木材腐朽がビス接合部のせん断性能と変形挙動におよぼす変化

上田　麟太郎[1]・澤田　圭[2]・高梨　隆也[3]・佐々木　貴信[4]

[1]学生　北海道大学大学院　農学研究院（〒060-8589 北海道札幌市北区北 9 条西 9 丁目）
E-mail: hokkai_arsenal@eis.hokudai.ac.jp

[2]非会員　北海道大学大学院講師　農学研究院（〒060-8589 北海道札幌市北区北 9 条西 9 丁目）
E-mail: ksawata@for.agr.hokudai.ac.jp

[3]非会員　北海道立総合研究機構　林産試験場（〒071-0198 北海道旭川市西神楽 1 線 10 号）
E-mail: takanashi-ryuuya@hro.or.jp

[4]正会員　北海道大学大学院教授　農学研究院（〒060-8589 北海道札幌市北区北 9 条西 9 丁目）
E-mail: tak-sas@for.agr.hokudai.ac.jp

本研究では，褐色腐朽菌であるオオウズラタケ(*Fomitopsis palustris*)を用いて強制腐朽処理を行ったトドマツ(*Abies sachalinensis*)材に腐朽部の上からビス 1 本で鋼板を留め付けたビス接合部に対し，鋼板添え板一面せん断試験を行った．ビスの変形を観察したところ腐朽試験体とコントロールとで優勢な降伏モードは明らかに異なっており，腐朽による支圧強度の低下が変形挙動の違いを与えたことが示唆された．腐朽性状の評価を目的としてピロディン打ち込み深さを測定し，また試験体の断面のビス留め付け位置において腐朽部の深さを測定した．ピロディン打ち込み深さは強度特性値のいずれとも有意な相関を示さなかった．腐朽深さは初期剛性との間に有意水準 1%において有意な負の相関が認められた．腐朽深さと健全部の密度を説明変数とする重回帰分析から，強度特性値は腐朽深さと健全部密度から高確度で説明が可能であると示された．

Key Words: *wood decay, screwed joints, brown-rot fungus, shear test, timber repair*

1.　はじめに

木材腐朽に関しては腐朽の機構[1), 2)]のほか，各種材料強度についてもまた長きにわたり数多くの研究[3-5)]が行われ，様々に知見が蓄積されてきた．一方で木質構造物にとって肝要となる各種の機械的接合部については，その腐朽劣化に関する研究は釘接合部[6-8)]やボルト接合部を中心として数例が最近になり行われた程度であり，データの蓄積は進んでおらず，接合部の腐朽劣化に関する研究は全般的に不足している．そのために接合部が腐朽劣化を受けた場合の変形挙動の特徴や強度低下の程度はいまだ明らかではなく，腐朽性状の診断に基づく接合部の強度評価手法が確立されていないため，部材に劣化を生じた木質構造物の補強の機会を損ね，安易な建て替えに至っている可能性がある．

木質構造物の補強には金物を劣化部材やその周囲にビス接合して用いる方法があるが，これにあたっては腐朽の生じている箇所にビスを挿入して金物で補強を行うことも考えられる．ゆえに，このような補強方法の開発にあたっては腐朽性状の診断に基づく強度評価手法が必要である．したがってこれに先立ち，腐朽材のビス接合部について，その強度特性や変形挙動に関しての知見が求められる．腐朽したビス接合部に対しては森らによる研究[9), 10)]があるが，用いるビスの長さが異なる場合については他に研究例がなく，データが不足している．

そこで本研究では，強制腐朽処理を施した木材に既往研究より長寸のビスを用いて金物を接合したビス接合部に対し一面せん断試験を行い，部材の腐朽に対するビス接合部の残存耐力を求め，腐朽材におけるビス接合部の変形挙動の違いについて評価を行った．また，腐朽性状をピロディン打ち込み深さおよび腐朽深さとして調べ，ビス接合部の強度特性を腐朽性状と関連付けて検討した．

