

論文 内圧充填接合補強工法によるコンクリート中への樹脂充填性能と補修効果

渡邊 祥庸*1・瀬野 健助*2・加川 順一*3・二羽 淳一郎*4

原稿要旨： 損傷を与えた高さを変化させた RC はりに内圧充填接合補強工法により補修を施し、再度載荷することで RC はりの高さと補修効果の関係を検討した。その結果、高さが低い方が、補修により回復した剛性を保持する傾向があることがわかった。また、RC はりと切欠きはりをそれぞれ同一条件で2体ずつ作製し、一方を内圧充填接合補強工法、もう一方を従来の樹脂注入工法を模擬した方法で補修し、補修効果の差を検討した。その結果、内圧充填接合補強工法は従来の注入工法を模擬した方法よりも部材剛性を大きく回復させることができ、より微細なひび割れに樹脂を充填できることがわかった。

キーワード： 内圧充填接合補強工法, 樹脂注入, エポキシ樹脂, RC はり, 補修効果, 充填性能

1. はじめに

損傷を受けた RC 構造物の応急復旧や、既存構造物の改修補修方法の1つに樹脂注入工法がある。今回用いた内圧充填接合補強工法も樹脂注入工法の1つである。この工法は、コンクリート内部、または鉄筋位置まで穿孔し、エア抜き機能を備えた注入器具を用いてスプリングの力により、低粘度(700mPa・s 以下)のエポキシ樹脂を自動低圧注入(0.06N/mm² 以下)するものである。ひび割れ内部や鉄筋位置から注入を行い、鉄筋とコンクリートの付着面やひび割れ細部にエポキシ樹脂を浸透させることで、より大きな補修効果を得ることを目的としている。これまで、損傷を与えた RC 柱や逆対称モーメントの作用する RC はりへの実験的適用がなされ、補修前の耐力と比べ補修後の耐力が向上することや、部材剛性が補修前と同等に回復することが報告されている¹⁾²⁾。しかし、スラブや地中のボックルカルバート片側のみからしか補修できない RC 構造物の補修効果に対する研究は少なく、またひび割れ長さが変化した際の補修効果に関する研究もこれまでに行われていない。さらに、内圧充填接合補強工法の従来工法からの改善点である、穿孔やエア抜きを行うことによる補修効果及び樹脂充填性能の変化は、RC 部材での実験的な検証データが少ないのが現状である。

そこで本研究では、ひび割れの長さが変化した際の内圧充填接合補強工法による補修効果の比較検討を目的とし、高さを変化させた RC はりに対して片振り繰返し載荷による損傷を与えた後、内圧充填接合補強工法による補修を行い、再度載荷を行うことで補修効果を確認した。加えて、内圧充填接合補強工法による補修効果と、従来の樹脂注入工法を模擬した穿孔及びエア抜きを行わずに

母材コンクリートの表面から樹脂注入を行う方法(以下、従来模擬工法)による最大耐力、部材剛性の補修効果の比較を目的に、同一条件の RC はりを2体作製した。それぞれ内圧充填接合補強工法と従来模擬工法で補修を行い、高さを変化させた RC はりに対する試験と同様の方法で載荷試験を行った。

また、注入樹脂の充填具合の違いを確認するために、曲げひび割れを誘発させるための切欠きを有した RC はりを同一条件で2体作製した。それぞれ損傷を与えたのちに、内圧充填接合補強工法と従来模擬工法で樹脂注入を行い、樹脂充填状況の比較を行った。

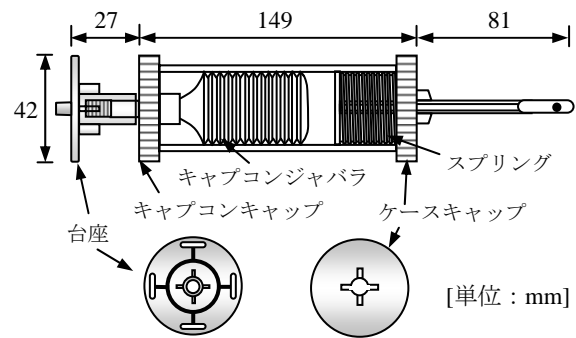


図-1 注入器具

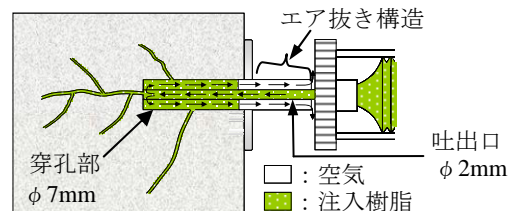


図-2 エア抜きイメージ図

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 メトロ開発 (株)

