繰り返し载荷を受けるモーメント抵抗型集成材接合部の性能評価

PERFORMANCE EVALUATION OF GLULAM MOMENT RESISTING JOINT SUBJECTED TO REPEATED CYCLIC LOADING

山崎義弘 — * 1 清水 舜 — * 2
坂田弘安 — * 3

Yoshihiro YAMAZAKI — * 1 Shun SHIMIZU — * 2
Hiroyasu SAKATA — * 3

キーワード：
繰り返し载荷, 性能劣化, モーメント抵抗接合, 木質ラーメン,
感度解析

Keywords:
Repeated cyclic loading, Performance deterioration, Moment resisting joint, Wooden frame, Sensitivity analysis

Fatigue behavior of glulam moment resisting joint subjected to repeated cyclic loading has not been well clarified. In addition, the accuracy of conventional design formulae for rotational stiffness and yield/ultimate moment should be discussed especially related to the method to obtain material properties. In this research, repeated cyclic loading tests were conducted for drift pinned joints with insert-steel gusset plate and tensile-bolted joint. Deterioration of strength and energy dissipation is focused on. The dependency of the performance on the material properties is also investigated through sensitivity analysis.

1. はじめに

木質構造の耐力壁やモーメント抵抗接合部など、水平力を負担する部材の実験では、小振幅から振幅を3サイクルずつ漸増させる繰り返し载荷が行われるが、1/50rad以上の大変形域での繰り返しがあり行われていないため、大地震経験後の継続使用性や安全性の確保の検証に必要なデータが十分にそろっているとは言い難い。著者らはこれまで軸組工法の筋かい耐力壁と合板耐力壁を対象に、多数回の繰り返し変形履歴を与える静的载荷実験や振動台実験を実施し、繰り返し载荷で劣化する包絡線の評価、時刻歴応答解析用の復元力特性のモデル化を行ってきた^{1),2)}。また、文献3では2種類の载荷履歴の実験により、耐力劣化評価式に関わるパラメータを効率的に取得できることを示した。本論では中大規模木造建築物への展開を意図して、モーメント抵抗接合部を対象とした大変形域での繰り返し载荷実験による検証を行う。

モーメント抵抗接合部においては、回転剛性や降伏・終局モーメントを求める算定式が指針類⁴⁾で整備されているが、これは上述の耐力劣化とは無関係の、単調载荷時の包絡線（基準包絡線と呼ぶ）の特性値に対応すると考えられる。繰り返しによる耐力劣化は、耐力壁・接合部などの、実際に用いられる形態での载荷実験により評価する必要があるが、基準包絡線の評価は理論式等で精度良く評価できることが望ましい。一般に設計で用いられる材料特性値は安全側の配慮として低めに設定されがちであるが、建築物の大規模化にともない2次設計や保証設計が必要になると、必ずしも低めの強度を与えればよいわけではなく、ある程度実態性能を把握しつつ、各部の強度バランスを設定することが望まれる。そのような意味で、既往のモーメント抵抗接合部の特性値の算定に用いるべき材料特性

値やその評価精度への影響は、十分に吟味される必要がある。

以上より、本論ではモーメント抵抗接合部として抵抗要素の異なる鋼板挿入ドリフトピン接合と引きボルト接合の2種類を対象とし、それぞれについて繰り返し载荷による性能劣化挙動の把握と評価式の適応、および材料特性値の算定法の違いが接合部特性値の既往算定式の精度におよぼす影響把握と感度解析を行う。

2. 接合部曲げ実験

2. 1 実験概要

図1にセットアップ及び計測計画、図2に接合部詳細、表1に集成材と接合具の材料特性を示す。試験体数は鋼板挿入ドリフトピン接合試験体（DP試験体）、引きボルト接合試験体（TB試験体）それぞれ4体、計8体とした。事前計算⁴⁾により、DP試験体は柱側の矩形配置したドリフトピンは弾性範囲に収め、梁側の円形配置したドリフトピンを降伏させるように設計した。TB試験体は引きボルト降伏時にはめり込み降伏等が生じず、終局まで母材破壊しないよう設計した。

