

炭素繊維シートによるRC梁のせん断補強効果と抵抗メカニズム

The effect of shear strengthening and its resistance mechanism of RC beams with carbon fiber sheets

阿部弘典*, 幸左賢二**, 田崎賢治***, 松本 茂****

Hironori Abe, Kenji Kosa, Kenji Tasaki Shigeru Matsumoto

*学生会員 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

***正会員 工修 大日本コンサルタント(株) 九州支社 構造技術部 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東 2-5-19)

****正会員 工修 阪神高速道路公団 神戸管理部 (〒650-0041 神戸市中央区新港町 16-1)

To estimate shear strength of RC beams reinforcing by carbon fiber sheets, 5 types of tests were conducted. As results of these experiments, the effect of shear strengthening and its efficiency by carbon fiber sheets was clarified. It was also found that the shear resistance was related to bond area of carbon fiber sheets which contributed to shear strength.

Key Words : Shear strengthening, Carbon fiber sheets, Mechanism of shear resistance, Efficiency of shear strengthening.

キーワード: せん断補強, 炭素繊維シート, せん断抵抗メカニズム, せん断補強効率

1. はじめに

従来, 半永久的に強度や耐久性を有するとされてきたコンクリート構造物の劣化や損傷が近年見受けられるようになり, 補修や補強の必要性が迫られるようになってきている. このような中, 補強工法の一つとして, 補修(物質遮蔽)効果と補強(引張力負担)効果を兼ね備えた炭素繊維シートを既存のコンクリート構造物に接着する工法が盛んに行われている.

現在までに, 炭素繊維シートにより補強されたコンクリート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)~3)}. また, 指針の中では, 図-1に示すように炭素繊維シートの補強比が増加するにしたがって, 補強効率が低下するということが示されている^{4)~6)}. しかし, これらのデータの中には柱の耐震補強に着目したものも含まれており, せん断スパン比も 1.0~2.5 と幅広い範囲で評価されている. また, 供試体の破壊形態も, 炭素繊維シートの高補強比に伴う曲げ破壊先行型のせん断破壊や, コンクリートの圧縮破壊が混在しており, 評価の対象としたデータの中で純粋に斜め引張せん断破壊したデータは少ない.

したがって, 本研究では, 炭素繊維シートによるゼブラ状の 4 面巻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, 炭素繊維シートのひずみやコン

