

セルフセンタリング性能を有する鋼構造に関する一考察

高松隆夫*・玉井宏章**
山西央朗***・小畑寛行***

(平成17年9月9日受理)

A Study on Steel Structures with Self-Centering Performance

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI
Teruaki YAMANISHI and Hiroyuki KOBATA

(Received Sep. 9, 2005)

Abstract

A non-slip-type exposed column base has been proposed by the authors to improve slip phenomenon of an anchor-bolt-yield-type column base by use of wedge device. This column base has many advantages for earthquake resistant structures. Recently, self-centering function, that is, the mechanism of no end rotation of member in unloading after member yielding, has been proposed as seismic performance, reducing residual deformation of steel moment frames after an earthquake. In this paper, the self-centering performance of the non-slip-type column base is verified by consideration of restoring force characteristics. The function of non-slip-type column base can be applied to beam-to-column connections by consisting of end-plate beam, long bolts and the wedge devices. New structural system with such connections and non-slip-type column bases possesses the self-centering performance.

Key Words: non-slip-type, restoring force characteristics, self-centering performance

1. はじめに

建築物の耐震設計は、大地震時において倒壊を避けることを第一の目標としている。そのために、建築物の保有水平耐力算出に当たっては全体崩壊を目指した塑性崩壊機構を仮定して崩壊荷重を求める場合が多い。梁の材端部や第1層の柱脚部に塑性ヒンジを生じさせることにより建築物全体で効率よく塑性エネルギー吸収できるように設計されている。このような建築物は地震後において塑性変形が残ることになるために大規模改修を行うことになる場合がある。阪神・淡路大震災以後、地震後に速やかに建築物を現状復帰させることにより日常業務を遅延なく開始できるよ

うに、建築物の損傷をできるだけ小さく抑えるような設計が求められ始めている。コンピュータ数値解析により、地震動による建築物の残留水平変位を求めて残留変形を減少させる設計法についての検討も行われている^{1), 2)}。また、CO2 排出量削減の観点から、建築物の長寿命化のために部材のリユースを可能にするサステナブル構造システムの研究も行われており³⁾、塑性変形を起こす部材を少なくする設計法の提案がなされている。更に、最近では、梁端部に塑性変形を生じても梁端部曲げモーメントが0に戻った時点で材端回転角も0になるような機能(以後、セルフセンタリング機能と呼ぶ。)を梁端部に付与することにより、建築物の地震後残留変形を減少させる方法が提案されてい

* 広島工業大学工学部建設工学科教授

** 広島工業大学工学部建設工学科助教授

*** 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻大学院生

る⁴⁾。このセルフセンタリング機能を塑性ヒンジ生成を想定する梁端部や柱脚部に付与することができれば、地震時においては、塑性変形により十分なエネルギー吸収ができるとともに、地震後では、残留水平変形をほとんど生じない建築物の設計が可能となる。セルフセンタリング機能を持つ梁端部や柱脚を有する建築物の地震応答解析により残留水平変形を減少させることができること、特に、柱脚にセルフセンタリング機能を付与すれば効率よく残留水平変形を減少させられることが報告されている⁵⁾。

そこで、本論文においては、最初に、柱脚にセルフセンタリング性能を付与する方法について検討する。著者等は、ノンスリップ型露出柱脚の研究において⁶⁻¹²⁾、多数アンカーボルト配列されたノンスリップ型柱脚の復元力特性がセルフセンタリング性能を有することを報告している¹²⁾。この柱脚の特徴は、柱心付近に配置されたボルトが弾性域に留まる限りはセルフセンタリング性能を保持していること、更に、全てのアンカーボルトが降伏した後も、原点に戻れば柱脚性能は弾性状態に復帰するために、大地震時に遭遇した場合にもほぼセルフセンタリング性能は保持されることである。そのために、ノンスリップ型露出柱脚の除荷曲線に着目して、セルフセンタリング性能について検討する。次に、セルフセンタリング性能を梁端部に付与するために、ノンスリップ型露出柱脚と同様の接合形式を柱梁接合部に適用可能かどうかの検討を行う。適用可能であれば、セルフセンタリング性能を有する梁端部を実現できることになる。側柱型および内柱型接合部について適用可能性を検討する。適用可能となれば、ノンスリップ型露出柱脚の復元力特性モデルは煩雑なスリップ現象を含まない簡潔な解析モデルであるので、梁端部の復元力特性モデルも簡潔な解析モデルとなる。このセルフセンタリング性能を持つノンスリップ型露出柱脚および梁端部を使用した建築物は、地震時では十分な塑性エネルギー吸収能力を保有して、地震後には塑性水平変形を残さない理想的な耐震構造物となる。

