論文 UFC パネルによる補強での接着接合部の強度評価に関する検討

高橋 順^{*1}・藤間 誠司^{*2}・上田 多門^{*3}・古内 仁^{*4}

要旨:橋梁等の構造物では健全度を保持するために適切な補強対策を施すことが必要になる。補強対策の効果については供用時の荷重等の負荷条件に対する性能だけでなく、繰返し荷重や持続荷重に対する面からも評価される。また補強の方法や目的に応じた評価も必要とされるので、補強部の機能評価などの面からの評価も考えなければならない。本論文では、鋼繊維補強超高強度コンクリートの板材を接着剤により接合する補強方法を対象に、補強部材の接合条件を変えた静的な継手強度の評価をもとに接着接合部の評価や接合条件の影響などを検討したので、その結果について述べる。 キーワード:接着接合、静的引張試験、UFC、接着厚さ、接着長さ、応力伝達、ひずみ分布

1. はじめに

橋梁をはじめとする土木構造物では長寿命化に対する 取り組みが行われている。長寿命化への対応としては適 切な健全度調査に基づく計画的な管理と健全度保持のた めの効果的な対策¹⁾など,種々の着眼による検討が必要 とされる。

健全度保持のための維持管理対策の一つとして補強対 策があげられる。既設部に補強材を付加する接着工法²⁾, 巻立て工法,増厚工法などの適用に際しては,既設部と 補強材料との接合部の評価及び挙動把握^{1),3)}を行い補強 設計に活かすことが重要になると考えられる。

補強部に対する負荷荷重の観点から考えると,例えば 橋梁では静的な荷重負荷の他に,交通振動を主とする繰 返しの負荷などもあるので,補強部においても繰返し負 荷に対する疲労特性が重要になる⁴。さらに,補強の疲 労については,補強部材の疲労破壊と接合部の疲労破壊 のどちらも起こる可能性があるので,補強設計の考え方 も重要になる。

そこで本研究では、補強材として鋼繊維補強超高強度 コンクリート(以下, UFC)の板材を用いる場合を考え、 接着剤による補強部材の接合を静的引張試験により検討 した。補強接合における補強材の接着長さや接着厚さに 着目し、補強接合における応力伝達、継手強度、接合部 破壊に及ぼす接着部の影響などを調べた。

2. 検討の考え方と目的

UFC パネルを鋼やコンクリートといった構造材料に接 着接合することを考えた場合、接合部の設計では供用時 の環境要因を含めた耐久性に関わる特性の考慮も要求さ れるが^{3),5)},本検討では接着長さや接着厚さなどの接合 条件と継手強度の関係に着目して、特に接着剤の静的な せん断強度について考える。そして、補強材である UFC パネルの接着性は UFC パネル側の接着面での凝集破壊を 対象とする。UFC パネル側の接着性を評価する場合,母 材側(本検討では鋼材)の影響をできるだけ小さいもの にする必要がある。そのためには UFC パネルよりも接着 強度が大きく,評価する範囲で破壊するなどの影響因子 がない母材を選ぶ必要があり、本検討では鋼材を用いた。 また接着剤の評価としては接着のせん断力として評価す るために, 図-1 のような鋼材と UFC パネルの接着を行 った二重重ね合せ継手 6の構成により静的引張試験を行 う。二重重ね合せ継手の構成を採用したのは、曲げがか らない接着剤の標準的なせん断評価であることと、同型 の試験機で疲労試験を行うことを考えたためである。

図-1では、接着剤が継手強度に影響する寸法条件として接着厚さt。と接着長さL、UFCパネルが継手強度に影響する寸法条件としてUFCパネルの厚さt。が考えられる。したがって、接合部の評価としてはこれらの寸法パラメータの、接合部における応力伝達、接合部破壊の



*2 電気化学工業株式会社 デンカイノベーションセンター 特混町田研究センター (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究院 工学博士 (正会員)

*4 北海道大学 大学院工学研究院 博士(工学) (正会員)

