

論文 低弾性率樹脂のせん断特性を考慮した FRP シートの剥離破壊解析

尾崎 允彦*1・佐藤 靖彦*2

要旨：低弾性率樹脂であるポリウレア樹脂を用いた場合の FRP シートの剥離破壊の再現を目的として、非線形有限要素解析を行った。まずポリウレア樹脂のせん断試験を行い、得られたせん断応力-せん断ひずみ関係から逆解析によって引張応力-引張ひずみ関係の構成則を明らかにした。得られたポリウレア樹脂の構成則を FRP シートの付着試験の有限要素解析に導入することで、荷重-すべり関係、剥離性状、ひずみ分布、付着応力-すべり関係がそれぞれ一致し、ポリウレア樹脂を用いた場合の剥離挙動を再現できた。

キーワード：FRP シート, ポリウレア樹脂, 温度, コンクリート表層, せん断特性

1. はじめに

FRP シート接着によりコンクリート構造物を補強した場合、FRP シートが剥離することで補強後の部材が破壊に至る。このため、FRP シートの付着耐力を向上させる研究が行われ、FRP シートとコンクリート間に弾性係数が小さい柔軟性エポキシ樹脂を用いる方法が提案されている¹⁾。しかし、柔軟性エポキシ樹脂は温度によって力学的特性が大きく変化する²⁾。この問題を解決する材料として、小林ら³⁾は弾性係数が 66 N/mm^2 のポリウレア樹脂を用いる方法を提案し、常温環境下で付着耐力が 2 倍以上増加することを報告している。温度を変化させた場合については、新井ら⁴⁾が高温環境下、小川⁵⁾が低温環境下で実験を行っており、 -20 度から 50 度の範囲での付着耐力の変化は小さかった。これは、 -20 度から 50 度の範囲内でのポリウレア樹脂の力学的特性の変化が小さかったためだと考えられる。低弾性率樹脂を用いた場合、FRP シートの付着特性は樹脂の力学的特性に大きく影響される。しかし、付着試験による付着耐力の評価は行われているものの、樹脂の力学的特性と FRP シートの付着特性を直接的に結びつけた研究は少ない。最近、著者ら⁶⁾は FRP シートの剥離性状を再現可能な非線形有限要素解析を用いたモデル化手法を提案している。この手法によって、FRP シートの剥離破壊のシミュレーションが可能となった。ただし、適用範囲は弾性係数 2700 N/mm^2 程度の通常のエポキシ樹脂となっている。このため、提案手法を低弾性率樹脂にも適用することができれば、樹脂の力学的特性から FRP シートの付着特性を評価でき、今後の樹脂を含む材料開発に大きく寄与すると考えられる。

そこで、本研究では提案手法によるポリウレア樹脂を用いた場合の剥離破壊の再現を試みる。まずポリウレア樹脂の力学的特性を得るためのせん断試験を行い、そのせん断特性を用いて FRP シート付着試験の再現解析を実施する。また、樹脂の力学的特性が変化する低温環境下での再現解析も併せて実施する。

2. ポリウレア樹脂のせん断特性

ポリウレア樹脂はウレア結合から構成される高分子化合物で、弾性係数は 60 N/mm^2 程度、破断ひずみは 400% 程度である。FRP シート接着にポリウレア樹脂を用いた場合には、ポリウレア樹脂がせん断変形することによって応力を伝達することになる。このため、ポリウレア樹脂のせん断特性が FRP シート全体の付着挙動に大きな影響を及ぼす。本章ではポリウレア樹脂のせん断試験から、せん断応力-せん断ひずみ関係を取得する。さらに、有限要素解析に適用するために、逆解析によって引張応力-引張ひずみ関係としての構成則を求める。

2.1 せん断試験

(1) 実験概要

図-1(a)に製作した試験片の概略、図-1(b)に試験状況を示す。本試験体は一方方向 CFRP プレート (弾性係数 167000 N/mm^2 , 厚さ 1.0 mm) の両面にウレタンプライマーとポリウレア樹脂を塗布し、対称に 4 面製作することで引張試験によって、ポリウレア樹脂のせん断変形が発生するようにした。すなわち、CFRP プレートの両端を引っ張ることで、ポリウレア樹脂がせん断変形し、荷重

