

論文 ガラス繊維シートの片面貼付による RC はりの曲げ補強効果

小林 憲治^{*1}・日野 伸一^{*2}・Basem Abdullah^{*3}・佐々部 宏^{*4}

要旨：本研究はガラス繊維シート（GF シート）の既設コンクリート部材に対する曲げ補強を目的として、ひび割れ損傷を有する既設建物布基礎を対象とした T 形断面 RC はりを作製して、GF シートの片面貼付による補強を行い、その補強効果を実験的に検討したものである。本実験は、用いる GF シートの枚数・貼付位置およびシート剥離を抑制するためのファイバーアンカーの有無をパラメータとし、静的または繰返し曲げ載荷試験を実施した。その結果、GF シートの片面貼付による RC はりの曲げ耐力および靱性の改善効果が明らかになった。またシートの剥離耐力向上にファイバーアンカーの施工が有効であることが示された。

キーワード：ガラス繊維シート，ファイバーアンカー，曲げ補強，剥離

1. はじめに

現在、RC 部材の補強に高強度かつ高弾性である炭素繊維シートやアラミド繊維シートを、樹脂接着する補強工法が多く用いられている。連続繊維シート接着による RC 部材補強工法は、施工が簡便で工期が短い等、施工性に優れた特長を有している。また、繊維の目付け量や積層数の増減により柔軟な補強設計が可能である¹⁾。一方、ガラス繊維シート（以下、GF シート）は、炭素繊維シートやアラミド繊維シートに比べ材料単価が大幅に安価であるにも関わらず、ヤング係数が過小なため曲げ補強効率が劣るとして、かぶりコンクリートの剥落防止や、一部の鉄道橋脚のせん断補強あるいは靱性改善²⁾を目的とした適用事例を除き、わが国では著者らの知る限り補強実績はもちろん、GF シートの曲げ補強効果についての研究もほとんどない。しかし限定された補強効果を実現する上で、経済性追及の観点から GF シートの有用性も十分有り得るものと考えられる。

そこで本研究では、GF シートの既設コンクリート部材の曲げ補強への適用を目的として、ひ

び割れ損傷を有する既設木造建物布基礎を対象とした GF シートの片面貼付による曲げ補強効果検証実験を実施した。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

供試体の概要図を図-1 に、供試体の種類を表-1 に示す。供試体は、既設木造建物の布基礎を想定した過小鉄筋比の T 形断面はりとした。ひび割れ損傷を有する基礎を再現するため、全供試体が同様のひび割れ状態となるように予め中央部の曲げスパン内に、125mm 間隔のひび割れ誘導目地を 5 ヶ所設け、それが 0.2mm 幅程度となるまで 4 点曲げ載荷を行った。供試体は TypeA ～F の 6 体である。初期ひび割れ導入後、すべての供試体のひび割れにエポキシ樹脂注入による、ひび割れ補修を実施した。TypeA はエポキシ樹脂注入のみ、TypeB～F はエポキシ樹脂注入後、GF シート（以下、シート）を接着して補強した。さらに TypeE, F についてはファイバーアンカー（写真-1）を 450mm 間隔で 6 本設置しシートの剥離を抑制した。

