

論文 CFRP・コンクリート合成梁の軸力作用下の曲げ挙動に関する解析的検討

櫻庭 浩樹^{*1}・松本 高志^{*2}・稲田 裕^{*3}・松井 孝洋^{*4}

要旨：本論文では、軸力作用下における CFRP・コンクリート合成梁の曲げ載荷実験を対象とし、有限要素解析を用いて梁の変形と強度特性の把握を行った。有限要素解析では、合成梁の界面を接触解析と完全剛結にした場合と比較し、CFRP の拘束による中詰めコンクリートの圧縮硬化を考慮した。合成梁の強度に関しては、CFRP の降伏規準に Tsai-Wu の降伏規準を用いて、卓越応力成分と比較することで評価した。その結果、界面の影響と圧縮硬化が合成梁の変形を再現する上で重要であることを明らかにした。また実験のいくつかの合成梁の強度を評価する上で、梁軸方向圧縮応力と面内せん断応力の組合せが破壊に影響することを示した。

キーワード：箱形断面 CFRP、積層構成、中詰めコンクリート、圧縮硬化

1. はじめに

近年、土木構造物へ繊維強化ポリマーを活用するための研究が進められており、適用先の1つとしてシールドトンネルのセグメントが検討されている¹⁾。その中でも、高強度を有する炭素繊維強化ポリマー(CFRP)を用いる構造が研究されている。セグメントは、高強度が必要な方向と箇所が限定される可能性があるため、高強度かつ異方性材料である CFRP を有効に活用した場合、断面を小さくすることができ、薄肉化、掘削外径の縮小等による建設コストの低減が期待される^{2,3)}。また CFRP は優れた耐腐食性を持つことから、下水道トンネル等に適用した場合には、ライフサイクルコストの低減も期待できる。

このような背景から、シールドトンネルセグメントへ CFRP を適用するための実験的検討が行われている⁴⁾。構造形式としては箱形断面 CFRP を外殻として使用し、中詰めにコンクリートを配する合成構造としている。これは、セグメントの主荷重である土圧・水圧を CFRP とコンクリートで持たせ、施工時荷重であるシールドジャッキ反力に対して中詰めコンクリートの抵抗を期待するものである。この検討では、CFRP の材料試験と軸力を受ける CFRP・コンクリート合成梁の曲げ載荷実験を行い、CFRP の積層構成が構造部材の変形、破壊性状に及ぼす影響が大きいことが確認されている。

しかし、梁の変形を評価する上で、CFRP の拘束効果は考慮されておらず、CFRP とコンクリートの界面の影響も明らかになっていなかった。また梁の強度は、CFRP の梁軸方向の強度だけでは評価できず、さらに詳細な検討が必要とされていた。そこで本論文では、有限要素法を用いて梁をモデル化し、CFRP・コンクリート合成梁の変形および強度特性を明らかにすることを目的として、

解析的な検討を行った。

2. 軸力作用下における CFRP・コンクリート合成梁の曲げ載荷実験概要

実験供試体は、箱形断面 CFRP の外殻にコンクリートを中詰めた合成構造である。図 - 1 に載荷条件と梁の側面図及び断面図を示す。セグメントは曲率を持つユニットで構成されるが、実験では基本特性を把握するため、曲がりのない供試体が使用された。またセグメントは強い圧縮力を受ける構造物であるため、鉛直荷重に加えて軸力を作用させ、圧縮軸力下における梁の変形・強度特性の検討がなされた。CFRP の積層構成とコンクリート強度を実験パラメータとして、合計 6 供試体で実験は行われた。

2.1 供試体作成方法

供試体の CFRP には、プリプレグと呼ばれる 1 方向の炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させたシート状のもの(単層板)を 25 層重ねた積層板が用いられた。まず、核となる角柱状の心材に 2.3 節で後述する積層数になるように、プリプレグを梁軸方向と梁周方向の 2 方向に 25 枚巻きつけて積層する。その後、熱硬化処理を施すことで母材であるエポキシ樹脂が硬化し、各層が接着される

