

# セメント押出成形板を用いた木造耐力壁の構造特性に関する研究

## Study on Structure Characteristic of Wooden Bearing Wall used Concrete Casting Board

幡司 祐弥\*

Yuya HATASHI

Recently, the outside insulation building construction composed of extruded cement panel and heat insulator is attract attention as a method to energy conservation. Arinaga et al was proposed a method that the outside insulation building construction apply to the wooden house. In this paper, the structural experiment of the proposed outside insulation building construction is done ,and structural property of extruded cement panel and wooden frame is by investigated comparison the result of experiment with the result of finite element analysis.

**Keywords:** Concrete Casting Board, Finite Element Method, Wall Ratios, Static and Elastic Plastic Incremental Analytic

押出成形板, 有限要素法, 壁倍率, 静的弾塑性増分解析

### 1 緒言

産業革命以降, 特に 20 世紀に入ってから急速に, 二酸化炭素, メタン, 人工物質であるハロカーボン類などの温室効果ガスが増加しつつあり, これをもたらす地球温暖化は, 自然の生態系や人間社会に大きな影響を及ぼし, 人類の生存基盤を揺るがす問題となっている. この問題を踏まえ 1997 年 12 月に京都で温室効果ガス排出量の削減に向けて, 各国に具体的な取り組みを課した初の国際的な議定書「京都議定書」が採択され, 2005 年 2 月 16 日に発行された.

我が国でも, 1970 年代のオイルショックを契機に, それまでの熱管理法が廃止され, 燃料資源を有効に利用するため新たに省エネ法が 1979 年に制定されたが, エネルギーをめぐるその後の経済的社会的環境の変化により何度か改正されている. 特に 1998 年以降の改正では, 化石燃料の大量使用に伴う二酸化炭素の排出量増加が, 地球温暖化問題の主原因であると世界的に認識され, 省エネ法はエネルギーの安定供給という当初の目的に加え, 二酸化炭素排出量削減の視点からも改正が行われており, 改正ごとに規制が厳しくなっている. 省エネ法の規制の対象は「工場等」, 「住宅・建築物」, 「機械器具」, 「輸送」の 4 つの分野である.

このような状況の中, 住宅・建築物の運用段階における CO<sub>2</sub> 排出量を含む民生部門のエネルギー消費量は, 我が国の最終エネルギー消費の 3 割以上を占めており, 産業, 運輸部門に比べ, 過去からの増加が顕著であり, 省エネルギー対策の強化が最も強く求められている部門となっている. 民生部門の CO<sub>2</sub> 排出量の削減を図るためには, 住宅・建築物の省エネルギー対策を抜本的に強化するとともに,

再生可能エネルギー等のクリーンエネルギーの導入などが必要となっている.

住宅における省エネルギー化対策の一つが木造住宅における各種断熱工法の提案である. 木造では, 充填断熱工法と外張断熱工法の 2 種類の断熱工法が主流であるが, それに代わる新しい工法として在永らは木造住宅の外周壁の柱間にセメント押出成形板を用い, その外側に断熱材を設けることで木造住宅における外断熱工法を提案している.

蓄熱体を柱間に挿入することによって熱を住宅内に蓄え, 室内の温度変化を少なくすることができる. それにより木造住宅で問題とされていた冷暖房機器などの使用段階でのエネルギー消費量の増加を最小限に抑え, 省エネルギー化を目指す.

セメント押出成形板は, 蓄熱性も高く, せん断強度も他の製造法によって製造された材料より飛躍的に大きい. さらに遮音性や耐熱性が高いのもセメント押出成形板の特徴である.

ところで, 本工法を実際に住宅で用いる場合, 押出成形板を設置した壁構造の耐震性, 耐力を知る必要がある. そのため 2009 年度から押出成形板を設置した木造壁構造の耐力実験を行っている.

本論文では, 解析的手法により, 押出成形板を用いた耐力壁の構造特性を把握し, 押出成形板の木造骨組への設置方法を提案することにある. そのため過去の実験結果<sup>1)2)</sup>から木材のフレームと押出成形板の構造的特性を理解し, 有限要素法による骨組解析を行うことで応力の傾向を比較, 調査する

\* 近畿大学大学院システム工学研究科 博士前期課程

## 2 実験概要

### 2.1 加力実験

本実験では、油圧シリンダを用いたタイロッド式加力実験を行う。タイロッド式とは耐力壁脚部の浮き上がりをタイロッド（鋼棒）で抑えたものである。図1に、実験装置の図面を示す。また、本実験に用いるタイロッドは、H形鋼（150×150×10×8）である。今回は、実験場所の都合上、一方向のみの加力とする。

