

## 複合化技術により補修・補強された塩害劣化部材の安全性評価に関する研究（2）

研究予算：運営費交付金

研究期間：平30～令3

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、吉田英二、竹内彩

### 【要旨】

道路橋のメンテナンスサイクルを確実に実施するには、劣化した部材の状態を的確に「診断」し、その状態に応じた「措置」を行う必要がある。本研究では、複合化技術の信頼性に基づいた評価手法の提案のためにFRP材等を用いた複合化技術に代表されるCFRPシートに着目して、CFRPシートにより補強された実スケールに近い供試体を製作し、せん断抵抗機構の解明とその評価手法に関する検討を行った。その結果、供試体寸法が大きくなってしまってもシートが負担できるせん断力の大きさに直接的な影響はなく、シートの積層数が増えると剥離が早く発生し、せん断抵抗力が小さくなることを明らかにした。そこで、剥離過程をモデル化したせん断耐力評価方法を新たに提案し、実験結果を概ね妥当な精度で予測できる方法であることを確認した。さらに、CFRPシートの基準への導入に向けた一検討として、CFRPシートの引張試験データを収集し、引張強度と弾性係数のばらつきを分析した。

キーワード：CFRPシート、RCはり、せん断補強、材強データのばらつき

### 1. はじめに

道路橋のメンテナンスサイクルを確実に実施するには、劣化した部材の状態を的確に「診断」し、その状態に応じた「措置」を行う必要がある。劣化した部材の状態として、残存耐荷力を評価する手法は実験や解析など様々な手法が開発されてきている<sup>1),2)</sup>。また、道路橋において、鋼材の腐食に起因したひび割れなどの劣化に対し、FRP材等を用いた複合化技術により補修・補強を行う事例が増加しているが、信頼性に基づいた評価手法とはなっていない。すなわち、それらは実験に基づく最終的な耐荷力の確認を基本とするものが多く、必ずしも想定される耐荷メカニズムに立脚した評価手法とはなっていない。

FRP材等を用いた複合化技術に代表される炭素繊維シート（ここでは、エポキシ樹脂を含浸・硬化させた炭素繊維補強樹脂シートのことをいう。以下、CFRPシート）は、高強度・高耐食性・軽量などの優れた特性を有することから、道路橋の補修補強にも広く用いられている。2000年度に、土木学会より補強補修指針<sup>3)</sup>が刊行され、その中でCFRPシートにより補強された部材のせん断耐力式も示された。しかしこの評価式は、シートの端部が定着（全周巻き立てや機械式定着）していることを前提としている。しかし、実際の主桁部材では構造上の特性により、端部の定着が取れない場合も考えられる。その場合、そもそも評価式の前提が成り立たないため、破壊の制御が困難であり、前述の

耐力式より小さな荷重でせん断破壊が発生するものと想定される。また、その評価式は実験事実に基づき提案されたものであるが、その根拠となっているのがスケールの小さい供試体の実験により得られたものであるため、実構造物の寸法効果の違いなどが適切に考慮されているわけではない。

そこで本研究では、複合化技術として広く採用されているCFRPシートに着目し、実スケールに近い大型RCはりの載荷試験の実施により、耐荷メカニズムに関する分析とその結果を踏まえ、信頼性の高いせん断耐力式を構築することを目的とする。なお、本研究では塩害により劣化部材を想定しているが、FRP等による補強を行ううえでは、まずは損傷した躯体コンクリートの脆弱部を取り除くことが必要になる。換言すれば塩害劣化は鋼材腐食を要因としたひび割れをはじめ、コンクリートの断面欠損など様々な損傷があり、それらの損傷に対し、適切な補修を施し健全な状態に戻すことが前提になる。そうした時に、補修方法や範囲などが補強後の効果に及ぼす影響についても一般に無視することができないため段階的な検討を行う必要があると考えられる。そのため、本研究の範囲においてはまずは耐荷メカニズムに立脚した評価手法を提案することを主目的とし、躯体を健全な状態に戻したことを前提としたうえで検討することとした。

一方、H29に改定された道路橋示方書<sup>4)</sup>（以下、道示）では、信頼性の概念に基づく部分係数設計法を採

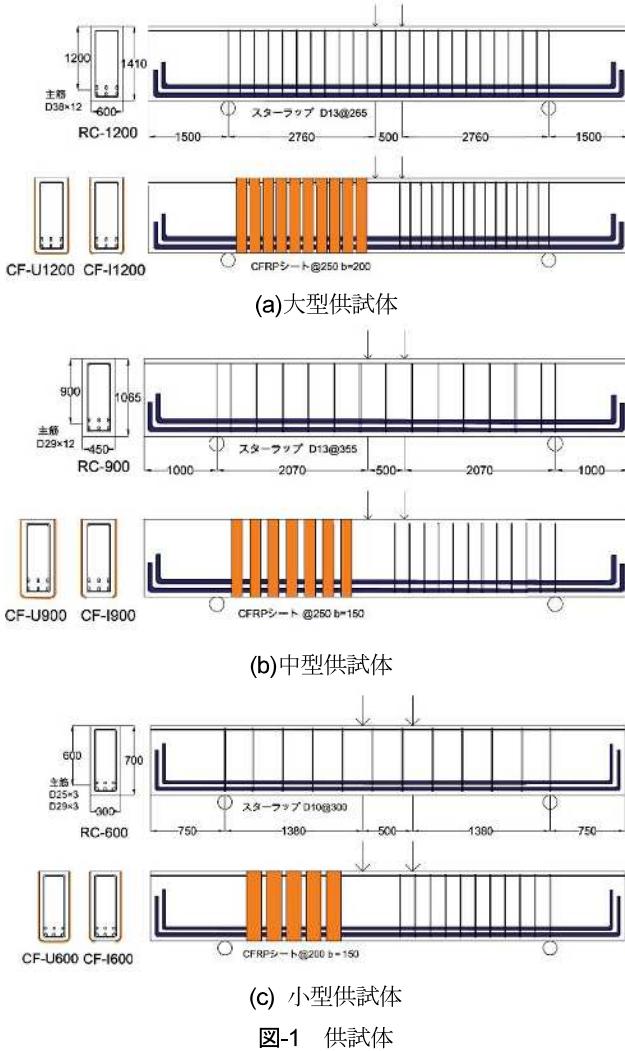


図-1 供試体

用するにあたり、材料強度のばらつきなどが再評価され、その結果に基づき一定水準の信頼性を得るために特性値や部分係数が設定されている。そのため、道示では、材料の機械的性質などの特性のばらつきの程度や傾向などの諸特性が明確であり、さらに材料が集積された部材としての耐荷機構として考慮される材料の応力-ひずみ関係が保証されていることが前提となる。

道示に規定される材料強度の特性値は、JISなどの規格値または強度試験データの統計分析結果などから設定されてきたものである。CFRPシートをはじめ、道示に規定のない材料を適用する場合には、実験的検証を通じて材料としての特性や部材に用いた場合の機構に対する信頼性を確認するとともに、長期の使用における外力及び環境条件に対する耐久性の確認など、多様な条件に適応できる条件を明確にする必要がある。

そこで、本研究で対象としたCFRPシートについて、基準への一般化に向けた一検討として、材料試験データを収集し、引張強度と弾性係数のばらつきを分析し

表-1 実験供試体の諸元

供試体名	$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$d$ (mm)	補強方法	$n_f$	$P_{c1}^{*1}$ (%)	$P_w^{*2}$ (%)	曲げ 耐力 <sup>†1</sup> (kN)	せん断 耐力 (kN)
RC-1200	44.5	27.02	1200 (大型)	スター・ラップ	—	1.9	0.16	4167	2453
CF-U1200	45.4	27.84		シートU字	2	1.9	0.087	4176	—
CF-I1200	10.5	26.99		シート側面	2	1.9	0.087	4122	—
RC-900	44.4	28.14	900 (中型)	スター・ラップ	—	1.9	0.16	2378	1446
CF-U900	42.5	26.39		シートU字	2	1.9	0.087	2367	—
CF-I900	42.5	26.46		シート側面	2	1.9	0.076	2378	—
RC-600	38.2	25.40	600 (小型)	スター・ラップ	—	1.9	0.16	1013	633.0
CF-U600	37.4	25.69		シートU字	1	1.9	0.082	972.8	—
CF-I600	35.8	25.03		シート側面	1	1.9	0.082	967.5	—
CFA10	31.9	22.06		シートU字 (定着長=10cm)	1	1.9	0.082	975.3	—
CFA20	31.8	22.67		シートU字 (定着長=20cm)	1	1.9	0.082	986.3	—

表-2 使用材料の諸元（左：RC、CF-U、CF-I、右：CFA）

種類	断面積 (mm <sup>2</sup> )	弾性 係数 (GPa)	降伏 強度 (MPa)	引張 強度 (MPa)	種類		断面積 (mm <sup>2</sup> )	弾性 係数 (GPa)	降伏 強度 (MPa)	引張 強度 (MPa)
					鉄筋	CFA				
D10	71.33	190.5	341.4	558.2	D25	506.7	196.1	383.3	594.6	
D13 <sup>*4</sup>	126.7	—	406	574	D29	642.4	198.7	378.0	584.8	
D25	506.7	191.5	367.5	592.5	CFRP シート	0.163 <sup>*2</sup>	458.9	—	3233	
D29	642.4	197.7	384.0	565.3						
D38	1140	191.6	388.2	561.7						
CFRP シート	0.163 <sup>*4</sup>	417.8	—	3264						

