

連続繊維シートで補強したRCおよびPRC部材のせん断耐力評価

出雲 健司¹・佐伯 昇²・大沼 博志³

¹正会員 博士 (工学) 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

³フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

連続繊維シートで補強したRC部材のせん断耐力の評価を行うために、ノッチでひび割れ位置を限定したRC部材を使用して、せん断ひび割れを強制的に導入して、せん断耐力に有効的に寄与するシートの有効付着面積を求めている。この有効付着面積を既報の研究で得た連続繊維シートとコンクリートの付着強さ式に適用することによって、連続繊維シートによるせん断耐力の向上効果を評価できることを明らかにしている。また、より実際の桁に近いRC桁の側面に接着した連続繊維シートの補強効果と一部のシートに導入したプレストレス力の効果を検討している。実験の結果、シート、プレストレス力によるせん断補強効果が明らかになっており、算定式により実験値を評価できている。

Key Words : aramid fiber sheet, carbon fiber sheet, shear strengthening, RC member, prestressed force

1. はじめに

半永久的な耐久性を有しているといわれているコンクリート構造物が近年塩分などによる劣化や交通荷重・交通量の増加などにより、コンクリートの損傷が多く見受けられるようになってきている。また、設計基準の見直しや阪神・淡路大震災などによる被害の反省などにより、既存のコンクリート構造物の安全性を強化することが要求されてきている。コンクリート構造物は社会基盤を支える重要な役割を果たしており、時間的な空白をつくることが許されず、効率のよい補修・補強が重要となっている。そこで、既存のコンクリート構造物の安全性を強化するための研究が盛んに行われている。その補強工法の一つとして、連続繊維シートをコンクリート構造物に接着して補強する工法がある。この補強工法の利点は比較的簡便で、連続繊維シート自体が鋼板などと比べると非常に軽量で、死荷重に対する影響が少なく、耐久性にも優れている。しかし、せん断ひび割れが卓越し、シートの剥離による破壊が発生する場合、シートとコンクリートの付着に関してはほとんど解明されていない。連続繊維シートとコンクリートの付着に関しては筆者らの既報の研究により、一軸引張応力下での連続繊維シートとコンクリートの付着強さ式¹⁾が構築されている。しかし、

せん断補強の評価に関しては筆者らの既報の研究²⁾、また、既往の研究^{3), 4), 5), 6), 7)}など多くの研究がなされているが、連続繊維シートがコンクリートの表面から剥離する破壊についてのせん断耐力の評価式が確立されているとは言えない。

既往の研究³⁾では付着を考慮した連続繊維シートのせん断耐力を求めている。また、本研究とほぼ同様に、耐力向上に寄与するシートの面積を論じている。しかし、この研究で使用されている付着強度はあくまで推定した値で、本研究は一軸引張応力下での連続繊維シートとコンクリートの付着強さで得られた実際の値を使用しているのが異なる。

既往の研究^{4), 6)}は本研究のように連続繊維シートとコンクリートの付着強さを考慮しておらず、シートの引張強度を使用して算定している。そのため、シートが剥離した後にせん断破壊した部材については算定値が実験値より大きく見積もるという結果になっている。それを補うために、既往の研究⁴⁾では低減係数を用いている。

本研究はモデル化したRC部材試験とより実際に近いRC桁試験の二つから構成されている。

RC部材試験では、せん断補強筋を有さないRC部材にノッチを設けて、せん断ひび割れが入る位置を限定し、シートがひび割れに抵抗する面積、有効付着面積を

表-1 シート物性値

シリーズ	96		97	
シートの種類	CFS96	AFS96	CFS97	AFS97
全目付量 (縦:横) (g/m ²)	400 (200:200)	400 (200:200)	600 (300:300)	470 (235:235)
比重	1.79	1.39	1.80	1.39
厚さ (mm)	0.112	0.144	0.167	0.169
引張強度 (N/mm ²)	3879	2493	3115	2134
引張弾性率 (kN/mm ²)	242	86	222	73
破断伸度 (%)	2.1	3.1	1.6	3.3

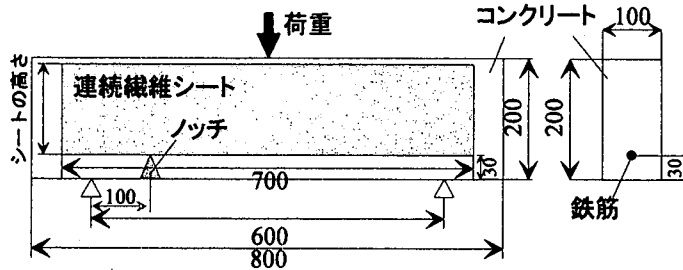


図-1 RC部材の概略図

算定し、これを既報の研究⁹⁾の連続繊維シートとコンクリートの付着強さ式に適用することによって、シートが受け持つせん断耐力式を構築した。なお、連続繊維シートは部材のウェブに接着している。

RC桁試験では、せん断補強筋を配し、シートを桁のウェブに接着して、連続繊維シートのせん断補強効果を検討している。また、一部のシートにプレストレスを導入して、そのせん断補強効果も検討している。既往の研究^{9),10)}では底面に緊張材としてのFRPプレートを接着して補強を行っているが、本研究では側面に緊張材としての連続繊維シートを接着して補強効果を検討している。

2. 実験概要

(1) 使用材料

本研究で使用した炭素繊維シート (以下、CFS) とアラミド繊維シート (以下、AFS) の物性値を表-1に示す。また、この物性値は「JIS K 7073」に準拠して試験を行った値である。シートの厚さは目付量/単位体積重量より算定した一方向当たりの理論値である。使用した連続繊維シートは96、97の2シリーズに分かれており、各シリーズごとにCFSとAFSの2種類がある。それぞれのシリーズのCFS、AFS共に縦糸と横糸がそれぞれ1:1の割合で繊維が入っている2方向連続繊維シートである。2方向シートを使用した理由は桁の