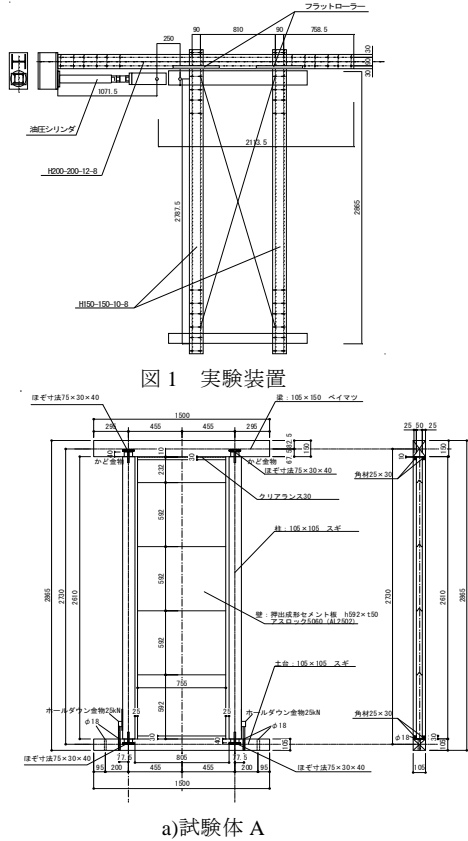
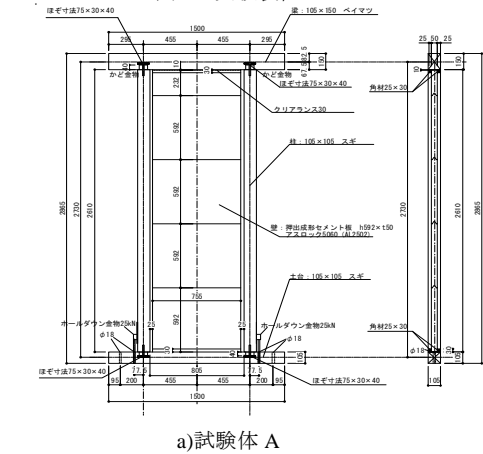
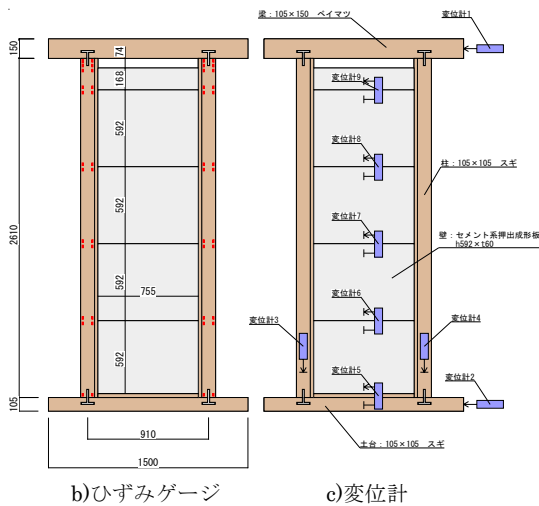


図1 実験装置



a)試験体 A



b)ひずみゲージ

c)変位計

図2 試験体とひずみゲージと変位計の設置場所

試験体は、梁、柱、土台を木材で組み立て、そこに押出成形板をはめ込み作製する。この時、梁、柱、土台の接合部は、ほぞで固定し、T型金物で補強する。押出成形板を耐力壁として用いる場合、耐力がどの程度期待できるのか、壁倍率を知る必要がある。

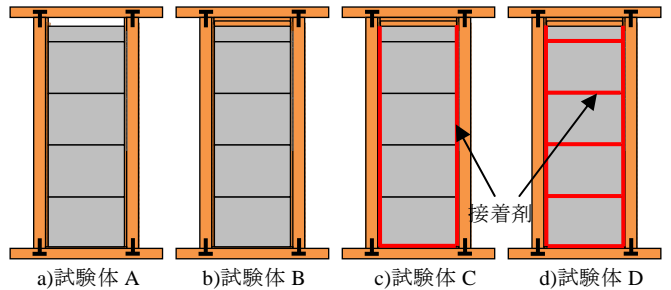
壁倍率の算出には、y軸に荷重(kN)、x軸に層間変形角(rad)をとった荷重変形角曲線が必要である。そのため、変位計を試験体に取り付け、各位置の変位を調べる。また、壁倍率とともに、応力の大きい箇所を知るために、試験体の曲げモーメントを算出するが、その時にひずみが必要となるため、ひずみゲージも試験体に取り付ける。

