

鋼構造建物解体合理化工法の提案を通じた環境負荷低減

研究代表者 京都大学防災研究所

教授 中島 正愛

1. はじめに

これから造る鋼構造建物においては、解体と再生を常に意識して設計・施工しなければならない。筆者は、実大3階建て鋼構造建物の崩壊実験を実施した経験があるが、実験後の解体時に、解体に関わる作業、それぞれの作業に要する日数、各作業に伴う環境負荷を定点観測する機会（約10日間の全工程）をもった。その結果、解体作業のなかで、最も労力と時間を要したエネルギー負荷が高い作業は、鋼とコンクリートの分離、具体的には、鉄筋コンクリート基礎梁に埋め込まれた鋼柱の分離、スタッドを用いて緊結された鉄筋コンクリート床スラブと鋼梁の分離であることを突き止めた。また解体途中では、床スラブの半分だけが除去された状態における荷重の偏在、床スラブが除去されたことによるダイアフラム効果の消失などによって、構造体が一時的に不安定状態に陥り、仮り支えなどの（手間暇を要する）作業が必要となる局面が少なくないことがわかった。また解体時の不安定度は、構造体の残留水平変形（残留傾斜量）、特にすべての自重を一挙に支えなければならない1階の残留水平変形に大きく依存することも定点観測から明白になった。

建物の解体作業の重要性、また解体に対する定点観測から得た筆者らの経験に照らし合わせ、本研究では、基礎梁と緊結される柱を対象に、構造体としての安全性を確保しつつ解体が容易な工法、また解体途中の不安定を抑制するために、（特に地震による被害後の）構造体の残留水平変形を最小限に留める工法の考案を目的とした。具体的には、鉄筋コンクリート基礎梁とは決別し、鋼基礎梁を用いることによってコンクリートと鋼の分離問題を回避することとした。また鋼（基礎梁）と鋼（柱）をつなぐという相性の良さを利用して、結合方法に工夫を加え、残留水平変形の抑止効果が高い「セルフセンタリング柱脚」を新たに提案することによって、解体の効率化を図るとともに、構造体の安全性や機能性の向上も指向した。本稿では、上記一連の研究項目のうち特にセルフセンタリング柱脚に焦点を当て、その機構、妥当性を検証するために実施した実験および解析、構造設計法の基本的考え方の概要を報告する。

2. 提案セルフセンタリング柱脚

図-1に本研究で考案した柱脚を示す。鋼製の柱と基礎梁は緊張力を与えるPC鋼棒と、エネルギー消費を目的とするダンパーによって緊結される。柱脚はPC鋼棒を取り付けるための水平スチフナー（以下ストッパー）とベースプレート、またストッパーと基礎梁の下フランジの面外変形を抑える鉛直スチフナーにより補強されている。

提案柱脚において意図する回転機構は次の通りである；1)地震時の水平力により生じる柱脚モーメントが、軸力およびPC鋼棒のプレストレス力による柱の押さえ付けに勝つまで、柱脚・基礎梁は剛接合と同様の挙動を示す。2)柱が離間した後は、圧縮側フランジ端部を中心に回転を開始し、柱は塑性化しない。同時に、柱脚脇の鋼製ダンパーに軸方向（塑性）変形が生じ、付加強度、付加エネルギー消費を与える。3)PC鋼棒の弾性挙動により、回転変形を引き戻す。

さらに、ダンパーは、くびれ部の降伏によってエネルギーを消費する。鋼製柱、鋼製基礎梁、スチフナー、ダンパーはすべてSS400材である。またスチフナーはすべて隅肉溶接で接合する。

