

論文 ポリウレア樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法の高温時における付着特性に関する研究

新井 崇裕*1・山野辺 慎一*2・荒添 正棋*3・佐藤 靖彦*4

要旨: コンクリートと炭素繊維シートの界面にポリウレア樹脂層を配置した炭素繊維シート補強工法を煙突構造物などの高温環境下に用いる場合を想定し、常温から高温における付着特性について実験的な検討を行った。その結果、ポリウレア樹脂層を有する場合、常温(23℃)から高温(70℃)までポリウレア樹脂層の無い場合にくらべて顕著に大きな付着耐力を示したが、70℃では常温に比べて付着性能が低下した。次に、付着特性の定式化として、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。その結果、定式化した付着応力-すべり関係を用いて付着挙動を概ね再現できることを確認した。

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

1. はじめに

ポリウレア樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法は、コンクリートと炭素繊維シートの界面に、ヤング係数が小さく伸び能力の高いポリウレア樹脂層を配置することにより、炭素繊維シートの付着特性を大幅に改善した工法である¹⁾。低温環境下や疲労特性についての研究²⁾は進んでいるものの、高温環境下においては、その研究例は少ない。そこで、本研究では、高温環境下の付着特性について実験的な検討を行った。本工法は、付着強度が高いために、土木学会で提案されている連続繊維シートとコンクリートの付着試験方法(案)³⁾(以下、両引き法と称す)では、繊維シートの剥離よりもコンクリートの付着割裂破壊が先行し、付着強度を評価できないため、別の実験方法を用いた。次に、実験結果から得られた付着応力-すべり関係を整理し、これを用いて解析による評価を試みた。

いては、ポリウレア樹脂層が有る場合は付着強度が高く、両引き法では繊維シートの剥離よりもコンクリートの付着割裂破壊が先行し、付着強度を評価できない。このため、本実験ではマッシュなコンクリートブロックを用いた片引き実験方法(以下、片引き法と称す)を用いることとした。この実験方法の適切性を評価するために、ポリウレア樹脂層が無いケースで、それぞれの実験方法を実施した。なお、各々の実験では試験体数は3体とした。

表-1 実験パラメータ

Case	ポリウレア樹脂層	環境温度 [°C]	実験方法
Case1	B-PU-23-O	23	片引き法
Case2	B-PU-50-O	50	
Case3	B-PU-70-O	70	
Case4	B-EP-23-O	23	両引き法(JSCE)
Case5	B-EP-23-J	23	

*1 ポリウレア樹脂層有: スtrand型高強度炭素繊維シート⁴⁾を使用。

*2 ポリウレア樹脂層無: 従来型高強度炭素繊維シート(ドライシート)を使用。

2. 実験的検討

2.1 実験パラメータ

付着強度実験のパラメータを表-1に示す。実験パラメータは、ポリウレア樹脂層の有無、環境温度、及び実験方法の3つとした。ポリウレア樹脂層の有無については、ポリウレア樹脂層が有ることによる付着特性の改善効果について改めて確認する位置づけで設定した。環境温度については、一般環境下として常温(23℃)を、また、高温環境下として50、70℃の2水準を設定した。これは、煙突構造物の環境温度が50℃程度であること、また今回用いたポリウレア樹脂を除く耐熱型樹脂材料のガラス転移点が70℃程度であることによる。実験方法につ

2.2 使用材料

実験に用いた主な使用材料の特性値を表-2に示す。コンクリートは、設計基準強度30N/mm²(実験時の圧縮強度は32.0N/mm²)のものを用いた。含浸接着剤は、施工後の熱キュアが不要な耐熱型のものを用いた。ポリウレア樹脂層有りに用いた不陸修正材(ポリウレア樹脂)は、表に示す通り圧縮弾性率が含浸接着樹脂に比べて2オーダー小さい特性を有するものであり、伸び能力は、約300%である。連続繊維シートは、繊維目付量600g/m²、設計厚さ0.333mmの高強度型炭素繊維シートで、ポリウレア樹脂層有りにはstrand型⁴⁾を、ポリウレア樹脂層無しには従来型のドライシートを用いた。

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 博士(工) (正会員)

*3 新日鉄住金マテリアルズ(株) コンポジット社 (正会員)

*4 北海道大学 北海道大学大学院工学研究院北方圏環境政策工学部門准教授 博士(工) (正会員)

