

論文 樹脂で補修した RC 部材のテンションスティフニング効果

佐々木 尚美^{*1}・小林 薫^{*2}・半井 健一郎^{*3}

要旨：コンクリート構造物の初期欠陥である豆板を取り除かずに樹脂を注入して補修する方法を検討した。豆板に樹脂を注入して補修した箇所は、普通コンクリートとは異なるため、ひび割れの発生や鉄筋との付着性状が異なる。そこで、ひび割れの発生状況や鉄筋との付着作用によるテンションスティフニング効果を確認するため、一軸引張試験を実施した。その結果、樹脂を注入して補修した豆板供試体は、鉄筋コンクリート供試体よりも高いテンションスティフニング効果があることがわかった。

キーワード：樹脂、テンションスティフニング、補修、豆板、ポリマーセメントモルタル

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と打継ぎ界面の付着強度が低下するため¹⁾、ひび割れや剥離発生の要因となることが考えられる。そこで、豆板を取り除かずに樹脂を注入することで補修する方法（以降、提案補修工法という。）を検討した。

既往の研究では、樹脂注入による既設構造物の補修を行った場合、鉄筋との付着力が向上し、耐力が回復するという報告^{例えば 2)}がある。よって、豆板に樹脂注入補修した場合の鉄筋との付着性状や引張剛性は通常の RC 部材とは異なると考えられる。また、提案補修工法で補修した部材のひび割れ発生状況や引張剛性を把握することは、耐久性への影響や破壊性状を把握するために重要であると考えられる。

そこで、一軸引張試験により、提案補修部材のひび割れの発生状況および鉄筋との付着作用によるテンションスティフニング効果を確認することとした。この際、比較の対象として、通常の RC 部材であるコンクリートと一般的な補修工法の方法として用いられているポリマーセメントモルタル（以降、PCM という。）についても確認することとした。



写真-1 試験概要

2. 一軸引張試験

2.1 供試体概要

試験体を試験装置にセットした状況を写真-1に、供試体概要を図-1に示す。供試体は、幅200mm、高さ150mm、長さ1500mmの角柱とし、供試体の中心に鉄筋を1本埋め込んだ。埋め込んだ鉄筋には、縦リブが無いねじふし鉄筋を使用した。その理由は、通常の異形鉄筋ではストレインゲージを貼り付ける際に鉄筋のリブを削らなければならない、鉄筋断面が欠損してしまうためである。鉄筋径はD19とし、鉄筋比が1.0%となる供試体断面とした。試験体の長さは、ひび割れが多く発生するように、試験装置にセット可能な最長の長さで設定した。

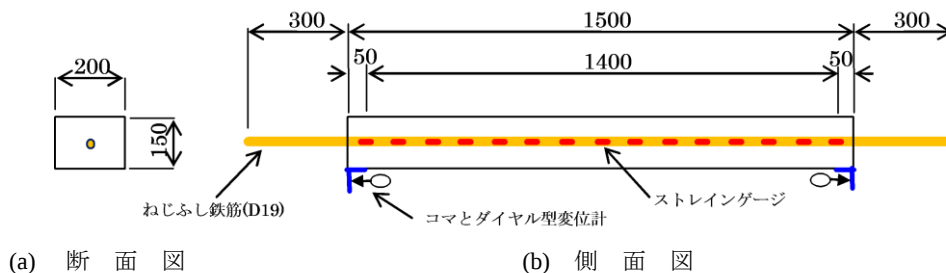


図-1 供試体概要

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

*2 東日本旅客鉄道（株） J R 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）

供試体の種類を表－１示す。供試体は、通常の鉄筋コンクリートとの比較を行うため、普通コンクリートを用いた健全供試体(N)と、一般的な断面修復に用いられているPCM供試体(P)、豆板にエポキシ樹脂を注入して補修した供試体で豆板のコンクリート未充填率（コンクリートが十分に充填されていない未充填空隙の割合）が異なる供試体3体(H05、H10、H25)の計5体とした。

