

# PIC 板で補強した RC はりの補強効果に関する実験及び解析的研究

永松 牧子\*・出水 享\*・鶴田 健\*\*・岡本 賢治\*\*・宮本 紘貫\*\*\*・松田 浩\*

## Experimental and analytical study on reinforcement effect of RC beam reinforced with PIC boards

By

Makiko NAGAMATSU\*, Akira DEMIZU\*, Ken TSURUTA\*\*,  
Kenji OKAMOTO\*\*, Hiromichi MIYAMOTO\*\*\* and Hiroshi MATSUDA\*

In this study, bending shear tests were conducted on deteriorated reinforced concrete beams, and the reinforcement effects of polymer impregnated concrete (PIC) boards were examined.

As a result, it was confirmed that the shear load bearing capacity of damaged RC beams increased by reinforcing with PIC boards. Furthermore, the RC beam with the anchorage of the reinforcing bar deteriorated and the RC beam reinforced by the PIC board were analyzed using three-dimensional FEM analysis. The analytical and experimental results are in good agreement. In addition, by modeling RC beams with various damages and analyzing them, the load bearing characteristics of RC beams depending on the degree of damage and its type were illustrated.

### 1. はじめに

コンクリートは建設工事において不可欠な材料であるが、過酷な環境下では常に耐久性が減じる方向にある。我が国において 2030 年頃には、供用期間 50 年を超過する橋梁が全体の半数以上となり、RC 構造物の延命化や維持管理が重要となる<sup>1)</sup>。また、維持管理の対象となる RC 構造物の劣化損傷の 1 つとして、鉄筋腐食による膨張圧力や疲労荷重等により発生するひび割れが挙げられる。主筋付近での水平方向のひび割れが生じた場合、鉄筋とコンクリートの付着力が低下し、耐力が著しく低下することが報告されている<sup>2)</sup>。

本研究では、コンクリート構造物を補強する工法として、無機系・セメント系の材料の中で付着特性に優れる PIC 板 (Photo1) に着目した。PIC (Polymer Impregnated Concrete) とは樹脂を含浸・重合させ、緻密化させた複合材料である<sup>3)</sup>。

その特徴として線膨張係数が  $1.1 \times 10^{-5}$  と、既設コンクリートと同等であり、純引張強度やせん断強度が著しく高いことが挙げられる。PIC 板を利用した基礎的研究の一環として、PIC 板を RC 構造物の補強材として用いた場合の力学特性、特にせん断補強効果について実験的に検討した。

最後に、3 次元 FEM 解析を用いて PIC 板で補強した健全及び鉄筋定着部が損傷した RC はりのシミュレーション解析を実施し、解析法の妥当性について検討した。また、様々な損傷を有する RC はりのモデル化と解析を行うことにより、損傷度やその種類による力学特性の特徴について示した



(a) 表面  
Photo1 PIC 板

(b) 付着面

令和 2 年 6 月 22 日受理

\* 長崎大学大学院工学研究科 (Department of Nagasaki University Graduate School of Engineering)

\*\* マテラス青梅工業(株) (Materase Ome Industry Co., Ltd)

\*\*\* 長崎大学工学部 (Department of Nagasaki University Faculty of Engineering)

## 2. PIC板を用いたRCはりの曲げせん断試験

### 2.1 研究目的

本研究では高耐久性埋設型枠として用いられる PIC 板をせん断補強材として RC はり側面に設けて、曲げせん断試験を行った。PIC 板のせん断補強効果を実験的に検討し、力学特性を求めることを目的とする。

### 2.2 試験概要

Table1 および Fig. 1 に曲げせん断試験を行う RC はり試験体の概要を示す。試験体 A-1 は無補強の通常の RC はりである。試験体 A-2 は PIC 板 (t20×H175×L900mm) で補強したもので、計 4 枚の PIC 板を用い、試験体の両側面に 2 枚ずつ設けている。試験体 A-3 は A-2 と同じ配置で PIC 板を設置し、それぞれの PIC 板に 4 本のボルト (M12) を取り付け、現場打ちコンクリートとの一体化を図っている。

Table1 試験体概要 (A-1~3)

