木材の熱軟化がドリフトピン接合部の基礎性能に及ぼす影響 (第 1 報)

木材の支圧耐力・剛性への影響^{*1}

津畑慎哉^{*2}, 酒井俊佑^{*3}, 田中聡一^{*3}, 森田 武^{*2}, 西谷隆之^{*4},
山野辺宏治^{*2}, 金山公三^{*3}

Influence of Thermal Softening of Wood on the Fundamental Performance of Drift Pin Joints I. Influence on the bearing strength and stiffness of wood^{*1}

Shinya TSUBATA^{*2}, Shunsuke SAKAI^{*3}, Soichi TANAKA^{*3},
Takeshi MORITA^{*2}, Takayuki NISHIYA^{*4},
Koji YAMANOBE^{*2} and Kozo KANAYAMA^{*3}

This study deals with the thermo-softening behavior of wood under the combined stresses in the drift pin joints of timber buildings. The purpose of this paper was to clarify the influence of thermal softening of wood on the bearing strength and stiffness, which was required to estimate the performance of the joints. The relations of bearing strength and stiffness to moisture content (MC) and temperature of wood samples were evaluated. The bearing test was conducted for the MC-conditioned sample by using the testing machine with the thermo-hygrostat. Both bearing strength and stiffness decreased with increasing MC and temperature, or with the promotion of the thermal softening. The decrease in both the strength and the stiffness in the longitudinal direction was larger than that in the transverse direction.

Keywords : drift pin joint, thermal softening of wood, bearing test, joint performance.

本研究は、木造建築物のドリフトピン接合部において、複合応力が作用した木材の熱軟化挙動を対象とする。本論文では特に、接合部性能の算出に必要な木材の支圧耐力および剛性に及ぼす熱軟化の影響を明らかにすることを目的とした。そのために、木材の含水率 (MC)、温度と支圧耐力および剛性の関係を評価した。MC を調整した木材試験体について、恒温恒湿機能を備えた材料試験機を用いて支圧試験を行った。試験体の支圧耐力および剛性はともに、温度と MC の増加に伴い低下し、木材の熱軟化に影響されることが示唆された。また、熱軟化に伴う支圧耐力および剛性の低下は、縦方向に支圧した場合のほうが横方向に支圧した場合と比べて大きかった。

^{*1} Received December 25, 2020; accepted July 10, 2021.

^{*2} 清水建設株式会社 技術研究所 Institute of Technology, Shimizu Corporation, Tokyo 135-8530, Japan

^{*3} 京大大学生存圏研究所 Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Uji 611-0011, Japan

^{*4} 清水建設株式会社 設計本部 Design Division, Shimizu Corporation, Tokyo 104-8370, Japan

Corresponding author: S. Tsubata (s.tsubata@shimz.co.jp)

1. 緒 言

近年、建築基準法改正（2015年等）に伴う規制緩和によって、様々な規模や用途の建築物において木材の利用が拡大している。特に大規模（高層・大空間）建築物の木造化が進むにつれて、木材の置かれる環境が多様化している。中でも、温度と相対湿度（RH）は木材の特性や性能に大きく影響する。例えば、高温多湿の環境では食害や腐朽のような木材の生物劣化が促され、さらに高温になると木材の熱変性や熱分解が促される。

木造建築を設計する上で重要な木材の力学的性質も、温度とRHに大きく影響を受ける。特に、温度とRHが高くなると、含水率（MC）の増加と水分子運動の活性化により木材が熱軟化挙動を示し、弾性係数や強度が低下することが分かっている^{例えは1-3)}。鈴木ら⁴⁾は、木材の熱軟化挙動を反映した木質構造設計を行うため、スギを含む5樹種の木材に対して、温度とMCから木質部材の力学的性質を求める評価式を提唱している。

一方、既往の研究では繊維方向あるいはその直交方向へ圧縮あるいは引張応力が作用する単純な系では詳細な検討が行われているが、複合応力状態においては十分な検討がなされていない。木造建築の代表的な接合部であるドリフトピン接合部では、ピンが木材と接触することで力を木質部材間で伝達させるが、接触箇所では単純な系ではなく、複合応力が作用する。このような複合応力が作用する接合部で、火災などによって木材が熱軟化すると、接合部の構造性能が大きく低下する危険性がある。木造建築は今後も増加していくとみられ、その安全性の保障はますます重要になると考えられる。従って、複合応力状態となっている接合部において熱軟化が生じた場合の構造性能の変化を明らかにすることは不可欠