図2a)に試験体Aの詳細図を示す。また、ひずみゲージと変位計の設置場所を図2b),c)に示す。

### 3. 2009年と2010年の試験体

2009年の試験体をA,Bとし2010年の試験体をC,Dとする。試験体Bは試験体Aの梁と押出成形板のクリアランス部分に木材をつめたものである。試験体A,Bの違いを図3a),b)に示す。

試験体Cは柱と押出成形板の接合部を接着剤を用いて固定している。試験体Dはさらに押出成形板同士も接着剤を用いて固定したものである。また、試験体C,Dともに成形板の上部と梁の間にできた隙間は木材を用いて埋めた。試験体C,Dの違いを図3c),d)に示す。なお、太線で示した場所を接着剤で固定した。



a)試験体 A

b)試験体 B

c)試験体 C

d)試験体 D

図3 2009年、2010年の試験体モデル

### 4. 2009年と2010年の実験結果

図4、図5に実験から得られた試験体A,Bと試験体C,Dの荷重変形角曲線を示す。

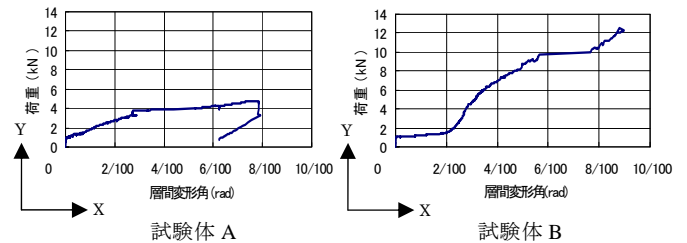


図4 試験体Aと試験体Bの荷重変形角曲線

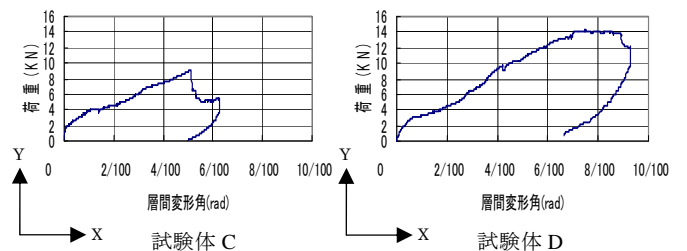


図5 試験体Cと試験体Dの荷重変形角曲線

試験体Aの荷重変形角曲線を見ると耐力が上昇せず変形のみが進み初期剛性も低いことがわかる。これは、押出成形板がロッキングを起こしたことが原因として考えられる。

試験体Bの押出成形板はせん断変形となった。試験体Bの荷重変

形角曲線を見ると、試験体 A と比べて、耐力の伸びは大きくなったが初期剛性は試験体 A と同様に低いことが確認できる。つまり、押出成形板のロッキングが耐力の伸びに大きく影響していると言える。

試験体 C は、押出成形板同士がずれるため、耐力が上がらなかった。しかし、試験体 B と比べると試験体 C は層間変形角 2/100 までの耐力が大きいことがわかる。これは、柱と押出成形板を接着したことによる影響と考えられる。

試験体 D は、試験体 C と同様に層間変形角 2/100 までの耐力が大きいことがわかる。また試験体 C よりも耐力が高いことがわかる。これは押出成形板同士を固着したため、押出成形板同士のずれが生じなかったためだと考えられる。

### 5. 2009 年の実験結果から応力の特性についての考察

図 6、図 7 に昨年度実験の試験体 C、D の応力図、変形を示す。図 6b) の応力図より左右の柱の左側に曲げモーメントがでている。また、図 6c) の変形から、押出成形板同士が滑っていることがわかる。そのため、押出成形板が滑ってずれることで柱と押出成形板の間に隙間が生まれ隙間が噛み合うまでフレーム自体は右に変形を起こし接合部での抵抗があるために左右の柱はしなるような変形を起こしたと考えられる。そのため図 6b) のような曲げモーメント図となった。

図 7b) の応力図から右の柱では左側にしか曲げモーメントがでない。右の柱と梁の接合部が剥がれたために柱と梁の接合部での抵抗がなくなったために柱はしなるような変形をしなかったと考える。また図 7c) の変形から、押出成形板はロッキングのような動きをおこなっている。そのため押出成形板同士を接着すると左の柱の上層部分と梁に影響があると思われる。左右の柱で応力の大きさが異なっているのは押出成形板と押出成形板の接合部に接着剤を用いた影響だと考えられる。