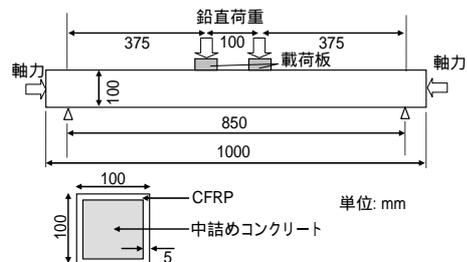


図 - 1 載荷条件と梁の側面図及び断面図

*1 北海道大学大学院工学研究科 環境創生工学専攻 修士課程 (正会員)

*2 北海道大学大学院工学研究科 准教授 Ph.D. (正会員)

*3 清水建設(株)技術研究所 博(工)

*4 東レ(株) (正会員)

表 - 1 CFRP 積層板の材料特性

材料特性	単位	梁軸方向：梁周方向の繊維量の比率（括弧内は積層数）				備考
		9(22)：1(3)	1(13)：1(12)	1(7)：2(18)	1(3)：9(22)	
σ_1^T	MPa	1790	1759	715	295	鋼管掴み引張試験値
σ_1^C		-674	-612	-247* ¹	-173* ¹	圧縮要素試験値，* ¹ JIS 準拠クーポン試験値
σ_2^T		295	1759	1759* ²	1790	鋼管掴み引張試験，* ² L1T1 の値を仮定
σ_2^C		-173* ³	-612	-713	-674	圧縮要素試験値，* ³ JIS 準拠クーポン試験値
σ_3^T		62	62	62	62	文献より仮定 ⁵⁾
σ_3^C		-173	-173	-173	-173	L9T1 から L1T9 の中で最小の σ_2^C を仮定
τ_{12}^U		71.1	67.7	67.7* ⁴	67.7* ⁴	せん断要素試験値，* ⁴ L1T1 の値を仮定
τ_{23}^U		32	32	32	32	G_{23} の限界ひずみ 1% と仮定
τ_{31}^U		49.5	46.1	46.1* ⁵	46.1* ⁵	せん断要素試験値，* ⁵ L1T1 の値を仮定
E_1		98100	81000	39000* ⁶	20900* ⁶	圧縮要素試験値，* ⁶ 鋼管掴み引張試験値
E_2		20900* ⁷	81000	88800	98100	圧縮要素試験値，* ⁷ 鋼管掴み引張試験値
E_3		8500	8500	8500	8500	TORAYCA の HP 記載データより仮定 ⁶⁾
G_{12}		3500	3560	3530	3500	JIS 準拠クーポン試験値
G_{23}		3200	3200	3200	3200	文献より仮定 ⁷⁾
G_{31}		3200	3200	3200	3200	G_{23} と同じと仮定
ν_{12}		0.130	0.080	0.044	0.0276	JIS 準拠クーポン試験値
ν_{23}		0.460	0.465	0.462	0.432	古典積層理論に基づき仮定 ⁷⁾
ν_{31}	0.0374	0.0488	0.101	0.187	古典積層理論に基づき仮定 ⁷⁾	

ことで CFRP の外殻が製作された。

中詰めコンクリートは CFRP の外殻が製作されてから充填された。また梁の両端部は閉じられておらず，CFRP 内面とコンクリート間の付着を強化するための処置は施されていない。

2.2 荷重方法

荷重実験は，図 - 1 に示したように鉛直荷重と軸力を作用させ，荷重制御で行われた。写真 - 1 に梁の側面写真を示す。軸力は鉛直荷重と同時に荷重を始め，梁の変形に追従するように作用させている。また式(1)に示すように，曲げスパン内の曲げモーメントと軸力の比が 0.04m になるように制御している。この値は，既存のシールドトンネルを基に算出した断面力から決定された。

$$M/N = 0.04 \text{ (m)} \quad (1)$$

ここに， M : 曲げスパン内の曲げモーメント， N : 軸力。

2.3 実験パラメータと供試体名称

(1) CFRP の積層構成と材料特性

実験では積層構成の違いによる影響を確認するため，梁軸方向と梁周方向の繊維量の比率（以下，繊維比率）が異なる 4 種類の積層構成が用いられた。表 - 1 に供試体の材料特性を示す。添え字の 1, 2, 3, T, C, U はそれぞれ梁軸方向，梁周方向，箱形断面（ウェブ，フランジ）の厚さ方向，引張強度，圧縮強度，せん断強度を意味する。梁軸と梁周方向（1 と 2 方向）は，材料試験に



