

楔デバイスによる鋼構造建築物の耐震補強工法について

高松 隆夫*, 玉井 宏章*, 山西 央朗**

(平成20年10月31日受理)

Rehabilitation technique of steel structure by means of wedge device

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 31, 2008)

Abstract

A wedge device consisting of a wedge, a counter-wedge and a spring, is proposed by the authors. The device is applied to earthquake-resistant elements to provide more effective energy absorption under seismic ground motion. New structural elements are also proposed: a non-slip-type column base, a non-compression brace, a self-centering beam-to-column connection and a non-compression knee-brace. An experimental study has been made on these structural elements subjected to cyclic loadings to clarify their earthquake-resistant performance and applicability to rehabilitation.

Key Words: rehabilitation, wedge device, column base, brace, beam-to-column connection, knee-brace

1. はじめに

著者等は、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚のスリップ現象を改善する装置として、“楔デバイス”を提案している。この装置を設置した柱脚を、“ノンスリップ型柱脚”と呼び、載荷実験により、スリップ現象を解消できることを明らかにしている¹⁾⁹⁾。また、この装置を、梁端部をエンドプレート形式にして柱梁接合部に適用することで、柱梁接合部にも同様の性能を付与することができ、この接合部を“セルフセンタリング接合部”と呼んでいる¹⁰⁾。これ等が、以下のような利点を有していることを明らかにしている。

1) アンカーボルトや長締めボルト降伏後も接合部に緩みが生じず、常に固定度が保持される。；2) 大地震および中小地震に対するエネルギー吸収ダンパーとして設計で

きる。；3) 弾塑性繰返し載荷下において、いずれのサイクルにおいても単調載荷曲線と同様の履歴を描くため、復元力特性モデルの定式化が容易である。；4) 楔デバイスは簡単に設置できるので、柱脚においては耐震改修工法として適用できる。；5) ボルト列の内、一列でも弾性範囲に留まる列が存在すれば“原点指向型の復元力特性（セルフセンタリング性能）”が得られる。

特に、柱梁接合部においては、溶接接合形式が一般的であるために耐震補強工法としてはあまり期待できないものの、セルフセンタリング性能を付与して残留変形を低減することで、地震後も構造物の継続使用が可能となり、更に、母材（柱、梁部材）を弾性範囲に留めることができる。これ等の性能により、サステナブル構造システムを構築できる。

次いで、ブレースおよび方杖の端部に楔デバイスを設置

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科知的機能科学専攻

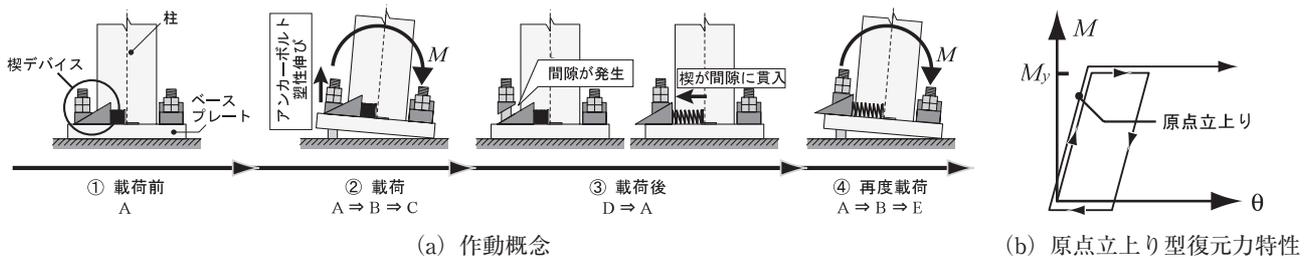


図1 ノンスリップ型露出柱脚

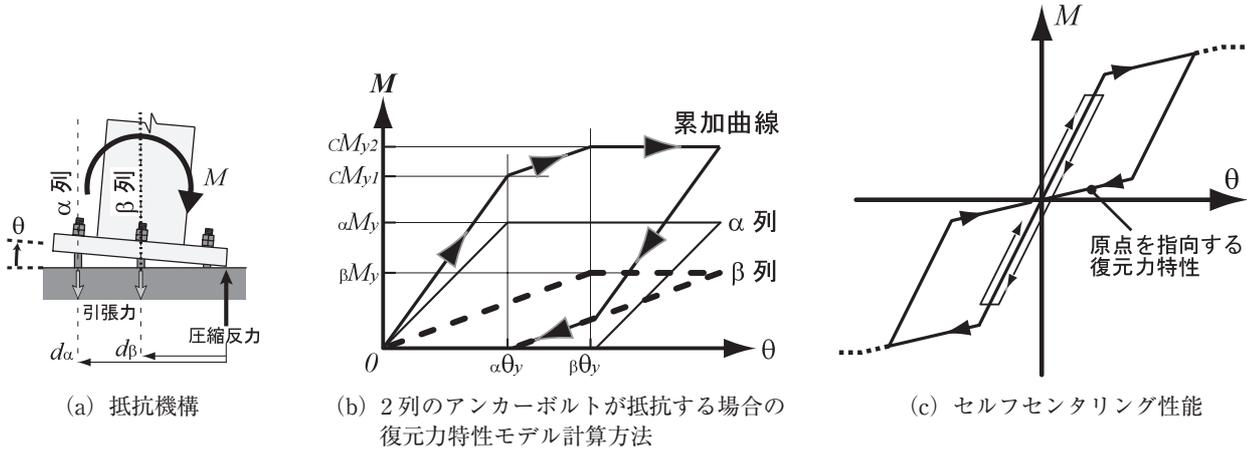


図2 アンカーボルト多数配列型のノンスリップ型露出柱脚の抵抗特性

することで、引張変形にのみ抵抗する部材を実現でき、これを、ブレースではX型に¹¹⁻¹⁴⁾、方杖は梁の上下対に設置することで^{15), 16)}、完全弾塑性型の復元力特性が得られることを明らかにしている。これ等は、以下のような利点を有している。

