

方杖による鉄骨フレームの耐震補強に関する実験的研究

高松隆夫*・玉井宏章*
檜谷本浩二**・小畑寛行**

(平成18年10月30日受理)

EXPERIMENTAL STUDY ON REHABILITATION OF STEEL FRAMED STRUCTURE BY MEANS OF KNEE-BRACES

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI
Koji HIYAMOTO and Hiroyuki KOBATA

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

In this paper, an experimental study on steel framed structures subjected to cyclic loadings was carried out. Knee-braces were installed to strengthen a beam-to-column connection. Two types of knee-braces resistance were proposed. One was non-compression knee-braces and the other was non-tension knee-braces. The following conclusions were drawn from the experimental results. 1) Both connections show bi-linear restoring force characteristics. 2) The cyclic curves of the connection with non-tension knee-braces show good agreement with ones of the non-compression knee-braces the connection.

Key Words: Non-compression and Non-tension braces, Steel frame, Loading test

1. はじめに

2000年鳥取県西部地震そして2001年芸予地震においては、鉄骨造建物の被害としてはブレースの座屈が挙げられている¹⁾。ブレース材が圧縮力を受け局部座屈や曲げ座屈を生じると著しくエネルギー吸収性能が低下し、引張塑性変形を起すとスリップ現象を生じることになる。そのため、座屈を起すことなくスリップ現象を生じないブレースの必要性がある。

現在では、その対策として様々な座屈拘束ブレースなどが開発されている²⁾³⁾⁴⁾。著者らは、露出柱脚のスリップ型復元力特性を改善するために、楔デバイスを用いることにより、スリップ現象を起さないノンスリップ型露出柱脚の開発研究を行っている⁵⁾⁶⁾。その拡張として楔デバイスをブレース端部に設置することにより、圧縮力をブレースに

作用させることなく、引張力のみを作用させるとともに塑性伸びを生じた後もブレースの緩み(スリップ現象)を発生させないブレース、ノンコンプレッションブレースを提案し、実験的に復元力特性と有効性を明らかにしてきた⁷⁾⁸⁾。また、柱梁接合部においてノンコンプレッションブレースを方杖として適用した場合の補強効果も示されている⁹⁾。

しかしながら現在の補強工法(X型ブレース、Z型ブレースなど)では、柱と梁で囲まれた空間を閉塞することになり、通路や窓等の開口部が取りにくく、居室の利便性が悪くなり、採光の遮りや補強構造材が見えることにより美観が損なわれるなどの問題が生じる可能性がある。また、現在までに様々な構造形式の建物があり(例えば柱がSRC構造形式など)ブレース端部接合部において引張力などが作用すると、取付け部分に悪影響を生じる可能性がある。そこで地震力によりブレースが効率良く圧縮力だけで抵抗

* 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土木工学専攻

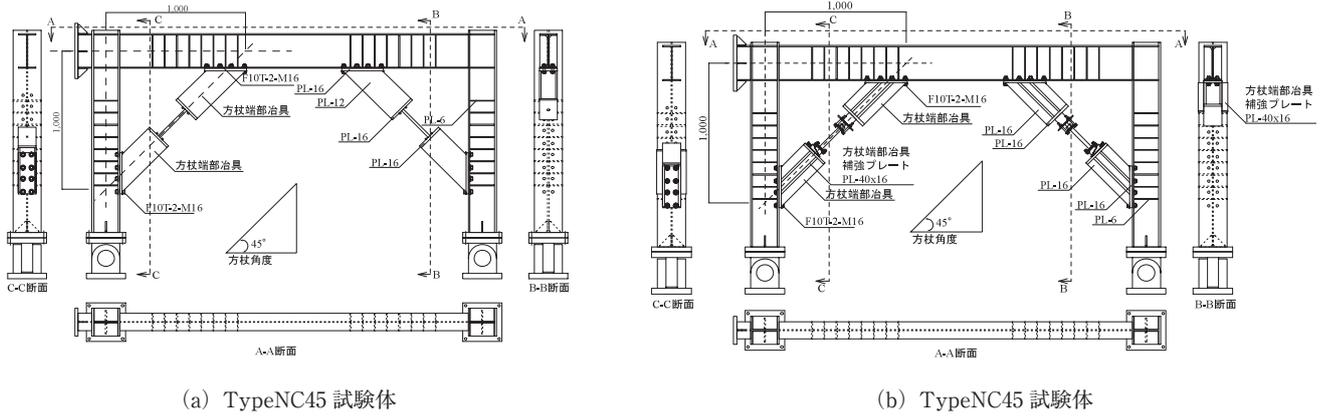


図1 2種類の補強試験体外観図

する機構の必要性もあると考えられる。

こうした背景から、本研究では中低層の鉄骨構造物を対象とした耐震補強工法として、鉄骨フレーム柱梁接合部近傍に方杖材をコンパクトに設置し、外観上の影響が少なく建物空間を有効に利用でき、容易に設置できる耐震補強を提案し、鉄骨フレームの載荷試験を行う。その際に、本研究室で提案されてきた引張力のみに対抗するノンコンプレッション方杖（以後、TypeNC）と新規に提案する圧縮力のみに対抗するノンテンション方杖（以後、TypeNT）の2種類の復元力特性・構造特性・有効性について検討する。

2. 方杖材の抵抗機構と構成

2.1 ノンコンプレッション方杖 (TypeNC) の概要

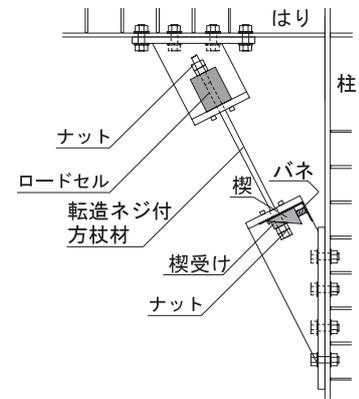
2.1.1 ノンコンプレッション方杖の構成

ノンコンプレッション方杖で補強された試験体を図1(a)に、方杖設置詳細図を図2(a)に、楔作動概念図を図3(a)に、それぞれ、示す。両端にネジの付いた丸鋼棒の端部は、楔を介して楔受けとダブルナットで鉄骨フレームに取り付けられた端部治具に設置され、もう一方の端部は、端部治具にダブルナットで取り付けられている。楔やナットを受けるプレートには、スチフナが溶接されており丸鋼棒からの引張力に対して十分な強度と面外曲げ剛性を有し、鉄骨フレームの柱や梁と方杖端部治具との接合方法は、摩擦ボルト接合されている。楔の後方鉛直面には、楔が貫入する方向に力が作用するようにバネが設置されている。