であると考えられる。

本研究は、木造建築において使用頻度が高いドリフトピン接合を対象とし、木材の熱軟化が接合部性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。本論文では特に、ドリフトピン接合部性能の基礎的知見として重要な木材の支圧耐力および剛性に注目し、それらに及ぼす熱軟化の影響について検討した。

2. 試験方法

2.1 試験体とMCおよび温度の条件

試験体の木取りは、Fig.1に示すSample A～Dの4通りとした。実際のドリフトピン接合部に加わる力の向きに対応するように、Sample AとBは繊維方向への支圧（以下、縦支圧と呼ぶ）、Sample CとDは縦直交方向への支圧（以下、横支圧と呼ぶ）

Fig.1. Nominal dimensions for each sample. (Unit: mm)

Notes: L: Longitudinal direction, R: Radial direction, T: Tangential direction.

Table 1. Basic properties for samples.

Temperature [°C]		20			50		80	
Target MC [%]		9	14	18	14	9	14	18
Annual ring width [mm]	Sample A	2.3 ^{a)} ± 0.6 ^{b)}	2.4 ± 0.6	2.3 ± 0.5	2.3 ± 0.6	2.7 ± 0.5	2.8 ± 0.6	2.8 ± 0.5
	Sample B	2.8 ± 0.7	2.7 ± 0.8	2.9 ± 0.8	2.9 ± 0.9	3.0 ± 0.9	2.9 ± 0.9	2.9 ± 1.0
	Sample C	2.4 ± 0.4	2.5 ± 0.3	2.4 ± 0.4	2.4 ± 0.4	2.6 ± 0.6	2.5 ± 0.7	2.6 ± 0.7
	Sample D	2.6 ± 0.9	2.9 ± 0.9	2.6 ± 0.9	2.7 ± 1.1	2.6 ± 0.7	2.4 ± 0.7	2.5 ± 0.6
Air-dry density (before test) [g/cm ³]	Sample A	0.36 ± 0.03 ^{c)}	0.37 ± 0.04	0.39 ± 0.03	0.38 ± 0.03	0.36 ± 0.04	0.38 ± 0.03	0.39 ± 0.04
	Sample B	0.37 ± 0.04	0.38 ± 0.04	0.40 ± 0.04	0.39 ± 0.04	0.37 ± 0.04	0.39 ± 0.04	0.39 ± 0.04
	Sample C	0.35 ± 0.03	0.37 ± 0.03	0.38 ± 0.03	0.37 ± 0.03	0.35 ± 0.03	0.37 ± 0.03	0.38 ± 0.03
	Sample D	0.36 ± 0.02	0.38 ± 0.04	0.39 ± 0.03	0.38 ± 0.02	0.36 ± 0.03	0.37 ± 0.02	0.39 ± 0.02

Notes: Annual ring width and air dry density were measured at 20 °C.

a) Averaged value, b) Standard deviation ($n = 6-7$), c) Standard deviation ($n = 6$).

のための試験体とした。また、本研究では木材の熱軟化が支圧耐力および剛性におよぼす影響を定量的に調べるため、試験温度とMCを20℃で9%, 14%, 18%, 50℃で14%, 80℃で9%, 14%, 18%の7通りで制御した。

試験体は、製材後30年以上屋内に静置した奈良県産のスギ (*Cryptomeria japonica*) の柱材 (長さ4 m, 120 mm 角, 無節の心材) 6本から切り出した。4種類の木取りごとに7通りの試験条件を設定したため、1本の柱の同一年輪帯から4ブロックを切り出し、各ブロックから繊維方向に連続的に1種類につき7体の試験体を切り出した。同様の方法で、6本の柱から各々28体の試験体を切り出した。各試験条件には、1本の柱から1種類あたり1体を無差別に抽出して振り分けることで、1条件につき6体とした。