起点,継手強度などへの影響を検討する必要があると考 えられる。なお,継手の破壊が接着剤の場合と被接着剤 である UFC パネルの場合があるので,これを総称して継 手強度と呼び,特に接着剤の破壊で継手強度が決まる場 合を接着強度と呼ぶことにする。

そこで、本検討では補強材(UFC パネル)の接着接合の 長さ、接着接合の厚さに着目して、接着接合の条件と接 合部の強度評価の関係について検討し、UFC パネルを補 強部材とする場合の接合部設計についての知見を得るこ とを目的とした。

3. 実験方法

3.1 試験体構成

試験体は図-1 に示す UFC パネルと鋼材の組合せによる二重重ね合せ継手の構成で,接着間隔 d は 10mm とした。 ここで,接着厚さt_aを 0.2mm, 2.0mm, 5.0mm の 3 水準, UFC パネルの接着長さL を 30mm, 50mm, 80mm, 120mm の 4 水準, UFC パネルの厚さt_oを 30mm, 60mm の 2 水準と して,**表**-1 に示す 10 体の試験体を作製した。なお,試 験体作製の接着作業では,UFC パネル及び鋼材ともに接 着面をサンドブラスト後に溶剤で脱脂する処理を行った。

3.2 使用材料の特性

本検討で用いた接着剤の仕様を**表-2**に、UFC パネルの 仕様を**表-3**に示す。鋼材は幅 44mm, 厚さ 9mm の SS400 を用いた。

	ヤング率 (N/mm ²)	最大伸び (%)	接着強度 (N/mm ²)	種類	骨材	
接着剤	300	30	9.5	アクリル系	あり	

表-2 接着剤の仕様

表-3 UFC パネルの仕様

	ヤング率	圧縮強度	曲げ強度	厚さ	幅
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(mm)	(mm)
UFC	4600	199	37	30	44

3.3 実験方法

図-1 に示す二重重ね合せ継手について 1mm/min.の速度で引張試験を行い,変位荷重の関係を求めた。

また,引張試験では UFC および鋼材の側面(図-1(a)) にひずみゲージを貼り,継手引張方向のひずみを測定し た(図-2)。ひずみ測定では,UFC パネルの接合面近くの 接着長さ方向と UFC パネルの厚さ方向のひずみ分布を調 べた。

4. 実験結果

4.1 接合部における荷重伝達

図-1 の継手において、鋼材(SS400)両端に引張力が働いた場合、鋼材の荷重は接着層を介して UFC パネルに伝達し、そして継手中央がつり合い中心になり UFC パネル に引張荷重がかかると考えられる。そこで接合面に近い UFC パネルのひずみと鋼材のひずみを図-3 に示す。これより継手中央に向かって鋼材のひずみが減少するにしたがって UFC パネルのひずみが増加することがわかる。 したがって、図-1 の試験体構成で接着層を介した鋼材 と UFC パネルの荷重伝達が行われていることを確認した。 4.2 変位荷重関係

接着長さが 50mm, 120mm の場合の引張試験における変 位荷重関係を図-4, 図-5 に示す。接合部の接着厚さが 0.2mm, 2.0mm, 5.0mm と異なる場合,いずれの接着長さの 場合も接着厚さが厚いほうが最大荷重までの変位が大き い傾向がみられる。ここでの最大荷重を継手強度とする。



図-2 ひずみゲージ貼付けの一例

			-				-
試験体	s 鋼材(SS400)		UFC パネル		接着接合部		接着層
No.	厚さ(mm)	幅(mm)	厚さ t _c (mm)	長さ 2L+d (mm)	接着長さ L (mm)	接着幅(mm)	厚さ t _a (mm)
1	9	44	30	70	30	44	2.0
2	9	44	30	110	50	44	2.0
3	9	44	30	110	50	44	2.0
4	9	44	30	110	50	44	0.2
5	9	44	30	110	50	44	5.0
6	9	44	60	110	50	44	0.2
7	9	44	60	110	50	44	2.0
8	9	44	30	170	80	44	0.2
9	9	44	30	250	120	44	0.2
10	9	44	30	250	120	44	2.0
11	9	44	30	250	120	44	5.0

