

論文 エポキシ樹脂とセメント系補修材によるひび割れ注入補修が鉄筋のひずみ分布に与える影響について

山本 健太*1・張 大偉*2・古内 仁*3・渡辺 忠朋*4

要旨：鉄筋コンクリート部材について両引き引張試験を行い、発生したひび割れに対してエポキシ樹脂とセメント系補修材によるひび割れ注入補修を行った。その結果、2種類の補修材による最大荷重時のひずみに対する影響に大きな差は得られなかった。また、エポキシ樹脂による補修において、補修時のひび割れ部のひずみが大きくなるにつれ補修後の除荷時のひび割れ部の残留ひずみも大きくなることが分かった。セメント系補修材の供試体においても、同様の傾向を示した。

キーワード：ひび割れ補修，注入工法，エポキシ樹脂，セメント系補修材，残留ひずみ

1. はじめに

コンクリート構造物中に生じたひび割れは、部材の剛性低下をまねくだけでなく、炭酸ガス、塩化物イオンあるいは水等の浸透を促し鉄筋腐食の原因の1つとなっている。こうしたひび割れに対する補修工法の1つにひび割れ注入工法がある。一般に、ひび割れ注入は環境因子の侵入を防ぐことを目的に実施されているため、ひび割れ注入補修された部材に対して力学的な観点から行われた研究は少ない^{1) 2)}。

本研究では、荷重作用で生じたひび割れを対象として、エポキシ樹脂とセメント系補修材の注入が鉄筋の付着性状に与える影響について調査することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験は両引きの1軸引張試験により行い、発生したひび割れについて、2種類の樹脂を注入し、鉄筋の付着性状を調査する。供試体は、図-1に示すように全長600mmのコンクリート角柱中央部に長さ800mmのD25鉄筋を

埋め込んだものである。載荷試験装置には、アクチュエーターを用いた。

コンクリートには、早強ポルトランドセメント、天然の粗骨材および細骨材を使用した。試験は材齢14日以上で行い、実測したコンクリートの圧縮強度は 28.8N/mm^2 である。コンクリートの配合は、表-1に示すとおりである。鉄筋にはSD345D25を使用した。実測の降伏強度は 386N/mm^2 ，降伏ひずみは 2081μ である。

使用したエポキシ樹脂の公称の材料特性は、比重が1.11，粘度が $12500\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，圧縮降伏強さが 69.2N/mm^2 ，圧縮弾性率が 2260N/mm^2 ，引張せん断接着強さが 23.4N/mm^2 である。セメント系補修材の公称の材料特性は接着強さが 5.1N/mm^2 ，圧縮強さが 37.9N/mm^2 である。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法	単位量 (kg/m^3)				
	W	C	S	G	A
20mm	173	326.4	814.4	991.8	0.138

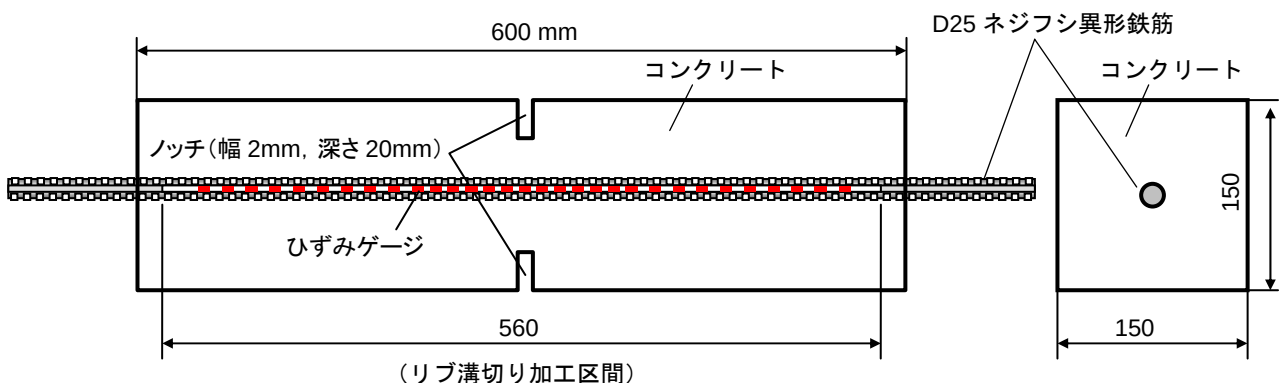


図-1 実験供試体

*1 北海道大学 大学院工学院北方圏環境政策工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究院 学術研究員 Ph.D. (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究院 助教 博(工) (正会員)

