

論文 バサルト繊維シートとコンクリートの付着特性

岩下 健太郎*1・佐藤 大地*2・馬場 進*3・松本 信行*4

要旨：両引き試験によりバサルト繊維シートとコンクリートの付着特性，特に界面剥離破壊エネルギーや最大ひずみに基づく付着強さ，および有効付着長について実験的に検討を行うとともに，既存の評価式を用いて実験値の評価を行った。その結果，界面剥離破壊エネルギー，連続繊維シートの剥離直前における最大ひずみ，そして有効付着長について，既存の評価式による閾値と実験値に強い相関がみられ，既存の評価式によりバサルト繊維シートの付着強さおよび有効付着長の評価が精度よく行えることが明らかになった。

キーワード：バサルト繊維シート，付着，両引き試験，界面剥離破壊エネルギー，最大ひずみ，有効付着長

1. はじめに

バサルト繊維シートは，炭素繊維シートやアラミド繊維シート，ガラス繊維シートといった種々の繊維シートに比べ，伸度において特に優れており，ある程度高い引張強度やヤング率をも有している。また，バサルト繊維は玄武岩より成るため，熱膨張率がコンクリートと同程度になることから，コンクリート構造物の補強材としての適用に関する研究が盛んに進められている。しかし，連続繊維補強材には，補強構造物の終局時において，コンクリートに生じたひび割れを起点とした剥離進展により補強効果が低下する恐れがあるため，付着強さや有効付着長の評価を行い，設計時に必要となる界面剥離破壊エネルギーや最大ひずみ，そして必要接着長を明確にする必要がある。そこで，本研究では，コンクリート塊の両側面にバサルト繊維シートを接着したうえで，強制的に剥離させる両引き試験を行い，バサルト繊維シートとコンクリートの付着特性，特に界面剥離破壊エネルギーおよび連続繊維シートの最大ひずみに基づく付着強さ，および有効付着長について実験的に検討を行った。また，既存の評価式を用いて実験値の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の形状と寸法

日本コンクリート工学会，連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ)¹⁾および土木学会，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²⁾において，連続繊維シートのコンクリートに対する付着強さの評価を目的とした両引き試験方法案が提案されている。この実験案において提案されている供試体は，図-1に示すように，幅100mm×高さ100mm×長さ300mmのコンクリート塊2体を長手方向に並べ，その両側面に，幅50mmの連続繊維シートに接着材を含浸させつつ，長手

方向に接着した形状である。ここで，コンクリートの内部には，試験機との接続に用いる鋼棒が埋め込まれており，この鋼棒の両端を試験機と接続し，相対する方向に引っ張ることにより荷重を負荷した。

2.2 使用材料と供試体の諸元

本研究の実験に使用したバサルト繊維シートとは，天然に存在する玄武岩(バサルト)を溶融・紡糸したバサルト繊維を一方向に並べ，シート状にしたものであり，表-1に示すように，高い伸度を有し，ある程度高い引張強度やヤング率も有している。また，耐震補強等において施工実績のあるアラミド繊維シートについても，比較対象として実験を行った。これらの連続繊維シートの含浸・接着材およびプライマーには，コンクリートの補強に関する施工実績のある，常温硬化型の熱硬化性エポキシ樹脂(硬化材には環状ポリアミドアミンを使用)およびアクリル樹脂を用いた。表-2に示すように，これらの硬化時間はアクリル樹脂については塗布後45分程度，エポキシ樹脂については15時間程度であり，大きく異なるが，供試体作製時における養生条件は，両者で合わせることにした。また，コンクリートについては，コンクリートの圧縮強度が高いほど，連続繊維シートの付

