

論文 劣化や補修を施した単配筋 RC アーチ構造の偏載荷重に対する耐力

大西 郷^{*1}・田中 章夫^{*2}・箕輪 健一^{*3}

要旨：偏載荷重を受ける RC アーチ構造物を対象に、劣化または補修を施した際の構造性能への影響に関する基礎的な分析を行った。また併せて、静的載荷実験の再現解析を行い、健全な試験体に対する評価精度の確認ならびに鉄筋腐食により劣化させた試験体の評価方法の検討を行った。その結果、RC アーチ構造物の最大耐力は、ひび割れの有無にはよらず、健全な試験体よりも補修を施した試験体では 1 割程度大きく、健全な試験体よりも劣化を施した試験体では 2 割程度小さい値となることを示した。また、ファイバー要素により構成した数値解析モデルにより、健全な試験体の実験結果を精度良く評価できることを示した。

キーワード：単配筋 RC アーチ構造, 偏載荷重, 電食試験, 内圧充填接合補強工法, ファイバー要素

1. 序

3次元 CAD や加工技術の発展により、様々なデザインを有する曲面用型枠の形成が容易にできるようになり、自由曲面コンクリートシェルへのニーズが高まっている。このような背景もあり、2020年にはコンクリートシェルの設計指針¹⁾が発刊する運びとなった。しかしながら一方で、コンクリートのクリープ、繰返し温度変化や地震荷重に起因する経年劣化、更には鉄筋腐食による、構造安全性の低下や剥落事故が社会的な問題となっている。特に、鉄筋コンクリート (RC) シェルは、その特性上、構造物が外的要因にさらされる率が高く、劣化や補修の影響の把握と評価が強く望まれている。

そこで近年、武藤らは、RC アーチの振動破壊実験²⁻⁵⁾や大型 RC シェルの長期変形と構造特性に関する実証⁶⁾をしている。また、田中・眞下ら⁷⁻⁹⁾は、炭素繊維シートによる修復を施した RC シェルの耐力の検討をしている。このように RC シェルに対する実験的な研究は行われてはいるがその数は少なく、劣化や補修に対して体系的に検討が行われている実験的研究は見当たらない。

また近年では、近代に施工されてきた RC シェル構造物の劣化や耐震性能不足の問題から、数多くの歴史的 RC シェル構造物の取り壊しが余儀なくされている。RC シェル構造物の補修は一般的な重層構造物と同様にはいかず決して容易ではなく、その経時変化の影響の評価と適切な補修工法の提案が急務となっている。

そこで著者らは、一般の重層構造物に比べ薄い構造体で構成されるシェル構造物を対象に、ひび割れや腐食等の経年劣化による影響の定量的な把握と、それらに対する補修効果の定量的な把握を目的に研究を行っている。その研究の端緒として本研究では、RC シェルの基本形状であるアーチ構造物を対象に、偏載荷重に対する静的載荷実験による破壊性状の把握と、腐食劣化または補修

を施した際の構造性能への影響について基礎的な分析を行う。また併せて、静的載荷実験の再現解析を行うことで、健全な試験体に対する評価精度の確認ならびに鉄筋腐食により劣化させた試験体の評価方法の検討を行う。

2. 単配筋 RC アーチ構造物の静的載荷実験

2.1 試験体形状および実験方法

図-1, 2 に試験体形状と加力フレームを示す。試験体は、図-1(a)に示すように、スパン L が 3450 mm, 半開角 θ が 30 deg のアーチ構造物である。ここで境界条件は、図-1(b)に示すように、RC アーチの両端に設けたステンレスパイプに通した直径 $\phi 35$ mm の丸鋼により両端ピン支持とする。試験体の断面形状は、図-1(c)に示すように、シェル幅 b を 150 mm, シェル厚 h を 40 mm とする。

