で部材性能を直接説明できる変数（断面積）を用いた実験を行うことは、極めて困難であった（試験体破壊後に取り出した鉄筋を長さ方向に非常に細かく裁断して個々に質量を計測し、その質量減少率を断面積減少率と読み替えることでこれを克服した事例¹⁾もあるが、極めて膨大な実験的労力が必要となり、あくまで例外的な実験例である）。このため、鉄筋腐食部材の構造性能を実験により正しく把握し、評価につなげることは、これまで困難であった。

2 . 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、試験体製作前の鉄筋を事前に腐食させ、3D スキャナーにより腐食鉄筋の断面積およびその長さ方向の分布を詳細に把握する。その後、当該の腐食鉄筋を用いて鉄筋を組み、コンクリートを打設する方法を採用する。この方法には、

- 強度や変形能力の説明性が高い、鉄筋の断面積による評価が可能となる
- 一方で、実際の建築物の鉄筋腐食過程とは完全に異なるプロセスであるため、得られた結果が実構造物の性能を表すものであるかは、極めて慎重な判断が必要となる

という長所と短所がある。この短所は無視できないが、本研究では、質量減少率とは異なるアプローチを採用することで、鉄筋腐食部材の評価に新しい知見を導入することを主眼に計画を立案した。本研究では、上記の短所を含むことを前提として、鉄筋腐食した RC 柱の変形能力の把握と、それを支配する要因であると考えられる腐食鉄筋の伸び能力評価手法の開発を目的として、下記に述べる研究を行った。

3 . 研究の方法

上記の研究目的を達成するため、本研究では、鉄筋引張試験ならびに部材実験を行った。先にも述べた通り、本研究では質量減少率に代えて断面積とその長さ方向の分布に着目している。以下、それぞれの研究手法を説明する。

(1) 腐食鉄筋の伸び能力の評価法

腐食対象としたのは、長さ 520mm の D10 の鉄筋 (SD345) 11 本であり、鉄筋とステンレス円筒を 3% の NaCl 水溶液に入れ、鉄筋は陽極側に、円筒は陰極側に接続させ、1A の電流で腐食を促進させた。また、鉄筋と円筒が互いに干渉しないようにゴム板を用いて鉄筋の下に配置し、鉄筋の両端の 10mm 区間は電線を繋ぐために防食処理を行っている (腐食区間は 500mm)。3D スキャナーにより、電食させた鉄筋の 3D モデルを製作して、腐食鉄筋の断面積分布を 1mm 間隔で正確に把握した。各鉄筋は 2 分割し、それぞれ健全鉄筋 4 本と腐食鉄筋 22 本の計 26 本について、引張試験を行った。鉄筋の破断位置を特定するため、腐食鉄筋の場合は、腐食区間の 250mm に 10mm 間隔で標点を設け、健全鉄筋の場合も腐食鉄筋の場合と同じく 250mm 区間に 10mm 間隔で標点を設けた。また、材料力学理論を用いて、腐食鉄筋の伸び能力評価法を提案し、これら鉄筋の引張試験結果と比較することでその妥当性を検証した。詳細は「4 . 研究成果」で述べる。

(2) 鉄筋腐食した RC 柱の変形能力の把握

後述するように、鉄筋の伸び能力には、断面欠損部の材軸方向長さ L_c が強く影響することが (1) から明らかとなった。そこで、 L_c をパラメータとした部材の塑性変形能力の低下を確認するため、RC 柱試験体の静的加力実験を行った。目的とする破壊形式は曲げ降伏後せん断破壊型とした。本試験体では帯筋のみ断面積減少率 40% まで電食により腐食させ、3D スキャンののち、鉄筋を組立て、コンクリートを打設した。試験体は 4 体であり、健全試験体 (N 試験体)、帯筋全

体を腐食させた試験体(CA-40 試験体)、帯筋の折り曲げ部を防食し直線部のみ腐食させた試験体(CP-40 試験体)、 L_c を極端に短くするため帯筋に長さ5mmの切り込みをいれた試験体(S-40 試験体)を製作した。各試験体の帯筋の様子を図1に示す。試験体の諸元を表1に、各試験体の設計時における強度計算値を表2に、試験体の詳細図を図2に示す。

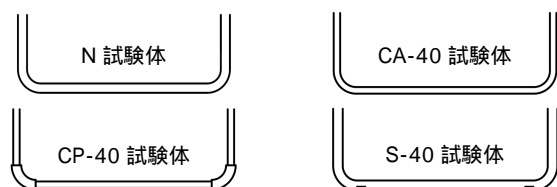


図1 各試験体の帯筋の様子

表1 当初計画の試験体諸元

試験体名	内法高さ	柱幅	コンクリート強度	主筋	帯筋	引張鉄筋比	帯筋比	軸力	軸力比
N	520mm	160mm	30MPa	4-D10	D6@60	0.56%	0.66%	105kN	0.137
CA-40							0.40%		
CP-40							0.40%		
S-40							0.40%		

