

高温時におけるポリウレア樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法の付着特性（２）
－解析的検討－

鹿島建設(株) 正会員 ○新井 崇裕, 山野辺 慎一
新日鉄住金マテリアルズ(株) 正会員 荒添 正棋, 小林 朗
北海道大学大学院 正会員 佐藤 靖彦

1. はじめに

連続繊維シートとコンクリート構造物との間に柔軟性のある樹脂を介し、コンクリートと連続繊維シートとの付着性能を向上させる工法が提案されている。筆者らは、温度依存性が小さく一般的に用いられるエポキシ系の不陸修正材よりも 2 オーダー程度小さいヤング係数（70N/mm²程度）と 300%以上の伸び性能を持つポリウレア樹脂を変形層に用いその有効性を確認してきた。今回、煙突構造物の補強を想定して高温環境下における有効性を検討する目的で実験的検討を行い、（１）で報告した。本報では、続報として付着特性の定式化を目的に実験における付着応力－すべり関係を整理し非線形 FEM 解析による定量化を試みた結果について報告する。

2. 解析概要

2.1 解析ケース・モデル

解析ケースを表－１に示す。解析モデルは、図－１に示すように試験体を忠実に再現したものとした。主要構成要素であるコンクリートと炭素繊維シートはソリッド要素で、コンクリートと炭素繊維シートの界面は、図－２に示すように法線方向剛性とせん断剛性を評価できるものを用いた。解析コードは、DIANA9.4.4 を用いた。

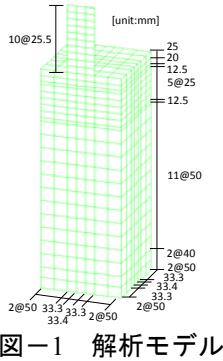
表－１ 解析ケース

case	ポリウレア樹脂層	環境温度 [°C]
1	無	23
2	有	23
3		50
4		70

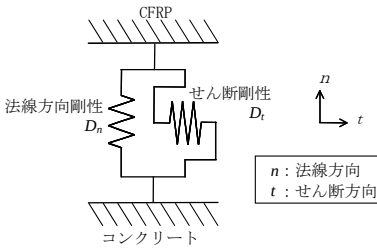
2.2 材料の構成則

(1) コンクリート

コンクリートの材料構成則は、図－３(a)に示すように、圧縮軟化特性には圧縮破壊エネルギーに基づいて定式化される Feenstra による放物線モデルを、引張軟化特性には引張破壊エネルギー G_f を考慮した Hordijk モデルを用いた。材料特性値は、圧縮強度 32.0N/mm²、圧縮破壊エネルギー 49.8N/mm、引張強度 2.32N/mm²、引張破壊エネルギー 0.0862N/mm を用いた。



図－１ 解析モデル



図－２ 界面要素

(2) 炭素繊維シート

炭素繊維シートの材料構成則は、図－３(b)に示すように、Brittl 型を用いた。材料特性は、case1 は、引張強度 3,890N/mm²、ヤング係数 249kN/mm²、case2～4 は、引張強度 4,360N/mm²、ヤング係数 269kN/mm² を用いた。

(3) 界面要素

界面要素の材料構成則のうち、せん断剛性は付着応力－すべり関係を用いるものとし、図－３(c)に示すように、バイリニア型を用いた。材料特性値となる τ_u 、 δ_e 、 δ_u は、張らの研究¹⁾を参考にして、付着強度実験より算定した。ここで、算定方法を概説すると、まず、炭素繊維シートのひずみ分布から、ひずみゲージの値が無付着区間と同じ値になった点を特定し、有効付着長とした。次に、ひずみの増分にヤング係数と炭素繊維シートの設計厚さ（0.333mm）を用いて付着応力を、また有効付着長間における各々のひずみ値に長さを乗じたものを積算することによりすべり量をそれぞれ算定した。算定結果を表－２に示す（実験は各ケースで 3 体ずつ実施したが、解析には得られた算定値の平均値を用いた）。法線方向剛性は、 $1 \times 10^6 \text{N/mm}^3$ とした。

キーワード 炭素繊維シート, ポリウレア樹脂, 付着特性, 高温環境下, FEM 解析, 付着応力－すべり関係
連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設株式会社 TEL 042-489-6706

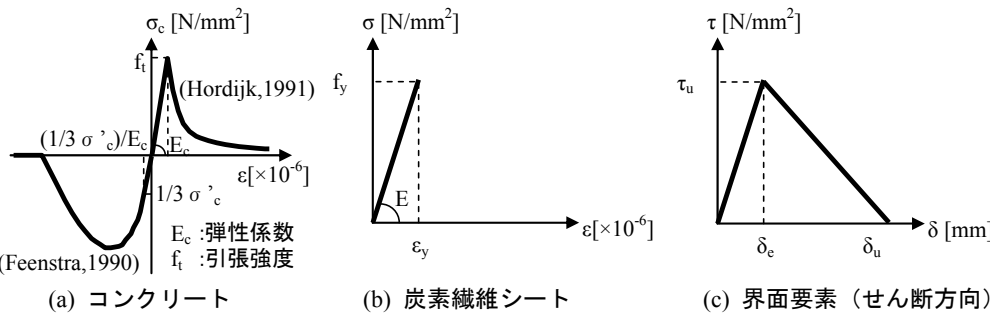


図-3 材料構成則

表-2 付着強度実験における τ_u , δ_e , δ_u

case	τ_u [N/mm ²]	δ_e [mm]	δ_u [mm]
1	2.27	0.05	0.39
2	3.01	1.75	3.72
3	3.15	2.34	4.25
4	5.05	0.89	1.25

