

論文 炭素繊維シートによる RC スラブ下面補強効果に関する 実験的研究

高橋義裕*¹・佐藤靖彦*²

要旨：相対する二辺が単純支持され、他の二辺が自由の RC スラブの下面に炭素繊維シートを貼付し、スラブ上面の中央に静的集中荷重が作用した場合のスラブの破壊性状・たわみ性状・主鉄筋のひずみ性状・シートのひずみ性状について実験的に検討した。実験に用いた供試体は全部で6体である。その内1体は、シートを貼付しない供試体で基準供試体とした。他の5体の供試体の内訳は、下面全面にシートを貼付したものの3体、下面にシートを10cm間隔でゼブラ状に貼付したものの2体である。供試体全て押抜きせん断破壊であった。下面にシートを貼付することによりその最大荷重は、基準供試体の最大で1.58倍の値を示した。

キーワード：RCスラブ，炭素繊維シート，押抜きせん断耐力

1. はじめに

既存RC建造物の耐荷力不足を補強する方法として種々のものが開発提案されている。例えば現在道路橋RC床版に対する主要な補強方法としては、①増桁工法、②鋼板接着工法、③上面増厚工法の3つである。これらの工法は、完全に損傷をカバーする例も多いが、再損傷が発生する場合もあり、床版の複雑な損傷機構に対抗するには、まだまだ改良の余地がある。また、近年の現場技術者の不足によって簡易な工法の開発も要求されている。

この様な中で、連続繊維シート、特に炭素繊維（以下「CFRP」）シート接着工法が床版の補強工法として注目され、基礎研究が行われてきた¹⁾。このような現状を踏まえ現在はり部材に関する合理的な補強設計方法の確立に向けての積極的な検討がなされている。しかし、スラブのような面部材の補強にCFRPシートを用いる補強設計法に関する研究は少ないように思われる。そこで本研究は、今後、設計方法を構築する上で必要とされる基礎的な情報を得ることを目的とし、CFRPシートを下面に貼り付けたRCスラブを

用い、荷重がスラブ中央に集中的に作用した場合のスラブの破壊性状・たわみ性状・主鉄筋のひずみ性状・CFRPシートのひずみ性状について実験的に検討したものである。

2. 実験概要

本研究で検討を行った実験供試体は、図-1に示すような相対する2辺が単純支持、他の2辺が自由な長方形スラブである。なお載荷中においては、支持端部でのスラブの浮き上がりは自由としている。実験供試体は表-1に示す6体である。スラブのスパン $l=60\text{cm}$ 、スラブ厚 $h=15\text{cm}$ 、スラブ幅 $B=100\text{cm}$ である。荷重は、 $10\times 10\text{cm}$ の正方形鋼板（厚さ 32mm ）を介し、スラブ表面の中央に作用させた。主鉄筋、配力鉄筋ともD10（SD295A）を 5cm ピッチで配筋した。主鉄筋かぶり $c=10\text{mm}$ とした。

供試体F1は、CFRPシートを全く貼り付けていない供試体で基準供試体とする。供試体F2は、下面全面にCFRPシートを1層（繊維方向は主鉄筋方向と同じ）貼付（以下「全面貼付」と呼ぶ）したもの、供試体F3は、3層の全面貼付、供試

*1北海道大学大学院 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

表-1 実験結果一覧

No.	f'_c MPa	A_{CFRP} cm ²	P_{test} kN	P^*_{test} kN	$P^*_{test}/F1$	備考
F1	30.4	0	240	238	1.0	基準供試体
F2	34.3	5400	304	284	1.19	全面貼付1層
F3	24.1	16200	327	365	1.53	全面貼付3層
F4	29.3	27000	376	375	1.58	全面貼付5層
F5	34.3	2700	337	315	1.32	ゼブラ貼付1層
F6	29.3	8100	320	324	1.36	ゼブラ貼付3層

f'_c : コンクリートの圧縮強度 P_{test} : 最大荷重
 A_{CFRP} : CFRPシートの面積 $P^*_{test} = P_{test} \sqrt{30/f'_c}$

