

## L形筋かい金物を用いた引張筋かい耐力壁の復元力特性の評価に関する研究

## A STUDY ON EVALUATION OF RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF TENSILE BRACE SHEAR WALL USING L - SHAPED BRACE CONNECTOR

宮崎 太郎\*<sup>1</sup>, 中尾 方人\*<sup>2</sup>, 古田 智基\*<sup>3</sup>

Taro MIYAZAKI, Masato NAKAO and Tomoki FURUTA

In this study, focused on the tensile brace shear wall using L-shaped brace connectors that connect the ends of a brace and columns, which have become popular in recent years, static shear loading tests of the single-braced shear wall specimens were conducted. Then, static pushover analyses of the tensile brace shear walls with the L-shaped brace connector were conducted and evaluation of the effect of the thickness of the connector, the number of screws and the length of screws on the load-story displacement relationship was done.

**Keywords :** Tensile brace shear wall, Brace connector, Static shear loading test, Pushover analysis

引張筋かい耐力壁, 筋かい金物, 静的せん断加力実験, 増分解析

## 1. はじめに

筋かい耐力壁は、面材耐力壁に比べて施工性がよい、換気孔や配管孔などを設置しやすい、そして、面材との併用が可能などの利点があり、在来軸組構法の木造住宅において多用されている。建築基準法施行令第46条においては、筋かい材の断面寸法に応じて、筋かい耐力壁の壁倍率が設定され、平成12年建設省告示第1460号においては、その軸組への接合方法が規定されているが、実際の建築物では、その仕様と同等の性能であることを確認された別の仕様の筋かい金物も多く用いられている。

1995年の兵庫県南部地震以降、筋かい端部と軸組との接合に筋かい金物が広く用いられるようになり、耐力壁の静的な構造性能に関しては多くの研究が行われてきた。筋かい端部の接合金物の違いに関する実験研究<sup>1)~6)</sup>では、同等の倍率とされる筋かい金物を用いた筋かい耐力壁においても、復元力特性にばらつきがあること、所定の倍率を満たさない金物があることが示されている。筋かいの品質に関する研究<sup>7)~10)</sup>では、軸組材の品質の差異は耐力壁の性能に大きな影響を与えないが、筋かい材の品質の差異は大きな影響を与えることが示されている。筋かい耐力壁の壁長および高さの影響に関する実験研究<sup>11)~13)</sup>では、壁長や壁高さは大きくなるほどせん断耐力が低下する傾向が示されている。圧縮筋かいにおける弾塑性挙動に関する研究<sup>14)~17)</sup>では、圧縮筋かいの弾塑性挙動の把握および算定式の提案が行われている。筋かい端部の接合金物の違いにおける力学的挙動の違いに関する研究<sup>18), 19)</sup>では、金物の違いにより、復元力特性や筋かい接合部と架構材の変形分担に違いが生じ、耐力にも違いがあることが示されている。

このように、圧縮筋かい耐力壁における応力伝達機構のモデル化や力学的性状の把握は行われているが、引張筋かい耐力壁においては、詳細な力学モデルは提案されていないので、筋かい金物の仕様が荷重一層間変位関係に及ぼす影響を評価することは難しい。本論文では、近年多用されるようになった、筋かい端部と柱とを緊結するL形の筋かい金物を用いた引張筋かい耐力壁を対象に、壁長、金物の厚さ、ビスの種類や本数をパラメータとした静的せん断加力実験の結果から、破壊性状や耐力性状への影響を把握する。そして、この仕様の引張筋かい耐力壁の力学モデルを提案し、増分解析の結果と実験結果とを照らし合わせ、各パラメータの耐力性状への影響を総合的に評価する。また本論文の一部は文献20)~22)において発表している。

## 2. 静的せん断加力実験

## 2.1 試験体

本研究で用いた各試験体をFig.1に示す。試験体は、高さ2730mmの片筋かい耐力壁であり、壁長は、910mm(以下、1P)、1365mm(以下、1.5P)および1820mm(以下、2P)である。柱の樹種はスギ、桁はベイマツ、土台はヒノキ、そして、筋かいはツガとした。ツガはE120であったが、その他は無等級材であった。ほぞの寸法は85mm×30mm×50mmとし、間柱は用いなかった。筋かい金物は、筋かい側のビス群の剛心が筋かいの中心軸上になるように、1Pでは土台の上端と桁の下端からそれぞれ165mm、1.5Pでは86mm、2Pでは48mmの位置に取り付けた。このとき、できるだけ柱側ビスが節から外れた位置となるように配慮した。

\*1 元 横浜国立大学大学院都市イノベーション学府  
大学院生・修士(工学)

\*2 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院  
特別研究教員・博士(工学)

\*3 西日本工業大学デザイン学部建築学科 教授・工博

Former Grad. Student, Graduate School of Urban Innovation, Yokohama National University, M.Eng.

Research Assoc., Faculty of Urban Innovation, Yokohama National University, Dr.Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Design, Nishinippon Institute of Technology, Dr.Eng.

本研究で用いた L 形筋かい金物を Fig.2 に示す。各部の寸法やビスの数を決めるに際しては、市販されている L 形筋かい金物を調査し、平均的な寸法や数となるように製作した。用いた鋼板の厚さは、公称値が 2.3 mm、2.9 mm および 3.2 mm (実測値はそれぞれ 2.1 mm、2.7 mm および 2.9 mm) であり、鋼種は JIS G3141: 2011 SPCC: SDN の冷間圧延鋼板 (降伏強度は 199~219N/mm<sup>2</sup>) とした。Table1 に試験体一覧を示す。試験体名は、[壁長]-[金物の厚さ]-[柱側のビスの本数と種類]-[筋かい側のビスの本数] で表記した。基準の試験体の仕様は、厚さ 2.3 mm の筋かい金物を、柱にビス 8 本、筋かいにビス 6 本で緊結したものとした。本研究に用いたビスは、胴径 5.5mm、長さ 45mm のビス A、胴径 5.5mm、長さ 75mm のビス B の 2 種類である。柱側のビスの本数は 7~9 本とし、筋かい側のビスは 5~7 本とした。基本的には、柱側および筋かい側にビス A を用いたが、一部では柱側にビス B を用いた。なお、試験体数はそれぞれ 1 体とした。

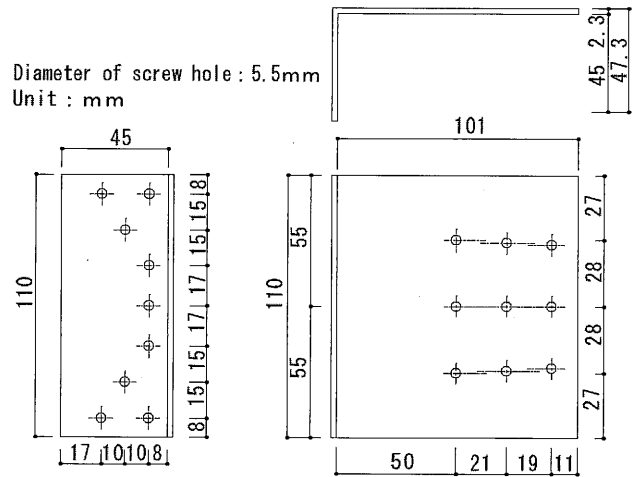


Fig.2 L-shaped brace connector for the experiment (thickness of the steel: 2.3mm)

