

# 論文 鉄筋腐食による劣化後に連続繊維複合パネルで補強した RC 版の耐衝撃性に関する基礎的検討

小尾 博俊\*1・玉井 宏樹\*2・園田 佳巨\*3

**要旨：**本研究では鉄筋腐食により劣化した RC 版と、同様に劣化させた後、連続繊維複合パネルで補強した RC 版を用いて繰り返し衝突実験を行い、本パネルの衝撃補強効果について検討した。その結果、1)無補強および表面を補強した試験体の破壊形態は、いずれも裏面剥離であること、2)無補強の試験体では鉄筋腐食率が大きくなると、破壊に要する衝突回数が増える傾向にあること、3)裏面に補強を施すと腐食率に拠らず、本パネルの剥離防止効果が期待できること、などの知見が得られた。

**キーワード：**鉄筋腐食, 経年劣化, 電食法, 連続繊維複合パネル, 繰り返し衝突, 耐衝撃性, 裏面剥離

## 1. はじめに

高度成長期に建設された道路、橋梁、トンネル、上下水道等の多くのインフラ構造物では経年劣化が進み、合理的な補修・補強工法による延命措置を必要としている。また、近年では気候変動に伴う竜巻飛来物や土石流等の自然災害をはじめ、道路・鉄道橋における人為的な衝突事故も度々発生し、衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の安全性を適切に評価することが以前にも増して求められている。

このような背景の下、これまで著者らは、鉄筋腐食により劣化した RC 梁試験体を用いて、鉄筋の腐食率と耐衝撃性能の関係について定量的に評価してきた。すなわち、鉄筋腐食による静的曲げ耐力の低下に比べ、繰り返し衝突時の耐衝撃性能は大きく低下することを明らかにしたり<sup>2)</sup>。さらに、後述する連続繊維複合パネル（以下、単にパネル）を用いて適切に補強することで、RC 梁の劣化程度に拘らず耐衝撃性能が向上することを明らかにしたり<sup>3)</sup>。

本研究では経年劣化した既設の壁または版部材を対象に、衝撃荷重に対する効果的な補強方法の基礎資料を得ることを目的とし、まず、電食法により鉄筋を腐食させた RC 版試験体を製作し繰り返し衝突実験を行った。これにより、腐食率と耐衝撃性能の関係を明らかにするとともに、破壊性状に及ぼす腐食ひび割れの影響について検討した。さらに、本パネルで補強した補強試験体を用いて繰り返し衝突実験を行い、パネルの衝撃補強効果について検討した。

## 2. RC 版試験体の製作

### 2.1 試験体概要

本試験で用いた RC 版試験体の寸法および配筋を図-1に示す。試験体の寸法は 600mm×600mm×80mm であり、鉄筋は D10 を 125mm 間隔で格子状に配置した。鉄筋までのかぶり厚さは底面で 20mm、側面で 50mm である。また、電食法により鉄筋を腐食させるため、図に示すように横方向の鉄筋はコンクリートから張り出している。なお、JIS に基づき測定したコンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度はそれぞれ 45.5N/mm<sup>2</sup>、358N/mm<sup>2</sup>である。

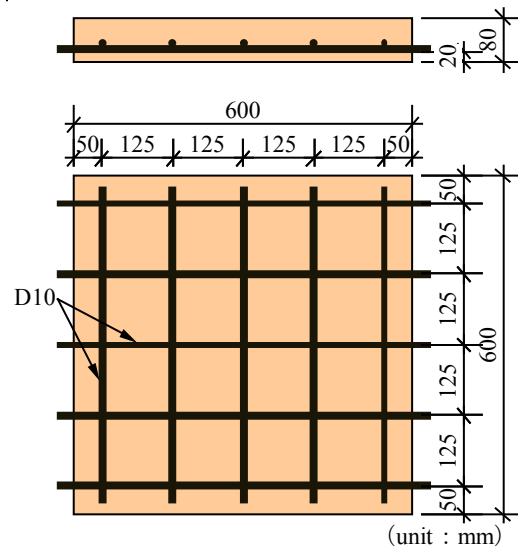


図-1 RC 版試験体

### 2.2 電食法による鉄筋腐食

本研究では鉄筋を腐食させることで劣化した試験体を製作する。鉄筋の腐食方法には、腐食促進環境下での暴露、乾湿繰り返し、塩水噴霧などがあるが、ここでは既

\*1 大成建設(株) 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室 工修 (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教 博(工) (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授 工博 (正会員)