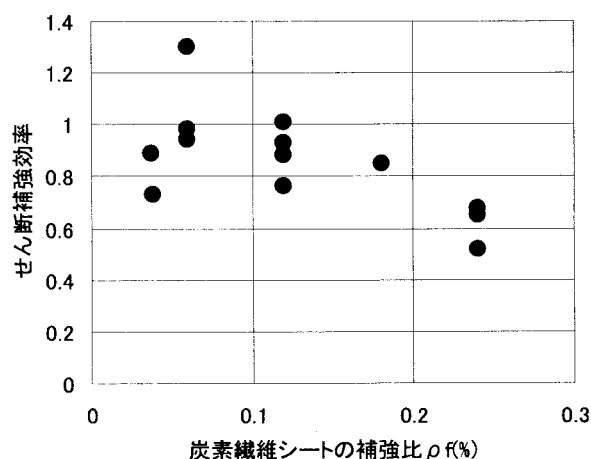


図-1 炭素繊維シートの補強比とせん断補強効率

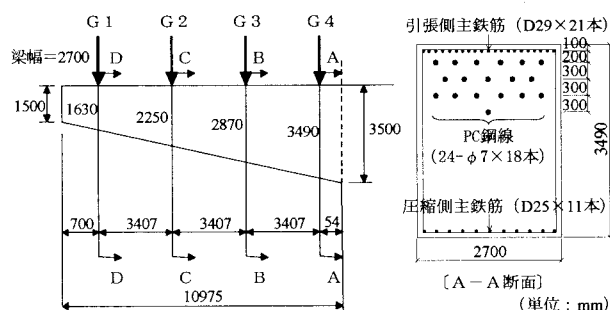


図-2 対象橋脚梁部

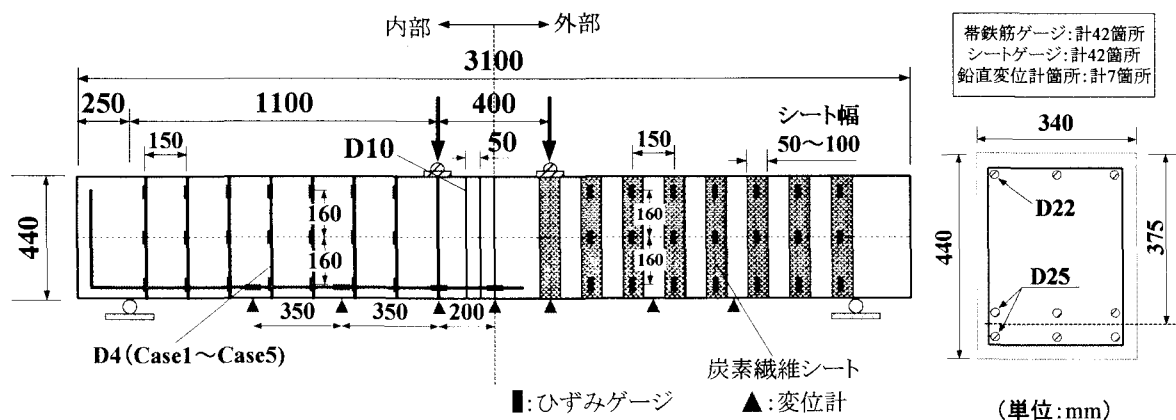


図-3 実験供試体

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 Pyo (kN)	補強 せん断 耐力 (kN)	コンクリート せん断 耐力 (kN)	せん断耐力 V (kN)	Pyo/V	補強比率 (%)	破壊形態
Case1	無補強	0	302.0	0	131.0	131.0	2.30	0.000	せん断破壊
Case2	50	150	302.0	81.3	131.0	212.3	1.42	0.022	せん断破壊
Case3	75	150	302.0	122.0	131.0	253.0	1.19	0.032	せん断破壊
Case4	87.5	150	302.0	142.3	131.0	263.3	1.07	0.038	せん断破壊
Case5	100	150	302.0	162.6	131.0	293.6	1.02	0.043	せん断破壊

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、せん断補強効果およびコンクリートのせん断破壊の進展に伴う炭素繊維シートの抵抗機構を明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

2.1 供試体形状

実験供試体は図-2に示すようなT型のRC橋脚の梁部を単純梁に置き換えた。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～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いA-A断面とした。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部材であるため、まず、実橋を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、次に、実験供試体の主鉄筋比 ρ_t は、置き換えたRC梁の主鉄筋比($\rho_t=1.90\%$)と同等となるように2.03%とし、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 $a/d=2.5$ とした。供試体断面は、表-1に示すようにA-A断面の1/8スケールとし、炭素繊維シートによるせん断補強後も供試体がせん断破壊し、かつ主鉄筋比は釣り合い鉄筋比を超えない範囲としている。また、実橋では、アルカリ骨材反応による劣化が生じておりスターラップが破断していることを想定し、低せん断補強比($\rho_s=0.05\%$)でせん断耐

表-2 使用材料と材料試験結果

コンクリートの圧縮強度		28.4～31.4N/mm ²
コンクリートの割裂強度		3.40～4.03N/mm ²
引張主鉄筋降伏強度(D25)		381.5N/mm ²
圧縮鉄筋降伏強度(D22)		389.2N/mm ²
プライマー付着強度(エポキシ)		1.5N/mm ²
レジン引張強度(エポキシ)		29N/mm ²
炭素繊維シート	引張強度	4840N/mm ²
	弾性係数	2.53×10 ⁵ N/mm ²
	シート厚さ	0.111mm
	繊維目付	200g/m ²

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）をシートと同間隔で配置している。以上により決定した供試体形状を図-3に示す。

一方、表-1に実験ケースを示す。ここで、炭素繊維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と炭素繊維シートによる補強せん断耐力は、それぞれ土木学会の補修補強指針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、シートは全て1層貼り付けとなっている。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 $R=20\text{mm}$ の面取り加工を施している。

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を採用している。実験中の荷重の測定はロードセルによって行い、鉛直変位は、スパン中央、載荷点および支点との間に変位計を 7 箇所設置して計測した。また、ひずみゲージは図-3 に示す主鉄筋とダミー鉄筋の他に、本実験では、せん断ひび割れが入る位置で炭素繊維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はひずみゲージを貼り付けている。使用したコンクリートおよび炭素繊維シートの物性値を表-2 に示す。軸方向鉄筋 (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。

3. 実験結果

図-4 に、各供試体の最大荷重時における破壊性状を示す。図より、何れの供試体も破壊形態は斜め引張せん断破壊となっており、炭素繊維シートで補強した供試体については、最大荷重付近で載荷点から 1～5 列目のシートのほぼ全域が剥離した後、2～4 列目のシートが次々と破断した。なお、剥離したシートにはコンクリートの表層部が付着していた。また、補強供試体の場合、ひび割れ角度は $25^\circ \sim 31^\circ$ 程度であり、無補強供試体の Case1 と比べてひび割れ角度が小さくなっており、ひび割れも分散する傾向にあった。

図-5 に示す荷重－変位曲線によると、各ケースともほぼ同様の挙動を示しているため、補強後の供試体の最大荷重から無補強供試体の最大荷重を差し引くことで、補強耐力の評価が可能であると考えられる。したがって、4 面ゼブラ巻きの炭素繊維シート補強によるせん断耐力は 2 点載荷を考慮し、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 ～Case5 のそれぞれに対し、63.4kN, 149.6kN, 142.5kN, 185.0kN となる。