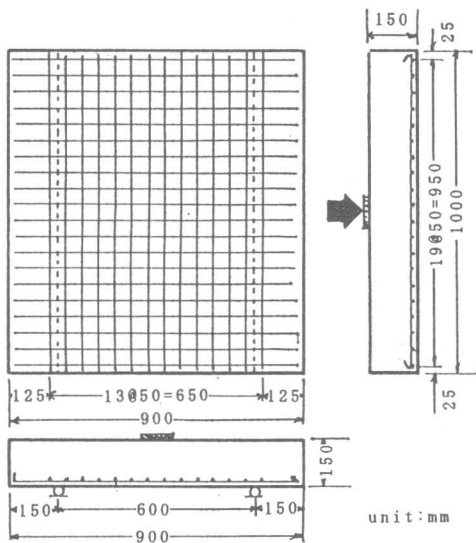


図-1 実験供試体形状寸法及び配筋状況

体F4は、5層の全面貼付である。供試体F5は、幅10cmのCFRPシート1層（繊維方向は全面貼付と同じ）を10cm間隔で下面に貼付（以下「ゼブラ貼付」と呼ぶ）、供試体F6はCFRPシート3層のゼブラ貼付である（図-2参照）。

実験に使用した鉄筋及びCFRPシートの特性値を表-2に示す。CFRPシートには、一方向繊維のものを使用した。CFRPシート貼り付け工程は、以下の通りである。まず施工面をケレンしたのちエポキシ樹脂プライマーを塗布し24時間養生した。次にCFRPシートの接着をエポキシ樹脂接着剤の下塗り/シート貼り付け/エポキシ樹脂

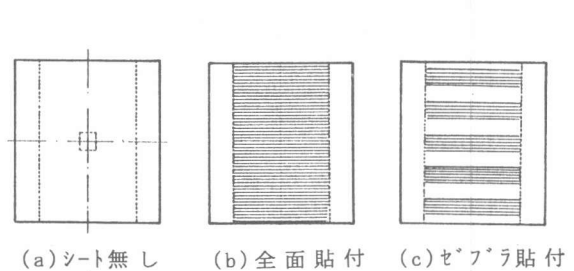


図-2 CFRPシート貼付状況

接着剤の上塗り・含浸の順で行った。養生は常温で1週間とした。ただし、支点部手前3cmで貼り止めコンクリート表面を直接支持した。

コンクリートは、水セメント比50%、細骨材率45%で早強ポルトランドセメント、海砂（比重2.69）及び川砂利（比重2.76）を使用した。コンクリートの目標圧縮強度は30MPaである。実験は、材令約2週間で行った。

以上の事により各実験供試体の最大荷重、破壊性状、CFRPシートのひずみ、载荷点直下の主鉄筋ひずみ、载荷点のたわみを測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 破壊荷重及び破壊性状

各供試体の最大荷重 P_{test} を表-1に示す。また P^*_{test} は、コンクリートの圧縮強度 f'_c のばらつきの影響をある程度取り除くため、実際の実験で得られた最大荷重に $\sqrt{30/f'_c}$ を乗じ、それぞれコンクリートの圧縮強度30MPaに換算し

表-2 使用材料の力学特性

Type		Cross section area (mm ²)	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Steel	D10	71.3	200	385	543
CFRP		1.65*	230	—————	3480

*Cross sectional area in width of 10mm

た値である。

供試体は、全てCFRPシートの補強の有無に関わらず押抜きせん断破壊を示した。また、押抜きせん断破壊時には、CFRPシートの全面的剥離やシートの破断は見られなかった。

図-3に最大荷重 P_{test}^* とスラブ下面に貼り付けたCFRPシートの総面積(2層の場合は1層の面積の2倍とする)との関係を示したものである。同図には、下記に示すコンクリート標準示方書の面部材の押抜きせん断耐力式²⁾による計算値も記入してある。

$$v = \beta_d \beta_v \beta_r f_{p.c.d} u_p d / \gamma_b \quad (1)$$

ここに

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d}, \quad \beta_d > 1.5 \text{ の場合 } 1.5 \text{ とする}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p}, \quad \beta_p > 1.5 \text{ の場合 } 1.5 \text{ とする}$$

$$\beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25 u / d)$$

$$f_{p.c.d} = 0.2 \sqrt{f'_{c.d}} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$f'_{c.d}$: コンクリートの設計圧縮強度

u : 載荷周長(ここでは40cm)

u_p : 設計断面の周長 ($4r + \pi d$)

d : 有効高さ (m)

γ_b : 部材係数(ここでは1.0とした)