*1 九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻（正会員）

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 教授 工博（正会員）

*3 (株) SF エンジニアリング 博（工）（正会員）

*4 (株) ウェストホールディングス 経営企画室 次長（非会員）

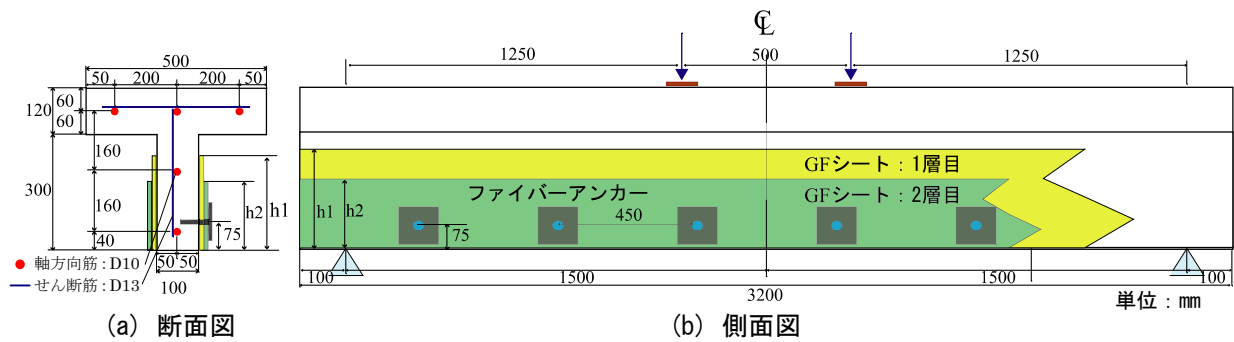


図-1 供試体の概要図

表-1 供試体の種類

Type	貼付位置	層数	1層目 h1 (mm)	2層目 h2 (mm)	アンカー (本数)
A	-	-	-	-	-
B	片面	1	300	-	-
C	片面	2	300	150	-
D	両面	4	300	150	-
E, F	片面	2	200	200	6

表-2 材料特性値

コンクリート	圧縮強度	N/mm ²	45.6
	引張強度	N/mm ²	3.22
	ヤング係数	kN/mm ²	34.6
鉄筋	降伏強度	N/mm ²	346
	ヤング係数	kN/mm ²	200
GFシート	引張強度	N/mm ²	575
	ヤング係数	kN/mm ²	26.0
	破断伸び	%	2.20
	厚さ (1枚)	mm	1.30
エポキシ樹脂	目付け量	g/m ²	915
	引張強度	N/mm ²	72.0
	ヤング係数	kN/mm ²	3.20
	破断伸び	%	5.00



写真-1 ファイバーアンカー



写真-2 供試体設置状況

本来であれば、曲げ補強には引張側底面にシートを接着して補強することが望ましいが、本試験で対象としている既設木造建物布基礎では、作業空間が狭小であり補強施工に制約を受け、側面かつ片面のみの施工に限定されるため、図-1および表-1のような貼付位置とした。

なお、CFRPやAFRPなど連続繊維シートの側面接着による補強効果は、繊維強化方向や補強範囲に影響を受けることや、アンカーボルトの設置が連続繊維シートの剥離抑制に有効であることが既往研究^{3), 4)}により明らかにされている。

補強に用いたシートはFyfe社製のSHE-51で

ある。ファイバーアンカーは、ガラス繊維ロービングを束ね、傘部を放射状に広げてシートと含浸させて一体化させるものである。コンクリート、鉄筋、GFシートおよび樹脂接着剤の材料特性値を表-2に示す。

2.2 載荷試験概要

補修および補強の完了した供試体について、TypeA～Eは漸増4点曲げ載荷試験を実施し、TypeFは同じ補強タイプであるTypeEの結果より、荷重-たわみ曲線の勾配が変化した点の変位を基準に、その奇数倍となるよう載荷ステップを設定し、各ステップ3回の繰返し載荷を実

施した。供試体の設置状況を写真-2に示す。載荷試験中、シート、鉄筋、およびコンクリートのひずみ、スパン中央部の鉛直変位、供試体下面のひび割れ幅を計測した。

3. 試験結果

3.1 TypeA～D

(1) 変形および破壊性状

初期ひび割れ導入箇所では先行的にひび割れ幅が拡大していったが、シート補強を実施した TypeB～D はひび割れが次第に分散し、載荷スパン全域に渡って曲げひび割れが進展した。