往の研究において実施例が多く、比較的早期に目標とする腐食レベルが得られる電食法を採用した。電食法の概要を図-2に示す。試験体の鉄筋を直流電源装置の陽極に、銅板を陰極にそれぞれリード線で接続し、試験体のかぶりコンクリートを3%NaCl水溶液に浸漬した後、電流を印加する。腐食程度は事前に実施した電食試験に基づき、電流量を一定とし通電時間を変化させることで制御した。本試験では2種類の腐食レベルを設定した。

鉄筋の実腐食率は、全ての試験終了後にコンクリートをはつり、取り出した鉄筋の質量から算出した。すなわち、10%クエン酸二アンモニウム水溶液に72時間浸漬し、たわしを用いて付着している腐食生成物を洗い落とし、十分に乾燥させた後、質量を測定することで腐食率を算出した。腐食率  $w$  は鉄筋の質量減少率であり、次式で求められる。

$$w = \frac{m_0 - m_c}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $m_0$ は腐食前の鉄筋の質量、 $m_c$ は腐食後の鉄筋の質量である。

電食法により劣化したRC版試験体の外観を写真-1に示す。腐食レベルL1の試験体では主に横方向のひび

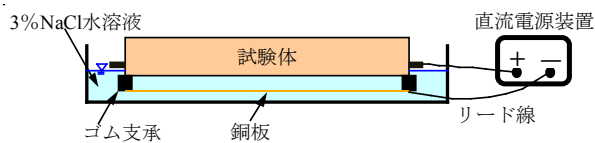


図-2 電食法の概要

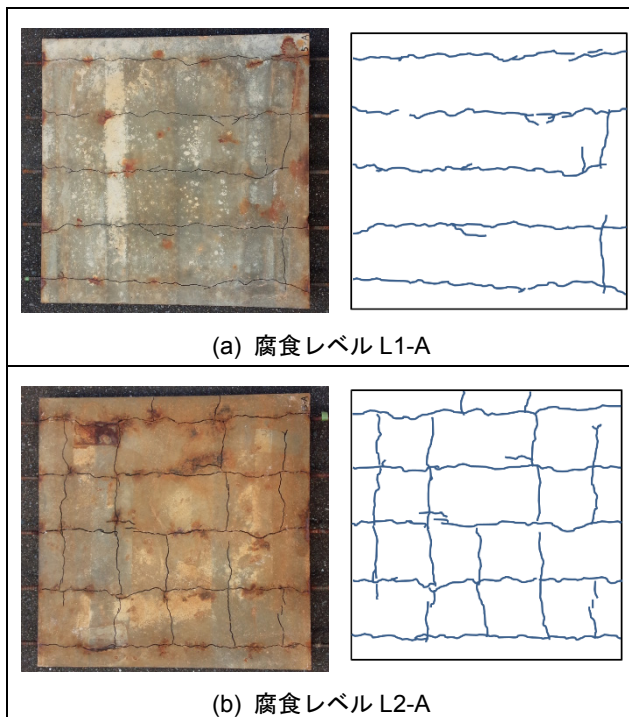


写真-1 電食試験後のRC版試験体

割れが、電食試験の通電時間を変化させた腐食レベルL2の試験体では横方向に加え縦方向のひび割れも観測された。また、鉄筋の錆汁による試験体の変色も明確であった。

表-1には上述した方法で測定した腐食率と鉄筋が交差する位置にあたる25点（図-1参照）で測定したひび割れ幅の平均値を示した。腐食率の増大に伴ないひび割れ幅も増大することが明瞭に確認できる。なお、表中の記号A~Eは試験体の識別を表す。