ウェブにシートを接着し、横糸はせん断補強筋として、縦糸は軸方向にプレストレスを導入することを想定しているためである。使用したプライマーと接着剤は共にエポキシ系の樹脂である。

(2) RC部材試験の供試体

連続繊維シートをウェブに接着して補強した鉄筋コンクリート部材のせん断耐力を算定するために、供試体にノッチを設けた。ノッチを設けた理由はせん断ひび割れが入る位置を限定して、シートがそのせん断ひび割れに対して抵抗する面積を求めやすくするためである。

連続繊維シートの接着法は、コンクリート部材の表面をディスクサンダーで削った後、プライマーを塗布して約一日養生した。養生後、エポキシ系の接着剤でシートを接着して、一週間後に実験を行った。図に示すように、連続繊維シートをRC部材のウェブに貼り、供試体にノッチに入れてせん断ひび割れが入る場所を限定した。

使用した供試体の概略図を図-1に示す。引張主鉄筋はシリーズ96-SではD13 (降伏点: 345N/mm²) を、シリーズ97-SではD16 (降伏点: 345N/mm²) を使用しており、せん断補強鉄筋は使用せず、せん断破壊を想定した。表-2に実験供試体の一覧を示す。

試験はコンクリートの強度を一定条件下で、シートの種類のみ変えて、中央一点荷重で行った。

表-2 実験供試体一覧

供試体名	シートの種類	シートの高さ (mm)	コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)	コンクリートの引張強度 (N/mm ²)	コンクリートの弾性係数 (N/mm ²)	破壊パターン
96-S-N	-	-	24.9	2.3	28600	S
96-S-A	AFS96	150	25.6	2.2	22900	PS
96-S-C	CFS96	150	25.6	2.2	22900	PS
97-S-N	-	-	27.5	2.2	22100	S
97-S-A	AFS97	150	27.5	2.2	22100	PS
97-S-C	CFS97	150	27.5	2.2	22100	PS
97-S-N-H	-	-	23.9	1.9	22700	S
97-S-A-H	AFS97	85	23.9	1.9	22700	PS
97-S-C-H	CFS97	85	23.9	1.9	22700	PS

S: せん断破壊, PS: シート剥離後せん断破壊

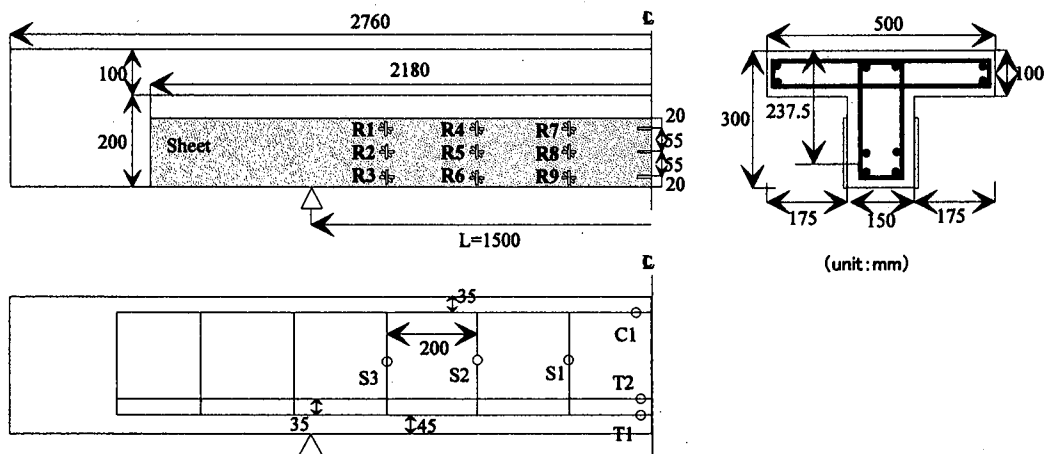


図-2 RC桁の概略図とひずみゲージの位置

表-3 桁の種類

供試体番号	シートの種類	使用した主鉄筋	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	コンクリート弾性係数 (N/mm ²)	プレストレス導入量 (kN)	破壊パターン
96-N-0	-	D19	46.4	28300	-	S
96-C-0	CFS96	D19	52.0	28000	0	PS
96-C-15	CFS96	D19	40.3	22000	15×2	PS
96-A-0	AFS96	D19	60.3	29400	0	PS
96-A-15	AFS96	D19	42.5	28400	15×2	PS
97-N-0	-	D29	42.6	26600	-	S
97-A-0	AFS97	D29	45.7	25300	0	PS

S: せん断破壊, PS: シート剥離後せん断破壊

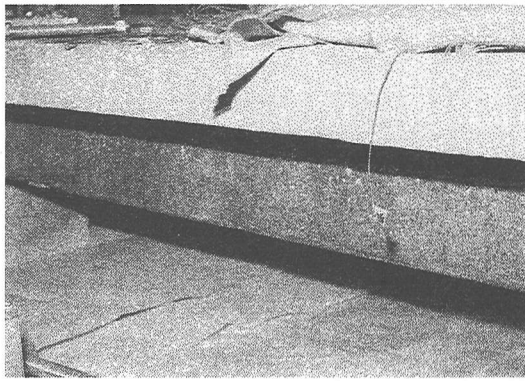
(3) RC桁試験の供試体

実験に使用した桁の形状ならびにゲージの測定位置を図-2に示す。桁の断面はT型であり、シリーズ96では主鉄筋はD19 (降伏点: 345N/mm²)、シリーズ97では主鉄筋はD29 (降伏点: 345N/mm²)、また、両シリーズともに圧縮鉄筋とスターラップはともにD6 (降伏点: 295N/mm²) を使用しており、スターラップは200mmの間隔で配置した。シートは図-2に示されるように、桁のウェブの両面に接着した。載荷方法は中央一点載荷で、

静的試験を行った。

ゲージはシートにはスターラップ上に図のように上中下3点、ロゼットで貼り、図に示すようにそれぞれR1~R9とした。鉄筋にはスターラップ (S1~S3)、主鉄筋 (T1, T2)、圧縮鉄筋 (C1) に図のように貼った。

