

論文 炭素繊維を用いた梁のせん断補強効果に関する研究

武内 康裕^{*1}・幸左 賢二^{*2}・松本 茂^{*3}・橋場 盛^{*4}

要旨：炭素繊維シートによる T 型 RC 橋脚梁部のせん断補強を行うための RC 梁のせん断補強実験を行った。本論では、炭素繊維シート 4 面巻き立てを施したせん断破壊先行型の RC 梁のせん断補強実験結果から、せん断補強効果の定量化とコンクリートの斜め引張破壊の進展に伴う炭素繊維シートの抵抗メカニズムを明らかにした。その結果、シート巻き立て幅の違いによらず、ひび割れ幅とコンクリートが受け持つせん断補強耐力 V_c の相関が確認され、巻き立て幅が大きいほど V_c の低下が抑制され、せん断補強効率は向上することがわかった。

キーワード：せん断補強効果、炭素繊維シート、せん断ひび割れ、せん断抵抗メカニズム

1. はじめに

本研究は T 型 RC 橋脚の梁部のせん断補強を対象に、炭素繊維シート（以下、CF シートと称する）によるせん断補強効果に着目した検討を行う。

CF シートにより補強した RC 棒部材のせん断補強効果および耐力の評価方法はこれまで多くの研究者や学会、委員会等による組織的な検討も行われており、いくつかの設計基準や指針にまとめられ運用されている^{1)~2)}。この中では、柱の耐震補強に着目したものが数多く含まれ、CF シートのせん断補強比 ρ_f も 0.025~0.30% まで幅広い範囲で評価されている。そのため、供試体の破壊形態も CF シートが剥離後に破断する斜め引張せん断破壊のみならず、高補強比に伴う曲げ破壊先行のせん断破壊やコンクリートの圧縮破壊が混在しているが、破壊モードの区別なく回帰されている³⁾。本実験で対象としている T 型 RC 橋脚梁部の実際のせん断補強比は $\rho_f=0.04\%$ 程度であり、既往の検討範囲の下限値付近に相当するとともに、せん断破壊モードを想定している。

したがって、本稿では、CF シート 4 面巻き立てを施したせん断破壊先行型の RC 梁のせん断

補強実験を行い、CF シートのひずみやコンクリートのせん断ひび割れの進展状況を詳細に計測することにより、せん断補強効果の定量化とコンクリートの斜め引張破壊の進展に伴う CF シートの抵抗メカニズムについて述べる。

2. 実験概要

2.1 供試体形状

実験供試体は図-1 に示すように、T 型の RC 橋脚の梁部を単純梁に置き換える。対象断面は支承箇所での A-A 断面～D-D 断面中で、作用力 $G1 \sim G4$ に対して曲げモーメントおよびせん断力の余裕が最も小さく、道路橋示方書に記載されている照査断面位置に最も近い A-A 断面としている。また、対象橋脚の梁部は断面の上段に合計 18 本の PC 鋼線を有する PC 部材であり、実験供試体は PC の軸力を考慮して初降伏時の曲げ耐力が等価になる RC 単純梁に置き換え、供試体のせん断スパン比はディープビームの影響が混在しないように $a/d=2.5$ としている。また、供試体耐力は実橋の引張主鉄筋比 ($\rho_t=1.90\%$) と同等となるように $\rho_t=2.03\%$ とした。供試体断面は、表-1 に示すように、CF シートのせん断補強後も供試体がせん断破壊し、

*1 九州工業大学 大学院工学研究科 建設社会工学専攻 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 教授 Ph.D. (正会員)

*3 阪神高速道路公団 神戸管理部 工修 (正会員)

*4 ㈱オリエンタルコンサルタンツ 関西支社 工博 (正会員)

かつ釣り合い鉄筋比を超えない範囲で A-A 断面の 1/8 スケールとした。以上により決定した供試体形状を図-2 に示す。

表-1 に実験ケースを示す。ここで、CF シートの巻き立て量は幅を 50mm~100mm まで変化させ、何れのケースも設計上の破壊形態はせん断破壊型となる。なお、表-1 の中で、コンクリートのせん断耐力 V_c と CF シートの補強せん断力 V_{cf} はそれぞれ土木学会の指針³⁾に基づいて算出している。

