腐朽条件下に置いた木材の面圧強度の変化*1

滝内 浩*2, 澤田 圭*3, 佐々木貴信*3, 岡崎泰男*3,
土居修一*4, 飯島泰男*3

Embedding Strength of Wood Exposed to Decay Fungi*1

Hiroshi TAKIUCHI*2, Kei SAWATA*3, Takanobu SASAKI*3,
Yasuo OKAZAKI,*3 Shuichi DOI*4 and Yasuo IJIMA*3

The embedding strength of wood decayed by *Fomitopsis palustris* was investigated in this study. The embedding tests were conducted on decayed heartwood of sugi, karamatsu, Douglas-fir and spruce, and decayed sugi sapwood according to ASTM-D5764. The same tests were conducted on sound sugi, karamatsu, Douglas-fir and spruce at various moisture contents. Embedding strength of sound wood decreased as moisture content increased below the fiber saturation point (moisture content 28%), and became constant above the fiber saturation point independent of specimen and load direction. The strength above the fiber saturation point was 50% of the strength of air-dried specimens. The strength reduction by decay was remarkable in the spruce heartwood and the sugi sapwood. A strength reduction was not observed in other species for parallel to grain loading, but was the case only in sugi heartwood for perpendicular to grain loading. The strength reduction of decayed wood after ten weeks was greatest in sugi sapwood, followed, in order, by spruce heartwood, karamatsu heartwood, and Douglas-fir heartwood.

Keywords: Embedding strength, decay, moisture content, strength loss, decay resistance.

ASTM-D5764に準拠した面圧試験を、オオウズラタケによる強制腐朽操作を施したスギ、カラマツ、ベイマツ、スプリースの心材およびスギ辺材、ならびに含水率の異なるスギ、カラマツ、ベイマツ、スプリースの健全材に対して実施した。健全材の面圧強度は、樹種や加力方向によらず、繊維飽和点（含水率28%）以下では含水率の増加とともに直線的に低下し、繊維飽和点以上ではほぼ一定となった。その値は気乾状態の約50%であった。腐朽による強度低減はスプリース心材、スギ辺材で顕著であった。他の樹種では繊維平行方向加力では強度低減は発生しなかったが、直交方向加力ではカラマツ心材、ベイマツ心材でも強度低減が発生、腐朽10週目までに強度低減が生じていないのはスギ心材のみであった。腐朽10週目で最も強度低減が大きかったのはスギ辺材であり、以下、スプリース心材、カラマツ心材、ベイマツ心材の順であった。

*1 Received September 14, 2005; accepted August 25, 2006. 本報告の一部は第55回日本木材学会大会（2005年3月、京都）において発表した。

*2 (株)コシイプレザービング Koshii Preserving Co. Ltd., Osaka 559-0026

*3 秋田県立大学木材高度加工研究所 Institute of Wood Technology, Akita Prefectural University, Noshiro 016-0876

*4 筑波大学生命環境科学研究科 Graduate school of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8577

1. 緒 言

近代的な木質構造ではドリフトピン接合が多く用いられている。こうした木質構造では接合部の力学性能が構造物全体の特性を左右するため、腐朽により接合部周辺の木材が劣化した際にどの程度接合部の力学性能が低下するかを把握しておくことは重要なことである。腐朽劣化と木材強度の関係については藤平ら¹⁾、土居・西本²⁾、福田・原口³⁾などが、主に曲げ強度の低下を報告している。しかし、ドリフトピン接合部のせん断性能は木材の面圧強度とドリフトピンの曲げ性能によって決定されるので、腐朽による接合部の力学性能の低下程度を把握するためには、腐朽劣化と面圧強度の関係を明らかにする必要がある。腐朽菌が生育している時の木材の含水率が繊維飽和点以上であることを考えると、腐朽が発生した状態では含水率の影響を受けて面圧強度が低下していることが予想される。したがって、腐朽材の面圧強度評価に際しては含水率と面圧強度の関係も併せて明らかにし、含水率の影響を補正する必要がある。

そこで本研究では数種類の針葉樹について、強制腐朽操作を施した材、ならびに様々な含水率の健全材を用いた面圧試験を行い、腐朽劣化による面圧強度の変化を評価した。

2. 試験体および試験方法

健全材における含水率と面圧強度の関係はスギ (*Cryptomeria japonica*)、カラマツ (*Larix leptolepis*)、ベイマツ (*Pseudotsuga menziesii*)、スプルース (*Picea abies*) の心材を用いて調べた。試験体数は各樹種48体とした。試験体寸法は ASTM-D5764⁴⁾ に準じて幅89 mm、高さ89 mm、厚さ24~38 mm とし、試験体の端部に径13 mm 程度の半円形の溝を設けた。これは、ドリフトピン接合部のピン穴を中心としたときの片側半分を想定している。試験体形状は Fig. 1 に

Fig. 1. Schematic diagram of embedding test and embedding test specimen (parallel to grain direction).

