

論文 断面修復材と炭素繊維シートを使用した RC 部材の補修・補強工法に関する考察

鹿毛忠継*1・河合 啓次*2・家室 育夫*3・本橋 健司*4

要旨：各種断面修復材により RC 部材を補修した後に、炭素繊維 (CFRP) シートで補強する場合を想定し、強度の異なるエポキシ樹脂モルタルとポリマーセメントモルタル数種類を選択し、断面修復したコンクリートの力学的性能と CFRP シートによる補強効果、ならびにこれらに及ぼす断面修復材の力学的特性の影響について基礎的な実験を行い検証した。結果として、CFRP シート張付けにより圧縮強度ならびに強度時のひずみが大きくなり靱性が改善されるが、ヤング係数には影響を及ぼさない。ヤング係数は断面修復材と補修するコンクリートに依存し、ある程度推定が可能である。

キーワード：炭素繊維(CFRP)シート, 断面修復材, 圧縮強度, ヤング係数, ひずみ

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、既存 RC 構造物の柱やはり等の構造部材の耐震補強工事に連続繊維シート工法が使用され始め、近年その施工実績が急速に増加している。耐震補強において本工法を適用する際には、基本的には躯体が健全(軽微な損傷程度は含む)であることが前提となっているため、現在、躯体に施されている仕上げの有無あるいは性能が補強効果に及ぼす影響等が検討されているところである。^{1),2)}

しかし、連続繊維シート工法を適用する部材に鉄筋腐食等に起因するひび割れや断面欠損が生じている場合には、適切な補修工法を選定・実施した後、連続繊維シートを施工しなければならない。既往の研究^{3),4)}では、鉄筋腐食により劣化した RC はり、柱をエポキシ樹脂注入や軽量エポキシ樹脂モルタルと炭素繊維シート(以下、CFRP シート)により補修・補強した場合の補強効果や靱性改善効果が報告されているが、断面修復材の力学的特性と補修後の断面性能、さらに連続繊維シート施工後の補強効果等

について、十分に検討されているとは言い難い。

一般に、補修に伴う断面修復には、エポキシ樹脂モルタルやポリマーセメントモルタル等の断面修復材が用いられるが、特に、エポキシ系ではヤング係数が小さいために、従来より構造部材断面への大量使用が危惧されている。⁵⁾

本研究では、断面修復材として、強度の異なるエポキシ樹脂モルタルとポリマーセメントモルタル数種類、連続繊維シートとして CFRP シートを選択し、これらの断面修復材の力学的特性が補修後のコンクリートの力学的性能と CFRP シートによる補強効果に及ぼす影響について基礎的な実験を行い検証した。

2. 実験概要

断面修復材により補修・補強される RC 部材として、はり、柱を想定しているが、本研究では、単純圧縮応力を受けるコンクリート円柱供試体を用い、補修・補強された部材の基本的な断面性能として、強度・ヤング係数・強度時のひずみ等についての検討を行った。

*1 建設省建築研究所 第2研究部材料環境研究室 主任研究員 Ph.D. (正会員)

*2 アサヒポンド工業(株)

*3 (株)小野田 技術部

*4 建設省建築研究所 第2研究部維持保全研究室 室長 農博

2.1 使用材料

使用したコンクリート、CFRP シート、断面修復材の材料特性を表-1~3に示す。各材料特性は JIS A1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法)、JIS 原案 (コンクリートの静弾性係数試験方法)、JIS K7073 (炭素繊維強化プラスチックの引張強度試験方法)、JIS R7601 (炭素繊維試験方法) に従って求めた。

表-1 コンクリートの力学的特性*1

圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)
30.8	27.1	2218

*1:試験日での測定値

表-2 CFRP シートの力学的特性

CF 質量(g/m ²)		CF 断面積(cm ² /m)	
200		1.11	
引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (GPa)	破断伸び (%)	
4101	273	1.4 ~ 1.5	

表-3 断面修復材の力学的特性*1

記号	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ひずみ*2 ($\times 10^{-6}$)
E1*3	41.4	6.5	7631
E2*3	32.2	4.1	11827
C1*4	43.7	20.2	4294
C2*4	37.0	16.3	3813
C3*4	15.6	8.3	3661

*1:試験日での測定値、*2:強度時のひずみ

*3:E系、*4:C系

なお、目標強度は、コンクリートで 27MPa、C1 で 40MPa、C2 で 24MPa、C3 で 12MPa であり、C2 が若干強度が高いのを除けば、ほぼ目標に近い値が得られた。

2.2 試験体種類

(1) 断面修復材および基材コンクリート試験体
断面修復材は $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 、基材コンクリー

