

# 論文 柱の基部に豆板補修部を有する RC 柱の曲げせん断破壊

佐々木 尚美<sup>\*1</sup>・小林 薫<sup>\*2</sup>・半井 健一郎<sup>\*3</sup>

**要旨** : RC 柱の下端かぶり部に豆板補修部を有する試験体を用いて、水平交番載荷試験を行った。豆板補修部を有する場合の変形性能への影響と補修境界面（界面）の剥離挙動に着目し、健全試験体、豆板を取り除いて断面修復した従来補修試験体、豆板に樹脂を注入して補修した提案補修試験体で検討した。その結果、従来補修および提案補修試験体とも、補修による耐力や変形性能への影響はほとんど無かった。しかし、従来補修試験体は、変位の小さい段階から界面での剥離が発生し、拡大した。提案補修試験体は、界面での剥離は発生せず、従来補修試験体に比べ、補修部の損傷は小さかった。

**キーワード** : 豆板, 補修, 樹脂, ポリマーセメントモルタル, 交番載荷

## 1. はじめに

コンクリート構造物の初期欠陥である豆板が発生した場合、一般的には、豆板を取り除いて断面修復する方法により補修が行われる。しかし、豆板を取り除いて断面修復する方法（以降、従来補修工法という。）では、打継ぎ界面の付着強度が低下する<sup>1)</sup>ため、界面での剥離が発生しやすい。

一方、著者らは、従来補修工法のような界面を作らない補修を行うことを目的とし、豆板を取り除かず樹脂注入を行う新たな補修方法（以降、提案補修工法という。）を提案し、補修した材料レベルでの検証を行ってきた。材料レベルでの検証では、界面を模擬した供試体での直接引張強度確認試験や、補修部を有する供試体での曲げ強度確認試験を行い、提案補修工法を用いた供試体の界面での剥離は発生せず、健全供試体と同等の強度を有した<sup>2)</sup>こと、従来補修工法を用いた供試体は界面での剥離が生じ、健全供試体の強度に及ばなかったことを確認している<sup>2)</sup>。

そこで、部材レベルでの性能確認を行うため、ここでは、RC柱の柱下端部に豆板が発生した場合を想定した試験を行うこととした。柱下端かぶり部に豆板を補修し

た箇所（以降、補修部という。）を有する試験体を作製し、水平交番載荷試験を行った。本試験では、健全な試験体に対し、補修部を有する場合の変形性能に与える影響と、界面の剥離挙動に着目した。補修部を有する試験体は、従来補修工法および提案補修工法を用いて補修を行った。

## 2. 試験の概要

### 2. 1 試験体の諸元

試験体の諸元を表-1に示す。試験体は、鉄道のラーメン高架橋の柱を想定し、実構造物の1/2スケールを想定したものである。断面は、幅400mm、高さ400mmの正方形で、側方鉄筋を配置した形状である。せん断スパン比は3.19である。パラメータは、帯鉄筋比（耐力比）と補修部の有無と補修方法の違いである。既往の実験結果<sup>3),4)</sup>より、基本となる健全試験体（記号：N）は、破壊形態の異なる帯鉄筋比0.51%（記号：125）、0.91%（記号：70）の試験体とし、それぞれに対して、従来補修（記号：P）および提案補修（記号：H）した補修部を有する試験体を作製した。試験体の概要を図-1に示す。補修部以外は、同じ諸元であるため、補修部を有する試験

表-1 試験体諸元

試験体名	補修部	断面寸法 B×H (mm)	有効高さ d (mm)	せん断 スパン a (mm)	せん断 スパン比 a/d	軸方向鉄筋 (鉄筋の呼び名) ×(本)	軸方向 鉄筋比 (%)	側方鉄筋 (鉄筋の呼び名) ×(本)	帯鉄筋 (鉄筋の呼び名) -(組)-(間隔(mm))	帯鉄筋比 (%)
N-125	無	400×400	360	1,150	3.19	D19×16	2.865	D19×3	D13×1-ctc125	0.51
P-125	従来補修									
H-125	提案補修									
N-70	無								D13×1-ctc70	0.91
P-70	従来補修									
H-70	提案補修									

