

## 論文 炭素繊維シート補強 RC スラブのせん断耐力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、スラブ上面の中央及び自由縁に向かって荷重が偏心して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・一部供試体においてはコンクリート表面のひずみ性状を実験的に検討した。実験に用いた供試体は全部で9体である。中央荷重の場合は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、シート無し供試体の約1.3倍の値を示した。また、荷重が自由縁近傍に作用した場合、シートの補強効果は殆ど期待できない。

キーワード：RCスラブ、炭素繊維シート、せん断耐力

## 1. はじめに

既存RC構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が、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<sup>1)</sup>。このような現状を踏まえ現在よ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が、スラブのような面材の補強にCFRPシートを用いる補強設計法に関する研究は少ない。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、CFRPシートの有無、載荷荷重作用位置が変化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等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9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、スラブ表面の中央及び自由縁側に偏心して作用させた。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~F5は、CFRPシートを全く貼り付けていない供試体である。供試体F6~F8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）貼付した（以下「全面貼付」と呼ぶ）もの、供試体F9は、3層の全面貼付である。載荷位置は、自由縁からの荷重中心までの偏心量  $e$  で与えられ、 $e=50\text{cm}$ は中央載荷、 $e=5\text{cm}$ は縁端載荷である。

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。シートは、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。

\*1北海学園大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

\*2北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

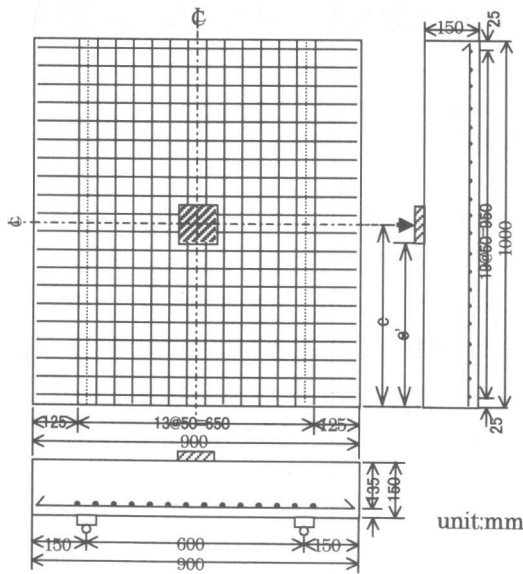


図-1 実験供試体形状寸法及び配筋状況

表-1 実験結果一覧

No	e (cm)	e/a	f <sub>c</sub> (Mpa)	P <sub>max</sub> (kN)	P* <sub>max</sub> (kN)	備考
F1	50	1.667	47.6	355	318	シト無し
F2	40	1.333	31.6	298	328	シト無し
F3	20	0.667	30.8	260	290	シト無し
F4	10	0.333	34.0	156	165	シト無し
F5	5	0.167	31.1	104	115	シト無し
F6	50	1.667	46.7	395	357	シト1層
F7	25	0.833	45.7	358	327	シト1層
F8	5	0.167	46.0	146	133	シト1層
F9	50	1.667	24.1	327	412	シト3層

f<sub>c</sub>: コンクリート圧縮強度, P<sub>max</sub>: 最大荷, P\*<sub>max</sub> = P<sub>max</sub> √(38.2 / f<sub>c</sub>)

表-2 使用材料の力学特性

Type	Cross section Area (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (Gpa)	Yield strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)
D10	71.3	200	385	543
CFRP	1.65*	230	—	3480

\* Cross sectional area in width of 10mm

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。CFRPシート表面のひずみ測定は、供試体幅の半分のラインに沿って支間（=60cm）中央より両サイド0cm, 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cmの位置にゲージ長5

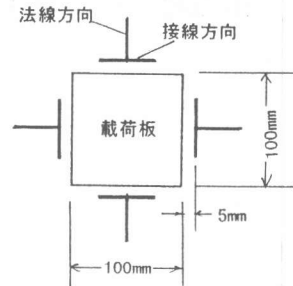


図-2 コンクリート表面ゲージ貼付状況

mmの一軸ひずみゲージを貼付（合計11点）し測定を行った。供試体F6, F7, F8のコンクリート表面ひずみの測定にはゲージ長70mmのひずみゲージを用いた。コンクリート表面のひずみゲージは、載荷板の各辺に直角方向（以下「法線方向ひずみ」と呼ぶ）、と載荷板の各辺に平行方向（以下「接線方向ひずみ」と呼ぶ）とにそれぞれ貼付した（図-2参照）。