2. ノンスリップ型露出柱脚

本章では、アンカーボルトを多数配列したノンスリップ型露出柱脚の載荷実験より復元力特性を求め、セルフセンタリング性能を有していることを示す。また、復元力特性モデルの定式化を行い、実験と比較検討をする。

2.1 ノンスリップ型露出柱脚の機構

著者等が提案しているノンスリップ型露出柱脚の設置写真および概念図を Photo. 1, Fig. 1 に示す。

ノンスリップ型露出柱脚では、ベースプレートとナットとの間に楔デバイスを設置するのみでスリップ現象を防止

できる。従来の露出柱脚と同様に、アンカーボルトに塑性伸びが生じるとナットとベースプレートとの間に間隙が発生するが、この間隙にばねの力により楔を貫入させることで間隙が消滅する。この結果として、ノンスリップ型露出柱脚においてはスリップ現象を生じること無く、復元力特性は原点立上り型となる。

楔デバイスが有効に機能するには、楔デバイスが理想的に貫入する必要がある。そのため、ベースプレートに面外変形が生じない程度の厚さが必要となる。

2.2 実験概要

試験体および載荷実験装置を Fig. 2, 3 に、試験体の材料特性および主要寸法を Table 1 示す。ベースプレートは、アンカーボルトを3本8列均等配置したものを採用する。試験体柱頭部にジャッキを設置し、柱脚部回転角制御による正負交番繰返し水平載荷を行う。載荷方式は、1) 柱心付近に配置されたアンカーボルトが降伏しない振幅範囲内で、繰返し漸増載荷を行う。2) 1 サイクル目に1 / 50 まで載荷し、全てのアンカーボルトを降伏させた後に繰返し漸増載荷を行う。

楔デバイスの各部寸法を Fig. 4 に示す。また、楔デバイスに用いるばねの特性を Table 2 に示す。楔デバイスは、楔、楔受け、装置台およびばねから構成されている。楔、楔受けおよび装置台はナットとベースプレートとの間に設置し、ばねは楔と装置台の反力板との間に設置する。尚、ナットと楔受け、ベースプレートと装置台を隅肉溶接接合し、楔が安定して貫入できるように加工してある。尚、楔と楔受け間の摩擦係数は、0.78 である。

2.3 復元力特性の定式化

定式化の対象とする柱脚形式および耐荷機構を Fig. 3, 5 に示す。また、以下の5つの仮定を基に定式化を行う。

- i) 柱脚の降伏要素をアンカーボルトに限定する。
- ii) 圧縮合力点位置およびベースプレート回転中心位置をベースプレート端部とする。但し、圧縮側柱フランジより外側に位置するアンカーボルトについては、抵抗力および剛性が微小であるので考慮しないものとする。
- iii) アンカーボルトの材料特性として完全弾塑性体モデルを採用する。
- iv) 著者等が提案している楔デバイスは理想的に機能するものとする。
- v) 複数アンカーボルト配列された柱脚の復元力特性は、各列アンカーボルトの復元力特性を累加することにより求められる。