試験体	PIC板	ボルト	主鉄筋
A-1	—	—	3×D19
A-2	4 枚	—	
A-3	4 枚	4 本/1枚	

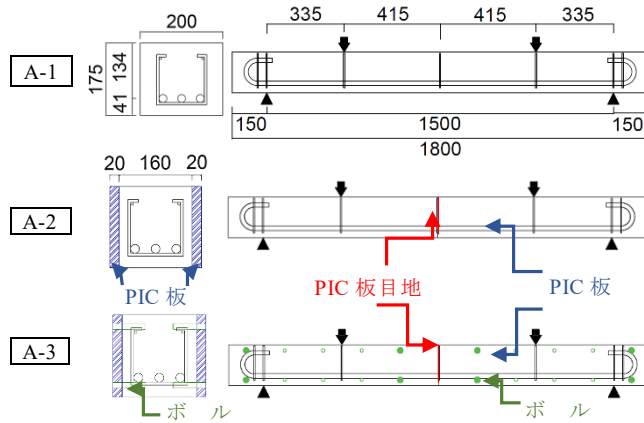


Fig. 1 試験体の設計図 (A-1~3)

### 2.3 試験結果

試験体のひび割れ図を Fig. 2 に、荷重－変位曲線を Fig. 3 に示す。試験体 A-1 は 184kN でせん断圧縮破壊を呈した。PIC 板で補強した試験体 A-2 は 279kN でせん断引張破壊を呈し、無補強試験体 A-1 の 152%のせん断耐力となり、PIC 板のせん断補強効果が確認できた。また、破壊時には PIC 板の剥離が生じ、せん断破壊による大変形が原因と考えられる。試験体 A-3 は

269kN でせん断引張破壊を呈し、無補強試験体 A-1 の 146%のせん断耐力となった。ボルト固定による耐力の増大はみられなかったが、PIC 板は剥離せず、現場打ちコンクリート内にひび割れが生じ、ボルトにより一体性が増した。

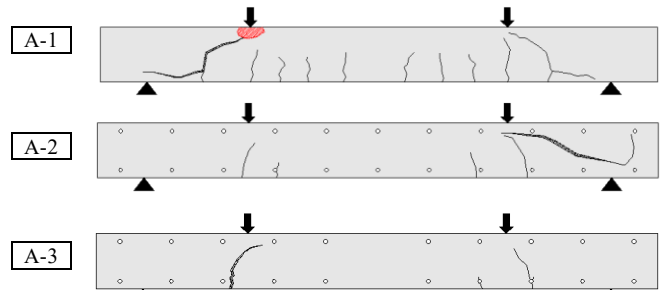


Fig. 2 側面のひび割れ図 (A-1~3)

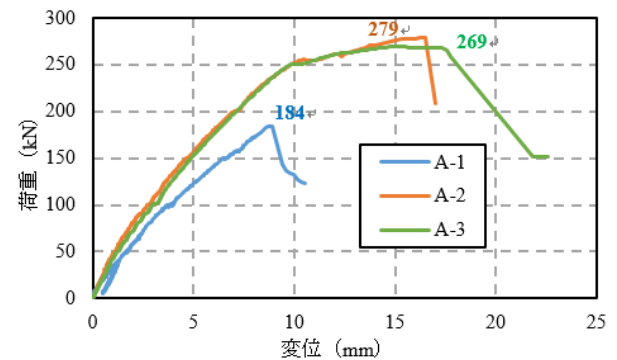


Fig. 3 荷重－変位曲線 (A-1~3)

## 3. PIC板を用いたRCはりのボルト埋込長及びPIC板断面積比の影響によるせん断補強効果

### 3.1 研究目的

本研究では 2 章で示した試験体の幅を 2 倍にした RC はりの曲げせん断試験を行い、PIC 板の断面積比によるせん断補強効果の影響の検討を実験的に行った。また、PIC 板固定に用いられるボルトの埋込長が力学特性へ及ぼす影響の検討をすることも目的とする。

### 3.2 試験概要

Table2 および Fig. 4 に曲げせん断試験を行う RC はり試験体の概要を示す。2 章で述べた試験体と比べて、試験体幅が 2 倍の 400mm となり、PIC 板の断面積比は 10%であり、現場打ちコンクリートの面積比が 1:9 となる。また、2 章の試験体 A の PIC 板の断面積比は 20%であり、現場打ちコンクリートとの面積比は 1:4 である。

