中詰め材を有する CFRP 角柱の圧縮挙動に関する有限要素解析

Finite element analysis on CFRP box columns with infill material in compression

北海道大学大学院工学研究科	○学生員	池田 真	(Makoto Ikeda)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	松本 高志	(Takashi Matsumoto)
北海道大学大学院工学院	学生員	櫻庭 浩樹	(Hiroki Sakuraba)
北海道大学大学院工学研究院	F会員	林川 俊郎	(Toshiro Hayashikawa)

1. はじめに

近年,土木構造物へ炭素繊維強化ポリマー(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)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⁾.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 を活用した場合断面 を薄肉化することができ,掘削外形の縮小などによる建 設コストの低減が期待される.また優れた耐腐食性も有 することから下水道トンネルなど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軸力作用下における CFRP・コン クリート合成梁の曲げ載荷試験が行われており²⁾,これ までに CFRP の積層構成が構造部材の破壊と変形の性状 に及ぼす影響が大きいことが確認されている.また,関 連して圧縮,引張,せん断の要素試験も行われてきた. しかし,要素試験で観察された強度・変形特性について も CFRP の積層構成の影響が大きいことが確認されている.

そこで本論文では、要素試験の一つである中詰め材を 有する CFRP 角柱の圧縮試験を対象とし、積層構成の異 なる角柱試験体の挙動について有限要素解析を行い、中 詰め材が圧縮特性に及ぼす影響について検討することを 目的としている.

2. 試験概要

2.1CFRP 角柱の圧縮試験

試験では異なる積層構成の CFRP 角柱に中詰め材とし てモルタルを充填し,端部を石膏で固定している. CFRP 角柱は高さ 80mm, 1 辺 40mm の中空正方形断面 で板厚は 3mm である.載荷方法は,荷重制御により荷 重が低下するまで角柱試験体軸方向に載荷している.ま た写真-1 に示す位置にひずみゲージが貼付されている. 図-1に試験体形状を示す.

対象となる CFRP 角柱は軸方向(L)と周方向(T)の繊維 比率が異なる 3 種類の積層構成(L9T1, L2T1, L1T1)で あり, L と T の比率は 9:1, 2:1, 1:1 である.供試体本 数は各種類 3 本ずつ製作された.

2.2 試験結果

試験では、中詰め材モルタルを有する試験体の場合, 試験体中腹部の CFRP において破壊が生じた(写真-2 参照). また中詰め材を有しない場合と比較して最大荷 重は増加し、CFRP の応力とひずみは減少した. 試験で 得られた最大荷重, CFRP の応力と最大ひずみはについ

表-1 試験結果

市主社	荏屈堪击	最大荷重	CFRP 応力	CFRP ひずみ
中面的	惧眉伸风	(kN)	(N/mm ²)	(μ)
	L9T1	299	412	4570
有	L2T1	298	394	6935
	L1T1	292	371	8492
	L9T1	246	555	5225
無	L2T1	245	553	7696
	L1T1	268	605	9726



図-1 試験体形状



写真-1 試験体

写真-2 載荷後試験体

て,3種類の積層構成の試験体各3本から得られたものの平均値を表-1に示す.

CFRP 角柱圧縮の FEM 解析 3.1 解析モデルの概要

本稿では3種類の積層構成のうちL9T1を対象とする. 有限要素解析の対象は前述した中詰め材にモルタルを使 用し端部を石膏で固定したものである.解析では,直交 異方性の8節点ソリッド要素を用い,角柱は1/4対称モ デルとしている. 表-2に試験から得られた特性値と 文献等から仮定したL9T1の積層構成の材料特性値³⁾⁴⁾ を示す.パラメータの添字1,2,3,はそれぞれ,角柱 軸方向,周方向,積層方向を示す.表-2から CFRP は 1 方向引張強度が高く,せん断強度が低いことがわかる. また,積層方向の強度を除き引張強度に比べ圧縮強度が 低くなっている.