示した。半円形の溝を木口面に設けた試験体（繊維平行方向加力用）と、柾目面に設けた試験体（繊維直交方向加力用）の2種類を作成した。試験体は常温で1~3週間浸水処理した後、試験に供した。

腐朽劣化と面圧強度の関係はスギ、カラマツ、ベイマツ、スプルースの心材およびスギ辺材を用いて調べた。ここではピン穴に腐朽菌が入り込んだ場合を想定し、木材に強制腐朽操作を施して面圧試験を行った。試験体寸法と形状は上記の面圧試験体と同様とし、木材の溝部分から腐朽を生じさせるため、試験体の溝以外の面にはエポキシ樹脂を塗布した。試験体数は Table 1 に示した通りであった。腐朽操作には褐色腐朽菌オオウズラタケ (*Fomitopsis palustris*) を用いた。ポリプロピレン製容器内の液体培地（麦芽エキス2%、ペプトン1%）上に予め培養しておいた腐朽菌を接種し、恒温恒湿器内（25℃100%）で10日間の培養後、滅菌処理した試験体をその溝部分が菌叢に接するように静置した。試験体は恒温恒湿器内（26℃、99% RH）で腐朽させた。腐朽操作期間は Table 1 に示すように2~10週間と

Table 1. Period of decay and number of test specimens.

Specimens	Period of decay (weeks) and loading direction											
	2		3		4		6		7		8	
	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥
Sugi (HW ^{a)})							6	6	6	6	6	6
Sugi (SW ^{b)})	3	3	6	6	6	6	7	7	6	7	7	7
Karamatsu (HW ^{a)})							6	6	6	6	6	6
Douglas-fir (HW ^{a)})							6	6	6	6	6	6
Spruce (HW ^{a)})	6	6	4	4	4	5	6	6	6	6	6	6

Notes : // : parallel to grain, ⊥ : perpendicular to grain.

^{a)} heartwood. ^{b)} sapwood.

した。腐朽操作終了後すぐ面圧試験を行い、面圧強度を求めた。健全材の気乾状態の面圧強度を求めるために、腐朽操作を施さない試験体の面圧試験を行った。試験体数は各樹種 6 体とした。

面圧試験は半円形の溝に径12 mm の丸鋼を押し込むように行い (Fig. 1), 加力方向は繊維平行および繊維直交方向とした。荷重速度は 1 mm/min. とし, クロスヘッドと試験体間の変位を 2 つの変位計を用いて測定した。面圧試験後, 試験体から溝部分を含む小片を切り出し, 溝近傍の含水率を全乾法により求めた。

3. 結果と考察

3.1 面圧強度の評価法

面圧試験から得られた荷重を試験体の厚さ (24~38 mm) と丸鋼の直径 (12 mm) で除して面圧応力を求めた。面圧強度は ASTM-D5764⁴⁾ に準じ, 5 % off-set 法から求めた。すなわち, Fig. 2 に示すように, 応力-変位曲線上の 0.1 Pmax と 0.4 Pmax を結んだ直線を丸鋼の直径の 5 % 相当の変位だけ X 方向へ平行移動し, 応力-変位曲線との交点の面圧応力を面圧強度とした。しかし繊維直交方向加力においては, Fig. 3 に示したように明確な降伏点が見られず, 5 % off-set 法が適用できない場合があった。この場合, 面圧強度を求めることができた試験体の結果を基に降伏変位を推定し, 降伏変位までの最大応力を繊維直交方向の面圧強度とした。検討の結果, めり込み変位 2.5 mm までの最大面圧応力と 5 % off-set 法で求めた面圧強度の値がほぼ一致した (Fig. 4)。この結果を基に降伏変位を 2.5 mm と定めることとした。

3.2 面圧強度と含水率

含水率による強度データ調整法としては, ASTM-D-2915, 同 D-1990, prEN384 などの方法が知

Fig. 2. Evaluation method of embedding strength by 5% offset method.