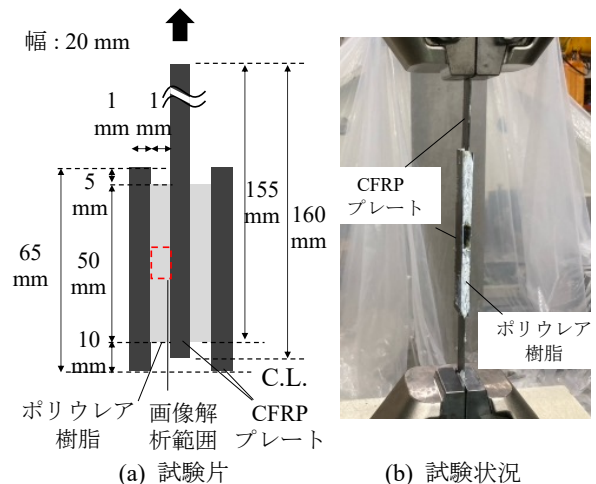


図-1 ポリウレア樹脂のせん断試験

*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻・日本学術振興会特別研究員 DC 修士(工学) (学生会員)

*2 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博士(工学) (正会員)

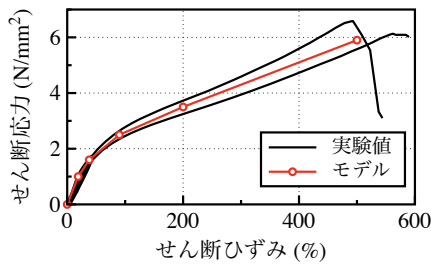


図-2 ポリウレア樹脂のせん断応力-せん断ひずみ関係

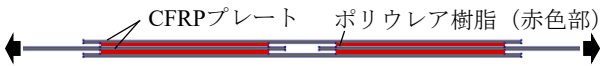


図-3 せん断試験の有限要素解析モデル

とせん断変形量からせん断応力-せん断ひずみ関係を取得することができる。具体的には、せん断応力は荷重を接着面全体で除した平均応力として算出した。せん断ひずみは、画像解析により図-1(a)の赤線で示す中央部の1 mm×10 mmの長方形に着目し、各辺の長さ変化から求めた。試験片の幅は20 mmとし、ポリウレア樹脂の厚みはFRPシート接着時と同様に1 mmとして、2体の試験を行った。なお、樹脂の力学的特性はひずみ速度によって変化するため、FRPシートの付着試験時と同程度となるように、樹脂のせん断ひずみ速度を0.05%/secとして、載荷速度は0.06 mm/minに設定した。また、弾性係数の変化を調べるためにせん断ひずみが5%程度で一旦除荷し再載荷を行っている。

(2) 実験結果

図-2に2体の実験のせん断応力-せん断ひずみ関係とその直線近似したモデルを示す。ポリウレア樹脂は非線形性を有しており、せん断ひずみが50%以上では大きな傾きの低下が見られた。

2.2 せん断試験の逆解析

(1) 解析概要

FRPシート付着試験の有限要素解析に、図-2のポリウレア樹脂のせん断特性を導入できるように、逆解析により材料構成則(引張応力-引張ひずみ関係)を求める。具体的には、図-1の試験に対して有限要素解析を行い、図-2のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデルに一致するように、引張応力-引張ひずみ関係を算定する。汎用有限要素解析ソフトDIANA10.6を用いて、図-3のせん断試験の2次元解析モデル(要素サイズ0.1×0.25 mm)を作成した。CFRPプレートは使用した材料に合わせて弾性係数167000 N/mm²、ポアソン比0.3の線型弾性体とし、ポリウレア樹脂はポアソン比0.49の非線形弾性体とした。荷重は実験同様、変位制御で両端に与えた。