写真 - 1 梁の側面写真

よる値であり，鋼管掴み引張試験値に関しては実験に用いた供試体から切り出した試験片を用い，その他の材料試験は別途作成した試験片を用いている。箱形断面の厚さ方向（3 方向）は文献などから仮定した値である。なお繊維比率は表 - 1 の積層数に示すように，おおその数値である。

以下の検討では，4 種類の梁軸方向：梁周方向の繊維比率 9:1, 1:1, 1:2, 1:9 をそれぞれ，L9T1, L1T1, L1T2, L1T9 と称する。L 及び T は梁軸方向と梁周方向の繊維を示し，それらの文字の後に繊維比率を示している。

(2) 中詰めコンクリート強度

実験では，普通強度コンクリートと低強度コンクリートの 2 種類が用いられた。強度の異なるコンクリートを用いたのは，強度の違いによる梁の挙動の把握を図るためである。普通強度コンクリートが 2 種類あるのは実験

時期が異なるためである。表 - 2 に中詰めコンクリートの圧縮強度 f'_{c0} , 弾性係数 E_c , ポアソン比 ν_c , 引張強度 f_t , 軟化勾配 E_s を示す。 E_s に関しては、次章で述べる。

(3) 供試体名称

以下の検討では、供試体の名称を 'L9T1-N1' のように、'積層構成 - コンクリート強度' として示す。コンクリート強度は第 1 期普通強度、第 2 期普通強度、低強度を意味する文字をそれぞれ N1, N2, L とする。実験は、L9T1-N1, L9T1-L, L1T1-N2, L1T1-L, L1T2-N1, L1T9-N2 の 6 供試体で行われた。

2.4 梁の破壊性状

実験では、4 種類の積層構成と普通強度と低強度の中詰めコンクリートを用いたが、6 供試体の破壊性状は、上フランジ載荷板端部せん断スパン側の CFRP が面外に折れたような破壊性状であった。写真 - 2 に上フランジ破壊部の拡大写真を示す。

3. 3次元有限要素解析

解析は 6 供試体について行った。解析コードには MSC.Marc を使用した。

3.1 解析条件

(1) 境界条件

解析では、梁軸方向、鉛直方向、奥行き方向をそれぞれ、X, Y, Z 方向として定義した。解析モデルの要素はすべて 8 節点ソリッド要素とし、図 - 2 に示すように梁の対称性を考慮して 1/4 モデルとして、対称面節点の X 方向もしくは Z 方向の変位を拘束した。解析の支点は、支点上の節点の Y 方向変位を拘束した。鉛直荷重と軸力は、面に作用する圧力として定義し、梁の変形後も荷重作用面の法線方向に荷重を作用させる従動荷重とした。

(2) 載荷点と支点

載荷点と支点には幅 50mm, 厚さ 15mm の鋼板を配置し、CFRP と鋼板は剛結とした。鋼板は弾性係数 200GPa, ポアソン比 0.3 の弾性体とした。

(3) CFRP

CFRP は直交異方性とし、材料特性は表 - 1 に示した値を用いた。CFRP の降伏規準としては、式(2)のように示される Tsai-Wu の降伏規準⁷⁾を用いた。異方性係数 F は材料強度から算出される。

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{31}\sigma_3\sigma_1 + F_{44}\tau_{23}^2 + F_{55}\tau_{31}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 = 1$$

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_1^T} + \frac{1}{\sigma_1^C}, F_2 = \frac{1}{\sigma_2^T} + \frac{1}{\sigma_2^C}, F_3 = \frac{1}{\sigma_3^T} + \frac{1}{\sigma_3^C}, F_{11} = \frac{-1}{\sigma_1^T\sigma_1^C}$$

$$F_{22} = \frac{-1}{\sigma_2^T\sigma_2^C}, F_{33} = \frac{-1}{\sigma_3^T\sigma_3^C}, F_{44} = \frac{1}{(\tau_{23}^u)^2}, F_{55} = \frac{1}{(\tau_{31}^u)^2}, F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^u)^2}$$

$$F_{12} = -0.5\sqrt{F_{11}F_{22}}, F_{23} = -0.5\sqrt{F_{22}F_{33}}, F_{31} = -0.5\sqrt{F_{33}F_{11}} \quad (2)$$

