

## V-36

## CFRPシートで補強されたRCスラブのせん断耐力に関する実験的研究

北海学園大学 ○正 員 高橋義裕

北海道大学 正 員 佐藤靖彦

## 1. はじめに

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はい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、荷重がスラブ上面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、一部供試体においてはコンクリート表面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7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 $32\text{mm}$ ）を介し、スラブ表面の中央及び自由縁に偏心して作用させた。主鉄筋、配力鉄筋ともD10（SD295A）を $5\text{cm}$ ピッチで配筋した。主鉄筋のかぶりは $10\text{mm}$ とした。

供試体F1は、CFRPシートを全く貼り付けていない中央に荷重が作用する供試体である。供試体F2は荷重が中央に作用し、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）貼付したものの、供試体F3は荷重が中央に作用し、CFRPシート3層貼付、供試体F4は、CFRPシート1層貼付で荷重が自由縁側に $25\text{cm}$ 偏心して作用、供試体F5は、CFRPシート1層貼付で荷重が自由縁に接して作用した供試体である。供試体F6は、CFRPシートを全く貼付していない供試体で自由縁に $30\text{cm}$ 偏心して荷重が作用し、供試体F7は、CFRPシート貼付がなく荷重が自由縁に接して作用した供試体である。

実験に使用した鉄筋及びCFRPシートの特性値を表-1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 $3\text{cm}$ で貼り止めコンクリート表面を直接支持している。

CFRPシートのひずみを供試体幅半分のラインに沿って支間（ $60\text{cm}$ ）中央より両サイド $0\text{cm}$ 、 $5\text{cm}$ 、 $10\text{cm}$ 、 $15\text{cm}$ 、 $20\text{cm}$ 、 $25\text{cm}$ の位置にゲージ長 $5\text{mm}$ の一軸ひずみゲージを貼付（合計11点）し測定した。供試体F2、F4、F5のコンクリート表面ひずみの測定にはゲージ長 $70\text{mm}$ のひずみゲージをもちいた。ひずみゲージの貼付位置は、図-2に示すように、載荷板に近接した載荷板の各辺に直角方向（法線方向と呼ぶ）及び平行方向（接線方向と呼ぶ）とした。

---

Experimental Study on Shear Strength in Free Edged RC Slabs Strengthened with Externally Bonded CFRP Sheet  
By Yoshihiro TAKAHASHI and Yasuhiko SATO

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。実験は、材令約3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、載荷点直下の主鉄筋ひずみ、載荷点近傍のコンクリート表面のひずみ、載荷点の変位を測定した。

### 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  $P_{max}$  を表-2 に示す。また  $P^*_{max}$  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  $\sqrt{40.7/f'_c}$  を乗じ、それぞれコンクリートの平均圧縮強度40.7MPaに換算した値である。

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 は最大荷重  $P^*_{max}$  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<sup>2)</sup> による計算値も記入してある。

$$v = \beta_d \beta_p \beta_r \beta_c \alpha u_p d / \gamma_b \quad (1)$$

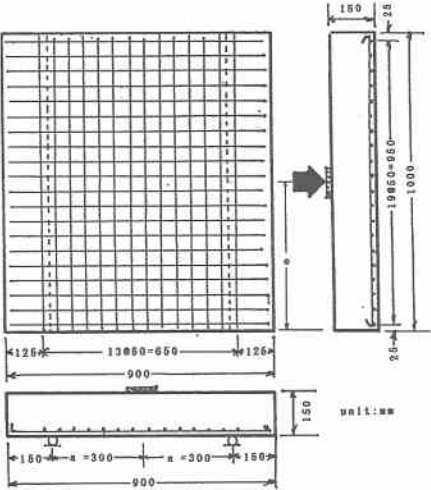


図-1 実験供試体及び配筋状況

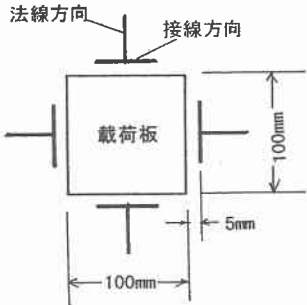


図-2 ゲージ貼付位置

表-1 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) |
|-----------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| Steel D10 | 71.3                                  | 200                   | 385                  | 543                    |
| CFRP      | 1.65*                                 | 230                   | —                    | 3480                   |

\*Cross sectional area in width of 10mm

表-2 実験結果一覧

| No. | $f'_c$ MPa | e cm | $P_{max}$ kN | $P^*_{max}$ kN | 備 考   |
|-----|------------|------|--------------|----------------|-------|
| F1  | 47.6       | 50   | 355          | 328            | シート無し |
| F2  | 46.7       | 50   | 395          | 369            | シート1層 |
| F3  | 24.1       | 50   | 327          | 425            | シート3層 |
| F4  | 45.7       | 25   | 358          | 338            | シート1層 |
| F5  | 46.0       | 5    | 146          | 137            | シート1層 |
| F6  | 30.8       | 20   | 260          | 299            | シート無し |
| F7  | 31.1       | 5    | 104          | 119            | シート無し |