*3 アイクリーテクノロジー (株)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

2. 補修方法

内圧充填接合補強工法による補修手順は以下の通りである。まず、注入ポイントの穿孔を行う。孔径は 7mm、深さ 50mm とし、注入ポイントは、ひび割れ発生位置とした。穿孔終了後、穿孔部以外のひび割れ表面にシーリングを施す。これは、エポキシ樹脂の漏れを防止するためである。シーリング材は、速硬化のエポキシ樹脂を用いた。シーリング材の硬化後、**図-1** に示す注入器具を穿孔部に取り付け、エポキシ樹脂を吐出圧 0.06N/mm² 以下で加圧注入し、加圧状態で 72 時間硬化養生させる。なお、エア抜きは注入開始直後に台座とキャップコンキャップの連結を緩めることで行われる。連結を緩めることで僅かな隙間が生じ、そこから空気が逃げていく仕組みとなっている。エア抜きのイメージ図を**図-2** に示す。注入加圧器具は、注入圧の安定性確保から加圧精度の高いスプリング方式が採用されている。

従来模擬工法では、使用する注入樹脂や注入器、シーリングの方法は内圧充填接合補強工法と変えずに、コンクリート部材の穿孔とエア抜きを行わずに注入を行った。この 2 つの補修方法の模式図を**図-3** に示す。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

本実験では、6 体の試験体を作製した。実験ケースの一覧を表-1 に示す。高さを変化させた RC はりシリーズの RC はりの高さは、200mm、400mm、600mm の 3 パターンとした。主鉄筋に降伏強度が 1018N/mm² 又は 970 N/mm² の高強度異形鋼棒を用い、全ての試験体でせん断引張破壊が先行するように設計した。せん断破壊時の荷重 P_{cal} の推定には、式(1)~(3)を使用した³⁾。

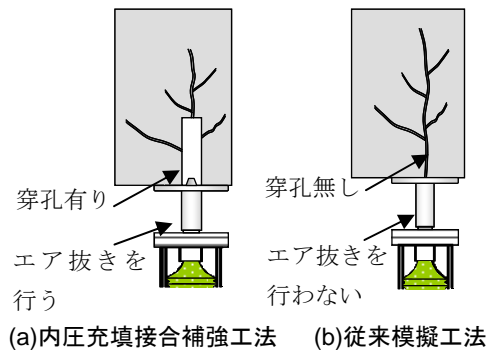


図-3 補修方法の違い

$$P_{cal} = 2(V_c + V_s) \quad (1)$$

$$V_c = 0.2 \cdot f_c^{1/3} (10^3/d)^{1/4} p_w^{1/3} (0.75 + 1.4d/a) \cdot b_w d \quad (2)$$

$$V_s = A_w f_{wy} (z/s) \quad (3)$$

ここで、 V_c : コンクリートのせん断抵抗、 V_s : せん断補強筋のせん断抵抗、 p_w : 引張鉄筋比、 d : 有効高さ(mm)、 a : せん断スパン、 b_w : 部材断面幅、 A_w : せん断補強筋 1 組の断面積、 f_{wy} : せん断補強筋の降伏強度、 $z=(7d)/8$ である。なお、 V_c は載荷試験日に実測したコンクリートの圧縮強度を使用して算出した。

図-4 に 1 例として高さが 400mm の試験体の配筋図と寸法及びひずみゲージの位置を示す。鉄筋の降伏の有無を確認するために、主鉄筋のスパン中央とせん断スパン内のせん断補強筋の高さ方向の中央部にひずみゲージを貼り付けた。破壊形式が一致するように、コンクリートの呼び強度、 a/d 、せん断補強筋比、幅は統一した。高さが 600mm の試験体に関しては、内圧充填接合補強工法により補修する IPH-h600 と、従来模擬工法で補修する CON-h600 の 2 体を作製した。定着を確保するため、軸方向鉄筋の端部を鋼板とナットで締め、主鉄筋の引抜けが生じないようにした。