载荷は試験体を90度回転させた状態で反力フレームにセットし、梁端部に水平力 P を与えることで接合部に曲げモーメント M を与え、梁の部材角 R で制御した。TB試験体の引きボルトにはひずみゲージを貼付し、载荷前に初期ひずみ 30μ （ボルト軸力で2.3kN程度）を与えた。 M, R , 柱梁回転角 θ は次式のように表される。

$$M = Pl \quad , \quad R = \frac{(\delta_{H1} + \delta_{H2}) - (\delta_{H3} + \delta_{H4})}{2L}$$
$$\theta = \frac{(\delta_1 + \delta_3) - (\delta_2 + \delta_4)}{2d} \quad (\delta_{H*}, \delta_*, d, l, L \text{ は図1参照}) \quad (1a-c)$$

¹⁾ 国立研究開発法人建築研究所 主任研究員・博士（工学）
（〒305-0802 茨城県つくば市立原1）

²⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系修士課程 大学院生

³⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 教授・工博

¹⁾ Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr.Eng.

²⁾ Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

³⁾ Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

図3に示すように、荷重サイクルは各接合形式について終局変形繰返し荷重を2体(U-1,U-2)、漸増荷重①を1体(G1)、漸増荷重②を1体(G2)とした。終局変形繰返し荷重は、最大荷重の80%に荷重が低下するまで、もしくは $R=1/13\text{rad}$ に達するまで片振りで単調に荷重し（この時の R を終局変形 R_u とする）、 $R=\pm R_u$ を繰返す荷重とした。漸増荷重は R_u に対する振幅比 $\Delta(=R/R_u)$ を繰返し漸増する荷重であり、文献3で示したように耐力劣化評価式に関わるパラメータを効率的に取得することができる。①と②では各振幅比 Δ における繰返し回数を3回と5回で変化させた。なお、①の $\Delta=0.2$ 以降は文献5の「接合部の標準試験法」にも紹介されているISO16670の加力履歴と類似する。

2. 2 実験結果

破壊性状は、DP試験体では全ての試験体で梁側ドリフトピン材中央部で破断が見られた。DP-U,G2試験体では全てのドリフトピンが破断した。TB試験体では荷重サイクルに関わらず梁木口の柱へのめり込み、引きボルトの伸びが見られた。終局時の伸びは3%程度と破断伸び（約28%）に対してかなりの余裕が確認された。なお、後述の計算による終局時の伸びは約3.6%であった。

図4にモーメント M -回転角 θ 関係を示す。図中に示す基準包絡線とは単調荷重時の包絡線を表し、DP試験体ではU-1とU-2の包絡線の平均、TB試験体ではU-2の包絡線とした。DP-U試験体では最大変形時である梁の部材角 $R=1/13\text{rad}$ までモーメントが低下しなかったが、DP-G1試験体で $\Delta=1.0$ サイクルで、DP-G2試験体では $\Delta=0.8$ サイクルで低下した。 M - θ 関係の包絡線が $\Delta=0.2$ の荷重（ $\theta=1/60\text{rad}$ 程度）で第1勾配から第2勾配に移行していることから、接合部の塑性率換算で4程度以上の領域では、それまでに経験した繰返し荷重による損傷次第で耐力低下が生じ得る、と言える。TB試験体では荷重サイクルに依らず $\Delta=1.0$ までモーメントが上昇し続

表1 集成材と接合具の材料特性

（比重、ヤング係数、強度は実測値）

木材	樹種	等級	比重	ラミナ厚[mm]	ヤング係数[N/mm ²]	
					繊維平行方向	繊維直角方向
柱	オウシュウ	E105-F300	0.520	約30	1.116 $\times 10^4$	379.7
梁	アカマツ	対称異等級集成材	0.528		1.213 $\times 10^4$	—

金物	材料	断面寸法	ヤング係数[N/mm ²]	降伏強度[N/mm ²]	引張強度[N/mm ²]
ドリフトピン	SS400相当	$\phi 12$	2.202 $\times 10^5$	525.4	586.4
引きボルト	ABR400	M22	2.148 $\times 10^5$	302.8	440.5

図3 荷重サイクル（梁の部材角で制御）

図4 M - θ 関係

図5 耐力劣化曲線 $f(\Delta)$ と等価減衰定数 h_{eq} のサイクルごとの推移

（(a), (b), (c)は漸増荷重、(d)は終局変形繰返し荷重の結果から算出）

けた。引きボルト接合部は木材のめり込みが圧縮のみを、引きボルトが引張のみを負担するため除荷から変形0まで荷重が生じないスリップ型の復元力特性を示した。

図5に各振幅比における耐力劣化曲線 $f(\Delta)$ ¹⁾と等価減衰定数 h_{eq} のサイクルごとの推移を示す。 $f(\Delta)$ は振幅比 Δ におけるモーメントを基準包絡線のモーメントで基準化した値、 h_{eq} は M - θ 関係から得られる1サイクルの損失エネルギー ΔW 、等価剛性による弾性ひずみエネルギー W を用いて算出した。DP試験体ではドリフトピンの破断

