

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2006～2008
課題番号：18360262
研究課題名（和文）構造実験に基づく鉄骨コンクリート合成構造の耐震性能評価法の開発
研究課題名（英文）Development of Seismic Performance Evaluation Method for Composite CES Structures Based on Structural Testing
研究代表者
倉本 洋（KURAMOTO HIROSHI）
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20234544

研究成果の概要：

長期耐用型の新建築構造として提案した CES（Concrete Encased Steel）合成構造の実用化を目的として、CES 柱、CES 柱梁接合部および CES 架構の構造実験を実施し、何れにおいても損傷抑制効果に優れ、靱性に富む極めて耐震的な構造であることを明らかにした。また、耐震性能評価に必要な諸耐力、復元力特性モデルおよび等価粘性減衰定数の評価法を実験結果に基づいて提案すると共に、限界耐力計算による CES 造建築物の耐震性能評価法の基本的な枠組みをまとめた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2007 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2008 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学／建築構造・材料

キーワード：CES 構造システム、耐震性能評価法、構造実験、限界耐力計算、復元力特性、CES 柱、CES 柱梁接合部、CES 架構

1. 研究開始当初の背景

わが国において最も優れた耐震構造として大規模建築物や超高層建築物に適用されてきた鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRC）構造は、近年の鉄筋コンクリート（以下、RC）構造の高強度化、超高層化技術の発展に伴って、設計および施工の複雑さ等によるコスト高、工期の長期化の問題が浮き彫りになり、その建設シェアが減少傾向を辿っている。しかし、1995年の兵庫県南部地震において明らかにされたように、SRC構造の耐震性能は他の構造に比して卓抜している。

そこで、研究代表者等はここ数年、SRC構

造と同程度の高耐震性を有し、より施工性に優れ、かつ、21世紀における安心・安全で持続可能な社会の形成に資する長期耐用型の建築構造システムの開発を目的として、鉄骨とコンクリートのみで構成される CES（Concrete Encased Steel）合成構造システムという新しい建築構造システムの研究開発に取り組んできた。

現時点ではCES柱の構造性能に関して概ね把握するに至っており、体積混入率1%程度の繊維補強コンクリートを用いることにより、鉄骨とコンクリートのみでも損傷が少なく、SRC柱と同等以上の耐震性能が期待できるこ

となどが明らかとなってきた。一方で、CES構造のような新しい構造システムの耐震性能評価に関しては、2000年6月に施行された「限界耐力計算」が適していると考えられる。

そこで、本研究課題ではCES構造システムの実用化を念頭において限界耐力計算による当該構造システムの耐震性能評価法の開発を行う。具体的にはCES構造部材および架構の耐力、変形能力、履歴特性および減衰特性等を構造実験により評価し、限界耐力計算に必須の静的非線形荷重増分解析に適用可能な当該部材・架構の復元力特性モデル並びに減衰評価式を構築する。さらに、限界耐力計算によるCES構造建築物の耐震性能評価法の枠組みを検討する。

2. 研究の目的

本研究課題では、CES合成構造システムの耐震性能評価法の開発に関して以下の目的を設定した。

(1) CES柱の構造性能評価

CES柱の構造実験を実施すると共に、既往のCES柱の実験結果と併せて、構造実験結果に基づいた柱の耐力および変形能力の評価法、並びに復元力特性モデルを提案する。

(2) CES柱梁接合部の構造性能評価

CES柱梁接合部の構造実験を実施し、破壊性状、せん断耐力および応力伝達メカニズム等を把握し、構造性能評価法を提案する。

(3) CES架構の構造性能評価

CES架構の構造性能を把握するための実験を実施する。さらに、上記(1)および(2)で提案した柱、梁部材および柱梁接合部の復元力特性モデルを適用して、当該架構の荷重変形解析を実施し、モデル化の妥当性を検討する。

