

# 試設計による CES 構造低層建築物の耐震性能に関する研究

## — 柱断面の縮小化の検討 —

日大生産工(院) ○宇都宮 陸  
日大生産工 藤本 利昭

### 1. まえがき

CES(Concrete Encased Steel : 以下CES)構造とは、内蔵鉄骨と繊維補強コンクリート(Fiber Reinforced Concrete : 以下FRC)で構成される新構造システムであり、現在「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)が作成されている<sup>1)</sup>。

文献2)ではCES造の低層建築物への適用を検討するため、設計例となる鉄骨造(以下S造)建築物の概要を明記し、保有水平耐力、限界耐力計算の検討を行った。ブレース付きラーメン構造のY方向は、安全限界時のスペクトルを上回ったのに対し、純ラーメン構造であるX方向はスペクトルを下回り、要求性能を満たしていないことが確認された。そこで文献3)において、S造建築物設計例の柱に対しFRCを被覆することでCES造柱とし、要求性能を満たしていない純ラーメン構造のX方向に対し、同様の検討を行った。その結果、柱をCES造としたことによ

り剛性・耐力が向上し、余裕のある設計となることが確認された。しかしながら、柱断面も大きくなっていることから、計画上改善の余地があると考えられる。

したがって本研究では、柱をCES造へ変更することによる、内蔵鉄骨の縮小化による柱断面縮小の可能性を検討する。

### 2. 検討建物詳細

伏図・軸組図を図1に、建物詳細と柱・梁リストを表1, 2に示す。検討対象とした建物は文献4)に示された許容応力度計算によって設計された例題建築物である。文献4)では、SN400材のH-390×300×10×16のS造柱に対し、文献3)ではF<sub>27</sub>のFRCを被覆させ、B×D=400×490のCES柱とした。そこで、本研究の柱断面はS造建築物設計例の柱断面と同程度とする目的で、内蔵鉄骨をH-298×201×9×14とし、FRCを被覆した状態ではB×D=301×398とした。ここで、鉄骨とコンクリートの材料強度は文献3)と同等である。また、内蔵鉄骨までのFRCのかぶり厚さは、鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計と保有水平耐力—(以下SRC規準)より、最小値である50mmとした<sup>5)</sup>。

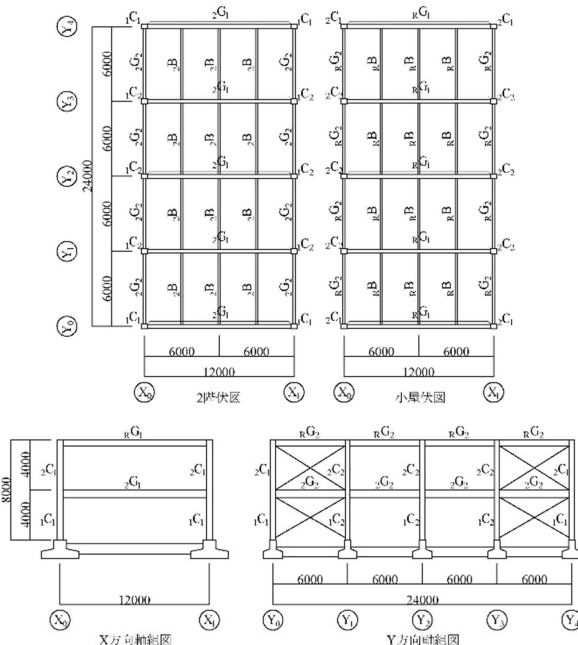


図1 伏図・軸組図

表1 建物詳細

建築用途	事務所
規模	地上2階
地盤	第1種地盤
構造概要	CES構造, 独立基礎

表2 柱・梁リスト

柱	断面(CES)	梁	断面(S)
2C <sub>1</sub>	B×D=301×398	R <sub>G1</sub>	H-488×300×11×18
1C <sub>1</sub>		2G <sub>1</sub>	H-588×300×12×20
2C <sub>2</sub>	H-298×201×9×14	R <sub>G2</sub>	H-300×150×6.5×9
1C <sub>2</sub>		2G <sub>2</sub>	H-350×175×7×11

Seismic Performance of a Low-Rise Concrete Encased Steel Structure Building  
By Trial Design

— Examination of Reduction of Column Cross Section —

Riku UTSUNOMIYA and Toshiaki FUJIMOTO

なお、梁断面については、X方向のスペンが12mと長く、長期応力が支配的であることから変更しないこととした。

### 3. 解析モデル概要

各種計算は一貫構造計算プログラムを用いて行った。建物モデルは、床の回転を無視した立体解析モデルとした。また、柱・梁部材は重心軸を線材置換し、部材の剛性低下を表す目的で、部材両端に曲げ剛性を表す剛塑性ばねモデルを採用している。剛性低下の基準としては、逆対称曲げを受ける単純梁を考え、この時の部材剛性を弾性時の基準とする。さらに、部材中央にはせん断剛性を表すばねを設ける。解析に際し外力分布は、一次設計に用いた $A_i$ 分布に基づく外力分布としている。外力算定時の各係数を表3に示す。なお、建物の一次固有周期は0.16秒である。