以上の仮定と耐荷機構より、本章で取り扱う柱脚形式で

Table 1 Main dimensions and material properties

| Material | E (kN/mm^2) | σ_y (N/mm^2) | σ_u (N/mm^2) | Main dimensions (mm) | E : Young's modulus σ_u : Tensile strength $ab l$: Effective length | σ_y : Yield stress ϕ_g : Diameter of shank |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---|---|
| Column | SS400 | 205 | 235 | 400 | Box-200x200x12 | |
| Base plate | SS400 | 205 | 235 | 400 | PL-35x400x400 | |
| Anchor bolt | ABR400 | 205 | 305 | 400 | $\phi_g = 14.6, ab l = 445$ | |

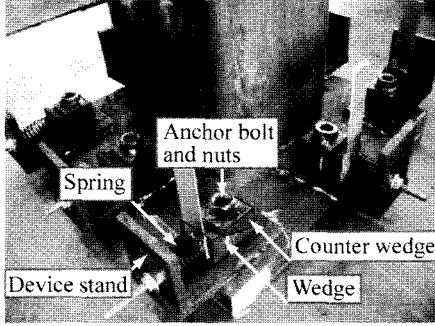


Photo. 1 Non-slip-type exposed column base (In case of Type II)

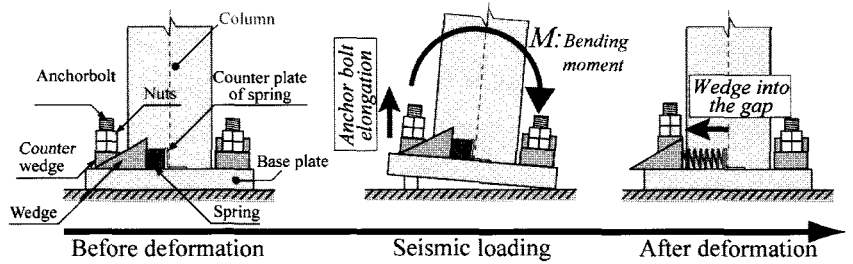


Fig. 1 Concept and function of non-slip-type exposed column base

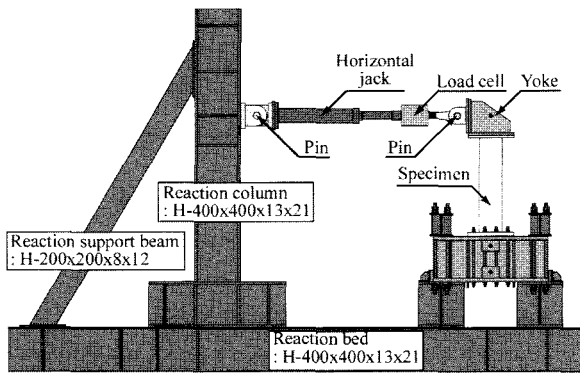


Fig. 2 Test apparatus

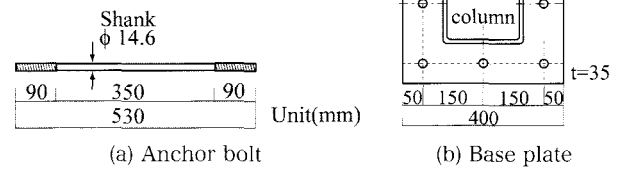


Fig. 3 Base plate

は、2列のアンカーボルトが曲げに抵抗する。

任意のアンカーボルト列における、アンカーボルト降伏時の曲げ耐力： M_y は

$$M_y = n \cdot ab A \cdot ab \sigma_y \cdot d \quad (1)$$

となる。耐荷機構より、2列のアンカーボルトが曲げに抵抗するので、各列のアンカーボルト降伏時の曲げ耐力： M_{y1} 、 M_{y2} は次式となる

$$M_{y1} = \alpha M_y + \left(\frac{d_\beta}{d_\alpha}\right) \cdot \beta M_y \quad (2.a)$$

$$M_{y2} = \alpha M_y + \beta M_y \quad (2.b)$$

ここに、 n ：アンカーボルト本数、 $ab A$ ：アンカーボルト軸部断面積、 $ab \sigma_y$ ：アンカーボルト降伏点、 d ：圧縮合力点位置からアンカーボルト中心までの距離、 M_{y1} 、 M_{y2} ：Row α 、 β のアンカーボルト降伏時の柱脚曲げ耐力、 αM_y 、 βM_y ：Row α 、 β のアンカーボルトの曲げ降伏耐力、 d_α 、 d_β ：圧縮

