

# 論文 鉄筋が腐食した RC 梁の無機系被覆工法による補修効果

平野 勝識<sup>\*1</sup>・田辺 将樹<sup>\*2</sup>・新井 泰<sup>\*2</sup>・渡辺 忠朋<sup>\*3</sup>

**要旨**：地下構造物は長期間の供用による地下水の浸透により，鉄筋腐食などの変状が顕在化している。しかし，施工上の制約を考慮した補強対策工の設計手法について十分な検討がなされていない現状がある。本研究では，鉄筋が腐食した RC 梁に対し，従来適用されてきた断面修復補修に加え，本来コンクリート片の剥落防止を目的として適用されてきた無機系の表面被覆工法を適用し，曲げ変形特性に与える影響を検討したものである。その結果，かぶりコンクリートに発生した腐食ひび割れ箇所表面に被覆補修を行うことで，ひび割れ幅の拡大を抑制し，靱性に富む変形特性に改善できることがわかった。

**キーワード**：地下構造物，腐食鉄筋，付着，無機系被覆補修，曲げ特性

## 1. はじめに

長期間供用された地下の鉄筋コンクリート構造物は，ひび割れに浸透した地下水により，鉄筋が腐食し，腐食膨張によるひび割れ発生，かぶりコンクリートの剥落などで顕在化することが多く見られる。しかし，それらに対する合理的な管理手法については未だ確立されていない。これまで，腐食鉄筋の基礎的な力学性状について様々な研究<sup>3)</sup>がなされてきた。また，筆者らも腐食鉄筋とコンクリートの付着特性に着目した基礎実験<sup>1)</sup>とシミュレーション<sup>2)</sup>を実施してきた。

鉄筋コンクリート構造物に対するメンテナンスの実務において，劣化箇所に対してはかぶりコンクリートの浮いた箇所はたたき落とし，鉄筋腐食によるひび割れ箇所は鉄筋をはつり出して錆を除去し，防錆塗料を塗布し断面修復することが一般的な対策工法として実施されている。しかし，しかし，鉄道トンネルの場合，終電から始発までの限られた作業時間で，多量の粉塵が発生するはつり作業は効率が低い上に，はつりにより健全な部位にマイクロクラックを発生させる懸念があり，施工性と経済性を両立した補修技術が求められている。

本研究は，鉄筋腐食による劣化部位を対象に，

従来から剥落防止用途に用いられている無機系の表面被覆工法により，鉄筋腐食によるコンクリートひび割れ部に表面補修を行った鉄筋コンクリート部材の力学的特性について検討を行ったものである。なお，対策工の合理化を念頭においているため，表面被覆の前にひび割れ注入等は行なっていない。また，残置した腐食鉄筋の耐久性の検討は本論文の対象としていない。

表-1 実験ケース

実験ケース	鉄筋の状態	鉄筋断面減少量 (%)	はつり + 断面修復	表面被覆
1	健全	----	無	無
2		----		
3	腐食	2.0	有	有
4		11.6		

## 2. 実験概要

### 2.1 実験ケース

実験ケース一覧を表-1に示す。実験パラメータは，鉄筋の腐食の有無，断面修復の有無，表面被覆補修の有無としている。作業時間の限られた実務で現状を考慮して，緊急に部分的に断面修復を行ったという想定のもとで，鉄筋が腐食したケース3，4は，試験体両端の主筋定

\*1 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 工修 (正会員)

\*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル研究室 工修 (正会員)

\*3 北武コンサルタント(株) 専務取締役 工博 (正会員)

着部の腐食は未補修とすることを共通仕様とした。また、主筋腐食による付着力低下の比較のため、無腐食+断面補修のケース2を実施した。

## 2.2 試験体の概要

試験体の概要を図-1に示す。開削トンネルの一般的なRC構造を想定し、実大のスラブ相当として断面形状、配筋を決定した。また、主筋の付着性状に着目するため、通電時に主筋に腐食が一樣に発生するように、帯鉄筋等の補強筋は配筋していない。主筋はD16@125とし、通電腐食させる下側主筋は純かぶり50mmとした。試験体の外形はw250×H500×L4000mmとしたが、これは揚重機的能力、電食水槽サイズの制約から決定したものである。下側主筋の片側のみ、ひずみゲージ貼付のため、鉄筋の縦リブ部にw5×d4mmの溝を切削した。これによる主筋断面減少は重量実測値で、切削前198.6mm<sup>2</sup>(D16公称)に対して152.9mm<sup>2</sup>(-23%)であった。ゲージ貼付鉄筋は、ゲージが主筋の上下となるよう型枠内にセットした。以上は、すべての実験ケースで共通の仕様である。

