

氏名(本籍)	うめ もり ひろし 梅 森 浩(神奈川県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第113号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項
学位授与年月日	平成23年3月7日
学位論文題目	木質断熱複合パネル構法の耐震性能に関する研究
論文審査委員	主査 宮 澤 健 二 副査 久 田 嘉 章 吉 田 倬 郎 入 江 康 隆(宇都宮大学准教授) 河 合 直 人((独)建築研究所・本学大学院非常勤講師)

論文要旨

住宅による環境負荷軽減への対策は避けて通れないテーマとなっている。また、地震国日本では近年、住宅に甚大な被害を及ぼす地震が多発し、東海・南海・連動型地震の発生も危惧されている。一方、国内の住宅に対する「木造」ニーズは依然として高い。このような背景の中、木質断熱複合パネルは住宅に対する社会的要求を解決する建築材料の一つであると考えられる。同パネルは芯材を発泡ポリスチレン(EPS)等の成形断熱材とし、その両面に構造用パネル(OSB)等の構造用面材を工場接着一体化したものである。同パネルを枠組壁工法の屋根及び外壁に用いることは、断熱性能及び耐震性能の向上に有効で、且つ施工的にも合理的な手段となる。しかし、国内での実績は少なく、耐震性能に関する知見が十分に整理されている状況にはない。

本論文では同パネルを耐力壁とした構法を木質断熱複合パネル構法と定義し、構法的な特徴を明らかにすると共に、単体耐力壁の水平加力実験からせん断耐力性能を定量的に把握し、構法的特徴に起因するせん断耐力の発現メカニズムの分析を踏まえ、せん断耐力性能の算定式を提案する。また、静的及び動的な実大建物実験の結果より、本構法の地震時挙動を把握し、既往の研究による他の木質系耐力壁形式構造との比較を踏まえ、その耐震性能を明らかにすることを目的としている。

本論文は、全7章で構成されており、各章の概要を以下に示す。

「第1章 序論」では、背景、研究目的、木質断熱複

合パネル構法の構法的な位置付けを明確にし、用語の定義を行った。そして同パネルに対する既往の研究が少なく、特に耐震性能に関する知見が十分でないことを示した。また、木質系耐力壁形式構造の耐震性能に係わる主な研究を把握した。在来軸組構法には多くの研究があり、明確な躯体構成・仕様に基づく構造設計法の整備がなされているが、論理的整備や今後の課題の存在も認識されている。枠組壁工法には従前より詳細な技術基準が存在し、在来軸組構法よりも構法的に画一化されている。その設計法は、実大実験による各部挙動の把握等も踏まえて、系統的な整理がなされている。木質プレハブ工法(木質接着複合パネル構法)は、各社特有の仕様による実験等に基づく研究により一定の耐震性能が示されている。なお本章では、木質断熱複合パネル構法の設計法のベースとなる枠組壁工法の耐震設計法の概略を示し、最後に本論文の全体構成と研究の特徴について述べている。

「第2章 木質断熱複合パネル構法の特徴」では、先ず、構成材となる芯材(EPS)の原材料、製造・管理方法、並びに物性と品質を示した。次に木質断熱複合パネルの生産方法と指定建築材料としての要求性能項目を整理し、剥離強度と管理方法を明らかにした。更に、同パネルを建物に適用する場合に必要な各部位のディテールを示し、耐力壁と周辺部材との納まりについて詳述した。同パネルによる耐力壁面材の木口は床版に最初から接触した納まりになっており、これを「床勝ち」の納まりと定義した上で、次章以降で示す同耐力壁のせん断耐力性能の発現機構に対して重要な要素であることを示唆した。また、壁の機能として水平荷重抵抗機能と共に重要である鉛直荷重支持性能の概略も示した。

「第3章 耐力壁の水平耐力実験による耐力特性の分析」では、先ず木質断熱複合パネル耐力壁の基本的なせん断耐力性状を定量的に把握するための各実験結果より以下①～③を示した。

