

強非線形域における在来構法軸組木造住宅の剛性付加効果に関する実験的研究

山田 明*, 三島 弘敬**

Experimental Study on the Effect of Adding the Secondary Stiffness on Wooden Frameworks in the Strong Nonlinear Region

Akira YAMADA*, Hirotaka MISHIMA**

ABSTRACT

In this paper, the restoring force characteristics of wooden frameworks are clarified experimentally. The frameworks have bearing wall elements and steel bar braces that are placed in parallel. The steel bar braces are placed to add the secondary stiffness after yielding of the bearing wall elements of the frameworks. There is a loose hole on the plate at the end of the steel bar brace.

キーワード： 木造軸組，耐力壁，剛性，バイリニア型

Keywords: Wooden Framework, Bearing Wall, Stiffness, Bilinear Restoring Force

1. はじめに

建築物の構造設計では、部材のひび割れ・降伏等による剛性低下を考慮し、層の荷重変形関係を求める。層が完全に降伏してしまうと、建築物の剛性は消失し、耐力だけで地震動に耐えることになる。

建築物の塑性設計では、図 1 に示すエネルギー一定則に基づき、弾性系のポテンシャルエネルギー(ΔOAB の面積)と弾塑性系のそれ(台形 $OCDE$ の面積)を等しくなるように設計すれば、両者の耐震安全性は等しいと考える。これに従えば、台形 $OCDE$ を完全弾塑性型ではなく、バイリニア型に設計することで、最大変位 $\mu\delta_Y$ は完全弾塑性系よりも小さくすることができると言える。

本研究では、木造住宅の耐力壁に対して、降伏後の 2 次剛性を付加するために、鉄筋ブレースを並列し、その荷重変形関係を、実験によって明らかにする。鉄筋ブレース端部のボルト孔はルーズホールとし、軸組本体の降伏後にブレースが効くように設計する。

本研究は、小堀・南井の研究^[1]、および浅野の研究^[2]からアイデアを得ている。小堀・南井は、構造物を常時部材と耐震部材の 2 種で構成し、耐震部材には小振幅における剛性を担う傍ら大振幅では降伏しないし判断する“pretention wire”と、微小振幅を超えるに従いその威力を発揮する“twisted wire”を併

設した。これらの部材の地震応答特性を数学的に吟味している。浅野は、擬定常の white noise を受けるバイリニア型復元力特性を有する 1 質点系構造物の確率統計的な地震応答特性について検討し、地震動に対する変位応答を最小にするバイリニア型復元力特性には最適な 2 次剛性が存在することを指摘した。

これらの研究から、耐力壁の降伏後に威力を発揮する鉄筋ブレースを併設し、その剛性を適切に制御すれば、地震応答の低減が図れるのではないかと考える。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は図 2(a)に示す半間 (1P) の同一形状の軸組とし、5 体製作した。軸組形状は幅 910mm、高さ 2,730mm で、部材は柱・土台 105×105mm (無等級

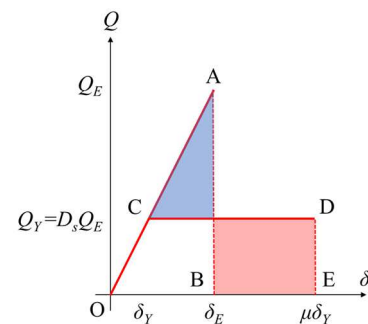
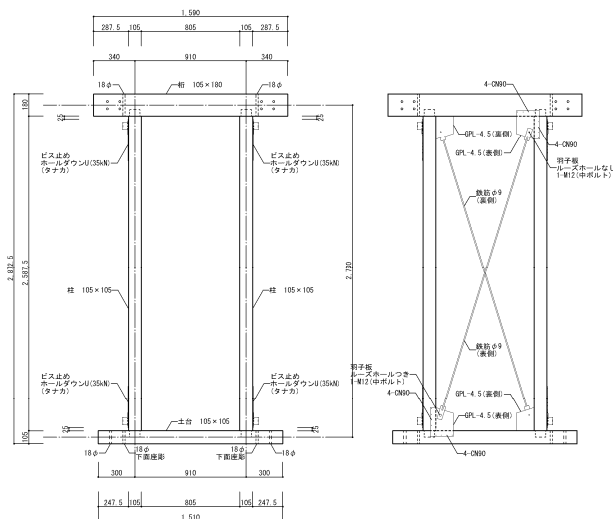