\*1：主鉄筋の補強量比。ただし、 $p_s = A_s/(bd)$

\*2：せん断補強筋の補強量比。ただし、スター・ラップの場合  
 $p_w = A)/(bs_w)$ 、CFRPシートの場合  $p_w = 2n_t b_t/(bs_t)$

\*3：曲げ耐力は、せん断耐力(V)と比較するため、終局時の荷重(P)の半分( $V=P/2$ )で表記した。

\*4：D13は、引張試験未実施のため、材料特性はミルシートの値を採用

\*5：単位幅あたりの断面積(=シート厚さ $t_f$ )



写真-1 実験状況（大型供試体）

た。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

表-1に、供試体の諸元および曲げ耐力、せん断耐力の計算値を、表-2に、使用した鉄筋およびCFRPシート

表-3 破壊形式と最大荷重、最大せん断力

供試体名	破壊形式	最大荷重 (kN)	最大せん断力 (kN)
RC-1200	せん断圧縮	3369.6	1684.8
CF-U1200	シート剥離	3540.8	1770.4
CF-II1200	シート剥離	2953.8	1476.9
RC-900	せん断圧縮	2215.7	1107.9
CF-U900	シート剥離	2061.1	1030.5
CF-I900	シート剥離	1749.9	874.9
RC-600	せん断圧縮	912.5	456.3
CF-U600	曲げ引張	1212.4	606.2
CF-I600	シート破断	1128.9	564.4
CFA10	シート剥離	1002.5	501.2
CFA20	シート剥離 →曲げ圧縮	844.9	422.4

ト（以下、シート）の諸元を示す。供試体は、シートによりせん断補強した供試体 8 体、その比較用にスターラップでせん断補強した供試体 3 体の計 11 体を製作した。なお、表-1 中の曲げ耐力ははり理論より、せん断耐力は土木学会式<sup>3)</sup>を用いた修正トラス理論により算出した。

図-1 に、供試体形状を示す。供試体は、有効高さ 1200mm の大型供試体を基準に、比較用として 600mm の小型供試体、900mm の中型供試体を製作した。供試体それぞれについて、左右のせん断スパンにスター ラップを用いてせん断補強したものを RC シリーズ、右側のせん断スパンにスター ラップを用いてせん断補強し、試験スパンである左側にシートを用いてせん断補強したものを CF シリーズと呼ぶ。

CF シリーズは、貼り付け形状の違いによる補強効果の確認のために、シートを U 字型に巻きつけた CF-U シリーズ、シートを側面のみに貼り付けた CF-I シリーズの 2 種類とした。また、全ての供試体で補強量を合わせるために、せん断補強材の補強量比(P)に弾性係数(E)をかけた値(PE)が等しくなるように設計した。

## 2.2 実験方法

写真-1 に、実験状況を示す。実験は図-1 に示すとおり 2 点単純支持の状態の供試体に対して、2 点載荷により供試体が破壊するまで荷重を加えた。また、計測項目は、載荷荷重、供試体変位、主鉄筋、スター ラップ、コンクリート、シートのひずみとした。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊形式と荷重変位関係

表-3 に、各供試体の破壊形式および最大荷重、最大せん断力を示す。写真-2 に代表的な破壊状況を、図-2 に各供試体の荷重-変位曲線を示す。

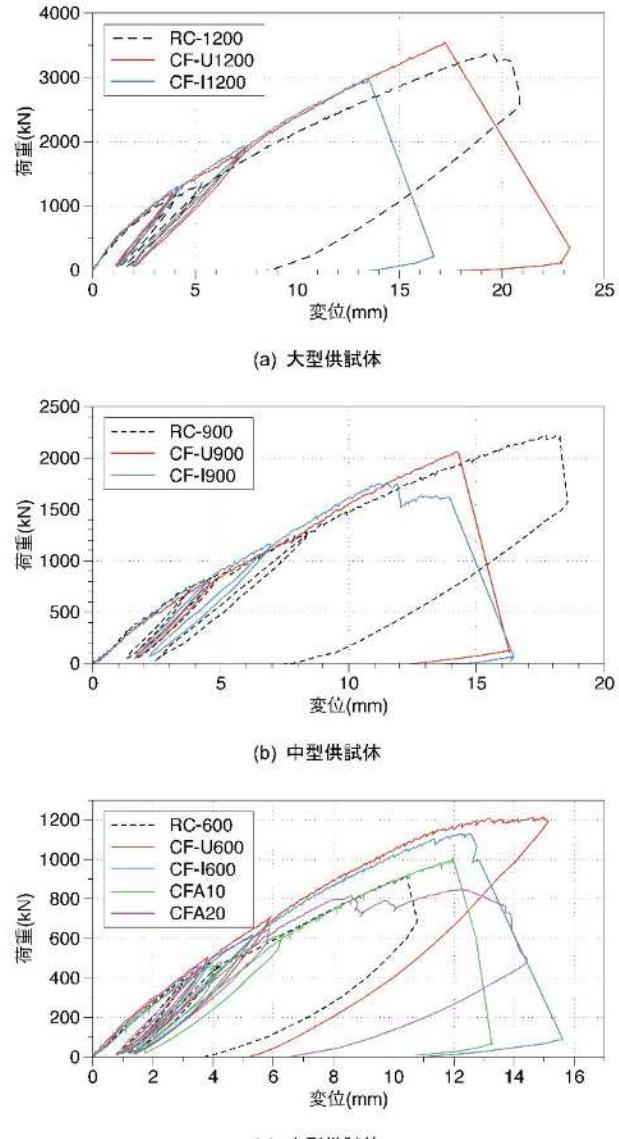


図-2 荷重-変位関係

破壊形式について、RC シリーズは 3 体ともせん断圧縮破壊であった。シート補強した供試体は、中型、大型の場合は、写真-2 (b)、(c) に示すとおり、CF-U シリーズ、CF-I シリーズとともにシートの剥離による斜め引張破壊が生じた。図中の点線部分は、シートが剥離した範囲を示している。U 字型に補強した CF-U シリーズでは、斜めひび割れより上部が剥離し、CF-I シリーズでは載荷点側がひび割れの上部、支点側が斜めひび割れの下部で剥離した。CF-U600 では、シートが剥離する前に主鉄筋が降伏し曲げ引張破壊となった。CF-I600 は、シートが剥離する前に破断し、斜め引張破壊となった。

このことは、供試体の側面にシート接着された CF-I シリーズでは、接着されたシートの上下が自由端であ

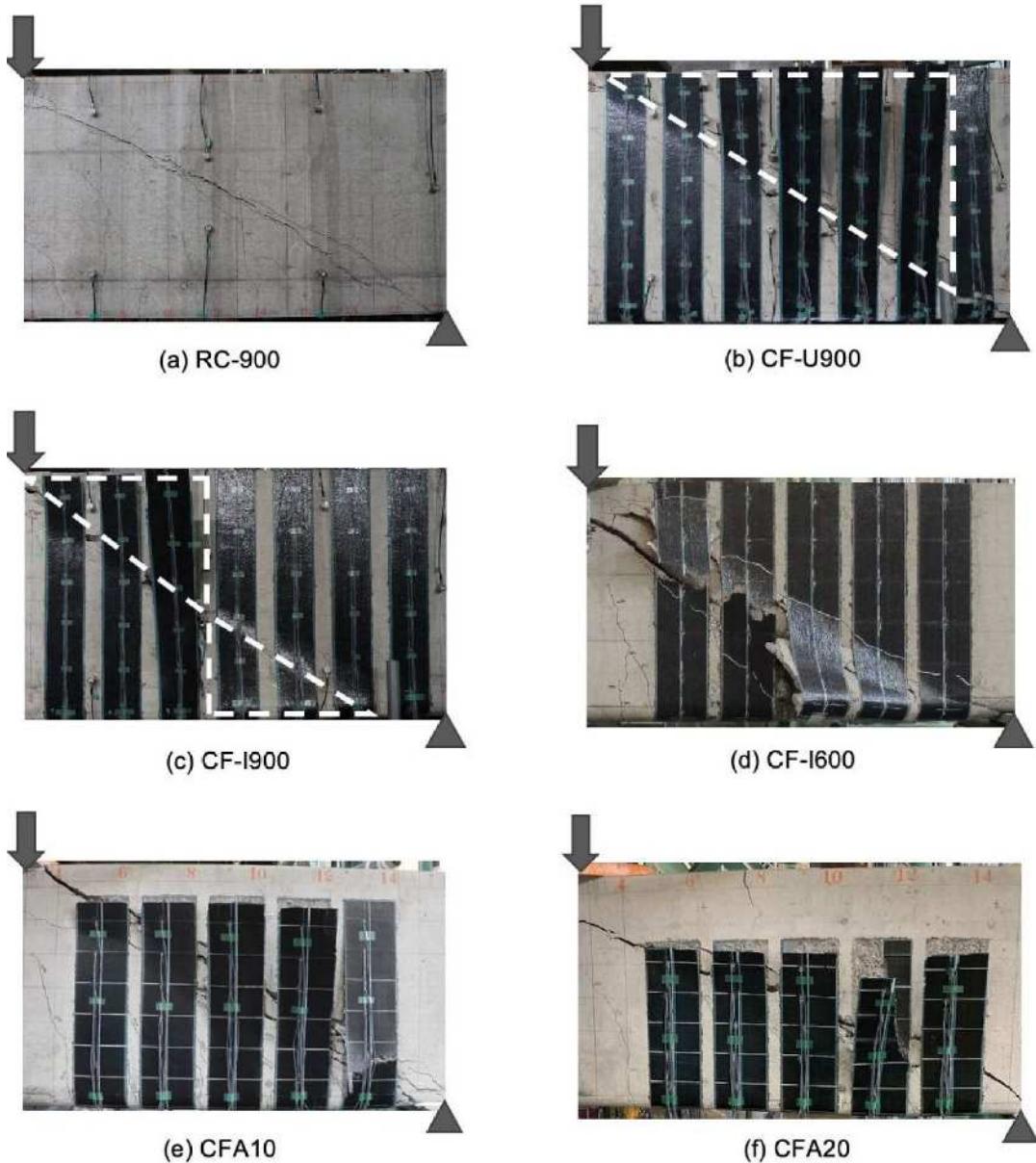


写真-2 破壊状況

るため、斜めひび割れ位置を跨ぐシートの接着範囲の短い側で剥離が生じる傾向にあるが、CF-U シリーズでは供試体の底部がシートに抱合されているため接着されたシートの下側では剥離が生じず、自由端である上側で剥離が生じる傾向にあることがいえる。