表-2(a) 樹脂材料

試験項目	ポリアレア樹脂層 有		ポリアレア樹脂層 無*1
	含浸接着樹脂	不陸修正材	含浸接着樹脂
引張強度 [N/mm ²]	35	7	43
圧縮強度 [N/mm ²]	74	4	92
圧縮弾性率 [N/mm ²]	2,805	66	2,666

*1 不陸修正材は、ポリアレア樹脂層有の含浸接着樹脂と同じものを使用。

表-2(b) 炭素繊維シート

試験項目	ポリアレア樹脂層 有*1	ポリアレア樹脂層 無*2	試験方法
引張強度 [N/mm ²]	4,360	3,890	JIS A 1191
ヤング係数 [kN/mm ²]	269	249	JIS A 1191

*1 ストランド型高強度炭素繊維シート⁴⁾を使用。

*2 従来型高強度炭素繊維シート(ドライシート)を使用。

* 引張強度、ヤング係数とも23℃の値を記載(50,70℃で大きな差は無し)。

2.3 実験方法

本実験で採用した片引き法を図-1に、両引き法を図-2にそれぞれ示す。

片引き法は、断面が300×300mm、高さが800mmのコンクリートブロックに、幅が100mm、長さが1,060mmの炭素繊維シートを貼付した試験体とし、コンクリートブロックをPC鋼棒で固定して一方方向に片引きで荷重を行うものとした。コンクリートの上端部においては、離型部分として20mmの非接着区間を設け、炭素繊維シートとコンクリートとの付着長さは700mmとした。高温時のケースについては、電熱シートと断熱材(発泡ポリスチレンフォーム)により、温度管理を行った。実験時の計測項目は、荷重、実験装置のストローク(変位)、炭素繊維シート下端における相対変位、炭素繊維シートの

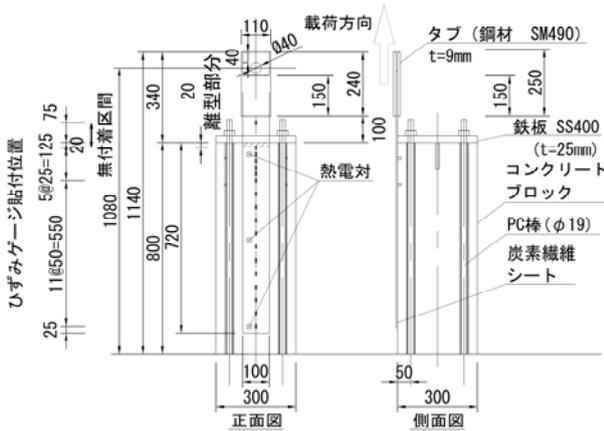


図-1 実験方法(片引き法)

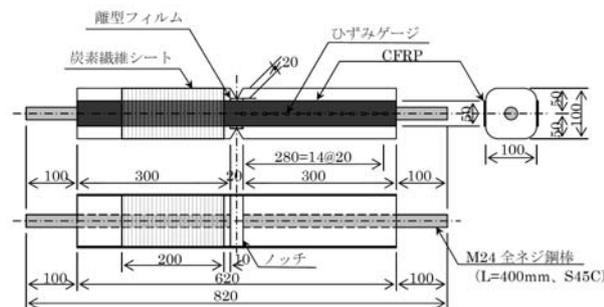


図-2 実験方法(両引き法)

ひずみ、及び環境温度とした。

両引き法は、断面が100×100mm、長さが620mmで中央部分に20mm深さのノッチを有するコンクリートブロックに、幅が50mm、長さが620mmの炭素繊維シートを2面に貼付した試験体とし、断面中心に配置した全ねじ鋼棒(M24, S45C)によって両方向に荷重を行うものとした。一方の端部は、試験体の軸直角方法に100mmの定着用シートを設けた。実験時の計測項目は、荷重、実験装置のストローク(変位)、及び炭素繊維シートのひずみとした。