- 1) 引張力にのみ作用するので、座屈を考慮する必要がなく、ブレースおよび方杖部材を細長く設計できる。;
- 2) ブレースおよび方杖部材と同様に、母材との接合部の設計も、座屈を考慮する必要がなく容易に設計できる。;
- 3) 完全弾塑性型の復元力特性を有しており、安定したエネルギー吸収性能を有しているため、エネルギー吸収ダンパーとして設計できる。;
- 4) いずれの機構も単純であるため、既設構造物に設置できるので、耐震補強工法として適用できる。

このように、楔デバイスは様々な部材に適用でき、優れた抵抗特性を有した部材を実現できることを明らかにしている。これまで、楔デバイスを適用した個々の構造実験により評価してきたが、本論文では、各構造実験の結果をまとめ、改めて、楔デバイスを適用した部材の構造特性を検証する。

2. ノンスリップ型露出柱脚

図1にノンスリップ型露出柱脚の機能を、図2に復元力特性モデルの計算方法とセルフセンタリング性能の概念

を、図3に試験体形状を、図4に荷重装置を、図5に実験結果を、それぞれ、示す。また、表1に試験体の素材試験結果を、表2にバネの特性を示す。

尚、本実験では、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚に関する実験を行うため、ベースプレート、柱、および、基礎部分には、各荷重に対して弾性範囲に留まる素材特性・断面性能を採用している。

2.1 ノンスリップ型露出柱脚の機能

ノンスリップ型露出柱脚は、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚のナットとベースプレートの間に、楔デバイスを設置したものである。

図1に示すように、ノンスリップ型露出柱脚に地震外力が作用すると、従来のアンカーボルト降伏先行型露出柱脚と同様にアンカーボルトが伸ばされ、降伏して塑性伸びが生じる。アンカーボルトの塑性伸びにより、ナットとベースプレートとの間に間隙が発生するが、この間隙にバネの力により楔を貫入させることで間隙が消滅する。このため、再度地震外力が作用した際にも、柱脚は緩むことなく直ぐに地震外力に抵抗する。

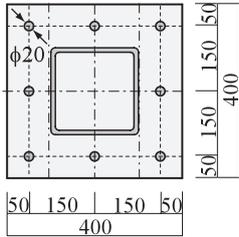
このような楔デバイスの機能により、弾塑性繰返し荷重下におけるスリップ現象が解消され、図1(b)に示すように、原点立上り型の復元力特性となる

また、図2に示すように、複数列が抵抗する場合、復元力特性はTri-linear型となる。このため、内側のアンカー

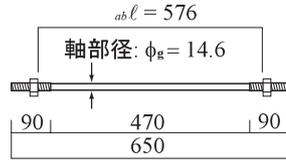
表1 試験体の素材特性と主要寸法

材質	E (N/mm^2)	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	主要寸法 (mm)
柱	STKR400	205,000	349	Box-200x200x12
ベースプレート	SS400	205,000	409	PL-400x400x50
アンカーボルト : N	ABR400	205,000	307	$\phi_g = 14.6, ab\ell = 576$

E : ヤング係数 σ_y : 降伏応力 σ_u : 引張強さ ϕ_g : 軸部径 $ab\ell$: 有効長さ



(a) ベースプレート



(b) アンカーボルト

図3 試験体形状

表2 バネの特性

外径 (mm)	バネ径 (mm)	自由長さ (mm)	最大たわみ (mm)	最大荷重 (N)	バネ定数 (N/mm)
26.1	2.0	94.0	70.3	93.5	1.33

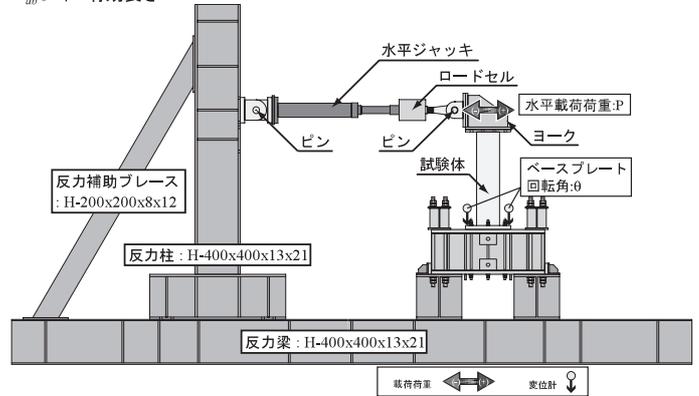
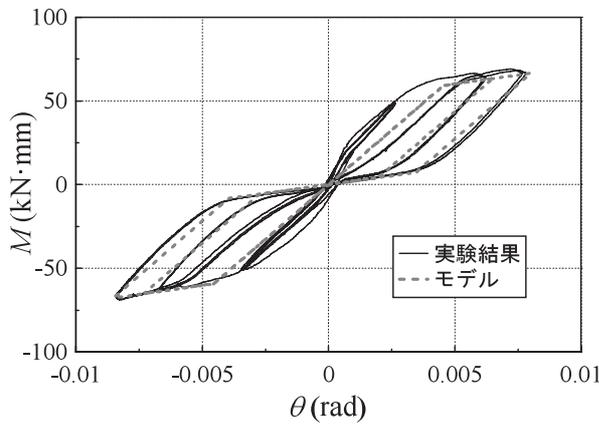
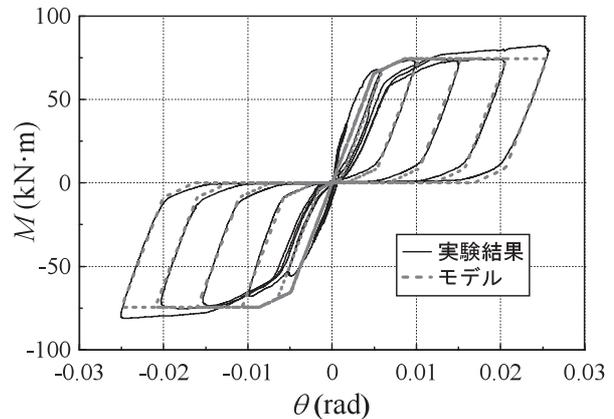


