

論文 FRP・コンクリート界面の引張付着特性に与える水分影響について

北見 篤史*1・Shrestha Justin*2・張 大偉*3・上田 多門*4

要旨: 本論文は、コンクリート構造物の補強・補修に用いられる炭素繊維シート接着工法において、接着剤として使用されるエポキシ樹脂の種類やコンクリートの接着面の状態が水分によって与えられる影響について、実験を行い調査したものである。よって、FRP 材料とエポキシ樹脂の組み合わせやコンクリート接着面の状態および湿潤環境を実験変数とし、FRP 材料をコンクリート界面から引張はく離破壊を強制的に発生させる3点曲げ試験を行った。実験から荷重-ひび割れ肩口開口変位関係を測定し、導かれた特性値と実験変数の関係について考察を行った。水分の影響はわずかであり、接着面の状態の影響が大きいことがわかった。

キーワード: 炭素繊維, コンクリート, 付着, はく離, 湿潤環境, 樹脂, 界面

1. はじめに

コンクリート構造物の維持・補修が注目される中、力学的特性の優れた炭素繊維シートを接着することで構造物の維持・補修を行う FRP シート接着工法は、広く用いられている。FRP シート接着工法では、FRP シート・コンクリート間に界面が存在することになり、力や環境作用等はこの界面を介して伝達される。よって、既存のコンクリート状態や付着特性、接着樹脂の耐久性等の様々な要因が影響を与える。特に界面でのはく離破壊が問題点として挙げられている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。そこで本研究では、開口型はく離であるモード I はく離破壊に的を絞って、FRP シート・コンクリート接着界面のはく離付着特性に関して実験を行っている。FRP シート・コンクリート界面を含む複合切欠きはりを用いた3点曲げ試験を行い、得られたデータについて検討した。切欠きはりの3点曲げ載荷時の荷重-ひび割れ肩口開口変位曲線(以下、P-CMOD 曲線という)を測定し、その結果から多直線近似法を用いて引張軟化挙動を導く。また、その得られた引張軟化曲線から破壊エネルギーを求め様々な要因との関係を考察する。なお、本研究は湿潤環境下における FRP シート・コンクリート界面の付着特性を解明することを最終目標とした一連の研究の一部である。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

コンクリートは、呼び強度 27MPa, 最大骨材寸法 20mm のレディミクストコンクリートを用いた。実測した圧縮強度は 29.5MPa (材齢 28 日) であった。

(2) 炭素繊維および樹脂

補強材として2種類の FRP 材料と接着樹脂の組み合わせを使用した。1 つは、炭素繊維(CFRP)シートの FRP-A とプライマーとエポキシ樹脂からなる Resin-A である。もう 1 つは、炭素繊維(CFRP)プレートの FRP-B とプライマーを使用しないエポキシ樹脂の Resin-B である。FRP 材料の特性値を表-1 に、接着樹脂の特性値を表-2 に示す。

(3) コンクリート接着面

FRP 材料が接着されるコンクリート接着面には、型枠面(写真-1(a))と切断面(写真-1(b))の2種類を用いた。型枠面は、打設時に型枠に接している面であり、切断面は養生後にダイヤモンドカッターで切断した面である。両者の大きな違いとして、前者は接着面に粗骨材面積がほとんど含まれないのに対し、後者は接着面内に骨材面積を多く含む。実構造物では、基本的に型枠面に FRP 材料が接着されるが、実験ではしばしば切断面が使

表-1 FRP 材料の特性値

FRP	Type of FRP material	t (mm)	ρ (g/m ²)	f_t (MPa)	E (GPa)
A	Sheet	0.111	200	3400	245
B	Plate	1.4	-	3100	210

t (mm): FRP 材料の設計厚さ ρ (g/m²): 繊維目付量

f_t (MPa): 引張強度 E (GPa): ヤング係数

*1 北海道大学 工学院北方圏環境政策工学専攻 (学生会員)

*2 北海道大学 工学院北方圏環境政策工学専攻 (学生会員)

*3 浙江大学 College of Civil Engineering and Architecture

*4 北海道大学 工学院北方圏環境政策工学専攻 (正会員)