2.2 供試体の製作および実験方法

供試体は材齢 21 日まで湿布養生を施した。シートの貼り付けは材齢 28 日において行い、貼り付け面にエポキシプライマーを塗布含浸させ、シートの繊維方向が梁軸方向と直角になるようにし、シートを緊張しない状態で周囲に巻き付け、接着用含浸樹脂によって接着した。なお、シートの重ね合わせ長さは梁の圧縮側となる上面で 300mm とし、十分な定着長さを確保している。また、折り曲げによるシートの強度低下を小さくするために、供試体断面の四隅のコーナー部に、半径 $R=20\text{mm}$ のハンチを設けて面取りを施している。

載荷実験は材齢 35~43 日で実施し、静的な 2 点集中対称載荷とした。なお、コンクリートの圧縮強度は載荷日強度で補正している。実験中の荷重の測定はロードセルによって行い、たわみの鉛直変位は図-2 に示すように、スパン中央、載荷点および支点との間に変位計を設置した。また、ひずみゲージは図-2 に示す主鉄筋と低せん断補強比 ($\rho_t=0.05\%$) でせん断耐力への影響が少ない D4 スターラップ筋 (以下ダミー鉄筋と称す) の他に、本実験では、せん断ひび割れが入る位置で CF シートのひずみを測

定する為に、ダミー鉄筋と同一側面箇所にひずみゲージを貼り付けている。ゲージの設置に当たり、図-2 右下に示すように剥離前・剥離後もシート自体の測定が可能で、CF シート挙動に影響しない小さい範囲の測定箇所にシートとコンクリート間でフィルターの挿入を行い、付着を縁切りしている。また、デジタルカメラを設置し、載荷状態のコンクリートのひび割れ幅を画像処理により計測した。一方、使用した CF シートは表-2 に示すように、目付量が 200g/m^2 (設計厚さ 0.11mm , 引張強度 4840N/mm^2 , 弾性係数 $2.53\times 10^5\text{ N/mm}^2$) のもので、主鉄筋 (D25: 降伏強度 381.5N/mm^2 , D22: 降伏強度 389.2N/mm^2) には、それぞれ SD345 の異形棒鋼を使用した。なお、使用したコンクリートの試

