

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21246088

研究課題名（和文）

長期耐用型新建築合成構造(CES)の構造性能評価法の確立

研究課題名（英文）

Establishment of Structural Performance Evaluation Method for A New Composite Building Structural System (CES)

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（和文）：

長期耐用型の新建築構造として提案された CES (Concrete Encased Steel) 合成構造の実用化を目的として、CES 柱、スラブ付 CES 架構および CES 耐震壁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、韌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、構造性能評価に必要な諸耐力、変形能力および復元力特性モデル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 造建築物の構造性能評価法をまとめた。

研究成果の概要（英文）：

For the purpose of practical use of the composite CES (Concrete Encased Steel) structure proposed as a new building structural system of the long-term durability type, structural tests on CES columns, CES frames with floor slab and CES shear walls were conducted. It was clarified from the tests that the CES members have good seismic performance with high strength, ductility and damage control effects. The evaluation methods of the strengths, deformability and restoring force characteristic of the CES members are proposed based on the test results. Furthermore, the evaluation method for structural performance of CES buildings using the response and limit strength method is proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

|         | 直接経費       | 間接経費       | 合計         |
|---------|------------|------------|------------|
| 2009 年度 | 15,100,000 | 4,530,000  | 19,630,000 |
| 2010 年度 | 7,800,000  | 2,340,000  | 10,140,000 |
| 2011 年度 | 10,500,000 | 3,150,000  | 13,650,000 |
| 2012 年度 | 3,700,000  | 1,110,000  | 4,810,000  |
| 年度      |            |            |            |
| 総計      | 37,100,000 | 11,130,000 | 48,230,000 |

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、構造性能評価法、構造実験、CES 柱、スラブ付 CES 架構、CES 耐震壁、変形能力、復元力特性

## 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、1990年代後半頃から鉄筋コンクリ

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顕在化し、その建設シェアが減少傾向を辿ってきた。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建築構造に比して卓抜している。

そこで、研究代表者等は1998年頃からSRC構造と同程度の高耐震性を有し、より施工性に優れた長期耐用型の建築合成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）構造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。

本研究開始当初においては、構造実験を通してCES柱、CES柱梁接合部およびCESフレーム架構の構造性能を概ね把握する段階に至っていたが、建築物の主要構造部材の一つであるCES耐震壁やスラブ付CES架構の構造性能を把握すること、およびCES造建築物の構造性能評価を確立するために、CES構造部材・架構の諸耐力と復元力特性の評価法の構築や限界耐力計算の適用可能性の検討などがこの研究の重要課題として残されていた。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、これまで未検討であったCES耐震壁やスラブ付CES架構の構造性能を構造実験およびFEM解析によって把握するとともに、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構造性能評価法を開発することを目的とした。特に後者については、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CES構造部材・架構の諸耐力式、復元力特性モデルおよび限界変形評価式などの構築に重点を置いた。

## 3. 研究の方法

### (1) CES耐震壁の構造性能評価

この研究では、CES耐震壁の構造性能に及ぼすCES付帯柱の拘束効果の影響、ならびに壁板の偏在配置や壁筋の周辺架構への定着方法の違い（図1：完全接合タイプおよび半接合タイプ）による応力伝達メカニズムの変化を構造実験（写真1）により検討した。また、FEM解析を実施し、構造実験結果のシミュレーションを行うとともに、実験では測定できない内部応力の分布や推移状況等を検討した。さらに、これらの実験的および解析的研究結果に基づいてCES耐震壁の耐力および変形能力の評価法、ならびに復元力特性モデルを検討した。

### (2) スラブ付CES架構の構造性能評価

この研究では、スラブ付CES架構の構造性能の把握を目的として、写真2に示すような柱梁接合部の構造実験を実施した。試験体は実大の約2/5縮尺のもの2体であり、実験変数には破壊モード（梁の曲げ降伏先行型および接合部せん断破壊先行型）を選択した。また、3次元FEM解析を実施し、構造実験結果

のシミュレーションを行うとともに、スラブの有無による接合部内の応力伝達メカニズムの相違を検討した。さらに、これらの研究成果に基づいてスラブ付CES柱梁接合部のせん断耐力評価法を検討した。

