

論文 FRP 吹付け工法による T 型 RC 梁の耐震補強

古田 智基^{*1}・金久保 利之^{*2}・高橋 啓介^{*3}・根本 武^{*4}

要旨：カーボン・ガラスの短繊維とビニエステル樹脂を使用した，コンクリート系構造物の FRP 吹付け耐震補強に着目し，入隅部での FRP スリット充填定着を想定した JCI 型の二面せん断付着実験および T 型梁の曲げせん断実験を行った。付着実験よりスリットの深さは 5mm で十分な定着強度を有し，T 型梁実験ではスリット定着により入隅部での FRP の破壊を防止し，FRP 吹付けによる耐震補強効果が見込めることが確認された。

キーワード：FRP，ガラス繊維，ビニルエステル，定着，せん断補強，靱性

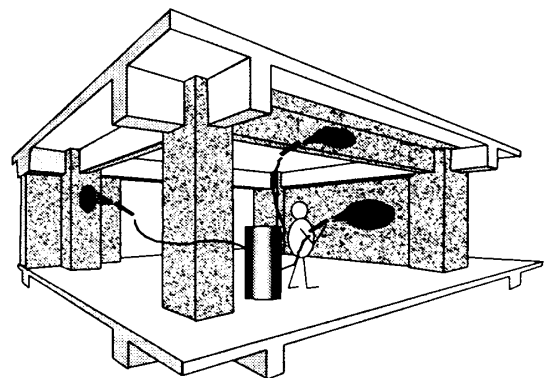
1. はじめに

近年，コンクリート系構造物の耐震補強として，連続繊維シート貼付による耐震補強工法が多く用いられるようになってきている。しかし，今後の耐震補強の一層の促進を考えると，より低コストで施工が容易な補強工法を提案するとともに，その耐震性能を確認し，補強後の構造安全性を保証しなければならない。

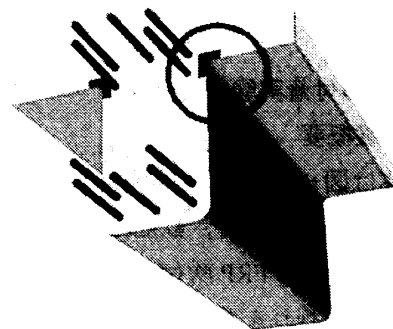
筆者らは，安価で施工の容易な補強方法として，「カーボン・ガラスの短繊維＋ビニエステル樹脂」を，コンクリート系建築構造物に対して現場吹付けする耐震補強工法（以下，FRP 吹付け工法）に着目し，これまでに矩形柱の耐震補強実験を行いその有効性を確認している¹⁾。また，FRP 吹付け工法では図－1に示すように床，壁の多い建築構造物の表面形状に沿った形で FRP を現場成型できるため，柱付き壁や床付き梁（T 型梁）の耐震補強に対して有効である。本研究では FRP 吹付け工法による T 型梁の耐震補強に焦点をあて，その有効性を確認することを目的とする。

連続繊維シートによる T 型梁の耐震補強では，梁とスラブとの入隅部でのシートの定着性状が T 型梁の構造性能に影響を与えることが確認されている²⁾。本研究では FRP 吹付け工法のメリ

ットを生かすことができる「FRP スリット充填定着」（図－2）を主とし，さらにボルトや鋼材を使用した FRP の定着も試みている。本研究では T 型梁の実験とともに「FRP スリット充填定着」の定着性能を把握するために JCI 型の二面せん断付着実験も行ったので，同時に報告する。