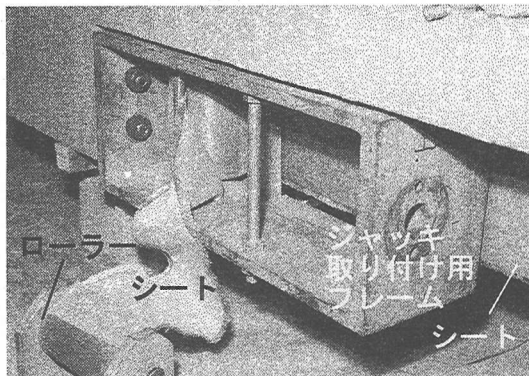
本研究で使用した桁の種類を表-3に示す。ここで、プレストレス導入量はシート1枚に対する量である。



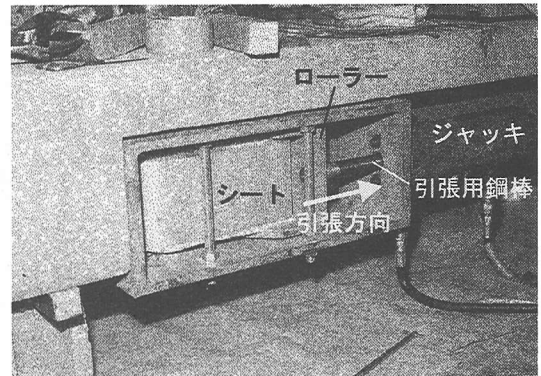
(a) 下地処理過程



(b) シートの端固定過程



(c) シート接着過程



(d) プレストレス導入過程

図-3 プレストレス導入過程

(4) プレストレス導入法

プレストレスの導入法は図-3に示されるように大きく分けて4つの過程がある。第一段階として、図-3(a)に示されるように、桁のウェブをディスクサンダーで表面処理した後にプライマーを塗り、約一日養生した。第二段階として、図-3(b)に示されるように、桁の一方の端部のみ接着剤でシートを貼り、板状の固定金具で桁にシートを挟み込み、ボルトで金具を固定した。この時、裏側のウェブ面のシートの固定も同時に行った。この固定端のシートが完全に接着した後、第三段階として、ウェブ全体に接着剤でシートを貼り付けた。また、接着剤の硬化前に、図-3(c)に示されるように、もう一方の端部に油圧ジャッキを取り付けるためのフレームを取り付けた。シートを固定するためにローラーにシートを巻き付け、ローラーが回転しないようにシートを巻き付けた後にローラーをストッパーで固定した。この方法で、導入するプレストレスの引張力に対してローラーに巻き付けられたシートの摩擦力で反力をとるようにしている。最終段階として、図-3(d)に示されるように、フレ

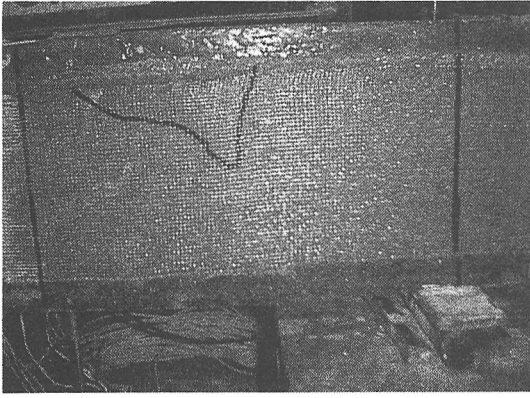
ームにセンターホールジャッキを取り付け、引張用鋼棒とローラーを連結させ、ローラーを引張ることによりシートにプレストレスを導入した。そのまま約一週間養生し、接着剤が硬化してシートが接着された後に、プレストレスの導入装置を外して直ちに実験を行った。

3. せん断補強筋を有さないRC部材のシートが受け持つせん断耐力の評価

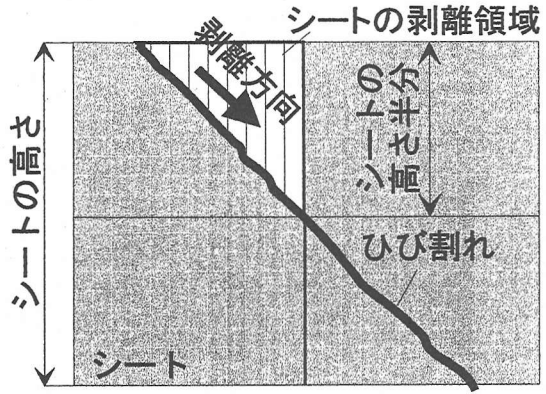
(1) シートの剥離過程

シート補強したRC部材の破壊過程の説明を図-4に示す。図-4(a)、(c)は連続繊維シートで補強したRC部材の破壊状況を示すもので、部材に設けたノッチからひび割れが入り、剥離がひび割れ上のシートの上縁から発生した後、シートの高さほぼ半分まで達したときに最大荷重を示して破壊した直後の状況である。その他の供試体のいずれもコンクリートの表面数mmからシートが剥離し、せん断破壊に至った。