表2 各試験体の強度(当初計画に基づく)

試験体名	せん断強度 V_u (kN)	せん断終局強度 $Q_{su-mean}$ (kN)	曲げ強度 Q_{cu} (kN)	せん断余裕度
N	61.96	59.55	52.05	1.14
CA-40	55.76	54.01		1.04
CP-40				
S-40				

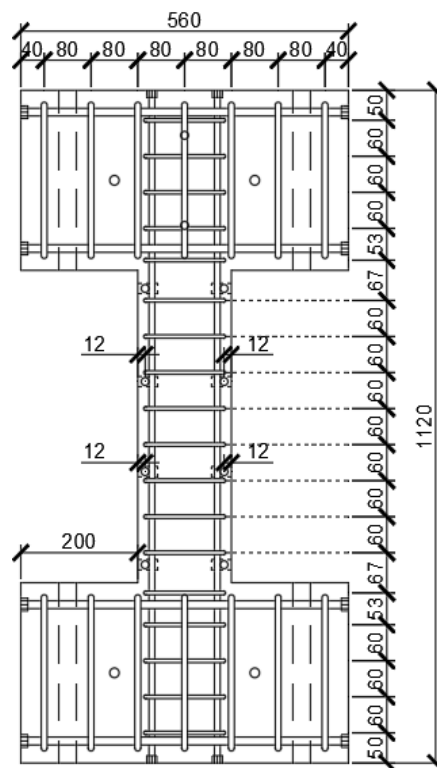


図2 試験体の詳細図

帯筋比は腐食(S-40については切削加工)後の断面積を用いて計算している。各試験体とも、せん断余裕度が1.0を超えており、曲げ降伏後破壊が先行するが、その後、せん断補強筋の伸び能力が腐食により小さくなることで塑性変形能力も同様に小さくなり、曲げ降伏後のせん断破壊により限界変形を迎えるものと考え計画した。加力計画は、所定の一定軸力をまず作用させ、内法高さ520mmを基準に、変形角0.25%、0.50%、0.75%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%を2サイクルずつ正負交番漸増静的繰り返し加力し、全サイクル終了後に、水平方向に押し切る計画とした。一体目に加力したCA-40試験体は計画通りに曲げ降伏したが、その後せん断破壊は生じず、圧縮側コンクリートが圧壊することにより最終破壊に至った。そのため、二体目のCP-40試験体では、105kNの軸力を180kNに増加させ加力試験を行ったが、CP-40試験体と同様に曲げ降伏後のせん断破壊は生じなかった。

ここで、N試験体とS-40試験体のせん断余裕度を低下させるために、柱部分の内法高さ520mmを400mmに変更する治具を製作し、軸力は165kNに変更し、加力を行うこととした。

4. 研究成果

(1) 腐食鉄筋の伸び能力評価法

腐食鉄筋の伸び能力(破断伸び)評価式を、式(1)~(3)に示す。ここに、式(2)、(3)は文献^{2), 3), 4)}によるものであり、本研究の提案部分は主として式(1)である(式(3)については、腐食鉄筋の特性から、 L_0 だったものを L_c と修正している)。式(1)は、断面積最小位置を含む標点距離の区間に一様伸びが発生し、断面欠損が特に大きい区間に局部伸びが発生することを仮定して導出したものである。

$$\text{破断伸び}(\%) = (L_0 \varepsilon_u + L_c \varepsilon_n) / L_0 \times 100 \quad (1)$$

$$\text{一様伸び } \varepsilon_u = 0.47(1 - Y_R) \quad (2)$$

$$\text{局部伸び } \varepsilon_n = 1.28(\beta / L_c) \times (1 - 0.5 \varepsilon_u) \times \sqrt{4A / \pi} \quad (3)$$

$$Y_R = \text{降伏比} \quad \alpha = \frac{\sqrt{1 - \varphi}}{1 - 0.5 \varepsilon_u} \quad \beta = \frac{2 - \alpha - \alpha^2}{1 + \alpha + \alpha^2} \quad \varphi = \text{収縮率} \quad A = \text{破断前断面積}$$

ここに、 L_c は腐食による断面欠損が特に大きい区間の材軸方向長さであるが、その算定には鉄

筋の降伏比と 3D スキャンで得られる長さ方向の断面積分布を用いる。「降伏部断面積 × 降伏応力」が「腐食鉄筋の最小断面積 × 極限応力」に等しいとして、この降伏部断面積以下となる区間長さを L_c とした（ただし、 L_c は 4.0D を超えない範囲とする。D は主筋径。）。また、 L_0 は原標点距離である。図 3 に、提案式による計算値と実験値を示した。同図より、提案式により破断伸びの値を安全側に評価できていることが分かる。