$f'_c$  : コンクリートの圧縮強度,  $P_{max}$  : 最大荷重,  $P^*_{max} = P_{max} \sqrt{40.7/f'_c}$

ここに

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

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

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

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

$f'_{c,d}$ : 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)

$\gamma_b$ : 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、シート層数の増加に伴い最大荷重は増加している。しかし、シート総数の増加割合ほどその最大荷重は増加しない。CFRPシート3層貼付補強の場合は、CFRPシート補強のない供試体F1に対し約30%の最大荷重の増加が見られた。

### 3.2 たわみ性状

図-4は、縦軸に各荷重 $P$ を各供試体の最大荷重 $P_{max}$ で割った $P/P_{max}$ をとり、横軸にたわみをとり示したものである。供試体F1の $P/P_{max}$ -たわみ関係も示されている。同図より、CFRPシートを貼付した供試体(F2, F3)のたわみ曲線の勾配は、供試体F1の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。

### 3.3 主鉄筋のひずみ性状

図-5はシート貼付供試体(F2, F3)の載荷点直下の荷重-主鉄筋ひずみ関係である。同図にはまた、供試体F1の主鉄筋ひずみ分布も示されている。最初の変曲点でひび割れが発生したものとと思われる。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。また、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-6は、載荷点直下のCFRPシートの $P/P_{max}$ -ひずみ関係を示す。全面貼付1層補強供試体F2と3層補強供試体F3とは同じようなひずみ挙動を示