表-2 FRP 接着樹脂の特性値

Resin	Bond (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E (GPa)
A	>1.9	>40	>30	-
B	>4	>50	>32	12.8

Bond (N/mm²): コンクリート付着強度 σ_b (N/mm²): 曲げ強さ
 f_t (N/mm²): 引張強度 E (GPa): ヤング係数

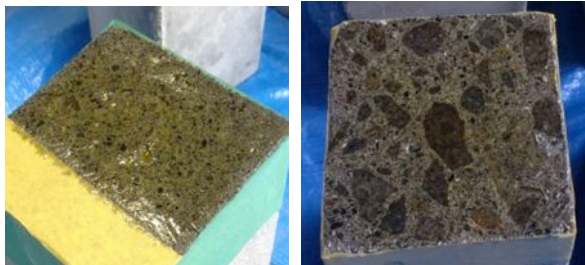
用される場合がある。そのため、表面処理方法ではなくコンクリート接着面の条件を考慮することにした。

なお、どちらのコンクリート接着面に対しても、表面処理はディスクサンダーによる処理を行った。表面処理およびプライマー塗布後の状態を写真-1 に示した。

2.2 供試体

(1) FRP 材料の接着方法

本研究では、前節で述べたようにコンクリート接着面には2種類を用いている。またその両者とも、コンクリート養生後、ディスクサンダーによる処理を行った。その後 Resin-A の場合は、プライマー・接着樹脂・FRPシート・含浸樹脂の順に、Resin-B の場合は、接着樹脂・FRPプレートの順に FRP 材料を接着させた。1週間以上の養生の後、3点曲げ試験を開始した。



(a) 型枠面 (b) 切断面

写真-1 コンクリート接着面

(2) 供試体概要

FRP・コンクリート界面を含む複合切欠き梁を作製した。供試体概要を図-1 に示す。図に示すように、100mm×100mm×200mm の断面形状を持つ2つのコンクリートブロックの中心に FRP 材料を挟むように接着させ、3点曲げの力を作用させる。FRP 接着面積は 100mm×100mm であるが、その内 30mm×100mm の範囲にビニールテープを使用し、FRP 材料とコンクリート間に非接着面を作製し、それを切り欠きとした。載荷時に、その切り欠き先端からモード I はく離破壊を発生させるためである。

(3) 湿潤条件

以上のように用意した供試体を、水分の影響の有無により湿潤供試体と非湿潤供試体に区別する。FRP 接着養

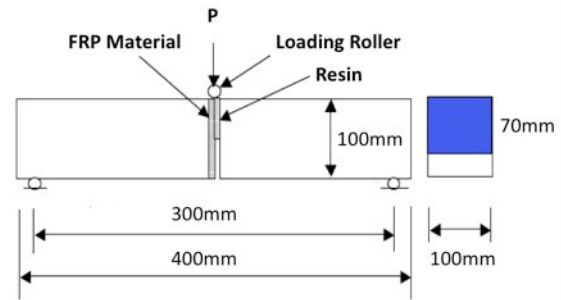


図-1 供試体概要図



写真-2 試験機と室温湿度調節設備

生した後、水温が 20°C に保たれた水道水に浸水された供試体を湿潤供試体、浸水されずに室内で常温保管された供試体を非湿潤供試体とした。湿潤供試体に関しては、試験中も湿潤環境が保たれるよう試験機内側に加湿器と供試体を覆うボックス(写真-2)を用意し、湿度が常時 70% を上回る様に調節した。

2.3 試験方法

本研究では、JCI-S-001-2003 (JCI 規準 切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法) を参考にして、3点曲げ試験を行うことで、付着特性値を得る事とした。試験機には、最大荷重 250kN の万能試験器(写真-2)を使用し変位制御載荷により試験を行った。載荷速度は 0.05mm/min とした。また載荷中の環境温度を 20°C に統一出来る様、試験機の周囲には、室温調節設備を設けた。水道水を使用している事より、水分の影響のみを観察するものとし、浸水後一ヶ月ごとに試験を行う。