合力点位置からそれぞれのアンカーボルト中心までの距離である。

また、任意のアンカーボルト列における、アンカーボルトの塑性伸びから求められる弾性回転剛性： K_b は次式となる。

$$K_b = \frac{ab E \cdot n \cdot ab A \cdot d^2}{R \cdot ab l} \quad (3)$$

ここに、 $ab E$ ：アンカーボルトのヤング率、 R ：ベースプレートと基礎コンクリートの弾性変形を考慮した低減係数 ($R = 1.5$)¹³⁾、 $ab l$ ：アンカーボルトの有効長さである。

2.4 復元力特性モデル

単調載荷および繰返し載荷時の復元力特性モデルを Fig. 6 に示す。

○単調載荷時の復元力特性モデル

Table 2 Properties of spring

| Spring diameter (mm) | Diameter (mm) | Spring length (mm) | Maximum elongation (mm) | Maximum strength (N) | Spring constant (N/mm) |
|-------------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 26.1 | 2.0 | 94.0 | 70.3 | 93.5 | 1.33 |

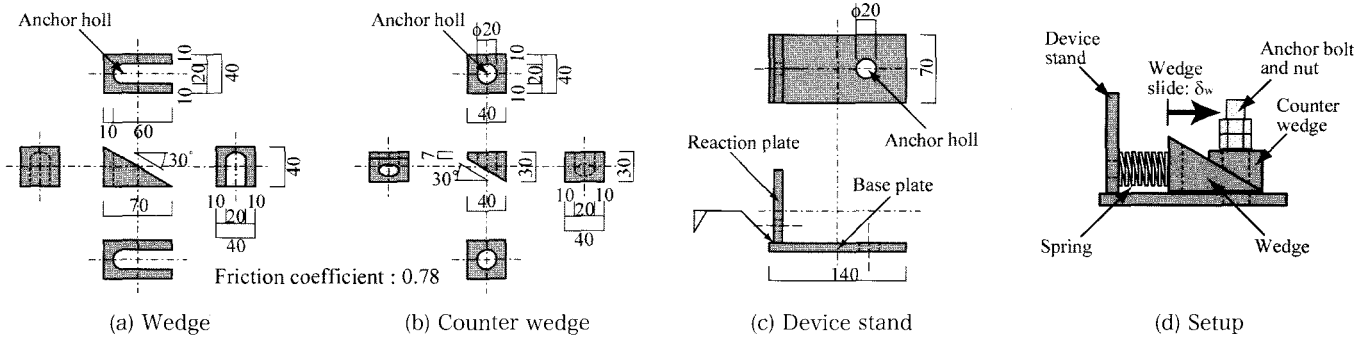


Fig. 4 Shape and dimensions of wedge device

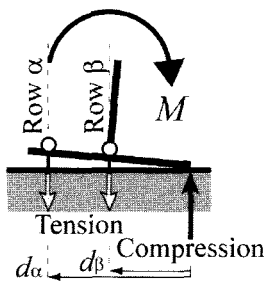


Fig. 5 Resistance mechanism under seismic loading

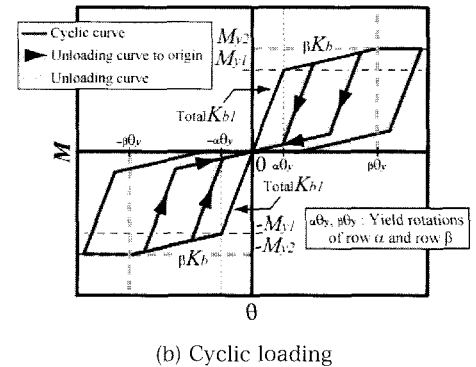
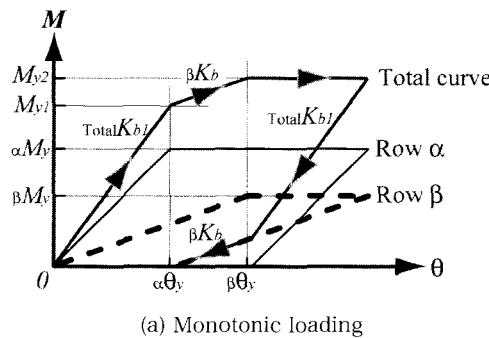


