

修士学位論文

非埋込み型 CES 柱脚の
構造性能評価法に関する研究

Structural Performance Evaluation Method
for CES Unembedded Type Column Bases

西野 天駿

2024 年 1 月

高知工科大学大学院工学研究科

<論文要旨>

本研究は、「非埋込み型 CES 柱脚の構造性能評価法に関する研究」と題し、鉄骨および繊維補強コンクリートから構成される CES 合成構造システムの主要構造部材の一つである非埋込み型 CES 柱脚の構造性能の把握を主たる目的とした実験的および解析的研究である。

第 1 章「序論」では、本研究の背景と目的を示すとともに本研究に関連する既往の研究を示した。既往研究に関しては「CES 構造に関する既往の研究」および「非埋込み型柱脚の構造性能に関する既往の研究」の 2 項目に分けて示した。これまでに CES 構造における非埋込み型柱脚に関する研究が行われていないことを背景に構造性能の把握を目的に実験的および解析的研究を行う必要性を示した。

第 2 章「軸力比の異なる非埋込み型 CES 柱脚の静的載荷実験」では、これまでに CES 構造における非埋込み型柱脚に関する研究が行われていないことを背景に基本的な構造性能の把握を目的に軸力比の異なる非埋込み型 CES 柱脚を対象に静的載荷実験を行い、当該部材の基本的な構造性能について検討結果を示した。実験結果より、軸力比の増大に伴い柱脚における損傷の減少、柱における損傷の増加、最大耐力の上昇および履歴性状がスリップ型から紡錘型に移行する傾向があることを示した。また、本章に示す試験体の最大耐力は一般化累加強度理論および鋼構造接合部設計指針に示される式により評価可能であることを示した。

第 3 章「軸力比の異なる非埋込み型 CES 柱脚の静的増分解析」では、第 2 章において示した軸力比の異なる非埋込み型 CES 柱脚を対象に静的増分解析を行い、提案する解析モデルの妥当性について検討結果を示した。柱をマルチスプリングモデル、柱脚を 2 つの回転ばねおよびせん断ばねに置換した解析モデルは、実験の柱脚の曲げモーメントー回転角関係、スケルトンカーブおよび履歴性状を再現できることを示した。

第 2 章に示す試験体の柱脚形式の場合、建物規模によってはベースプレートの増大による調達および施工の困難さが考えられる。そこで、第 4 章「ベースプレート下面にリブ補強を施した非埋込み型 CES 柱脚の静的載荷実験」では、ベースプレー

トの縮小のため、ベースプレート下面にリブ補強を施し、アンカーボルトを柱断面内に配置した非埋込み型 CES 柱脚を提案し静的載荷実験を行った。当該部材の基本的な構造性能、リブ補強およびアンカーボルトを柱断面内に配置することが非埋込み型 CES 柱脚の構造性能に及ぼす影響について検討結果を示した。実験結果より、リブ補強による正載荷側のみの耐力上昇、試験体側面の基礎コンクリートの掻き出しおよびベースプレートの降伏抑制が確認されたことを示した。柱断面内に配置した圧縮側アンカーボルトは柱コンクリートの曲げによる圧縮応力の負担が確認されたことを示した。また、柱脚における敷モルタルの剥離に伴い柱脚曲げ終局耐力の実験値は計算値と比べて低くなることから、柱脚の曲げ設計は余裕を見込む必要があることを示した。

第 5 章「アンカーボルトを柱断面内に配置した非埋込み型 CES 柱脚の静的増分解析」では、第 4 章において示したアンカーボルトを柱断面内に配置した非埋込み型 CES 柱脚を対象に静的増分解析を行い、提案する解析モデルの妥当性についての検討結果を示した。柱脚曲げ復元力特性は軸力が作用する場合の初期剛性およびベースプレートと敷モルタルの離間耐力を本章に示す式によりそれぞれ考慮する必要性を示した。また、柱脚曲げ復元力特性における原点から降伏点までの割線剛性は既往の研究で提案された式を基に回転剛性補正係数を 1.5 程度とすることで評価可能であった。柱にマルチスプリングモデルを適用し、上記の結論を考慮した柱脚の曲げばねから構成される非埋込み型 CES 柱脚の構造解析モデルは実験の柱脚の曲げモーメントー回転角関係、スケルトンカーブおよび履歴特性を再現できることを示した。

第 6 章「アンカーボルト配置位置の異なる非埋込み型 CES 柱脚の静的載荷実験」では、これまでの明確にされていない非埋込み型 CES 柱脚における柱脚の回転剛性の評価およびベースプレート降伏先行型の柱脚曲げ耐力評価を行うため、アンカーボルトの配置位置およびベースプレートの剛性の異なる非埋込み型 CES 柱脚の静的載荷実験を行った。当該部材の基本的な構造性能およびアンカーボルトの配置位置およびベースプレートの剛性の違いが非埋込み型 CES 柱脚の構造性能に及ぼす影響についての検討結果を示した。ベースプレートの降伏が確認された試験体では、引張側フランジ付近のベースプレートの浮上がりが顕著であった。ベースプレート下面のリブ補強によるベースプレート剛性の増大およびアンカーボルト間距離の増大に伴う柱脚回転剛性の増加が確認されたことを示した。柱脚の回転剛性は鋼構造接合部設計指針に示され

る式中の d_c を柱図心から柱コンクリート縁間距離とすることで実験結果を評価可能であることを示した。しかしながら，ベースプレートの降伏耐力がアンカーボルトの降伏耐力よりも低い場合は注意が必要であることを示した。また，本章に示す耐力評価法は非埋込み型 CES 柱脚の最大耐力を評価可能であることを示した。

<Abstract>

This research, titled "Structural Performance Evaluation Method for CES Unembedded Type Column Bases," is an experimental and analytical study aimed primarily at understanding the structural performance of CES unembedded type column bases, one of the main structural components of CES composite structure systems composed of steel and fiber-reinforced concrete.