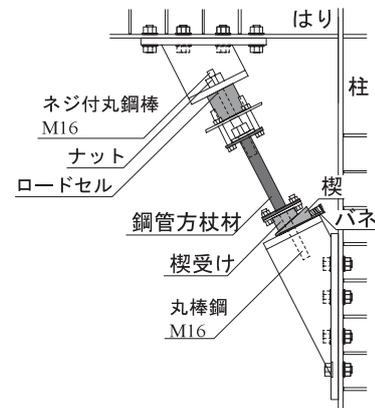
楔と楔受けは、大きな摩擦係数が確保されるよう発錆処理が施されている。また、楔の角度は30°を適用している。

2.1.2 ノンコンプレッション方杖の機構

この方杖に地震水平力が作用すると、方杖に対して引張方向の水平力には方杖が効率良く抵抗し、方杖材は塑性変形して地震入力エネルギーを吸収する。一方、方杖に対して圧縮方向の水平力が作用する場合は、楔受けが楔と離間



(a) TypeNC60 試験体



(b) TypeNT60 試験体

図2 2種類の補強試験体詳細図

し、方杖は圧縮力に抵抗しないため座屈は生じない。この方杖端部に離間が生じて楔に後方に取り付けられたバネの復元力により、楔が楔受けと端部治具との間に貫入され、方杖の緩み（スリップ現象）は生じない機構となっている。

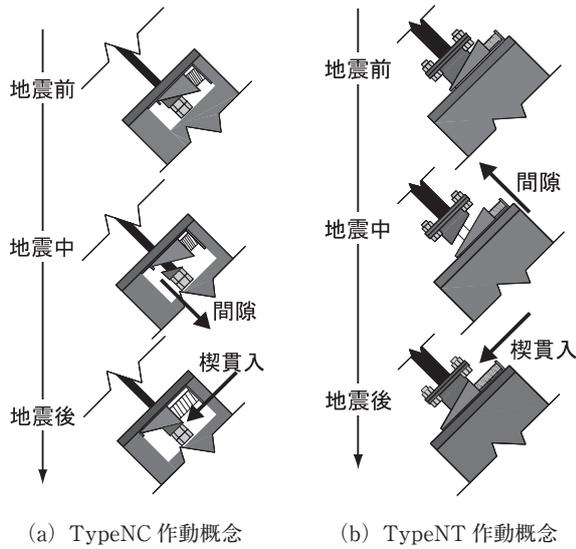


図3 2種類の補強試験体における楔作用概念

2.2 提案するノンテンション方杖 (TypeNT) の概要

2.2.1 提案するノンテンション方杖の構成

提案するノンテンション方杖で補強された試験体を図1 (b) に、方杖設置詳細図を図2 (b) に、楔作用概念図を図3 (b) に、それぞれ、示す。両端に鋼プレートを溶接した鋼管の端部は、鋼プレートに楔受けを溶接し、鋼プレートと鋼管とをボルト接合で取り付けられ、楔を楔受けと方杖位置を固定する丸鋼棒 (M16) で鉄骨フレームに取り付けられた端部治具に設置されている。もう一方の端部は、鋼管に溶接されたプレートは端部治具にボルト接合され取り付けられている。端部治具は、鋼管からの圧縮力に対して十分な強度と面外曲げ剛性を有し、鉄骨フレームの柱や梁と方杖端部治具との接合方法は、摩擦ボルト接合されている。楔の後方鉛直面には、楔が貫入する方向に力が作用するようにバネが設置されている。

楔とテーパ付座金は、大きな摩擦係数が確保されるよう発錆処理が施されている。また、楔の角度は 15° を適用している。

2.2.2 提案するノンテンション方杖の機構

この方杖に地震水平力が作用すると、方杖に対して圧縮方向の水平力には方杖が効率良く抵抗し、方杖材は塑性変形して地震入力エネルギーを吸収する。一方、方杖に対して引張方向の水平力が作用する場合は、テーパのついた座金が楔と離間し、方杖に引張力は抵抗しない。この方杖端部に離間が生じて楔に後方に取り付けられたバネの復元力により、楔がテーパのついた座金と端部治具との間に貫入され、緩みは生じない機構となっている。

3. 実験概要

ノンコンプレッション方杖と提案するノンテンション方杖の補強効果と適用可能性を検討するため、鉄骨フレームに柱梁接合部近傍に2種類の補強形式を設置した補強試験体を作製し、梁軸方向に水平荷重を載荷する繰り返し漸増振幅載荷実験を行う。

3.1 試験体

試験体を図1に示す。柱の反曲点位置で取り出した1スパンの鉄骨フレーム柱：H-200x200x12x8 (SS400)、梁：H-250x125x6x9 (SS400) にノンコンプレッション方杖 (TypeNC)、ノンテンション方杖 (TypeNT) で補強された試験体、及び無補強試験体 (TypeN) について実験を行った。試験体のパラメーターは方杖の設置角度 (45° , 30° , 60°) とし、試験体計7体を用意した。方杖設置角度 60° における2種類の補強形式の設置詳細図を図2に、試験体名称を図4に、各補強試験体 (TypeNC, TypeNT) の方杖材を図5に、2種類の補強形式で用いた楔・楔受け形状を図6に、それぞれ、示す。また、TypeNC試験体にお

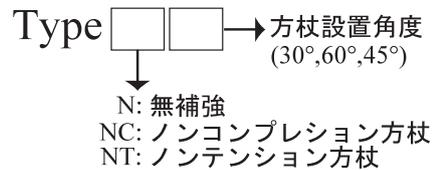
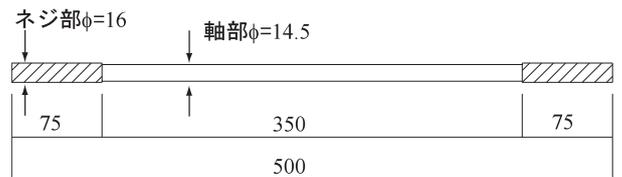
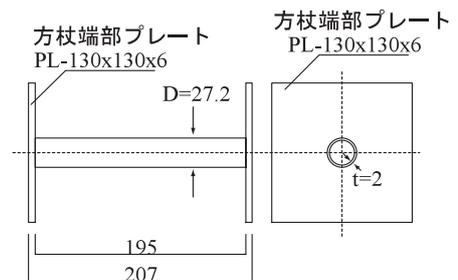