図4 荷重装置と計測位置



(a) 実験 I



(a) 実験 II

図5 曲げモーメント M - ベースプレート回転角 θ 関係

ボルト (図2(a)中のβ列) が弾性範囲であれば、図2(c)に示すように原点を指向する復元力特性を得ることができ、セルフセンタリング性能が期待できる。この、セルフセンタリング性能が期待できる範囲を、弾性限界回転角 (θ_y : β列のアンカーボルトが降伏する回転角) と呼ぶ。

2.2 試験体

柱には Box-200x200x12, ベースプレートには PL-400x400x50 を使い、柱とベースプレートとは全周隅肉溶接接合している。アンカーボルトには軸部に十分な塑性伸びが期待できる転造ねじアンカーボルト M16 を使用し、また、実験時には軸部降伏軸力の 30% (15kN) を初期張力として導入する。基礎部には、鋼製基礎 BH-400x400x32x36 を使用する。

楔デバイスに使用する楔、楔受けは、発錆処理 (塩分濃度 5% 程度の食塩水により、1 週間ほど湿潤状態を保つ) を施して、静止摩擦係数 μ がおよそ 0.78 となっている。

尚、本実験では、楔の貫入角度を 30 度としており、 $\mu=0.78$ 程度であれば、アンカーボルトから伝達される圧縮力に対して抵抗して滑らない。また、バネは、楔を水平移動させる程度の復元力を有していれば良いので、表2に示す程度の小さなバネ定数を持つバネを用いている。

2.3 実験方法

本実験では、露出柱脚付き片持ち柱に水平繰返し荷重実験を行う。荷重装置は、試験体柱頭部に設置したヨークに水平ジャッキを接合し、柱頭部に水平荷重を行うものである。荷重は、正負交番漸増繰返し荷重を行い、ベースプレート回転角を制御値とする。実験としては、以下の2種類を行う。実験 I は、セルフセンタリング性能が期待できる回転角で繰返し荷重を行う；実験 II は全アンカーボルトが降伏する弾塑性繰返し荷重を行う。

次いで、変位計測としては、ベースプレートに設置した変位計によりベースプレート左右の鉛直変位を、荷重計測

表3 試験体の素材特性と主要寸法

材種	E (kN/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u (%)	ε_{st} (%)	主要寸法 (mm)		
ブレース	SNR400	205	324	413	78.5	$\phi_p = 10.8, A_g = 91.6$ (mm ²)		
柱	ウェブ	SS400	205	303	382	79.3	25.1	H-100x100x6x8
フランジ	SS400	205	306	433	70.7	21.8		
梁	ウェブ	SS400	205	281	396	71.0	26.2	H-150x75x5x7
フランジ	SS400	205	274	388	70.6	25.5		

表4 バネの特性

外径 (mm)	バネ径 (mm)	自由長さ (mm)	最大たわみ (mm)	最大荷重 (N)	バネ定数 (N/mm)
30.0	2.50	150	320.0	110	0.65

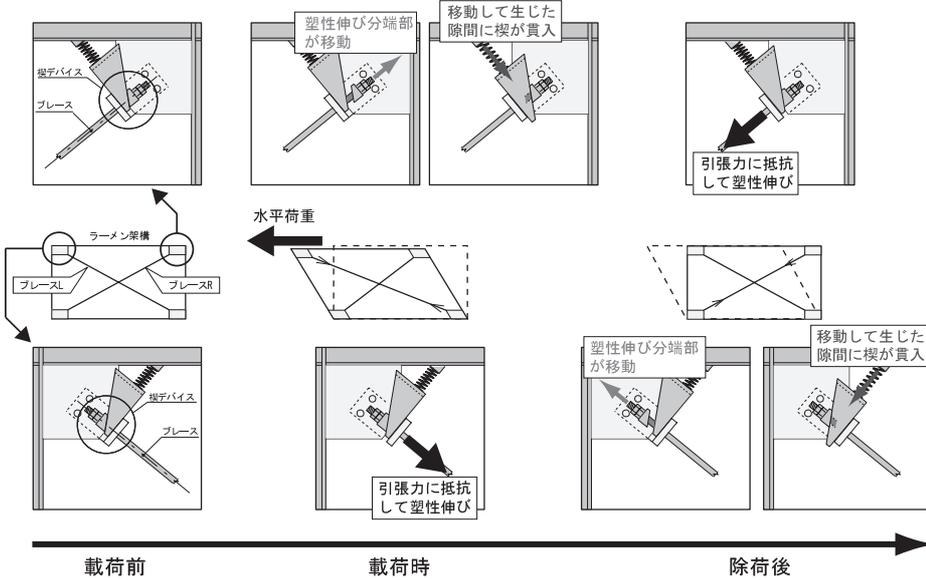
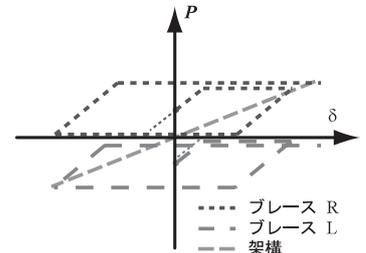
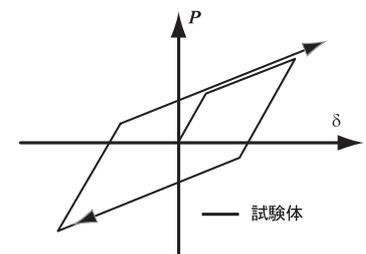