次に最大荷重を比較する。CF-U シリーズと CF-I シリーズを比較すると、シートの剥離後にせん断破壊した大型、中型の場合、CF-U シリーズの方が CF-I シリーズより 20%程度最大荷重が大きくなつた。この結果から、側面のみに補強するよりも U 字型に補強した方が明らかに剥離が発生しにくいため、せん断補強の効果が向上するものと判断される。

RC シリーズと CF シリーズを比較すると、小型供

試体では CF シリーズの最大荷重が RC シリーズを大きく上回っているのに対し、中型、大型供試体では CF シリーズの最大荷重が RC シリーズと同程度かやや下回っている。このことは、シートの補強量比が同じでも寸法が異なるとシートが負担できるせん断力の大きさに違いが出ることが判断される。これらに理由については後述する。また、定着長を短くした CFA シリーズは、いずれも端部まで定着したものと比べ最大荷重が小さくなつており、シートの定着長がせん断耐力に大きく影響していることがわかる。

### 3.2 シートのひずみと供試体の寸法効果

図-3 には、大型供試体 (CF-U1200) におけるせん断スパン中央付近に配置されたシートの高さ方向のひ

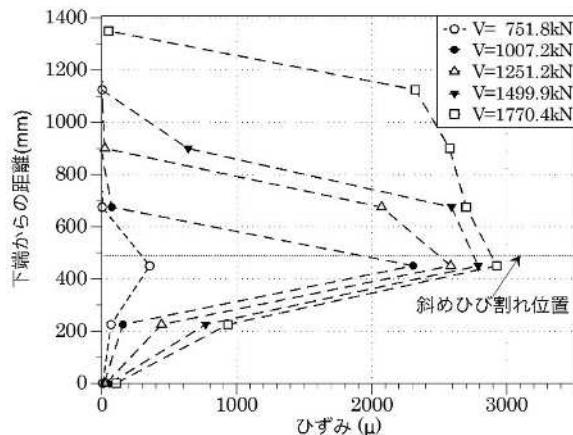


図-3 高さ方向のシートのひずみ分布 (CF-U1200)

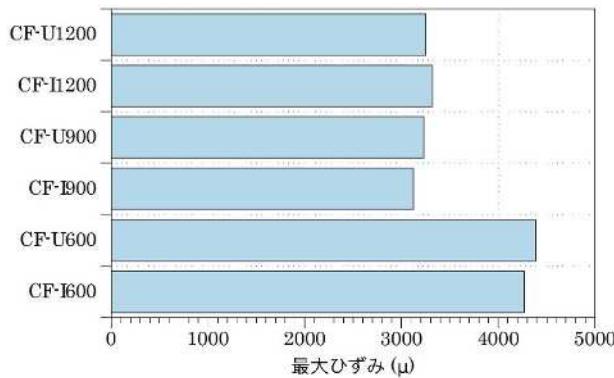
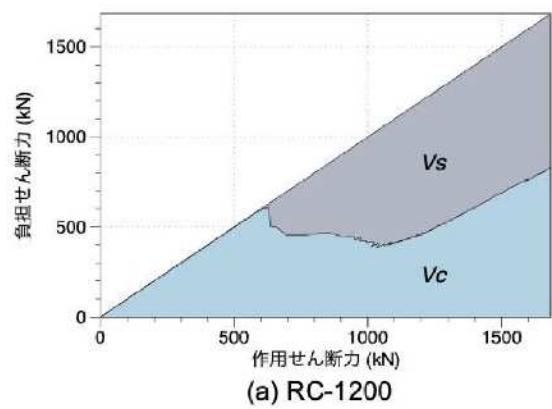


図-4 各供試体のシートの最大ひずみの比較

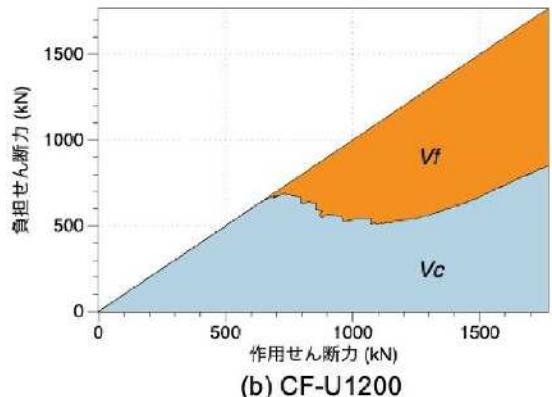
ひずみ分布を示している。図には、写真から読み取った斜めひび割れの発生位置が破線で示されている。図中の 751.8kN は、コンクリートに斜めひび割れが入った直後の作用せん断力であり、1770.4kN は、終局直前の作用せん断力である。ひずみ分布の変化から、シート補強された RC はりは共通して以下の過程を経て破壊することが考えられる。すなわち、

- 1) コンクリートに斜めひび割れが発生すると、ひび割れ付近でシートのひずみが増加する。
- 2) ひずみが増加すると、シートの剥離が発生し、斜めひび割れ位置から端部に向かって剥離が進展していく。図-3において、下端から 450mm~1100mm の位置に着目すると、荷重が増加していくとシートのひずみが一定の領域が現れ、その領域が徐々に広くなっていく。
- 3) 剥離している領域がシートの自由端まで到達すると、シートが完全に剥離し、終局状態に至ると考えられる。

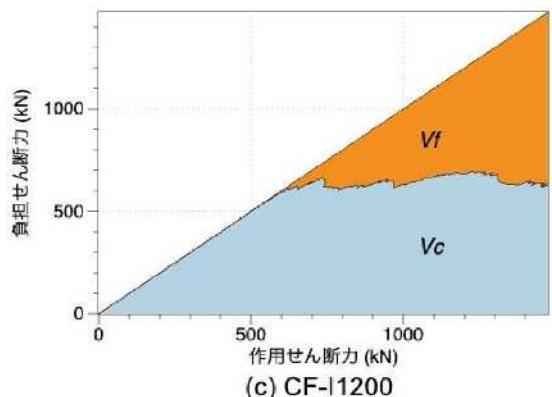
以下、混同を防ぐため、初めに斜めひび割れ位置附近でシートの剥離が発生することを局所剥離、剥離領



(a) RC-1200



(b) CF-U1200



(c) CF-I1200

図-5 せん断力分担割合 (大型供試体の例)

域がシート全体に進展し、完全に剥がれることを全体剥離と呼ぶ。せん断耐力評価においては、この性状をモデル化することが重要であると考える。

次に、シートが全体剥離したときの最大ひずみを比較する。図-4は、シート補強した大型、中型、小型供試体について、シートの全体剥離または破断が生じた際の斜めひび割れ付近における最大ひずみを比較したものである。なお、供試体 CF-U600 については、シートの剥離、破断が生じなかつたため、最大荷重時の最大ひずみとした。結果を比較すると、大型、中型供試体については、全体剥離時の有効ひずみが概ね同じ値になっている。すなわち、シート、コンクリートの材

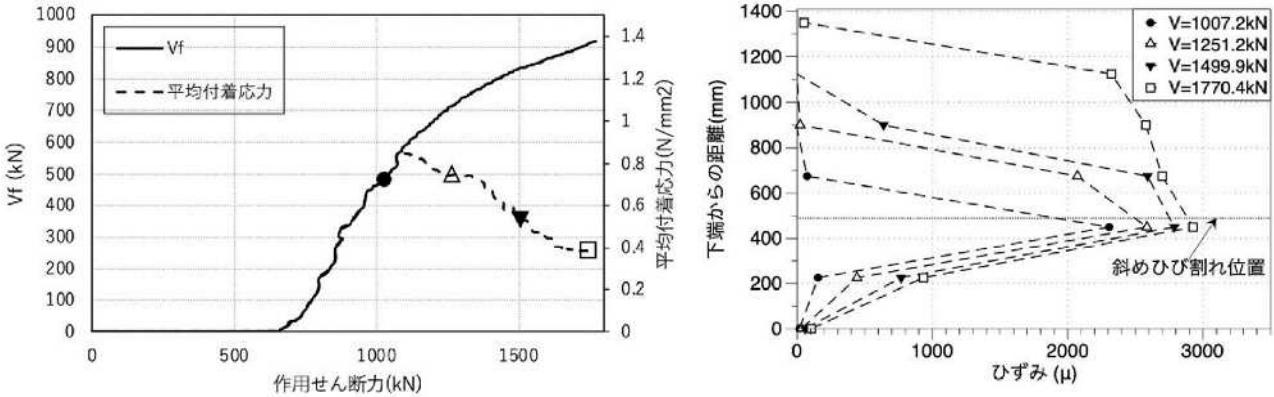


図-6 平均付着応力の変化（左）とひずみ分布（右）の比較（CF-U1200）

料特性、シートの補強量比、積層数が変わらなければ、寸法が変わっても全体剥離するときのシートひずみの値は変化しないといえる。また、小型供試体と中型、大型供試体の最大ひずみを比較すると、小型供試体の方が大きくなっている。小型と中型、大型を比較すると、シートの材料特性は等しく、補強量比もほぼ等しいため、異なるのはシートの積層数である。