図4 試験体名称



(a) 丸鋼棒方杖材 (NC方杖)



(b) 鋼管方杖材 (NT方杖)

図5 方杖材

ける方杖材は、M16 (ABR-400) の転造ねじ付き丸棒鋼、TypeNT 試験体における方杖材は、鋼管φ27.2 (STK400) を用いた。ここで、方杖の降伏耐力はほぼ等しい値に設定し、方杖設置角度が変化しても方杖の有効長さは一定になるように設置している。尚、方杖に設置された楔の初期不正を防ぐため、0.5kNの軸力を導入している。表1に鉄骨フレーム及び方杖材の素材試験結果を、表2に各試験体における方杖設置位置寸法を、それぞれ、示す。

また、文献7)に示したように楔表面の摩擦係数が0.7rad程度とすれば、方杖に対して傾斜角が30°以下となる楔を

採用すれば、方杖に引張力が作用する場合、楔は押し戻されることはないことが確認されている。尚、楔・楔受けはSS400鋼ブロックから切削して製作している。

3.2 加力装置

加力装置を図7に示す。試験体柱は、剛性の高い基礎反力梁 (H-400x400x13x21) にピン支持で取り付けられており、反力柱 (400x400x13x21) に取り付けられた水平オイルジャッキ (50t用) により試験体梁に水平力を与える。また、試験体の構面外方向への変形を防止するため水平オ

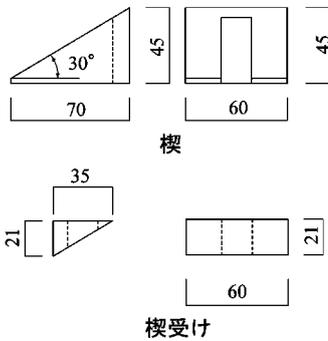
表1 素材試験結果

(a) 柱・梁

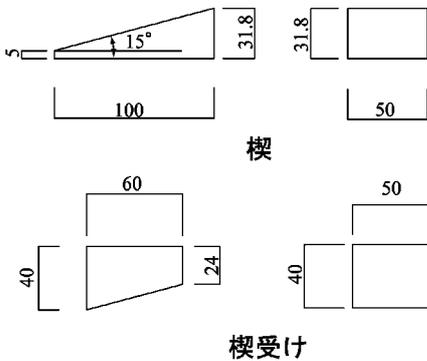
部材	材質	ヤング係数 E (kN/mm ²)	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_u (%)	伸び率 ϵ_u (%)
柱 はり	SS400	205	317	440	0.72	26.5
		205	324	456	0.71	26.1

(b) 方杖材

部名	材質	断面積 A (mm ²)	ヤング係数 E (kN/mm ²)	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_u (%)	伸び率 ϵ_u (%)
丸鋼棒	ABR400	165	205	302	446	0.67	30.4
鋼管	STK400	153	205	330	-	-	-



(a) NC方杖の楔・楔受け



(b) NT方杖の楔・楔受け

図6 楔・楔受け形状

表2 方杖設置位置寸法

方杖設置位置	$\theta : 30^\circ$	$l'_c : 509 \text{ mm}$ $l'_b : 1000 \text{ mm}$
	$\theta : 60^\circ$	$l'_c : 1000 \text{ mm}$ $l'_b : 507 \text{ mm}$
	$\theta : 45^\circ$	$l'_c : 1000 \text{ mm}$ $l'_b : 1000 \text{ mm}$

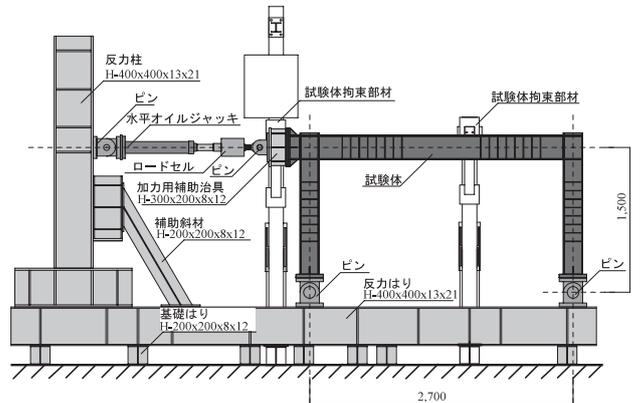


図7 加力装置

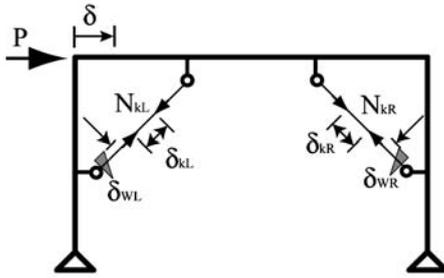


図8 計測諸量

イルジャッキ近傍と試験体梁中央部に、表裏からプレートで挟み込んで構面外への変形を抑えている。

3.3 計測方法

各計測諸量の模式図を図8に示す。

荷重計測は、水平オイルジャッキ先端に取り付けられたロードセルから水平力、 P を、方杖材の上端部に取り付けられたロードセルから左右の方杖の軸方向力、 N_{KL} 、 N_{KR} を、それぞれ、計測した。

変位計測は、試験体柱下部に取り付けられたピン軸を不動点とする支持治具に変位計を取り付け、水平変位、 δ 、左右方杖端部に取り付けられた楔の貫入変位、 δ_{WL} 、 δ_{WR} を、それぞれ、計測した。

ひずみ計測は、方杖材中央部の表裏に貼り付けられたひずみ値を平均した軸方向ひずみ、 ϵ_K を、試験体フレームに箔ひずみを貼り付け、それぞれ、計測した。

3.4 荷重方法

荷重方法は、試験体梁の水平変位を制御とする変位制御とし、層間変形角 $1/1000\text{rad}$ 、 $1/500\text{rad}$ 、 $1/250\text{rad}$ 、 $1/200\text{rad}$ 、 $1/150\text{rad}$ 、 $1/125\text{rad}$ と振幅を漸増させ、正負交番漸増繰返し荷重を行った。