図6 ノンコンプレッションブレースの作動概念

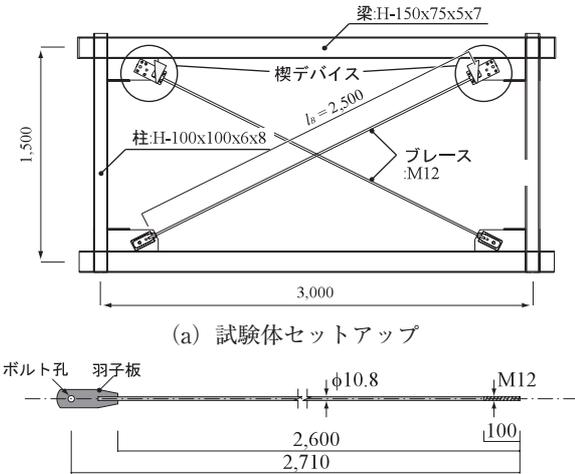


(a) 各部材の復元力特性



(b) 試験体の復元力特性

図7 復元力特性モデル



(a) 試験体セットアップ
(b) ブレース
図8 試験体形状

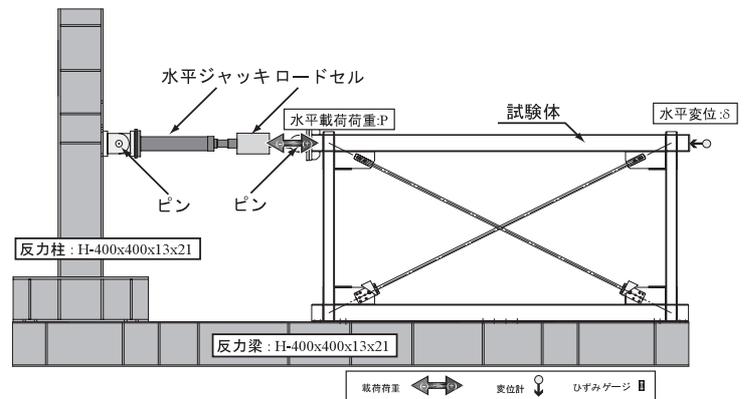


図9 荷重装置と計測方法

としては、水平ジャッキ先端に設置したロードセルにより水平荷重荷重 P を計測している。それぞれ、ベースプレート鉛直変位よりベースプレート回転角 θ を、水平荷重荷重より柱脚部曲げモーメント M を算出している。

2.4 実験結果と考察

図5に、実験結果を示す。図5には、曲げモーメント M - ベースプレート回転角 θ 関係を示し、更に、復元力特性モデルも併せて示す。曲げモーメント M については水平荷重荷重 P に柱高さ L を乗じた値、ベースプレート回転角 θ については柱下端部の鉛直変位より算出している。

図5(a)より、いずれの荷重においても、原点を指向する復元力特性が得られており、変形が弾性限界回転角以下であれば、セルフセンタリング性能が期待できることが分かる。

図5(b)より、いずれの荷重においても、原点立上り型の復元力特性を示しており、スリップ現象が改善されていることが分かる。

また、復元力特性モデルは良好に対応しており、ノンスリップ型露出柱脚の性能を、簡便に推定できることが分かる。

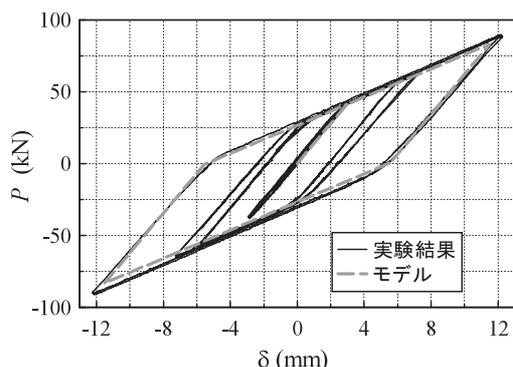


図10 水平荷重 P -水平変位 δ 関係

3. ノンコンプレッションブレース

図6にノンコンプレッションブレースの機能を、図7にノンコンプレッションブレース付架構の復元力特性モデルを、図8に試験体形状を、図10に載荷装置を、図11に実験結果を、それぞれ、示す。また、表3に試験体の素材試験結果を、表4にバネの特性を示す。

尚、本実験では、柱および梁は終始弾性範囲に留まり、ブレースのみが塑性化する。

2.1 ノンコンプレッションブレースの機能

ノンコンプレッションブレースは、ブレースをX型に配置し、ブレースの上端部に楔デバイスを設置したものである。

図6に示すように水平荷重が作用すると、ノンコンプレッションブレースにおいては、ブレースLが引張抵抗して、降伏、塑性伸びが発生する。一方、ブレースRでは端部が移動して圧縮力は作用せず、隙間が生じるが、この隙間に楔が貫入していく。次いで、除荷すると、ブレースLの上端部は塑性伸び分だけ移動して隙間ができていくが、この隙間に楔が貫入するので、ブレースに緩みは生じない。また、ブレースRは、楔デバイスが隙間を埋めているので、除荷により引張変形が作用すると直ぐに引張抵抗を開始する。