小型供試体では積層数を1、中型、大型供試体では積層数を2としている。この違いが終局時の最大ひずみの差につながっていると考えられる。すなわち、シートの積層数を増やすと付着応力が大きくなることで剥離が発生しやすくなり、シートが負担できるせん断力が小さくなると推察される。現在提案されているせん断耐力式では補強量比は考慮されているが、シートの厚さと積層数の影響は、一切考慮されていない。

せん断耐力を予測する上で、これらを重要なパラメータとして認識すべきである。

以上より、供試体の寸法とせん断耐力の関係を整理すると、寸法が大きくなることによるせん断耐力への直接的な影響はないと考えられる。一方で、シートの補強量が多くなると（積層数が増えると）小さいひずみで剥離が発生するため、シートが負担できるせん断力が小さくなる。

したがって、CFRPシートによりせん断補強したRCはりのせん断耐力には、広い意味で寸法効果があると言える。

### 3.3 負担せん断力の分担割合

実験から得られたスターラップ、シートのひずみからそれぞれが受け持つせん断力を算出し、せん断力の分担割合の変化を考察する。まず、斜めひび割れと交差するスターラップおよびシート1本が負担するせん断力は、以下の式(1)、(2)で求められる。

$$V_{si} = \varepsilon_{si} \cdot E_s \cdot A_s \quad (1)$$

$$V_{fi} = \varepsilon_{fi} \cdot E_f \cdot A_f \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_{si}$ ：斜めひび割れ位置と交差するスターラップのひずみ ( $\mu$ )、 $\varepsilon_{fi}$ ：斜めひび割れ位置と交差するシートのひずみ ( $\mu$ )、 $E_s$ ：スターラップの弾性係数 ( $N/mm^2$ )、 $E_f$ ：シートの弾性係数 ( $N/mm^2$ )、 $A_s$ ：スターラップの弾性係数 ( $mm^2$ )、 $A_f$ ：シートの弾性係数 ( $mm^2$ )である。また、スターラップ、シート全体が受け持つせん断力は、式(1)、(2)で求めた値を、以下の式(3)、(4)により算出できる

$$V_s = \sum_{i=1}^n V_{si} \quad (3)$$

$$V_f = \sum_{i=1}^n V_{fi} \quad (4)$$

式(3)、(4)により求めた負担せん断力を全体の作用せん断力から差し引くことで、コンクリートが負担するせん断力 $V_c$ を求めることができる。このような整理により求めたせん断力分担割合の結果を図-5に示す。

図-5より、大型供試体の結果を例にすると、RCシリーズの分担割合は、斜めひび割れの発生後、 $V_c$ が急激に減少し、その後一定で推移している。スターラップの降伏後は $V_c$ が再び増加に転じている。これは、スターラップの降伏によってせん断抵抗機構がトラスからアーチへと変化することに起因していると考えられる。

CFシリーズでは、斜めひび割れ発生後、 $V_c$ の低下はほとんど見られず、 $V_f$ が緩やかに増加している。スター

ラップやシートのひずみの大きさはひび割れ幅に依存するので、シート補強には斜めひび割れの開口を抑制する効果があるものと考えられる。斜めひび割れの発生後、RC シリーズと同じように  $V_c$  が一定で推移し、作用せん断力がある値を超えると  $V_c$  が再び増加に転じる。これは、シートの局所剥離によってシートのひずみが増加しなくなり、それに伴い  $V_c$  が増加していくためだと考えられる。この結果から、スターラップの降伏とシートの局所剥離は見かけ上同じ機構にあることが伺える。次に、局所剥離が発生するタイミングを調べるために、シートの付着応力を算出する。

### 3.4 負担せん断力と付着応力

ある区間におけるシートとコンクリートの間の付着応力は、鉛直方向の力の釣合いから式(5)で求めることができる。

$$\tau = n_f t_f E_f \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad (5)$$

ここで、 $d\varepsilon_f/dx$ ：シートのひずみ勾配である。

シートのひずみ分布から、斜めひび割れとの交差部の付着応力を求め、さらに斜めひび割れと交差している全てのシートの付着応力の平均値を算出し、平均付着応力とする。**図-6 (左)** に、大型供試体 (CF-U1200) を例に、求めた平均付着応力と、式(4)で求めた  $V_f$  を比較した結果を示す。

$V_f$  と平均付着応力を比較すると、全ての供試体で共通する特徴が見られた。すなわち、斜めひび割れが発生すると、 $V_f$  と平均付着応力がともに増加し、ある値までは両者が同じ割合で増加していく。しかしある値を超えると、両者は乖離していく。この乖離が開始する点において局所剥離が始まっているものと判断される。

**図-6 (右)** は、供試体 CF-U1200 において、平均付着応力の変化とシートの高さ方向ひずみ分布を比較したものであるが、**図-6 (左)** との比較で同じ凡例が同じ荷重に対応している。作用せん断力が 1007.2kN のときは、シートが剥離していないことが読み取れる。このときの平均付着応力は  $V_f$  と乖離していない。作用せん断力が 1251.2kN のときは斜めひび割れ付近のひずみ勾配が緩やかになっており、シート剥離が徐々に始まっていることが読み取れる。このときの平均付着応力は  $V_f$  の変化と乖離し減少し始めている。それ以降はシートの剥離がさらに進み、それに伴い平均付着応力も低下している。このことから、 $V_f$  の変化と平均付着応力の変化の乖離が始まる点が局所剥離の開始点である。

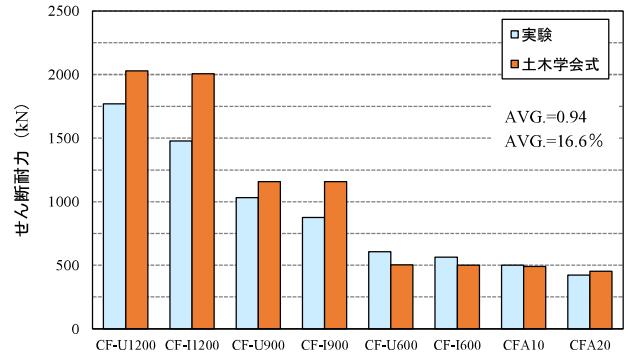


図-7 実験値と土木学会式の比較

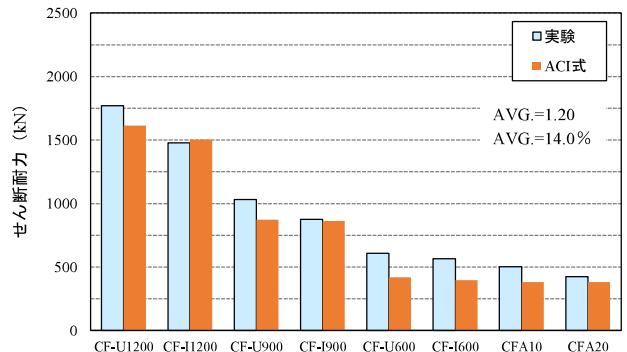


図-8 実験値と ACI 式の比較

ることが判断できる。

また、平均付着応力の変化と、**図-5** で示したせん断力の分担割合の変化を比較すると、**図-6 (左)** で局所剥離が発生している点と、**図-5** 中で  $V_f$  が再び増加し始める点が概ね一致している。これらの結果から、シートの局所剥離以降、はりのせん断耐荷機構がアーチ機構へと変化していることが考えられる。

## 4. 既存の耐荷力式との比較

### 4.1 土木学会式<sup>3)</sup>

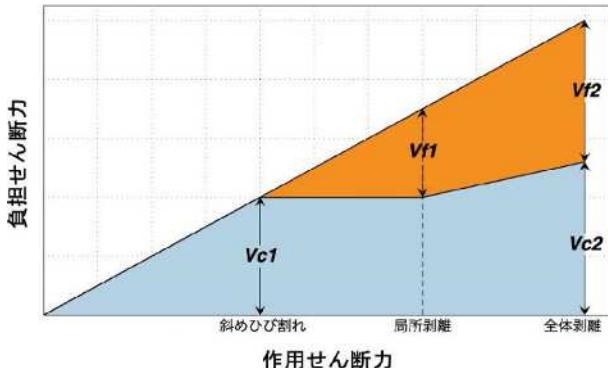
シート補強された供試体全 8 体について、既存の耐力式（土木学会式<sup>3)</sup>）で計算した結果と、実際のせん断耐力を比較し、既存の耐力式の妥当性を検証した。

**図-7** は、土木学会式で計算した結果と実際のせん断耐力を比較したものである。大型、中型供試体で、計算値が実際のせん断耐力より大きくなっている。

したがって、今回のように U 字型または側面のみにシートを貼り付け、機械式定着を施していない場合は、土木学会式で計算するとせん断耐力を過大評価してしまうため、既存の評価式をそのままあてはめることはできないと考えられる。

### 4.2 ACI 式<sup>5)</sup>

**図-8** は、ACI440.2R-08<sup>5)</sup>のせん断耐力式により計算



※図中凡例

- $V_{c1}$  : 斜めひび割れ発生時のコンクリート負担せん断力
- $V_{c2}$  : 全体剥離時のコンクリート負担せん断力
- $V_{f1}$  : 局所剥離時のシートの負担せん断力
- $V_{f2}$  : 全体剥離時のシートの負担せん断力