MCが9%, 14%, または18%の試験体は、調湿塩 (それぞれ $MgCl_2$, $NaBr$, または KCl) の飽和水溶液を収めた密閉容器内に静置して、20℃の恒温室内で試験体の質量が安定するまで養生することによって調整した。なお、試験体は調湿塩に直接触れないように配慮した。

試験体は、支圧試験の直前に、密閉容器から取り出し、質量、および平均年輪幅を測定した。試験条件ごとの試験体の基本特性を Table 1に示す。試験体は、試験条件によって気乾密度や平均年輪幅が大きく偏ることのないように分配されていることが確認できる。

2.2 温湿度制御の方法

支圧試験中は、木材のMCを一定に保つために、試験体周辺の相対湿度 (RH) と温度の両方を制御する必要がある。そこで、Fig. 2に示すように温湿度を制御しながら支圧試験を行う試験装置を構築した。万能試験機 (AG-50kNB, (株) 島津製作所) の加力部に恒温チャンバー (TCR-300, (株) 島津製作所) を設置し、試験体が接する治具周辺の領域 (試験エリア) を樹脂製カーテンで仕切り、そこにシリコンホースを経由して調湿空気を導入した。温湿度センサ (LR9501, 日置電機 (株)) を、試験体を挟んで調湿空気の入口と反対側に設置し、それを温湿度ロガー (LR5001, 日置電機 (株)) に接続して、RHと温度をモニタリングした。

試験中のRHと温度は、目標値に対してそれぞれ $\pm 2\%$ と $\pm 2^\circ\text{C}$ に収まるように (Fig. 2), チャンバーと蒸留水加熱用ヒーターの設定温度および乾燥空気と加湿空気の混合比率を変えることで調整した。なお、乾燥空気と加湿空気は、ポンプでチャンバー

Fig. 2. System to control relative humidity (RH) and temperature during bearing test. (Unit: mm)

外の空気をそれぞれ乾燥剤と加熱蒸留水をくぐらせることで得た。

2.3 支圧試験の条件と手順

試験装置 (Fig. 2) に示すように、支圧治具 (直径10 mm, 長さ50 mm) とベースプレートの間に試験体を設置し、2.2節で述べた手順で試験エリア内を目標の温湿度に調整した。試験温度が20℃の試験体は、試験エリア内が目標温湿度に調整されてから5分後に支圧を開始した。設定温度が50℃または80℃の試験体は、試験エリア内が目標温湿度に調整されてから60分後に支圧を開始した。

支圧中はロードセルの荷重とクロスヘッドの変位を測定し、測定荷重が最大荷重の0.7倍に低下するまで、またはクロスヘッドの変位が15 mmになるまで支圧を行った。なお、試験体の質量測定は、支圧の直前と直後および105℃の乾燥器内で質量が安定するまで乾燥させた状態 (全乾状態) について行った。

支圧の初期剛性 K および各種支圧耐力 (降伏耐力 P_y , 最大耐力 P_{max} , 終局耐力 P_u) は、日本建築学会による木質構造設計規準・同解説⁵⁾に記載された完全弾塑性モデルに置換する方法に準拠して算出した。

3. 試験結果および考察

3.1 支圧中の試験体のMC変化

支圧前後における試験体のMCの変化を Table 2に示す。温度条件が20℃の試験体に関するMCは、支圧前後で安定しており、概ね目標値に調整できていることがわかる。一方、50℃と80℃の試験体に

関する MC では、支圧前と比べて支圧後において各値のばらつきが大きくなり、支圧前後で MC が大きく増加する場合があった。試験後に試験体を確認したところ、木材の表面に水滴が付着している試験体があったことから、加湿空気が試験体にぶつか

る際に結露を生じ、試験体に過剰な水分を供給したことが原因であると考えられる。ただし、50℃と80℃の試験体は、試験エリア内が目標温湿度に達してから60分後に支圧を行っているため、支圧中における MC 変化は少ないものと考えられる。従って、

Table 2. Change in measured MC during bearing test.