供試体の破壊は、無補強の TypeA では荷重が増加せずたわみおよびひび割れ幅のみが増加していき、たわみが 4mm を超えた時点で載荷を終了した。シート補強を実施した TypeB～D では、各最大荷重時にシートの大きな剥離音が発生して荷重が低下した。この時点で載荷を終了した。TypeB～D の破壊形式は、上縁コンクリートの圧壊によって終局に至る曲げ圧縮破壊型ではなく、シートの剥離が生じて終局に至る剥離破壊型³⁾であった。また全供試体ともに最終的にシートの破断には至っていない。これより本補強供試体の曲げ耐力は、シートの付着強度に依存していると考えられる。スパン中央部の荷重-たわみ関係を図-2に示す。シート補強によって曲げ耐力および靱性が顕著に向上したことが確認できる。また、その補強効果はシートの補強量に依存している。

(2) シートのひずみと剥離状況

TypeB～F のスパン中央部最下縁の、荷重-シートひずみ関係を図-3に示す。図より TypeB～D では、ひび割れ発生後にシートのひずみが増加することから、シートが引張抵抗に寄与していることがわかる。

TypeB～D の片面に接着したシートは、荷重の増加に伴い徐々にコンクリートから剥離していった。シートの剥離は、載荷スパン間に生じたコンクリートのひび割れに沿って筋状に発生した後、剥離領域が次第に支点方向へと拡大して