2.4 実験結果

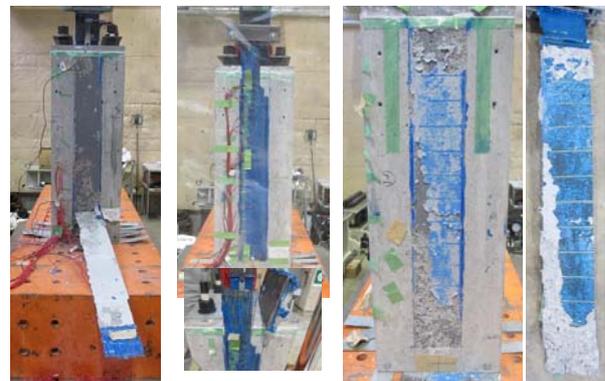
(1) 実験結果一覧

実験結果の一覧として、最大荷重、剥離破壊エネルギー、最大付着応力、有効付着長、及び破壊状況を表-3に示す。ここで、界面剥離破壊エネルギーは以下に示す式(1)により、最大付着応力、有効付着長は、JCI規準集2004連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(II)⁵⁾に従って算定した。代表的な破壊状況として、プライマー面の剥離破壊(Case1-1)、シート破断(Case1-2)、樹脂面の剥離破壊(Case3-1)を写真-1に示す。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{2 \cdot b^2 \cdot E_f \cdot t} \quad (1)$$

ここに、 G_f : 界面剥離破壊エネルギー [N/mm]
 P_{max} : 最大荷重 [N]
 b : 連続繊維シート幅の平均値 [mm]
 E_f : 連続繊維シートのヤング係数 [N/mm²]
 t : 連続繊維シートの厚さ [mm]

実験方法の相違による結果への影響について、Case5に対するCase4の比をとってみると、最大荷重(44.8/48.4=0.93)、界面剥離破壊エネルギー(1.13/1.34=0.84)、最大付着応力(5.00/4.37=1.14)とも同様な結果が得られた。これより、片引き法は、実験方法として妥当性のあるものと考えた。



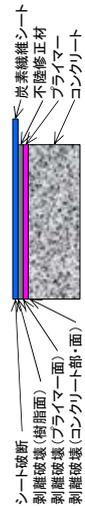
Case1-1 剥離破壊(P面) Case1-2 シート破断 Case3-1 剥離破壊(樹脂面)

写真-1 破壊状況

表-3 実験結果一覧

Case	最大荷重 [kN]		界面剥離破壊エネルギー [N/mm]		最大付着応力 [N/mm ²]		有効付着長 [mm]		破壊状況	
	データ	平均値	データ	平均値	データ	平均値	データ	平均値	破壊形態	破壊面
Case1-1	117.4	126.8	7.72	9.05	3.44	3.33	341.4	382.6	剥離破壊	プライマー面
Case1-2	136.1		10.38		3.21		423.8		シート破断	—
Case1-3*1	66.1		2.45		1.96		337.6		剥離中の破断	—
Case2-1	124.0	123.8	8.61	8.62	2.89	3.96	428.5	334.8	剥離破壊	プライマー面
Case2-2	115.4		7.46		5.33		216.5		剥離中の破断	—
Case2-3	132.1		9.78		3.67		359.5		剥離中の破断	—
Case3-1	91.1	77.5	4.65	3.42	8.12	5.82	112.2	158.8	剥離破壊	樹脂面
Case3-2	69.2		2.68		17.50*2		19.8*2		剥離破壊	樹脂面
Case3-3	72.2		2.92		3.52		205.3		剥離破壊	樹脂面
Case4-1	43.7	44.8	1.08	1.13	5.86	5.00	74.6	91.1	剥離破壊	コンクリート面
Case4-2	44.4		1.10		4.75		93.5		剥離破壊	樹脂面
Case4-3	46.2		1.20		4.39		105.2		剥離破壊	樹脂面
Case5-1	54.2	48.4	1.66	1.34	3.25	4.37	165.7	135.4	剥離破壊	コンクリート部
Case5-2	49.8		1.40		6.35		81.4		剥離破壊	コンクリート部
Case5-3	41.2		0.96		3.50		159.1		剥離破壊	コンクリート部

*1 荷重が適切に行えなかったため不使用(平均値に考慮しない)。*2 ひずみの計測が適切に行えなかったため不使用(平均値に考慮しない)。



(2) 界面剥離破壊エネルギー

剥離破壊エネルギーと環境温度の関係を図-3 に示す。ポリアリア樹脂層を有する場合、常温 (23℃) から高温 (70℃) までポリアリア樹脂層のない場合に比べて界面剥離破壊エネルギーは大きな値を示した。