Temp. [°C]	Target MC [%]	Sample A [%]		Sample B [%]		Sample C [%]		Sample D [%]	
		Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
20	9	9.1 ^{a)} ± 0.4 ^{b)}	9.2 ± 0.5	9.0 ± 0.3	9.1 ± 0.3	9.1 ± 0.4	9.2 ± 0.5	9.2 ± 0.4	9.4 ± 0.4
	14	13.8 ± 0.3	13.7 ± 0.4	13.6 ± 0.3	13.6 ± 0.3	13.4 ± 0.3	13.4 ± 0.3	13.6 ± 0.4	13.6 ± 0.4
	18	17.1 ± 0.4	17.0 ± 0.1	17.0 ± 0.2	17.1 ± 0.2	16.9 ± 0.4	17.0 ± 0.2	17.0 ± 0.3	17.0 ± 0.3
50	14	13.8 ± 0.1	14.8 ± 1.3	13.8 ± 0.4	16.1 ± 1.9	13.7 ± 0.2	15.1 ± 0.5	13.6 ± 0.5	15.7 ± 1.4
80	9	8.7 ± 0.3	13.8 ± 5.0	8.6 ± 0.6	9.9 ± 1.2	8.7 ± 0.2	10.0 ± 1.2	8.7 ± 0.2	10.0 ± 2.4
	14	13.8 ± 0.2	17.2 ± 2.5	13.7 ± 0.3	18.6 ± 4.7	13.8 ± 0.7	16.5 ± 2.2	13.6 ± 0.4	15.1 ± 1.7
	18	17.3 ± 0.3	19.1 ± 1.9	17.1 ± 0.2	18.5 ± 2.3	17.2 ± 0.1	19.7 ± 2.3	17.4 ± 0.9	17.3 ± 1.7

Notes : a) Averaged value, b) Standard deviation ($n = 6$).

Table 3. Bearing strengths and stiffness estimated from the bearing test.

	Temp. [°C]	Target MC [%]	K [N/mm]	P_y [N]	P_{max} [N]	P_u [N]	Terminal condition	
							0.7 P_{max} ^{a)}	15 mm ^{b)}
Sample A	20	9	5790 ^{c)} ± 498 ^{d)}	4305 ± 1297	6761 ± 992	6359 ± 1141	6	0
		14	5253 ± 565	3844 ± 429	6590 ± 752	6145 ± 648	6	0
		18	4207 ± 628	3169 ± 415	5472 ± 683	5108 ± 606	6	0
	50	14	2470 ± 819	2857 ± 297	4772 ± 485	4435 ± 406	6	0
		9	1871 ± 675	2375 ± 612	3850 ± 850	3398 ± 894	2	4
		14	1275 ± 446	1541 ± 232	2517 ± 442	2180 ± 492	1	5
Sample B	20	18	1412 ± 214	1586 ± 307	2321 ± 334	2100 ± 227	2	4
		9	5682 ± 529	5561 ± 1067	9467 ± 1242	8737 ± 1196	6	0
		14	4735 ± 627	4350 ± 481	7885 ± 1082	7223 ± 932	6	0
	50	18	4030 ± 454	4150 ± 734	7233 ± 863	6678 ± 835	6	0
		14	2704 ± 478	3301 ± 158	5896 ± 602	5454 ± 542	6	0
		9	2623 ± 590	3002 ± 361	4813 ± 570	4501 ± 512	4	2
Sample C	80	14	1521 ± 467	1906 ± 333	2963 ± 605	2746 ± 604	3	3
		18	1691 ± 407	1645 ± 237	2660 ± 337	2498 ± 315	6	0
		9	1089 ± 196	3978 ± 868	6517 ± 1082	5675 ± 880	0	6
	20	14	864 ± 197	3892 ± 776	6703 ± 1231	5632 ± 946	0	6
		18	807 ± 110	3682 ± 586	6453 ± 1359	5183 ± 972	0	6
		14	772 ± 158	3415 ± 498	5322 ± 1048	4433 ± 793	0	6
Sample D	50	9	606 ± 140	2887 ± 726	4276 ± 919	3577 ± 660	0	6
		14	383 ± 53	2173 ± 389	3296 ± 618	2488 ± 403	0	6
		18	333 ± 66	1680 ± 266	2570 ± 580	2062 ± 447	0	6
	80	9	837 ± 166	4617 ± 1193	6511 ± 928	5914 ± 1014	4	2
		14	844 ± 191	3862 ± 1339	6107 ± 1705	5199 ± 1200	2	4
		18	810 ± 150	2976 ± 561	4986 ± 976	4463 ± 831	5	1
	50	14	691 ± 125	3459 ± 659	4528 ± 663	4091 ± 586	5	1
	80	9	562 ± 182	2821 ± 398	3727 ± 892	3429 ± 753	3	3
		14	377 ± 64	2397 ± 569	2707 ± 358	2656 ± 618	4	2
		18	349 ± 77	1747 ± 126	2406 ± 442	2098 ± 380	2	4