測定項目は、曲げ荷重およびびびり割れ肩口開口変位である CMOD である。クリップゲージを供試体切り欠き

部に取り付け、0.001mm までの精度で計測を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 概説

本実験結果を示す。破壊形式・最大荷重・P-CMOD 曲線を測定し、引張軟化挙動を導いた。また、それらから破壊エネルギーを算出した。FRP 材料および接着樹脂、またコンクリートの接着面の状態が変わる事により、湿潤環境からどのような影響を受けたのかを考察する。FRP-A 供試体には切断面の接着面を、FRP-B 供試体には切断面と型枠面の両者の接着面を使用した。

試験の実施した期間が 0 ヶ月を非湿潤供試体つまり基準供試体とし、それ以降の供試体をすべて湿潤供試体として所定の期間浸水させたものとする。

3.2 FRP 材料と接着樹脂の種類と水分の影響

FRP-A および FRP-B を用いた供試体から得られたデータから考察する。ここでは、両者ともコンクリート接着面には、切断面を用いたものを対象とする。

(1) 破壊形式

写真-3(a)および写真-3(b)に非湿潤供試体の 3 点曲げ試験後の破壊面を示す。両者とも付着界面ではなくコ

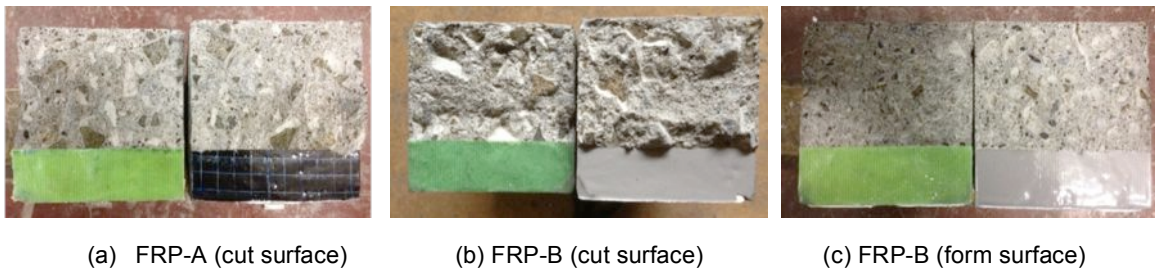


写真-3 供試体破壊面

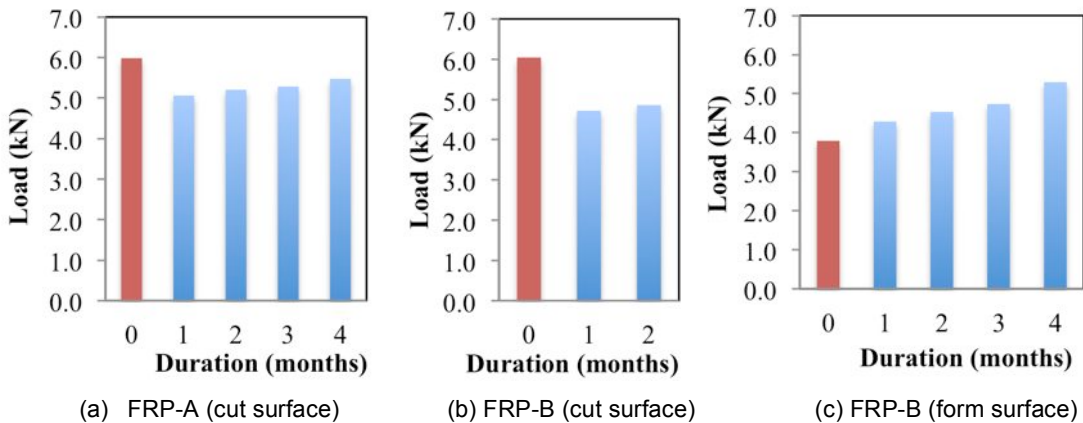


図-3 最大曲げ荷重に対する FRP 材料の種類および水分の影響

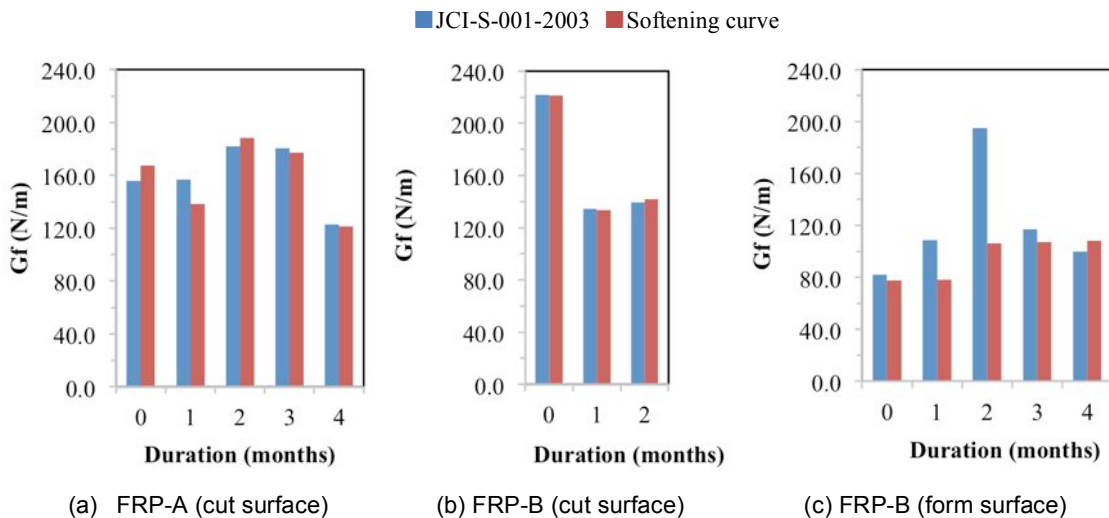


図-4 破壊エネルギーに対する FRP 材料の種類および水分の影響