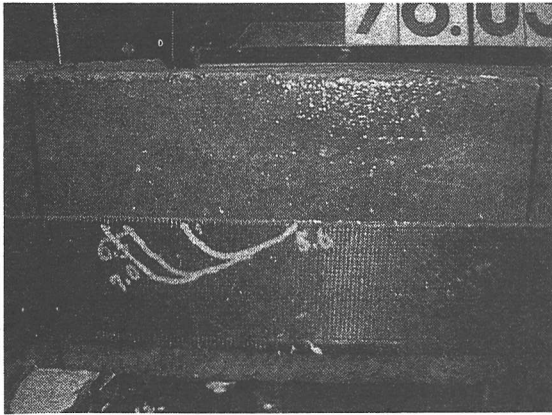
RC部材の破壊過程の概略を図-4(b)に示す。シート



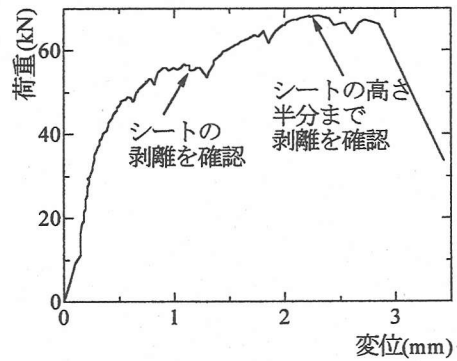
(a) 97-S-Aの破壊状況



(b) シートの剥離過程



(c) 97-S-C-Hの破壊状況



(d) 荷重-変位曲線 (97-S-C-H)

図-4 RC部材の破壊過程の説明

の白地に縦線部に囲まれた部分が剥離して、破壊に至った。また、図-4(a), (c)の写真にも示されるように、ひび割れが部材の上縁付近に達した後に、ほとんどの部材でひび割れが入った場所のシート上端部が最初に剥がれた。その後、徐々に剥離した部分の最上部は図-4(b)に示される矢印の方向に広がり、剥離した部分の最下部はひび割れに沿うように進展していった。そして、全ての部材は軸直角方向にみてシートの高さのほぼ半分のところで最大荷重に至ってその後破壊した。このような破壊形態は既往の研究³⁾でも示されている。

また、図-4(d)に図-4(c)に示した部材の荷重-変位曲線を示す。この図に示すとおり、荷重約55kNの時でシートの剥離を初めて確認している。しかし、シートの剥離を指の打音検査で確認しているため、シートの剥離開始時を正確にとらえるのが困難だったと思われる、その前に曲線の傾きが明らかに緩やかになっている50kN付近の点がシートの剥離開始時と思われる。

シートの剥離が確認された後、シートが一部剥がれることにより荷重が下がり、その後また荷重が上がり、再びシートの一部が剥がれると荷重が下がるという具合に、繰り返しが見られた。そして、シートの剥離がシートの高さ半分に達したとき、約68kNで最大荷重に達した。その後、しばらく最大荷重を保持していたが、剥離がそれ以上進んで、部材が破壊に至った。

シートは繊維方向のみに力を分担し、繊維方向外には力を分担できない。したがって、せん断ひび割れに対して抵抗する力を軸方向、軸直角方向に分解して考える。軸方向、軸直角方向の繊維と比べると、繊維の長さが短かい方が当然せん断ひび割れに抵抗する力が弱いと思われる。したがって、シートの剥離に関しては受け持てる力が弱く、早く剥離すると思われる軸直角方向のシートのみ考えればよいと思われる。

ひび割れ発生部分ではせん断力による引張力が作用しており、シートの上縁または下縁が最も抵抗する力が弱

いと思われる。しかし、下縁の方はさらに上に抵抗するシートがあるが、上縁はその上に抵抗するシートがないので、シートの上縁から剥離していくと思われる。また、シートの高さ半分で最大荷重を迎える理由としてはひび割れを挟んで常に短い方の付着長、つまり、抵抗する力の弱い方が剥離する。したがって、シートの高さ半分に達したとき、短い方の付着長が最大となるので、ここで最大荷重を迎えるものと思われる。

(2) せん断補強筋を有さないRC部材のシートが受け持つせん断耐力の評価

既報の研究¹⁾の一軸引張応力下の連続繊維シートとコンクリートの付着強さ算定式を式(1)に示す。

$$B_{cal} = (a_1 \cdot f_c^{2/3} + a_2) \cdot L_f \cdot E_f \cdot B_f \cdot t_f \times 10^{-6} \quad (\text{kN}) \quad (1)$$

ここで、 a_1 : AFSは2.6, CFSは2.9

a_2 : AFSは68.7, CFSは11.5

f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

E_f : シートの引張弾性係数(kN/mm²)

b_f : シートの幅(mm)

l_f : シートの付着長(mm)

t_f : シートの厚さ(mm)

L_f : $l_f \geq L_e$ の時, $L_f = L_e$

$l_f < L_e$ の時, $L_f = \alpha(l_f)$

$$\alpha(l_f) = l_f \cdot (3.11 - 0.0420l_f + 2.09l_f^2 \times 10^{-4})$$

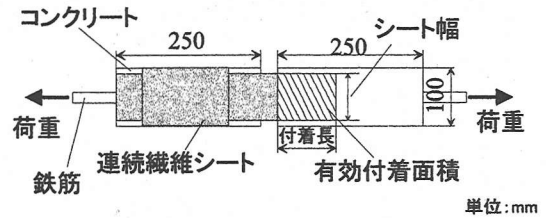
B_f : $b_f \geq 80$ の時, $B_f = b_f$

$b_f < 80$ の時, $B_f = \beta(b_f) \cdot b_f$

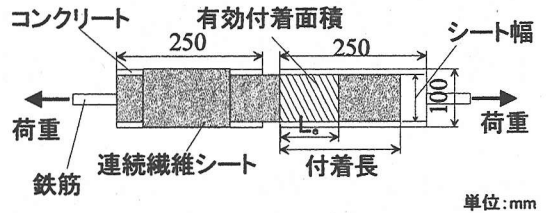
$$\beta(b_f) = 1.818 - 0.0102 \cdot b_f$$

この式(1)を算定したときの実験供試体を図-5に示す。この一軸引張応力下の供試体において、コンクリート部材同士の空間をひび割れと仮定している。また、左側をシートで巻いて補強しているので、右側のシートが剥離して供試体が破壊するようにしている。

