

鋼製枠組みと LVL パネルを用いたハイブリッド耐震システムの開発 —その1 システム概要と適用事例—

正会員 ○塩手 博道* 正会員 丸谷 周平*
正会員 落合 徹* 正会員 野俣 亜沙美*

大規模木質構造 耐震構造 単板積層材
鉄骨構造 耐火構造

1. はじめに

近年、特に環境配慮型建築の側面から木質構造建築物の重要性が叫ばれており、近い将来、木造建築物の需要は更に増してくると考えられる。

今まで鉄骨やコンクリートで作られてきた比較的大規模な建物について、木質材料を用いた建物に置き換えることが出来れば、つまり大規模木質構造建築物が一般化すれば、多くのCO₂を都市に固定化できる可能性がある。

その際、大規模木造建築に要求される耐火性能を満足する使いやすい大臣認定仕様や、耐震性能についても簡易に検討できるモデルがあれば、より一層の普及が期待できる。そこで、大規模木質構造建築物で想定される比較的大きな地震力に抵抗する木質材料を用いた耐震要素を考案する。

2. 耐火構造と木質材料を用いた耐震システム

想定している建物は大規模木質構造建築物であるため一般的に主要構造部が耐火建築物となることが多い。その際の対策としては木材を耐火被覆するか自己消火出来る木材を使用する等が考えられる。

一方、木質構造建築物に建物使用者が求める要件の大半は木材特有の温かさであるため、柱梁接合部が耐火被覆で覆われた状態では構造体に木質構造を採用する魅力は非常に少なくなる。さらに、自己消火出来る木材については開発に時間が必要で、接合部の耐火性能の問題やコストの問題等がある。

そこで室内から目で見え、直接触れられることで木材の温かみを感じられ、外観の特徴にもなり、採光や通風を確保することで室内居住環境に良い影響を与える仕組みをもつ耐震構造のしくみを開発しようと考えた。柱梁及び床等の主要構造部については耐火被覆し仕上げてしまうが、耐震要素を上記要件に適用させるためのシステムとして、図1に示すような耐震要素（以下、耐震パネル）を用いた大規模木質構造建築物を提案する。

3. 本システムを適用した構造計画のイメージ

本システムを用いることを想定している設計対象建物は、大規模建築物であるため、室内のレイアウトの自由度や比較的大空間が要求されることが多い。よって、耐震要素を建物外周に配置したうえでレイアウトの自由度の問題をクリアし、耐震要素に100%地震力を負担させる計画とする。柱梁をラーメン構造とし地震力を負担させた場合には、柱梁接合部において建物の変形性能が決まり木材の特性を十分発揮できな