Notes : K ; Initial stiffness, P_y ; Yield strength, P_{max} ; Maximum strength, P_u ; Ultimate strength.

a) The test was terminated because the resistance decreased until 0.7 P_{max} .

b) The test was terminated because the total displacement reached 15 mm.

c) Averaged value, d) Standard deviation ($n = 6$).

支圧試験で得た初期剛性と各種支圧耐力に対応させる MC は、支圧直後に得られた値を用いる。

3.2 MC および温度が支圧耐力および剛性に及ぼす影響

Sample A～D に関する各温度の支圧試験で得られた MC と初期剛性の関係および MC と降伏耐力の関係を図.3 にそれぞれ示す。また、Sample A

～D の各温度・MC における初期剛性と各種支圧耐力の値および支圧試験の終了条件を Table 3 にまとめた。なお、初期剛性はロードセルの荷重とクロスヘッドの変位から求めている。

木材の熱軟化が構造性能に及ぼす影響について、まず MC の影響に注目すると、初期剛性は、Sample A, B の 80℃ および Sample D の 20℃ を除

Fig. 3. The relations of initial stiffness and yield strength to measured MC after test at each temperature. Notes: Plot; Averaged value, Error bar; Standard deviation ($n = 6$).

き、MCの増加に伴い低下した (Fig. 3a, c, e, g)。降伏耐力においても Sample A の80℃を除き同様の傾向だった (Fig. 3b, d, f, h)。この結果は、MCの増加に伴い木材の軟化が促されることで¹⁾、初期剛性と降伏耐力が低下したことを示唆している。なお、Sample A および B の80℃では目標 MC 14%の試験体が実測値で MC $17.2 \pm 2.5\%$ および $18.6 \pm 4.7\%$ と MC の変動が大きくなったことで、木材内部の水の動きが活性化して初期剛性および降伏耐力が小さくなったと考えられる。また Sample D の20℃の初期剛性は、各 MC で1体ずつ平均値から大きく外れる試験体があり、それらを除いた平均値は MC 9%, 14%, 18% でそれぞれ 787 N/mm, 772 N/mm, 751 N/mm となり、MC の増加に伴い初期剛性が低下していることを確認した。

温度の影響に注目すると、Sample A~D の試験体について、初期剛性は、温度の増加に伴い低下した (Fig. 3a, c, e, g)。これは降伏耐力においても同様の傾向だった (Fig. 3b, d, f, h)。この結果は、温度の増加に伴い木材の軟化が促されることで¹⁾、初期剛性と降伏耐力が低下したことを示唆している。

最大耐力や終局耐力についても (Table 3)、降伏耐力と同様に MC と温度の増加に伴い耐力が低下し、木材の熱軟化の影響がみられた。

MC と温度の増加に伴う初期剛性や降伏耐力の低下の大きさは、縦支圧した場合 (Fig. 3a~3d) と横支圧した場合 (Fig. 3e~3h) で異なった。これは、木材の熱軟化に伴う初期剛性や降伏耐力の低下が支圧方向によって影響を受けることを示唆している。