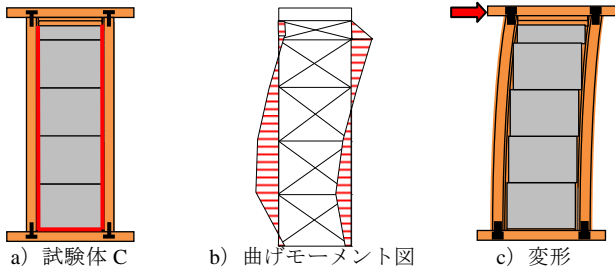


図 6 試験体 C の実験結果

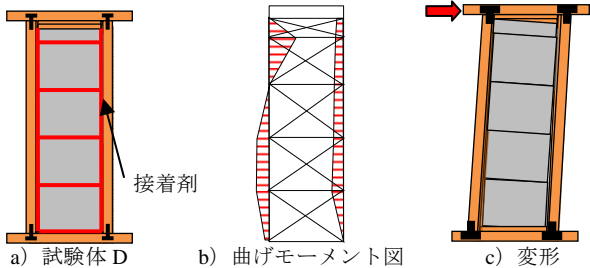


図 7 試験体 D の実験結果

### 6. 試験体モデルの弾性解析

本研究に用いる解析法として、有限要素法による骨組解析を行う。図 8 に解析に使用する解析モデル図を示す。本モデルでは、柱と

梁の接合部、柱と土台の接合部、柱と押出成形板の接する部分、押出成形板と押出成形板の接する部分、梁と押出成形板の接する部分にバネ要素を設けている。バネ要素は、摩擦やボンドの接着を考慮するために設置した。

図 8 の骨組モデルの解析条件は、節点数 50、要素数 89 とする。また、押出成形板と木材のヤング係数は、それぞれ 20600 N/mm<sup>2</sup>、7400 N/mm<sup>2</sup> とする。

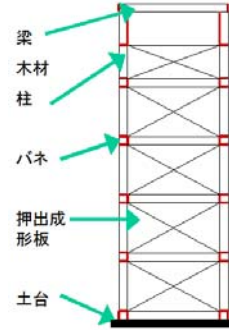


図 8 解析モデル図

図 9 に、実験からの考察をふまえた値による有限要素法による試験体 C、D の骨組解析の曲げモーメント図と変位図を示す。

図 6、図 7 と図 9 の曲げモーメント図と変位を比較すると、実験結果と解析結果で同じ傾向の曲げモーメントを表すことができた。

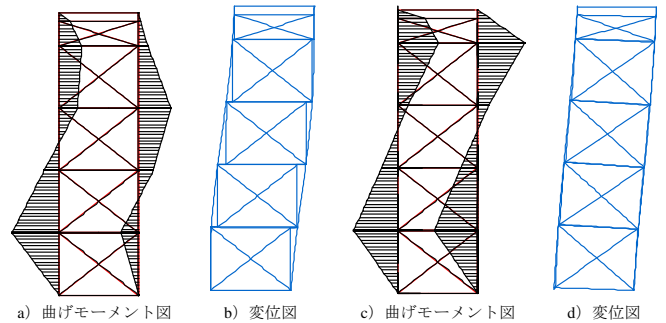


図 9 試験体 C、D の解析結果

### 7 弾塑性荷重増分解析

#### 7.1 解析結果

固着部分の剥がれ方と変形の過程を調べるために試験体 C、試験体 D それぞれの弾塑性荷重増分解析を行う。

解析モデルは図 8 に示したモデルである。解析条件は図 8 のモデルと同様とする。

図 10 に解析結果によって得られた接着剤の剥がれていく順番を示す。図 10a)b) ともに最初は応力の大きい箇所から剥がれている。また、図 10a) より押出成形板同士は下層に関しては早い段階で剥がれていることがわかる。このことから、最初に下層の押出成形板がずれるような変形を起こしたために下層の応力が大きくなったと考えられる。また、接着剤の剥がれ方としては一部に偏ってしまうのではなく全体的に剥がれているため全体的に変形が進んだことがわかる。全体的に変形が大きくなってしまったために初期の剛性も低く耐力も大きく出なかったと思われる。図 10b) より下層の押出成形板と柱のバネ要素が早い段階で剥がれた。このことから、荷重が増えていくことにより押出成形板はロッキングのような変形をおこなうとしていることがわかった。また、接着剤の剥がれ方としては

