論文　水中適用型高流動エポキシ樹脂により接着した CFRP グリッドの付着性能

根本　正幸[*1]・川瀬　義行[*2]・呉　智深[*3]・岩下　健太郎[*4]

要旨：水中で施工可能な高流動エポキシ樹脂を用いて接着した CFRP グリッドのコンクリート部材に対する付着挙動を，両引きせん断試験により究明した。そして，界面剥離破壊エネルギーG_fが 2.58N/mm 以上と，水中硬化型エポキシパテを用いて陸上で接着した場合や炭素繊維シートを通常の含浸・接着材を用いて気中で接着した場合と同等以上の付着強さが得られることを明らかにした。また，既存の算定式を応用して，高流動エポキシ樹脂を用いてコンクリート表面に接着した CFRP グリッドの有効付着長と付着耐力を評価するための算定式を提案した。

キーワード：CFRP グリッド，水中適用，エポキシ樹脂，界面剥離破壊エネルギー，有効付着長

1. はじめに

水辺や水中にある鉄筋コンクリート構造物を補強する場合には，現段階では函体などで周囲を囲った上で水を排除してドライ空間を作り出してから施工する方法が主流である。しかし，大型重機や多大な労働力を必要とするため，かなり高コストである。既報では，「水中で硬化，接着可能なエポキシパテ」を用いて，水中でコンクリート表面に CFRP グリッドを接着，補強する技術を提案した[1)2)3)]。しかし，この技術ではダイバーが手作業で水中施工することを前提としていたため，大面積を補強対象とした場合や高流速の地域での施工精度低下に懸念があった。また，エポキシパテが周辺環境に与える影響への懸念も考慮する必要があった。そこで，これらの懸念事項を踏まえて，狭い隙間に充填できかつ施工能力も高くなるポンプ圧送が可能な「水中適用型高流動エポキシ樹脂」を接着材に採用して，接着対象の周辺に事前に設置した SUS 型枠とコンクリートの隙間に CFRP グリッドを設置した上でこの樹脂を流し込み，内部の水と置換することにより水中適用を維持した工程に改良した。その結果，接着層厚さが一定になるため，付着強さを安定化することができる。また，SUS 型枠によりエポキシ樹脂は密閉される上，流し込み時の流出水を回収することで，周辺環境への影響に対する懸念が無くなる。

本研究では，以上の構想により改良した CFRP グリッド水中接着補強技術に関して，CFRP グリッドとコンクリート間の隙間厚さや全体樹脂厚さを考慮した両引きせん断試験により，CFRP グリッドの付着挙動を検証した上で，既存の算定式を応用して CFRP グリッドの有効付着長と付着耐力の算定式を提案し，上記の実験結果を用いて提案式の有意性を検討した。