2.　実験概要

(1)　試験体概要

試験体にはトドマツ(*Abies sachalinensis*)材を用い，試験体寸法は断面 60×60mm，　長さ 300mm とした．年輪接触角の違いによる影響を低減するため，試験体はいずれも柾目材となるよう木取りして製材した．腐朽試験体は 12 体，コントロールは試験体の幅を材料調達上の都合から 45mm としたものを含め 9 体を用意した．

(2)　強制腐朽処理

腐朽試験体に対しては一般的な褐色腐朽菌であり，日本工業規格 JIS Z2101:2009 木材の試験方法 26 耐朽性試験 [11]などにおいて供試菌と定められたオオウズラタケ(*Fomitopsis palustris*)による強制腐朽処理を行った．強制腐朽処理には腐朽源ユニット法を用い，ポリプロピレン容器(幅 188×長さ 129×深さ 43mm)に充填したポテトデキストロース寒天培地上にオオウズラタケを生育させて作製した腐朽源ユニット(図-1)を，菌糸が試験体表面の木表側に接するよう梱包用ラップを用いて試験体に取り付けることで行った(図-2). 腐朽処理期間は 22 週間とし，その間，試験体を温度 28℃，相対湿度 75%環境下に静置した．腐朽処理期間が終了後，試験体から腐朽源ユニットを取り外し，湿度無調整の室温環境下で 2 週間静置して養生した．

(3)　ビス接合部の一面せん断試験方法

各試験体には先穴を設けず，一面せん断試験の直前に鋼板(幅 50×長さ 242×厚さ 6mm)を”TBA-65D”ビス(φ=6mm，長さ 65mm うち首下長さ 59mm，(株)タナカ製，図-3)1 本によって留め付けた．試験体の腐朽部には表面の痩せがみられる場合があったが, 鋼板は腐朽部より幅, 長さとも大きく，取り付けにあたり表面の痩せは支障とならなかった．ビスの留め付け位置はコントロールでは材端から 80mm，　腐朽試験体では腐朽処理位置の中央(いずれも材端から約 80mm)とした. 試験体概要を図-4 に示す.

加力にあたっては試験体左右に取り付けた変位計により試験体と鋼板との相対すべり量を測定し，その平均値を荷重に対するビス接合部の変位として用いた．一面せん断試験では，予備試験として行った健全材の単調引張試験における降伏変位の値(2．4mm)を基準として，繰り返し設定変位をその 1/2，1，2，4 倍とした一方向繰り返し加力を行ったのち，破壊に至るまで，または変位が 40mm を超えるまで単調加力を行った．なお予備試験における降伏変位の値は，最大荷重の 10，40，90%点を用いた完全弾塑性モデル化による評価方法 [12]に基づき決定した降伏点から求めた．加力方法を図-5 に示す．試験終了後に各試験体の主材をビスを通る断面で割断し，主材内におけるビスの変形形態を観察して接合部の降伏モードを決定した．

なお，試験終了直後に各試験体の健全部から求めた含水率は 8.5～11.4%であった．

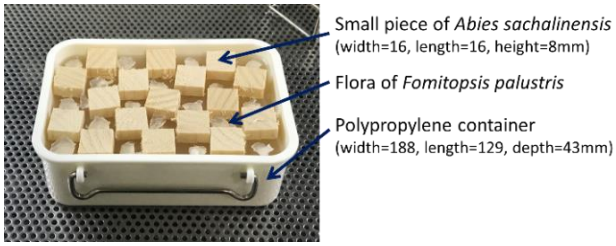

図-1　Rot fungus feeder unit.

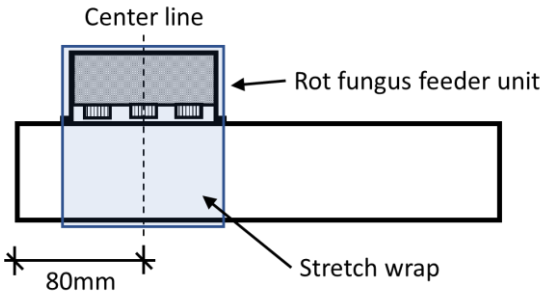

図-2　Attachment of the rot fungus feeder unit.

