

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：26402

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14293

研究課題名（和文）応力伝達機構の確信に基づくCES埋込み柱脚の構造性能評価法の革新

研究課題名（英文）Innovation of Structural Performance Evaluation Method for CES Embedded Column base based on Confidence in Stress Transferring Mechanisms

研究代表者

鈴木 卓（SUZUKI, SUGURU）

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号：20738710

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、柱鉄骨の埋込み深さ比およびベースプレートの有無を変数としたCES埋込み柱脚の静的載荷実験を実施した。その結果、柱下部の損傷が顕著であった埋込み深さ比1.5以上の試験体では柱曲げ降伏先行型の破壊モードを、スタブの損傷が顕著であった埋込み深さ比1.0の試験体では柱脚曲げ降伏先行型の破壊モードを示す傾向が確認された。また、柱脚曲げ耐力評価のために埋込み部における鉄骨およびコンクリート間の抵抗機構を提案した。提案した柱脚曲げ耐力および一般化累加強度理論による柱曲げ耐力は本論に示す試験体の最大耐力および破壊モードを評価可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はCES埋込み柱脚の耐力評価法の構築による合理的設計・施工法の構築を目指したものである。提案した耐力評価法は柱脚における鉄骨の埋め込み深さの判定を可能とする。これにより、基礎のサイズ縮小および配筋の簡略化を可能とするものである。また、埋込み柱脚は非埋込み柱脚と比べて高い耐震性を有することから、上部構造から基礎構造にかけて安全な建築構造物の提供を可能とする。

研究成果の概要（英文）： In this study, static loading experiments on a CES embedded column bases were conducted. As a result, the failure mode of the specimens with an embedment depth ratio of 1.5 or more, in which the damage at the bottom of the column was significant, was the column bending yield type. On the other hand, the failure mode of the specimens with an embedment depth ratio of 1.0, in which the stub damage was significant, was the column base bending yield-first type. In addition, a stress resistance mechanism between the steel frame and concrete in the embedded part was proposed to evaluate the bending strength of the column base. The column base strength evaluation method based on the proposed stress resistance mechanism showed good correspondence with the maximum strength of the CES embedded column base test specimen.

研究分野：耐震設計

キーワード：合成構造 静的載荷実験 最大耐力 有限要素法解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

内蔵鉄骨を有する CES (Concrete Encased Steel) 構造では、上部 CES 建物と基礎構造を結ぶ柱脚 (以下、CES 柱脚) が存在する。応募者の行った既往研究では、CES 柱脚は高い耐震性能を有するものの、SRC (Steel Reinforced Concrete) 柱脚を基に算定した支圧耐力式 (以後、現設計式と呼称) の計算結果は、CES 柱脚の最大耐力を大幅に過小評価した。現設計式は図 1(a)中の埋込み部の支圧による応力伝達が考慮されているものの、検証例が少なく、同文献中で現設計式の過小評価が指摘されている。申請者らの実施した有限要素法 (以下、FEM) 解析の結果、同図(b)に示す従来の設計式で考えられていない3つの抵抗機構の存在の可能性を指摘した。

