論文 コンクリート充填楕円鋼管部材の純曲げ実験

上中 宏二郎*1·角掛 久雄*2

要旨:コンクリート充填楕円鋼管部材(CFEST)とは,楕円形状の鋼管にコンクリートを充填した新しい形式 の構造部材であり、コンクリート充填鋼管部材(CFT)の一種である。本研究では、直径比 a/b=2.0 の CFEST の曲げ特性の把握を目的とした四点曲げ載荷実験を合計6体行い、破壊形式、変形特性、曲げ強度ならび に応力状態から考察を加えたものである。得られた結果より、CFESTの径厚比(2a/t),ならびに載荷方向が 曲げ特性に与える影響について検討した。さらに、CFTと同様の手法を用いて純曲げ強度算定式の推定を試 みた。最後に、純曲げモーメント作用下での楕円鋼管に作用する二軸応力状態について言及した。 キーワード:コンクリート充填楕円鋼管部材,径厚比,四点対称曲げ載荷,純曲げ強度,二軸応力

1. まえがき

コンクリート充填楕円鋼管部材(Concrete filled elliptical steel tubular members,以下,CFEST とする。断面は図-1参照)とは、楕円形状の鋼管にコンクリートを充填し た新しいタイプの鋼・コンクリート合成構造部材であり 高靭性, 高耐久性のコンクリート充填鋼管部材 1)-2) (Concrete filled steel tubular members,以下,CFTとする) の一種である。CFEST を河川内の橋脚に用いれば、水流 をなめらかにすることができるため、洗掘の問題が軽減 できると考えられる。実際、従来の河川橋脚に小判型が 多いのはそのためであり、それに類似する形状を有する CFEST の適用は十分に考えられる。さらに、橋脚と上部 工の一体感が生まれるため,景観性が良くなる利点を有 する。

楕円鋼管,ならびに CFEST に関する既往の文献を概 観すれば、主に建築部材への活用を目的とした楕円鋼管 または CFEST 短柱の圧縮特性に関する検討³⁾⁻⁵⁾,曲げせ ん断に関する検討⁶⁻⁸⁾,長柱座屈に関する検討⁹⁻¹⁰⁾,なら びに接合面の応力伝達特性に関する検討 11-12)がなされて いる。また, Espsinos らは CFEST の耐火特性に関する検 討¹³⁾を行っている。しかしながら、上述の研究で取り 扱っている楕円鋼管の長径方向の径厚比(2a/t)は、28~ 40の範囲の小さいものであり、橋脚などの土木構造物 の適用に合致するものではない。

このような背景の下,著者の一部は径厚比(2a/t)が70 以上の CFEST 短柱の中心圧縮実験¹⁴を行い、CFEST 短 柱が従来の CFT と同様に算定して良いことを確認して いる。そこで、本研究では引き続き大径厚比(2a/t>70)を 有する CFEST の径厚比,ならびに載荷軸方向(Major / Minor)を実験変数とした6体の対称四点曲げ載荷による 純曲げ実験を行い、上記パラメータが純曲げ特性に与え る影響について考察した。さらに、鋼管に貼付したひず みゲージより,純曲げが作用する CFEST の鋼管部分の *1神戸市立工業高等専門学校 都市工学科准教授 博(工) (正会員)



弾塑性応力状態についても言及した。

2. 実験方法

2.1. 供試体の概要

表-1に供試体一覧を示す。供試体の長さ(H)は160mm としており、供試体数は、2種類の実験変数、すなわち

*2大阪市立大学大学院工学研究科 都市系専攻講師 博(工) (正会員)

| | Tag | Elliptical steel tube | | | | | | | | Conc. |
|----|----------|-----------------------|-----------------|-----------------|-------|------|--------|-------|-------|----------------|
| No | | Thick. | Diameter | | Ratio | | Length | | f_y | strength |
| | | t(mm) | 2 <i>a</i> (mm) | 2 <i>b</i> (mm) | 2a/t | 2b/t | L(mm) | axis | (MPa) | f_c' (MPa) |
| 1 | 10-minor | 1.0 | 160 | 80 | 160.0 | 80.0 | | minor | 196.0 | - 37.9 - |
| 2 | 10-major | 1.0 | 160 | 80 | 160.0 | 80.0 | 160 | major | | |
| 3 | 16-minor | 1.6 | 160 | 80 | 100.0 | 50.0 | | minor | 313.3 | |
| 4 | 16-major | 1.6 | 160 | 80 | 100.0 | 50.0 | | major | | |
| 5 | 23-minor | 2.3 | 160 | 80 | 69.6 | 34.8 | | minor | 298.7 | |
| 6 | 23-major | 2.3 | 160 | 80 | 69.6 | 34.8 | | major | | |