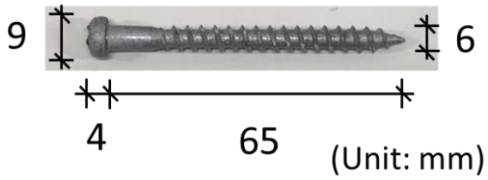

図-3　Screw “TBA-65D”.

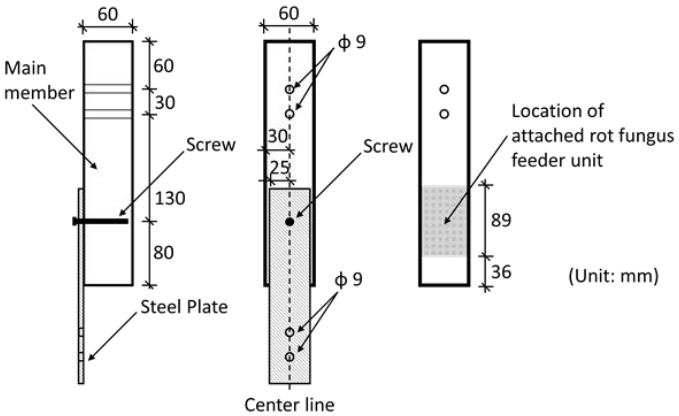

図-4　Outline of the specimen.

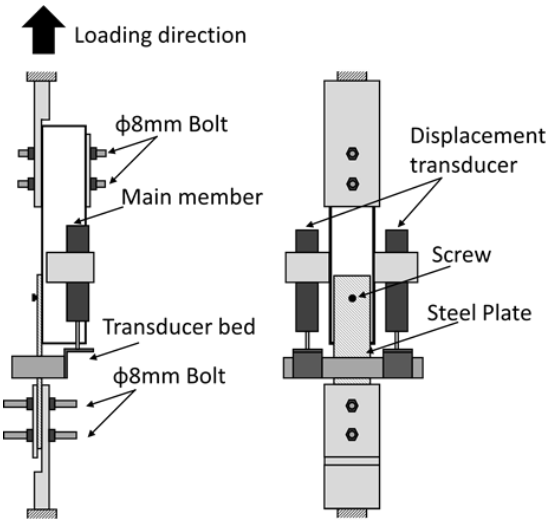

図-5　Setup of shear tests for screwed joints.

(4)　腐朽性状の評価

腐朽性状の評価として，ピロディン打ち込み深さおよび腐朽深さの測定を行った．ピロディン打ち込み深さはピロディン(エフティーエス社製，ピン径 2.5mm，打ち込みエネルギー6J，最大打ち込み深さ 40mm)を用いて各試験体のビス留め付け位置の近傍で測定した．腐朽深さは試験終了後にビスの変形形態の観察のため試験体を割断した際，その断面のビス留め付け位置において目視で確認される腐朽による褐変部について，試験体表面の痩せを考慮し，試験体の下側から褐変部の最下部までの距離を測定して材厚から差し引くことにより求めた(図-6).

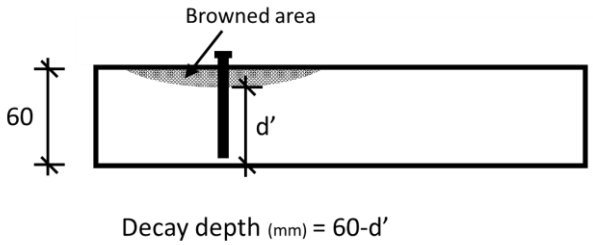

図-6　Way to determine the decay depth.

3.　結果と考察

(1)　試験体の破壊性状

腐朽試験体 12 体中 11 体およびコントロール 9 体中 7 体が変位 40mm までに破壊した(破壊しなかったコントロール 1 体は最大荷重に達したのち変位 30mm 付近で試験を中断)が，試験体の破壊はいずれもビス頭部の破断により生じていた．試験体の破壊性状の一例を図-7 に示す.

図-7　Specimen failure caused by the screw breakage.

