CES 柱の終局耐力評価法に関する研究

-鉄骨断面と CES 柱断面の終局曲げ耐力の関係-

日大生産工	(学部)	○宇都宮	陸
日大生産工		藤本 禾	旧昭

1. まえがき

鉄骨鉄筋コンクリート(Steel Reinforced Concrete:以下SRC)構造は他の構造に比べ,設計・施工が複雑かつ困難なことが工期の長期化やコスト高となる傾向にあり,バブル崩壊と同時期に建設数が急減した。そこで,耐震性はSRC構造と同等以上の新構造システムとして,鉄骨コンクリート(Concrete Encased Steel:以下CES)構造が開発された。CES構造は,内蔵鉄骨と繊維補強コンクリート(Fiber Reinforced Concrete:以下FRC)で構成されている¹⁾。

現在日本建築学会では、「鉄骨コンクリート (CES)構造物の性能評価型構造設計指針(案)・ 同解説」(以下CES指針)として、設計指針が作 成されている²⁾。CES指針では、耐震性能の評 価手法として、柱・梁部材の終局曲げ耐力を一 般化累加強度理論式にて算定できるが、詳細が 示された資料は少ない。そこで、本研究では耐 力曲線の算定式により、鉄骨断面とCES柱断面 の終局曲げ耐力の関係について明示すること にした。

2. 一般化累加強度理論式について

一般化累加強度理論式とは、コンクリート系 部材断面の最大曲げモーメントの算定に多く 用いられる式である。この累加強度式は断面の 構造材料が塑性材料であり、かつ、部材断面を 構成する各部材がつり合いと降伏の条件を満 たしていれば、それぞれ各部分の終局曲げ強度 を累加して求めた終局曲げ強度が真の強度に 等しいか、または小さいものであるという考え 方である³⁾。実際に、合成部材であるSRC部材 やCFT(Concrete Filled Steel Tube)部材に広く適 用されている。

CES構造においても既往の実験から,終局曲 げモーメントは,SRC規準の考え方に基づく一 般化累加強度理論式により精度良く評価でき ることが報告されている⁴。したがって,CES 柱の終局曲げモーメントは,次の式(1)より算 定する。

$$M_u = {}_c M_{u(cN)} + {}_s M_{u(sN)} \tag{1}$$

$$N_{\rm u} = {}_{\rm c}N + {}_{\rm s}N \tag{2}$$

[記号] M_u :部材の終局曲げモーメント, $_cM_{u(cN)}$:軸力 $_cN$ が作用したときのFRC部分の 終局曲げモーメント, $_sM_{u(sN)}$:軸力 $_sN$ が作用 したときの鉄骨部分の終局曲げモーメント, N_u :CES柱に作用する軸力, $_cN$:FRC部分の 負担軸力, $_sN$:鉄骨部分の負担軸力



[記号] D:柱せい, D_s:鉄骨せい, B:柱幅,
 B_s:鉄骨幅, sd:フランジ重心間距離, t_f:フランジ厚さ, t_w:ウェブ厚さ, X_n:中立軸までの距離

図1 CES 断面簡略図と中立軸位置

3. 終局曲げモーメントの算定

本研究では、文献5)に示された低層CES造の 試設計の柱断面を例として、検討を行った。使 用材料は、鉄骨をSN400(H-300×390×10×16)、 FRCをCES指針の最低設計基準強度であるF_c27 とした。かぶり厚さは50mmずつと想定し、 $B \times D$ =400×490とした。

A Study on Evaluation Method for Ultimate Strength of CES Columns - Relationship Between Steel Cross Section and CES Column Cross Section – Riku UTSUNOMIYA, Toshiaki FUJIMOTO

3.1 鉄骨の幅厚比の検討

CES構造は鉄骨がFRCで覆われており,鉄骨の幅厚比の制限値はSRC規準と同様に,S規準に対しフランジで1.5倍,ウェブで2.0倍と緩和されている。よって,表1に示すように幅厚比の制限を設けていることから,鉄骨の座屈は考慮しなくてもよい²⁾。