表-1 供試体一覧



図-3 鋼管の詳細とひずみゲージ貼付位置 (Major 軸実験)



写真-1 載荷風景

径厚比(2a/t)と載荷軸方向(Major /Minor)を組み合わた合計6体である。周知のとおり,楕円鋼管は2種類の直径を有するので,大きい直径(2a)の長さをMajor軸,小さいもの(2b)をMinor軸としている。ここで,Major軸,ならびにMinor軸を回転させるモーメントををそれぞれMajor軸実験,Minor軸実験とする。また,径厚比(2a/t)の範囲は69.6~160となっている。なお,供試体は,t=1.0, 1.6ならびに2.3mmの鋼板を楕円形状に加工,Minor軸上で突合せ溶接した後,載荷治具とボルト接合するためのt = 12mmの鋼板(Connecting plate, 図-2,3参照)に





楕円の周方向に沿って溶接した。最後に, *t*=1mmの鋼板 は電気亜鉛メッキ鋼板を用いている。

2.2. 測定項目

図-2ならびに図-3に示すように、楕円鋼管部材軸 方向中央に二軸ひずみゲージを上下左右に貼付し、鋼管 の応力状態を測定した。また、部材軸方向中央と楕円鋼 管両端に50mmの変位計を設置し、CFESTの変形性能を 測定した。

2.3. 載荷方法

載荷方法は、**図-4**a)に示すように、CFEST 両端を 載荷治具(Side beam)に高力ボルトで接合した後,載荷は り(Loading beam)を介した四点曲げ対称載荷により, CFEST 供試体に純曲げモーメント($M=Pl_1/2$, 図-4b), c)参照)を破壊モードが明確に確認できるまで作用させた。なお,楕円鋼管の溶接箇所は Minor 軸上に位置しており(図-1参照),曲げの影響を受けにくい中立軸,あるいは,ポアソン比の効果を得るために引張側とした。 最後に,載荷風景を写真-1に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊形式

写真-2に得られた破壊形式の典型例として, t= 1.6mmのMajor軸実験,ならびにMinor軸実験の実験終 了後の状態を示す。両実験ともに,従来のCFT同様に曲 げ圧縮側で局部座屈が発生した後,曲げ引張側の鋼管が 破断するものであった。これは,全供試体6体に共通す るものであった。さらに,Major軸実験では中立軸から引 張,圧縮両縁までの距離が短いため,局部座屈発生後, Minor軸実験よりも大きな変形が発生するまで鋼管引張 破断に至らなかった。なお,心配された楕円鋼管の溶接 切れは見られなかった。

3.2 変形特性

図-5に作用純曲げモーメント M (=Pl₁/2)と中央の変 位(のの関係を示す。Major 軸, Minor 軸両実験ともに, 鋼 管厚(t)が大きくなると変形性能(作用曲げモーメント M と変位 &の面積)の向上が見られる。これは, 鋼管厚が大 きくなることに起因する曲げ剛性の増加のためと考えら れる。また,変形量が 35mm を超えても,顕著な耐力低 下は見られず, CFEST は CFT 同様に優れた変形性能を 有することも確認できる。さらに,断面剛性(曲げ剛性) が小さい Major 軸実験では,載荷初期から緩やかな曲線 を描くため,明確な変曲点は現れにくいこともわかる。

3.3 純曲げ強度

(1)純曲げ強度(M)と径厚比(2a/t)

図-6に純曲げ強度(*M*_a)と径厚比(2*a*/t)の関係を示す。 同図より、当然のことながら、Major 軸、ならびに Minor 軸実験ともに、径厚比(2*a*/t)が大きくなると純曲げ 強度(*M*_a)が低下する傾向が現れている。これは、前述し たように、鋼管厚による曲げ剛性の影響に加えて、鋼管 厚が薄くなることにより起因する拘束効果の低下による 純曲げ強度(*M*_a)の低下と考えられ、従来のCFT部材と同 様である。