\*1 東日本旅客鉄道（株） JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 博（工）（正会員）

\*2 東日本旅客鉄道（株） JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 博（工）（正会員）

\*3 広島大学 大学院 工学研究院 博（工）（正会員）

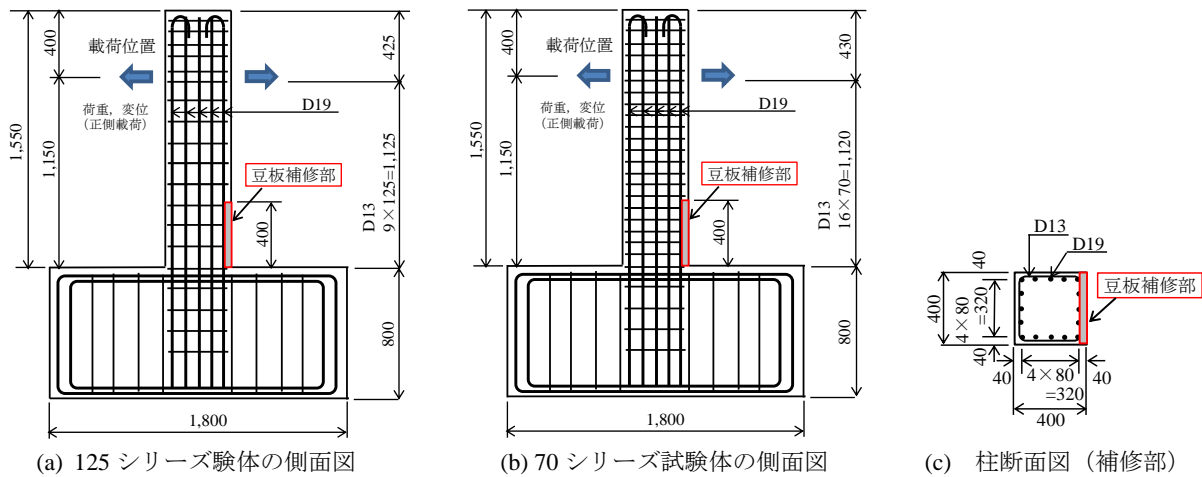


図-1 補修部を有する試験体の概要

体の概要を示した。図-1 (a)は、125シリーズの試験体の側面図、図-1 (b)は、70シリーズの試験体の側面図、図-1 (c)は、補修部の柱断面図を示す。ここでは、荷重する柱面を荷重面とし、荷重面に対して、直角方向となる柱面を柱側面とする。補修部の範囲は、既往の研究<sup>5)</sup>を参考に、幅は柱断面幅の400mm、柱の高さ方向は柱基部から1D (D: 柱の断面高さ) 区間である400mm、柱断面方向は軸方向鉄筋の中心位置までの40mmの範囲とした。なお、補修部の影響を明らかにするため、補修部は柱断面の荷重面の片側にのみ設定した。

## 2. 2 試験体の作製方法

試験体は、はじめに豆板部を作製する。柱試験体の型枠に鉄筋を組み立て、豆板部の寸法に合わせて、鋼板で仕切り型枠を配置する。豆板は、既往の研究<sup>2)</sup>の作製方法により、網目15mmのふるい機に振動機で振動を与えることで普通コンクリートからモルタルやペースト分を落として作製した。豆板部は、養生シート内 (最高温度約50℃) で約15時間蒸気養生した後、1日気中養生した。養生後、柱部の型枠と豆板部の仕切り型枠を撤去し、再度、柱部の型枠をセットして健全部となる周りのコンクリートを打ち込んだ。試験体は、豆板部と同様に蒸気養生し、試験実施まで気中養生した。

## 2. 3 試験体の補修方法

### (1) 従来補修試験体

従来補修試験体の補修状況を写真-1に示す。写真-1 (a)は、補修前の豆板の状態である。はじめに、界面が軸方向鉄筋の中心位置となるように、豆板をはつり取る。よって、帯鉄筋はむき出しとなる (写真-1 (b))。はつり出した健全コンクリート面にプライマーを塗布して、1~2時間乾燥させる。その後、型枠をセットし、一般的な断面修復材であるポリマーセメントモルタル (以降、PCMという。) を充填する。全断面修復後、型枠を固定