同図より下面にCFRPシートを貼り付けることにより、一部下に凸の部分が見られる(これはゼブラ貼付と全面貼付の貼り方の違いによるギャップが出ているのかもしれない)が、全体的な傾向としてシート面積の増加に伴い最大荷重は増加している。しかし、シート面積の増加割合ほどその最大荷重は増加せず、頭打ちが見ら

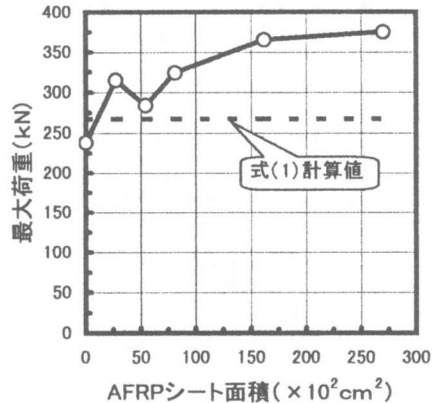
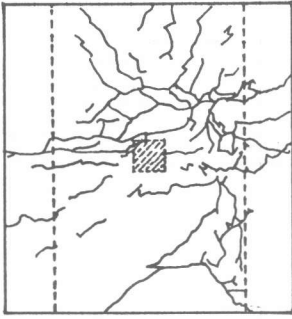


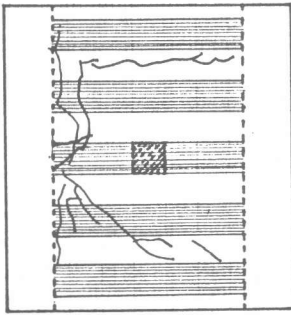
図-3 最大荷重-貼付シート総面積関係

れる。このことは、本実験の範囲では、シートの破断は観察されなかったのでシートとコンクリートとの界面での局部的な付着切れ又は押し抜かれるコンクリートの範囲がシート層をいくら増しても広がらずある限られた範囲に限定されてしまっているのかも知れない(後述図-4参照)。ゼブラ貼付補強では基準供試体F1に対し約20%の最大荷重の増加が見られ、全面貼付補強の場合は、基準供試体F1に対し約58%の最大荷重の増加が見られた。

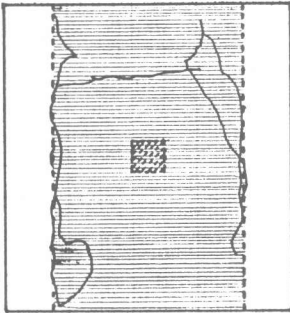
図-4は、供試体の実験終了後の下面のひび割れ状況のスケッチである。図-4(a)は、基準供試体F1、図-4(b)はゼブラ貼付3層供試体F6、図-4(c)は、全面貼付5層供試体F4である。ここで供試体F4と供試体F6の下面ひび割れのスケッチは、実験終了後貼付されていたCFRPシートをはがし、目視により観察しひび割れ面をなぞったものである。図-4(a)の供試体



(a) 供試体 F1



(b) 供試体 F6



(c) 供試体 F4

図-4 供試体下面ひび割れ状況の例

F1の場合、下面ひび割れは載荷板（図中では、斜めにハッチングされている部分）を取り囲む様に細かなひび割れが発生している。図-4

(b)の供試体F6の場合、シートをゼブラ貼付していることにより、供試体F1ほどの細かなひび割れは観察されていないが、支持辺近傍に若

干細かなひび割れが観察された。また、載荷板近傍には、ほとんど目立ったひび割れは発生しておらず支持辺に沿ったひび割れと自由辺に平行なひび割れのみが発生している。図-4(c)の供試体F4の場合、全面貼付5層の為、そのひび割れ発生状況は供試体F1及び供試体F6とは異なり、支持辺近傍の細かなひび割れは、ほとんど観察されなかった。しかし、支持辺に沿ったひび割れと供試体F6と同様に自由辺に平行なひび割れが発生していた。図-4(b)及び(c)より、シートで補強された場合そのひび割れ形状は、細かなひび割れは発生せず、載荷板を取り囲む様にして支点区間を1辺（本実験の場合60cm）とする正方形に近い形状となっているように思われる。このひび割れ発生状況よりシートを貼付することにより荷重増加の初期段階で発生する曲げひび割れの発生およびその後のひび割れ進展の抑制に効果を示し、耐力が増加したと思われる。