ここでコンクリート未充填率についてより詳しく説明するため、供試体の作製方法について述べる。供試体Nおよび供試体Pは、鉄筋が供試体断面の中心に位置するように配置して、型枠内に材料を打込んだ。豆板を補修した供試体は、はじめに、豆板を作製する。豆板は、コンクリート構造物の表面で観察される豆板を模擬して作製することとし、材料分離や型枠の変形などによりモルタルやペーストが著しく漏れ出た場合にできる豆板を再現した。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下させたコンクリートを締め固めずに型枠内に打込み、豆板となるコンクリートを硬化させる。このように作製した豆板供試体のコンクリート未充填率とは、示方配合通りのコンクリートが十分に充填された供試体Nに対し、モルタル等を落下させたコンクリート（骨材が多く、ペーストが少ない）を締め固めず（空隙が多くなる）に作製した豆板供試体のコンクリート未充填部の割合（供試体の密度比から求めるもの）である。補修した豆板3体のコンクリート未充填率は、ふるい機に与える振動時間を変え、モルタルやペースト分を落下させる量を変えることで変化した。振動周波数240Hzで60秒程度振動させるとコンクリート未充填率20%程度の豆板供試体となる。供試体の例を写真－２に示す。

補修した豆板供試体は、豆板コンクリートの硬化後、コンクリート打込み面に型枠と同じ鋼板で蓋をし、型枠にあらかじめ開けておいた孔から注入孔を削孔して樹脂を注入して作製した。注入は、ゴムの復元力を利用した注入器を用いた自動低圧注入方法で、注入圧力は0.1MPaを基本とした。注入位置および注入状況を図－２に示す。注入結果から算出した未充填空隙の割合は、H05は3.5%、H10は12.3%、H25は25.3%であった。

2.2 試験概要

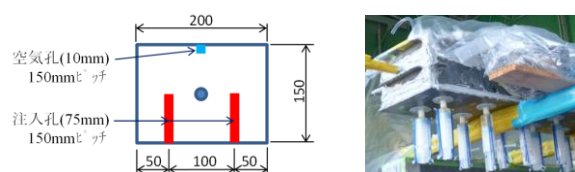
載荷は、文献(3)～(6)を参考に万能試験装置を用いて行った。供試体から突出した鉄筋の端部を試験装置の上下のチャックに固定し、鉄筋を両引きして載荷した。載荷荷重は、鉄筋を破断させないようにするため、事前に実施した鉄筋単体の引張試験による鉄筋破断荷重を踏まえ、最大荷重を140kN、または、最大ひずみを30,000μ程度までとした。

表－１ 供試体概要

供試体名（記号）	内 容
健全（N）	普通コンクリート
PCM（P）	ポリマーセメントモルタル
補修した豆板 5%（H05）	豆板（コンクリート未充填率 5%）にエポキシ樹脂を注入して補修したもの
補修した豆板 10%（H10）	豆板（コンクリート未充填率 10%）にエポキシ樹脂を注入して補修したもの
補修した豆板 25%（H25）	豆板（コンクリート未充填率 25%）にエポキシ樹脂を注入して補修したもの



写真－２ 供試体 H25 と材料試験用供試体



図－２ 樹脂注入位置（断面）と注入状況

表－２ コンクリート配合表

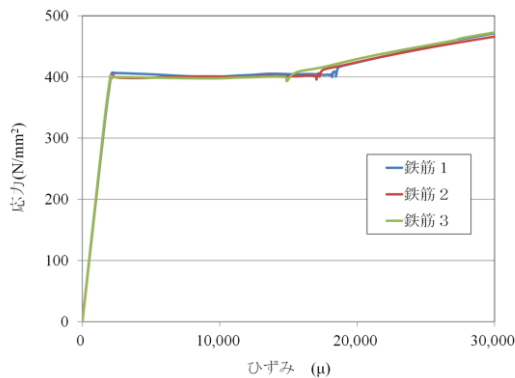
設計基準 強度 N/mm ²	スランブ cm	粗骨材 の最大 寸法 mm	セメント の種 類	W/C %	単位水量 kg/m ³
24	15.0± 2.5	20	普通ポ ルトラ ンド	60	170