図－1 FRP 吹付け工法による耐震補強



図－2 入隅部の FRP スリット充填定着

*1 バンドー化学（株） 運搬・建設資材事業部 博士（工学）（正会員）

*2 筑波大学講師 機能工学系 博士（工学）（正会員）

*3 三菱化学産資（株） 複合材事業部

*4 昭和高分子（株）

2. 使用繊維および樹脂

本研究のFRP吹付け工法で使用した繊維および樹脂は、ガラス繊維（ロービング）およびビスフェノール A 系ビニルエステル樹脂で、スプレーアップ装置のスプレーガンに内蔵されているカッターで繊維を 1.5 インチ (38mm) に裁断しながら樹脂とともに試験体に吹付けた。T 型梁試験体、付着試験体とも FRP の目標吹付け厚は 3.0mm とし、あらかじめ単位時間の吹出量を測定しておき、目標となる吹付け厚になるよう吹出時間によりコントロールした。本工法による FRP の繊維体積含有率 (v_f) はおよそ 30% である。なお、本研究では、実験結果を既往の連続繊維シート補強による補強実験結果と直接比較するため、シート補強の場合と同様に下地処理としてコンクリート表面ケレン、プライマー塗布およびパテ処理を施している。将来的には、これらの下地処理を省いた施工を想定している。

試験体吹付けと全く同一の条件下で、JIS K7054 に基づく FRP 引張試験用の A 型試験片を作製し、5 体の引張試験を行った。試験結果を表 1 に示す。なお、シートの場合とは異なり、断面積は試験片の実測値を用いている。

表 1 FRP の引張試験結果(平均値)

幅 (mm)	厚 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断歪 (%)
24.8	3.99	67.2	8.02	1.24

* 応力値は試験片断面積の実測値による

3. FRP の付着実験

3.1 実験概要

試験体は図 3 に示す 100×100×600mm のコンクリートブロックで、鉄筋は試験体中央部で切断されている。FRP 吹付け補強後、中央部のノッチにひび割れを導入し、2MN ユニバーサル試験機を用いて単調引張加力を行った。実験因子はスリットの有無および寸法で、スリットの位置は試験体中央部から 80mm、軸方向幅を 40mm、深さを 5、10、20mm の 3 水準とした。スリットに充填された FRP により、機械的な

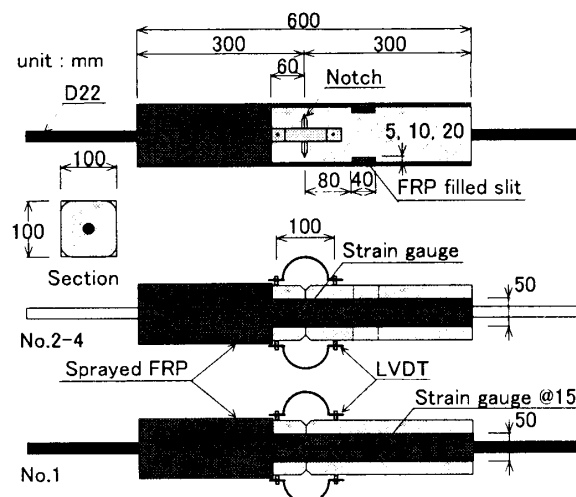


図 3 付着実験試験体

噛み合いによる定着強度増加を期待している。同一因子で各 3 体ずつ、計 12 体の加力を行った。コンクリートには、粗骨材に最大径 20mm の砕石を用いた普通コンクリートを使用し、試験体加力時材令の圧縮強度および割裂強度はそれぞれ 32.8、2.70MPa であった。

3.2 実験結果および検討

(1) 破壊性状および最大荷重

スリットのない試験体は FRP の剥離で、スリットのある試験体は FRP 母材部での破断あるいはコンクリートのせん断破壊により荷重が低下した。実験結果の一覧を表 2 に、典型的な破壊状況を図 4 に示す。

スリットのない試験体の最大荷重、すなわち吹付け FRP とコンクリートの付着強度は、試験体 3 体の平均で 20.6kN である。比較として、同一の軸剛性を有する連続繊維シートの場合、文献 3) による付着強度計算値は 25.7kN (有効付着長 88.3mm) であり、本工法の吹付け FRP の付着強度はその 80% 程度である。スリット有りの試験体では破壊形式がコンクリート破壊か FRP の破断であるのでスリットの定着強度は不明であるが、深さが 5mm でも FRP を母材破断させるための定着強度を有していると言える。No.2 試験体の最大荷重の平均値は、FRP の引張試験結果より算出される破断荷重の 97% である。