2. 両引きせん断試験による CFRP グリッドの付着性能

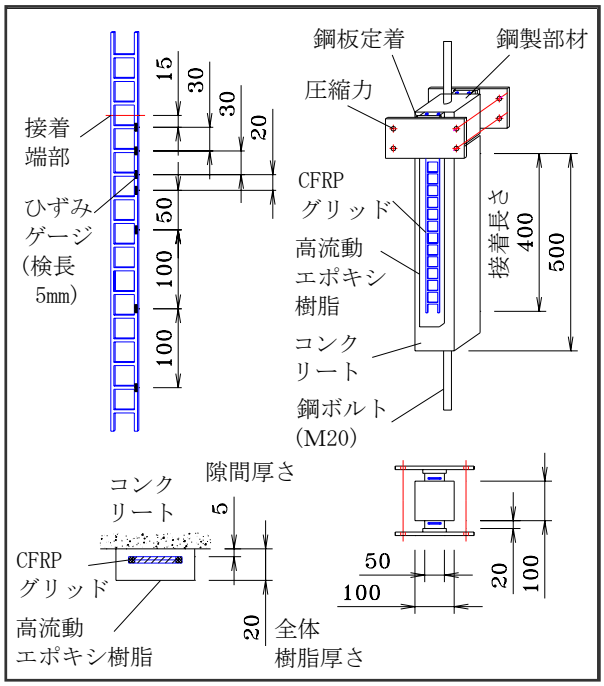
2.1 試験体の製作と実験水準

両引きせん断試験において，CFRP グリッドとコンクリート間の隙間厚さおよび CFRP グリッドも含んだ全体樹脂厚さを水準とした。実験水準を**表－１**に示す。なお接着層数は，1 層では破断，3 層では固定側 CFRP グリッドにすべりが生じてしまうため，2 層とした。試験体は土木学会基準（JSCE-E543-2000）を参考に，**図－１**に示す形状とした。ただし，断面寸法は同じ 100×100 mm としたが，有効付着長がより長くなった場合にも対応できるように試験側の CFRP グリッドの接着長さを 400mm とし，固定側は試験機のサイズに関する制約から，鋼製部材を用いて鋼板とボルトでグリッドを圧着させる形状とすることで，固定側を 100mm 長さに短縮した。なお，本研究で固定側 CFRP グリッドのすべりはまったく確認されなかった。試験に用いたコンクリート，CFRP グリッドおよび高流動エポキシ樹脂の各種物理的特性値を**表－２**に示す。試験体の製作は以下の手順で行った。まず，母材コンクリートの打設を行い，28 日養生後にサンドブラストにより下地処理を実施した。次に，コンクリート表面に CFRP グリッドをコンクリートとの間に所定の隙間をあけて固定し，周囲を型枠で囲った上で高流動エポキシ樹脂を流し込んだ。その後，7 日以上，室温（15～20℃）で養生してから実験を行った。

*1 日鉄防蝕（株）　技術部　(正会員)
*2 日鉄防蝕（株）　技術部
*3 茨城大学　工学部　都市システム工学科　教授　工博　(正会員)
*4 茨城大学　大学院　理工学研究科　非常勤研究員　工博　(正会員)

表－１　実験水準

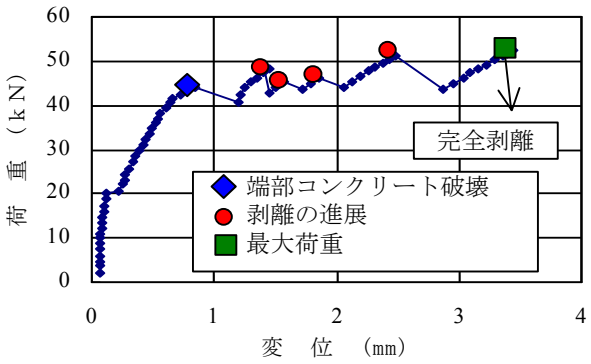
水準	接着層数	隙間厚さ (mm)	全体樹脂厚さ (mm)
A	2	0	10
B	2	0	15
C	2	0	20
D	2	5	20
E	2	10	20



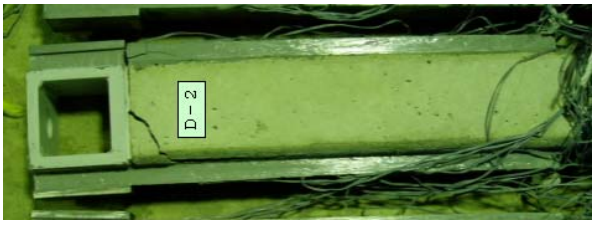
図－１　試験体形状（一例として水準Ｄ）

表－２　各種の物理的特性値

コンクリート	配　合 (24-12-20) W／C＝56 Gmax＝20mm	C	286 kg/m^3
		W	161 kg/m^3
		S	796 kg/m^3
		G	1,075 kg/m^3
		混和剤	2.85 kg/m^3
	スランプ		10 cm
	空気量		5.0 %
	温　度		22 ℃
	圧縮強度		33.3 N/mm^2
CFRP グリッド	引張強さ		1,400 N/mm^2
	弾性率（繊維断面積）		230,000 N/mm^2
	補強繊維の換算公称厚さ 断面積 4.4mm^2×繊維含有率 43%× 引張グリッド本数 2本／接着幅 50mm＝ 0.07568 mm（／層）		
	格子ピッチ		30 mm
高流動エポキシ樹脂	圧縮強さ　20℃×７日		64 N/mm^2
	弾性係数　20℃×７日		4,600 N/mm^2
	引張強さ　20℃×７日		32 N/mm^2
	密　度		2.05 g/cm^3
	粘　度　20℃		4,000 mPa・s