表－３ 材料特性

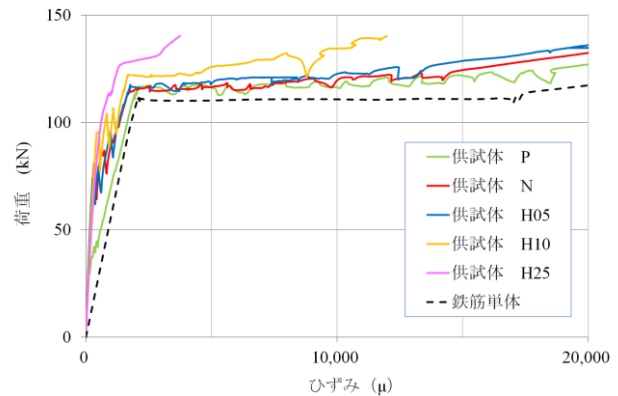
材料	特性（カタログ値、一例）
骨材	細骨材：砕砂、表乾密度：2.72 g/cm ³ 吸水率：1.53% 粗骨材：砕石、表乾密度：2.75g/cm ³ 吸水率：1.67%
PCM	圧縮強度 35.4N/mm ² 、曲げ強度 9.2N/mm ²
エポキシ樹脂 （硬化樹脂）	圧縮降伏強さ 88N/mm ² 引張強さ 50.8N/mm ²

表－４ 鉄筋の特性

鉄筋径	18.8mm
ヤング係数	196kN/mm ²
降伏強度	404 N/mm ²
ひずみ硬化開始ひずみ	16,800μ



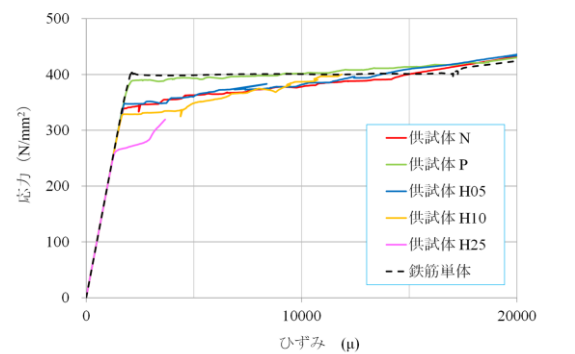
図－3 応力－ひずみ関係



図－4 各供試体の荷重と平均ひずみの関係

表－5 各供試体の材料の割裂引張強度

供試体名 (材料)	割裂引張強度 (N/mm²)
N (普通コンクリート)	3.22
P (PCM)	2.83
H05 (補修した豆板 5%)	3.38
H10 (補修した豆板 10%)	3.07
H25 (補修した豆板 25%)	4.24



図－5 各供試体内の鉄筋の平均応力と平均ひずみの関係

2.3 計測概要

載荷試験時における計測項目は、荷重、供試体の伸び、鉄筋のひずみ、材料表面のひずみとした。各計測位置を図－1に示す。供試体の伸びは、供試体の端部の表面にコマを貼り付け、そのコマに外部架台からダイヤルゲージ型変位計をセットし、コマ間の相対変位を測定することで求めた。鉄筋のひずみは、供試体の中心位置から100mm間隔で、鉄筋のふしのない2面にワイヤーストレインゲージを貼付して計測した。

3. 試験結果

3.1 材料特性

供試体Nのコンクリート配合表を表－2に、各材料の特性を表－3に示す。また、使用したねじふし鉄筋の特性を表－4に示す。鉄筋径については、鉄筋の水中質量から求めた体積を長さで除して求めた面積から算出した。鉄筋の特性の各値は3本の試験片の平均値で示している。なお、これ以降の鉄筋の応力や荷重は、表－4の断面積を用いて算出した。