図1 セットアップ及び計測計画

図2 接合部詳細

が確認されなかった $\Delta=0.4, 0.6$ において耐力は緩い勾配で減少し、 h_{eq} は 2 サイクル目以降、約 0.15 に収束した。ドリフトピンの破断が生じた $\Delta=0.8, 1.0$ において耐力は指数関数的に単調減少した。 h_{eq} は 2 サイクル目以降も減少し、特に $\Delta=1.0$ では 7 サイクル目に約 0.04 に収束した。TB 試験体は振幅比に依らず耐力劣化はほぼ見られなかったが、 h_{eq} は 1 度の繰返しにより収束し、約 0.02 と低い値を示した。DP 試験体より全体的に h_{eq} が低いことも指摘できる。

3. 要素試験

写真 1 に各要素試験セットアップ、図 6、表 2 に要素試験結果を示す。また、5 章の算定で使用する材料特性の基準値を併せて示す。

全面圧縮試験では接合部曲げ実験で用いた試験体から $150 \times 450 \times 300 \text{ mm}$ の試験片を切り出し加力した。部分圧縮試験では $150 \times 450 \times 650 \text{ mm}$ の試験片を切り出し、余長が 250 mm となるように材中央部を加力した。いずれの試験においても弾性剛性と塑性剛性を最小二乗法で求め、バイリニアで表した時の交点を降伏点とした^{注 1)}。支圧試験は繊維方向、繊維直角方向それぞれについて外層ラミナ（材せい方向の両端のドリフトピンがかかるラミナ）、内層ラミナ（材せい方向の中央のドリフトピンがかかるラミナ）試験体を用意し、径 12 mm の丸鋼を用いて試験体半孔を支圧した。載荷荷重を見かけの支圧面積で除したものを支圧応力とし、その最大値を $\sigma_{\max}$ として、 $0.3\sigma_{\max}$ と $0.5\sigma_{\max}$ を結んだ直線の勾配を面圧剛性、その直線を丸鋼径の 5% オフセットしたときの曲線との交点を降伏点とし、その応力度を各試験体の支圧強度とした。ただし、後述の計算におい

て外層ラミナと内層ラミナで特性値を区別するのは煩雑なため、接合部曲げ実験で用いた柱・梁のドリフトピン位置を考慮し、外層ラミナと内層ラミナに位置するドリフトピン本数から加重平均によって一つの値として代表させた場合の支圧強度及び面圧剛性も表 2 に示した。後述の計算ではこの加重平均値を用いた。

ドリフトピン、引きボルトの引張試験は万能試験機により加力した。ヤング係数は弾性域の 2 点間を結んだ直線の勾配とした。降伏強度はドリフトピンでは降伏棚が見られなかったため、0.2% オフセット耐力、引きボルトでは下降伏点とした。ドリフトピンの曲げ試験は引張試験から算出した全塑性モーメントとの関係を求めるために行った。試験は 3 点曲げ試験とし、支点間距離は接合部曲げ実験の条件から EYT 式⁵⁾を用いて算出した際に、めり込み応力の正負が入れ替わる反曲点距離である 110 mm とした。

表 2 の基準値と実験値の違いを俯瞰すると、実験値は集成材の繊維方向支圧強度、ドリフトピンの降伏強度で大きく上回り、集成材のめり込み剛性、面圧剛性で大きく下回る結果となった。集成材の繊維直角方向支圧強度で基準値が実験値をやや上回るが、図 6(c) より基準値はある程度塑性変形が進行した後の強度に対応するとも理解できる。なお、文献 5 の基準支圧強度によれば、集成材の支圧強度は樹種群を J1 として繊維方向で 25.4 N/mm^2 、繊維直角方向で 12.7 N/mm^2 であり、どちらも実験値を下回っている。集成材のめり込み剛性において実験値が基準値を下回ったのは、接触面近傍の変形集中の影響等も考えられる。