表1 鉄骨の幅厚比の制限

部位	幅厚比の検討式	
フランジ	$\frac{b}{t_f} \le 1.5 \times 0.53 \sqrt{\frac{E_s}{F}}$	
ウェブ	$\frac{d}{t_w} \le 2.0 \times 1.6 \sqrt{\frac{E_s}{F}}$	

[記号] b:H 形鋼フランジの公称全幅の 1/2, d:フランジの内法寸法, F:鉄骨の基準強度, Es:鉄骨のヤング係数

表1より、フランジ幅厚比は

$$\frac{150}{16} \le 1.5 \times 0.53 \sqrt{\frac{2.05 \times 10^6}{235}}$$

9.375 \le 74.25 OK

また、ウェブの幅厚比は

$$\frac{358}{10} \le 2.0 \times 1.6 \sqrt{\frac{2.05 \times 10^6}{235}}$$
$$35.80 \le 298.88 \quad OK$$

これより,フランジ,ウェブともに幅厚比の制 限を満たしていることが確認できた。

3.2 鉄骨の耐力曲線

鉄骨は次の式で表され,軸方向力の範囲により,ウェブ部分とフランジ部分の耐力を累加している。なお、ウェブ部分の全塑性応力状態での終局曲げ耐力は二次曲線となるが,式の簡略化のため,M-N軸上の接線で構成された近似耐力を用いている。また、ウェブは軸方向力のみに抵抗すると考えている⁹。

まず, 軸方向力の範囲が

 $-_{s}A \cdot {}_{s}\sigma_{y} \leq {}_{s}N \leq -\frac{sa_{w}}{2} \cdot {}_{s}\sigma_{y}$ である時,終局曲げモーメントは式(3)となる。

 $sM_{u(cN)} = sM_{max} + \frac{sd}{2} \left(sN + \frac{1}{2} \cdot sa_w \cdot s\sigma_y \right) (3)$ [記号] sA: 鉄骨断面積, sa_w : 鉄骨ウェブ 断面積, $s\sigma_y$: 鉄骨の材料強度, sM_{max} : 鉄骨 の全塑性モーメント

ここで、鉄骨の全塑性モーメント
$$_{s}M_{max}$$
は、 $_{s}M_{max} = _{s}Z_{p} \cdot _{s}\sigma_{y}$ である。
「記号」 $_{s}Z_{n}$:鉄骨の塑性断面係数

次に軸方向力の範囲が

 $-\frac{sa_{w}}{2} \cdot {}_{s}\sigma_{y} \leq {}_{s}N \leq \frac{sa_{w}}{2} \cdot {}_{s}\sigma_{y}$ となる時,終局曲げモーメントは式(4)となり, 鉄骨の全塑性モーメント ${}_{s}M_{max}$ に等しくなる。

$${}_{s}M_{u(cN)} = {}_{s}M_{max} \tag{4}$$

最後に軸方向力の範囲が

 $\frac{sa_{w}}{2} \cdot s\sigma_{y} \leq sN \leq sA \cdot s\sigma_{y}$

となる時, 式(5)で表され, 引張応力と圧縮応 力は等しくなるため, グラフは式(3)の直線をM 軸の線対称とした直線となる。

$${}_{s}M_{u(cN)} = {}_{s}M_{max} - \frac{{}_{s}d}{2} \Big({}_{s}N - \frac{1}{2} \cdot {}_{s}a_{w} \cdot {}_{s}\sigma_{y} \Big) (5)$$

以上のことから,鉄骨は(3), (4),および(5)式 より,耐力曲線は図2のようになる。



図2 鉄骨の耐力曲線

3.3 FRCの耐力曲線

FRCは圧縮力のみ負担すると考え,式(6)で表 される。耐力曲線は図3のようになる。

$${}_{c}M_{u(cN)} = \frac{\mathrm{D}}{2} \cdot {}_{c}N\left(1 - \frac{{}_{c}N}{{}_{u}}\right) \tag{6}$$