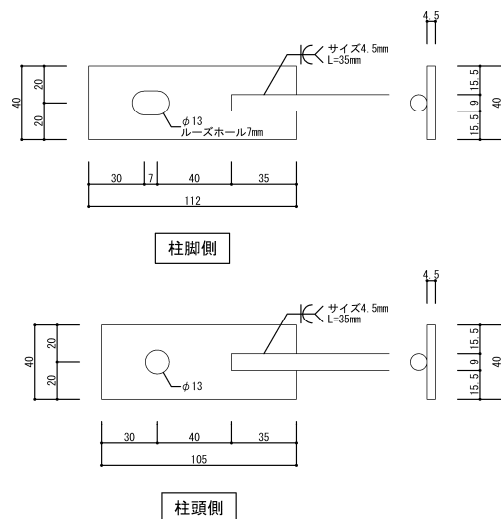
図 1 エネルギー一定則の概念

*工学部建築学科, **三島産業株式会社

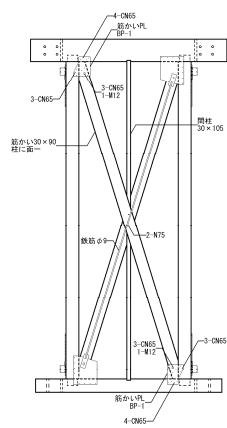


(a) 共通仕様

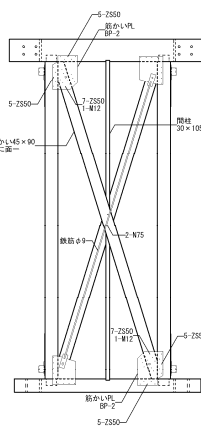
(b) No.1



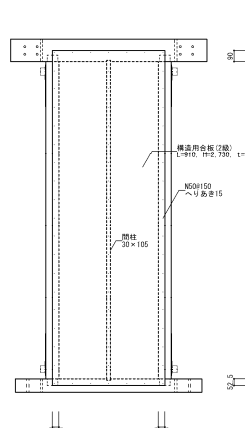
(c) 鉄筋ブレース羽子板



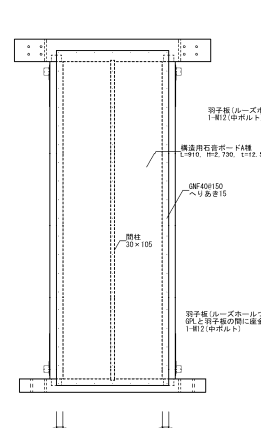
三ツ割筋かい
(d) No.2



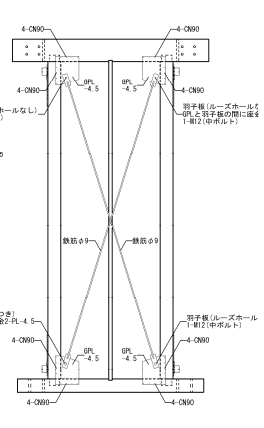
二ツ割筋かい
(e) No.3



構造用合板
(f) No.4 表側



石膏ボード
(g) No.5 表側



(h) No.4, 5 (裏側)

図 2 試験体軸組図

表 1 損傷状況

変形角	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
1/450	・鉄筋ブレースが少しだけ面外にはらむ。				
1/300					
1/200	・鉄筋ブレースの面外へのはらみだしが目線で確認でき、ルーズホールがずれ始める。				
1/150	・軸組のきしむ音がしだす。				
1/100					
1/75	・ルーズホールが移動が見え始める。	・筋かい交差部の釘が外れ始める。 ・ルーズホールが移動が見え始める。		・合板の釘がめり込み始め、ひびが確認される。 ・大きく音が鳴る。 ・ルーズホールが移動が見え始める。	・ボード四隅が剥れ始める。
1/50	・ルーズホールが移動しきる。	・木材の割れる音がする。 ・圧縮側筋かいの面外へのはらみだしが顕著になる。	・筋かいプレートの釘が抜け始める。	・鉄筋ブレースの屈曲が顕著になる。	・ボードの釘がめり込み始める。 ・ボード四隅がさらに剥れる。
1/40		・筋かい交差部の釘が完全に外れる。 ・鉄筋ブレースのガセットプレートが外れ始める。	・圧縮側筋かいの面外へのはらみだしが顕著になる。	・石膏ボードの屈曲が顕著になる。	・石膏ボードが軸組から突き始める。
1/30		・圧縮側筋かいが屈曲破壊する。 【実験終了】	・土台が剥ける。	・合板の釘のめり込みが顕著になる。	・軸組とボードのずれが顕著になる。
1/25			・引張側の筋かいが割れる。 ・鉄筋ブレースのガセットプレートが外れ始める。 ・圧縮側の筋かいが屈曲破壊する。 【実験終了】	・骨とともに耐力が低下する。 ・構造用合板が突き始める。	
1/20	・鉄筋ブレースのガセットプレートの釘が抜け出す。 【実験終了】			・骨とともに耐力が80%に低下する。 ・構造用合板が突きが顕著になり、釘が抜け出す。 ・鉄筋ブレースのガセットプレートの釘が抜け出す。 【実験終了】	・石膏ボードは、ほとんど剥離していない。 ・鉄筋ブレースガセットプレートの釘が抜け出す。
1/15					・柱が土台から抜け始める。
1/12					・鉄筋ブレースのガセットプレートが外れる。 【実験終了】