(2)純曲げ強度(M)の一計算例

まず,純曲げ強度の算定として,ベルヌーイの仮定に よる等価応力ブロックを用いた RC の曲げ強度算定に準 じ,鋼管とコンクリートの応力状態をそれぞれ図-7の 通りとした。すなわち,鋼管は全断面の圧縮,引張応力 を考慮しているのに対し,コンクリートは圧縮領域のみ 考慮している。この仮定により,軸力(*Nest*)ならびに曲げ



モーメント(Mest)は以下の通りとなる。

$$N_{est} = \frac{1}{2} k f_c' ab(\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha) - \frac{f_v}{2} t(a+b-t)(\sin 2\alpha + 2\alpha)$$
(1a)

| Teg | | | [1] | [2] | [3] | [4] | [1]/[2] | [1]/[3] | [1]/[4] |
|-----|----------|-----------|--------------|------------------|----------------|--------------------|---------------|----------------------|-----------------|
| | Tag | $P_u(kN)$ | M_u (kN m) | M_{est} (kN m) | $M_{est_{fu}}$ | M_{est_c} (kN m) | M_u/M_{est} | $M_{u}/M_{est_{fu}}$ | M_u/M_{est_c} |
| 1 | 10-minor | 81.0 | 10.6 | 2.5 | 4.2 | 67 | 4.24 | 2.53 | 1.59 |
| 2 | 10-major | 38.5 | 5.0 | 1.3 | 2.3 | 0.7 | 3.83 | 2.22 | 0.76 |
| 3 | 16-minor | 108.0 | 14.1 | 6.0 | 6.8 | 157 | 2.37 | 2.08 | 0.90 |
| 4 | 16-major | 59.8 | 7.8 | 3.3 | 3.8 | 13.7 | 2.35 | 2.05 | 0.50 |
| 5 | 23-minor | 164.6 | 21.6 | 8.0 | 9.7 | 20.5 | 2.71 | 2.23 | 1.05 |
| 6 | 23-major | 76.6 | 10.0 | 4.9 | 6.1 | 20.3 | 2.03 | 1.65 | 0.49 |

表-2 実験結果

$$M_{est} = \frac{2}{3} k f_c' a b (b+t) \cos^3 \alpha + \frac{2}{3} f_y t [t^2 - (2b+a)t + (2ab+b^2)] \cos^3 \alpha$$
(1b)

ここで, a, b: 楕円の Major 軸, Minor 軸の半径, t: 楕円 鋼管の板厚, α : 中立軸から圧縮領域底辺までの角度, f'_{c} : コンクリートの圧縮強度, f_{y} : 鋼管の降伏強度, k: コ ンクリートの圧縮強度の低減係数(=0.85)をそれぞれ示す。 式(1a)により, $N_{est}=0$ となる $\alpha = \alpha_{0}$ を求め, その α_{0} を式 (1b)に代入し, 算定純曲げ強度(M_{est})を求め, 実験曲げ強 度(M_{u})と比較する。

表-2に実験結果一覧を、図-8に算定曲げ強度(M_{est}) と M_u の関係をそれぞれ示す。同図より、式(1)に基づいて 算定を行うと、相対比(M_u / M_{est} =2.55)となり算定純曲げ 強度(M_{est})は純曲げ強度(M_u)を過小にに評価することがわ かった。また、式(1)にひずみ硬化を考慮して破断強度 f_u を代入し $M_{est,fu}$ を求めると $M_u / M_{est,fu}$ =2.11となり、 f_y に 基づくもの(M_{est})よりも算定強度に近い値となった。この 大きな差異は、供試体長さLが160mm であるため、充 填コンクリートに軸力が作用していたためと考えられる さらに、**表**-2内の $M_{est,c}$ は大きい直径 2aを有する円形 CFT の純曲げ強度を示しており、Minor 軸実験では、 $M_{est,c}$ を用いて概ね評価できることを示唆している。

3.4. 応力状態

(1)弾塑性応力の計算方法¹⁵⁾

鋼管には4枚の二軸ひずみゲージを貼付している。純 曲げモーメント作用下での二軸応力に着目し,これらの 軸方向(ε),ならびに周方向(ε)のずみを用いて,各鋼管 の応力状態を以下の手法により求める。なお,以下取り 扱う応力は全て圧縮を正の値としており,降伏応力 f_{j} は **表**-1に示すとおりであり,二軸応力 σ_{z} , σ_{θ} は部材軸方 向応力,円周方向応力をそれぞれ表している。