図-9 セン断耐荷機構のモデル

した結果と実際のせん断耐力を比較したものである。なお、 $V_c$ については、ACI318R-05<sup>6)</sup>で示されている以下の式(6)を用いて算出した。

$$V_c = \left( 1.9 \sqrt{f'_c} + 2500 p_s \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (6)$$

算定結果は、供試体 CF-II200 を除き、計算結果が実験結果を下回る結果となった。供試体 CF-II200 で計算結果が大きくなった理由としては、式(6)が寸法効果を考慮していないため、 $V_c$ を過大評価していることが考えられる。全体として、CF-U シリーズと CF-I シリーズのせん断耐力の差が実験結果よりも小さくなっている。

したがって、ACI 式は、全体として安全側にせん断耐力を評価できるが、U 字型補強と側面補強の差を適切に評価できていないと判断される。

## 5. セン断耐荷機構を踏まえたせん断耐力の評価法

以上を踏まえると、CFRP シートによりせん断耐強された RC はりのせん断耐荷機構は以下の図-9 のようにモデル化できる。すなわち、

- ・ 斜めひび割れの開口により、斜めひび割れ付近のシートひずみが増加し、ひずみがある程度まで増加すると局所剥離が発生する。さらに荷重が増加すると剥離は斜めひび割れ付近からシートの端部に向けて進展していく、端部に達したときに全体剥離が起こり、RC はりがせん断破壊する。

- ・ RC はりの寸法が大きくなることによるシート補強の直接的な寸法効果は存在しない。ただし、寸法が大きくなるとシートの必要積層数が増え、積層数が増えると剥離ひずみが小さくなりせん断耐強効果が低下という、広義の寸法効果（付着の寸法効果）が存在する。

- ・ シートの局所剥離は、スターラップの降伏と見かけ上同様の現象と捉えることができる。すなわち、シートの局所剥離によってはりのせん断耐荷機構がトラス機構からアーチ機構へと耐荷機構が移行し、それによりコンクリートが負担できるせん断力が増加する。

せん断耐力を精緻に評価するためには、以上の 3 つを正確に評価する必要がある。ただし、局所剥離以降のコンクリートのアーチ機構は、境界条件に依存する部分が多く、設計実務では考慮すべきではない。したがって、設計をする上で重要なのは、局所剥離時、全体剥離時にシートがどれほどのせん断力を受け持つことができるかを表す  $V_{f1}$ 、 $V_{f2}$  の評価である。特に、シート補強の可逆性という意味で、設計上重要な指標となりうる局所剥離時のシート負担せん断力を評価することは大きな意味を持つ。ところが、現在使われている設計コードには、局所剥離という概念がなく、その時のせん断耐力を評価するという方針を取っているものは存在しない。

以上のせん断耐荷機構を踏まえて、次章では、シートの剥離過程をモデル化したせん断耐力の評価方法を検討する。

## 6. 剥離進行過程をモデル化したせん断耐力評価法

### 6.1 概要

図-10 に、本稿で提案するせん断耐力の算出方法のフローチャートを示す。前述のせん断耐荷機構を踏まえて、せん断耐力の評価方法の検討を行う。具体には、シートの剥離進行過程をモデル化することで、局所剥離時、全体剥離時の  $V_f$  を評価する手法を検討する。

本手法は、斜めひび割れを仮定により、斜めひび割れの幅を与え、その斜めひび割れ幅とシートのひずみの積分値が一致するという変形の適合条件を用いてシートのひずみ分布を算出する。そしてひび割れと交差する位置のシートひずみからシートの引張力を求め、斜めひび割れと交差するシートの引張力を合計することでシートが負担するせん断力  $V_f$  を算出する。

シートの局所剥離が起こると上縁もしくは下縁に向かって剥離は伝播するためシートのひずみは増加しな

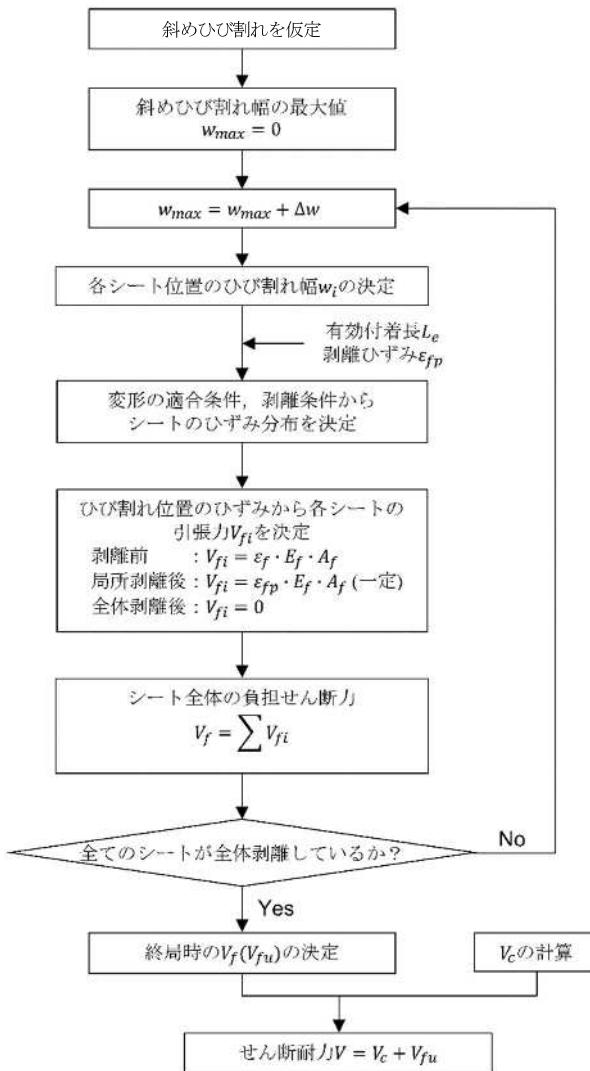


図-10 本提案手法におけるせん断耐力の算定フロー

くなり、最終的に、剥離が端部に達することで全体剥離が起こり、シートが受け持つ引張力がゼロになると仮定する。すなわち、斜めひび割れ幅を漸増させて、任意の斜めひび割れ幅に対応する $V_f$ を求め、 $V_f$ が低下するまで計算を繰り返すことで、シートが受け持つせん断力(シートの最大負担せん断力 $V_{fu}$ )を求めることができる。次節で $V_f$ の算出における詳細な計算方法を説明する。

## 6.2 斜めひび割れの仮定

斜めひび割れが発生する領域や、進展の仕方、位置によるひび割れ幅の変化などは既往の研究においても、それらの定量的な把握には至っていない。

したがって斜めひび割れ幅を用いて耐力評価を行うためには、それらの値に対してある程度の仮定を立てなければならない。

本手法では、前述の実験結果から得られた知見に基

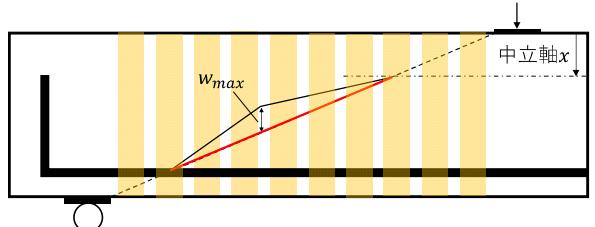


図-11 斜めひび割れの位置と幅の仮定

づき、以下の2つの仮定を用いてひび割れの分布およびそれぞれのシート位置におけるひび割れ幅を決定する。

- 1) 斜めひび割れは載荷板の端と支点板の端を結ぶ線上に1本存在すると仮定する。また、ひび割れが入る範囲は、等価応力ブロックにより算出した終局時の中立軸位置から引張鉄筋位置までとする(図-11参照)。
- 2) 斜めひび割れ幅はひび割れの中央において最大になり端部でゼロとなる。その間は線形で推移する。

このような仮定を用いることで、ひび割れ幅の最大値を与えることによって各シートと交差する斜めひび割れの本数、位置、ひび割れ幅が決定される。このようにして、各シートのひずみ分布を求める。なお、シートの引張力は上側のひび割れと交差する位置のひずみから算出する。

## 6.3 シートひずみ分布の決定

前項で決定したひび割れ幅をもとに、各シートのひずみ分布を決定する。コンクリートを剛体と仮定すると、シートの伸び量がひび割れ幅と等しくなる。したがって、シートのひずみを高さ方向に積分した値がひび割れ幅と等しくなる。この考えに基づき各シート位置のひび割れ幅からシートの高さ方向ひずみ分布を決定する。その際、前項で示したシートの剥離性状を再現する。すなわち、斜めひび割れの発生後、ひび割れ付近でひずみが増加していき、ひずみがある程度まで増加するとひずみが一定の領域(剥離領域)が現れる。剥離領域はその後シート端部に向かって進展し、剥離領域が自由端に達したときに全体剥離が発生し、そのシートが負担するせん断力はゼロになる。この性状を再現することにより各段階におけるシートひずみ分布を決定する。