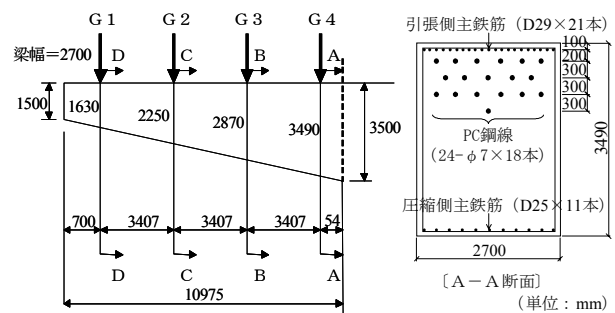


図-1 対象橋脚梁部

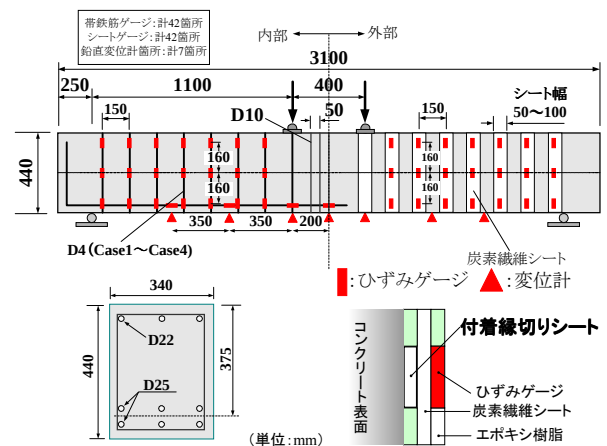


図-2 供試体形状とひずみゲージ計測位置

表-1 実験供試体諸元一覧

実験ケース	シート幅 (mm)	間隔 (mm)	曲げ耐力 $P_{yo}(\text{kN})$	補強 せん断耐力 $V_{cf}(\text{kN})$	コンクリート せん断耐力 $V_c(\text{kN})$	せん断耐力 $V=V_c+V_{cf}$ (kN)	P_{yo}/V	補強 比率 (%)	破壊形態
Case1	無補強	0	302.0	0.0	131.0	131.0	2.305	0.000	せん断破壊
Case2	50	150	302.0	81.3	131.0	212.3	1.423	0.022	せん断破壊
Case3	75	150	302.0	122.0	131.0	253.0	1.194	0.032	せん断破壊
Case4	100	150	302.0	162.6	131.0	293.6	1.029	0.043	せん断破壊

験時材齢における圧縮強度は 28.4～31.4 N/mm²である。

3. 実験結果および考察

3.1 CF シートのせん断補強耐力と補強効率

図－3 に無補強供試体（Case1）と補強供試体（Case2～Case4）の鉛直荷重－鉛直変位関係を示す。また、表－3 に各ケースの最大耐力とせん断補強耐力の実験結果を示す。実験の結果、最大荷重は無補強供試体（Case1）において 420kN、補強供試体 Case2～Case4 において、それぞれ 547, 719, 790kN となり、補強により最大荷重はそれぞれ 127, 299, 370kN 増加する結果が得られた。したがって、4 面ゼブラ巻きの CF シート補強によるせん断耐力は 2 点载荷を考慮し、最大耐力の増加分、すなわち補強耐力の 1/2 とする。その結果、補強せん断耐力は Case2～Case4 のそれぞれに対し、63, 150, 185kN となる。表－3 には、併せてせん断補強効率 α を示しているが、せん断補強効率 α は補強せん断耐力の実験値を設計値で除することにより算出した。ここで、補強せん断耐力の設計値はトラス理論を用いて式(1)により算出した。

$$V_{cf} = \frac{A_w \times F_{wyd} \times (\sin \theta + \cos \theta) \times d}{1.15 \times s} \quad (1)$$

ここに、

V_{cf} : 炭素繊維シートの補強せん断耐力

A_w : 炭素繊維シート断面積

F_{wyd} : シートの破断強度 (=4840N/mm²)

d : 供試体有効高さ

s : 炭素繊維シート配置間隔

θ : 炭素繊維シートと部材のなす角度

ここで、CF シートの引張強度 4840N/mm²を

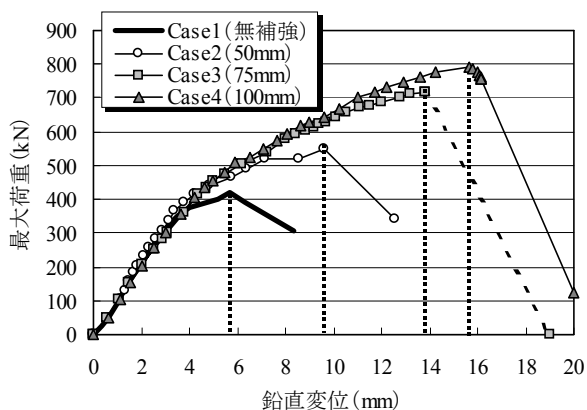
用いて CF シートのせん断補強効率 α を算出すると、表中に示すように、補強比率によってせん断補強効率にバラツキがあるものの、Case2～Case4 の各ケースでそれぞれ 0.548, 0.862, 0.799 となった。

3.2 せん断ひび割れと破壊性状

図－4 (a)～(d)に、それぞれ無補強供試体（Case1）と補強供試体（Case2～Case4）について、最大荷重時のひび割れ図を示す。図－5 に示すデジタルカメラ（400 万画素相当）画像を、画像診断支援ソフトによりひび割れ幅（小数第 2 位の精度）を測定し、複数本のひび割れの中から、ひび割れ幅の大きい主要なひび割れとダミー鉄筋の最大ひずみ分布を参考に特定し、ひび割れ角度を算出した。

