

廃材を用いた木造耐力壁の性能評価

年 縄 巧¹ 杉 本 陽 介² 平 川 大³

Performance of Timber Shearwalls using a Recycled Material

Takumi TOSHINAWA¹, Yousuke SUGIMOTO² and Hiroshi HIRAKAWA³

Performance of timber shearwalls using a recycled material is evaluated in terms of wall magnification factor which is widely used in Japanese earthquake-resisting design of wooden houses. Lateral load and displacement of half-size shearwalls were obtained in lateral loading tests and corresponding wall magnification factor was evaluated. It was found that shearwalls using a recycled material employed herein have an equivalent performance to conventional ones such as structural plywood and brace, demonstrating that the material can be used to reinforce wooden houses.

キーワード：木造耐力壁，壁倍率，廃材，水平加力試験

Keywords：Timber shearwall, Wall magnification, Recycled material, Lateral loading test

1. はじめに

木造建築物を地震や強風による倒壊・損傷から守るには耐力壁による耐震・耐風化が有効であり、横方向の変形や力を抑えるために筋交や構造用合板のような拘束部材を壁に取り付けた耐力壁を用いることが一般に行われている。耐力壁の性能は0.5～5.0の値を持つ壁倍率として表され、2階以上または延べ面積50m²以上の木造建築物は、壁倍率と耐力壁の長さの積から算定される存在壁量が必要壁量以上であることを確認しなければならない⁽¹⁾。拘束部材の材料は、通常、木材や鉄筋を使うが、パルプセメント材やせっこうボードを用いた耐力壁も用いられており壁倍率が規定されている。一方、近年ではタイヤチップが地盤材料に使われるなど、産業廃棄物を建設材料へ有効利用する取り組みが積極的に行われている。そこで、本研究では産業廃棄物を再利用した板状拘束部材（プラパネル⁽²⁾）を用いた耐震壁の性能（壁倍率）を実験的に評価を行った。なお、本研究で行った試験は簡易実験のため、現行の基準法で規定している終局状態を適切に表現はしていない。したがって、本研究で得られる壁倍率の値は従来耐力壁と相対的に比較するための尺度として取り扱われるべきものであることを予め明記しておく。

2. 耐力壁材

本研究で耐力壁として使用する材料（プラパネル）は、図1⁽²⁾に示すように光ケーブルの被覆材（主成分：ポリエチレン）の廃材を破砕して板状の材料として再成形したもの

であり、通常は建設現場の敷板に使用されている。

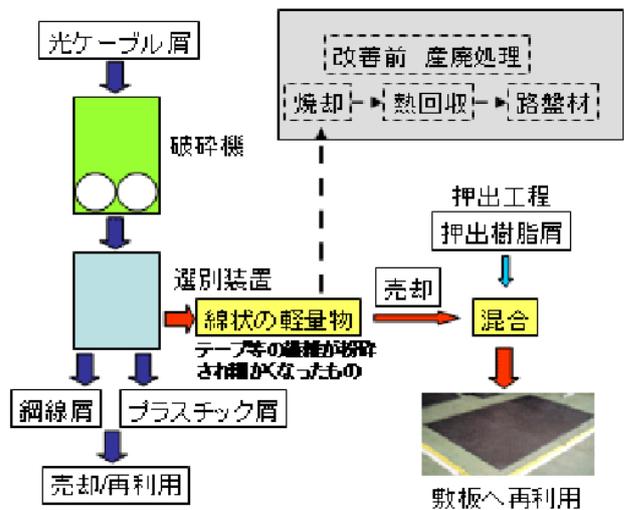


図1 プラパネルの製作工程⁽²⁾

この材料の密度は1.28 g/cm³（実験で使用した材料の質量と体積から計算）、ポアソン比は0.3である⁽³⁾。また、表1に他の材料との剛性・強度の比較^{(4),(5),(6)}を示す。プラパネルのヤング率は0.069（ひずみ度：50%）～0.127（ひずみ度：10%）GPaであり、原材料のポリエチレンの値に近く木材のヤング率と比べると剛性が低い（撓性が高い）。圧縮特性試験⁽⁴⁾では34.5MPa（ひずみ度：50%）でも破壊せず、木材や原材料のポリエチレンに比べ圧縮強度が大きい。また、曲げ強度は10.7MPaであり、木材の1/2～1/3程度ではあるものの原材料のポリエチレンに比べ大きい。