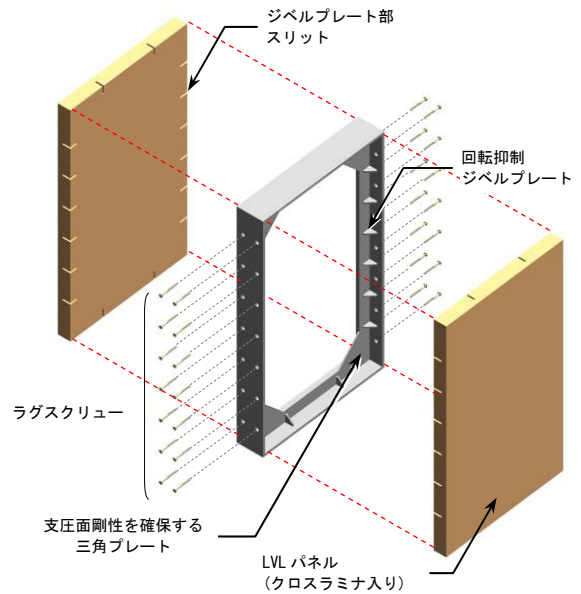


図1 耐震パネル概要図

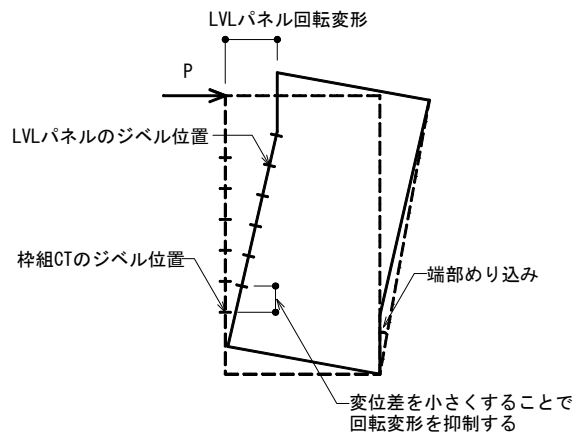


図2 変形概念図

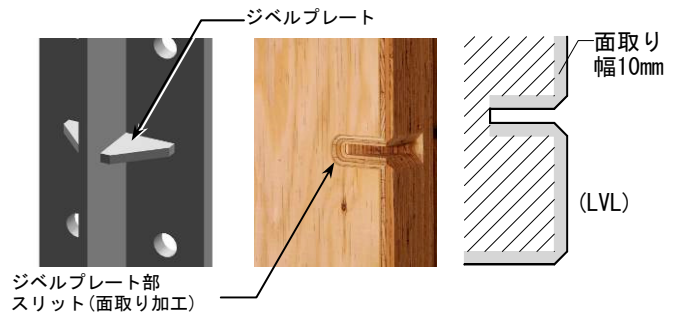


図3 ジベル詳細

い。そこで、柱梁接合部をピン接合とし、別に耐震要素を設置することにより柱梁は鉛直力のみを負担することとなり、比較的小断面化出来る。

本論文では、その 1 で耐震パネルの構造システムの概要や適用事例、その 2 で耐震パネルの単体に対する実大実験の計画と結果、その 3 で耐震パネル内の応力の伝達機構を示し、設計への適用手法について述べる。

4. 耐震パネルの構造システム

耐震パネルは、カットティー形状の鉄骨枠組み（以下、枠組み CT）に単板積層材である LVL パネルを両側からはめ込む形式としている（図 1）。このシステムの応力伝達システム上の最大の利点は、枠組み CT のフランジ面と LVL パネルの木口の支圧力によって枠組み CT が受ける水平力を LVL パネル内の面内せん断力に置き換えることが出来ることである。ボルトなどの一般的な接合部をもつ材の場合、そのシステムの耐力は専ら接合部で決まる。これは、一般的な接合で用いられる鋼材が、母材の木質材に対して剛性が著しく高く、また、支圧面積が極めて小さいため、応力が生じたときに母材にめり込んでしまうこと等が原因である。そのため、木材が木材としての強度（耐力）を十分発揮する前に接合部で破壊してしまうシステムがほとんどである。

今回のシステムは、枠組み CT のフランジ面と LVL パネルの木口という比較的大きな支圧面を確保することで、大きな応力を確実に LVL パネル内に伝達し、LVL パネルの強度を最大限に発揮させるものとなっている。

一方、枠組み CT 内に LVL パネルをはめ込むだけのシステムでは、水平荷重時には図 2 に示すように、枠組みの中で LVL パネルの回転（ロッキング）が進行し、システムの水平剛性が非常に小さくなる。そこで、LVL パネルの回転を抑制するために枠組み CT にリブプレート（以下、ジベルという）を設け、それに対応する LVL パネルの位置にスリットを設け両者をかみ合わせることにする。あわせて、枠組み CT の 4 隅には三角プレートを設置し、枠組みコーナー部の剛性を高めることで十分な支圧面を確保し枠組み CT と LVL パネルの応力の伝達をスムーズ且つ明快にしている。

枠組み CT の縦枠と LVL パネルは、縦枠 CT のジベル間に 200 ピッチでラグスクリューにて接合し、縦枠が変動軸力を受けた際の弱軸方向座屈補剛と LVL パネルにブレース方向の圧縮力が働いた時の面外座屈を拘束し、枠組みから面外にずれ出すことを抑制する設計としている。

5. 耐震パネルの実構造物への展開

延べ面積約 1 万 m² の 6 階建て耐火構造建築物に適用した木質構造体のイメージが図 4 となる。木質耐震パネルは外装材で覆い、室内の空調制御された環境におく計画としている。

本計画において、建物上階 2 層は比較的小空間が多いため木質構造とし、1 時間耐火とした。4 階以下を鉄骨造とし、5 階床を人工地盤に見立てた計画としている。

耐震パネルを市松状に配置することで、水平荷重時に効率よく剛性を確保し、枠組み CT に生じる変動軸力が打ち消しあうようにした。また、これにより通風や採光を確保しながら建物全体を特徴づけるデザインとした。

図 5 のように、2 層にわたる耐震パネルの枠組み脚部を剛性の高い人工地盤に取り付け、変動軸力の大部分を人工地盤へ分配することで、木質構造部と耐震パネル接合部の応力伝達を容易にしている。

また、図 5 のように、柱梁床構築後、耐震パネルを構面外に設置することにより、耐震パネルは鉛直荷重を負担せず、耐火被覆が不要となる。このため、室内では直接木材の温かみを感じることができる。

