温湿度による含水率変化が伝統的ホゾ-込み栓接合部の 接触応力度に及ぼす影響 (第2報)[†] 圧縮木材込み栓の変形回復による接合部の応力緩和防止効果の評価^{*1}

鄭 基浩^{*2}, 黄 権煥^{*3}, 小松 幸平^{*2}

Effect of Changes in the Moisture Content due to Surrounding Relative Humidity on the Contact Stress in Traditional Mortise and Tenon Joints II.[†] Evaluation of anti-relaxation effects by deformation recovery of compressed wooden Komisen on the contact stress of joints^{*1}

Kiho JUNG^{*2}, Kweonhwan HWANG^{*3} and Kohei KOMATSU^{*2}

This research is a continuation of part 1¹⁾, and focuses on studying the effect of cyclic humidity changes. It also evaluates the anti-relaxation effect by deformation recovery of the komisen (wooden square key) made of sugi (Japanese cedar; *Cryptomeria japonica* D. Don) compressed wood on the contact stress within the hozo-komisen joint (traditional wooden mortise and tenon joint stiffened by the inserted wooden square key) in the Japanese traditional post and beam structures.

The summary of this paper is as follows.

The contact force on small load cells in joints with compressed sugi komisen inserted is shown to higher (40N) than that of joints made of shirakashi (*Quercus myrsinaefolia* Blume) at 80% relative humidity (RH), and reaches 56N at RH 85%.

The contact force on small load cells in joints with compressed sugi komisen inserted increased from 20N to 27N, but in joints with shirakashi komisen inserted it decreased from 14N to 13N at RH40% of the complete cycle. It is concluded that compressed sugi komisen has the effect of preventing relaxation of the contact stress between joint parts by cyclic changes of relative humidity.

As to change of maximum swelling stress (σ_{max}) due to the cyclic changes of relative humidity at 40%-80% in the restraint condition, in shirakashi it decreased to 3.3 MPa at the 3rd cycle, but compressed sugi attained 4.6 MPa at all cycles. This clarified the reason why compressed sugi komisen has a higher anti-relaxation effect than shirakashi komisen.

Keywords: komisen, compressed wood, contact stress, mortise and tenon joint, swelling stress.

第1報¹⁾に引き続き、ホゾ-込み栓接合部における接触応力を測定することによって、周期的な相対湿度 (RH: Relative Humidity) 変化が接合部間の接触応力に及ぼす影響について検討した。さらに、増し打ちによる接触応力の上昇効果を調べると共に、スギ圧縮木材を用いた込み栓が接合部の接触応力の緩和防止に及ぼす影響について評価した。

その結果、スギ圧縮込み栓を挿入した接合部の接触応力は、RH40%からRH80%への変化によってシラカシのそれより高い40Nを示し、RH85%で56Nまで到達した。かつRH40%における接触応力は、シラカシの接合部では初期の14Nが第2周期に13Nへ減少した反面、圧縮木材の場合

[†] Report I: This journal 52(1), 44-49 (2006).

^{*1} Received July 20, 2005; accepted November 16, 2005. Part of this study was presented at the annual meeting of the Japan Wood Research Society, Kyoto, March, 2005.

^{*2} 京大学生存圏研究所 Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Uji 611-0011

^{*3} Forintek Canada Corp., Quebec, QC, Canada G1P 4R4

合は初期20 Nであった値が第2周期目には27 Nへ上昇した。このような結果から圧縮木材の込み栓は、周期的な相対湿度変化により接合部の接触応力緩和の防止効果があることが明らかになった。

一方、シラカシとスギ圧縮木材の拘束状態において、相対湿度を周期的に繰り返し変化させると (RH40 %~80%), シラカシは第3周期目から最大膨潤力 ($\sigma_{\max}$) が3.3 MPa まで低下したが、圧縮木材は第4周期目まで低下することもなく同じ傾向を示し、4.6 MPa まで到達した。これによって圧縮木材がシラカシより応力緩和防止の効果を持つことが明らかになった。