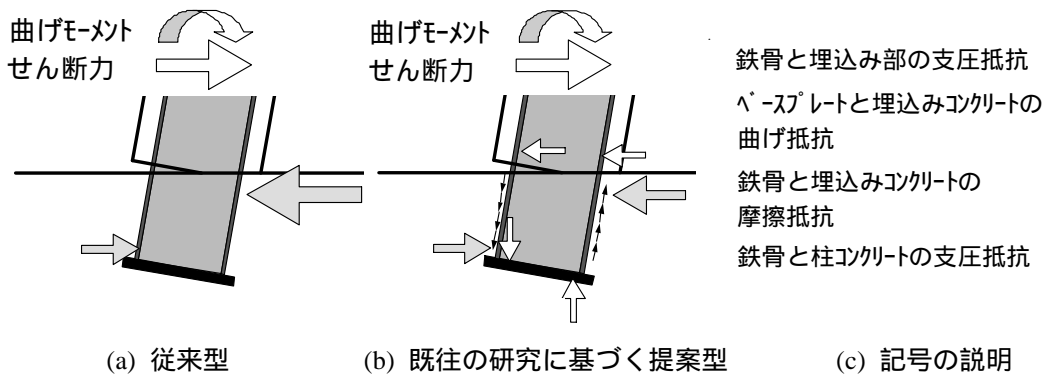


図 1 埋込み柱脚の鉄骨 - コンクリート間の応力伝達機構

2. 研究の目的

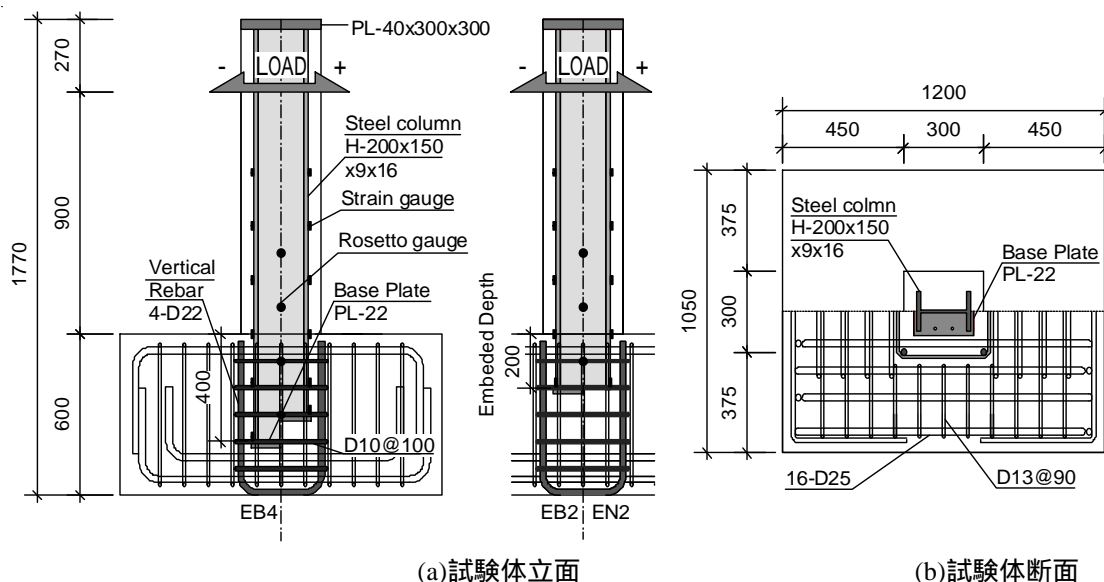
本研究の目的は CES 埋込み柱脚の耐力評価法の革新である。学術的な独自性は構造実験と FEM 解析に基づき現設計で考慮されていない柱脚の応力伝達機構の解明と設計式への反映を目指す点である。応力伝達抵抗機構の解明は、CES 構造のみならず埋込み柱脚を採用する構造形式全般の設計法にインパクトをもたらす。具体的には、鉄骨埋込み深さによる制限が撤廃され、評価精度が大幅に改善された柱脚支圧耐力と柱曲げ耐力の比較による鉄骨埋込み深さの設計が可能となり、設計・施工の合理化を見込むことが可能である。

3. 研究の方法

(1) 試験体

図 2 に試験体形状および寸法を示す。試験体は実大の約 1/3 のスケールのもので 4 体である。柱のコンクリート断面は 300mm 角、内蔵鉄骨は BH-200×150×9×16 である。柱脚から加力位置までの高さは 900mm (せん断スパン比 3.0) である。

実験変数には、柱鉄骨の埋込み深さを鉄骨せいで除した値 (以下、埋込み深さ比) およびベースプレート (以下、BP と略記する) の有無を選択した。試験体 EB2 と試験体 EN2 の埋込み深さ比は 1.0、試験体 EB3 の埋込み深さ比は 1.5、および試験体 EB4 の埋込み深さ比は 2.0 である。また、試験体 EB2、EB3 および EB4 における鉄骨最下部の BP は PL-22×175×225 である。一方