4. 耐力劣化評価式の適応と精度検証

接合部曲げ実験より作成した耐力劣化評価式^{1), 2)}を以下に示す。

$$f(\Delta, n) = R(\Delta^{-}) \left(1 - f_{\infty}(\Delta) \right) \prod_{i=1}^n \left(\phi(\Delta, \Delta_i) e^{-\lambda(\Delta_i)} + 1 - \phi(\Delta, \Delta_i) \right) + f_{\infty}(\Delta) \quad (2)$$

$$\text{DP 試験体: } f_{\infty}(\Delta) = \begin{cases} -0.99\Delta + 1 & (0 \leq \Delta \leq 0.83) \\ 0.18 & (0.83 < \Delta \leq 1) \end{cases}$$

$$\lambda(\Delta) = \begin{cases} 0.19 & (0 \leq \Delta \leq 0.6) \\ 0.55\Delta - 0.14 & (0.6 < \Delta \leq 0.8) \\ 0.30 & (0.8 < \Delta \leq 1) \end{cases} \quad (3a-d)$$

$$R(\Delta^{-}) = \begin{cases} 1 & (0 \leq \Delta^{-} \leq 0.2) \\ -0.14\Delta^{-} + 1.03 & (0.2 < \Delta^{-} \leq 1) \end{cases}$$

$$\phi(\Delta, \Delta_i) = \begin{cases} (1 + 1.72\Delta^{13.1}) \left(\frac{\Delta_i}{\Delta} \right)^{4.70} \\ \text{ただし、}\phi > 1 \text{ のとき}\phi = 1 \end{cases}$$

$$\text{TB 試験体: } f_{\infty}(\Delta) = \begin{cases} -0.30\Delta + 1 & (0 \leq \Delta \leq 0.15) \\ 0.94 & (0.15 < \Delta \leq 0.64) \\ -0.12\Delta + 1.03 & (0.64 < \Delta \leq 1) \end{cases}$$

$$\lambda(\Delta) = 0.39 \quad (4a-d)$$

$$R(\Delta^{-}) = 0.96$$

$$\phi(\Delta, \Delta_i) = \begin{cases} 0 & (0 \leq \frac{\Delta_i}{\Delta} < 1) \\ 1 & (\frac{\Delta_i}{\Delta} = 1) \end{cases}$$

$f(\Delta, n)$: n サイクル目の耐力を基準包絡線の同一変形時の耐力で基準化したもの、 Π : 相乗記号、 Δ : 終局変形 R_u で基準化した振幅比、 n : 過去に経験した振幅比 Δ もしくは定振幅のサイクル数、 $R(\Delta^{-})$: 検討対象とは異符号側の経験振幅比（絶対値）が Δ^{-} のときの耐力劣化の調整係数（ $\Delta^{-} \geq \Delta$ のときのみ考慮）、 $f_{\infty}(\Delta)$: 振幅比 Δ での $f(\Delta, n)$ の収束値、 $\lambda(\Delta)$: 振幅比 Δ での耐力劣化の速度を決める係数、 $\phi(\Delta, \Delta_i)$: 振幅比 Δ のときに、過去に経験した i 番目の振幅比 Δ_i から振幅比 Δ に伴う損傷の低減係数

図 6 要素試験結果

表 2 要素試験結果

	打音試験	全面圧縮試験	部分圧縮試験
	ヤング係数	めり込み剛性	めり込み強度
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
基準値	$E_0=10500$	$E_{90}=420(=E_0/25)^{*1}$	3.0^{*2}
実験値 (平均)	柱 1.116×10^4 梁 1.213×10^4	379.7	3.701

支圧試験		繊維方向		繊維直角方向	
		面圧剛性	支圧強度	面圧剛性	支圧強度
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
基準値		64.66 ^{*3}	30.31 ^{*3}	19.02 ^{*3}	19.81 ^{*3}
実験値 (平均)	外層ラミナ	50.21	41.91	10.66	16.39
	内層ラミナ	26.01	32.74	9.92	14.69
	柱側(加重平均)	43.72	41.96	10.26	16.13
	梁側(加重平均)	48.01	39.46	10.11	15.16

	ドリフトピン引張試験			引きボルト引張試験	
	ヤング係数	降伏強度	全塑性モーメント	ヤング係数	降伏強度
	N/mm ²	N/mm ²	Nm	N/mm ²	N/mm ²
基準値	2.050×10^5	235	67.68	2.050×10^5	235
実験値 (平均)	2.202×10^5	525.4	147.6	2.148×10^5	302.8

*1 木造ラメンの評価方法・構造設計の手引き⁴⁾より引用 *2 木質構造設計規程・同解説(2006)⁹⁾より引用
*3 平井式⁹⁾より算出 *4 小松式⁷⁾より算出 *5 Eurocode 5⁹⁾における設計式より算出