1. 緒 言

ホゾ-込み栓接合部において、先穴に打ち込まれた込み栓は、常に変形を拘束された状態であり、かつ嵌合こう差 (女木側の込み栓の穴と男木側の込み栓の穴の位置差) が与えられているので、込み栓が男木を女木側に強制的に引き込むことで発生する接合部間の接触応力を長期にわたって保持する役割が期待されている。そのため、込み栓としては強度性能の高いものが要求され、シラカシのような硬く、比重の高い堅木がよく用いられてきた²⁻⁵⁾。しかし、込み栓の打ち込みによって生じた接合部間の接触応力は、外部環境の周期的な相対湿度変化により、接合部母材の乾燥に伴う収縮と常に拘束状態に置かれている堅木の膨潤応力⁷⁻⁹⁾による先穴の拡大及び堅木の収縮等の様々な影響を受けて、変動することが予想される。これは、嵌合接合部の嵌合度を低下させ、長期的に接合部の剛性やガタなどの問題を引き起こすと考えられるが、まだその詳細なメカニズムは解明されていない状況である。

一方、新たな堅木材としてスギを高密度化したスギ圧縮木材が取り上げられている¹⁰⁻¹³⁾。スギを圧縮することによって密度、硬さ、強度などが広葉樹に匹敵する材料の製造が可能になり、それを堅木材の代替品として嵌合接合部に用いることで、スギ圧縮木材の変形回復による接合部の応力緩和の防止効果が期待できるのではないかと考えられる。なお、ここで期待する変形回復メカニズムは、スギに熱を与えながら横圧縮し、変形拘束下で冷却すると、一時的に変形が固定されるが、水分と熱の作用、また長期的に相対湿度変化及び圧縮木材の内部応力によって初期変形が回復することである。

本研究では、第1報で報告した込み栓打ち込み及び部材の乾燥が接触応力に及ぼす影響¹⁾に引き続

き、ホゾ-込み栓接合部の相対湿度の調節により、周期的な相対湿度変化が接合部の接触応力度に及ぼす影響を調べた。また、新たな込み栓材料として導入したスギ圧縮木材で製造した「スギ圧縮込み栓」の回復特性による応力緩和の防止効果についても検討を加えた。

2. 材料及び方法

2.1 周期的相対湿度の変化が嵌合度に及ぼす影響

2.1.1 供試材料及び接触応力測定

全試験体は徳島県木頭林業地域で伐採されたスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) を加工したもので、Table 1 は接合部を構成する各部材の詳細を示す。そして、接合部以外の木口面に油性ペイントを用いてエンドコーティングし、嵌合こう差 2 mm (込み栓穴の位置が接合面の距離から男木側が28 mm, 女木側が30 mm で 2 mm 短い) を与えた接合部である。込み栓材は、シラカシは柾目材を選別し、スギ圧縮木材は辺材を放射方向 (Radial direction) に元体積の30%まで130℃, 30分間圧縮したもので、込み栓打ち込みは込み栓の年輪が女木材の縦方向に平行に

Fig. 1. Experimental apparatus used for measurement of the contact force in Japanese traditional mortise and tenon joints.

Table 1. Characteristics of each part assembled in mortise and tenon joints.

Specimen	Type	Species	Size (mm)	Cutting (mm)	Density (kg/m ³)
Mortise and tenon	Column	<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don	120 × 120 × 400	30 × 100 × 100 (male)	340
	Sill	<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don	120 × 120 × 600	30 × 100 × 110 (Female)	340
Komisen	Shirakasi K.	<i>Quercus myrsinaefolia</i> Blume	15 × 15 × 165	—	860
	compressed Sugi K.	<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don	15 × 15 × 165	—	1,100

Photo 1. Mortise and tenon joint for the test.