次に、切欠きシリーズの試験体寸法及び配筋、ひずみゲージの位置、ならびに π ゲージの位置を**図-5** に示す。内圧充填接合補強工法により補修を行う IPH-notch と、従来模擬工法で補修を行う CON-notch の 2 体を作製した。はり下端の中央部に 10cm 四方の切欠きを設け、曲げひび割れを誘発した。切欠きの上部には、**図-5** に示すように、ひび割れ幅を計測するために 10cm の計測区間を有する π ゲージを 20cm 間隔で 2 列取り付けた。

3.2 使用材料

各試験体を使用したコンクリート及び高さを変化させた RC はりシリーズに用いた鉄筋の材料特性を表-2 及び表-3 にそれぞれ示す。表-2 中の f_c は各試験の実施日に実測したコンクリートの圧縮強度であり、 E_c はコン

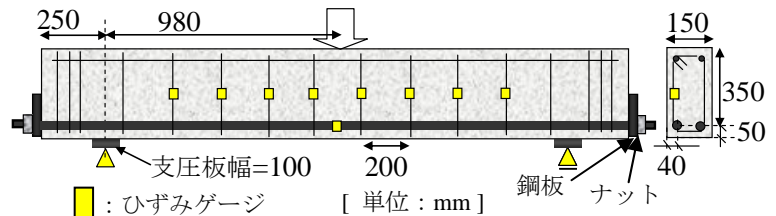


図-4 試験体概要(IPH-h400)

表-1 実験ケース

シリーズ名	試験体名	コンクリートの呼び強度(N/mm ²)	a/d	高さ(mm)	せん断補強筋比 (%)	主鉄筋	せん断補強筋	破壊形式	せん断余裕度
高さを変えた RC はり	IPH-h200	30	2.8	200	0.21	D22(SBPD93)	D6(SD295A)	せん断引張破壊	0.697
	IPH-h400			400					0.580
	IPH-h600			600					0.540
	CON-h600								
切欠きはり	IPH-notch	0.46	1000		0.17	D13(SD345)		曲げ圧縮破壊	1.404
	CON-notch								

クリートの弾性係数である。また、注入した樹脂の7日強度を表-4に示す。

3.3 試験方法

高さを変化させた RC はりシリーズの荷重には、油圧式 1000kN 耐圧試験機を用い、3 点曲げ片振り繰返し荷重試験を行った。RC はりの中央と支点に変位計を設置し、それぞれの変位を計測した。

荷重履歴は、まず荷重が曲げひび割れ発生荷重 P_{cr} に到達した時点で 1 サイクルの荷重を行い、その後は、 $0.5P_{cal}$ 、 $0.6P_{cal}$ 、…と $0.5P_{cal}$ から $0.1P_{cal}$ ずつ荷重を上げて 1 サイクルずつ荷重を行った。補修前の試験体の荷重では、 $0.9P_{cal}$ の荷重を 1 サイクル荷重した後、 $0.95P_{cal}$ まで荷重をかけ試験を終了した。損傷を与えた後、樹脂注入により補修を行った。なお、注入ポイント以外の側面及び底面に生じたひび割れにはシーリングを施し、注入は RC はりの底面のみから行った。補修後の試験では、補修前の荷重と同様に、 P_{cr} 、 $0.5P_{cal}$ 、 $0.6P_{cal}$ 、…と 1 サイクルずつ荷重を行い、 $0.9P_{cal}$ の荷重の後には $1.0P_{cal}$ 、 $1.1P_{cal}$ 、…と $0.1P_{cal}$ ずつ荷重を上げて荷重を行い、せん断破壊に至ったところで試験を終了した。なお、 P_{cr} は最初の曲げひび割れの発生を目視にて確認した際の荷重とした。

切欠きはりシリーズの荷重は、油圧式 2000kN 万能試験機を用いて、3 点曲げ単調荷重を行った。損傷を与える際は、残留ひび割れ幅がなるべく同じ値になるように、切欠き部直近の π ゲージの値が 0.5mm を超えたところで除荷した。樹脂注入は、2 体とも切欠きの両角からひび割れが発生したため (4.6 節で後述)、切欠き部から両角のひび割れに向かってそれぞれ 2 箇所ずつ底面から樹脂注入を行った。注入ポイント以外の底面及び側面のひび割れにはシーリングを施した。今回用いた樹脂は、ブラックライトを照射すると、発光する性質を持っている。荷重試験後、樹脂を注入してひび割れに沿ってコアを抜き取り、ブラックライトを照射することで樹脂の充填状