## 2.3 補修方法

ケース2、3の断面修復部は梁中央部をスパン1/2区間(全長1750mm)にわたって、ケース4は断面修復の区間の影響を確認するため梁中央の2,500mmの区間を電動コンクリートハンマーにより深さ80mmまではつり、鉄筋を露出させた。鉄筋表面の錆をワイヤブラシで除去後、エポキシ系の防錆塗料を塗布した。はつり面、鉄筋に対してプライマーを塗布した後、ポリマーセメント系の断面修復材によって、2~3層に分けて埋め戻しを行った。埋め戻しはスラブ下面への実施工を想定して、試験体下方から上向き施工を行った(写真-1)。

ケース4は、鉄筋の腐食減少率が比較的大きかったため、補強筋としてD6を腐食した主筋に添えて断面修復部にのみ埋設した。主筋D16(公称198.6mm<sup>2</sup>)の腐食減少断面積は23mm<sup>2</sup>/本であり、D6(公称31.67mm<sup>2</sup>)により8mm<sup>2</sup>×2本の主筋断面増となっている。

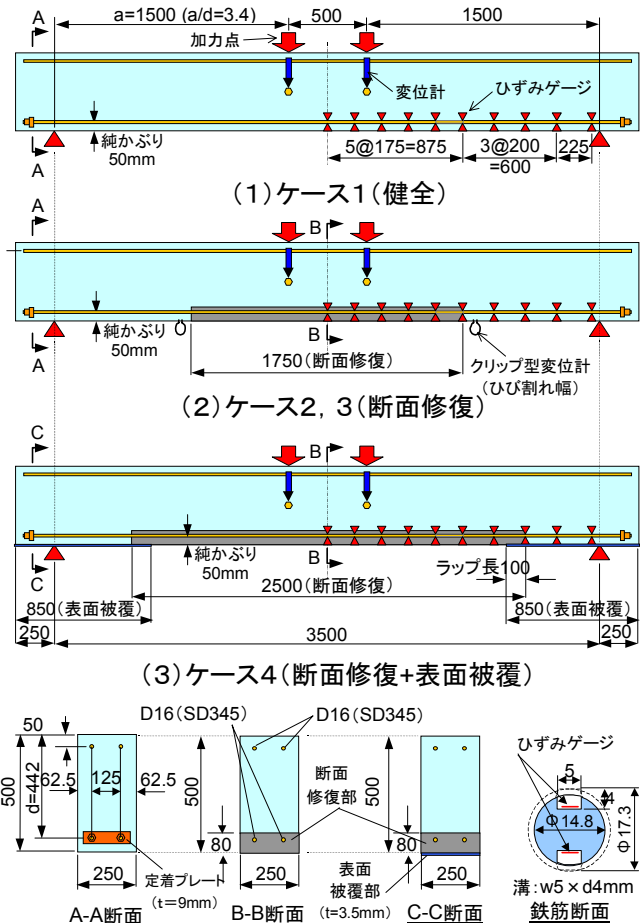


図-1 試験体、载荷・計測の概要

ケース4の表面被覆補修は、剥落防止工法として施工実績のある工法<sup>4)</sup>であり、試験体の断面修復部両サイドの梁底面に施工を行った。被覆部は断面修復部に100mmラップさせている。施工手順は、まずコンクリート表面をサンダーで目荒らしし、プライマーを塗布する。その後、ポリマーセメントモルタルをコテ塗りし、メッシュ材料をローラーで繊維を押し込むようになじませた後に、再度ポリマーセメントモルタルをコテ塗りし総厚で3.5mmとなるように仕上げた。なお、表面被覆は時間の関係で、梁底面が上向きになるようにして施工した(写真-2)。繊維はアラミドとビニロンで構成されるが、ひび割れの開口抑止を目的としたため、強度の高いアラミドを軸方向直角となるよう配置した。