まず,弾性状態での応力増分($d\sigma_{\epsilon}, d\sigma_{\theta}$)とひずみ増分 ($d\epsilon_{\epsilon}, d\epsilon_{\theta}$)の関係は,式(2)のとおりとなる。

$$\begin{pmatrix} d \sigma_z \\ d \sigma_\theta \end{pmatrix} = \frac{E_s}{1 - v^2} \begin{pmatrix} d \epsilon_z \\ d \epsilon_\theta \end{pmatrix}$$
 (2)



図-6 純曲げ強度(Mu)と径厚比(2a/t)





つぎに、弾塑性状態での平面応力状態における Prandl-Reuss の構成則によると、部材軸と円周方向のひずみ増分をそれぞれ $d_{\mathcal{E}_{n}} d_{\mathcal{E}_{\theta}} とすると、両者に対応する各応力増分 <math>d_{\mathcal{O}_{z}}$ 、 $d_{\mathcal{O}_{\theta}}$ は式(3)の通りとなる。

$$\begin{cases} d \sigma_z \\ d \sigma_\theta \end{cases} = \begin{cases} \frac{E_s}{1 - v^2} \begin{pmatrix} 1 & v \\ v & 1 \end{pmatrix} - \frac{1}{S} \begin{bmatrix} S_1^2 & S_1 S_2 \\ S_1 S_2 & S_2^2 \end{bmatrix} \begin{cases} d \epsilon_z \\ d \epsilon_\theta \end{cases}$$
(3)

ここに, *E_s*, *v*は鋼管のヤング係数(=200GPa), ポアソン 比(=0.3)をそれぞれ示す。さらに *S*, *S*₁, *S*₂は

$$S = s_z S_1 + s_\theta S_2 \tag{4a}$$

$$S_1 = \frac{E_s}{1 - v^2} \left(s_z + v \, s_\theta \right) \tag{4b}$$

$$S_2 = \frac{E_s}{1 - v^2} (s_\theta + v s_z) \tag{4c}$$

となる。ここで、 s_z 、 s_θ は部材軸方向ならびに円周方向の 偏差応力をそれぞれ示す。鋼管が降伏し塑性状態に なった場合は、実験により得られたひずみ増分を式(3) に代入し、弾塑性応力を計算する。

(2)鋼管圧縮側

図-9に外鋼管上部に添付したひずみゲージより求め られた鋼管の応力状態を示す。ここで、図内波線は平面 応力状態での von Mises の降伏曲線であり、式(5)のとお りに表わされる。

$$\sigma_z^2 - \sigma_z \cdot \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = f_y^2 \tag{5}$$

ここで, f,は鋼管の降伏応力である。

図-9 a)に鋼管圧縮側の二軸応力状態を示す。Minor 軸実験においては、曲げによる軸方向圧縮応力(の)が降 伏点に到達後、コンクリートの圧縮による体積膨張の影 響により、引張側に流動する傾向を示すものも見られた。

しかしながら, Major 軸実験においては全供試体の周 方向応力が引張側に流動することは見られず, コンクリ ートの圧縮による体積膨張が見られなかった。これは, Minor 軸実験と比較して, 圧縮領域が少ないためである こと, また, ひずみゲージ貼付位置近傍に鋼管の座屈が 発生したため, ひずみが停滞したためであると考えられ る。

(3)鋼管引張側

図-10に、鋼管引張側の二軸応力状態を示す。純曲げ による引張が部材軸方向に作用し、σ-が降伏に到達後、 周方向応力 σ_θは引張側に流動した。上述で見られた圧縮 側の周方向の挙動とは異なり、これは CFT と同様に、



図-10 引張側の応力状態

ひび割れたコンクリートが引張側の鋼管を拘束するため であると考えられる。

4. まとめ

本論文は、直径比(a/b=2.0)のコンクリート充填楕円鋼 管部材(CFEST)の径厚比(2a/t)、ならびに載荷軸方向 (Major, Minor)を実験変数とした四点曲げ載荷による純 曲げ実験を行い、破壊形式、変形性能、純曲げ強度、な らびに楕円鋼管の二軸応力状態から考察を加えたもので ある。結論付けられる事項を以下に列記する。