1 明星大学理工学部総合理工学科建築学系 教授 耐震工学
2 明星大学理工学部総合理工学科建築学系 学部生 耐震工学
3 明星大学理工学部総合理工学科建築学系 実験実習指導員 木材加工

表1 プラパネルと他の材料との剛性・強度の比較

	ヤング率 GPa	圧縮強度 MPa	曲げ強度 MPa
プラパネル ⁽⁴⁾	0.069(50%) 0.127(10%)	34.5 以上	10.7
べいまつ ⁽⁵⁾	10.0	22.2	28.2
すぎ ⁽⁵⁾	7.0	17.7	22.2
ポリエチレン ⁽⁶⁾	0.039~0.127	22.1	6.9

※木材の数値は繊維方向のもの。プラパネルのヤング率はひずみ毎の数値。

3. 水平加力試験

3.1 試験体

図2に耐力壁試験体の枠組図を示す。耐力壁の枠組は、2本の柱、梁（上部水平材）、および土台（下部水平材）で構成され、その実寸は柱芯間隔が910mm、梁高さが2730mmであるが、本研究では実験を簡易に行うために1/2のサイズに縮小し、これに合わせて部材断面も実寸（3.5寸角）の1/2の52mm角にしている。柱と梁・土台はべいまつ材を使用し、図2に示すようなほぞとほぞ穴で接合し、水平加力時の柱の抜けを抑えるために桎材の込栓を接合部に埋め込む。なお、この1/2試験体の基本枠組は建築学系2年生配当科目である「建築構造実験」で作成しているものと同じものであり、この授業では、基本枠組に貫、筋交、構造用合板のいずれかを取り付けて耐力壁とし、加力試験を行っている。本研究では、この基本枠組に厚さ10mmのプラパネルを取り付けて耐力壁とするが、その取り付け方として1)構造用合板と同様な大壁式、2)枠組内に埋め込む真壁式、に大きく分け、この他、ビス間隔を変えたりプラパネルの取り付け面積を変えたりしてその耐力性能を評価することにした。

3.2 加力方法

木造耐力壁の性能は、水平加力試験の荷重－変形曲線から壁倍率が算定され評価される。図3に加力試験のセットアップ図を示す。加力は手動油圧ジャッキによって梁に圧縮力を与えこの力(kN)をロードセル、梁の水平変位(mm)を

ワイヤー式変位計で計測する。壁倍率算定のための水平加力試験は、柱の浮き上がりを防止するために、梁と土台をタイロッドで緊結するタイロッド式、梁に重りを載せる鉛直載荷式、柱と土台をホールダウン金物で固定する金具固定式などがあるが⁽⁷⁾、本研究では前述のように、「建築構造実験」と同様に込栓を使用し、タイアップベルトを用いて柱の浮き上がりの拘束を図った。なお、加力開始時の柱が浮き上がる前の状態ではタイアップベルトの拘束効果は少なく、初期剛性に与える影響は無視できると考えられる。