表 2 コンクリート材料特性

材料特性	中詰めコンクリート		
	普通強度		低強度
	第 1 期(N1)	第 2 期(N2)	L
f'_{c0} (MPa)	31.7	28.9	19.4
E_c (MPa)	28480	31820	26710
ν_c	0.174	0.174	0.171
f_t^* (MPa)	2.98	2.85	2.33
E_s (MPa)	609	580	474

*引張強度は ACI code 318-95 $f_t = 0.53\sqrt{f'_{c0}}$ に基づく。

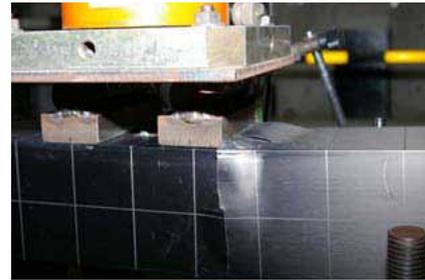


写真 - 2 載荷板端部破壊部の拡大写真

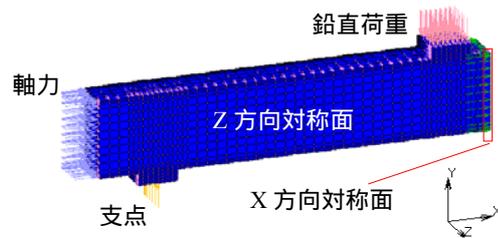


図 - 2 解析モデル

降伏後の挙動には、降伏規準を満たした積分点の弾性係数を最小の弾性係数（箱形断面の厚さ方向の弾性係数 E_{33} ）に低下させる進行性破壊機能⁸⁾を用いて解析を行った。進行性破壊では降伏曲面の拡大や移動はせず、降伏した要素は、回復しないものとしている。

(4) 中詰めコンクリート

中詰めコンクリートは、図 - 3 に示すように引張側と圧縮側で、ひび割れによる引張軟化と CFRP の拘束効果による圧縮硬化を考慮した。ひび割れ後のせん断力保持率は 0.1 とした。

引張側においては、主応力がコンクリートの引張強度に達した後にコンクリートのひび割れを考慮し、5000 μ まで線形に軟化するものとして、軟化勾配 E_s を決定した。

圧縮側では CFRP による拘束効果を式(3)から式(7)⁹⁾に示す Samaan 式を用いて考慮した。降伏判定には von Mises の降伏規準を用い、圧縮強度の半分まで線形挙動とした。コンクリートの圧壊は、表 - 3 に示す終局ひずみ (ϵ'_{cu}) に達した時とした。

本研究では、CFRP の 3 次元的な拘束を考慮して、Buyukotruk の降伏規準^{8),10)}を用いて解析を行ったが、梁の剛性は実験より早期に低下する挙動が見られた。これ

は、FRP の拘束によるコンクリートの圧縮硬化は、コンクリートの圧縮応力が軸圧縮強度付近に達し、微細なひび割れが入ることによる体積膨張を FRP が拘束することによって生じることが参考文献⁹⁾に示されており、この挙動を考慮していないことが要因であると考えられた。そこで、図-3 に示す応力-ひずみ関係⁹⁾を用いて CFRP による拘束効果を仮定し、解析を行った。

圧縮硬化モデルは、コンクリートの弾性係数 E_c と圧縮硬化勾配である E_{c2} で表現されるバイリニア型のモデルである。 E_c と E_{c2} の勾配の境界は形状係数 n で定まる曲線によって表される。

$$\sigma'_c = \frac{(E_c - E_{c2})}{\left[1 + \left(\frac{(E_c - E_{c2}) \cdot \varepsilon'_c}{f_0}\right)^n\right]^{1/n}} + E_{c2} \varepsilon'_c \quad (3)$$