表-1 試験体の仕様

4.3 継手強度

表-1に示す10種類の試験体の引張試験による継手強度の結果を表-4に示す。継手強度は接着部の破壊による場合とUFCパネルの破壊による場合があった。

4.4 破壊の起点

破壊した試験体の様子を図-6 に示す。図-6(a)は接着部が破壊した場合(No.3),図-6(b)は UFC パネルが破壊した場合(No.8)である。いずれの場合も継手中央の鋼材端部を起点として、接着剤あるいは UFC の破壊が進展することが観察された。

図-7, 図-8 に継手引張実験で計測した UFC パネルの 接合面近くのひずみと鋼材一般部(引張側端部から 90mm のところ)のひずみの関係を示す。図-7 は接着剤が破壊 する場合,図-8 は UFC パネルが破壊する場合である。



表-4 継手引張試験の結果

試験体	最大荷重	动病如八	破壊強度の換算値(N/mm ²)		
No.	(kN)	帔裝部分	接着剤:τ	UFC : $f_{\rm UFC}$	
1	19.1	接着層	7.2	_	
2	17.5	接着層	4.0		
3	20.0	接着層	4.5		
4	24.1	接着層	5.5		
5	23.4	接着層	5.3		
6	26.5	接着層	6.0	_	
7	23.9	接着層	5.4		
8	28.3	UFC		10.7	
9	26.5	UFC	-	10.0	
10	31.0	UFC	_	11.7	
11	33.5	UFC	_	12.7	





(b) UFC パネルの破壊

(a) 接着部破壊

図-6 実験後の試験体破壊状況



 0 100 200 300 400 鋼材一般部のひずみ (μ)
 図-8 接合面近くの UFC パネルのひずみ (UFC パネルの破壊の場合)

500

図で D=10mm が継手中央の鋼材端部に対応するひずみであ る。図-7、図-8において各点でのひずみの変化をみる。 図-7より D=10mm のひずみ低下が D=30mm 以上の場所に比 べ鋼材一般部のひずみが小さいところで起こり,図-8 の場合は D=10mm のひずみの急激な増加が D=30mm 以上の 場所に比べ鋼材一般部のひずみが小さいところで起こる ことがわかる。図-7 でも図-8 でも D=10mm の位置は, 図-6 で観察された破壊起点とほぼ一致しているので、 上述のひずみ変化は破壊にかかわる変化と考えられる。 また、図-7と図-8で破壊が始まった後のひずみ変化の 傾向が異なるのは破壊部分の違いによると考えられる。 すなわち、接着剤が破壊する場合(図-7)は接着端部の 接着剤の破壊によりその部分での UFC パネルへの応力伝 達がなくなるために UFC パネルのひずみは低下する変化 になり, UFC パネルが破壊する場合 (図-8) は UFC パネ ルの破壊に向かって UFC のひずみが増加する変化となっ ていると考えられる。

4.5 UFC 厚さ方向のひずみ分布

接合部の強度評価では UFC の荷重分担への係りを把握 することも重要となる。ここでは UFC の厚さ方向のひず みに着目し,図-9のような継手各位置での UFC 厚さ方 向でのひずみについて考える。

接着長さが 120mm の試験体 (No. 9)の結果を図-10 から 図-12 に示す。図には荷重レベルが最大荷重に対して 30%,60%,90%のときの UFC 厚さ方向でのひずみ変化 を示す。どの断面位置でも接合面に近いところのひずみ が大きく,接合面から離れるにしたがってひずみが小さ くなっている。破壊の起点に近いA断面,接着長さ方向 の中央にあたるB断面では,荷重レベルが上がるにした



がってどの厚さ位置でもひずみが大きくなる傾向が見ら れるが、C断面では接合部から離れると引張ひずみの発 生がほとんどみられない。

図-13 に接着長さが 120mm で接着厚さが 5mm の試験体 (No. 11)の結果を示す。接着厚さが 0.2mm の場合(図-10) と比べても UFC パネルの厚さ方向のひずみ変化の傾向に 違いがみられない。