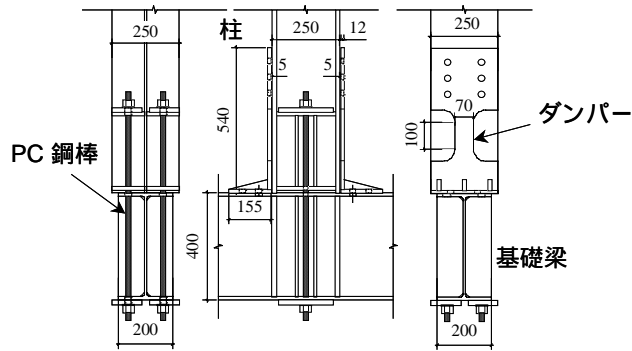
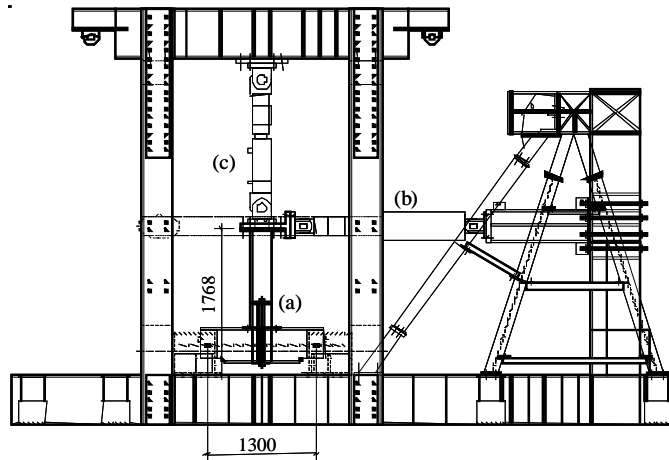


図-1 提案するセルフセンタリング柱脚の詳細

3. 提案柱脚に対する性能確認実験

3.1 荷重装置と荷重履歴

図-2 に荷重装置を示す。鉛直方向に配されたジャッキにより柱に一定の軸力を与え、水平方向に配されたジャッキにより柱頂部に水平力を与える。柱頂部における水平変位を柱長さで除した値を部材角とし、この部材角を基準とする正負交番漸増繰り返し荷重を、 ± 0.005 , ± 0.01 , ± 0.015 , ± 0.02 , $\pm 0.03\text{rad}$ に対して2サイクルずつ行う。



(a) 試験体, (b) 水平ジャッキ, (c) 鉛直ジャッキ

図-2 荷重装置

3.2 実験条件

実験においては、主に PC 鋼棒の降伏前の挙動に関する評価を目標とする。実験結果から、評価をめざす剛性と強度を図-1 に示す。ダンパーなしの試験体においては、1) フランジの離間耐力 M_d , 2) 離間後剛性 K_2 が対象となり、ダンパーありの試験体においては、3) フランジの離間耐力 M_d , 4) ダンパーの降伏時耐力 M_{dy} , 5) ダンパー降伏前の離間後剛性 K_1 , および 6) ダンパーの降伏後剛性 K_2' が対象となる。

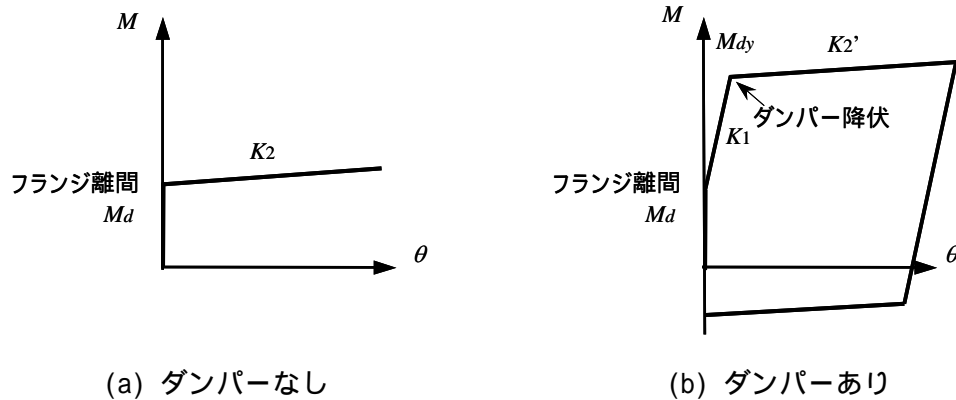


図-3 実験において評価する剛性および強度

試験体の一覧を表-1 に示す。提案柱脚に重要な影響を与える 4 つの因子をパラメータとして採用する。ダンパーなしの試験体シリーズにおいて、[1]、[2]、[3]を変化させてその影響を評価する。ダンパーありの試験体シリーズにおいては、[1]、[2]、[3]を固定し、[4]のダンパーの幅を変化させてその影響を評価する。