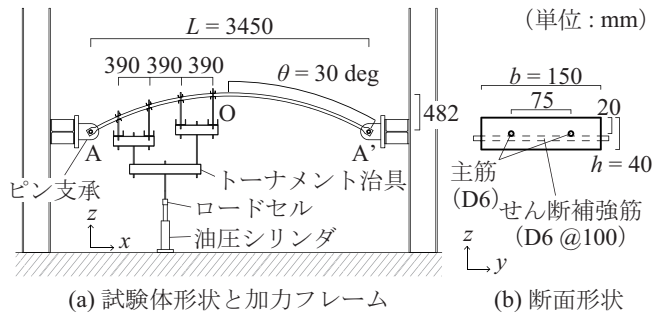
断面内に配する鉄筋は異形鉄筋 D6 (SD295) とする。なお、鉄筋の引張試験の結果は解析モデルの説明にあわせ図-8 に示す。ここで、文献 4) の鉄筋比を参考に、材軸方向の主筋は、成の中央に 2 本配置することで主筋比が 1.77% となるように、また、アーチの構面外方向に対するせん断補強筋は、100 mm 間隔に配置することでせん断補強筋比が 0.35% となるように設定した。表-1 にコンクリートの調合計画を示す。コンクリートは設計基準強度 24 N/mm² を満たす水セメント比 58.8% とした。使用材料として、セメント (C) は普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/cm³)、水 (W) は上水道水、細骨材 (S) は大井川水系陸砂 (表乾密度: 2.59 g/cm³)、粗骨材 (G) は青梅産硬質砂岩 1005 (表乾密度: 2.65 g/cm³) を用いた。なお、シェル厚さを考慮して最大粗骨材寸法 10 mm の骨材を使用した。

載荷は、図-1(a)に示すように、試験体に設置したトーナメント治具による試験体半分への偏載荷重により行う。ここで、荷重は油圧シリンダ上部に設けたロードセルに

*1 日本工業大学 建築学部 助手 修士 (工学) (正会員)

*2 日本工業大学 建築学部 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 日本工業大学 建築学部 准教授 博士 (工学)



(a) 試験体形状と加力フレーム

(b) 断面形状

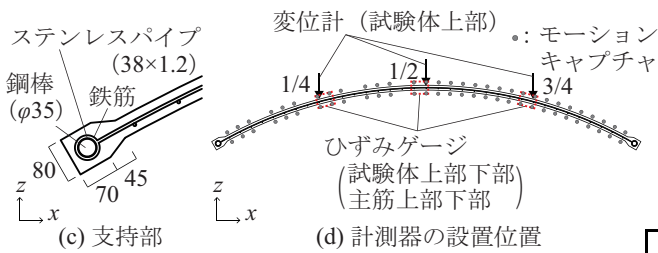
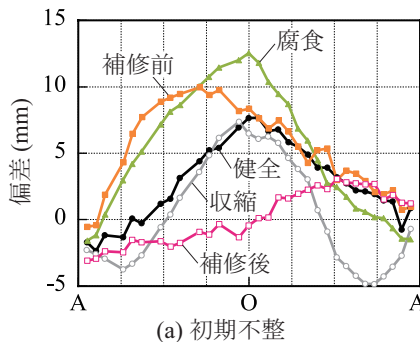


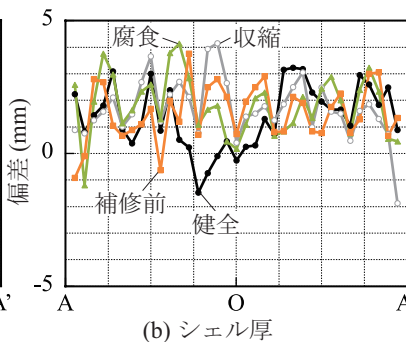
図-1 試験体形状および加力フレーム

表-1 コンクリートの調査計画

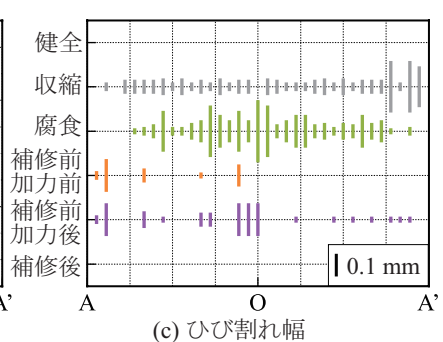
組骨材 最大寸法 (mm)	スランブ 範囲 (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
10	18.0	58.8	48.0	176	299	850	943	2.99



(a) 初期不整



(b) シェル厚



(c) ひび割れ幅

図-4 アーチ試験体の初期不整量・シェル厚・ひび割れ幅

より計測する。また計測は、図-1(d)に示すように、変位を変位計およびモーシオンキャプチャにより、ひずみをコンクリートの上部または下部もしくは主筋の上部および下部に貼付したひずみゲージにより行う。