表-1 腐食率とひび割れ幅

腐食レベル	腐食率 (%)			ひび割れ幅 (mm)	
	縦筋	横筋	平均	縦方向	横方向
L1-A	0.8	3.9	2.3	0.003	0.06
L1-B	1.4	4.1	2.7	0	0.04
L1-C	0.4	3.3	1.9	0	0.05
L1-D	0.6	2.5	1.6	0	0.06
L2-A	2.7	7.7	5.2	0.09	0.23
L2-B	3.8	8.4	6.1	0.05	0.15
L2-C	2.8	7.1	4.9	0.02	0.11
L2-D	2.5	5.7	4.1	0.02	0.12
L2-E	2.7	6.6	4.7	未確認	未確認

### 2.3 連続繊維複合パネルによる補強

本研究では、トンネル覆工の曲げ補強や柱部材の耐震補強として適用実績のある連続繊維複合パネル<sup>4)</sup>を用いて耐衝撃補強を行う。本パネルは図-3に示すように、連続繊維シートを2枚のフレキシブルボード（繊維強化セメント板）で挟み込んだパネルであり、軽量であるため作業性に優れ、また、工場生産のため品質が安定している等の特徴を有している。連続繊維シートには炭素繊維シートを用い、目付量は200g/m<sup>2</sup>×2方向（計400g/m<sup>2</sup>）とした。使用した炭素繊維シートの規格値を表-2に示す。なお、フレキシブルボードは概ね短繊維補強コンクリート程度の強度を有するが、3mm厚と薄いため、一般に設計上はボードの強度は考慮しない。

本パネルの施工手順は以下のとおりである。①まず、下地処理として補強面をケレンし、②鉄筋腐食によるひび割れに補修材を注入し、③密着性を高めるためプライマーを塗布後、④アンカーを用いてパネルを設置（図-4参照）し、⑤最後にパネル背面にエポキシ樹脂を注入してコンクリートと一体化する。

なお、補強面は、コンクリートの裏面剥離防止を目的とした試験体の裏面と、衝突部の貫入防止を目的とした表面（載荷面）の2種類とした。

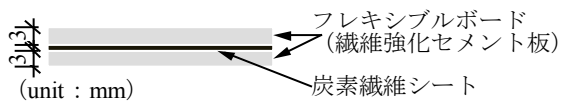


図-3 連続繊維複合パネルの断面

表-2 高強度炭素繊維シートの規格値

引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	200g/m <sup>2</sup> 目付の厚み (mm)
3400	245	0.111

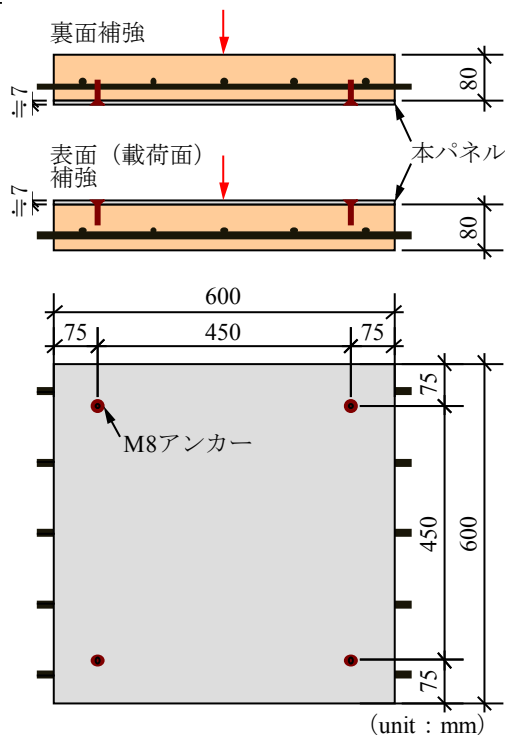


図-4 連続繊維複合パネルによる補強

### 3. 繰り返し衝突実験

#### 3.1 実験概要

本実験では供用期間中に繰り返し衝撃荷重が想定される防護構造物を対象に、鉄筋腐食による劣化、および、パネルによる衝撃補強効果を確認するため、RC版試験体の繰り返し衝突実験を行った。衝突実験は図-5に示す空気圧縮式水平衝撃試験機を用い、空気圧により質量3kgの飛翔体（衝突面の形状は直径50mmの円形平面）を試験体中央部に衝突させた。衝突速度は全試験ケースで15m/sとし、試験体に裏面剥離が生じる、または、飛翔体の貫入が鉄筋位置に達するまで荷重を繰り返した。なお、試験体は試験機にある上下の支持具で挟み、支点間距離500mmの2辺支持として固定されている。