謝辞：本システムの開発にあたり、試験体の提供は(株)キーテック、実大実験は東京大学生産技術研究所腰原准教授及び千葉実験場、ジベル要素実験は広島県立総合技術研究所林業技術センターの協力の下行うことが出来た。ここに記して感謝の意を示します。

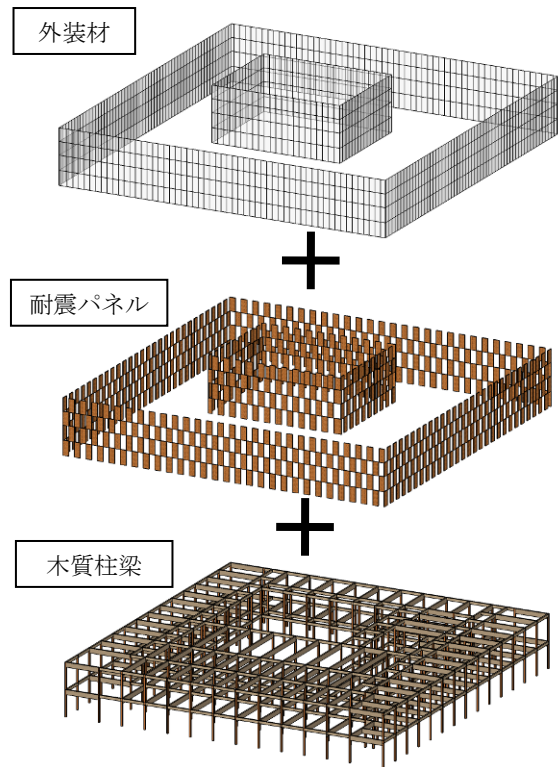


図 4 木質構造体イメージ図

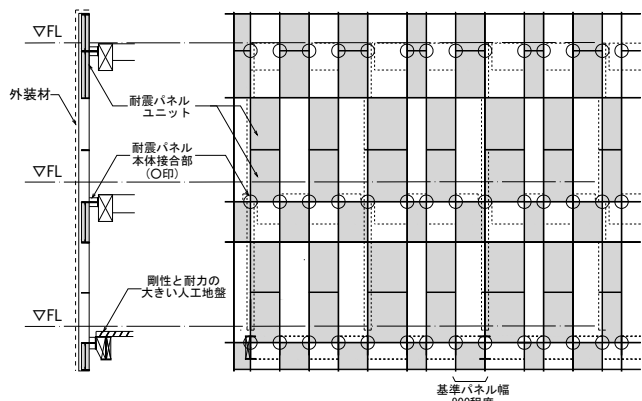


図 5 実建築物への適用例（市松状配置）

鋼製枠組みと LVL パネルを用いたハイブリッド耐震システムの開発 —その2 実験計画と結果—

正会員 ○丸谷 周平* 同 塩手 博道*
同 落合 徹* 同 北田 祐一*

大規模木質構造 耐震構造 単板積層材
鉄骨構造 実大実験

1. はじめに

本稿では、その1で紹介した耐震パネルの1ピースを対象に実大実験（以下、耐震パネル実大実験）を行った内容について、また、ジベル部分の要素実験（以下、ジベル要素実験）も合わせて行ったため、その内容について紹介する。

2. 耐震パネル実大実験の計画

その1で提案した耐震パネルが、どの程度の水平荷重・変形角まで安定した荷重が可能なかを把握するとともに、最終崩壊モード・破壊発生位置を確認することを目的として、耐震パネル1ピースに対して実大実験を行う。

図1に実大実験の実験計画図を示す。実験は、表1に示すスケジュールに沿って正負交番静的漸増荷重を行い、各荷重時における荷重変形関係を把握する。また、各時図1に示す箇所で枠組みCTおよびLVLパネルの変形とひずみをモニタリングし、全体変形等を把握する。

各部材は、枠組みCTがSM490A、LVLパネルがカラマツ（100E-375F,50V-43H）で、80mm厚のLVLパネルを両側から枠組みCTに挟み込んでいる。また、厚さ80mmの1枚のLVLパネルは、40mmのLVLを2枚合わせにして2次接着して製作する。繊維方向が直行する向きにラミナを挿入するクロスラミナ層は、40mmのLVLに対して両面の外側から2層目に配置しており、80mmのLVLでは全4層である。クロスラミナ層を入れる目的としては、LVLパネルの寸法安定性、靱性及び強度の確保である。