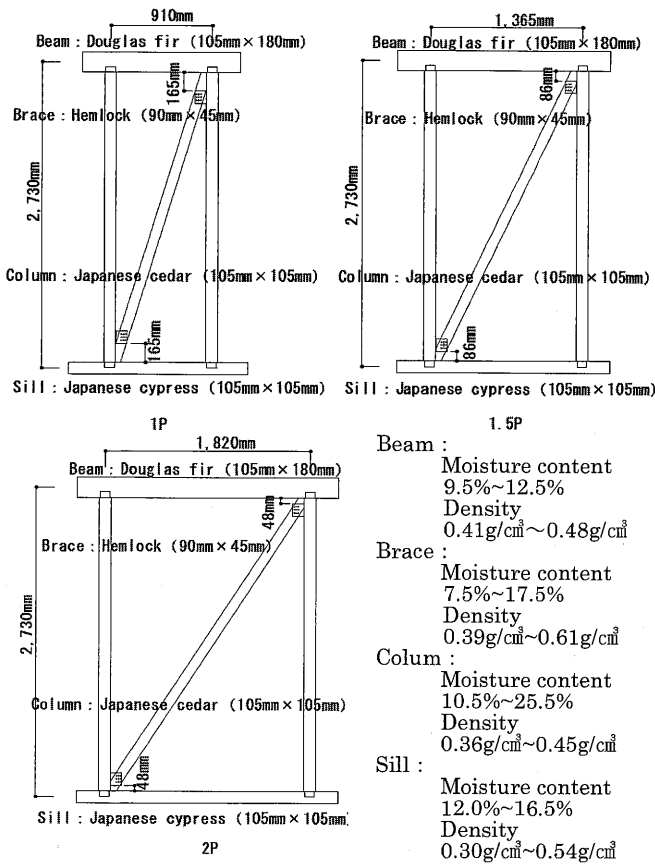


Fig.1 Specimens

## 2.2 加力方法および変位の計測

試験体の柱頭、柱脚には柱の引抜きを拘束する金物は用いず、桁に単調な水平力を筋かいに引張り力が作用する方向に加力した。桁の浮き上がりは、加力フレームに取り付けたリニアスライダにより拘束した。また、変位計により、桁の水平変位、土台の水平変位、左右の柱脚の鉛直変位、そして、筋かい上下端部接合部における金物の変形やビスの引抜きおよびせん断変位を測定した。

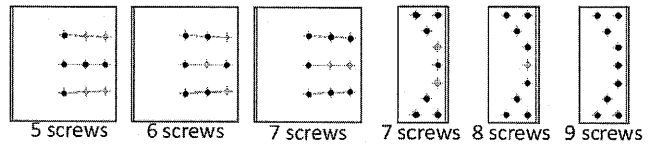
## 2.3 筋かい端部接合部の変形および破壊性状

Fig.3 に実験で観察された金物の変形性状を示す。筋かいの軸方向に引張り力が作用すると、Fig.3 の下側の横架材に近い折り曲げ

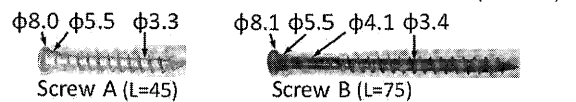
Table1 List of specimens

Specimen	Wall length	Thickness of connector (mm)	Number of screws		Types of screws	
			Column	Brace	Column	Brace
1-2.3-8A-6	1P (910mm)	2.3	8	6	A	A
1-2.3-9A-6	1P (910mm)	2.3	9	6	A	A
1-2.3-7A-6	1P (910mm)	2.3	7	6	A	A
1-2.3-8A-7	1P (910mm)	2.3	8	7	A	A
1-2.3-8A-5	1P (910mm)	2.3	8	5	A	A
1-2.3-8B-6	1P (910mm)	2.3	8	6	B	A
1-2.3-9B-6	1P (910mm)	2.3	9	6	B	A
1-2.9-8A-6	1P (910mm)	2.9	8	6	A	A
1-3.2-8A-6	1P (910mm)	3.2	8	6	A	A
1.5-2.3-8A-6	1.5P (1365mm)	2.3	8	6	A	A
1.5-2.3-9A-6	1.5P (1365mm)	2.3	9	6	A	A
1.5-2.3-8A-5	1.5P (1365mm)	2.3	8	5	A	A
1.5-2.3-8A-7	1.5P (1365mm)	2.3	8	7	A	A
1.5-2.3-8B-6	1.5P (1365mm)	2.3	8	6	B	A
1.5-2.9-8A-6	1.5P (1365mm)	2.9	8	6	A	A
1.5-3.2-8A-6	1.5P (1365mm)	3.2	8	6	A	A
2-2.3-8A-6	2P (1820mm)	2.3	8	6	A	A
2-2.3-9A-6	2P (1820mm)	2.3	9	6	A	A
2-2.3-8A-5	2P (1820mm)	2.3	8	5	A	A
2-2.3-8A-7	2P (1820mm)	2.3	8	7	A	A
2-2.3-8B-6	2P (1820mm)	2.3	8	6	B	A
2-2.9-8A-6	2P (1820mm)	2.9	8	6	A	A
2-3.2-8A-6	2P (1820mm)	3.2	8	6	A	A

Position of the screws:



Size of the screws:



部においては、水平方向に柱から引き離す力が生じる。そのため、まず金物の折り曲げ部が広がるように変形し、さらに応力が大きくなると、折り曲げ部に近いビスに引抜けが生じる。ビスの引抜けは、横架材に近い側から順に生じていき、最終的には、Photo1(a)に見られるように、ほとんどの柱側ビスが引抜け、耐力が低下する。またビスに引抜けが生じる側と反対側 (Fig.3 の上側) においては、反対方向の水平力が生じるため、金物の折り曲げ部が閉じるように変形し、柱にめり込む。

筋かいの中心付近には、金物の回転によって、1、2本程度の割り裂きが生じ、剛性は低下したが、割り裂き上にはないビスはせん断力に抵抗するため、そのことによる耐力の低下はなかった。1.5Pと2Pでは、金物の取り付け位置が柱端に近くなるため、柱側ビスの引抜けだけでなく、終局時には Photo1(b)のような柱の割裂も見られた。以上のような破壊は、筋かいの上下端部で同等には生じず、上下端部のどちらか一方で顕著であった。

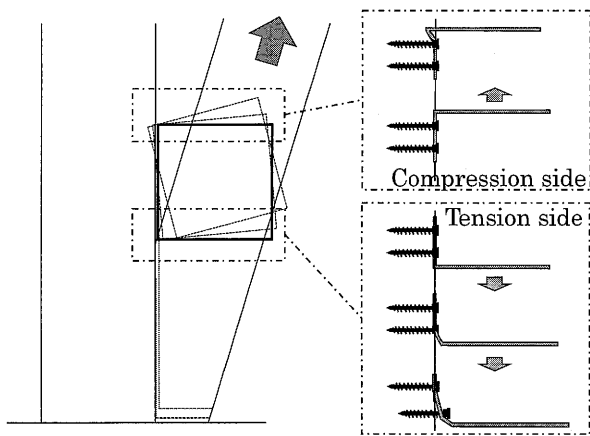


Fig.3 Deformation behavior of L-shaped brace connector



(a) Pull-out of screws (b) Splitting failure of column  
Photo1 Ultimate states of the end of brace

2. 4 筋かい耐力壁試験体の荷重－層間変位関係および特性値  
実験により得られた荷重－層間変位関係を Fig.4 に示す。(a)、(e)および(i)を比較すると、壁長が大きくなるにつれて最大耐力は大きくなり、最大耐力時の層間変位は小さくなる傾向があることがわかる。

Fig.4 に示す実験の荷重－層間変位関係から得た特性値(真の1/120rad 時の耐力、最大耐力および終局変位)を、金物の厚さ、柱側ビスの本数と種類、筋かい側ビスの本数に関して整理し Fig.5 に示す。ここで、終局変位は最大耐力後、最大耐力の 80%に低下した点の変位とした。

Fig.5(a)に、筋かい金物の厚さと特性値との関係を示す。これより、金物の厚さが大きくなるにつれて、1/120rad における耐力と最大耐力は増加し、終局変位は小さくなる傾向が見られる。Fig.5(b)に、柱側ビスの本数と特性値との関係を示す。1P では柱側ビスの本数の特性値への影響は小さいが、1.5P と 2P における 1/120rad 時の耐力と最大耐力は、柱側ビスの多い方が概して高くなる傾向である。Fig.5(c)からは、柱側ビスを長くすることで、1/120rad における耐力、最大耐力および終局変位はいずれも大きくなる傾向があることが分かる。耐力の増加は、Fig.5(b)と同様に、1.5P と 2P で大きい。