4. せん断抵抗機構とせん断耐力の評価

4.1 炭素繊維シートのせん断抵抗機構

(1) 炭素繊維シートのひずみと剥離過程

各ケースの炭素繊維シートのひずみと剥離面積の関係を図-6 に示す。なお、炭素繊維シートには図-3 で示すように、各列にそれぞれ上、中、下段の 3 箇所にひずみ

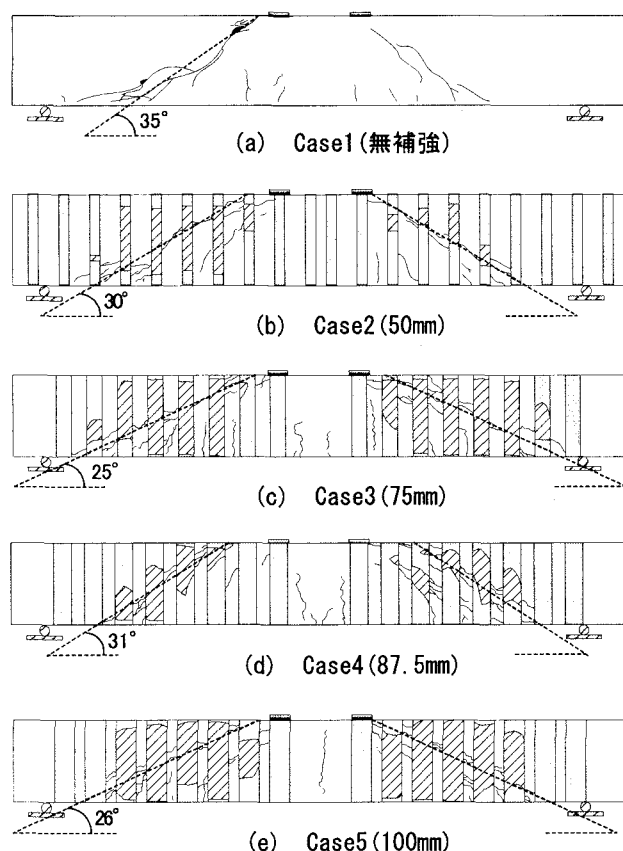


図-4 各供試体の破壊性状 (最大荷重時)

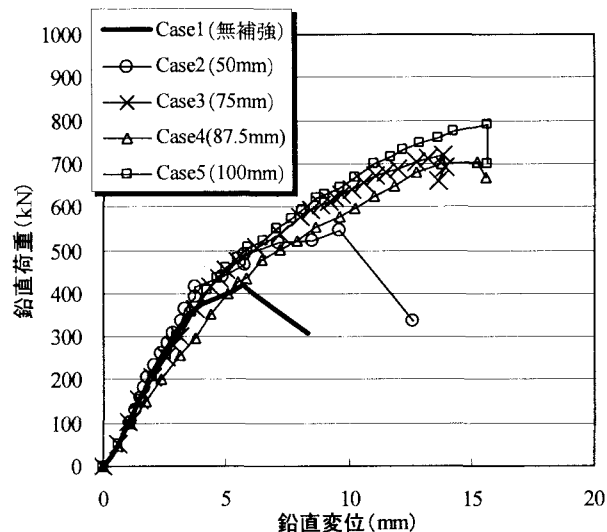


図-5 鉛直荷重－鉛直変位関係

ゲージを貼付しているが、ここでは各荷重ステップごとに得られた 1～5 列目のシートのひずみの最大値を平均することにより算出している。これによると、各ケースともシートの剥離が進展する際にはシートのひずみが 4000μ 程度で停滞し、シートの剥離面積が全体の 60% 程度に達すると再びシートのひずみが進展する傾向にある。

次に、Case5 を例に各荷重ステップごとにおける 1～5 列目のシートのひずみの進展状況を図-7 に示す。ここ

で、シートのひずみの値は上、中、下段の3箇所のひずみの中で最大値をプロットしている。これによると、図-6と同様に各列のシートともひずみの値が 4000μ 程度で停滞する領域が存在する。そのため、この領域においてシートの剥離が進展しているものと考えられる。また、各列のシートで比較すると、3列目のシートのひずみの進展が最も早く鉛直荷重 350kN 付近からひずみが発生しているが、その他の列のシートは鉛直荷重 450kN 付近からひずみが進展しており、3列目のシートから離れた位置にあるシートほどひずみの進展が遅くなっていることが分かる。ここで、図-8および図-9にシートのひずみの進展が最も早い3列目のシートと、最も遅い1列目のシートに着目したひずみの分布状況を、図-10の(a)~(e)にシートの剥離の進展状況と併せて示す。これによると、まず、鉛直荷重 490kN 時には(a)のように供試体中央部でせん断ひび割れが発生するため、せん断ひび割れに最も近い3列目のシートの中段位置でひずみが 3000μ 程度発生している。なお、この時点では1列目のシートにはせん断ひび割れは到達しておらず、ひずみもほとんど発生していない。鉛直荷重 590kN 時には、(b)のように3列目のシートの中段位置で剥離が生じ、せん断ひび割れも供試体の上端部から下端部にまで到達している。それに伴い、剥離箇所およびせん断ひび割れ発生付近のシートのひずみが進展している。 629kN 時になると、(c)のように1列目のシートの上段においても剥離が確認され、ひずみも 4000μ 程度生じている。また、2列目および3列目のシートでは、剥離がシートの上下方向に進展しているが、中段のひずみは 4000μ 程度で停滞したままとなっている。 666kN 時になると、(d)のように3列目のシートのほぼ全域が剥離しており、上、中、下段のひずみの値は何れも 4000μ 程度となっている。また、1列目のシートでも剥離が下方向へ進展しているが、その際、上段のひずみは 4000μ で停滞したままとなっている。 776kN 時になると、1列目から5列目までのシートのほぼ全域が剥離し、せん断に対してシートの付着で抵抗できなくなるため、再びシートのひずみが進展し始める。最終的に、鉛直荷重 789kN 時には図-9のように、3列目のシートの下段のひずみが 12000μ 程度発生し、シートが破断に至った時点で最大荷重となる。