試験は、同一仕様で3体行い、各試験体の製作状況、荷重状況等を考慮し、結果の考察を行う。

3. 耐震パネル実大実験結果

図2に試験体No.3の荷重と変形関係図を、図3に終局時の写真を示す。これら及び実験過程から以下のことが確認できた。

- 変形角 1/67 程度までほぼ弾性挙動で、その後徐々に剛性低下する。
- 最大荷重は、LVLパネルの繊維方向（縦方向）のせん断破壊時に発現する。
- 繊維方向のせん断破壊に達しても、急激な耐力低下を起さず、徐々に耐力低下し、変形性能を保持する。
- 図4に示すように、右加力時は耐震パネルの左上と右下に於いて枠組みCTとLVLパネルが密着し、支圧力により応力を伝達する。対角側は隙間が生じ、枠組みCTとLVLパネルとの支圧による応力伝達はない。

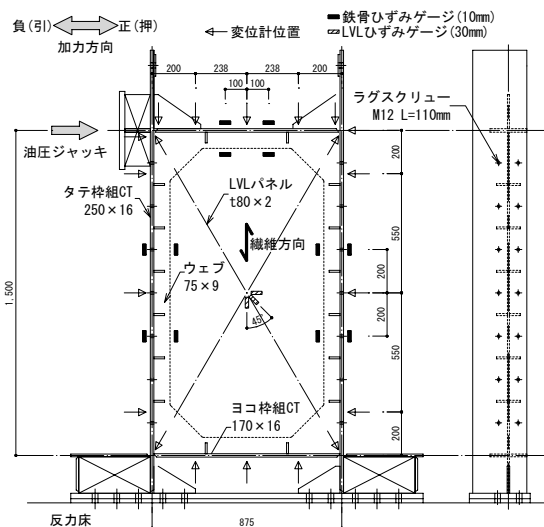


図1 実験計画図

表1 荷重増大スケジュール

試験ステップ	変形角	載荷手順(水平変位)
1	1/800	0 → 押側1.88mm → 引張側1.88mm → 3サイクル繰り返し
2	1/400	0 → 押側3.75mm → 引張側3.75mm → 3サイクル繰り返し
3	1/200	0 → 押側7.50mm → 引張側7.50mm → 3サイクル繰り返し
4	1/133	0 → 押側11.3mm → 引張側11.3mm → 3サイクル繰り返し
5	1/100	0 → 押側15.0mm → 引張側15.0mm → 3サイクル繰り返し
6	1/67	0 → 押側22.4mm → 引張側22.4mm → 3サイクル繰り返し
7	1/50	0 → 押側のみ30.0mm程度の破壊まで(最大50mm)まで

※水平変位は高さ1500mmを基準として算定

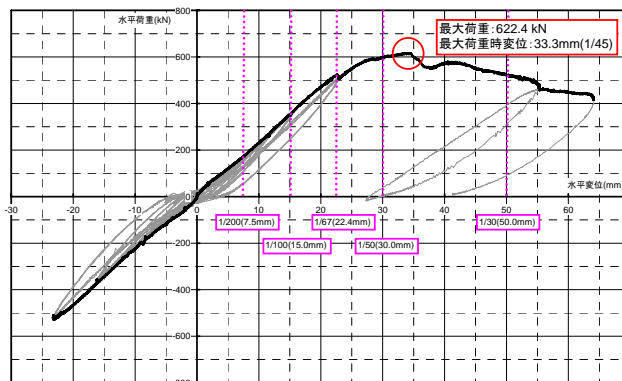


図2 耐震パネル履歴ループ(試験体No.3)

- ラグスクリューには、枠組みCTとLVLパネルを密着させようとする効果があり、特にLVLパネルから離れようとする場合には引張力が生じ、枠組みCTの座屈補剛等に対して有効であった。
- ジベルはLVLパネルの回転抑制に対して十分効力を発揮し、試験終了時の観察によれば、下から左右それぞれ1、2箇所程度LVLパネルのブロックせん断破壊が確認された。しかし、全てのジベル部がブロックせん断