スギ製材), 桁 105×105mm (無等級ベイマツ製材) である。柱頭・柱脚の仕口は短ほぞとし, 短期許容引抜耐力 35kN のホールダウン金物を取り付ける。これらに耐力壁の要素を取り付け, 同図(b)および(d)~(h)の5種の仕様とする。

同図(b)に示す No.1 は, 鉄筋ブレースの軸組の特

性を把握するための試験体である。軸組の両面から φ9 の片側ブレースを取り付けて X 型とし, その端部は 1-M12 の中ボルトでガセットプレートに固定する。ブレース端部の羽子板については, 同図(c)に示すように, φ13 のボルト孔を開け, 柱脚側は 7mm のルーズホールとする。この 7mm の長さについて

は、次の計算により求めたものである。

軸組高さ 2,730mm
軸組幅 910mm
対角線長さ $\sqrt{(2,730^2+910^2)}=2,878\text{mm}$
1/120rad 時の水平変位と対角線長さ
2,730/120=23mm
 $\sqrt{\{2,730^2+(910+23)^2\}}=2,885\text{mm}$
必要ルーズホール長さ
2,885-2,878=7mm

すなわち、鉄筋ブレースは、層間変形角が 1/120rad に達したときに効き始める。ルーズホール部分の可動を妨げないように、ボルトはきつく締め付けすぎず、かつ、シリコンスプレーを吹き付ける。軸組側のガセットプレートの厚さは 4.5mm であり、柱と横架材に CN90 釘を 4 本ずつ打ち付けて固定する。

同図(d), (e)の No.2, 3 は、それぞれ 30×90mm の三ツ割筋かい、45×90mm の二ツ割筋かい耐力壁に鉄筋ブレースを並列させた試験体である。筋かい端部には、筋かいプレート BP, BP2 をそれぞれ取り付ける。

(f)の No.4 は、厚さ 9mm の構造用合板耐力壁に鉄筋ブレースを並列させた試験体である。合板外周部には、N50 釘を 150mm 間隔で打ち付ける。(g)の No.5 は、厚さ 12.5mm の構造用石膏ボード A 種に鉄筋ブレースを並列させた試験体である。ボード外周部には、GNF40 釘を 150mm 間隔で打ち付ける。

2.2 載荷方法と計測方法

試験体柱脚側のホールダウン金物を鉄骨架台に緊結し、試験体の浮き上がりを防止する。桁端部に取り付けられたモートルシリンダーにより、試験体を正負交番漸増繰り返し載荷する。加力サイクルは、見かけのせん断変形角にして 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/40, 1/30, 1/15rad とし、各振幅につき正負各 3 回の交番加力とする。

試験体の水平変位を測定するため、桁小口 1 箇所、桁側面 1 箇所、土台 1 箇所の計 3 箇所に水平方向の変位計を取り付ける。柱の引き抜き、試験体の浮き上がりを測定するため、柱頭 2 箇所、柱脚 2 箇所、土台両端 2 箇所の計 6 箇所に鉛直方向の変位計を取り付ける。

3. 実験結果

3.1 損傷状況

鉄筋ブレースの挙動については、No.1～5 で概ね共通しており、1/450rad 時以降、圧縮側ブレースが面外にはらみ出し始め、1/200rad 時にはそれが顕著になった。1/200rad 時から、引張側ブレースの端部ルーズホールが少しずつ移動し始めた。1/75rad 時

にはルーズホール孔の移動が目視でも確認できるようになり、1/50rad 時にはルーズホール孔が移動しきった。鉄筋ブレースは引張ブレースとしては働き、塑性化も見られた。