(4) CES構造建築物の耐震性能評価法の検討

上記(1)～(3)の研究成果を踏まえて、限界耐力計算によるCES構造建築物の耐震性能評価法の枠組みを検討する。

3. 研究の方法

(1) CES柱の構造性能評価

この研究では、既往の研究で検討されてきた繊維補強コンクリート（FRC）を用いた一体打ちCES柱に対して施工の合理化を図ることを目的として、プレキャストFRCパネルで内蔵鉄骨を囲み、内部に普通コンクリートを打設したPCa-CES柱の構造性能を構造実験により検討した。実験では、写真1に示す実験装置を用いて、直交するパネル間をエポキシ系接着剤による接着接合を施し、かつ、パネルの内面にスタッドボルトを取り付けることによって外殻FRCパネルと内部普通コンクリートの一体性を高めたPCa-CES柱（図1のCES-S）と、FRCを一体打ちした通常のCES柱（図1のCES-U）の構造性能を比較した。

また、既往の構造実験結果に基づいてCES柱の耐力と復元力特性の評価法を検討した。特に、復元力特性の評価に関しては、平成19年度以降に実施するCES架構実験の予備解析やCES構造システムの耐震性能評価法を限界耐力計算ベースで開発することを想定して、非線形静的荷重増分解析に適用可能な部材モデルの構築や等価粘性減衰定数の評価法の提案を念頭に置いて研究を進めた。

(2) CES柱梁接合部の構造性能評価

この研究ではまず、CES柱梁接合部の構造性能の把握を目的として、写真2に示す実験装置を用いて、図2に示す内部柱梁接合部2体（CESJ-AおよびCESJ-B）と外部柱梁接合部2体（CESJ-AEおよびCESJ-BE）の計4体の構造実験を実施した。実験変数は梁の曲げ耐力に対する接合部パネルのせん断耐力の比で表されるせん断余裕度とした。

さらに、CES柱梁接合部における応力伝達メカニズムを明らかにするために、上記4試験体に対して3次元非線形FEM解析を行った。解析



写真1 柱の実験装置

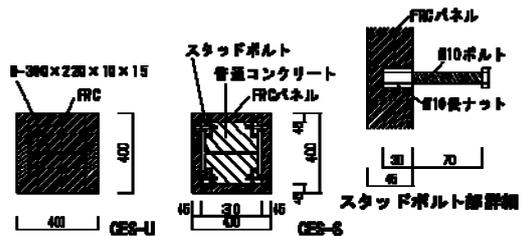


図1 柱断面形状



写真2 柱梁接合部の実験装置

ではまず、実験で得られた各接合部の荷重－変形関係や鉄骨の応力推移状況を概ね正確にシミュレートできるように解析モデルにおける諸係数を定め、解析精度の妥当性を確認した上で、解析から得られたコンクリートの応力推移状況や鉄骨とコンクリートのせん断力分担率など、実験では直接得られない値を求めることとした。

(3) CES架構の構造性能評価

この研究は、CES骨組の構造性能の把握と耐震性能評価法の開発に資する基礎データの整備を目的としたものであり、写真3に示す実験装置を用いて2層2スパン架構の構造実験を実施した。

また、CES柱および柱梁接合部に関する研究で検討した復元力特性モデルを用いて、当該骨組の静的非線形解析を実施し、実験結果と比較・検討することにより解析精度を検証すると共に、当該復元力モデルの妥当性を検証した。

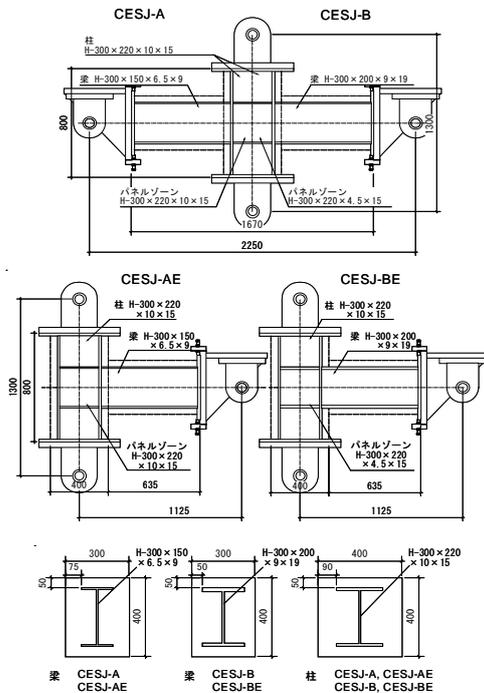


図2 CES柱梁試験体の形状



写真3 CES架構の実験装置

(4) CES構造建築物の耐震性能評価法の検討

この研究では、CES構造システムの実用化を念頭に置いて、限界耐力計算によるCES構造建築物の耐震性能評価法の枠組みを検討した。具体的には、既往の研究並びに上記(1)および(2)で得られた研究成果に基づいてCES柱、梁部材および柱梁接合部の耐力評価式、復元力特性モデルおよび等価粘性減衰定数の評価法を整理した。また、それらの評価法を適用したCES構造建築物の耐震性能評価フローを提案した。