各パラメータは終局変形繰返し載荷 (U-1, U-2) と漸増載荷② (G2) の結果を用いて最小二乗法で同定して求めた。各振幅で基準包絡線に式(2)の劣化関数 $f(\Delta, n)$ を乗じれば劣化後の包絡線が得られる。なお、包絡線を描く際は文献 2 の付録 B の近似計算を用いることで計算量を大幅に削減できる。図 7 に耐力劣化が見られた DP 試験体の漸増載荷包絡線と評価式による予測値を示す。大変形時に多少の誤差はみられたが、概ね良い精度で再現できた。TB 試験体は繰返しによる劣化が見られなかったため、割愛する。

図 7 耐力劣化評価式による予測値と実験値

5. 回転剛性と降伏・終局モーメント算定式の妥当性検証

5. 1 各特性値の算定方法

・鋼板挿入ドリフトピン接合試験体

まず、柱梁それぞれの接合部について、文献 9 の「鋼板挿入ドリフトピン式モーメント抵抗接合部の保有耐力設計」に従って、回転剛性及び降伏・終局モーメントの算定を行う。ただし、ドリフトピンと鋼板の先穴のクリアランス等に起因した剛性低減係数 C_f は 1/3 とした¹⁰⁾。次に接合部全体 (柱梁接合面) での各特性値を求める。回転剛性 K_θ , 降伏・終局モーメント M_y, M_u は以下のように求めた。

$$\frac{1}{K_\theta} = \frac{1-l_1/l}{bK_\theta} + \frac{1-l_2/l}{cK_\theta} \quad (5)$$

$$M_y = {}_bM_y / (1-l_1/l), \quad M_u = {}_bM_u / (1-l_1/l) \quad (6),(7)$$

ここに、左下添字の「 b 」, 「 c 」はそれぞれ梁側・柱側ドリフトピン群の図心位置での回転剛性やモーメントを表す。 l, l_1, l_2 は図 8 に示す部分の長さである。

また、上記の終局モーメントは全ドリフトピン降伏時のモーメントであり、その後の応力上昇を考慮していない。そこで、3 章の要素実験結果を踏まえ、明確な応力上昇を示す、集成材繊維直角方向の支圧強度とドリフトピンの曲げ耐力について、次のように評価する。ドリフトピンの集成材へのめり込みは三角形状に生じるため、繊維直角方向支圧試験における 5.5mm めり込み時は、各梁側ドリフトピンの繊維直角方向最大変位 (すべり量) が 11mm に相当すると考える。各ドリフトピンの繊維直角方向変位の平均値が 11mm となる時点での梁側接合部回転角はドリフトピン配置から幾何学的に約 0.059rad となり、これに柱側接合部の弾性回転角を足し、全体で 0.067(1/15)rad に相当する。また、ドリフトピンの曲げ試験における支点位置は、接合部曲げ実験時のドリフトピン変位に概ね対応させており、0.067rad においてドリフトピンは最大曲げモーメントに達していると考えられる。

以上より、降伏後の応力上昇を考慮する際は、接合部回転角 1/15rad 時に対応するものとして、集成材の繊維直角方向支圧強度は 5.5mm めり込み時の支圧強度、ドリフトピンの曲げ耐力は要素実験の最大曲げモーメントを用いた。なお、この計算において、繊維直角方向支圧強度は 15.16N/mm² から 22.0N/mm² (1.45 倍)、ドリフトピンの曲げ耐力は 147.6kNm から 206.7kNm (1.4 倍) と上昇した。

図 8 接合部モーメント図

・引きボルト接合試験体

文献 4 に従って、回転剛性、降伏・終局モーメントを算定する。ただし、集成材繊維直角方向のめり込み強度は、余長が 150mm 以上で降伏応力度の上昇が見込めない¹¹⁾ ため、部分圧縮試験のめり込み強度をそのまま用いた。また、降伏モーメントの算定は文献 12 を参考に軸部降伏、ねじ部降伏の 2 通りを示した。

5. 2 実験値と算定値の比較

図 9, 表 4 に各特性の算定値と実験値の比較を示す。算定値は基準値、要素試験値を用いた 2 パターンを示した。DP 試験体、TB 試験体のいずれの場合も要素試験を考慮した算定値は概ね精度良く評