Fig. 3. Examples of embedding stress and embedment curve of perpendicular to grain direction specimens.

Legends: — : sound, - - - : 6 weeks decay, - · - : 8 weeks decay

Fig. 4. Relationship between f_y and $f_{2.5}$ of perpendicular to grain direction in decayed wood.

Legends: ● : Sugi (HW), ○ : Sugi (SW), □ : Karamatsu (HW), ▲ : Douglas-fir (HW), ◇ : Spruce (HW)

Notes: HW : heartwood, SW : sapwood, f_y : embedding strength by 5% offset method, $f_{2.5}$: embedding stress at 2.5 mm

られている⁵⁾が, ここでは健全材における含水率と面圧強度の関係を調べた実験結果を基に調整を行うこととした。Table 2 に気乾材の面圧強度を, Fig. 5 に含水率の異なる健全材の面圧強度を気乾材の強度の平均値で除した値 (以下, 面圧強度比と呼ぶ) と含水率の関係を示す。面圧強度比は, いずれの樹種や加力方向においても, 繊維飽和点 (含水率28%) までは含水率の増加とともに直線的に低下し, 繊維飽和点以上では約0.5でほぼ一定となった。これら

Table 2. Embedding test results of air-dried, sound test specimens.

Specimens		MC ^{b)} (%)		fd ^{c)} (MPa)		δ _y ^{d)} (mm)	
		Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
Sugi (HW ^{a)})	//	13.8	0.53	27.0	3.33	2.16	0.37
	⊥	13.7	0.43	10.7	1.23	2.39	0.20
Karamatsu (HW ^{a)})	//	10.1	0.33	43.6	8.08	1.75	0.28
	⊥	10.1	0.39	20.2	3.62	2.26	0.31
Douglas-fir (HW ^{a)})	//	14.1	0.28	53.1	4.69	1.55	0.20
	⊥	14.1	0.29	20.0	4.58	2.06	0.13
Spruce (HW ^{a)})	//	12.8	0.27	34.4	7.53	3.03	0.47
	⊥	12.7	0.25	13.4	1.35	2.67	0.31

Notes: //: parallel to grain, ⊥: perpendicular to grain.

a) heartwood, b) moisture content, c) embedding strength.

d) yield embedment.

の結果を基に面圧強度と含水率の関係を求めると、式(1)に示すようなバイリニア型モデルで示すことができた。

$$\begin{aligned}
 fe &= \left\{ 1 - (ue - ud) \times \frac{r}{100} \right\} \times fd \quad (ue < 28\%) \\
 &= \left\{ 1 - (28 - ud) \times \frac{r'}{100} \right\} \times fd \quad (ue \geq 28\%) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、 fe は推定面圧強度 (MPa), ue は測定含水率 (%), ud は気乾含水率 (%), r, r' は回帰直線の傾き, fd は気乾時の面圧強度 (MPa) である。得られた r は約0.030~0.037, r' は約0.5であった。

3.3 強制腐朽材の面圧強度

Fig. 6に強制腐朽材の面圧強度と腐朽期間の関係を示す。10週間強制腐朽させた材の面圧強度をそれぞれの気乾状態の健全材と比較すると、スギ辺材では10~15%, スプルース心材では20~30%, スギ心材, カラマツ心材, ベイマツ心材では50~60%に低下した。しかしこの結果には、含水率変化による影響が含まれており、腐朽劣化と面圧強度の関係を明らかにするためには含水率の影響を除く必要がある。そこで、3.2で得られた面圧強度比と含水率の関係を表す式(1)に強制腐朽材の試験時の含水率 ue を適用して、健全材の ue における面圧強度を推定し、この値に対する強制腐朽材の面圧強度の比を求め、この値を含水率の影響を除いた腐朽劣化の評価パラメータ (以下、「強度低減係数」とする) として用いた。なお、スギ辺材の面圧強度値は、スギ心材に対する試験から求められた結果より推定した。この場合、推定した基準強度と実際の強度の違いによるばらつきが生じるものの、強度低減係数が1.0より小さくなるほど腐朽による強度低減が大きいことを示すことになる。

Fig. 7に腐朽期間と強度低減係数との関係を示す。

Fig. 5. Relationship between moisture content and embedding strength.