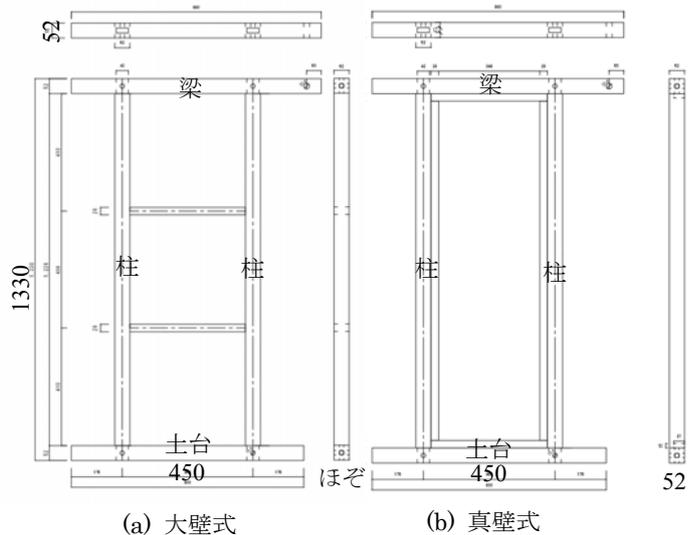


図2 耐力壁試験体枠組図

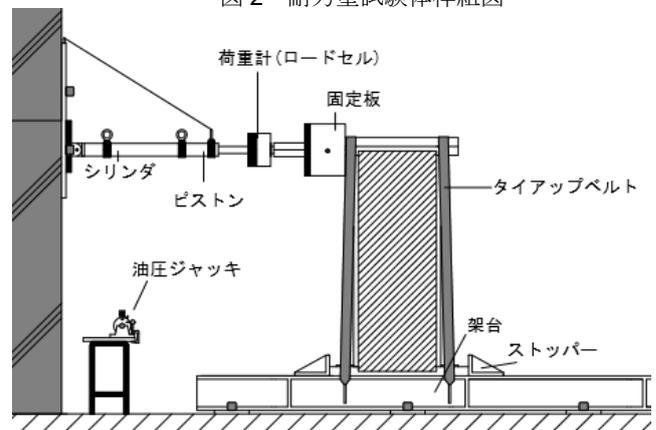


図3 試験体セットアップ図

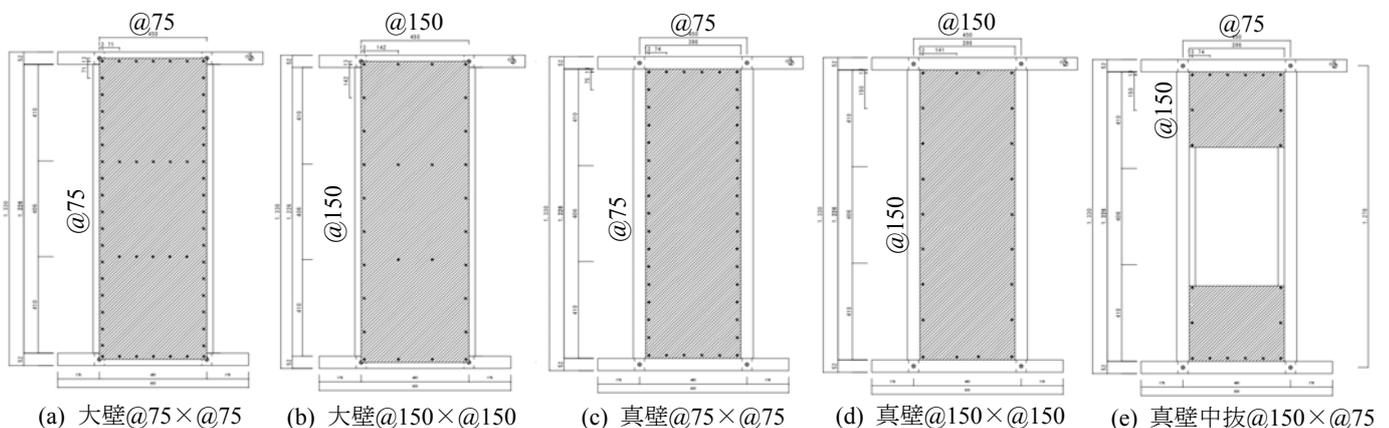


図4 プラパネル耐力壁

3-3 耐力壁

図 4 にプラパネルを基本枠組に取り付けた耐力壁を示す。(a)、(b)が大壁式、(c)、(d)が真壁式であり、プラパネルを枠組に取り付けるビスの間隔を 75mm としたものが(a)と(c)、150mm としたものが(b)と(d)である。また、真壁式の応用として中央部分のプラパネルを抜いた(e)真壁中抜きタイプ(ビス間隔は梁・土台部分が 75mm、柱部分が 150mm)についても実験を行った。なお、取り付けビスはナベ頭のコーススレッド(長さ 32mm、M4.2)を使用し、下穴を開けた後、平ワッシャー(M5)を挟んで取り付けた。また、比較のために 12mm 厚のラワン合板を同一のビスで 75mm 間隔で取り付けけた耐力壁も作成し、同様の加力試験を行った。なお、ビス間隔 75mm は構造用合板の枠組固定時に規定されている釘間隔 150mm に相当しており、1/2 試験体であることからビス間隔も 1/2 にした。

3-4 荷重-変位関係