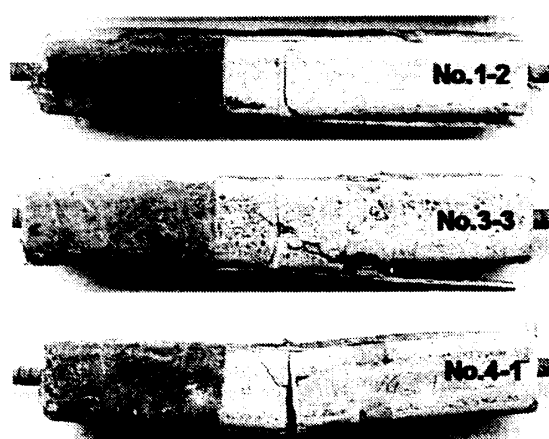
表－ 2 付着実験結果

試験体	スリット		最大荷重時		破壊形式*2
	幅 (mm)	深さ (mm)	荷重 (kN)	ひび割れ幅*1 (mm)	
No.1-1	なし		20.8	1.13	BF
-2			26.3	1.48	BF
-3			14.8	0.75	BF
No.2-1	40	5	24.1	1.22	CS
-2			24.2	1.78	FR
-3			27.1	1.41	CS
No.3-1		10	*3	*3	FR
-2			23.0	1.21	CS
-3			31.2	1.78	CS
No.4-1		20	30.2	1.46	FR
-2			16.9	0.79	FR
-3			26.3	1.37	FR