(2) 解析結果

図-4に逆解析で得られた引張応力-引張ひずみ関係

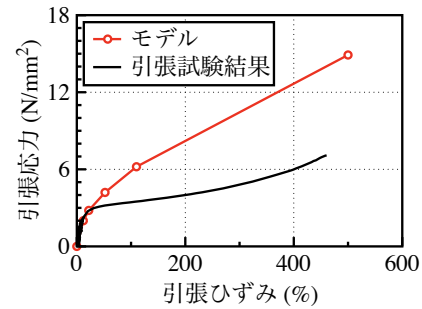


図-4 ポリウレア樹脂の引張応力-引張ひずみ関係

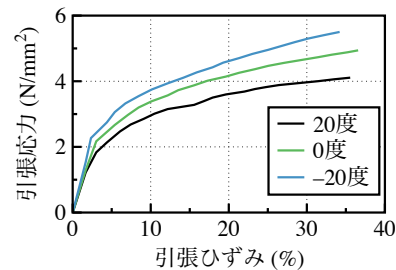


図-5 ポリウレア樹脂の温度による変化

を赤線で示す。また、黒線はJIS K7161に基づくポリウレア樹脂の引張試験結果を示す。なお、引張試験の載荷速度は5 mm/minであるため、ひずみ速度は0.07%/secである。初期の引張応力-引張ひずみ関係の傾きは両者で一致しているものの、ひずみが20%からの非線形領域では傾きが大きく異なっている。これは、樹脂の分子鎖の動きの違いが微小弾性要素では考慮できないためだと考えられる。この事実は、高ひずみ領域までを対象とする剥離破壊解析における構成則として、せん断応力-せん断ひずみ関係に着目することの重要性を示す。

2.3 温度の影響を考慮したせん断特性

樹脂の力学的特性は温度によって変化する。樺木⁷⁾は温度を変化させた場合のポリウレア樹脂の引張試験を行い、図-5の引張応力-引張ひずみ関係を得ている。しかし、前述したように、せん断特性から得られる引張応力-引張ひずみ関係のモデルと引張試験結果は乖離がある。そのため、図-5の結果を直接FRPシート付着試験の解析に適用することはできない。そこで、図-4の赤線の常温環境下のせん断特性を考慮したモデルに対して、図-5の引張試験から得られる温度による変化率の補正を行うことで、低温環境下のせん断特性を考慮したモデルを作成する。具体的には、式(1)のように傾きが変化する各区間の20度(図-5の黒線)と-20度(図-5の青線)の弾性係数の比を算出し、その比がせん断特性を考慮したモデルの20度(図-4の赤線)と-20度の弾性係数の比と等しくなるように設定する。

$$E_{SL,i} = (E_{NL,i}/E_{NN,i}) \cdot E_{SN,i} \quad (1)$$

ここで、 $E_{SL,i}$: -20度のせん断特性を考慮したモデルの*i*

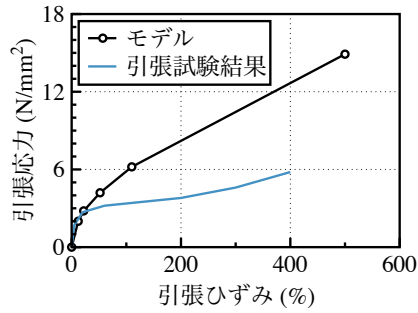


図-6 温度の影響を考慮したせん断特性考慮モデル

番目の区間の弾性係数 (N/mm²), $E_{NL,i}$: -20 度の引張試験結果の i 番目の区間の弾性係数 (N/mm²), $E_{NN,i}$: 20 度の引張試験結果の i 番目の区間の弾性係数 (N/mm²), $E_{SN,i}$: 20 度のせん断特性を考慮したモデルの i 番目の区間の弾性係数 (N/mm²) である。なお、ひずみが 30% 以降は引張試験の実験データがないため、最終区間の弾性係数比が維持されると仮定した。

式(1)を用いて算出された-20 度のせん断特性を考慮したモデルを図-6 に青線で示す。引張試験結果と同様に、20 度に比べて-20 度では弾性係数が大きくなっている。