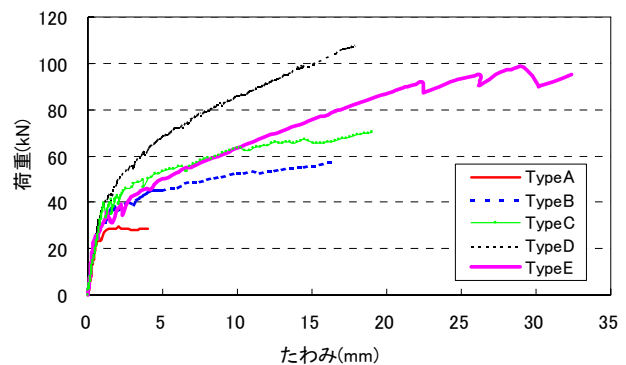


図-2 荷重-たわみ関係

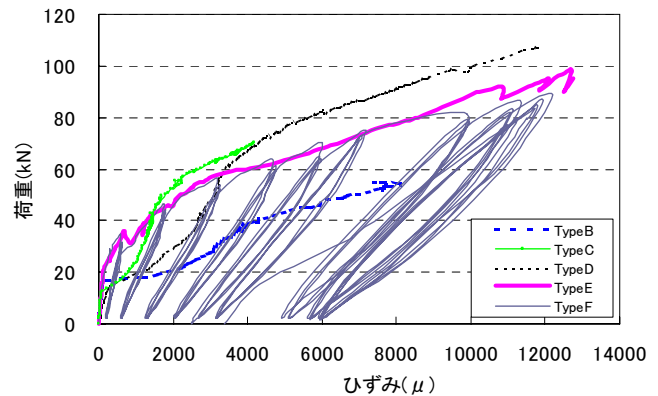


図-3 荷重-GF シートひずみ関係

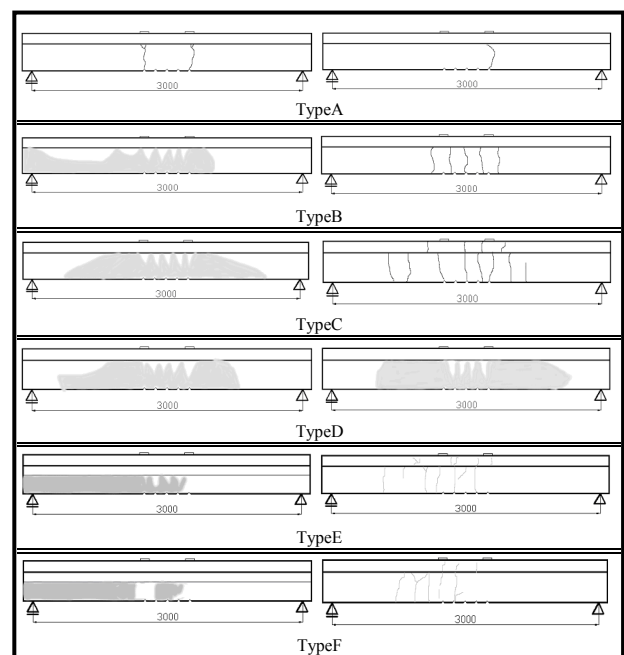


図-4 コンクリートひび割れ
およびシート剥離状況

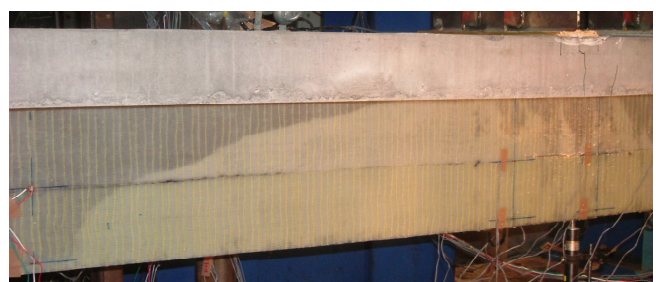


写真-3 GF シート剥離状況 (TypeC)

いった。コンクリートひび割れおよびシートの剥離状況を図-4に、TypeCのシートの剥離状況を写真-3に示す。

3.2 TypeE, F

(1) 変形および破壊性状

TypeE および TypeF の荷重-たわみ関係を図-5に示す。TypeE は荷重 92kN 以降、荷重の増減を3回繰返した後、95kN で大きな剥離音とともにシートの端部（支点側）が、コンクリートから完全に剥離して破壊した。ファイバーアンカーがシートの剥離を抑制して、曲げ耐力と靱性を大幅に改善することが明らかとなった。

TypeF は TypeE の試験結果より荷重-たわみ曲線の勾配が変化した点の変位を基準変位 $\delta y = 1.32\text{mm}$ として繰返し载荷を実施した。変位が $17\delta y$ ($P=89.5\text{kN}$) までは、TypeE とほぼ同様の挙動を示していることが確認できる。変位を $19\delta y$ へと増加させた時点で、大きな剥離音が発生し、 $21\delta y$ へ増加させようとしたときに大きな剥離音とともにシートの端部（支点側）がコンクリートから完全に剥離する TypeE と同様の破壊形式であった。

(2) シートのひずみと剥離状況

図-3に示す荷重-シートひずみ曲線からファイバーアンカーを設置した TypeE, F は片面貼付の TypeB, C に比べ、最大荷重時のシートのひずみが増大し、両面貼付の TypeD と同等になっていることがわかる。これより、耐力に大きく影響するシートの剥離をファイバーアンカーの設置により遅延させた TypeE, F はシートの補強効果をより有効にすることがわかる。

なお、シートの剥離は TypeB~D と同様に载荷スパン間のひび割れに沿って筋状に発生した後、剥離領域が次第に支点方向へ拡大していった。但し、TypeE, F は片方の支点側最端部のファイバーアンカー1本が、既設コンクリートと GF シートの界面でせん断破断するとともに、シートが完全にコンクリートと剥離した。TypeE における、ファイバーアンカーの破断状況を写真-4に示す。また試験終了後にシートを除去した後の