ひずみ分布の決定には、有効付着長、剥離時ひずみの2つのパラメータが必要になる。有効付着長 $L_e$ は佐藤ら<sup>7)</sup>により示された式(7)を用いる。

$$L_e = 1.89(n_f t_f E_f)^{0.4} \quad (7)$$

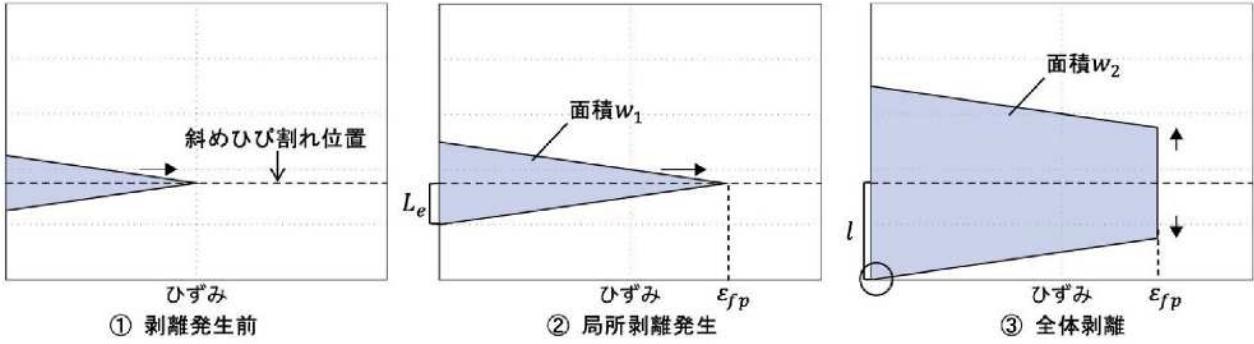


図-12 高さ方向のシートのひずみ分布の変化

ここで、 $n_f$  : シート積層数、 $t_f$  : シート厚さ (mm)、 $E_f$  : シートの弾性係数 (MPa) である。一方、剥離が始まるひずみ $\varepsilon_{fp}$ の値については、確立された予測方法が存在しないため、本手法においては実験で観察された値で得られた値を用いて以下のように定義する。

$$\text{積層数 } 1 \text{ の場合} : \varepsilon_{fp} = 4200(\mu)$$

$$\text{積層数 } 2 \text{ の場合} : \varepsilon_{fp} = 2700(\mu)$$

なお、定着長 $L$  (ひび割れ位置から端部までの距離) が有効付着長よりも短い場合、最大ひずみが低減されることが知られている<sup>8)</sup>。したがって本手法においても、支点近くなど定着長 $L$ が有効付着長 $L_e$ より短い場合には、以下の式(8)を用いて最大ひずみを低減させる。  
図-12 にひずみ分布の変化を示す。

$$\varepsilon'_{fp} = \frac{L}{L_e} \varepsilon_{fp} \quad (8)$$

まず斜めひび割れが発生すると、ひび割れの上下でひずみが増加していく。このとき、簡単のためひずみ勾配は常に剥離発生時のひずみ勾配 $\varepsilon_{fp}/L_e$ で一定であるとする。これにより、ひずみ分布の形状が決定する。次に、局所剥離発生時を考える。局所剥離は、ひずみの最大値が剥離ひずみ $\varepsilon_{fp}$ に達した時点で発生するとする。これによりひずみ分布の形状が決定する。次に、局所剥離発生時を考える。局所剥離は、ひずみの最大値が剥離ひずみ $\varepsilon_{fp}$ に達した時点で発生するとする。このときのひび割れ幅を $w_1$ とすると、以下の式(9)で表される。

$$w_1 = L_e \varepsilon_{fp} \quad (9)$$

ひび割れ幅 $w_i$ が $w_1$ より小さい場合は、ひずみが線形で増加していき、 $w_1$ を超えるとひずみは一定とする。次に全体剥離を考える。全体剥離は、局所剥離の発生後ひずみが一定の領域（剥離領域）が進展していく、剥離領域がシートの自由端に達したときに発生すると

考える。すなわち、図-12③が全体剥離の発生する瞬間を表している。このときのひび割れ幅 $w_2$ は、ひび割れ位置から自由端までの距離を $l$ とすると、次式(10)で表される。

$$w_2 = (2l - L_e) \varepsilon_{fp} \quad (10)$$

ひび割れ幅がこの値より大きくなると、シートは完全に剥離しているとし、シートが負担するせん断力はゼロとする。なお、U字型補強の場合、シートの下端は完全に定着されていると考える。したがって、剥離領域が先にシート下端に達しても全体剥離は起こらず、剥離領域が上端に達して初めて全体剥離が起こるとする。

以上をまとめると、ひび割れ幅 $w_i$ とひずみの関係は以下のようになる。

(i)  $w_i < w_1$  のとき

$$\varepsilon_{fi} = \frac{w_i}{w_1} \varepsilon_{f1} \quad (11)$$

(ii)  $w_1 \leq w_i < w_2$  のとき

$$\varepsilon_{fi} = \varepsilon_{fp} \quad (12)$$

(iii)  $w_2 \leq w_i$  のとき

$$\varepsilon_{fi} = 0 \quad (13)$$

#### 6.4 $V_f$ の算出

前項で算出したひずみをもとにシートの負担せん断力 $V_f$ を算出する。シートの斜めひび割れ位置におけるひずみを $\varepsilon_{fi}$ とすると、帯状のシート 1 枚が負担するせん断 $V_{fi}$ は、式(14)で算出できる。

$$V_{fi} = \varepsilon_{fi} \cdot E_f \cdot A_f \quad (14)$$

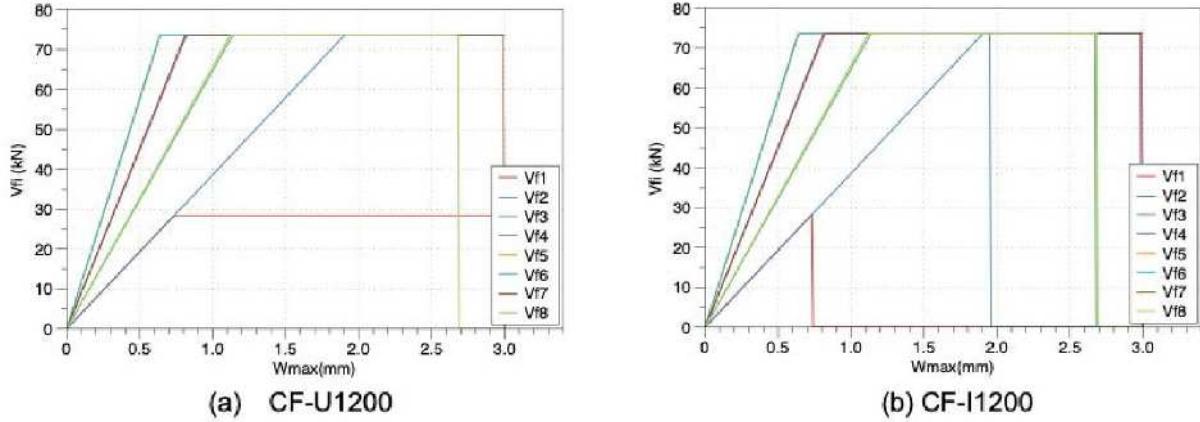


図-13 ひび割れ幅と各シートの引張力の関係（大型供試体の例）

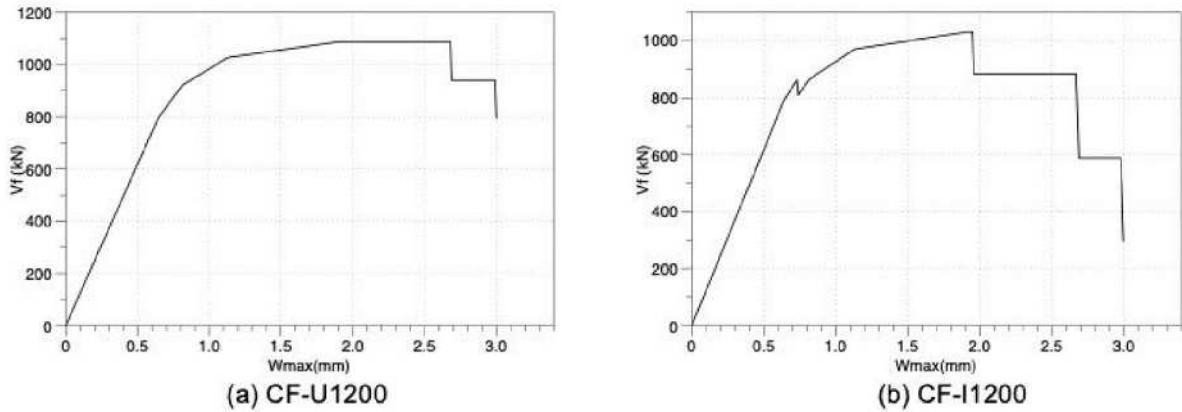


図-14 ひび割れ幅と  $V_f$ との関係（大型供試体の例）

ここで、 $A_{fi}$ ：シートの断面積 ( $mm^2$ )である。

シート全体が負担するせん断力  $V_f$ は、斜めひび割れと交差する全てのシートについて負担せん断力を足し合わせることで求める。すなわち、 $V_f$ は式(15)で求められる。

$$V_f = 2 \sum_{i=1}^n V_{fi} \quad (15)$$

ここで、 $V_{fi}$ ：各々のシートの引張力( $kN$ )、 $n$ ：ひび割れと交差するシートの本数である。

### 6.5 $V_f$ の算出結果

シート補強した供試体について、各々のシートが負担するせん断力  $V_{fi}$ を前項で示した方法により算出した。図-13は、その大型供試体の例である。図-14は、図-13で算出した負担せん断力を式(15)により足し合せた結果である。斜めひび割れ幅が小さい領域では、斜めひび割れ幅の増大に比例して  $V_f$ が増大していくが、ある値より大きくなるとシートの局所剥離が順次発生し、剥離したシートの負担せん断力が頭打ちとなるので  $V_f$ の増加も緩やかになる。さらに、ひび割れ幅が増