部に偏ってしまうのではなく全体的に剥がれていった。

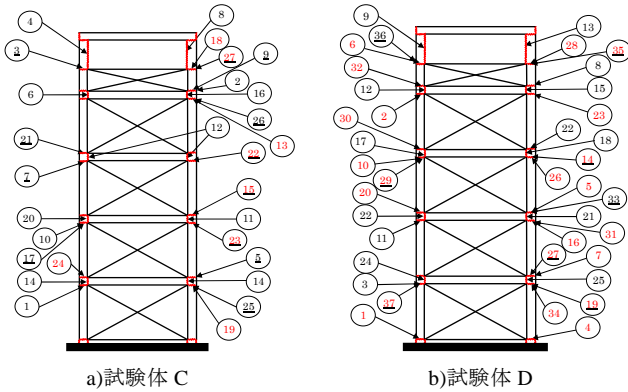


図 10 解析による接着剤の剥がれ方

## 7.2 実験と解析の荷重変位曲線

図 11 に実験からえられた試験体 C の荷重変位曲線と解析から得られた荷重変位曲線を示す。図 11 より試験体 C の荷重変位曲線はそこから荷重 4.2kN を境に耐力が 3.5kN まで低下し、崩壊荷重まで上昇するという結果となった。耐力が低下した理由は、押出成形板が破壊されたのではなく加力によって栈木の固着部分が剥がれ、土台と栈木をボルトで固定した部分が破壊されたためである。

土台と栈木をボルトで固定した部分の破壊によって落ちた耐力は押出成形板と柱が噛み合うと再び上昇する。解析では耐力の上昇までは考慮できないため、耐力が上昇するまでの試験体 C の荷重変位曲線と解析による荷重変位曲線を比較する。図 11 よりどちらも約 1.5kN の付近で荷重変位曲線の上昇の仕方が変わり緩やかに上昇していることがわかる。また、図 12 に解析と実験の初期剛性の比較を示す。図 11,12 より実験と同じような傾向を解析でも示すことができた。

図 13 に実験から得られた試験体 D の荷重変位曲線と解析から得られた荷重変位曲線を示す。図 13 より試験体 D の荷重変位曲線も荷重 9.5kN を境に耐力が 8kN まで低下し、そこから崩壊荷重まで上昇するという結果となった。耐力が低下した理由は、押出成形板が破壊されたのではなく加力によって栈木の固着部分が剥がれ、土台と栈木をボルトで固定した部分が破壊されたためである。

土台と栈木をボルトで固定した部分の破壊によって落ちた耐力はその後再び上昇する。解析では耐力の上昇までは考慮できないため、耐力が上昇するまでの試験体 D の荷重変位曲線と解析による荷重変位曲線を比較する。図 13 よりどちらも約 4kN の付近で荷重変位曲線の上昇の仕方が変わり緩やかに上昇していることがわかる。また、図 14 に解析と実験の初期剛性の比較を示す。図 13,14 より実験と同じような傾向を解析でも示すことができた。

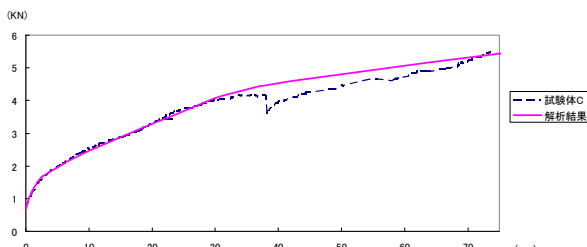


図 11 試験体 C の実験結果と解析結果の比較

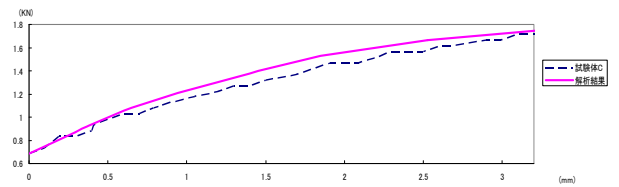


図 12 試験体 C の初期剛性の比較

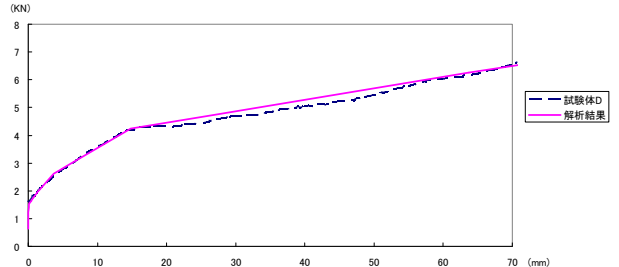


図 13 試験体 D の実験結果と解析結果の比較

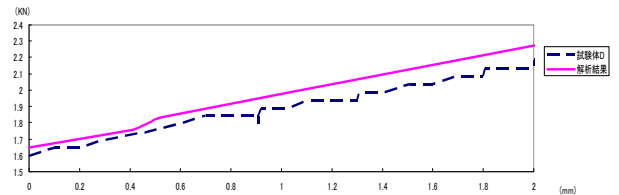


図 14 試験体 D の初期剛性の比較

## 8 簡易模型による振動実験の結果と考察

### 8.1 実験概要

簡易模型を作製し地震などの揺れが起きた場合に押出成形板がどのような挙動を示すかを確認する。押出成形板の挙動を確認するために押出成形板同士、押出成形板と柱は接着させない。これにより、押出成形板の挙動が確認しやすくなると考えられる。また、加力実験では 1P(910mm)の実験しか行っていないが実際の住宅は 2P(1820mm)などの壁も存在するため今回の簡易模型実験では 2P(1820mm)の場合も想定して実験を行う。2パターンの場合の実験を行うことで、スパンの違いによって押出成形板同士や柱にどのような影響が出るのかを確認する。図 15 に今回作製した実験模型の寸法を示す。