また、常温 (23℃) に対する 50℃, 70℃の比をとってみると、それぞれ、 $8.62/9.05=0.95$, $3.42/9.05=0.38$ であり、50℃では低下が見られないこと、70℃では、6割程度の低下が見られることがわかった。表-3 に示すように破壊モードは、シートの破断、あるいはプライマー面の剥離破壊から、樹脂面での剥離破壊と相違が見られた。70℃はガラス転移点近傍の温度であり、その領域において付着特性が大きく変化したものと考えられる。

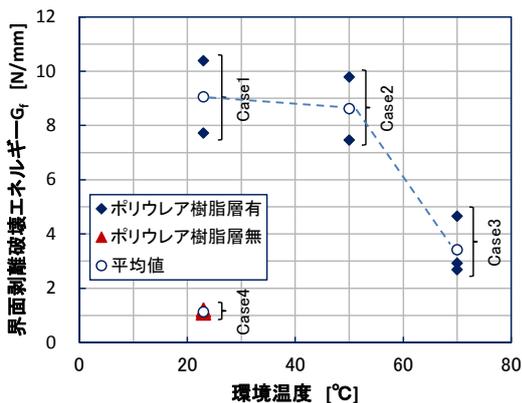


図-3 界面剥離破壊エネルギーと環境温度の関係

(3) 荷重-変位関係

荷重-変位関係を図-4 に示す。これより、Case1 (23℃, ポリアリア樹脂層有) と Case2 (50℃, 有) では大きな差はないこと、Case1,2 と比べて Case3 (70℃, 有), Case4 (23℃, 無) は性状が大きく異なることが見て取れる。

シートの破断により終局に至った Case1-2 は、最大荷重に到達したあと脆性的に破壊しているのに対し、プライマー面や樹脂面での剥離破壊によって終局に至ったその他のケースは、最大荷重に到達した後に若干のじん性のある挙動が見られた。

(4) ひずみ分布

最大荷重時のひずみ分布を図-5 に示す。ポリアリア樹脂層のある Case1,2 は、計測位置の 0~700mm にかけて緩やかにひずみが伝達されており、全長に渡って付着応力を分担していることが見て取れる。また、Case3 についても、主に付着応力を分担しているのは 0~100mm 程度の区間であるが、それでも 700mm の位置までひずみが伝達されていることがわかる。一方、ポリアリア樹脂層の無い Case4 は、前者とは異なり、局部的に付着応力を分担していることがわかる (Case4-1 では、125~400mm, Case4-2,3 では、400~700mm の区間)。これは、ポリアリア樹脂のヤング係数が小さく伸び能力が高い特性によるものと考えられ、この特性によって界面剥離破壊エネルギーが大幅に改善されることが確認できる。

3. FEM 解析による検討

3.1 解析概要

付着特性の定式化を目的として、後述する実験における付着応力-すべり関係を整理し非線形 FEM 解析による評価を行った。解析コードは、DIANA9.4.4 を用いた。解析モデルは、図-6 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-7 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。