写真 1 に加力試験終了時の大壁式プラパネル耐力壁の変形状況を示す。プラパネルが形を保っているため、枠組の柱・土台の接合部が浮き上がり、土台が裂けている様子がわかる。また、図 5 に水平加力試験の結果(荷重-変位関係)の一例を示す。図には、ビス打ち間隔 75mm の大壁、真壁タイプのプラパネル耐力壁の結果と過去に建築構造実験で行った耐力壁試験(貫、2ツ割片筋交、同寸角片筋交、構造用合板)の結果も示している。水平変位 10mm 程度以下で見ると、プラパネル耐力壁は構造用合板、2ツ割片筋交、同寸角片筋交と同等以上の初期剛性を持ち、特に大壁タイプのプラパネル耐力壁の初期剛性が最も大きい。なお、貫以外の耐力壁は水平変位 20~40mm 付近で込栓を挿入したほぞが破壊し、剛性が一時的に低下している。



写真 1 大壁式プラパネル耐力壁の変形状況

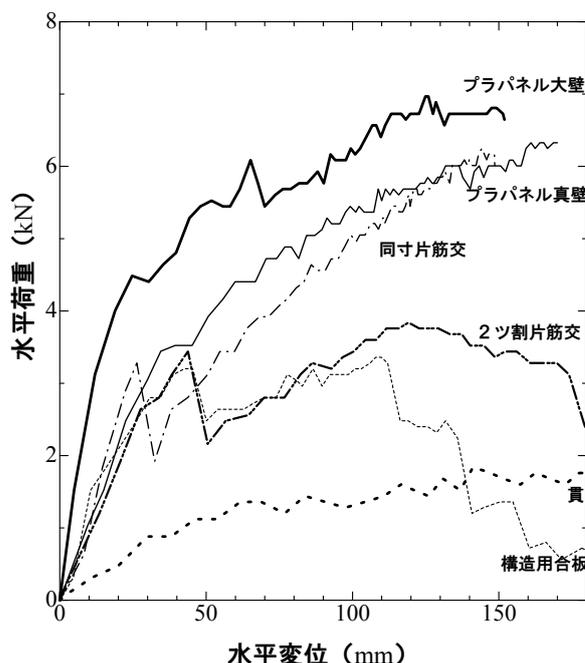


図 5 荷重-変位関係

4. 壁倍率の算定

4-1 壁倍率算定手順

3. で述べたように、本加力試験では、柱の浮き上がり防止するために、込栓とタイアップベルトを使用している。ただし、この拘束は従来法よりも弱く、3-4 で述べたように主要耐力材が降伏する前に込栓取り付け部分のほぞが破壊してしまう。そこで、ほぞ破壊前の初期剛性から壁倍率を求める旧建築基準法による算定方法を用いることにした。以下にその算定式を示す⁽⁷⁾。

$$\text{壁倍率} = \text{ばらつきによる低減係数} \times \frac{P_a}{1.27} \times \alpha \quad (1)$$