(a)試験体立面 (b)試験体断面
図 2 試験体の形状と寸法

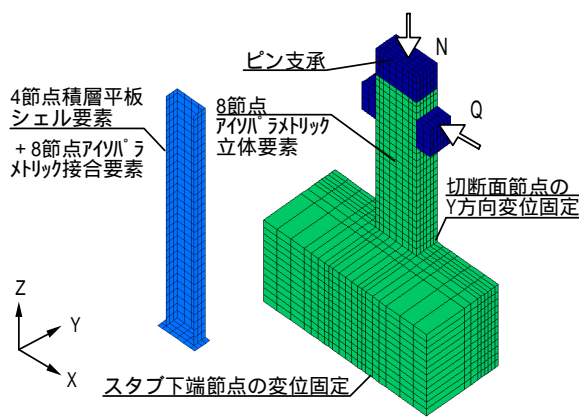
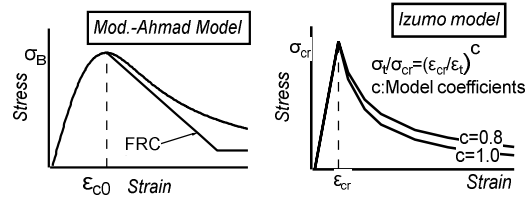
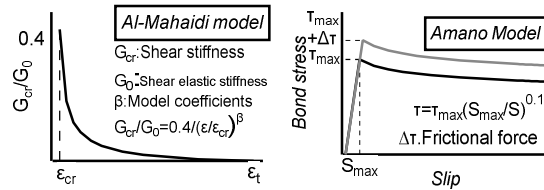


図3 要素分割



(a) 応力 - ひずみ関係

(b) 引張側特性



(c) せん断伝達特性 (d) 付着応力 - すべり関係

図4 材料構成則

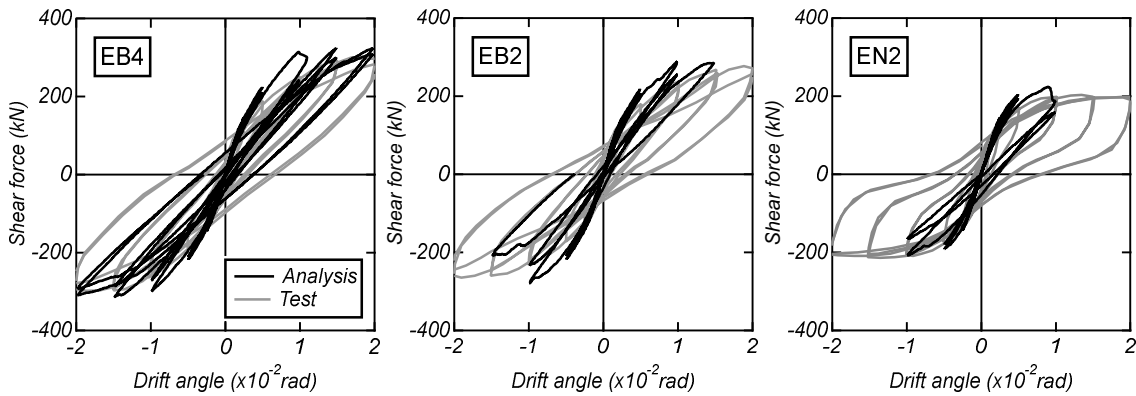


図5 実験および解析の履歴特性の比較

の試験体 EN2 には BP をつけないものとした。いずれの試験体も一般化累加強度理論による柱曲げ耐力計算値が柱脚曲げ耐力計算値より低くなるように設計された。

本試験体では、埋込み部であるスタブには普通コンクリートが、柱には繊維補強コンクリートが使用されている。柱に使用した繊維は標準長さ 30mm、直径 0.66mm のビニロンファイバーであり、体積混入率は 1.0% である。

試験体のスタブはアンカーボルトを用いて載荷フレームに固定され、柱上部のプレートは高力ボルトを用いて鉛直オイルジャッキに固定された。実験は鉛直オイルジャッキによって軸力比 0.2 を作用させつつ、載荷フレームに取り付けた 2 台の水平オイルジャッキにより水平力を載荷した。水平力載荷は加力点の水平変位 δ を柱脚から加力点までの高さ (900mm) で除した相対部材角 R による変位制御とした。

