

試設計による CES 構造の低層建築物への適用に関する研究

-SRC 構造低層建築物を例とした合理的な断面の検討-

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構造とは、Concrete Encased Steel構造の略であり、内蔵鉄骨と繊維補強コンクリート(Fiber Reinforced Concrete：以下FRC)により構成される新構造システムである。1990年のバブル崩壊を境に鉄骨鉄筋コンクリート(Steel Reinforced Concrete：以下SRC)構造の建設棟数が急激に減少したことを受け、SRC構造は耐震性に優れていながら設計および施工が他の構造に比べ複雑であることなどから、同等以上の耐震性能を得られる新構造システムとして、CES構造の実用化に向けた研究が行われてきた。そして、それらの技術資料の整備により、2022年3月に「鉄骨コンクリート(CES)造建物の性能評価型構造設計指針(案)・同解説」¹⁾(以下CES指針)が刊行された。

CES指針には中高層建築物の設計例が明示されているが、低層建築物に対する検討はなされていない。しかしながら、CES構造をより一般的な構造システムとして広く普及させるためには、低層建築物への適用も目指すべき課題であると考えられる。そこで本研究では、文献2)に示されたSRC構造低層建築物の設計例(以下SRC造設計例)を基に、柱・梁部材をCES構造へ変更したCES造低層建築物について限界耐力計算により変形性能の検討を行うことで、CES構造の低層建築物への適用の可能性および、断面の合理化の検討を行う。

2. 検討建物詳細

伏図・軸組図および柱・梁断面図を図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、2階建てSRC構造の例題建築物であり、許容応力度計算および略算による保有水平耐力計算などの検討が行われている。これまでに文献3)において、SRC造設計例の柱・梁部材をCES構造へ変更し限界耐力計算の検討を行い、構造性能についての比較を行った。寸法の等しいCES部材に変更した結果、ひび割れ後の剛性および、変形性能が向上することを確認した。また、CES構造はSRC構造に比べ内

蔵鉄骨断面を大きく確保できることから、部材断面を縮小化してもSRC構造と同等の耐力を得られるものと推察した。そこで本研究では、柱および梁の断面寸法を縮小し同様の検討を行った。断面は1・2階共通で柱は十字形鉄骨、梁はH形鉄骨とし、CES指針に準記してかぶり厚は50mmとした。なお、コンクリートの設計基準強度についての記載が無いことから、CES指針の最低強度であるF_c27を採用した。また、X方向、Y方向ともに純ラーメン構造であり、X方向は5.0mの片持ち梁を有する。

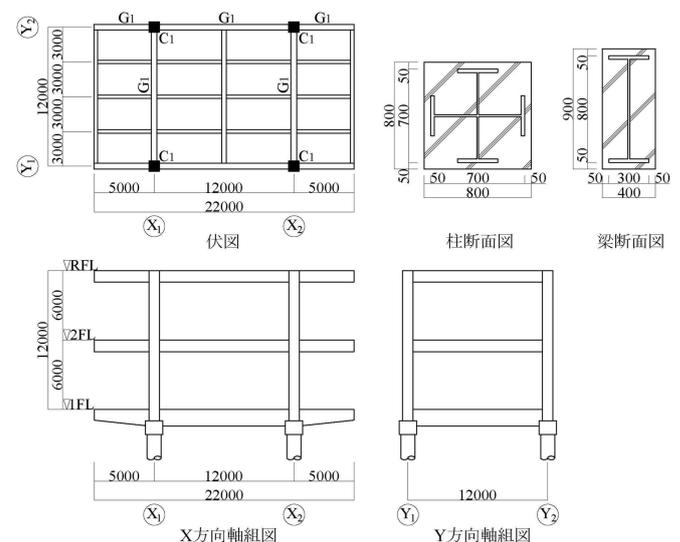


図1 伏図・軸組図および柱・梁断面図

表1 建物詳細

建築用途	店舗
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(CES)
2C ₁	B×D=800×800	RG ₁	B×D=400×900
1C ₁	2H-700×300×13×24 F _c 27	2G ₁	H-800×300×14×26 F _c 27