3. 樹脂特性を考慮した FRP シート付着試験の再現解析

3.1 解析概要

小川⁵⁾によって行われた樹脂の力学的特性を変化させた FRP シート付着試験を対象に再現解析を行う。実験供試体の概要を図-7、実験条件と結果を表-1 にそれぞれ示す。なお、ポリウレタ樹脂を用いた場合については、2 体ずつ試験が行われている。解析は、ポリウレタ樹脂

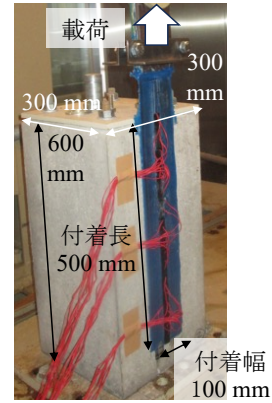


図-7 FRP シート付着試験の供試体概要⁵⁾

なし (N-N), 20 度のポリウレタ樹脂あり (P-N), -20 度のポリウレタ樹脂あり (P-L) の 3 ケースについて行う。

非線形有限要素解析は DIANA10.6 を用いて、図-8 のようにモデル化した。なお、ポリウレタ樹脂を用いない場合には、ポリウレタ樹脂層を作成せず、エポキシ樹脂層のみモデル化している。解析モデルと解析手法は、過去の著者らの FRP シートの剥離破壊の解析⁶⁾と同様に設定した。材料構成則は、実験での材料特性に合わせ、FRP シートが弾性係数 254000 N/mm² の線形弾性体、エポキシ樹脂が弾性係数 2805 N/mm²、降伏応力 35 N/mm² の弾塑性体、ポリウレタ樹脂が温度により変化する図-6 のモデルとした。コンクリートは圧縮が Feenstra の放物線モデル⁸⁾、引張が Hordijk モデル⁹⁾、せん断が Al-Mahaidi のモデル¹⁰⁾を用い、圧縮強度 29.6 N/mm²、圧縮破壊エネルギー 47.88 N/mm、引張強度 2.2 N/mm²、引張破壊エネルギー 0.09 N/mm、せん断伝達係数の下限値 0 とした。

表-1 供試体の条件⁵⁾

供試体	解析ケース	一方向 CFRP シート		付着長 (mm)	付着幅 (mm)	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	ポリウレタ樹脂	温度 (°C)	最大荷重 (kN)
		弾性係数 (N/mm ²)	厚さ (mm)						
SS-N-S	N-N	254000	0.333	500	100	29.6	なし	20	30.7
SSP-N-S4	P-N								93.0
SSP-N-S5							102.8		
SSP-L-S4							P-L	-20	96.4
SSP-L-S5	87.0								

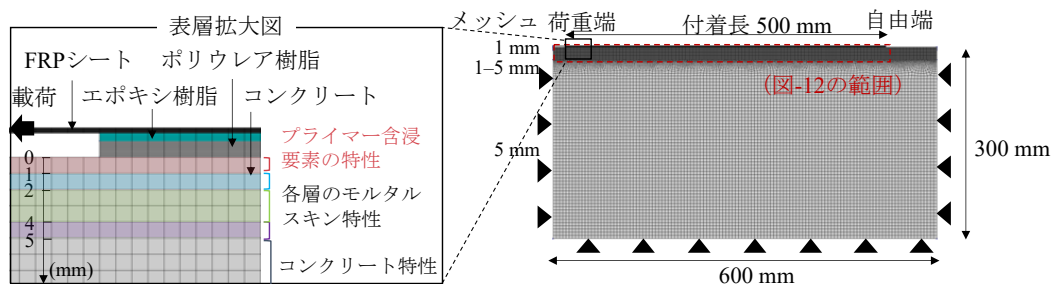


図-8 FRP シート付着試験の供試体のモデル化

表-2 各解析ケースに用いた材料特性

解析 ケース	ポリウレタ樹脂	コンクリート表層の特性							
		引張強度 (N/mm ²)				引張破壊エネルギー (N/mm)			
		0-1mm	1-2mm	2-4mm	3-5mm	0-1mm	1-2mm	2-4mm	3-5mm
N-N	なし	14.4	6.6	4.2	4.0	0.195	0.080	0.107	0.064
P-N	図-6の黒線	9.0				0.087			
P-L	図-6の青線								