トは $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の試験体を 20℃, 60% R.H. の恒温恒湿室で作製、養生した。

(2) 断面修復試験体

試験体中心から 2cm の位置にスペーサーを配置した型枠に基材コンクリートを打設し、標準養生材齢 28 日後、基材コンクリートの断面修復材接着面をディスクサンダーによりけし、エポキシ系はプライマー塗布、セメント系はセメントペーストを塗布した。その後、再度、型枠に設置し、製造業者仕様により調査・混練した断面修復材で欠損部を埋め戻し、図-1に示すような試験体を作製し、20℃, 60% R.H. の恒温恒湿室において 14 日間養生した。

(3) CFRP シート張付試験体

標準的な施工要領に準拠し、断面修復試験体に CFRP シート 1 層をエポキシ樹脂含浸接着剤により試験体上端・下端各々 2cm に張付けた A タイプ (被覆率 20%, 横補強筋比 0.044%) と、さらに中央部 6cm に張付けた B タイプ (被覆率 50%, 横補強筋比 0.111%) の 2 種類を作成し、20℃, 60% R.H. の恒温恒湿室に試験時までで養生した。試験体の形状・寸法を図-1に示す。

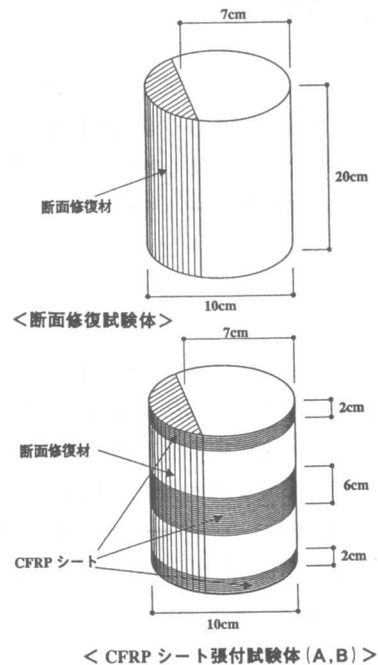


図-1 試験体形状・寸法

2.3 試験方法

全ての試験体は 100ton 万能試験機を用いて圧縮強度試験を行い、圧縮応力度-ひずみ曲線を測定し、圧縮強度と圧縮ヤング係数を測定した。また、断面修復試験体では、補修材と基材コンクリートとの界面の横ひずみ、CFRP シート張付試験体では上記界面部分での CFRP シートのひずみも測定した。ひずみの測定にはストレーンゲージおよびコンプレッソメータを使用し、試験結果は 3 体の平均値とした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮応力度-ひずみ関係

図-2 に圧縮応力度-ひずみ曲線を示す。全ての試験体で縦ひずみが約 2000 μ 程度まで同様な変化を示すが、断面修復試験体では 2400 ~ 2800 μ 程度で最大強度を示し破壊する。CFRP シート張付試験体では、断面修復試験体強度時以降も、徐々にではあるが強度が増進し、縦ひずみで約 8000 ~ 10000 μ 程度で最大強度を示した後、CFRP シートが破断し破壊する。そのときの CFRP シートの横ひずみは、約 6000 ~ 15000 μ であった。また、破壊後の試験体を観察すると、終局時には殆どの試験体でコンクリート部分が破壊しており、これは後述する断面修復材のヤング係数がコンクリートよりも小さく、強度時のひずみが大きいことに起因すると考えられる。しかし、断面修復材とコンクリート界面で破壊した試験体は無く、すべての試験体において良好な接着性を示した。なお、界面より 1 ~ 2mm 程度断面修復材側で、試験体軸方向に亀裂が生じているものがあった。写真に試験体破壊状況の一例を示す。