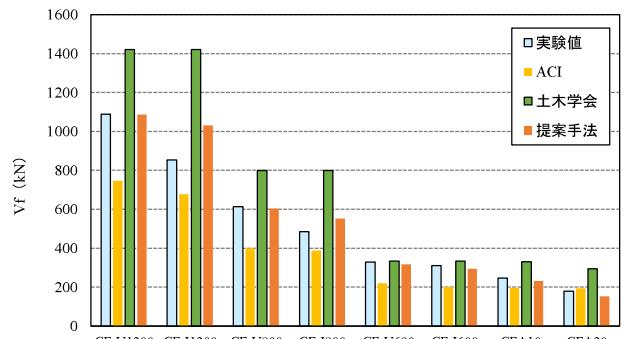


図-15  $V_f$ に関して提案手法と既存の耐荷式との比較

大すると、シートの全体剥離が生じ、剥離したシートの負担せん断力がゼロとなるため、合計の  $V_f$ は減少する。これによって、ひび割れ幅を増大させる過程において  $V_f$ の最大値  $V_{fu}$ が自動的に求まる。

### 6.6 $V_f$ の算定精度

図-15は、提案手法によって求めた  $V_{fu}$ と実験から得られた終局時のシート負担せん断力  $V_{fe}$ を既存の耐荷力式との比較したものである。前提としてコンクリートの斜めひび割れ発生後の負担せん断力は一定である

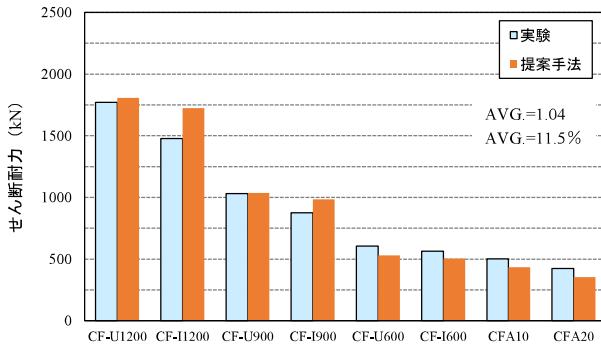


図-16 提案した手法によるせん断耐力の算定精度

とし、 $V_{fe}$ を式(16)で求めた。

$$V_{fe} = V_u - V_c \quad (16)$$

ここで、 $V_u$ ：終局時の作用せん断力 ( $kN$ )、 $V_c$ ：斜めひび割れ発生時の作用せん断力 ( $kN$ )である。

図-15より、提案手法によるシートが負担するせん断力は、既存の評価式と比較して算定精度が大きく向上している。また、図-16より、せん断耐力のシート補強した8体の算定精度( $V_{fe}/V_{fu}$ )は、平均値が1.04、変動係数が11.5%であった。これより提案した手法は既存の耐荷力式より高い精度で評価できるといえる。一方で、側面補強した場合において、大型供試体(CF-I1200)および中型供試体(CF-I900)の計算値が実験値よりやや過大に評価しているため、今後の課題として挙げられる。

## 7. CFRP シートの材料特性の評価

CFRP シートをはじめ、道示に規定のない材料や構造を適用する場合には実験的検証を通じて材料としての特性や部材に用いた場合の機構に対する信頼性を確認するとともに、一般化のためには長期の使用や長期の間の多様な外力及び環境条件における経験を経て、多様な条件に適応できる条件を明らかにする必要がある。そのため、たとえばある材料についての引張強度を部材の耐荷性能または耐久性能を評価するために見込む場合には、常に一定の信頼度でその強度が実現できること、また、強度のばらつきを含めてどの範囲まで強度を見込んでよいかが明確であることが求められる。

そこで、本章では CFRP シートについて基準への一般化に向け、まずは機械的性質に代表される材料強度試験データを収集し、引張強度と弾性係数のばらつきを分析した。なお、道示ではこのように整理された各材

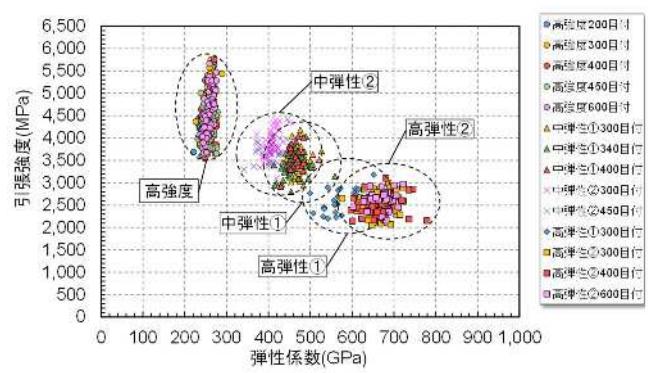


図-17 CFRP シートの引張強度と弾性係数の関係

表-4 CFRP シートの引張強度のばらつき

種類	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	データ数	特性値 (MPa)	平均値 (MPa)	比率	標準偏差	変形係数 (%)
高強度	200	75	3,400	4,550	1.34	0.13	10.0
	300	75	3,400	4,910	1.44	0.11	7.7
	400	75	3,400	4,390	1.29	0.12	9.4
	450	70	3,400	4,280	1.26	0.11	8.8
	600	75	3,400	4,560	1.34	0.14	10.6
中弾性①	300	50	2,400	3,490	1.45	0.11	7.9
	340	40	2,400	3,380	1.41	0.10	7.4
	400	25	2,400	3,570	1.49	0.11	7.7
	300	50	2,900	3,840	1.32	0.10	7.5
中弾性②	450	25	2,900	3,650	1.26	0.10	7.7
	300	25	1,900	2,570	1.35	0.14	10.2
高弾性①	300	50	1,900	2,510	1.32	0.13	9.7
	400	50	1,900	2,500	1.31	0.11	8.5
	600	25	1,900	2,630	1.38	0.11	7.9
高弾性②	300	50	640	660	1.04	0.05	4.5
	400	50	640	670	1.04	0.06	5.7

表-5 CFRP シートの弾性係数のばらつき

種類	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	データ数	特性値 (GPa)	平均値 (GPa)	比率	標準偏差	変形係数 (%)
高強度	200	75	245	250	1.03	0.04	4.1
	300	75	245	260	1.06	0.04	3.7
	400	75	245	260	1.05	0.04	3.4
	450	70	245	260	1.04	0.04	4.2
	600	75	245	260	1.05	0.04	3.8
中弾性①	300	50	440	470	1.06	0.05	4.4
	340	40	440	460	1.05	0.06	6.0
	400	25	440	460	1.05	0.03	3.0
	300	50	390	410	1.05	0.06	5.5
中弾性②	450	25	390	410	1.06	0.08	7.7
	300	25	540	570	1.06	0.08	7.8
高弾性①	300	50	640	660	1.04	0.05	4.5
	400	50	640	670	1.04	0.06	5.7
	600	25	640	670	1.04	0.05	4.3
高弾性②	300	50	640	660	1.04	0.05	4.5
	400	50	640	670	1.04	0.06	5.7

料強度のばらつきは、最終的に材料強度のばらつきも見込んだ部材耐力のばらつきとして評価することで考慮しており、今回整理したデータについても部材耐力の抵抗係数を算出する際の根拠として使用することを想定している。