試験体 B-1 は無補強の通常の RC はりである。試験体 B-2 は PIC 板 (t20×H175×L900mm) で補強したもの

で、計4枚のPIC板を用い、試験体の両側面に2枚ずつ設けている。試験体B-3はB-2と同じ配置でPIC板を設置し、それぞれのPIC板に、現場打ちコンクリートへの埋込長が50mmとなるような4本のボルト(M12)を取り付け、PIC板と現場打ちコンクリートとの一体化を図った。試験体B-4はB-3と同様の設計で、ボルトの埋込長のみ100mmに長くした試験体である。試験体B-3とB-4を比較することで、ボルト埋込長の違いがせん断補強効果や力学特性に及ぼす影響の検討を行う。また、試験体A-1~3と比較することで、PIC板が占める断面積比がRCはりの力学特性におよぼす影響も検討する。

Table2 試験体概要 (B-1~4)

試験体	PIC板	ボルト埋込長	主鉄筋
B-1	—	—	6×D19
B-2	4枚	—	
B-3	4枚	50mm (4本/1枚)	
B-4	4枚	100mm (4本/1枚)	

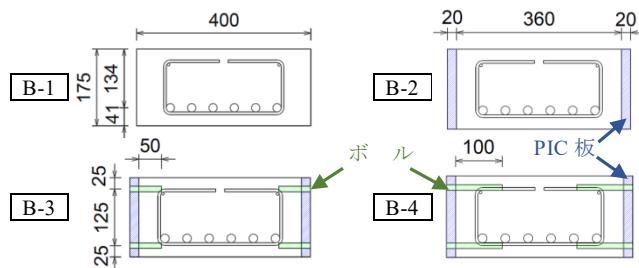


Fig. 4 試験体の設計図 (B-1~4)  
(※側面の設計図については図1を参照する)

### 3.3 試験結果

試験体B-1~4の側面のひび割れ図をFig.5に、試験体B-2の上面のひび割れ図をFig.6に、荷重-変位曲線をFig.7に示す。試験体B-1は263kNでせん断圧縮破壊を呈した。PIC板で補強した試験体B-2は321kNでせん断引張破壊を呈し、無補強試験体B-1の122%のせん断耐力となった。Fig.8にPIC板の断面積比によるせん断補強効果を比較したグラフを示す。PIC板断面積比20%の試験体AにおけるPIC板のせん断補強効果が152%であるのに対し、PIC板断面積比10%の試験体BのPIC板のせん断補強効果が122%であることから、 $22\% \div 52\% \times \{(1/9) / (1/4)\}$ より、PIC板補強によるせん断耐力の増分はPIC板と現場打ちコンクリートとの断面積比の比によって決まると考えられる。Fig.9にボルト埋込長とせん断強度の関係を示す。50mm長のボルトで固定した試験体B-3は359kNで、

100mm長のボルトで固定した試験体B-4は364kNでせん断引張破壊を呈した。ボルトで固定することにより、約110%のせん断補強効果があること、及びボルト埋込みの長さがせん断耐力に及ぼす影響が小さいことが確認できた。本研究は1体ずつの試験のため、今後データ数を増やすことにより、断定的な結果を得る必要がある。また、Fig.7より、試験体B-3, 4は試験体B-2と比べて最大荷重時の変位が大きくなったことから、じん性が良好になっており、PIC板と現場打ちコンクリートとの一体性が図れたと考えられる。

ひび割れに関して、PIC板を設置することで、試験体B-2~4のはり上面のせん断破壊側に、長手方向ひび割れが確認できた。面外方向の力やせん断ひび割れが原因と考えられる。

-y

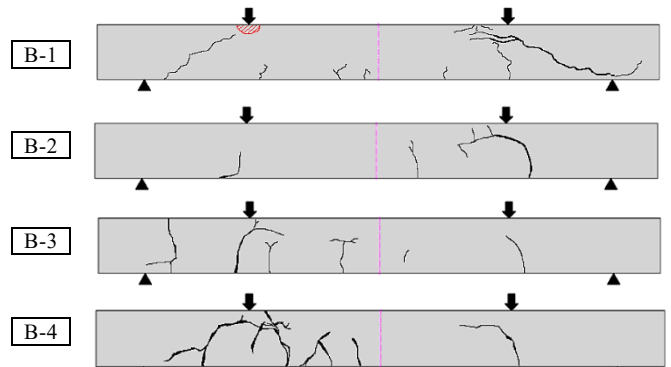


Fig. 5 側面のひび割れ図 (B-1~4)