3.2 Tsai-Wu の破壊規準

CFRP の破壊規準には、Tsai-Wu の破壊規準⁵を用い ている.この破壊規準は CFRP のような直交異方性の積 層板において、6 つの応力状態を考慮する式であり、材 料強度から異方性を考慮した係数を得ることができる. 式(1)に Tsai-Wu の破壊規準を示す.また各パラメータ は式(2)、式(3)により与えられ、表-2 の材料特性によ り決まる.L9T1 の角柱試験体について、式(1)の左辺で 表される破壊指標値が右辺と等しくなったとき破壊が生 じる.

$$F_{1}\sigma_{1}+F_{2}\sigma_{2}+F_{3}\sigma_{3}+F_{11}\sigma_{1}^{2}+F_{22}\sigma_{2}^{2}+F_{3}\sigma_{3}^{2}$$

$$+2F_{2}\sigma_{2}\sigma_{2}+2F_{2}\sigma_{2}\sigma_{2}+2F_{2}\sigma_{2}\sigma_{2}+F_{2}\sigma_{2}^{2}+F_{2}$$

$$F_{i} = \frac{1}{\sigma_{i}^{T}} + \frac{1}{\sigma_{i}^{C}}, F_{ii} = -\frac{1}{\sigma_{i}^{T} \cdot \sigma_{i}^{C}} \quad (i=1,2,3)$$
(2)

$$F_{44} = \frac{1}{\left(\tau_{23}^{\mu}\right)^2} , F_{55} = \frac{1}{\left(\tau_{31}^{\mu}\right)^2} , F_{66} = \frac{1}{\left(\tau_{12}^{\mu}\right)^2}$$
(3)

3.3 端部境界条件と隅角部の取り扱い

端部境界条件については、石膏による固定を水平変位 固定と仮定し、既往の研究^のに基づき、モデル上下の一 要素分の節点を固定することとした.また、CFRP 角柱 の隅角部も既往の研究^のと同様に水平方向の材料特性が 等しい横等方性とせずに側面の材料特性を角部まで延長 したものを用いた.そして、載荷板は CFRP 角柱の上面 と下面に 5mm 厚の鋼板としてモデル化した.

3.4 中詰め材と境界条件

本解析において中詰め材モルタルの材料特性は, 試験 結果に基づき弾性係数 $E_m=23593$ MPa, ポアソン比 μ =0.17, 一軸圧縮強度 f'_c=17.8MPa とした.本解析にお いてはモルタルの破壊を考慮する場合,式(4)に示すコ ンクリートの降伏規準である Buyukozturk 則⁷⁾⁸⁾を用い た.

$$3J_2 + \sqrt{3}\beta\sigma_0 J_1 + \alpha J_1^2 = \sigma_0^2 \tag{4}$$

Buyukozturk 則はコンクリートの多軸応力下における破 壊規準であり、圧縮強度が引張強度を 10 倍程上回るコ ンクリートの性質を表すことが可能である. 各パラメー タは $\beta = \sqrt{3}$, $\alpha = 0.2$, $\sigma_0 = f'_c/3 = 5.933$ を用いた. そして $J_1 \ge J_2$ は以下の(5)式で与えられる.

$$J_{1} = \sigma_{11} \qquad J_{2} = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \qquad S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (5)$$

モルタルの破壊に加えて、CFRP とモルタルの接触面を 完全剛結の場合と、CFRP とモルタルの節点をずれが生 じるものとして、接触解析機能⁸⁾を使用した場合の2 ケースについて検討した.CFRP とモルタルの界面にお いてずれを考慮する場合、摩擦係数は0.4 とした.

表一2 材料特性

σ_1^{T}	2352	σ_3^{T}	62
$\sigma_1^{\ C}$	-674	$\sigma_3^{\ C}$	-173
$\sigma_2^{\ T}$	295	E ₃	8500
$\sigma_2^{\ C}$	-173	$\tau_{23}{}^u$	32
E ₁	98100	$\tau_{31}{}^u$	49.5
E_2	20900	G ₂₃	3200
$\tau_{12}{}^u$	71.1	G ₃₁	3200
G ₁₂	3500	μ_{23}	0.46
μ_{12}	0.13	μ_{13}	0.43

単位:MPa(μを除く)

表-3 ケース対応表

		接触	
		有	無
破	有	CaseA	CaseB
壊	無	CaseC	CaseD



モルタルの破壊を考慮しない場合にも同様の2ケース を検討した.表-3 に全ケースを示す.また鋼板と CFRP もしくはモルタルとの接触面は完全剛結とした. 対称面は直交方向に固定とし,モデル下面は角柱軸方向 に固定とした.載荷方法は上面から試験時と同様に荷重 制御により力を加えた.解析モデルを図-3に示す.