次に,接着長さが 50mm の試験体(No.3)のA断面の結果 を図-14に示す。図より接合荷重に関与する引張ひずみ がみられるのは接合面から UFC パネルの厚さ 20mm 程度 のところまでであることがわかる。そしてB断面でも同 様の傾向がみられた。



5. 考察

5.1 接着長さと継手強度について

図-1 のような接着継手における継手強度は接着面積 に依存するため接着長さによって変わる。継手強度と接 着面積の関係は次式で表される。

$$F_{adh} = 2WL\tau \tag{1}$$

ここで、 F_{ath} は継手最大荷重、Wは継手の接着幅、Lは接着長さ、 τ は接着剤のせん断強度。ただし、式(1)において接着長さと継手長さの関係を考える場合は有効接着長さの考慮が必要となる場合もある^{3,6)}。

図-1 の継手試験の場合,破壊が接着部で起こる場合 と継手中央の被着体(UFC パネル)の引張破壊になる場合 がある。継手強度が被着体の引張荷重での破壊による場 合は次式で表される。

$$F_{UFC} = 2Wt_c f_{UFC} \tag{2}$$

ここで、 F_{UFC} は継手最大荷重、Wとt_cはそれぞれUFCパネルの幅と厚さ、 f_{UFC} はUFCパネルの引接強度である。

表-4 で接着部の破壊が起こった No.1~No.7 の試験体 では継手の最大荷重が式(1)の F_{adh} となり,式(1)より接着 のせん断強度 τ が求まる。また,UFC パネルの引張破壊 が起こった No.8~No.11 の試験体では継手の最大荷重が 式(2)の F_{UFC} になり,式(2)より UFC パネルの引張強度 f_{UFC} が求まる。これらの結果を表-4 に示す。これより, No.1~No.7 の τ の平均値から接着剤のせん断強度は 5. 4N/mm², No.8~No.11 の平均値から UFC の引張強度は 11. 3N/mm²と,平均強度を推定することができる。

また, No.1~No.7 の τ の最小値(4.0N/mm²)と, No.8~ No.11 の f_{UFC} の最小値(10.0N/mm²)により, それぞれの試 験体で推定した $\tau \geq f_{UFC}$ を比較して継手強度を決める破 壊箇所の推定を行うと, No.8 の試験体を除けば実験時の 観察結果(**表**-4)と同様の結果になった。これは接着層と UFC パネルの破壊の起点が図-6 に示すように同じ継手 端部付近であるためと考えられる。

式(1)と式(2)より,継手強度が接着剤のせん断強度で決まる場合($F_{adh} < F_{UFC}$)と、UFCパネルの引張強度で決まる場合($F_{adh} > F_{UFC}$)は式(3)から求まる接着長さを境



にして考えることができる。

$$L = \frac{f_{UFC} \cdot t_c}{\tau} \tag{3}$$

ここで表-4 の結果から f_{UPC} の平均値は 11. 3N/mm², τ の平均値は 5. 4N/mm² と求まるので,これらを式(3)に代入 すると L=62.8mm となり,接着長さLが 62.8mm を境に継 手強度を決める破壊箇所が異なることになる。したがっ て,表-4 の継手強度の接着長さ依存性は図-15 のよう に示すことができると考えられる。そして,UFC パネル 接合の設計では接着剤のせん断強度と UFC パネルの引張 強度がわかれば,式(3)により接着長さへの依存性を知る ことができると考えられる。

5.2 UFC 厚さ方向のひずみ分布

接着長さが 120mm の場合(図-10)は接合面から離れた UFC パネルの上方でも引張ひずみが観測されるが,接着 長さが 50mm(図-14)の場合は UFC パネルの 2/3 程度まで しか引張ひずみが観測されなかった。UFC 厚さ方向で引 張ひずみとなる部分は継手において引張荷重の伝達に関 与していると考えられる。そこで,継手長さが異なる場 合について,UFC パネルの厚さ方向のひずみがゼロクロ スする位置を外挿により求めた。その結果を図-16 に示 す。そして接着長さ L と引張ひずみとなる UFC パネルの 厚さ D_tは次式で表される。

$$D_t = D_0 (1 - \exp(-0.00349 \cdot L^{1.54})) \tag{4}$$





ここで、 D_0 は UFC パネルの厚さで 30mm である。図より UFC パネルの接着長さが 80mm 程度を越えた場合は、UFC パネルの厚さ全体が引張ひずみになることが推察される。