3.3 支圧耐力および剛性の低下に及ぼす支圧方向の影響

木材の熱軟化に伴う初期剛性と降伏耐力の低下に対する支圧方向の影響について議論するため、縦支圧と横支圧の初期剛性の関係を Fig. 4a,c に、縦支圧と横支圧の降伏耐力の関係を Fig. 4b,d にそれぞれ示す。いずれの結果についても、MC と温度の増加、すなわち木材の熱軟化に伴い、プロットは左下へ移動した。このとき、プロットに対する回帰直線の切片が0より大きいほど、木材の熱軟化に伴う初期剛性および降伏耐力の低下は縦支圧が横支圧と比べて大きいことを意味する。

支圧治具の長手方向と試験体の T 方向 (接線方向) が平行な場合 (Sample A と C)、初期剛性 (Fig. 4a) と降伏耐力 (Fig. 4b) に関する回帰直線の切片は0より大きく、木材の熱軟化に伴う初期剛性および降伏耐力の低下は縦支圧が横支圧と比べて大きいことが示唆された。また、最大耐力、終局耐力

に関する回帰直線は、 $P_{\max,R(T)} = 0.90 P_{\max,L(T)} + 0.86$ ($R^2 = 0.95$), $P_{u,R(T)} = 0.83 P_{u,L(T)} + 0.61$ ($R^2 = 0.98$) となり、切片はいずれも0より大きく、初期剛性や降伏耐力と同じ傾向だった。

支圧治具の長手方向と試験体の T 方向が垂直な場合 (Sample B と D) も同様に、初期剛性 (Fig. 4c)、降伏耐力 (Fig. 4d)、最大耐力 [$P_{\max,T(R)} = 0.62 P_{\max,L(R)} + 0.82$ ($R^2 = 0.98$)], 終局耐力 [$P_{u,T(R)} = 0.58 P_{u,L(R)} + 0.84$ ($R^2 = 0.98$)] の回帰直線の切片は0より大きかった。この結果は、木材の年輪と支圧治具の向きには関係なく、熱軟化に伴う初期剛性および降伏耐力の低下は縦支圧が横支圧と比べて大きいこと示している。

初期剛性について、本試験ではロードセルで得られた荷重とクロスヘッドの測定変位より計算しており、測定変位には支圧により生じる変位 (以下、支圧変位とする) だけでなく支圧部以外の木材の圧縮により生じる変位 (以下、圧縮変位とする) が含まれる。同様の MC・温度条件で予備的に行った縦圧縮試験と横圧縮試験の結果、縦圧縮のヤング係数は20℃ MC 9% で 6.6 ± 1.0 N/mm², 80℃ MC 18% で 3.0 ± 1.0 N/mm², 横圧縮のヤング係数は20℃ MC 9% で 0.52 ± 0.14 N/mm², 80℃ MC 18% で 0.12 ± 0.01 N/mm² となることを確認した。このことから、変位に及ぼす熱軟化の影響は、縦支圧は横支圧と比べて小さくなると考えられる。それにも関わらず縦支圧は横支圧と比べて初期剛性に及ぼす熱軟化の影響が大きかった事実から、縦支圧の初期剛性は木材が熱軟化するほど支圧変位の割合が高くなることは自明である。一方、横支圧の初期剛性は、木材が熱軟化するほど、圧縮変位の割合が高くなると考えられる。そこで、横支圧では10 mm 幅で支圧される弾性体について、支圧方向から $\pm 45^\circ$ の範囲に応力が分散すると仮定し、同様の MC・温度条件で予備的に行った全面圧縮試験で得られた R 方向と T 方向のヤング係数を用いて、 P_y 作用時の全体変位に対する圧密変位の割合を計算した。その結果、R 方向に加力した Sample C は20℃ MC 9% で7.5%, MC 18% で5.7%, 80℃ MC 9% で4.9%, MC 18% で6.0%, T 方向に加力した Sample D は20℃ MC 9% で7.3%, MC 18% で8.2%, 80℃ MC 9% で8.6%, MC 18% で12.8% となり、多少の熱軟化による増減は確認されたが、いずれも支圧変位が支配的と言える。このことから、本試験においては縦支圧および横支圧ともに圧縮変位の影響はほとんどないと考えられる。

全面圧縮における既往の研究⁶⁾より、気乾状態の

Fig. 4. The relationship between longitudinal direction and transverse direction for initial stiffness and yield strength.