2.2 試験体諸元

表-2 に試験体の一覧を示す。試験体は健全，収縮，腐食，補修の4体を用意した。ここで，健全試験体は，脱枠後，ラップを用いた封緘養生により乾燥ひび割れを低減させた試験体である。一方，収縮試験体は，型枠後から20度環境下にて自然乾燥させ，自由収縮によるひび割れを発生させた試験体である。また，腐食試験体は，コンクリート単位量の外割りとして塩化物イオン量5 kg/m³になるようNaClを添加した上で，飽和塩化カリウム水溶液による塩橋を用いて電食試験を実施し，所定のひび割れが発生するまで印可（印可電流0.5 A/hr）した。

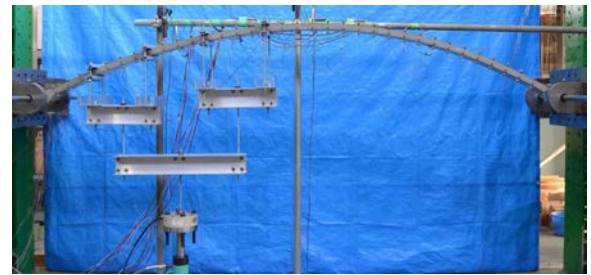


図-2 試験体セットアップ



図-3 内圧充填接合補強工法の様子

表-2 試験体一覧

試験体名	初期不整 (形状, 量)	主な ひび割れ 方向	コンクリート	
			ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
健全	1山形状, 小	なし	23440	33.4
収縮	3山形状, 大	主筋直交	23450	30.8
腐食	1山形状, 大	主筋平行	23050	27.7
補修前	1山形状, 大	主筋直交	23440	33.4
補修後	2山形状, 小	なし	24280	30.3

腐食範囲は図-1(d)に示される1/4~3/4の範囲に制限し実施した。鉄筋腐食部の腐食量は，載荷試験後に軸両方向の鉄筋を採取し，D6（公称直径6.35 mm，公称断面積31.67 mm²，単位重量0.249 kg/m）に対する腐食量として算出した結果，腐食減少率は24.4%，断面欠損率は32.2%（直径約5.2 mm）であった。そして，補修前試験体と補修後試験体は同一の試験体である。補修後試験体は，補修前試験体に短期設計荷重相当の加力を行った後，図-3に示す内圧充填接合補強工法により補修を行った状態を指す。なお本研究において補修は，変形性能の小さい無機系補修材では早期の再劣化が懸念されるため，ひび割れ浸透性と追従性の高い有機系樹脂により行った。

図-4 に試験体の初期不整量とシェル厚と試験体セットアップ時のひび割れ幅を示す。(a)に示す初期不整量は，補修後以外の試験体において最大10 mm程度あり，スパ

ンLに対し最大 1/300 程度である。一方、補修後の試験体については、荷重により AO 間が沈んだ 2 山形状を呈した。(b)に示すシェル厚に関しては、設計値より最大 4 mm (約 1 割) 程度厚いものの、設計値より薄い位置は概ね見られない。(c)に示す目視により確認された主筋直交方向のひび割れに関しては、健全試験体では全く観測できなかったものの、収縮試験体では乾燥収縮によるひび割れ同様に材軸と直行する方向に試験体全体で見られた。腐食試験体と補修前試験体の加力前では、収縮試験体同様に材軸と直行する方向にひび割れが見られたが、収縮試験体よりは少量である。

3. 偏載荷重を受ける RC アーチ構造物の静的荷重実験

3.1 劣化や補修による荷重変位とひずみ曲線への影響

本章では、様々な状態の RC アーチ構造物に対し、偏載荷重実験を行い、使用性や安全性、安定性の観点から、その剛性や耐力等の構造性能の把握と比較を行う。

図-5に荷重実験により得られた荷重-変位曲線および荷重-ひずみ曲線を示す。(a)に示す荷重-変位曲線から、試験体によらず、試験体の中央 1/2 の位置よりもトーナメントの中央 1/4 の位置において変形が大きく発生することが確認できる。(a1)に示すとおり、荷重が 0.2 kN 程度程度までは試験体によらず初期剛性は概ね等しい。荷重が 0.5 kN 程度になると、試験体全体にひび割れの発生が確認された収縮試験体の剛性が低下する。更に、荷重が 1.0 kN 以上になると試験体の剛性は、腐食試験体、

健全試験体、補修後試験体の順に低下していく。これらの剛性の低下は、試験体セットアップ時にひび割れ量が多いと起きやすいと推測される。一方、最大荷重 F_p については、試験体設置時に試験体全体にひび割れが確認できた収縮試験体とひび割れが見られなかった健全試験体で概ね一致する。また、補修を施した補修後試験体の最大荷重は、健全試験体よりも 1 割程度大きい。これは補修によりコンクリートの引張強度が増したためであると考えられる。劣化を施した腐食試験体の最大荷重は、健全試験体よりも 2 割程度小さい。これは腐食により鉄筋の耐力が低下したためであると推測される。