ここに、 σ'_c : コンクリート圧縮応力、 E_c : コンクリート弾性係数、 E_{c2} : 圧縮硬化勾配、 f_0 : 圧縮硬化勾配の切片、 ε'_c : コンクリート圧縮ひずみ、 n : 形状係数 (=1.5)

拘束下におけるコンクリートの終局圧縮強度は、式(4)で示される。また式(4)は円形断面について提案された式であるが、箱形正方形断面にも適用できることが参考文献¹¹⁾で示されており、式(4)を用いて f_r を算定した。

$$f'_{cu} = f'_{c0} + 6.0 f_r^{0.7}, \quad f_r = \frac{2\sigma_2^T \cdot t}{D} \quad (4)$$

ここに、 f'_{cu} : 拘束下コンクリート終局強度、 f'_{c0} : コンクリート圧縮強度、 f_r : CFRP の拘束圧、 σ_2^T : CFRP 周方向強度、 t : CFRP の厚さ (=5mm)、 D : 箱形正方形断面の内辺 (=90mm)

圧縮硬化勾配 E_{c2} と圧縮硬化勾配の切片 f_0 は式(5)と式(6)で表される。 E_{c2} と f_0 は CFRP の梁周方向弾性係数と拘束圧の関数である。

$$E_{c2} = 245.61(f'_{c0})^{0.2} + 1.3456 \frac{E_2 t}{D} \quad (5)$$

$$f_0 = 0.872 f'_{c0} + 0.371 f_r + 6.258 \quad (6)$$

ここに、 E_2 : 梁周方向の CFRP 弾性係数。

拘束下における終局ひずみは、図-3 に示した圧縮硬化勾配の関係から式(7)で与えられる。

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{f'_{cu} - f_0}{E_2} \quad (7)$$

上記の式(4)から式(7)を用いて算出した中詰めコンクリートのパラメータを表-3 に示す。

表-3 解析に用いた中詰めコンクリートのパラメータ

供試体名	L9T1-N1	L9T1-L	L1T1-N2	L1T1-L	L1T2-N1	L1T9-N2
f_r (MPa)	32.8	32.8	195.4	195.4	195.4	198.9
f'_{cu} (MPa)	100.7	88.4	269.8	260.3	272.6	272.8
E_{c2} (MPa)	2053	2007	6537	6500	7129	7815
f_0 (MPa)	46.1	35.3	104.0	95.7	106.4	105.2
ε'_{cu}	0.0269	0.0266	0.0260	0.0260	0.0242	0.0222

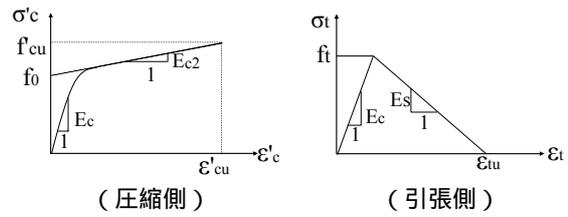


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

(5) CFRP とコンクリートの界面

解析では、CFRP とコンクリートの節点をずれが生じるものとして、接触解析機能⁸⁾を使用してモデル化した場合(以下、接触解析)と剛結とした場合(以下、完全剛結)の2ケースについて検討した。接触解析は、合成梁の界面の付着を強化する処置をしていないことを考慮して行った。接触解析はペナルティ法に基づいて、接触力は節点の貫通量に比例するとして扱い、その接触力を用いて摩擦力を算定するものである。摩擦係数は文献¹²⁾より、GFRP とオッタワ砂の摩擦係数を参考にして0.4とした。完全剛結は、軸力を合成梁の両端に作用させていることを考慮して、合成梁の界面にずれはない場合について行った。

3.2 解析結果

(1) 荷重-変位関係の比較

実験と解析結果の荷重-変位関係の比較を図-4 に示す。変位の計測点は図-1の鉛直荷重作用位置である(支点から375mm)。また線形弾性の梁理論による中詰めコンクリートの縁圧縮応力が、圧縮強度 f'_{c0} に達する時の荷重 P_c も合わせて示す。