ンクリート層における凝集はく離破壊であったことから、界面での付着強度は十分に保たれていると考えられる。また切断面を使用している事より、界面には粗骨材が多く見られた。湿潤供試体においてもすべてコンクリート層における凝集はく離破壊という結果が観察された。よって、破壊面の観察においてはFRP材料の種類による大きな差異および水分の影響は認められなかった。

(2) 最大曲げ荷重

図-3 に示されたのは、3点曲げ試験において測定された最大曲げ荷重である。切断面を使用した供試体(a)および(b)に関しては、基準である非湿潤供試体の値に大きな差異は認められなかった。湿潤供試体においては、両者とも1ヶ月目で10%以上の最大曲げ荷重の低下が観察されたが、その後次第に最大曲げ荷重が上昇した。以上の現象を説明するのは難しく試験によるばらつきである可能性もあり、水分の影響があるとは判断できない。

(2) P-CMOD 曲線

FRP-A および FRP-B の P-CMOD 曲線を図-5 に示した。破壊形式と同様に大きな差異は認められないが、後者のほうがわずかに曲げ荷重が大きい値を示している。これは破壊面(写真-3(b))から観察されるように、切断された骨材がコンクリート表層に含まれており、これらがひび割れ進行を妨げた為に影響したと考えられる。

(3) 引張軟化挙動

図-6 に示された引張軟化曲線は、ひび割れ開口変位と結合応力の関係を示したものである。この引張軟化曲線は多直線近似解析法により推定するものとし、多直線近似解析は数値計算をとまなうため、解析にあたっては、信頼性の確認されたプログラムを使用しなければならない。本研究では、日本コンクリート工学会が公開している引張軟化曲線多直線近似解析ダウンロード版(FEM FT法)⁷⁾を用いた。これは、仮想ひび割れモデルを用いたひび割れ進展解析であり、実験により得られたP-CMOD曲線の計測結果とひび割れ進展解析によって得られるP-CMOD曲線の解析結果が合致するように最適な引張軟化曲線の勾配を一点ごとに求める。順次このひび割れ進展解析を繰り返すことで、引張軟化曲線の全体形状を決定する方法である。