建物全体の減衰性能は、等価粘性減衰定数 $h$ により評価する。本研究では、等価粘性減衰定数を縮約1自由度系の構造特性曲線の塑性率から算定した。

また、プログラム上ではCES造の入力がないため、鉄筋量を可能な限り少なくしたSRC断面とし、終局耐力を別途計算し入力することでCES柱の評価を行った。

表3 建物重量と地震力

階	$W_i$ (kN)	$\Sigma W_i$ (kN)	$\alpha_i$	$A_i$	$C_i$	$Q_i$
2	1199	1199	0.437	1.239	0.200	297
1	1546	2745	1.000	1.000	0.200	549

### 4. 使用限界状態

CES柱の耐力曲線と、柱に作用する長期応力をプロットし図2に示す。CES指針より使用限界状態では、長期荷重下における部材の過度な変形、ひび割れ、劣化等が生じないことが求められる。また、建物の過大な沈下や傾斜が生じないことも要求される。したがって本研究では、構造解析プログラムにより長期作用応力を計算しCES柱の耐力曲線にプロットすることで、安全性を検討する。図中の2点のプロットの値は、長期荷重時における曲げモーメントが最大(■: Mmax)となる点と、軸力が最大となる(●: Nmax)となる点を表す。それぞれの荷重値は、曲げモーメントが最大となる時、軸力147(kN)、曲げモーメント152(kN・m)であり、軸力が最大となる時、軸力358(kN)、曲げモーメント87(kN・m)となる。CES柱の使用限界状態時に対する、使用限界曲げモーメントの算定式を式(1)~(4)

に示す。式(1)~(4)は軸力の応力状態に応じた場合分け(a)~(d)により算定する。また、図2の短期許容応力は式(1)~(4)において、長期許容応力を短期許容応力に置き換えて計算することで求めることができる。さらに、終局曲げ耐力は文献(6)の算定式より求める。

図2より、長期作用応力は長期許容応力の耐力曲線内に収まっており安全性が確認できた。しかし、低層建築物は軸力が小さくなる傾向があるため、曲げモーメントが大きくなる時には、長期許容応力の耐力曲線へ近づいてしまうことがわかった。

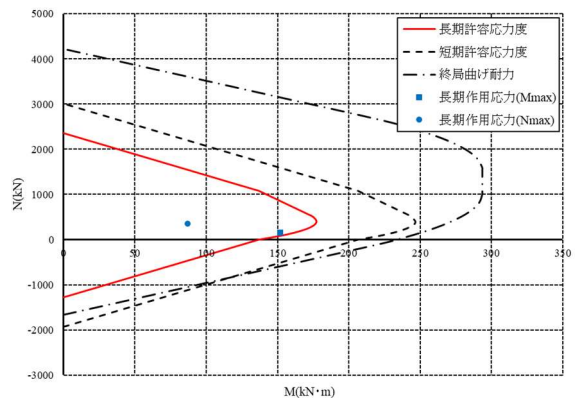


図2 CES柱の耐力曲線

(a)  $sN_t \leq N < 0$  のとき

$$M = \frac{sM_0}{sA \cdot Lf_{st}} (N + sA \cdot Lf_{st}) \quad (1)$$

(b)  $0 \leq N < cN_c/2$  のとき

$$M = sM_0 + N \left( \frac{1}{2} - \frac{2}{3} \frac{N}{b \cdot D \cdot Lf_{cc}} \right) D \quad (2)$$

(c)  $cN_c/2 \leq N < cN_c$  のとき

$$M = sM_0 + \frac{1}{6} (b \cdot D \cdot Lf_{cc} - N) D \quad (3)$$

(d)  $cN_c \leq N < sN_c + cN_c$  のとき

$$M = -\frac{sM_0}{sA \cdot Lf_{st}} (N - sA \cdot Lf_{st} - cN_c) \quad (4)$$

[記号]

$sN_t$ : 鉄骨の許容引張力(N)

$$sN_t = -sA \cdot Lf_{st}$$

$sA$ : 鉄骨部分の断面積(mm<sup>2</sup>)

$Lf_{st}$ : 鉄骨の長期許容引張応力度(N/mm<sup>2</sup>)

$N$ : 作用軸力(N)

$M$ : 柱の使用限界曲げモーメント(N・mm)

$Z_s$ : 鉄骨の断面係数(mm<sup>3</sup>)

$cN_c$ : コンクリートの長期許容軸圧縮力(N)

$$cN_c = b \cdot D \cdot Lf_{cc}$$

$b$ : 柱の幅(mm)