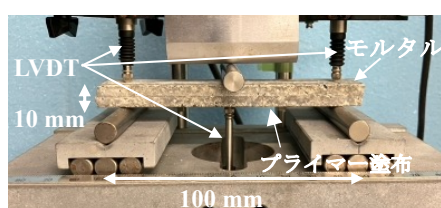


図-9 モルタル薄片供試体の曲げ試験¹¹⁾

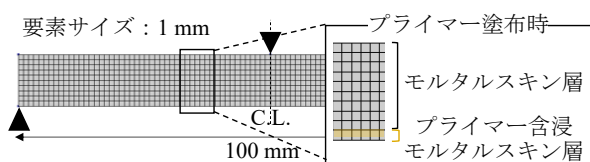


図-10 薄片供試体のモデル化

また、本解析手法では図-8の表層拡大図に示すように、コンクリート表層部分に着目し、その材料特性を層ごとに設定する。コンクリート表層はモルタルスキンと呼ばれ、その強度はコンクリートの中心部分とは異なる。本解析手法では、このモルタルスキン特性を有限要素解析に直接導入することで、FRPシートの剥離破壊挙動を再現することができる。このため、過去の研究⁹⁾と同様に、0-1 mmをプライマー含浸モルタルスキン要素とし、1-2 mm、2-4 mm、4-5 mmにそれぞれのモルタルスキン特性を表-2のように設定した。なお、過去の研究ではプライマー含浸モルタルスキン要素(0-1 mm)の強度特性の設定の際に、プライマーの含浸領域の影響が考慮できていなかったため、本研究ではその点の改良を行った。具体的には、過去に行ったプライマーを塗布したモルタルスキンの曲げ試験¹¹⁾(図-9)より、図-10の最下層の1 mmのみをプライマー含浸モルタルスキン要素とした逆解析を行い、その強度特性を求めた。その際、エポキシ樹脂とポリウレタ樹脂使用時に用いるウレタンプライマーの両方に対して、それぞれの強度特性を求めた。なお、曲げ試験結果より低温環境下におけるモルタルスキンの強度の変化は小さかったため、温度によるモルタルスキン特性の変化は考慮しないこととした。

3.2 解析結果と考察

実験と解析結果の荷重-すべり関係を図-11に示す。ポリウレタ樹脂を塗布した場合(P-N)は、無塗布(N-N)に比べて、剛性が小さくなり最大荷重が大幅に増加して

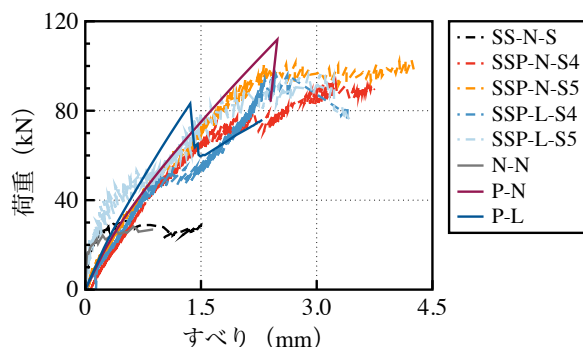


図-11 荷重-すべり関係

表-3 実験と解析の最大荷重の比

	最大荷重 (kN)		実験/解析
	実験	解析	
SS-N-S	30.7	N-N 28.2	1.09
SSP-N-S4	93.0	P-N 111.8	0.88
SSP-N-S5	102.8		
SSP-L-S4	96.4	P-L 83.1	1.10
SSP-L-S5	87.0		

