# 論文 暴露試験体を用いた腐食 RC 梁の曲げ圧縮挙動に関する研究

大屋戸 理明\*1・金久保 利之\*2・八十島 章\*3

要旨:鉄筋腐食に伴うコンクリートの圧縮性能の低下に伴う鉄筋コンクリート部材の構造性能の変化を把握 することを目的として,梁の曲げ載荷試験を行った。コンクリートの圧縮性能が部材性能に影響を与える事 例を確実に得るため,過去の試験結果で靭性に乏しい挙動を示した長期暴露試験体を用いた。3次元画像解析 による計測を行った結果,圧縮側コンクリートが横方向に膨み出してコンクリートの圧縮耐荷機構が崩壊し, 部材破壊に至る過程を把握することができた。

キーワード:暴露試験,鉄筋腐食,耐力,変形性能,圧縮破壊,3次元画像解析

## 1. はじめに

材料の劣化に伴う構造物の性能低下を的確に把握す ることが求められるようになり,各研究機関で研究がす すめられている。曲げを受ける鉄筋コンクリート(RC) 梁は,引張力を鉄筋が,圧縮力をコンクリートがそれぞ れ受け持つことで外力に抵抗するので,その力学的性能 の評価には鉄筋とコンクリートの両方の評価が必要であ ることは言うまでもない。しかしながら既往の研究のほ とんどでは,腐食が鉄筋の引張性能の低下を生じさせる という観点で部材の耐荷性能が検討されており,部材の 圧縮側の性能変化の観点で検討が行われた例は少ない。

この理由の一つとして、コンクリートの圧縮性能の低 下が部材の性能変化に影響を与えた事例が少なかったこ とがあげられる。一方、これまでに筆者らは、大量の塩 分を導入し 20 カ月<sup>1)</sup> もしくは 12 年 <sup>2)3)</sup> の長期屋外暴露 を行って劣化させた鉄筋コンクリート部材を用い、梁の 曲げ耐荷性能と材料の劣化性状との対応について検討を 行ってきたが、これらの中で耐力に加えて靭性能の顕著 な低下傾向を示した試験体が1体含まれていた。この試 験体は、コンクリートの圧縮性能の低下が原因でこのよ うな耐荷性状を示したものと考えられた。

これら長期暴露を行った試験体は、その後も引き続き 暴露試験が継続されており、暴露期間が20年を超えてコ ンクリートの圧縮性能の低下が予想され、これが部材性 能に影響を与える事例を確実に得られると予想された。 そこで本論文では、腐食により劣化した RC 部材の圧縮 性能の低下による影響を把握することを目的として、こ の暴露試験体を用いた静的曲げ載荷試験を行い、曲げを 受ける試験体の挙動を精緻に調べる。なお、通常の変位 計等を用いた計測ではこの目的に適合しないことが予想 されたため、デジタルカメラによる3次元画像計測手法 を用いることとし、実験を行った。

## 2. 載荷試験概要

#### 2.1 試験体

本研究では、**1**.で示した筆者らによる過去の研究<sup>1)~3)</sup> と同じ梁部材 1 体を使用した。試験体形状寸法を図-1 に、コンクリートの配合を**表-1**<sup>1)</sup>に示す。

暴露試験は,まず(1)暴露前に載荷により曲げひび割れ を発生させ,(2)別の試験体と組み締め付けて曲げひび割 れを保持し,(3)東京都国分寺市内に暴露する,という方 法を採り,かつ暴露開始当初17ヶ月間,劣化促進の目的 で定期的に塩水を散布している。試験体製作・屋外暴露 および塩水散布の開始は1987年,第1期試験<sup>1)</sup>が1989 年,第2期試験<sup>2)3)</sup>が2000年で,今回が第3期試験(2013 年実施)となる。暴露試験の経緯を図-2に,試験体暴