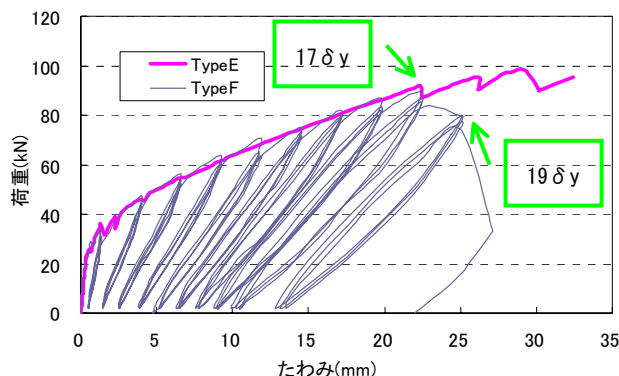


図-5 荷重-たわみ履歴曲線



写真-4 アンカー破断状況

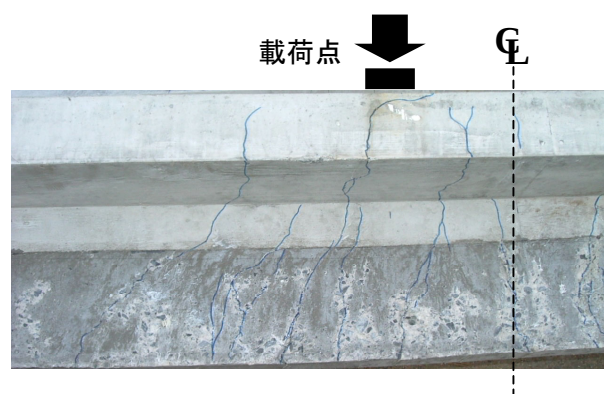


写真-5 TypeE ひび割れ（シート接着面）

コンクリート面を写真-5に示す。TypeE に発生したひび割れは、ファイバーアンカーを設置していない TypeB~D に発生した曲げひび割れに対して、载荷点から支点方向へせん断ひび割れが発生しているのが確認できる。曲げ補強効果を検証するため、曲げ破壊が先行するように供試体を作製したが、ファイバーアンカーの設置によりシートの剥離発生後もシートが引張力を負担し続けるため、曲げ耐力が増大することとともない、せん断ひび割れが発生したものと考えられる。

3.3 補強効果の比較

(1) 降伏および終局耐力

ひび割れ発生箇所の最下段の鉄筋が降伏した時点の荷重を降伏耐力 P_y として(図-6), TypeA の降伏耐力 (P_{ya}) を基準に相対比較したもの, および各供試体の荷重が最大となる点を終局耐力 P_u として(図-6), TypeA の終局耐力 (P_{ua}) を基準に相対比較したものをそれぞれ図-7 に示す。降伏耐力においては TypeC を除き, 供試体間の相対関係は終局耐力と同様であり, シート補強により降伏耐力は, 1.4~1.9 倍まで増大していることがわかる。また終局耐力は, 両面にシートを施工した TypeD が最も大きく TypeA の 3.8 倍となった。TypeE, F は, シートの補強量が同程度の TypeC と比較して終局耐力が大幅に増大していることから, ファイバーアンカーの剥離抑制効果が明らかである。

(2) 変形性能

降伏耐力時のスパン中央部におけるの変位を δy , 最大荷重時の変位を δu とし, δu を δy で除した値を塑性率 μ ($\mu = \delta u / \delta y$: 図-6) として各タイプの相対比較を行った。TypeA の塑性率 (μ_a) を基準にそれぞれ比較したものを図-8 に, 各タイプの塑性率と合わせて示す。また, 荷重-たわみ曲線において, 最大荷重時までの曲線で作られる面積をエネルギー吸収能 E と定義し(図-6), TypeA のエネルギー吸収能 (E_a) を基準として相対比較したものを図-9 に示す。図より, TypeE のエネルギー吸収能が TypeA の約 20 倍と最も大きく, 繰返し载荷を実施した TypeF でも, 両面にシートを施工した TypeD と同等程度エネルギー吸収能を有することが確認できる。これらより, ファイバーアンカーによるシートの剥離抑制効果に起因するエネルギー吸収能の増大が明らかである。

3.4 補強設計の考察

表-3 および図-10 に, シートの終局ひずみを 2 通り, いずれも終局時まで断面の平面保持則が成り立つことを仮定して RC 曲げ理論に基づく終局耐力の計算値と実験値を比較した結果