このように、シートの剥離が進展している間はシートのひずみが停滞する理由として、シートの付着抵抗領域の移動が原因であると考えられる。シートが剥離する以前は、せん断に対してシートの付着で抵抗することになるが、シートが剥離し始めるとせん断に対して付着で抵抗できなくなるので、剥離した領域に作用する付着応力がゼロとなる。そのため、剥離した領域が負担していたせん断力を、剥離していない領域で負担することとなり、図-10の(b)~(d)に示すように付着抵抗領域の移動、つまり、シートの剥離が進展する。これは既往の研究^{7), 8)}でも明らかとなっている。また、付着抵抗領域が移動す

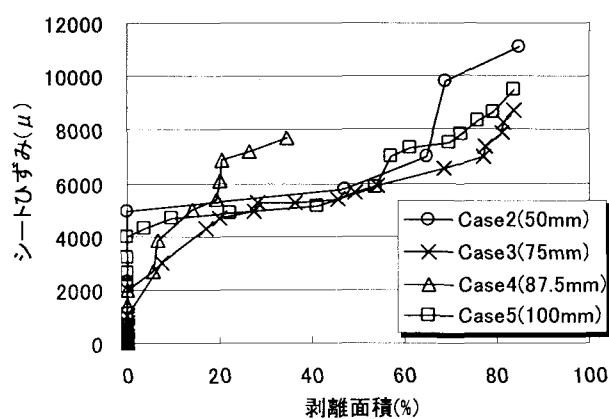


図-6 シートのひずみと剥離面積の関係

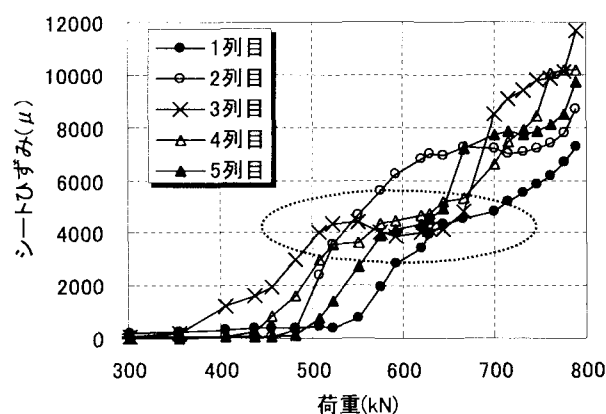


図-7 各列のシートのひずみの進展状況 (Case5)

る現象は、シートのほぼ全域が剥離するまで繰り返されるため、剥離が進展する間はシートのひずみが進展しない結果となる。

また、各列のシートのひずみの進展状況が異なる理由として、前述した付着抵抗領域の移動とせん断ひび割れの発生位置が関係していると考えられる。シートの剥離は何れの列のシートにおいてもせん断ひび割れ付近から発生している。そのため、1列目のシートは図-10の(c)に示すようにシートの上段部で剥離した後、付着抵抗領域は下方向にのみ移動することになるが、3列目のシートは図-10の(b)で示すようにシートの中段部で剥離し始めるため、その後は付着抵抗領域がそれぞれシートの上下方向へ移動することになる。つまり、3列目のシートは1列目のシートに比べて付着抵抗領域が短くなるため、剥離の進展も早くなる。その結果、3列目のシートのひずみの進展が他の列に比べて早くなると考えられる。

(2) 炭素繊維シートが負担するせん断力

炭素繊維シートが負担するせん断力 V_{cf} は、せん断ひび割れが横切る5本のシートを対象に式(1)より算出した。なお、シートのひずみには各荷重ステップ毎の最大値を用いている。また、全てのシートが同時に破断強度に達すると仮定した場合の、シートが負担するせん断力の理論値 V_{cf} を式(2)より算出した。

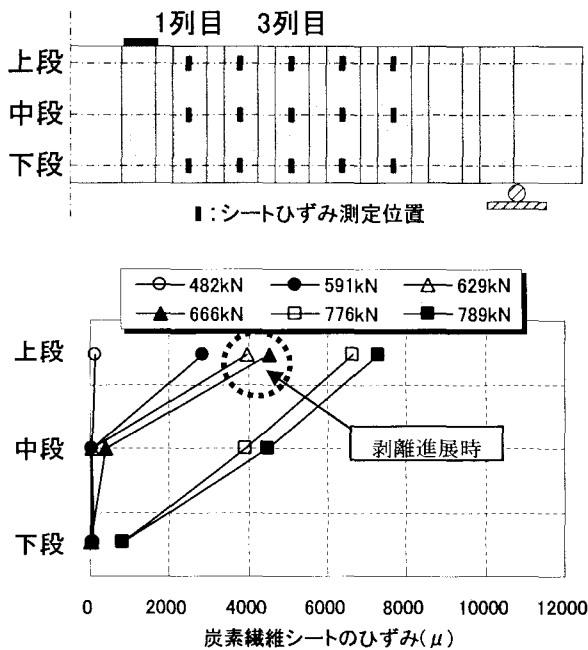


図-8 炭素繊維シートのひずみ分布 (1 列目 : Case5)

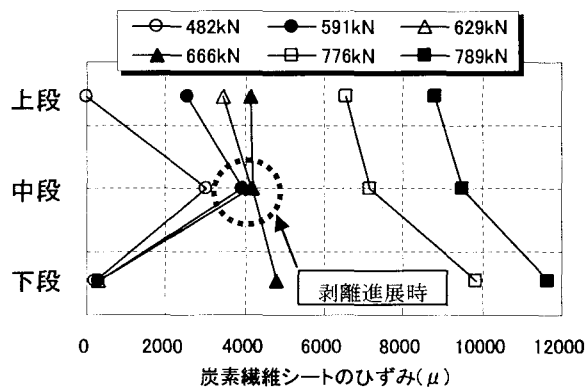


図-9 炭素繊維シートのひずみ分布 (3 列目 : Case5)