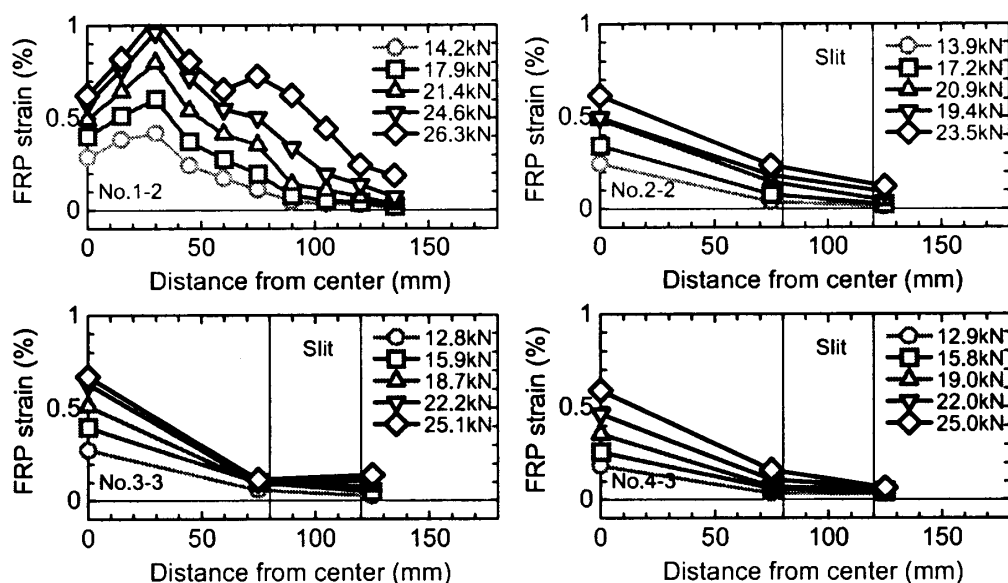
*1 試験体中央部導入ひび割れの幅（最大荷重時）

*2 BF：付着破壊 CS：コンクリート破壊 FR：FRP 破断

*3 測定データ不良



図－ 4 付着試験体破壊状況



図－ 5 FRP の歪分布

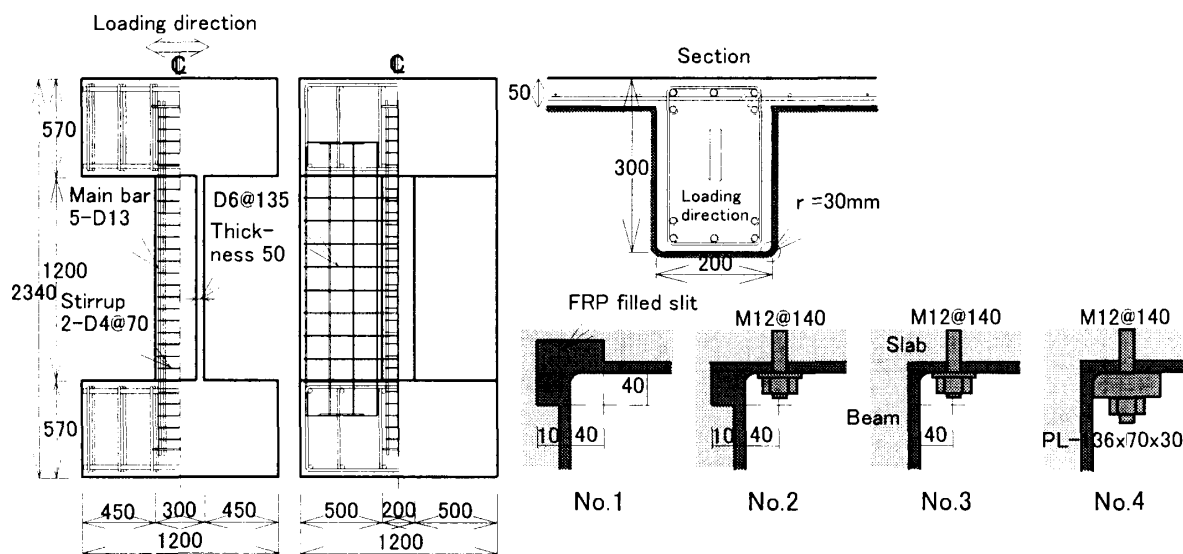
(2) FRP の歪分布

各変動因子試験体の FRP の歪分布を図－5 に示す。横軸は、試験体中央部からの歪ゲージの貼付位置である。スリットの無い試験体 No.1 では、荷重段階が進むにつれて付着力負担領域の推移が伺える。スリットの有る試験体 No.2～4 では、スリット位置（中央から 80～120mm）以降の FRP の歪は非常に小さい。歪分布からも FRP スリット充填定着の有効性が分かる。

4. T 型梁の曲げせん断実験

4.1 実験概要

試験体は鉄筋コンクリート造既存不適格建物の梁を想定した縮小モデルで、梁断面は 200×300mm、スラブ厚 50mm、片側幅 500mm、せん断スパン比は 2.0 である。試験体数は計 4 体で、実験因子は入隅部の FRP の定着方法とし、RC 部および吹付け FRP はすべて同一である。試験体計画時に比較用試験体として文献 2) の無補強試験体 No.11 と、炭素繊維シート補強試験体 No.22, 23（目付量 200g/m² の CF シート 1 層補強：シートの軸剛性＝26kN/mm）を想定した。本試験体では、その炭素繊維シート補強試験体と同程度の FRP 軸剛性を有するように FRP 厚の目標値を 3mm に設定した（FRP の軸剛性＝24kN/mm）。



図－6 T型梁試験体詳細

実験因子の FRP 定着方法は、入隅部の梁側、スラブ側とも幅 40mm、深さ 10mm の FRP スリット充填定着とした試験体 No.1、施工性を考慮して梁側のみを FRP スリット充填定着としスラブ側はアンカーボルトとした試験体 No.2、スラブ側のみをアンカーボルト定着とした試験体 No.3、炭素繊維シート補強試験体との比較を意図し、スラブ側に鋼ブロックとアンカーボルトで定着した試験体 No.4 の 4 種類である。試験体と入隅部の詳細を図－6 に示す。