- [1] PC 鋼棒の直径: ϕ
- [2] PC 鋼棒に導入する初期張力と降伏強度の比 (初期張力比): α
- [3] 柱軸力: n
- [4] ダンパーの降伏部分の幅: w

表-1 試験体一覧

| ダンパーなし | | | | | | | | | | | | | ダンパーあり | | | | | |
|----------|-----|-----|----|-----|---|-----|-----|---|-----|-----|-----|----|----------|-----|-----|----|----|-----|
| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | No. | 14 | 15 | 16 | 17 |
| n | 0.1 | 0.2 | 0 | 0.1 | 0 | 0.1 | 0.2 | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | | | n | 0.1 | | | |
| ϕ | / | / | 17 | | | | | | | | 19 | | ϕ | 17 | | | | |
| α | / | / | 0 | 0.3 | | | 0.6 | | 0 | 0.3 | 0.6 | | α | 0.3 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | w | 20 | 35 | 70 | 105 |

PC 鋼棒の直径はフランジ離間後の剛性に影響を与える。また、PC 鋼棒に導入する初期張力と降伏強度の比 (初期張力比) は、フランジの離間強度に影響を与える。実験においては、PC 鋼棒の直径を 17 mm と 19 mm とし、初期張力比 0、0.3、0.6 に対応する初期張力を与えた。柱軸力は、中低層の建物、および軸力変動を想定して、軸力比にして 0、0.1、0.2 に対応する軸力を採用し、柱頂部より与えた。

ダンパーの降伏面積は、フランジの離間後剛性、降伏時耐力に影響を与える。そこで、降伏部の幅を 20mm、35mm、70mm、および 105mm の 4 段階とした。

3.3 実験結果

3.3.1 ダンパーのないセルフセンタリング柱脚の挙動

実験では、1階柱の反曲点位置より下部、および基礎梁を再現して、柱頂部に軸力と水平力を与えたが、柱脚システムの純粋な性能を取り出す目的で、下式により柱脚モーメント M と回転角 θ の関係を導出する。

$$M = l_c F_H + \delta_H F_V \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\delta_H - F_H / K_{elastic}}{l_c} \quad (2)$$

ここに l_c : 柱長さ, F_H : 水平ジャッキ位置の水平力; δ_H : 水平ジャッキ位置の水平変位, F_V : 柱軸力, $K_{elastic}$: 水平ジャッキ位置の水平変位に対する柱と梁の弾性剛性。

実験における柱脚モーメントと回転角の関係を図-4 に示す。

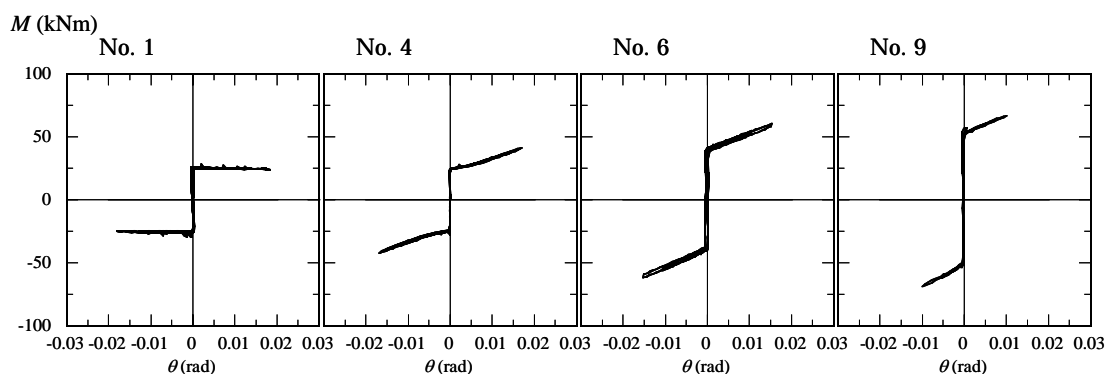


図-4 柱脚におけるモーメントと回転角の関係 (ダンパーなし)