3.2 たわみ性状

図-5は、載荷点直下の荷重-たわみ関係を示したものである。ただし、供試体F5は測定中のトラブルにより測定できず、CFRPシートを貼付した供試体のたわみ曲線勾配は、基準供試体F1

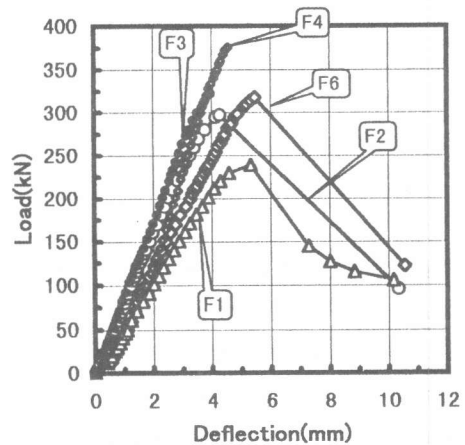


図-5 荷重-たわみ関係

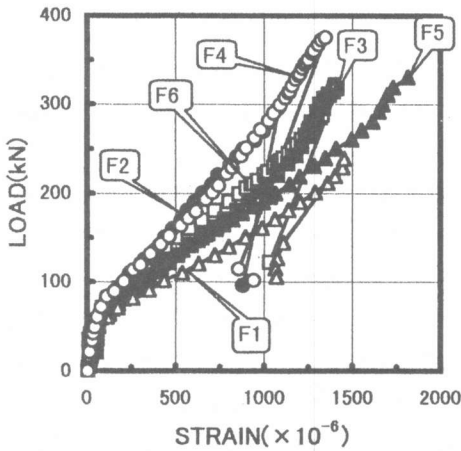


図-6 荷重-ひずみ（主鉄筋）関係

のたわみ曲線勾配より急になっている。このことは、CFRPシートを貼付することによりスラブの曲げ剛性が増加したことを示している。しかし、シート層の枚数増加による曲げ剛性の明確な増加は見られない。また、シート層の枚数増加により、より急激な押抜きせん断破壊を起こし、基準供試体F1に比べ靱性は低下する傾向にある。

3.3 主鉄筋のひずみ性状

図-6は載荷点直下の荷重-主鉄筋ひずみ関係を示したものである。確かにCFRPシートを下面に貼付することにより鉄筋に発生するひずみの値は減少している。このことは、CFRPシートが鉄筋のひずみ減少分の一部を分担しているものと思われる。最初の偏曲点でひび割れが発生したと思われる。この時点までは、シート貼付の有無によるひずみ挙動の違いは、それほど明確には見られない。しかし、この荷重点を過ぎるとシート補強の有無による差が見られる。本実験においては、シートの1枚貼付供試体F2と5枚貼付供試体F4とは、それぞれ最大荷重値は違うが、そのひずみ分布挙動は殆ど同じである。シート3枚貼付供試体F3は若干であるがひずみ量は他の供試体F2とF4より大きめにしている。しかし、基準供試体F1のひずみ分布よりは

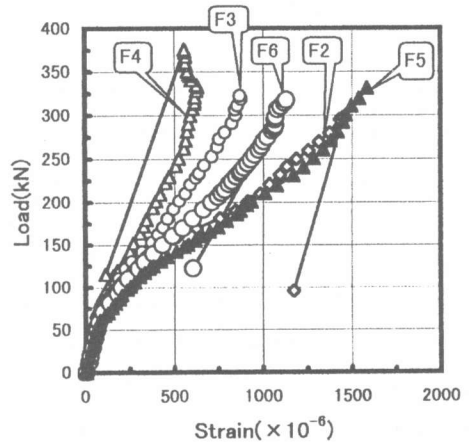


図-7 荷重-ひずみ（CFRPシート）関係

小さい。また、いずれの供試体とも鉄筋の降伏点ひずみ (1925×10^{-6}) には達していない。

ゼブラ貼付の1枚貼り供試体F5では、その鉄筋ひずみは鉄筋の降伏点ひずみ (1925×10^{-6}) 近くまで達している。

CFRPシート3枚貼りの全面貼付供試体F3は若干大きめのひずみ挙動を示している。しかし、他の供試体については、だいたいシート全面貼付供試体とゼブラ貼付供試体、基準供試体の3グループに分けられる。傾向としては、CFRPシートの貼付面積増加（ここでは、シートの枚数の増加）により、鉄筋ひずみは減少している。このことは、CFRPシートがそれだけ力を分担し補強効果がでているものと思われる。