(2)　ビス接合部の降伏モード

観察されたビス接合部の降伏モードは EYT(ヨーロッパ型降伏理論)[13]に定義された降伏モードのうちモード III とモード IV の 2 種類(図-8)であった．腐朽試験体では 12 体中 9 体が接合具に生じる塑性ヒンジの数が 1 つであるモード III，3 体が塑性ヒンジの数が 2 つであるモード IV で降伏したのに対しコントロールでは 9 体中 2 体がモード III，7 体がモード IV で降伏しており，2 者の間で優勢な降伏モードが異なっていた．腐朽試験体においてモード III での降伏がモード IV に対し優勢であったことは，腐朽による木材の支圧強度低下のため接合具全体が木材にめり込んでいき，塑性ヒンジの形成が遅れたという釘接合部での実験結果 [8]に一致しており，腐朽の結果として木材のめり込み強度が低下し塑性ヒンジの形成が遅れることで, モード III での降伏を生じやすくなる変形挙動の変化が生じたと推察できる.

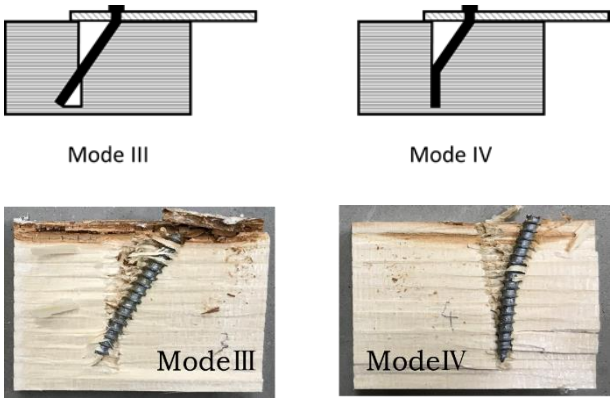

図-8　Observed failure modes of the screwed joints.

(3) 接合部性能の評価

試験より得られた荷重-変位曲線の一例を**図-9** に示す．接合部性能の評価方法には，最大荷重の 10，40，90%点を用いた完全弾塑性モデル化による評価方法 [12]を用い，荷重-変位曲線からバイリニア近似により降伏点を決定して，降伏荷重および初期剛性の各特性値を求めた．ただし，荷重の立ち上がりが遅い 3 試験体(腐朽試験体 1 体およびコントロール 2 体)については，この方法でのバイリニア近似が困難であった．これらに対してはいずれも最大荷重の 10，60，80%点を用いることでバイリニア近似が可能であったことから，この 3 点を用いて降伏点を決定し，各特性値を求めた．また，荷重-変位曲線からせん断エネルギーをエネルギー吸収量として算出した．求めた特性値をピロディン打ち込み深さ，腐朽深さ，含水率，健全部の密度とともに**表-1** に示す．

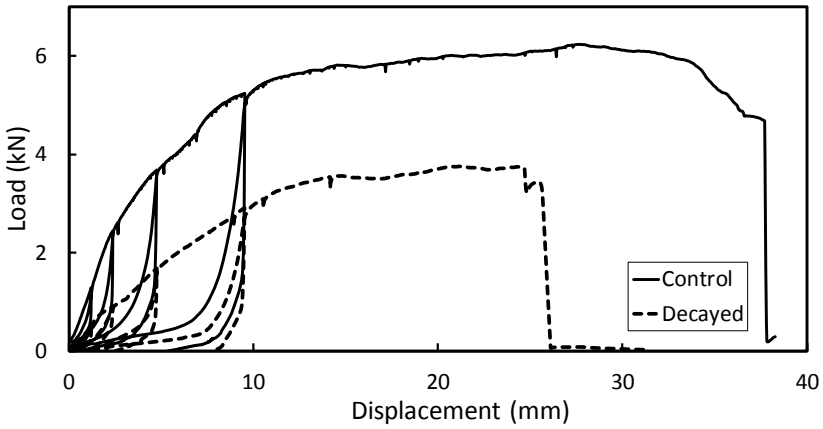

図-9 Load - displacement curves of the screwed joints (examples).

表-1 Strength properties and other properties of the specimens.