図-4 より、完全剛結にした場合では、全てのケースにおいて実験の剛性より大きい結果となった。接触解析とした場合では、L1T1-N2 と L, L1T2-N1, L1T9-N2 が実験の剛性とよく一致し、接触解析とした方が実験の変形を再現できた。しかし、L9T1-N1 と L では接触解析とした場合に実験の剛性を下回った。

中詰めコンクリートが圧縮硬化しているかを確認するために、 P_c と接触解析の結果を比較する。L1T1-N2 と L, L1T2-N1, L1T9-N2 では、 P_c を上回っても実験と同程度の剛性が得られた。よって、中詰めコンクリートは圧縮硬化していると考えられ、本解析で用いた応力-ひずみ関係の適用性が見られた。しかし、L9T1-N1 と L では、載荷初期は実験の剛性と一致しているが、 P_c である35kN と25kN 程度を超えると実験の剛性を下回った。

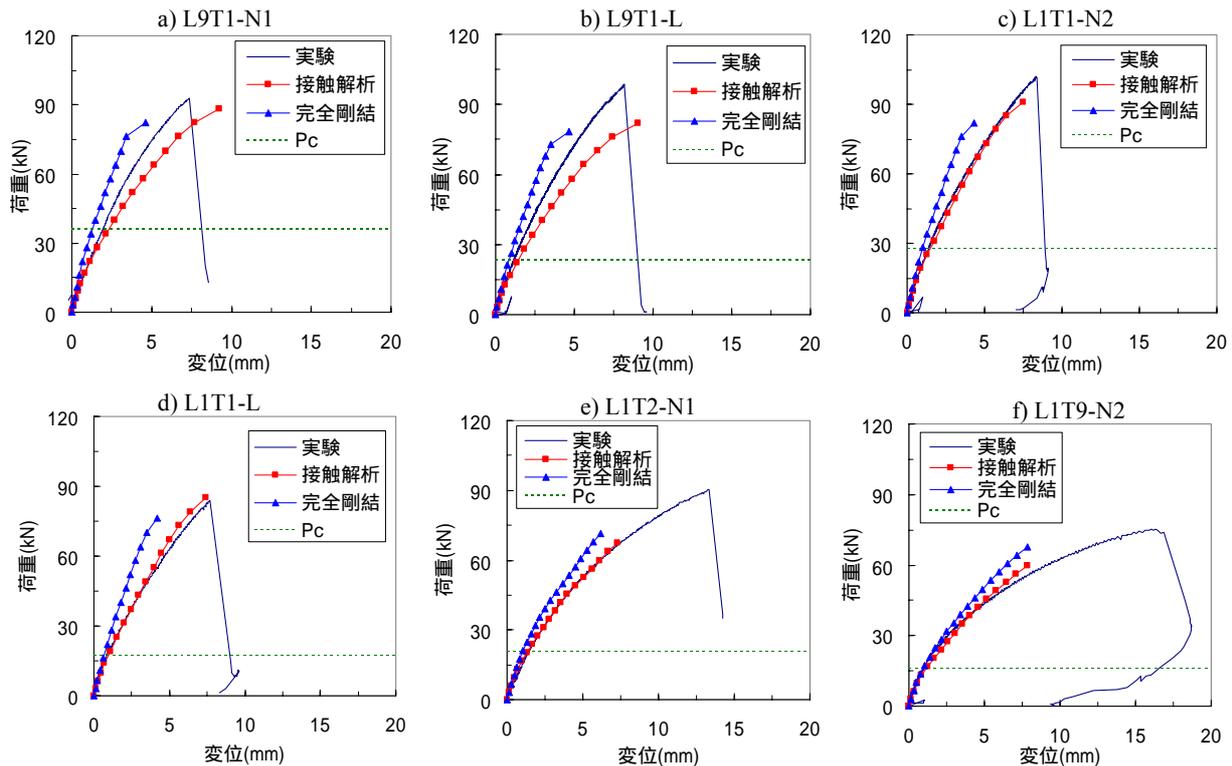


図 - 4 荷重 - 変位関係の比較

(2) 梁の強度の比較

解析での梁の強度は、Tsai-Wu の降伏規準を満たした節点が生じた上で、1 つ前の荷重時の剛性に対して相対的に剛性が 5%以上変化した時点の荷重とした。これは CFRP が脆性材料であることを考慮して仮定した。