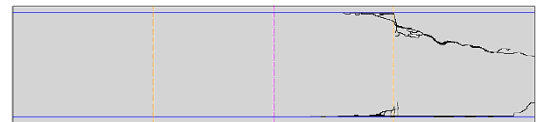


Fig. 6 上面のひび割れ図 (B-2)

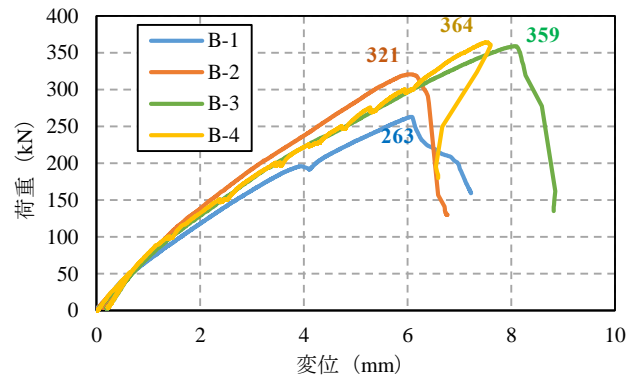


Fig. 7 荷重-変位曲線 (B-1~4)

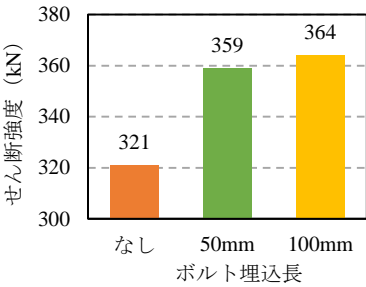


Fig. 8 PIC 板断面積比の比較

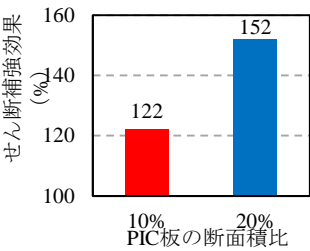


Fig. 9 ボルト埋込長の比較

4. 鉄筋定着部損傷がある RC はりに対するせん断補強効果

4.1 研究目的

劣化損傷の 1 つである鉄筋定着部損傷をスチレンボードの導入により模擬して RC はりの製作を行った。定着部損傷による RC はりの耐荷力の減少、及びPIC 板を定着部損傷がある RC はりの側面に埋設型枠として補強することによる PIC 板のせん断補強効果を検討することを目的とする。

4.2 試験概要

Table3 および Fig. 10 に曲げせん断試験を行う RC はり試験体の概要を示す。本研究の試験体幅は 200mm とする。試験体 C-1 は無補強無損傷の RC はりである。試験体 C-2 は主鉄筋上部にスチレンボード (t1×W160×L305mm) を導入することにより、鉄筋定着部損傷を模擬した<sup>2)</sup> 欠陥コンクリートである。試験体 C-3 は C-2 と同様にスチレンボードで鉄筋定着部を模擬し、さらに、PIC 板 (t20×H175×L900mm) で補強したものである。PIC 板は試験体の両側面に 2 枚ずつ設け、PIC 板 1 枚につき 8 本のボルト (M12) で固定した。

Table3 試験体概要 (C-1~3)

試験体	欠陥	PIC板	ボルト	主鉄筋
C-1	—	—	—	3×D19
C-2	有り	—	—	
C-3	有り	4 枚	8 本 / 1 枚	

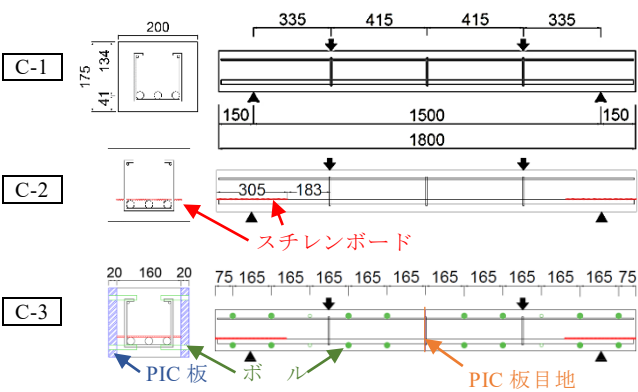


Fig. 10 試験体の設計図 (C-1~3)