(b)に示す主筋の荷重-ひずみ曲線から、最大荷重 F_p 到達時とほぼ同時期に 1/4 位置の主筋のひずみが降伏ひずみ (約 1600 μ) に達することが確認できる。また(c)に示すコンクリートの荷重-ひずみ曲線から、1/4 位置の圧縮側のひずみが圧縮強度に相当するひずみに達すると荷重が大きく低下することが確認できる。このように、本研究における試験体は、先ず主筋が塑性化することで荷重が伸びなくなり、次にコンクリートが圧壊することで耐力をむかえたものと考えられる。

3.2 劣化や補修による変位分布や破壊性状への影響

図-6 に荷重実験により得られた鉛直方向の変位分布を示す。試験体によらず変位分布は、荷重した AO 側が下方向にたわむ 2 山の形状を呈する。そして、図中の括弧で示したように最大荷重 F_p 以上になると、曲率の変化が大きい点が表れ、その点近傍の変形が大きく進行する

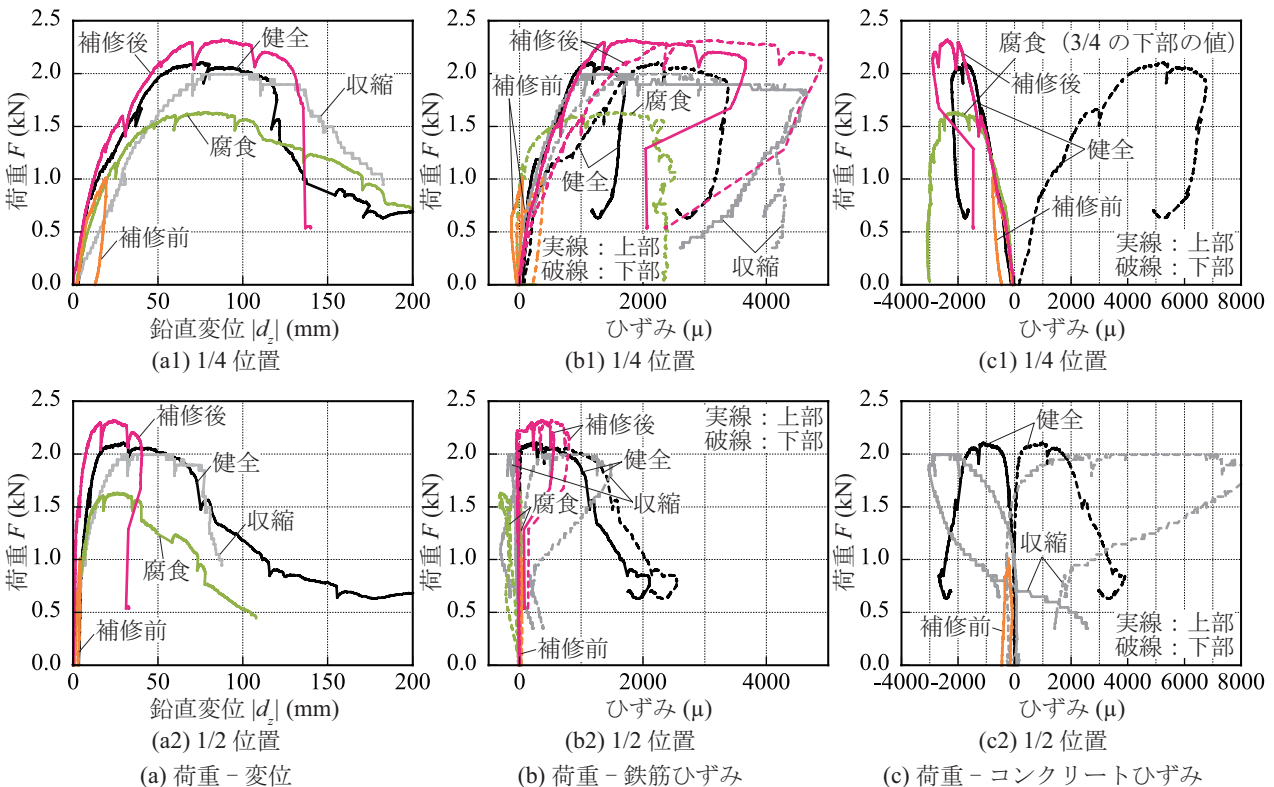
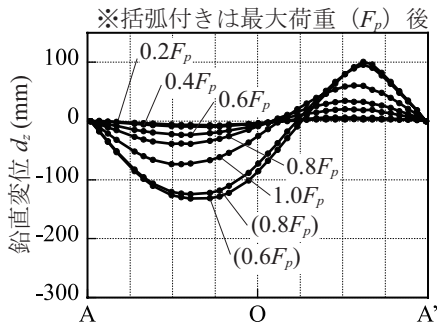
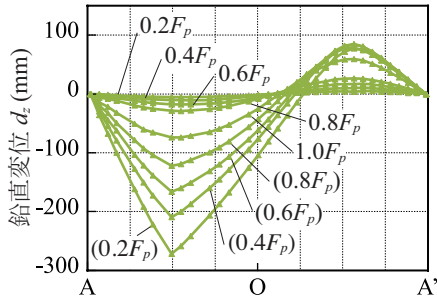