実験と解析の比較を表 - 4 に示す。実験の強度は、接触解析の L9T1-N1、L1T1-N2 及び L の結果とよく一致し、実験との差はそれぞれ-4.1%、-12.0%、1.6%であった。しかし、接触解析の L9T1-L、L1T2-N1、L1T9-N2 では実験の強度より比較的小さく、実験との差はそれぞれ-16.6%、-25.0%、-19.8%であった。また L1T2-N1 と L1T9-N2 では、実験の終局変位の 55%と 50%程度で強度に至っており、終局点の再現ができなかった。

完全剛結とした場合の強度は、L9T1-N1 と L 及び L1T1-N2 と L で接触解析より小さく、実験との差はそれぞれ、-10.7%、-20.5%、-19.9%、-9.2%となった。L1T2-N1 と L1T9-N2 では、接触解析より強度が大きくなり、実験との差は-20.8%と-9.4%になった。

(3) 破壊性状の比較

(1)と(2)項の結果では、接触解析の方が実験の剛性と強度を再現できたため、接触解析の破壊性状について述べる。図 - 5 に接触解析で降伏規準を満たした節点の位置を示す。L1T1-N2 と L では、(1)位置で Tsai-Wu の降伏規準を満たし、実験の破壊性状(写真 - 2)と一致した。しかし、L1T2-N1 は(2)位置、L9T1-N1 と L は(3)位置、L1T9-N2 は(4)位置で降伏規準を満たし、実験結果とは異なる位置で破壊した。

表 - 4 実験と解析の強度の比較

供試体名	梁の強度 (kN)		
	実験	完全剛結	接触解析
L9T1-N1	91.9	82.1	88.1
L9T1-L	98.5	78.3	82.1
L1T1-N2	102.0	82.1	91.1
L1T1-L	83.8	76.1	85.1
L1T2-N1	90.2	71.4	67.2
L1T9-N2	74.8	67.8	60.0

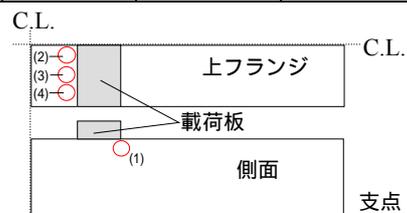


図 - 5 接触解析破壊部の概要図

なる位置で破壊した。

(4) 降伏規準を満たした節点の応力状態

この項では、前項で述べた位置の節点の応力状態について述べる。図 - 6 は、実験の剛性と差が見られる L9T1-N1 と L の結果を除いた接触解析の 4 供試体について、卓越応力であった梁軸方向圧縮応力(以下、 σ_1)と面内せん断応力(以下、 τ_{12})を示している。またこの 2 応力による Tsai-Wu の破壊包絡線と合わせて示している。図より、L1T1-N2 と L では τ_{12} 、L1T2-N1 と L1T9-N2 では σ_1 の寄与が支配的であることが分かる。この結果から、支配的な応力が異なることが破壊性状の違いに影響していると考えられる。

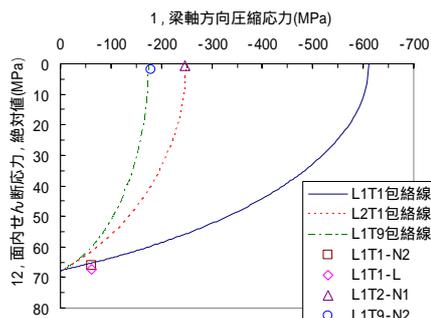


図 - 6 降伏規準を満たした節点の応力状態 (強度時の1つ前の荷重時)

3.3 考察

完全剛結とすると実験の剛性より大きい値が得られ、接触解析では実験を再現できるまで剛性が小さくなることから、界面にはずれが生じていたと考えられる。

L1T1-N2 と L, L1T2-N1 及び L1T9-N2 は、破壊に至るまでの剛性が実験と概ね一致しており、本解析で用いた応力 - ひずみ関係の適用性が見られた。しかし、L9T1-N1 と L では、 P_c を超えると剛性が実験より小さくなった。これは、圧縮硬化剛性 E_{c2} を小さく推定したことが実験との差の要因だと考えられる。