3.4 CFRPシートのひずみ性状

図-7に載荷点直下のCFRPシートの荷重-ひずみ関係を示す。全面貼付1層補強供試体F2とゼブラ貼付1層補強供試体F5は同じ様なひずみ挙動を示しているが、他の供試体においてはシート総面積の増加によりシートひずみは減少している。また、シートひずみの最大値でもだいたい 1700×10^{-6} 程度である。この値は、以前我々が行った下面CFRPシート補強されたはり部材の曲げ試験³⁾で剥離が生じたと思われる $5000 \sim 6000 \times 10^{-6}$ 程度のひずみ量の半分以下である。従ってまだ

下面のシートは剥離していないものと思われる。

3.5 考察

鉄筋コンクリートスラブに直接荷重が作用する場合の荷重とスラブのたわみ関係を概念的に述べると次のようになる。まず、荷重の増加につれて曲げひび割れが発生し、曲げひび割れが進展し、やがてスラブの鉄筋の一部が降伏を生じ、更にスラブ全域に降伏線が発展し、その後急激に変形が増大して最終的には、曲げ破壊を生ずることもある。しかしながら、最終的な曲げ破壊を形成する以前に、荷重の作用領域がピラミッド形の形状で押し抜ける、いわゆる押抜きせん断破壊を生ずることが多い。

本実験においては、確かに下面にCFRPシートを貼付していない基準供試体F1の場合、下面に初期曲げひび割れの発生が見られたが、主鉄筋は鉄筋の降伏ひずみに至らず、荷重作用領域がピラミッド形に押し抜ける、押抜きせん断破壊であった。さらに、下面にCFRPシートを貼付した供試体においては、基準供試体F1より激しく一気に大きな音と共に脆性的な押抜きせん断破壊を示した（下面にCFRPシートを貼付しているためひび割れ発生の確認できず）。今回の実験においては、主としてCFRPシートの総面積と貼り方を変えて検討した。その結果最大荷重は、概ねCFRPシートの面積の増加と共に増加するが、シートの増加割合ほどは、最大荷重は増加せず頭打ちが見られた。しかし、主鉄筋ひずみに関しては、全面貼付の方がゼブラ貼付の場合より多くの荷重をCFRPシートが、分担しているものと思われる。また、曲げ剛性はCFRPシートを貼付することにより増加するが、シートの層数増加による明確な違いは見られなかった。

4. まとめ

本研究は、相対する二辺が単純支持され、他の二辺が自由なRCスラブの下面にCFRPシートを貼付した実験供試体を用い、スラブ上面の中央に集中的に静的荷重が作用した場合のスラブの

破壊性状、最大荷重、載荷点のたわみ、載荷点直下の主鉄筋のひずみ分布、CFRPシートのひずみ分布について実験的に検討したものである。今後さらに検討すべき点もあるが本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 供試体全て押抜きせん断破壊であった。下面にシートを貼付することによりその最大荷重は基準供試体の最大で1.58倍になった。
- (2) CFRPシートを貼付することにより曲げ剛性の増加が確認できた。しかし、シートの層数増加による曲げ剛性の違いは確認出来なかった。
- (3) 鉄筋ひずみは一部供試体において使用鉄筋の降伏点ひずみ近くまで達しているが、殆どの供試体では、 1500×10^{-6} 以下の鉄筋ひずみであった。
- (4) CFRPシートのひずみは各供試体とも最大荷重付近で $500 \times 10^{-6} \sim 1700 \times 10^{-6}$ の範囲であった。

謝辞

本研究の遂行においてCFRPシート及び接着剤の提供を頂いた東燃（株）及び実験を進めるに当たっては、北海学園大学工学部土木工学科四年生、三島 健君及び竹内哲也君の協力を得た。さらに、本研究の一部は、「平成11年度私立大学学術フロンテア推進事業」の補助金を受けた。ここに付記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 森, 若下, 松井, 西川: 炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究, 橋梁と基礎, 1995, 3, pp25-32.
- 2) コンクリート標準示方・設計編[平成8年 制定], 土木学会.
- 3) 高橋義裕ほか: 炭素繊維シートにより補強した鉄筋コンクリートはりの耐力及び変形, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp.1611-1616, 1997.