コンクリートには、粗骨材に最大径 15mm の川砂利を用いた普通コンクリートを使用し、試験体加力時材令の圧縮強度および割裂強度はそれぞれ 26.9、2.02MPa であった。鉄筋には、主筋に D13 (降伏点 324MPa)、肋筋に D4 (降伏

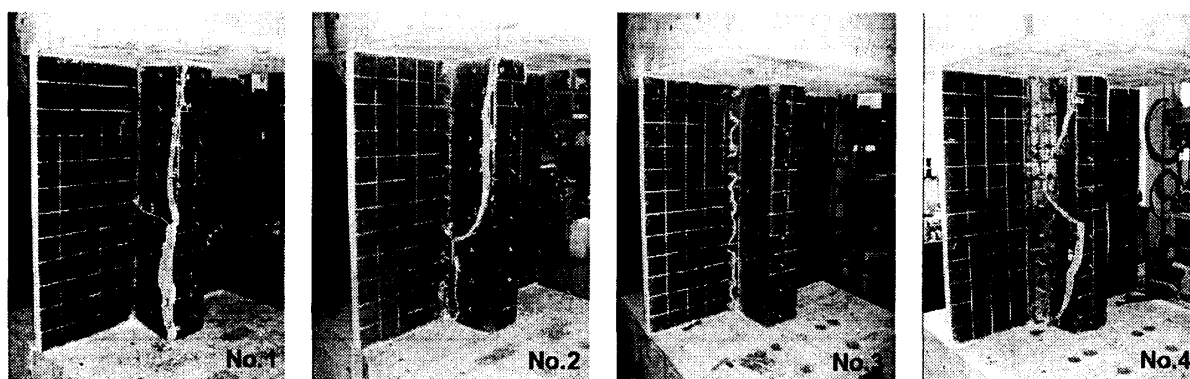
点 218MPa)、スラブ筋に D6 (降伏点 414MPa) を使用した。

加力は正負交番繰返しの建研式加力とし、加力履歴、計測項目は文献 2) と同一である。

4.2 破壊経過

各試験体の最終破壊状況を図－7 に示す。各試験体とも 1/100rad. の加力サイクルで曲げ降伏が先行、1/50rad. の加力サイクルで FRP に微細な亀裂が生じ始め、最終的には FRP の破断により耐力低下を起こした。

試験体 No.3 は 1/50rad. の 1 回目の加力サイクルでスラブ定着部アンカーボルト付近に FRP の亀裂が生じ始め、定着部の FRP 亀裂が拡大して耐力低下を起こした。1/50rad. の 2 回目加力サイクルで FRP の破断が進行し、梁側面の FRP



図－7 最終破壊状況

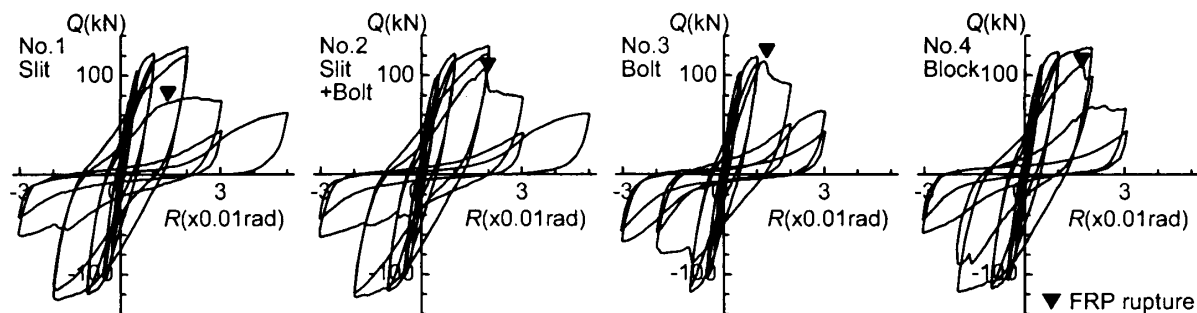


図- 8 せん断力-部材角関係

がコンクリートから剥離した状態となった。

試験体 No.4 は、1/50rad.の2回目加力サイクルで定着部鋼材周辺の FRP に亀裂が生じ耐力低下した。その後梁側面のせん断ひび割れに沿って亀裂が拡大し、最終的には部材長全域に FRP の破断が連なった。