Legends: —: Approximate line by Bi-linear model, ●: Sugi (HW), □: Karamatsu (HW), ▲: Douglas-fir (HW), ◇: Spruce (HW)

Notes: HW: heartwood, fw: embedding strength when the moisture content is w, fd_{avg} : average embedding strength at air-dry condition

以下に加力方向ごとに樹種間の比較を行う。繊維平行方向加力で腐朽による強度低減が見られたのは、スギ辺材および耐朽性区分が「極小」⁶⁾に分類されているスプルース心材であり、どちらも腐朽6週目以降に強度低減が発生した。強度低減係数は腐朽期間が長くなるとともに小さくなり、腐朽10週目の強

Fig. 6. Influence of decay period on embedding strength.
Notes: HW: heartwood, SW: sapwood

強度低減係数は、スギ辺材で0.1～0.6、スプリース心材で0.2～1.0の範囲の値を示した。一方、心材耐久性区分が「中」⁶⁾に分類されているスギ心材、カラマツ心材、ベイマツ心材については、いずれも腐朽10週目まで強度低減係数は1.0～1.5の範囲の値を示し、腐朽による強度低減は起こっていないと考えられる。

繊維直交方向加力でも、スギ辺材およびスプリース心材は強度低減が見られ、スプリース心材では4週目以降、スギ辺材では6週目以降に低減が発生した。強度低減係数は腐朽期間が長くなるとともに小さくなり、腐朽10週目の強度低減係数は、スギ辺材で0.1～0.3、スプリース心材で0.3～0.6の範囲の値を示した。スギ心材、カラマツ心材、ベイマツ心材はいずれも、繊維平行方向加力では強度低減が見られなかったが、繊維直交方向加力では強度低減の程度に差が見られた。カラマツ心材では7週目以降から

Fig. 7. Influence of decay period on embedding strength reduction ratio.

Notes: HW: heartwood, SW: sapwood

強度低減が発生、10週目の強度低減係数は0.1～0.8の範囲の値を示し、ベイマツ心材では腐朽8週目以降から強度低減係数が0.2前後の値を示した試験体が見られ、10週目では0.2～1.0の範囲の値を示したのに対し、スギ心材では腐朽による強度低減は発生しなかった。

4. 結 論

本研究では、腐朽により接合部周辺の木材が劣化した際にどの程度接合部の力学性能が低下するかを把握することを目的として、ボルト穴内部の腐朽を想定したオオウズラタケによる強制腐朽操作を施したスギ、カラマツ、ベイマツ、スプリースの心材およびスギ辺材、ならびに含水率の異なるスギ、カラマツ、ベイマツ、スプリースの健全材に対して面圧試験を行い、以下に示す結果を得た。

- 1) 健全材の面圧強度はいずれの樹種においても、繊維飽和点（含水率28%）以下では含水率の増加とともに直線的に低下し、含水率が繊維飽和点以上になるとほぼ一定となり、その値は気乾状態の約50%であった。
- 2) 繊維平行方向加力については、耐朽性区分「極小」⁶⁾のスプルス心材で面圧強度の強度低減が最も早く発生し、次いでスギ辺材で発生した。耐朽性区分「中」⁶⁾であるスギ、カラマツ、ベイマツ心材については、腐朽10週目まで強度低減は発生しなかった。
- 3) 繊維直交方向加力については、スプルス心材、スギ辺材で同時に強度低減が発生した。また、カラマツ、ベイマツ心材でも強度低減の発生が見られた。腐朽10週目まで強度低減が発生しなかったのはスギ心材のみであった。
- 4) 腐朽が発生した樹種では、腐朽期間が長くなるとともに強度低減係数は小さくなり、腐朽10週目の強度低減係数は、繊維平行方向加力につい

てはスギ辺材で0.1～0.6、スプルス心材で0.2～1.0、繊維直交方向加力についてはスギ辺材で0.1～0.3、スプルス心材で0.3～0.6、カラマツ心材で0.1～0.8、ベイマツ心材で0.2～1.0の範囲の値を示した。

文 献

- 1) 藤平真紀子, 中村嘉明, 磯田憲生, 正田洋子: 木材学会誌 **43**(7), 589-594 (1997).
- 2) 土居修一, 西本孝一: 木材学会誌 **32**(9), 724-729 (1986).
- 3) 福田清春, 原口隆英: 東京農工大農学部演習林報告 **11**, 25-29 (1974).
- 4) "Annual Book of ASTM Standards", ASTM, West Conshohocken, USA, 2004, pp. 608-611.
- 5) "構造用木材の強度試験法", (財)日本住宅木材センター, 東京, 1997, pp. 18-19.
- 6) "木材保存学入門", 日本木材保存協会, 東京, 2001, p. 50.