4. 実験結果とその考察

以下に得られた各実験結果と項目毎の考察を示す。

4.1 水平力-水平変位関係

図9には、無補強試験体 TypeN における最終サイクル時における最大水平力 ($P_{Nmax} = 77.6\text{kN}$) と最大水平変位 ($\delta = 12\text{mm}$ 、層間変形角 $1/125\text{rad}$) で各試験体の実験値を割って無次元化した水平力、 P/P_{Nmax} と水平変位、 δ/δ_{Nmax} との関係を示す。図10には、(a) TypeNC30 試験体、(b) TypeNC60 試験体、(c) TypeNC45 試験体、(d) TypeNT30 試験体、(e) TypeNT60 試験体、(f) TypeNT45 試験体に分けて示す。縦軸は、無次元化された水平力、横軸は、無次元化された水平変位である。これらの図には、解析結果から得ら

表3 剛性と方杖降伏時の水平力の実験結果

試験体名称	加力時 1/1000	除荷時 1/200		E^P_{ky} (kN)
	E^K (kN/mm)	E^K (kN/mm)	K_r/K_f	
TypeN	-	6.47	-	-
TypeNC30	7.29	8.82	1.36	49.7
TypeNC60	7.55	9.15	1.41	43.2
TypeNC45	8.57	15.1	2.33	39.0
TypeNT30	7.63	9.81	1.52	42.2
TypeNT60	7.52	10.2	1.58	38.5
TypeNT45	10.9	18.8	2.91	35.4

E^K : 実験値の剛性 E^P_{ky} : 実験値の方杖降伏時の水平力
 K_f : 実験値の無補強試験体 TypeN における剛性 ($K_f = 6.78\text{kN/mm}$)
 ※ここで、実験値の剛性は、水平変位 7.5mm (層間変形角: 1/200 時) での剛性を用いている。

れた理論剛性と梁端部におけるひずみ値を併せて示す。また、表3には、各試験体における水平変位 $\delta = 1.5\text{mm}$ (層間変形角: 1/1000) 時の剛性と $\delta = 7.5\text{mm}$ (層間変形角: 1/200) 時での除荷剛性及び方杖降伏時の水平力を示す。

図9、表3から以下のことが分かる。1) 補強試験体 TypeNC、TypeNT は、スリップ現象を生じず、安定した紡錘型の履歴を示す。2) 補強試験体 TypeNC と補強試験体 TypeNT を較べて、ほぼ等しい履歴性状となる。3) 補強試験体 TypeNC、TypeNT は、鉄骨フレームは弾性体であるため方杖の降伏後無補強試験体 TypeN の弾性剛性で耐力が上昇する。4) 無補強試験体 TypeN と補強試験体 TypeNC、NT を較べて、補強試験体 TypeNC45、TypeNT45 では耐力が 1.3 倍程度、補強試験体 TypeNC、TypeNT (30, 60) では耐力が 1.2 倍程度上昇する。5) 補強試験体 TypeNC、TypeNT は、方杖の初期軸力が 0.5kN と低いいため初期時の剛性は低いものの、方杖端部の楔と楔受けの間隙に楔が貫入することで方杖の軸力が増分し、剛性が上昇することが分かる。

尚、補強試験体 TypeNT45 では、楔が貫入限界に達したため試験を終了し、この貫入限界は方杖の使用限界を意味している。

4.2 方杖軸方向力-楔貫入変位関係と方杖軸方向力-方杖軸方向ひずみ関係

図10には、補強試験体 TypeNC30 と補強試験体 TypeNT30 における左右の方杖軸方向力、(N_{KL} 、 N_{KR}) と左右の楔貫入変位、(δ_{WL} 、 δ_{WR}) との関係を、(a) TypeNC30 の左側、(b) TypeNC30 の右側、(c) TypeNT30 の左側、(d) TypeNT30 の右側に、図11には、補強試験体 TypeNT30 における左右の方杖軸方向力、(N_{KL} 、 N_{KR}) と左右の方杖軸方向ひずみ値、(ϵ_{KL} 、 ϵ_{KR}) との関係を、分けて示す。これらの図には、対応するサイクルの層間変形角の振幅を併せ