鉄筋単体の応力－ひずみ関係を図－3に示す。図－3は、3本の試験片の引張試験結果を示している。

各供試体の材料の割裂引張強度を表－5に示す。引張

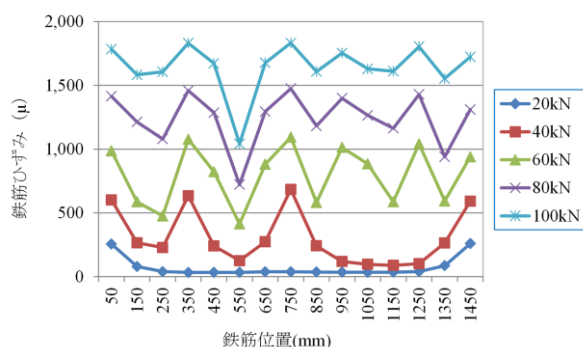
強度は各供試体と同時に作製した円柱テストピースの引張強度試験(JIS A 1113に準ずる)による割裂引張強度である。

3.2 荷重と平均ひずみの関係

各供試体の荷重と平均ひずみの関係について、図－4に示す。縦軸の荷重は、試験時の計測値である。横軸の平均ひずみは、鉄筋に貼付したゲージにより計測した全ひずみの平均(以降、同様。)とした。なお、横軸は20,000μまでで表示した。また、鉄筋単体のデータを点線で示した。この値は、図－3に示す3本の試験片うち、最も平均的な値を示した鉄筋の引張試験結果である。

供試体Nは、鉄筋が弾性域にある範囲のみだけではなく、降伏後に至っても鉄筋単体の引張剛性よりも高くなっている。また、鉄筋単体のひずみ硬化開始ひずみよりも早い段階で降伏後ただちにひずみ硬化開始している状態となっている。これらは、既往の研究結果³⁾と同様な結果であることから、実験方法も妥当であるといえる。

供試体Pは、鉄筋単体よりも5%程度引張剛性は高いが、他の供試体に比べて剛性は低い結果となった。これは、後述するが、供試体Pは荷重の小さい段階から多数のひび割れが発生し、テンションスティフニング効果が小さかったものと思われる。



図－6 供試体 P の鉄筋ひずみ

供試体 H05 および供試体 H10 は、ひび割れが入った段階で荷重の低下がみられるものの、供試体全体の引張剛性は、供試体 H05 は供試体 N と同程度で、供試体 H10 は供試体 N よりも高かった。

供試体 H25 は、140kN に至るまで荷重の低下は見られなかった。これは、供試体 H25 の材料自体の引張強度および鉄筋との付着力が大きかったためであると考えられる。後述するが、ひび割れ発生状況の目視確認でも、最大荷重に至るまで供試体の表面に顕著なひび割れは発生していなかった。

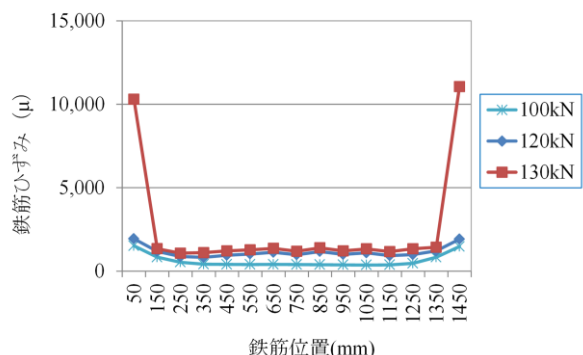
3.3 供試体内の鉄筋の平均応力と平均ひずみの関係

供試体内の鉄筋のみが負担している応力を求め、各供試体内の鉄筋の応力と平均ひずみの関係について求めた。各供試体内の鉄筋の応力とひずみの関係について図－5 に示す。また、鉄筋単体のデータを 3.2 と同様に点線で示した。供試体内の鉄筋の平均応力および平均ひずみは、以下のように求めた。

はじめに、各供試体の鉄筋の平均ひずみを求める。次に、図－3 の鉄筋単体の応力－ひずみ関係において、各鉄筋位置に生じたひずみと同じひずみのときの応力を求める（具体的には、3 本の試験片それぞれのデータにおいて、測定したひずみに近い 2 点の応力を求め、それらの平均値を求めた）。このようにして、横軸の鉄筋の平均ひずみに対する平均応力を求めてプロットした。