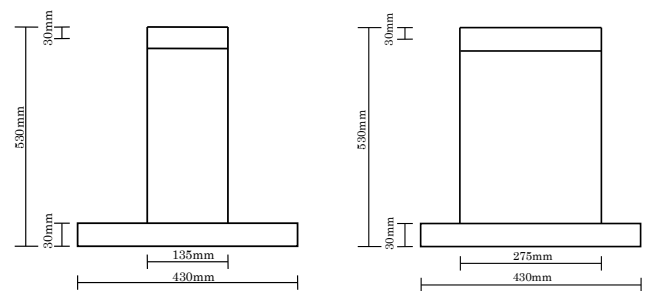


図 15 実験模型の寸法

### 8.2 実験結果

図 16 を見てもわかるように、1層目と2層目の部分が大きくロッキングを起こした。また、押出成形板が5層目と梁の隙間を埋めるように浮き上がっている。これは 2009 年の試験体 A の実験結果と類似している。5層目の押出成形板が梁を押し上げるような動きを起こしているため梁への影響も考えられる。そして押出成形板が浮き上がることで柱を引き抜こうとする動きをした。ロッキングを起こしたことにより 2層目から上の押出成形板は斜めに傾き、柱

に寄り掛かっているため柱への影響が考えられる。押出成形板と梁の隙間を埋める必要がある。片方の柱のみが押出成形板によって変形しているため左右の柱が同時に大きく変形することはなかった。

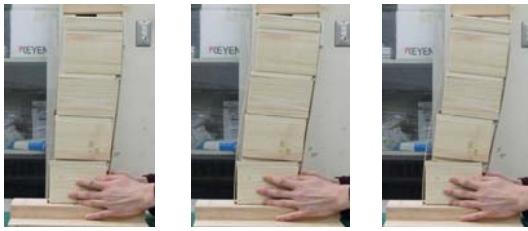


図 16 1P の場合の挙動

図 17 を見てもわかるようにロッキングは発生せず、押出成形板が梁を押し上げるような動きをしていない。これは 1P(910mm) の場合の実験とは明らかに違う動きをしている。しかし、押出成形板同士が左右に大きくずれるために左右の柱が両側に大きく開くように変形することが確認できた。このことより、柱に大きな影響があることが考えられる。また、振動時の初めは下層の押出成形板だけが動いていたが徐々に上層の押出成形板へと動きが伝わってゆき最終的には全ての押出成形板がゆっくりと左右に動いた。



図 17 2P の場合の挙動

## 9 解析によるスパン長の違いの検討

### 9.1 解析モデル

試験体 D の実験結果より押出成形板同士を接着した場合は高い耐力が出たが初期剛性が低かった。ロッキングが原因と思われる。そこで押出成形板と梁との間に設置してあるバネの強さを  $10^7$ 、 $10^4$ 、 $10^3$ 、 $10^2$  として解析を行うことでロッキングが初期剛性に影響があるのかを図 18a) に示すモデル A を用いて検討する。また、図 19 にモデル A の場合に強くするバネの位置を示す。

また、図 17 よりスパンの大きい壁はせん断変形をおこなうために押出成形板と柱の隙間が大きくなる。柱と押出成形板の間に設置してあるバネ要素の強さを  $10^6$ 、 $10^4$ 、 $10^3$  として解析を行うことで隙間を抑えることで初期剛性や耐力にどのような影響があるのかを図 18b) に示すモデル B を用いて検討する。また、図 22 にモデル B の場合に強くするバネの位置を示す。モデル A とモデル B の節点数は 50、要素数は 89 とする。

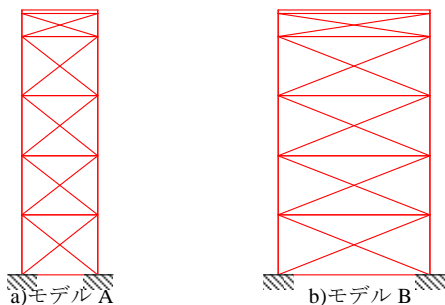


図 18 解析モデル

### 9.1.1 モデル A

押出成形板と梁との間に設置してあるバネの強さで初期剛性に影響があるのかを調べるためにバネ要素の強さを  $10^7$ 、 $10^4$ 、 $10^3$ 、 $10^2$  として行った場合の初期剛性を図 20 に示す。また、バネ要素の強さを  $10^7$  として解析した場合と過去の実験結果を比較したものを図 21 に示す。