*4 北武コンサルタント(株) 副社長 博(工) (正会員)

表一2 実験変数

供試体番号	補修材の種類	補修タイミング
E-03	エポキシ樹脂	ひび割れ幅が約 0.3mm
E-04	エポキシ樹脂	ひび割れ幅が約 0.4mm
E-06	エポキシ樹脂	ひび割れ部のひずみが約 3000 μ
C-03	セメント系補修材	ひび割れ幅が約 0.3mm
C-04	セメント系補修材	ひび割れ幅が約 0.4mm

鉄筋にワイヤーストレインゲージを設置するために、試験区間においてリブに深さ 2mm の溝切り加工を行った。溝切り加工区間の断面積は、推定で 474.6mm² となり、加工前に比べて 3.3%減少することとなった。ワイヤーストレインゲージを加工された溝内に片面 15 枚(中央部では 20mm 間隔、両端部では 50mm 間隔、両面で 30 枚)設置した。また、コンクリート供試体の中央部にノッチを設け、載荷時にそのノッチからひび割れが発生するよう制御した。

さらに、供試体の 2 面に 2 軸亀裂変位計を設置し、ひび割れ幅を計測した (写真一1 参照)。

2.2 実験変数

実験変数は表一2 に示すように、ひび割れ補修材の種類と、ひび割れ補修を行う際のひび割れ幅とした。

(1) ひび割れ補修材

使用するひび割れ補修材はエポキシ樹脂とセメント系補修材の 2 種類とした。供試体 E シリーズはひび割れ補修材としてエポキシ樹脂を、C シリーズはひび割れ補修材としてセメント系補修材を使用した。

(2) 補修のタイミング

供試体 E-03, E-04, E-06, C-03, C-04 については、ひび割れ補修前にひび割れ部の鉄筋のひずみがおおよそ 3000 μ になるまで載荷した後除荷した。その後、再度引張力を与え、E-03 および C-03 はひび割れ幅が約 0.3mm において、E-04 と C-04 はひび割れ幅が約 0.4mm において、E-06 は初回載荷時と同一のひずみが 3000 μ となる状態においてひび割れ注入補修を行った。

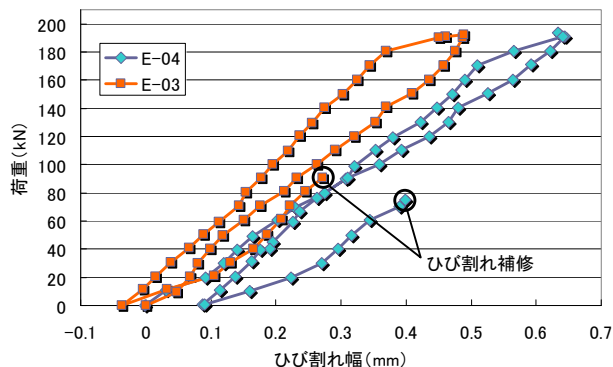
図一2 と図一3 は、それぞれ E シリーズ (E-03 と E-04) と C シリーズ (C-03, C-04) の補修前のひび割れ幅と荷重関係を示したグラフである。図が示すように一度約 190kN (ひずみの値が約 3000 μ) まで載荷された後除荷され、再びひび割れ幅が所定の値になるまで載荷し、そこでひび割れ補修を行っている。