4. 研究成果

(1) CES柱の構造性能評価

H型鉄骨を内蔵したCES柱について曲げせん断加力実験を実施し、特に一体打ちCES柱と外殻PCaパネル使用のCES柱の違いが構造特性にどのような影響を及ぼすかについて比較・検討を行った。その結果、図3に示すように、両試験体とも良好な履歴特性を示した。また、一体打ちCES柱はPCa-CES柱に比して、若干ではあるが同一変位振幅における残留ひび割れ幅、並びに最大耐力以後の耐力低下が大きくなる傾向が認められた。

また、内蔵鉄骨フランジの応力推移状況に関しては、水平変形が小さな領域($R=0.005$ rad.程度)において、PCa-CES柱ではスタブとPCaパネル境界部で応力が最大となり、柱の中央部に向かって直線的に応力が減少しているのに対し、一体打ちCES柱では最大応力の発生位置は同じであるが、その内側の応力も大きくなっており、両者に若干の差異が認められた。これは、PCa-CES柱ではスタブとPCaパネルとの境界部において変形が集中するのに対して、一体打ちCES柱では曲げひび割れ発生の影響でスタブから少し離れた位置まで応力シフトが生じたものと考えられる。ただし、変形の増大に伴い、両試験体の応力分布は類似したものとなる傾向も併せて確認できた。

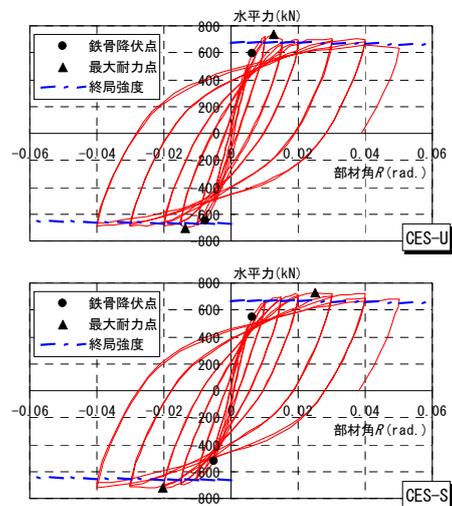


図3 CES柱の荷重－変形関係

(2) CES柱梁接合部の構造性能評価

接合部せん断余裕度の異なる内柱梁接合部CESJ-A、CESJ-Bおよび外柱梁接合部CESJ-AE、CESJ-BEの計4体の構造実験を実施した。その結果、写真4および図4に示されるように、接合部形状に拘わらず、CES柱の場合と同様に大変形時においてもコンクリートの剥落はほとんど確認されず、安定した復元力特性を示すことが明かとなった。また、パネルのせん断耐力に関しては、鉄骨鉄筋コンクリート規準式を用いて概ね評価できることを確認した。