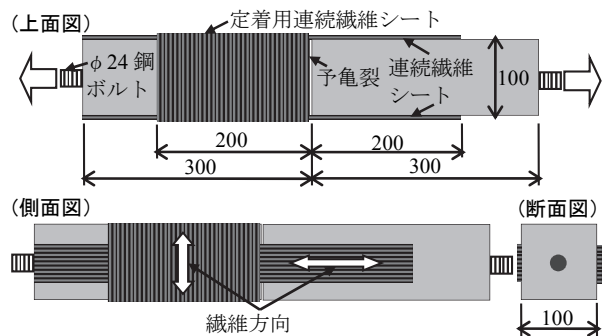


図-1 両引き試験供試体の詳細寸法

*1 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科准教授 博(工) (正会員)

*2 名城大学 大学院理工学研究科博士前期課程建設システム工学専攻 (学生会員)

*3 アイレック技建(株) 営業開発本部

*4 梶屋ティスコ(株)

着がより強くなるとの報告¹⁾として³⁾が数多くあり、後述する付着特性に関する設計式にも影響要因が考慮されているため、設計基準強度は21, 30, 40N/mm²の3種類の供試体を作製し、コンクリートの圧縮強度の影響も考慮した検討を行った。実験供試体の一覧を表-3に示す。なお、コンクリートの圧縮強度については、設計基準強度毎に円柱供試体(φ50×100mm)3本の圧縮試験を行い、平均値を同表に記した。

表-1 連続繊維シートの物性値一覧

特性	バサルト繊維シート	アラミド繊維シート
引張強度 σ_f (N/mm ² , メーカー値)	1900	2060
引張弾性率 E_f (kN/mm ² , メーカー値)	90	118
破断伸度 $\varepsilon_f(=\sigma_f/E_f)$ (μ)	21111	17458
目付量 (g/m ²)	580	280
1層あたり換算厚さ t_f (mm)	0.22	0.195
$E_f \cdot t_f$ (kN/mm) (長手方向のみ, 1層あたり)	19.8	23.0

表-2 接着材の物性値一覧

特性	アクリル樹脂	エポキシ樹脂
引張強度 σ_r (N/mm ² , メーカー値)	23	30
可使時間 (分, 20℃)	25	45
硬化時間 (20℃)	45分	15時間
粘度 (mPa・s)	4000 (15℃)	1800 (20℃)

表-3 実験供試体一覧

供試体名	連続繊維シートの種類	含浸・接着材の種類	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²) (設計基準値, 実測平均値)	供試体数
B-EP-21	バサルト繊維シート	エポキシ樹脂	21.0, 23.0	3
B-EP-30			30.0, 31.2	3
B-EP-40			40.0, 37.3	3
B-AC-21	バサルト繊維シート	アクリル樹脂	21.0, 23.0	3
B-AC-30			30.0, 31.2	3
B-AC-40			40.0, 37.3	3
A-AC-21	アラミド繊維シート	アクリル樹脂	21.0, 23.0	3
A-AC-30			30.0, 31.2	3
A-AC-40			40.0, 37.3	3

2.3 連続繊維シートの含浸・接着手順

コンクリートの表面処理は、コンクリートの表面をディスクサンダーにより骨材が現れる程度の深さまで研削し、アセトンに浸透させた布でその面を洗浄した上で、プライマーを塗布する手順で行った。ここで、プライマーには含浸・接着材と同種の接着剤を用い、その塗布量はメーカーの推奨値である0.5kg/m²とした。その後、12時間程度経過して、プライマーの表面が硬化した時点で、常温硬化型接着材で2層の連続繊維シートを含浸し、プライマーの表面に密着させ、脱泡ローラーで気泡を抜く手順で接着させた。そして、温度が24~28℃、湿度が50~70%となる室内で、7日間程度で養生したうえで両引き試験を実施した。ここで、バサルト繊維シートとアラミド繊維シートの試験結果を比較するうえで、補強量はある程度合わせる必要があるため、引張弾性率(E_f)×シート厚さ(t_f)が同程度になるように、繊維目付量を調整した。また、連続繊維シートと含浸材の体積比である繊維含有率(V_f)が引張特性に大きく影響することが一般に知られているため、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²⁾を参考に50%程度になるように接着材の塗布量を調整した。