なるように挿入した。

男木と女木間の接触応力を測定する接触応力測定装置は、Fig. 1 と Photo 1 に示すように直径12 mm、長さ285 mm の鋼棒冶具に超小型圧力変換器（ゴム製感圧部の直径が6.2 mm、形式：PS-70KBM260、共和電業製）をイソシアネート接着剤で先端部に接着したものである。

2.1.2 温湿度調節条件

Fig. 2 はホゾ・込み栓接合部における周期的含水率変化が接合部の接触応力に及ぼす影響、またスギ圧縮込み栓の変形回復による初期応力緩和防止効果を調べるための相対湿度の調整スケジュールを示す。

Fig. 2 に示すように、試験チャンバー内を温度22℃、相対湿度 RH40% の条件下に保ち、試験体の重量変化率が安定するのを確認した後、試験チャンバー内の相対湿度を RH80% に変化させた。この条件下で試験体の重量変化が安定するまで相対湿度を一定に保った。その後、さらに、試験チャンバー内の相対湿度を RH40% に変化させ、この条件下で試験体の重量変化率が安定するまで相対湿度を一定に保った。

この一連の相対湿度の変動期間を第1周期（one cycle）と定義する。なお、全ての相対湿度の調節スケジュールは、試験体の重量（ W_a ）変化率によって決めた。

試験体の含水率は以下のようにして逆算した。第2周期目の RH40% の条件下で重量変化率が恒量に到達した試験体から含水率測定用切片を切断し、105℃全乾法によって含水率（ $MC_{RH40\%}$ ）を測定し、試験体のどの部分も含水率がほぼ一定値に達していると仮定して、RH40% で実測された試験体の全重量（ $W_{RH40\%}$ ）を式1）によって試験体の全乾重量（ W_0 ）を求めた。そして、全周期における試験体の重量

Fig. 2. Schedule for the cyclic change of relative humidity (RH) and time procession for the test at each cycle.

Notes: The time span of each cycle is determined by the weight-ratio of the specimen.

Photo 2. Additional Komisen insertion.

（ W_a ）を式2）によって含水率（ MC ）に変換した。なお、実験は同一試験体を3体用意し、その平均値によって以下の議論は行う。

$$W_0 = 100 W_{RH40\%} / 100 + MC_{RH40\%} \dots\dots\dots 1)$$

$$MC = (W_a - W_0) / W_0 \times 100 \dots\dots\dots 2)$$

2.1.3 込み栓の増し打ち検証

実際の建築現場において、建上げ当初に打ち込んだ込み栓を一定期間後に大工棟梁が再度よりきつく打ち直す行為を「増し打ち」と呼ぶ。本節では、大工の増し打ちによる嵌合度の上昇効果を擬似的に調べるために、全周期が終了したシラカシ込み栓試験体を、堅型万能試験機（Instron-1125 model, 100 kN）に Photo 2 のようにセットし、静的な圧縮荷重を込み栓に加えて、増し打ちによる接合部の接触応力の変化を測定した。

2.2 圧縮込み栓材の応力緩和防止効果検証

周期的な相対湿度変化条件下に置かれているスギ

Fig. 3. Measurement device for swelling stress by the cyclic change of humidity (RH40-80%).

Photo 3. Measurement device for swelling stress.

圧縮木材の変形回復特性による初期応力緩和の防止効果を解明するため、拘束状態で周期的な相対湿度変化によるシラカシ材とスギ圧縮木材の膨潤力の推移を、Fig. 3 と Photo 3 に示した膨潤力測定用治具を

用いて調べた。試験体は、15 mm×15 mm×40 mm のものを、温度22℃、相対湿度 RH40% の恒温恒湿下で長期間静置し、試験体の重量変化が恒量に到達したものを用いた。

試験体の設置は、試験体の放射方向 (Radial direction) に拘束応力がかかるように、年輪が鉄板と平行になるように設置した。試験体の拘束状態の設定は、膨潤力測定用治具の4本の鉄棒のナットを回すことによって試験体における拘束応力度の調節ができ、RH40%環境で予め養生し安定した試験体と治具を、試験体と治具との間隙をあけずに接触させる状態で組み上げ、湿度変化を与えた。