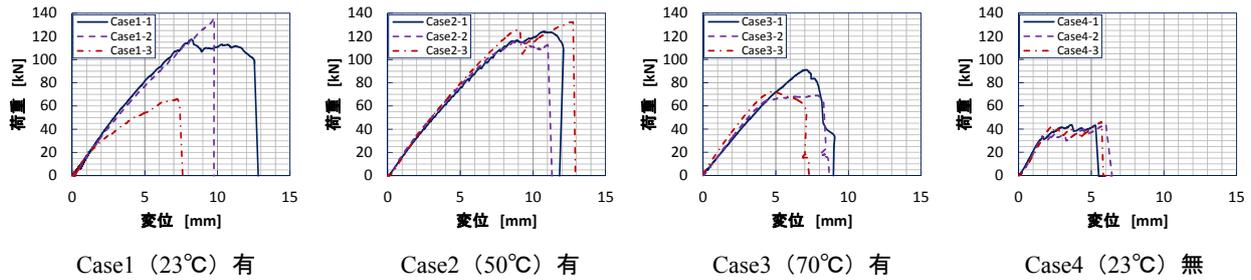


図-4 荷重-変位関係

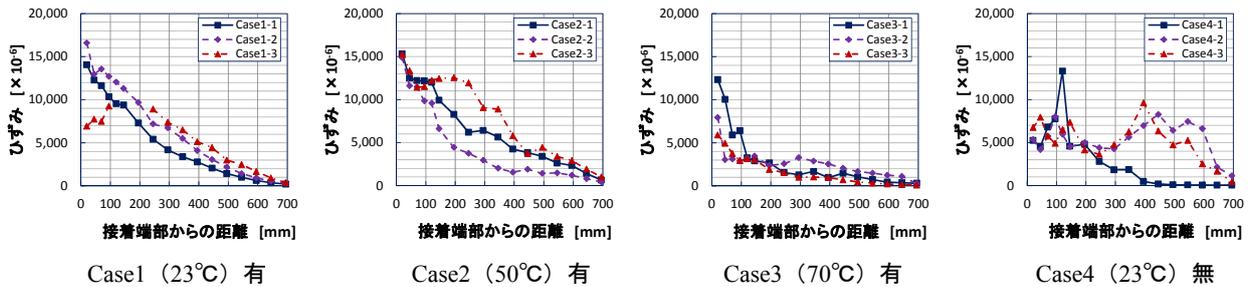


図-5 最大荷重時のひずみ分布

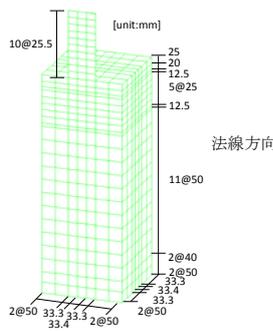


図-6 解析モデル

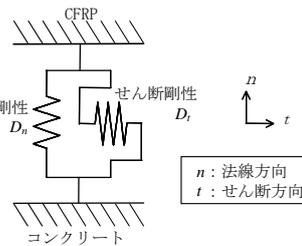


図-7 界面要素

(2) 炭素繊維シート

炭素繊維シートの材料構成則は、図-8(b)に示すように、Brittl型を用いた。材料特性は、Case1~3は、引張強度 $4,360\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 269kN/mm^2 、Case4は、引張強度 $3,890\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 249kN/mm^2 を用いた。

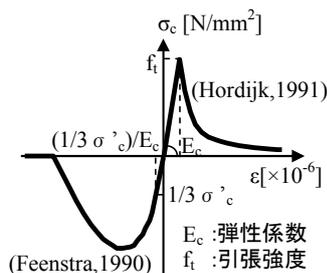
(3) 界面要素

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-8(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⁸⁾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(図-1参照)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に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-4に示す。なお、法線方向剛性は、 $1 \times 10^6\text{N/mm}^3$ とした。

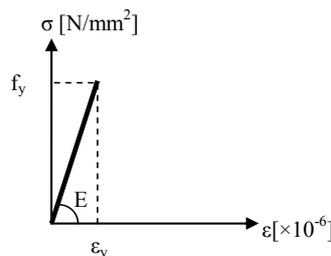
3.2 材料構成則

(1) コンクリート

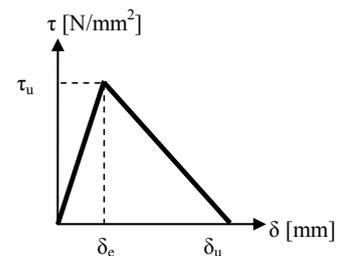
コンクリートの材料構成則は、図-8(a)に示すように、圧縮軟化特性には圧縮破壊エネルギーに基づいて定式化される Feenstra による放物線モデル⁶⁾を、引張軟化特性には引張破壊エネルギー G_f を考慮した Hordijk モデル⁷⁾を用いた。材料特性値は、圧縮強度 32.0N/mm^2 、圧縮破壊エネルギー 49.8N/mm 、引張強度 2.32N/mm^2 、引張破壊エネルギー 0.0862N/mm を用いた。



(a) コンクリート



(b) 炭素繊維シート



(c) 界面要素 (せん断方向)

図-8 材料構成則

表-4 実験結果の τ_u , δ_e , δ_u の一覧

Case	τ_u [N/mm ²]	δ_e [mm]	δ_u [mm]
Case1-1	3.32	1.14	3.46
Case1-2	2.70	2.36	3.99
Case1-3*1	1.38	0.63	1.70
Case1平均	3.01	1.75	3.72
Case2-1	3.04	2.74	4.25
Case2-2	3.31	1.96	3.38
Case2-3	3.11	2.33	5.13
Case2平均	3.15	2.34	4.25
Case3-1	6.51	1.05	1.53
Case3-2*2	4.11	1.61	1.61
Case3-3	3.58	0.74	0.98
Case3平均	5.05	0.89	1.25
Case4-1	3.73	0.06	0.49
Case4-2	1.64	0.04	0.25
Case4-3	1.43	0.06	0.44
Case4平均	2.27	0.05	0.39