In Chapter 1, "Introduction," the background and objectives of this study were presented, along with a review of relevant previous research. Previous studies were categorized into two sections: "Previous Studies on CES Structures" and "Previous Studies on the Structural Performance of CES Unembedded Type Column Bases." It was highlighted that no prior research had been conducted on CES unembedded type column bases. This underscored the necessity to conduct experimental and analytical research with the aim of understanding the structural performance.

In Chapter 2, "Static Loading Experiment of CES Unembedded Type Column Bases with Different Axial Force Ratios," static loading experiments were conducted on CES unembedded type column bases with different axial force ratios. Given the absence of prior research on CES unembedded type column bases, the aim was to grasp the fundamental structural performance. The experimental results were presented to examine the basic structural performance of these members. The experimental results indicated that with an increase in axial force ratio, there was a decrease in damage to the column base, an increase in damage to the column, an increase in maximum capacity, and a transition in the hysteretic behavior from slip-type to spindle-type. Furthermore, it was demonstrated in this chapter that the maximum capacity of the specimens presented can be evaluated using the equations provided in the generalized cumulative strength theory and the design guidelines for steel structure joints.

In Chapter 3, "Static Incremental Analysis of CES Unembedded Type Column Bases with Different Axial Force Ratios," static incremental analysis was conducted on CES unembedded type column bases with varying axial force ratios presented in Chapter 2. The

results of the analysis were presented to examine the validity of the proposed analytical model. The analytical model, which replaces the column with a multi-spring model and the column base with two rotational springs and shear springs, demonstrated the ability to reproduce the bending moment-rotation relationship of the experimental column bases, as well as the skeleton curve and hysteretic behavior.

In the case of the column base configuration presented in Chapter 2, it is conceivable that the difficulty of procurement and construction may increase due to the enlargement of the base plate, depending on the size of the building. In Chapter 4, "Static Loading Experiment of CES Unembedded Type Column Bases with Rib Reinforcement on the Bottom Surface of the Base Plate," a static loading experiment was conducted on CES unembedded type column bases. To reduce the size of the base plate, rib reinforcement was applied to the bottom surface of the base plate, and anchor bolts were positioned within the column cross-section. The results presented an examination of the basic structural performance of the member, as well as the impact of rib reinforcement and positioning anchor bolts within the column cross-section on the structural performance of CES unembedded type column bases. The experimental results indicated an increase in capacity only on the positive loading side due to rib reinforcement. Additionally, it was shown that the rib reinforcement helped prevent the excavation of foundation concrete on the specimen's side and suppressed the yielding of the base plate. It was demonstrated that the anchor bolts placed on the compression side within the column cross-section bore the compressive stress induced by the bending of the column concrete. Furthermore, it was indicated that the experimental values of the ultimate bending capacity of the column base decreased compared to the calculated values due to the detachment of the bedding mortar in the column base. This suggests that a margin should be anticipated in the design of column base bending.

In Chapter 5, "Static Incremental Analysis of CES Unembedded Type Column Bases with Anchor Bolts Positioned within the Column Cross-Section," static incremental analysis was conducted on CES unembedded type column bases with anchor bolts positioned within the column cross-section, as presented in Chapter 4. The results of the analysis were presented to examine the validity of the proposed analytical model. The need to consider the initial stiffness in the case of axial force application and the separation resistance

between the base plate and bedding mortar for the column base bending restoring force characteristics was demonstrated in this chapter using the equations presented. Furthermore, it was possible to evaluate the secant stiffness from the origin to the yield point in the column base bending restoring force characteristics by applying a rotation stiffness correction factor of approximately 1.5 to the equation proposed in previous studies. The structural analysis model of CES unembedded type column bases, constructed using bending springs for the column base considering the conclusions mentioned above and applying a multi-spring model to the column, demonstrated the ability to reproduce the bending moment-rotation relationship, skeleton curve, and hysteretic characteristics observed in the experimental column bases.

In Chapter 6, "Static Loading Experiment of CES Unembedded Type Column Bases with Different Anchor Bolt Placement," static loading experiments were conducted on CES unembedded type column bases with different anchor bolt placement positions and varying base plate stiffness. This was done to evaluate the rotational stiffness of CES unembedded type column bases, which had not been clearly defined previously, and to assess the yield-preceding behavior of column base bending strength. The results presented an examination of the basic structural performance of the member, as well as the impact of differences in anchor bolt placement positions and base plate stiffness on the structural performance of CES unembedded type column bases. In the specimens where base plate yielding was observed, significant uplift of the base plate near the tension flange was notable. It was demonstrated that the increase in base plate stiffness due to rib reinforcement on the bottom surface of the base plate and the increase in column base rotational stiffness due to the greater spacing between anchor bolts were confirmed. It was demonstrated that the rotational stiffness of the column base can be evaluated using the experimental results by setting d_c in the equation provided in the design guidelines for steel structure joints as the distance between the column centroid and the edge of the column concrete. However, it was highlighted that caution is necessary when the yield strength of the base plate is lower than that of the anchor bolts. Furthermore, the capacity evaluation method presented in this chapter demonstrated the ability to evaluate the maximum capacity of CES unembedded type column bases.