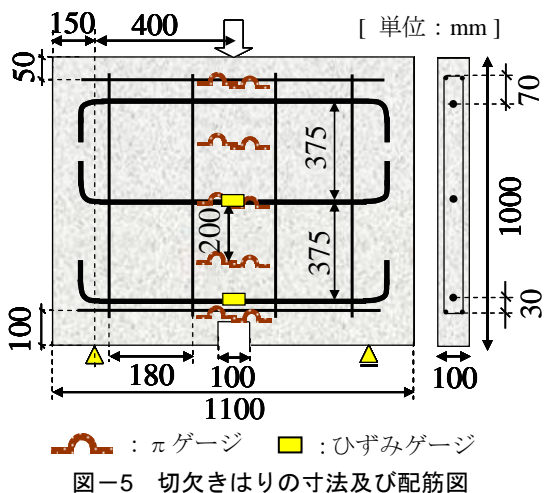


図-5 切欠きはりの寸法及び配筋図

況を確認した。

4. 実験結果

4.1 高さを変化させた RC はりシリーズ

(1) 破壊状態

図-6 に高さを変化させた RC はりシリーズの補修前及び補修後のひび割れ図を示す。補修前のひび割れ図は荷重荷重が $0.95P_{cal}$ に到達した際のものであり、補修後のひび割れ図はピーク荷重時のものである。なお、補修後のひび割れ図中の太い線は、破壊時に最も拡幅した斜めひび割れを示している。各試験体とも、クラックスケールで計測したところ、斜めひび割れの残留ひび割れ幅は 0.2mm 程度であり、その他の曲げひび割れに関しては、目視はできるが 0.1mm 以下であった。

IPH-h200 の補修前に関しては、 44.5kN で最初の曲げひび割れを確認し、荷重を上げていくにつれ曲げひび割れの発生及び伸展が生じ、 $0.95P_{cal}$ の荷重を行った際に斜め

表-2 コンクリートの力学特性

試験体名	補修前試験時		
	材齢	$f_c(\text{N/mm}^2)$	$E_c(\text{N/mm}^2)$
IPH-h200	14	33.6	2.13×10^4
IPH-h400	19	33.6	2.17×10^4
IPH-h600	12	36.7	2.41×10^4
CON-h600	7	28.0	2.57×10^4
試験体名	補修後試験時		
	材齢	$f_c(\text{N/mm}^2)$	$E_c(\text{N/mm}^2)$
IPH-h200	31	39.2	2.46×10^4
IPH-h400	31	39.2	2.46×10^4
IPH-h600	28	39.2	2.38×10^4
CON-h600	28	39.2	2.38×10^4
試験体名	荷重試験時		
	材齢	$f_c(\text{N/mm}^2)$	$E_c(\text{N/mm}^2)$
IPH-notch	15	32.5	-
CON-notch	8	30.5	-