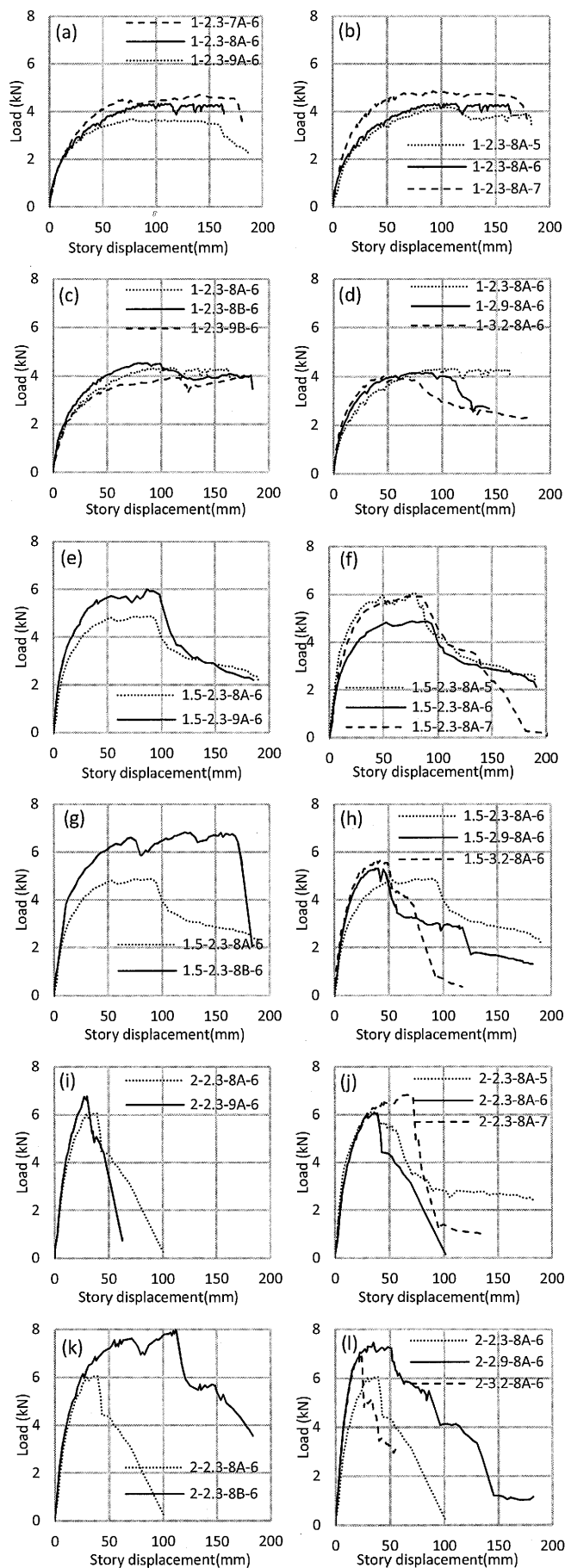


Fig.4 Load - story displacement relationship

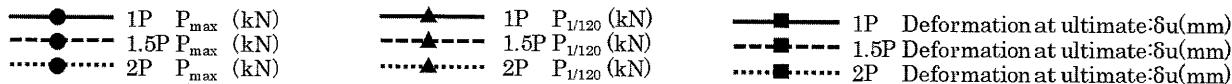
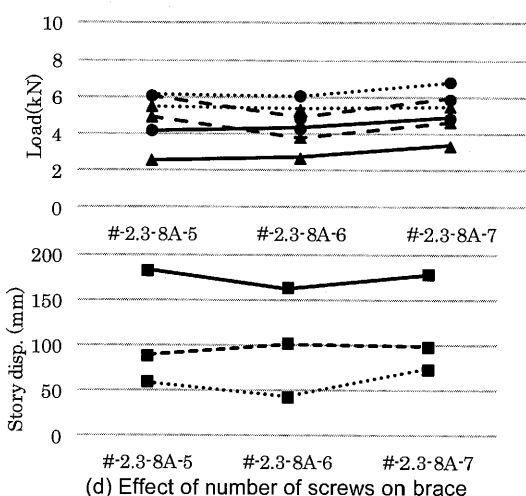
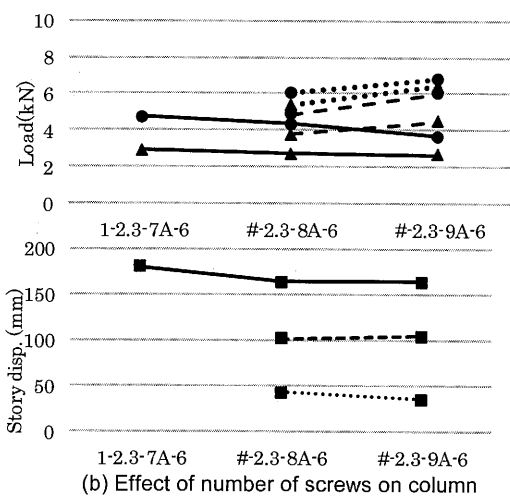
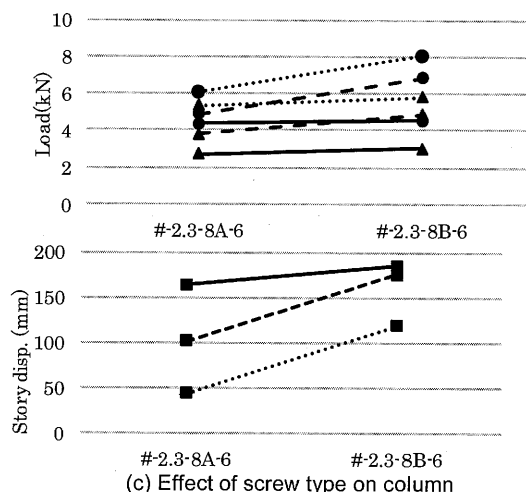
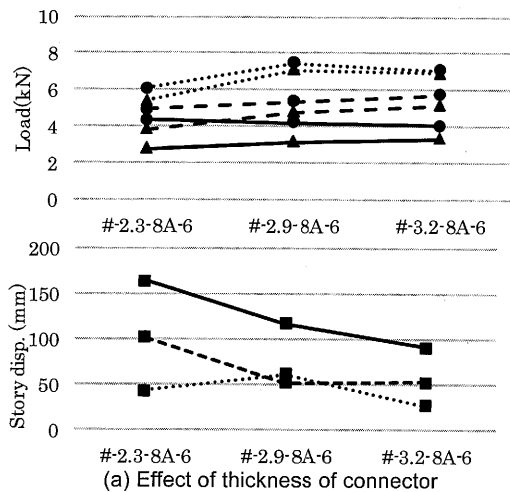


Fig.5 Characteristic values

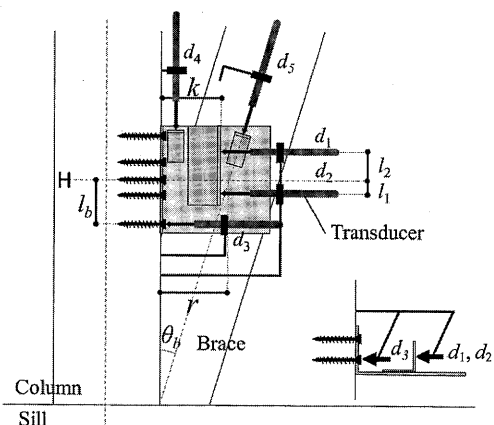


Fig.6 Arrangement of displacement transducers on the end of brace

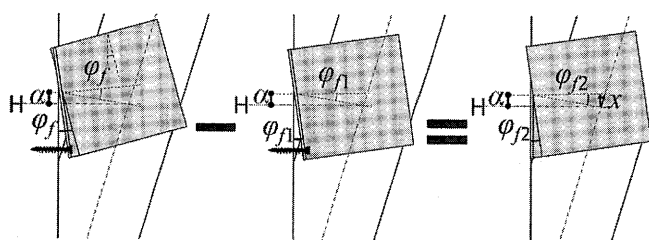


Fig.7 Definition of  $\varphi_{f2}$

対して水平方向の応力が大きくなるため、柱側ビスの本数や長さの影響が顕著に表れたと考えられる。筋かい側ビスの本数については、Fig.5(d)のように、特性値への顕著な影響は見られなかった。

柱側ビスの引抜けに対しては、筋かいの引張軸力の水平方向成分が大きく影響する。そのため、鉛直方向の応力に比べて水平方向の応力が小さい1Pでは、柱側ビスの本数や長さの影響が小さいと考えられる。一方、1.5Pと2Pでは、1Pと比較して鉛直方向の応力に

## 2. 5 金物の筋かい軸方向変位

Fig.3 で示したような、引張筋かい端部における金物の変形形状を考慮すると、筋かい耐力壁の層間変位のうち、金物の変形による割合が大きいと考えられた。そこで、せん断加力実験においては、