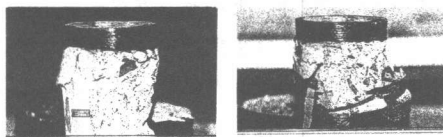


写真 試験体の破壊状況

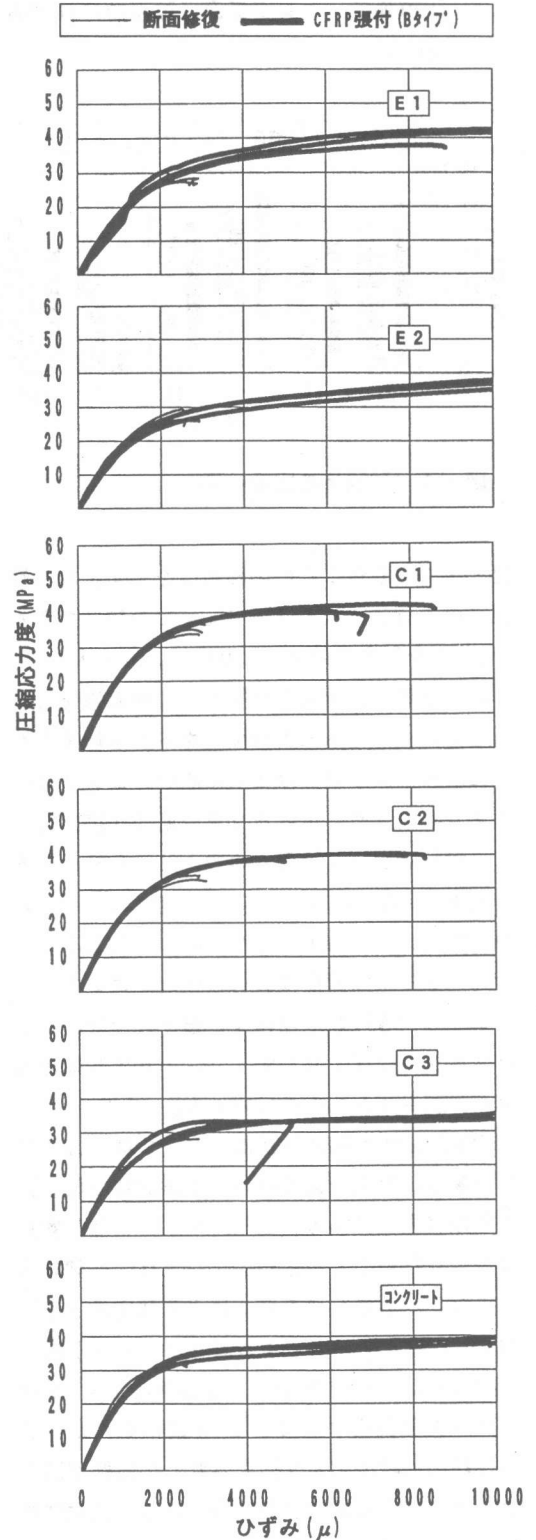


図-2 圧縮応力度-ひずみ関係

3.2 圧縮強度、ヤング係数、強度時のひずみ

(1) 圧縮強度

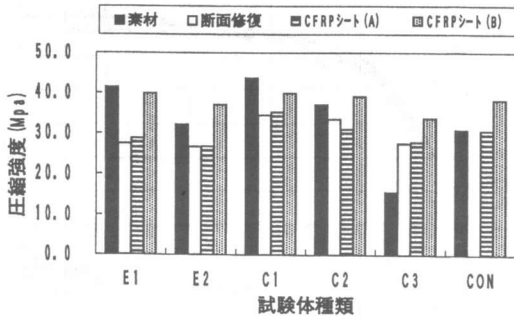


図-3 試験体の圧縮強度

図-3に試験体ごとの圧縮強度を示す。断面修復材の素材強度は $\phi 5 \times 10\text{cm}$ での結果であるが、エポキシ系ではコンクリートよりも大きく、これらを用い断面修復を行うと、断面修復材およびコンクリートの素材強度を下回る結果となった。セメント系ではC3を除いてコンクリートよりも大きく、これらを用い断面修復を行うと、素材強度を下回るものの、コンクリート素材強度を上回る結果となった。ただし、C3については、逆の結果となった。このことより、セメント系では断面修復材の強度がコンクリートよりも大きければ補修後の強度は補修前のコンクリート強度よりも大きく、小さければ補修後の強度も小さくなるといえる。

CFRPシート張付試験体については、Aタイプの場合、断面修復のみ行った試験体の圧縮強度と殆ど同じであり、CFRPシートの補強効果は得られないことが分かる。これは、本試験体の場合、断面修復材の使用による強度低下を予想し、CFRPシートによるコンファインド効果(平均拘束応力 1.82N/mm^2 、横補強筋比 \times CFRPシート引張強度として算出)を期待したが、試験体端部は球座により拘束され、圧縮強度試験を行うとせん断破壊する部分であり、試験体横方向へのひずみが小さい部分であるため、このような部分にCFRPシートを巻き付けても補強

効果は得られないことを示している。⁶⁾

ただし、柱部材のように軸力と水平力を受ける場合、部材端部に曲げモーメントが作用するために、CFRPシート巻き付けによる端部補強効果が予想される。⁴⁾補修断面が曲げ応力を受ける場合については、今後検証が必要である。