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

$$V_{cf}' = \sum_{i=1}^n (2 \times f_{wydi} \times A_{wi}) \quad (2)$$

ここに,

V_{cf} : 炭素繊維シートが負担するせん断力

V_{cf}' : シートが負担するせん断力の理論値

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} : 炭素繊維シートの断面積

n : 載荷点から n 列目のシート

f_{wydi} : 炭素繊維シートの破断強度

式(1)により算出した最大荷重時における各列のシートが負担するせん断力を、Case5 を例に図-11 に示す。また、図中には V_c と V_{cf}' の値を併記している。これによると、各列のシートに作用する引張力は均等ではなく、中央のシートに作用する引張力が最も大きく、載荷板と支承板に近いシートほど作用する引張力が小さくなる。

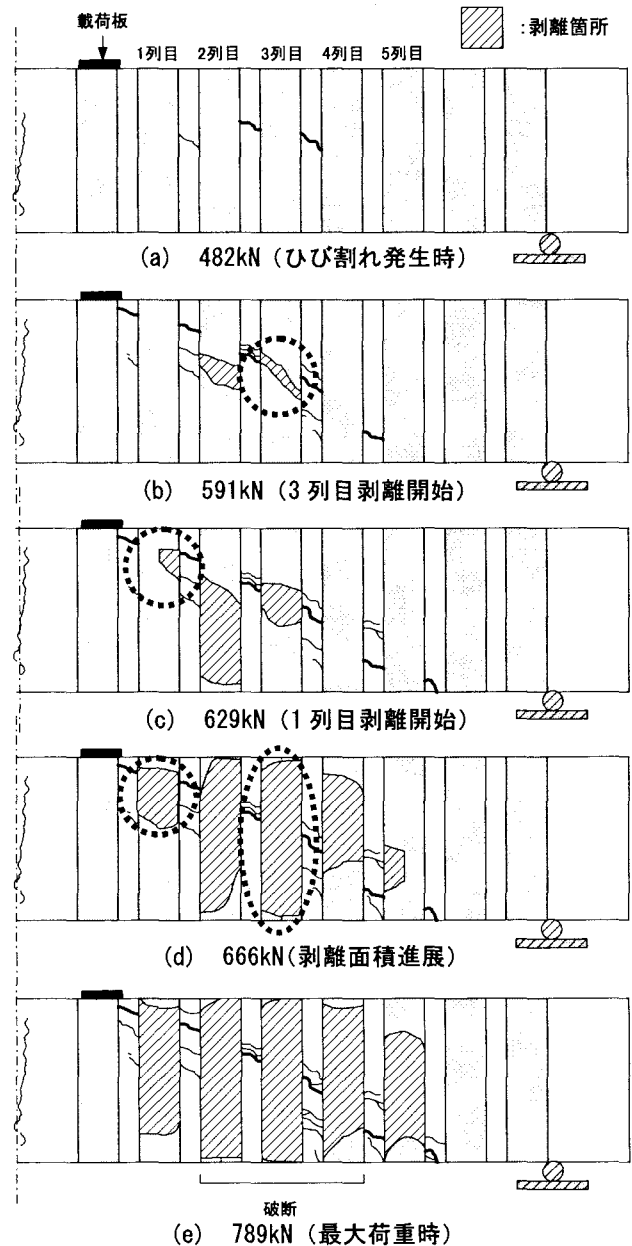


図-10 炭素繊維シートの剥離進展状況 (Case5)

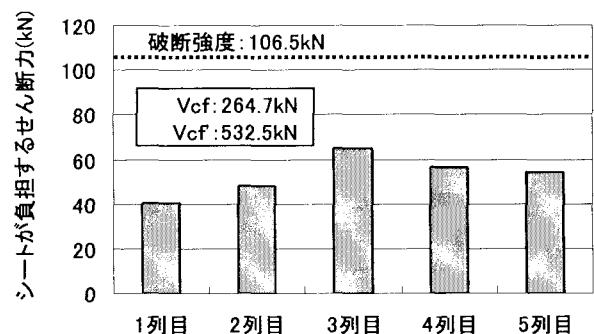


図-11 各列のシートが負担するせん断力 (Case5)

これは、前述したようにシートのひずみの進展状況が異なるためである。また、一般にコンクリート部材に貼られたシートの強度は破断強度よりも低下すると言われており⁹⁾、今回行った実験においても、最大荷重時に最も

せん断力を負担する3列目のシートでも破断荷重には達していない結果となる。これは、供試体の変形やずれなどによりシートに均一な荷重が作用しないこと、また、剥離したシートには供試体表面のモルタルが付着しているが、この影響でシートの剛性が変化したこと、また、隅角部の面取り半径の影響⁵⁾などが原因であると考えられる。

4.2 ダミー鉄筋のせん断抵抗機構

Case1, Case2 および Case5 のダミー鉄筋のひずみと鉛直荷重の関係を図-12 に示す。なお、ダミー鉄筋のひずみは炭素繊維シートの場合と同様の手法を用いて算出しており、図中にはシートのひずみも併記している。図より、ダミー鉄筋のひずみは、何れのケースにおいても、最大荷重以前に降伏ひずみ 1800μ を越える結果となっている。また、シートの補強量が増加するに従って、シート、ダミー鉄筋、ともにひずみの進展が緩やかになっている。したがって、シートで補強することによって、ダミー鉄筋の負担が軽減されていることが分かる。