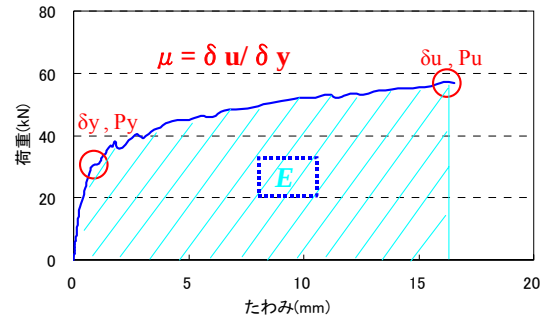


図-6 諸値の定義

表-3 補強効果の比較

Type	-	A	B	C	D	E	F
終局耐力 (実験値)	kN	28.5	57.3	70.2	107	98.1	88.7
最大荷重時のシートひずみ (実験値)	μ	-	8090	5456	11836	12754	11950
シートの設計破断ひずみによる曲げ耐力 (計算値(I))	kN	31.7 ^(※1)	96.6	141	248	144	144
実験値/計算値(I)	-	0.90	0.59	0.50	0.43	0.68	0.62
シートひずみの実測値による曲げ耐力 (計算値(II))	kN	31.7 ^(※1)	48.6	52.4	144.1	93.7	86.2
実験値/計算値(II)	-	0.90	1.18	1.34	0.74	1.05	1.03
降伏耐力 (実験値)	kN	21.6	30	40.1	38.5	36.5	32.6
塑性率	-	7.64	19.6	18.2	19.3	22.3	16.6
エネルギー吸収能	kN・mm	101.3	751.0	1076	1369	2037	1397
降伏耐力比 ^(※2)	-	1	1.4	1.9	1.8	1.7	1.5
終局耐力比 ^(※2)	-	1	2.0	2.5	3.8	3.4	3.1
塑性率比 ^(※2)	-	1	2.6	2.4	2.5	2.9	2.2
エネルギー吸収能比 ^(※2)	-	1	7.4	10.6	13.5	20.1	13.8