### 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<sub>max</sub> を表-1 に示す。また P\*<sub>max</sub> は、コンクリートの圧縮強度 f<sub>c</sub> ののばらつき (24.1~47.6MPa, 平均38.2MPa) 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 √(38.2/f<sub>c</sub>) を乗じ、それぞれコンクリートの平均圧縮強度38.2MPaに換算した値である（以下「補正最大荷重」と呼ぶ）。

供試体は、荷重が中央付近に載荷された場合全て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。一方荷重が自由縁近傍に作用する場合は、不完全な押抜きせん断破壊を示した。この場合、押抜けるコンクリートは自由縁に達しており破壊面が完全な押抜きせん断破壊に比べて減少することになる。

図-3に補正最大荷重 P\*<sub>max</sub> とスラブ下面に貼り付けたCFRPシートの層数との関係を示す。同図

には、下記に示すコンクリート標準示方書の面材の押抜きせん断耐力式<sup>2)</sup>による計算値も記入してある。

$$V = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (1)$$

ここに

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

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

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

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

$f'_{cd}$  : 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 ( $4 r + \pi d$ )

$d$  : 有効高さ (m)

$\gamma_b$  : 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、補正最大荷重は増加するが、シート層数の増加割合ほどその最大荷重は増加しない。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可能性がある。

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、下面シート貼付の無い供試体F1, 図-4 (b) は1層シート貼付の供試体F6, 図-4 (c) は、3層シート貼付の供試体F9, 図-4 (d) は、1層シート貼付の自由縁近傍に荷重が載荷された供試体F8である。図-4 (a) の供試体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。しかし、図-4 (b) の供試体F6及び図-4 (c) の供試体F9の場合、下面全面にシートを貼付している為、そのひび割れ発生状況は供試体F1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、

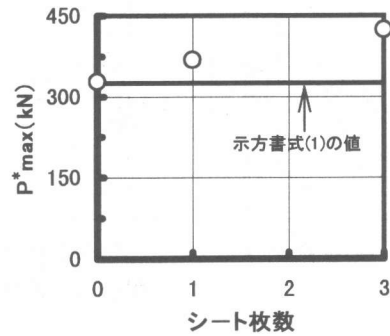


図-3 P\*<sub>max</sub>とシート層数との関係

支持辺に沿ったひび割れと自由辺に平行なひび割れが発生していた。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、耐力が増加したものと思われる。図-4 (d) の供試体F8の場合、自由縁近傍に荷重が載荷され、CFRPシートで補強されている為、支持辺に沿ったひび割れが確認できる。

### 3.2 たわみ性状

図-5は、作用荷重Pと載荷点直下のたわみ関係を示したものである。同図よりCFRPシートを貼付した供試体F6, F9のたわみ曲線の勾配は、CFRPシートを貼付していない供試体F1の曲線勾配より若干急になっている。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、供試体F9 (シート3層) が供試体F6 (シート1層) に比べ若干たわみが大きく出ている。これは、コンクリートの圧縮強度が供試体F9はF6の半分程度である為なのかも知れない。

### 3.3 主鉄筋のひずみ性状

図-6は中心載荷における作用荷重と載荷点直下の主鉄筋ひずみの関係を示したものである。供試体F9は、他の供試体と比べコンクリートの圧縮強度が半分程度しか出なかったために途中で供試体F1より若干大きめのひずみ値を示しているが、最大荷重付近では、逆転している。確かにCFRPシ

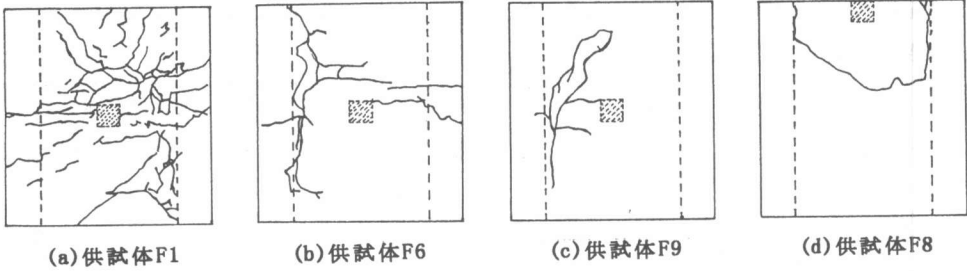


図-4 供試体下面ひび割れ状況の例

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(50~75kN付)でひび割れが発生したものと思われる。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、この最初の偏曲点荷重を過ぎるとシート補強の有無による差違が若干見られる。いずれの供試体とも鉄筋の降伏点ひずみ( $1925 \times 10^{-6}$ )には達していない。

