床根太用接着剤を併用した木ねじ接合部の強度性能評価^{*1}

河村 進^{*2}, 稲山正弘^{*3}, 李 元羽^{*4}, 成田敏基^{*4}

Evaluation of Shear Performance of Screw Joints Reinforced with Adhesives for Floor Joists^{*1}

Susumu KAWAMURA^{*2}, Masahiro INAYAMA^{*3},
Wonwoo LEE^{*4} and Toshiki NARITA^{*4}

The practical method for evaluating improvement of the shear performance of floor joints to horizontal diaphragms was examined when using adhesives as compared to designs for screws alone, assuming that the design of the stressed-skin panel used Laminated Veneer Lumber (LVL) for both the flange and the web. The adhesive was spread around the screw joint, and single shear tests were done. Then the maximum loads, loads at yield point, and stiffness were compared to the condition with a gap in the shear plane and the condition of water soaking the test piece after curing. As a result, it became possible to calculate the reduction factor of the screw joint and the adhesive joint independently, and it became clear that evaluation of the condition with a gap in the shear plane is needed, to obtain the just appraisal for the design where adhesive is spread on the entire shear plane.

Keywords: single shear test, screw joint, adhesive, stressed-skin panel.

フランジとウェブに単板積層材 (LVL) を用いたストレートスキンパネルの設計を想定して、木ねじ接合のみで設計される水平構面に床根太用接着剤を併用して生ずるせん断性能の向上を評価する実用的な方法を検討した。木ねじ接合周辺のみ接着剤を塗布して一面せん断試験を行い、すき間あり条件と事故的水がかり条件における耐力や剛性を比較した。その結果、木ねじ接合と接着接合に対する調整係数を独立して算出可能になるとともに、接合面全体に接着する設計に対して適切な評価を得るにはすき間あり条件による評価を行う必要があることが明らかとなった。

1. 緒 言

中層大規模木造建築物を構成する耐力要素の一つとしてストレートスキンパネル (SSP) を用いた床構面がある。SSP のような組立梁では上下のフランジとウェブが一体化すると耐力やたわみ性能は向上して、部材単体では実現し得ない長スパンの横架材を設計できる可能性がある。しかし組立梁を現場で製作する場合、現在の国内における許容応力度設計の考え方として現場接着は余力としてしか認められておらず、必然的に接合金物や接合具のみで耐力やたわみ制限などを満たす設計を行う必要があるが、文献¹⁾の事例に示すように木ねじに加わるせん断力が接合部の降伏せん断耐力に達するときの許容耐力

^{*1} Received November 14, 2013; accepted April 16, 2014. 本研究の一部は、第63回日本木材学会大会 (2013年3月、盛岡) において発表した。

^{*2} 島根県産業技術センター Shimane Institute for Industrial Technology, Matsue 690-0816, Japan

^{*3} 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo, Tokyo 113-8657, Japan

^{*4} 全国 LVL 協会 National LVL Association, Tokyo 136-0082, Japan

Corresponding author: S. Kawamura (susumuk@shimane-iit.jp)

は、フランジ下縁が引張応力度に達するときの弾性限界荷重やウェブが曲げ降伏応力度に達するときの弾性限界荷重よりも小さく、SSPにおいては部材単体とあまり変わらないスパンでしか設計できない²⁾のが現状である。

他方、木造建築物において生ずる床の振動を低減するため、あるいは床鳴り等のクレームを解決するため、床部材の接合に際しては多くの場合接着剤が併用される。建築現場においては幅広い環境条件と許容度の広い作業条件で安定した接着性能を発揮する特長を持つとされる床根太用接着剤 (JIS A5550)³⁾ (以下、接着剤と略す) が普及している。接着剤の併用によりフランジとウェブは一体化して、木ねじのみの設計と比較して部材間のせん断性能が向上する効果が期待される。

これまで接着剤を併用した木ねじ接合部の強度性能は明らかとされてこなかった理由として、接着接合は塗布面積に依存するが、現場施工に際して塗布状況を確認する容易な手段が存在しないこと、および接着・養生 (接合) 条件によって変化する接着強度特性を定量的に評価する方法が存在しなかったことなどが考えられる。本研究においてはSSPの設計において接着・木ねじ併用接合によって生ずるせん断性能の向上効果を利用するため、実用的な接合性能の評価を行うこととした。