3. 解析結果

3.1 解析ケース・モデル

荷重-変位関係について、各ケースにおける代表的な実験結果と解析結果の比較を図-4に示す。荷重-変位関係は、比較的よく再現ができているものと考えられる。特に case3 は、良好な一致が見られた。

3.2 ひずみ分布

ひずみ分布として、同じく各ケースにおける代表的な実験結果と解析結果を比較したものを図-5に示す。図には、解析ステップとして、荷重-変位関係において軟化が始まる前の変位を選定し、case1 については変位が 1mm 時のものを、case2,3 については 6mm 時のものを、また case4 については 3mm 時のものをそれぞれ示している。いずれのケースにおいても、定性的には付着挙動を概ね再現できていると考えられる。

3.3 解析結果一覧

解析結果の一覧として、最大荷重、及び界面剥離破壊エネルギーを表-3に示す。同表には、実験結果、並びに実験結果に対する解析の精度（解析/実験）の結果を併記する。試験体毎の解析精度を見てみると、最大荷重では、0.64~1.12、界面剥離破壊エネルギーの平均値は 0.38~1.26 の解析精度であった。今回は、付着応力-すべり関係を簡易なモデルに置き換えて検討を行ったが、今後はモデルを精緻化するなどして解析精度の向上を図る予定である。

4. まとめ

- (1) 荷重-変位関係、及びひずみ分布より、付着挙動を非線形 FEM 解析により概ね再現できていると考えられる。
- (2) バイリニアにモデル化した付着応力-すべり関係を用いた解析では、解析結果と実験結果との比において、最大荷重では 0.64~1.12、界面剥離破壊エネルギーでは 0.38~1.26 とばらつきが大きかった。解析精度は、付着応力-すべり関係に大きく影響を受けるものであり、今後、付着応力-すべり関係により精緻なモデルを用いるなどして精度の向上を図る必要がある。

参考文献

1) 張 広鋒, 星隈順一, 堺 淳一, 運上茂樹: 炭素繊維シートと鋼板を併用した RC 橋脚の耐震補強工法とその効果, 土木学会論文集, A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.430-445, 2011.8

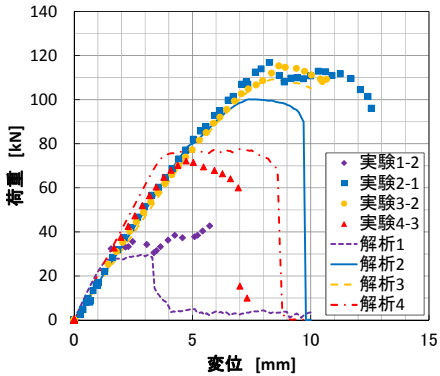


図-4 荷重-変位関係

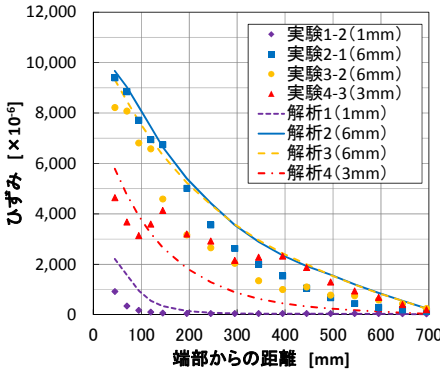


図-5 ひずみ分布

表-3 解析結果一覧

case	最大荷重 [kN]			界面剥離破壊エネルギー [N/mm]		
	実験値	解析値	解析/実験	実験値	解析値	解析/実験
1-1	43.7	29.67	0.68	1.16	0.49	0.43
1-2	44.4		0.67	1.20		0.41
1-3	46.2		0.64	1.30		0.38
平均値	44.8		0.66	1.22		0.41
2-1	117.4	100.23	0.85	7.69	5.63	0.73
2-2	136.1		0.74	10.34		0.54
2-3 ^{*1}	66.1		1.52	2.44		2.31
平均値	126.8		0.80	9.02		0.64
3-1	124.0	109.31	0.88	8.58	6.69	0.78
3-2	115.4		0.95	7.43		0.90
3-3	132.1		0.83	9.74		0.69
平均値	123.8		0.89	8.58		0.79
4-1 ^{*2}	91.1	77.64	0.85	4.63	3.38	0.73
4-2	69.2		1.12	2.67		1.26
4-3	72.2		1.08	2.91		1.16
平均値	70.7		1.10	2.79		1.21

^{*1} 繊維シートを繊維方向に載荷できず不採用とした。
^{*2} 繊維方向の温度のバラツキが大きくなり不採用とした。