破壊していないことから、耐震パネルとしての耐力に大きな影響は及ぼさなかった。

また、試験体に設置した変位計、ひずみ計の測定結果により、図4に示す変形図、モーメント図を得た。数値のない曲げモーメントは変形図からの推定である。これより、枠組みCTには純ラーメン的な応力状態が表現されず、縦材はほとんどせん断力を負担しない両端がピンのような応力であることが見て取れる。図のせん断力は、水平力520kNに対して、逆せん断で3.1kNと3.5kNであるため、誤差範囲であると考えられる。示した図は、試験体No.3の応力図であるが、他の試験体でも大局的に同様な応力が得られている。すると、水平力はLVLパネルが負担していることとなる。LVLパネルは、枠組みCTに対して、全縁端が固定されているわけではない。よって、枠組みCTから支圧力を受ける上端A点と下端B点を結ぶ対角線上に流れる軸方向力でせん断力を支点へ伝達していると考えられる。つまり、大局的にみた応力の伝達システムは図5に示すトラス構造で表現できる。ここで、引張ブレースは、ジベルによって回転を抑制しLVLパネルにせん断力を伝達する効果を表現している。現に、耐震パネル上面の横材に生じているせん断力よりも、圧縮力のはるかに大きいことがわかる。

ブレース置換における軸剛性は、圧縮側はLVLパネルのせん断剛性と回転剛性、引張側はジベルによるLVLパネルの回転抑制剛性で表現できる。

4. ジベル要素実験計画と実験結果

本検討では、ジベル部の剛性および耐力を確認するためにその要素実験を行った。試験計画図を図6に示す。4組のジベル付鉄骨枠組みにLVLパネルを挟み込んだ試験体を作成し、1方向静的漸増荷重を行った。試験体は3体用意した。

試験結果の履歴曲線を図7に示す。これは、試験体の全体の引張荷重と変位の関係を示している。LVLに加工されたジベルプレート用のスリットがジベルプレートに接触するまではラグスクリューとLVLと鋼製枠との摩擦などの剛性が表れ、接触後は剛性が上がり、そのままの剛性で終局耐力を迎える。終局耐力は3体を平均すると概ね320kN程度で、破壊形式はジベルプレートに接触しているLVLがそのままの形状で抜け出してくる、ブロックせん断破壊であった。特に、ブロックせん断破壊面は、ラグスクリューをLVLの2次接着面の付近に設置していたこと、2次接着面近傍にクロスラミナ層が存在したことが重なり、クロスラミナ層のローリングシアーが確認された。最大耐力に達した直後は、耐力低下を起こしたものの、ラグスクリューが曲げ降伏しながらLVLと鋼製枠を繋ぎとめた為、徐々に耐力低下を起こす挙動に変化した。1組当りのジベルの剛性は約60kN/mm、耐力は約80kNであることがわかった。

5. まとめ

本実大実験、ジベル要素実験により、耐震パネルが水平力を受けたときの挙動を明らかにすることができた。

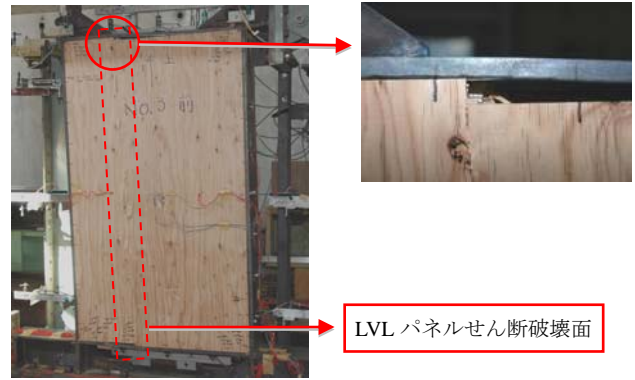


図3 試験体No.3 LVLパネルせん断破壊時

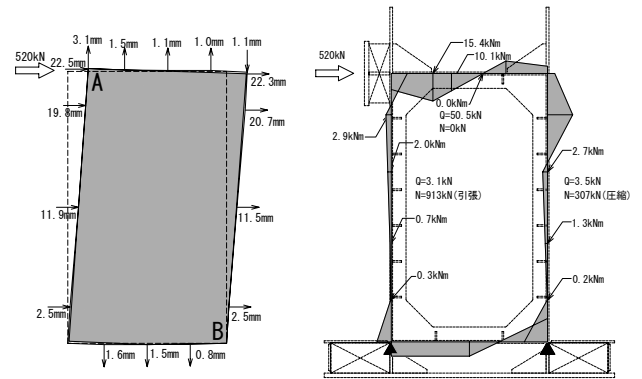


図4 1/67 変形時変形図および応力図(試験体No.3)