4. 解析結果

4.1 荷重-ひずみ関係の比較

図-4 に試験により得られた荷重-ひずみ関係の平均 値と解析結果を示す.解析によるひずみは試験体のひず みゲージ位置の値を平均したものである.解析ではいず れかの要素が破壊規準を満たすと,全体に破壊が進行し てひずみが増大するため,破壊が生じる一段階手前の値 を最終の値としている.

図-4 よりモルタルの破壊を考慮しなかった CaseC と CaseD が試験より最大荷重が大きい結果となった.モル

タルと CFRP を剛結とした場合と接触を考慮した場合で も大きな変化は無く,接触を考慮した場合に 3%程度傾 きが減少した.次に CaseA と CaseB では,試験と比較 して破壊荷重が小さい結果となったが,その差は縮まっ た.これらの Case においても,モルタルと CFRP を剛結 とした場合と接触を考慮した場合に大きな変化は見られ ず,接触を考慮した方が 2%程度減少するという結果と なった.モルタルの破壊を考慮した場合,考慮しなかっ た場合と比較して約 30%傾きが減少した.以上より, モルタルの破壊を考慮することで,傾きと破壊荷重は試 験値に近づくことが確認された.

4.2 破壊性状の比較

解析結果では、CaseA と CaseB, CaseC と CaseD がそ れぞれ同じ破壊性状を示した.破壊箇所と該当箇所の節 点を含む角柱軸方向の破壊指標値分布を図-5 と図-6 に示す. CaseA と CaseB の破壊箇所は試験体の内側角 部の中腹部であり図-5 が示すように上端と下端から中 腹部に向け破壊指標値が増加して、試験と同様に中腹部 で破壊した.一方 CaseC と CaseD の破壊箇所は試験体 外側の端部、石膏固定を仮定した要素の隣の節点であり、 上下両端で見られた.破壊指標分布は図-6 に示す通り であり、破壊位置は試験と異なった.

4.3変形性状の比較

図-7 に破壊荷重時の角柱側面の面外方向変位を示す. 前節と同じく CaseA と CaseB, CaseC と CaseD がそれ ぞれ同様の変形性状を示した. どのケースも面外方向に 変位が発生しているが,破壊荷重時においてモルタルの 破壊を考慮した CaseA と CaseB では中腹部において変 位が天きい. 一方, CaseC と CaseD では面外方向に変 位が発生しているが CaceA や CaseB に比する変位は見 られなかった. 以上より,接触の考慮の有無に関わらず, モルタルの破壊の考慮が変形に大きく影響を与えること が示された. これはモルタルが一定の荷重に達した後に 破壊を起こし, モルタルを拘束している状態にある CFRP を内側から圧迫し図に示すような変位になったと 考えられる.

4.4 考察

解析結果の比較により,モルタルの破壊を考慮するこ とが,破壊性状および破壊荷重に大きい影響を与えると いうことが示された.また CFRP とモルタルを剛結にし た場合と接触を考慮した場合とではわずかな変化が生じ たが,これは接触関係に強度を持たせなかったため界面 全体にずれが生じていたことが影響していたと考えられ る.

CaseB の破壊箇所において破壊指標値に占める各応力 成分の割合を図-8 に示す.角柱軸方向の応力(σ_1)が卓 越しており,これが破壊に大きく寄与していると考えら れる.しかしながら, σ_1 と比較すると小さいものの角 柱板厚方向の応力(σ_3)が発生しており,これが破壊箇所 において集中的に破壊指標値が上昇する要因となったと 考えられる.

次に図-9 に以下の式により得られる中詰め材を有しな い場合と中詰め材を有する場合の CFRP 角柱の理論強度, モルタル強度,解析値(CaseB と CaseC)と試験値を示す.