- ① 木質断熱複合パネル耐力壁の基本的なせん断耐力性能と床勝ちによる効果：床勝ちと壁勝ちの各試験体の耐力性状の差を定量的に把握し、その差が床勝ちによる面材の圧縮筋かい効果的な効果であると考えた。同効果は初期段階から現れ始め、最大荷重時に最大値に達し、概ね最大荷重の0.8倍の時点まで存在する。
- ② 壁の周辺状況及び施工状況等による影響として下記3点を確認した。
 - ・壁に対する開口部の影響：枠組壁工法構造計算指針の開口部による耐力・剛性の低減方法が概ね適用できる。
 - ・壁高さの影響：壁高さの減少により初期剛性は上昇するが、耐力は殆ど上昇しない。壁高さが低い場合でも脆性的な破壊は生じずDs値は寧ろ下がる傾向にある。
 - ・面材釘頭部のめり込みの影響：面材釘頭部のめり込みによる耐力性能の低下を定量的に把握すると共に、その対策についても実験的に確認した。
- ③ 繰返し加力・初期経験変位・加力速度による影響：試験体数は限られているものの、壁単体実験により、これらの影響については既往の研究による枠組壁工法面材耐力壁の性状と概ね同じ傾向があることを確認した。

続いて本章では、床勝ちによる木質断熱複合パネル耐力壁脚部の床版に対する壁面材のめり込み性状について述べている。めり込みについては稲山の算定式があり広く用いられているが、合板のめり込み及び全面横圧縮ヤング係数、並びに部材を重ね合わせた部位におけるめり込み性状については示されていないため、これらに係る要素実験に基づいて考察した。受圧材上段が針葉樹合板(厚18mm)、下段が土台404材(Hem-Fir)の場合は、これらの部材の直列バネによる等価な全面横圧縮ヤング係数(E_{c90})を求め、受圧材高さ z_0 を構成部材の総厚とすること等により実験結果を安全側で評価する結果が得られた。また、めり込み式では E_{c90} は繊維方向曲げヤング係数 E_0 の1/50として良いとされているが、これは受圧材断面の年輪等の入り方等によっても異なるため、適宜勘案して設定する必要があることを示した。その他、床材の支持条件に応じて剛性低下を考慮する方法を示した。

「第4章 耐力性能評価式の提案」では、木質断熱複合パネル耐力壁の面材筋かい効果の発現機構を明らかにし、その効果を用いた耐力壁の耐力及び剛性の算定式を理論的に導く過程を示した。当該機構の発現は同構法の壁脚部の納まりに起因するところが大きい。面材の回転に伴い、圧縮領域は面材木口が床版にめり込むことにより反力を受け、回転が拘束される。その際面材木口は水平方向に床版から摩擦力を受けるため、面材のめり込み反力による曲げモーメントと摩擦による曲げモーメントの釣合いにより、面材の圧縮筋かい的な効果が算定できる。面材木口は床版に対して三角形変位めり込みを生じるため、その反力の算定には稲山の算定式を用いる。その際、受圧材である床版は複数の部材から構成されるため、三角形変位めり込み式を適用するためには加圧材と受圧材の寸法、及び全面横圧縮ヤング係数のを適切に設定する必要があるが、第3章の要素実験に基づく等変位めり込み式での検証結果を踏まえることにより、第3章で示した床勝ちと壁勝ちの試験体比較実験から得られた耐力差を概ね捉えることができることを示した。

「第5章 実大建物の静的性状」では、実大で躯体のみの3階建建物の静的水平加力実験の結果に基づき、木質断熱複合パネル構法の建物としての静的挙動と耐力性状等について確認した結果を示した。平面寸法7m×7mの3層立体架構試験体の他、同試験体の外周壁構面及び中通りの壁構面を想定した各3層平面架構試験体の水平加力も行い、これらの比較から立体的な効果や建物内での耐力壁の挙動及びせん断力負担について確認していることが本研究の特徴の一つである。まず、3層立体架構試験体の短期基準せん断耐力 P_0 は層間変形角1/150radで決定され、構造特性係数Dsは0.36、等価粘性減衰定数 heq は0.1(1/200rad時)～0.15(1/30rad時)であり、これらが一般の枠組壁工法や在来軸組構法の既往の研究に示されている範囲に含まれることを確認した。木質断熱複合パネルによる3層平面架構試験体の P_0 及び終局耐力 P_u は3.3.2節の単体耐力壁の結果の累加による推定値に対してそれぞれ1.47倍及び1.68倍、3層立体架構試験体の P_0 及び P_u は3層平面架構試験体の結果の累加による推定値に対してそれぞれ1.02倍及び1.24倍であることから、一般的に知られている実大建物としての余力が確認された。前者が平面的(耐力壁面)効果であり、後者が立体架構(箱)効果である。3層立体架構実験における加力方向構面端部に接続する直交壁が、加力全般に渡り一体挙動していることも立体架構効果の存在を裏付けている。なお、これらの効果は一般の枠組壁工法の設計法