2. 実 験

2.1 試験方法の検討

接着・木ねじ併用接合に際して、本研究では接合部材をロケット型に組み合わせた一面せん断試験体による要素試験⁴⁾により評価を行った。要素試験体への接着剤の塗布方法については、以下の想定により行った。すなわちSSPを製作するにあたってはウェブ材にコーキングガンを用いてビード状に接着剤を塗布し、フランジ材を重ね合わせてねじ留めして接合部を圧縮する⁵⁾ ことにより接着剤が接合部全面に広がるが、塗布面積を正確に把握することは工

程管理上困難である。接合部端部から接着剤のはみ出しが生じれば塗布の有無は把握できるが、接着剤が接合部全面に充てんされない状況を想定して、本研究ではねじ接合部周辺のみ接着剤を塗布した要素試験体の評価を行い、実際の設計と同様全面に接着剤を塗布して製作したSSP試験体と比較して、ねじ接合部周辺のみ接着剤を塗布して評価する方法が安全側評価であるかどうか検討することとした。

また、接合条件における調整係数の算出を行うため、本研究では施工中の降雨などを想定して文献⁶⁾で規定される事故的水がかり条件における試験を行うとともに、実大SSPにおける加工精度を想定してJIS A5550³⁾に規定されるすき間充てん性試験 (以下、すき間あり条件と記載する) における試験を行うこととした。

なお、木ねじのみを用いた接合であっても事故的水がかり条件やすき間あり条件によって性能は変化することが考えられる。そこで木ねじ接合のみによる試験体についても同様の試験を行い、これらの条件が木ねじ接合および接着接合に及ぼす影響についても検討を行った。

2.2 試験体の作製

試験体の構成の概要および接合条件をTable 1～2に、コントロール (U0) 試験体の形状および接着剤の塗布方法をFig. 1に示す。SSPにおけるウェブ材である50 mm厚カラマツ単板積層材 (LVL) とフランジ材である38 mm厚カラマツ LVLの接合性能を確認するため、50 mm厚 LVL (ウェブ・主材) の単板平行積層面に湿気硬化型一液ウレタン系接着剤を塗布し、38 mm厚 LVL (フランジ・側材) の単板表面が接合されるよう配置した後、電動インパクトドライバ (日立製 WH12VE, 締め付けトルク 165 N・m) によりねじ留めした。作製した試験体は、試験開始まで約20℃に設定した室内に保管し、7日間以上の養生後試験に供した。

ねじ接合部周辺のみを接着するため、接着剤塗布に先立ってねじ位置より主材の長さ方向に±28 mm

Table 1. Specification of wooden panels and joints.

Material		
Wooden panels	Central member	Laminated veneer lumber (LVL), Karamatsu (<i>Larix kaempferi</i>), 16 ply, 50 mm thickness, JAS structural LVL, Class 1, E120.
	Side member	LVL, Karamatsu (<i>Larix kaempferi</i>), 12 ply, 38 mm thickness, JAS structural LVL, Class 1, E90. Note: Crossbanded veneers were inserted to the 2nd layer from face/back.
Joints	Screw	Screw for insulation panel, 6×90 mm, surface treatment: chromate and TORK, PANLEAD® P6×90II+ (East Japan Power Fastening Co. Ltd)
	Adhesive	Adhesive for floor joists, SELECTY® UR-70 (OSHIKA Co. Ltd)

Table 2. Condition of method of joint, aging treatments, and number of lots.

Series	Method of joint	Method of accelerated aging treatments	Num.
00	Jointed by screw only.	—	23
U0	Adhesive was spread around the screw.	None	22
01	Jointed by screw only, with gap in shear plane by placed wire of 1.6 mm diameter.	—	7
U1	Adhesive was spread around the screw, with gap in shear plane by placed wire of 1.6 mm diameter.	None	22
02	Jointed by screw only.	2 times treatments by water soaking at 20°C for 4 hours and drying air at 60°C for 20 hours	5
U2	Adhesive was spread around the screw.		21
U3	Adhesive was spread on the entire shear plane, and jointed by screw. (See Fig. 3.)		22
U4	Adhesive was spread on the entire shear plane, and jointed by using cold press. (See Fig. 4.)	None	15

Fig. 1. Schematic of test specimen for single shear test. (unit: mm)

離れた位置に離型テープ（ふっ素樹脂製・0.08 mm 厚）を貼り付けた。また接着剤塗布に際しては、コーキングガンより射出した接着剤を離型テープで囲まれた領域の中心に円を描くように一か所あたり 4～5 g 付着させた。

コントロール試験体以外の作製手順については以下によった。なお木ねじ接合のみによる試験体 (00/01/02) については、離型テープの貼り付け、および接着剤塗布を省略した。

①すき間あり (U1/01試験体)