図－２　荷重と変位の挙動の一例（Ｄ－２）



写真－１　試験後の外観の一例（Ｄ－２）

2.2 試験結果

(1) 高流動エポキシ樹脂の使用による付着強さの向上効果

両引きせん断試験における荷重と変位の関係を，一例としてＤ水準内の 1 体についてのみ**図－２**に示す。なお，他の水準の試験についても同様の破壊形式であった。破壊形式は，まず，小さな樹脂の破断音とともに剛性がやや低下した。これを著者らの過去の研究[7]を参照して微視的な剥離と判断した。そして，この微視的な剥離の蓄積により剥離が進展を始めた。その後は幾度かの部分的な剥離を繰り返し，最終的に CFRP グリッド全面が剥離に至った。試験後の外観の一例を**写真－１**に示す。

次に，日本コンクリート工学協会，補強技術研究委員会報告書[5]に示される CFRP シートの付着強さの評価式(1)に基づき，付着強さの評価指標として界面剥離破壊エネルギー（以下 G_f と略）を算出した。

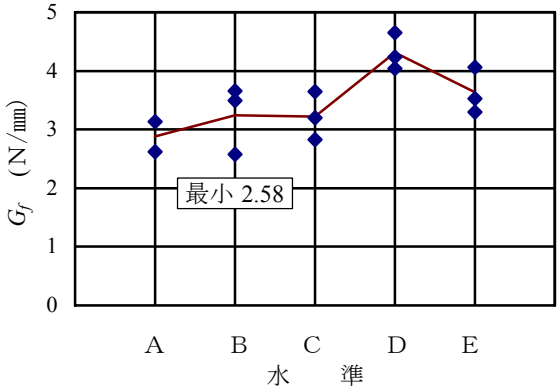
$$G_f = P^2_{max} / (8b^2 \cdot E_{frp} \cdot t_{frp}) \qquad (1)$$

ここで，G_f：界面剥離破壊エネルギー（N／mm）
P_{max}：最大荷重（N）
b：CFRP シート幅の平均値（mm）
E_{frp}：CFRP シートの引張弾性率（N／mm^2）
t_{frp}：CFRP シートの公称厚さ（mm）

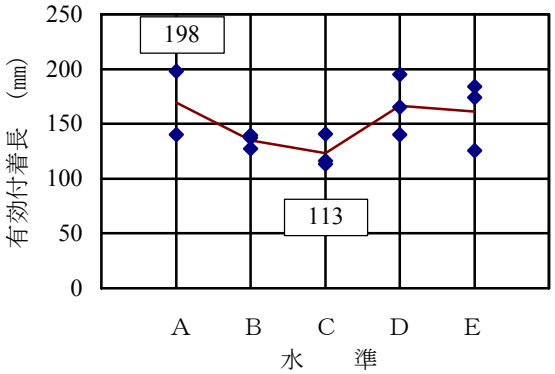
ただし，この式は CFRP シートを用いた場合の評価式であり，CFRP グリッドとは形状が異なるため，下記の