本研究では、連続繊維シートとコンクリートの付着強さに有効的に効くシートの面積を有効付着面積と定義する。図-5(a)に示されるように、付着長が有効付着長 L_e 以下の場合、ちょうど剥離した面積が有効付着面積となる。また、付着長が有効付着長 L_e 以上の場合、既往の研究¹⁾でも触れているように、連続繊維シートとコンクリートの付着強さがほぼ一定になる。したがって、付着長が有効付着長 L_e 以上の場合、図-5(b)に示されるように、連続繊維シートとコンクリートの付着強さに寄与したシートの面積、つまり、 $b_f \times L_e$ が有効付着面積となる。



(a) $l_f < L_e$ の時の有効付着面積



(b) $l_f \geq L_e$ の時の有効付着面積

図-5 一軸引張応力下の供試体

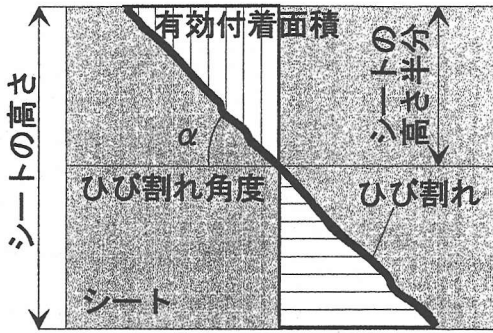
このように定義した有効付着面積をせん断ひび割れに対して同様に適用すると、シートが剥離した上半分に適用することになる。ただし、一軸引張応力下と同様に、有効付着長 L_e が存在すると思われるので、シートの付着長に当たるシートの高さの半分 $h_f/2$ が有効付着長 L_e 以上の場合と以下の場合で場合分けされる。

$h_f/2 < L_e$ の時、せん断耐力に寄与する有効的な面積は図-6(a)に示される縦線部の直角三角形と思われるので、このモデル実験において、高さがシートの高さの半分 $h_f/2$ 、底辺が $h_f/2 \cdot \tan \alpha$ の直角三角形をせん断ひび割れに対するシートの有効付着面積と定義した。

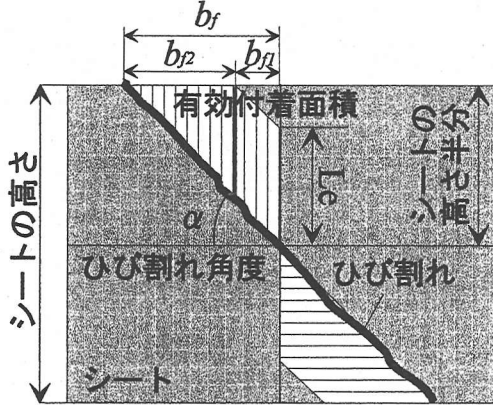
$h_f/2 \geq L_e$ の時、図-6(b)に示される縦線部の高さ $L_e \cdot \sin \alpha$ 、上辺が $(h_f/2 - L_e) / \sin \alpha$ 、下辺が $h_f/2 \sin \alpha$ の台形がその時の有効付着面積と定義した。

ただし、有効付着面積と定義された部分はシートが順次剥離しているため、終局状態まで荷重を受け持っているわけではない。図-6(a), (b)に示すとおり、シートの下半分の横線部の面積が、シートの上半分とほぼ同面積の有効付着面積が存在する。この下半分が最大荷重に達するまで剥離せずに残っているため、この部分で荷重を受け持っていると思われる。

これらの有効付着面積を式(1)に適用する場合、シートの付着長が含まれる L_f 、シートの幅が含まれる B_f にそれぞれ適用して、連続繊維シートとコンクリートの付着強さが求まる。これをトラス理論よりシートが受け持つせん断耐力 V_{fd} に表すと、 $h_f/2 < L_e$ の時は次式(2a)のようになる。また、 $h_f/2 \geq L_e$ の時、図-6(b)に示すよう



(a) $h_f/2 < L_e$ の時のせん断ひび割れに抵抗する有効付着面積



(b) $h_f/2 \geq L_e$ の時のせん断ひび割れに抵抗する有効付着面積

図-6 シートの剥離過程と有効付着面積の概略図

に、有効付着面積は直角三角形と平行四辺形に分けて算定すると次式(2b)のようになる。

$h_f/2 < L_e$ ($l_f < L_e$) の時

$$V_{fd} = \frac{\int_0^{h_f/2} B_{cal} \cdot dl_f}{h_f/2} \cdot \frac{z}{d}$$

$$= (a_1 \cdot f^{2/3} + a_2) \cdot \gamma(h_f) \cdot E_f \cdot B_f \cdot t_f \cdot \frac{z}{d} \times 10^{-6}$$

ただし、

$$\gamma(h_f) = h_f \cdot (0.778 - 3.50 \cdot h_f \times 10^{-3} + 6.53 \cdot h_f^2 \times 10^{-6})$$

と置き換えた。

$h_f/2 \geq L_e$ ($l_f \geq L_e$) の時

$$V_{fd} = \left[\frac{\int_0^{2 \cdot L_e/2} B_{cal} \cdot dl_f}{h_f/2} + 100 \cdot (a \cdot f^{2/3} + b) \cdot E_f \cdot B_{f1} \cdot t_f \times 10^{-6} \right] \cdot \frac{z}{d}$$

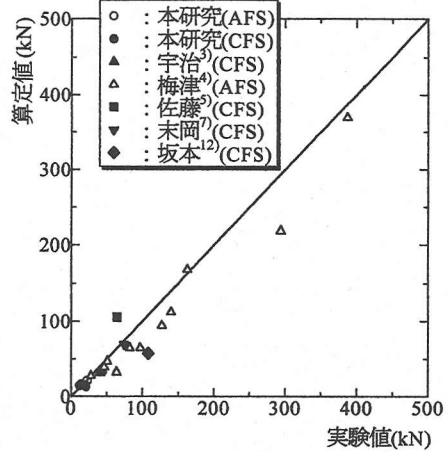


図-7 実験値と算定値の比較

$$= (a_1 \cdot f^{2/3} + a_2) \cdot [\gamma(2 \cdot L_e) \cdot B_{f2} + 100 \cdot B_{f1}] \cdot E_f \cdot t_f \cdot \frac{z}{d} \times 10^{-6}$$