2.4 実験手順および測定項目

供試体両端部の鋼ボルトを2000kN万能試験機に接続し、5kN/min程度の割合で荷重を増加させる引張試験を行った。試験時の環境温度および湿度は空調管理されており、24~25℃、50~60%であった。実験に際して計測する項目(測定機器)は、荷重(試験機より出力)、FRPシート表面ひずみ(検長5mmのひずみゲージを予亀裂位置から順に5, 50, 100, 125, 150, 175, 195mm離れた箇所に設置)、そして予亀裂の拡張量(検長50mmの π 型変位計)とした。

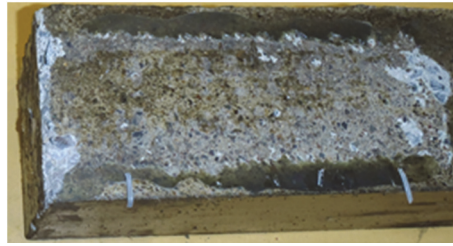
3. 実験結果と考察

3.1 連続繊維シートの種類に関する検討

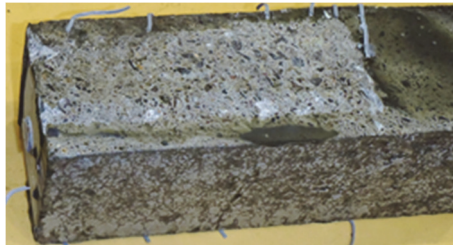
(1) 界面剥離破壊エネルギーに関する検討 (繊維の種類を考慮)

B-AC-30試験およびA-AC-30試験におけるバサルト繊維シートおよびアラミド繊維シートの剥離後の状況写真を図-2に示す。剥離の状況は両者で類似しており、また、コンクリートの圧縮強度が異なるケースでも類似していた。連続繊維シートの剥離は予亀裂近傍からシート端部に向かって進展した。予亀裂から10mm程度はコンクリートが斜めに滑っている状況が確認された。

土木学会編、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²⁾に掲載されている、下記の式(1)から求めた剥離破壊エネルギー G_f を用いて、付着強さを評価する。



(a) B-AC-30



(b) A-AC-30

図-2 剥離後コンクリート表面の状況

$$G_f = \frac{P_{\max}^2}{8b_c^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot n} \quad (1)$$

ここで、 P_{\max} :最大荷重(N)、 b_f :連続繊維シート幅(mm)、 n :連続繊維シートの層数、 E_f 、 t_f については表-1に掲載した値を採用した。最大荷重の実験値を用いて算出した G_f の閾値をコンクリートの圧縮強度ごとに図-3～図-5に示す。また、National Research Council 発行の CNR-DT200 ガイドライン⁴⁾および Teng ら⁵⁾ (fib bulletin 14 ガイドライン⁶⁾に採録)による G_f の設計式は、それぞれ(2)式、(3)式のように表されている。これらの式より算出された閾値についてもこれらの図に示す。

$$G_f = 0.03 \sqrt{\frac{2-b_f}{1+b_f} \frac{b_c}{400}} \sqrt{f_{ck} f_{cm}} \quad (2)$$

$$G_f = \frac{0.5c_1^2 \sqrt{f_{ck} f_{cm}}}{\gamma_c} \quad (3)$$

ここで、 b_c :コンクリート接着面の幅(mm)、 f_{ck} :コンクリートの設計基準強度(N/mm²)、 f_{cm} :コンクリートの引張強度(N/mm²) (CEB-FIB コード⁷⁾より $f_{cm} = 0.3(f_{ck})^{2/3}$)、 c_1 :定数で0.23、 γ_c :コンクリートの材料安全係数で1.5である。コンクリートの実測平均強度を用いて G_f を算出した場合には、設計基準強度を用いた場合に比べて2.0～4.6%の差異が生じるが、これは供試体毎の G_f の実験値におけるばらつきよりかなり小さいため、本稿では設計基準強度を用いて算出した場合についてのみの考察を行う。