図-1 試験体の形状寸法

表-1 コンクリートの配合<sup>1)</sup>

	空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				水	セメ ント	細骨材	粗骨 材	
	$4\pm1$	65	50	165	245	932	953	
※設計基準強度:24(N/mm <sup>2</sup> )、スランプ:8±2.5(cm)								

\*1 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 博士(工学) (正会員)

\*2 筑波大学 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 筑波大学 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

露状況を図-3 および図-4 に示す。今回使用した試験 体は、第2期試験後に引き続き暴露されていた6体のう ちの1体(図-3@)であり、曲げひび割れを保持する ための締め付け鋼棒を2011年に除去し、その他の条件は 同じとして、引き続き2012年夏まで暴露を継続したもの である。第2期の材料試験結果を表-2<sup>2)</sup>に示す。第3 期は第2期よりも劣化の進行が予想されるため、材料特 性値は表-2より低下していると考えられる。なお、載 荷試験は2013年3月に実施<sup>4)</sup>している。

## 2.2 試験方法

試験体は、まず外観観察により劣化状況の確認を行っ た後、静的曲げ載荷試験を行った。載荷試験は、図-1 に示す位置を載荷点・支承位置とする単純曲げ載荷によ り行った。第2期の結果から試験体の荷重の急激な変動

	コンクリート		鉄筋						
試験 体名	静弹性 係数 (N/mm <sup>2</sup> )	压縮 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	質量 減少率	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張 強度 (N/mm <sup>2</sup> )				
А	19700	28.5	0.15	267	408				
В	31800	42.4	0.14	280	414				
С	31800	38.6	0.11	294	437				
注・コンクリートは 筆 2 期試験の直径 50mm のコアに上ろ									

表-2 材料試験結果(第2期)<sup>2)</sup>

注:コンクリートは、第2期試験の直径 50mm のコアによる 鉄筋の降伏点と引張強度は公称断面積に対する値



#### 図-2 暴露試験の経緯



図-3 暴露試験体配置状況 (第2期試験前の配置を元に図示) は生じないと予想し、変位制御ではなくアムスラー式万 能載荷装置による一方向単調曲げ載荷を行うこととした。 測定は、荷重、変位(載荷点直下・試験体中央および支 点の鉛直変位)ならびに局所変位を対象とした。なお、 局所変位は、後述する3次元画像解析により行った。

載荷試験後は、第2期と同様、各試験体のせん断スパンで100×50×100mm 程度の試料を採取し、表面から深 さ方向に 20mm 毎に切断して、JCI-SC4 に準拠して塩化 物イオン量の表面からの深さ方向の分布を測定した。

## 3. 試験結果

## 3.1 載荷前の劣化状況

## (1) 外観観察結果

載荷前の試験体の外観を図-5 に示す。ひび割れは第 2 期同様、軸方向鉄筋に沿うものが顕著であり、特に上 面(圧縮側,図-5①)と表・裏面(引張側,図-5②) のひび割れが第2期と比べて著しく大きい。ひび割れ幅 は目測 5mm 程度以上で、一部のかぶりは脱落寸前で、 触れるだけでひび割れ幅が変動し、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 ラップに沿うひび割れについては、表面に現れたものは 少なく裏面には多く観察されたものの、ひび割れ幅は軸 方向ひび割れに比べて小さかった。ただし、スターラッ プに沿う浮き・剥落については、特に裏面で顕著なもの が確認されている(図-5③)。第2期の試験体で剥落は スターラップや引張鉄筋位置に若干程度であったのと比 べ,暴露に伴う劣化が顕著であることが伺える。なお, 鉄筋の断面欠損状態は、試験体の外観からは把握できな いが、第2期の状態(図-6に例示)と同等またはそれ 以上の極端な局部的な欠損が生じていると考えられる。