(2b)

ただし、 $b_f = b_{f1} + b_{f2}$

$b_f \geq 80$ の時、 $B_{f1} = b_{f1}$ 、 $B_{f2} = b_{f2}$

$b_f < 80$ の時、

$B_{f1} = \beta(b_f) \cdot b_{f1}$ 、 $B_{f2} = \beta(b_f) \cdot b_{f2}$

また、ひび割れ角度 α は既往の研究¹⁰⁾により算定している。

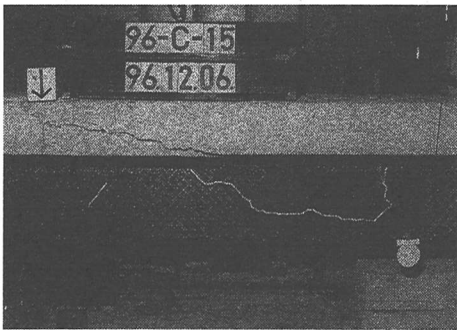
なお、せん断破壊パターンとしては一般にせん断圧縮および引張破壊の二つに分けられる。しかし、本研究の算定法は斜めひび割れに対する有効付着面積によるものであり、せん断圧縮および引張破壊に関係ないので、破壊パターンごとに分けずに算定ができるものとも思われる。

(3) 実験と算定の結果

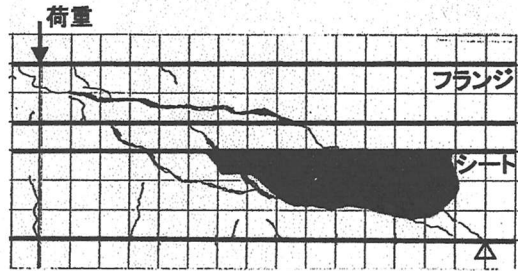
本研究の供試体はいずれも設けたノッチの先端から発生したせん断ひび割れによってシートの剥離後、せん断破壊した。また、シートによってRC部材を補強することにより、本研究に限らず、既往の研究でも、せん断耐力の向上が見られている。その時のシートが受け持つせん断耐力の実験値と本研究で提案した式(2a)、(2b)によって算定した値を比較したものを図-7と表-4に示す。これらの図と表に示されるとおり、一部大きく実験値を評価できていない部材もあるものの、シートによる耐力の向上分の算定は、本研究で提案した算定式によってほぼ評価できていると思われる。また、既往の研究は全て一方向連続繊維シートを軸直角方向に接着していた供試

表-4 本研究の実験値と算定値の比較

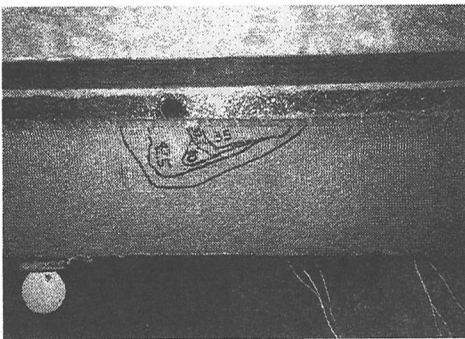
供試体名	シートの種類	ひび割れ角度	最大荷重 (kN)	シートによる耐力向上分 (kN)	
				実験値	算定値
96-S-N	-	-	16.8	-	-
96-S-A	AFS96	45.6	31.4	14.6	16.4
96-S-C	CFS96	45.6	28.5	11.7	14.3
97-S-N	-	-	47.6	-	-
97-S-A	AFS97	37.8	69.9	22.3	20.9
97-S-C	CFS97	35.9	91.7	44.1	33.3
97-S-N-H	-	-	48.3	-	-
97-S-A-H	AFS97	35.2	68.5	20.2	12.6
97-S-C-H	CFS97	34.2	68.2	19.9	15.2



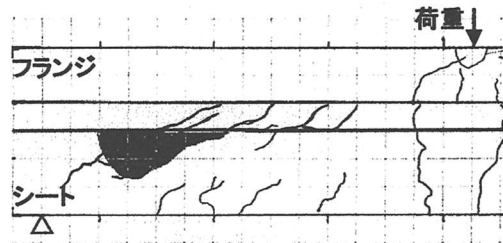
(a) 96-C-15の破壊状況



(b) 96-C-15 のシート剥離位置を重ねたひび割れ図



(c) 97-A-0の破壊状況



(d) 97-A-0のシート剥離位置を重ねたひび割れ図

図-8 桁のシート剥離後の破壊状況とシート剥離位置を重ねたひび割れ図

体の実験結果を使用している。

4. RC桁試験結果と考察

(1) 破壊パターン

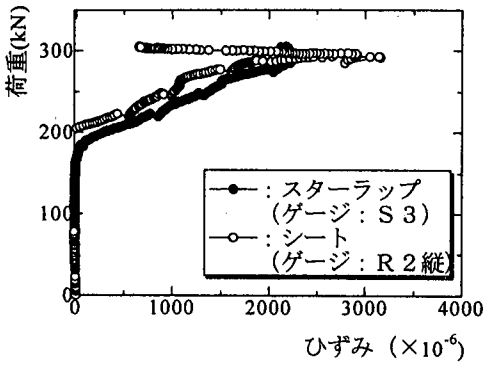
また、図-8に各桁のシート剥離後せん断破壊した状況の写真とシート剥離位置を重ねたひび割れ図を示す。図-8(a)では写真に示されるようにシートに黒い線で、図-8(c)は白い線で囲まれた部分のシートが剥離して、せん断破壊に至った。RC部材試験と同様に、破壊過程はひび割れが上フランジまで成長し、ひび割れが入った場所のシート上端部がまず剥がれだし、軸直角方向に見てシートの高さ半分のところで最大荷重に至り、桁が破壊