Study on application of CES structure to low-rise building by trial design
-Examination of rational cross section using SRC structure low-rise building as an example-

Riku UTSUNOMIYA and Toshiaki FUJIMOTO

3. 各限界状態時の応答

3.1. 使用限界状態

CES柱の耐力曲線に、柱の長期および短期作用応力をプロットし図2に示す。図中のプロットは、軸力が最大となる N_{max} (●)と、曲げモーメントが最大となる点 M_{max} (■)の2点を示す。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・短期作用応力を算定し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2より、長期・短期ともにプロットが耐力曲線内に収まっていることから、作用応力が許容応力度以下となっており、許容応力度設計が満足していることを確認した。

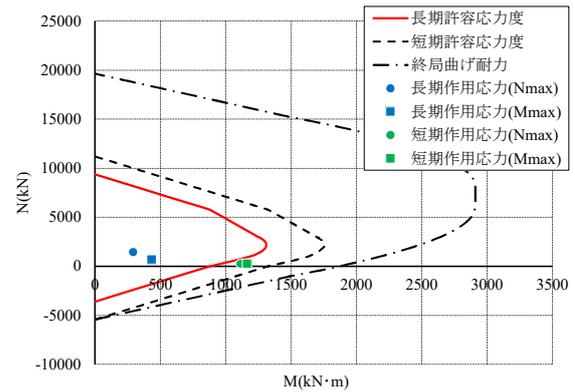


図2 CES柱の耐力曲線

3.2. 荷重増分解析

荷重増分解析により得られたCES構造のX方向、Y方向の層せん断力—層間変形角の関係を、SRC造設計例と比較し図3、4に示す。解析は、建物の崩壊もしくは層間変形角が0.02(Rad.)に達した時点で終了した。

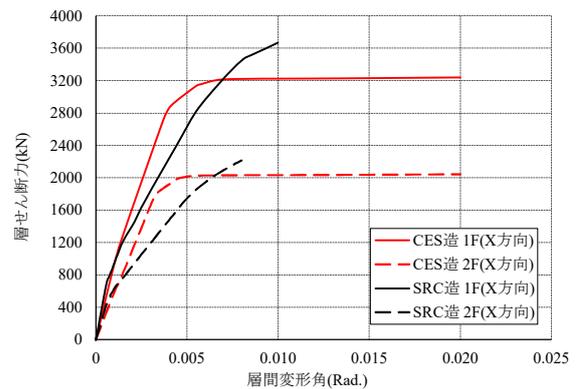


図3 X方向の層せん断力—層間変形角

図より、柱および梁を縮小化しCES構造へ変更したことにより、X方向、Y方向いずれも初期剛性はわずかに低下した。一方、ひび割れ後の剛性および変形性能は向上した。また、内蔵鉄骨は十字形鉄骨であることから、荷重方向による構造性能の差は小さく、剛性および変形性能は概ね同様であった。SRC構造ではX方向は層間変形角が0.01(Rad.)に達した時点で建物が崩壊したのに対し、CES構造では柱断面を縮小したが鉄骨断面が大きくなったことにより、変形性能が向上したと考える。

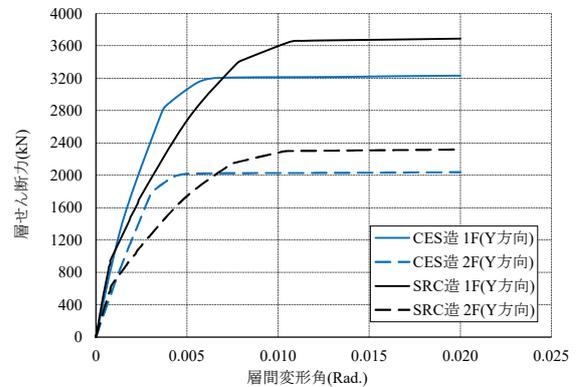


図4 Y方向の層せん断力—層間変形角

3.3. 損傷限界状態

損傷限界時のX方向およびY方向のSa-Sdスペクトルを図5に示す。図中の黒色破線の要求曲線は1質点系へ縮約した工学的基盤のスペクトルを示す。また、白抜きのプロットは弾性限界時の応答を示す。ここではCES指針から、損傷限界状態を柱・梁のいずれかが初めて許容応力度に達した時点と定義した。