Name	Strength Properties				d_p(mm)		D (mm)	WD_h(kg/m^3)	MC (%)
	P_{max}(kN)	P_y(kN)	K_s(kN/mm)	U_s(J)	Sound part	Decayed part			
Control									
C-1	5.55	2.90	0.42	174.03	21			468	10.2
C-2	5.96	3.62	0.61	135.05	18			493	10.6
C-3	4.47	3.53	0.24	83.67	25			314	8.5
C-4	6.34	4.81	0.45	160.44	23.5			361	8.5
C-5	5.90	3.85	0.37	177.25	23.5			409	9.6
C-6	4.28	2.56	0.35	47.19	23.5			398	9.5
C-7	5.76	2.93	0.40	157.23	23			383	10.0
C-8	6.02	3.39	0.75	180.52	21.5			417	9.7
C-9	5.13	3.09	0.31	60.81	20			403	9.9
Decayed									
D-1	5.22	3.34	0.38	86.10	19.5	24	6.00	481	11.4
D-2	3.83	2.35	0.33	75.51	20	22	1.35	352	10.9
D-3	3.69	1.88	0.26	65.16	26	32	8.20	446	10.9
D-4	3.58	2.16	0.21	41.33	16	20	9.05	462	11.0
D-5	4.28	2.37	0.37	50.68	22.5	22	1.75	450	10.8
D-6	3.57	2.04	0.30	67.37	20	24	5.20	400	11.1
D-7	5.18	3.02	0.41	103.13	18	20	3.55	473	10.9
D-8	2.72	1.58	0.16	26.03	18	21	20.25	491	11.0
D-9	4.88	3.09	0.33	90.12	17	25.5	10.40	477	11.1
D-10	5.04	2.46	0.45	174.62	20	23.5	3.00	497	10.7
D-11	4.83	2.97	0.45	137.51	18	23	4.10	525	10.5
D-12	5.64	3.90	0.52	161.77	18	18	4.75	527	10.6

Note: P_{max}=Maximum shear load, P_y=Yield shear load, K_s=Initial stiffness, U_s=Shear energy capacity, d_p=Pilodyn penetration depth, D =Decay depth, WD_h=Wood density of sound part, MC =Moisture content

(4) 腐朽性状と接合部性能

a) 腐朽による接合部性能の変化

腐朽試験体・コントロール間で各特性値について Welch の t 検定により有意差検定を行ったところ，最大荷重および降伏荷重について有意水準 1%，せん断エネルギーについて有意水準 5%においてそれぞれ有意差が認められたが，初期剛性については有意差を認められなかった．これは，釘接合部や複数本のビス接合部において，接合部の初期剛性は腐朽により低下しなかったとの報告[8),14)]と同様の傾向である．

b) ピロディン打ち込み深さと接合部性能

腐朽試験体において健全部に対し測定したピロディン打ち込み深さは腐朽部(ビス留め付け位置の近傍)での測定値との間に有意水準 5%において有意差が認められ，腐朽によりピロディン打ち込み深さは有意に増加していた(図-10).

ピロディン打ち込み深さと各特性値との関係を図-11に示す．腐朽試験体・コントロールとも，各特性値とピロディン打ち込み深さとの間に有意な相関は認められなかった．ピロディン打ち込み深さの測定にあたってはピロディン頭部を試験体表面に押し付ける必要があるが，腐朽試験体では試験体表面に痩せや割れを生じており，ピロディン頭部が試験体にめりこむ場合があったため，強度特性に対して測定値のばらつきが大きかったものと考えられる．いっぽうコントロールでは先述のように接合部の変形において材中でビスの曲げ変形を伴う例が多かったために，ピロディン打ち込み深さを接合部の強度特性値に単純に関連付けることが困難であったものと考えられる．

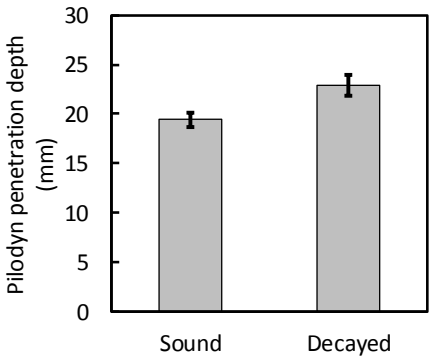

図-10 Pilodyn penetration depth of sound part and decayed part of decayed specimens.