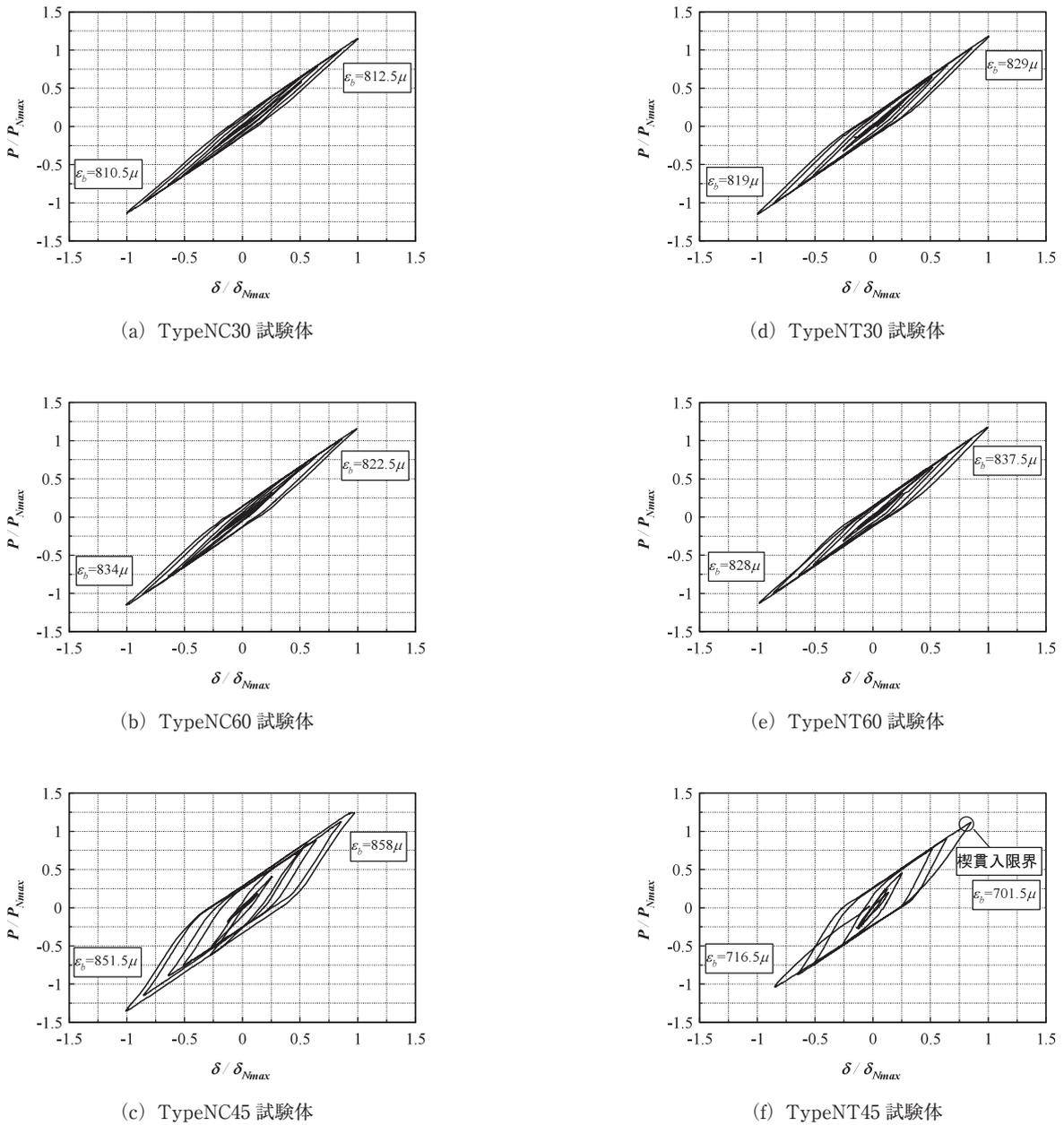


図9 水平荷重と水平変位関係

て示す。

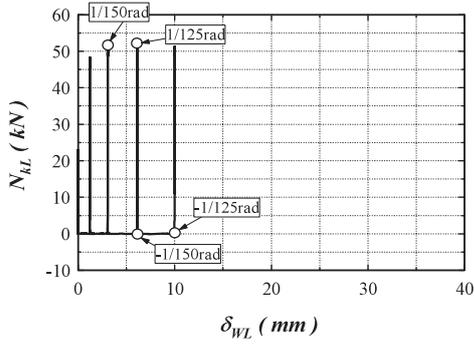
図10, 11から以下のことが分かる。1) 補強試験体 TypeNC では、方杖は引張力のみ抵抗し、無軸力に楔は貫入する。2) 補強試験体 TypeNT では、方杖は圧縮力のみ抵抗し、無軸力で楔は貫入する。3) 両補強試験体とも楔が押し戻されることはない。4) 補強試験体 TypeNT では、方杖軸方向ひずみが引張方向に推移してないことから、方杖に引張力は作用していないことが分かる*。

*補強試験体 TypeNT では、引張力が作用しているのは全ネジと鋼プレートでロードセルを締め付け固定していたため、方杖が圧縮はらみ出し変形を生じ、ロードセルを固定していたプレートも変形することで締め付け力が抜け、ロードセルに引張力の値が生じている。

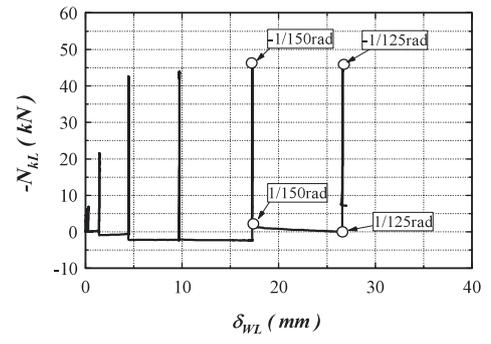
4.3 エネルギー吸収能力

表4には、各試験体の層間変形角 1/200rad, 1/150rad 時における履歴吸収エネルギー量, ΔW , 最大変位におけるポテンシャルエネルギー, W , フレーム全体の減衰定数, h を示す。ここで、鉄骨フレームは図9に示した梁端ひずみ値が 1000 μ 以下であり、弾性体状態を保持しているため履歴全体のエネルギー吸収量は方杖によるエネルギー吸収量とする。また、方杖のエネルギー吸収性能は、楔の貫入限界によって決定される。フレーム全体の減衰定数を式(1)に示す。

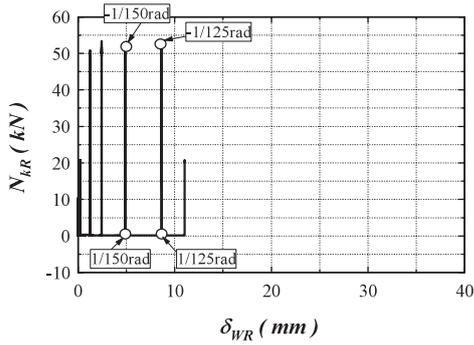
$$h = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \dots\dots\dots (1)$$