コントロール試験体と同一形状の部材について、JIS A5550のすき間あり充てん性試験³⁾に倣って直径1.6 mm のステンレス (SUS304) 鋼線を接着剤塗布部を避けて主材と側材の接合面に配置し、鋼線を挟んだ状態で接着剤を充てんしてねじ留めした。

②事故的水がかり (U2/02試験体)

コントロール試験体と同一手順で作製を行い養生の終了した試験体について、文献⁶⁾に従い20°C 4 h 水中浸せし、60°C 20 h で乾燥する作業を2回繰り返し、その後20°Cに設定した室内に2日間静置した後試験に供した。この一面せん断試験体では実大サイズのSSPと比較して木口面の面積割合が大きいことから、木口からの吸水の影響を軽減するため、水中浸漬処理前にシリコンゴムを塗布して防水処理を行った。

③実大 SSP (U3 試験体)

実大 SSP の作製手順⁵⁾に従い、接合面全体に接着剤をビード状に80～100 g/m 塗布してFig. 2に示す形状の試験体を作製した後、Fig. 2中2点鎖線で示すように幅方向に150 mm、長さ方向に360 mm 毎に切断を行い、このうち木ねじ接合部が計4か所含まれるものについて試験に供した。

④プレス接着 (U4 試験体)

U4 試験体では木ねじを使用せず、接合面全体に接着剤を塗布し、コールドプレスによりプレス圧力1 MPaで4日間圧縮してFig. 3に示す形状の試験体を作製した後、③と同寸法で切断を行った。

2.3 一面せん断試験

養生が終了した試験体について、一軸圧縮試験装置（島津製作所製 AGX-250 kN）を用いて一方加力し、レーザ変位計（キーエンス製 IL-300、変

Fig. 5. Examples of actual Load-Deformation curves of each series.

Table 3. Results of single shear tests.

	$P_{\max}$ (kN)	$\delta_{P_{\max}}$ (mm)	P_y (kN)	K (kN/mm)	μ
00					
Ave.	14.5	8.65	7.6	9.4	18.0
C.V.	0.10	0.22	0.09	0.19	0.40
U0					
Ave.	33.6	0.72	18.5	118.5	3.9
C.V.	0.07	0.11	0.08	0.14	0.18
01					
Ave.	14.6	13.28	7.6	4.6	10.3
C.V.	0.11	0.13	0.10	0.10	0.26
U1					
Ave.	28.8	2.34	15.8	48.6	7.0
C.V.	0.05	0.33	0.08	0.32	0.22
02					
Ave.	13.3	10.84	6.4	3.4	8.8
C.V.	0.18	0.12	0.12	0.06	0.32
U2					
Ave.	32.6	0.73	17.0	90.4	2.9
C.V.	0.10	0.21	0.12	0.18	0.18
U3					
Ave.	84.7	1.08	46.9	168.7	3.3
C.V.	0.08	0.26	0.08	0.14	0.18
U4					
Ave.	89.3	0.45	56.6	325.9	3.2
C.V.	0.06	0.16	0.17	0.13	0.23

Legend: $P_{\max}$: Maximum load, $\delta_{P_{\max}}$: Deformation at $P_{\max}$, P_y : Load at yield point, K : Initial stiffness, μ : Ductility factor, Ave.: Average, C.V.: Coefficient of variation.

U4) についてはねじ接合部周辺のみには接着剤を塗布した試験体よりも耐力、剛性ともに非常に大きな値を示し、靱性はほぼ同じ値であった。

接着剤を塗布した U0, U1, および U4 試験体の破壊状況を Fig. 6 に示す。ほとんどの試験体で接着層が凝集破壊し、一部で LVL 直交単板のローリングシアア破壊が観察された。プレス接着 (U4) では 3 体についてのみ木破率が 20% 以上を越えたが、木破した試験体であっても最大耐力の差はほとんどなかった。

以上の結果より、ねじ接合部周辺のみには接着剤を塗布した要素試験によって SSP における接着・木ねじ併用接合を安全側で評価できるとともに、接着接合の剛性を用いれば木ねじ接合のみの剛性より実際に即した設計が可能になると考えられる。

コントロール試験体に対してすき間あり条件、事事故的水がかり条件における耐力および剛性の低減を比較したところ、特にすき間あり条件 (U1) における耐力や剛性の低下は顕著であったが、一方で吸収エネルギーが増加して靱性不足は緩和された。