L1T2-N1 と L1T9-N2 に関しては、実験の強度より小さく、終局変位も 50% 程度であった。これらのケースでは σ_1 による寄与が支配的であることから、圧縮強度 σ_1^c の影響が大きいと考えられる。積層構成によって、材料試験方法が異なるため、L1T2 と L1T9 の σ_1^c が実際より小さかった可能性がある。

L1T1-N2 と L では、実験と剛性、強度、破壊性状が一致し、卓越する σ_1 と τ_{12} の組合せが Tsai-Wu の降伏規準を満たして破壊したと考えられる。しかし、その他の供試体では、剛性、強度、破壊性状の一部が一致しない結果であった。今後は、応力分布、ひずみ分布、ひび割れ分布などを実験結果と比較し、さらに検討していく必要がある。

4. まとめ

本論文では、軸力作用下における CFRP・コンクリート合成梁の変形および強度特性を明らかにすることを目的として 3 次元有限要素解析を行った。この解析の特徴は次の 3 点である。1) CFRP とコンクリートの界面を接触解析とした場合と完全剛結とした場合を比較したこと、2) CFRP の拘束による中詰めコンクリートの圧縮硬化を Samaan 式による応力 - ひずみ関係を仮定して考慮したこと、3) CFRP の降伏規準に Tsai-Wu の降伏規準を用いたこと。以下に得られた結論を示す。

(1) 接触解析では、完全剛結と比較して実験の梁の剛性を再現でき、合成梁の界面では軸力作用下においてもずれが生じていたと考えられる。よって、界面の

考慮が変形特性を把握する上で必要であった。

- (2) CFRP の拘束効果を仮定したコンクリートの応力 - ひずみ関係を用いることで、実験の梁の剛性とある程度一致したことから、合成梁の変形を算定するためには、CFRP の拘束によるコンクリートの圧縮硬化の考慮が重要であると考えられる。
- (3) L1T1-N2 と L では実験の挙動と一致し、梁の強度を評価する上で、卓越する σ_1 と τ_{12} の組合せが破壊に影響することを示した。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造シリーズ 03, 複合構造技術の最先端, pp.121-126, 2007
- 2) 小林朗他：CFRP を利用したシールドトンネルセグメントの技術的フィージビリティ・スタディ, 土木学会第 61 回年次学術講演会, CS10-007, 2006
- 3) 石塚与志雄他：CFRP を利用したシールドトンネルセグメントの経済的フィージビリティ・スタディ, 土木学会第 61 回年次学術講演会, CS10-008, 2006
- 4) 稲田裕他：CFRP を用いた合成セグメントの強度特性に関する実験的検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, CS15-009, 2007
- 5) Mallick, P.K. : Fiber reinforced composites-materials, manufacturing ,and design ,Marcel Dekker Inc ,p.550 , 1993
- 6) Toray : Fundamentals of carbon fiber technology and their application to "Torayca" products-Functional and composite properties , <http://www.torayca.com/techref/index.html>
- 7) Hyer , M.W. : Stress analysis of fiber reinforced composite materials , WCB/McGraw-Hill , pp.58 , 387-395 , 502-508 , 1998
- 8) MSC Software : MSC. Marc A 編 理論およびユーザー情報 , pp.314-316 , 352-363 , 449-478 , 2003
- 9) Samaan , M. , Mirmiran , A. , and Shahawy , M. : Model of concrete confined by fiber composites , Journal of Structural Engineering ,ASCE ,124(9) , pp.1025-1031 , 1998
- 10) Buyukozturk , O : Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures , Computers and Structures , Vol.7 , pp.149-156 , 1977
- 11) Mirmiran ,A. ,Shahawy ,M. ,Samaan ,M. ,El Echary , H. , Mastrapa , J. C. , and Pico , O. : Effect of column parameters on FRP-confined concrete , Journal of Composites for Construction ,ASCE ,2(4) ,pp.175-185 , 1998
- 12) Iscimen , M. : Shearing behavior of curved interfaces , MS thesis ,Georgia Institute of Technology ,USA , 2004