では既に取り込まれているが、木質断熱複合パネル構法でも同様の考えに基づいた設計が可能であることを示すものである。また、3層立体架構実験の耐力壁面材せん断ひずみから推定すると、外周壁（木質断熱複合パネル耐力壁）と中通り壁（面材耐力壁）のせん断力の負担割合は、3層平面架構実験から得られた各耐力性能の比と終局に到るまで概ね一致しており、建物内での耐力壁のせん断耐力加算則が成り立つことも示した。

「第6章 立体架構の動的挙動」では、平面形状が4m×6mの総2階の躯体のみで外周壁長さを同一とした4種類の試験体に対してJMA神戸波及びBCJ波による振動台実験を行い、木質断熱複合パネル構法の動的な基本性状を把握した。なお、3方向加振はどの方向の加振が建物の各部にどのように影響したかの把握を難しくするため、1方向加振の結果を中心に論じているところに本研究の特徴がある。本実験から、木質断熱複合パネル構法に対する応答値、動的挙動、損傷状況、固有振動数・減衰定数の推移、 heq 等のデータを得た。BCJ波加振で得られた1階の層間変形角は、3.3.2節の単体耐力壁の実験結果から推定した層間変形角の1/1.5程度となる等のことから、木質断熱複合パネルにおいても枠組面材壁と同程度に動的な加力に対する余力が確認された。木質断熱複合パネル及び合板張り枠組壁による試験体では、耐力余裕率と最大層間変形角の関係において概ね予想通りの結果が認められたが、両面せっこうボード張りのみで構成された試験体は耐力余裕率による想定以上に変形が小さいことが確認された。また、外周が木質断熱複合パネルの試験体の中通りに両面せっこうボード張り耐力壁を加えると、それに伴う耐力余裕率の増分以上に建物の層間変形角を低減させる傾向が確認された。腰壁の有無による比較ではBCJ波加振で約2割の層間変形角低減効果が認められた。L型配置の直交壁の有無による比較では、BCJ波加振で約2割、JMA神戸波加振で約3割の層間変形角低減効果が確認されると共に、浮き上がり防止金物の歪データから直交壁が構面壁と一体挙動し構面壁の浮上り拘束に直交壁の浮上り拘束金物も寄与することが定量的に確認され、第5章の静加力時とも概ね符合する結果が得られた。木質断熱複合パネルのJMA神戸波加振による heq は12~30%であり、第5章で示した静的実験による heq より大きい値となり、速度による影響が確認された。また、木質断熱複合パネル及び枠組面材壁共通の現象として、 heq は1/30rad以上の層間変形角を経験した後に低下し、最大層間変形角が大きい程低下率が大きいことが確認され、木造の安全限界層間変形角とさ

れる1/30radを経験することにより減衰性能が低下することを示す実例を得た。

「第7章 総括」では、本論文を次のようにまとめた。木質断熱複合パネル耐力壁の床勝ちによる面材筋かい効果によるせん断耐力性能を実験から定量的に捉え、同効果の発現機構を分析し、耐力性能の算定方法を提案した。また、単体壁実験並びに実大建物実験等の結果から木質断熱複合パネル構法の耐力性能の特徴を述べると共に、建物の全体的な挙動としては、既往の研究による一般の耐力壁構造の性状を概ね同じ傾向にあることを示した。最後に、これまで実施した実大建物の実験結果の中に存在するデータを基に、木質系耐力壁形式構造という括りにおいて、既往の研究を踏まえた系統的な整理を進めることを今後の課題として示した。