B-AC-21～40 と A-AC-21～40 における G_f の実験値を比較すると、コンクリートの圧縮強度が21 N/mm² およ

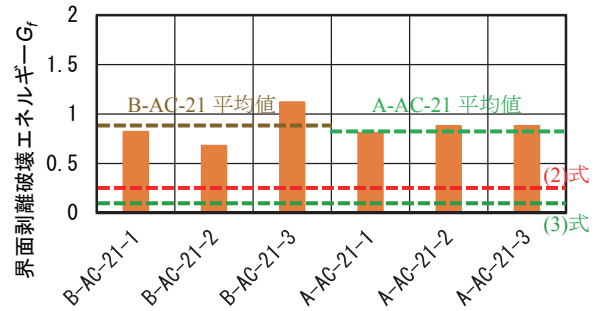


図-3 G_f の比較 (コンクリート圧縮強度 21N/mm²)

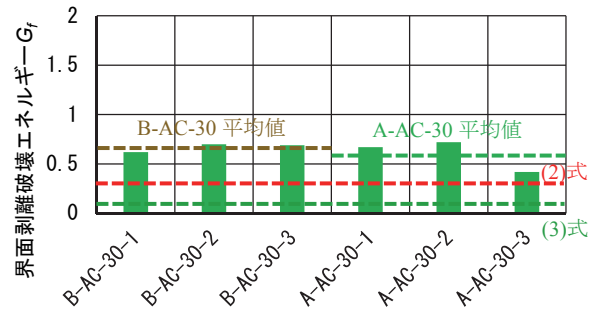


図-4 G_f の比較 (コンクリート圧縮強度 30N/mm²)

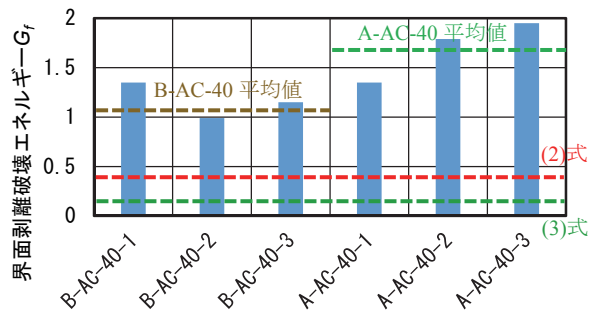


図-5 G_f の比較 (コンクリート圧縮強度 40N/mm²)

び30 N/mm² のケースでは、B-AC-21～30 と A-AC-21～30 ではほぼ同様の値となっている。しかし、コンクリートの圧縮強度が40 N/mm² のケースでは、A-AC-40-2 および AC-40-3 のケースで極端に大きな G_f となっている。実験後の剥離面の観察で、これらのケースでのみ、比較的大粒の粗骨材が引き抜かれたように剥離している様子が確認された。よって、粗骨材の噛み合わせが生じ、大きな G_f となったと考えられる。一方、式(2)、式(3)より算出した閾値と、各ケースにおける最小の実験値を比較すると、B-AC-21～40 について、2倍以上の G_f が得られていることがわかる。以上から、バサルト繊維シートとアラミド繊維シートを用いた場合の付着強さは同程度であり、既存の設計式から算出された閾値より大きく得られることが実験的に明確となった。