し、補修部をシートで覆い養生した。補修完了後の状態を写真-1 (c)に示す。

### (2) 提案補修試験体

提案補修試験体の補修概要と補修完了後の状態を図-2に示す。ここでは、H-70試験体を例に示す。

図-2 (a)に、柱側面からみた表面シール材の塗布範囲と各孔の削孔長を示す。補修は、荷重面側から行った。はじめに、豆板の表面からの注入した樹脂 (低粘度系エポキシ樹脂) の漏出を防ぐため、豆板の範囲より50mm以上大きい範囲に表面のシール材 (高粘度系エポキシ樹脂) を塗布する。その後、豆板部に直径約10mmの注入孔と空気孔を削孔する。注入孔は、柱面から90mmの深さ (健全部に50mm程度入った位置) まで削孔する。空気孔は、柱面から35mmまで削孔する。できるだけ豆板の奥側から空気を抜くように空気孔の削孔長を決めた。

図-2 (b)は、荷重面からみた注入孔と空気孔の配置を示す。各削孔位置は、主鉄筋の純かぶりが約30mmと薄いため、かぶり部以外で、鉄筋位置を避けた位置に配置した。注入孔は、中心から半径100mmの範囲を1ヶ所の注入範囲として、注入範囲が重なるように注入孔を配置した。空気孔は、注入孔の間に、注入孔と同数配置した。注入は、注入器を用いた自動低圧注入工法により一定の圧力 (0.1MP<sub>a</sub>程度) で行った。柱下端から注入を開始し、注入器の樹脂がなくなった時点で新しい注入器と交換し、順次注入していった。すべての注入器において、注入が進まなくなったことを確認し、注入器をつけた状態で注入を完了した。

なお、提案補修試験体は、豆板部をセットした状態で周りの健全なコンクリートを打ち込むため、最終的にできあがった豆板部のコンクリート未充填率<sup>2)</sup> (健全コンクリートに対するコンクリート未充填部の割合) を正確に算出することはできない。そこで、作製した豆板寸法



写真-1 従来補修試験体の補修状況

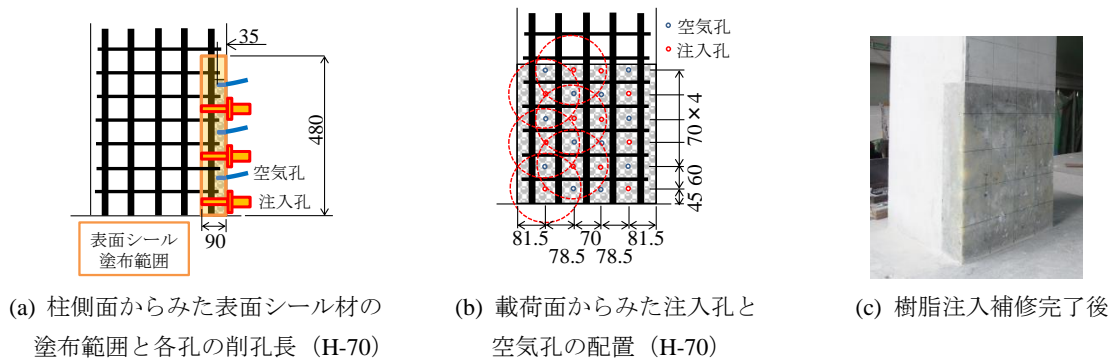


図-2 提案補修試験体の補修概要と補修完了後の状態

から豆板部の体積を仮定し、豆板の体積に対して注入した樹脂の量から豆板の空隙率を算出してみた。その結果、H-125 試験体の空隙率は 15.2%、H-70 試験体の空隙率は 15.5%となった。後述する材料強度試験用の豆板供試体のコンクリート未充填率はそれぞれの試験体に対し 17.0%および 16.4%であったことから、2%程度の差はあるものの、提案補修試験体の豆板部と材料強度試験用の豆板供試体はほぼ同じ空隙を有したと推定された。

#### 2. 4 荷重方法

試験体の荷重位置を図-1に示す。水平方向の荷重は、3,000kN まで荷重可能なアクチュエーターを用いた。軸力は、門型フレームに取り付けた鉛直ジャッキ (3,000kN)により、156.8kN (平均軸圧縮応力度:  $0.98\text{N/mm}^2$ ) を一定で与えた。静的交番荷重試験により、引張側となる最外縁の軸方向鉄筋のひずみが、材料の引張試験から求まる降伏ひずみに達したときの変位を降伏変位 ( $\delta_y$ )、その時の荷重を降伏荷重 ( $P_y$ ) とした。