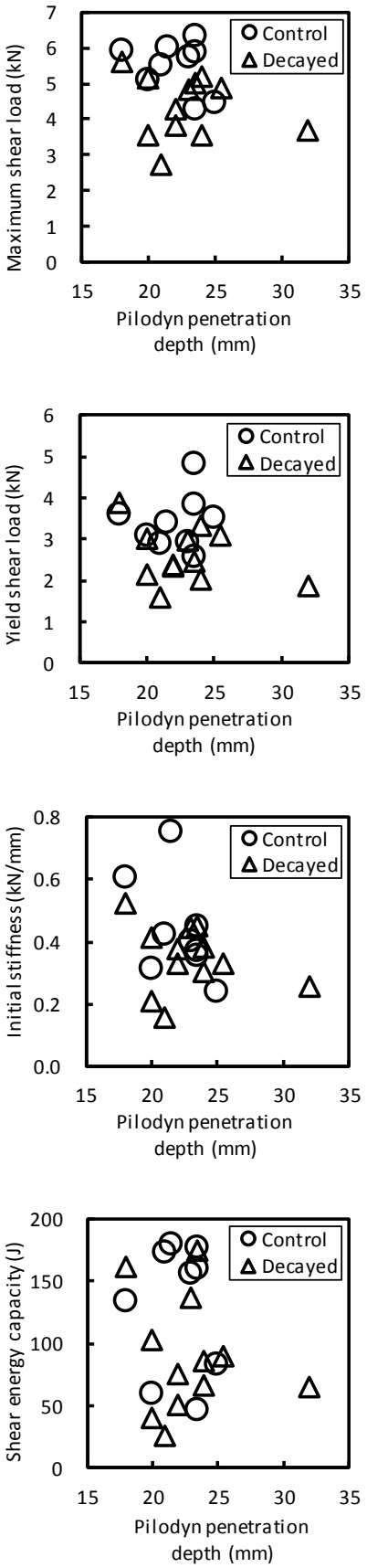

図-11 Relationships between Pilodyn penetration depth and strength properties.

c)　腐朽深さと接合部性能

腐朽深さと各特性値との関係を**図-12** に示す．腐朽深さは初期剛性との間には有意水準 1%において有意な負の相関を認められたが，最大荷重，降伏荷重，せん断エネルギーとの間に有意な相関は認められず，腐朽深さによる強度特性値の説明は困難であるとの結果を得た.

d)　腐朽深さと健全部密度による接合部性能の推定

腐朽深さと強度特性値とが十分な相関関係を示さなかったことに関連して，腐朽深さの値が約 1～20mm であったのに対し主材の厚さは 60mm，ビスの有効長さは 59mm(ビスの首下長さ 65mm から鋼板の厚さ 6mm を引いた値)であったことから，接合部の強度特性には腐朽深さに加えて腐朽部直下の健全部の特性が関わっていることが十分に考えられた．そこで腐朽試験体の健全部から求めた密度(健全部密度)および腐朽深さを説明変数とし，各強度特性値に対して重回帰分析を行い，次の(1)～(4)式を得た.

$$P_{max} = 0.0121 \times WD_h - 0.124 \times D - 0.433 \quad (1)$$

$$P_y = 0.00838 \times WD_h - 0.0734 \times D - 0.827 \quad (2)$$

$$K_s = 0.00130 \times WD_h - 0.0177 \times D - 0.141 \quad (3)$$

$$U_s = 0.621 \times WD_h - 6.01 \times D - 160 \quad (4)$$

ここで，P_{max}：最大荷重(kN)，P_y：降伏荷重(kN)，K_s：初期剛性(kN/mm)，U_s：せん断エネルギー(J)，WD_h：健全部の密度(kg/m^3)，D：腐朽深さ(mm)を示す．また，重回帰式(1)～(4)の決定係数と，各強度特性値に対する腐朽深さ，または健全部密度を説明変数とした単回帰における決定係数を**表-2** に示す.