図-6 破壊箇所(CaseC, CaseD)



図-7 最大荷重時の面外方向変位



図-8 破壊指標に占める各応力成分の割合(CaseB 破壊部)

$$(I) P_{cf} = \sigma_1^c A_{cf} \quad (2) P_{mor} = \sigma_m^c \frac{A_e}{n} \quad (3) P_e = \sigma_1^c A_e \quad n = \frac{E_1}{E_m}$$

- ①CFRP の断面のみを考慮し、CFRP の応力が圧縮強度 σ₁^cに達する時の荷重
- ②モルタルを CFRP に換算した換算断面において, CFRO の応力がモルタルの一軸圧縮強度に達するとき の荷重
- ③モルタルを CFRP に換算した換算断面において, CFRP の応力が圧縮強度 σ_1 に達する時の荷重

 A_{cf} :CFRP 角柱の断面積 A_e :換算断面, σ'_m :モルタルの 圧縮強度, E_m :モルタルのヤング係数, n:ヤング係数比

モルタルの破壊を考慮した Case においては接触の考 慮の有無に関わらず,モルタル強度付近(50kN)で直線の 傾きが減少し P の傾きに近付いた.よって対象とした 試験体では界面の接触を考慮することより,中詰め材の 破壊を考慮することで,角柱の圧縮挙動を再現すること が出来ると考えられる.また CFRP とモルタルを剛結と した場合と接触を考慮した場合に有意な差があまり生じ なかったのは,一軸圧縮試験であるため CFRP とモルタ ルの界面のずれが少なかったためであり,よって,モル タルの破壊が圧縮挙動に支配的であったためと考えられ る.

最後に試験値平均とモルタルの破壊を考慮した場合の 差が生じたのは、CFRP によるモルタルの拘束硬化を考 慮しなかったためであり、今後検討していく必要がある と考えられる.

5. まとめ

本報では、中詰め材を有した CFRP 角柱の圧縮挙動を 明らかにすることを目的として有限要素解析を用いた検 討を行った.解析の要点は次の点である.

i) CFRP とモルタルの界面の接触を考慮した場合と完全 剛結とした場合との比較検討を行った.

ii)モルタルの破壊を考慮した場合と考慮せず弾性体として扱った場合との比較検討を行った.以下に得られた結論を示す.

 モルタルの破壊を考慮した場合のみ、試験時と同様 に中腹部で破壊が生じた.よって中詰め材モルタル



を有する場合,接触を考慮するよりも破壊を考慮し た方が影響は大きく,試験の状況を再現できた.

 破壊に寄与する応力成分から角柱軸方向σ₁成分と 角柱板厚方向σ₃成分による組み合わせが破壊に影 響することを示した.

謝辞

本研究で用いた試験結果は清水建設株式会社技術研究 所の御厚意により提供されました.ここに記し,御礼申 し上げます.

【参考文献】

- 小林朗・松本高志・後藤茂・石塚与志雄・杉山博 ー・入矢桂史郎・松井孝洋: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,年次学術講演会講演概要集,土木 学会,CS10-007, pp. 455-456, 2006.
- 2) 稲田裕・吉武謙二・杉山博一・後藤茂・石塚与志雄・松本高志・鈴川研二・松井孝洋:CFRPを用いた合成セグメントの強度特性に関する試験的検討, 年次学術講演会講演概要集,土木学会,CS15-009, pp. 493-494, 2007.
- 3) 櫻庭浩樹・松本高志・稲田裕・松井孝洋: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, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会 vol.32 pp.1297-1302, 2010.
- 4) 稲田裕・吉武謙二・杉山博一・後藤茂・石塚与志 雄・松本高志・鈴川研二・松井孝洋:CFRP・コン クリート合成梁の強度特性に関する検討,年次学 術講演会概要集,土木学会,CS02-47,2008.
- 池田真・松本高志・櫻庭浩樹・林川俊郎:CFRP 角 パイプの圧縮挙動に関する有限要素解析,土木学 会北海道支部論文報告集,土木学会北海道支部, A-5,2010.
- Oral Byukozturk:Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures, Computers and Structures, 1977.
- 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