ここに、ばらつきによる低減係数は慣例的に用いられている値として 3/4、 P_a は特定変形(ここでは層間変形角 1/120)時の壁長 1m あたりの耐力[kN/m]、1.27 は許容耐力を壁倍率表示にするための基準耐力[kN/m]、 α は材料特性、繰り返しによる耐力低下や柱脚の仕様により実際設計で危険とならないように低減する係数である。表 2 は複数の機関による壁倍率算定の実験で用いられた α の値別件数であるが⁽⁸⁾、 α は 0.8~1.0 の値を取るケースがほとんどであり、その平均値は 0.88 であった。そこで本研究では α の値として 0.88 を用いることにした。

表 2 低減係数の値別件数⁽⁸⁾

低減係数	軸組耐力壁	枠組耐力壁	合計
0.7 未満	0 件	0 件	0 件
0.7 以上 0.8 未満	6 件	1 件	7 件
0.8 以上 0.9 未満	15 件	7 件	22 件
0.9 以上 1.0 未満	23 件	9 件	32 件
1.0	2 件	0 件	2 件
低減係数の平均値	0.88	0.88	—

4-2 実寸試験体の耐力相当値への換算

式(1)の P_a (kN)は特定変形角(1/120)時の耐力であるが、これは実寸(梁高さ:2730mm)の試験体に相当する値を用いる。本試験体は実寸の 1/2 であるため試験によって得られた耐力を実寸相当値に換算する必要がある。試験体は基本枠組のラーメン構造と拘束材のトラス構造を合成したものと見なせるので、付録に示すようなラーメンとトラスの水平荷重-変位関係の寸法効果を参考に用いる。いずれの構造の場合も試験体が $1/n$ 倍になったとき、同一の層間変形角に対して荷重は $1/n^2$ 倍になる。すなわち、1/2 試験体の層間変形角 1/120 の耐力が実験によって求められた場合、この耐力は実寸試験体の 1/4 であると考えられるので実寸試験体の耐力に換算するために 4 を乗ずることとする。

4-3 壁倍率

水平加力試験で得られた荷重-変位図の初期剛性[kN/mm] (層間変形角 1/120 に相当する水平変位 11.1mm までの荷重-変位データから最小自乗法によって算定) に水平変位 11.1mm を乗じて特定変形での耐力[kN]を求め、実寸での耐力[kN]に換算するために 4 を乗じ、実寸での柱芯間隔(0.91m)で除して壁長 1m あたりの耐力[kN/m]を求め、これを式(1)の P_a とする。ばらつきによる低減係数と α (材料特性、繰返しによる耐力低下や柱脚の仕様により実際設計で危険とならないように低減する係数)は 4-1 で述べた値を用いて式(1)により各耐力壁の壁倍率を算定すると図 6 の○のようになった。複数の試験体について実験を行った場合は、それぞれの結果をプロットしている。プラパネル大壁ビス間隔 75mm は 3 試験体について実験を行ったが、いずれも 5 を超えている。また、12mm 構造用合板ビス間隔 75mm も 5 を超えている。壁倍率の最大値は、実際には 5.0 を上限とするが、ここでは数値の分布を見るために切り捨てる前の値をそのままプロットしている。図には建築構造実験で得られた従来壁の壁倍率も示しており、3 ツ割、2 ツ割、同寸角片筋交と構造用合板は基準法による規定値も■で示している。従来壁の実験値は基準法の規定値よりも大きめの値となっており、試験方法や壁倍率の算定時に仮定した数値の影響が原因と考えられる。しかしながら、本実験で得られた壁倍率の大小は基準法の値のものと同傾向であり、従来壁に対するプラパネル耐力壁の相対的な性能評価は可能である。