Bタイプの場合、平均拘束応力は 4.55N/mm^2 であり、横補強量としては多いとはいえないが、すべての試験体においてCFRPシートによるコンファインド効果により強度が改善される。⁷⁾なお、CFRPシートの破断時の横ひずみは、約 $6000 \sim 15000 \mu$ で、ばらつきがあり、コンファインド効果を定量化する際の設計用CFRP引張強度については検討を要する。

また、本実験の範囲では、断面修復材の圧縮強度が、エポキシ樹脂モルタルの場合で 36MPa 以上、ポリマーセメントモルタルの場合で 30MPa であれば、コンクリートだけをCFRPシートで補強した試験体と同等以上の強度に修復できると推察される。

(2) ヤング係数

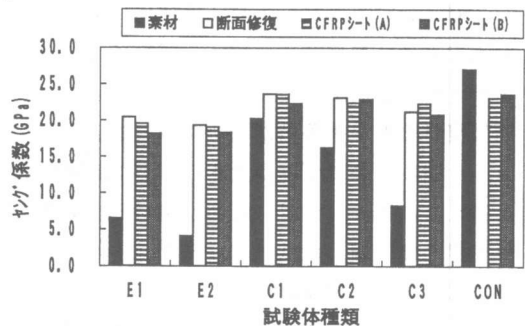


図-4 試験体のヤング係数

図-4に試験体ごとのヤング係数を示す。なお、ヤング係数は1/3割線ヤング係数である。セメント系材料のヤング係数は、その応力-ひずみ関係の非線形性から本来測定が難しく、測定方法等に起因するばらつきが比較的大きいが、本実験において以下のことが確認された。

エポキシ系断面修復材のヤング係数は特に小

さく、素材コンクリートの約 1/5 であるが、断面修復試験体では、素材コンクリートを下回るものの、かなり大きくなるのがわかる。セメント系では、素材コンクリートよりも小さく、強度に応じてヤング係数も異なるが、断面修復試験体では、素材コンクリートより小さく、断面修復材の種類によらず、エポキシ系よりも若干大きく、ほぼ一定値を示すことがわかる。

ここで、断面修復試験体 (CFRP シートなし) を断面修復材およびコンクリートの二相複合材料と考え、並列および直列に相をなしていると仮定してモデル化し、下式 (1) : 並列モデル, (2) : 直列モデル, によりヤング係数 E を推定した。結果を図-5 に示す。

$$E = V_m \cdot E_m + V_c \cdot E_c \quad (1)$$

$$E = 1 / (V_m / E_m + V_c / E_c) \quad (2)$$

ここで、 $V_m + E_m = 1$

($V_m=0.242, V_c=0.758$)

V_m, V_c : それぞれ断面修復材および
コンクリートの容積比

E_m, E_c : それぞれ断面修復材および
コンクリートのヤング係数 (GPa)

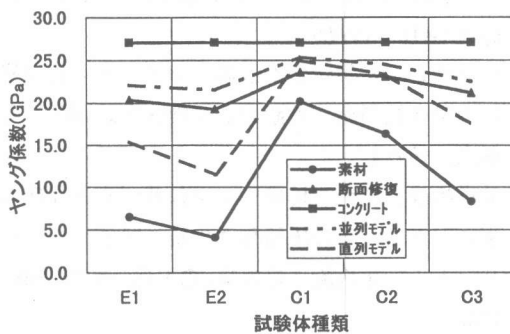


図-5 推定したヤング係数

図-5 より、軸力を受ける断面修復試験体のヤング係数は、直列モデルでは、断面修復材のヤング係数に大きく影響を受ける。並列モデルでも影響はあるものの、測定値は計算値の約 90 ~ 94 % 程度であり、断面修復試験体のヤング

係数をほぼ推定できることがわかる。また、補修断面の面積比による影響については、ここでは検討していないが、通常の RC 部材の補修範囲 (鉄筋のかぶり厚さ程度) を考慮すれば、問題ないと考えられる。また、CFRP シート張付試験体については A, B タイプとも顕著な効果は確認されず、断面修復試験体と同程度であり、既往の実験結果と同様な傾向を示した。⁴⁾

結果として、CFRP シート張付けによるヤング係数改善効果は殆どなく、ヤング係数の小さな断面修復材を使用しても、部材全体の剛性は補修されるコンクリートの影響を受けることがわかった。ただし、断面修復材自体のヤング係数が著しく小さい場合や補修断面がかなり大きい場合には別途検討する必要がある。