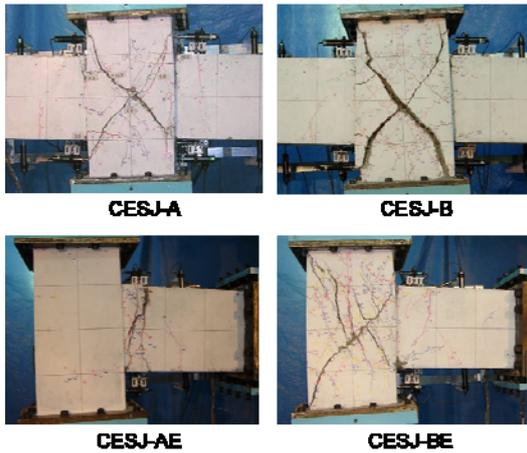


写真4 CES柱梁接合部の最終破壊状況

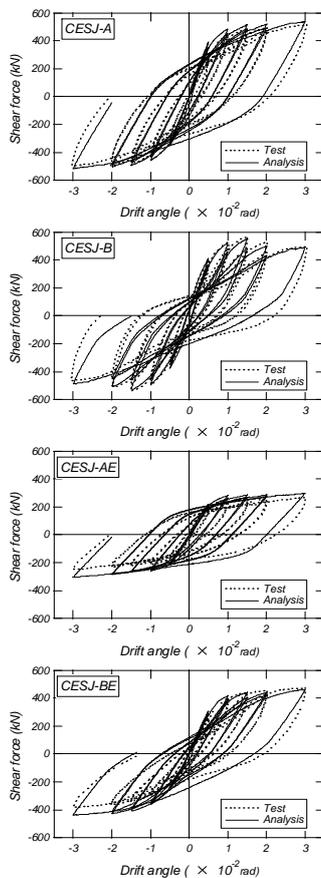


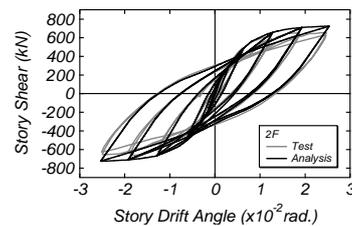
図4 CES柱梁接合部の荷重-変形関係

また図4に示すように、3次元非線形FEM解析によって当該接合部の荷重-変形関係を精度よくシミュレートすることが可能であることを示した。さらに、解析結果より、作用軸力が接合部パネルに形成される圧縮ストラットの領域に影響を及ぼし、圧縮軸力時と引張軸力時では、接合部パネルの応力状態は大きく異なること、および接合部パネルにおいてアウターコンクリート部はインナーコンクリート部に比べて広い領域で圧縮ストラットを形成しており、最大耐力時にはほぼ等しいせん断力を負担していることなどを明らかにした。

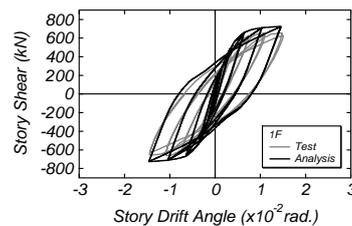
(3) CES架構の構造性能評価

15層程度の純フレーム建築物を想定し、下部2.5層の2スパンを取り出した約1/2縮小モデルの架構試験体1体の静的荷重実験を実施した。その結果、CES架構は、相対部材角 $R=0.03\text{rad}$ 程度の大変形においてもかぶりコンクリートの剥落がほとんど認められず、損傷抑制効果に優れていること、および最終変形角 $R=0.05\text{rad}$ 時においても最大耐力の約90%の耐力を保持し、靱性に富む極めて耐震的な構造であることなどを明らかにした。

また、当該架構に対してRC造およびSRC造建築物の構造解析で慣用されている部材の復元力モデルと骨組解析モデルを適用した正負交番の静的非線形解析を実施し、図4に示すように、各階の荷重-変形関係を精度よくシミュレートできることを確認した。一方、本研究の範囲では、接合部せん断余裕度が2程度の外部柱梁接合部の場合には接合部パネルの変形はわずかで、梁の曲げ降伏が先行するが、せん断余裕度が1.2程度と比較的小さな内部柱梁接合部では変位振幅の増大に伴い接合部パネルの変形が増大し、梁の曲げ降伏に対して接合部パネルのせん断降伏



(a) 2階の水平荷重-層間変形角関係



(b) 1階の水平荷重-層間変形角関係

図4 CES架構の実験結果と解析結果

が先行する傾向にあった。したがって、CES 架構に対して梁降伏先行型の全体崩壊メカニズムを計画する場合には、接合部せん断余裕度を十分大きく設定することが肝要であることを明らかにした。

(4)CES構造建築物の耐震性能評価法の検討

CES 柱および柱梁接合部に関する研究に基づいて、当該部材の諸耐力評価式、並びに限界耐力計算による耐震性能評価に必須の復元力特性モデルおよび等価粘性減衰定数の評価法を提案した。また、CES 造建築物および構成部材の限界状態と目標構造性能の設定法や構造解析における基本事項などを検討し、耐震性能評価法の枠組みをまとめた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