試験体 No.1 および No.2 は 1/50rad.の2回目加力サイクルで梁端コーナー部に FRP の亀裂が生じ始めた。1/33rad.の1回目の加力サイクルでその亀裂が部材材軸方向に拡大し耐力低下した。入隅部の FRP に大きな損傷は確認されなかった。

各試験体のせん断力-部材角関係を図-8 に示す。FRP の破断による最終的な耐力低下の部材角は、No.2>No.1>No.4>No.3 の順であった。FRP スリット充填定着の有効性が分かる。

4.3 無補強・シート補強試験体との比較

試験体の設計段階において無補強およびシート補強試験体との比較を念頭に置いた対象試験体である、文献2)の試験体 No.11, 22, 23 との比較を行う。RC 部は本試験体と同一であり、試験体 No.11 は無補強、試験体 No.22, 23 は目付量 200g/m² の CF シート1層補強を施し入隅部をアングルで定着したもので、No.22 は梁スラブ両面に、No.23 はスラブ面のみにアンカーボルト定着をしている。各試験体のせん断力-部材角関係の包絡線を図-9 に示す。

試験体 No.11 の無補強試験体はせん断破壊で、本試験体はいずれも曲げ降伏先行型に移行しており、吹付け FRP による補強効果が確認できる。シート補強試験体と比較すると、部材角 1/50rad.

までは吹付け FRP 補強も同様の耐力を維持しているが、1/33rad.以降で差が見られる。試験体 No.1, No.2 では入隅部 FRP の損傷は見られなかったことから、FRP 自体の強度の差に起因するものと思われる。吹付け FRP および CF シートの軸強度（厚×破断応力）はそれぞれ 268, 541N/mm であり、本実験における吹付け FRP の強度は CF シートの半分程度である。