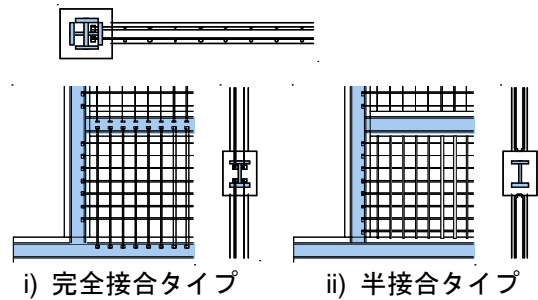


図1 壁縦筋の接合方法



写真1 CES耐震壁の構造実験



写真2 CES架構の構造実験

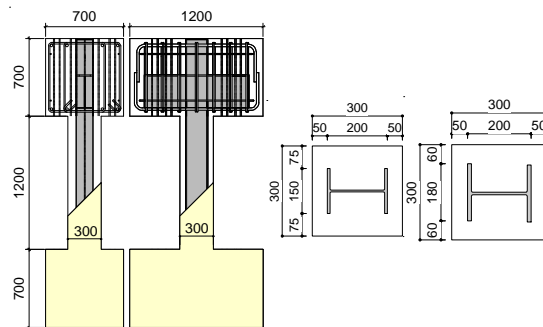


図2 CES柱試験体（B3タイプ、B3MBタイプ）

### (3) CES柱の限界変形角評価

この研究ではまず、既往の研究で未検討であったCES柱の構造性能に及ぼす繊維補強コンクリート (FRC) の繊維混入量と内蔵鉄骨のフランジ幅の影響を検討するために4体の試験体を用いた静的荷重実験を実施した (図2)。さらに、これらの4体と既往試験体9体の計13体に対して、軸力比、鉄骨量、せん断スパン比、繊維混入量および鉄骨フランジ幅の影響を考慮した限界変形の評価式の構築を試みた。また、静的荷重増分解析に適用可能なCES柱の復元力特性モデルも併せて検討した。

## 4. 研究成果

### (1) CES耐震壁の構造性能評価

壁筋の周辺架構への定着方法と破壊モードを実験変数とした4体のCES耐震壁の実験を実施し、構造性能を比較した。その結果、図3に示すように、①せん断破壊先行型と曲げ降伏先行型ともに壁縦筋の定着方法の相違に関わらず、最大耐力は同程度となること、②壁縦筋が定着されているCES耐震壁の耐力は急激に低下しているのに対し、定着されていない耐震壁の耐力低下は緩やかであり、変形能力が増加すること、および③CES耐震壁の曲げ終局耐力はSRC規準によって、せん断終局耐力は広沢式およびトラス・アーチ式によってそれぞれ評価可能であること、などを明らかにした。

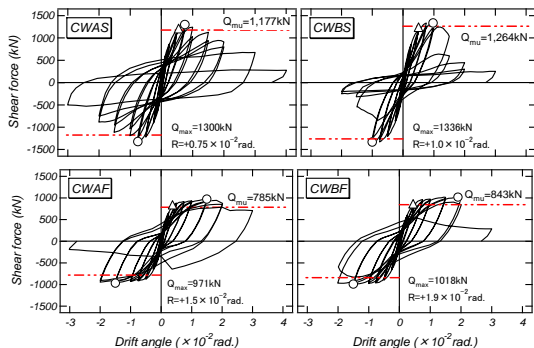


図3 CES耐震壁の実験結果

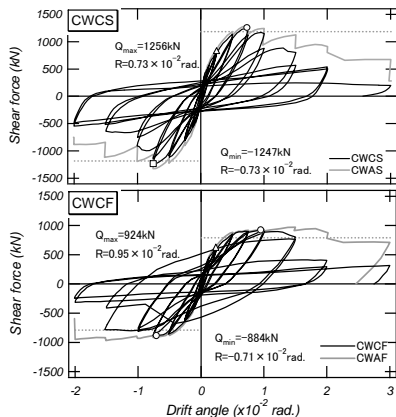


図4 壁偏心配置のCES耐震壁の実験結果

また、図4に示すように壁を偏心配置したCES耐震壁の実験から、①破壊モードに拘わらず、偏心配置したものの最大耐力は、無偏心のものと同程度であること、および②偏心配置したものは無偏心のものに比べて変位振幅の増大に伴って壁のせん断変形量が増加し、結果として最大耐力以降における変形能力が低下すること、などを明らかにした。