### 3.4 CFRPシートのひずみ性状

図-7に載荷荷点直下のCFRPシートの作用荷重-ひずみ関係を示す。ここでは、載荷位置がパラメータとなっている。供試体F6は、中心載荷、すなわち偏心量 $e=50\text{cm}$ 、F7は、偏心量 $e=25\text{cm}$ 、F8は、偏心量 $e=5\text{cm}$ である。載荷位置の違いによるひずみ性状の違いは、供試体F6とF7では、それほど明確ではない。これは、載荷荷重が自由縁から十分離れているために、自由縁の影響をほとんど受けないためであると思われる。しかし、供試体F8は、他の供試体に比べその最大荷重は、半分以下であるにも関わらずシートひずみは $1500 \times 10^{-6}$ 程度まで達している。このことは、載荷荷重が自由縁に接しているための、抵抗面の減少によりシートひずみがかかなり発生したものと思われる。

### 3.5 コンクリート表面のひずみ挙動

図-8(a)は、供試体F6のコンクリート表面の法線方向(主鉄筋方向)ひずみ性状を、図-8(b)は、接線方向(配力鉄筋方向)ひずみ性状の一例を示

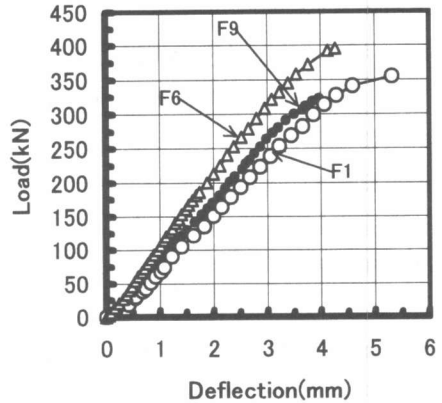


図-5 荷重-たわみ関係

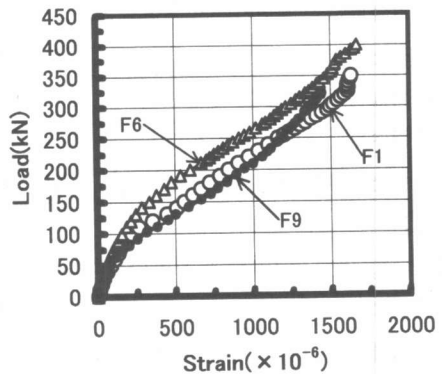


図-6 荷重-ひずみ(主鉄筋)関

したものである。荷重の増加に従って接線方向ひずみは、圧縮側に単調に増加し、最大ひずみは $1600 \times 10^{-6}$ 程度である。一方、法線方向のひずみは、当初は荷重の増加につれて増加するが、ある荷重段階から増加割合が緩くなり、さらに荷重が増加すると最大荷重の60~80%で法線方向ひずみは、増加から減少に変化し、最終的に引っ張りになる。このことは、この間に生じるスラブ内のひび割れによってスラブ内の応力流れを大きく変化

させているものと思われる。

### 3.6 荷重載荷位置の影響

CFRPシートの有無による補正最大荷重 $P^*_{max}$ と  
 載荷位置 $e$  ( $e$  = 自由縁から荷重載荷板中心ま  
 の距離) と支点間距離の半分 $a$  ( $a = 30\text{cm}$ ) との  
 比 $e/a$ との関係が図-9に示されている。また、  
 同図には自由縁の影響の無い場合の示方書式(1)  
 の値及び自由縁の影響を考慮する低減係数 $\alpha$ を用  
 いた下記式の値も記入してある。

$$\text{破壊荷重} = \beta_d \beta_s \beta_r \beta_f u_s d \quad (2)^4$$

ここに

$\beta_d, \beta_s, \beta_r, \beta_f$  : 式(1)と同じ

$$f_p = \alpha \cdot 0.20 \cdot \sqrt{f'}. \quad (\text{N/mm}^2)$$

$f'$  : 実測コンクリート圧縮強度 (MPa)

$\alpha$  : せん断強度の低減係数

$$\alpha = 0.64 + 0.46e'/a \quad (e'/a \leq 0.78)$$

$$\alpha = 1.0 \quad (e'/a > 0.78)$$

$e'$  : 載荷両端辺から自由縁までの距離

$u_s$  : Case 1 又は Case 2 のうち短い方をとる

(図-10参照)

同図より確かに自由縁に荷重が近づくにつれ補  
 正最大荷重は減少し、荷重が自由縁に接したとき  
 の荷重は、中央載荷の場合の概ね1/3位になってい  
 る。また、自由縁の影響が殆どない載荷の場合は、  
 CFRPシートの補強効果が確認できるが、自由縁近  
 傍での載荷では、CFRPシートによる補強効果は殆  
 ど期待できないことが示された。