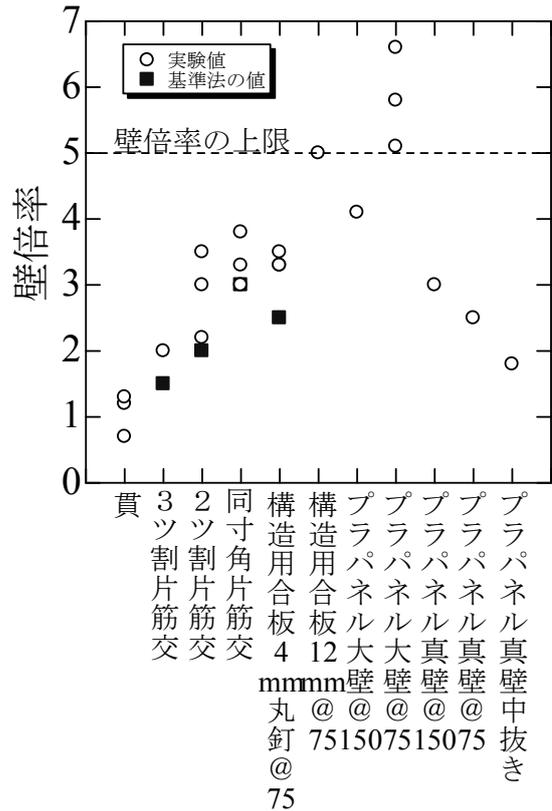


図 6 プラパネル耐力壁の壁倍率



写真 2 真壁タイプ耐力壁の桟木の剥離

プラパネル耐力壁の壁倍率を見ると真壁タイプよりも大壁タイプの方が壁倍率は大きい。これは、低ひずみ時は大壁タイプはプラパネルがビスによって枠組に密着しているのに対し、真壁タイプはプラパネルを固定している桟木が枠組から剥離したためと考えられる。通常はビスの間隔が狭ければそれだけ密着度が高く壁倍率も上がる事が予想される。大壁タイプはその傾向が見られるが、真壁タイプはビス間隔が壁倍率に影響しない。写真 2 は真壁破壊時の梁-柱隅角部の状況を示したものであるが、プラパネルは桟木に密着しているのに対し桟木が枠組からはずれている。したがって真壁タイプの耐力壁の強度はビス間隔ではなく桟木と枠組の密着度に依存する結果となったと考えられる。また、真壁タイプ中抜きは通常真壁タイプより若干

小さいものの同等の壁倍率となった。この事は枠組の変形を拘束するためには梁・柱部と土台・柱部に重点的にブラパネルをはめ込むことが効果的であることを示している。

従来壁と比較すると大壁タイプは適切なビス間隔(75mm)で固定した場合、従来壁の構造用合板や同寸片筋交り壁倍率は大きくなる。真壁タイプはビス間隔に関わらず、従来壁の 2 ツ割片筋交り程度の壁倍率になるが、積木と枠組の固定度を上げれば壁倍率は大きくなるのが期待できる。また、ブラパネルと同程度の厚さ 12mm のラワン合板、同じ固定方法(丸釘ではなくコーススレッドを使用)で作成した構造用合板の壁倍率は、厚さ 4mm のラワン合板と丸釘で作成した従来の構造用合板より壁倍率が 2 程度大きく、合板の厚さの増加による剛性の増加に加えビスによる固定の影響も受けていると考えられる。

4・4 終局強度・材料の厚さに関する考察

本実験は、柱の浮き上がりを抑えるために込栓とタイアップベルトを用いたが、固定度が十分でないためひずみが大きくなると柱に浮き上がりが生じてしまい、降伏以後の耐力壁の性能を正しく評価できないため、現行の基準法による壁倍率の算定はしなかった。しかしながら、躯体変形後の試験体の挙動を観察することによってブラパネル耐力壁の終局状態を予測することは可能と考えられる。

図 5 を見ると大壁タイプのブラパネルは水平変位 20mm 付近のほぞ破壊後も剛性を落としながらも耐力が増加していく。水平変位 60mm 付近の 2 度目の剛性低下は取り付けビスがはずれたためと思われるがその後も耐力は上昇していく。真壁タイプも初期剛性は低いものの突発的な破壊はなく徐々に耐力を上げていき、水平変位 150mm 以後はビスがはずれた大壁タイプと大差ない。真壁タイプはブラパネルが枠内にはまっているため終局時にはビスの固定に関係なく枠の形を保とうとする効果があり、大壁タイプと同様に終局強度は高いと考えられる。