- (1)得られた破壊形式は,楕円鋼管の圧縮側が局部座屈を起こした後,引張側の鋼管が破断するものであった。
- (2) 得られた変形性能は、径厚比(2a/t)が大きくなると変形性能が低下する傾向が見られた。これは、鋼管厚が薄くなることによる曲げ剛性の低下のためと考えられる。また、純曲げ強度(M_u)は、楕円鋼管の径厚比(2a/t)が大きくなると低下する傾向が見られた。これは、従来のCFTと同じものであった。
- (3) 等価応力ブロックの適用により CFEST の純曲げ強度 算定強度式を試みたところ,純曲げ強度(*M_u*)は算定 純曲げ強度(*M_{est}*)の2.55 倍となった。また,2*a*の直径 を有する CFT の算定曲げ強度(*M_{est}*)と Minor 軸実験 結果と比較したところ,概ね評価できることを示唆 した。
- (4) 鋼管に貼付した二軸ひずみゲージより、平面応力状態における弾塑性応力の計算を行ったところ、圧縮側では、純曲げによる軸方向圧縮応力(σ₂)が降伏点(f₂)に到達後、コンクリートのコンクリートの圧縮による体積膨張により引張側に流動した。
- (5)上記(4)の一方で、圧縮側で軸方向応力が圧縮降伏に 到達しても、鋼管の座屈の影響によりひずみが増え ることなく圧縮側に流動したのみで終局状態に至る ものも見られた。
- (6) 引張側では鋼管の周方向応力(の)は、軸方向引張力 (の)が降伏強度に到達後、引張側に流動した。これは、 ひび割れたコンクリートが引張側の鋼管を拘束する ためであると考えられる。また、これは従来のCFT と同様の挙動である。

謝辞:載荷実験の実施に当たっては、神戸市立工業高等 専門学校・専攻科都市工学専攻、ならびに同都市工学科 5年生の学生諸君にご協力頂きました。ここに記して感 謝の意を表します。

参考文献

- 日本建築学会:コンクリート充填鋼管構造設計施工 指針,2008.
- 日本建築学会:鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規 準・同解説,2001.

- Yang, H., Lam, D. and Gardner, L.: Testing and analysis of concrete-filled elliptical hollow section, *Engineering Structures*, Elsevier, Issue 30, pp. 3771-3781, 2008.
- Chan, T. M. and Gardner, L.: Compressive resistance of hot-rolled elliptical hollow sections, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 30 pp. 522–532, 2008.
- Zhao, X. L. and Packer, J. A.: Tests and design of concrete-filled elliptical hollow section stub columns, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol. 47, pp. 617-628, 2009.
- Chan, T. M. and Gardner, L.: Bending strength of hotrolled elliptical hollow sections, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 64 pp. 971–986, 2008.
- Gardner, L., Chan, T. M. and Wadee, M. A.: Shear response of elliptical hollow sections, *Structures & Buildings*, Vol. 161, Issue SB6, pp. 301-308, 2008.
- Theofanous, M., Chan, T. M. and Gardner, L.: Flexural behaviour of stainless steel oval hollow sections, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol. 47, Issues 6-7, pp. 776-787, 2009.
- Ruiz-Teran, A.M. and Gardner, L.: Elastic buckling of elliptical tubes, Thin-Walled Structures, Elsevier, Vol. 46, Issue 11, pp. 1304–1318, 2008.
- Gardner, L. and Chan, T. M.: Cross-section classification of elliptical hollow sections, *Steel & Composite Structures, -An International Journal,* Techno-Press, Vol. 7, No. 3, pp. 185-200, 2007.
- Willibald, S., Packer, J. A. and Martinez-Sauced, G.: Behaviour of gusset plate connections to ends of round and elliptical hollow structural section members, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 33, pp. 373-383, 2006.
- 12) Saucedo, G. M., Packer, J. A. and Zhao, X. L.: Static design of elliptical hollow section end-connections, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Structures & Buildings Vol. 161, Issue SB2, pp. 103-113, 2008.
- Espinos, A., Gardner, L., Romero, M. L. and Hospitaler, A.: Fire behavior of concrete filled elliptical steel column, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol. 49, Issue 2, pp. 239-255, 2011.
- 14) 上中宏二郎: コンクリート充填楕円鋼管合成短柱の 圧縮特性に関する基礎実験,鋼構造論文集,日本鋼 構造協会, Vol. 18, No. 70, pp. 49-54, 2011.
- 15) 吉田総仁:弾塑性力学の基礎,共立出版, pp. 188-190, 1997.