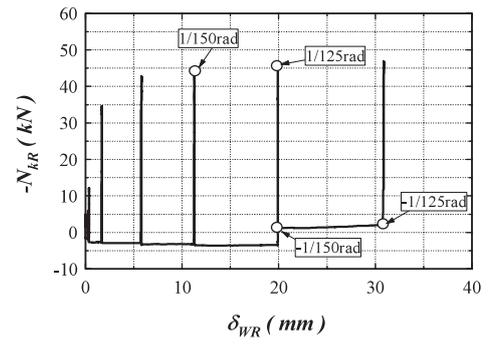
(a) TypeNC30 の左側方杖



(c) TypeNT30 の左側方杖

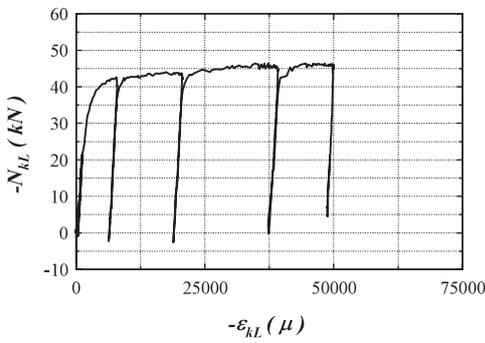


(b) TypeNC30 の右側方杖

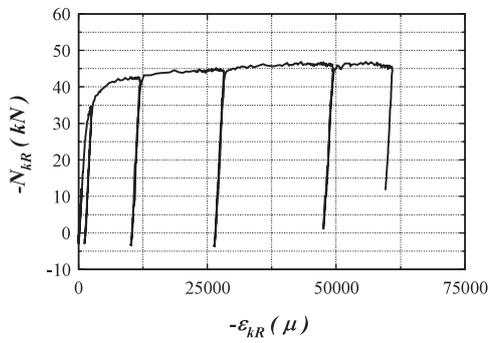


(d) TypeNT30 の右側方杖

図 10 方杖軸方向力と楔貫入変位関係



(a) TypeNT30 の左側方杖



(b) TypeNT30 の右側方杖

図 11 方杖軸方向力と軸方向ひずみ関係

表4から以下のことが分かる。1) 補強試験体 TypeNC45, TypeNT45 では、12~13%程度の減衰効果得られ、ほぼ等しいエネルギー吸収性能を示す。2) 補強試験体 TypeNC(30, 60), TypeNT(30, 60) では、3.5~5.9%程度の減衰効果が得られた。3) 方杖が塑性変形を生じると減衰効果は安定する。4) 補強試験体 TypeNC, TypeNT におけるエネルギー吸収性能に大きな差は見られない。

4.4 曲げモーメント図

試験体フレームに貼り付けられた箔ひずみ位置を図12

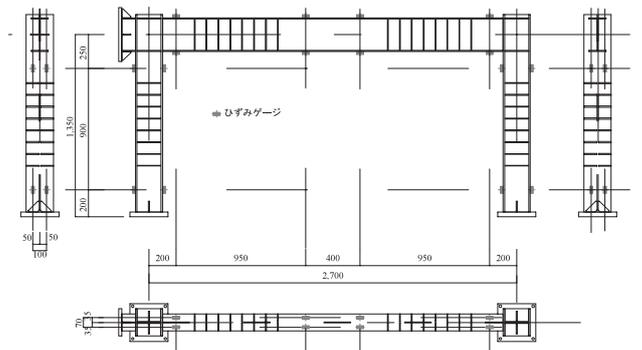


図 12 ひずみ計測位置

表4 各サイクル時におけるエネルギー吸収量と等価減衰定数

試験体名称	TypeNC45		TypeNC30		TypeNC60	
	δ/H	δ/H	δ/H	δ/H	δ/H	δ/H
ΔW (kN・mm)	410.5	616.9	100.4	204.0	101.4	248.3
W (kN・mm)	255.7	432.3	227.7	384.8	231.78	390.7
h	0.128	0.114	0.035	0.042	0.035	0.051

試験体名称	TypeNT45		TypeNT30		TypeNT60	
	δ/H	δ/H	δ/H	δ/H	δ/H	δ/H
ΔW (kN・mm)	442.9	-	168.0	286.1	171.4	283.86
W (kN・mm)	261.2	-	227.5	396.2	229.45	395.8
h	0.135	-	0.059	0.057	0.059	0.057

ΔW : 全体のエネルギー吸収量
 W : ポテンシャルエネルギー
 h : 等価減衰定数

に示す。補強試験体における水平変位 $\delta=7.5\text{mm}$ 時（層間変形角 $1/200\text{rad}$ ）の履歴性状を図13 (a) TypeNC45 試験体, (b) TypeNT45 試験体に示す。また、図13中に示した番号の位置での曲げモーメント分布図を図14, 15に示す。柱・梁の断面ひずみ値： (ϵ_T, ϵ_B) から、各断面における曲げモーメントは式(2), (3)で算定できる。

$$\chi = \frac{\epsilon_T - \epsilon_B}{D} \dots\dots\dots (2)$$

$$M = E \cdot I \cdot \chi \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 E : ヤング係数, I : 各ひずみ計測箇所における断面二次モーメント, D : 各ひずみ計測箇所における断面せいである。