Fig. 6 Models of restoring force characteristics

復元力特性モデルは Tri-linear 型となり、各列のアンカーボルト降伏時曲げ耐力は式 (2.a), (2.b) により求められる。Row α 降伏時の耐力 M_{y1} までは、Row α および Row β のアンカーボルトの弾性回転剛性を足し合わせた $TotalK_{b1}$ ($= \alpha K_b + \beta K_b$) で荷重が上昇する。 M_{y1} から Row β 降伏時の耐力 M_{y2} までは、Row β のアンカーボルトの弾性回転剛性 βK_b で荷重が上昇する。 M_{y2} 以後は、耐力 M_{y2} を保持したまま回転角が増加する。

除荷時には、Row α および Row β が共に弾性である場合には、 $TotalK_{b1}$ で原点を指向する。次いで、Row α が降伏している場合には、除荷時回転角から $\alpha\theta_y$ を差し引いた回転角まで $TotalK_{b1}$ で減少し、引き続き βK_b で原点を指向する。最後に、Row α および Row β のアンカーボルトが降伏して塑性伸びを生じた後に除荷を行うと、Fig. 6 (a) に示すように、外力による曲げモーメントが 0 になる時に柱脚回転角は 0 に戻っていない。

○繰返し载荷時復元力特性モデル

全アンカーボルトが降伏する場合の曲線はいずれのサイクルにおいても、Fig. 6 (a) の単調载荷時と同様となる。除荷時の曲線は、除荷開始時回転角により変化し、载荷時の軌跡を 180 度回転させた形となる。Row α のアンカー

ボルトが降伏後に塑性伸びを生じてても、Row β のアンカーボルトが弾性であれば、除荷時には Bi-linear 型で原点を指向する復元力特性を保有する。しかしながら、Fig. 6 (a) に示すように、Row β のアンカーボルトが降伏後に塑性伸びを生じた場合、外力による曲げモーメントが 0 になる時に柱脚回転角は 0 に戻らない。結果として、柱脚弾性限界回転角 (Row β のアンカーボルトの弾性限界回転角) $\beta\theta_y$ を超過することがなければ、楔の機能により柱脚は塑性変形によるエネルギー吸収をすると共に、常に原点を指向する復元力特性を有することとなる。

2.5 実験結果と考察

载荷実験より得られた復元力特性と、復元力特性モデルを Fig. 7 に示す。実験結果の柱脚曲げモーメント : M は、水平载荷荷重 : P に柱長さ : L を乗じた値である。柱脚回転角 : θ は、ベースプレートに設置した変位計により求めた回転角である。

柱脚弾性限界回転角を超過しない载荷実験結果を Fig. 7 (a) に示す。柱脚弾性限界回転角を超過しない载荷のため、常に原点を指向する復元力特性を保持している。また、楔デバイスの機能により Row α が曲げ抵抗・塑性伸びを繰