## (2) 塩化物イオン量測定結果

塩化物イオン量の調査結果を図-7 に示す。試験体の 全塩化物イオン量は、第 1 期 (5~10kg/m<sup>3</sup>) や第 2 期 (4kg/m<sup>3</sup>程度)に比べて特に表面・裏面近傍で低く(2 ~4kg/m<sup>3</sup>程度),暴露によって塩分が流出していること が伺える。今回の試験体は第2期同様、第1期のように 裏面側で塩化物イオン量が多い傾向は見られない。



図-4 試験体暴露状況(第2期試験前)



①顕著な軸方向ひび割れ(圧縮側) ②顕著な軸方向ひび割れ(引張側)③スターラップ間のかぶり剥落





## 3.2 載荷試験結果

載荷試験で得た荷重-変位曲線を,第2期の結果と併 せて図-8に示す。第2期Aは,第2期B,第2期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(表-2参照)。本試験体は,第2期の3体のどれ よりも耐力が小さく,降伏後に変位20mmの手前で最大 荷重に達して以降荷重低下を開始しており,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ことが推察 される。引張鉄筋のひずみは測定していないため引張鉄





(a) 側面ならびに上面 (白線は腐食ひび割れ,赤線・赤網掛は載荷ひび割れ)



(b) 等曲げ区間 図-9 破壊状況

筋が降伏したか否かを判定するには至らないが,一般に コンクリートは劣化した場合でも鉄筋のような降伏点を 生じないことから,載荷荷重約 30kN 付近から最大荷重

(変位約15mm付近)に至るまでの、荷重-変位曲線の 折点以降の勾配低下領域で、鉄筋に降伏およびひずみ硬 化が生じていることが推察される。破壊状況を図-9 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,等曲げ区間に集中 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のような様態を示している。こ れらのような破壊形態より,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。

# 4. 3次元画像解析による検討

## 4.1 計測および解析方法

前章の結果より、劣化した梁が曲げを受ける場合、鉄 筋の腐食劣化による影響のみならずコンクリートの性能 低下の影響を受ける場合があると考えられる。かぶりコ ンクリートが浮き上がるような挙動を示した場合,その 浮いた部分は圧縮力を負担できなくなっており、鉄筋の 座屈に対しても抑制の効果が低下していると推察される ので、コンクリートのどの部分がどの方向に変位してい るかをトレース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、同時に多点の観測を行うことは 困難であり、また3次元的に任意な方向の変位を追跡す ることは事実上不可能である。そこで本研究では、デ



(a)暴露試験体標点マーキング(黒〇の位置)



## (b)デジタルカメラ設置状況

図-10 3次元画像解析の撮影状況

ジタル画像を用いた変位解析手法を採用し、コンクリー ト表面の3次元挙動を把握することを試みた。

デジタル画像を用いた変位解析手法は、過去にも例え ば松尾ら 5)によりコンクリート部材の構造実験に取り入 れられている。本研究で用いた手法はこれを3次元に拡 張したものである。対象構造物に標点をマーキングし(図 -10(a)), 複数台のデジタルカメラによって異なる方向 から一定時間間隔で撮影する(図-10(b))。撮影画像を 解析し、それぞれのカメラで独立して標点を追尾する。 これとは別に、個々のカメラで(対象構造物を撮影した のと同じ位置・方向から)同一の立方体枠を撮影し(図 -10(c)),空間上の基準軸を定義する。これにより,そ れぞれのカメラの画像で特定した2次元画像内の位置を 空間座標に変換する3次元キャリビュレーションを行う。 これらの後に解析を行い、標点の空間座標の時系列変化 を算出する。今回の実験では、撮像画面サイズ約35.8× 23.9mm (35mm フルサイズ),約 2000 万 (5472×3648) 画素のカメラを撮影に用いている。なお、荷重や変位計 変位などの画像以外の測定データは、画像撮影と同期で きるよう,同じ時間間隔で取得した。