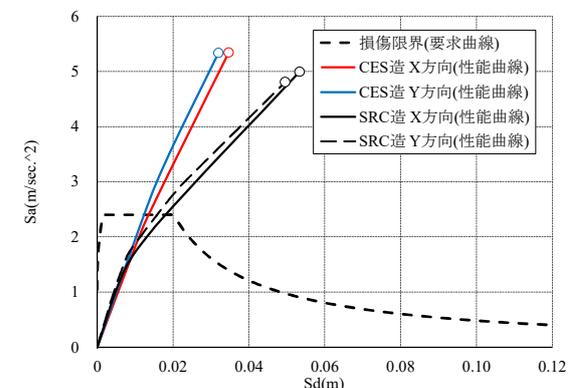


図5 損傷限界時のSa-Sdスペクトル

断面寸法の縮小化によりX方向、Y方向ともに初期剛性はわずかに低下したが、CES構造のひび割れ後の剛性低下は小さくなった。また、SRC構造でも要求性能を満たしているが、CES構造も同様に荷重方向による構造性能の差は小さく、変形性能はX方向、Y方向ともに強度型を示し、十分な耐力を有することを確認した。

3.4. 安全限界状態

安全限界時のX方向およびY方向のSa-Sdスペクトルを図6, 7に示す。図中の黒色実線の要求曲線は、1質点系へ縮約した工学的基盤のスペクトルを示す。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白抜きのプロットは弾性限界を示し、黒塗りのプロットは最大層間変形角が0.013(Rad.)($=1/75$)を超えた時点もしくは崩壊時の応答を示し、その時点を実安全限界状態と定義した。

SRC構造では、X方向において層間変形角が0.01(Rad.)に達した時点で建物が崩壊していたが、CES構造としたことによりX方向、Y方向いずれも、ひび割れ後の剛性および変形性能が向上し、靱性型の変形性能を示す要求性能を上回る結果となった。部材断面縮小後もSRC造設計例と同等の変形性能であり、CES構造を用いることにより内蔵鉄骨断面を大きく取れることから、柱断面は約20%、梁断面は約35%の縮小化が可能であることを確認した。

4. 低層建築物への適用のための検討

4.1. 塑性率の検証

前章において、X方向、Y方向ともに各限界状態時の要求性能を満足することを確認した。しかしながら低層建築物は、中高層建築物などと比べ初期剛性が高くなる傾向があり、降伏後、要求曲線と交わるまでに大きな塑性率が必要となる可能性がある。そこで本章では荷重増分解析により得られた層せん断力と、1質点系縮約モデルの代表変位から、X方向およびY方向の塑性率の算定を行いその妥当性を検証する。

X方向およびY方向の層せん断力と代表変位の関係と骨格曲線を図8, 9に示す。図中の白抜きのプロットは降伏変位 δ_y を、黒塗りのプロットは安全限界変位 δ_s を示す。骨格曲線はBi-Linearモデルとし、性能曲線と等価なエネルギーとなる降伏変位を算定した。また、安全限界変位は層間変形角が0.013(Rad.)の時点の変位とし、塑性率 μ は、安全限界変位を降伏変位で除し($\mu=\delta_s/\delta_y$)算定した。図8よりX方向は $\delta_y=0.042(m)$ 、 $\delta_s=0.134(m)$ であり、 $\mu=3.20$ となった。また、図9よりY方向は $\delta_y=0.039(m)$ 、 $\delta_s=0.134(m)$ であり、 $\mu=3.47$ となった。図5より、Y方向は5.0(m)の片持ち梁が無く、X方向に比べわずかに初期剛性が高いことから塑性率も大きくなったと考えられる。文献4)より、CES柱は0.02(Rad.)の大変形に至るまで大幅な耐力低下は見られず、耐力は保持できていると言える。また、文献5)においても塑性率が $\mu=2.0$ を