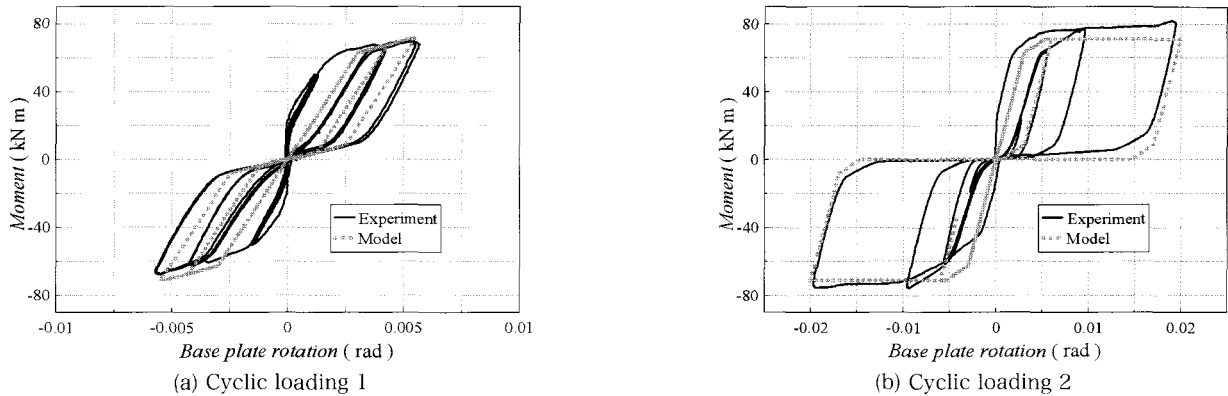


Fig. 7 Restoring force characteristics

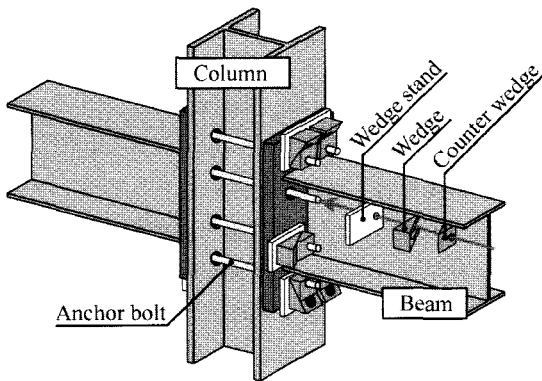


Fig. 8 Wedge-device introduction concept into column/beam connection

り返すので、常にエネルギーを吸収する機構を有しており、復元力特性に履歴ループが表れている。更に、復元力特性モデルとも比較的良好に対応しており、特に除荷時の履歴ループはほぼ一致している。

1 サイクル目に $1/50$ (rad) を載荷する載荷実験結果を Fig. 7 (b) に示す。1 サイクル目の正方向載荷にて、Row α および Row β は降伏する。今回の実験では、楔が理想的に機能しなかったため原点近傍で多少のスリップが生じ、1 サイクル目の負方向載荷の原点近傍では、Row α のみが曲げに抵抗している。このため、正方向載荷の耐力と比べ負方向載荷の耐力が低目となり、かつ2 サイクル目以降において原点近傍で多少のスリップが生じている。しかしながら、柱脚の固定度はほぼ保たれており、全アンカーボルト降伏後においても柱脚の回転角を0にする方向への復元力特性を常に保持している。

以上より、アンカーボルトを多数配列したノンスリップ型露出柱脚においては、1) 弾性のアンカーボルト列を残すことにより、常に原点を指向する復元力特性を有し、かつエネルギー吸収を期待できる。2) 全てのアンカーボルトが降伏した後も、柱脚の固定度はほぼ保ち、柱脚回転角を0にする方向への復元力特性を常に保持している。

また、各耐力・剛性の定式化および復元力特性モデルの

作成は、比較的簡潔であり、コンピュータ解析を必要としない。

3. 楔デバイスの柱梁接合部への導入

第2章にて、構造物の残留水平変形を減少させるセルフセンタリング性能を、ノンスリップ型露出柱脚に付与することが可能であることを示した。しかしながら、それらは柱脚部の部分架構要素についての性状であり、柱脚部以外の要素に起因した残留水平変形に対する効果は確認されていない。柱脚部にセルフセンタリング性能を付与することで残留水平変形を効率よく減少させられることが報告されているが、柱脚部のみの復元力特性により構造物全体の変形を制御するという考えは現実的な設計では不可能と思われる。そこで、本章では構造物の全ての接合部にノンスリップ型露出柱脚の機構を導入することで、構造物の残留水平変形を効果的に低減する構造システムを考察する。