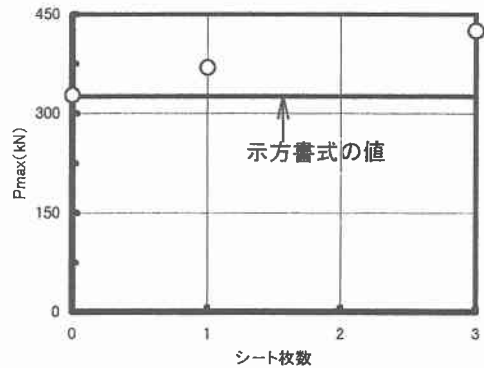


図-3 最大荷重-シート層数との関係

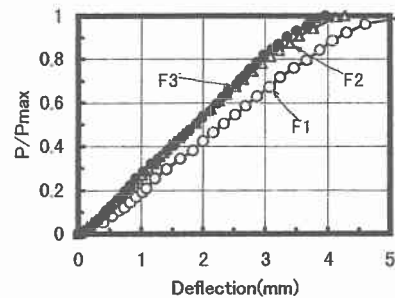


図-4  $P/P_{max}$ -たわみ関係

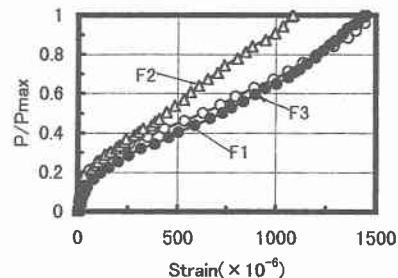


図-5  $P/P_{max}$ -鉄筋ひずみ関係

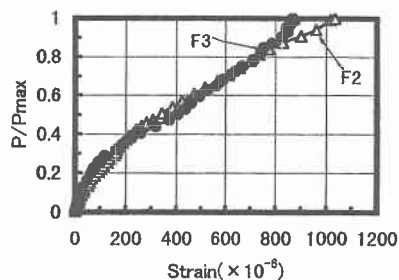


図-6  $P/P_{max}$ -シートひずみ関係

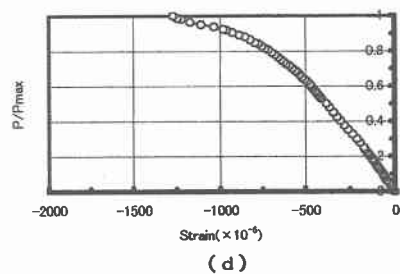
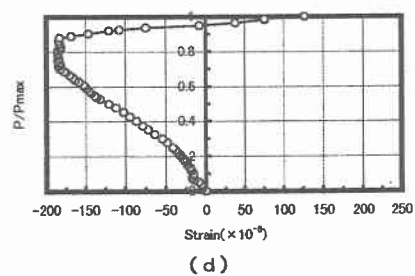
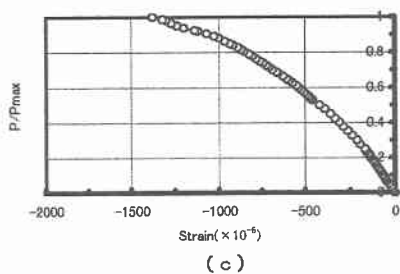
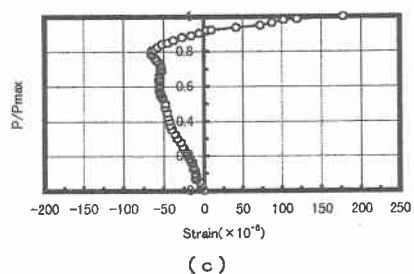
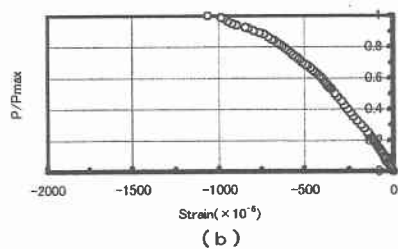
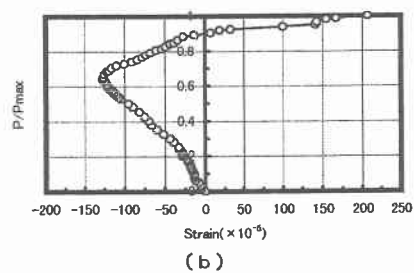
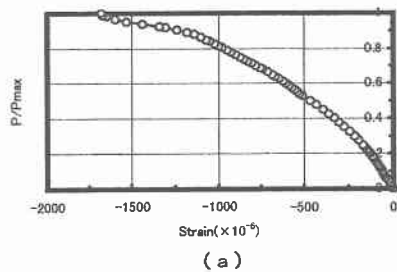
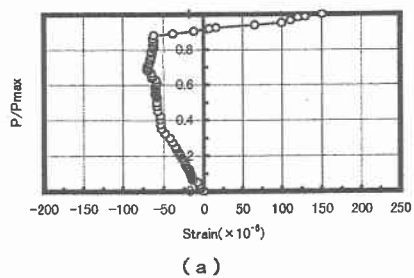


図-7 P/Pmax—法泉方向ひずみ関係（供試体F2）

図-8 P/Pmax—接線方向ひずみ関係（供試体F2）

している。シートひずみの最大値は、だいたい $1100 \times 10^{-6}$ 程度である。

### 3.5 コンクリート表面のひずみ関係

図-7 (a) ~ (d) は、供試体F2の供試体の法線方向の $P/P_{max}$ -ひずみ関係を示したものである。図-8 (a) ~ (d) はF2供試体の接線方向の $P/P_{max}$ -ひずみ関係を示したものである。荷重の増加に従って接線方向の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の割合が緩くなり、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最大荷重 $P_{max}$ と載荷位置 $e$  ( $e$ =自由縁から荷重載荷板の中心までの距離)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の値も示されている。確かに自由縁に荷重が近づくにつれ最大荷重は減少し、荷重が自由縁に接した時の最大荷重は、中央載荷の場合の半分以下になっている。また、自由縁近傍での載荷では、CFRPシートによる補強効果はほとんど期待できないことが示されている。

### 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変位関係を概念的に述べると以下ようになる。荷重の増加につれて曲げひびわれが発生し、曲げひびわれが進展し、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降伏線理論によって算定される曲げ耐力に至り、その後急激に変形が増大してメカニズムとなり、最終的には、曲げ破壊を生ずることもある。しかしながら、最終的なメカニズムを形成する以前に、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われ発生の確認できず)。今回の実験においては、その最大荷重は、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、CFRPシートのひずみは最大でも $2000 \times 10^{-6}$ に達していなかった。また、荷重が自由縁近傍に作用する場合、CFRPシートでの補強効果はほとんど期待できない。

## 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、載荷点の変位、載荷点直下の主鉄筋のひずみ分布、CFRPシートのひずみ、コンクリート表面のひずみ挙動、

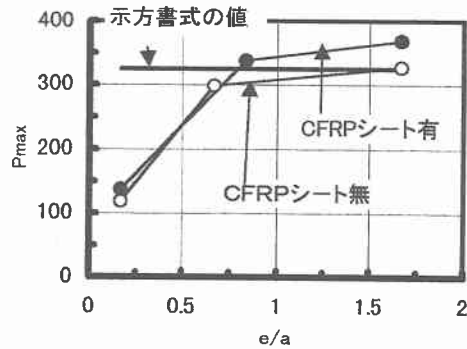


図-9 最大荷重-載荷位置との関係

荷重載荷位置とCFRPシート補強効果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CFRP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、 $1500 \times 10^{-6}$ 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 $750 \times 10^{-6} \sim 1750 \times 10^{-6}$ 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、ほとんどCFRPシートの補強効果は、期待できない。
- (6)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っ張りになる。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）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、「平成11年度私立大学学術フロンティア推進事業」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