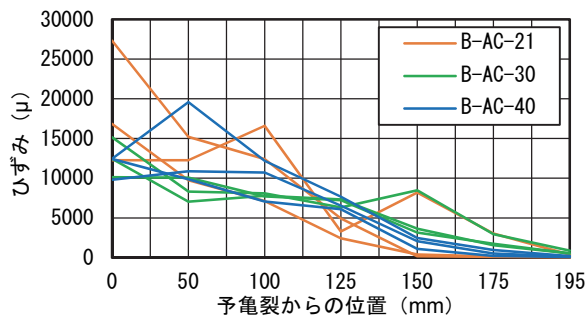


図-6 連続繊維シートに生じるひずみ分布
(B-AC-21, B-AC-30, B-AC-40)

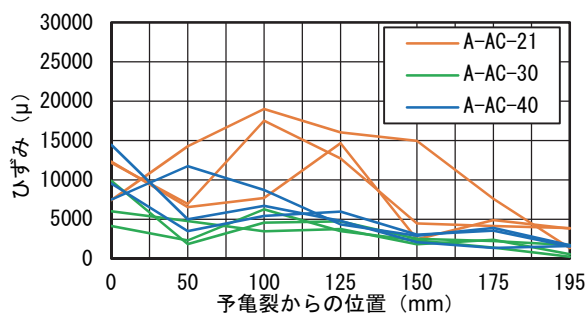


図-7 連続繊維シートに生じるひずみ分布
(A-AC-21, A-AC-30, A-AC-40)

(2) 連続繊維シートの剥離直前における最大ひずみに 関する検討 (繊維の種類を考慮)

連続繊維シートに生じたひずみ分布を図-6 および図-7 に示す。予亀裂から剥離が進展した個所までは同程度で大きなひずみが生じている。ここでは、付着強さに関する重要な指標の一つとして、剥離直前の連続繊維シートの最大ひずみ(ϵ_e)について検討する。土木学会 コンクリートライブラリー101²⁾ および CNR-DT200⁴⁾ に示される ϵ_e の評価式はそれぞれ(4)式, (5)式の通りである。

$$\epsilon_e = \frac{\sqrt{2G_f E_f}}{E_f} t_f \quad (4)$$

$$\epsilon_e = \frac{1}{\gamma_{fd} \sqrt{\gamma_c}} k_{cr} \sqrt{\frac{2G_f E_f}{t_f}} \quad (5)$$

ここで、 γ_{fd} : FRP の安全係数(=1.2), γ_c : コンクリートの安全係数(=1.6), k_{cr} : 剥離モードに関する係数(モード I の場合, $k_{cr}=1$)である。また、 G_f には各実験ケースにおける3体の結果の平均値を用いた。なお、(5)式は(4)式に安全率を考慮したものである。

最大ひずみの実験値およびこれらの式より算定された値を図-8 に示す。図に示す実験値は予亀裂から 0mm 位置における値の平均値である。(4)式による算定値は、実験値の 151%~283% (B-AC), 122%~174% (A-AC),

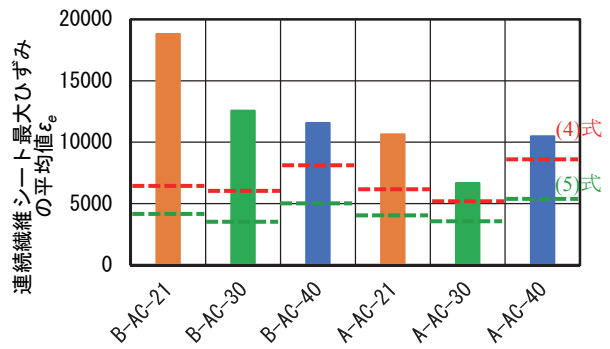


図-8 連続繊維シートの最大ひずみ
(繊維の種類を考慮)

(5)式による算定値は、実験値の 229%~430% (B-AC), 185%~265% (A-AC) であり、連続繊維シートの種類の違いについて大きな差異は見受けられない。よって、連続繊維シートの剥離直前における最大ひずみは、既存の評価式で評価できることが実験的に示唆された。

(3) 有効付着長に関する検討 (繊維の種類を考慮)