No.1 では、1/150rad 以降、軸組からのきしみ音が確認されたが、1/25rad に至るまで目立った損傷は認められなかった。1/20rad 時に鉄筋ブレース端部のガセットプレートが木部から脱落し、実験を終了した。

No.2 では、1/75rad 時に筋かいの面外変形により、交差部を留めている釘が抜け始めた。1/50rad 時に木材の割裂音がし、圧縮側筋かいの面外へのはらみ出しが顕著になった。1/40rad 時には交差部の釘が完全に外れた。また、鉄筋ブレース端部の釘も抜け始めた。1/30rad 時に圧縮側筋かいが座屈破壊し、実験を終了した。

No.3 では、1/50rad 時に筋かいプレートの釘が抜け始め、1/40rad 時には圧縮側筋かいの面外へのはらみ出しが顕著になった。1/30rad 時には柱直下の土台が裂け、耐力の上昇が見られなくなった。1/25 時には引張側の筋かいプレート部分の木材が割れ、鉄筋ブレースのガセットプレートも外れ始めた。圧縮側筋かいが座屈破壊し、実験を終了した。

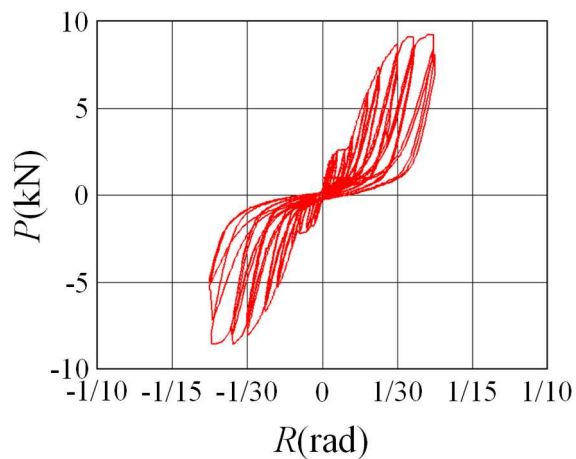
No.4 では、1/100rad 時から構造用合板外周の釘がめり込み始め、合板外周部に部分的なひび割れが生じた。1/75 以降、木材からの音が聞こえるものの、大きな変化は生じなかった。1/30rad 時には合板周囲の釘のめり込みが顕著になり、1/25rad 時には合板が軸組から浮き出し、音とともに耐力低下が生じた。1/20rad 時にはそれらが顕著になり、耐力が最大耐力 80%以下になったため、実験を終了した。

No.5 では、1/100～1/50rad にかけて、石膏ボード四隅が破壊し、1/75rad 時にはボード周囲の釘のめり込みが生じた。1/40rad 以降、ボードの軸組からの浮き上がりが顕著になり、1/20rad 時には耐力上の機能が消失したように思われた。その後、耐力低下は生じなかったため実験を継続したものの、1/12rad 時に鉄筋ブレースのガセットプレートが軸組から脱落し、実験を終了した。

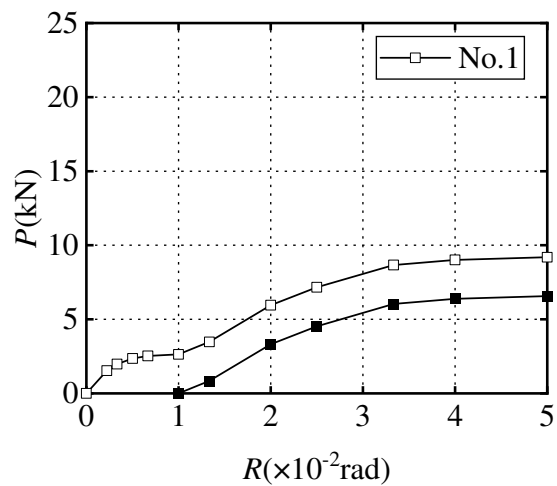
以上をまとめたものを表 1 に示す。

3.2 荷重変形関係とその包絡線

図 3(a)に、No.1 の荷重と変形角の関係を示す。同図より、軸組は一旦降伏して剛性を消失し、耐力が一定の領域を経た後、再び剛性が生じ、再度降伏していることが分かる。正負の加力方向による違いは認められない。詳細に確認するために、同図(b)に正加力時の包絡線を示す。図中の白抜きの点が、実験結果の包絡線である。同図から、1/200～150rad で