2.3 ひび割れ注入方法

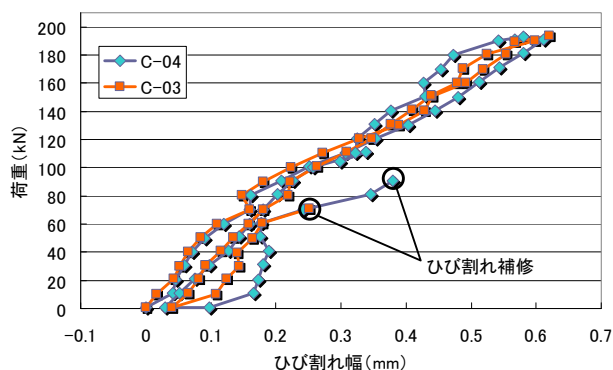
ひび割れ補修はいずれの材料も、発生したひび割れ全長に対してポリエステル系接着剤でシールを行い、専用



写真一1 一軸引張り試験の様子



図一2 荷重-ひび割れ幅関係 (E シリーズ)



図一3 荷重-ひび割れ幅関係 (C シリーズ)



写真-2 エポキシ樹脂の注入



写真-3 セメント系補修材の注入

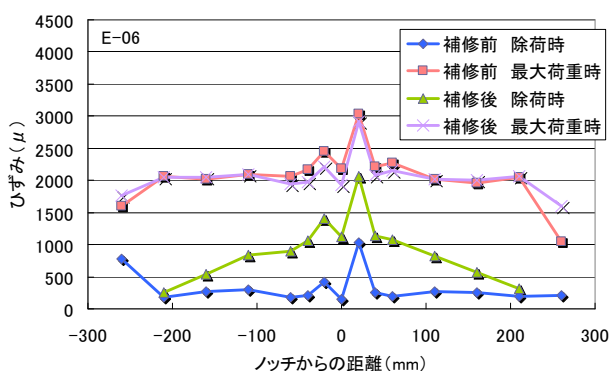


図-4 鉄筋のひずみ分布 (E-06)

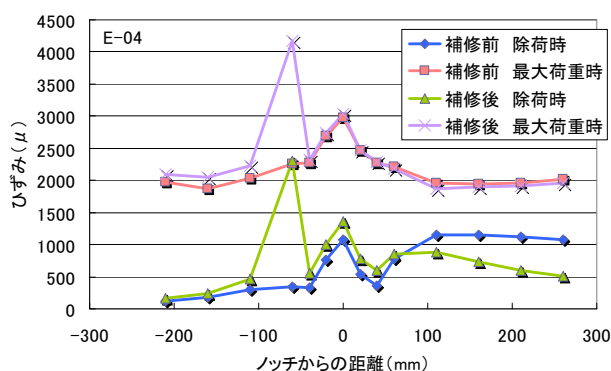


図-5 鉄筋のひずみ分布 (E-04)

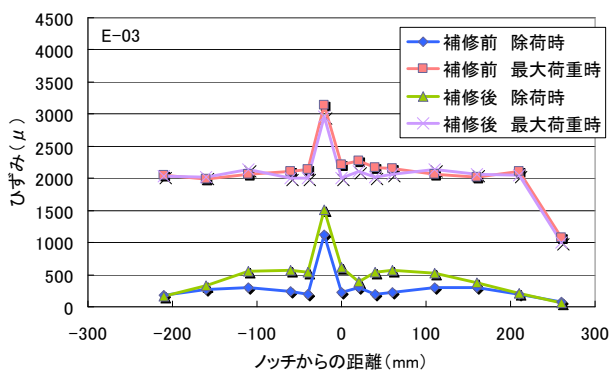


図-6 鉄筋のひずみ分布 (E-03)

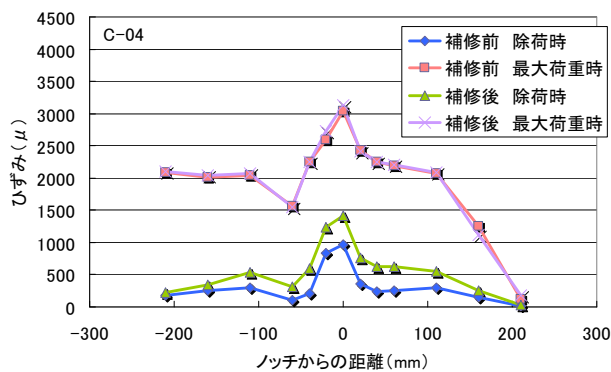


図-7 鉄筋のひずみ分布 (C-04)