表－３　試験結果

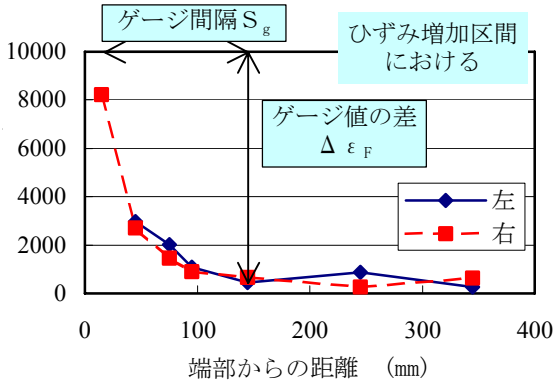
水準	接着層数	隙間厚さ (mm)	全体樹脂厚さ (mm)	最大荷重 P_{max} (N) 〈平均〉	G_f (N/mm) 〈平均〉	引張応力度 T (N/mm^2) 〈平均〉
A	2	0	10	44,710	2.88	2,950
B	2	0	15	47,380	3.24	3,130
C	2	0	20	47,320	3.23	3,130
D	2	5	20	54,750	4.31	3,620
E	2	10	20	50,240	3.63	3,320



図－３　剥離破壊エネルギーG_fの一覧



図－４　有効付着長の一覧



図－５　ひずみ分布の一例（Ｄ－２）

ように各数値を換算する。①b としてはグリッドを含んだ樹脂の幅を用いる（本研究では 50mm）。②t_{frp} としては，CFRP グリッドに含まれる樹脂の引張強さはグリッド全体としての引張強度よりはるかに小さい（32 : 1400）ことを考慮して樹脂を無視し，b の範囲に含まれる CFRP グリッドの内部の炭素繊維断面積を b で除した値とする（本研究では 0.07568 mm／層）。また，最大荷重を CFRP グリッド内の炭素繊維量（断面積）で除して，CFRP グリッド剥離直前における引張応力を求めた。これらの算出結果を**表－３**および**図－３**に示す。まず，各水準における G_fを比較して，水準Ａ，ＢおよびＣでは各水準内の平均値は 2.88～3.24N/mm（最小 2.58）であった。一方，過去の研究[1)]で接着樹脂にエポキシパテを用いて水中で CFRP グリッドを接着した場合（繊維の換算公称厚さ＝0.076mm）には，G_f＝0.54～2.28N/mm，炭素繊維シートを通常の含浸・接着剤を用いて気中で接着した場合（繊維の厚さ 0.111mm）には，G_f＝0.60～1.40N/mm であり，繊維量が異なるものの，これらの場合と比べて本研究での値はかなり高く，試験値のばらつきがかなり小さくなっている。その理由としては，1）高流動エポキシ樹脂は通常のエポキシ樹脂より低粘度であり，コンクリート表面の凹凸への浸透が容易であること，2）CFRP グリッドとコンクリート表面との距離や全体樹脂厚さがより均一となったためであると推測される。

ついで，CFRP グリッドのコンクリートに対する有効付着長を算出するために，まず，最大付着応力を以下の式(2)により算出した[5)]。CFRP グリッドの形状は棒状であるが，接着工法として評価するため繊維シートの式を適用した。補強繊維の断面積は，含有する補強材である炭素繊維の量を，接着幅全体に分散させたものとして補強繊維の断面積を，換算公称厚さ×接着幅とした。