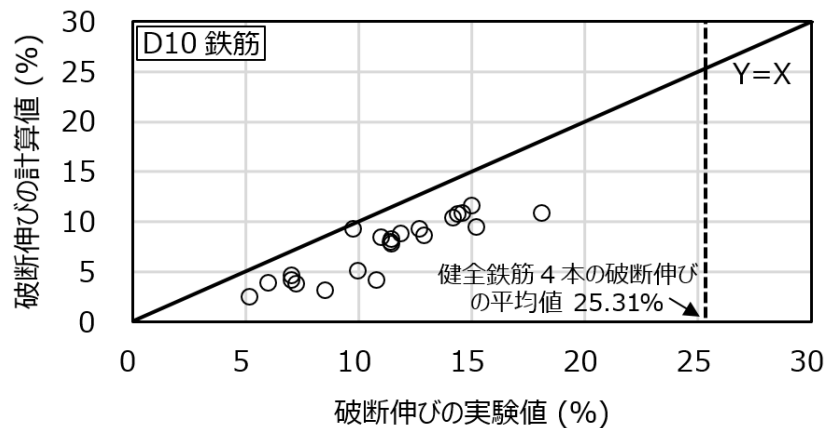


図 3 提案式による計算値と実験値の比較

なお、ここでは検証のため式(1)～(3)の各変数に 3D スキャン結果から得られた数字を代入しているが、実務上は長さ・断面積等についてはノギス等で、降伏比等については標準的な値を代入することを想定している。

(2) 鉄筋腐食した RC 柱の変形能力

N 試験体と S-40 試験体の荷重 - 変形角関係図を図 4 に、N 試験体と S-40 試験体の破壊形状を図 5 に示す。図 4 より、N 試験体と S-40 試験体は変形角 0.6% で曲げ降伏し、変形角 2.5% までは荷重 - 変形角関係がほぼ一致している。N 試験体は付着割裂破壊が進展しつつも変形角 9.2% まで軸力が安定的に保持され、耐力が最大耐力の 50% である 40kN を下回りここで加力終了とした。S-40 試験体は変形角 2.5% でせん断ひび割れを生じ、その後、正側に押し切り、変形角 7.8% で帯筋切削部の破断により軸力保持能力を喪失し崩壊に至ることを確認した。

CA-40 試験体と CP-40 試験体の破壊性状が計画と異なったため、本実験で当初目的としていた L_c に基づいた変形能力評価法を提案するまでには至らなかった。しかし、N 試験体と S-40 試験体の比較により、 L_c が小さい S-40 試験体で極めて脆性的な破壊を生じ、鉄筋腐食により変形能力が低下する現象を確認することができた。

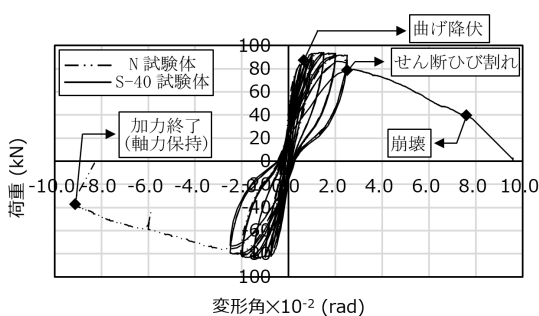


図 4 N 試験体および S-40 試験体の荷重変形関係

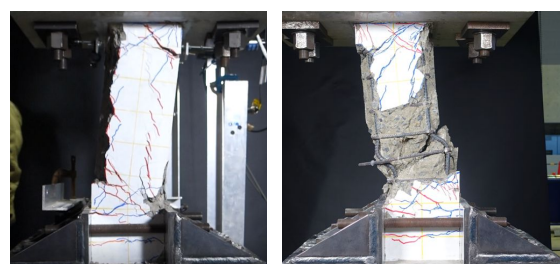


図 5 試験体の最終破壊性状

参考文献

- 1) 村上祐貴, 木下哲秀, 鈴木修一, 福本成幸, 大下英吉 : 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.1, 2006 年, p. 61-74
- 2) 鈴木博之 : 構造用鋼材の一様伸びと降伏比の関係の定式化, 福井工業大学研究紀要. 第一部, Vol.24, 1994 年, p.189-196
- 3) 岩田善裕, 石原直, 向井昭義, 西山功, 青木博文 : 鋼材の素材引張試験における一様伸びと破断伸びの関係, 日本建築学会構造系論文集, 78 巻, 683 号, 2013 年, p.223-232
- 4) 大澤章吾, 井口重信, 杉田清隆, 築嶋大輔 : 軸方向鉄筋の内側に円形帯鉄筋を配置した鉄筋コンクリート柱の限界変位に関する一考察, 日本コンクリート工学年次論文集,

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松川和人
2. 発表標題 電食により腐食させた鉄筋の機械的性質とRC部材の限界変形の評価 その2 腐食鉄筋の機械的性質への検討 2 と部材実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宋榮訓
2. 発表標題 電食により腐食させた鉄筋の機械的性質とRC部材の限界変形の評価 その1 腐食鉄筋の機械的性質への検討 1
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------