このような楔デバイスの機能により、図7(a)に示すように、各ブレースは引張力のみで抵抗する完全弾塑性型の復元力特性となる。試験体としては、ブレースL、Rと架構の復元力特性を累加したものととなるので、図7(b)に示すようにBi-linear型の復元力特性を示す。

3.2 試験体

架構の柱にはH-100x100x6x8を、梁にはH-150x75x5x7を使用し、柱通し型としてそれぞれ強軸方向に完全溶け込み溶接接合している。また、架構の隅角部にはブレース設置用のガセットプレート：PL-350x150x9を全周隅肉溶接接合している。ブレースには、転造ねじ付丸鋼ブレース

M12を使用している。また、ブレースには初期載荷時に楔が貫入して弾性剛性が変化することを防ぐために、降伏軸力の50%を初期張力として与えている。

楔デバイスに使用する楔、楔受けは、発錆処理（塩分濃度5%程度の食塩水により、1週間ほど湿潤状態を保つ）を施して、静止摩擦係数 μ がおよそ0.73となっている。尚、本実験では、楔の貫入角度を30度としており、 $\mu=0.73$ 程度であれば、ブレースから伝達される圧縮力に対して抵抗して滑らない。また、バネは、楔を水平移動させる程度の復元力を有していれば良いので、表4に示す程度の小さなバネ定数を持つバネを用いている。

3.3 実験方法

本実験では、ブレース付門型ラーメン架構の載荷実験を行う。載荷装置は、門型ラーメン架構柱頭部に、水平ジャッキをピンを介して接合し、水平載荷を行う。載荷は、層間変形角を制御値として、1/1000、1/500、1/250、1/200、1/125と漸増させて各2サイクル行い、楔が貫入限界を迎えた時点で、実験を終了している。

次いで、変位計測としては、柱頭部の水平変位を計測して、層間変形角 δ としている。荷重計測としては、ジャッキ先端に設置したロードセルより、水平荷重 P を計測している。

3.4 実験結果と考察

図10に、実験結果を示す。図10には、水平載荷荷重 P -層間変位 δ 関係を示し、更に、復元力特性モデルも併せて示す。

図10より、ノンコンプレッション付門型ラーメン架構はBi-linear型の復元力特性を示し、エネルギー吸収効率が良いことが分かる。更に、常に一定の弾性剛性が保たれており、安定した性状を示している。また、復元力特性モデルは良好に対応しており、ノンコンプレッションブレース付付門型ラーメン架構の復元力特性を簡便に推定できることが分かる。

4. セルフセンタリング接合部

図11に試験体形状を、図12にセルフセンタリング接合部の機能と復元力特性モデルを、図13に載荷装置を、図14に実験結果を、それぞれ、示す。また、表5に試験体の素材試験結果を示す。

4.1 セルフセンタリング接合部の機能

セルフセンタリング接合部とは、梁端部をエンドプレート形式にし、楔デバイス付長締めボルトで、梁を柱に緊結したものである。

図12に示すように、楔デバイスを用いたセルフセンタリング接合部では、地震外力に対して、長締めボルトを塑

表5 試験体の素材特性と主要寸法

材種	E (kN/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u (%)	ε_{st} (%)	主要寸法 (mm)	
長締めボルト	ABR400	205	316	490	64.5	23.1	$\phi_g = 14.7, ab, l = 510$
柱	SS400	205	320	460	69.6	29.8	H-200x200x8x12
梁	SS400	205	319	462	69.0	28.1	H-250x125x6x9

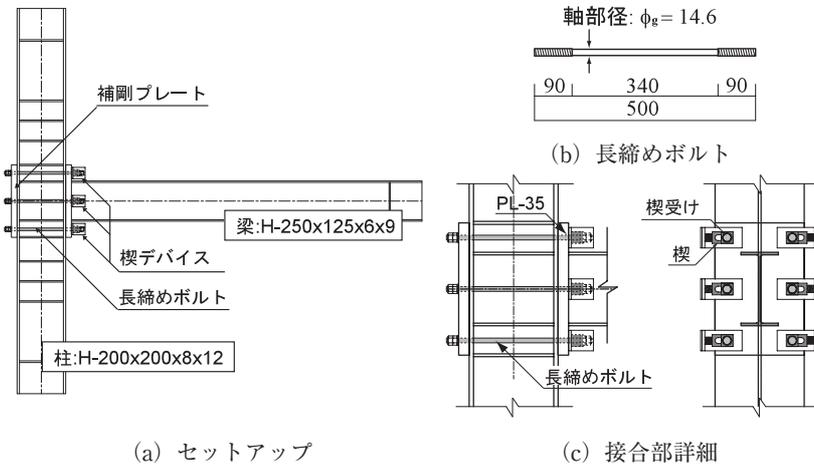
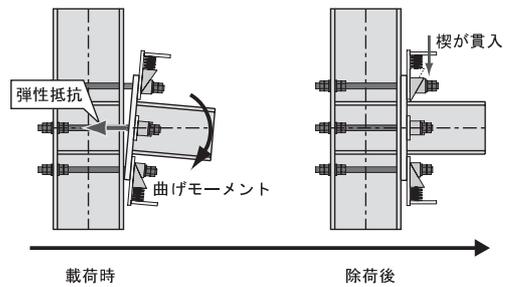
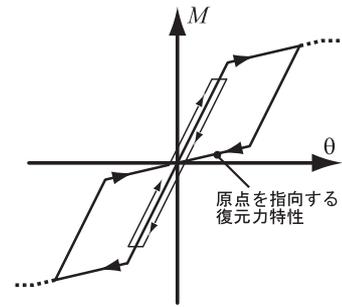