3) 強度時のひずみ

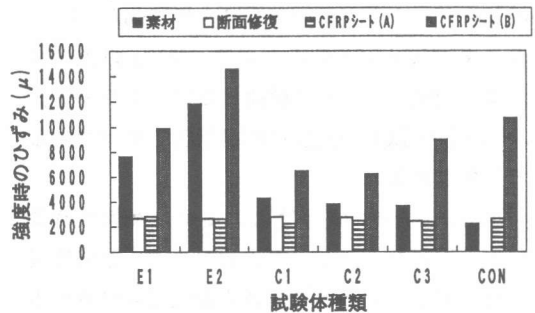


図-6 試験体の強度時のひずみ

図-6 に試験体ごとの強度時のひずみを示す。エポキシ系はヤング係数が小さく、強度が大きく、圧縮応力度-ひずみ曲線も直線性を示すために特に大きい値となる。セメント系では、約 3600 ~ 4200 μ であり、素材強度が大きいものほどひずみも大きくなる傾向にある。断面修復試験体では、約 2400 ~ 2800 μ であり、見かけ上コンクリートのヤング係数が小さくなるため、素材コンクリート試験体の強度時のひずみ約 2200 μ を上回る結果となる。エポキシ系はセメント系より若干小さい値となり、圧縮強度と同様な傾向を示す。CFRP シート張付試験体

では、Aタイプの場合、全く変化がないが、Bタイプの場合、すべての試験体において CFRP シートによるコンファインド効果が顕著に現れる。特にエポキシ系では大きく、補修部材断面の靱性をかなり改善できると考えられる。

4. まとめ

本研究により、以下の結果を得た。

(1) CFRP シート張付試験体 (Aタイプ) では、圧縮強度は断面修復材の強度に依存し、補強効果がみられない。よって、断面修復材を使用してコンクリートを補修し、部材断面の性能を改善しようとする場合、CFRP シート張付箇所に作用する応力状態をよく勘案する必要がある。

(2) CFRP シート張付試験体 (Bタイプ) では、CFRP シート張付によるコンファインド効果により強度が改善される。また、断面修復材の圧縮強度がエポキシ樹脂モルタルで 36MPa 以上、ポリマーセメントモルタルで 30MPa 以上であれば、CFRP シートで補強したコンクリート試験体と同等以上の強度に部材断面を修復できると推察される。

(3) CFRP シート張付けによるヤング係数改善効果は殆どなく、ヤング係数の小さな断面修復材を使用しても、部材全体の剛性は補修されるコンクリートの影響を受ける。ただし、断面修復材自体のヤング係数が著しく小さい場合や補修断面がかなり大きい場合には検討を要する。

また、断面修復試験体のヤング係数は、軸力を受ける円柱試験体の場合、並列モデルによりある程度推定可能である。

(4) CFRP シート張付試験体では、CFRP シートを張付けることで、強度時のひずみが著しく増加し、補修部材断面の靱性を改善できる。

本研究では、比較的簡易な試験体を用い、単純な応力状態 (単軸圧縮) で検討を行ったが、実際の RC 部材に適用する場合、寸法効果⁷⁾や実際に RC 部材断面が受ける応力状態を想定した検証が必要である。また、力学的特性以外にも、使用材料の相性や補修後の不具合等、耐久性に

関する検討も充分に行われる必要がある。

謝辞

本研究は、(社)建築研究振興協会に設置された「連続繊維シート工法検討委員会 (委員長: 今泉勝吉工学院大学教授)」での研究の一部として行った。使用材料の提供・試験体の作成において、コニシ(株)、アサヒボンド工業(株)、(株)小野田のご協力を得ました。また、実験の実施において建設省建築研究所第2研究部部外研究員木原孝氏に多大なご協力を得ました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) (社)建築研究振興協会: 炭素繊維シート補強工事の材料と工法, 1997.7
- 2) (社)建築研究振興協会: 炭素繊維シート補強工事の材料と工法 (2), 1998.11
- 3) 鹿毛忠継ほか: 鉄筋が腐食した RC 構造部材の炭素繊維シートによる補強(その 1 ~ 5), 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.343-352, 1996.9
- 4) 鹿毛忠継ほか: 鉄筋が腐食した RC 構造部材の炭素繊維シートによる補強(その 6 ~ 10), 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.401-410, 1997.9
- 5) (社)日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説, 1997.1
- 6) 小坂義夫ほか: 構成モデルに基づく各種横拘束コンクリートの圧縮靱性の統一評価, コンクリート工学年次論文報告集, 第 8 巻, pp.365-368, 1986.
- 7) 伊藤ほか: 炭素繊維シートで補強した円形コンファインドコンクリートの圧縮実験, コンクリート工学年次論文報告集, 第 20 巻, 第 1 号, pp.491-496, 1998.