試験体は電食を行っていない健全な試験体と、電食の通電時間を変化させた腐食レベルが異なる腐食試験体を用いた。さらに、試験ケースはパネルの補強仕様により

細分化し表-3に示す全16ケースとした。試験体記号のうち第1項目は腐食レベルを示し、L0が腐食率0%、L1が1.6~2.7%、L2が4.1~6.1%を示す。第2項目は補強仕様を示し、Nが無補強、CBが裏面補強、CUが表面補強を示す。また、第3項目のa~cは同一仕様または同じ腐食レベル内での識別を示している。

測定項目は、RC版試験体裏面中央部の変位、支点反力、飛翔体の貫入深さおよび目視による破壊状況とした。支点反力の測定には試験体の4隅に設置した動的測定用ロードセルを、変位の測定にはレーザー変位計を使用した。なお、測定時のサンプリング周波数は10kHzとした。

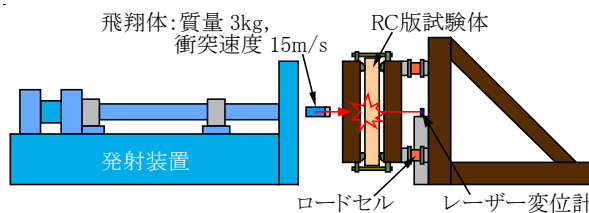


図-5 空気圧縮式衝撃試験機

表-3 試験ケース

試験体記号	衝突速度 (m/s)	補強面	腐食レベル	腐食率 (%)
L0-N-a	15 (繰り返し し荷重)	無	L0	0
L0-N-b		無		
L0-CB-a		裏面		
L0-CB-b		裏面		
L0-CB-c		裏面		
L0-CU-a		表面		
L0-CU-b		表面		
L1-N-a		無	L1-C	1.9
L1-N-b		無	L1-D	1.6
L1-CB-a		裏面	L1-A	2.3
L1-CB-b		裏面	L1-B	2.7
L2-N-a		無	L2-C	4.9
L2-N-b		無	L2-D	4.1
L2-CB-a		裏面	L2-A	5.2
L2-CB-b		裏面	L2-B	6.1
L2-CB-c		裏面	L2-E	4.7

※腐食レベルは表-1に対応

#### 3.2 実験結果

##### (1) 累積残留変位と腐食率

無補強および表面補強した試験体について、累積残留変位と衝突回数、腐食率と衝突回数の関係を図-6、7に示す。まず、6体の無補強試験体は衝突回数4回までにいずれも裏面剥離を生じて破壊した。図-7からは腐食率が大きくなるにつれて、破壊に要する衝突回数が増す

ことが分かる。この要因としては、鉄筋腐食で発生した腐食生成物が緩衝材のような働きをし衝撃波の伝播を緩和することや、腐食で生じたひび割れが剥離片を形成しようとするひび割れの進展を途中で遮断することなどが考えられる。これらの可能性については、広範な腐食率