インジェクターを用いて注入を行った。供試体は補修材の強度が保たれるまで養生され、エポキシ樹脂を使用した供試体は 24 時間、セメント系補修材を使用した供試体は 48 時間の養生後、再び載荷を行った。

写真-2 および写真-3 は、エポキシ樹脂とセメント系補修材の注入の様子を示している。

3. 実験結果

3.1 補修後のひび割れの発生状況

供試体 E-04 は補修後の載荷において最大荷重付近で補修部とは別の箇所でも新しいひび割れが一つ発生した

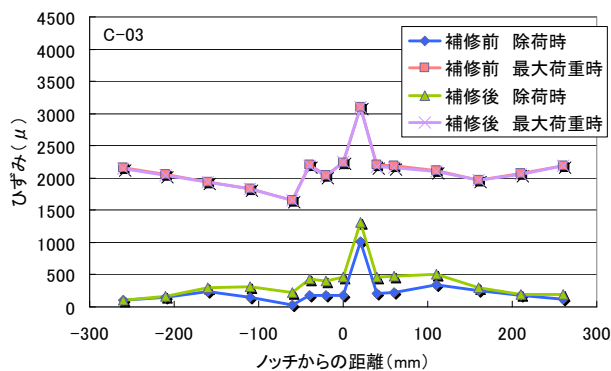


図-8 鉄筋のひずみ分布 (C-03)

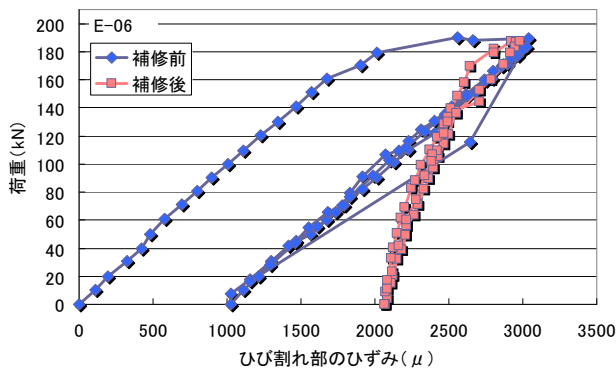


図-9 ひび割れ部での荷重—ひずみ関係 (E-06)

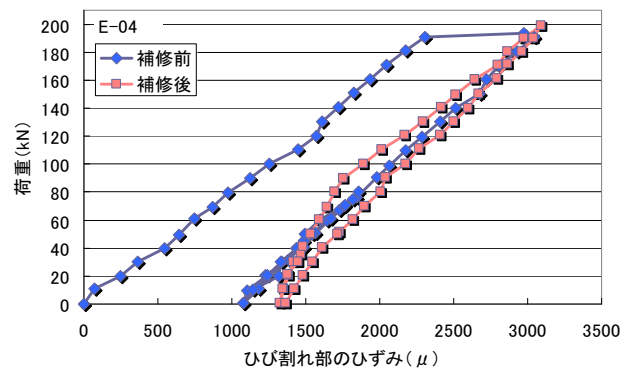


図-10 ひび割れ部での荷重—ひずみ関係 (E-04)

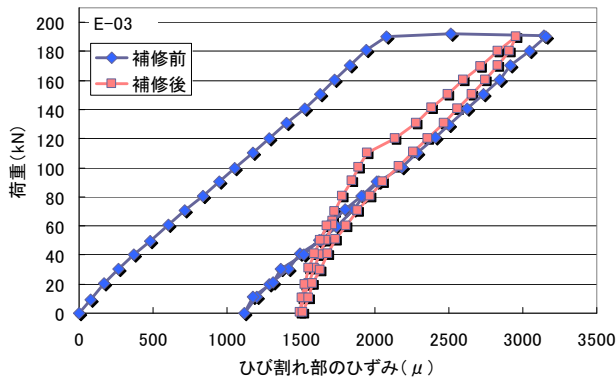


図-11 ひび割れ部での荷重—ひずみ関係 (E-03)