前出の図-6 および図-7 を参照して、予亀裂から既に剥離が進展した個所では同程度の卓越したひずみが生じているが、そこから急激にひずみが小さくなっている。吉澤らの研究⁹⁾において、剥離端から剥離箇所のひずみの 3%程度のひずみを伝達している箇所までの距離を有効付着長 (L_e) と呼称しており、連続繊維シートの接着補強を行う際の定着長さを定める際に重要な指標となる。なお、これらの図から L_e を読み取ると、連続繊維シートの種類およびコンクリート圧縮強度に関わらず、 L_e は 50~150mm 程度であった。

一方、Teng and Chen⁷⁾および Wu and Niu⁸⁾の研究に示されている L_e の評価式は、(6)式, (7)式のように表されている。

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (6)$$

$$L_e = \frac{1.3 \sqrt{E_f t_f}}{f'_c{}^{0.095}} \quad (7)$$

ここで、 f'_c にはコンクリートの設計基準強度を用いた。 L_e の閾値は、(6)式より B-AC 供試体で 79mm~93mm, A-AC 供試体で 85mm~100mm であり、(7)式より B-AC 供試体で 182mm~194mm, A-AC 供試体で 196mm~209mm である。以上から、連続繊維シートの種類に関わらず、(6)式から算出される閾値は実験値の平均値に近い値を、(7)式から算出される閾値は、実験値の最大値に近い値をとることが実験的に明らかになった。

3.2 接着材の種類に関する検討

(1) 付着強さに関する検討 (接着材の種類を考慮)

B-EP-40 試験におけるバサルト繊維シート剥離後の状



図-9 剥離の様子 (B-EP-40)

況写真を図-9に示す。剥離は予亀裂近傍からシート端部に向かって進展した。剥離後、いずれの供試体においても、シート表面にコンクリート表層が5mm程度の厚みで付着していた。また、コンクリート強度が比較的高い40N/mm²供試体では、予亀裂から20mm～50mm程度のコンクリートが40mm程度深さから斜めに滑っており、予亀裂近傍にせん断応力が集中したことがわかる。前出の土木学会編、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²⁾に掲載されている、前出の式(1)から求めた剥離破壊エネルギー G_f を用いて付着強さを評価する。実験における最大荷重を用いて G_f を算出した結果をコンクリートの圧縮強度ごとに図-10～図-12に示す。また、前出の(2)式, (3)式より算出された閾値についてもこれらの図に示す。

B-AC-21～40とB-EP-21～40における G_f の実験値を比較すると、コンクリートの圧縮強度が21N/mm²および40N/mm²のケースでは、バサルト繊維シートとアラミド繊維のケースではほぼ同様の値となっている。しかし、B-EP-30のケースでは極端に大きな G_f となっている。実験後の剥離面の観察で、これらのケースでのみ、比較的大粒の粗骨材が引き抜かれたように剥離している様子が確認された。よって、粗骨材の噛み合わせが生じ、大きな G_f となったと考えられる。一方、式(2), 式(3)より算出した閾値と、各ケースにおける最小の実験値を比較すると、いずれのケースでも2倍以上の G_f が得られていることがわかる。以上から、エポキシ樹脂およびアクリル樹脂を用いた場合のいずれにおいても、付着強さに関する既存の設計式より得られる閾値より大きな値となることが実験的に明確となった。

(2) 連続繊維シートの剥離直前における最大ひずみに関する検討 (接着材の種類を考慮)

B-EP 供試体について、連続繊維シートに生じたひずみ分布を図-13に示す。予亀裂から既に剥離が進展した個所では同程度の卓越したひずみが生じている。ここでは、付着強さに関する重要な指標の一つとして、剥離直前に