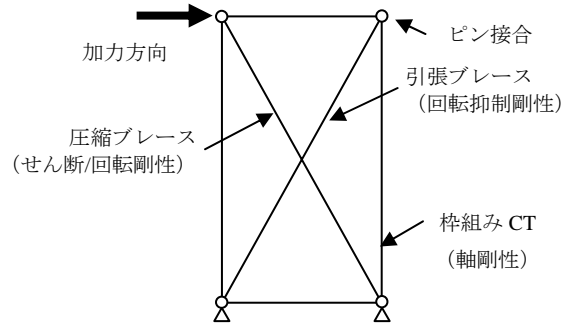


図5 耐震パネルモデル化図

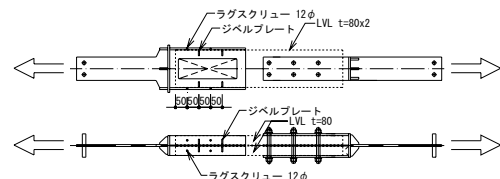


図6 ジベル要素実験計画図

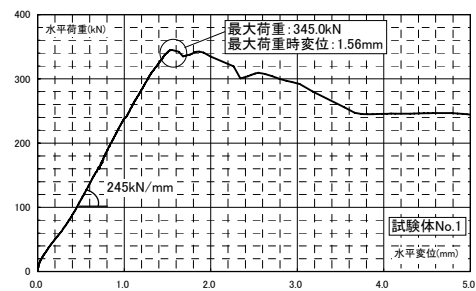


図7 ジベル要素実験荷重変形曲線

鋼製枠組みと LVL パネルを用いたハイブリッド耐震システムの開発 —その3 実験結果と解析の比較—

正会員 ○落合 徹* 同 塩手 博道*
同 丸谷 周平*

大規模木質構造 耐震構造 単板積層材
鉄骨構造 実大実験

1. はじめに

本編では、その2で示した実験結果を基に、解析によって耐震パネルの応力状態を確認する。また、耐震パネルの構造システムが簡単なモデルで表現できる有効なシステムであることを示す。解析モデルはその2で示したトラス構造を用いてモデル化する。

2. 耐震パネルの応力伝達機構

耐震パネルの応力伝達機構は、その2で示したように枠組み CT はせん断力を負担せず、LVL パネルが 100%せん断力を負担している。LVL パネルは、図1の上端の加力点側(A)と下端対角側(B)、およびジベル部のみ枠組み CT と接しているため、それらの接面のみ応力の伝達が行われる。ここでは、ある程度の面積を持った面を介して支圧力で応力を伝達しているため「接点」ではなく、「接面」という用語を用いている。

まず水平力の伝達について考えると、図1に示すように、水平力の応力伝達を行っている接面は、上端の加力点側(A)と下端の加力点と逆側(B)である。これは LVL パネル内を対角線上に応力が伝達されていることを示し、単純に圧縮ブレース状の応力状態になっていると考えられる。次に、ジベルから枠組みに伝わる応力は、図2に示すように、枠組み CT の引張側の引張応力を圧縮側の圧縮応力へ LVL パネルを介して伝達しているため、引張ブレース状と考えることができる。

以上により、LVL パネルの応力伝達機構は、圧縮ブレースと引張ブレースで置換できると考えられる。

3. 各ブレースの剛性とその算定法

前項で示した、圧縮ブレースと引張ブレースが持つ剛性の考え方と算定法を示す。

圧縮ブレースは、主に水平力を伝達する。水平力の伝達機構は、主に LVL パネルのせん断応力である。よって、LVL パネルのせん断剛性を求めることで圧縮ブレースの軸剛性を求めることができる。しかし、明快な圧縮ブレース機構を形成できる要因の一つとして、LVL パネルの回転が挙げられる。LVL パネルの下端の加力点側(C)が加力時に浮き上がらなければ、LVL パネルが枠組み CT の中で回転せず、ブレース状よりもせん断壁状の挙動となる。以上より、圧縮ブレースの軸剛性を求めるにあたってはパネルの回転剛性を加味する必要がある。図3に示すように、同一の水平力に対して、LVL パネルがせん断変形および回転変形するため、相互の剛性は直列接続であると考えられる。