供試体 N は、鉄筋単体よりも早い段階で降伏し、その後、すぐにひずみ硬化開始していることがわかる。そして、15,000μ 程度で鉄筋単体の応力を超えた。

供試体 P は、鉄筋単体とほぼ同じ挙動を示した。ここで、供試体 P の各荷重段階における鉄筋のひずみの発生状況について、図－6 に示す。縦軸は鉄筋のひずみで、横軸は供試体端部からのひずみ計測位置である。40kN 程度の荷重でひずみが出始め、100kN ではほぼすべての位置で同じくらいのひずみが出ており、降伏ひずみに近

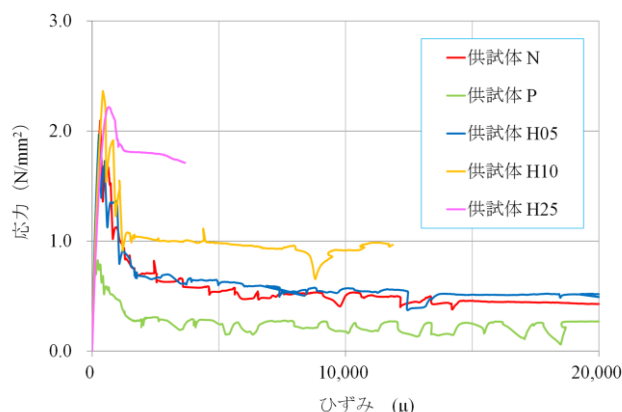


図－7 供試体 H25 の鉄筋ひずみ

い値を示している。供試体 P は、材料の引張強度が小さく（後述）、荷重の小さい段階から供試体にひび割れが発生し、ひび割れの数も多く発生したことがわかる。これにより、テンションスティフニング効果が小さくなったと考えられる。

供試体 H05 は、供試体 N とほぼ同じ挙動を示した。これは補修した豆板の鉄筋との付着状態がコンクリートと近い状態であったことが推定される。つまり、健全供試体に対して 5%程度の空隙を有する場合でも豆板内部の鉄筋付近状態は健全なコンクリートと同じような状態であったと考えられる。また、供試体 H10 も供試体 N とほぼ同じ挙動を示した。

供試体 H25 は、供試体内の鉄筋の降伏は他の供試体に比べ、より早い段階で起きている。しかし、図－4 に示した供試体全体の引張剛性はかなり大きいものであった。ここで、供試体 H25 の鉄筋降伏前後の鉄筋のひずみの発生状況について、図－7 に示す。縦軸は鉄筋のひずみで、横軸は供試体の端部からの計測距離である。降伏前の 100kN から 140kN までの各荷重段階でのひずみ値を示した。図より、120kN まではいずれの鉄筋位置でも降伏ひずみには至っておらず、130kN ではじめて降伏していることがわかる。これは、文献 3) に示される、鉄筋がひび割れ発生直後に鉄筋が降伏したものと同様な傾向であり、供試体端部から突出した鉄筋の伸びにより、供試体端部の鉄筋の付着が切れ、ひび割れ部の鉄筋と同じ挙動を示していると考えられる。このため、図－5 の供試体 H25 の応力ひずみ関係は、他の供試体に比べ、より早い段階で降伏している結果となっている。また、図－4 の結果より、供試体は非常に高い引張剛性を有していることから、材料の引張強度負担割合が大きいと考えられ、材料の強度だけでなく、補修材料と鉄筋との付着力も非常に大きく、供試体全体の剛性が大きくなったと考えられる。



図－8 各供試体の材料の平均応力と平均ひずみの関係

3.4 コンクリートまたは補修材の平均応力と平均ひずみの関係

ここでは、鉄筋以外の材料（コンクリートまたは補修材）が負担している応力を算出する。はじめに、図－5に示した各供試体内の鉄筋の応力に鉄筋の断面積を掛けて鉄筋の負担している荷重を算出する。次に、図－4に示した供試体全体の荷重から先に算出した鉄筋の負担している荷重を差し引く。差し引いた荷重を供試体の断面積で除して、材料の負担している応力を算出する。このようにして求めた各材料の平均応力と平均ひずみの関係を図－8に示す。