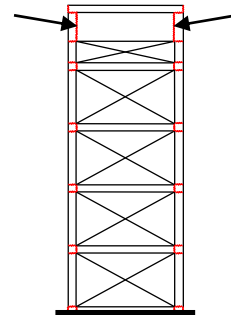


図 19 強くしたバネ要素の箇所

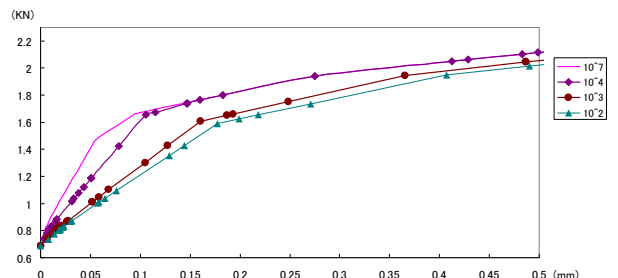


図 20 初期剛性の比較

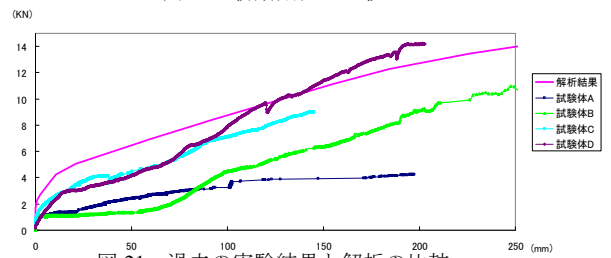


図 21 過去の実験結果と解析の比較

図 20、図 21 よりバネを強くすると初期剛性も向上し初期の耐力も過去の実験より大きくなっている。また、図 25a), b) に  $10^7$  として解析した場合の曲げモーメント図と変位図を示す。

### 9.1.2 モデル B

押出成形板と柱の間に設置してあるバネの強さで初期剛性に影響があるのかを調べるためにバネ要素の強さを  $10^6$ 、 $10^4$ 、 $10^3$  として行った場合の初期剛性を図 23 に示す。また、バネ要素の強さを  $10^6$  として解析した場合と過去の実験結果を比較したものを図 24 に示す。

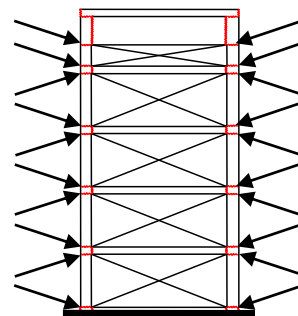


図 22 強くしたバネ要素の箇所

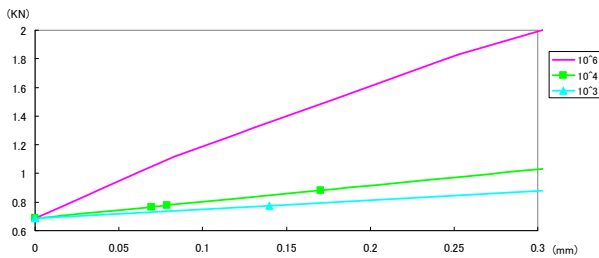


図 23 初期剛性の比較

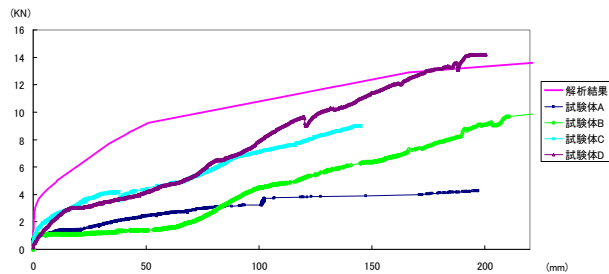


図 24 過去の実験結果と解析の比較

図 23, 図 24 よりバネを強くすると初期剛性も向上し初期の耐力も過去の実験より大きくなっている。また, 図 25c,d)に  $10^6$  として解析した場合の曲げモーメント図と変位図を示す。

