FRPグリッドとコンクリート接着界面の付着強さに関する実験的研究

名城大学　学生会員　金光男　名城大学　正会員　岩下健太郎

１．はじめに

FRP格子筋（以下，FRPグリッドと呼称）を吹付型のポリマーセメントによりコンクリート表面に固定する増厚巻き立て工法は，トンネル覆工コンクリートや橋脚, 床版等の補修や補強に広く用いられている。FRPグリッドに限らず，FRPをコンクリートの補修，補強材として用いた際の破壊モードとしては，ほとんどの場合にひび割れ近傍で励起されたせん断応力に起因するFRPの剥離破壊が想定されるため，FRPとコンクリートの接着界面の剥離挙動を対象とした研究が盛んに実施されている一例として[1] 他多数。しかし，そのほとんどが，施工実績が多く優れた引張特性を有する高強度タイプの炭素繊維を用いたFRPグリッド（以下，CFRPグリッド）を用いた場合を対象としたものであり，高伸度繊維材を用いたグリッドの付着挙動に関する検討はあまり実施されていないようである。本研究では，低価格で2.5%を超える伸度を有しながら, ある程度の引張強度や弾性率を有しており，最近，中国や欧米で盛んに研究が進められている玄武岩（バサルト）繊維を用いたFRP（以下，BFRPと呼称）のグリッドに着目して，高伸度繊維を用いたFRPグリッドのコンクリートに対する付着挙動を実験的に検討し，付着強さに関する既往の評価式の適用性を検証した。

２．BFRPグリッドの引張特性

BFRP グリッドはバサルト繊維を格子状に設置し，繊維含有率（V_f）が20%となるように常温硬化型のビニルエステル樹脂で格子状に成形したものであり，10本の引張試験を行ったところ，引張強度の平均値は$2309N/mm^2$（標準偏差は 77 N/mm^2），引張弾性率は$91kN/mm^2$程度であった。ここで，過去の研究[2]で実施した繊維目付量$365g/m^2$のBFRPシートの引張試験においても引張強度の平均値は$2392N/mm^2$，引張弾性率は$91kN/mm^2$と同程度の値が得られていることから，本研究で用いたBFRPグリッドはある程度安定的に製作されていることが示された。

３．FRPグリッドの付着試験方法

３・１　試験体の製作　鋼ボルトを事前に埋め込んだ直方体のコンクリート塊2体を，**図1**に示すように付け合せる形で配置し，ポリマーセメントモルタルを用いて2体にまたがる形にFRPグリッドを接着した試験体を作製した．FRPグリッドの種類としてBFRPグリッドとCFRPグリッドについて検討した。試験体の作製手順としては, ダイヤモンドサンダーで表面を削り，エポキシプライマーを塗布する方法で表面処理を行い，12時間経過後に**表 1**に示す配合で練り混ぜたポリマーセメントモルタルでFRPグリッドを接着した.

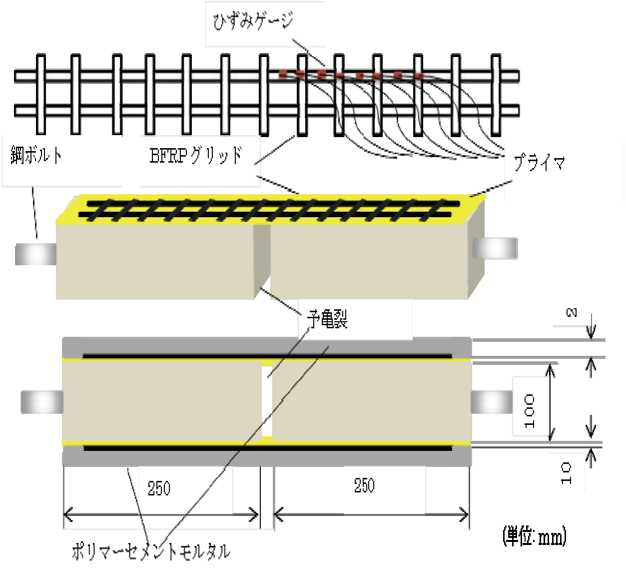

図１　両引きせん断試験体の詳細寸法

表１ ポリマーセメントモルタルの配合比

<table>
<tr><td rowspan="8">コンクリート</td><td rowspan="5">水セメント比 = 49.5</td><td>セメント</td><td>322 kg/m^3</td></tr>
<tr><td>水</td><td>159 kg/m^3</td></tr>
<tr><td>細骨材量</td><td>755 kg/m^3</td></tr>
<tr><td>粗骨材量</td><td>1043 kg/m^3</td></tr>
<tr><td>混合剤量</td><td>3.220 kg/m^3</td></tr>
<tr><td colspan="2">スランプ</td><td>80 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">空気量</td><td>4.5 %</td></tr>
<tr><td colspan="2">圧縮強度</td><td>30 N/mm^2</td></tr>
<tr><td rowspan="3">ポリマーセメントモルタル</td><td colspan="2">水 (W) / セメント (C)</td><td>50 %</td></tr>
<tr><td colspan="2">砂 (S) / セメント (C)</td><td>300 %</td></tr>
<tr><td colspan="2">ポリマー(P)/セメント(C)</td><td>40 %</td></tr>
</table>

なお，BFRPグリッドは2枚，CFRPグリッドは1枚を接着した。これは，引張弾性率×断面積を補強量の指標として考慮し, これが同程度となるように枚数を設定したことによる。各ケースで3体の実験を行った。ポリマーセメントモルタルの打設後，14 日間の気中養生を行ったうえで引張試験を実施した。