3.1 柱梁接合部への導入概念

楔デバイスの柱梁接合部への導入概念図を、Fig. 8 に示す。これは、通し柱にアンカーボルト孔を加工し、梁端部にエンドプレートを溶接し、長締めボルト（アンカーボルト）により接合するという形式である。降伏要素を長締めボルトとし、長締めボルトの塑性伸びによりエネルギー吸収するものとする。つまり、本論文で取り扱っているノンスリップ型露出柱脚の柱脚柱を梁に、基礎梁を柱に見立てた機構であり、ほぼ同様の耐荷機構を有することとなる。そのため、Fig. 8 に示すように長締めボルトを多数配列し、楔デバイスを設置することにより、ノンスリップ型露出柱脚と同様に、セルフセンタリング性能を付与できる。以上の、柱脚および柱梁接合部にセルフセンタリング性能を導入した、新しい構造システムの概形図を Fig. 9 に示す。

3.2 柱梁接合部への導入にあたる課題

柱梁接合部における梁の軸方向には、力はほとんど作用

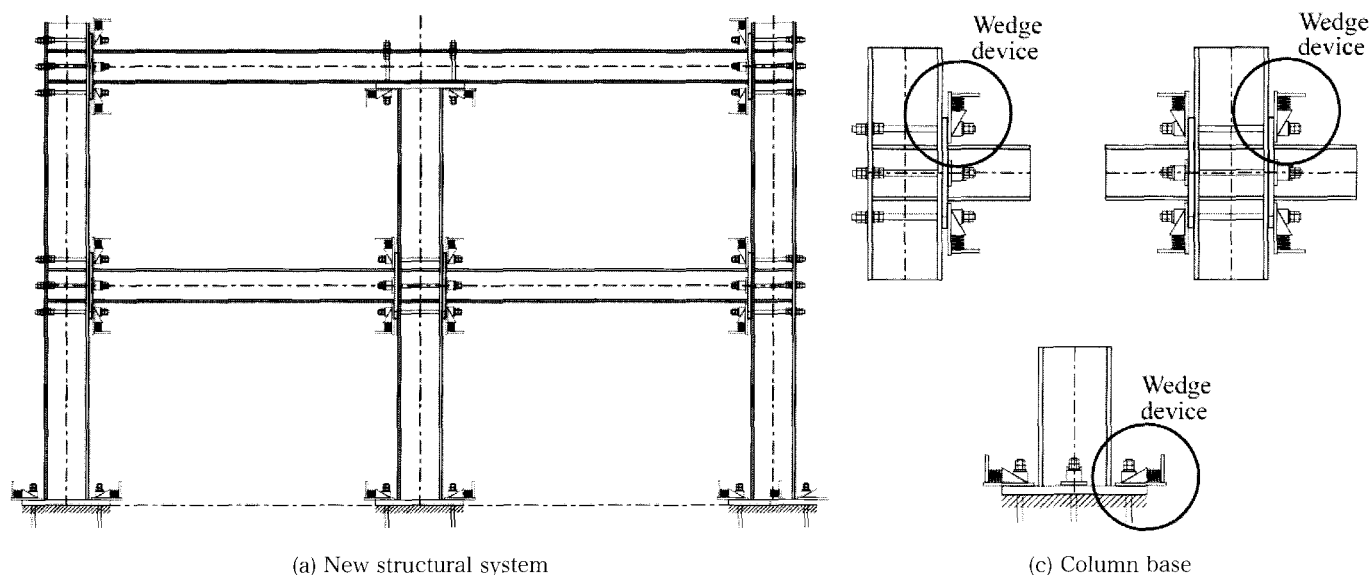


Fig. 9 New structural system for reduction of residual displacement by wedge device

せず、鉛直方向の自重および積載荷重が常時作用する。これらは、地震が作用しない場合には、長締めボルトを締付けることにより柱と梁端部エンドプレート間に生じる摩擦力が負担するが、地震外力が作用し締付け力が失われることで鉛直せん断力を長締めボルトが負担することとなる。この場合に、安定した復元力特性を示すか否かを確認する必要がある。更に、鉛直せん断力により、アンカーボルトが破断、接合部の耐荷機構が変化する等した場合、補強などの工夫が必要となる。