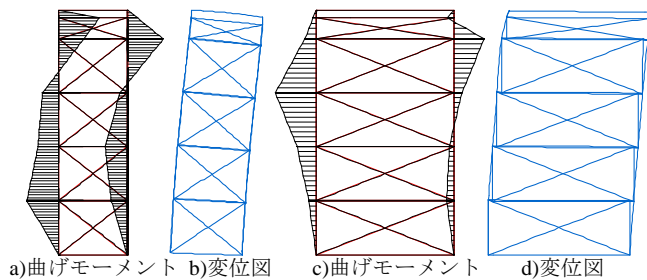


図 25 曲げモーメントと変位図

### 9.1.3 スパンの違いによる柱と押出成形板の固定方法

スパンの大きい場合の押出成形板と柱の固定方法として押出成形板の角を柱と固定する方法を提案する。モデル B の解析により柱と押出成形板の角を固定することは高い耐力と初期剛性が大きくなることを示した。そこで同じ解析条件でモデル A とモデル B を解析することでスパンの違いによる固定方法の有効性を示す。また, 1P (910mm) の場合に柱と押出成形板の角を固定するだけでなく押出成形板と梁の間に圧縮力を加えて固定させた場合の解析も比較対象として行う。また, 図 26 に強くするバネの位置を示す。図 28 に解析結果の荷重変位曲線を示す。

図 27 より初期剛性はともに同程度になったが耐力の伸びに違いがあらわれた。このことより 2P (1820mm) の場合は柱と押出成形板の角を固定させることは耐力的にも有効であるといえる。逆に 1P (910mm) の場合においては柱と押出成形板の角を固定させるだけでは耐力の伸びは期待できない。しかし, 梁と押出成形板に圧縮力を加えて固定させることで耐力の伸びが 2P (1820mm) の場合と同程度となった。つまり, スパンが大きくない場合は柱と押出成形板の角を固定に加え, 梁と押出成形板に圧縮力を加えて固定させることが有効であるといえる。

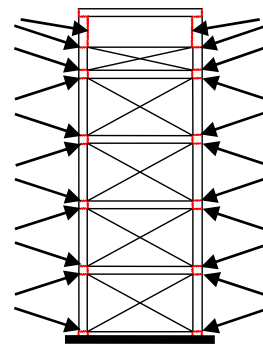


図 26 強くしたバネ要素の箇所

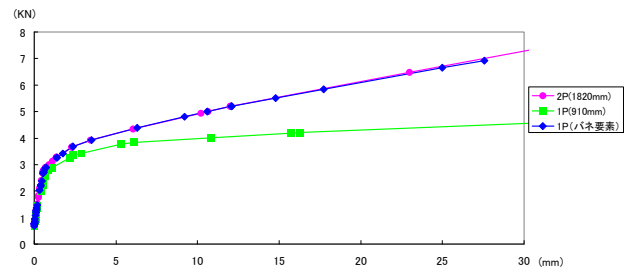


図 27 スパンの違いによる荷重変位曲線

## 10 結論

まず, 過去の実験結果から応力の特性を考察することにより, 試験体 C, 試験体 D の曲げモーメント図, 変形の仕方を把握し, 考察をふまえた値で有限要素法による骨組解析を行うことで解析結果と実験結果が似たような傾向になることを示した。また, 荷重増分解析によって荷重が徐々に加わることで変形の過程や固着部分の剥がれ方の傾向を示した。荷重と変位の関係を表した荷重変位曲線も示した。実験によって得られた荷重変位曲線と解析によって得られた荷重変位曲線とを比較することで, 解析と実験が似たような傾向になることも示した。

次に押出成形板を木造住宅の耐力壁として用いた場合に耐力がどの程度期待できるのかを知るために 2009 年と 2010 年の壁倍率を算出した。

簡易模型実験によりスパン長の違いにより押出成形板の挙動にどのような変化があるのかを示した。また, ロッキングが初期の荷重の伸びに影響があることも示した。また, スパンの大きい場合は柱と押出成形板の角を固定することが有効であることやスパンが大きくない場合は柱と押出成形板の角を固定に加え, 梁と押出成形板を圧縮力を加えて固定させることが有効であることも示した。

## 参考文献

- 1) 大田吉則, 「木造外断熱工法の耐震性に関する実験的研究」平成21年度卒業論文
- 2) 宮田隆一, 「押出セメント成形板を蓄熱体として利用した外断熱木質構造体の耐震性に関する基礎的実験研究～セメント成形板の固着方法による初期剛性の改善について～」平成22年度卒業論文
- 3) 藤井大地, 「Excelで解く構造力学」, 丸善, 2003.8
- 4) 杉山英男, 「木質構造」, 共立出版, 2008.4
- 5) 日本建築学会, 「建築材料実験用教材」, 日本建築学会, 2000
- 6) 高田秋一, 堀川武廣, 「省エネ対策の考え方・進め方」, オーム社, 2007.9
- 7) 日本建築学会, 「省エネ住宅とスマートライフでストップ地球温暖化」, 丸善, 2006.10
- 8) ビューローベリタスジャパン建築認証事業本部, 「世界で一番やさしい省エネ法」, 株式会社エクスマレッジ, 2011.7