*1 荷重が適切に行えなかったため平均値に考慮しない。

*2 ひずみの計測が適切に行えなかったため平均値に考慮しない。

3.3 解析結果

(1) 荷重-変位関係

荷重-変位関係について、実験結果と解析結果の比較を図-9に示す(解析結果は付着応力-すべり関係の各ケースの平均値を用いた結果のみ示す)。破壊が炭素繊維シートが破断で終局に至った Case1-2, 荷重が適切に行えなかった Case1-3, ひずみの計測が適切に行えなかった Case3-2を除くと、荷重-変位関係は、比較的良好に再現ができていたものと考えられる。特に、Case2 シリーズと Case4 シリーズは、良好な一致が見られる。

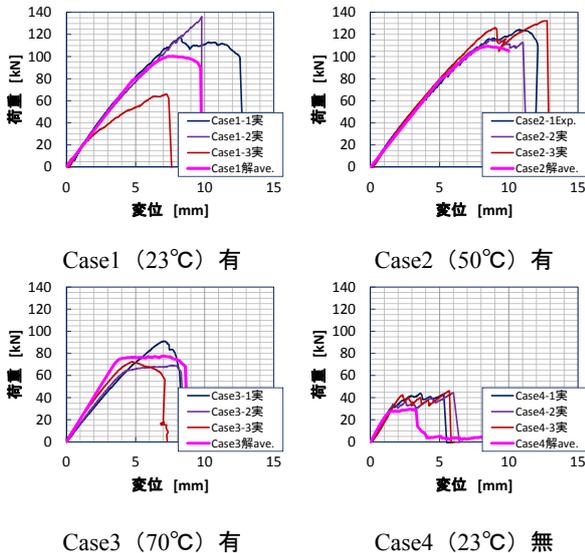


図-9 荷重-変位関係 (実験結果との比較)

(2) ひずみ分布

代表的なひずみ分布として、荷重-変位関係の良好な一致が見られた Case1-1, Case2-1, Case4-1 について、実験結果と解析結果を比較したものを図-10に示す。図には、解析ステップとして、変位が 3mm, 6mm 時 (Case4

は、1mm, 2mm 時) のものと最大荷重時のものを示している。いずれのステップにおいても、良好な一致が見られ、付着挙動を概ね再現できていると考えられる。

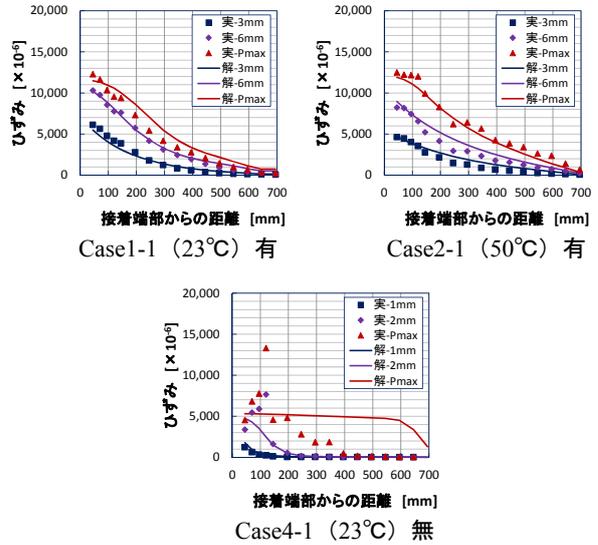


図-10 ひずみ分布 (実験結果との比較)

(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-5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。

まず、各々の付着応力-すべり関係を用いた①解析/実験について、試験体毎の解析精度を見てみると、最大荷重では、0.71~1.18, 界面剥離破壊エネルギーでは、0.51~1.39の解析精度であった。

次に、付着応力-すべり関係の定式化の検討として、付着応力-すべり関係の平均値を用いた②解析平均/実験について、同じく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0.41~1.26の解析精度であった。

付着応力-すべり関係の平均値を用いても最大荷重、界面剥離破壊エネルギーとも解析精度は大きく変わらない結果となった。

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

ポリウレタ樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法について、片引き法を用いた付着強度実験による検討、及び実験結果から算定した付着応力-すべり関係を用いて非線形 FEM 解析による検討を行った結果、得られた知見を以下に示す。