論文審査要旨

梅森浩君提出の（論文）博士学位請求論文「木質断熱複合パネル構法の耐震性能に関する研究」は、厚さ92mmの発泡ポリスチレンの面材を芯材として裏表に面材（構造用パネル、11mm）を接着して耐力壁とした、特殊な木質住宅の耐震性に関する研究である。木質系面材を利用したものとして、枠組壁工法があるが、枠組壁工法は面材（構造用合板や構造用パネル）の周辺を枠材に釘打ちすることで水平抵抗することとしているが、断熱複合パネル構法は周辺を釘打ちしていることは同じであるが、面材の下側木口を床材に、上側木口は製材の桁材に直接面接触させている。ポリスチレンは断熱と面材の座屈防止に寄与している。この構法は1930年ころ北米で開発された。

面接触していると、水平力を受けたとき上下の対角部分が面接触し、対角方向に圧縮力が、即ちその水平成分である水平抵抗力が生ずる。この抵抗形式は木質構造でも特殊で、研究の事例が殆どない。

この構造形式について、接触部分、壁の挙動、平面壁構面、更に立体の構造体の挙動を静加力と振動実験により明らかにした上、これらの理論的把握を行っている。

本研究の成果は、下記3点に要約される。

- ・耐力壁脚部の三角接触めり込み抵抗と耐力壁のモデル化を提案し、実挙動を把握できることを示したこと
- ・実大実験により直交壁効果を明らかにしたこと
- ・耐震挙動を各種構法と比較検討し、その性状を示したこと

その研究成果は、木質構造分野に新しい知見を与え、本構法のみならず、同様な構造形式や今後の新しい構法

開発に応用可能である。研究の進め方は緻密かつ実践的で、広範囲な内容を含み、研究の過程とその成果は木質系住宅の耐震性評価に、更にこの分野の研究の発展にも貢献するものと思われる。

「第1章 序論」では、本構法の構造的及び法的位置づけ、関連既往研究と本研究の関連性の背景を述べている。

「第2章 木質断熱複合パネル構法の特徴」では、本構法のポリスチレンとこれで構成される断熱複合パネル、及びこれで構成される住宅構造の構法と力学的特徴を述べている。

「第3章 耐力壁の水平耐力実験による耐力特性の分析」では、断熱複合パネル単体耐力壁及び開口を含む壁の水平加力実験を行い、その挙動の把握と分析を行っている。特に脚部めり込みに関して、複雑な部材構成を等価な1つの部材と見なしてめり込み式を適用する方法について要素実験を基に考察し、その妥当性を示している。この面接触により耐力壁強度は2～3割上昇するが、靱性は若干低下することを示している。

「第4章 耐力性能評価式の提案」では、耐力壁脚部の接触部分めり込み特性を考慮して、耐力壁モデルを提案している。めり込み反力分布を実験と比較検討しモデルの決定を行ない、耐力壁の性能に占める接触めり込みによるブレース効果と特性を実験と比較し、その評価法の妥当性を示している。

「第5章 実大建物の静的性状」では、平面が7m×

7mで3階建て実大住宅の静加力実験を行っている。この建物は外周が断熱複合パネル、内壁は両面石膏ボード耐力壁の各方向3構面からなるもので、立体の実験の他3階建て各構面の実験も行い、直交壁効果を算定している。1階より2、3階の方が直交壁効果は高く、0.9～1.5倍であることを示している。従来の研究では1、2階建ての研究であり、貴重なデータと言える。

「第6章 立体架構の動的挙動」では、各種構法の実大2階建て振動実験を行い、各種構法の比較及び直交壁効果を検討している。隅角部が直交壁と接続している場合は、無い場合より、直交壁効果が2割程度高いこと、腰壁により1～2割剛性や耐力が上がることを示している。実大振動実験で、各種構法や、直交壁、腰壁効果等を明らかにした研究は少なく、貴重な成果である。

「第7章 総括」では、本論文の総括を行っている。断熱複合パネルでは提案モデルが適切であり、今後の同様な構法への応用が可能であること、直交壁効果と腰壁効果等、及び各種構法の耐震特性を把握したことを示している。また、より詳細な検討が、今後の課題としている。

尚、国際会議論文投稿2編、内1編が筆頭で、英語での口頭発表も行っている。本審査でも英語での口頭発表を行い語学力の判断材料とした。

以上のように、本研究は接触部めり込みによるブレース抵抗の研究のような新規性、各種構法との比較等研究範囲の広さ、またこれらの研究の萌芽性、発展性等から判断し、博士（工学）学位請求論文として十分価値のある内容で、学位授与に値すると判断する。