図-4 からわかるように、フランジの離間まで柱脚回転角は生じず、モーメントのみが上昇する。離間後は、PC 鋼棒の伸び剛性から生じる剛性を保ち、回転角が増大する。軸力および PC 鋼棒の初期張力が大きくなることにより、離間時の強度が大きくなるがわかる。PC 鋼棒の降伏は生じておらず、除荷によって回転角が 0 に戻るセルフセンタリング機構が達成されている。評価の対象となるフランジの離間モーメント M_d 、および離間後の回転剛性は、柱の回転中心 (離間フランジの反対側) でのモーメントの釣り合いを考えることにより、下式から求めることができる。

$$M_d = (A_c \sigma_y n + \pi (\frac{\phi}{2})^2 \sigma_y \alpha) \times \frac{d_c}{2} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{\pi (\phi/2)^2 E d_c^2}{4 l_{pc}} \quad (4)$$

ここに、 $A_c \sigma_y n$: 柱軸力, A_c : 柱断面積, σ_y : 柱降伏応力, n : 柱軸力比, d_c : 柱せい, $\pi (\phi/2)^2$: PC 鋼棒断面積, ϕ : PC 鋼棒直径, σ_y : PC 鋼棒降伏応力, α : PC 鋼棒の初期張力比, l_{pc} : PC 鋼棒長さ。

図-5に、各試験体において、(3)式、(4)式より求めた計算値と実験値の比較を示す。フランジの離間モーメント M_d に関しては、計算値が実験値を上回る傾向にあるが、実験値における傾向を概ねとらえており、計算値が実験値の0.98倍から0.82倍と一定の精度で評価できている。

一方、離間後の剛性 K_2 に関しては、特に軸力およびPC鋼棒の引張力による柱脚軸圧が小さいほど誤差が大きくなり、計算値は実験値の0.89倍から0.35倍に分布する。フランジ離間後の剛性において

は、柱と基礎梁の接触条件（いわゆる‘がた’）などの影響により、評価の精度が左右されるため、計算値から、適宜、低減する必要がある。

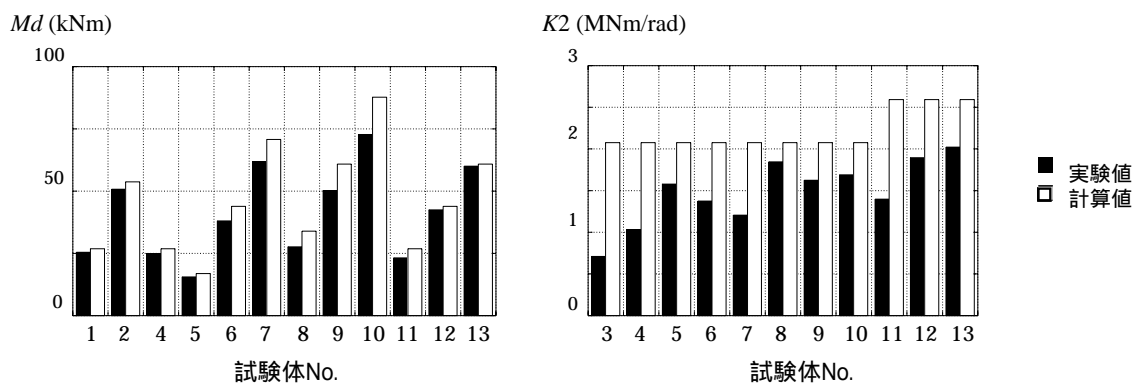


図-5 フランジ離間耐力および離間後剛性の実験値と計算値の比較（ダンパーなし）

3.3.2 ダンパーつきセルフセンタリング柱脚の挙動

図-6 にそれぞれダンパー幅が 20, 35, 70, 105mm の場合 (No.14, No.15, No.16, No.17) を示す。ダンパー幅が大きいほど降伏強度は大きくなり、ダンパーの降伏による履歴吸収エネルギーも大きくなる。ダンパー幅に関わらず、部材回転角 0.01rad 程度で圧縮側のダンパーは座屈し始める。曲げ変形は柱側に凸となるたわみを有するため、やがて座屈は柱方向に進行し柱フランジと接触し、座屈による面外変形の進行が抑制される結果、座屈拘束効果が現れて繰返し载荷下においてもエネルギー消費能力は大きく損なわれない。初期剛性と離間モーメントで決まるバイリニア型の弾塑性履歴に比べて、本システムの履歴によるエネルギー消費量は、部材回転角 0.02rad のサイクルで半分程度となる。ただし、ダンパー幅の影響により降伏強度が大きくなるに従い、ダンパーの塑性化に起因する残留変形も大きくなっている。