腐朽深さまたは健全部密度による各強度特性値への単回帰は，腐朽深さによる初期剛性の単回帰を除きすべて有意でなかった．いっぽう重回帰式(1)～(4)はいずれも有意水準 5%において有意であった．したがって腐朽深さと健全部密度を説明変数として，単回帰は困難であっても重回帰により各強度特性値は高確度で説明可能であることが示された．初期剛性については，腐朽深さによる単回帰に対して健全部密度を説明変数に加えた重回帰では決定係数が上昇し，回帰の精度が向上した．なお本試験の結果において腐朽深さと健全部密度との間には有意な相関は認められず，重回帰分析において 2 説明変数は独立であり，腐朽深さと健全部密度とが相乗的に腐朽接合部の強度特性値を与えていたことが示唆された．重回帰式(1)～(4)によりそれぞれ推定した各強度特性値と，実験により求めた各強度特性値との関係を**図-13** に示す。

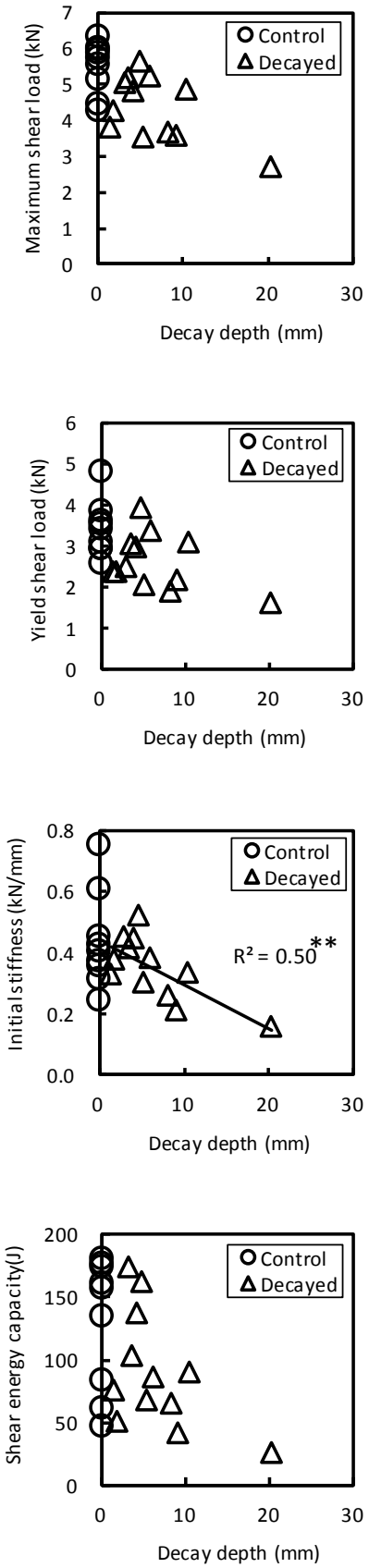

図-12　Relationships between the decay depth and strength properties. (**= significant at the 1% level)

表-2　Coefficient of determination (R^2) of single and multiple regression of strength properties on WD_h and D.

	Single regression: Variables		Multiple regression: Variables
	WD_h	D	WD_h and D
P_{max}	R^2=0.25	R^2=0.31	R^2=0.74***
P_y	R^2=0.23	R^2=0.17	R^2=0.53*
K_s	R^2=0.14	R^2=0.50**	R^2=0.85*****
U_s	R^2=0.25	R^2=0.25	R^2=0.66**

*=significant at the 5% level.**=significant at the 1% level. ***=significant at the 0.5% level. *****=significant at the 0.05% level.