Fig.6 に示すように変位計を設置し、金物の変形の測定も重点的に行った。

本論文では Fig.7 のように、金物全体の回転角  $\varphi_f$  から、最も横架材に近い柱側ビスの引抜けによる回転角  $\varphi_n$  を差し引いた  $\varphi_R$  を金物の変形による回転角  $\varphi_R$  と定義する。そして、 $\varphi_R$  より金物の中心点における筋かい軸方向の変位  $x$  を以下のように求める。

まず金物全体の回転角  $\varphi_f$  を Fig.6 における変位  $d_1, d_2$  より、式(1)で求める。

$$\varphi_f = \frac{d_2 - d_1}{l_2 + l_1} \quad (1)$$

$l_1, l_2$  はそれぞれ水平方向の中心軸 H と、変位  $d_1, d_2$  を測定する変位計との距離を示す。

次に、柱側ビスの引抜けによる回転角  $\varphi_n$  を式(2)で求める。このときの水平方向の中心軸 H から回転中心までの距離  $\alpha$  は、式(3)によって、金物に取り付けた治具上の回転中心から補正することで求められると仮定する。

$$\varphi_n = \frac{d_3}{l_b + \alpha} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{-d_1 l_1 - d_2 l_2}{d_1 - d_2} - k \cdot \frac{\varphi_f}{2} \quad (3)$$

ここで、 $d_3$  は最も横架材に近い柱側ビスの引抜け変位、 $l_b$  は水平方向の中心軸 H とこの柱側ビスとの距離を示す。 $k$  は金物上に取り付けた治具と、柱内面との距離を示す。

金物の変形による回転角  $\varphi_R$  は式(4)によって求め、金物の筋かい軸方向の変位  $x$  は式(5)によって求まる。

$$\varphi_R = \varphi_f - \varphi_n \quad (4)$$

$$x = 2 \sin\left(\frac{\varphi_R}{2}\right) \cdot \sqrt{\alpha^2 + r^2} \cdot \cos\left(-\frac{\varphi_R}{2} - \theta_b + \tan^{-1}\left(\frac{\alpha}{r}\right)\right) \quad (5)$$

ここで、 $\theta_b$  は、筋かいと柱のなす角度を示す。 $r$  は、筋かきの中心軸と水平方向の中心軸 H との交点の柱面からの距離を示す。

筋かい軸力と式(5)より求めた金物の中心点における筋かい軸方向の変位  $x$  との関係を図.8 に示す。筋かい軸力は、桁に載荷した水平力を  $\sin\theta_b$  で除して求めた。Fig.8 では、変位の計測誤差もある程度含まれており、壁長やビスの本数などの違いが筋かい軸力-金物の変位関係に及ぼす明確な影響は把握できなかった。

また、金物の特定変位における筋かい軸力の平均値を図.9 に示す。金物の厚さが 2.3 mm では剛性が低く、また、2.9 mm と 3.2 mm ではあまり差がないことが分かる。

そして、Fig.10 に真の 1/120rad における 1P の筋かい耐力壁試験体の層間変位のうち、金物の筋かい軸方向の変位によるもの割合を示す。金物の変位は、筋かい軸力の平均から Fig.9 を用いて求めた。金物の厚さが 2.3 mm では 60% を超えており、金物の変形が筋かい耐力壁の層間変位に及ぼす影響は大きいといえる。2.9 mm では約 35%、3.2 mm では約 30% であり、変形の割合としては小さいが、層間変位を評価する際には無視できない程度であることが分かる。

### 3. 増分解析

#### 3.1 モデルの概要

前章の静的せん断加力実験では、各仕様の試験体数は 1 体であったため、その結果にはばらつきが含まれており、各パラメータが筋かい耐力壁の耐力性状に及ぼす影響を評価するには、この実験結果だけでは十分ではない。本章では、静的せん断加力実験の試験体を対象に、金物の厚さやビスの本数、種類が耐力性状や破壊性状に及ぼす影響をより精度よく評価するために行った静的増分解析について示す。解析には、SNAP ver.7 を用いた。

筋かい耐力壁試験体の解析モデルは、柱、土台、桁、そして、筋かきを線材に置換したものとし、桁に一方方向の強制変位を加える変位増分解析とした。なお、これらのヤング係数は、樹種毎の平均的な値として、それぞれ、7000N/mm<sup>2</sup>、10000N/mm<sup>2</sup>、14000N/mm<sup>2</sup>、8000N/mm<sup>2</sup>とした。

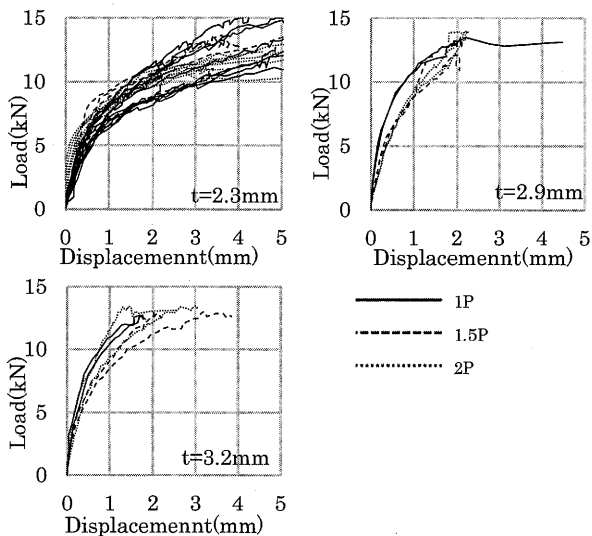


Fig.8 Load - displacement relationship of brace connector (t: Thickness of the steel)

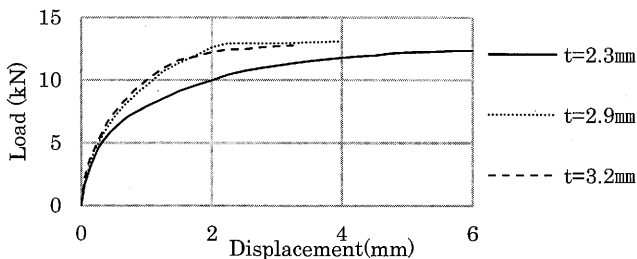


Fig.9 Average of load-displacement relationship of brace connector (t: Thickness of the steel)

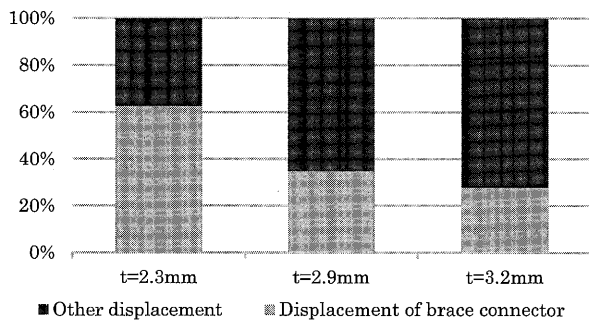


Fig.10 Displacement ratio of brace connector (t: Thickness of the steel)

解析モデルの筋かい端部を Fig.11 に示す。柱側ビスの引抜きおよび金物の柱へのめり込みを表す非線形バネ(column screw)は、金物の折り曲げ部に沿ったビスの数だけ(柱ビス7本では5箇所、8本では6箇所、9本では7箇所)配置した。柱側ビスのせん断については、全てのビスが有効に働くとした。金物については、柱に接する面では平面保持が成り立ち、また、筋かいに接する面のせん断変形は小さいと仮定し、T形の剛な部材(Rigid member)としたが、Fig.3のような、折り曲げ部での変形による変位は比較的大きいため、筋かい軸力-金物の変位関係を表すバネ(Connector)を設けた。さらに、筋かい側ビス接合部のせん断力-変位関係(Brace screw(Shear))、および、筋かい側ビスによるモーメント-回転角関係(Brace screw(Rotation))を表すバネを筋かいの軸方向に配置した。また、柱-横架材仕口においては、ほぞのモーメント-回転角関係を示す非線形の回転バネ(Tenon)を配置した。なお、静的せん断加力実験においては、柱端部の割裂も見られたが、割裂が生じる条件や荷重を適切に評価することが難しかったため、本解析モデルでは考慮していない。