いずれの供試体も供試体 N と同様、鉄筋降伏後もテンションスティフニング効果が確認できた。供試体 N は平均ひずみが 20,000μ 近くで、コンクリートの割裂引張強度の 13%程度 (0.4N/mm²) の効果が存在しているが、供試体 P は、PCM の割裂引張強度の 10%程度 (0.3N/mm²) であった。補修した豆板供試体は、供試体 H05 は健全と同程度 (0.5N/mm²) であるが、供試体 H10 は材料の割裂引張強度の 30%程度 (1.0N/mm²)、供試体 H25 は材料の割裂引張強度の 40% (1.7N/mm²) を負担していることがわかる。

ここで、図－8 は、全供試体の比較を行うために 1 つの図にまとめたが、各供試体のピーク応力等がわかりにくくなっている。そこで、各供試体の引張軟化曲線の各パラメータを求めた。引張軟化曲線の算出式⁷⁹⁾を式(1)に示す。

$$\sigma_t = f_t \cdot (\varepsilon_{tu} / \varepsilon_t)^c \quad (1)$$

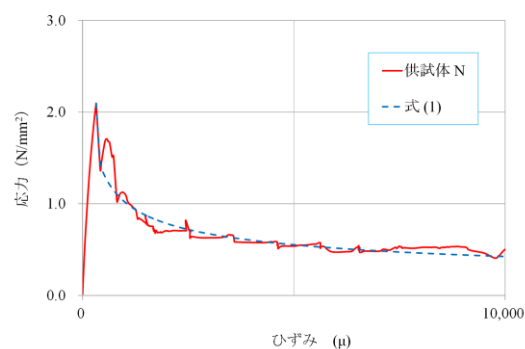
σ_t : 引張応力 (N/mm²)

f_t : 引張強度 (N/mm²)

ε_{tu} : 引張終局ひずみ

ε_t : 引張ひずみ

c : 付着係数



図－9 健全供試体の引張軟化曲線

表－6 引張軟化曲線の各パラメータ

供試体	f_t	ε_{tu}	c
健全(N)	2.10	150	0.38
PCM(P)	0.83	200	0.41
補修した豆板 5%(H05)	1.97	200	0.39
補修した豆板 10%(H10)	2.36	350	0.38
補修した豆板 25%(H25)	2.22	900	0.22

実験結果に近似するように、式(1)のパラメータを変えて各供試体の引張軟化曲線を求めた。 f_t は、図－8の各供試体の最大応力値であり、一軸引張試験による材料の直接引張強度を示している。いずれの供試体も、表－5の割裂引張強度の値より小さい値を示した。一例として、供試体 N の結果を図－9に示す。他の供試体についても、同様に引張軟化曲線を求めた。

各供試体の引張軟化曲線のパラメータを表－6に示す。付着係数 c の値を比較すると、供試体 N の 0.38 に対して、供試体 P は 0.41、供試体 H05 は 0.39、供試体 H10 は 0.38 で供試体 N と同程度となった。供試体 H25 は 0.22 で供試体 N の半分程度の値を示した。供試体 P は f_t が供試体 N の半分以下で、 c は供試体 N と同程度であった。つまり、引張強度は極端に小さいが、ひび割れ発生後の付着は供試体 N と同程度であったことがわかる。これに対し、供試体 H05 は f_t および付着とも供試体 N と同程度で、供試体 H10 は f_t が高く、 ε_{tu} も若干大きく、付着は供試体 N と同程度であった。供試体 H25 は、 f_t は供試体 N より若干大きい、他の供試体に比べて ε_{tu} が大きく、また、付着の効果が非常に大きいことがわかった。

3.5 ひび割れ発生状況

各供試体の試験後のひび割れ発生状況について、図－10に示す。図の上段に示した数値は、供試体の端部からの距離を示している。試験装置にセットした状態では、図の左側が試験装置の上側、図の右側が試験装置の下側である。