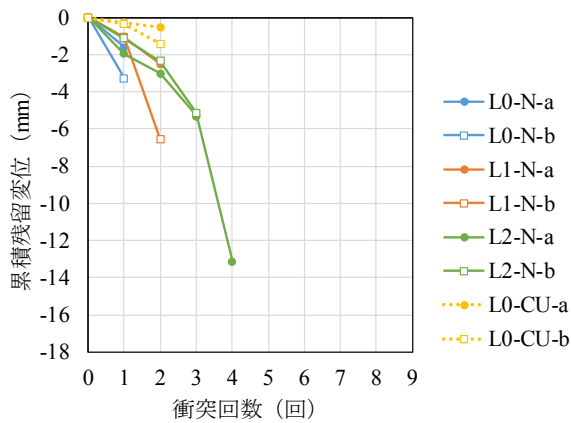


図-6 累積残留変位と衝突回数（無補強，表面補強）

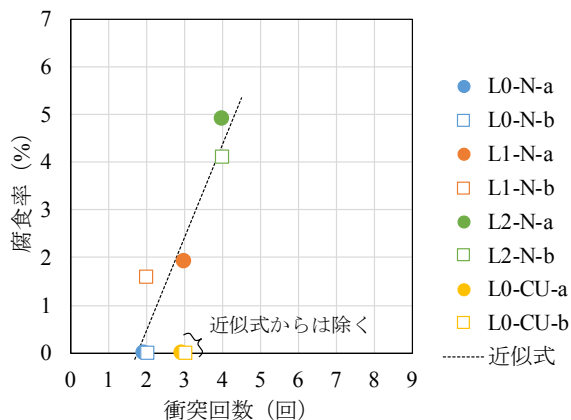


図-7 腐食率と衝突回数（無補強，表面補強）

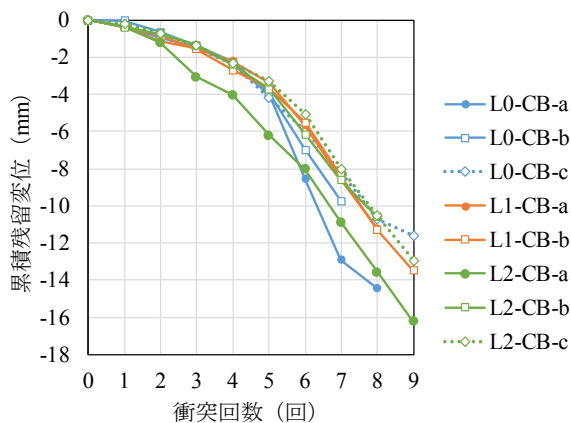


図-8 累積残留変位と衝突回数（裏面補強）

を対象とした衝突実験や劣化モデルを取り入れた数値解析と比較するなどさらなる検討が必要である。

表面を補強した2体の試験体は、累積残留変位は小さいものの3回目の衝突で破壊が生じており、裏面剥離を防止する効果は乏しいといえる。

一方、裏面を補強した8体の試験体は図-8に示すように破壊までに最低7回の衝突を要し、また、いずれの試験体でも裏面剥離は生じず、飛翔体が鉄筋位置まで貫入したことで载荷を終了している。図-9からは腐食率と衝突回数に相関関係は見られず、劣化程度に拠らず補強効果が確認できた。

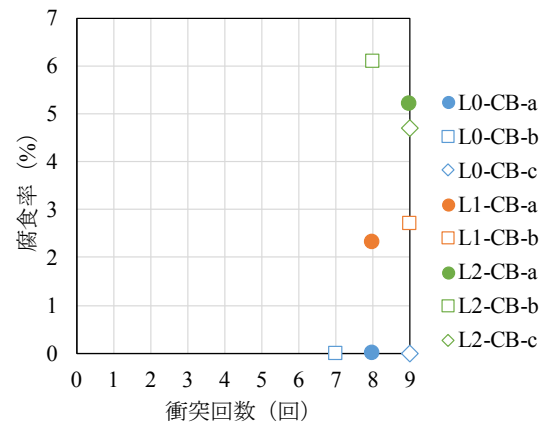


図-9 腐食率と衝突回数（裏面補強）

## (2) 貫入深さ

図-10, 11には飛翔体の貫入深さと衝突回数の関係を示す。無補強および表面補強の試験体では、飛翔体の貫入量が大きくなる前に破壊に至っている。裏面補強した試験体では、破壊に至る直前の1, 2回の衝突で急激に貫入量が増していることが分かる。実験終了後の貫入孔からは版内部のコンクリートが粉々に破壊されている様