さらに、図5に示すような3種類の壁偏心モデルを用いたCES耐震壁の3次元非線形FEM解析を実施し、壁板が偏心配置されている場合でも、側柱中心位置が壁板厚の範囲にあると (図中の小偏心モデル) 無偏心壁配置の耐震壁と同程度のせん断力伝達性能が期待できることを明らかにした。

### (2) スラブ付CES架構の構造性能評価

スラブがCES造柱梁接合部の構造性能に及ぼす影響を検討するために、梁曲げ破壊先行型と接合部せん断破壊型の2体の試験体の実験を実施し、既往のスラブ無し試験体の実験結果と比較した (図6)。その結果、①スラブが付くことにより、接合部パネルゾーンの水平方向の変形が抑制されるとともに接合部内鉄骨ウェブの降伏が遅延され、結果として接合部の損傷が軽減されるとともにせん断耐力が増加すること、および②スラブ付き梁の終局曲げ耐力は一般累加強度理論を用いて評価できること、などを明らかにした。

また、3次元FEM解析によりスラブ付きCES柱梁接合部の応力伝達メカニズムを検討し、スラブが取り付くことによって接合部

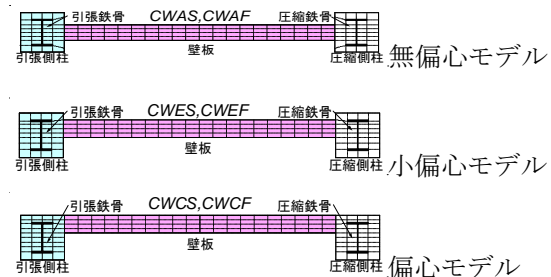


図5 CES耐震壁の解析モデル断面

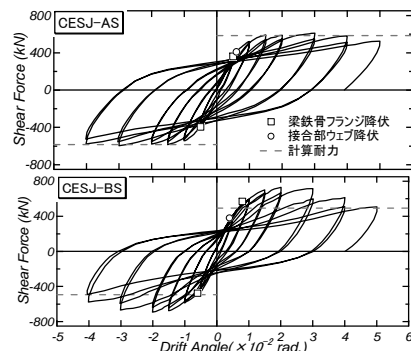


図6 スラブ付きCES柱梁接合部の実験結果 (上: 梁曲げ降伏先行型、下: 接合部せん断破壊型)

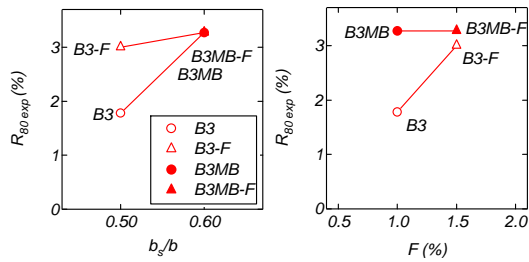


図7  $R_{80,exp}$ - $b_y/b$  関係および  $R_{80,exp}$ - $F$  関係

パネル鉄骨ウェブのせん断変形角および負担せん断力には大きな影響を及ぼさないが、接合部の梁幅より外側のコンクリートの負担せん断力が増加するため、結果として接合部の終局せん断耐力が増加することを明らかにした。

### (3) CES柱の限界変形角評価

FRCの繊維混入量および内蔵鉄骨のフランジ幅の違いがH型鉄骨を内蔵したCES柱の変形能力および破壊状況に及ぼす影響を検討するために静的実験を実施した。その結果、繊維混入量が増加するとCES柱の変形能力は増加する傾向にあるが、内蔵鉄骨のフランジ幅が大きな場合には鉄骨によるコンクリートの拘束領域が増加することで変形能力が増加する反面、フランジ位置でのかぶりが小さくなるため、変形能力改善に及ぼす繊維混入量の影響は減少することを明らかにした(図7)。