## 2.4 材料諸元

試験体の材料諸元を表-2に示す。

コンクリートは、実験材齢時の強度が30

N/mm<sup>2</sup>程度となるように呼び強度 18N の早強コンクリート、粗骨材寸法を 20mm 以下とし、梁上面から打設した。コンクリート打設後 10 日で脱型し、ケース 3, 4 は腐食促進の通电のため、平均水温 28℃の塩水に 2 週間程度浸漬した。そのため、ケース 1 の健全試験体とは養生過程が異なっているが、試験体間の強度差は 1 割以内であった。鉄筋は主筋 D16 (SD345) ×2×上下のみとし、ケース 4 のみに埋設した D6 は主筋と同じ高さ位置に設置した。

断面修復材はプレミックスのポリマーセメントモルタルで、施工時の厚付が可能のように微細なポリプロピレンの繊維が混入されている。

表面被覆工法は、厚さ 3mm のポリマーセメントモルタル、ビニロンとアラミドの格子にポリプロピレン系の不織布が編み込まれたメッシュ材料で構成されている。なお、補修材の表中で示す付着強度は、コンクリートはつり面に施工した補修材に直接引張試験を行い、補修材が母材破壊したときの値である。

## 2.5 通电による鉄筋の腐食促進

図-2 に電気腐食の概要を示す。健全な鉄筋を埋設した試験体を塩化ナトリウム溶液の電解液に浸漬し、陽極を鉄筋端部に接続し、電解液中に設置したステンレスメッシュを陰極として通电を行った。電流は 3.5A 一定とし、試験体表面に発生する鉄筋腐食の膨張圧によるひび割れが平均的に幅 0.3mm 程度となるまで、約 2 週間程度通电を行った。試験体の鉄筋露出部はシリコンコーキングで防水し、試験体両端の鉄筋定着部 L=250mm の区間はアルミ箔で覆い腐食を抑制した。写真-3 に通电終了後のひび割れ発生状況を示す。定期的に試験体を水揚げし、ひび割れ幅計測を計測監視しながら通电管理を行った。腐食ひび割れは、試験体の純かぶりは底面 50mm/側面 54.5mm と近似していたが、ほとんどは試験体底面に発生した。

## 2.6 荷重実験方法

加力はスパン 3500mm の単純梁中央部に油圧ジャッキで 2 点単調荷重を行った。弾性域はひ

び割れ発生に応じて約 0.5kN 間隔で荷重を行い、最大付近以降は急激に進展する破壊状況に応じて更に細かい間隔で行った。

表-2 材料諸元

### (1) コンクリート

実験ケース	養生条件	材齢	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(1/3) (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
ケース 1, 2	気中	50日 (試験時)	28.8	2.00	2.2
ケース 3, 4	10日気中 14日塩水 26日気中		31.3	2.30	2.9

### (2) 鉄筋

使用箇所	呼び径	鋼種	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> ) (降伏ひずみ×10 <sup>-6</sup> )	弾性係数 E(3/4σ時) (N/mm <sup>2</sup> )
主筋	D16	SD345	363 (2026)	1.92×10 <sup>5</sup>
主筋補修 (ケース4)	D6	SD295A	316 (1941)	1.87×10 <sup>5</sup>

### (3) 補修材 (ポリマーセメントモルタル)

実験ケース	養生条件	材齢	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )
断面修復材	気中	50日 (試験時)	26.3	5.4
表面被覆材			27.2	2.1

### (4) 補修材 (補強繊維)

方向	繊維名	引張強さ* (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数* (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (@50mm) (N)	格子間隔
梁軸方向	ビニロン	2250	0.60 × 10 <sup>5</sup>	785	10mm
奥行き方向	アラミド	3430	0.73 × 10 <sup>5</sup>	981	10mm

\*印は公称値



写真-1 断面修復の上向き施工状況



写真-2 表面被覆メッシュ施工状況 (手前：ケース4)

鉄筋のひずみは図-1に示したように、鉄筋縦リブに幅5mm×深さ4mmの溝を2条切削し、溝底面に175~200mm間隔でひずみゲージを10箇所、計20枚貼付し計測した。なお、当該ゲージはエポキシ樹脂のコーティングにより防水処理を行っている。以降の結果で示す荷重と変位は、左右のロードセル、変位計の平均値を用いている。