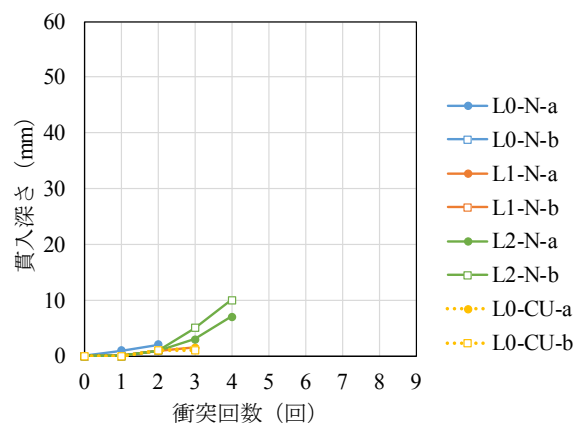


図-10 貫入深さと衝突回数（無補強，表面補強）

子が見て取れた。

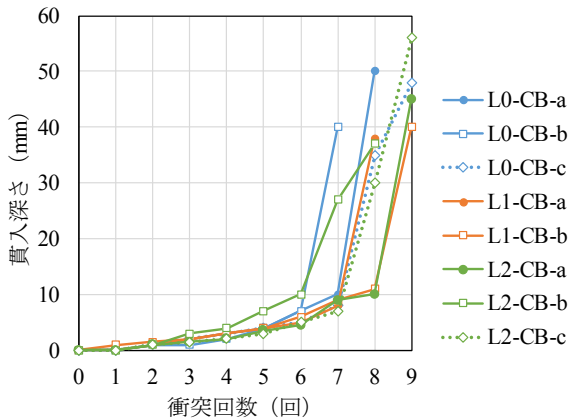


図-11 貫入深さと衝突回数（裏面補強）

### (3) 最大支点反力

最大支点反力と衝突回数の関係を図-12, 13 に示す。無補強の試験体については個体差はあるものの、特に腐

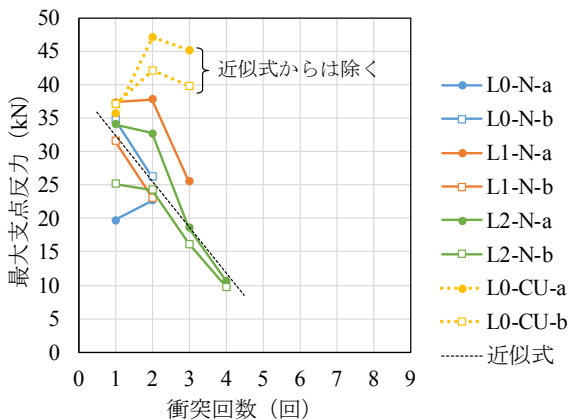


図-12 最大支点反力と衝突回数（無補強，表面補強）

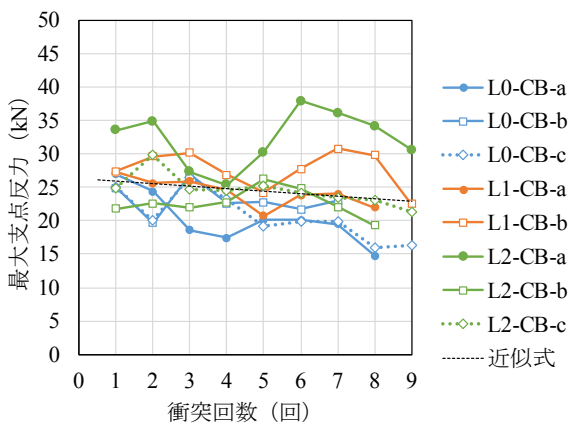


図-13 最大支点反力と衝突回数（裏面補強）

食レベルが大きい試験体では衝突回数が進むにつれて急激に支点反力が減少する様子が分かる。一方、裏面を補強した試験体では、衝突回数が増しても支点反力の減少は緩やかな傾向にあることが分かる。したがって、裏面補強することで破壊の進行を遅らせることができているものと思われる。

### (4) 破壊状況

代表的な試験体の破壊状況を写真-2～4 に示す。まず、無補強の試験体では、表面に飛翔体の衝突跡と鉛直方向のひび割れが観測された。裏面については、腐食レベルが増すにつれてコンクリートの剥離範囲が大きくなる傾向にある。ただし、前述したように腐食レベルが増すと破壊に要する衝突回数も増加している。表面補強の試験体では、表面にはかすかに衝突跡が残る程度であり貫入の防止には有効であるが、裏面は無補強で腐食率 0%の試験体と同程度の剥離状況が観測された。したがって、先にも述べたが、表面補強は裏面を補強する効果はほと