$$\tau_y = \Delta\varepsilon_F \cdot E_{frp} \cdot A_F / S_g / b \qquad (2)$$

τ_y：最大付着応力（N/mm^2）

$\Delta\varepsilon_F$：最大荷重時のひずみ増加区間におけるひずみゲージ値の差

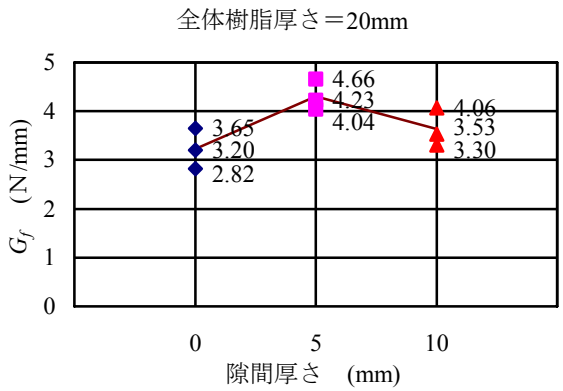
A_F：補強繊維の断面積（0.07568／層×50 mm^2）

S_g：ひずみ増加区間のひずみゲージの貼り付け間隔（mm）

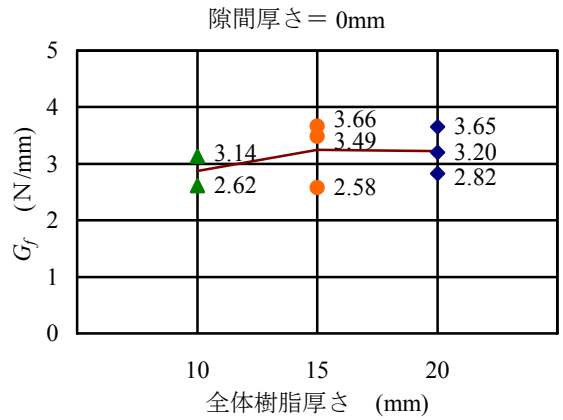
次に，算出した最大付着応力を用いて CFRP グリッドの有効付着長 L_e(mm)を以下の式(3)により計算した[5)]。

$$L_e = P_{max} / (2 \cdot \tau_y \cdot b) \qquad (3)$$

算出した有効付着長の一覧を**図－４**に示す。また，算



図－６　隙間厚さが付着強さに及ぼす影響



図－７　全体樹脂厚さが付着強さに及ぼす影響

出に際して用いたひずみ分布の一例を**図－５**に示す。算出された有効付着長は 113～198mm であった。

(2) CFRP グリッドとコンクリートとの隙間厚さや全体樹脂厚さが付着強さに与える影響

隙間厚さおよび全体樹脂厚さと G_f の関係を**図－６**および**図－７**に示す。CFRP グリッドとコンクリートが密着した状態である隙間厚さ 0mm では，G_f がやや小さいことがわかる。この理由としては，FRP グリッドとコンクリートの間に隙間が無いため，エポキシ樹脂が入りにくく，付着面積が減少したためと考えられる。

一方，本試験の水準範囲内では全体樹脂厚さに関する影響はほとんど無いことも検証された。よって，CFRP グリッドが露出しない程度の厚さとすることで，付着強さを確保できることが明らかとなった。

3. CFRP グリッド接着端部における有効付着長と付着耐力の算定式の提案

3.1 CFRP グリッドの有効付着長の簡易算定式の提案

既往の研究[6]において，付着試験におけるコンクリート圧縮強度 f_c' と最大付着強度 τ_f の関係は，以下の式(4)，式(5)で表されている。

$$\tau = \tau_f \left[\frac{\delta}{\delta_1} \cdot \frac{n}{(n-1)+\left(\frac{\delta}{\delta_1}\right)^n} \right] \tag{4}$$

$$\tau_f = 3.50 f_c'^{0.19} \tag{5}$$

τ ：付着応力（N/mm^2）
τ_f：最大付着強度（N/mm^2）
δ ：すべり量（mm）
δ_1：最大付着強度到達時のすべり量(0.065mm)
n ：3（定数）
f_c' ：コンクリート圧縮強度（N/mm^2）

よって，G_f とコンクリート圧縮強度の関係は，以下の式(6)で表される。

$$G_f = \int_0^\infty \tau d\delta = \int_0^\infty \tau_f \left[\frac{\delta}{\delta_1} \cdot \frac{3}{2+\left(\frac{\delta}{\delta_1}\right)^3} \right] d\delta$$
$$\approx 0.184\tau_f = 0.644 f_c'^{0.19} \tag{6}$$

著者らは，有効付着長 L_e と最大荷重 P_{max} の関係式を以下の式(7)のように示しており[7]，式(5)を代入して有効付着長とコンクリート圧縮強度との関係に変換することができる。

$$L_e \approx \frac{P_{max}}{\left(\frac{b\tau_f}{2}\right)} = \frac{2b\sqrt{2G_f E_{frp} t_{frp}}}{b\tau_f}$$
$$= \frac{0.649\sqrt{E_{frp} t_{frp}}}{f_c'^{0.095}} \tag{7}$$