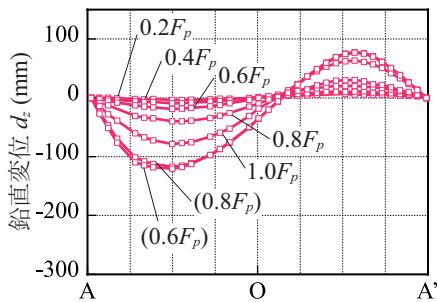
図-5 劣化や補修による荷重-変位曲線および荷重-ひずみ曲線への影響



(a) 健全 ($F_p = 2.11$ kN)



(b) 腐食 ($F_p = 1.63$ kN)




(c) 補修後 ($F_p = 2.32$ kN)

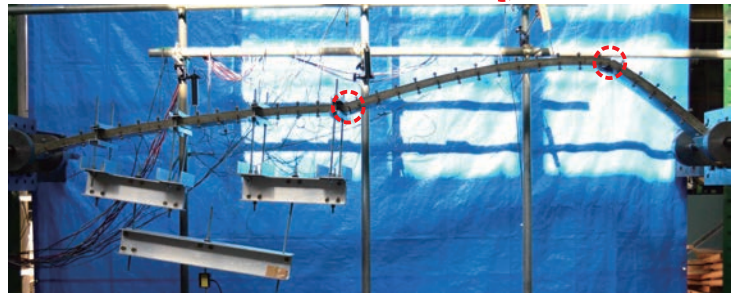
図-6 劣化や補修による鉛直方向の変位分布への影響

よくなることを確認できる。

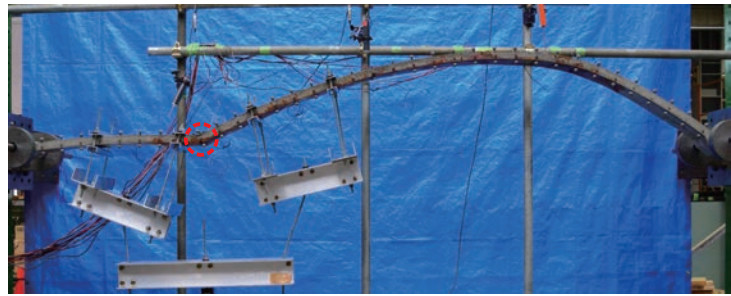
ここで、載荷実験時の破壊性状の様子を図-7に示す。なお、図には示していないが、ひび割れに関しては、変位が大きい、かつ引張側の1/4位置の下部と3/4位置の上部に多く発生する。このため補修は、図-3に示す通り、この点近傍および試験体セットアップ時に発生していたひび割れ近傍において重点的に行った。

試験体によらず構造物はコンクリートの圧壊により生じるヒンジ(以降、塑性ヒンジ)の発生により崩壊した。最初に発生した塑性ヒンジの発生位置は、健全試験体では3/4位置より若干支点A'側の位置であり、腐食試験体ではほぼ1/4位置であった。これらの位置は、概ね変位分布の最大点近傍に相当し、最大曲げモーメント発生位置であると推測できる。一方、補修後試験体の塑性ヒンジの発生位置は、1/4位置より大きく支点A側の位置であった。これは、補修を行った範囲を避けてヒンジが発生したものと考えられる。このように補修により破壊