1. 倉本 洋、山口敏和、山本直輝、松井智哉：CES門形フレーム補強を施したRCフレームの耐震性能、日本建築学会構造系論文集、第636号、pp.351-358、2009年2月(査読有)
2. 倉本 洋、芳賀亮祐、松井智哉、田口孝：CES外付耐震補強RCフレームの動的載荷実験、日本建築学会構造系論文集、第630号、pp.1265-1272、2008年8月(査読有)
3. 松井智哉、倉本 洋：繰返し水平力を受けるCES柱梁接合部の応力伝達機構、日本建築学会構造系論文集、第630号、pp.1401-1407、2008年8月(査読有)
4. 倉本 洋、松井智哉、今村岳大、田口孝：CES合成構造平面架構の構造性能、日本建築学会構造系論文集、第629号、pp.1103-1110、2008年7月(査読有)
5. 佐藤美郷、倉本 洋、田口 孝、松井智哉：CES外付耐震補強RC柱の耐震性能に及ぼす既存柱の破壊モードとせん断スパン比の影響、コンクリート工学年次論文集、第30巻、第3号、pp.1225-1230、2008年7月(査読有)
6. 岩瀬勝洋、松井智哉、倉本 洋：CES内部柱梁接合部の構造性能、コンクリート工学年次論文集、第30巻、第3号、pp.1351-1356、2008年7月(査読有)
7. 倉本 洋、松井智哉、永田 諭、藤本利昭：CES合成構造システムにおける外部柱梁接合部の構造性能、日本建築学会構造系論文集、第624号、pp.235-242、2008年2月(査読有)
8. 河本孝紀、倉本 洋、尾崎純二、松井智哉、藤本利昭：中低層住宅用プレキャストCES壁柱の構造性能に関する実験的研究、日本建築学会技術報告集、第13巻、第26号、pp.573-578、2007年12月(査読有)

9. 山口敏和、北村敏也、松井智哉、倉本 洋：CESフレームを挿入した補強RCフレームの耐震性能に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、第29巻、第3号、pp.1177-1182、2007年7月(査読有)
10. 芳賀亮介、田口 孝、松井智哉、倉本 洋：CES外付耐震補強を施したRC柱の耐震性能、コンクリート工学年次論文集、第29巻、第3号、pp.1183-1188、2007年7月(査読有)
11. 田口 孝、芳賀亮介、深津尚人、倉本 洋：CES外付耐震補強を施したRCフレームの動的載荷実験、コンクリート工学年次論文集、第29巻、第3号、pp.1189-1194、2007年7月(査読有)
12. 松井智哉、倉本 洋：CES柱梁接合部の非線形FEM解析、コンクリート工学年次論文集、第29巻、第3号、pp.1327-1332、2007年7月(査読有)
13. 永田 諭、松井智哉、倉本 洋：鉄骨コンクリート造柱梁接合部の構造性能に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、第28巻、第2号、pp.1267-1272、2006年7月(査読有)
14. 田口 孝、永田 諭、松井智哉、倉本 洋：H型鉄骨を内蔵したCES柱の構造性能、コンクリート工学年次論文集、第28巻、第2号、pp.1273-1278、2006年7月(査読有)
15. 藤本利昭、永田 諭、松井智哉、倉本 洋：プレキャストCES柱の構造性能に及ぼすパネル接合方法の影響、コンクリート工学年次論文集、第28巻、第2号、pp.1279-1284、2006年7月(査読有)

[学会発表] (計 16 件)

(国際会議論文)

1. T. Fujimoto, H. Kuramoto and T. Matsui: Seismic Performance of Columns and Beam-Column Joints in Composite CES Structural System, Proceedings of Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Paper ID: 05-06-0073, October 2008. (abstract 査読有)
2. T. Kawamoto, H. Kuramoto, T. Matsui, T. Fujimoto and J. Osaki: Behavior of Precast CES Columns for Middle and Low-rise Houses, Proceedings of Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Paper ID: 05-06-0078, October 2008. (abstract 査読有)
3. T. Matsui and H. Kuramoto: Stress Transferring Mechanisms of Composite CES Beam-Column Joints Subjected to Seismic Loading, Proceedings of Fourteenth World Conference on Earthquake