健全試験体の荷重は、 $1\delta_y$  終了後、 $2\delta_y$ 、 $4\delta_y$ ...と、降伏変位の偶数倍をそれぞれ 1 サイクルずつ荷重し、荷重低下した時点からは、 $1\delta_y$  ずつ変位を増加させ、荷重低下後はそれぞれ 3 サイクルの荷重を行っている<sup>3),4)</sup>。

補修部を有する試験体の荷重は、 $1\delta_y$  に至るまで、荷重の小さい段階における界面の剥離の発生状況を確認するため、部材角  $1/800$  (1.31mm)、 $1/400$  (2.63mm)、 $1/200$  (5.25mm) の変位で、各 5 サイクルずつ荷重した。 $1\delta_y$  終了後は、補修箇所損傷状況を確認するため、 $1\delta_y$  ずつ変位を増加させ、荷重が降伏荷重 ( $P_y$ ) の半分程度

になるまで荷重した。なお、 $2\delta_y$  以降は、最初に試験を行った P-125 試験体の  $\delta_y$  を基準として、同様に変位を増加させて荷重を行った。

### 3. 試験結果

本章で示す健全試験体の試験結果は、過去に行った実験の結果<sup>3),4)</sup>をもとに示している。

#### 3. 1 材料強度

試験体に使用した材料で作製したテストピースの強度試験結果を表-2に示す。従来補修試験体の補修部の圧縮強度は、試験体の補修に用いた PCM で作製した円柱供試体の強度である。提案補修試験体の補修部の圧縮強度は、試験体と同日に豆板を作製し、試験体と同日に樹脂注入補修を行った円柱供試体の強度である。円柱供試体の寸法は、直径  $100\text{mm}$  × 高さ  $200\text{mm}$  である。なお、豆板を補修した円柱供試体のコンクリート未充填率の平均値は、H-125 試験体で 17.0%、H-70 試験体で 16.4%であった。

#### 3. 2 降伏荷重、降伏変位、耐力比の算定値と実験値

降伏荷重、降伏変位、耐力比の算定値と実験値を表-3に示す。降伏変位の算定値 ( $\delta_{y,ca}$ ) は、耐震設計標準<sup>6)</sup>の算定式を用いて算出した。耐力比 ( $V_y/V_{mu}$ ) の  $V_y$  の計算に用いた  $V_c$  は、せん断補強筋のない棒部材のせん断耐力算定式である二羽らの式<sup>7)</sup>により求めた。 $V_y$  は帯鉄筋が負担するせん断耐力、 $V_{mu}$  は  $M_u$  (曲げ耐力) /  $a$  (せん断スパン) である。実験値の終局変位 ( $\delta_u$ ) は、降伏荷重を下回る前の最大変位である。

表-2 材料強度

試験体	材料強度			
	コンクリートの圧縮強度 $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	補修部の圧縮強度 $f'_{hc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	軸方向鉄筋(D19)の降伏強度 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	帯鉄筋(D13)の降伏強度 $f_{vy}$ (N/mm <sup>2</sup> )
N-125	27.4	—	378	359
P-125	29.0	52.5	371	363
H-125	28.4	28.7	371	363
N-70	23.5	—	378	359
P-70	27.2	45.9	371	363
H-70	24.6	24.4	371	363

表-3 降伏荷重, 降伏変位, 耐力比の算定値と実験値

試験体名	コンクリートの圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	計算値									実験値			破壊形態
		降伏荷重 $P_{y,cal}$ (kN)	降伏変位 $\delta_{y,cal}$ (mm)	$V_c$ (kN)	$V_s$ (kN)	$V_y$ (kN)	$V_{mu}$ (kN)	$V_c/V_{mu}$	$V_s/V_{mu}$	耐力比 $V_y/V_{mu}$	降伏荷重 $P_y$ (kN)	降伏変位 $\delta_y$ (mm)	終局変位 $\delta_u$ (mm)	
N-125	27.4	214.6	6.4	157.9	227.9	385.8	249.9	0.63	0.91	1.54	236.1	6.5	48.9	曲げ降伏後のせん断破壊
P-125	29.0	211.7	6.1	160.8	230.2	391.0	247.9	0.65	0.93	1.58	262.0	7.4	57.9	曲げ降伏後のせん断破壊
H-125	28.4	210.7	6.2	159.7	230.2	389.9	247.9	0.64	0.93	1.57	254.0	7.1	51.4	曲げ降伏後のせん断破壊
N-70	23.5	211.7	6.9	150.2	406.9	557.1	245.0	0.61	1.66	2.27	239.9	7.6	70.9	曲げ破壊
P-70	27.2	210.7	6.3	157.5	411.0	568.5	246.0	0.64	1.67	2.31	261.0	7.3	73.9	曲げ破壊
H-70	24.6	208.7	6.6	152.5	411.0	563.5	243.0	0.63	1.69	2.32	240.5	6.5	73.7	曲げ破壊