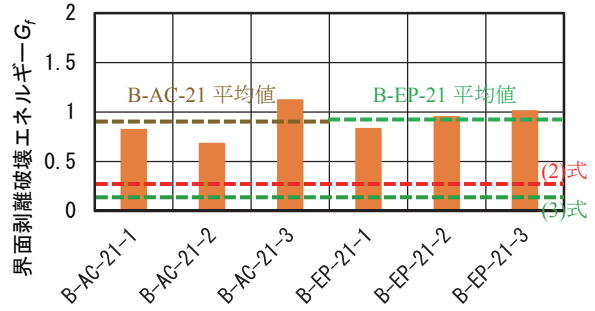


図-10 G_f の比較 (コンクリート圧縮強度 21N/mm²)

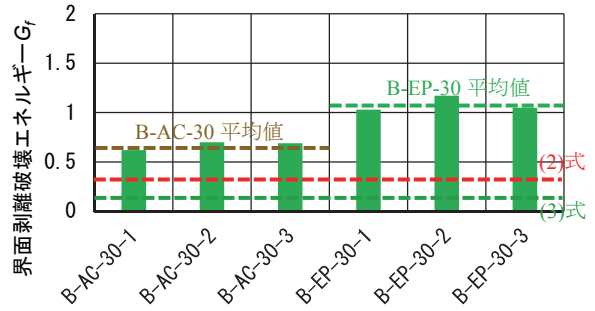


図-11 G_f の比較 (コンクリート圧縮強度 30N/mm²)

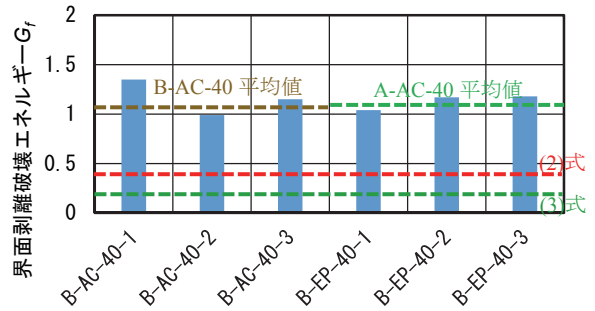


図-12 G_f の比較 (コンクリート圧縮強度 40N/mm²)

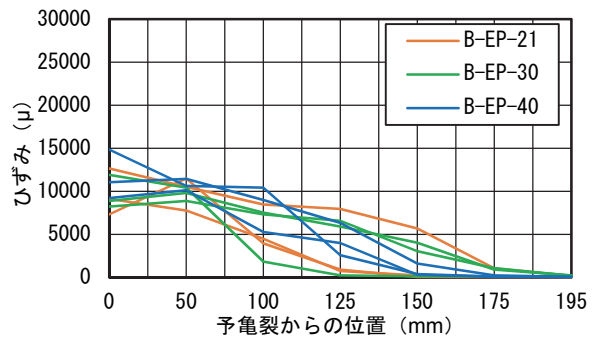


図-13 連続繊維シートに生じるひずみ分布 (B-EP-21, B-EP-30, B-EP-40)

における連続繊維シートの最大ひずみについて検討する。最大ひずみの実験値および前出の(4)式, (5)式より算定さ

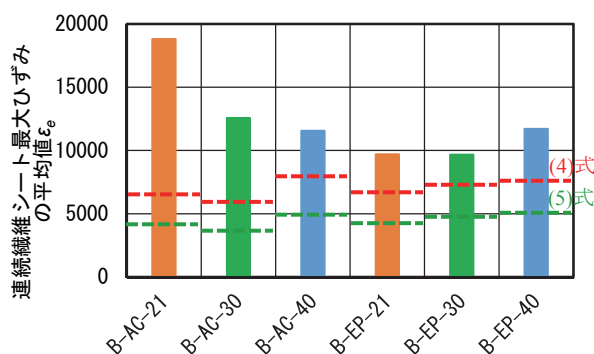


図-14 連続繊維シートの最大ひずみ
(接着材の種類を考慮)