## 2.7 鉄筋の腐食減少率

鉄筋の腐食減少率を求めるために、載荷後試験体から鉄筋をはつり出した。腐食生成物除去後に、JCI規準集「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠し、腐食生成物の除去前後の質量変化を鉄筋の腐食減少率として算出した。写真-4に腐食した鉄筋を示す。その際、基準となる腐食前の鉄筋重量は、加力による鉄筋の伸びを考慮して、健全試験体の加力後の鉄筋を計測した。計測した腐食率を表-1中に示している。腐食減少率はケース3が2.0%とケース4が11.6%であった。鉄筋の腐食量の管理は、通電過程でコンクリートに発生する腐食ひび割れの幅を0.3mm程度を目安とした結果、この程度のばらつきを生じたものである。はつりによる鉄筋の状態確認を行わない日常の検査業務においては、ひび割れ幅を指標とするため、同等の劣化程度とみなされる可能性がある。



(1) 加力後鉄筋 (2) 腐食物除去後  
写真-4 腐食鉄筋の状態

表-3 実験結果

実験ケース	鉄筋の状態	断面修復	表面被覆	ピーク荷重(kN)	ピーク時変位(mm)	ケース1荷重比較
1	健全	---	---	50.7	57.0	100%
2		○	---	52.6	54.1	104%
3	腐食	○	---	49.9	42.1	98%
4		○	○	52.4	41.0	103%

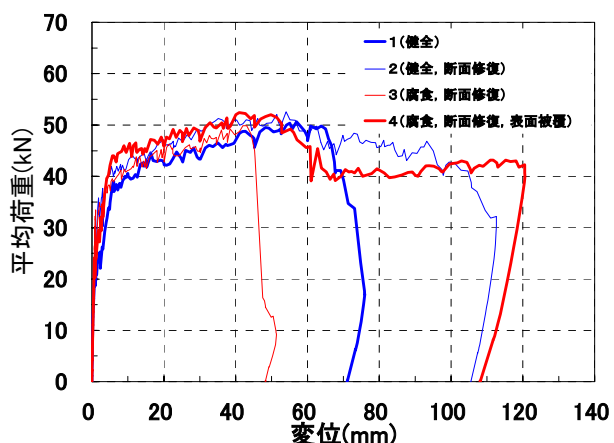


図-3 平均荷重～平均変位関係

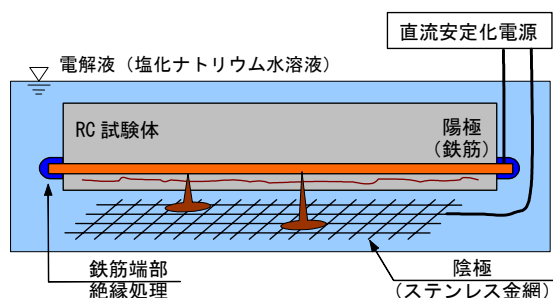
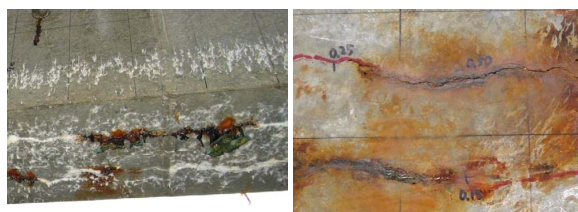


図-2 電気腐食の概要



(1) 通電直後 (2) 析出物除去後  
写真-3 促進腐食後の試験体底面

## 3. 実験結果

### 3.1 荷重変位関係(～最大耐力)

実験結果を表-3に、平均荷重～平均変位関係を図-3に示す。最大耐力は、鉄筋腐食の有無によって大きな差は無かった。ケース4はD6による補強により、降伏荷重、最大耐力がやや高めであるが、いずれも最大耐力までの変形性状に大きな差は見られなかった。

### 3.2 荷重変位関係(最大耐力～)

最大荷重後の挙動に関しては、いずれもせん断スパンに発生した斜めひび割れを起点に耐力低下を起しており、補強筋の無いコンクリー

ト梁の破壊によく見られる破壊形態となっている。その後、斜めひび割れが主筋定着部に沿ったひび割れへ進展するが、腐食試験体であるケース3は、後述する腐食ひび割れの開口とともに急激な荷重低下を示しており、一旦腐食ひび割れが発生してしまうと2.0%と低い鉄筋腐食率にも関わらず、付着への影響が無視できないことが推察される。一方、腐食+表面被覆のケース4は、最大荷重以降20%程度荷重低下するもののその後の低下は抑制されている。応急補修でしばしば実施される部分的な補修では、残置した腐食鉄筋の付着低下を考慮する必要がある。