表－2 使用材料と材料試験結果

コンクリートの圧縮強度		28.4～31.4 N/mm ²
コンクリートの割裂強度		3.40～4.03 N/mm ²
引張主鉄筋降伏強度(D25)		381.5 N/mm ²
圧縮鉄筋降伏強度(D22)		389.2 N/mm ²
プライマー付着強度（エポキシ）		1.5 N/mm ²
レジン引張強度（エポキシ）		29 N/mm ²
CF シート	引張強度	4840 N/mm ²
	引張弾性率	2.53×10 ⁵ N/mm ²



図－3 鉛直荷重－鉛直変位関係

表－3 最大耐力とせん断補強耐力結果

供試体	CF シート幅(mm)	補強比率(%)	最大荷重(kN)	補強耐力(kN)	補強せん断耐力 V_{cf}		せん断補強効率 α
					実験値(kN)	設計値(kN)	
Case1	無補強	0.000	419.8	—	—	—	—
Case2	50	0.022	546.6	126.8	63.4	115.7	0.548
Case3	75	0.032	718.9	299.1	149.6	173.6	0.862
Case4	100	0.043	789.7	369.9	185.0	231.5	0.799

まず、無補強供試体の Case1 は鉛直荷重 350kN で初期せん断ひび割れが供試体中央部および下端部付近から発生し、その後せん断ひび割れが進展し、420kN で最大荷重に達してせん断破壊に至った。なお、主要なひび割れ角度は 30° であり、最大荷重時の最大ひび割れ幅はひび割れ中央部で 2.2mm である。

一方、補強供試体 (Case2~Case4) はそれぞれ鉛直荷重 350, 450, 475kN で初期せん断ひび割れが中央付近から発生し、続いてそれぞれ鉛直荷重 420, 490, 590kN でせん断ひび割れの進展とともに、シートの剥離が生じ始めた。最終的に Case2 (50mm 巻立て) の場合、547kN で最大荷重に達し、載荷点から 2~5 列目までの 4 本の CF シートが次々に破断してせん断破壊に至った。図-6 に Case2 の最大荷重時における CF シートのひずみ分布を示す。これによると、最初に破断した載荷点から 4 列目の中段のみ破断ひずみ (19130μ) に達しており、他のひずみゲージは破断ひずみに達していない。これは本実験のように、CF シートをゼブラ状に巻き立てる場合、抵抗するシート全体が破断強度に達して最大荷重に達するのではなく、ある列のシートが破断ひずみに達し、破断現象が発生し、その後、シートが連鎖的に破断する破断形態であるためと考えられる。

一方、Case3 (75mm 巻立て) の場合、最大荷重 719kN に達した後、次の載荷中 690kN に 1 本目が破断し、さらに次の載荷中 660kN に 2 本目が破断した。このように Case3 の場合、1 本目が破断した後、荷重の再配分により、2 本目以降は最大荷重に達する前に次のシートが破断し、せん断破壊に至る破壊形態であった。同様に、Case4 (100mm 巻立て) の場合、最大荷重 790kN に達した後、次の載荷中、最大荷重に達する前の 701kN で載荷点から 1~5 列目までの 5 本のシートが同時に破断し、破壊に至った。

また、補強供試体の場合、ひび割れ角度は Case2~Case4 で $30^\circ \sim 27^\circ$ 程度であり、無補強供試体の Case1 と比べてほぼ同等である。なお、