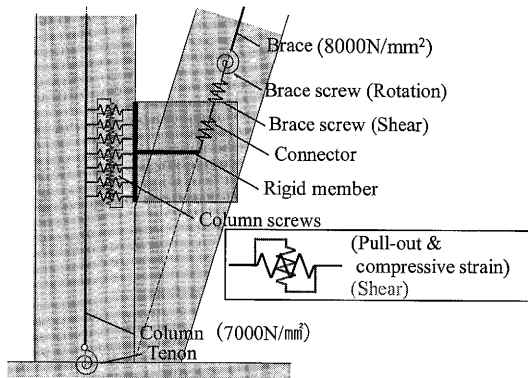


Fig.11 Analysis model

### 3.2 各要素の荷重-変位関係

#### (a) 筋かい軸力-金物の変位関係

金物の厚さ別の筋かい軸力-変位関係モデルおよび Fig.8 で示した実験における筋かい軸力-変位関係を Fig.12 に示す。初期剛性は金物の厚さによらずほぼ同じとしたが、2次剛性は 2.3 mm、2.9 mm、3.2 mm の順に大きい値とした。

#### (b) 柱側ビスの軸力-変位関係とせん断力-変位関係

柱側ビスの引抜きとせん断の荷重-変位関係のモデルを Fig.13 と Fig.14 に示す。

引抜きについては、A、B それぞれのビスについて引抜き試験を実施し、その結果を参考に引抜き力-変位関係のモデル化を行った。

圧縮側については、金物のめり込み応力-変位関係を設定した。めり込み応力-変位関係のモデルは、ビスの支配面積とその周辺の余長部を考慮し、文献(23)の式(4.4.1)~(4.4.4)を用いて求めた。Fig.15 に仮定した支配面積を示す。基準弾性係数  $E_0$  は  $7.0\text{kN/mm}^2$ 、繊維方向に対する繊維直角方向の置換係数  $n$  は 5 とし、初期剛性は  $1.12\text{kN/mm}$ 、降伏変位は  $0.63\text{ mm}$ 、降伏後の剛性は初期剛性の  $1/6$  とした。

せん断力-変位関係については、筋かい耐力壁試験体のせん断加力実験における、筋かい軸力の鉛直方向成分を柱ビスの本数で除した値と、Fig.6 に示す変位  $d_4$  との関係よりモデル化を行った。従って、このせん断力-変位関係モデルには引抜き力の影響が含まれていると考えられるが、ビスのせん断試験によって求める場合には、引抜き力の影響を適切に考慮する必要がある。

本研究の範囲において、柱側ビスについては、せん断力より引抜き力が解析結果に及ぼす影響が大きいため、引抜き力-変位関係をビスの引抜き試験結果だけからモデル化しても誤差は小さいと考えられるが、一般的には、引抜き力-変位関係とせん断力-変位関係とは互いに影響していることを適切に考慮する必要がある。

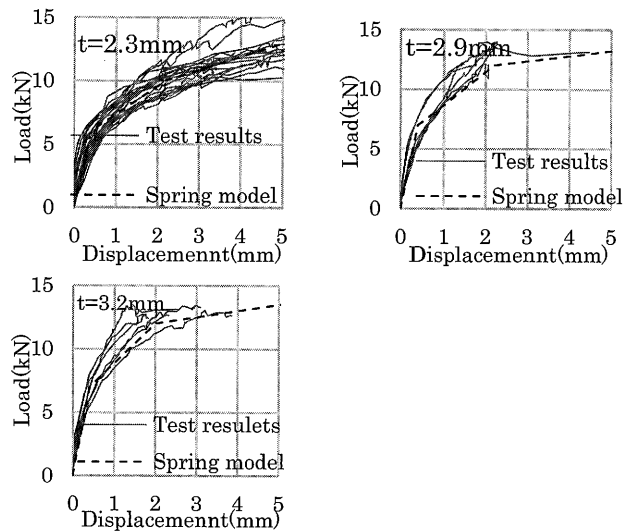


Fig.12 Load - displacement relationship of brace connector ( $t$ : Thickness of the steel)

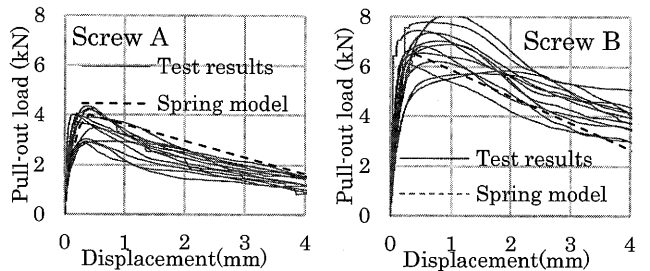


Fig.13 Pull-out load - displacement relationship of column screw

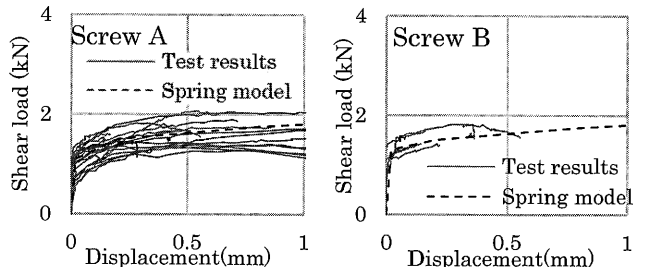


Fig.14 Shear load - displacement relationship of column screw

(c) 筋かい側ビスのせん断力-変位関係

筋かい側ビスのせん断力-変位関係モデルを Fig.16 に示す。同図に示した実験値は、筋かい耐力壁試験体のせん断加力実験における筋かい軸力を筋かいビスの本数で除した値と、Fig.6 に示す変位  $d_s$  との関係である。

(d) 筋かい側ビスによるモーメント-回転角関係

筋かい側ビスによるそれぞれの本数におけるモーメント-回転角関係モデルを Fig.17 に示す。複数の筋かい側ビスによるモーメントを算出するに際して、ビス 1 本のせん断力-変位関係は Fig.16 のせん断力-変位関係モデルを用いた。回転中心は、筋かい側ビスのせん断力-変位関係モデルの初期剛性を用いて、X 方向と Y 方向の剛性を求め、その剛心とした。本来、Fig.16 の筋かい側ビスのせん断力-変位関係と Fig.17 のモーメント-回転角関係は互いに影響していて独立に決めることはできないが、現状では、両者の影響を考慮した復元力特性モデルを設定することは難しく、独立したモデルとなっている。

(e) 柱-横架材仕口のモーメント-回転角関係

柱-横架材仕口のモーメント-回転角関係は、文献(24)の掘立柱式柱脚接合部の回転剛性と降伏モーメントの計算式(式 4.6-3)~(式 4.6-12)によって算出した。ほぞの寸法は 85 mm×30 mm×50 mm、摩擦係数  $\mu$  は 0.5 とし、初期剛性 2.95kNm/rad、降伏モーメント 0.047kNm、降伏後の剛性は初期剛性の 1/6 のバイリニアモデルとした。

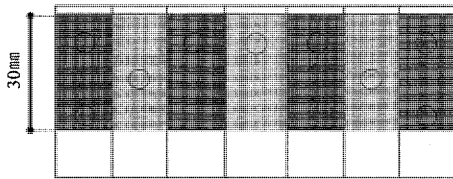


Fig.15 Compressive areas of spring element of each screw on column

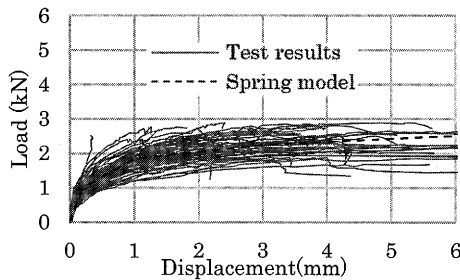


Fig.16 Shear spring element of brace screw

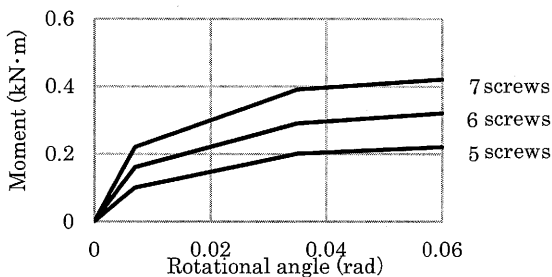


Fig.17 Moment - rotational angle relationship of brace screw

4. 増分解析結果と実験結果からの考察

4.1 解析結果と実験結果の対比

解析によって得られた荷重-層間変位関係と実験値との比較を Fig.18 に示す。ここでは、解析値、実験値とも終局変位までの荷重-層間変位関係を示した。

概して、解析による荷重-層間変位関係は実験値と近い傾向であった。特に 1/50rad 付近までは、精度よく実験結果を追跡することができた。これは、L 形の筋かい金物を用いた引張筋かい耐力壁では、層間変位のうち、金物の変形による変位が占める割合が大きく、本解析における筋かい軸力-金物の変位関係の評価が適切であったためと考えられる。