- Engineering, Beijing, China, Paper ID: 05-06-0065, October 2008. (abstract査読有)
4. Fauzan, H. Kuramoto, T. Matsui and T. Taguchi: Test on 2-Bay 2-Story CES Frame Subjected to Lateral Load Reversals, Proceedings of Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Paper ID: 05-06-0063, October 2008. (abstract査読有)
 5. T. Taguchi, H. Kuramoto, T. Matsui and T. Kamiya: Dynamic Loading Test on RC Frame Retrofitted by Outer CES Frame, Proceedings of Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Paper ID: 05-06-0075, October 2008. (abstract査読有)
 6. T. Matsui and H. Kuramoto: Three Dimensional Non-Linear FEM Analysis of CES Beam-Column Joints, Proceedings of 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 4A127 (CD-ROM), December 2007. (abstract査読有)
(シンポジウム論文)
 7. 岩瀬勝洋、倉本 洋、松井智哉、藤本利昭: CES 柱梁接合部の構造性能、第7回複合構造の活用に関するシンポジウム、土木学会/日本建築学会、Paper No.33 (CD-ROM)、2007年11月 (査読無)
 8. 松井智哉、倉本 洋: CES 柱梁接合部における負担せん断力に関する解析的研究、第7回複合構造の活用に関するシンポジウム、土木学会/日本建築学会、Paper No.34 (CD-ROM)、2007年11月 (査読無)
 9. 今村岳大、倉本 洋、松井智哉、田口孝: 2 層2 スパンCES フレームの実験と解析、第7回複合構造の活用に関するシンポジウム、土木学会/日本建築学会、Paper No.35 (CD-ROM)、2007年11月 (査読無)
 10. 佐藤美郷、倉本 洋、芳賀亮祐、松井智哉、田口 孝、鈴木峰里: CES 外付耐震補強を施したRC 柱の耐力と変形性能、第7回複合構造の活用に関するシンポジウム、土木学会/日本建築学会、Paper No.36 (CD-ROM)、2007年11月 (査読無)
 11. 芳賀亮祐、倉本 洋、佐藤美郷、松井智哉、田口 孝、深津尚人: CES 外付耐震補強を施したRC フレームの動的挙動、第7回複合構造の活用に関するシンポジウム、土木学会/日本建築学会、Paper No.37 (CD-ROM)、2007年11月 (査読無)
 12. 山本直輝、倉本 洋、山口敏和、松井智哉、北村敏也、小林義信: CES フレームを挿入した補強RCフレームの耐震性能に及ぼす接合方法の影響、第7回複合構造の活用に関するシンポジウム、土木学会/日本建築学会、Paper No.38 (CD-ROM)、2007年11月 (査読無)
 13. 山口敏和、倉本 洋、山本直輝、松井智哉、北村敏也、小林義信: CES門形フレームで補強したRCフレームの静的および動的載荷実験、第7回複合構造の活用に関するシンポジウム、土木学会/日本建築学会、Paper No.39 (CD-ROM)、2007年11月 (査読無)
(国内学会口頭発表)
 14. 倉本 洋: 新合成構造指針の確立過程 (CES構造を例として)、2008年度日本建築学会大会 (中国) 構造部門 (SCCS) パネルディスカッション「多様化する合成構造の設計規準の確立に向けて」資料、日本建築学会、pp.33-40、2008年9月 (査読無)
 15. 倉本 洋: 新合成構造システム: CES、2006年度日本建築学会大会 (関東) 構造部門 (SCCS) パネルディスカッション「New Composite Structures - CES構造システムの実用化を目指して-」資料、日本建築学会、pp.11-14、2006年9月 (査読無)
 16. 三宅辰哉、倉本 洋、松井智哉: CESの構造評価・設計方法、2006年度日本建築学会大会 (関東) 構造部門 (SCCS) パネルディスカッション「New Composite Structures - CES構造システムの実用化を目指して-」資料、日本建築学会、pp.27-32、2006年9月 (査読無)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
倉本 洋 (KURAMOTO HIROSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20234544
 - (2) 研究分担者
 - (3) 連携研究者
松井 智哉 (MATSUI TOMOYA)
豊橋技術科学大学・工学部・助教
研究者番号: 20402662
中澤 祥二 (NAKAZAWA SHOJI)
豊橋技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 70314094
西山 功 (NISHIYAMA ISAO)
国交省国土技術政策総合研究所・建築部・部長
研究者番号: 30344005
福山 洋 (FUKUYAMA HIROSHI)
独立行政法人建築研究所・構造研究グループ・上席研究員
研究者番号: 60344008
西村 泰志 (NISHIMURA YASUSHI)
大阪工業大学・工学部・教授
研究者番号: 10102998