おり、実験結果と良く一致している。この剛性の変化は樹脂の弾性係数が小さくなったことに起因する。低温環境下(P-L)では常温よりも樹脂の弾性係数が大きくなることで、解析上の剛性も若干大きくなった。しかし、実験と比較すると、低温環境下で荷重低下が発生するすべりが小さい値であった。これは実験では最大荷重の半分程度で一度剛性が大きく低下したが、解析ではその低下が起こらなかったことによる。この一時的な剛性低下は低温環境下での樹脂の何らかの特性に起因すると考えられるが、その詳細は不明なため、今後検討していきたい。

また、表-3に示す通り、実験の平均値と解析の最大荷重の比は1.0付近となった。剥離破壊としての解析の妥当性を確認するために、ひび割れ性状、ひずみ分布、付着応力-すべり関係について比較する。

(1) ひび割れ性状

解析ケースN-NとP-Nのひび割れ性状を図-12に示す。ポリウレタ樹脂を用いない場合(N-N)はコンクリート表層2-3 mmの部分が破壊しているのに対し、用いた場合(P-N)は5-6 mmの部分が破壊していた。一般にポ

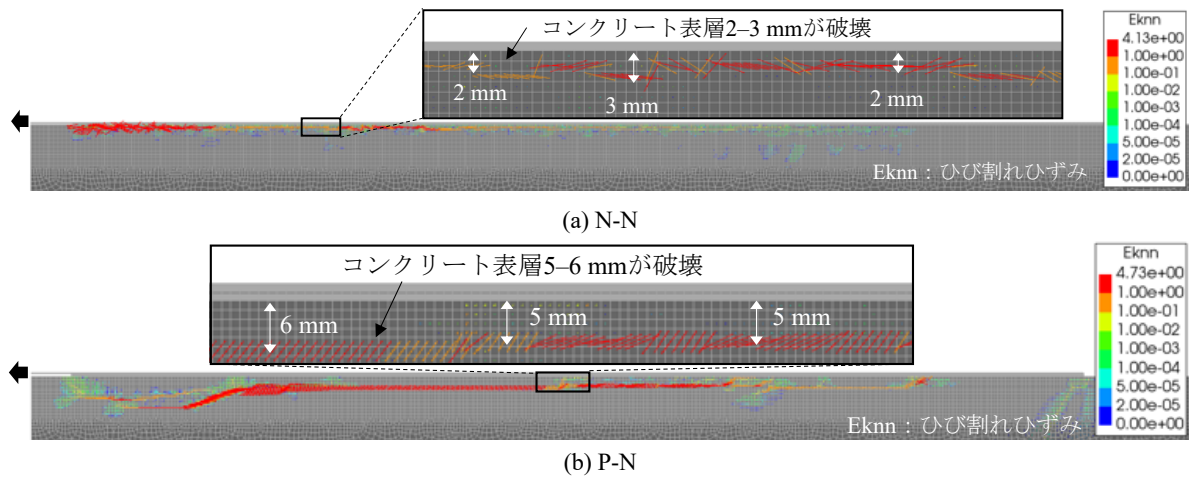


図-12 剥離破壊解析のひび割れ性状

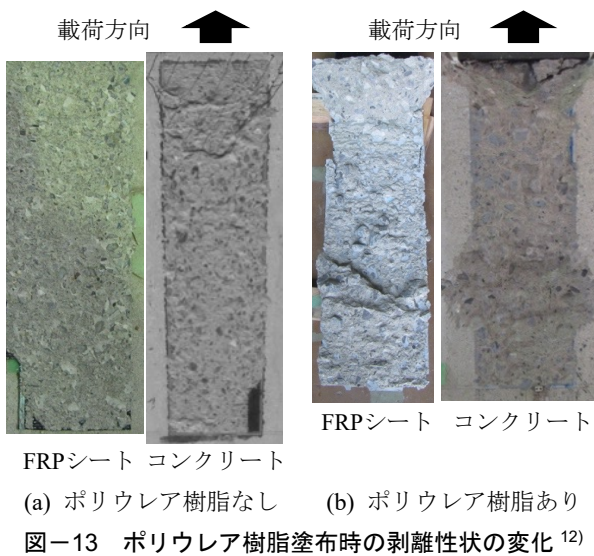


図-13 ポリウレア樹脂塗布時の剥離性状の変化¹²⁾

ポリウレア樹脂を用いた場合には、図-13のように剥離性状が大幅に変化する。過去に著者ら¹²⁾が、剥離後のFRPシートに接着しているコンクリート層の厚さを測定した結果、ポリウレア樹脂を用いない場合の剥離深さが0.5–2.5 mmであるのに対し、用いた場合は1–6 mmと表層の深い部分で剥離していた。このため、本解析においてもポリウレア樹脂を用いた場合の深い部分での剥離が再現