4.3 コンクリートのせん断抵抗機構

(1) ひび割れ幅の進展状況

次に、コンクリートのせん断抵抗機構を、ひび割れの進展状況と負担するせん断力の割合から検討する。まず、ひび割れ幅の測定方法は図-13 に示すように、供試体の上、中、下段の3箇所のひび割れ発生箇所にデジタルカメラ（400 万画素相当）を設置し、載荷状態でのひび割れ幅の記録を行った。その後、図-14 に示すように、撮影した画像に計測線を10線設定し、各荷重ステップ毎に計測線を横切るひび割れ幅を、画像診断支援ソフトを用いて合計30箇所測定した。評価方法としては、計測線を横切る複数のひび割れ幅の中から、最もひび割れ幅の大きい主要なせん断ひび割れを特定し、30箇所の平均値を用いている。図-15 に測定したひび割れ幅-鉛直荷重関係を示す。これによると、シートで補強した供試体は何れも無補強供試体に比べてひび割れ発生荷重が増加していることが分かる。また、各ケースとも初期せん断ひび割れが供試体中央部で発生後、ひび割れ幅が1mm程度に進展するまでの曲線の傾きはほぼ同等の値となっており、割れが供試体中央部で発生後、ひび割れ幅が1mm程度に進展するまでの曲線の傾きはほぼ同等の値となっているが、その後はCase3を除いて補強量が増加にしたがってひび割れ幅の進展が緩やかとなり、最大ひび割れ幅も抑制されることが分かる。これは、補強量が増加すると、シートの拘束効果が向上することにより同一鉛直荷重時における変形量が小さくなること、また、図-4の破壊性状で示したように、補強後の供試体には初期に発生した斜めせん断ひび割れ以外にも複数のせん断ひび割れが発生しているため、1本あたりの斜めせん断ひび割れ幅が抑制されたためであると考えられる。