得られた結果を図-6 に示した。FRP-A および FRP-B の両者とも、初期結合応力に大きな差異は認められないが、徐々に軟化するにつれて結合応力が一定であるにも関わらずひび割れが進展している箇所がある。仮想ひび割れ幅が0.1mmを過ぎると両者とも似たような曲線が確認された。両者の軟化挙動の差異には、P-CMOD曲線と同様に破壊面における切断された骨材がひび割れ進行に影響しているためと考える。

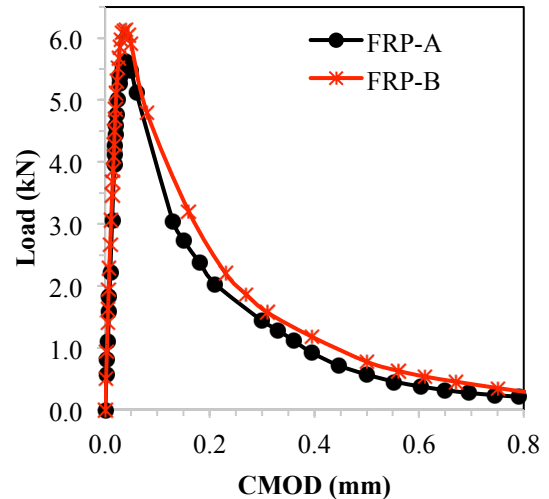


図-5 P-CMOD 曲線に対するFRP材料の種類の影響

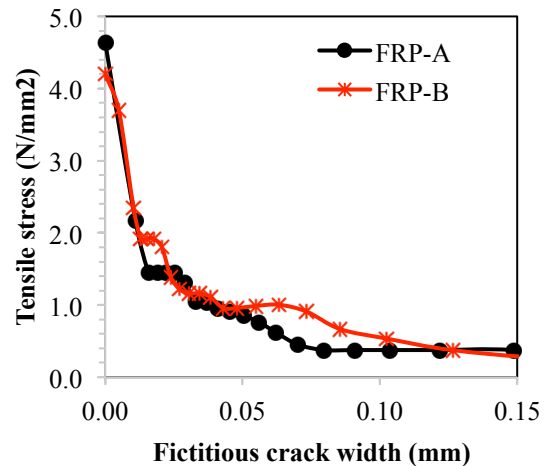


図-6 引張軟化曲線に対するFRP材料の種類の影響

(4) 破壊エネルギー

破壊エネルギーには、JCI-S-001-2003⁶⁾に基づき実験で得られたP-CMOD曲線の計測結果を使用した計算値および、前項で導いた引張軟化曲線下の面積値の2種類を検討した。図-4 に示されるように、P-CMOD曲線からJCI-S-001-2003に基づいた計算値および引張軟化曲線下の面積値ともにFRP-BがFRP-Aより大きな値を示した。これは、図-5 に示されるように、最大荷重に到達後の曲げ応力が常に大きい値を示していたことが影響している。また、FRP-Bに関しては浸水後に破壊エネルギーの低下が観察されるが、基準供試体の破壊面上の粗骨材面積が他の供試体よりも大きかったことから、破壊エネルギーの増加に繋がったと推測される。

(5) まとめ

以上の結果から、FRP・コンクリート界面の引張付着特性に対するFRP材料と接着樹脂の種類の影響、および

水分の影響があるとは判断されなかった。

3.3 コンクリート接着面の種類と水分の影響

FRP 材料が接着されるコンクリート接着面に、型枠面および切断面の 2 種類が使用された場合の水分影響を考察する。なお本実験では両者とも FRP-B を接着させ実験を行った。また、先に述べたように両者の接着面はディスクサンダーによる処理を行っている。