Notes: Plot; Averaged value, Error bar; Standard deviation ($n = 6$).

$K_{R(T)}$; K - Initial stiffness, R - Longitudinal direction of embedding tool, (T) - Embedding direction.
 R^2 ; Coefficient of determination.

スギの縦圧縮強さや横圧縮比例限応力の熱軟化による低下率は、繊維直交方向が繊維方向と比べて大きかった。しかし、本試験結果から得られた降伏耐力、最大耐力および終局耐力の低下率に及ぼす支圧方向の影響の傾向は逆転した。本試験のように支圧治具が木材にめり込む場合、支圧部では加力方向に圧縮応力とせん断応力、加力直交方向に引張応力が発生する。これらの複合応力に対して、縦支圧の方が横支圧よりも熱軟化の影響を大きく受けたと考えられる。

3.4 支圧後の試験体の観察

支圧治具の長手方向が試験体の T 方向（接線方向）と平行な場合の Sample A と C の支圧後（残留変形）の代表的な外観と支圧部近傍を Fig. 5 および Fig. 6、支圧治具の長手方向が試験体の T 方向と直交する場合の Sample B と D の支圧後（残留変形）の代表的な外観と支圧部近傍を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。

Sample A（縦支圧）では、20 °C、MC 9% で L 方向（繊維方向）へのめり込みは少なく木材の割裂破壊によって試験が終了したのに対し、木材の熱軟化

が進む温度、MC の条件（80 °C、18%）に近づくにつれてめり込みが進行して（Fig. 5）、変位が試験終了条件である 15 mm に到達する試験体もみられた（Table 3）。特に 80 °C、18% の試験体の支圧部近傍では（Fig. 6 a）、支圧部直下の木材が繊維間で剥離した状態で座屈変形していた。Miki *et. al.* の報告によると⁷⁾、熱軟化は木材の細胞でも起こるが、細胞と細胞の間でより顕著に起こり、そのような状態で木材に外力が加えられると細胞間でのせん断すべりが生じやすいことが示唆されている。従って、熱軟化が進むと、支圧部直下の木材が細胞間におけるせん断すべりによって試験体本体から剥離しつつ、木材繊維が折りたたまれるように座屈が生じたものと考えられる。

Sample C（横支圧）では、加力中に試験体端部で層（RT 面）の剥がれによる多少の耐力低下はみられたものの、全ての試験体の変位が試験終了条件の 15 mm に到達した（Table 3）。残留変形の性状については、20 °C、MC 9% の試験体と 80 °C、MC 18% の試験体のいずれにおいても確認できたが（Fig. 5）、その要因が両者では異なると考えられた。支

圧部近傍を観察すると、20℃、MC 9%の試験体では (Fig. 6 b), 繊維を分断するような割れと支圧部直下の木材の圧密が生じていたのに対し、80℃、MC18%の試験体では (Fig. 6 c), 破断や割れはほ

とんど見られなかったことから、木材の広範囲な圧密が起きたと推察される。木材は熱軟化すると細胞内腔が減少するような圧密⁸⁾ が起こりやすくなることが知られている。従って、熱軟化した試験体で破

Fig. 5. Representative appearance of the tested Samples A and C after bearing test.

Fig. 6. Magnified appearance of the representative tested samples shown in Fig. 5.

Fig. 7. Representative appearance of the tested Samples B and D after bearing test.

Fig. 8. Magnified appearance of the representative tested samples shown in Fig. 7.

断や割れが起こらなかったのは、支圧による仕事エネルギーが広範囲の圧密エネルギーによって消費されたためであると解釈できる。

Sample B (縦支圧) において、20℃、MC 9%ではL方向へのめり込みは少なく全て木材の割裂破壊によって試験が終了した (Table 3)。一方、熱軟化が進む温度、MC の条件 (80℃、18%) では、L方向へのめり込みが進行し、最大変位が15 mm に達して試験を終了した試験体も見られた (Table 3)。支圧後の試験体観察により、支圧部直下の木材が繊維間で剥離して座屈した状態が観察された (Fig 8 a)。これは、Sample A (Fig. 5) と同じ傾向であり、同様の説明が成り立つと考えられる。