引張ブレースは、主に LVL パネルの回転を抑制する応力を

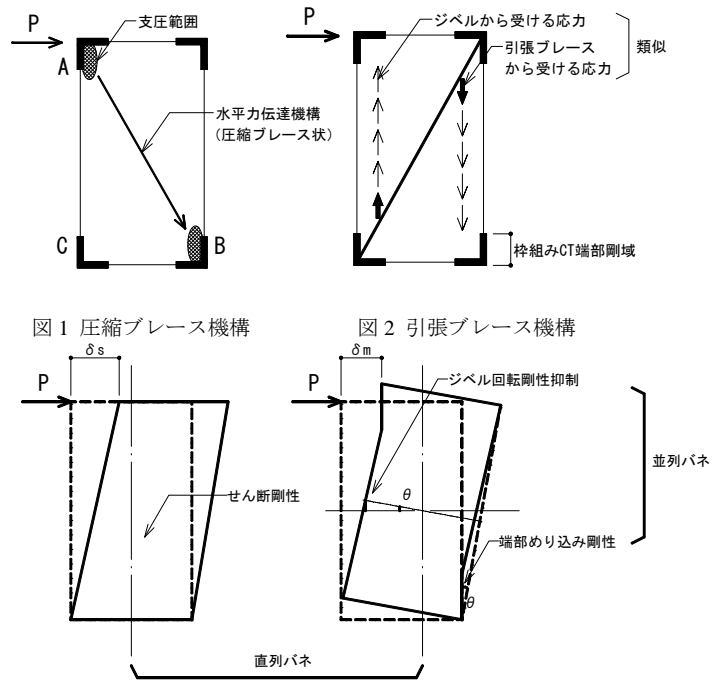


図3 各変形要素の相互関係

模擬する。しかし、LVL パネルの回転抑制に対する剛性は、パネルの回転変形に対して働くため、図3の右図に示すように LVL パネルの回転剛性と並列接続であると考えられる。

これを式で表現すると、次式となる。

$$\frac{1}{K_H} = \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_M + K_J} \quad (1)$$

$$\frac{1}{K_C} = \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_M} \quad (2)$$

$$K_T = K_H - K_C \quad (3)$$

ここで、 K_H はシステム全体の水平剛性、 K_S は LVL パネルのせん断剛性、 K_M は LVL パネルの回転剛性、 K_J はジベルの回転抑制剛性、 K_C は圧縮ブレース水平換算剛性、 K_T は引張ブレース水平換算剛性を示す。

次に、それぞれの変形要素が持つ剛性を算定する。

LVL パネルのせん断剛性 K_S は、次式で算定する。

$$K_S = \frac{t \cdot w \cdot G}{H} \quad (4)$$

ここで、 t は LVL パネルの厚さ、 w は LVL パネルの幅、 G は LVL パネルのせん断弾性係数($G=E/15$)、 H は LVL パネル

の高さを示す。

LVL パネルの回転剛性は、図 5 を参考に、枠組み CT の端部にめり込むことで起きる回転剛性を考える。めり込み範囲は、端部三角プレートによる補強範囲とする。ここでは、図 5 における端部の三角めり込みモーメントと水平力によって発生する偶力モーメントが釣合うと考え、回転剛性を算出すると下式となる。

$$K_M = \frac{2H_p^3 \cdot t \cdot E_{90}}{H^2 \cdot w'} \left[\frac{1}{3} + \frac{2w'}{3H_p} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-3(H - H_p)}{2w'} \right) \right\} \right] \quad (5)$$

ここで、 H_p は縦方向端部剛域長さ、 E_{90} は繊維直方向ヤング係数、 w' はめり込み有効長さを示す。

ジベルによる回転抑制剛性は次式で算定する。

$$K_J = \frac{w^2}{2H^2} \cdot n \cdot K_{Ji} \quad (6)$$

ここで、 n は片側ジベル箇所数、 K_{Ji} はジベル 1 箇所当たりのせん断剛性を示す。

4. 各要素の耐力の算定

次に、各要素の終局耐力、降伏耐力を算定する。

LVL パネルのせん断終局耐力は、実験結果より繊維方向（高さ方向）のせん断破壊した時点であったため、繊維方向が終局せん断耐力に達した時点を終局耐力と定義する。すると、終局耐力は下式で算定される。

$$Q_U = \frac{w}{H} \cdot H \cdot t \cdot F_{SU} = w \cdot t \cdot F_{SU} \quad (7)$$

ここで、 F_{SU} は繊維方向の終局せん断応力度を示す。

端部がめり込むことで起きる回転に対する耐力は、下式により降伏回転角を算定し、前項で示した各要素の剛性からその回転角に達した時点のせん断耐力を逆算して算定する。また、降伏後の剛性低下率は、回転の初期剛性に対して 1/7 とする。

$$\theta_y = \frac{w' F_{cv}}{H_p \cdot E_{90} \cdot \sqrt{C_x \cdot C_y \cdot C_{xm} \cdot C_{ym}}} \quad (8)$$