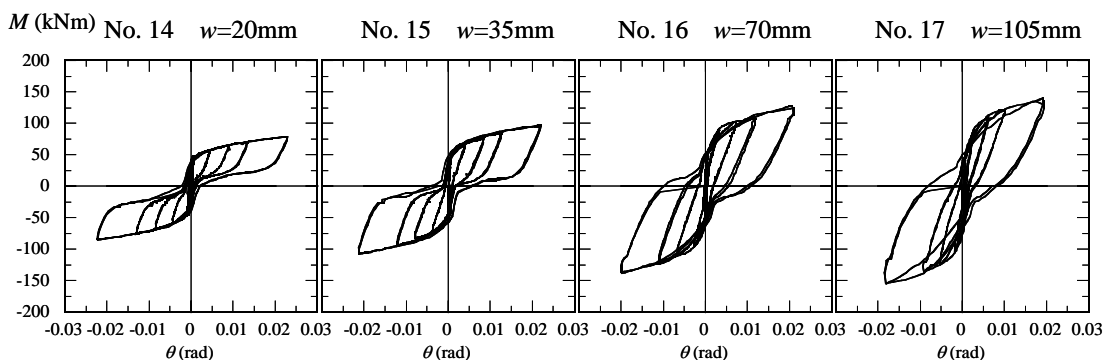


図-6 柱脚におけるモーメント - 回転角関係（ダンパーあり）

本試験体は、回転角にして 0.03rad まで PC 鋼棒が塑性化しないよう設計されており、実際の実験でも、PC 鋼棒の塑性化は確認されていない。すなわち、载荷後の柱脚における塑性化部分は、ダンパーのみとなり、他の部分は弾性に留まっている。本研究では、地震を経験した後の補修段階を想定し、所定の回転角に対する载荷を終了後に、水平ジャッキによる水平力を 0、鉛直ジャッキからの軸

力を一定に保ち、ダンパーを取り除く作業を行った。ダンパーと柱脚側面の緊結ボルトを緩めるに従い残留変形は減少し、ダンパーを取り除いた時点で柱は原点の位置に静止した。この結果により、本提案柱脚においては、地震後の補修時、すなわちダンパーの取替え時における残留変形の低減効果を期待できる。

これら、ダンパーを有する場合の試験体における各強度、剛性に対する評価については、フランジの離間前にダンパーの軸変形が生じないと考えれば、離間モーメントはダンパーがない場合と同じ(3)式で評価することができる。また、ダンパー降伏時モーメント M_{dy} はダンパーの降伏軸力 $A_d\sigma_{dy}$ から、下式により求めることができる。