4.3 試験結果

試験体のひび割れ図を Fig. 11 に、荷重—変位曲線を Fig. 12 に示す。試験体 C-1 は 181kN でせん断圧縮破壊を呈した。鉄筋定着部損傷がある試験体 C-2 は 98.8kN でせん断張破壊を呈し、無損傷の試験体 C-1 の 55% のせん断耐力となり、定着部損傷により、せん断耐力が減少した。また、スチレンボードに沿ったひび割れが確認できた。PIC 板で補強した試験体 C-3 は 192kN でせん断引張破壊した。無補強の試験体 C-2 の 194% のせん断耐力となり、無損傷の試験体 C-1 と同程度までせん断耐力が回復した。この結果から、PIC 板は損傷を有する RC はりに対しても、せん断補強補強効果があると示された。

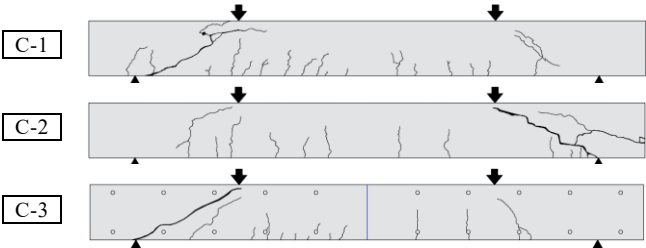


Fig. 11 側面のひび割れ図 (C-1~3)

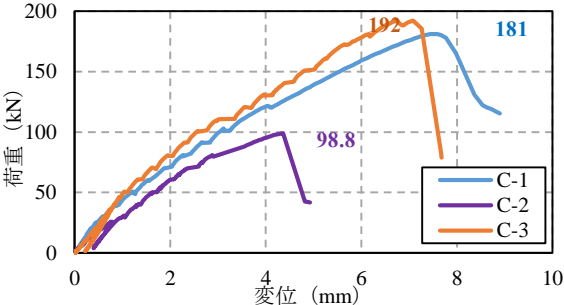


Fig. 12 荷重—変位曲線 (C-1~3)

5 RC はり 3 次元 FEM 解析

既往研究として、2 章の試験体を PyMentat を用いてモデル作成し、解析を行った。PyMentat は単純なモデ

ルであれば、整然とした正六面体要素分割が可能である。しかし、鉄筋のような円形のモデルを再現して作成することは非常に困難である。また、2~4 章で用いたボルトや、4 章で模擬した定着部損傷のような複雑な構造をモデル化することも困難となる。本章ではその解決法として 3 次元 CAD を用いて 1/4 モデルを作成した。この方法により鉄筋の扱いが容易となり、プログラムでは難しい複雑なモデルも簡単に作成できる。

### 5.1 PIC 板で補強した幅広 RC はりの解析

3 章の試験結果を 3 次元 FEM を用いてシミュレーション解析し、解析法の妥当性を検討した。荷重－変位曲線を Fig. 13 に、試験体 B-2 の上面の主ひずみのコンター図を Fig. 14 に示す。全ての試験体について曲げ剛性はほぼ一致した。試験体 B-1, 2 については、最大荷重の差も 6.5% 以内に収まり、PIC 板の補強効果をシミュレーションすることができた。しかし、ボルトを取り付けた試験体 B-3, 4 については、最大荷重が低くなった。ボルトと PIC 板や内部コンクリートとの接着条件や、収束条件に原因があると考えられ、今後の課題となる。また、Fig. 14 より、試験体 B-2 上面にひび割れが確認できた。このひび割れは試験体 B-1 の解析結果では確認できなかったため、PIC 板が原因として発生したと解析からも示された。今後、PIC 板とコンクリートとの接着条件等の検討を進め、上面ひび割れや剥離の再現性を高める必要がある。