価された。DP 試験体の K_θ については、5.1 節で述べた剛性低減係数 C_j によるところが大きく、本論の試験体では実験値より 20%程度低めとなった。

基準値による算定について、DP 試験体においては、ドリフトピンの降伏強度や支圧強度の影響から、 M_y, M_u は実験値より 30%程度低めであった。TB 試験体では K_θ は精度よく、 M_y, M_u は実験値より 20%程度低めに評価された。表 2 で示したように、本試験体では特に鋼材の降伏強度で基準値と実験値に比較的に大きな相違が見られたが、特定の要素で基準値と実験値に乖離があっても、接合部評価では他の特性値の影響もあり、誤差が緩和されることがうかがえる。

DP 試験体の降伏後の応力上昇は、前節で述べた方法による 1/15rad 時耐力 (図 9(a)赤破線) が実験値に概ね対応した。以上を踏まえると、基準値による算定でも設計上妥当な算定値は得られるが、保証設計などを考えると、材料特性値の実態を反映することや、降伏後の応力上昇を考慮すること等も必要と考えられる。各材料特性値の感度については、次節にて再度分析する。

表 4 各特性の算定値と実験値

a)DP 試験体				
	実験値	算定値		
		基準値	要素試験考慮	
K_θ [kNm/rad]	5056	5911	3998	
M_y [kNm]	62.66	44.01	64.47	
M_u [kNm]	89.65	62.52	78.81	

b)TB 試験体				
	実験値	算定値		
		基準値	要素試験考慮	
K_θ [kNm/rad]	5727	5746	5638	
M_y [kNm]	43.94	ねじ部降伏	37.30	47.87
		軸部降伏	39.45	50.63
M_u [kNm]	46.88	39.45	50.63

図 9 各特性の算定値と実験値

5.3 感度解析

接合部の特性値の算定に用いる材料特性値が回転剛性、降伏・終局モーメントの算出結果に与える影響を把握するために感度解析を行う。なお、ドリフトピン接合部では主材厚とドリフトピン径の比 (本論の試験体では約 12) も重要なパラメータであるが、ここでは材料特性値の影響のみに着目した。表 5 に解析パターンを示す。DP 試験体ではドリフトピンの降伏強度を下限値の 235N/mm² から要素試験値よりもやや大きい 550N/mm² まで変化させた場合を Case1、集成材の面圧剛性と支圧強度を同時に 0.5~2 倍に変化させた場合を Case2 とした。TB 試験体では引きボルトの降伏強度を下限値の 235N/mm² から引張強度の下限値の 400N/mm² まで変化させた場合

を Case1、集成材のヤング係数とめり込み強度を同時に 0.5~2 倍に変化させた場合を Case2 とした。

図 10 に解析結果を示す。添え字 0 は要素試験結果を考慮した算定値 (5.2 節で示した算定値) を表す記号とする。縦軸はパラメータを変化させた際に得られる K_θ, M_y, M_u をそれぞれ $K_{\theta 0}, M_{y0}, M_{u0}$ で基準化した値とした。ただし、TB 試験体の M_y はねじ部降伏時のモーメントとした。横軸は Case1 では降伏強度を σ_{y0} で基準化した値、Case2 では要素試験値に乗じる倍率 (α とする) とした。

DP 試験体では Case1 で降伏強度が 0.5 倍となるとき降伏・終局モーメントは 0.7~0.8 倍となった。さらに、単位接合部繊維平行方向の降伏モードが III (集成材のめり込み降伏とドリフトピンの鋼板位置での曲げ降伏が生じる) ⁵⁾ の範囲にあるときの影響は降伏モードが IV (集成材のめり込み降伏とドリフトピンの鋼板位置、集成材位置での曲げ降伏が生じる) の範囲にあるときよりも小さいことが分かる。Case2 で面圧剛性、支圧強度が 0.5 倍となるときは回転剛性、降伏・終局モーメントは約 0.6 倍に、2 倍になる時は 1.4~1.7 倍となった。また、Case1 とは異なり、降伏モード IV のときパラメータの影響が小さいことが分かる。このように、DP 試験体では降伏モードにより多少傾向は異なり、接合部の特性値の変化はモード IV であればドリフトピンの降伏応力度や集成材の面圧剛性・支圧強度の変化率の平方根に比例する程度である。モード III であればドリ

表 5 感度解析パターン

鋼板挿入ドリフトピン接合		ドリフトピン		集成材	
		降伏強度 σ_y (N/mm ²)		面圧剛性	支圧強度
		Case1	Case2	要素試験	要素試験
		235~550	525.4 (要素試験)	要素試験*0.5~2	要素試験*0.5~2