### 3.3 ひび割れ発生状況

加力終了時のひび割れ発生状況を写真-5に示す。いずれの試験体も、せん断ひび割れの開口とともに鉄筋に沿った付着割裂が顕著となり耐力が低下する斜め引張破壊を示した。ひび割れの分散性はケース1が最も高く、他はほぼ同様の傾向である。ケース4は、断面修復の区間を他の試験体より長くしたが、前項の荷重変形関係およびひび割れ発生状況のいずれにも補修区間の影響は認められなかった。

### 3.4 鉄筋の付着ひび割れ

図-4にケース3の腐食ひび割れの開口変位を示す。グラフは断面修復端部の腐食ひび割れの4箇所計測位置の中で終局時に大きく変形した計測点のものである。最大荷重を境に急激に開口変位が増大しており、主筋の定着力低下が荷重低下の支配要因であることが推測される。

写真-6は表面被覆補修を行ったケース4の加力後の試験体底面ひび割れ発生状況である。ケース4は11.6%という高い鉄筋腐食率とかぶりコンクリートの腐食ひび割れが表面被覆補修の下に内在するという条件にも関わらず、加力による大きな付着ひび割れの発生は無く、表面被覆部がひび割れ幅の拡大を抑制していることが推定できる。

### 3.5 鉄筋のひずみ分布

図-5にケース1~4の主筋のひずみ分布を示す。図にはひび割れ発生時、主筋降伏時、最

大荷重時等の各ステップでの値を示している。

ケース1, 2は鉄筋が健全であるため、最大荷重時以降においても、主筋の定着部のひずみの増加は見られず、定着切れがないことがわかる。それに対して、鉄筋が腐食したケース3は最大荷重時には、断面修復区間より外側の主筋定着区間で降伏を超えるひずみが発生し、主筋の定着切れが最大荷重後の急激な耐力低下の原因となっていることを裏付けている。



(1) ケース1 (健全)



(2) ケース2 (健全, 断面修復)



(3) ケース3 (腐食, 断面修復)



(4) ケース4 (腐食, 断面修復, 表面被覆)

写真-5 加力終了時のひび割れ発生状況

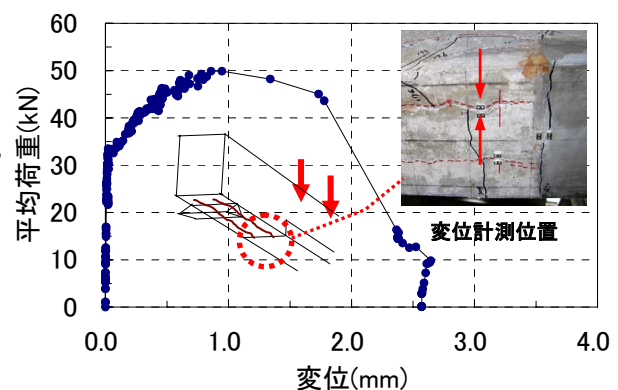


図-4 ひび割れ開口変位 (ケース3)

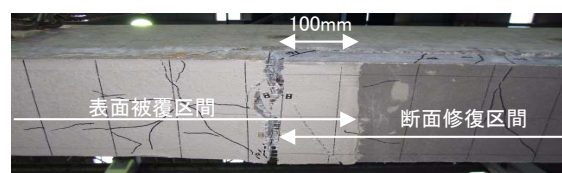


写真-6 加力後の試験体底面 (ケース4)

断面修復区間より外側の試験体底面に表面被覆補修を行ったケース4は、最大荷重後の変位50mmにおいても定着区間のひずみは増加せず、定着が確保できている。表面被覆の区間でひずみが増加するのは、変位80mm以降であるが、変位100mmにおいても支点付近の最端部のひずみに大きな変化は見られない。