できている。この剥離深さの変化は、低弾性率の樹脂を用いたことで、せん断応力の伝達が緩やかになり、コンクリート表層の浅い部分(2–3 mm)に働く主応力の大きさが、その層の強度よりも小さくなったことに起因する。したがって、コンクリート表層の各層の強度と樹脂のせん断応力の伝達により各層に発生する主応力のバランスによって破壊層が決定するため、樹脂の弾性率を制御することで剥離性状を制御できる。なお、低温環境下でのひび割れ性状(P-L)は常温(P-N)と同様であった。

(2) ひずみ分布

荷重端からの位置を横軸とした各実験と解析ケースのひずみ分布の比較を図-14に示す。なお、実験のひずみゲージは20 mm間隔である。ポリウレア樹脂を用いた場合に有効付着長が大幅に長くなる性状が再現できており、常温と低温ともにひずみ勾配が実験と解析でよく一致している。ただし、剥離が進展し全体剥離(終局)となる直前を比較した(b)と(c)の青線においては、実験と解析で差が見られた。これは、図-12に示すようにポリウレア樹脂を用いた場合の解析で、荷重端付近に深いひび割れが発生したことによるものだと考えられる。

(3) 付着応力-すべり関係

各実験と解析ケースの荷重端からの位置ごとの付着

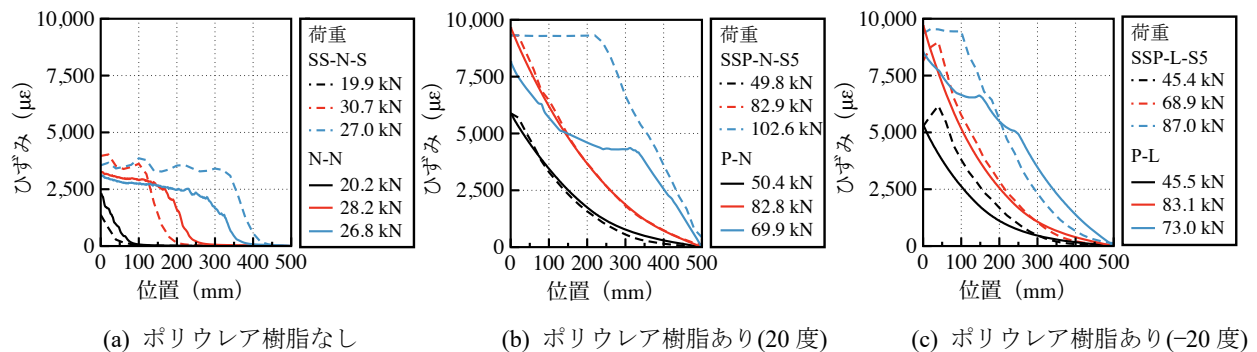


図-14 FRPシートのひずみ分布の比較

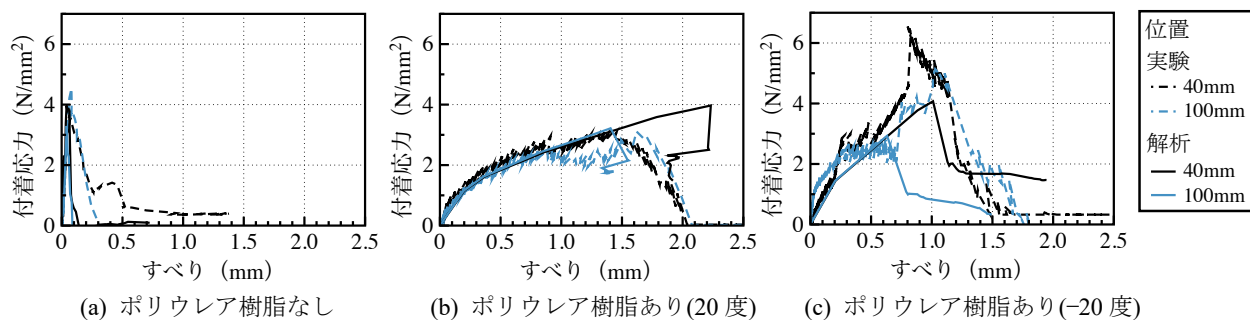


図-15 付着応力-すべり関係の比較

応力-すべり関係を図-15に示す。ただし、ポリウレタ樹脂を用いた実験は、常温は SSP-N-S5、低温は SSP-L-S5の結果を示す。付着応力は隣接する位置のひずみ差とシート剛性の積をゲージ間隔で除して求めた。解析ではポリウレタ樹脂を用いた場合に、すべりが大幅に増加しており、実験と解析で挙動がよく一致している。常温と低温ともに傾きがよく一致していることから、提案したせん断試験方法と低温での換算方法によって、ポリウレタ樹脂のせん断特性を適切に考慮できていたと考えられる。

以上より、低弾性率樹脂のせん断特性を適切に導入することで、低弾性率樹脂を用いた場合でも、コンクリート表層に着目したモデル化手法によって FRP シートの剥離破壊を再現することができると言える。

4. まとめ

本研究では低弾性率樹脂のせん断特性を用いた FRP シートの剥離破壊の再現解析を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ポリウレタ樹脂のせん断試験より、そのせん断特性を明らかにした。さらに、温度による弾性係数の補正から低温環境下におけるせん断特性を導いた。
- (2) せん断特性を考慮したポリウレタ樹脂の構成則を有限要素解析に導入することで、低弾性率樹脂を用いた場合の FRP シートの剥離挙動を再現できた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23KJ2027 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 前田敏也, 小牧秀之, 坪内賢太郎, 村上かおり: 緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法の補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.817-822, 2001.7.