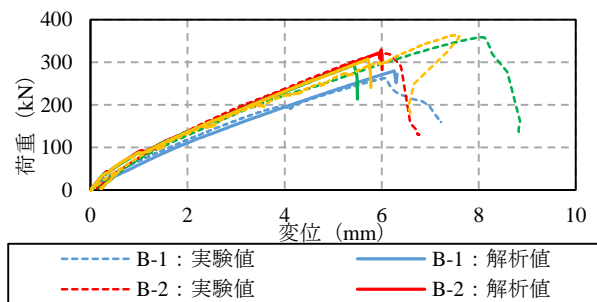


Fig. 13 荷重－変位曲線の比較 (B-1~4)

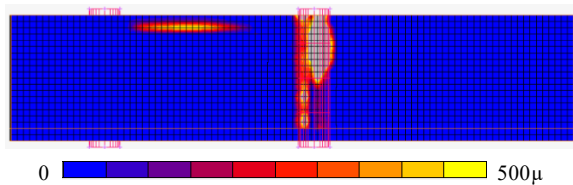


Fig. 14 試験体 B-2 の上面のひび割れコンター図

### 5.2 鉄筋定着部損傷を有する RC はりの解析

4 章の試験結果を 3 次元 FEM を用いてシミュレーション解析し、解析法の妥当性を検討した。荷重－変位曲線を Fig. 15 に示す。全ての試験体について曲げ剛

性はほぼ一致した。試験体 C-1, 2 については、最大荷重の差も 6.5% 以内に収まり、鉄筋定着部の損傷をシミュレーションすることができた。しかし、PIC 板補強した試験体 C-3 の最大荷重は過大となった。解析条件として、PIC 板とコンクリートは完全接着としているため、実験値における最大荷重後も、PIC 板が応力を伝達し続けたため、最大荷重が増大したと考えられる。

試験体 C-1~3 の長手方向中央で切った実験値における最大荷重時の主ひずみのコンター図を Fig. 16 に示す。無損傷の試験体 C-1 はせん断ひび割れ部に、引張ひずみが広く分布していることがわかるが、欠陥がある試験体 C-2, 3 は欠陥部周辺で引張ひずみが確認されず、応力が伝達されていないことがわかる。試験体 C-2 では、欠陥端部でせん断ひび割れ部に応力が集中し、C-1 の最大荷重の約 5 割の荷重で、C-2 の主ひずみが C-1 より大きくなるのが解析により明らかにできた。

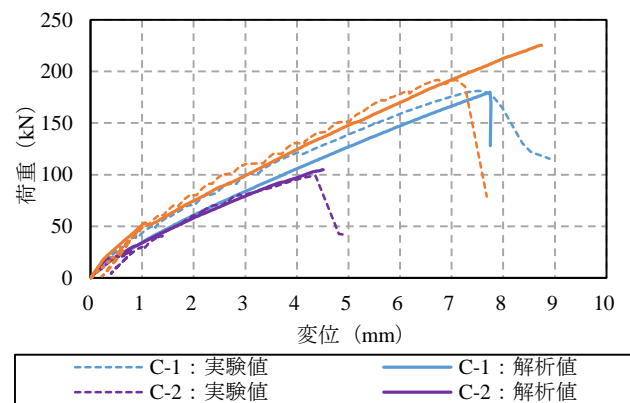


Fig. 15 荷重－変位曲線の比較 (C-1~3)

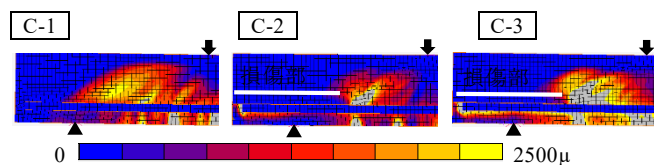


Fig. 16 ひび割れコンター図 (C-3 は 192kN のとき)

### 5.3 様々な損傷がある RC はりの解析による破壊特性の解明

実験するにおいて、故意に損傷を試験体に入れることは非常に困難であり、損傷がある RC はりの力学特性について明らかになっていないことが多い。3 次元 CAD を用いることにより、様々な損傷をモデル化できるため、本節では鉄筋の断面欠損と破断が RC はりの力学特性におよぼす影響を解明することを目的として解析を行った。