(1) 破壊形式

写真-3(b)および写真-3(c)に両者の非湿潤供試体の試験後の破壊面を示す。両者とも FRP 接着界面ではなくコンクリート表層における凝集はく離破壊であったが、写真-3(c)から分かるように、型枠面を使用した接着面における破壊面は大きな粗骨材断面が含まれずにコンクリート表層においてはく離が発生している点は、切断面の場合と差異が認められる。切断面を使用した場合にはコンクリート表層に切断された粗骨材が含まれており、コンクリート表層でのひび割れを起点にはく離が発生する場合、粗骨材の存在がそのひび割れ進行に影響を与えているといえる。つまり、ひび割れが、モルタルマトリックスと粗骨材の界面（以下、ITZ という）を進行し、結果としてひび割れ長さが長くなる。それにより、曲げ荷重や破壊エネルギーが大きくなると考えられる。つまり、接着面の条件が切断面か型枠面かで異なるとその他の特性値に影響を与えている可能性がある。

(2) P-CMOD 曲線および引張軟化挙動

図-7、図-8 に FRP 材料接着面に型枠面および切断面を用いた場合の P-CMOD 曲線、引張軟化曲線を示した。型枠面を使用した供試体は、切断面を使用した供試体と比べ初期勾配に大きな差異は認められないが、最大曲げ荷重が小さくなり最大曲げ荷重到達後の挙動においても同じ CMOD に対する曲げ荷重は小さい値となった。

引張軟化曲線も同様に、型枠面を使用した供試体において初期結合応力は小さくなり、その後も同じ仮想ひび割れ幅に対し小さい結合応力での軟化挙動を示した。

これらは前項で述べたように、界面において切断された粗骨材の有無が大きく影響していると考えられる。接着面に型枠面を使用した供試体は、界面付近のコンクリート表層にて、ひび割れ進行が粗骨材に妨げられる事なくスムーズに進行している。一方、切断面を使用した供試体では、粗骨材がひび割れ進行を妨げ、進行が ITZ もしくは接着界面を通るように迂回するため大きな荷重が必要となる。

(4) 破壊エネルギー

切断面および型枠面を使用した供試体の破壊エネルギーは、図-4(b) および図-4(c)に示した。前節と同様 2 種類の方法で計算した。P-CMOD 曲線の測定結果から算出した値に大きなばらつきが認められる供試体がある

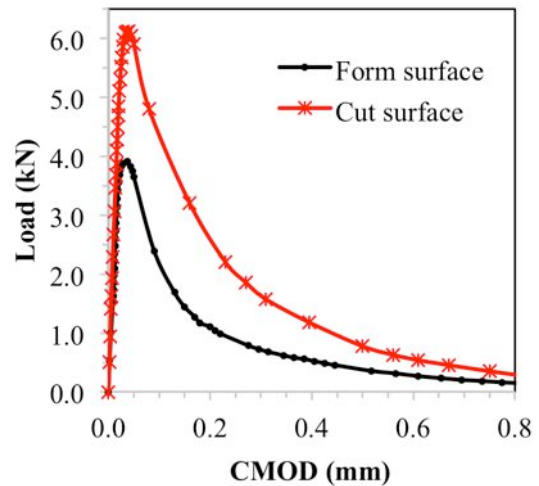


図-7 P-CMOD 曲線に対する接着面の種類の影響

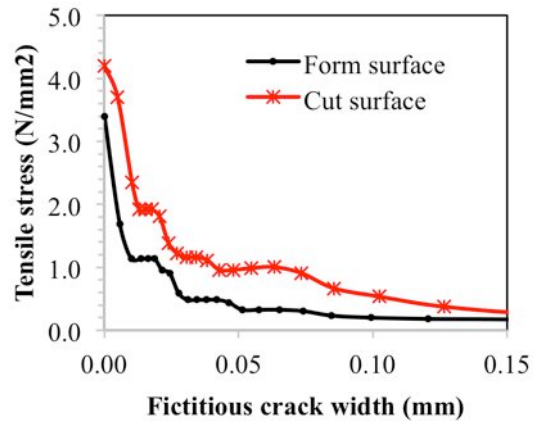


図-8 引張軟化曲線に対する接着面の種類の影響

が、これは、実験計測機器が最大荷重後の急激な荷重低下に追いつかずに記録したため P-CMOD 曲線下の面積が増加したからである。型枠面を使用した供試体は、P-CMOD 曲線および引張軟化曲線において小さい曲げ荷重および結合応力を示していたことより、破壊エネルギーは平均して 30%以上も低い値を示している。これらの結果から、FRP・コンクリート界面の引張付着特性は、FRP 材料を接着するコンクリート表面の条件に大きな影響を受けるといえる。このことより、単にディスクサンダーやサンドブラストなどによる表面処理方法による粗度の差異だけではなく、接着界面にどれだけ切断された粗骨材が含まれているかが重要になるといえる。つまり、界面での切断された粗骨材の存在がひび割れ進行を妨げるため、FRP 材料のコンクリート表層はく離特性に大きく影響すると考えられる。