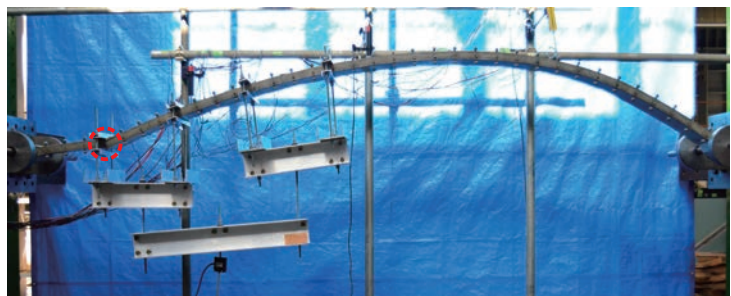
※はヒンジ発生箇所



(a) 健全



(b) 腐食



(c) 補修後

図-7 劣化や補修による破壊性状への影響

位置が変わることにより、健全試験体よりも最大荷重が上昇したと思われる。

4. 数値解析によるRCアーチ構造物の載荷実験の再現

4.1 数値解析方法

本章では、載荷実験の再現解析を行い、その精度の確認と実験結果の評価を試みる。ここで、解析対象は健全試験体と腐食試験体の2体のアーチ構造物とする。境界条件は、アーチ構造物の両端部AとA'の2点をピン支持とする。荷重条件はAO間に等分布荷重を載荷する偏載荷重とする。数値解析は材料および幾何学的非線形性を考慮する弾塑性解析により行う。解析モデルは、アーチを20等分した節点を結ぶ20のファイバー要素で構成する。ここでファイバー要素は、コンクリートと主筋をモデル化する。この際、積分点は、シェル幅方向に8等分、シェル厚方向に9等分した分割点72点と、主筋2本の位置2点の計74点とする。なお、解析にはSAP2000

(ver.22.1.0) を用い、解析結果は収束条件を満たすステップまでを示す。

表-3 に解析モデルの部材諸元を示す。シェル幅 b およびシェル厚 h は試験体の設計値である 150 mm と 40 mm とする。また、主筋の直径 d は 6 mm とする。ここで、図-8 に鉄筋とコンクリートの解析モデルにおける構成則を示す。いずれも載荷実験に使用した鉄筋およびコンクリートの材料試験に基づき性能を定めた。鉄筋の弾性範囲内のヤング係数 E は 205000 N/mm² であり、2 次勾配は 1/100 の 2050 N/mm² とした。コンクリートの弾性範囲内のヤング係数 E は 23500 N/mm² である。また、鉄筋の降伏応力度 σ_y は 325 N/mm² であり、コンクリートの圧縮強度は 30 N/mm²、引張強度は 0 N/mm² とした。

4.2 再現解析による健全試験体の評価精度

図-9 に健全試験体を対象とした再現解析の評価精度を示す。(a)には荷重-変位曲線を示す。節点位置によらず実験の最大荷重近傍である約 2.0 kN までの剛性は概ね実験値と一致する。また、解析における最大荷重 2.12 kN は、実験の最大荷重 2.11 kN と良い対応を示す。ただし、解析における最大荷重後の剛性低下は、実験値に比べて AO 側において大きく、最大荷重時の変位は実験時の方が大きい。これは荷重条件の違いや要素の長さによる鉄筋の塑性領域の再現精度の悪さ等に起因すると考えられ、今後の課題である。