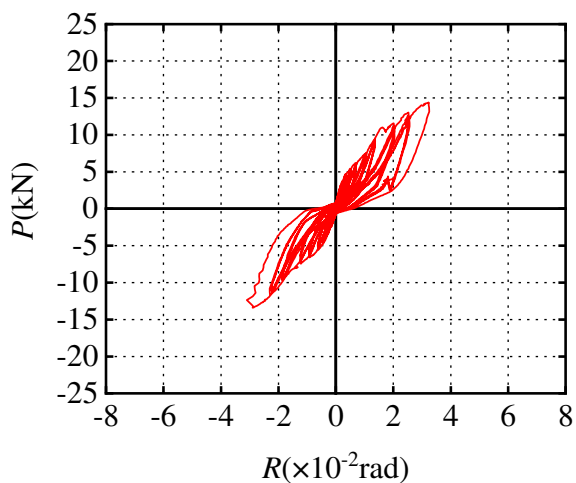


(a) 荷重と変形角の関係

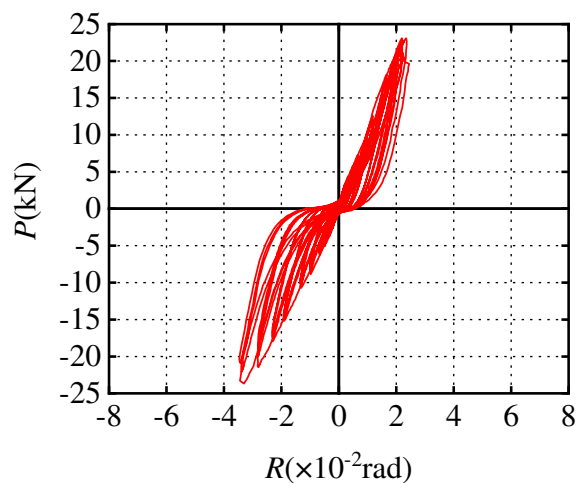


(b) 包絡線

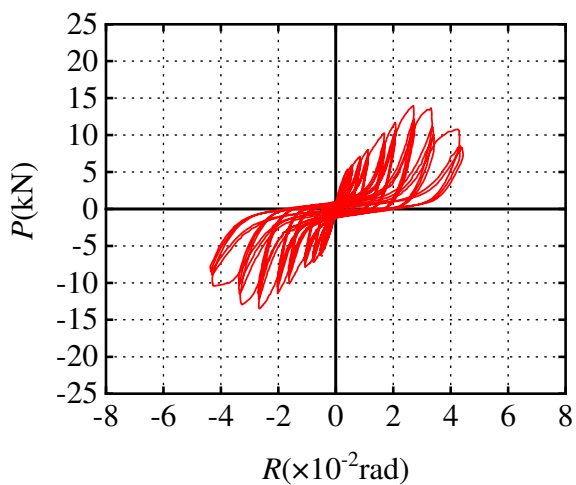
図 3 No.1 の実験結果



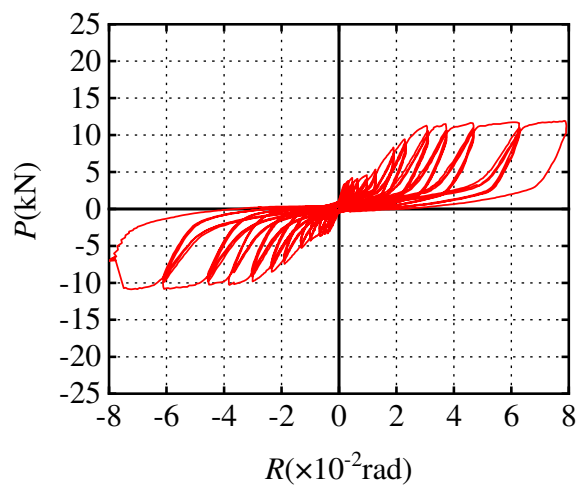
(a) No.2



(b) No.3

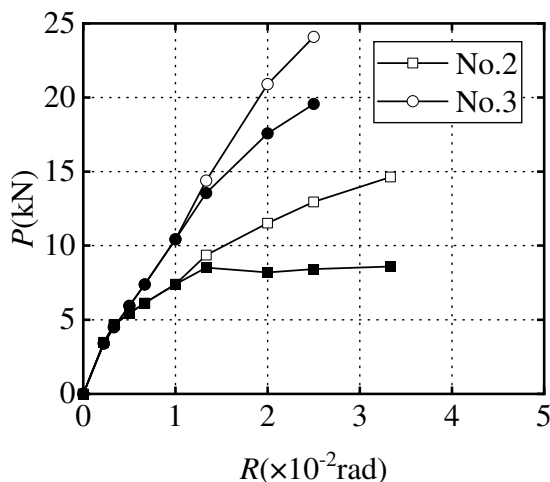


(c) No.2

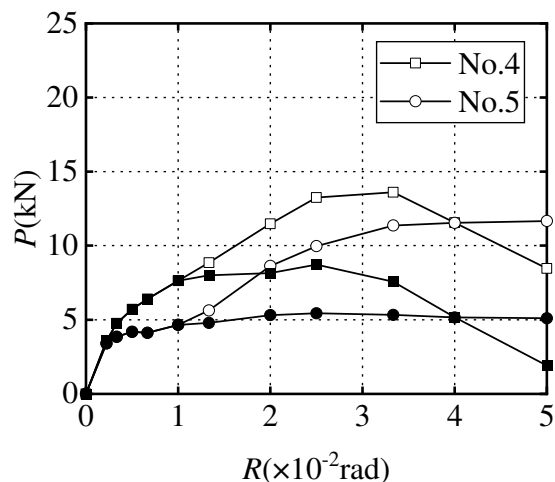


(d) No.3

図 4 No.2~5 の荷重と変形角の関係



(a)No.2, 3 (筋かい)



(d)No.4, 5 (面材)

図5 No.2~5の包絡線

降伏し、1/100rad 時には剛性がほとんど消失していることが分かる。1/100rad 時の耐力値は 2.63kN であった。その後、1/75~1/25rad にかけて剛性が回復し、再び、1/25rad 時に降伏している。1/25rad 時の耐力は 9.00kN であった。

図中の白抜きの各点の値から軸組の降伏耐力 2.63kN を減じ、鉄筋ブレースだけの包絡性を求め、これを図中の塗りつぶしで示す。なお、1/100rad 以前の耐力はゼロと見なしている。

図 4(a)~(d)に、No.2~5 の荷重と変形角の関係を示す。なお、変形角については、No.3 で土台の割裂による浮き上がりが確認されたことから、No.2~5 のすべてについて、真の変形角を図示している。図 (a), (d)では、1/100rad あたりに外形の凹みが見られ、No.1 の結果で説明した軸組降伏後の鉄筋ブレースの効果が認められる。他方、図(b), (c)では、判然とはしない。これは、軸組自体の耐力が大きく、鉄筋ブレースの寄与が少ないためと考えられる。