れた閾値を図-14に示す。図に示す実験値は予亀裂から0mm位置における値の平均値である。(4)式による閾値は実験値の151%~283%(B-AC), 131%~155%(B-EP), (5)式による閾値は実験値の229%~430%(B-AC), 199%~235%(B-EP)であり, 接着材の違いについて大きな差異は見受けられない。よって, 連続繊維シートの剥離直前における最大ひずみは, エポキシ樹脂およびアクリル樹脂を用いた場合のいずれにおいても同程度の実験値が得られ, 既存の評価式より得られる閾値より大きな値となることが実験的に明確となった。

(3) 有効付着長に関する検討 (接着材の種類を考慮)

前出の図-13から L_e を読み取ると, 接着材の種類およびコンクリート圧縮強度に関わらず, L_e は50~150mm程度であった。また, 前出の(6)式, (7)式から算出される L_e の閾値は, 接着材の種類に関わらず(6)式より79mm~93mm, (7)式より182mm~194mmであった。以上から, エポキシ樹脂およびアクリル樹脂を用いた場合のいずれにおいても, (6)式の算定値は実験値の平均値に近い値を, (7)式の算定値は実験値の最大値に近い値をそれぞれ取ることが実験的に明らかになった。

4. まとめ

本研究では, バサルト繊維シートの付着強さを実験的に検討し, 既存の評価式の適用性を検証した。本研究の実施により得られた主な成果を以下に纏める。

- (1) 連続繊維シートとコンクリートの付着強さを表す重要な指標である, 界面剥離破壊エネルギーおよび剥離直前におけるシートの最大ひずみについて評価した結果, バサルト繊維シートおよびアラミド繊維シートを用いた場合, そしてエポキシ樹脂およびアクリル樹脂を用いた場合のいずれにおいても同程度の実験値が得られ, 既存の評価式より得られる閾値より大きな値となることが実験的に明確となった。
- (2) 連続繊維シートとコンクリートの接着界面における,

せん断応力の伝達範囲を表す重要な指標である有効付着長について評価した結果, バサルト繊維シートおよびアラミド繊維シートを用いた場合, そしてエポキシ樹脂およびアクリル樹脂を用いた場合のいずれにおいても, Teng and Chenの研究における評価式による閾値は実験値の平均値に近い値となること, およびWu and Niuによる研究の評価式より得られる閾値は実験値の最大値に近い値となることが実験的に明らかになった。

謝辞

本研究の一部は, 平成24年度に私立大学戦略的基盤研究形成支援事業として採択, 設置された「名城大学 自然災害リスク軽減研究センター (代表者: 小高 猛司)」と, JSPS 科研費 24760352 の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- (1) (社)日本コンクリート工学協会: 連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(II), 1998.5
- (2) (社)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, 2000.7
- (3) X.Z. Lu, J.G. Teng, L.P. Ye, J.J. Jiang: Bond slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete, Engineering Structures, Vol.27, No.6, pp.938-950, Apr.2005
- (4) National Research Council (NRC): Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures, CNR-DT200, Rome, Jul.2004
- (5) Teng, J.G., Smith, S.T., Yao, J., and Chen, J.F.: Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs, Constr. Build. Mater., Vol.17, iss.6, pp.447-462, Sep./Oct.2003
- (6) The International Federation for Structural Concrete (fib): Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, Bulletin 14, Oct. 2001
- (7) Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L.: FRP-strengthened RC structures, Wiley, West Sussex, England, Nov.2001
- (8) Wu, Z.S., and Niu, H.D.: Prediction of crack-induced debonding failure in R/C structures flexurally strengthened with externally bonded FRP composites, JSCE J. Materials, Concrete Structures, and Pavements, Vol.63, No.4, pp.620-639, Dec.2007
- (9) 吉澤弘之, 呉 智深, 袁 鴻, 金久保利之: 連続繊維シートとコンクリートの付着挙動に関する検討, 土木学会論文集, Vol.662, V-49, pp.105-119, 2000.1