# 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

落合 徹 —— \*1 丸谷周平 —— \*2 塩手博道 —— \*3

### キーワード:

大規模木質構造,耐震構造,単板積層材,鉄骨構造,耐火構造,実大実験

Keywords:

Large scale timber structure, Seismic structure, Laminated veneer lumber, Steel structure, Fire resistance structure, Real scale experiment

# DEVELOPMENT OF HYBRID SEISMIC SYSTEM WITH STEEL FRAME AND LVL PANEL

### Toru OCHIAI Syuhei MARUYA Hiromichi SHIOTE

The government is aiming at the reduction of CO<sub>2</sub> and the improvement of the wood rate of self-sufficiency by promoting the construction of the timber structure.

When a large-scale timber structure is designed, the development of an earthquake-proof element with large ability and the establishment of the design approach are needed.

This report is a description of the earthquake-resisting system that uses the wood-based material and the modeling method.

In this structure, the LVL panel is set in the frame made of the steel frame. This system brings out the maximum capacity of LVL panel. Because, steel frame transmits shear - force to LVL by a wide bearing area.

This paper presents background and outline that develops this system, experimental plan and results, and structural modeling and estimation method of P-d curve.

### 1. はじめに

2010 年,「公共建築物における木材の利用の促進に関する法律」 が施行された.そこでは、公共建築物の木造化を図ることにより、 林業の活性化や森林の保全、木材自給率の向上などを目指している. このような背景の中、普及を図りたい大規模木質構造物は、床面積 あたりの壁長さが短いため、効率よく大きな地震力を負担できる耐 震要素の開発や設計手法の整備が課題である.

本論は、埼玉県春日部市に建設される「東部地域振興ふれあい拠 点施設」で開発した、木質材料を用いた耐震システムとそのモデル 化手法についての報告である.

延べ面積 10,000m<sup>2</sup>の 6 階建て耐火建築物の 5・6 階 4,000m<sup>2</sup>を木 質構造とし,建物外周に鋼製枠組みと LVL パネルを併用した耐震パ ネルを市松配置した(図 1 参照). 柱梁接合部はピン接合とし,地震 力は 100%耐震パネルに負担させ,部材の小断面化を図っている. 柱・梁・床は「社団法人 日本木造住宅産業協会」の1時間耐火大 臣認定仕様を用い,強化せっこうボードにて耐火被覆している.耐 震パネルは,柱梁床等を施工した後に,側面より取り付けるため鉛 直荷重を負担しない. そのため,耐火被覆の必要がなく,LVL は室 内から目で見え,直接手で触れられ,建築主が木造に求める木材特 有の温かみを感じられるものとしている. 耐震パネルは市松配置と することにより,外観を特徴づけ,どの部屋からも採光・通風が確 保できるものとしている.

## 2. 耐震パネルの構造システム

耐震パネルは、図2に示すように、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.このシステムの最大の利点は、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

本稿の一部は日本	本建築学会大会	2010年度(北陸)で発表した。
*1(株)山下設計	構造設計部門	
(〒103-8542	東京都中央区日	日本橋小網町 6-1)
*2 (株)山下設計	構造設計部門	主管
*3 (株)山下設計	構造設計部門	副部長



図1 東部地域振興ふれあい拠点施設完成予想パース



\*1 Staff, Yamashita Sekkei Inc. Structural Design Division

\*2 Chief, Yamashita Sekkei Inc. Structural Design Division

\*3 Sub manager, Yamashita Sekkei Inc. Structural Design Division

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できる応力伝達機構を有 していることである.ボルトなどの接合部を 用いた場合,接合で用いられる鋼材が,木材 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木 材側に変形やめり込みを生じる.そのため, 木材としての強度(耐力)を十分発揮する前 に接合部で破壊を起こしてしまい,システム の耐力が接合部で決まる場合が考えられる.

考案したシステムは、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.

ー方,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3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,ロッキングによる変形量 を抑制する.併せて,枠組み CT の4 隅には三角プレートを配置し, 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することを 目指している.

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 パネルにせん断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.

# 3. 実験の計画と結果

### 3.1. 耐震パネル実大実験

### 3.1.1. 実験計画

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 た載荷が可能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実大実験を行う.

図4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載荷を行い、各荷重時における荷重変 形関係を把握する.また、逐次枠組みCTおよびLVLパネルの変形 と歪みを計測し、全体変形および応力を把握する.

