

Title	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
Author(s)	
Citation	コンクリート工学年次論文集, 32(2), 1297-1302
Issue Date	2010
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/51986
Туре	article
File Information	PJCI32_1297-1302.pdf



Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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 した場合で比較し,CFRPの拘束による中詰めコンクリ-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 を中詰めした合成構造である。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



^{*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)

*****	出合	梁軸方向:梁周方向の繊維量の比率(括弧内は積層数)			供老		
们补补付工	41 <u>1</u>	9(22):1(3)	1(13):1(12)	1(7): 2(18)	1(3):9(22)	1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1	
σ_I^T		1790	1759	715	295	鋼管掴み引張試験値	
$\sigma_{I}{}^{C}$		-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	
$\sigma_2^{\ C}$		-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)	
$\sigma_3{}^C$		-173	-173	-173	-173	L9T1 から L1T9 の中で最小の д ^C を仮定	
$ au_{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	
$ au_{23}{}^U$	MPa	32	32	32	32	G23の限界ひずみ 1%と仮定	
$ au_{3I}{}^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_I		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 ^の	
G_{I2}		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_{3l}		3200	3200	3200	3200	G23 と同じと仮定	
<i>V</i> 12		0.130	0.080	0.044	0.0276	JIS 準拠クーポン試験値	
<i>v</i> ₂₃		0.460	0.465	0.462	0.432	古典積層理論に基づき仮定	
<i>v</i> ₃₁		0.0374	0.0488	0.101	0.187	古典積層理論に基づき仮定	

表 - 1 CFRP 積層板の材料特性

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 載荷方法

載荷実験は,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載荷を始め,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。 (1)

$$M/N = 0.04 \,({\rm m})$$

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, おおよその 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 v_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。

 $F_{1}\sigma_{1} + F_{2}\sigma_{2} + F_{3}\sigma_{3} + F_{11}\sigma_{1}^{2} + F_{22}\sigma_{2}^{2} + F_{33}\sigma_{3}^{2} + 2F_{12}\sigma_{1}\sigma_{2}$ $+ 2F_{23}\sigma_{2}\sigma_{3} + 2F_{31}\sigma_{3}\sigma_{1} + F_{44}\tau_{23}^{2} + F_{55}\tau_{31}^{2} + F_{66}\tau_{12}^{2} = 1$

$$F_{1} = \frac{1}{\sigma_{1}^{T}} + \frac{1}{\sigma_{1}^{C}} , \quad F_{2} = \frac{1}{\sigma_{2}^{T}} + \frac{1}{\sigma_{2}^{C}} , \quad F_{3} = \frac{1}{\sigma_{3}^{T}} + \frac{1}{\sigma_{3}^{C}} , \quad F_{11} = \frac{-1}{\sigma_{1}^{T}\sigma_{1}^{C}}$$

$$F_{22} = \frac{-1}{\sigma_{2}^{T}\sigma_{2}^{C}} , \quad F_{33} = \frac{-1}{\sigma_{3}^{T}\sigma_{3}^{C}} , \quad F_{44} = \frac{1}{\left(\tau_{23}^{u}\right)^{2}} , \quad F_{55} = \frac{1}{\left(\tau_{31}^{u}\right)^{2}} , \quad F_{66} = \frac{1}{\left(\tau_{12}^{u}\right)^{2}}$$

$$F_{12} = -0.5\sqrt{F_{11}F_{22}} , \quad F_{23} = -0.5\sqrt{F_{22}F_{33}} , \quad F_{34} = -0.5\sqrt{F_{33}F_{11}}$$

$$(2)$$

表 2 コンクリート材料特性

	中詰めコンクリート					
材料特性	普通	低強度				
	第1期(N1)	第2期(N2)	L			
<i>f</i> ' _{<i>c</i>0} (MPa)	31.7	28.9	19.4			
E_c (MPa)	28480	31820	26710			
V _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



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 - 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一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。

$$\sigma_{c}^{'} = \frac{\left(E_{c} - E_{c2}\right)}{\left[1 + \left(\frac{\left(E_{c} - E_{c2}\right) \cdot \varepsilon_{c}^{'}}{f_{0}}\right)^{n}\right]^{1/n}} + E_{c2}\varepsilon_{c}^{'}$$
(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*,を算定した。

$$f_{cu}^{'} = f_{c0}^{'} + 6.0 f_{r}^{0.7}$$
, $f_{r} = \frac{2\sigma_{2}^{r} \cdot t}{D}$ (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, 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。

$$E_{c2} = 245.61 \left(f_{c0}^{\prime} \right)^{0.2} + 1.3456 \frac{E_2 t}{D}$$
(5)

$$f_0 = 0.872 f_{c0}' + 0.371 f_r + 6.258$$

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。

$$\varepsilon_{cu}^{'} = \frac{f_{cu}^{'} - f_{0}}{E_{2}}$$
(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。



(5) CFRP とコンクリ - 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'co に達する時の 荷重 Pc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かめ 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-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。

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

表 - 3 解析に用いた中詰めコンクリートのパラメータ

(6)



(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

表-4 実験と解析の強度の比較

供試	梁の強度(kN)						
体名	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				



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 の結果は除いた接触解析の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。



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_l による寄与が支配的であることから,圧縮強度 σ_l^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_l^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 σ₁ と τ₁₂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 σ₁ と τ₁₂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
- 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
- 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
- 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/techre f/index.html
- 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
- 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
- Buyukozturk , O: Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures , Computers and Structures , Vol.7 , pp.149-156 , 1977
- 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
- Iscimen , M. : Shearing behavior of curved interfaces , MS thesis ,Georgia Institute of Technology ,USA , 2004