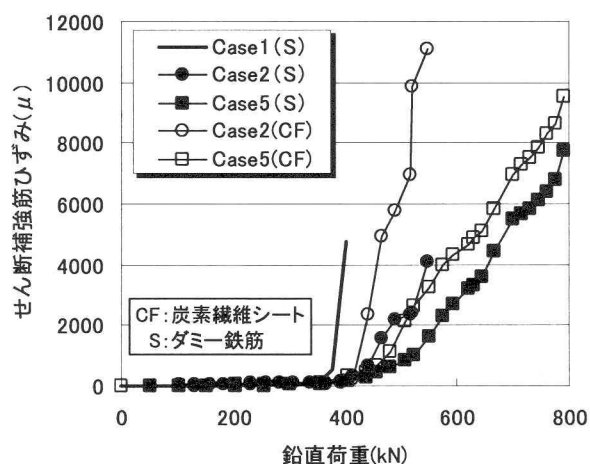


図-12 ダミー鉄筋のひずみの進展状況

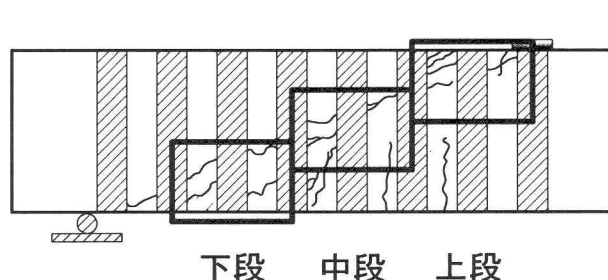


図-13 デジタルカメラによるひび割れ撮影箇所

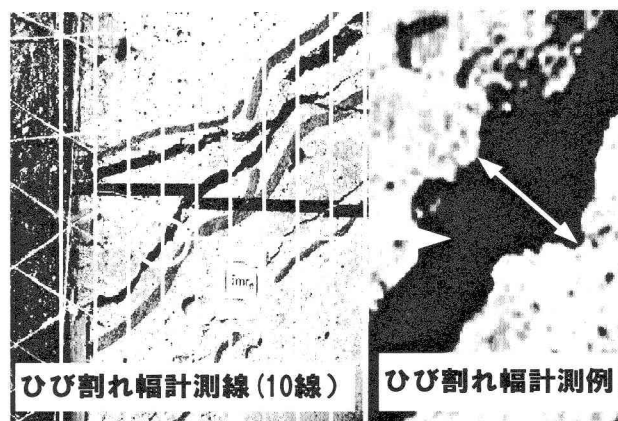


図-14 ひび割れ幅計測例

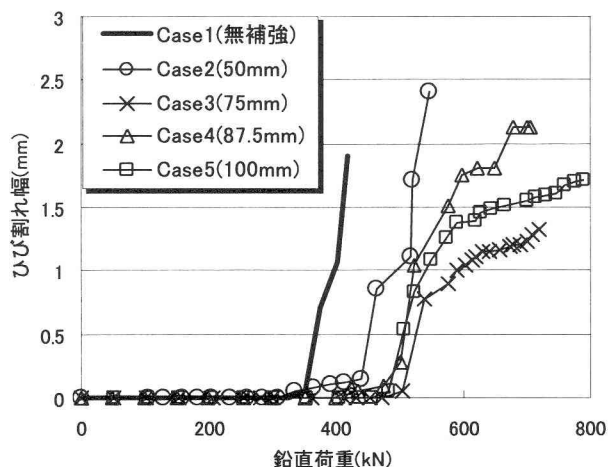


図-15 せん断ひび割れ幅-鉛直荷重関係

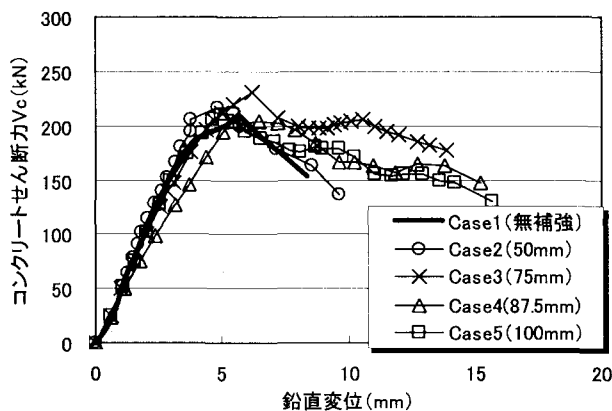


図-16 V_c と鉛直変位の関係

(2) コンクリートが負担するせん断力

コンクリートが負担するせん断力 V_c は式(3)より、実験で得られた最大荷重の 1/2 から式(1)で得られた V_{cf} を差し引くことで算出する。なお、供試体にはダミー鉄筋を配置しているが、炭素繊維シートと同様に負担するせん断力を算出すると、何れのケースにおいても 20kN 程度となり、無補強供試体のせん断耐力の 1 割程度であることから、せん断耐力に与える影響は小さいと考え考慮せずに算出した。図-16 に V_c と鉛直変位の関係を示す。

$$V_c = V - V_{cf} \quad (3)$$

ここに、

V : 部材が受け持つせん断力

V_c : コンクリートが負担するせん断力

図-16 によると、各ケースとも鉛直変位 5mm 程度で V_c の値は最大値となっており、その後は変形の増加に従って V_c の値が低下している。これは、ひび割れ幅の進展に伴って、骨材の噛み合わせなどによるせん断伝達力が低下したためと考えられる。また、補強量が増加すると V_c の低下勾配は緩やかになる傾向にあるが、Case3 の場合は Case4, 5 に比べてさらに低下勾配が緩やかとなっている。これは、図-4 の破壊性状によると、Case3 のみ 6 列目のシートにおいても剥離が確認されているため、合計 6 本のシートがせん断力を負担していると考えられるが、 V_{cf} は 5 本のシートを対象として算出しているため、 V_{cf} を過小評価した可能性が考えられる。また、 V_c とひび割れ幅の関係を図-17 に示す。これによると、 V_c とひび割れ幅との間には、補強量の違いによらず一定の関係が得られており、ひび割れ発生時において V_c の値は最大値となり、その後はひび割れ幅が大きくなるに従って V_c は低下している。したがって、図-15 で示したように、補強量が増加するとシートの拘束効果が向上し、ひび割れ幅の進展が抑制されるため、 V_c の低下が抑制されたと考えられる。

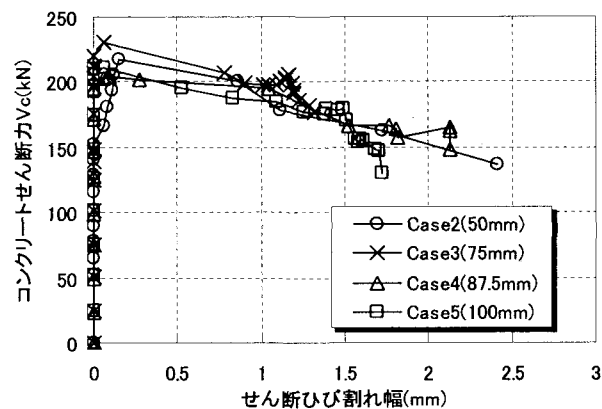


図-17 V_c とひび割れ幅の関係

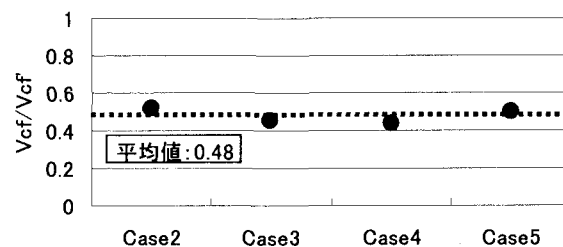


図-18 炭素繊維シートの有効率

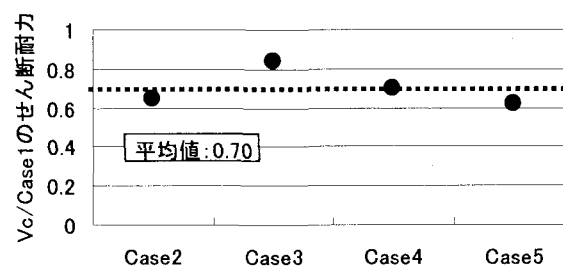


図-19 コンクリートの有効率

5. せん断耐力の評価

4 章で示したように、炭素繊維シートは破断強度に達する以前に破断しており、コンクリートもひび割れ発生以降負担するせん断力が低下する結果となっている。そのため、最大荷重時において各部材がどの程度有効に働いているか検討する。図-18 に、炭素繊維シートの有効率を、図-19 に、コンクリートの有効率をそれぞれ示す。なお、シートの有効率は式(1)で与えられた V_{cf} を式(2)で与えられる V_{cf} で除すことにより算出し、コンクリートの有効率は、式(3)で与えられた V_c を無補強供試体 (Case1) のせん断耐力で除すことにより算出している。これらによると、炭素繊維シートは平均で 0.48、コンクリートは平均で 0.70 となっている。以上より、炭素繊維シートで補強されたコンクリート梁のせん断耐力を、式(4)により評価することとした。