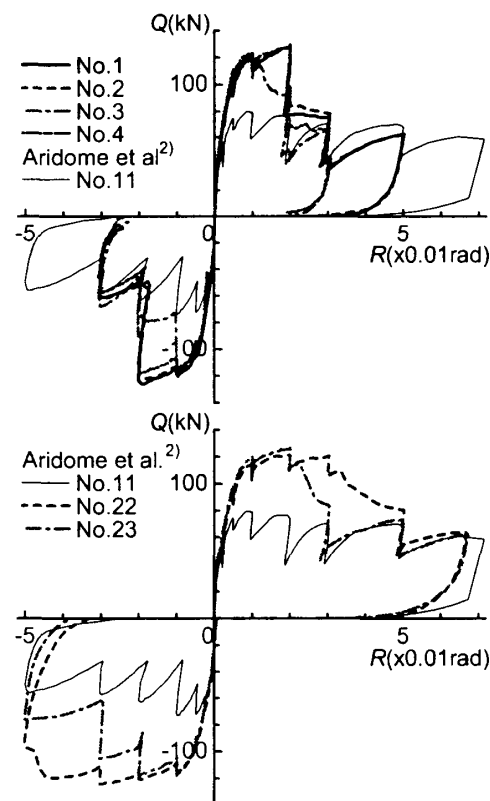


図- 9 シート補強試験体との比較

4.4 FRP の歪発生状況

試験体 No.2, No.3 について、梁側面およびコ

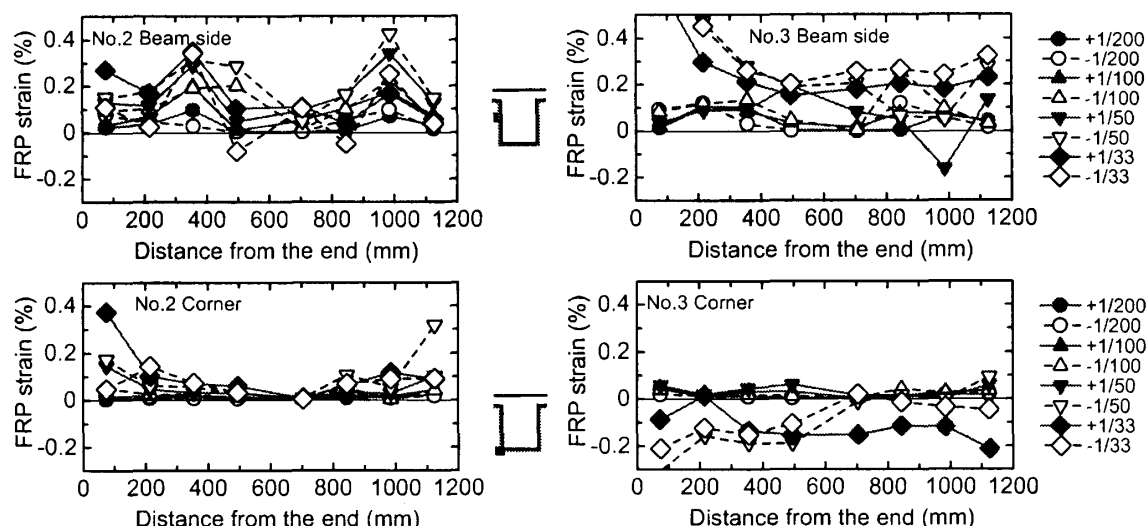


図-10 FRPの歪分布

一ナ一部に添付した歪ゲージによる各加力サイクルピーク時のFRPの歪分布を図-10に示す。

梁側面では、試験体 No.2, No.3 とともにFRPの最大歪は0.3~0.4%程度である。試験体 No.2 のコーナー部では、加力サイクル 1/50~1/33rad.時に梁端部での歪が大きくなっており、コーナー部からFRPが破断していった破壊経過と対応している。一方試験体 No.3 では入隅部のFRPが破壊し、梁側面のFRPに浮きが生じたことから、コーナー部では曲率の反対方向に曲げ力を受け、FRP表面で圧縮歪が発生している様子が伺える。

5. まとめ

- (1) 梁とスラブの入隅部でのFRPの定着を想定した「FRPスリット充填定着」は、JCI型の付着試験、T型梁の曲げせん断実験のそれぞれにおいて、その有効性が確認された。
- (2) 「FRPスリット充填定着」におけるスリット深さは、5mm程度でもFRPの母材破断を生じさせるために十分な定着能力を有している。
- (3) 「FRPスリット充填定着」によりT型梁の入隅部の破壊は防止できたが、最終的に梁コーナー部でのFRPの破断が観察された。FRP破断時の部材角は1/50~1/33rad.程度で

あり、コーナー部でのFRP破断防止の工夫が必要であると考えられる。

謝辞

本研究は、筑波大学、三菱化学産資(株)、三菱商事(株)、昭和高分子(株)、(株)コンステックの共同研究の一環として実施されたものである。関係各位に感謝いたします。また、実験の実施にあたっては、筑波大学卒研生土田晃博君の協力を得た。

参考文献

- 1) 根本 武, 高橋啓介, 竹内百合, 古田智基, 福山 洋, 金久保利之: FRP吹付け工法によるRC構造物の耐震補強に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), C-2構造IV, pp.339~344, 2000.9
- 2) 有留義朗, 金久保利之, 古田智基, 松井雅明: CFRPシートで補強したT型梁の靱性能, コンクリート工学年次論文報告集, 第20巻, 第1号, pp.455~460, 1998.7
- 3) 金久保利之, 古田智基, 福山 洋: 等価付着ストレスブロックによる連続繊維シートとコンクリートの付着強度算定式, コンクリート工学論文集, 第12巻, 第3号, pp.27~37, 2001.9