- 2) 三井雅一, 福澤公夫, 齊藤誠, 舟川勲: 緩衝材を用いた FRP シート-コンクリート間のせん断付着特性の温度依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26,

No.1, pp.351-356, 2004.7.

- 3) 小林朗, 尾崎允彦, 佐藤靖彦, 荒添正棋, 立石晶洋, 小森篤也: 高伸度弾性樹脂を用いて接着した FRP シートとコンクリートの付着挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.855-867, 2020.3.
- 4) 新井崇裕, 山野辺慎一, 荒添正棋, 佐藤靖彦: ポリウレタ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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1159-1164, 2014.7.
- 5) 小川泰成: ポリウレタ樹脂を用いた CFRP スtrandシート補強部材の低温時力学特性に関する研究, 北海道大学修士論文, 2015.2.
- 6) Ozaki, M. and Sato, Y.: Importance of Mortar Skin Characteristics in Concrete Surface Layer in Analysis of Delamination Behavior between FRP Sheet and Concrete, Proceedings of the 2024 fib Symposium, pp.2369-2379, 2024.11.
- 7) 樺木達也: ポリウレタ樹脂層の温度依存特性を考慮した FRP シート補強 RC 部材の破壊シミュレーション, 北海道大学修士論文, 2017.2.
- 8) Feenstra, P. H.: Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1993
- 9) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991
- 10) Al-Mahaidi, R. S. H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Tech. Rep. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 1979
- 11) 尾崎允彦, 佐藤靖彦: プライマーを塗布したコンクリート表層モルタルスキンの強度特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1945-1950, 2024.7.
- 12) 尾崎允彦, 佐藤靖彦, 吉田英二, 竹内彩, 山田雄太, 永島史晟: シート剛性に着目した CFRP シートとコンクリート間の付着耐力の評価, 土木学会論文集, Vol.79, No.6, 22-00289, 2023.6.