図-17 に UFC パネルの厚さが 60mm と厚い場合のひず み分布を示す。図より引張ひずみとなる厚さは 40mm 程度 となり、図-14 との比較から、接着長さが同じ場合でも UFC パネルの厚さが厚い場合は引張ひずみとなる UFC パ ネルの厚さが異なることがわかる。

5.3 接着厚さと継手強度について

UFCパネルの接着接合で重要な接着層を介した荷重伝 達を4.1 で確認したが、ここでは接着層の厚さの継手強 度への影響を考える。継手強度は接着剤の強度だけでな く、接着厚さ⁶⁰やせん断剛性⁷⁰、被着体の種類³³などの影 響を受ける。図-15より継手強度である最大荷重に対し て接着強度とUFCパネルの引張強度が関与し、その分類 は接着長さによるところが大きいことがわかった。そこ で接着層が凝集破壊する接着長さ50mmの場合とUFCパ ネルが引張破壊する接着長さ120mmの場合について、接 着厚さと継手最大荷重の関係を調べた。結果を図-18 に 示す。図-18より、接着層が破壊する場合は継手最大荷 重は接着厚さにあまり依存しないが、UFCパネルが破壊 する場合は接着厚さが厚くなる方が継手の最大荷重が大 きくなる傾向がみられる。

接着厚さが厚くなるにしたがって継手最大荷重が大き くなる L=120mm の場合は、UFC パネルの破壊の起点にな る継手端部の応力集中が接着層が厚いほど小さくなった ことが影響していると考えられる³³。また、L=50mm の場 合は、接着剤の特性に起因するところが大きく、ヤング 率が小さく硬化収縮が小さいこと³³が接着層の厚さにあ まり影響しなかった要因と考えられる。

6. 結論

UFC パネルを接着接合した補強を想定し,接合部の挙動を調べた。接着接合の長さ,厚さに着目し,接着接合の条件と継手の強度評価について検討した。その結果,以下のことがわかった。



(1) 継手強度は接着層の破壊による場合と接着接合した
UFC パネルの引張破壊による場合があり、その違いは接着長さへの依存性がみられた。そして、破壊部の違いを分ける接着長さの算出方法を示し、実験結果で検証した。
(2) 接着長さは接合した UFC パネルの厚さ方向のひずみ分布にも影響し、接着長さが長くなると引張ひずみとなる厚さが増え、その厚さは UFC パネルの厚さで変わる。
(3) 接着層が凝集破壊する場合、使用した接着剤では接着厚さへの依存性がみられず、一方、UFC パネルが引張破壊する場合は接着層が厚いと継手最大荷重が大きくなる。

参考文献

- コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告書, (社)日本コンクリート工学協会,2003.7.
- (社)日本鋼構造協会:鋼構造物への接着接合の適用,JSSC-No.26,1993.
- 3) 樹脂材料による複合技術の最先端:土木学会複合構造委員会・樹脂材料による複合技術研究小委員会,(社)土木学会,複合構造レポート06,2012.6.
- 三木千壽,加納隆史,片桐誠,菅沼久忠:UFC パネ ル貼付による鋼床版の疲労補強,鋼構造論文集, Vol.15,,No.58, pp.79-87, 2008.6.
- 高橋順,行澤義弘,成田昌弘,工藤伸司,石橋忠良:土 中に5年間埋設した接着接合鋼管の曲げ耐荷特性 に関する検討,鋼構造年次論文報告集,第12巻, 467-474,2004.11.
- 高橋順,向永治郎:二重重ね合わせ継手の強度に及ぼ す接着剤の影響,第 10 回計算力学講演会講演集, No.97-7,pp.169-170,1997.
- 7) Jianguo Dai, Tamon Ueda and Yasuhiko Sato, "Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method", Journal of Composites for Construction, ASCE, Volume 9, No.1, January/February 2005, pp.52-62.