$D$  : 柱の全せい(mm)

$lf_{cc}$  : コンクリートの長期許容圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

${}_sM_0$  : 鉄骨部分が曲げモーメントのみを受ける場合の使用限界曲げモーメント(N・mm)

$${}_sM_0 = Z_s \cdot lf_{st}$$

${}_sN_c$  : 鉄骨の長期許容軸圧縮力(N)

$${}_sN_c = {}_sA \cdot lf_{sc}$$

$lf_{sc}$  : 鉄骨の長期許容圧縮応力度(N/mm<sup>2</sup>)

## 5. 荷重増分解析

荷重増分解析により得られたX方向、Y方向の層せん断力—層間変形角の関係を図3、4に示す。解析は、層間変形角が0.02rad.に達した時点で終了した。図3より、純ラーメン構造であるX方向は、2階に比べ1階へ変形が集中しており、層間変形角も1階のみ0.20rad.まで達している。これは、1階に損傷が集中したことにより層崩壊を起こしたためだと考えられ、崩壊形も1層目の部分崩壊メカニズムであることが確認された。一方、Y方向はブレース付きラーメン構造である。図4よりバランスよくせん断力に抵抗できており、崩壊形は全体崩壊メカニズムとなることが確認された。

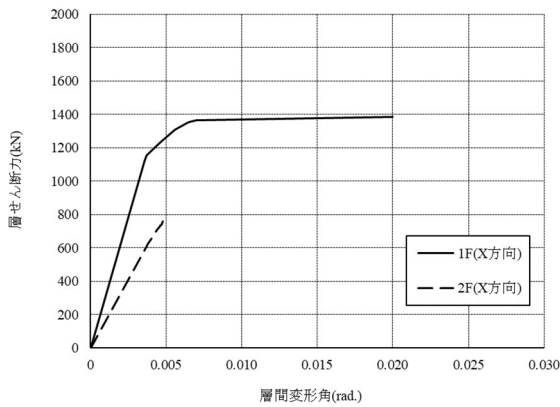


図3 X方向の層せん断力—層間変形角

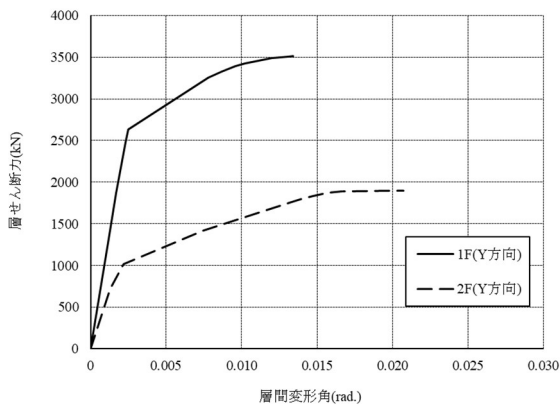


図4 Y方向の層せん断力—層間変形角

## 6. 損傷限界時

X方向、Y方向の損傷限界時Sa-Sdスペクトルを図5に示す。また、黒色実線の要求曲線は1質点系へ縮約したときの工学的基盤のスペクトルを示す。さらに、図中のプロット(○)は弾性限界時の応答を示す。ここで、CES指針から、柱・梁のいずれかが初めて許容応力度に達するとき、すなわち、いずれかの部材が初めて降伏曲げ耐力を超過した時を建築物の損傷限界状態と定義した。図5より、X・Y方向ともに要求曲線を大きく上回っており、余裕のある建物であると言える。また、Y方向はブレースがあることで、X方向に比べ剛性が大きいことが確認された。

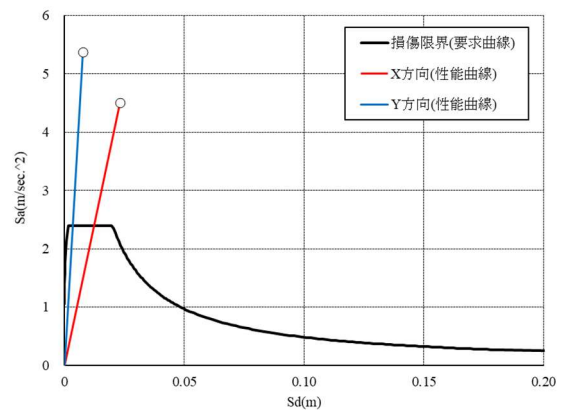


図5 損傷限界時のSa-Sdスペクトル

## 7. 安全限界時

X方向、Y方向の安全限界時のSa-Sdスペクトルを図6、7に示す。ここで、黒色実線の要求曲線は損傷限界時と同様に、1質点系へ縮約したときの工学的基盤のスペクトルを示す。また、一点鎖線は振動の減衰による加速度の減衰率 $F_h$ を乗じたスペクトルを示す。さらに、各方向の性能曲線のプロット(○)は弾性限界を示し、プロット(●)は最大層間変形角が1/50を超えた崩壊時の応答を表す。ここで、建築物の安全限界状態は、限界耐力計算に準じて各階の層間変形角が1/75に達した時点と定義した。