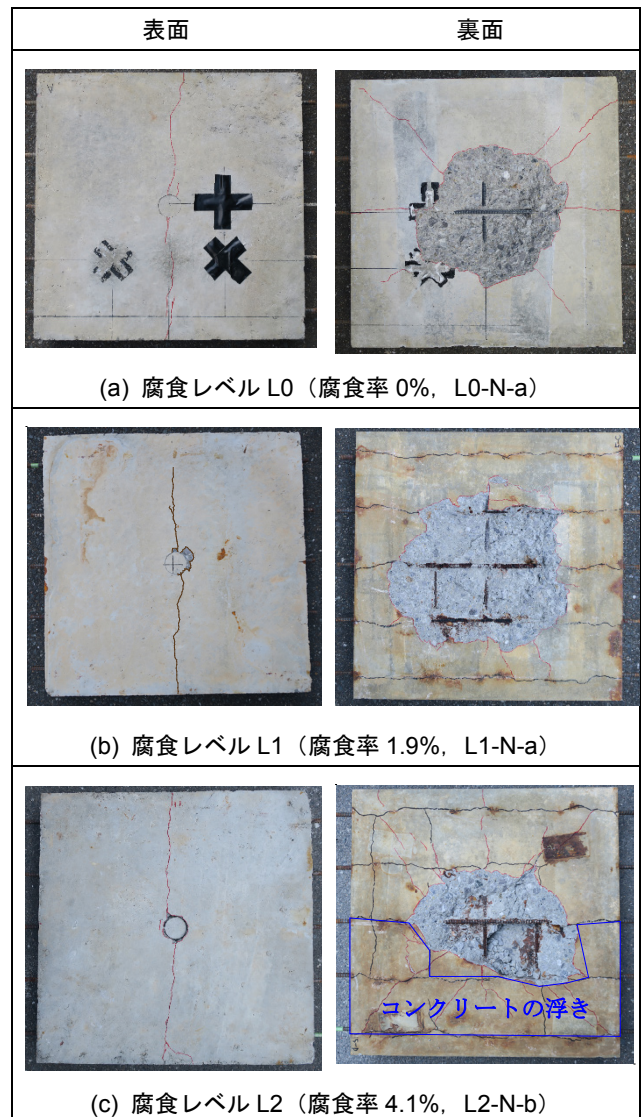


写真-2 無補強試験体の破壊状況

んど期待できない。一方、裏面補強の試験体では、劣化程度に抛らず表面には飛翔体の繰り返し衝突で生じた貫入跡が明確に残っている。裏面はいずれの試験体も円形および放射状のひび割れが観測された。また、試験体の裏面中央部付近が外側へ凸状に変形していることや、打

音による検査から補強面の内部ではパネルの剥離やコンクリートの破壊による空隙が生じているものと推測された。

#### 4. まとめ

本研究では、鉄筋腐食した RC 版試験体の繰り返し衝突実験を行い衝撃荷重に対する抵抗性を評価し、さらに、パネルによる衝撃補強効果について検討した。以下に本研究の範囲内で得られた知見をまとめる。

- (1) 無補強および表面補強した試験体の破壊形態は、いずれも裏面剥離であった。
- (2) 無補強の試験体では鉄筋腐食率が増すと、破壊に要する衝突回数が増える傾向にあった。
- (3) 表面補強した試験体は飛翔体の貫入には抵抗するが、無補強の場合と同様に裏面剥離が生じ剥離防止効果は見られない。
- (4) 裏面補強した試験体では腐食率に抛らず剥離を防止することができ、本パネルの衝撃補強効果が確認できた。

本研究で得られた知見は、試験体や実験の仕様・諸元等、限られた条件下のものであり、今後、実構造物への適用を図るためには、対象構造物の形状寸法や衝突物の質量、衝突速度等を適切に取り入れた検討が必要になるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 玉井宏樹, 桑原功旺, 園田佳巨: 鉄筋腐食により劣化した RC 梁部材の曲げ耐荷性能および耐衝撃性能に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.1224-1236, 2017.
- 2) Yang Sun, Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda, Hirotohi Obi: EXPERIMENTAL STUDY ON IMPACT RESISTANCE OF CORRODED RC BEAMS REINFORCED BY CFC PLATE, 12th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, pp.409-418, 2017.
- 3) Hiroki Tamai, Yang Sun, Yoshimi Sonode, Hirotohi Obi: A BASIC STUDY ON IMPACT RESISTANCE OF RC BEAMS REINFORCED BY CONTINUOUS FIBER COMPOSITE PANEL, 土木学会第 72 回年次学術講演会, pp.811-812, 2017.
- 4) 河村圭亮, 新藤竹文, 松岡康訓, 菅野道昭: 連続繊維複合パネルによる大断面柱部材の耐震補強効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1141-1146, 2017.