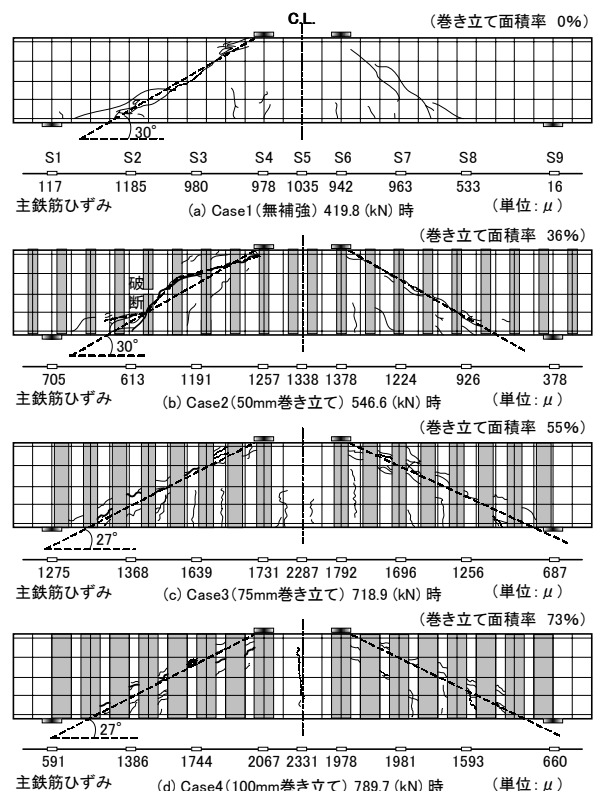


図-4 ひび割れと破壊性状 (最大荷重時)

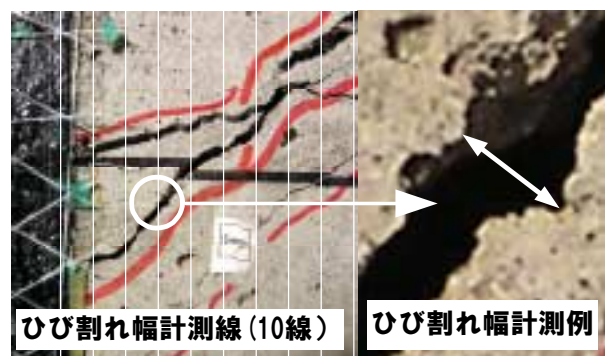


図-5 ひび割れ計測例

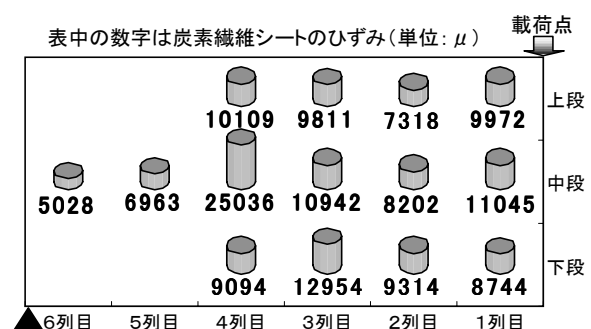


図-6 シートひずみ分布
(Case2 最大荷重時)

最大荷重時のせん断ひび割れ中央部における平均ひび割れ幅は Case2~Case4 でそれぞれ 3.3(mm), 2.6(mm), 1.4(mm)であり、CF シート

の巻き立て幅が大きくなるにつれてひび割れ幅は小さくなる傾向であった。

3.3 CF シートのせん断抵抗メカニズム

載荷荷重の増加に伴うせん断ひび割れの進展により、せん断ひび割れ位置でせん断ずれに抵抗できなくなったシートがコンクリート表面から付着切れ、すなわちシートの剥離が始まる。シートの剥離の進展状況は図-7 に示すように、せん断に対して抵抗する 5 本のシートのうち、中央付近からシートの剥離が始まり、これはせん断ひび割れの発生箇所と一致している。その後、荷重およびせん断ひび割れの進展とともに、シートの高さ方向と隣のシートに剥離が進展していき、最大荷重状態ではせん断抵抗する 5 本のシートのほぼ全体に渡って剥離が生じている。

図-8 に Case2～Case4 について、シート変位とひび割れ幅関係を示す。まず、シート変位については、シートの剥離長さとひずみから算出したものをシート変位とした。ひび割れ幅は、シートに最も近い箇所の値を用い、図-5 に示すような数本のひび割れが計測線上に存在した場合、線にかかるひび割れ幅の総和の値を用いた。図-8 より、ひび割れ幅の進展に、シートの伸びが追従する傾向で、シートとひび割れ幅の関係は 1:1 に近い挙動が得られる。これよりシート変位とひび割れ幅はシート幅に依存せず一定の関係であることが確認できる。