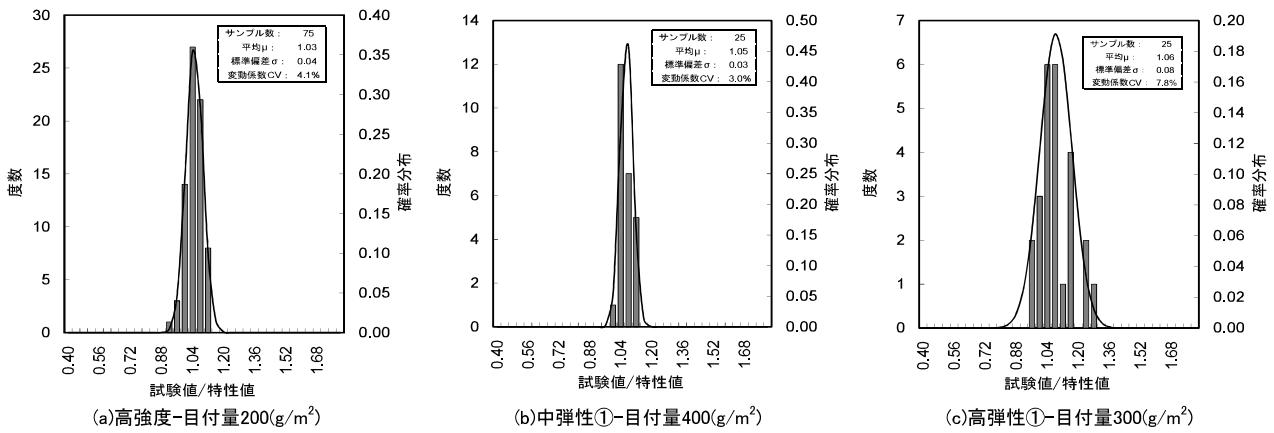


図-18 CFRP シート引張強度のばらつき

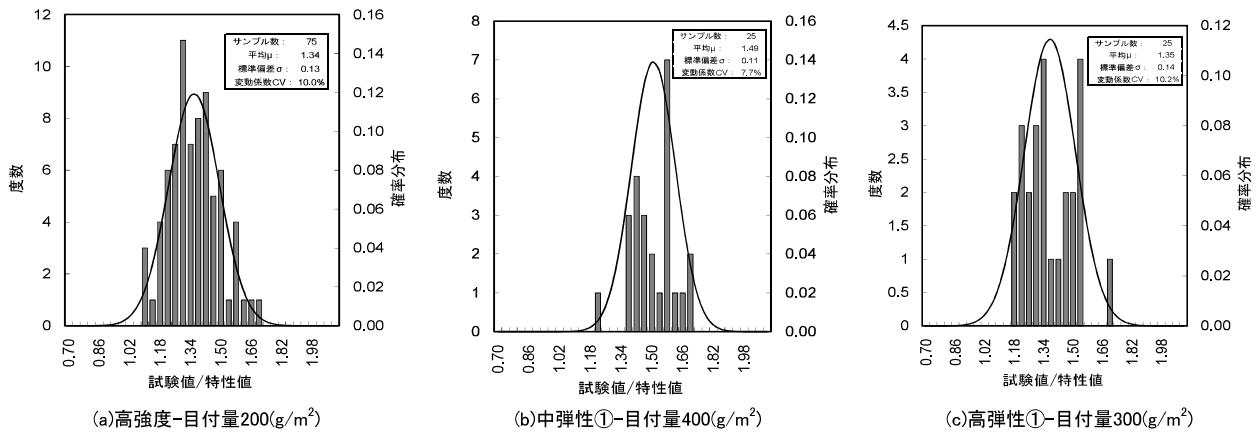


図-19 CFRP シート弾性係数のばらつき

表-6 CFRP シートの引張強度の特性値

種類	引張強度 (MPa)			
	平均値 $x$	標準偏差 $\sigma_n$	特性値 $x - 1.64\sigma_n$	特性値 <sup>3)</sup>
高強度	4,540	472	3,800	3,400
中弾性	3,470	275	3,100	2,400
高弾性	2,530	229	2,200	1,900

## 7.1 CFRP シートの引張強度と弾性係数

図-17 に、高強度・中弾性・高弾性の CFRP シート（計 710 本）について、国内の材料メーカー 3 社から収集した引張試験データより得られた引張強度と弾性係数の結果をそれぞれ示す。図中には、それぞれのシートの目付量毎の結果を示している。なお、引張試験は 1 層に対して実施した結果であり、試験法は JIS A 1191 による。

図-17 より、引張強度はシートの種類にかかわらず概ね同程度のばらつきがあることが確認できる。また、弾性係数は、高強度が中弾性や高弾性に比べてばらつきが小さい傾向にある。

## 7.2 引張強度と弾性係数のばらつき

実設計で使用している特性値に対して、引張強度試験より得られた引張強度と弾性係数のばらつきを図-18、19 にヒストグラムで示す。図-18、19 には、代表して高強度（目付量 200g/m<sup>2</sup>）、中弾性（目付量 400g/m<sup>2</sup>）、高弾性（目付量 300g/m<sup>2</sup>）の結果を示しているが、それ以外にも表-4、5 に示す全てのシートの引張強度及び弾性係数は、概ね正規分布の曲線に沿ってプロットされる。

表-4 より、引張強度の平均値はいずれの種類も特性値の 1.3 倍程度、変動係数が概ね 10% 程度であった。一般に、標準養生した供試体により確認したコンクリートの圧縮強度の変動係数は 7% 程度、鉄筋の降伏強度の変動係数は 4% 程度であり<sup>9</sup>、それらに比べて CFRP シートの引張強度のばらつきが若干大きいことがわかる。この理由は、炭素繊維シートに樹脂を含浸・硬化させる過程に起因し生じるばらつきの影響であると考えられる。また、表-6 より弾性係数の平均値は、いずれの種類も特性値とほぼ同等であった。変動係数

は高強度が4%程度、中弾性と高弾性については、シートの目付量が毎に3%から8%の間で差がみられた。一般に、コンクリートの弾性係数の変動係数は10%程度であり<sup>9)</sup>、CFRPシートの弾性係数のばらつきはそれに比べて小さい。

### 7.3 材料の特性値

実設計で使用されているCFRPシートの特性値は、土木研究所の実験結果<sup>10)</sup>より整理された値であり、引張強度は0.1%フラクタイル値( $x - 3x_n$ )を、弾性係数は平均値が用いられている。一方、道示での材料強度の特性値は、試験値のばらつきを考慮したうえで、試験値がそれを下回る確率がある一定以下となることが保証された値となるように定めており、例えばコンクリートの圧縮強度の場合、5%フラクタイル値( $x - 1.64x_n$ )となるように定められている。そこで、仮にCFRPシートの引張強度に対して5%フラクタイル値となるように特性値を定めるとした場合の試算結果を表-5に示す。この場合、引張強度の特性値は実設計で使用している値よりも1.1倍程度が大きくなる。

## 8. まとめ

本研究では、道路橋の補修補強材料として広く採用されているCFRPシートに着目し、その評価法の一般化に向けて、コンクリート橋の上部構造を想定して、CFRPシートに補強された実スケールRCはりのせん断試験およびCFRPシートの材料特性に関する分析を行った。本研究により得られた知見は以下の通りである。

1. シート補強されたRCはりのせん断試験において、せん断破壊は斜めひび割れの発生、シートの局所剥離、全体剥離という過程を経て起こること、また積層数が増えると、剥離が発生しやすくなるという広義の意味での寸法効果が存在することが明らかになった。
2. シート補強されたRCはりの実験結果における破壊耐力について、既存の土木学会などの耐力式の計算結果と比較したところ、正確にせん断耐力を評価できないことがわかった。特に、土木学会における評価式は、むしろ実験値よりも危険側に評価する場合があることがわかった。
3. 実験結果により考察した耐荷機構を踏まえ、剥離過程をモデル化したせん断耐力評価方法の提案を行った。提案手法は、貼り付け方法が異なる場合において、特に側面接着された場合で精度に課題が残されたものの、既存の評価式

に比べ、概ね妥当な精度で評価できることが示された。

4. CFRPシートの材料特性に関する分析を行った結果、引張強度のばらつきは、コンクリートの圧縮強度や鉄筋の降伏強度に比べて若干大きな値を示すが、弾性係数のばらつきは小さな値を示す傾向にあることがわかった。また、引張強度の特性値については5%フラクタイル値となるように定めた場合、実設計で使用している値よりも1.1倍程度大きくなることが知見として得られた。

## 5.

### 9. おわりに

本課題では、早稲田大学、弘前大学、日本大学との共同研究を実施している。本共同研究により、CFRPシートに補強されたRCはりの耐荷メカニズムに立脚したせん断耐力の評価手法に関する一連の知見は得られたものの、複合化技術として塩害により劣化した既設部材に対する影響評価を含め、普遍的な設計手法の整備には至っていない。そのため、塩害劣化に対して適切な補強効果が発揮されるための補修の前提条件やCFRPシート以外にも適用可能な合理的な貼り付け方法、それに基づいた力学モデルや境界条件の設定、破壊メカニズムの制御方法などの検討が今後必要である。また、材料特性に関しても、今回整理した強度特性のみならず、長期の使用における多様な外力及び環境条件における耐久性の観点から、基準に規定される材料と同程度の信頼性で所定の性能が得られるように許容値や品質、施工などの条件を設定するための検討が必要である。

### 参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じるコンクリート構造物の構造性能、維持管理優先度研究小委員会、2006.8.
- 2) 土木学会：統・材料劣化が生じるコンクリート構造物の構造性能、維持管理優先度研究小委員会、2009.5.
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー101 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、2000
- 4) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説III コンクリート橋編、2017.3.
- 5) ACI : Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R.

- 6) ACI : Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-05
- 7) 佐藤靖彦, 浅野靖幸, 上田多門 : 炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究, 土木学会論文集 No.648/V-47, pp41-87, 2000.5
- 8) Chen, J. F. and Teng, J. G. : Anchorage Strength Model for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete, J. Struct. Eng., ASCE, 127(7), pp784-791, 2001
- 9) 国立研究開発法人土木研究所 : コンクリート道路橋の性能規定及び部分係数設計法に関する調査研究、土木研究所資料第 4401 号、2020. 5
- 10) 建設省土木研究所 : コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書 (III)、共同研究報告書 第 220 号、1999.12.

## RESEARCH ON SAFETY EVALUATION OF SALT DAMAGED AND DETERIORATED MEMBERS REPAIRED AND REINFORCED BY COMPOSITE TECHNOLOGY (2)

Research Period: FY2018-2021

Research Team: Bridge and Structural Engineering Research Group

Author: ISHIDA Masahiro

YOSHIDA Eiji

TAKEUCHI Aya

**Abstract:** In order to reliably implement a maintenance cycle for road bridges, it is necessary to accurately "diagnose" the condition of deteriorated members and take "measures" according to their condition. In this study, in order to propose an evaluation method based on the reliability of composite technology, we focused on CFRP sheets, which are typical of composite technology using FRP materials, etc. We fabricated a specimen close to the actual scale reinforced by CFRP sheets, and investigated the shear resistance mechanism and its evaluation method. As a result, it was found that the shear force that the sheets can bear is not directly affected by the increase in the size of the specimen, but that delamination occurs more quickly and the shear resistance becomes smaller as the number of sheets increases. Therefore, we proposed a new shear resistance evaluation method that models the delamination process, and confirmed that the method can predict the experimental results with generally reasonable accuracy. Furthermore, as a study for the introduction of CFRP sheets into the standards, we collected tensile test data of CFRP sheets and analyzed the variation of tensile strength and modulus of elasticity.

**Keywords:** CFRP sheets, RC beams, shear reinforcement, variation in material strength data