湿度調節は、RH40% (拘束応力度 0) から RH80% に変化させ、応力が安定になると、また RH40% に変化させた。この一連の湿度変化を第1周期 (one cycle) とし、全て4周期まで繰り返し行った。なお、全ての実験は同一試験体を3体用意し、その平均値によって以下の議論は行う。

3. 結果及び考察

3.1 周期的相対湿度の変化が嵌合度に及ぼす影響

3.1.1 湿度調節による接触応力の変化

全周期の相対湿度条件におけるシラカシとスギ圧縮込み栓を用いたホゾ-込み栓接合部の接触応力の時間的推移を Fig. 4 に示す。そして Fig. 5 は全期間にわたる重量変化から換算した含水率推移を示す。

初期 RH40% の条件で接触応力の初期値がそれぞれ14 N と20 N だったシラカシ込み栓を用いた接合部の接触応力とスギ圧縮込み栓を用いた接合部の接触応力は、相対湿度が RH80% 条件に変わることによって徐々に増加し、シラカシ込み栓を挿入した接合部の場合は21 N に到達したが、スギ圧縮込み栓接合部の場合は、40 N まで到達した。そして、第2周期の RH85% 条件下において、シラカシ込み栓接合部の場合は第1周期の RH80% の場合と殆ど同じ傾向を示すが、スギ圧縮込み栓接合部の場合はシラカシ込み栓接合部よりも高い上昇率を示し、56 N まで到達した。これは、相対湿度が高くなるほど、圧縮木材の膨潤による回復力が大きくなり、女木が男木をさらに強く引き込み、嵌合度が高くなることによって接触応力が高くなるものと推定される。

第1周期目に相対湿度が RH40% から RH80% になることによって接触応力が向上することは、まず接合部母材の膨潤、込み栓の膨潤、そして嵌合こう差 2 mm による影響と考えられる。実測の結果、スギ圧縮込み栓試験体が相対的にシラカシ込み栓試験体より高い接触応力を示したのは、元体積の30%まで

Fig. 4. Contact force changes by cyclic changes of humidity (RH40-80%) for the time progression.

Fig. 5. MC changes of all specimens at different RH conditions.

圧縮した圧縮込み栓の方が圧縮木材の含水率増加による変形回復量が相対的に大きかったことによると考えられる。また、吸湿含水率に依存する圧縮木材セットの回復は、圧縮木材の加圧収縮の影響により、相対湿度変化が周期的に変わることによって最大接触応力が徐々に低下することも考えられる。

一方、全周期の相対湿度が、RH40%条件における接触応力は、シラカシ込み栓接合部の場合、初期の14 Nが第2周期目の13 Nに減少したが、スギ圧縮込み栓接合部の場合は初期の20 Nが第2周期目の27 Nに上昇した。

シラカシ込み栓を挿入した接合部の場合、拘束状態にある木材が周期的な含水率変化を受けて徐々に体積減少を起こす加圧収縮によって、応力の緩和が顕著であったのに対し、スギ圧縮込み栓接合部の場合は、圧縮木材の回復力により、ホゾを引き込む力が追加されて接合部の接触応力減少を緩和したと考えられる。また、実験結果を見ると、圧縮込み栓の場合、湿度増加によって変形回復した込み栓がホゾを引き込む力は、たとえ相対湿度が低下しても、その引き込み力がある程度保つことができることが分かる。圧縮木材の変形回復の例を Photo 4 に示す。

Photo 4. Both ends of a Komisen which has recovered from 15 mm to 20 mm at the cross section by the change of relative humidity. (Inserting is done from the left side, and pushed out at the right side.)