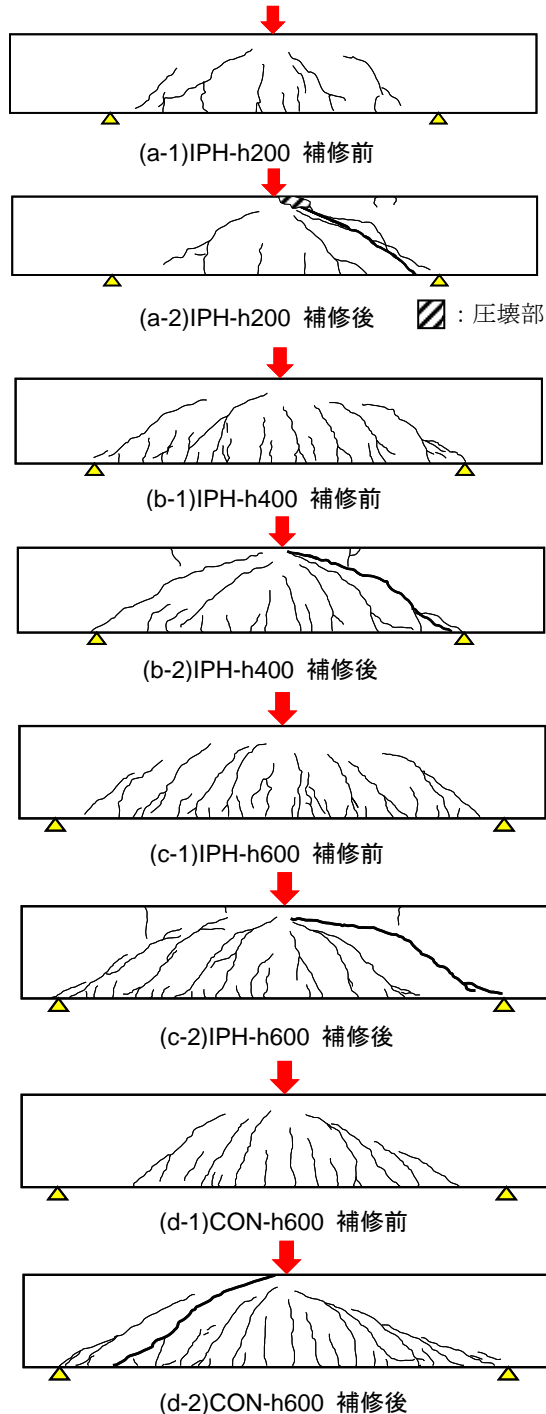
表-3 鉄筋の力学特性

鉄筋種類	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
D6(SD295)	358.2	519.8	1.95×10^5
D22(SBPD930)	1018	1144	2.01×10^5
D25(SBPD930)	970	1111	2.00×10^5

表-4 注入樹脂の7日強度

圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	接着強さ (N/mm^2)
50 以上	30 以上	50 以上	6 以上

ひび割れが発生した。IPH-h200の補修後は、46.5kNで曲げひび割れを確認した。曲げひび割れの発生箇所は、補修前の荷重で生じた最初の曲げひび割れと同じ個所であった。0.5 P_{cal} を荷重したときに、新規の曲げひび割れが発生するとともに、補修前の荷重で生じた曲げひび割れが下端から開き始めた。また、補修前の荷重で生じた斜めひび割れの開口を確認したのも0.5 P_{cal} 時だったが、斜めひび割れは下端からではなく、はりの丁度中央の高さ辺りが開口した。その後1.3 P_{cal} を荷重した際に、補修前



※図中の太線は破壊時に最も拡幅した斜めひび割れ
図-6 高さを変化させたRCはりのひび割れ図

に発生した斜めひび割れとは異なる位置に斜めひび割れが発生し、その斜めひび割れが拡幅すると共に、図-6(a-2)に示す圧壊部が破壊し、1.43 P_{cal} でせん断圧縮破壊に至った。

IPH-h400の補修前荷重では、52.0kNで最初の曲げひび割れを確認した。その後曲げひび割れが数本発生し、0.9 P_{cal} を荷重したところで斜めひび割れが発生した。補修後は、47.5kNで曲げひび割れを確認した。この曲げひび割れは補修前に発生した曲げひび割れとは異なる位置に発生した。その後0.5 P_{cal} で補修前に生じた斜めひび割れが中腹から開口し始め、荷重が上がるにつれて補修前に生じた斜めひび割れに沿って荷重点方向と支点方向に伸展し、1.13 P_{cal} で斜め引張破壊に至った。

IPH-h600に関しては、補修前の最初の曲げひび割れは77.0kNで確認された。その後曲げひび割れが数本発生し、0.9 P_{cal} を荷重した際に斜めひび割れが発生した。補修後は、補修前に生じたひび割れの開口を79.3kNで確認した。その後曲げひび割れが、補修前に生じたひび割れに沿って伸展するとともに、0.5 P_{cal} で斜めひび割れの中腹部が開口し始めた。その後、斜めひび割れも荷重点、支点方向に伸展しはじめるとともに、0.8 P_{cal} で新規の曲げひび割れが発生し、1.38 P_{cal} でせん断引張破壊に至った。

CON-h600に関しては、補修前の荷重では80.2kNで最初の曲げひび割れが生じた。その後、曲げひび割れが伸び、0.8 P_{cal} で斜めひび割れが発生した。補修後の荷重試験では、71.3kNで補修前試験時に生じたひび割れが開口するのを確認した。0.5 P_{cal} 時には、補修前に生じたひび割れとは異なる位置に曲げひび割れが発生した。また、斜めひび割れの中腹部も開口し始めた。0.8 P_{cal} 時には、ひび割れ図左側の支点の位置から斜めひび割れが新規に発生し荷重荷重が増えるごとに荷重点に向けて伸展したが、1.34 P_{cal} で図-6(d-2)に太線で示した斜めひび割れが開口し、せん断引張破壊に至った。