3.2 全面接着試験体における接着の状態の推定

本研究で使用した接着剤はすき間あり条件で耐力や剛性が低下することから、実際の SSP においてもすき間が生じないよう配慮が必要となると考えられる。しかし実際の SSP を製作するにあたり接着剤を接合面全面に塗布しても、小試験体よりも木ねじ間隔が広く圧縮圧力が不足したり、施工精度など種々の状況が異なることから、見かけ上すき間あり条件と同様の状況が生ずる可能性が考えられる。そこで実大 SSP 試験体における接着の状態を推定するため、塗布面積の異なる U3/U4 試験体と U0/U1 試験体との比較を行った。

Fig. 7 に示すような同一変位における接着接合が負担する荷重 (以下、接着接合荷重成分と記す) と木ねじ接合が負担する荷重 (以下、木ねじ接合荷重成分と記す) の重ね合わせが生ずるモデルにおいて、接着・木ねじ併用試験体と木ねじ接合試験体で観測

Fig. 6. Fracture behavior of specimens in single shear tests (U0, U1, and U4 series).

Fig. 7. Conceptual diagram of superposition of screw joint and bonding joint.

される荷重-変位曲線の荷重の差分は接着接合荷重成分であり, また接着接合荷重成分は塗布面積に比例すると考えられる。そこで塗布面積の異なる試験体について式(1)によりコントロール試験体における塗布面積と等しくなるよう換算した荷重 P_{as0} によって接合性能の評価を行った。

$$P_{as0} = (P_{as} - P_s) \times \frac{S_0}{S} + P_s \quad (1)$$

ここで,

S : 塗布面積

S_0 : U0 試験体における塗布面積

P_{as} : 塗布面積 S の試験体における荷重

P_s : 木ねじ接合のみによる荷重

すなわち, (1)式における $(P_{as} - P_s)$ は接着接合荷重成分, P_s は木ねじ接合荷重成分を表している。

同一変位における荷重を比較するため, 評価に際しては各試験体の荷重-変位曲線を内挿して相対変位 0.01 mm 毎に荷重を求めた。 P_s については, 同一変位における木ねじ接合のみによる荷重を平均して算出した。なお, 以後の議論では接合部 1 か所あたりの性能比較を行うため, S_0 , S および試験荷重について接合部の箇所数である 4 で除して評価した値を示す。

(1)式により求めた P_{as0} より荷重-変位曲線を Fig. 8 に, 荷重-変位曲線に対して完全弾塑性モデルを適用して求めた評価値を Table 4 に示す。木ねじを使用しない U4 試験体について, 最大耐力は最も低い結果を示したが, U4 試験体と U0 試験体の荷重-変

Fig. 8. Load (calculated as P_{as0})-deformation curves of single shear tests.

Notes: 1. Each curve means average load at each deformation.

2. (U4+00) plot means superposition of U4 and 00 curves.

Table 4. Estimated values of single shear tests.

	$P_{\max}$ (kN)	$\delta P_{\max}$ (mm)	P_s (kN)	K (kN/mm)	μ
00	3.63	8.65	1.90	2.3	18.0
U0	8.39	0.72	4.63	29.6	3.9
U1	7.20	2.34	3.94	12.1	7.0
U3	8.02	1.10	4.39	16.6	3.6
U4	6.95	0.45	4.40	25.4	3.2
(U4+00)	8.46	0.46	4.76	33.3	3.2

Legend: See Table 3.

Notes: 1. The load of each series was calculated according to expression (1).

2. (U4+00) was calculated by superposition of U4 and 00 curves.

位曲線を重ね合わせた (U4+00) のプロットではコントロール試験体とほぼ同等の最大耐力を示した。

一方, U3 試験体についてはコントロール試験体とすき間あり試験体の中間的な荷重-変位曲線を示し, 最大耐力や剛性の評価値についても同様の傾向を示した。これは, 実大試験体においては小試験体におけるすき間あり条件と同じような状態が生じていることが考えられる。従って, SSP の安全側設計を行うには U1 試験体による評価が必要と考えられる。

3.3 各種接合条件における調整係数の算出

接着接合を評価する上では各種接合条件における調整係数の算出が重要である。本研究において木ねじ接合のみによる試験体についても接合条件を変化させると耐力や剛性は低下する傾向が見られたことから、すき間あり条件と事故的水がかり条件下における00およびU0試験体に対する耐力や剛性の比較を行い、木ねじ接合と接着接合それぞれの接合条件における調整係数の算出を試みた。

ここでFig.7に示すモデルに従うと、接着接合荷重成分、および木ねじ接合荷重成分それぞれに対する調整係数が算出できる。同一変位におけるU1またはU2試験体の荷重から01または02試験体の荷重を差し引いて接着接合荷重成分の荷重-変位曲線を求め、完全弾塑性モデルに基づく評価値より各種条件における調整係数を求めた結果をTable 5に示す。