引きボルト接合		引きボルト		集成材	
		降伏強度 σ_y (N/mm ²)		ヤング係数	めり込み強度
		Case1	Case2	要素試験	要素試験
		235~400	302.8 (要素試験)	要素試験*0.5~2	要素試験*0.5~2

*ヤング係数とめり込み強度は同時に変化

図 10 感度解析結果

フトピンの降伏応力度の影響は小さく、集成材の面圧剛性・支圧強度に対し接合部の特性がほぼ比例する。

一方、TB 試験体では Case1 で引きボルトの降伏強度の変動がそのまま降伏・終局モーメントに現れることが分かる。Case2 で集成材のヤング係数、めり込み強度を変化させた場合は値が大きくなるほど回転剛性への影響が若干小さくなる事が分かる。いずれのケースにおいても、引きボルトが先行降伏する範囲内では、引きボルトの降伏応力度が接合部の降伏・終局モーメントを、集成材のヤング係数が接合部の回転剛性を決定づける主要パラメータとなることが分かる。DP 試験体と異なり、TB 試験体では特定の材料特性値に接合部の特性値が影響されやすい。

6. おわりに

得られた知見を以下にまとめる。

- ・鋼板挿入ドリフトピン接合では、接合部の塑性率で 4 程度以上の領域において、それまでに経験した繰り返し载荷による損傷次第で、耐力低下が生じ得る。一方、引きボルト接合では、繰り返し载荷による耐力低下が生じなかった。
- ・繰り返し载荷時の等価減衰定数は、鋼板挿入ドリフトピン接合でドリフトピンの破断が生じない程度の変形レベルでは、2 サイクル目以降に約 0.15 に収束した。ドリフトピンの破断が生じるような大変形域（接合部の塑性率で 4 程度以上）では、サイクル数に応じて単調減少を示した。引きボルト接合では 2 サイクル目以降は約 0.02 と低い値を示した。
- ・文献 3 と同様に 2 種類の载荷履歴の実験から耐力劣化評価式のパラメータを同定することで、単調载荷時の包絡線から繰り返し载荷による劣化後の包絡線を精度よく予測することができた。
- ・接合部の回転剛性や降伏・終局モーメントを求める既往の算定式は、鋼板挿入ドリフトピン接合試験体、引きボルト接合試験体とも、要素試験で得られた材料特性値を用いると概ね精度良く実験値に対応した。ただし、鋼板挿入ドリフトピン接合における初期剛性の評価は、ドリフトピンと鋼板の先穴のクリアランス等に起因した剛性低減係数¹⁰⁾によるところが大きい。一方、要素試験結果を参照せず、基準値・規格値のみを用いた降伏・終局モーメントの算定値は、実験値より 20～30%程度低めであった。
- ・鋼板挿入ドリフトピン接合では全ドリフトピンが降伏後も応力上昇が生じる。これを予測するには、集成材の繊維直角方向支圧強度やドリフトピンの曲げ耐力など、明確な応力上昇を示す要素について応力上昇後の強度を算定式に用いることで対応できる。
- ・鋼板挿入ドリフトピン接合（主材厚とドリフトピン径の比は約 12）における接合部の特性値の変化は、モード IV であればドリフトピンの降伏応力度や集成材の面圧剛性・支圧強度の変化率の平方根に比例する程度であり、モード III であればドリフトピンの降伏応力度の影響は小さく、集成材の面圧剛性・支圧強度に対し接合部の特性がほぼ比例した。一方、引きボルト接合では引きボルトが先行降伏する限り、引きボルトの降伏応力度が接合部の降伏・終局モーメントを、集成材のヤング係数が接合部の回転剛性を決定づける主要パラメータであった。

注 1) 得られた σ - ε 関係において、最大応力点から $\varepsilon = 0.025/0.015$ （全面圧

縮／部分圧縮）までの区間（降伏後に概ね一定の勾配になったと判断される領域）のデータ群から最小二乗法で塑性剛性を求め、その近似直線と σ 軸の交点応力を σ_0 とする。次に、 $0.1\sigma_0$ から $0.4\sigma_0$ までの区間のデータ群から最小二乗法で弾性剛性を求め、ここで求まる弾性時の近似直線と塑性時の近似直線の交点応力を降伏応力とした。