#### 4. 結論

腐食鉄筋に対して、2種類の補修を実施したRC部材の実験の結果、以下の知見が得られた。

- 1) 断面修復により、初期の荷重変形は概ね健全な状態に回復できる。断面修復の区間長による影響は見られなかった。
- 2) 鉄筋腐食した試験体の一部を断面修復しても、鉄筋定着部の腐食を残置した場合、鉄筋の定着切れに起因する脆性的な破壊挙動を示すことがある。
- 3) 剥落防止を目的とした表面被覆工法を、腐食ひび割れが発生した主筋定着部に適用することで、ひび割れ幅拡大を抑制し、最大荷重以降の靱性が向上した。

#### 5. 今後の課題

鉄筋が腐食したコンクリート部位をはつることなく表面被覆補修すると、鉄筋の腐食状態が確認できない。これらの非破壊、微破壊試験方法の検討、また、補修後の耐久性の検証が必要と考えられる。

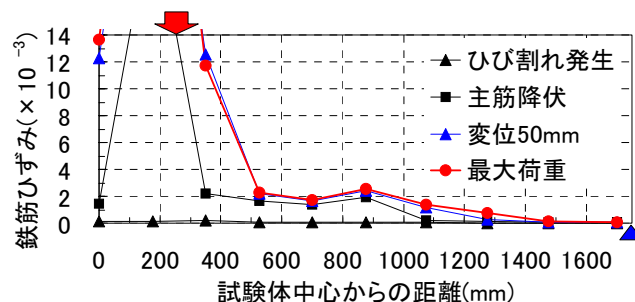
本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を得て行った。

#### 参考文献

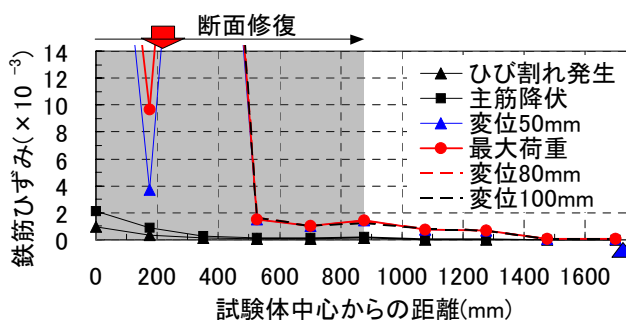
- 1) 新井泰ほか：鉄筋腐食が部材の強度特性に及ぼす影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告，Vol. 27, pp. 739-744, 2005.
- 2) 新井泰ほか：非線形挙動を考慮した開削トンネルのひび割れ調査結果シミュレーション，トンネル工学論文，Vol. 15, pp. 173-181, 2005.

3) 島弘ほか：腐食した鉄筋の局所付着応力-局所すべり関係，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No. 1, pp. 663-668, 1991.

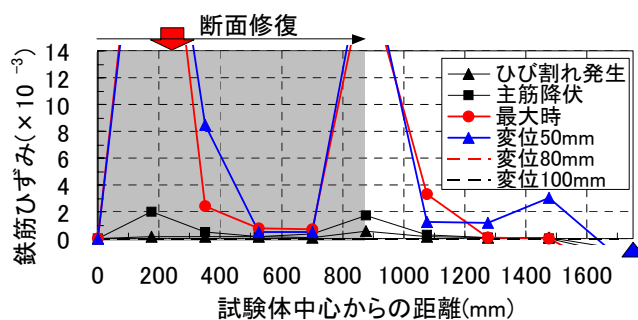
4) 藤倉裕介ほか：ポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 25, pp. 1487-1492, 2003.



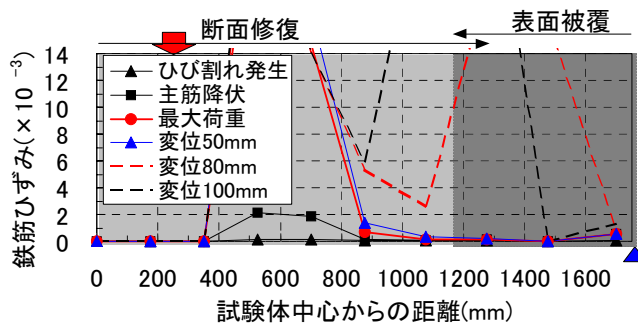
(1) ケース 1 (健全)



(2) ケース 2 (健全, 断面修復)



(3) ケース 3 (腐食, 断面修復)



(4) ケース 4 (腐食, 断面修復, 表面被覆)

図-5 主筋のひずみ分布