本研究では試験体と部材断面は実寸の 1/2 のものを用いたが、ブラパネルだけは実寸の 10mm 厚のものを用いている。そのため、仮に縮小スケールに合わせた 5mm 厚のものを用いた場合よりは強度が大きく出た可能性がある。しかしながら、ブラパネルは強度が大きいので厚さが薄くても枠変形を拘束する効果はそれほど落ちないと予想される。



写真 3 ブラパネルの面外方向の変形（真壁中抜き）

写真 3 は真壁中抜き耐力壁の破壊状況を示したものであるが、ブラパネルが面外方向に大きく変形していることがわかる。強度が十分あれば、むしろ厚さが薄い方が面外方向の変形が大きくなり地震エネルギーの吸収に有利に働くことが期待される。また、材料が薄い方が壁取り付け時に下穴を開けずにそのままビスが打ち込めるなど施工面でも有利であり、当然コストも少なく抑えられる。このような厚さに関する検討は今後の課題としたい。

5. 結論

本研究では光ケーブル層を再生した廃材を木造軸組構造の耐力壁の材料として利用できる可能性を検討するために耐力壁の性能の尺度として用いられている壁倍率を水平加力試験によって算定し、従来壁の壁倍率と比較した。以下に本研究で得られた知見を述べる。

1. 大壁タイプは適切なビス間隔で固定を施した場合、従来壁の構造用合板や同寸片筋交り壁倍率は大きくなる。
2. 真壁タイプはビス間隔に関わらず、従来壁の 2 ツ割片筋交り程度の壁倍率になるが、積木を枠組の固定度を上げれば壁倍率はもっと大きくなるのが予想される。
3. 大壁タイプの大きな壁倍率はブラパネルの剛性に加えビスによる固定の影響も受けていると考えられる。
4. 真壁タイプは枠組の変形を枠内から拘束する効果があり大壁同様終局強度は高いと予想される。

以上の事からブラパネルを耐力壁に使用できる可能性は十分にあると言える。また、ブラパネルの高い強度と撓性を利用すればエネルギー吸収能力の高い耐力壁となる事が期待される。しかしながら、ブラパネル耐力壁の実用化に向けては、強度以外の性能(防音性、通気性)やコスト面での検討も必要である。

謝辞

本研究で使用した材料(ブラパネル)とその品質性能試験報告書は P.PANEL 合同会社から提供されたものである。記して謝意を表する。

参考文献・引用資料

- (1) 建築基準法施行令第 46 条
- (2) <http://www.p-panel.com/> (2016/10/27 アクセス)
- (3) <http://www.aid-m.co.jp/index.htm> (2016/10/27 アクセス)
- (4) 建材試験センター, 品質性能試験報告書(試験名称: プラスチック敷き板の性能試験; 依頼者: (株)エイドマシナリー) (2008)
- (5) 日本建築学会, 木質構造設計規準・同解説 (2006)
- (6) <http://www.kk-hanshin.co.jp/contents/pdf/jushi.pdf> (2016/11/29 アクセス)
- (7) 平井卓郎, 宮沢健二, 小松幸平: 「木質構造」, 東洋書店, (2004)
- (8) 完山利行, 今西達也, 杉本敏和: 「木造耐力壁の性能評価試験(評価方法と評価実績)」, GBRC, Vol.35, No.3 pp.24-34 (2010)