ついで，算定式と実験結果を一致させるための拡大係数 a を設定し有効付着長 L_e' の評価式を式(8)に示すように仮定する。

$$L_e' \geq a\frac{0.649\sqrt{E_{frp}t_{frp}}}{f_c'^{0.095}} \quad (8)$$

このとき，a のレベルごとに有効付着長を計算し，実験値と比較した結果を**表－４**に示す。実験水準Ａ～Ｅは補強繊維の水準，コンクリート圧縮強度がすべて同じであるので簡易算定式(8)から求めた有効付着長は同じになる。一方，各水準での実験値の最大な有効付着長は 116～198mm となっている。実験量は十分とは言えないが，定数 a＝1 として算定式から求められる値は実験からの値よりかなり小さく，本実験値の最大の有効付着長を満足するように定数 a を設定すると 2.28 である。現状の実験結果より，有効付着長 L_e’ の簡易算定式は式(9)のように示すことができる。

$$L_e' \geq \frac{1.479\sqrt{E_{frp}t_{frp}}}{f_c'^{0.095}} \quad (9)$$

3.2 界面剥離破壊エネルギーに着目した接着端部における付着耐力の評価式の提案

前項で提案した算定式から求めた有効付着長を確保することを条件として，接着端部の付着耐力を，両引きせん断試験から得られた G_f から算定する手法を提案する。まず，2.2 の式(1)として示した最大荷重 P_{max} と G_f との関係式に，両引きせん断試験から得られた最小の G_f（2.58）を代入して付着耐力を算出する。さらに，材料や施工に係る部分安全係数 k を考慮した設計に対する付着耐力 P_{max} の評価式を式(10)に示すように提案する。

$$P_{max} = \frac{2b\sqrt{2G_f E_{frp}t_{frp}}}{k} \quad (10)$$

ここで，CR3-30（格子間隔：30mm，断面積：4.4mm^2／1 本）を用いる場合は接着幅 b=50mm で長手方向の CFRP グリッドが 2 本含まれた場合を，CR10-100（格子間隔：100mm，断面積：39.2mm^2／1 本）を用いる場合は

表－４　有効付着長の簡易算定式による計算値と実験値の比較

水準	有効付着長 (mm) 実験値の最大	接着層数	弾性率 E_{frp} (N/mm)	換算公称厚さ t_{frp} (mm)	圧縮強度 f_c' (N/mm^2)	有効付着長 (mm) L_e’ 簡易算定式による計算結果			
						a ＝1	a ＝1.5	a ＝2	**a＝2.28**
A	198	2	230,000	0.15136	33.3	86.8	130	174	198
B	140	2	230,000	0.15136	33.3	86.8	130	174	198
C	116	2	230,000	0.15136	33.3	86.8	130	174	198
D	195	2	230,000	0.15136	33.3	86.8	130	174	198
E	184	2	230,000	0.15136	33.3	86.8	130	174	198

表－５　端部付着耐力の算定式による計算結果

CFRP グリッドの仕様	接着層数	幅 b (mm)	弾性率 E_{frp} (N/mm)	換算公称厚さ t_{frp} (mm)	G_f (N/mm)	端部付着耐力の計算結果 P_{max} (N)		
						k＝1	k＝2	k＝3
CR3-30 断面積：4.4mm^2/1 本 格子間隔：30mm	1	50	230,000	0.07568	2.58	30,000	15,000	10,000
	2	50	230,000	0.15136	2.58	42,400	21,200	14,100
	3	50	230,000	0.22704	2.58	51,900	26,000	17,300
CR10-100 断面積：39.2mm^2/1 本 格子間隔：100mm	1	120	230,000	0.28093	2.58	138,600	69,300	46,200
	2	120	230,000	0.56187	2.58	196,000	98,000	65,300
	3	120	230,000	0.84280	2.58	240,000	120,000	80,000