込み栓両側の突き出した端部が回復していることが分かる。

3.1.2 込み栓増し打ちによる接触応力の変化

込み栓接合部の組み立ての初期段階において込み栓を打ち込むことで生じる接触応力は、一般のシラカシ込み栓の場合、部材の乾燥収縮によってその応力の殆どは失われることは、第1報で報告した。伝統的に大工棟梁は、もう1度込み栓を打ち込む「増し打ち」を行い、低下した接触応力を高める習慣を持っていた。本試験は第2周期目の湿度調節が終わった後、シラカシ込み栓のみに対して増し打ちを行った。Fig. 6 に増し打ちによる込み栓の変位と接触応力の推移を示す。込み栓が増し打ちされることにより、込み栓の打ち込む力がホゾの男木側に伝わり、接触応力が徐々に増加することが分かる。込み栓の余裕長の都合で、増し打ちの範囲は10 mm 以内にした。込み栓が10 mm 増し打ちされることにより、最初8.2 N 程度であった接触応力は最終的に43 N まで回復した。

Fig. 6 で示した込み栓の増し打ちによる接触応力の上昇値と Fig. 4 の第1周期目のRH80%時、及び第2周期目のRH85%時におけるスギ圧縮込み栓試験体の接触応力回復を比較すると、スギ圧縮込み栓試験体の接触応力回復は、シラカシ込み栓試験体における低下した接合部の嵌合度を高めるために行った増し打ちに匹敵する効果があることが分かった。

3.2 圧縮込み栓材の応力緩和防止効果検証

Fig. 7 は、シラカシと圧縮木材の拘束状態における周期的な相対湿度変化の繰り返し (RH40%-80%) による膨潤及び収縮特性の結果を示す。第1周期目のRH40%からRH80%の変化における最大膨潤応力

Fig. 6. Relationship between inserting force, contact force and relative displacement of the Komisen additionally inserted.

Fig. 7. Changes of swelling stress brought by the cyclic change of relative humidity in the controlled chamber (RH40-80%).

($\sigma_{\max}$) は、シラカシが100時間経過で3.7 MPa まで、圧縮木材が295時間経過で4.6 MPa まで到達した。この到達値の違いと最大値に到達するまでの経過時間の違いは、樹種の違い、比重差（シラカシ；0.8, スギ圧縮木材；1.1), 更に、圧縮過程時の熱による影響による水分拡散差などの様々な影響であると考えられる。

周期的に調べてみると、最大膨潤応力 ($\sigma_{\max}$) は、シラカシが第3周期目から3.3 MPa まで低下するが、圧縮木材は第1周期目から変わらず、第4周期目まで同じ傾向で4.6 MPa という最大値を再現した。このことは、シラカシの場合、周期的な相対湿度変化によって応力緩和が起き、最大膨潤応力 ($\sigma_{\max}$) は低下する傾向を示した。

菅野らは、膨張を拘束することにより生じる膨潤応力は、その発生過程から考え、常に応力緩和を受けると報告⁷⁾した。更に、水分平衡状態の応力緩和より水分非平衡状態で応力緩和がより激しいことも報告⁹⁾した。

しかし、スギを圧縮前体積の30%まで圧縮した圧縮木材の場合、圧縮降伏変形によって細胞内腔が殆

ど存在しない状態であるため、周期的な相対湿度変化による圧縮木材の回復によって最大膨潤応力 ($\sigma_{\max}$) の低下が見られなかったものと考えられる。

130℃の圧縮拘束下で冷却させて製造した圧縮木材は、ドラインセットによって一時的に変形が固定されているが、高温加熱あるいは蒸煮等を行わない限り、熱や水分の影響によって元の体積に回復する特性を持つことが既往の研究¹⁰⁻¹³⁾から知られている。この圧縮木材の回復特性によってスギ圧縮木材の方がシラカシより周期的な相対湿度変化による乾燥収縮によって、ガタの発生と応力緩和の発生が少なくなるものと考えられる。