図11 試験体形状



(a) 機能



(b) 復元力特性

図12 セルフセンタリング接合部

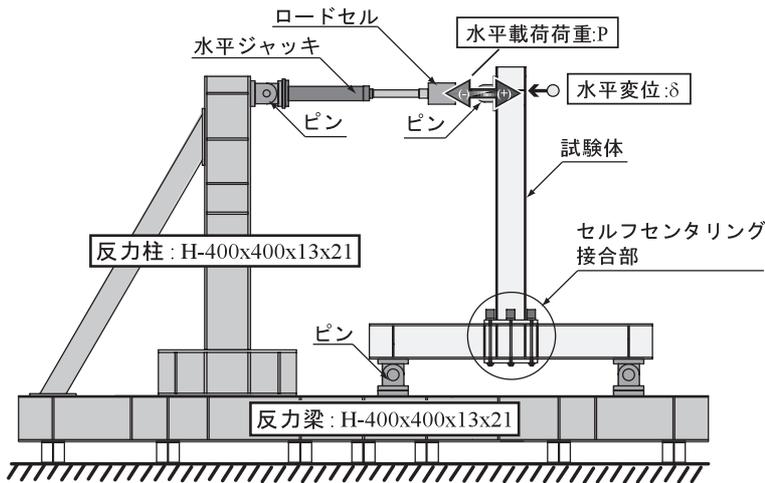


図13 荷重装置と計測位置

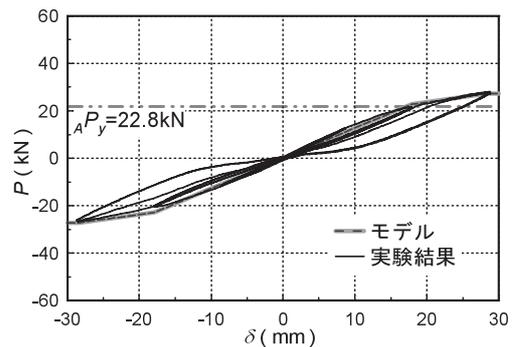


図14 水平荷重P-水平変位δ関係

性化させることでエネルギーを吸収すると共に、真ん中の長締めボルトを弾性範囲に留めることでセルフセンタリング性能を得ることができる。また、外側の長締めボルトが塑性化することにより、ナットとエンドプレートとの間に間隙が発生するが、この間隙にバネの力により楔を貫入させることで間隙が消滅する。このため、再度地震外力が作用した際も、接合部は緩むことなく直ぐに地震外力に抵抗する。

このように、エネルギー吸収すると共にセルフセンタリング性能を得ることができ、更に、母材を弾性範囲に留めることができる。地震後においても、残留変形を軽減することができ、更に、構造部材をリユースすることが可能であるため、本工法を、サステナブル構造システムとして期

待することができる。

4.2 試験体

試験体としては、側柱を取り出した部分架構試験体（ト字型試験体）を使用する。試験体の柱には H-200x200x8x12 を、梁には H-250x125x6x9 を使用する。梁端部にエンドプレート PL-450x200x35 を全周隅肉溶接接合し、長締めボルトには M16 の転造ねじアンカーボルトを使用する。また、長締めボルトには、降伏軸力の 30% を初期軸力として与えている。尚、長締めボルトの引張力により、柱フランジが面外変形することを防ぐために、柱には、補剛プレートおよびスチフナプレートを溶接接合している。

楔デバイスに使用する楔、楔受けは、2.2 節と同様の処

表 6 試験体の素材特性と主要寸法

材種	E	σ_y	σ_u	σ_y / σ_u	ε_{st}	主要寸法
	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(%)	(mm)
方杖 ABR400	205	316	490	64.5	23.1	$\phi_g = 14.7, ab, l = 930$
柱 SS400	205	320	460	69.6	29.8	H-200x200x8x12
梁 SS400	205	319	462	69.0	28.1	H-250x125x6x9