(2)最大荷重

表-5に各試験体の補修後試験体の最大荷重 P_{exp} と計算上のせん断破壊時の荷重 P_{cal} および破壊形式を示す。なお、IPH-h400とIPH-h600、CON-h600に関しては、せん断引張破壊をしたため、式(2)を使用して V_c を求めたが、IPH-h200はせん断圧縮破壊したため、最大荷重との比較においては式(4)を用いて V_c を求めた⁴⁾。

$$V_c = \frac{0.244 f_c'^{2/3} b_w d (1 + 3.33 r/d) (1 + \sqrt{p_w})}{1 + (a/d)^2} \quad (4)$$

ここで、 r : 支圧板幅(mm)である。RCはりの高さの違いによる補修効果の比較は、これら実験値と計算値の比 P_{exp}/P_{cal} で行った。表-5を見ると、IPH-h600の P_{exp}/P_{cal} が1.38と最も高く、次いでIPH-h200の1.24、IPH-h400

の 1.13 の順となっていることがわかる。この結果から、内圧充填接合補強工法により補修した RC はりの高さの最大荷重に対する補修効果の影響はほとんどないと考えられる。

次に、内圧充填接合補強工法で補修を行った IPH-h600 と従来工法を模擬した方法で補修を行った CON-h600 の実験結果について比較を行う。表-5 より IPH-h600 と CON-h600 の P_{exp}/P_{cal} はそれぞれ 1.38 と 1.34 であり、これより、内圧充填接合補強工法による補修と従来模擬工法での補修効果は、最大耐力に関してはほとんど差がないことがわかる。

(3)部材剛性の変化

各サイクルの荷重 0 の点と、変位が最大になった点の 2 点を結ぶ割線剛性を、部材剛性と定義する。さらに、各試験体の補修前・補修後の各荷重段階の剛性を補修前の初期剛性 (P_{cr} 時の剛性) で正規化した値 (剛性低減率) と、荷重履歴の関係を図-7 に示す。3 体共に補修前の最終荷重履歴時の剛性と比べ、補修後の初期剛性の方が高い。補修後の初期剛性は補修前の最終荷重履歴時の剛性と比べ、IPH-h200 で 19.1%, IPH-h400 で 15.5%, IPH-h600 で 25.3% 上昇した。IPH-h200 は、補修前の最終荷重履歴時の剛性を、補修後の荷重試験において $1.2P_{cal}$ まで保持しているが、IPH-h400 では $1.1P_{cal}$ の時点、IPH-h600 では $0.7P_{cal}$ の時点で補修前の最終荷重履歴時の剛性を下回っており、RC はりの高さが低いほど補修後の剛性を保持する傾向があることがわかる。

次に、荷重履歴ごとの IPH-h600 と CON-h600 の補修前、補修後の剛性低減率を図-8 に示す。なお、荷重履歴は P_{cal} に対する荷重の比率となっている。比較しやすいように、各剛性の値は各試験体の P_{cr} 時の剛性で正規化した。補修後の剛性に関しては IPH-h600 の剛性が CON-h600 の剛性を多少上回るという結果が得られた。特に、 P_{cr} 時の剛性は 1 割程度 IPH-h600 の方が高い結果となった。このように、剛性に関しては従来模擬工法と比べ、内圧充填接合補強工法の方がより高い補修効果となった。しかし、今回補修効果を比較した試験体は 1 体ずつのみであるため、今後実験データを蓄積し内圧充填接合補強工法の優位性を検証する必要がある。