$$V_y = V_c + V_s$$

帯鉄筋を 125mm 間隔で配置した試験体の耐力比は 1.5 程度, 帯鉄筋を 70mm 間隔で配置した試験体の耐力比は 2.3 程度となった。降伏荷重の実験値は, 各試験体の算定値の 1.10~1.24 倍となった。また, 3.4 で詳しく述べるが, 破壊形態は, 耐力比の異なる試験体ごとで, 補修部の有無や補修方法にかかわらず, 同じ破壊形態を示した。

### 3.3 荷重と変位の関係

125 シリーズの試験体の荷重変位関係を図-3 に, 70 シリーズの試験体の荷重変位関係を図-4 に示す。補修部が引張側となる荷重を正荷重 (正の変位), 健全側が引張側となる荷重を負荷重 (負の変位) とした。

ここで, 試験体による材料特性の影響を無くすため, 荷重と変位を降伏荷重と降伏変位で除して, 正規化した。

正規化した  $P_y/P_y$  と  $\delta_y/\delta_y$  の関係を図-5 に示す。ここでは, 降伏以降の結果を示した。図-5(a)の 125 シリーズ (耐力比 1.5 程度) の試験体では, 試験体による違いはみられない。図-5(b)の 70 シリーズ (耐力比 2.3 程度) の試験体では, 補修部を有する試験体の補修側引張時の終局変位が大きくなっている。また, 他の試験体に比べ,

提案補修(H-70)試験体の補修側の変形性能が高いように見える。これは, H-70 試験体の降伏変位が他の試験体に比べて小さい値であったため, このような差が現れたものと思われる。補修部が圧縮側となる領域では, 試験体による違いは見られなかった。

### 3.4 破壊状況

125 シリーズ試験体の破壊後の状態を写真-2 に示す。写真-2(a)の健全な N-125 試験体は, 引張側の軸方向鉄筋が降伏後, 載荷面の曲げひび割れの増加に伴って, 載荷面に対して直角となる柱側面の斜めひび割れが伸展した。交番載荷が進むと載荷面の柱下部のコンクリートが圧壊して粉碎し, 荷重が低下した。補修部を有する P-125, H-125 試験体の最終的な破壊形態は健全試験体と同様であったが, 補修側は健全側のコンクリートに比べ, 大きく剥落していない (写真-2(b), (c))。従来補修の P-125 試験体は, 部材角 1/400 (2.63mm) 時に柱側面の鉛直界面に剥離が生じ, 約  $3\delta_y$  時に界面全域に剥離が発生した。5  $\delta_y$  以降, 鉛直界面の剥離が拡大するが, 補修側の圧壊は健全側に比べて小さかった。提案補修の H-125 試験体は, 4  $\delta_y$  以降, 補修部が圧壊し始めるが,

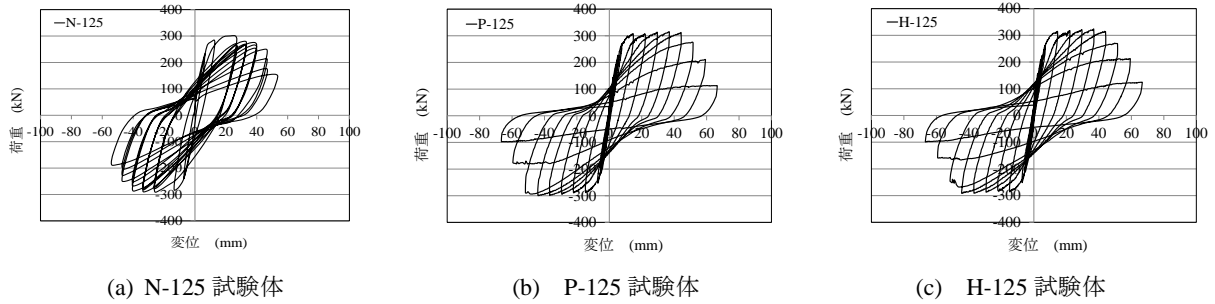


図-3 荷重変位関係 (125 シリーズの試験体)