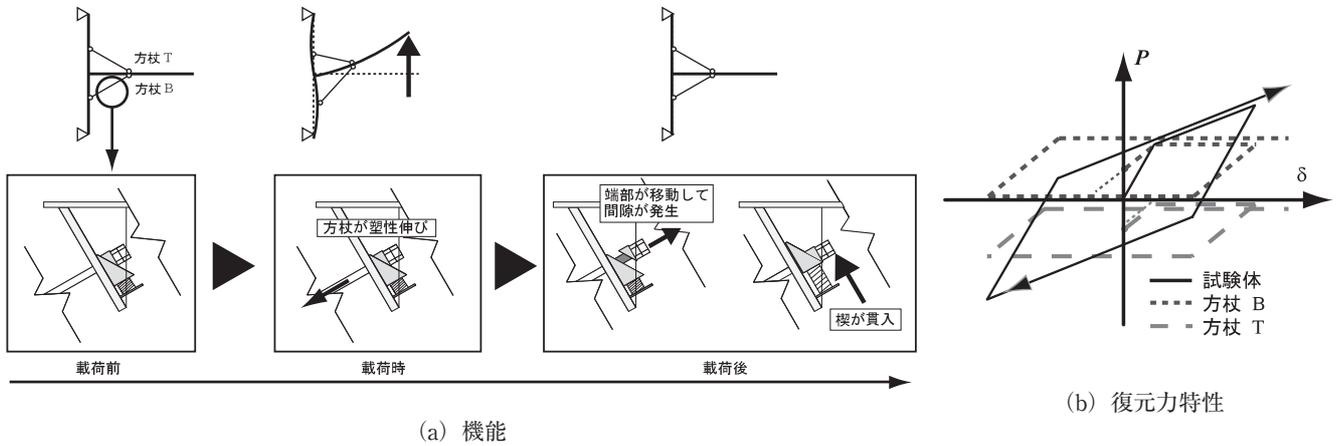


図 15 ノンコンプレッション方杖

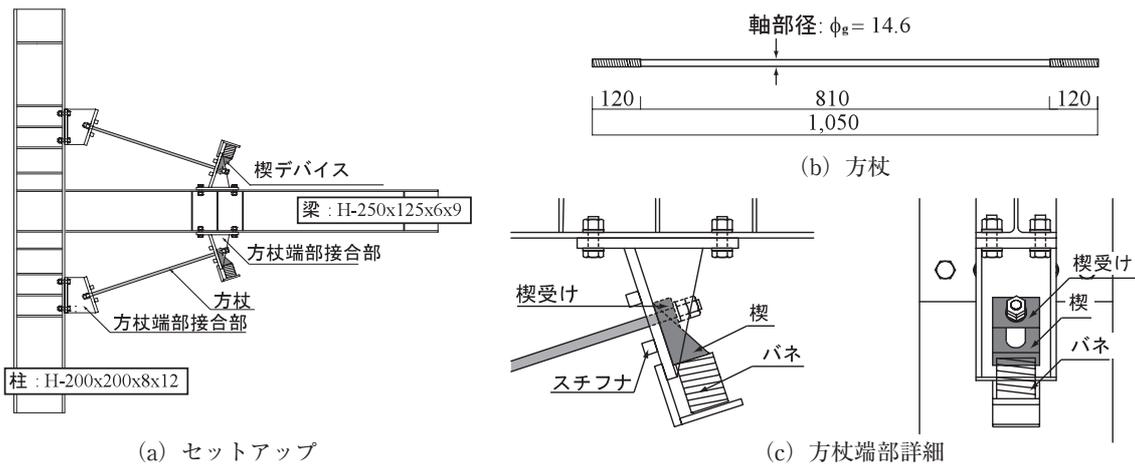


図 16 試験体形状

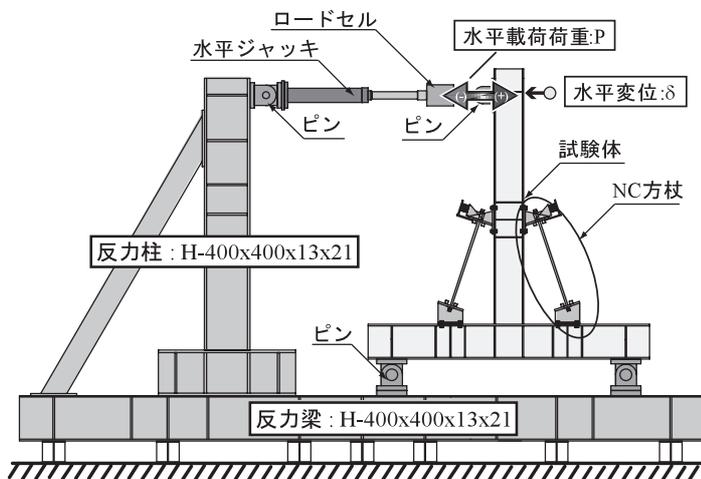


図 17 荷重装置と計測位置

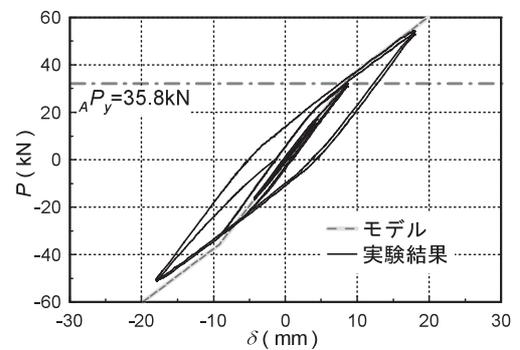


図 18 水平荷重P - 水平変位delta関係

理を施し、静止摩擦係数 μ がおよそ 0.73 となっている。
また、本実験では、楔の貫入角度を 30 度としており、 μ

=0.73 程度であれば、長締めボルトから伝達される圧縮力
に対して抵抗して滑らない。また、バネは、ノンスリップ

型柱脚と同様のものを使用している。

4.3 実験方法

本実験では、ト字型柱梁接合部の載荷実験を行う。試験体を90度回転させて、柱上下端をピンを介して反力梁に設置し、梁先端部に水平ジャッキをピンを介して接合し、載荷を行う。載荷は、梁先端部の変位を制御値として、正負交番漸増繰返し載荷実験を行う。

次いで、変位計測としては、梁先端の水平変位 δ を計測している。荷重計測としては、ジャッキ先端に設置したロードセルより、水平載荷荷重 P を計測している。

4.4 実験結果と考察

図14に、実験結果を示す。図14には、水平載荷荷重 P －水平変位 δ 関係を示し、更に、復元力特性モデルも併せて示す。

図14より、セルフセンタリング接合部は、柱脚と同様の原点立上り型の復元力特性を示すと共に、原点を指向する復元力特性を示していることが分かる。このように、エネルギー吸収すると共にセルフセンタリング性能が得られており、また、梁は終始弾性範囲に留まっている。また、復元力特性モデルと良好に対応している。

5. ノンコンプレッション方杖

図15にノンコンプレッション方杖の機能と復元力特性モデルを、図16に試験体形状を、図17に載荷装置を、図18に実験結果を、それぞれ、示す。また、表6に試験体の素材試験結果を示す。

尚、本実験では、柱および梁は終始弾性範囲に留まり、方杖のみが塑性化する。

5.1 ノンコンプレッション方杖の機能

ノンコンプレッション方杖とは、接合部近傍の梁上下に、ノンコンプレッションブレースと同様の機構を有した部材を、方杖として設置したのものである。

図15に示すように、NC方杖付ト字型試験体に地震外力が作用すると、NC方杖に軸方向変形が生じ、圧縮方向に変形する方杖は楔と楔受けが離間して抵抗せず、引張方向に変形する方杖は抵抗をする。楔と楔受けが離間して隙間が生じると、バネの力で楔が貫入する。このため、方杖に引張変形が生じると、直ぐに抵抗し始める。