試験体は1ピースの耐震パネルとし,同一仕様で3体(No.1~3)用 意する.各試験体の製作状況,載荷状況等を考慮し,結果の考察を 行う.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に挟み込む.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.クロスラミナ層は,LVLパネルの寸法安定性,靱性及び 強度の確保を目的として設ける.





表 1	荷重載荷	スケシ	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				

#### 3.1.2. 実験結果

図 5~図 7 に試験体 No.1~3 の荷重と変形関係図を,写真 3 に試 験体 No.3 の終局時の写真を示す.それぞれの履歴曲線は,最終状況 が異なっているが,それぞれ除荷したポイントに下記のような違い があるためである。

No.1: せん断破壊した時点で除荷.

No.2: せん断破壊した後の状況を観察するため,変形 43mm 程度 まで載荷した後,除荷.

No.3: せん断破壊後の挙動を詳細に観察するため,変形 55mm 程 度で除荷した後,再載荷し,せん断破壊後のループ形状を確認.

また,どの試験体も 1/67 程度まではほぼ弾性挙動しているため, 1/67 時点の点と原点を結んだ等価剛性をそれぞれの図に表記した. 図 5~7,写真 3 及び実験過程から以下のことが確認できた.

1/67 程度までほぼ弾性挙動し、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こ さず、徐々に耐力低下し、変形性能を保持する。
- 図8の変形図に示すように、右加力時は耐震パネルの左上端Aと右下端B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。
- 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 て有効である。
- 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、試験終了時に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.
- No.2 試験体の等価剛性は他の2体と比べて小さい.これは, 試験体を作成した際,枠組み CT に LVL パネルをはめ込む 作業が難航し,納まるように LVL パネルの周囲を削ったこ とにより,隙間が増大したことが原因と考えられる. No.3 試験体も同様に作成の効率を上げるために周囲を削ったが, 最後にラグスクリューを2次締めすることにより,できる 限り LVL パネルと枠組み CT の密着性を図った.

## 3.2. ジベル要素実験

### 3.2.1. 実験計画

耐震パネル実大実験に先立ち,ジベル部の剛性および耐力を確認する目的で要素実験を行った. 試験計画図を図9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方向静的漸増載荷を行った.試験体は全3体とした.

### 3.2.2. 実験結果

No.1 試験体の試験結果の履歴曲線を図 10 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, 鋼製枠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に達する.

終局耐力は3体を平均すると概ね320kN程度で,破壊形式は写 真4に示すように,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.











図7 耐震パネル履歴曲線(No.3)





# 4. 耐震パネルの荷重変形曲線の推定

# 4.1. 実験結果に基づく応力伝達機構の仮定

試験体に設置したひずみ計の測定結果により, 図 11 に示す 1/67 変形時の局部的なモーメントお よび軸力を得,これを枠組みコーナーのウェブ三 角プレート端まで直線補間し,モーメント図を描 いた. これにより, 枠組み CT の縦枠には軸力は 生じるものの,曲げ・せん断はほとんど生じない ことがわかった.これは、枠組み CT と LVL パネ " ルがラグスクリュー等の効果で密着していること により、縦枠に曲げ変形がほとんど生じないこと 100 が原因と考えられる. つまり, 水平剛性が単純に パネルの剛性とラーメン枠組みの剛性の和で考え られないことが、本システムの特徴と言える.本 実験においては、LVL 四隅の支圧面と接する枠組 み部分や下枠の応力を、ひずみ計を設置しなかっ 520% たため把握できなかった. そのため, 全体を網羅 した明確な応力図を得るためには、更なる検討が 必要である.示した図は、試験体 No.3 の応力図で あるが、他の試験体でも同様な応力が得られてい る.以上から、実験により得られた本システムの 応力伝達機構の概要を基に、設計において簡便に モデル化を行うため、枠組みコーナーには局部的 に応力が生じていると考えられるものの,水平力 は 100%LVL パネルが負担し、枠組みは軸剛性の

12φ μVL t=80x2  $\leq = 1$  $\leq = +$ 図9 ジベル要素実験計画図 最大荷重:345.0kN -最大荷重時変位:1.56 」 水平荷重(kN) 245kN/mm 試験体No.1 水平変位(mm) 20 3.0 40 図10 ジベル要素実験荷重変形曲線(No.1) 写真4 ブロックせん断破壊状況写真 ジベル回転抑制剛性 K Ρ 並列バネ θ Q=3.5kN N=307kN(圧縮) せん断剛性 Q=3.1kN N=913kN(弓I張)  $K_{S}$ 端部めり込み剛性 せん断変形 回転変形 Kм 直列バネ  $\sim$ 

は100%LVL ハイルが負担し、枠組みは軸剛性の 図 1 1/ みをもつ要素とすることをモデル化の基本方針とする.