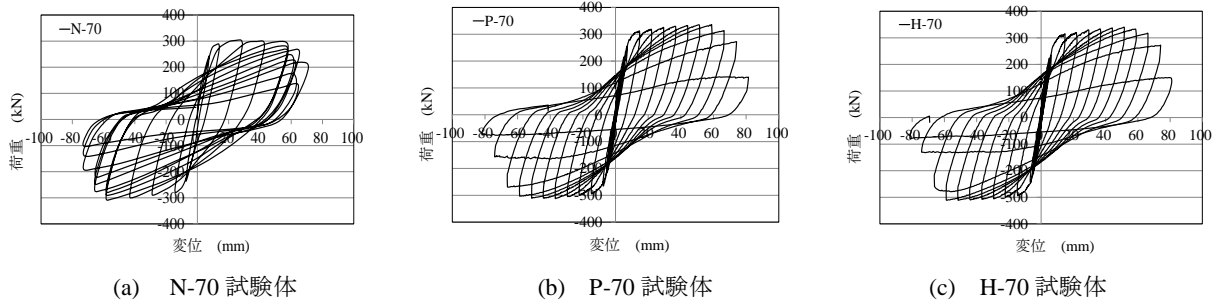


図-4 荷重変位関係 (70 シリーズの試験体)

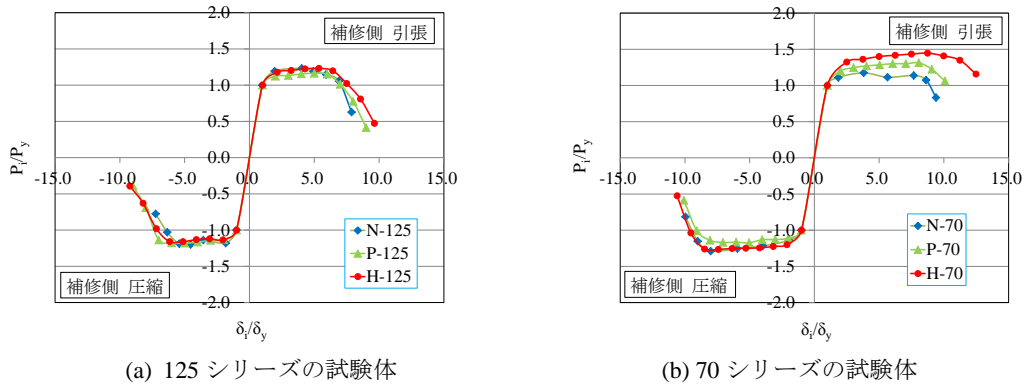


図-5  $P_i/P_y$  と  $\delta_i/\delta_y$  の関係

界面での剥離は見られなかった。

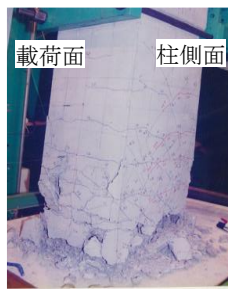
70 シリーズ試験体の破壊後の状態を写真-3 に示す。写真-3(a)の健全な N-70 試験体は、交番荷の進捗に伴い、柱下端のひび割れが集中し、載荷面側の柱下端のコンクリートが圧壊して損傷し、曲げ破壊した。補修部を有する P-70、H-70 試験体の最終的な破壊形態は健全試験体と同様であった。従来補修の P-70 試験体は、部材角 1/200 (5.25mm) 時に柱側面の鉛直界面に剥離が発生し、 $\delta_y$  時に柱側面の水平界面に剥離が生じた。5  $\delta_y$  時には、全域に渡って界面は剥離し、圧縮力を受けると界面の剥離が拡大した。その後は、補修部が引張力を受ける際にも剥離は拡大した。提案補修の H-70 試験体は、界面での剥離は生じず、補修部は圧縮力を受けて圧壊したが、健全側のような剥落はしなかった。写真-3(b)、