付録

1層ラーメンの水平荷重—変位関係の寸法効果

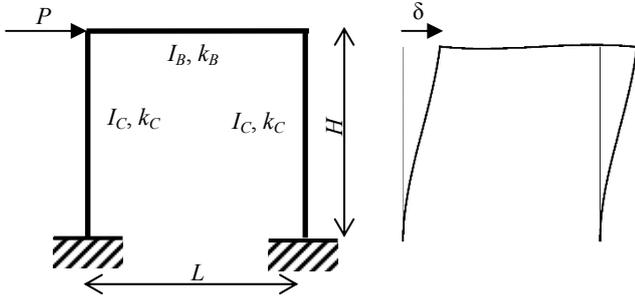


図7 水平荷重を受けるラーメン

図7に示すように同一材料で構成される1層ラーメンの梁部に水平力 P が作用したとき、部材の曲げ変形によるこの構造の水平方向の変形 δ は、柱の断面2次モーメント、剛比を I_C 、 k_C 、梁の断面2次モーメント、剛比を I_B 、 k_B 、材料のヤング係数を E とすると、曲げモーメントの分布から単位荷重法を用いれば次式のように表される。

$$\delta = \frac{aHI_B + bLI_C}{I_B \cdot I_C} \times \frac{H^2 P}{E} \quad (2)$$

ここに、

$$a = \frac{1}{(3\mu_{BC} + 1)^2} \left(\frac{1}{2} \mu_{BC}^2 + \frac{1}{6} \right)$$

$$b = \frac{\mu_{BC}^2}{(3\mu_{BC} + 1)^4} \left(6\mu_{BC}^2 + \mu_{BC} + \frac{1}{6} \right)$$

$$\mu_{BC} = \frac{k_B}{k_B + k_C}$$

部材の断面を幅 d の正方形とし、 P について表せば

$$P = \frac{1}{aH + bL} \times \frac{d^4 E}{12H^2} \times \delta \quad (3)$$

となる。あるいは δ の代わりに層間変形角 $\theta (= \delta/H)$ で表すと以下ようになる。

$$P = \frac{1}{aH + bL} \times \frac{d^4 E}{12H} \times \theta \quad (4)$$

a 、 b 、 E は試験体の寸法に関係しないから、式(4)から P は長さの2乗に比例する事がわかる。したがって、 d 、 H 、 L が等しく $1/n$ 倍になったとき、同一の θ に対して P は $1/n^2$ 倍になる。

トラスの水平荷重—変位関係の寸法効果

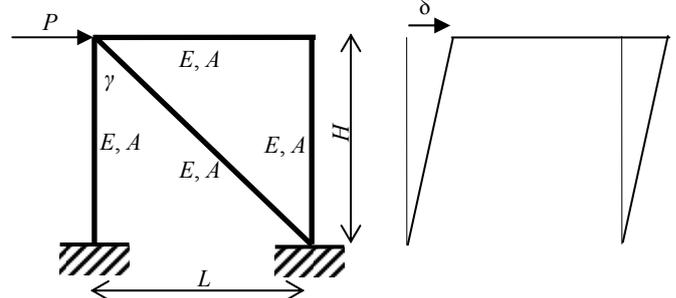


図8 水平荷重を受けるトラス

図8に示すように同一材料で構成されるトラスの梁部に水平力 P が作用したとき、部材の軸力によるこの構造の水平方向の変形 δ は、柱、梁、斜材の断面積を A 、材料のヤング係数を E 、斜材と柱のなす角を γ とすると、ポテンシャルエネルギー極小の定理から次式のように表される。

$$\delta = c \times \frac{HP}{EA} \quad (5)$$

ここに、

$$c = \left(\frac{1}{\tan^2 \gamma} + \frac{1}{\sin^2 \gamma \cdot \cos \gamma} \right)$$

$$\tan \gamma = \frac{L}{H}$$

部材の断面を幅 d の正方形とし、 P について表せば

$$P = \frac{d^2 E}{cH} \times \delta \quad (6)$$

となる。あるいは δ の代わりに層間変形角 $\theta (= \delta/H)$ で表すと以下ようになる。

$$P = \frac{d^2 E}{c} \times \theta \quad (7)$$

c 、 E は試験体の寸法に関係しないから、式(7)から P は長さの2乗に比例する事がわかる。したがって、 d 、 H 、 L が等しく $1/n$ 倍になったとき、同一の θ に対して P は $1/n^2$ 倍になる。