(5) 水分の影響

図-3(b) (c)および図-4(b) (c)に、FRP-B 供試体の最

大荷重と破壊エネルギーの変化を示した。切断面を使用した供試体に関しては、基準供試体と比較して湿潤後低い値を示しているが、3ヶ月後にわずかに増加した。また、型枠面を使用した供試体は、水分の影響が全く見られなかった。

4. まとめ

本研究は、FRP・コンクリート界面における引張付着特性に対し、FRP材料と接着樹脂の組み合わせおよびコンクリート接着面の状態が与える影響について、実験・比較を実施したものである。以下に本研究のまとめを示す。

- (1) FRP材料と接着樹脂の組み合わせおよびコンクリート接着面の比較では、すべての供試体がコンクリート表層における凝集はく離破壊であった。また、型枠面を使用した供試体は接着界面に近い層ではく離が発生した一方、切断面を使用した供試体では、粗骨材のITZを破壊面を含むためスムーズにひび割れが進行せずにはく離面の粗度が大きくなった。
- (2) 水分の影響が見られたのはわずかな値であり、本研究では浸水した事による引張付着特性への影響はほぼなかったと言える。
- (3) FRP材料と接着樹脂の組み合わせおよびシート・プレートの違いにおいても、引張付着特性値に大きな影響を与えないことを確認した。
- (4) コンクリート接着面の状態の比較から、表面粗度の差異だけではなく、接着界面に切断された粗骨材が含まれているかそしてその割合が重要になる可能性があることがわかった。これは、モードIはく離破壊を引き起こすひび割れがコンクリート表層にて進行する場合、界面に存在する粗骨材がその進行を妨げる為であると考えられる。この粗骨材の影響に関しては、界面に存在する割合や粗骨材の切断される位置による組み合わせ効果などの検討が今後の検討課題である。

また実構造物では、接着面は主に型枠面が使用

されることから、高い付着強度を保つために粗骨材を露出するような表面処理が望まれる。

謝辞

新日鉄住金マテリアルズ株式会社の小森篤也様には、CFRPシートのご提供、そして施工のご指導を頂きました。またSika Ltd.には、CFRPプレートをご提供して頂きました。ここに深く謝礼申し上げ、感謝の意とさせていただきます。

参考文献

- 1) Jianguo DAI: MODE I FRACTURE BEHAVIORS OF FRP-CONCRETE INTERFACE, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No.1, 2003
- 2) Oral Büyükoztürk, Tzu-Yang Yu: Understanding and Assessment of Debonding Failures in FRP-Concrete Systems, Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, October 11-13, 2006
- 3) C. Tuakta, O. Büyükoztürk: Deterioration of FRP/concrete bond system under variable moisture conditions quantified by fracture mechanics, Composites: Part B 42, pp.145-154, 2011
- 4) C. Tuakta, O. Büyükoztürk: Conceptual Model for Prediction of FRP-Concrete Bond Strength under Moisture Cycles, JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION © ASCE, pp.743-756, September-October 2011
- 5) Justin SHRESTHA, Tamon UEDA, Dawei ZHANG and Atsuya KOMORI: MOISTURE EFFECT ON THE RESIN AND INTERFACIAL FRP-CONCRETE BOND PROPERTIES, Proceedings of JCI, 35 (2), pp.1333-1338, 2013
- 6) JCI 基準: 切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法, JCI-S-001-2003
- 7) 日本コンクリート工学会: 引張軟化曲線多直線近似解析ダウンロード版 (FEM FT 法)