第Ⅴ部門　　不陸修正材を有する炭素繊維シート補強RCはりの補強性能解析

神戸大学大学院　学生員　○鴨谷　知繁
神戸大学工学部　正会員　森川　英典

1.はじめに：本研究では，炭素繊維シート施工時に用いられる不陸修正材（以下，パテ）に注目し，パテを有するシートとコンクリートの付着試験から導出した付着構成則を用い，2次元FEM解析を用いてシート補強RCはりの補強性能解析を行った．また，付着構成則に不確定性を考慮することで，シート接着界面状態に不確定性を有するシート補強RCはりの補強性能もあわせて評価した．

2.付着試験概要：付着試験供試体は図-1に示すように土木学会「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法（案）」[1]に準拠した．シートは以下の手順で貼付けた．コンクリート表面をディスクサンダーにより研磨し，プライマーを塗布する．プライマーの乾燥後，パテを塗布面積・塗布厚さを制御して塗布し，1週間養生する．その後，シートを貼付け含浸させ脱泡ローラーで脱泡した後，上塗りを施す．その上に離型シートをかぶせ，表面を均一に整え1週間養生させた．プライマーを2回塗布したものについては，1度塗布し，指触乾燥させた後，2回目を塗布した．用いた材料の性質を表-1，表-2，表-3に示す．表-1に示した値はシートに樹脂を含浸硬化させた状態で行った引張試験結果である．表-4に付着試験要因を示す．シート層数は全て1層とした．パラメータとして，プライマー塗布回数（1回，2回），パテ塗布厚さ（1mm，2mm），接着樹脂の弾性率（高弾性率，低弾性率），コンクリート強度（標準強度：26N/mm²，高強度：35N/mm²，低強度：20N/mm²）を考慮した．

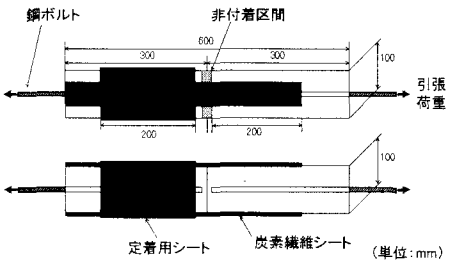

図-1　曲げ載荷試験供試体概要

表-1　炭素繊維シートの性質

接着樹脂の種類	繊維目付 (g/m²)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm²)	引張弾性率 (N/mm²)	破断ひずみ(%)
低弾性率	300	0.167	3.98×10^3	252.7	1.58
高弾性率	300	0.167	4.51×10^3	252.6	1.82

表-2　パテの性質

圧縮強さ(N/mm²)	圧縮弾性率(N/mm²)
71.9	5.18×10^3

表-3　接着樹脂の性質

接着樹脂の種類	圧縮強さ (N/mm²)	圧縮弾性率 (N/mm²)	引張強さ (N/mm²)	引張弾性率 (N/mm²)
高弾性率	92.8	3.20×10^3	50.9	3.65×10^3
低弾性率	-	1.70×10^3	-	-

表-4　付着試験要因

供試体名	プライマー塗布回数	パテ塗布厚さ(mm)	接着樹脂弾性率	コンクリート強度
F1	1	1	高	標準
F2	2	1	高	標準
F3	1	2	高	標準
F4	1	1	高	低
F5	1	1	高	高
F6	1	1	低	標準

3.付着試験結果と付着構成則の導出：図-2に付着試験から得られた付着力-相対変位関係を示す．シートとパテは一体となってコンクリートを引きちぎってはく離したことから，シートの付着応力を，次式を用いて算出した．

$$\tau(x)=(E_f\cdot t_f+E_p\cdot t_p)\cdot\frac{d\varepsilon_{cf}(x)}{dx}$$

$\tau(x)$　：付着応力
$\varepsilon_{cf}(x)$：シートのひずみ
E_f，E_p：シートおよびパテの弾性係数
t_f，t_p：シートおよびパテの塗布厚さ

付着力は付着応力分布を積分し，シートの幅を乗じることにより算出した．また相対変位は，シートとコンクリートとの剛性の差を考慮して，コンクリートを剛体と仮定し，シートひずみ分布をシート端部から中央まで積分することにより算出した．次にシート付着構成則の導出法を示す．図-2の付着力-相対変位曲線を付着力および相対変位が最大となる地点を要素としてのはく離破壊とし，曲線を2つの勾配を有するバイリニア型でモデル化する．これをシート接着面積で除すことで平均化し，付着応力-相対変位関係を導出し付着構成則とした．その一覧を図-3に示す．

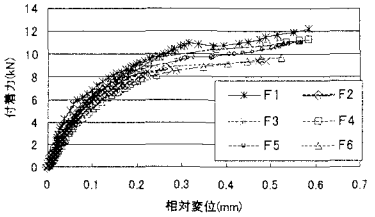

図-2　付着力-相対変位（試験結果）

Tomoshige　KAMOTANI，Hidenori　MORIKAWA

4. 補強性能解析：図-5 に解析モデルを示す．解析モデルは比較対象としたシート補強RCはり曲げ載荷試験供試体[2]を想定したものである．解析モデルは対称供試体であるため，片側のみをモデル化して，スパン中央断面を軸方向に拘束した．はり下面に貼り付けたシート要素は軸力のみを伝える棒要素でモデル化し，コンクリート要素と繊維シート要素との接触節点において，図-3 の付着構成則を持つバネ要素を用いた．表-5 に F1 から F6 のそれぞれのシート接着界面状態を有するシート補強RCはりの解析結果を示す．いずれも本解析手法によって載荷試験結果を概ね再現している．ただし，シートはく離時中央たわみにおいては，必ずしも載荷試験結果を精度良く再現できているとは言えない．この原因として載荷試験においてシートはく離時たわみの測定誤差が考えられる．