### 4.2. システム全体の水平剛性の仮定

ここで、システム全体としての水平剛性を考える. 耐震パネルに 生じる水平力は、前項に示した仮定に従い全て LVL パネルが負担で きると考える. LVL パネルの枠組み CT 内での挙動は、図 12 に示す ように大きくせん断変形成分と回転変形成分に分けられると考える.

せん断変形に抵抗する剛性は LVL パネルが持つせん断剛性であ る.回転変形に抵抗する剛性は,枠組み CT 端部に設けられている 三角プレートによる剛域範囲が大きな支圧力を受けることによって めり込む端部めり込み剛性と,LVL パネルの回転を抑制するために 設置されているジベルによる回転抑制剛性であると仮定する.端部 めり込み剛性と回転抑制剛性は,同一の回転変形に対して効くと考 えられるため,回転変形に対する剛性は相互の剛性を単純に足し合 わせる並列接続である.また,せん断変形と回転変形は同一の水平 力によって独立に変形すると考えられるため,直列接続である.こ

図 11 1/67 変形時応力図(No.3) 図 12 各変形成分の相互関係 れを式で表現すると下式となる.

$$\frac{1}{K_{H}} = \frac{1}{K_{S}} + \frac{1}{K_{M} + K_{J}}$$
(1)

ここで, *K<sub>H</sub>*は全体の水平剛性, *K<sub>S</sub>*は水平せん断剛性, *K<sub>M</sub>*は端部 めり込み剛性, *K<sub>J</sub>*はジベルによる回転抑制剛性であり, 各要素の剛 性算出法は 4.5 項に示す.

### 4.3. 簡便モデルへの置換

ここで、図 11 の応力図を模擬でき、式(1)で示される全体水平剛 性をもつモデルを提案する.水平力は LVL パネルで 100%負担する ことから、水平力伝達機構として図 13 に示す圧縮ブレース機構を考 える.本システムは、比較的大きな支圧面を確保することで端部 A から受けた水平力を LVL パネルの面内せん断力に置き換え、端部 B まで伝達する機構を有しているため、この応力伝達機構はモデル化 として比較的明快であると考えられる.

また、図11の応力図を見れば、上枠に生じているせん断力より6

倍程度大きい圧縮力が右側縦枠に生じ ている.そのため,圧縮ブレース機構 だけでなく,引張ブレースも有する機 構が想像できる.この応力は,主にジ ベルプレートを介して伝達されている と考えられるが,ラグスクリューや上 枠など多種の影響も考えられるため, 圧縮ブレース機構のように明快に抵抗 要素を特定することが難しい.本報告 でのモデル化の妥当性を細部にわたっ



て検証する必要はあるが、本検討では実験により得られた応力図を 設計として簡便に模擬できるモデルを提案することを目的とする. 以降は、図15に示すような全接合部がピンで接合された圧縮ブレー スと引張ブレースを有するトラス機構でモデル化できると仮定し、 推定式を導出する.

### 4.4. 圧縮・引張ブレースの剛性の考え方と算定法

枠組み CT 内に設置されている LVL パネルの変形成分は,図 12 に示すように大きくせん断変形成分と回転変形成分に分離した.ま た,ここで推定しようとしているのは枠組み CT の内部に設置され た LVL パネルの挙動(応力伝達)であるため,全体の剛性 K<sub>H</sub>は, LVL パネルの剛性のみを考えており,枠組み CT の剛性は考慮して いない.枠組み CT の剛性は,数値解析の際,形状のままモデル化 し軸剛性のみを考慮する.

次に, 圧縮ブレースと引張ブレースの剛性を求める.

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が、回転変形を伴うため、回転 に対する剛性を加味する必要がある.図 13 に示したように、圧縮ブ レース機構は、端部の支圧部が関係する.よって、圧縮ブレースの 剛性は、支圧力を受けた際に端部がめり込むことによって起きる端 部めり込み剛性と、パネル内を伝達する際に起きるせん断剛性を考 慮すればよいと考えられる.ここで、せん断変形バネと曲げ変形バ ネは直列であるため、圧縮ブレースの剛性は下式で表現できる.