終局変位について、1P と 1.5P の一部では、解析値は実験値より小さく、実験値との差が生じている。この原因としては、解析モデルにおいて、Fig.19 に示す灰色の位置の柱側ビスはモデル化をしていないこと、また、金物の柱に接する面では、平面保持が成り立つと仮定しているが、実際には、面外に変形していることが考えられる。よって、これらを解析モデルに考慮することができれば、実験値により近い値を解析により得ることができると考えられる。

4.2 各パラメータによる耐力性状への影響の評価

(a) 金物の厚さによる影響

1P の 1-2.3-8A-6、1-2.9-8A-6 および 1-3.2-8A-6、1.5P の 1.5-2.3-8A-6、1.5-2.9-8A-6 および 1.5-3.2-8A-6、2P の 2-2.3-8A-6、2-2.9-8A-6 および 2-3.2-8A-6 における解析値は実験値と同様の結果となった。よって、金物の厚さが増すと筋かい耐力壁の耐力が増加し、終局変位は低下するといえる。

(b) 柱側ビスの本数による影響

1P で柱側ビスの本数増加の影響をみるため 1-2.3-8A-6 と 1-2.3-9A-6 を比較すると、解析値は実験値と同様に耐力への顕著な影響はなく、1.5P の 1.5-2.3-8A-6 と 1.5-2.3-9A-6、2P の 2-2.3-8A-6 と 2-2.3-9A-6 においては、解析値は実験値と同様に最大耐力の増加が見られた。しかし、1P で柱側ビスの本数を 8 本から 7 本に減らした場合、実験ではその影響はあまり見られなかったが、解析値の 1-2.3-8A-6 と 1-2.3-7A-6 を比較すると、最大耐力の低下が見られた。これは、解析における最大耐力は柱側ビスの横架材側から 3 本目が最大引抜耐力に達した時であるが、柱側ビスが 7 本の場合だけこのビスがないためであると考えられる。しかし、実際には 4.1 で述べたように、Fig.19 の灰色の位置のビスが最大耐力に影響するため、実験においては 7 本でも最大耐力は低下しなかったと考えられる。よって、柱側に取り付けるビスの本数を 1 本増減させても、壁長が小さい 1P では耐力への影響は少ないと考えられる。しかし、1.5P や 2P では、筋かきの引張軸力の鉛直方向成分に対する水平方向成分が増加するため、耐力に影響を与えるといえる。

(c) 柱側ビスの長さによる影響

1P の 1-2.3-8B-6、1.5P の 1.5-2.3-8B-6 および 2P の 2-2.3-8B-6 の解析値は 1/120rad 付近までは実験値に近いが、最大耐力は実験値より大きい値を得た。これは、柱側に引抜耐力が高いビス B を用いた実験では、ビス頭部の金物の穴からの抜け(以下、ビスの頭抜け)や、柱材の割裂が生じやすくなり、ビスの引抜耐力が最大まで発揮されなかったが、このことを解析では考慮していなかったためだと

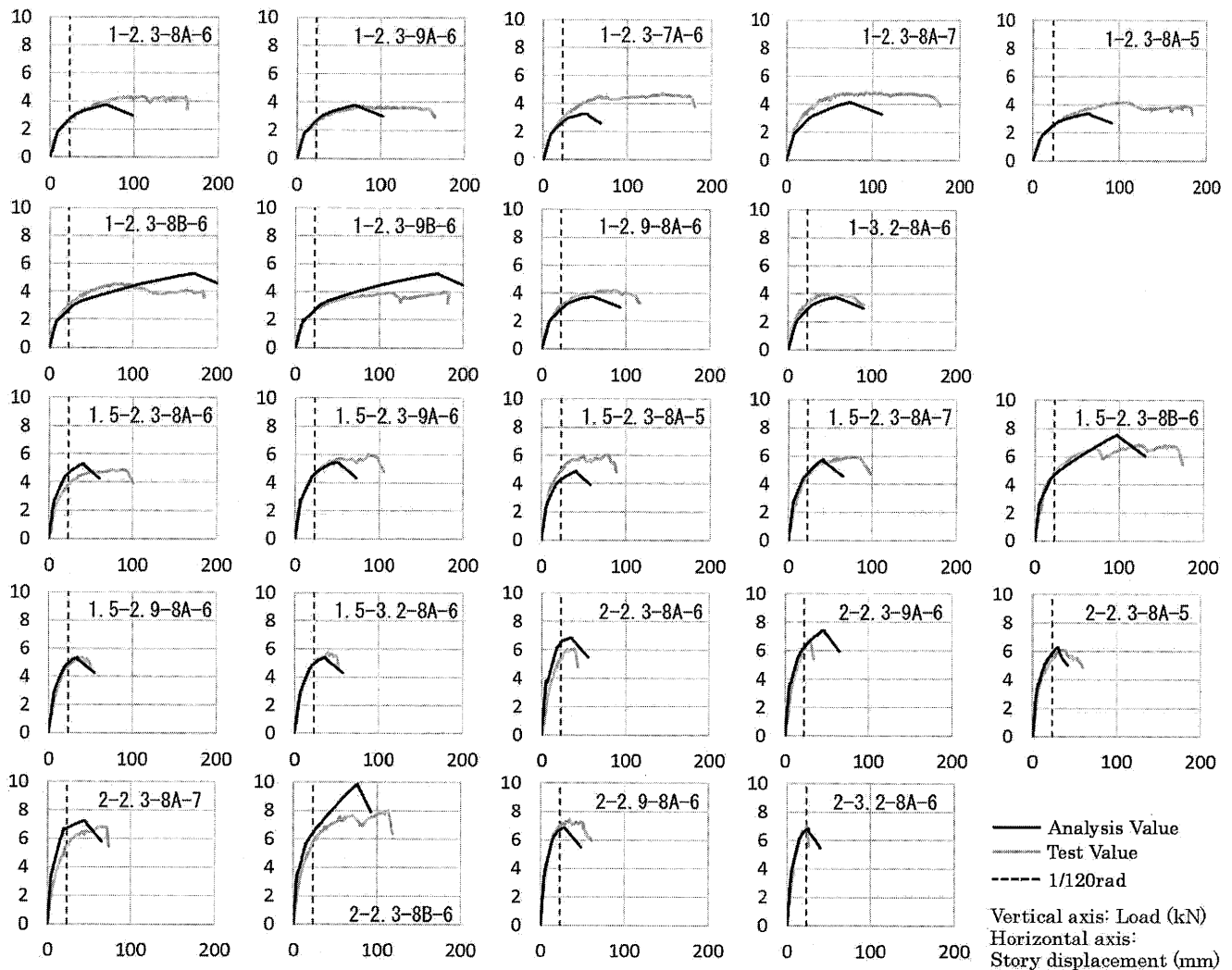


Fig.18 Load – story displacement relationship of analysis result and test result

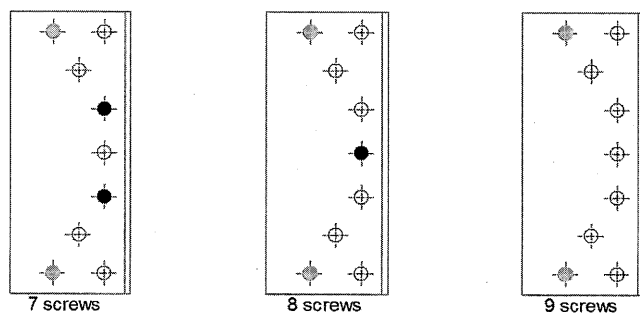


Fig.19 Screw position on the column side of connector

考えられる。よって、柱側に長く、引張耐力の高いビスを用いた場合、最大耐力は増加すると考えられるが、ビスの引抜けが生じる前に、ビスの頭抜けや柱の割裂などによって最大耐力となる場合があることに注意する必要がある。

(d) 筋かい側ビスの本数による影響

1P の 1-2.3-8A-5、1-2.3-8A-6 および 1-2.3-8A-7、1.5P の 1.5-2.3-8A-5、1.5-2.3-8A-6 および 1.5-2.3-8A-7、2P の 2-2.3-8A-5、2-2.3-