$$M_{dy} = M_d + A_d\sigma_{dy}d_c \quad (5)$$

ここで w : ダンパー幅 (20mm, 35mm, 70mm, 105mm), σ_{dy} : ダンパー鋼材の降伏応力。

また、ダンパー付き柱脚の離間後剛性 K_1 およびダンパーの降伏後剛性 K_2' は、下式により求めることができる。

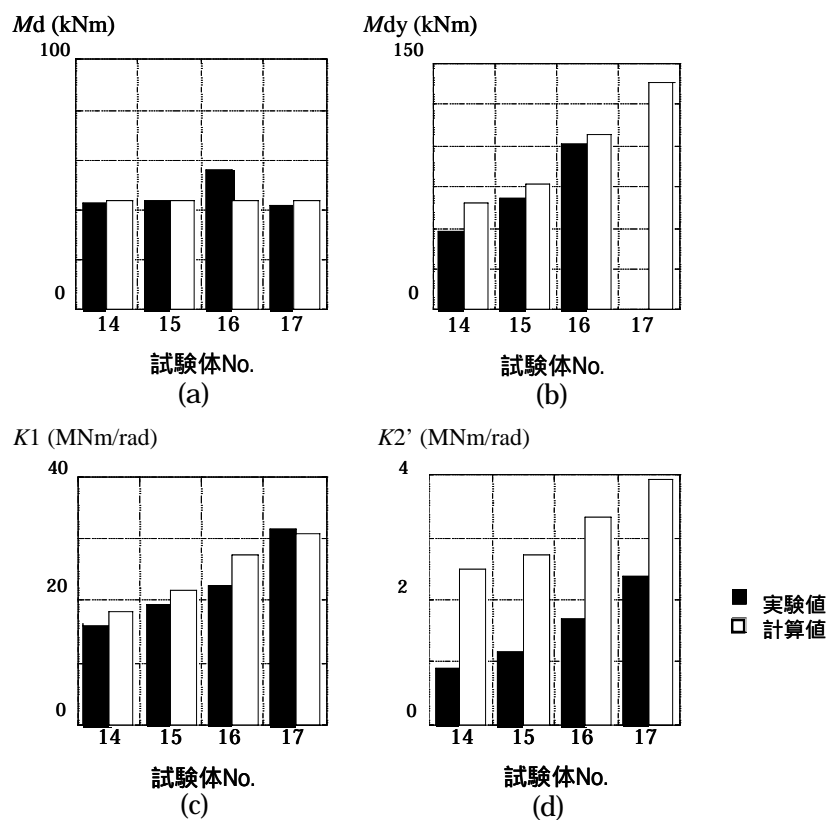
$$K_1 = (K_{pc}^{-1} + K_d^{-1})^{-1} \quad (6)$$

$$K_2' = (K_{pc}^{-1} + e_t K_d^{-1})^{-1} \quad (7)$$

ここで K_{pc} : PC 鋼棒による回転剛性 (4)式による K_2), K_d : ダンパーによる回転剛性, e_t : ダンパー鋼材の歪硬化係数。また、ダンパー基礎固定部における付加的な変形については、FEM 解析を用いて評価し、ダンパーの軸剛性に反映させている。すなわち、ダンパーの軸剛性は、くびれた塑性化領域、その他の弾性領域、および基礎固定部の直列結合として考えることにより求められる。

実験値と計算値の比較を図-7 に示す。フランジの離間時モーメントおよび M_d ダンパー降伏時のモーメント M_{dy} は、計算値が実験値の 1.28 倍から 0.73 倍となり、30%未満の誤差で評価できている (試験体 No.17 の場合は、ダンパーの軸耐力が大きく、ダンパー基礎固定部における梁フランジが局部降伏したため、実験値を除いている。) また、フランジの離間後剛性 K_2' は、計算値が実験値の 1.03 倍から 0.82 倍となっている。

一方、ダンパーの降伏後剛性に関しては、計算値が実験値を上回り、計算値が実験値の 0.37 倍から 0.61 倍となっている。この場合もダンパーがない場合の離間後剛性と同様、剛性が急激に低下する場合において評価の精度が落ちている。これら予測精度の向上は今後の課題である。



(a) フランジ離間耐力, (b) ダンパー降伏耐力
(c) フランジ離間耐力後剛性, (d) ダンパー降伏後剛性
図-7 実験値と計算値の比較 (ダンパーあり)

参考文献

- 1) 池永昌容, 長江拓也, 中島正愛, 吹田啓一郎: セルフセンタリング柱脚の設計と予備実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第45号, 2005年6月.
- 2) 池永昌容, 長江拓也, 中島正愛, 吹田啓一郎: ダンパー付きセルフセンタリング柱脚の開発と大変形下の挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造 III, 2005年9月, pp.643-644.
- 3) 池永昌容, 長江拓也, 中島正愛, 吹田啓一郎: 履歴ダンパーを配するセルフセンタリング柱脚の開発と実験による性能評価, 日本地震工学会年次大会, 2005年11月.
- 4) 長江拓也, 池永昌容, 中島正愛, 吹田啓一郎: 履歴ダンパーを配するセルフセンタリング柱脚に関する解析, 日本地震工学会年次大会, 2005年11月.