#### 4.2 予備実験

前節で述べた3次元画像解析による手法の適用性を検 討するため,普通強度コンクリートの円柱供試体 (ø100 ×h 200mm)の1軸圧縮試験により予備実験を行った。 供試体には図-11 左図のように周方向 20×鉛直方向 30mm の間隔で標点をマーキングし,2 台のカメラで有 効に取得できた図ー11 右図に示す各標点について検討 を行った。なお、この計測では、供試体までの撮影距離 はおよそ 50cm で,ズームレンズの焦点距離は 60mm と している。

計測結果のうち、円柱供試体の応力ー軸ひずみ曲線を 図-12 に示す。ここで軸ひずみは、図-13 のように定 義した座標系および標点に対し,標点 1-2 間, 2-3 間の順 に、標点 6-7 間までのひずみを平均した値を標点 1~7 ひ ずみとし、同様に標点8~14ひずみと標点15~21ひずみ を算出している。図-12 左図によれば、標点 1~7 ひず み,標点8~14 ひずみならびに標点15~21 ひずみの載荷 初期のひずみのばらつきが大きく,例えば応力15N/mm<sup>2</sup>



図-11 3次元画像計測予備試験状況 および検討に用いた標点

レーション状況

(赤枠の頂点を基準)

時点で2倍程度のひずみの差異が認められる。全ての縦 方向隣接標点間ひずみを平均化して算出した軸ひずみを 用いた図が図-12右図であり,B点の破壊状況を図-14 に示している。一般的なコンクリート円柱の強度試験で ひずみゲージ等によって得られる応力-ひずみ曲線より ばらつきが大きいが、応力の増加に伴って軸ひずみが増 大するという大まかな傾向は把握できており、最大応力 時の軸ひずみ(2000 µ)も妥当である。x(概ね周方向)・ y(鉛直方向)ひずみのバブルチャートを図-15に示す。 横線上(x方向)は引張ひずみを網掛け有りで、縦線上

(y 方向) は圧縮ひずみを網掛けなしで示している。破壊時点に近づくにつれて局所ひずみが進展している様子が確認でき,縦ひび割れの発生した図-14の破壊状況とも一致している。



図-15 予備試験の周方向・鉛直方向 ひずみのバブルチャート

## 4.3 暴露試験体の3次元画像解析

前節の経緯から,3次元画像解析による手法が適用可 能として,暴露試験体の分析を行った。

図-9(a)に示すように、側面(裏面)は縦(y)×横(x)= 40×50mmの、上面は縦(z)×横(x)=25×50mmの間隔で標 点をマーキングし、各標点について画像解析により3次 元的な位置を追跡した。なお、この計測では、カメラと 供試体の間の撮影距離はおよそ70cmで、ズームレンズ の焦点距離は24mmと設定している。

計測結果のうち,変位計により取得したはりのたわみ 変位と,画像解析により取得した鉛直変位をそれぞれ横 軸・縦軸にとって図−16に示す。なお,画像解析変位は, 図−16右図で□で囲った9点のy座標から求めた平均値 である。両者はほぼ完全な線形対応をなしているが,3 次元画像解析変位は変位計変位に比べて1.35倍の応答を 示している。これは,画像解析で設定した座標軸が変位 計の移動軸と必ずしも一致していないことが一因とも考 えられるが,詳細な精査は今後の課題である。以降,本 論文では,暴露梁試験体の3次元画像解析の応答のうち, 変位の絶対値に関する情報は参考程度に留めて扱う。変 位として変位計変位と3次元画像解析変位の2種類を採 用し描画した荷重一変位曲線を図−17に示す。3次元画 像解析変位は上述の倍率 1.35 を除して用いているが,3 次元画像解析により十分な情報が得られている。