このような楔デバイスの機能により、図15(b)に示すように、各方杖は引張力のみ抵抗する完全弾塑性型の復元力特性となり、試験体は、Bi-linear型の復元力特性を示す。

5.2 試験体

試験体としては、側柱を取り出した部分架講試験体（ト字型試験体）を使用する。試験体の柱にはH-200x200x8x12を、梁にはH-250x125x6x9を使用する。柱と梁を、スカ

ラップ付完全溶け込み溶接接合し、梁端上下に、M16の転造ねじアンカーボルトを方杖として使用する。また、方杖には、降伏軸力の50%を初期軸力として与えている。尚、方杖の引張力により、柱および梁フランジが面外変形することを防ぐために、柱および梁の方杖設置位置周辺には、スチフナを溶接接合している。

楔デバイスに使用する楔、楔受けは、2.2節と同様の処理を施し、静止摩擦係数 μ がおおよそ0.77となっている。また、本実験では、楔の貫入角度を30度としており、 $\mu=0.77$ 程度であれば、方杖から伝達される圧縮力に対して抵抗して滑らない。また、バネは、ノンスリップ型柱脚と同様のものを使用している。

5.3 実験方法

本実験では、ト字型柱梁接合部の載荷実験を行う。試験体を90度回転させて、柱上下端をピンを介して反力梁に設置し、梁先端部に水平ジャッキをピンを介して接合し、載荷を行う。載荷は、梁先端部の変位を制御値として、正負交番漸増繰返し載荷実験を行う。

次いで、変位計測としては、梁先端の水平変位 δ を計測している。荷重計測としては、ジャッキ先端に設置したロードセルより、水平載荷荷重 P を計測している。

5.4 実験結果と考察

図18に、実験結果を示す。図18には、水平載荷荷重 P －水平変位 δ 関係を示し、更に、復元力特性モデルも併せて示す。

図18より、ノンコンプレッション方杖付柱梁接合部は、Bi-linear型の復元力特性を示し、エネルギー吸収効率が良いことが分かる。弾性剛性は、架構と方杖の剛性を足し合わせたものとなり、二次勾配は架構のみの剛性となる。また、方杖以外の部材は終始弾性範囲に留まっている。モデルと良好に対応している。

6. まとめ

楔デバイスを各部材に適用し、要素実験および部分架構実験を行っ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およびセルフセンタリング接合部では、原点立上り型復元力特性が得られると共に、セルフセンタリング性能が期待できる。また、接合部においては、長締めボルト以外の部材は終始弾性範囲に留まり、サステナブル構造システムとしても期待できる。
- 2) ノンコンプレッションブレースおよびノンコンプレッション方杖は、Bi-linear型の復元力特性を示し、エネルギー吸収効率が良い。また、常に一定の弾性剛性を示し、安定しているので、エネルギー吸収ダンパーとしても

期待できる。

柱脚，ブレース，エンドプレート形式接合部，方杖に楔デバイスを設置した場合の載荷実験を行い，いずれも簡便な工法により，期待通りの抵抗特性を付与できることが分かった。特に，柱脚，ブレース，方杖においては，既設の構造物にも適用することが可能であり，耐震補強工法として期待できる。

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されました。

また，フルサト工業株式会社には各試験体の転造ねじアンカーボルト，転造ねじ付ブレースを提供していただきました。ここに，感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.51B, pp.293-302, 2005.3.
- 7) 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のセルフセンタリング性能に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp.173-180, 2005.11.
- 8) T. Takamatsu, H. Tamai, T. Yamanishi & A. Matsuo (2006a), Self-centering performance of non-slip-type exposed column-base, Proceeding of fifth international conference on "Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA2006)", Yokohama, Japan, 357-362, 2006.8.
- 9) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松尾彰：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復元力特性—無軸力下の場合のセルフセンタリング性能—，日本建築学会構造系論文集，第621号，pp.155-162, 2007.11.
- 10) 小畑寛行，高松隆夫，玉井宏章，山西央朗，松尾彰，ト字型柱梁接合部の耐震補強と新接合システムに関する実験的研究，鋼構造年次論文報告集，第14巻，pp.717-724, 2006.11.
- 11) 高松隆夫，玉井宏章，小持明宏：ノンコンプレッションブレースの履歴性状とエネルギー吸収性能について，鋼構造年次論文報告集，第11巻，pp.129-136, 2003.11.
- 12) 玉井宏章，高松隆夫，松尾彰：ノンコンプレッションブレースの耐震性能向上について，日本建築学会構造系論文集，第595号，pp.131-138, 2005.9.
- 13) 高松隆夫，玉井宏章，加藤孝昌，小畑寛行：ノンコンプレッションブレースで補強した鋼構造骨組の復元力特性，鋼構造年次論文報告集，第14巻，pp.429-436, 2006.11.
- 14) 高松隆夫，玉井宏章，岡部政和ノンコンプレッションブレース付鋼構造骨組の地震応答性状に関する振動台実験，構造工学論文集，Vol.54 B, pp.707-714, 2008.4.
- 15) 高松隆夫，玉井宏章，檜谷本浩二，小畑寛行，方杖による鉄骨ラーメンの耐震補強工法に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第15巻，pp.113-120, 2007.11.
- 16) 高松隆夫，玉井宏章，小畑寛行，竹内一郎，ノンコンプレッション方杖によるH形鋼柱梁接合部の耐震補強法，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp.215-222, 2005.11.