※1: TypeAは上縁コンクリート圧縮破壊として計算

※2: TypeAを基準として各Typeと比較したもの

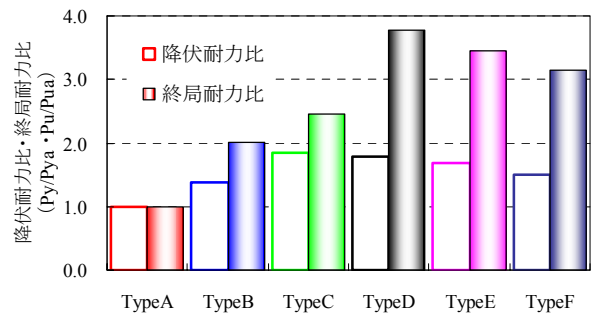


図-7 降伏荷重および終局荷重の比較

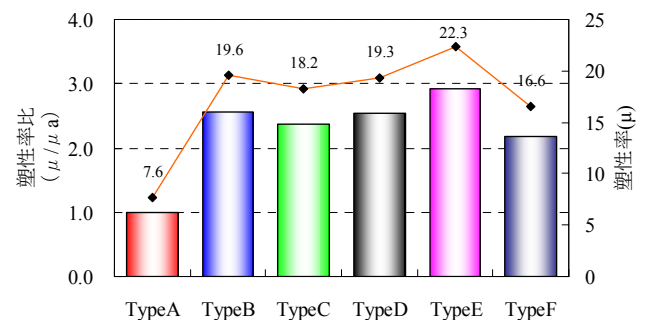


図-8 塑性率の比較

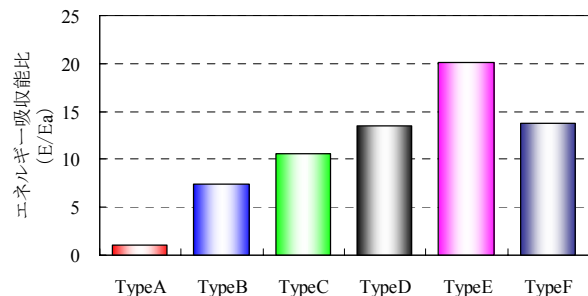


図-9 エネルギー吸収能の比較

を示す。すなわち、計算値（Ⅰ）は、TypeA では上縁コンクリートひずみがコンクリートの終局ひずみに達した時を、また TypeB～F については最下端シートひずみが設計破断ひずみの2.2%に達した時をそれぞれ終局状態として、それまではシートは剥離せずに完全合成断面として挙動することを想定して算定した曲げ耐力である。これより、ファイバーアンカーを設置していない TypeB～D の実験値と計算値（Ⅰ）の比は0.43～0.59、またファイバーアンカーを設置した TypeE, F の比は0.62～0.68 と、いずれも過小な値を示した。これは、終局時のシートひずみが設計破断ひずみに比べて過小であること、ファイバーアンカーを設置することでシート剥離を遅延させ、引張抵抗力を増加させることを追証したものである。

これに対して計算値（Ⅱ）は、最大荷重時におけるシートひずみの実測値に基づく曲げ耐力の算定値である。終局時のシートひずみは破断ひずみの40～60%相当の0.8～1.3%であり、これに基づく実験値と計算値（Ⅱ）の比は、0.74～1.34 となり計算値（Ⅰ）に比べて実験値に近い結果となった。特に、ファイバーアンカーを設置した TypeE, F では、シートの終局ひずみは1.2～1.3%で、これを用いた計算値は実験値と良く一致する結果となった。

以上より、シートの終局時の剥離ひずみが判明すれば、それを用いて RC 曲げ理論に基づき、終局曲げ耐力を精度良く推定することが可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、GF シートの既設コンクリート部材補強への適用を目的として、既設建物布基礎を対象とした過小鉄筋比の T 形断面 RC はりに、GF シートによる補強およびファイバーアンカー施工を行い、その補強効果を実験的に検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) GF シートによる補強によって、はりの曲げ耐力および変形性能を向上できた。また、そ

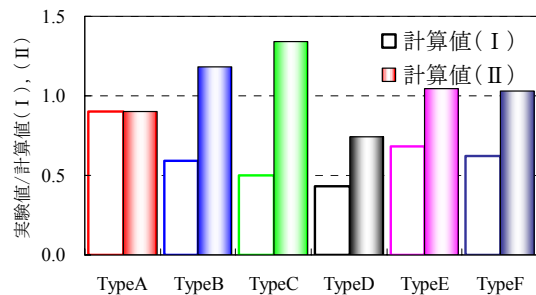


図-10 終局耐力計算値の比較

の補強効果は GF シートの補強量に依存する。はりの破壊形式は GF シートの剥離による剥離破壊型であった。

- (2) ファイバーアンカーの設置により、GF シートの剥離を抑制し、また GF シート剥離進展後もシートは引張力を負担できることで、さらなる耐力向上が期待できる。
- (3) GF シートの剥離ひずみは設計破断ひずみの40～60%程度の0.8～1.3%となり、それに基づく曲げ耐力算定値は実験値の0.74～1.34程度の精度で評価できた。

以上、既設コンクリート部材の補強工法として、これまであまり適用実績のなかった GF シートについても、限定した補強要求レベルに対しては、十分補強効果の期待できる有用な補強材であると考えられる。今後は、GF シートの剥離が終局耐力を支配していることから、シートの剥離ひずみの究明とその抑制対策について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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，コンクリートライブラリー101，2000。
- 2) 鉄道総合技術研究所：既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 PPS 巻補強編，2004。
- 3) 澤田 純之，岸 徳光，三上 浩，栗橋 祐介：側面接着を施した FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷挙動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.27，No.2，pp.1399-1404，2005。
- 4) 鈴木 健太郎，三上 浩，岸 徳光，澤田 純之：AFRP シート曲げ補強 RC 梁のアンカーボルトを用いた剥離抑制法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.28，No.2，pp.1477-1482，2006。