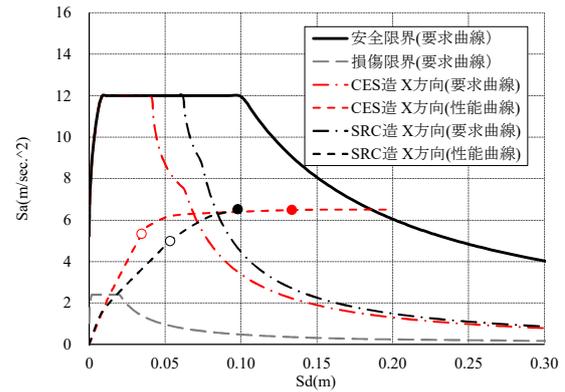


図6 X方向の安全限界時のSa-Sdスペクトル

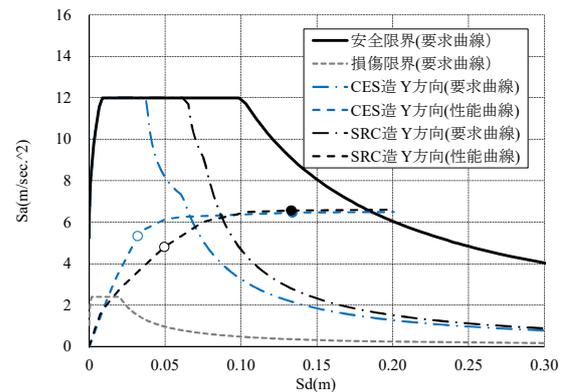


図7 Y方向の安全限界時のSa-Sdスペクトル

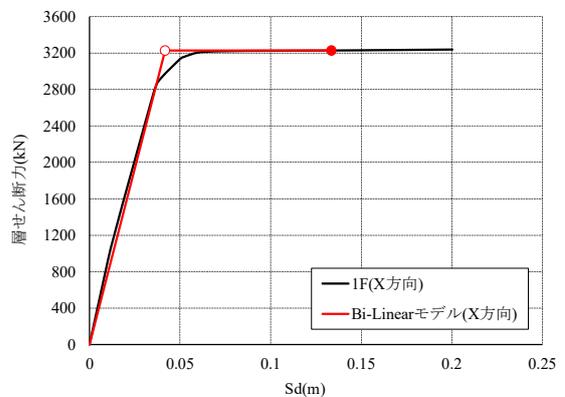


図8 X方向の骨格曲線

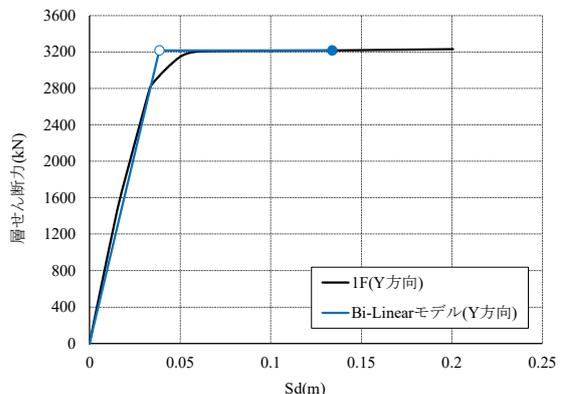


図9 Y方向の骨格曲線

超過し、CES柱は0.03(Rad.)まで耐力低下は見られない。以上のことから、本研究でのX方向、Y方向の塑性率は安全限界時の層間変形角0.013(Rad.)における値であり、CES柱の変形性能を鑑みると概ね評価できるものと考えられる。