-22-

ここで, FRCの圧縮耐力 _cN_uは,

$${}_{c}N_{u} = B \cdot x_{n} \cdot {}_{c}\gamma_{u} \cdot \sigma_{B} \tag{7}$$

となる。ここで,鉄骨比に応じて定まるコンク リート強度の低減係数 _cyuは,通常のSRC断面 や鋼管を用いた被覆型や,充填被覆型と同様に, それらに鉄筋がない場合の値0.85を用いてい る。

$$c_{c}\gamma_{u} = 0.85 - 0.25 \ _{s}p_{c}$$
$$s_{c}p_{c} = \frac{sa_{c}}{b \cdot D}$$
$$s_{c}a_{c} = \frac{A_{f}}{2}$$

[記号] $_{c\gamma_{u}}$:鉄骨比に応じて定まるコンクリートの強度の低減係数, σ_{B} :FRCの圧縮強度, $_{s}p_{c}$:圧縮側鉄骨比, $_{s}a_{c}$:圧縮側鉄骨の断面積, A_{f} :フランジの断面積



3.4 CESの耐力曲線

中立軸の位置による軸力の大きさの違いから、終局曲げモーメントを求める。またグラフは、FRCの耐力曲線の原点を鉄骨の耐力曲線へ水平移動させ、累加することで作成する。中立軸位置の場合分けを図1のように、1) $X_n = 0$, 2) $0 \le X_n \le \left(\frac{D-D_S}{2}\right)$, 3) $\left(\frac{D-D_S}{2} + t_f\right) \le X_n \le \left(\frac{D+D_S}{2} - t_f\right)$, 4) $\left(\frac{D+D_S}{2}\right) \le X_n \le D$,および5) $X_n = D$ の五つに分け、順に示す。さらに、合わせた耐力曲線を図4に示す。

1) X_n = 0 軸力の範囲が

$$N = -_{s}N_{u} \tag{8}$$

の時,モーメントは式(9)となる。モーメント は作用せず,引張力は鉄骨のみが負担するため, 作用軸力は鉄骨の最大引張耐力となる。ここで, 鉄骨の引張応力 $_{s}N_{u}$ は,

$$sN_{u} = {}_{s}A \cdot {}_{s}\sigma_{y}$$

$$E - \mathcal{X} \times \mathbb{N}t$$

$$M = 0 \qquad (9)$$

2)
$$0 \le X_n \le (\frac{D-D_S}{2})$$

次に、軸力の範囲が

$$-_{s}N_{u} < N < -\frac{_{s}N_{w}}{2} \tag{10}$$

である時,1)と同様に,引張側に対しては鉄骨のみが負担するため,鉄骨の引張耐力の耐力曲線と等しくなる。ここで、ウェブ部分の負担軸力。Nwは次の式で表される。

$$_{s}N_{w} = _{s}A_{w} \times _{s}\sigma_{y}$$

モーメントの式は,式(11)となる。軸力とモー メントが同時に作用するため,全塑性曲げモー メントに近づくにつれ,軸力は小さくなる。

$$M = {}_{s}M_{max} \cdot \frac{\left(N + {}_{s}N_{u}\right)}{\left({}_{s}N_{u} - {}_{s}N_{w}/2\right)}$$
(11)

$$3 \left(\frac{D - D_S}{2} + t_f \right) \le X_n \le \left(\frac{D + D_S}{2} - t_f \right)$$

圧縮側では,鉄骨とFRCの累加強度による耐力となる。 $N = -_{s}N_{w}/2$ の鉄骨の耐力曲線上にFRCの耐力曲線を移動させ,足し合わせることでCESの耐力を示す。

軸力の範囲が

$$-\frac{{}_{s}N_{w}}{2} < N < \frac{{}_{c}N_{u}}{2} - \frac{{}_{s}N_{w}}{2}$$
(12)

の時、モーメントは

$$M = {}_{s}M_{max} + \frac{\mathrm{D}}{2} \cdot {}_{c}N\left(1 - \frac{\mathrm{c}N}{\mathrm{c}N_{\mathrm{u}}}\right)$$
(13)