ここで、 F_{cv} はめり込み強度、 C_x 、 C_y 、 C_{xm} 、 C_{ym} はそれぞれめり込み範囲に対する影響係数である。

ジベルに対する終局耐力は、ジベル 1 箇所当たりの終局耐力を用いて、下式で算定する。

$$Q_{JU} = \frac{w}{H} \cdot n \cdot Q_{JUi} \quad (9)$$

ここで、 n は片側ジベル箇所数、 Q_{JUi} はジベル 1 箇所当たりの終局せん断耐力(その 2: ジベル要素実験の結果)を示す。

5. 静的荷重増分解析の結果と実験値の比較

以上で示した、各要素の剛性と耐力を用いて静的荷重増分解析を行う。前項では、LVL パネルの水平方向に対する諸元を導いたため、ブレース置換するために、それぞれの値を角

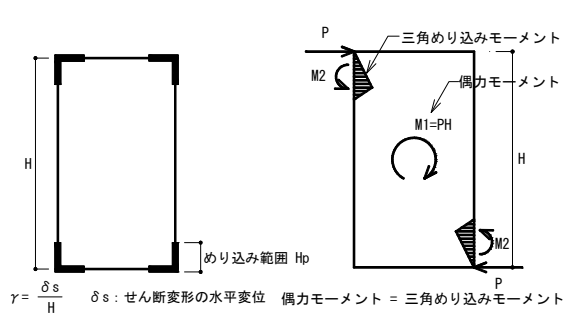


図 4 せん断剛性

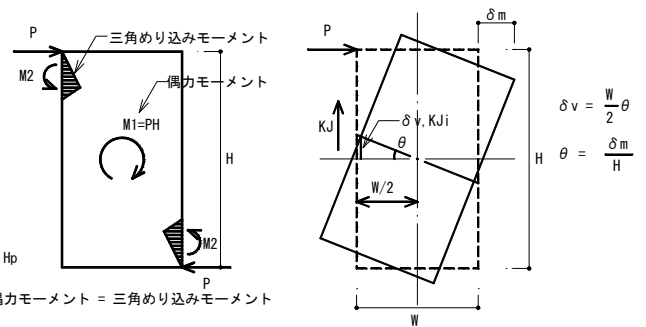


図 5 めり込み回転剛性

図 6 ジベル回転抑制剛性

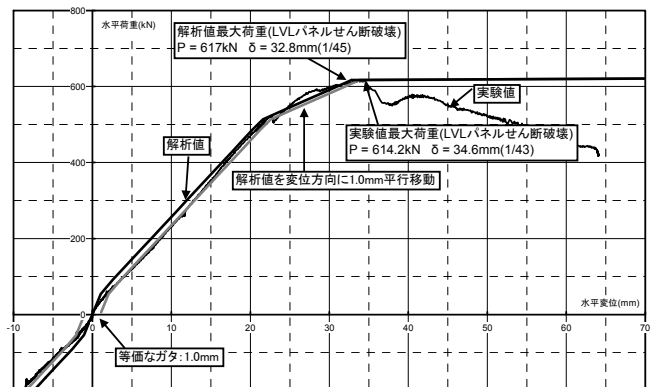


図 7 解析値と実験値の比較

度補正する。また、枠組み CT については、試験体に用いた断面の性能を持つ線材としてモデル化する。終局耐力後は、便宜的に初期剛性に対して低下率を 1/1000 とした。

静的荷重増分解析の結果得られた P- δ 曲線を図 7 に示す。

P- δ 曲線は 3 つの折れ点から構成されており、順に LVL パネルの端部が回転めり込み降伏した点、ジベルが終局状態に達した点、LVL パネルが繊維方向にせん断破壊した点を示す。

LVL パネルの繊維方向終局せん断応力度は、材料強度として定められていないため、解析より $F_{SU}=3.8\text{N/mm}^2$ とした。

実験値は初期剛性が解析ほど高くなく、2 次勾配とよく一致している。これは、初期スリップによる影響だと考えることができる。しかし、実験ではラグスクリューや枠組み CT の初期剛性、また摩擦などの影響により明快な初期スリップが現れなかったのではないかと考えられる。ここで、1 つ目の折れ点を実験値と重なる点まで平行移動させると、x 軸と約 1.0mm の位置で交わることがわかる。これを理想的にスリップした時の等価なガタと考えることができる。

また、解析ではジベルにかかる耐力をジベルの箇所数倍しているため、全てのジベルが同時に終局状態に達していることになるが、実験では応力が集中する下側のジベルから徐々に終局状態に達するため、変形角 1/67 からなだらかな剛性低下を起こしていると考えられる。

6. まとめ

本論では、鋼製枠組みと LVL パネルを用いたハイブリッド耐震システムの開発および実験、解析を行い、提案した耐震システムが極めて単純な構造システムでモデル化でき、剛性、終局耐力を推定することが可能であることを示した。