した。図-8(b), (d)のひび割れ図と図-6(a), (c)に示される有効付着面積とほぼ同様な形状となった。

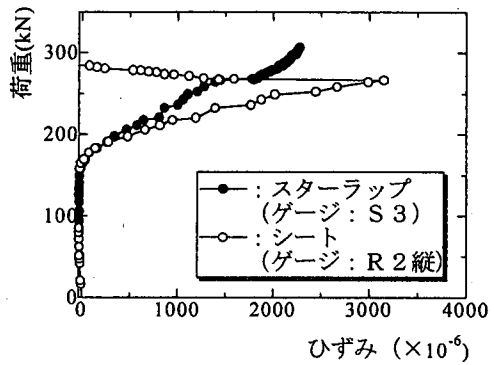
(2) せん断耐力の算定法

本研究ではシート接着したせん断耐力 V をコンクリートのみが受け持つせん断耐力 V_{cd} 、スターラップが受け持つせん断耐力 V_{sd} 、シート剥離時にせん断破壊する場合のシートが受け持つせん断耐力 V_{fp} の3つに分けて算定を行い、式(3)に示す。

$$V = V_{cd} + V_{sd} + V_{fp} \quad (3)$$



(a)96-A-0



(b)96-C-0

図-9 シート (ゲージ: R 2 軸直角方向) とスターラップ (ゲージ: S 3) のひずみ比較

式(3)の各項は、 V_{cd} は既往の研究¹⁾をもとに軸方向力を考慮した場合の係数 β_{nl} をかけている。 V_{sd} はトラス理論により算定している。

$$\beta_{nl} = \sqrt{1 + \sigma'_{nd}/f_{td}} \quad (4)$$

ここで、 σ'_{nd} : 軸方向による平均圧縮応力(N/mm²)

f_{td} : コンクリートの引張強度(N/mm²)

ただし、プレストレス力は一様に分布していると仮定して、 σ'_{nd} を算定している。

ゲージ位置R 2の軸直角方向のシートのひずみ、それとほぼ同位置のスターラップのひずみS 3を比較したものを図-9に示す。ゲージ位置R 2は桁によって多少の差はあるものの、有効着面積としているシート高さ半分に位置にある直角三角形の頂点に一番近い場所に位置するゲージである。この図に示されるように、スターラップが降伏する地点、スターラップのひずみで言うならば、 2000×10^6 を越えた地点でシートが剥離している。まだまだ実験数が少ないので、はっきりしたことが言えないがシートとスターラップを併用した場合、スターラップの降伏により桁の変形が極端に進むときにシートはその変形を受け持つことができずに剥離してしまうと思われ、シートの能力が全て使われていない。また、図-9ではシートのひずみが 3000×10^6 を越えてから剥離しているが、シートのひずみが 2000×10^6 の時の荷重とシートが剥離した時の荷重を比較すると、ほとんど増加していない。このことからスターラップの降伏とほぼ同時にシートも荷重の増分を受け持たなくなったのではないかと思われる。シートが受け持つせん断耐力式 V_{sf} は(2a)、(2b)と既往の研究¹⁾のシートがコンクリートの表面から剥離するときのひずみ、式(6)のシートの付着限界ひずみより、次式で得られる。

$$V_{sf} = \frac{\epsilon_{sy}}{\epsilon_{pf}} \cdot V_{fd} \quad (5)$$

ここで、 ϵ_{sy} : スターラップ降伏時のシートのひずみ (本研究では 2000×10^6 としている)

ϵ_{pf} : シートの付着限界ひずみ

$$\epsilon_{pf} = (b_1 \cdot f_i + b_2) \times 10^{-6} \quad (6)$$

ここで、 b_1 : AFSの時、1390 CFSの時、1230

b_2 : AFSの時、2730 CFSの時、824

f_i : コンクリートの引張強度(N/mm²)

スターラップが降伏した後、シートはそれまでスターラップが受け持っていた荷重増加分を受け持つことになると思われる。降伏後、スターラップが分担できる荷重の増分がほとんど0になると考えると、スターラップの補強筋量が十分に大きい場合、シートが分担することとなる荷重増加分が過大になり、シートの分担できる荷重を大きく越えてしまい、シートが剥離して破壊すると思われる。

ただし、スターラップの補強筋量が少ない場合、スターラップの降伏と同時にシートの荷重分担能力を超えず、シートの剥離が起きないので、シートはその付着の能力を十分に発揮すると思われる。その時のシートが受け持つせん断耐力はスターラップを有しないRC部材と同じ式(2a)、(2b)で算定が可能と思われる。

式(5)と式(2a)、(2b)の適用範囲であるが、本研究では明確な範囲を特定するには至っていないので、今後の課題と思われる。ただし、本研究で得られた結果の一つの指標としての考察を次に述べる。

表-5に本研究のせん断ひび割れに抵抗するスターラップの鉄筋量とシート量を示す。 A_{wr} はひび割れに抵抗するスターラップの断面積で、 A_{fr} はひび割れに抵抗する

表-5 せん断ひび割れに抵抗するスターラップの鉄筋量 A_{wr} とシート量 A_f

供試体名	ひび割れ角度 $\alpha^{10)}$	A_{wr}	A_f	$n \cdot A_f$	$n \cdot A_f / A_{wr}$
96-C-0	31.1	108.4	76.7	92.8	0.856
96-C-15	31.4	107.2	75.8	91.7	0.856
96-A-0	29.2	117.0	106.4	45.8	0.391
96-A-15	29.3	116.6	106.0	45.6	0.391
97-A-0	26.1	133.5	142.5	52.0	0.390

表-6 桁の実験値と算定値

単位 (kN)

供試体	最大荷重 [実験値]	シートによる増減 [実験値]	シートによる増減 [計算値]	プレストレスによる増減 [実験値]	プレストレスによる増減 [計算値]	破壊パターン
96-N-0	294	-	-	-	-	S
96-C-0	307	13	15.2	-	-	PS
96-C-15	328	13	15.2	21.0	17.2	PS
96-A-0	305	11	10.3	-	-	PS
96-A-15	327	11	10.4	22.0	17.0	PS
97-N-0	409	-	-	-	-	S
97-A-0	428	19	11.9	-	-	PS