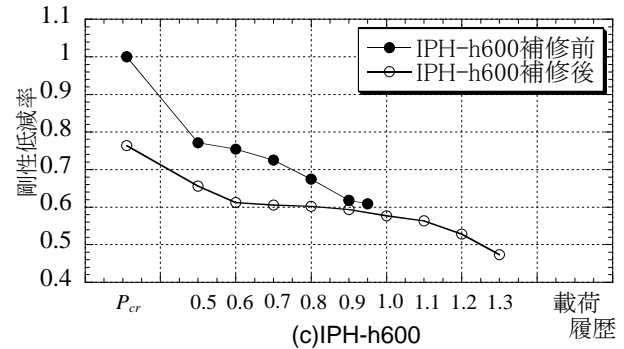
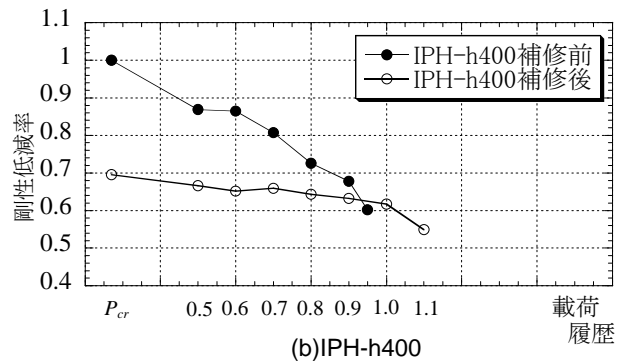
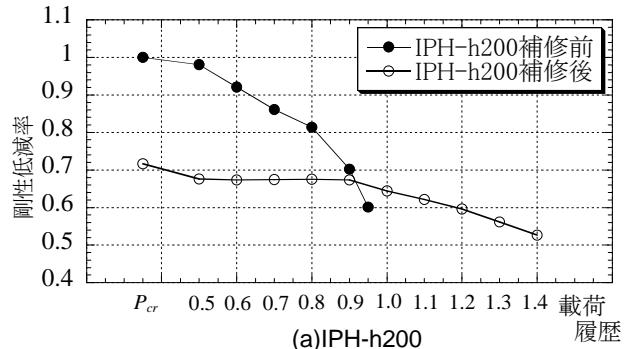
4.2 切欠きはりシリーズの樹脂充填状況

IPH-notch と CON-notch のひび割れ図と、 π ゲージ及び

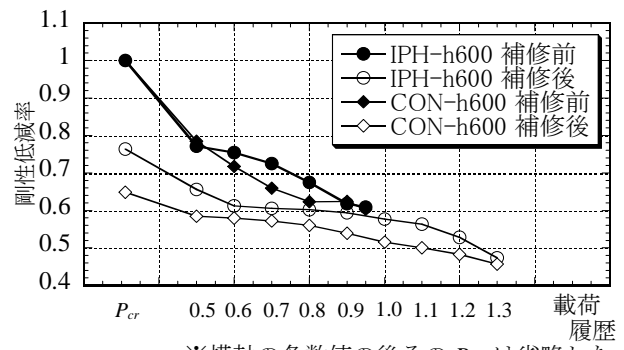
表-5 各試験体の P_{exp} , P_{cal} および破壊形式

試験体名	P_{exp} (kN)	P_{cal} (kN)	P_{exp}/V_{cal}	破壊形式
IPH-h200	166.5	134.4	1.24	せん断圧縮
IPH-h400	213.1	188.0	1.13	せん断引張
IPH-h600	361.3	262.2	1.38	せん断引張
CON-h600	351.8	262.2	1.34	せん断引張

コア抜き位置を図-9 に示す。また、各コアの切欠きからの距離及び樹脂の充填の有無を表-6 に示す。表中のコア番号は、各試験体のひび割れ図中の番号と対応している。IPH-notch は切欠きからの距離が 70cm のひび割れ端部にまで樹脂が充填されていた。一方、CON-notch では、切欠きからの距離が 29.8cm までしか樹脂が充填されていなかった。次に、各試験体の伸展長さの大きいひび割れ上に設置した π ゲージの値 (ひび割れ幅) と切欠きからの高さの関係を図-10 に示す。なお、この π ゲー