上記の実験結果を踏まえ、軸力比( $N/N_0$ )、内蔵鉄骨量( $A_s/BD$ )、せん断スパン比( $a/D$ )、繊維混入量( $F$ )および内蔵鉄骨のフランジ幅( $b_y/b$ )を変数としたCES柱の変形能力評価式として次式を提案した。

$$R_{80,cal} = -24.5 \cdot N/N_0 + 18.5 \cdot A_s/BD + 1.6 \cdot a/D + (-24.4 b_y/b + 14.6) \cdot F + 39.3 b_y/b - 17.4$$

$$R_{85,cal} = -19.1 \cdot N/N_0 + 13.5 \cdot A_s/BD + 1.2 \cdot a/D + (-11.0 b_y/b + 6.6) \cdot F + 26.2 b_y/b - 10.3$$

$$R_{90,cal} = -14.3 \cdot N/N_0 + 9.3 \cdot A_s/BD + 0.7 \cdot a/D + (-5.5 b_y/b + 3.4) \cdot F + 21.3 b_y/b - 7.8$$

提案した変形能力評価式の精度を検証した結果、限界変形角 $R_{80}$ 、 $R_{85}$ 、 $R_{90}$ の計算値と実験値の比( $n=R_{cal}/R_{exp}$ )の平均値は1.00、0.99および1.00、標準偏差は0.09、0.09および0.10となり、実験結果と極めてよい対応を示した。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計25件)

1. 石鈞吉、牧元祐太、Juan Jose CASTRO、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、第682号、pp.1977-1982、2012年12月
2. 鈴木卓、倉本洋、松井智哉：CES造連層

耐震壁の構造性能に及ぼす壁板位置の影響、日本建築学会構造系論文集、第681号、pp.1801-1807、2012年11月

3. 藤井崇嗣、岐津幸大、松井智哉、倉本洋：曲げ降伏型プレキャストCES造耐震壁の構造性能、コンクリート工学年次論文集、第34巻、第2号、pp.355-360、2012年7月
4. 奥林泰昭、田口孝、長塚典和、倉本洋：制振装置を用いた架構増設型耐震補強工法の開発、コンクリート工学年次論文集、第34巻、第2号、pp.949-954、2012年7月
5. 田口孝、乃村亮、Juan Jose CASTRO、倉本洋：CES部材を用いた外付柱補強工法の基礎研究、コンクリート工学年次論文集、第34巻、第2号、pp.1039-1044、2012年7月
6. 小島佑太、松井智哉、北村敏也、倉本洋：CES付帯フレームで補強されたRC柱の静的載荷実験、コンクリート工学年次論文集、第34巻、第2号、pp.1045-1050、2012年7月
7. 吉野貴紀、松井智哉、倉本洋：スラブ付きCES造柱梁接合部の3次元FEM解析、コンクリート工学年次論文集、第34巻、第2号、pp.1219-1224、2012年7月
8. 鈴木卓、松井智哉、倉本洋：壁縦筋の定着方法の異なるCES造連層耐震壁の非線形FEM解析、日本建築学会構造系論文集、第666号、pp.1533-1540、2011年8月
9. 鈴木卓、岐津幸大、松井智哉、倉本洋：壁板が柱に偏心して取り付けいたCES造耐震壁の構造性能、コンクリート工学年次論文集、第33巻、第2号、pp.391-396、2011年7月
10. 岐津幸大、鈴木卓、松井智哉、倉本洋：プレキャスト化したCES造耐震壁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33巻、第2号、pp.415-420、2011年7月
11. 福池章平、松井智哉、北村敏也、倉本洋：CES付帯柱で補強された既存RC柱の構造性能に及ぼすあと施工アンカーの影響、コンクリート工学年次論文集、第33巻、第2号、pp.1015-1020、2011年7月
12. 吉野貴紀、松井智哉、倉本洋：スラブ付きCES造柱梁接合部の静的加力実験、コンクリート工学年次論文集、第33巻、第2号、pp.1123-1128、2011年7月
13. 石鈞吉、Juan Jose CASTRO、松井智哉、倉本洋：H型鉄骨内蔵CES柱の構造実験と変形能力評価、コンクリート工学年次論文集、第33巻、第2号、pp.1183-1188、2011年7月