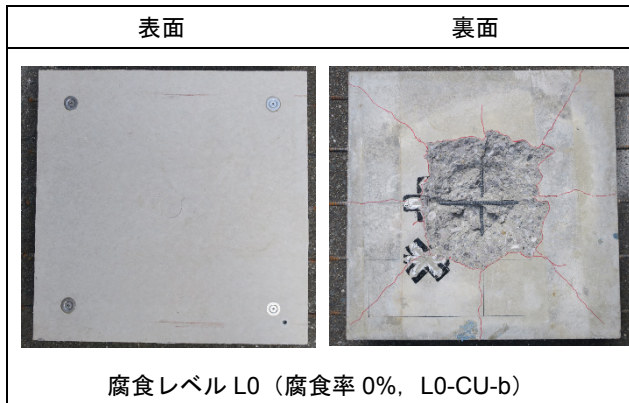
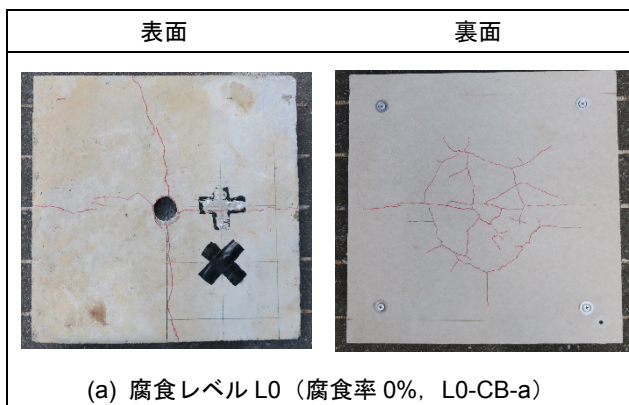
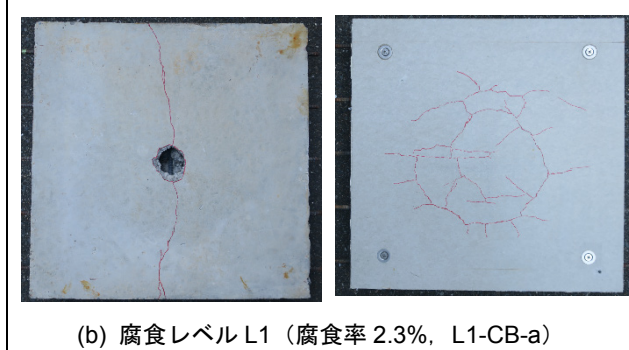


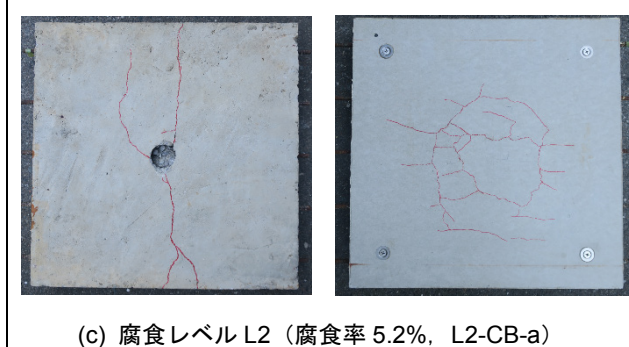
写真-3 表面補強試験体の破壊状況



(a) 腐食レベル L0 (腐食率 0%, L0-CB-a)



(b) 腐食レベル L1 (腐食率 2.3%, L1-CB-a)



(c) 腐食レベル L2 (腐食率 5.2%, L2-CB-a)

写真-4 裏面補強試験体の破壊状況