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

ここで,Kcは圧縮ブレースの水平剛性である.

次に,引張ブレースの剛性について考える.図14に示したように, 引張ブレースが負担する応力は,主にジベルがLVLパネルの回転を 抑制する際に生じる応力であると考えられるが,先に示したように 様々な要素の影響が考えられるため,明確に要素を限定して表現す ることは難しい.本モデル化では,まず式(1)により全体の水平剛性 を求め,次に圧縮ブレースの剛性を式(2)で求める.今回の実験では 詳細な応力伝達機構が明らかにできなかった部分が含まれる引張ブ レースの剛性は,次式に示すように,全体の水平剛性 K<sub>H</sub>から圧縮 ブレースの剛性 K<sub>c</sub>を引くことで求めることとした.

$$K_T = K_H - K_C$$

(3)

 $P = A_S \cdot G \cdot \gamma = \frac{A_S \cdot G}{H} \cdot \delta_S \tag{4}$ 

ここで、Asはせん断用断面積、G はせん断弾性係数(=E/15)、yは せん断変形角,Hは高さ、&はせん断変形に対する水平変位を示す.

本式を本システムのパラメータに置換えて, せん断剛性 Ksを導く と次式となる.

$$K_S = \frac{t \cdot W \cdot G}{H} \tag{5}$$

ここで、tはLVL パネルの厚さ、WはLVL パネルの幅を示す.

LVL パネルの回転剛性は,図 17,18 を参考に枠組み CT の端部に めり込むことで起きる端部めり込み剛性 K<sub>M</sub> とジベルによって回転 変形を抑制する回転抑制剛性 K<sub>J</sub>を考える.

端部めり込み剛性 K<sub>M</sub>を求めるにあたって,図 17 に示すように, LVL パネルの上端と下端に P の水平力が加わったときにパネルに生 じる偶力モーメント M<sub>1</sub>と枠組み CT 端部の三角プレート補強範囲を めり込み範囲とした三角めり込みモーメント M<sub>2</sub>が釣合うと考える. 偶力モーメント M<sub>1</sub>は下式となる.

$$M_1 = P \cdot H$$
 (6)  
ここで、PはLVLパネルの上端と下端に受ける水平力を示す.

三角めり込みモーメントは次式より求める.

$$M_2 = \frac{H_p^3 \cdot t \cdot E_\perp \theta}{W} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{2W}{3H_p} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{3\left(H - H_p\right)}{2W}\right) \right) \right\}$$
(7)

本式は、三角めり込みモーメントを求める式<sup>1),2)</sup>に本システムで用 いるパラメータを代入したものである.ここで、 $H_p$ は高さ方向めり 込み範囲(端部三角プレート設置範囲)、 $E_{\perp}$ は全面横圧縮ヤング係 数 ( $E_{\perp}=E/4$ )<sup>3</sup>、 $\theta$ はめり込み回転角、めり込みに対する有効厚さ(文 献 1)、2)では $Z_0$ を使用)は、LVL パネルの幅 W とした.

式(7)中の $\theta$ は $\delta_{M}/H$ であることと、めり込み範囲は上下で2箇所あることを考慮して式(6)と式(7)を等置すると下式となり、端部めり込み剛性 $K_{M}$ を得る.

$$K_{M} = \frac{2H_{p}^{3} \cdot t \cdot E_{\perp}}{H^{2} \cdot W} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{2W}{3H_{p}} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{3\left(H - H_{p}\right)}{2W}\right) \right) \right\}$$
(8)

次にジベルによる回転抑制剛性 K<sub>J</sub>を考える.はじめに、図 18 を 参考に枠組み CT との鉛直変位差 & とジベル 1 箇所あたりの負担応 力 P<sub>vi</sub>の関係を次式に示す.

$$P_{vi} = K_{Ji} \cdot \delta_v$$

(9)

ここで, K<sub>ň</sub>はジベル1箇所あたりの剛性を示す. 式(9)は縦方向の応力と変形関係を示しているため, 偶力モーメン

> トと図 18 に示す回転角0を考慮して、 横方向の応力と変形関係に換算すると、 次式で示される見かけ上の水平剛性 K<sub>J</sub>を得る.

$$K_J = \frac{W^2}{2H^2} \sum K_{Ji} \tag{10}$$

# 4.6. 各変形要素の耐力算定

荷重変形関係を推定するためには, 各変形成分の剛性の他,耐力も必要と なってくるため,ここでは耐力の算定 法を示す.