(2) 解析モデル

図 3 に試験体 EB2 の要素分割を、図 4 に材料構成則を示す。解析に使用したプログラムは市販の解析ソフトウェア「FINAL」である。試験体は面外方向の対称性を考慮して片側の半分のみをモデル化した。コンクリートおよび柱上部のピン支承は 8 節点アイソパラメトリック立体要素で定義し、スタブ内の鉄筋はコンクリート要素内に埋込み鉄筋として定義された。鉄骨は 4 節点積層平板シェル要素で、鉄骨およびコンクリートの間の付着特性を 8 節点アイソパラメトリック接合要素でそれぞれ定義した。また、 $P-\Delta$ 効果を考慮するために試験体上部に設置した鉛直オイルジャッキは軸剛性を剛とするトラス要素に置換した。境界条件はスタブ下端における節点の変位を固定した。また、試験体切断面におけるすべての節点の面外方向変位を固定した。

4. 研究成果

(1) 実験結果と解析結果の比較

図 5 に実験と解析の履歴特性の比較を示す。試験体 EB2 では、 $1/100\text{rad}$ のサイクルにおいて解析のせん断力は実験のもの比べて高くなる。一方で各試験体ともに $1/100\text{rad}$ 以外のサイクルでは、解析と実験のせん断力は概ね一致した。試験体 EB2 では $1/67$ のサイクル、および試験体 EN2 では $1/100\text{rad}$ のサイクルにおいて柱脚部引張側コンクリートのひずみ軟化挙動に伴う不安定化により解析が終了した。

図 6 に $R=1/50\text{rad}$ までの正載荷 1 サイクル目ピーク時における実験および解析の鉄骨ウェブせん断応力推移の比較を示す。柱下部に着目すると、各試験体ともに $1/67\text{rad}$ までの解析と実験のせん断応力の値は概ね一致している。一方の埋込み部に着目すると、全ての試験体において $1/100\text{rad}$ 以降の解析のせん断応力の値は実験のもの比べて低いものの、実験と解析の増加傾向

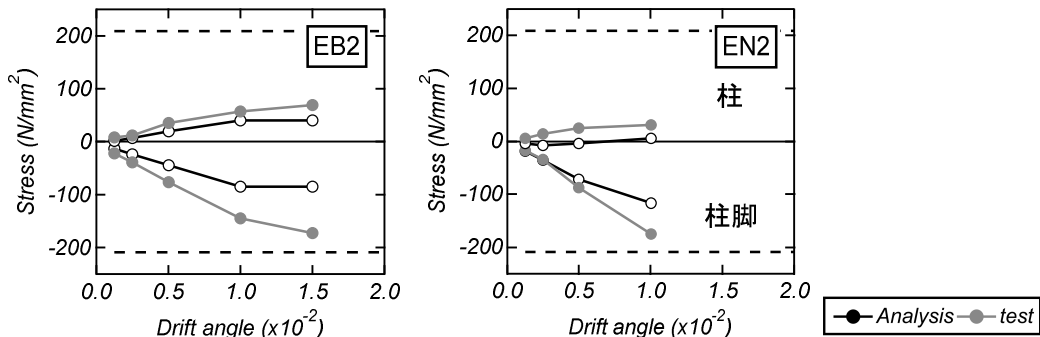


図6 鉄骨ウェブせん断応力の推移

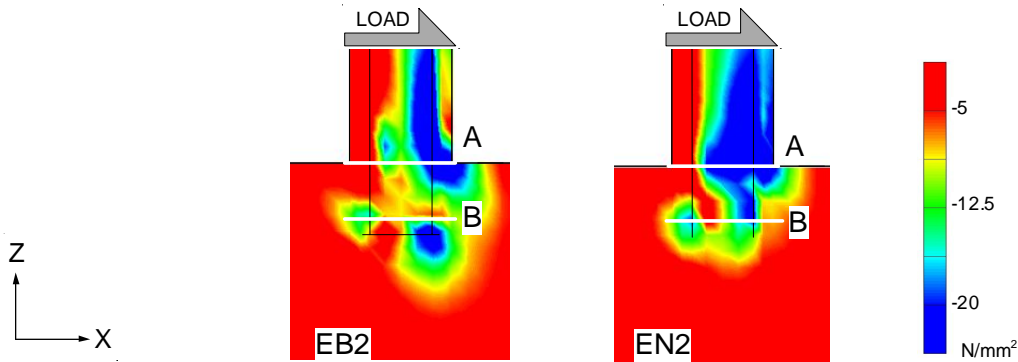


図7 最小応力分布 ($R=1/100rad$)