図 5(a)には No.2, 3 (筋かい) の正側の包絡線を白抜きで示す。同図より、筋かいでは 1/300rad で荷重変形関係が一旦折れ曲がり、その後は、ほぼ直線で耐力が上昇していることが分かる。白抜きの値から図 3(b)の塗り潰しの値を減じることで、鉄筋ブレースの効果を控除した包絡線を、同図中に塗り潰しで示す。No.2 の三ツ割筋かいでは、1/75rad で軸組が降伏に至っており、剛性を消失していることが確認できる。他方、二ツ割筋かいは耐力自体が大きいため、やはり、鉄筋ブレースによる剛性の寄与はあまり認められない。

図 5(b)には、No.4, No.5 (面材) の包絡線である。図中の塗り潰しを見ると、No.4, 5 ともに、1/100rad では耐力が頭打ちになっており、軸組が降伏していることが分かる。塗り潰しと白抜きの比較することで、軸組が降伏した後の剛性がブレースによって付与されたことが確認できる。

以上より、木造軸組の降伏後において、ルーズホール付き鉄筋ブレースによって、降伏後の 2 次剛性が確保することができることが分かった。

4. おわりに

本報では、主となる耐力壁の降伏後に剛性を発揮する鉄筋ブレースを並列した軸組の復元力特性を、実験的に確認した。実験の結果、筋かい系・面材系の耐力壁とともに、その効果が確認できた。

謝辞

本研究の遂行にあたり、福山大学工学部建築学科山田研究室の諸学生にお礼申し上げます。

参考文献

- [1]小堀鐸二, 南井良一郎: 地震による構造物の非線形振動について (その 2 構造物力学特性の人為的非線型化過程), 日本建築学会論文集, 第 52 巻, pp.41-48, 1956 年 3 月
- [2]浅野幸一郎: 弾塑性形履歴特性を有する質点構造物の確率統計的地震応答 その 1 擬定常 White Noise 入力を受ける 1 自由度系, 日本建築学科論文報告集, 第 247 号, pp.75-82, 1976 年 9 月