—付着強度実験より—

表-5 解析結果一覧（実験結果との比較）

Case	最大荷重 [kN]					界面剥離破壊エネルギー [N/mm]				
	実験	①解析	①解析/実験	②解析平均	②解析平均/実験	実験	①解析	①解析/実験	②解析平均	②解析平均/実験
Case1-1	117.4	102.7	0.87	100.23	0.85	7.72	5.91	0.77	5.63	0.73
Case1-2	136.1	96.8	0.71		0.74	10.38	5.25	0.51		0.54
Case1-3 ^{*1}	66.1	45.6	0.69		1.52	2.45	1.17	0.48		2.30
Case1平均	126.8	99.8	0.79		0.80	9.05	5.58	0.64		0.64
Case2-1	124.0	106.4	0.86	109.31	0.88	8.61	6.34	0.74	6.69	0.78
Case2-2	115.4	100.7	0.87		0.95	7.46	5.68	0.76		0.90
Case2-3	132.1	118.8	0.90		0.83	9.78	7.91	0.81		0.68
Case2平均	123.8	108.6	0.88		0.89	8.62	6.64	0.77		0.79
Case3-1	91.1	100.2	1.10	77.64	0.85	4.65	5.63	1.21	3.38	0.73
Case3-2	69.2	81.6	1.18		1.12	2.68	3.73	1.39		1.26
Case3-3	72.2	56.8	0.79		1.08	2.92	1.81	0.62		1.16
Case3平均	77.5	79.6	1.02		1.02	3.42	3.72	1.07		1.05
Case4-1	43.7	43.9	1.00	29.67	0.68	1.08	1.08	1.00	0.49	0.46
Case4-2 ^{*2}	44.4	21.0	0.47		0.67	1.10	0.25	0.22		0.45
Case4-3 ^{*2}	46.2	24.2	0.52		0.64	1.20	0.33	0.27		0.41
Case4平均	44.8	43.9	1.00		0.66	1.13	1.08	1.00		0.44

*1 荷重が適切に行えなかったため不使用(平均値に考慮しない)。

*2 付着応力-ひずみ関係の算定が適切に行えなかったため不使用(平均値に考慮しない)。

- (1) 剥離破壊エネルギーについて、常温 (23℃) において、ポリウレア樹脂層の有無に関する比をとってみると、9.05/1.13=8.01 であり、大幅な改善効果があることを確認した。
 - (2) ポリウレア樹脂層のある Case1,2 は、0~700mm の炭素繊維シートの全長に渡って付着応力を分担していることを確認した。また、Case3 についても、主に付着応力を分担しているのは0~100mm 程度の区間であるが、それでも 700mm の位置までひずみが伝達されていることがわかった。一方、ポリウレア樹脂層の無い Case4 は、前者とは異なり、局所的に付着応力を分担していることがわかった。
 - (3) ポリウレア樹脂層を有する場合の界面剥離破壊エネルギーについて、常温 (23℃) に対する 50℃、70℃ の比をとってみると、それぞれ、8.62/9.05=0.95、3.42/9.05=0.38 であり、50℃では低下が見られないこと、70℃では6割程度の低下が見られることがわかった。
- 非線形 FEM 解析より—
- (4) 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。
 - (5) 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 0.41~1.26 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) 高橋義裕, 荒添正棋, 小林 朗, 佐藤靖彦: 界面にポリウレア樹脂を塗布された CFRP スtrandシート補強 RC はりの曲げ挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1285-1290, 2013.7
- 2) 小川泰成, 佐藤靖彦, 小林 朗, 荒添正棋: 常温・低温下におけるポリウレア樹脂層を有する炭素繊維ストランドシートの付着耐力, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, V-026, pp.51-52, 2013.9
- 3) 土木学会: コンクリートライブラリー101 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.73-78, 2000.7
- 4) 小林 朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕, 立石晶洋: FRP スtrandシートの材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1561-66, 2008.7
- 5) 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), pp.509-514, 2004.4
- 6) Feenstra, P. H., de Borst, R. and Rots, J. G.: Stability Analysis and Numerical Evaluation of Crack-Dilatancy Models, Proceedings of 2nd International Conference on Computer Aided Analyses of Concrete Structures, Zell-am-See, Vol. 2, pp. 987-999, 1990.4
- 7) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete. Ph.D Delft University of Technology, 1991
- 8) 張 広鋒, 星隈順一, 塚 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.