$$V = 0.48V_{cf}' + 0.70V_c \quad (4)$$

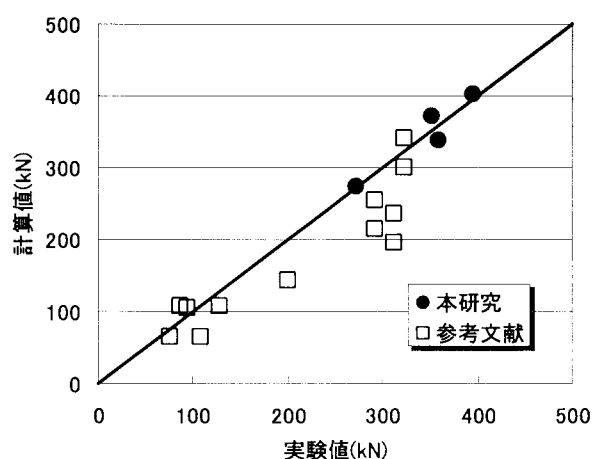


図-20 セン断耐力の評価

ここで、 V_{cf} の値はひび割れが横切るシート全ての破断強度の合計であり、 V_c の値は無補強供試体の最大荷重となっている。また、式(4)で与えられるせん断耐力の算定式の妥当性を検証するため、既往の研究^{9)~11)}と比較した。図-20は、せん断耐力の計算値と実験値の比較を行ったものである。なお、図中には既往の研究結果も併記しているが、使用したデータは参考文献の中で、1)補強前のせん断耐力と補強後のせん断耐力が比較できるもの、2)炭素繊維シートの引張強度が明らかであるもの、3)スターラップを有さず、炭素繊維シートが全面もしくはゼブラ状に4面巻立てされた供試体であるもの、4)シート破断によってせん断破壊を起こしたものを対象としている。図より、既往の研究結果に算定式を適用した場合、計算値は実験値よりも小さくなるデータが多いが、両者は比較的一致しているため、式(4)は概ね実験結果を評価できているものと考えられる。

以上より、スターラップを有さない炭素繊維シートで補強されたコンクリート梁のせん断耐力は、せん断ひび割れを横切るシートの総断面積が予測可能で、且つコンクリートのせん断耐力 V_c が判明している場合、シートとコンクリートが負担するせん断耐力に、それぞれ今回の実験で得られた低減係数を乗じて算定することで評価が可能であると考えられる。

6. まとめ

以下に、本研究で得られた結論を示す。

- (1) 斜めせん断破壊の進展に伴う炭素繊維シートのせん断抵抗機構として、まず、せん断ひび割れ発生後にひび割れ付近のシートが局所的に剥離し始める。その後、剥離が進展する間はシートのひずみは停滞し、せん断抵抗するシートのほぼ全域が剥離すると再びシートのひずみが進展し、シートが1本でも破断した時点で最大荷重に達する結果となる。

- (2) 補強量が増加するとひび割れ発生荷重が増加し、ひび割れが分散され、ひび割れ幅の進展が抑制される。
- (3) コンクリートが負担するせん断力 V_c はせん断ひび割れ発生後、変形の増加とともに低下し、補強量が増加すると低下勾配が緩やかになる傾向にあるが、終局時には最大値の約7割程度となる。
- (4) スターラップを有さない炭素繊維シートで補強されたコンクリート梁のせん断耐力は、シートが負担するせん断力 V_{cf} およびコンクリートが負担するせん断力 V_c にそれぞれ低減係数を乗じることで、評価が可能であると考えられる。

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
- 4) 岡野素之，大内一，森山智明，松本信之：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱のせん断補強，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19, No.2, pp.249-254, 1997.6
- 5) 小嶋克朗，勝俣英雄，田中常雄：炭素繊維巻きつけによる既存鉄筋コンクリート部材の耐震補強，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.11, No.1, pp.861-866, 1989.6
- 6) 浅倉晃，岡本直，谷垣正治，小田稔：高強度繊維巻付けによる既存 RC 柱のせん断補強，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.16, No.1, pp.1061-1066, 1994
- 7) 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 No.641/V-46, pp.167-178, 2000.2
- 8) 吉澤弘之，吳智深，袁鴻，金久保利之：連続繊維シートとコンクリートの付着挙動に関する検討，土木学会論文集 No.662/V-49, pp.105-119, 2000.11
- 9) 宮内克之，井上正一，西林新蔵，田中良典：CFRPシートでせん断補強した鉄筋コンクリートはりのせん断挙動，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19, No.2, pp.1605-1610, 1997.6
- 10) 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 Vol.17, No.2, pp.899-904, 1995.6
- 11) 東野幸史，濱田譲，高木宣章，児島孝之：連続繊維シートによる RC はりのせん断補強，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20, No.1, pp.443-448, 1998.6

(2005年1月17日受付)