図13, 14, 15から以下のことが分かる。1) 補強試験

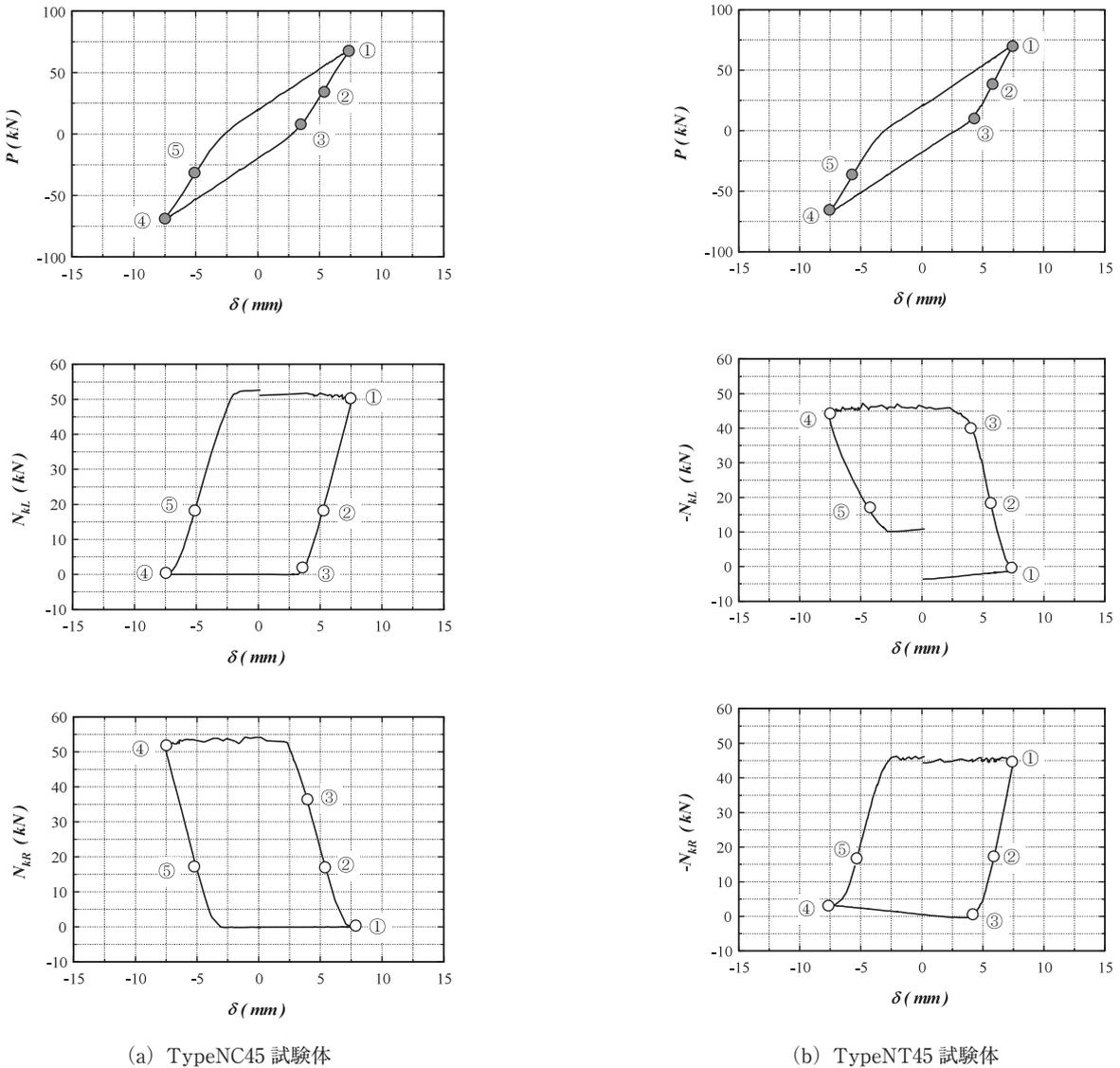


図13 層間変形角 1/200 時における履歴性状

体 TypeNC, TypeNT では, ①, ④の位置では, 方杖は片側のみが抵抗している。2) ②, ⑤の位置では, 最大変位時において抵抗していた方杖の軸力は徐々に抜け, もう一方の方杖は楔が貫入することで直ちに方杖軸力が増分するため, 左右の方杖の抵抗によって曲げモーメント分布は方杖設置位置近傍で変化し複雑な曲げモーメント分布となる。3) 補強試験体 TypeNC における③の位置では, 左側の方杖軸力が $N_{KL} \approx 0$ になった時, モーメント分布は方杖設置位置近傍での変化はなく, 右側の方杖だけ抵抗する。4) 補強試験体 TypeNC, TypeNT での曲げモーメント分布の性状はほぼ等しくなる。

5. ま と め

方杖材を鉄骨フレーム柱梁接合部近傍にコンパクトに設置する耐震補強法について 2 種類の補強形式を用いて方杖設置角度を変化させた載荷実験を行い, 補強形式及び設置角度の変化による履歴性状・有効性について検討した結果以下の知見が得られた。

- 1) 方杖を設置することにより耐力及び剛性は上昇し, 2 種類の補強形式 (TypeNC, TypeNT) はほぼ類似した性能を示し安定した紡錘型の履歴性状となる。