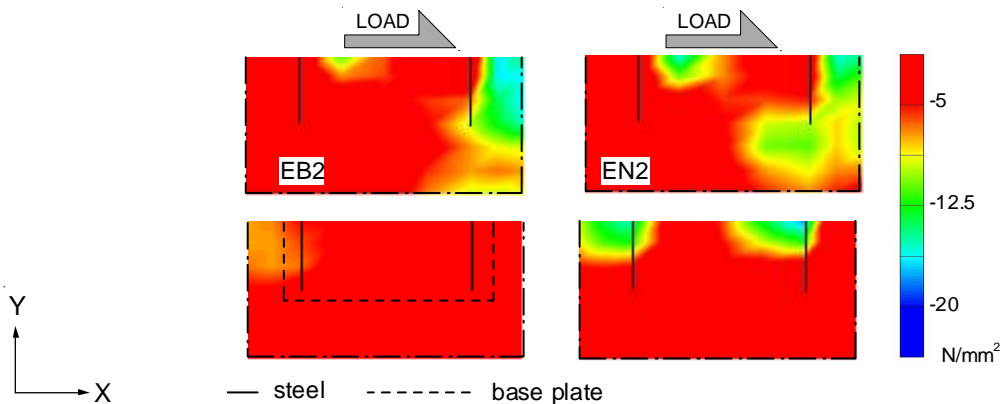


図8 X方向応力分布 ($R=1/100rad$, 上段: A断面, 下段: B断面)

は概ね対応している。以上の実験および解析における履歴特性および鉄骨ウェブのせん断応力推移の結果より、本論に示した解析モデルは各試験体の耐力のほぼ上限値までの実験結果を概ね再現することが可能である。

(2) 圧縮応力分布

図7に試験体の切断面におけるコンクリートの最小主応力分布を示す。なお、試験体EB2では、当該部材角における解析のせん断力は実験のものとは比べて高い。しかし、 $1/67rad$ のサイクルにおいてひずみ軟化に伴う不安定化の影響があったことから $1/100rad$ のものを示した。図8に埋込み部におけるコンクリートのX方向応力分布を示す。同図の上段は柱と柱脚の境界部(A断面)の値を、下段は埋込み下部(B断面)の値を示している。

図7の柱に着目すると、各試験体ともに圧縮フランジ付近の広範囲および引張フランジ下部の内側付近に圧縮応力の発生が確認された。これらは、図8のA断面に示すように、鉄骨フランジからコンクリートにかけての支圧応力の伝達によるものと判断される。図7の埋込部に着目すると、試験体EB4およびEB2ではB断面付近における引張フランジの外側および圧縮フランジの下部に圧縮応力の発生が確認された。一方の試験体EN2では、引張フランジの外側および圧縮フランジの内側にそれぞれ高い圧縮応力の発生が認められた。図8のB断面に着目すると、BPのある試験体EB4およびEB2では、引張フランジの外側に圧縮応力の発生が認められた。一方でBPのない試験体EN2では、引張フランジの外側と圧縮フランジの内側に高い圧縮力が発生しており、BPの有無による支圧応力の発生状況の差異が認められた。

(3) 柱脚曲げ耐力の提案式

図9に実験から想定される埋込み部における鉄骨-コンクリート間の応力状態を示す。柱下部位置では、軸力 N_s および曲げモーメント M_s が仮定され、前節で示したウェブのせん断応力の推移より当該位置のせん断力は無視した。BP位置では、軸力 N_b 、せん断力 Q_b および曲げモーメント M_b が仮定される。フランジ-コンクリート間には鉛直付着力(摩擦係数0.5を仮定)と

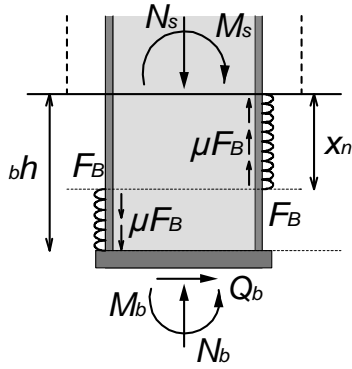


図7 鉄骨 - コンクリート間の応力状態

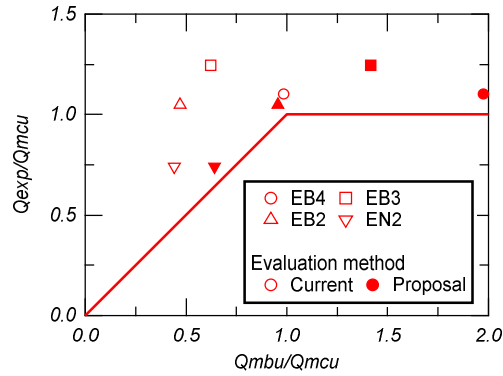


図8 実験値と計算値の比較

水平支圧応力の作用が考えられる。ウェブ - コンクリート間の支圧力と摩擦力は無視した。埋込み中立軸深さを x_n とすると、左右フランジに作用する支圧力は式(1)、水平力のつり合いは式(2)となる。