14. 乃村 亮、田口 孝、Juan Jose CASTRO、倉本 洋 : CES 外付耐震補強を施した垂壁・腰壁付き RC 柱の耐震性能、コンクリート工学年次論文集、第 33 巻、第 2 号、pp.1351-1356、2011 年 7 月
15. 松井智哉、倉本 洋 : CES 柱梁接合部の構造性能に及ぼす作用軸力の影響、日本建築学会構造系論文集、第 663 号、pp.1025-1031、2011 年 5 月
16. 田口 孝、神谷 隆、石 鈞吉、倉本 洋 : 架構増設型 CES 耐震補強工法に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.57B、pp.543-550、2011 年 3 月
17. 藤本利昭、倉本 洋、松井智哉、小松博 : 繊維補強コンクリートの材料特性を考慮した CES 柱の終局耐力に関する考察、日本建築学会構造系論文集、第 658 号、pp.2231-2238、2010 年 12 月
18. 福池章平、松井智哉、北村敏也、倉本 洋 : CES 付帯柱で補強された曲げ降伏先行型 RC 柱の挙動、コンクリート工学年次論文集、第 32 巻、第 2 号、pp.967-972、2010 年 7 月
19. 田口 孝、倉本 洋、神谷 隆、深津尚人 : CES 構造を利用した架構増設型耐震補強工法の開発、コンクリート工学年次論文集、第 32 巻、第 2 号、pp.973-978、2010 年 7 月
20. 金子慶一、松井智哉、福池章平、倉本 洋 : CES 付帯柱で補強されたせん断破壊型 RC 柱の挙動、コンクリート工学年次論文集、第 32 巻、第 2 号、pp.1009-1014、2010 年 7 月
21. 松井智哉、溝渕博己、倉本 洋 : H 型鉄骨内蔵 CES 柱の構造実験と FEM 解析、コンクリート工学年次論文集、第 32 巻、第 2 号、pp.1171-1176、2010 年 7 月
22. 鈴木 卓、松井智哉、倉本 洋 : CES 造耐震壁の構造性能に及ぼす壁筋の定着状態の影響、コンクリート工学年次論文集、第 32 巻、第 2 号、pp.1189-1194、2010 年 7 月
23. 田口 孝、倉本 洋、松井智哉 : CES 外付耐震補強 RC 柱の耐震性能に及ぼす CES 柱形状の影響、コンクリート工学年次論文集、第 31 巻、第 2 号、pp.1045-1050、2009 年 7 月
24. 金子慶一、山本直輝、松井智哉、倉本 洋 : CES 門形補強工法における補強合成梁の構造性能、コンクリート工学年次論文集、第 31 巻、第 2 号、pp.1063-1068、2009 年 7 月
25. 松井智哉、溝渕博己、藤本利昭、倉本 洋 : シアスパン比が異なる CES 柱の静的載荷実験、コンクリート工学年次論文集、第 31 巻、第 2 号、pp.1165-1170、2009 年 7 月

[学会発表] (計 20 件)  
(国際会議論文)

1. S. Suzuki, H. Kuramoto and T. Matsui : A Study on Structural Performance of CES Shear Walls with Eccentrically Arranged Wall Panel, Proceedings of 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, pp.837-842, March 2013. (abstract 査読有)
2. J. Shi, H. Kuramoto, J. J. Castro, T. Matsui and T. Fujimoto: Structural Performance of Concrete Encased Steel Columns with H-shaped Steel, Proceedings of Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Paper ID: 811, September 2012. (abstract 査読有)
3. S. Suzuki, T. Matsui and H. Kuramoto: A Fundamental Study on Structural Performance of CES Shear Walls with Different Anchorage Conditions of Wall Reinforcing Bars, Proceedings of Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Paper ID: 961, September 2012. (abstract 査読有)
4. T. Matsui, S. Suzuki and H. Kuramoto: Experimental Study on Structural Performance of Precast CES Shear Walls, Proceedings of Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Paper ID: 2177, September 2012. (abstract 査読有)
5. J. J. Castro, R. Nomura, H. Kuramoto, T. Taguchi and T. Kamiya: Seismic Performance of Reinforced Concrete Columns with Spandrel Walls Retrofitted Using CES System, Proceedings of Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Paper ID: 3940, September 2012. (abstract 査読有)
6. T. Matsui and H. Kuramoto: Structural Performance and FEM Analysis of CES Beam-Column Joints, Proceedings of 10th International Conference on Advances in Steel Concrete Composite and Hybrid Structures (ASCCS2012), Singapore, pp.733-740, July 2012. (abstract 査読有)
7. T. Matsui, S. Suzuki and H. Kuramoto: A Fundamental Study on Structural Performance of CES Shear Wall with Different Anchorage Condition of Wall Reinforcement, Proceedings of 8th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Paper ID