接着幅 b=120mm で長手方向の CFRP グリッドが 2 本含まれた場合をそれぞれ想定する。そして，安全係数 k を 1，2，3 と設定するとき，端部付着耐力の算出結果は**表－5**に示す通りである。ここで，実験では CR3-30，2 層のケース（実験結果 ; G_f=2.58N／mm，P_{max}=42,360N）しか実施していないが，G_fの定義式には CFRP の厚さや幅，引張特性が考慮されているため，CFRP グリッドの接着層数や引張特性により G_f は変化しないことを前提として算定した。なお，以上の方法で算出した端部付着耐力を CFRP グリッドに想定される設計荷重が上回る場合には，端部の増し厚や外部からの端部定着など，新たな補強を考える必要がある。

4. まとめ

本研究では，水中適用型の高流動エポキシ樹脂を用いて接着した CFRP グリッドの付着強さおよび有効付着長を実験的に明らかにした上で，既存の理論を応用して実験結果から有効付着長を評価した。また，接着端部の付着耐力を算定するための算定式を提案し，その有意性を検討した。本研究で得られた主な知見を以下にまとめる。

(1) 高流動エポキシ樹脂を適用した CFRP グリッドとコンクリートの接着界面における界面剥離破壊エネルギーG_fは 2.58N/mm 以上であり，過去の研究で行った接着樹脂にエポキシパテを用いて水中で CFRP グリッドを接着した場合の G_f=0.54～2.28N/mm や炭素繊維シートを通常の含浸・接着剤を用いて気中で接着した場合の G_f=0.60～1.40N/mm に比べて非常に高い値であり，かつ値のばらつきがより小さいことが検証された。その理由としては，1）高流動エポキシ樹脂は通常のエポキシ樹脂やエポキシプライマーより低粘度であり，コンクリート表面の凹凸への浸透が容易であること，2）CFRP グリッドとコンクリート表面との距離や全体樹脂厚さがより均一になったためであると推測される。

(2) CFRP グリッドとコンクリートが密着した状態である隙間厚さ 0mm では，5mm 以上とした場合より G_f がやや小さいことがわかる。この理由としては，FRP グリッドとコンクリートの間に隙間が無いため，エポキシ樹脂が入りにくく，付着面積が減少したためと考えられる。また，全体樹脂厚さに関する影響はほとんど無いことも検証された。よって，CFRP グリッドが露出しない程度の厚さとすることで，付着強さを確保できることが明らかとなった。

(3) 有効付着長の算定に関する既存の理論を用いて実験結果を評価した。その結果，本研究で提案した高流動エポキシ樹脂を用いた CFRP グリッド接着技術においては定数が 2.28 となり，既存研究[7)]で示された基準の定数 2.00 より大きいため，本技術では陸上での CFRP シート接着技術の場合より有効付着長がかなり大きくなることが明らかとなった。

(4) 有効付着長を確保することを前提とした接着端部の付着耐力の算定式を，既存の G_fと最大荷重 P_{max} の関係式から材料や施工に係る部分安全係数 k を考慮して新たに提案した。また，実際の施工時に想定されるケースを一例として付着耐力を算出した。

参考文献

1) 芦野孝行ほか：水中適用型 CFRP グリッド接着補強工法の補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.1123-1128，2001
2) 芦野孝行ほか：水中適用型 FRP グリッド接着補強工法のせん断補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.2260-2265，2002
3) 芦野孝行ほか：水中適用型 FRP グリッド接着補強工法の圧縮補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1879-1884，2003
4) 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 101，2000.7
5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告書，2003.7
6) Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., and Yoshizawa, H.: Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete, ACI Structural Journal, Vol.98 ,No.3 ,pp. 359-367, 2001
7) Zhishen WU, Hedong NIU: Prediction of crack-induced debonding failure in R/C structures flexurally strengthened with externally bonded FRP composites, JSCE Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Vol.63, No.4, pp.620-639, 2007.12