4.2. ピロティへの適用の提案

図2より、CES柱の耐力は作用応力を上回っていることから、許容応力度設計を満足していることを確認した。しかしながら低層建築物は建物重量が小さく、軸力が低くなる傾向にあり、短期作用応力時では軸力が低いことから耐力曲線に迫っていることが分かる。また、合成構造の耐力は累加式で評価できることから、軸力の高い建物の方が効率良く部材耐力を発揮することが可能である。一方、図3~9ではひび割れ後の剛性低下はSRC造設計例よりも小さく、既往研究⁴⁾においてもCES構造は高い変形性能を示している。

したがって低層建築物に対する適用の可能性として、ピロティ階の柱もしくは架構にCES構造を用いることを提案する。その理由としては、主に次の2点であると考えられる。(1)CES構造は新構造システムであることから、建築規模に関わらず限界耐力計算を行う必要がある。(2)ピロティは過去の被害地震において深刻な被害の発生が見られており、現行法においては柱の変形性能および崩壊形の検討などが求められる。上記(1)は、低層建築物であれば建築規模に制限はあるが許容応力度計算のみでの設計が可能であり、既存建築においてもすでに成熟している構法での設計が一般的である。したがって、新構造システムであるために、建築規模に関わらず限界耐力計算を行う必要があるCES構造は、低層建築物に用いる際の障害となり得ると推察される。一方(2)は、駐車場や店舗など開放的な空間が必要とされる用途には需要があるものの、現行法においてピロティの設計をする際には、柱の変形性能および崩壊形の検討などが求められる。このことから、(1)のCES構造の設計における限界耐力計算にて、(2)のピロティの要求性能である柱の構造性能について検討することができれば、図10に示すように1階のCES柱に変形を集中させ上層階の

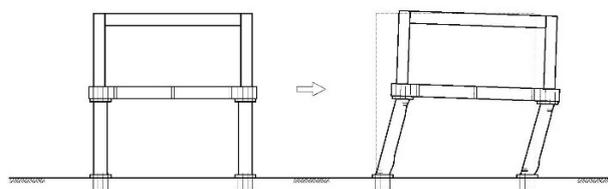


図10 ピロティ階へのCES構造の適用

損傷を低減するなど、CES構造の構造性能を活かしたピロティの設計が可能なのではないかと推察した。

5. まとめ

本研究ではSRC造設計例を基に、CES構造の低層建築物への適用の可能性および、断面の合理化の検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・ 使用限界状態時では、長期・短期作用応力ともに耐力曲線内に収まっており、許容応力度設計が満足していることを確認した。
- ・ 柱断面を縮小化したことから初期剛性はわずかに低下したが、SRC造設計例のX方向よりも高い変形性能を示した。
- ・ 損傷限界状態時では、ひび割れ後の剛性低下は小さくなり強度型の変形性能を示した。
- ・ 安全限界状態時では、X方向、Y方向ともにSRC構造以上の変形性能を示し、靱性型の変形性能であることを確認した。
- ・ 各限界状態時の要求性能を満たしており、CES構造は内蔵鉄骨断面を大きく取れることから柱断面は約20%、梁断面は約35%の縮小化が可能であることを確認した。
- ・ CES構造の塑性率は、X方向は $\mu=3.20$ 、Y方向は $\mu=3.47$ であり、既往研究におけるCES柱の構造性能を鑑みると概ね評価できると考える。
- ・ ピロティの柱および架構にCES構造を用いることで、構造性能を活かした設計ができるのではないかと推察した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨コンクリート(CES)造建築物の性能評価型構造設計指針(案)・同解説、第1版第1刷、2022.3
- 2) 日本鉄鋼連盟建築構造教材作成委員会：基礎からわかる建築構造物の設計、株式会社オーム社、pp.109-122、第1版第6刷、2010.3
- 3) 宇都宮陸、藤本利昭：CES構造の低層建築物の適用に関する研究—柱・梁断面の縮小化のための検討—、日本建築学会大会学術講演会梗概集、pp.1235-1236、2022.9
- 4) 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
- 5) 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 第83巻 第752号、pp.1507-1515、2018.10