(b)には最大荷重 F_p に対し $0.8F_p$ の際の鉛直方向の変位

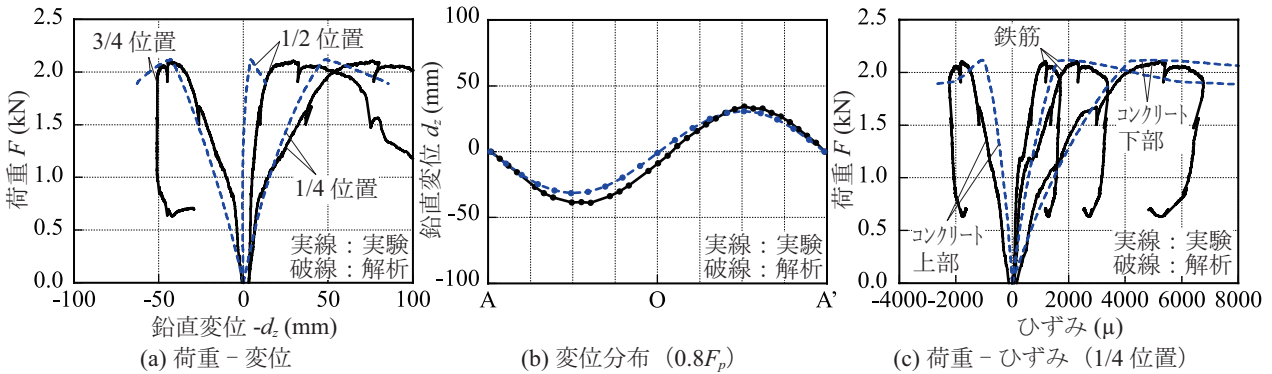


図-9 健全試験体を対象とした再現解析の評価精度

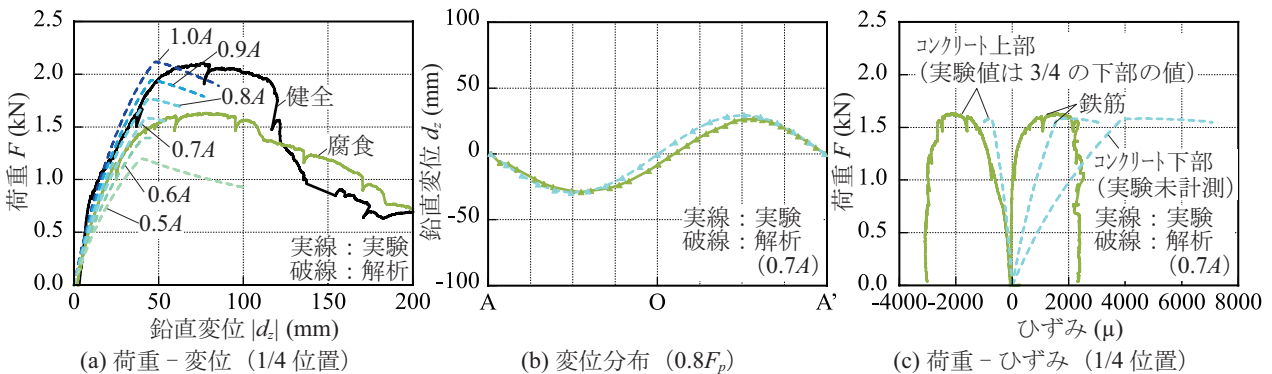


図-10 腐食試験体を対象とした再現解析の結果

表-3 解析モデルの部材諸元

シェル幅 b (mm)	シェル厚 h (mm)	主筋直径 d (mm)	鉄筋		コンクリート		
			ヤング係数 (N/mm ²)	降伏応力度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
150	40	6	205000	325	23500	30	0

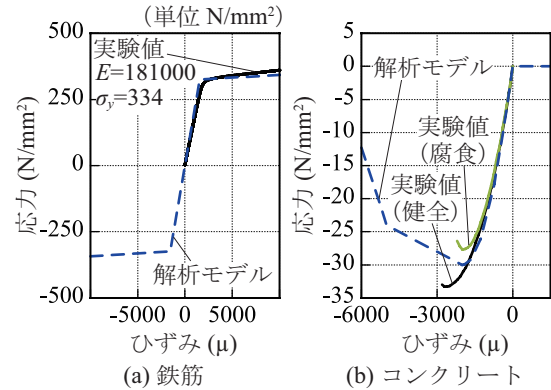


図-8 鉄筋とコンクリートの構成則

分布の比較を示す。いずれの分布も AO 側が下にたわむ 2 山の形状を呈しており、解析値は実験値と良い対応を示す。(c)には 1/4 位置における荷重-ひずみ曲線を示す。荷重-変位曲線と同様に、最大荷重までの傾きは鉄筋およびコンクリートともに概ね良い対応を示す。また、解析における最大荷重は、載荷実験と同様に、鉄筋が降伏応力度に達することでむかえ、その後、コンクリート上部が圧縮強度に達することが確認できる。

4.3 数値解析による鉄筋腐食による劣化の表現

図-10 に腐食試験体を対象とした再現解析の結果を示す。ここで、腐食試験体の再現のための解析モデルとして、鉄筋の断面積が、表-3 に示す解析モデルにおける断面積 A に対し 9 から 5 割の断面積しか有さない 0.9 A , 0.8 A , 0.7 A , 0.6 A , 0.5 A モデルを用意した。

(a) に示すように、1/4 位置における荷重-変位曲線は、その他の場合に比べ 0.7 A モデルにおいて、最大荷重までの剛性および最大荷重が腐食試験体と概ね一致するように見られる。実際、0.7 A モデルの最大荷重 1.58 kN は、腐食試験体の実験の最大荷重 1.63 kN と概ね良い対応を示す。また、断面積の 7 割という値は、腐食による鉄筋の断面欠損率 32.2% と概ね良い対応を示す。しかし、健全試験体と同様に、最大荷重時の変位は実験時の方が大きい。この一因として、荷重条件の違いや要素の長さ等による鉄筋の塑性領域の再現精度の悪さ等が考えられる。