8A-6 および 2-2.3-8A-7 において、筋かい側ビスの本数を 5 本、6 本、そして、7 本と増加させた解析値は、実験値と異なり増加が見られた。これは、3.2(d)の筋かい側ビスによるモーメント-回転角関係の算出において、筋かいの引張り軸力の影響を考慮していないことで、モーメントを大きめに評価していることや、実験では筋かい端部に割り裂きが生じているが、解析ではそのことによる剛性低下を考慮していないことが理由と考えられる。つまり、実際には、筋かい端部に割り裂きが生じることが原因で、本数が増えても耐力の増加は小さいが、筋かいに割り裂きが生じなければ、筋かい耐力壁の耐力が増加すると考えられる。

4.3 解析モデルの適用範囲

本解析において、柱-横架材仕口のほぞは回転バネでモデル化し、水平方向のせん断バネは設定していないが、ほぞへの最大せん断力は 6.8kN であり、ほぞ側面の単位面積あたりでは 2.8N/mm<sup>2</sup>であったので、結果への影響は小さかったと考えられる。しかし、大きなせん断力がほぞに作用する場合には、ほぞのせん断について詳細なモデル化が必要である。

また、本解析モデルの精度の検証は、静的せん断加力実験を行った試験体の仕様の範囲内で行っており、最終的な破壊性状は柱側ビ



スの引抜けを対象としている。金物の寸法や鋼種、ビスの構造性能などが大きく異なり、破壊性状が異なる場合の精度については不明であり、今後、適用範囲を拡大するためには検討が必要である。

なお、本解析モデルに用いた各種の荷重-変位関係モデルについては、静的せん断加力実験の結果を参考にしたものが多いが、合理的な要素試験方法を検討する必要がある。

## 5. まとめ

本論文では、近年多用されるようになった、筋かい端部と柱とを繋結するL形の筋かい金物を用いた、引張り筋かい耐力壁を対象に、壁長、金物の厚さ、ビスの本数、およびビスの長さを実験変数として、筋かい耐力壁の静的せん断加力実験と増分解析を行い、これらの実験変数が耐力性状や破壊性状に及ぼす影響を評価した。

実験変数の範囲内(壁長は1P~2P、金物の厚さは2.3mm~3.2mm、柱側ビスの本数は7本~9本、筋かい側ビスの本数は5~7本、ビスの長さは45mmと75mm)で得られた知見を以下に示す。

- a) 金物の厚さが増すと筋かい耐力壁の耐力が増加し、終局変位が低下する。
- b) 柱側に取り付けるビスの本数を増減させても、壁長が小さい1Pでは耐力への影響は少ない。しかし、1.5Pや2Pでは、筋かいの引張軸力の鉛直方向成分に対する水平方向成分が増加するため、耐力に影響を与える。
- c) 柱側に長く、引抜耐力の高いビスを用いた場合は最大耐力が増加する。しかし、ビスの頭抜けや柱の割裂が生じやすく、ビスの性能が十分に発揮されない可能性が高い。
- d) 筋かい側ビスの数を増減させても、筋かいに割り裂きが生じるため、耐力への影響は小さい。筋かいに割り裂きが生じなければ、剛性と最大耐力が増加すると考えられる。

なお、金物の寸法や鋼種、ビスの構造性能などが大きく異なる場合については、それらが筋かい耐力壁の荷重-変位関係に与える影響は未だ不明であり、今後の課題である。

## 謝辞

本研究は、科研費(基盤研究(C))「任意寸法の軸組を対象とした筋かい耐力壁の性能設計実現に向けた基礎研究」(課題番号:15K06287、代表者:中尾方人)によって行われました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Ono, Y. and Oshiumi, S.: A Study on the Reinforcement-effect of Joint-metal for Wooden Brace, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.37-38, 1995.8 (in Japanese)  
小野泰, 鴛海四郎: 筋かい金物の補強効果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.37-38, 1995.8
- 2) Tokuda, M. and Uchisako, T.: Racking tests of shear walls with single brace jointed by connectors, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.105-106, 1998.9 (in Japanese)  
徳田迪夫, 内迫貴幸: 接合金物を用いた引張り片筋かい壁のせん断性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.105-106, 1998.9
- 3) Inoue, M. and Goto, Y.: Effect of Connecting System at Brace End on Structural Behavior of Wooden Frame, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.521, pp.89-94,

1999.7 (in Japanese)

井上正文, 後藤靖: 筋違端部の接合方法が片筋入り木造骨組の構造特性に与える影響について, 日本建築学会構造系論文集, 第521号, pp.89-94, 1999.7

- 4) Gotou, T. and Oshiumi, S.: A Study on the Reinforcement-effect of Joint-metal for Wooden Brace (Part 2), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.357-358, 2000.7 (in Japanese)  
後藤隆洋, 鴛海四郎: 筋かい金物の補強効果(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.357-358, 2000.7
- 5) Yamada, K. and Goto, M.: Distribution of the Restoring Force Characteristic and the Maximum Earthquake Displacement Response of Brace Bearing Walls, Journal of Structural Engineering, Vol.50B, pp.327-333, 2004.3 (in Japanese)  
山田耕司, 後藤正美: 筋かい耐力壁復元力特性のばらつきと地震応答のばらつき, 構造工学論文集, Vol.50B, pp.327-333, 2004.3
- 6) Moriya, Y., Kawakami, O., Nakagawa, T., Kawai, N. and Tsuchimoto, T.: Verification Experiments about Effects of Shearing Performance by Difference of Brace Joints, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures III, pp.279-280, 2013.7 (in Japanese)  
守屋嘉晃, 川上修, 中川貴文, 河合直人, 榎本敬大: 筋かい金物の種類の違いが長尺筋かい耐力壁のせん断性能に及ぼす影響に関する検証実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.279-280, 2013.7
- 7) Nakagawa, T., Aoki, K., Harada, N. and Tachibana, K.: The Effect of Quality of Brace on Lateral Resistance of Bracing Shear Wall, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures III, pp.91-92, 2014.7 (in Japanese)  
中川貴文, 青木謙治, 原田直希, 立花和樹: 筋かいの品質の差異が耐力壁の性能に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.91-92, 2014.7
- 8) Aoki, K., Hayashizaki, M., Sugimoto, K. and Tsuchimoto, T.: Effect of mechanical properties of framing members on performance of shear wall, Part 1 Outline of experiment and results of using visual grading timber, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.293-294, 2010.7 (in Japanese)  
青木謙治, 林崎正伸, 杉本健一, 榎本敬大: 軸組材の品質の差異が耐力壁の性能に及ぼす影響 その1 実験概要と目視等級区分製材による検証結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.293-294, 2010.7
- 9) Sugimoto, K., Aoki, K., Hayashizaki, M. and Tsuchimoto, T.: Effect of mechanical properties of framing members on performance of shear wall: Part 2 Results of Using Mechanical Grading Members, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.295-296, 2010.7 (in Japanese)  
杉本健一, 青木謙治, 林崎正伸, 榎本敬大: 軸組材の品質の差異が耐力壁の性能に及ぼす影響 その2 機械等級区分製材による検証結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.295-296, 2010.7
- 10) Hayashizaki, M., Aoki, K., Sugimoto, K. and Tsuchimoto, T.: Effect of mechanical properties of framing members on performance of shear wall: Part 3 Results of using timber graded by specific density, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.297-298, 2010.7 (in Japanese)  
林崎正伸, 青木謙治, 杉本健一, 榎本敬大: 軸組材の品質の差異が耐力壁の性能に及ぼす影響 その3 密度によって分類した製材による検証結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.297-298, 2010.7
- 11) Moriya, Y., Kawakami, O., Murohoshi, H. and Kanai, K.: Experimental Study on Effects of Shearing Strength by Difference of Height and Length of Wooden Frame with Brace, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.497-498, 2008.7 (in Japanese)  
守屋嘉晃, 川上修, 室屋啓和, 金井建二: 筋かい耐力壁の壁高さ及び壁長さの違いがせん断耐力に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.497-498, 2008.7