文献3)において、性能曲線よりX・Y方向ともに強度型の建物であることが確認された。一方、既往の研究7)より、CES造は十分な靱性があることが確認されている。そこで、本研究では柱断面を縮小させた検討を行った結果、要求曲線を上回ることが確認された。

X方向について、図6より性能曲線は要求曲線を超えており、耐震性能を満たすことが確認できた。また、弾性限界は要求曲線内であるが、十分な変形性能を持っていることが確認でき、

靱性型の性能であることがわかった。次に、図7よりY方向についても性能曲線は要求曲線を超えており、耐震性能を満たすことが確認できた。Y方向も同様に、弾性限界は要求曲線内であるが、十分な剛性が保たれており要求曲線を性能曲線が超えていることから、強度型の性能であることがわかった。X方向、Y方向の性能の違いはブレースの有無による剛性の違いであると考えられる。

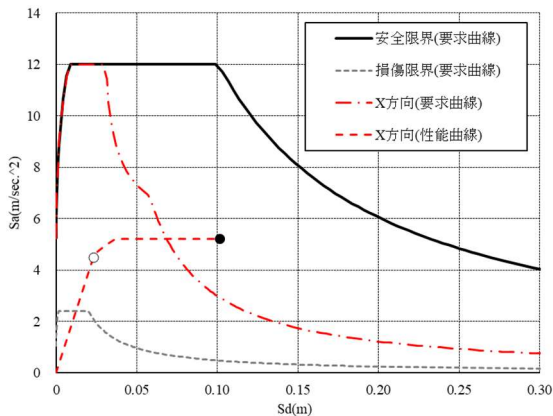


図6 X方向の安全限界時のSa-Sdスペクトル

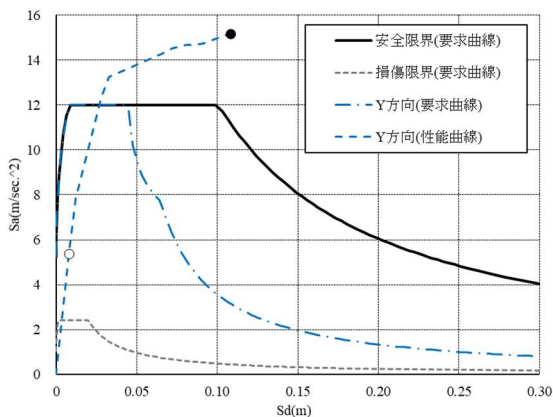


図7 Y方向の安全限界時のSa-Sdスペクトル

## 8. まとめ

本研究では、CES構造低層建築物における内蔵鉄骨の縮小化に伴う、柱断面の縮小化の可能性を検討した。得られた知見を以下に示す。

- 使用限界時において、長期許容応力度を計算し耐力曲線を示した。長期作用応力が耐力曲線内に収まっていることから、建物の安全性が確認できた。
- 荷重増分解析において、X方向は1階に変形が集中した。これは、損傷が1階に集中したことにより層崩壊を起こしたためだと考えられる。また、Y方向はブレース付

きラーメン構造であることから、1・2階ともにバランスよくせん断力に抵抗できていることが確認できた。

- 損傷限界時において、X・Y方向ともに要求曲線のSa-Sdスペクトルを大きく上回っていることから、余裕のある設計であると考えられる。
- 安全限界時において、X・Y方向ともに弾性限界は要求曲線のSa-Sdスペクトルを下回ったが、X方向は靱性型、Y方向は強度型の変形性能を示し、崩壊時の応答が要求曲線を超えていることが確認できた。従って、十分な変形性能とともに建物の安全性が確認できた。
- 既往の研究よりCES造の靱性があることが確認されていることから、内蔵鉄骨の縮小化に伴う柱断面を縮小化は可能であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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実験的研究—検討用建物の概要—，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1397-1398，2019.9
- 3) 宇都宮陸，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—CES造低層建築物の設計例—，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1329-1330，2021.1
- 4) 〈建築のテキスト〉編集委員会：初めての建築構造設計 構造設計の進め方，pp.128-197，2001.1
- 5) 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—許容応力度設計と保有水平耐力—，pp.94-95，2014.1
- 6) 宇都宮陸，藤本利昭：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—，日本大学生産工学部第53回学術講演会講演概要，pp.21-26，2020.12
- 7) 石鈞吉，牧本祐太，JuanJoseCASTRO，松井智哉，倉本洋：H型鉄骨内蔵CES柱の変形能力評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.682，pp.1977-1982，2012.12