- 04-288 (CD-ROM), March 2011. (abstract 査読有)  
(シンポジウム論文)
8. 鈴木 卓、松井智哉、倉本 洋：壁板が柱に偏心して取り付いたCES造耐震壁の非線形FEM解析、第9回複合・合成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.17 (CD-ROM)、2011年11月 (査読無)
  9. 吉野貴紀、松井智哉、倉本 洋：スラブ付きCES造柱梁接合部のFEMによるシミュレーション解析、第9回複合・合成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.18(CD-ROM)、2011年11月 (査読無)
  10. 岐津幸大、鈴木 卓、松井智哉、倉本 洋：プレキャストCES造耐震壁の構造性能、第9回複合・合成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.25 (CD-ROM)、2011年11月 (査読無)
  11. 乃村 亮、田口 孝、神谷 隆、Juan Jose CASTRO、倉本 洋：CES外付耐震補強を施した垂壁・腰壁付きRC柱の耐力と変形性能、第9回複合・合成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.26 (CD-ROM)、2011年11月 (査読無)
  12. 石 鈞吉、牧元祐太、藤本利昭、Juan Jose CASTRO、松井智哉、倉本 洋：H型鉄骨を内蔵したCES柱の構造性能評価、第9回複合・合成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.31 (CD-ROM)、2011年11月 (査読無)
  13. 小島佑太、松井智哉、福池章平、倉本 洋、金子慶一、北村敏也：形状の異なるCES付帯柱で補強されたRC柱の構造性能、第9回複合・合成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.32 (CD-ROM)、2011年11月 (査読無)
  14. 石 鈞吉、劉 春陽、田口 孝、神谷 隆、倉本 洋：架構増設型CES耐震補強工法に関する研究、第13回日本地震工学シンポジウム論文集、DVD No.GO10-Sat-AM-9、2010年11月 (査読無)
  15. 藤本利昭、倉本 洋、松井智哉：交差H型断面鉄骨を内蔵したCES柱の構造性能、第8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.4 (CD-ROM)、2009年11月 (査読無)
  16. 溝渕博己、松井智哉、藤本利昭、倉本 洋：軸力比およびシアスパン比が異なるH型鉄骨内蔵CES柱の静的載荷実験、第8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.5 (CD-ROM)、2009年11月 (査読無)
  17. 松井智哉、倉本 洋：CES柱梁接合部のせん断挙動に関する研究、第8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.27 (CD-ROM)、2009年11月 (査読無)
  18. 田名部智、熊谷将吾、新藤健太、平松 靖、宮武 敦、松井智哉、瀧野敦夫、倉本 洋：国産スギ集成材を用いたEWECs柱梁接合部の構造性能、第8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.44 (CD-ROM)、2009年11月 (査読無)
  19. 田口 孝、神谷 隆、倉本 洋：材料特性の異なるFRCを用いた外付耐震補強工法におけるCES補強柱の構造性能、第8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.52 (CD-ROM)、2009年11月 (査読無)  
(国内学会口頭発表)
  20. 倉本 洋：今後展開される新たな合成構造例：CES構造の展開、2012年度日本建築学会大会(東海)構造部門(SCCS)パネルディスカッション「今後の合成構造の展開を考える」資料、日本建築学会、pp.4-11、2012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  
眞田 靖士 (SANADA YASUSHI)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：80334358  
岸本 一蔵 (KISHIMOTO ICHIZO)  
近畿大学・建築学部・教授  
研究者番号：40234215  
中川 隆夫 (NAKAGAWA TAKAO)  
元大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：60335370  
松井 智哉 (MATSUI TOMOYA)  
豊橋技術科学大学・工学部・准教授  
研究者番号：20402662  
秋田 知芳 (AKITA TOMOFUSA)  
千葉大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：60512374  
和泉 信之 (IZUMI NOBUYUKI)  
千葉大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：80526773