- 12) Watahiki, M., Nagashima, T., Ishiyama, H., Adachi, R., and Ohashi, Y. : Experimental study on the undefined performance of the shear walls of old wooden houses 【Part 1】 Influence of the wall width of braced shear walls, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.483-484, 2010.7 (in Japanese)  
 綿引誠, 長島泰介, 石山央樹, 足立亮二, 大橋好光 : 既存木造住宅における耐力が不明確な壁要素に関する実験的研究【その1】釘留筋かい耐力壁の壁長さの違いの影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.483-484, 2010.7
- 13) Moriya, Y., Hayashizaki, M., Takahashi, H., Kawai, N. and Tsuchimoto, T. : Experiments Confining Effects of Shearing Performance by Difference of Height and Length of Shear Walls by Wooden Post and Beam Construction Part 1 Wooden Frame with Brace, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.97-98, 2011.7 (in Japanese)  
 守屋嘉晃, 林崎正伸, 高橋仁, 河合直人, 榎本敬大 : 木造軸組耐力壁のせん断性能に与える壁高さ及び壁長さの影響確認実験 その1 筋かい耐力壁, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.97-98, 2011.7
- 14) Narita, T., Ohta, M. and Tsuchimoto, T. : Buckling fracture behavior of bracing shear wall by Japanese conventional construction method Part 3 The effect of connection of the end of brace, sill-column connection, and material of timber, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.91-92, 2003.7 (in Japanese)  
 成田敏基, 太田正光, 榎本敬大 : 筋かきの座屈挙動解析 その3: 筋かい端部, 柱脚接合条件および筋かきの材料の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.91-92, 2003.7
- 15) Narita, T., Ohta, M. and Tsuchimoto, T. : Buckling fracture behavior of bracing shear wall by Japanese conventional construction method Part 4 The effect of moment resistance of the end of brace to buckling load of the brace, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp.367-368, 2004.7 (in Japanese)  
 成田敏基, 太田正光, 榎本敬大 : 筋かきの座屈挙動解析 その4: 筋かい端部のモーメント抵抗が座屈荷重に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造III, pp.367-368, 2004.7
- 16) Murakami, M., Satake, K., Katoh, M. and Inayama, M. : Formula to Predict the Bearing Capacity of Beam-Column Joint with Steel Tenon-bar Connector Attached to Compressive Brace, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.611, pp.103-109, 2007.1 (in Japanese)  
 村上雅英, 佐武憲一, 加藤正章, 稲山正弘 : 圧縮筋かきの取り付くほぞ金具を用いた管柱の柱頭接合部の耐力算定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第611号, pp.103-109, 2007.1
- 17) Okamoto, S., Murakami, M. and Inayama, M. : Prediction and Verification of Shear Force-Drift Angle Relations for Compressive Bracing Shear Wall with Arbitrary Wall Length -Elastic and plastic behavior before buckling-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.75, No.657, pp.2019-2026, 2010.11 (in Japanese)  
 岡本滋史, 村上雅英, 稲山正弘 : 任意壁長圧縮筋かい耐力壁のせん断力-変形角関係の推定と検証 -座屈が生じるまでの弾塑性挙動-, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第657号, pp.2019-2026, 2010.11
- 18) Nomura, Y., Kanda, K., Yamazaki, Y., Sakata, H. and Isoda, H. : Experimental study on mechanical behavior of wooden brace wall with different types of brace joint Part 1. Outline of experiments and failure mode, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures III, pp.189-190, 2017.7 (in Japanese)  
 野村佳亮, 神田健吾, 山崎義弘, 坂田弘安, 五十田博 : 筋かい金物の仕様が耐力壁の力学的挙動に与える影響に関する実験研究 その1 : 実験概要と破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.189-190, 2017.7
- 19) Kanda, K., Nomura, Y., Yamazaki, Y., Sakata, H. and Isoda, H. : Experimental study on mechanical behavior of wooden brace wall with different types of brace joint Part 2. Results and discussions of experiments, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures III, pp.191-192, 2017.7 (in Japanese)  
 神田健吾, 野村佳亮, 山崎義弘, 坂田弘安, 五十田博 : 筋かい金物の仕様が耐力壁の力学的挙動に与える影響に関する実験研究 その2 : 実験結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.191-192, 2017.7
- 20) Miyazaki, T. and Nakao, M. : A Study on Evaluation of Restoring Force of Braced Shear Wall using L-Shaped Brace Fastener 【Part 1】 Influence of Screws on 1P Shear Wall, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures III, pp.195-196, 2017.7 (in Japanese)  
 宮崎太郎, 中尾方人 : L 形筋交い金物を用いた筋交い耐力壁の復元力特性の評価に関する研究 その1 1Pにおけるビスの影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.195-196, 2017.7
- 21) Miyazaki, T. and Nakao, M. : A Study on Evaluation of Restoring Force of Braced Shear Wall using L-Shaped Brace Fastener 【Part 2】 Influence of thickness of brace fastener, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures III, pp.425-426, 2018.7 (in Japanese)  
 宮崎太郎, 中尾方人 : L 形筋交い金物を用いた筋交い耐力壁の復元力特性の評価に関する研究 その2 金物の厚さによる影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.425-426, 2018.7
- 22) Miyazaki, T., Nakao, M. and Furuta, T. : A Study on Evaluation of Restoring Force of Braced Shear Wall using L-Shaped Brace Fastener 【Part 3】 Development of analysis model and evaluation of the analysis results, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures III, pp.427-428, 2018.7 (in Japanese)  
 中尾方人, 宮崎太郎, 古田智基 : L 形筋交い金物を用いた筋交い耐力壁の復元力特性の評価に関する研究 その3 増分解析モデルの構築と解析結果の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.427-428, 2018.7
- 23) Architectural Institute of Japan(AIJ) : Fundamental Theory of Timber Engineering, Maruzen, 2010 (in Japanese)  
 日本建築学会 : 木質構造基礎理論, 丸善株式会社, 2010
- 24) Architectural Institute of Japan(AIJ) : Design Manual for Engineered Timber Joints, Maruzen, 2009 (in Japanese)  
 日本建築学会 : 木質構造接合部設計マニュアル, 丸善株式会社, 2009

# A STUDY ON EVALUATION OF RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF TENSILE BRACE SHEAR WALL USING L – SHAPED BRACE CONNECTOR

*Taro MIYAZAKI*<sup>\*1</sup>, *Masato NAKAO*<sup>\*2</sup> and *Tomoki FURUTA*<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Former Grad. Student, Graduate School of Urban Innovation, Yokohama National University, M.Eng.

<sup>\*2</sup> Research Assoc., Faculty of Urban Innovation, Yokohama National University, Dr.Eng.

<sup>\*3</sup> Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Design, Nishinippon Institute of Technology, Dr.Eng.

A braced shear wall is an important shear resistant element in post and beam construction in Japan. Braced shear walls have better work-ability than nailed plywood shear walls and easier to install ventilation holes and piping holes. Also, it has advantages such as high wall magnification can be obtained by using in combination with plywood, it is widely used in wooden houses.

Though many studies have been done on the static structural performance of braced shear walls, it was difficult to predict the load-story displacement relationship of the braced shear wall on tensile direction. In this study, focused on the braced shear wall using L-shaped brace connectors that connect the ends of a brace and columns, which have become popular in recent years, static shear loading tests of the single-braced shear wall specimens were conducted. Variables of the specimens were the wall length, the thickness of the L-shaped brace connector, the number and the length of screws.

Then, an analysis model of the braced shear wall with the L-shaped brace connectors was proposed and static pushover analyses were conducted. The analysis result showed close to the load-displacement relationship of the experiment up to about 1/50 rad.

From the static shear loading tests and the pushover analyses, following findings were obtained.

- a) As the thickness of the L-shaped brace connector increases, the shear strength of the braced shear wall increases and the ultimate displacement decreases.
- b) Effect of the number of the screws on the column on the shear strength of the braced shear wall is small in the case of 910mm of wall length. However, in the case of 1365mm and 1820mm of wall length, since a ratio of the horizontal component of the axial tensile force of the brace to the vertical component of the one increases, it affects the shear strength.
- c) With long screws on the column, the maximum shear strength of the braced shear wall increases. However, there is possibilities of pulling-through the screw from the connector or splitting failure of the column. Therefore, the higher pull-out strength of the long screw may not affect the maximum strength.
- d) Even if the number of screws on the brace side increases, the influence on the shear strength of the braced shear wall is small due to cracks on the end of the brace. If the cracks on the brace do not occur, the maximum shear strength of the braced shear wall is considered to increase.

(2019年1月31日原稿受理, 2019年8月2日採用決定)