耐力については以下の傾向がみられた。すなわち、すき間あり条件の P_{max} および P_y について、木ねじ接合荷重成分の調整係数は1であるが、接着接合荷重成分は0.78に低下したことから、すき間あり条件によって生ずる耐力の低下は接着性能の低下が支配的であるといえる。また、事故的水がかり条件の P_{max} および P_y について、木ねじ接合荷重成分の調整係数はそれぞれ0.91, 0.84であったが、接着接合荷重成分では1を上回る結果となった。したがって、事故的水がかり条件によって生ずる耐力の低下は木ねじ接合性能の低下が支配的であるといえる。

また、剛性についてはいずれの条件においても接着接合荷重成分、および木ねじ接合荷重成分いずれの調整係数も低い値を示したが、耐力の調整係数と同様、すき間あり条件では接着接合荷重成分、事故的水がかり条件においては木ねじ接合荷重成分で調整係数が大きく低下する傾向がみられた。

4. 結 論

LVLを用いたSSPを対象に、現場施工対応の床根太用接着剤を併用して木ねじ接合を行ったときの接合性能を一面せん断試験により評価し、すき間あり、および事故的水がかり条件における性能の低減

を確認するとともに、実大SSPにおける接合性能とも比較したところ、以下の結論を得た。

- ・木ねじのみによる接合と比較して、接着剤を併用すると耐力、剛性ともに大きく増加した。接着剤を全面塗布した実大SSPについてはねじ接合部周辺のみ接着剤を塗布した試験体よりも耐力、剛性ともに大きな値を示し、ねじ接合部周辺のみ接着剤を塗布した試験体の試験によってSSPにおける接着・木ねじ併用接合の安全側評価が可能と考えられる。

- ・実大SSPについて、塗布面積を小試験体と同一として比較すると、小試験体におけるすき間あり条件と同じような状態が生じることが示された。したがってSSPの安全側評価を行うにはすき間あり条件の評価が必要である。

- ・コントロールに対して、事故的水がかり条件、またはすき間あり条件では、耐力や剛性は低下した。木ねじ接合荷重成分と接着接合荷重成分の調整係数を独立して求めたところ、事故的水がかりによる低減は木ねじ接合性能の低下の影響が大きく、すき間あり条件による低減は接着性能の低下の影響が大きいことが明らかとなった。

本研究では接着・木ねじ併用接合部の評価方法と実験値のみを報告したが、全体の設計にフィードバックすることは今後の課題となる。すなわち、得られたフランジ-ウェブのすべり係数の値を用いて実大SSPを設計し、実大SSPの曲げ試験との比較により評価の妥当性を検証する必要がある。また接着接合における調整係数を幅広く評価するため、接着剤塗布時および硬化中の温湿度条件に関する調整係数、あるいは接合部のたわみ増大係数を確認する必要もあると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、平成24年度林野庁補助事業「地域材供給倍増事業（木材利用技術整備等支援事業）」の助成により実施した。ここに感謝の意を表する。

Table 5. Reduction factor in various jointing conditions.

	P_{max}		P_y		K	
	S ^{*a)}	A ^{*b)}	S	A	S	A
Condition with gap in shear plane	1.00	0.78	1.00	0.78	0.50	0.42
Soaking in water after curing	0.91	1.10	0.84	1.02	0.36	0.87

Legend: See Table 3. ^{*a)} S: screw joint. ^{*b)} A: adhesive joint (calculated from the difference between the load of joint with screw and adhesive, and the load of screw only).

文 献

- 1) “木質構造接合部設計マニュアル”, 日本建築学会, 東京, 2009, pp. 179-195.
- 2) “LVL Structural Design Guide-LVLの使い方と構造設計の考え方”. 全国LVL協会, 東京, 2011, pp. 21-27.
- 3) JIS A 5550: “床根太用接着剤”, 日本工業規格 (2003).
- 4) “木質構造設計基準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法”, 日本建築学会, 東京, 2009, pp. 367-376.
- 5) “木造住宅・建築物の整備促進に関する調査・普及・技術基盤強化成果報告書-住宅及び中規模建築に用いる, 単板積層材を用いた厚板構造と高強度水平構面 (床・屋根パネル) の開発とラーメン構造開発”, 全国 LVL 協会, 東京, 2011, pp. 23-29.
- 6) “木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2008年度版)”, 日本住宅・木材技術センター, 東京, 2008, pp. 572-574.
- 7) “木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2008年度版)”, 日本住宅・木材技術センター, 東京, 2008, pp. 571-572.