また、本論文で提案している構造システム概念図 Fig. 8において、内柱型接合部では柱を中心に対面する梁エンドプレートを一本の長締めボルトにより接合している。地震外力が作用し、梁端部が回転したとすると、対面する梁エンドプレート両方によりアンカーボルトは伸ばされ、場合によっては各列の伸び量が一致する可能性がある。このような場合、全てのアンカーボルトが同時に降伏し、柱脚の復元力特性はBi-liner型となる。つまり、原点指向型の復元力特性は接合部が降伏したサイクルにおいては期待できなくなる。そのため、各エンドプレートの長締めボルトは共有しない、もしくは、梁図心付近の長締めボルトの有効長さを調整する等で全ての長締めボルトが同時降伏することを避ける必要がある。

4. ま と め

鋼構造物にセルフセンタリング性能を付与する方法に関して検討した結果、以下の知見が得られた。

1. ノンスリップ型露出柱脚は、弾性のアンカーボルトを残すことで原点を指向する復元力特性を示している。また、全てのアンカーボルトが降伏しても、ほぼ固定度は保持されている。これらの点より、セルフセンタ

リング性能を有していると言える。

2. 比較的簡潔な定式化および復元力特性モデルにより、ノンスリップ型露出柱脚の履歴性状を表現できる。
3. 柱梁接合部を長締めボルトによる接合部とし、楔デバイスを設置することにより、柱梁接合部へもセルフセンタリング性能を付与できる。

謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者：高松隆夫教授)のプロジェクト研究の一環として実施した。また、フルサト工業株式会社より転造ねじアンカーボルトを提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 河野昭雄：地震動による鋼ラーメン骨組の残留水平変位に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第589号，pp.165-171，2005. 5.
- 2) 井上一朗，桑原進，多田元英，中島正愛：履歴ダンパーを用いた架構の地震応答と設計耐力，鋼構造論文集，第3巻第11号，pp.65-77，1996. 9.
- 3) 會澤貴浩，山田哲，岩田衛：サステナブルビル構造システムの提案とその基本特性，日本建築学会環境系論文集，第581号，pp.109-116，2004. 7.
- 4) J.M.Ricles, R.Sause, S.W.Peng, L.W.Lu: Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections, ASCE Journal of structural engineering 2002. 7. pp.850-859.
- 5) 中島正愛，吹田啓一郎，池永昌容，松宮智央，倉田真宏：セルフセンタリング導入による鋼構造骨組の残留

- 変形低減効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.765-766, 2004. 8.
- 6) 高松隆夫, 銅木弘和, 中村慎太郎: 露出型柱脚の復元力特性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第9巻, pp.415-422, 2001. 11.
- 7) 高松隆夫, 銅木弘和, 中村慎太郎: 鉄骨露出型柱脚の復元力特性に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第10巻, pp.499-506, 2002. 11.
- 8) 高松隆夫, 銅木弘和, 中村慎太郎: 改良型復元力特性を有する鉄骨露出柱脚に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第11巻, pp.563-570, 2003. 11. 9
- 9) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 石原節夫, 松尾彰: 既存屋内運動場露出柱脚の復元力特性について, 鋼構造年次論文報告集, 第12巻, pp.281-288, 2004. 11.
- 10) Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI: Non-slip-type restoring force characteristics of exposed-type column base, Journal of Constructional Steel Reserch, Vol. 61, pp.942-961, 2005.
- 11) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗: ノンスリップ型鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル, 構造工学論文集, Vol.51 B, pp.293-302, 2005. 4.
- 12) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 松尾彰: ノンスリップ型露出柱脚による構造物の耐震性能向上について, 日本建築学会中国史部研究報告集, 第28巻, pp.193-196, 2005. 3.
- 13) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985. 3.