※横軸の各数値の後ろの P_{cal} は省略した
図-7 剛性低減率-荷重履歴の関係



※横軸の各数値の後ろの P_{cal} は省略した
図-8 IPH-h600 と CON-h600 の剛性の比較

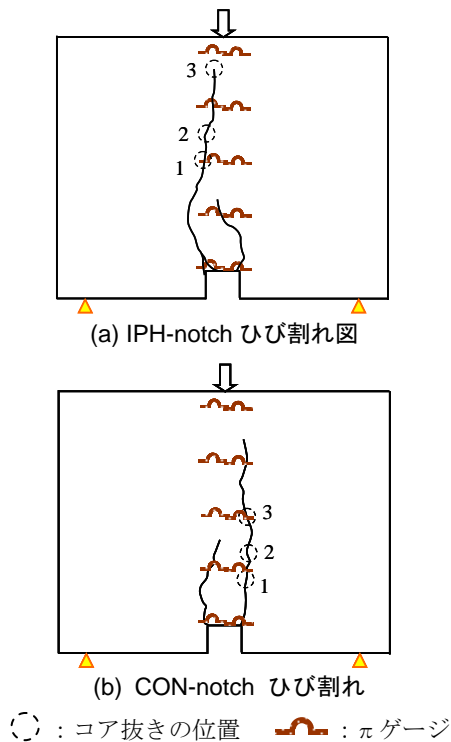


図-9 ひび割れ図及びコア抜き位置

ジの値は、除荷後の残留ひび割れ幅であり、切欠きからの距離は、切欠き上端からコア抜きを行った箇所の中央までの鉛直距離である。IPH-notch の切欠きからの距離が 0cm の時点での π ゲージの値が 0.68mm と CON-notch の 0cm 時点の値を大幅に上回っているのは、図-9(a)に示すように、 π ゲージの計測区間内に 2 本のひび割れが生じたためである。ひび割れ幅と注入状況を比べてみると、IPH-notch で最も切欠きから離れた箇所で樹脂が確認されたコア番号 3 の箇所の残留ひび割れは、図-10(a)より、0.13mm と推察できる。一方、CON-notch で切欠きから最も離れた箇所で樹脂が確認されたのは、コア番号 2 であり、同様に図-10(b)から残留ひび割れ幅を推察すると、0.22mm である。すなわち、より小さなひび割れ幅であったにもかかわらず、内圧充填接合補強工法は従来模擬工法よりも樹脂の伸展深さが大きかった。このように、内圧充填接合補強工法は従来工法よりも、より微細なひび割れに樹脂を充填できることを確認した。

5. まとめ

高さを変化させた RC はりに損傷を与え、内圧充填接合補強工法により補修を行った後、片振り繰返し載荷を行い補修効果を比較検討した。また、同一条件の RC はり 2 体に損傷を与え、片方を内圧充填接合補強工法、もう一方を従来模擬工法で補修し、補修効果の比較を行った。さらに、切欠きはりを同一条件で 2 体作製し、それぞれ内圧充填補強工法と従来工法を模擬した方法で樹脂注入を行うことで、それぞれの方法による樹脂の充填状況の比較を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

表-6 樹脂充填の確認結果

試験体名	コア番号	切欠きからの距離 (cm)	樹脂充填の有無
IPH-notch	1	42.5	有
	2	53.2	有
	3	70.0	有
CON-notch	1	22.5	有
	2	29.8	有
	3	39.5	無

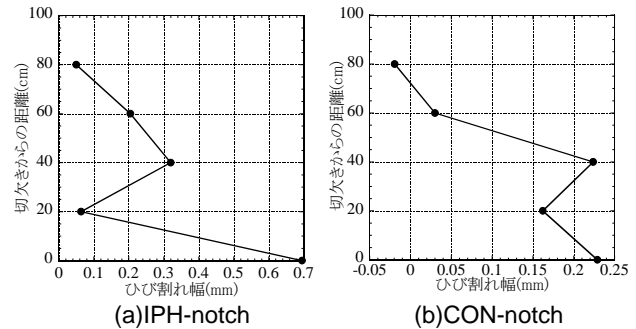


図-10 切欠きからの高さとしび割れ幅分布の関係

(1) 内圧充填接合補強工法による補修を行った結果、RC はりの高さが低い程、補修により回復した剛性を保持する傾向があった。

(2) 同一条件の RC はりを、内圧充填補強工法と従来模擬工法で補修した結果、補修後の試験において最大荷重はほぼ同じであった。本実験の範囲において、剛性に関しては、内圧充填接合補強工法の方がより高い補修効果を得られた。

(3) 同一条件の切欠きはりに損傷を与え、内圧充填補強工法と従来模擬工法で補修を行い、コア抜きとブラックライト照射により樹脂の充填状況を確認したところ、内圧充填接合補強工法で注入した方がより微細なひび割れに樹脂が充填され安定的な注入効果を得られる事がわかった。

参考文献

- 1) 中津紀幸ほか：内圧充填接合補強 RC 柱の耐震性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.517-518，2006
- 2) 永山正幸ほか：エポキシ樹脂注入による既存 RC 梁の補修効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1615-1620，2008
- 3) 二羽淳一郎：コンクリート構造の基礎，数理工学社，2006
- 4) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディーブビームのせん断耐荷力算定式，第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp.119-126，1983