### 3.7 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・伸展し、やがてスラブの鉄  
 筋の一部が降伏し、更にスラブ全域に降伏線が伸  
 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がある。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

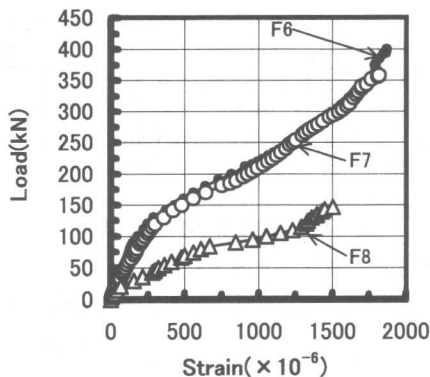
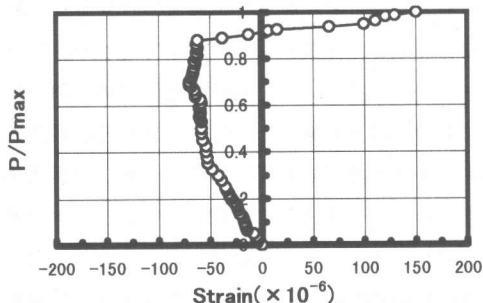
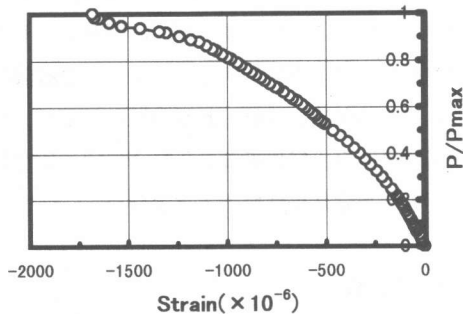


図-7 荷重-ひずみ (CFRPシート) 関係



(a) 法線方向ひずみ



(b) 接線方向ひずみ

図-8 コンクリート表面ひずみ状況

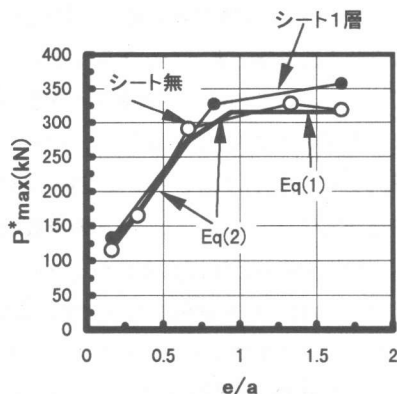


図-9  $P^*_{max}$ -載荷位置との関係

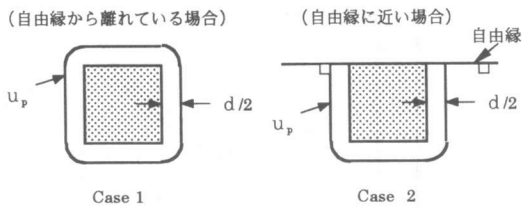


図-10 設計断面のとり方

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、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。今回の実験においては、主としてCFRPシートのシート層数と荷重載荷位置を変えて検討した。その結果最大荷重は、概ねCFRPシートの層数の増加と共に増加するが、シートの層数増加割合ほどは、最大荷重は増加しない。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。また、荷重作用位置が自由縁に近接した場合には、殆どCFRPシートの補強効果は期待できない。

#### 4. まとめ

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) 荷重が自由縁の影響の無い場合、実験供試体は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シートを貼付していない供試体の最大で約1.3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、 $1600 \times 10^{-6}$ 程度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 $1500 \times 10^{-6} \sim 1800 \times 10^{-6}$ の範囲であった。

(5) 荷重作用位置が自由縁に近接した場合には、殆どCFRPシートの補強効果は期待できない。

(6) 中心載荷の場合、荷重増加につれて接線方向ひずみは単調に増加し、法線方向ひずみはある荷重段階から、増加から減少に転じ、最終的に引張りになる。このことは、この間コンクリート内での応力流れが大きく変化していることを示しているものと思われる。

#### 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)(現:日鉄コンポジット(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 日比 諭君の協力を得た。さらに、本研究の一部は、文部省私立大学学術フロンティア(「積雪寒冷地における災害に強い都市モジュールの開発とシステム構築」)の補助を受けた。ここに付記し謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 森 成道ほか: 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, pp.25-32, 1995, 3
- 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.
- 4) 古内 仁ほか: RCスラブの自由縁附近載荷に対する実用せん断設計法の研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.141-149, 1996.