損傷がない健全な RC はり (5×D19) は鉄筋降伏前に



曲げ圧縮破壊を呈した。この D19 主鉄筋の 5 本全てに鉄筋全長にわたって断面欠損を与えて、曲げ試験を解析したときの荷重－変位曲線を Fig. 17 に示す。欠損を大きくすることで、鉄筋降伏前から降伏後に曲げ圧縮破壊を呈するように変化した。

次に、5 本の主鉄筋のうち、真中 1 本と、真中 3 本、5 本全てをスパン中央で鉄筋破断させたモデルの解析を行った。この荷重－変位曲線を Fig. 18 に示す。鉄筋破断により曲げ剛性が低くなるだけでなく、曲げ圧縮破壊する前に曲げひび割れにより破壊を呈した。Fig. 19 に RC はり下面の主ひび割れのコンター図を示す。破断した本数が少ないほど曲げひび割れが多くなり、曲げ引張力に抵抗していることがわかる。また、破断した鉄筋周りで主ひび割れが大きくなり、応力集中が起きることを解析により明らかにできた。

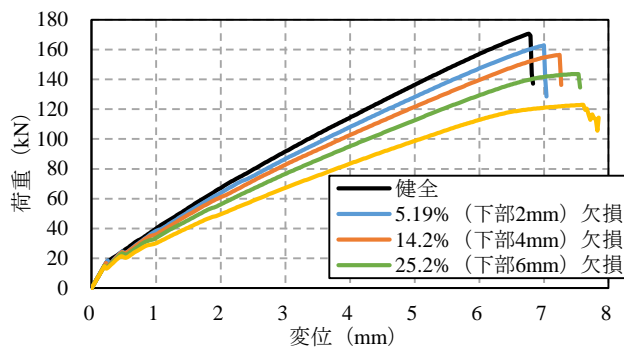


Fig. 17 鉄筋が断面欠損したときの荷重－変位曲線

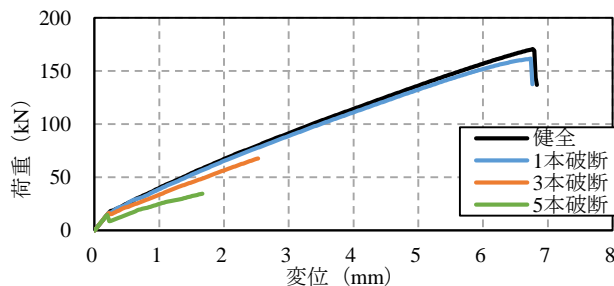


Fig. 18 鉄筋が破断したときの荷重－変位曲線

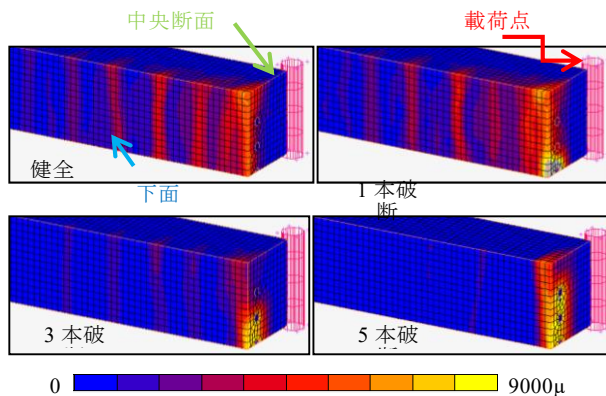


Fig. 19 鉄筋が破断した RC はり下面のひび割れコンター図

## 6 まとめ

- PIC 板で補強することにより、健全及び定着部損傷を有する RC はりに対するせん断補強効果を確認できた。
- RC はりのせん断耐力やひび割れ性状は、ボルト埋込長及び PIC 板の断面積比の影響を受けた。
- PIC 板補強及び欠陥コンクリートの解析法の妥当性を示されたが、ボルトや接着条件等が今後の課題となった。

## 参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版の長寿命化技術，森北出版(株)，pp. i，2016
- 2) 千々和伸浩：引張鉄筋定着部に腐食劣化を有する RC 梁の残存耐力と未損傷領域への面的補強，(公社)土木学会，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol. 67, No. 2, pp. 160-165, 2011
- 3) 小柳治：レジンコンクリート・ポリマー含浸コンクリートの利用，材料，(公社)日本材料学会，Vol. 41, No. 470, pp. 1709-1716, 1992