(c)に示すように、H-70 試験体の補修部の損傷状態は、P-70 試験体よりも軽微であった。

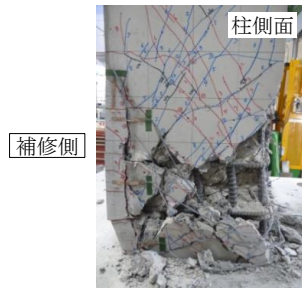
#### 4. まとめ

ラーメン高架橋の柱下端のかぶり部に豆板が発生した場合を想定し、健全および豆板を補修した箇所を有する試験体で交番荷試験を実施した。豆板部は表面に骨材がみえ、内部に 15%程度空隙を有する豆板を模擬して作製した。事前に作製した豆板部の周りにコンクリートを打ち込んで作製するため、豆板と健全なコンクリートとの境界は、豆板表面にペーストが入り込んだ状態となる。このような豆板部を補修した箇所を有する RC 柱試験体において、以下のことを確認した。

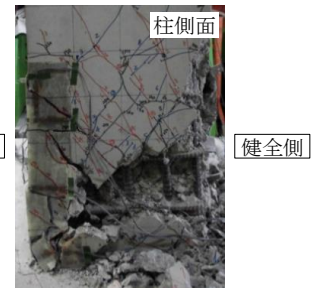
(1) 柱下端かぶり部に、豆板をはつり取り断面修復した



(a) N-125 試験体

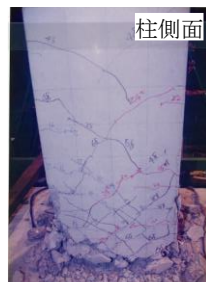


(b) P-125 試験体

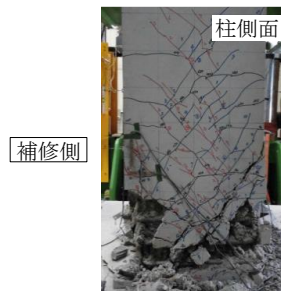


(c) H-125 試験体

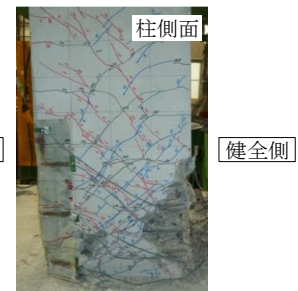
写真-2 各試験体の破壊後の状態【125シリーズ】



(a) N-70 試験体



(b) P-70 試験体



(c) H-70 試験体

写真-3 各試験体の破壊後の状態【70シリーズ】

従来補修部および豆板に樹脂注入して補修した提案補修部を有する場合、帯鉄筋配置 125mm 間隔（耐力比 1.5 程度）および 70mm 間隔（耐力比 2.3 程度）の試験体では、耐力や変形性能への影響はほとんど見られなかった。

- (2) 豆板をはつりとり、断面修復補修した従来補修試験体は、変位の小さい段階から界面での剥離が生じ、交番載荷とともに剥離は拡大した。
- (3) 内部に 15% 程度の空隙を有する豆板に樹脂を注入して補修した提案補修試験体は、従来補修試験体のような界面での剥離は生じず、補修部の損傷状態は従来補修試験体より小さかった。提案補修試験体は、健全なコンクリート部と豆板補修部が一体となって挙動したこと、また、豆板補修部の引張強度が高く、表面の樹脂の伸び能力もあることから、界面での剥離は生じず、損傷も小さかったものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 渡邊晋也, 後藤昭彦, 松本政徳, 宮永憲一: 打撃工法によるハツリ処理で生じた微細ひび割れの定量的評価方法と打継ぎ界面の付着強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, pp.775-780, Vol.35, No.1, 2013.
- 2) 佐々木尚美, 小林薫, 半井健一郎: 樹脂注入によ

る豆板補修工法の提案と各種材料強度の評価, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.2, pp.252-271, 2014.6

- 3) 石橋忠良, 津吉毅, 小林薫, 小林将志: 大変形正負交番載荷を受ける RC 柱の損傷状況及び効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.55-69, 2000.5
- 4) 中山弥須夫, 石橋忠良, 鎌田則夫, 鬼柳雄一: 帯鉄筋を密に配置した RC 柱の変形性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.783-788, 1997.
- 5) 町田篤, 睦好宏史: 補修された鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.257-260, 1983.
- 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計, 1999.10
- 7) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp.167-176, 1986.8