図-10 (a)の供試体 N は、100～300mm の間隔で 8 本ひび割れが入った。荷重が大きくなると、鉄筋に沿った縦ひび割れが入った。図-10 (b)の供試体 P は、荷重の小さい段階からひび割れが発生し、供試体 N よりも細かい 50～250mm 間隔で発生した。図-10 (c)の供試体 H05 は、供試体 N、供試体 P とは異なり、300mm 間隔で 4 本ひび割れが発生した。樹脂の内部に薄い筋状の確認できたひび割れを点線で示している。図-10 (d)の供試体 H10 は、供試体 H05 よりもさらに本数が少なく、ひび割れは 3 本程度だった。図-10 (e)の供試体 H25 は、最大荷重まで顕著なひび割れは発生せず、樹脂の内部に薄い筋状の確認できたひび割れが 2 本程度であった。

これらのひび割れ発生状況の違いがテンションステイフニング効果の違いにも表れていたと考えられる。

4. まとめ

- (1) 今回の試験結果では、PCM 供試体は、ひび割れ発生荷重も小さく、引張強度は健全供試体の半分以下だった。ひび割れ発生後の付着は健全と同程度であったが、テンションステイフニング効果は健全供試体よりも小さかった。
- (2) 補修した豆板供試体は、豆板のコンクリート未充填率が小さい供試体は健全供試体に近いひび割れ発生挙動やテンションステイフニング効果を示した。豆板のコンクリート未充填率が大きく、樹脂注入量の多い補修した豆板供試体は、補修材料自体の強度も高く、また、補修材と鉄筋との付着力も向上し、非常に高いテンションステイフニング効果を有した。よって、内部の鉄筋は両端部以外降伏までに至らなかった。

今回、供試体の伸びを計測したが、ひび割れが発生しにくい供試体は、供試体の伸びから算出する平均ひずみと鉄筋の平均ひずみとの値にかい離が生じた。コンクリートや PCM のように、ひび割れが多く発生する材料では、ひび割れ部と端部の鉄筋のひずみに大きな差は生じないが、ひび割れが発生しにくい補修した豆板供試体では、鉄筋のひずみに大きな差が生じた。これは、鉄筋が材料で覆われている供試体中央部付近と、鉄筋が解放されている端部位置での材料による拘束の違い（供試体から突出している部分の鉄筋の伸びによる材料端部との付着切れ）による影響が出ているものと考えられる。今後は、これらの結果を踏まえ、提案補修工法によって補修した部材の破壊性状等の解析に反映させていくことが課題であると考えられる。

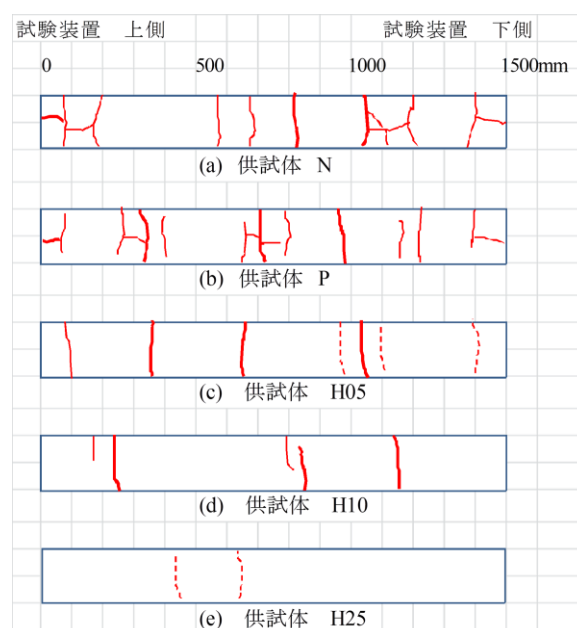


図-10 ひび割れ発生状況（試験終了後）

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) 尾坂芳夫，鈴木基行，石田博樹，宮本幹：RC部材の付着破壊とエポキシ樹脂注入による補修効果に関する研究，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.121-129，1986年8月
- 3) 玉井真一，島弘，出雲淳一，岡村甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力ー平均ひずみ関係，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.239-247，1987.2
- 4) 玉井真一，島弘：正負交番載荷時のテンションステイフニング効果，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，pp.85-90，1987
- 5) 後藤幸正，大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第294号，pp.85-100，1980.2
- 6) 島弘，周礼良岡村甫：異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.213-220，1987.2
- 7) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析，土木学会論文報告集，第360号/V-3，pp.1-10，1985.8
岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，pp.36-37，1991