3.4 せん断力の分担割合とせん断耐力の評価

図-9 には、Case1～Case4 に対してコンクリートが受け持つせん断耐力 V_c と供試体梁中央の鉛直変位の関係を示している。ここで、最大荷重時にコンクリートが受け持つせん断力 V_c を求めることを目的に、実験で得られた最大荷重の 1/2 を部材が受け持つせん断力 V から、CF シートが受け持つせん断力 V_{cf} を差し引くことにより、式(2)により V_c を算出した。また、CF シートが受け持つせん断力 V_{cf} はせん断ひび割れに抵抗する 5 本のシートについて、荷重ステップごとに各シートの中で最大ひずみを用いてシートの引張力を求め、トラスモデルを仮定し、

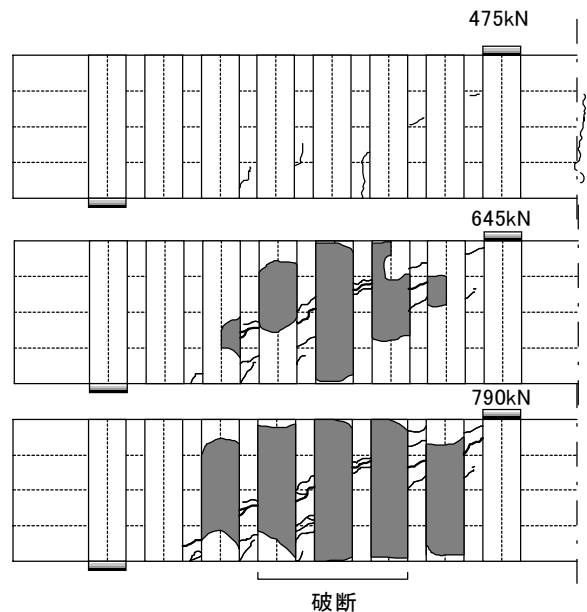


図-7 シートの剥離進展状況 (case4)

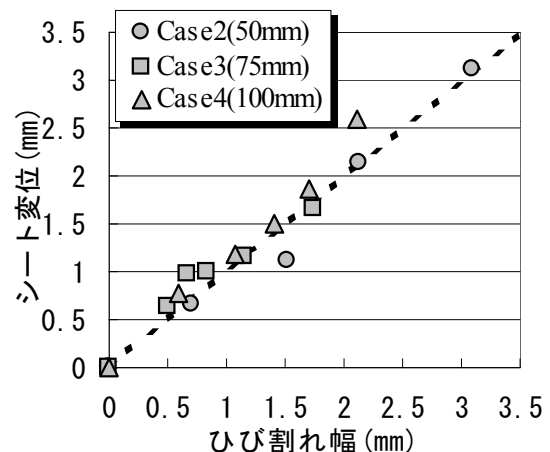


図-8 シート変位とひび割れ幅関係

式(3)によりせん断抵抗する 5 本分のシートを合計することにより算出した。ダミー鉄筋の寄与分もシートの同様に考慮した。

$$V_c = V - V_{cf} \quad (2)$$

$$V_{cf} = \sum_{i=1}^n (2 \times \varepsilon_{cfi} \times E_{cf} \times A_{wi}) \quad (3)$$

ここに、

V : 部材が受け持つせん断力

V_c : コンクリートが受け持つせん断力

V_{cf} : 炭素繊維シートが受け持つせん断力

ε_{cfi} : 炭素繊維シートの最大ひずみ

E_{cf} : 炭素繊維シートの弾性係数

A_{wi} : 炭素繊維シート断面積

n : 載荷点から n 列目のシート ($n=6$)