３・２　試験手順　作製した試験体両端の鋼ボルトを引っ張ることで，予亀裂近傍の FRP グリッドとコンクリートの接着界面に卓越したせん断応力を生じさせ，強制剥離させることでFRPグリッドの付着挙動を検討する。試験は 1mm/min の変位制御で行った。接着界面の付着強度を超えるとコンクリート塊の付け合わせ部からシート端部に向かって剥離が進展する．π 型変位計を予亀裂に跨るように設置し，コンクリートの弾性変形は無視して，予亀裂幅の拡大量を変位として評価した．また，FRP グリッド表面に事前にひずみゲージを設置して，FRP グリッドに生じるひずみ分布を測定した．ここで，ひずみゲージは FRP グリッドの長手方向 15mm 間隔で連続的に設置した．

４．実験結果と考察

荷重と変位の関係（**図 2**）において，荷重をかけ始めてからしばらく変位がほとんど増加していないのは，FRP グリッドを接着しているポリマーセメントモルタルに 10mm 程度の厚みがあり，拘束力が働いたためと考えられる。ポリマーセメントが予亀裂近傍で破断すると，予亀裂ではグリッドのみとなるため，BFRP グリッドの引張弾性率は CFRP グリッドのそれより小さく，より変位が大きくなっていると考えられる。さらに荷重増加につれて剥離が接着端部方向に進展してグラフの傾きが小さくなっていき，あるところまで剥離が進展すると，FRP グリッドの全面が剥離して荷重がゼロになった。

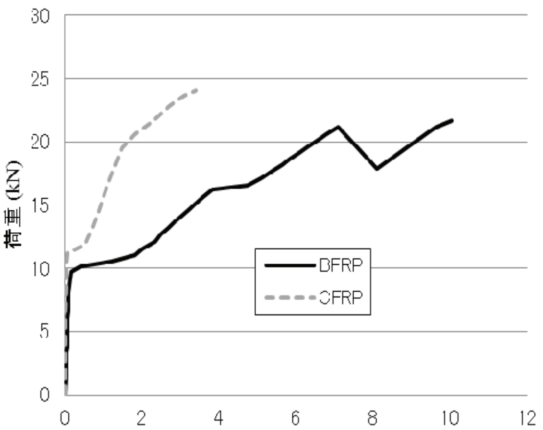

図 2　荷重と変位の関係

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[3]に示されている下記の式（1）,(2) から求められる剥離破壊エネルギーG_f および最大せん断応力 τ_y を付着強さの指標として，各種 FRP グリッドの付着強さの評価を行う．

$$G_f = \frac{P^2_{\max}}{8b^2 E_f t} \qquad (1)$$

$$\tau_y = \Delta\varepsilon_f E_F A_F / s_g / b \qquad (2)$$

ここで， E_f : FRP グリッドの引張弾性係数(N/mm^2), b : FRP シートの幅(mm)，P_{max} : 最大荷重(N)，t : FRP シートの厚さ(mm)，$\Delta\varepsilon_f$ ：最大荷重時のひずみ増加区間での隣り合うゲージひずみ値の差，E_f : FRP シートの引張弾性係数(N/mm^2)，A_f : FRP シートの断面積(mm^2)，s_g : ひずみゲージの貼り付け間隔(mm)，b : FRP シートの幅(mm) である。なお，上記式は FRP シートに関する式のため，FRP グリッドをシート形状に換算する必要があるが，過去の研究[2]ではこの換算により FRP グリッドの付着強さをうまく評価できることが示されている。FRP シートの幅は FRP グリッドの格子間隔 50mm とし，FRP シートの厚さは断面積をシート換算幅で除したものとした。算定の結果として,付着強さに関する指標 G_f の平均値について，CFRP グリッドを用いたケースで G_f が 0.687（N/mm）で，BFRP グリッドを用いたケースで G_f が 0.810（N/mm）であり，両者でほぼ同程度の値が得られた。また，最大せん断応力 τ_y は最大荷重時に 14.57 (N/mm^2)であった．（**図 3**）

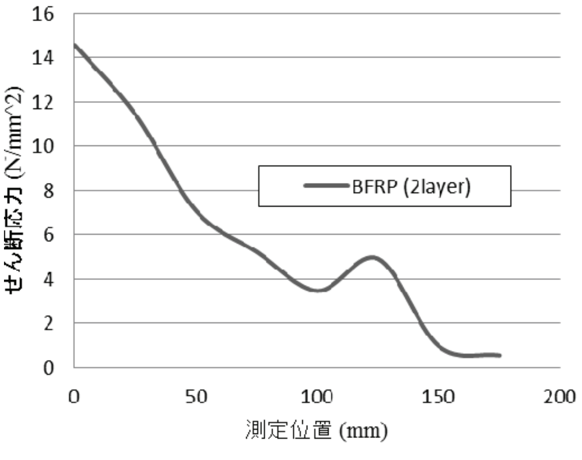

図 3　BFRP に生じるせん断応力分布

５．まとめ

BFRP グリッドと CFRP グリッドを用いた場合の付着強さは同程度であることが実験的に示された。また，このときの最大せん断応力は 14.57 (N/mm^2)であった．

参考文献

1) 根本正幸,川瀬義之,呉智深,岩下健太郎,コンクリート工学協会年次論文集,30/3,1633(2008).
2) 金光男,岩下健太郎,呉智深,清水亮太,榊原和則,第 65 回土木学会年次学術講演会概要集,CS2-017(2010).
3) 土木学会編,コンクリートライブラリ 101(2000)