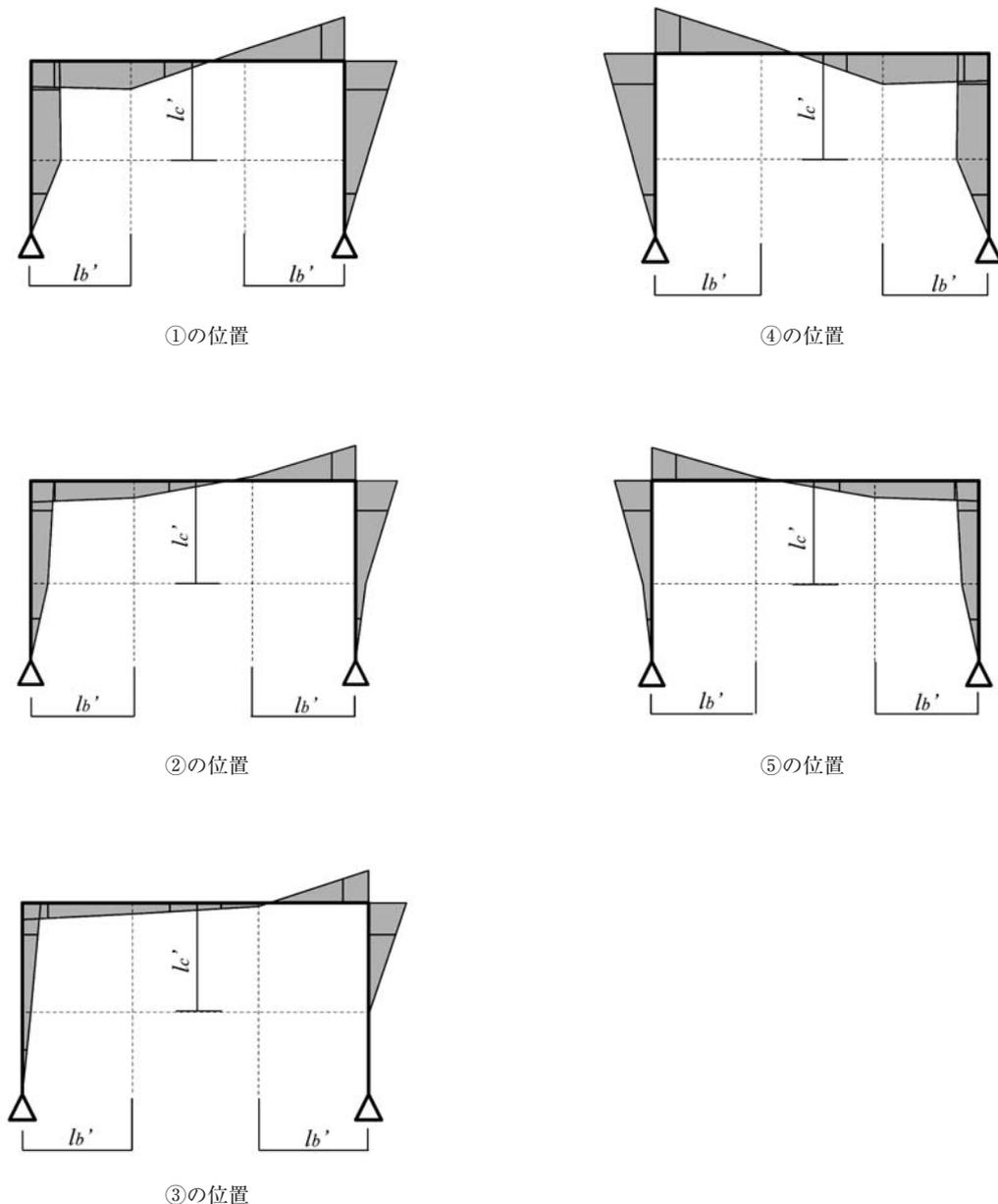


図 14 層間変形角 1/200 時における TypeNC45 のモーメント分布

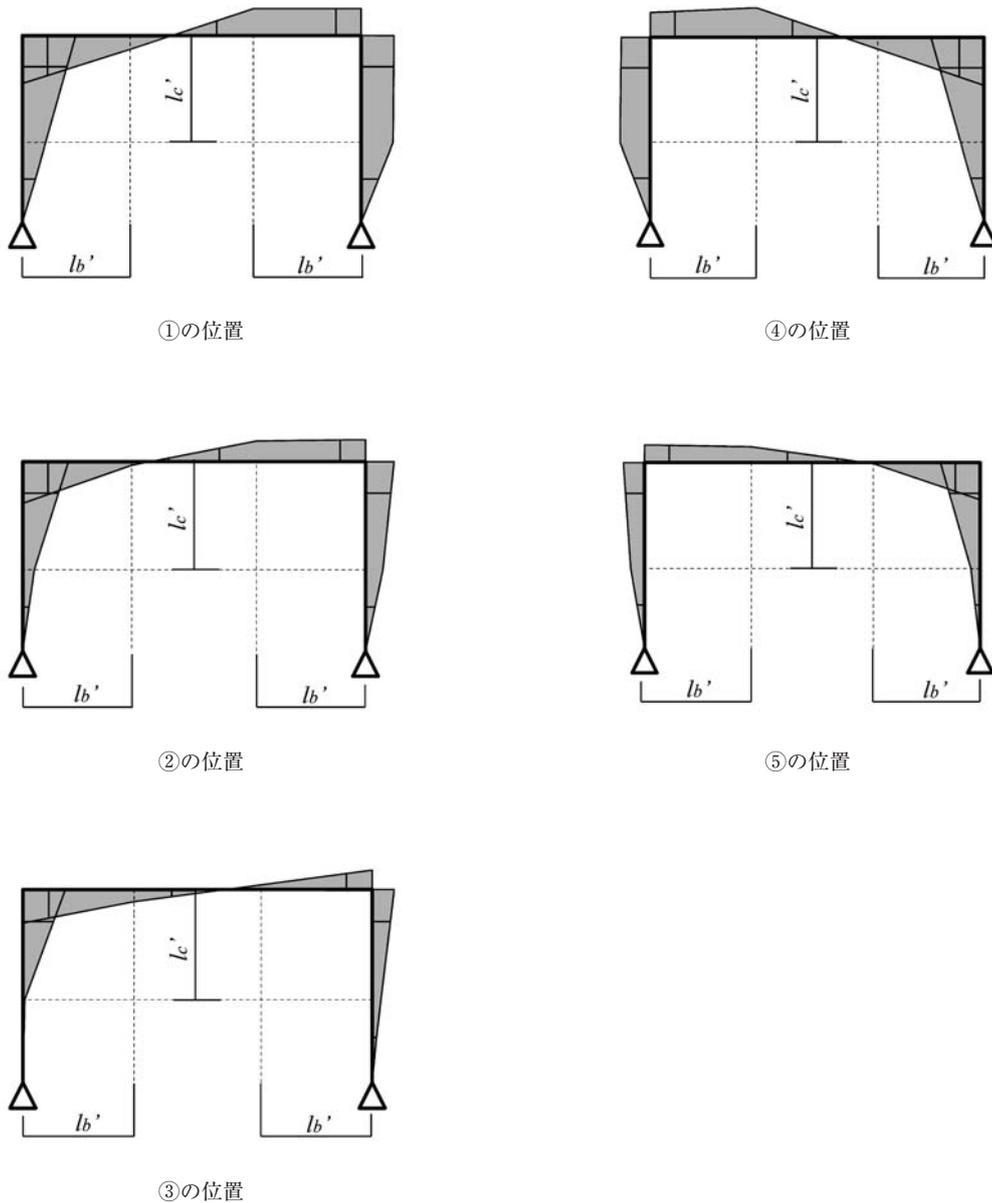


図 15 層間変形角 1/200 時における TypeNT45 のモーメント分布

- 2) 補強形式 (TypeNC, TypeNT) の方杖は、効率良く塑性化しエネルギー吸収し、フレームが弾性体であれば全履歴が方杖のエネルギー吸収量となる。
- 3) 片側及び両側方杖が抵抗することで曲げモーメント分布は変化するが、補強形式 (TypeNC, TypeNT) はほぼ類似した性能を示す。

以上のことから、2種類の補強形式 (TypeNC, TypeNT) は類似した性能かつ耐震性能が向上することから、構造物において方杖端部接合部の状況に応じて補強形式を選択でき、建物空間内を有効に利用できるため実用的であると考えられ、本論文で用いた方杖が設置された時の設計式を提案する必要がある。

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、実験実施にあたり、2005年度広島工業大学工学部建設工学科高松研究室・玉井研究室の学生には、多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

また、試験体作製にあたりフルサト工業株式会社には、転造ネジ付き丸棒鋼を提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：2000年鳥取県西部地震災害調査報告，2001年芸予地震災害調査報告，pp.17-155, pp.332-352, 2001.10.
- 2) 上村健二，藤澤一善，清水孝憲，木下陵二：二重鋼管座屈補剛プレースの履歴特性に関する研究（その2：二重鋼管プレースの繰返し載荷実験計画，その3：二重鋼管プレースの繰返し載荷実験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.671-674, 2001.9.
- 3) 竹内徹，鈴木一弁，丸川智輝：モルタル充填鋼管により座屈拘束された圧縮鋼管部材の変形能力，日本建築学会構造系論文集，第590号，pp.71-78, 2005.4.
- 4) 山下哲郎，深沢隆，村井正敏，岩田衛：鋼モルタル板を用いた実大座屈拘束プレースの軸加力実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.887-888, 2006.9.
- 5) 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.
- 6) 高松隆夫，玉井宏幸，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，小持明宏：ノンコンプレッションプ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.
- 8) 玉井宏章，高松隆夫，松尾彰：ノンコンプレッションプ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.
- 9) 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.