4.5. 各変形成分の剛性の算定法

LVL パネルのせん断変形と水平力の関係は、次式で表現できる.



LVL パネルの水平方向せん断終局耐力は,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し,次式で算定する.

$$Q_{SU} = \frac{W}{H} \cdot H \cdot t \cdot F_{SU} = W \cdot t \cdot F_{SU}$$
(11)

ここで、F<sub>SU</sub>は繊維方向の終局せん断応力度を示す.

次に、端部めり込み耐力を示す.この変形成分は、脆性的な破壊 形式を示さないため、終局耐力は算定せず降伏耐力のみを考慮し、 降伏後の剛性で無限に耐力が上昇するものと仮定する.降伏後の剛 性は、端部めり込み剛性の初期剛性に対して1/7<sup>1)</sup>と仮定する.降伏 耐力は、式(12)<sup>1),2)</sup>で降伏回転角*θ*、を算定し、その回転角に達する時 点の全体の水平変位を、式(1)を用いて式(13)のように求め、圧縮ブ レースの剛性*K*cを式(14)のように掛けることでせん断力を算定する.

$$\theta_{y} = \frac{W \cdot F_{m}}{H_{p} \cdot E_{\perp} \cdot \sqrt{C_{x} \cdot C_{y} \cdot C_{xm} \cdot C_{ym}}}$$
(12)

ここで、 $F_m=0.8F_{cv}$ 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り、文献 1)又は 2)を参考に求める.

$$\delta_{My} = \frac{K_S + K_M + K_J}{K_S} \cdot \theta_y \cdot H \tag{13}$$

$$Q_{M_V} = K_C \cdot \delta_{M_V} \tag{14}$$

最後に、回転抑制剛性に対する終局耐力を示す.ジベル部は、3 章に示したように終局状態はブロックせん断破壊を示し、それまで はほぼ弾性で挙動することから、終局耐力のみを考慮する.終局耐 力は、ジベル1箇所あたりの終局耐力を用いて、下式で算定する.

$$Q_{JU} = \frac{W}{H} \cdot \sum Q_{JUi} \tag{15}$$

ここで、Q<sub>IUi</sub>はジベル1箇所あたりの終局耐力である.

# 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, 圧縮・引張ブレースの剛性と耐力を用いて静的荷 重増分解析を行い, 推定した剛性, 耐力の妥当性を検証する. 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. LVL パネルのせん断終局耐力後とジベル部の終局耐力後は, 便宜的に初期剛性に対して低下率を 1/1000 とした.

静的荷重増分解析によって得られた P-δ曲線を図 19の黒実線に示 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,全ジベル部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、解析より実験値を模擬できるように F<sub>SU</sub>=3.8 N/mm<sup>2</sup>と設定した.この値は、繊維直行方向の終局せん断応力度(材 料強度)が、5.0N/mm<sup>2</sup>であるため、その約75%程度の耐力となる.

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



# 図19 解析値と実験値の比較

擦などの不確定要素による影響で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、仮に1つ目の折れ点が No.1 と No.3 の 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(図19黒点線).これを理想的なスリップと考 えれば、等価なガタがこの程度あったのではないかと考えられる. No.2 試験体の場合は同様に3.0mm 程度のガタ(図19黒一点鎖線) と考えられる.

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,なだらかな剛性低下を起こしていると考えられる.

以上,実験より得られた応力図を参考に,耐震パネルの応力状態 を模擬できそうな簡便なモデルを提案し,推定した荷重変形曲線と 実験値の比較を行い,比較的良い精度で推定可能であることがわか った.

# 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、限定的な実験結果ではある が、提案した耐震システムが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.また、 提案したシステムは木質材料の耐力を十分に発揮させることができ、 大規模建築物に対応できる保有耐力を確認できた.

今後,本報告で用いた,設計で使いやすい簡便なモデル化手法の 細部にわたる妥当性の検証を行うともに本システムを応用し,大規 模木質建築物の普及に貢献できればと考えている.

### 謝辞

本開発にあたり, 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幹雄准教授および千葉実験場の関係者の 方々, 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 の協力のもと行うことができた. ここに記して感謝の意を表す.

### 参考文献

- 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法 -, 2006.12
- 2) 日本建築学会:木質構造接合部設計マニュアル, 2009.11
- 3)川元満夫,藤田和彦,李 元羽,宮武 敦:直交単板を用いた単板積層材の性能 その1強度性能,日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸),pp.19~20,2010.9