(b) には最大荷重 F_p に対し 0.8 F_p の際の鉛直方向の変位分布の比較を示す。健全試験体と同様に、解析値は実験値と良い対応を示す。(c) には 1/4 位置における荷重-ひずみ曲線を示す。腐食試験体の評価精度は、図-9 に示す健全試験体に比べ、特に最大荷重までの傾きにおいて少し低い。これは、鉄筋の付着度等の未考慮の要素が多いためと考えられる。このように、鉄筋腐食を受けた RC アーチ構造物の応力に関する評価方法は今後の課題である。

5. 結

本研究では、単配筋 RC アーチ構造物を対象に、偏載荷重に対する静的載荷実験による破壊性状の把握および、腐食劣化または補修を施した際の構造性能への影響の把握を行った。また併せて、静的載荷実験の再現解析を行うことで、健全な試験体の評価精度の確認ならびに鉄筋腐食により劣化させた試験体の評価方法の検討も行った。

- (1) 偏載荷重を受ける RC アーチ構造物の最大耐力は、試験体設置時に試験体全体にひび割れが確認できた場合においても、ひび割れが見られなかった試験体と概ね一致することが確認された。
- (2) 補修を施した試験体の最大耐力は健全な試験体よりも 1 割程度大きく、腐食劣化を施した試験体の最大耐力が健全な試験体よりも 2 割程度小さい値を示すことがあることが確認された。
- (3) ファイバー要素により構成した数値解析モデルにより材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した弾塑性解析を行うことで、健全な RC アーチ構造物の試験体の偏載荷重に対する初期剛性および最大荷重を精度良く再現可能であることを示した。
- (4) 腐食劣化を施した試験体の再現解析を行うには、鉄筋の断面積を小さくすることで概ね剛性や最大耐

力を表現できる可能性を示した。しかしこの場合、応力状態に関しては、鉄筋の付着度等の未考慮の要素が多いため再現精度は低い。

謝辞

本研究は、日本コンクリート工学会の 2022 年度助成事業の助成を受け実施した。また、補修の実施にあたり株式会社山陽工業 佐藤大輔氏、山田哲矢氏に、実験の実施にあたり元日本工業大学学部生 呉井晴之氏、隅田川慶氏に多大なる助力を頂いた。ここに記し深謝する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリートシェル構造設計ガイドブック，日本建築学会，2020.3
- 2) 齋藤太士，前田大介，武藤 厚：RC 曲面構造における複合非線形挙動の予測に関する試み：その 4 RC アーチの振動性状に関する実験的評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.705-706，2009.7
- 3) 前田大介，齋藤太士，武藤 厚：RC 曲面構造における複合非線形挙動の予測に関する試み：その 5 RC アーチの振動破壊実験の結果とその評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.707-708，2009.7
- 4) 村本 駿，益田晃宏，後藤秀和，武藤 厚，伊藤雄基：RC 曲面構造における複合非線形挙動の予測に関する試み：その 7 RC アーチの振動破壊実験について(ダブル配筋)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I，pp.687-688，2012.9
- 5) 村本 駿，益田晃宏，伊藤夕華，武藤 厚：RC 曲面構造における複合非線形挙動の予測に関する試み：その 8 RC アーチの振動破壊性状と CF シートの補強効果について，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I，pp.847-848，2013.8
- 6) 武藤 厚，小松宏年，佐々木睦朗：扁平な大型 RC シェルの長期性状と構造特性に関する実証的検討，日本建築学会構造系論文集，No.813，pp.1525-1534，2023.11
- 7) 田中正史，眞下和彦，岩下大作：炭素繊維シートにより修復された鉄筋コンクリート造円筒殻の耐力，構造工学論文集，Vol.55B，pp.1-8，2009.3
- 8) 田中正史，眞下和彦：炭素繊維シートにより修復された炭素短繊維補強コンクリート造円筒殻の耐力，日本建築学会構造系論文集，No.643，pp.1639-1648，2009.9
- 9) 田中正史，眞下和彦，岩下大作：炭素繊維シートにより修復されたビニロン短繊維補強コンクリート造円筒殻の耐力，構造工学論文集，Vol.56B，pp.489-497，2010.3