である。

次に、軸力の範囲が

$$\frac{cN_{u}}{2} - \frac{sN_{w}}{2} < N < \frac{cN_{u}}{2} + \frac{sN_{w}}{2}$$
(14)
となる時、モーメントは式(15)となる。

$$M = {}_{s}M_{max} + {}_{c}M_{max}$$
 (15)
ここでは、鉄骨とFRCの最大耐力の和となり、
それぞれ効率よく耐力を発揮できる範囲であ
る。ここで、FRCのモーメント ${}_{c}M_{max}$ は、

$$_{c}M_{max} = D \cdot _{c}N_{u} \cdot \frac{1}{8}$$

となる。

さらに, 軸力の範囲が

 $\frac{cN_{u}}{2} + \frac{sN_{w}}{2} < N < cN_{u} + \frac{sN_{w}}{2}$ (16) である時,式(11)と同様に, $N = N_{Sw}/2$ の鉄骨 の耐力曲線上にFRCの耐力曲線を移動させ,足 し合わせることで,CESの耐力を示す。モーメ ントは式(17)のようになる。

$$M = {}_{s}M_{max} + \frac{D}{2} \cdot {}_{c}N\left(1 - \frac{{}_{c}N}{{}_{u}}\right)$$
(17)

ここで, FRC部分の負担軸力は

$$_{c}N = N - _{s}N_{w}/2$$

である。

4)
$$\left(\frac{D+D_S}{2}\right) \leq X_n \leq D$$

また,軸力の範囲が

$${}_{c}N_{u} + \frac{{}_{s}N_{w}}{2} < N < N_{u} \tag{18}$$

$$M = {}_{s}M_{max} \cdot \frac{(N_u - N)}{\left({}_{s}N_u - {}_{s}N_w/2\right)}$$
(19)

ここで, *N_u*は終局時に柱部材に作用する軸 力である。

$$N_{\rm u} = {}_{c}N_{u} + {}_{s}N_{u}$$

5) *X_n = D* 最後に軸力の範囲が

$$N = N_{\rm u} \tag{20}$$

となる時, モーメントは

$$M = 0 \tag{21}$$

となる。終局時に作用する軸力となる時,モー メントは0となる。

4. まとめ

CES柱の終局耐力評価法について報告した。 得られた知見を以下に示す。

- ・CES構造の柱の終局耐力(一般化累加耐力)は, FRCと鉄骨の中立軸を一致させることで求 めることができた。
- ・CESの耐力曲線内に荷重が収まっていること で、柱の安全性を確認することができ、FRC と鉄骨を足し合わせた、中立軸の位置が3.4 節の3)の範囲内を設計断面に使うことが、安 全かつ経済的であるといえる。
- ・軸力が柱に作用することで、曲げ耐力が増加 することが分かった。しかし、軸力のつり合 い状態を過ぎると曲げ耐力が減少し始める。

今後は低層建築物を想定し,鉄骨断面を小さく しても汎用性の高い,安全かつ経済的な断面の 研究を進める。



図4 CESの耐力曲線

参考文献

-24 -

- 1) 倉本洋:建築分野・鉄骨コンクリート(CES) 構造、コンクリート工学、52巻1号、 pp.115-120, 2014.1
- 2) 鋼コンクリート合成構造運営委員会:2013 年度日本建築学会大会(北海道)構造部門 (SCCS)パネルディスカッション「CES造建 築物の構造性能評価指針(案)の制定に向 けて」資料,日本建築学会,2013.8
- 中野清司,立花正彦,栗田康平,林渉:日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1115-1116,1990.10
- 藤本 利昭, 大崎 広貴: 内蔵鉄骨形状の異なるCES部材の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 83巻 752号, pp.1507-1515, 2018.10
- 5) 甲地哲也,藤本利昭:試設計によるCES造 低層建築物の耐震性能に関する研究,日本 大学生産工学部第52回学術講演概要,1-1, 2019.12
- 6) 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, 2014.1