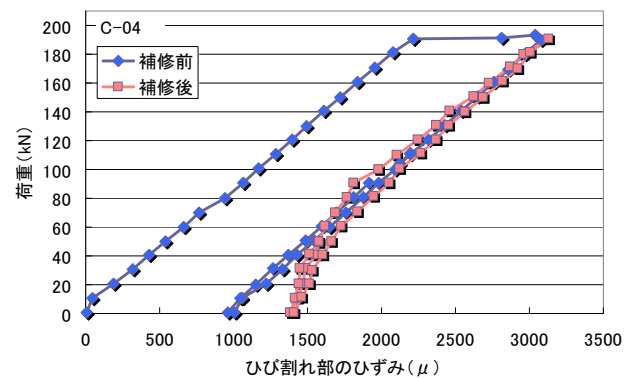


図-12 ひび割れ部での荷重—ひずみ関係 (C-04)

が、ひび割れ補修部が再び開口することはなかった。その他の供試体については、補修後の載荷による新しいひび割れは発生することなく、ひび割れ補修部が再び開口した。

一方、セメント系補修材を使用した供試体では、すべての供試体でひび割れ補修部が再び開口することが目視により確認された。なお、このときのひび割れ幅は、内部に補修材が充填されていることから、環境因子の侵入に対しては問題がない程度の大きさであると推察される。

3.2 ひび割れ補修後の載荷による鉄筋のひずみ分布

図-4 から図-8 に各供試体の最大荷重時と除荷時の鉄筋のひずみ分布を示す。表示した分布は補修前の最大荷重時と除荷時、補修後の最大荷重時と除荷時のものである。

(1) 最大荷重時のひずみ

どの供試体も補修前と補修後で比較すると、最大荷重時の全体的なひずみ分布の値はほぼ変わらなかった。ただし、ひび割れ部付近に注目すると、E-04を除いて補修後の最大荷重時のひずみが補修前のひずみをわずかに下回っている。これはE-04のみが、ひび割れ部付近で新しいひび割れが発生したためであると考えられる。

図-9から図-13はひび割れ部での荷重—ひずみ関係

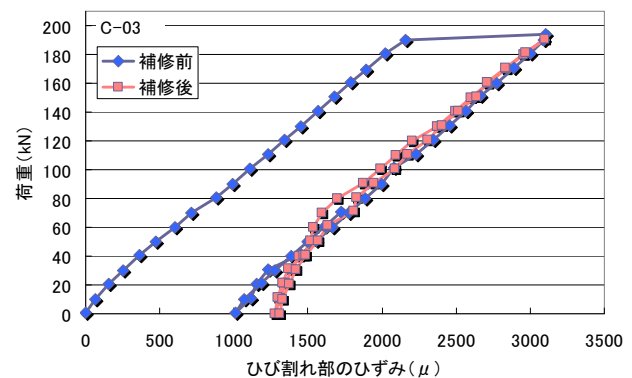


図-13 ひび割れ部での荷重—ひずみ関係 (C-03)

を示したものである。これらのグラフからわかるように、荷重が小さい時は補修前と補修後のひび割れ部でのひずみに差があるものの、荷重が大きくなるにつれ差は小さくなっていき、最大荷重において補修前と補修後でひずみの差がほぼ無くなることわかる。

また、E シリーズ、C シリーズともに同じような挙動を示しており、最大荷重において補修前と補修後でひずみの差がほぼ無くなっている。このことから、2 種類の補修材による最大荷重時のひずみに対する影響に大きな差は得られなかったと言える。