S : せん断破壊, PS : シート剥離後せん断破壊

表-7 既往の研究の実験結果と算定結果

供試体名	シートの種類	シートの弾性係数 (kN/mm ²)	コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)	最大荷重 [実験値] (kN)	シートによる増減(kN) [実験値]	シートによる増減(kN) [算定値]
N10 ⁶⁾	-	-	30.4	247.6	-	-
N10-E100S ⁶⁾	CFS	433	30.4	272.1	24.5	26.8
N-N-S ⁷⁾	-	-	32.4	207.9	-	-
R1-N-S ⁷⁾	CFS	200	32.4	225.6	17.7	24.0

シートの断面積で、 $n \cdot A_f$ は A_f を鉄筋の断面積に換算した値である。それぞれ次の式で表される。

$$A_{wr} = \frac{A_w \cdot z}{s \tan \alpha} \quad (7)$$

ここで、 A_w : 1組のスターラップの断面積(mm²)

s : スターラップの配置間隔(mm)

$$A_f = \frac{t_f \cdot z}{\tan \alpha} \quad (8)$$

$$n = \frac{E_w}{E_f} \quad (9)$$

この表に示されるように、 $n \cdot A_f / A_{wr}$ がCFSでは0.856以下、AFSでは0.390以下では式(5)を使用して算定が可能と思われる。

(3) 実験値と算定値の比較

本研究の実験値と算定値を表-6に示す。また、既往の研究の実験値と算定値を表-7に示す。プレストレス増減とはプレストレスをシートに導入することによって桁の耐力が増加した分を示しており、 β_{nu} による V_{cd} の増加

分である。

これらの表に示されるように、シートによる耐力の増加分、プレストレス力による耐力の増加分は今回提案した算定式により本研究、既往の研究共にほぼ評価可能であると思われる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) スターラップの有無に関わらず、部材の側面に連続繊維シートを接着するした場合、耐力の向上がみられ、せん断補強効果が期待できる。

(2) スターラップを有さない部材については耐力の向上分に寄与するせん断ひび割れに対しての有効付着面積を求めて、付着強さの簡易算定式に適用することにより、実験値のシートによる耐力向上分を評価できた。

(3) スターラップを有する部材に対しては、スターラップが降伏して部材の変形が進むときに、連続繊維シートとコンクリートの付着力が全て発揮される前にコンクリートの表面からシートが剥離すると思われる。

(4) 接着したシートにプレストレス力を導入した場

合、コンクリートと定着させることが必要条件であるが、せん断補強効果が期待できる。また、プレストレスト力による耐力の向上分を本研究で提案した算定式により評価できた。

謝辞:本研究に際し、ご助力を得たショーボンド建設(株)の江口和雄氏および日本高圧コンクリート(株)の秦滋康氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 出雲健司, 佐伯昇, 大沼博志: 連続繊維シートとコンクリートの付着強さの算定, 土木学会論文集, 第641号/V-46, pp.167-178, 2000.
- 2) 出雲健司, 浅水俊博, 佐伯昇, 志村和紀: アラミドおよび炭素連続繊維シートの付着特性, コンクリート工学論文集, 第9巻, 第2号, pp.1-7, 1998.
- 3) 宇治公隆: シート状炭素繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート部材のせん断耐力向上効果に関する研究, コンクリート工学論文集, 第3巻, 第2号, pp.37-47, 1992.
- 4) 梅津健司, 藤田学, 中井裕司, 玉置一清: アラミドシートにより補強したRCはりのせん断性状, (社)日本コンクリート工学協会北海道支部新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文集, pp.125-132, 1996.
- 5) 佐藤靖彦, 田中高行, 上田多門, 小野定: RCはりの側面に貼り付けた炭素繊維シートによるせん断補強効果, (社)日本コンクリート工学協会北海道支部新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論

文報告集, pp.133-140, 1996.

- 6) 加藤博文, 児島孝之, 高木宣章, 濱田譲: 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートはりのせん断補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第18巻, 第2号, pp.101-106, 1996.
- 7) 末岡英二, 佐野清史, 眞嶋光保, 岡野寛: 炭素繊維シートによるはり部材のせん断補強効果について, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.944-945, 1996.
- 8) 関島謙蔵, 木暮明仁, 鈴木秀門, 大塚靖: FRPプレートを緊張材に用いたPC補強工法に関する研究, 清水建設研究報告, 第62号, pp.115-123, 1995.
- 9) Meier, U., Dearing, M., Meier, H. and Schwegler, G.: Strengthening of Structures with CFRP Laminates, Research and Application in Switzerland, Canadian Society of Civil Engineering, 1992.
- 10) 佐伯昇, 高田宣之, 藤田嘉夫: ねじり荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の耐力, 土木学会論文集, 第390号/V-8, pp.123-130, 1988.
- 11) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp.167-176, 1986.
- 12) 坂本桂理, 田村悟士, 末岡英二, 眞嶋光保: 連続繊維シート接着によるRC部材のせん断補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集第20巻, 第3号, pp.1279-1284, 1998.

(1999.5.12 受付)

ESTIMATING SHEAR STRENGTH OF RC AND PRC MEMBER WITH FIBER SHEETS

Kenji IZUMO, Noboru SAEKI and Hiroshi OHNUMA

We experimented with RC members which had limited the shear crack position with notch to estimate shear strength of RC members with fiber sheets. In these experiments, we investigated effective bond area of fiber sheets which contributed to shear strength. It is possible to estimate the improvement of the RC member with the fiber sheets by applying effective bond area to the equation of bond strength between the fiber sheet of the research by which we reported. Moreover, we investigated the effect of shear strengthening of RC beams with fiber sheets and the effect of prestressed force introduced into a part of fiber sheets. As results of these experiments, the effect of shear strengthening by fiber sheets and prestressed force was clarified. Moreover, the experiment value can be estimated by the calculation.