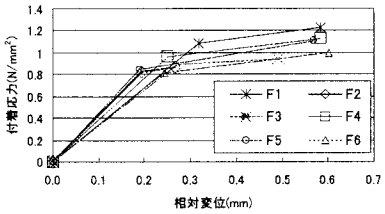

図-3　付着構成則（付着応力-相対変位）

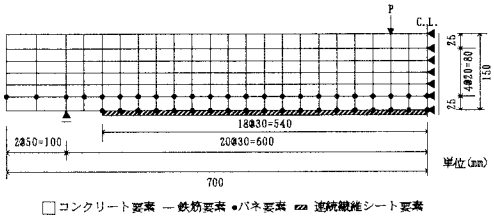

図-4　解析モデル

表-5　解析結果一覧

供試体名		引張鉄筋降伏荷重(kN)	部材降伏荷重(kN)	最大荷重(kN)	無補強に対する耐力比	シートはく離時の荷重(kN)	シートはく離時の中央たわみ
RC1	①実験値	41.7	43.6	52.1	1.28	51.5	12.2
	②解析値	42.1	43.0	50.7	1.25	50.7	12.5
	②/①	1.01	0.99	0.97	0.98	0.98	1.02
RC2	①実験値	43.1	44.1	48.5	1.19	48.1	8.8
	②解析値	42.2	43.1	47.4	1.16	47.4	8.4
	②/①	0.98	0.98	0.98	0.97	0.99	0.96
RC3	①実験値	43.1	44.1	48.5	1.19	48.1	8.8
	②解析値	42.2	43.1	47.4	1.16	47.4	8.4
	②/①	0.98	0.98	0.98	0.97	0.99	0.96
RC4	①実験値	42.2	44.1	49.8	1.23	49.7	10.7
	②解析値	40.1	41.2	48.5	1.19	48.5	12.5
	②/①	0.95	0.93	0.97	0.97	0.98	1.17
RC5	①実験値	41.7	44.6	54.9	1.34	54.2	12.4
	②解析値	46.5	47.6	54.5	1.36	54.5	10.8
	②/①	1.11	1.07	0.99	1.01	1.01	0.87
RC6	①実験値	39.7	41.7	49.4	1.22	48.5	11.2
	②解析値	42.5	42.9	49.4	1.21	49.4	9.9
	②/①	1.07	1.03	1.00	0.99	1.02	0.89

5. 接着界面の不確定性を考慮した補強性能解析：モンテカルロシミュレーションによりシート接着界面状態に不確定性を有するシート補強 RC はりの補強性能解析を行った．付着構成則への不確定性の導入方法を示す．図-5 に示すように付着構成則の折れ曲がる点の相対変位を U1，端点の相対変位を U2，折れ曲がるまでの傾きを $\theta 1$，折れ曲がった後の傾き $\theta 2$ をとして，それぞれを F1 の接着界面を有する場合（RC1）を平均値として変動係数 20％の正規分布と仮定した．$\theta 1$ と U1 に関しては付着試験結果において相関が見られたので相関係数-0.831 を与えて考慮した．試行回数は収束性を確認して 300 回とし，U1<0，U2>U1，コンクリート圧縮破壊先行型のものを除いた．図-6 にシートはく離開始時および最大荷重時の荷重-中央たわみ関係を示す．シートはく離時および最大荷重時ともに荷重-中央たわみ関係において強い正の相関が見られる．またシートはく離開始時，最大荷重時それぞれの分布の傾きを比較すると，最大荷重時の傾きが明らかに小さい．これは表-6 に示すように最大荷重はシートはく離開始時からあまり変化しないのに対し，最大中央たわみはシートはく離開始以降の挙動に支配され，大きくばらついたからだと考えられる．

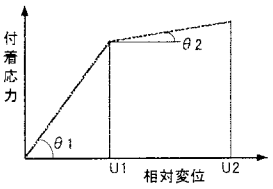

図-5　不確定性を考慮した付着構成則

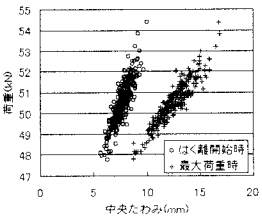

図-6　荷重-中央たわみ関係

表-6　不確定性を考慮した解析結果

		平均値	変動係数
シートはく離開始時	荷重(kN)	50.50	2.02(%)
	中央たわみ(mm)	7.72	9.72(%)
最大荷重時	荷重(kN)	50.52	1.98(%)
	中央たわみ(mm)	12.47	11.96(%)

6. 結論：(1)本解析手法によって．パテを有するシート補強RC部材の補強性能を精度良く評価できることを確認した．

(2)シート接着界面に不確定性を有するシート補強 RC はりの補強性能解析により，シートはく離時および最大荷重時ともに荷重-中央たわみ関係において強い正の相関が見られること，最大中央たわみが不確定性の影響を大きく受けることを確認した．

参考文献 1) 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，pp. 73-82，2000.7.

2) 鴨谷，森川ら：不陸修整材を有する炭素繊維シート補強RC部材の付着特性と補強性能の評価，平成14年度関西支部年次学術講演会講演概要，V-14—1-2，2002.5.