参考文献

- 1) Yamazaki, Y., Kanda, K. and Sakata, H. : Strength and Energy Dissipation of Timber Shear Walls Subjected to Arbitrary Deformation History : Study on fatigue behavior of timber structures subjected to repeated earthquake motions : Part1, Journal of Structural and Construction Engineering(Transactions of AIJ), No.765, pp.1443-1451, 2019.11 (in Japanese)
山崎義弘, 神田健吾, 坂田弘安 : 任意変形履歴を受ける木造耐力壁の耐力およびエネルギー吸収性能 繰り返し地震動を受ける木質構造物の劣化挙動に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 765 号, pp.1443-1451, 2019.11
- 2) Yamazaki, Y., Nakanishi, S. and Sakata, H. : Proposal of Hysteresis Model of Timber Shear Walls Considering Fatigue Behavior and Application to Equivalent Linearization Technique : Study on fatigue behavior of timber structures subjected to repeated earthquake motions : Part2, Journal of Structural and Construction Engineering(Transactions of AIJ), No.781, pp.425-435, 2021.3(in Japanese)
山崎義弘, 中西理, 坂田弘安 : 繰り返し载荷による耐力劣化を考慮した木造 耐力壁の復元力特性モデルの提案と等価線形化手法への適用 繰り返し地震動を受ける木質構造物の劣化挙動に関する研究 その 2, 日本建築学会構造系論文集, 第 781 号, pp.425-435, 2021.3
- 3) Yamazaki, Y., Suzuki, K., Matsuda, K. and Sakata, H. : Evaluation of Performance Deterioration of Plywood Sheathing Wall Subjected to Repeated Cyclic Loading, AIJ Journal of Technology and Design, No.65, pp.202-206, 2021.2(in Japanese)
山崎義弘, 鈴木渥哉, 松田和浩, 坂田弘安 : 合板耐力壁の繰り返し载荷による性能劣化挙動の評価, 日本建築学会技術報告集, 第 65 号, p.202-206, 2021.2
- 4) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター : 木造ラーメンの評価方法・構造設計の手引き, 2016
- 5) 日本建築学会 : 木質構造設計規準・同解説, 2006
- 6) Hirai, T. and Sawada, M. : Lateral Resistance of Bolted Wood-Joints with Steel Side Members Loaded Parallel to the Grain, Journal of the Japan Wood Research Society, Vol.28, No.11, pp.685-694, 1982(in Japanese)
平井卓郎, 沢田稔 : 側材に鋼板を用いたボルト接合部の剪断耐力 荷重が材軸方向に作用する場合, 木材学会誌, 28(11), pp.685-694, 1982
- 7) Komatsu, K., Maeda, N. and Horie, K. : Analysis of Glulam Frame-Structures Considering Nonlinear Characteristics of Fasteners II : Verification by experiments, Journal of the Japan Wood Research Society, Vol.35, No.3, pp.201-211, 1989(in Japanese)
小松幸平, 前田典昭, 堀江和美 : 接合部の非線形特性を考慮に入れた集成材骨組構造の解析（第 2 報）実験による検証, 木材学会誌, 35(3), pp.201-211, 1989
- 8) EN 1995-1-1 : 2004 Eurocode 5, Design of timber structures Part 1-1, 2004
- 9) 日本建築学会 : 大規模木質構造の構造設計規準（案）と実験的根拠ー耐力壁の構造特性係数 D_s ・平面混構造・鋼板挿入ドリフトピン接合等ー, pp.41-61, 2018.6
- 10) 秋山信彦, 植本敬大 : 鋼板挿入ドリフトピン式モーメント抵抗接合部の終局挙動に関する研究ー円形配置の塑性変形能ー, 日本木材学会研究発表要旨集, 2019.3
- 11) 富田弥奈美, 中野佑太, 坂田弘安, 山崎義弘, 竹内徹, 原田公明, 松井良太, 水谷美和, 朝日智生, 角野大介 : 集成材のめり込み挙動とビスによるめり込み性能向上に関する実験研究その 1: 実験概要と結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）, 構造 III, pp.83-84, 2017.8
- 12) 秋山信彦, 岡本滋史, 植本敬大 : 引きボルト式集成材ラーメン構造の耐震設計法に関する研究その 1: 柱梁接合部に関する一定軸力を考慮した降伏耐力・終局耐力の推定法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）, 構造 III, pp.179-180, 2019.9

[2021 年 6 月 2 日原稿受理 2021 年 8 月 10 日採用決定]