Sample D (横支圧) は、めり込みの大きさや試験体端部の割裂状況 (Fig. 7) とめり込み部の状態 (Fig. 8 b, c) について、Sample C の場合とほぼ同じ傾向であり (Fig. 5, Fig. 6 b, c)、同様の説明が成立すると考えられる。このことは、支圧部近傍での試験体の変形や破壊が年輪の影響をそれほど受けなかったことを示唆している。

以上のことから、縦支圧の場合、熱軟化していない状態では、支圧部近傍の細胞間でのせん断すべりによるめり込みより、加力と垂直方向に木材を押し広げる力による割裂破壊が支配的であった。これは、割裂力が繊維直交方向に働くので、割裂が広がりやすかったためと考えられる。しかし、熱軟化が進む温度、MC の条件では、木材の細胞間でせん断すべりを生じやすくなるため、めり込みが進行したと考えられる。それに対して、横支圧の場合、熱軟化していない状態では、支圧部近傍の繊維を分断するような割れと支圧部直下の木材の圧密によってめり込みを生じたが、熱軟化が進む温度、MC の条件では、木材の広範囲の圧密が起きたと考えられる。以上から、熱軟化によって木材の細胞間における繊維方向へのせん断すべりが進みやすくなるため、縦支圧の方が横支圧よりも熱軟化の影響を大きく受けたと推測される。

4. 結 論

本研究では、複合応力状態となっている接合部において熱軟化が生じた場合の構造性能の変化を明らかにするため、木造建築において使用頻度が高いドリフトピン接合を対象とし、木材の含水率および温度と支圧耐力および剛性の関係を調べた。その結果、支圧の初期剛性と支圧耐力 (降伏耐力、最大耐力、終局耐力) は、温度と含水率の増加に伴い低下し、熱軟化に影響されることが確かめられた。また、熱

軟化に伴う初期剛性と支圧耐力の低下は、繊維方向に支圧した場合 (縦支圧) の方が繊維直交方向に支圧した場合 (横支圧) と比べて大きくなることが明らかとなった。試験体の観察結果から、これは、木材の細胞間における繊維方向へのせん断すべりが熱軟化によって進みやすくなることが要因である推測された。

本報では、木材の熱軟化がドリフトピン接合部性能に及ぼす影響に関する基礎的な知見として、熱軟化が木材の支圧耐力と剛性を低下させ、その低下には異方性があることが明らかとなり、異方性は木材の組織構造に影響されることが示唆された。今後は、この異方性について木材の力学的性質との関係を明らかにすることが基礎的課題である。一方、ドリフトピン接合部に及ぼす木材の熱軟化の影響について支圧耐力や剛性に及ぼす影響との関係を明らかにすることで、支圧試験を行うだけで接合部の剛性と耐力を算出できる評価式を提案することが応用的課題である。

文 献

- 1) 渡辺治人: “木材理学総論”, 農林出版, 東京, 1978, p. 484, p. 590, p. 594.
- 2) 中村賢一, 山田 誠: “木造建築の防火設計”, 産調出版, 東京, 1973, p. 36-40.
- 3) 上杉三郎: スギ材の180℃以下加熱における曲げ性能. 木材学会誌 38(11), 985-994(1992).
- 4) 鈴木達朗, 長谷見雄二, 上川大輔, 安井 昇, 加來千紘, 渡辺秀太: 火災加熱される木質 部材内部の温度・含水率によるヤング係数残存率計算式の導出. 日本建築学会構造系論文集 770, 651-661 (2020).
- 5) 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 -”, 丸善, 東京, 2006, p. 369-371.
- 6) 伏谷賢美, 岡野 健: “木材の物理”, 文永堂出版, 東京, 1985, p. 161-162.
- 7) Miki, T., Sugimoto, H., Shigematsu, I., Kanayama, K.: Superplastic deformation of solid wood by slipping cells at sub-micrometre intercellular layers. *Int. J. Nanotechnol.* 11(5-8), 509-519 (2014).
- 8) 飯田生穂, 則元 京, 今村祐嗣: 圧縮セットの水分・熱回復. 木材学会誌 30(5), 354-358 (1984).