(2) 除荷時の残留ひずみ

エポキシ樹脂の供試体において、供試体 E-06 は補修後

の除荷時のひび割れ部鉄筋の残留ひずみは補修前のひずみと比べおよそ 1000μ 増加した。同様に、供試体 E-04 は 300μ 、供試体 E-03 は 370μ の増加である。E-06 はおよそ 3000μ 、E-04 はおよそ 1800μ 、E-03 はおよそ 2000μ の時点で補修されている。このことからエポキシ樹脂による補修において、補修時のひび割れ部のひずみが大きくなるにつれ補修後の除荷時のひび割れ部の残留ひずみも大きくなることが分かる。

セメント系補修材の供試体においても、補修後の残留ひずみは、供試体 C-04 では 380μ 、供試体 C-03 では 270μ の増加が見られた。ひび割れ補修時のひずみはそれぞれおよそ 1900μ と 1700μ であることから、エポキシ樹脂供試体と同様の傾向であると言える。(図-14 参照)

2 種類のひび割れ補修材を使ったすべての供試体において補修後の除荷時には、ひび割れ部の残留ひずみが大きくなった。これは、樹脂の注入を荷重をかけた状態で行っているため、除荷時には硬化した樹脂が抵抗してひび割れが閉じなくなるためである。

補修時のひび割れ部のひずみの値に近い E-04 と C-03、E-03 と C-02 において補修後の除荷時のひび割れ部の残留ひずみを比較すると、およそ同じ値を取っている。

2 種類の樹脂による補修後の除荷時のひび割れ部の残留ひずみに対する影響に大きな差は見られなかったことが分かる。

以上の実験結果から、2 種類の補修材料において補修部でのひび割れ再開の有無に違いがみられたが、最大荷重時および除荷時の鉄筋のひずみに着目したときその挙動に大きな差がないことが示された。

4. まとめ

2 種類の補修材を用いた注入工法により補修したひび割れについて、1 軸引張試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) ひび割れ補修後、エポキシ樹脂を使用した供試体は 1 体もひび割れ補修部が再び開口することがなかったのに対し、セメント系補修材を使用した場合にはすべての供試体がひび割れ補修部で再び開口することになった。
- (2) エポキシ樹脂を使用した供試体とセメント系補修材を使用した供試体は、ともに最大荷重において補修前と補修後でひずみの差がほぼ無くなってい

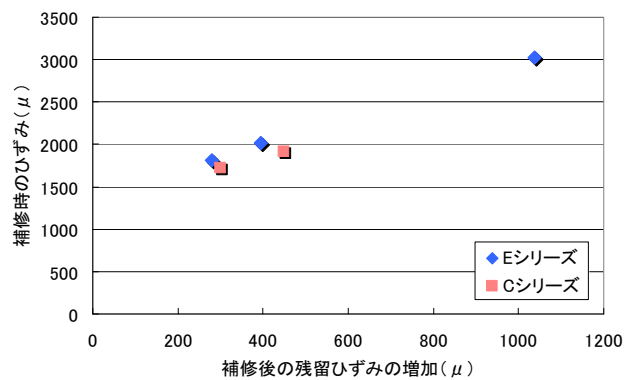


図-14 残留ひずみと補修時のひずみの関係

る。このことから、2 種類の補修材による最大荷重時のひずみに対する影響に大きな差は得られなかった。

- (3) エポキシ樹脂を使用した供試体とセメント系補修材を使用した供試体は、ともに補修時のひび割れ部のひずみが大きくなるにつれ補修後の除荷時のひび割れ部の残留ひずみも大きくなることが分かった。
- (4) 上記結果から、エポキシ樹脂とセメント系補修材において補修部でのひび割れ再開の有無に違いがみられたが、最大荷重時および除荷時の鉄筋のひずみに着目したときその挙動に大きな差がないことが示された。

謝辞

本研究において、供試体のひび割れ注入補修を行うにあたり、ショーボンド建設(株)の船谷智浩氏のご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国枝 稔 ほか：破壊制御設計に基づいたひび割れ注入補修に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.697/No.54，pp.169-177，2002.2
- 2) 星野富夫，魚本健人：ひび割れに樹脂注入したコンクリート梁の強度性状と耐久性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp. 451-456，2001