図-16 変位計変位と3次元画像解析変位の対応



画像解析により取得した側方(z)変位を横軸に、荷重 を縦軸にとって,はり側面の側方移動について検討した。 検討に用いた値は図-18右図に示した6つの標点の移動 量の平均である。標点は荷重の増加に従いわずかに(最 大で 0.5mm) 側方に変位し、部材降伏時点で減少に転じ 一旦0に戻り,最大荷重点で再び増加に転じて破壊に至 っている。同じく上面の9点の浮き上がり変位量平均値 (上面9点のy変位と図-16右図側面9点のy変位の差) と荷重との関係を図-19に示す。概ね単調増加の傾向に あるが,降伏までは変化が小さく,降伏以降は増加の割 合が増している。図-18のように最大荷重時点前後で傾 向が明確に変化する傾向はない。一般に健全な試験体で は、等曲げ区間の圧縮側のコンクリートに破壊が生じて も側方の破壊は軽微であることが多く、この試験体で側 方への膨みだしを生じていることは特徴的である。この 原因の一つとして, スターラップの腐食が側方コンクリ ートの内部にひび割れを生じさせ、また横拘束力の低下 を生じさせたことが考えられる。

なお、圧縮側の標点の軸方向(x) ひずみを算出して検 討したところ、載荷当初から±2000 μ程度のばらつきの 大きいひずみが算出される結果となった。梁載荷試験で は、予備実験よりもレンズの焦点距離を24mmと広角に 設定しているので、画像の分解能の低下に伴い解析値の 精度が低下した可能性は考えられる。本手法をひずみの 分析に用いる際は、ばらつきの処理方法や解析値の解釈 方法について検討が必要と考えられる。



## 5. まとめ

鉄筋腐食に伴うコンクリートの圧縮性能の低下によ り、鉄筋コンクリート部材の構造性能の変化を把握する ことを目的として、梁の曲げ載荷試験を行った。コンク リートの圧縮性能が部材性能に影響を与える事例を確実 に得るため、過去の試験結果で靭性に乏しい挙動を示し た長期暴露試験体を用いた。また、コンクリートの圧縮 耐荷機構が崩壊する現象を捉えるため、3次元画像解析 による計測を試みた。確認された事項を以下にまとめる。

- (1) RC部材は大量の塩分の導入と26年程度の長期暴露 により、かぶりが脱落するなどの著しい劣化を生じ る場合がある。
- (2) 顕著に腐食劣化した RC 部材は,耐力に加え変形性 能が低下する場合がある。材料劣化が RC 部材の曲 げ性能に与える影響に関し,引張鉄筋の性能低下の みならず座屈・圧壊の検討を要する場合がある。
- (3) 3 次元画像解析による計測は、ひずみのばらつきが 大きかったり、変位計で取得した値よりも一定の割 合で大きい場合があったりするなど、取扱いに注意 が必要なものの、同時多点の任意方向の計測が可能 で、挙動の大まかな傾向を把握するのに有用である。
- (4) 今回用いた腐食 RC 梁では,圧縮側の破壊のみならず,コンクリートが横方向に膨み出す破壊形態を示したことに特徴がある。

## 謝辞

本研究は科学研究費助成事業(基盤研究(C)課題番号 24560593)によっている。

### 参考文献

- 山住克己,宮本征夫,佐藤勉:鉄筋を腐食させた RC はりの劣化状態と耐力について、コンクリート工学 年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.557~562, 1990.
- 大屋戸理明,西脇敬一,長谷川雅志,永岡高:長期 暴露した鉄筋コンクリート梁の劣化性状と耐力,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1315 ~1320, 2001.
- 西脇敬一,大屋戸理明,長谷川雅志,永岡高:鉄筋 が腐食した RC 梁の疲労性状,コンクリート工学年 次論文集, Vol.24, No.1, 1123, 2002.
- 4) 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回年次学術講演会講演概要集,V-206, 2013.
- 5) 松尾豊史,酒井理哉,松村卓郎,金津努:鉄筋腐食 した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究, コンクリート工学論文集,15-2, pp.69-77, 2004.