シラカシなど嵌合接合部に伝統的に用いられてきた堅木と比較しても、スギ圧縮木材は込み栓、楔、そしてシャチ栓などの栓型の嵌合接合部に適応可能な特性を持ち、かつ接合部の応力緩和の防止材として適用可能であると示唆する興味深い実験事実が得られた。また、打ち込みによってスギ圧縮込み栓が込み栓の穴に拘束されるため、回復量は極めて小さいので、圧縮木材の回復による大きな強度低下の心配はないと考えられる。

4. 結 論

周期的な相対湿度変化が接合部の接触応力度に及ぼす影響及び、新たな込み栓材料として適用の可能性が考えられるスギ圧縮木材を用いた込み栓の回復による接合部の接触応力緩和防止効果を調べるために、ホゾ-込み栓接合部に周期的に相対湿度変化を与え、接合部の接触応力変化を調べた結果、次のような結論を得ることが出来た。

初期 RH40%で接触応力が20 N のスギ圧縮込み栓試験体は、RH80%でシラカシより高い回復率である40 N まで到達し、第2周期目の RH85%では更に56 N まで達した。第2周期終了時の RH40%条件における接触応力に関しては、シラカシ込み栓試験体は初期値の14 N が13 N まで減少したが、スギ圧縮込み栓試験体の場合は逆に初期値20 N が27 N まで上昇した。

スギ圧縮込み栓試験体の接触応力回復効果は、シラカシ込み栓試験体において低下した接合部の嵌合度を高めるために行った増し打ち効果に匹敵した。

シラカシと圧縮木材の拘束状態における周期的な相対湿度変化の繰り返し (RH40%-80%) による膨潤及び収縮特性については、シラカシの最大膨潤応力 ($\sigma_{\max}$) が3.7 MPa, スギ圧縮木材の最大膨潤応力 ($\sigma_{\max}$) が4.6 MPa を示した。

シラカシは第3周期目から最大膨潤応力 ($\sigma_{\max}$)

が3.3 MPaまで低下したが、圧縮木材は第4周期目の全期間を通して同一の最大値4.6 MPaを示した。

参考文献

- 1) 鄭 基浩, 黄 権煥, 小松 幸平: 木材学会誌 **52**(1), 44-49 (2006).
- 2) 坂 静雄: 建築学会論文集 (大会号) **21**, 259-268 (1941).
- 3) 河合直人: “継手仕口の種類・性能と適切な配置を知る, 地震に強い [木造住宅] パーフェクトマニュアル”, エクスナレジ, 東京, 2003, pp. 96-109.
- 4) 住吉寅七, 松井源吾: “木造の継ぎ手と仕口”, 鹿島出版会, 東京, 2003, pp. 69-73.
- 5) 鳥海義之助: “図解 木工の継手と仕口増補版”, 理工学社, 東京, 2003, p. 34.
- 6) 小松幸平, 森 拓郎: 建築学会近畿支部研究報告集 **43**(1), 構造系, 大阪, 2003, pp. 5-8.
- 7) 菅野国男: 木材学会誌 **23**(9), 419-426 (1977).
- 8) 菅野国男: 木材学会誌 **28**(4), 208-215 (1982).
- 9) 菅野国男: 木材学会誌 **40**(4), 347-355 (1994).
- 10) 飯田生穂, 則元 京: 木材学会誌 **33**(12), 929-933 (1987).
- 11) 則元 京: 木材学会誌 **39**(8), 867-874 (1993).
- 12) 東原貴志, 師岡淳郎, 則元 京: 木材学会誌 **46**(4), 291-297 (2000).
- 13) 井上雅文, 足立幸司, 金山公三: 木材学会誌 **47**(3), 198-204 (2001).
- 14) Simpson, W. T.: “Research Note (FPL-RN-0268), Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide”, Madison, WI, USA, 1998.
- 15) 高橋 徹, 中山義雄: “木材科学講座 3 物理” 海青社, 大津, 1995, pp. 32-44.
- 16) 有馬孝禮, 高橋 徹, 増田 稔: “木材科学講座 9 木質構造”, 海青社, 大津, 2001, pp. 111-126.