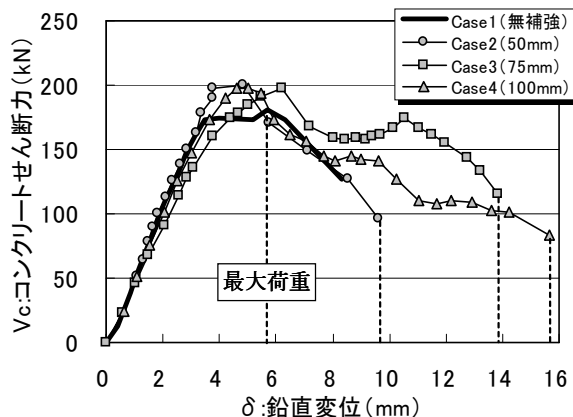


図-9 コンクリートの負担するせん断耐力

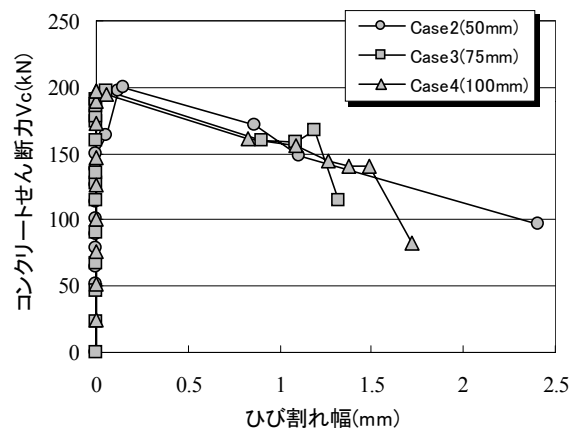


図-10 V_c とひび割れ幅の関係

図-9 によると、Case2～Case4 ともコンクリートが受け持つせん断力 V_c の最大値は無補強供試体 Case1 とほぼ同等の値が得られており、CF シートの補強せん断耐力の評価として各補強ケースの最大荷重から、無補強 Case1 の最大荷重を差し引くことで評価が可能であると考えられる。また、Case2 は V_c が低下し始める勾配のままで最大荷重に達しているのに対して Case3、Case4 では、 V_c の低下し始めて最大荷重に達するまでの勾配が緩やかである。これは補強量増加に伴い、せん断抵抗に対する拘束効果が高くなったことで、 V_c の低下が緩和され、補強効率が向上したものと考えられる。そこで、各供試体におけるコンクリート耐力とひび割れ幅の関係を図-10 に示す。ここでひび割れ幅は、せん断ひび割れ全範囲で主要ひび割れ幅の平均値を用いた。これより、差異は大きいですが、Case2～Case4 ともシートの巻き立て幅によらず、 V_c とひび割れ幅の間には一定の関係が得られ、ひび割れ幅が大きくなるに従い、 V_c は低下する。したがって、せん断ひび割れ中央部では補強量増加に伴い、ひび割れ幅は小さくなっていることから、CF シートの巻き立て量増加で拘束効果が大きい Case3 と Case4 は、Case2 と比べてひび割れ幅が小さくなり、 V_c の低下が抑制される。

4. まとめ

(1) CF シートによるせん断破壊型の梁の載荷実験の結果、最大荷重時にシート全体が破断ひずみに達するのではなく最大荷重後にシートが連鎖的に破断する破壊形態である。また、

せん断ひび割れ以降コンクリートの負担するせん断力 V_c が低下する。これらの理由により、トラス理論を仮定して算出したせん断補強効率が 100%有効とならないものの、55～86%程度のせん断補強効果が確認された。

- (2) コンクリートのせん断破壊の進展に伴う CF シートの抵抗メカニズムとして、まず、せん断ひび割れ発生後にシートの剥離・ひずみの進展が生じ、その後、せん断抵抗するシート全体が剥離した状態で最大荷重に達する。また、シート幅が大きい方がせん断ひび割れ幅とその進展を小さくするように制御できている。
- (3) CF シートの巻立て幅の違いによらず、ひび割れ幅と V_c の相関が確認され、巻き立て幅が大きいほど、 V_c の低下が抑制され、せん断補強効率は向上する。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架柱の耐震補強工法.設計施工指針，1996.7
- 2) 丸山久一：委員会報告「連続繊維補強コンクリート研究委員会報告」，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20, No.1, pp.1-10, 1998.6
- 3) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，pp.23-29，pp.301-308，2000.3