$$C = F_B b_e x_n, \quad T = F_B b_e (b h - x_n) \quad (1)$$

$$-C + T + Q_b = 0, \quad \therefore x_n = \frac{b h}{2} \left(1 + \frac{Q_b}{F_B b_e b h} \right) \quad (2)$$

フランジ - コンクリート間の付着応力は前述の支圧応力の摩擦応力により上昇する。鉄骨 - コンクリート間の摩擦係数を $\mu = 0.5$ と仮定すると、摩擦力は式(3)、鉛直方向の力のつり合いは式(4)となる。

$$B_C = \mu C, \quad B_T = \mu T \quad (3)$$

$$N_b = N_s - \mu Q_b \quad (4)$$

BP のせん断力 Q_b は軸力による摩擦力と考えると (式(5)), BP 位置の軸力は柱下部の軸力と摩擦係数を用いた式(6)となる。

$$Q_b = \mu N_b \quad (5)$$

$$N_b = \frac{1}{1 + \mu^2} N_s \quad (6)$$

以上の応力状態を基に柱下部におけるモーメントのつり合いは式(7)となる。

$$M_s = M_b + Q_b b h + \frac{\mu F_B b_e b h j}{2} + \frac{F_B b_e b h^2}{2} \left[1 - \left\{ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{Q_b}{F_B b_e b h} \right) \right\}^2 \right] \quad (7)$$

柱脚曲げ耐力は式(7)の計算値と柱曲げ耐力時の柱コンクリートの曲げモーメント計算値を単純累加した値である。

(4) 終局耐力評価

図8に実験値と計算値の比較をそれぞれ示す。既往の柱脚曲げ耐力と柱曲げ耐力の計算値の比率はすべての試験体において1.0未満であり、柱脚曲げ降伏先行型の破壊モードを示している。しかしながら、3.1節で述べたように試験体 EB4 および EB3 の破壊モードは柱曲げ降伏先行型である。一方、提案した柱脚曲げ耐力と柱曲げ耐力の計算値の比率は試験体 EB4 および EB3 では1.0以上であり、柱曲げ降伏先行型の破壊モードを示している。また、試験体 EB2 および EN2 の比率は1.0未満であり柱脚曲げ降伏先行型の破壊モードを示す。これは3.1節に示す損傷状況に基づいて判断された破壊モードと対応している。

試験体 EB4 および EB3 において実験の最大耐力と柱曲げ耐力の計算値との比率は1.1と1.2である。一方で試験体 EB2 と EN2 において提案する柱脚曲げ耐力の計算値と実験値との比率は約1.1である。したがって、本論に示す CES 埋込み柱脚の最大耐力および破壊モードは一般化累加強度理論による柱曲げ耐力と提案した柱脚曲げ耐力によって評価可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 今井真奈美, 鈴木卓, 神崎玲於	4. 巻 45
2. 論文標題 柱脚破壊先行型CES埋込み柱脚の終局耐力評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 361, 366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今井真奈美, 鈴木卓	4. 巻 46
2. 論文標題 CES埋込み柱脚における柱脚内部応力伝達の把握	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 今井真奈美
2. 発表標題 柱脚破壊先行型CES埋込み柱脚の終局耐力評価
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井真奈美
2. 発表標題 CES埋込み柱脚における柱脚内部応力伝達の把握
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鈴木卓
2. 発表標題 CES 埋込み柱脚の内部応力伝達に関する解析的研究 (その1) 解析モデルおよび履歴特性
3. 学会等名 2024年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 今井真奈美
2. 発表標題 CES 埋込み柱脚の内部応力伝達に関する解析的研究 (その2) 鉄骨のせん断応力, 最小主応力および支圧応力分布
3. 学会等名 2024年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関