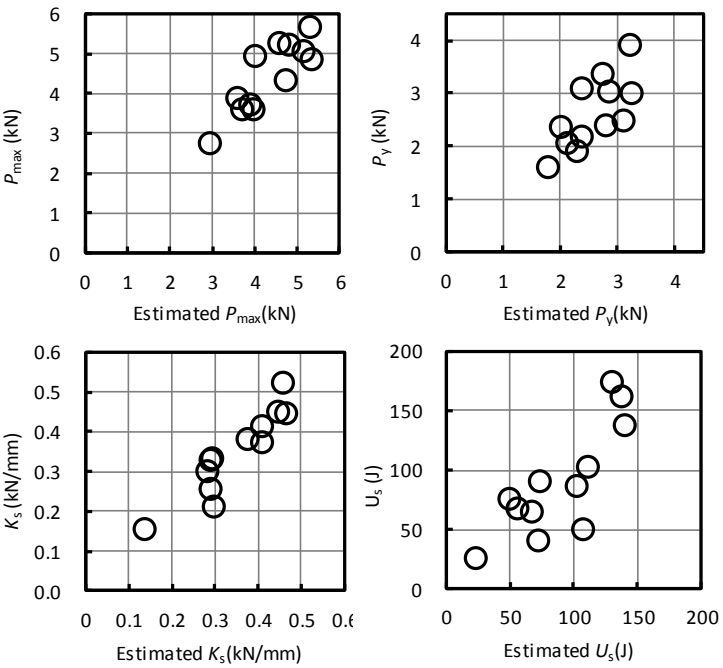

図-13　Comparison between the test results and estimated values of the strength properties.

4.　結論

本研究は腐朽の生じた接合部の強度評価および強度評価手法の確立に必要となる強度特性や変形挙動に関しての知見をビス接合部について得ることを目的とした．そのために本研究では，強制腐朽処理を施したトドマツ材に鋼板を接合したビス接合部に対し一面せん断試験を行って部材の腐朽に対するビス接合部の残存耐力を求め，腐朽材におけるビス接合部の変形挙動の違いについて評価を行った．また，腐朽性状をピロディン打ち込み深さおよび腐朽深さとして調べ，ビス接合部の強度特性を腐朽性状と関連付けて検討した．

強度試験の結果，以下のような結果が得られた．

- せん断試験において腐朽試験体 12 体中 11 体，コントロール 9 体中 7 体が破壊した．破壊はすべてビスの破断により生じていた．
- 試験体の降伏モードは，腐朽試験体ではヨーロッパ型降伏理論(EYT)におけるモード III，コントロールではモード IV の降伏がそれぞれ優勢であった．腐朽による主材の支圧強度低下によって塑性ヒンジ形成が遅れる変形挙動の変化が生じ，モード III の降伏が増えたと考えられる．
- 腐朽によりビス接合部の最大荷重および降伏荷重，せん断エネルギーは有意に低下した．初期剛性は有意には低下しなかった．
- 腐朽試験体，コントロールとも，ピロディン打ち込み深さと強度特性値の間には有意な相関が認められなかった．腐朽深さは強度特性値のうち，初期剛性との間にのみ有意な負の相関が認められた．
- 腐朽試験体の強度特性値について，腐朽深さに加え健全部密度を説明変数として重回帰分析を行ったところ重回帰式はいずれも有意水準 5%で有意であった．腐朽深さまたは健全部密度による単回帰が困難であっても，各強度特性値は腐朽深さおよび健全部密度から重回帰により高確度で説明が可能であったと示された．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 17K07870 の助成を受けた．

参考文献

1) 高橋旨象,西本孝一：木材の腐朽機構に関する研究(第 1 報)腐朽にともなうブナおよびスギ材の強度の変化，木材研究，Vol. 41, pp.75-89, 1967.
2) Schmidt, O.: Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control, *Mycol Progress*, Vol. 6, pp.261-279, 2007.
3) 土居修一，中井孝：ナミダタケで腐朽したエゾマツ材の曲げ強度と化学成分，木材学会誌，Vol. 32, No.9, pp.724-729, 1986.
4) 藤平眞紀子，中村嘉明，磯田憲生，疋田洋子：枠組壁工法構造用木材の耐朽性と曲げ強度性能の変化，木材学会誌，Vol.43, No.7, pp.589-594, 1997.
5) 森拓郎，簗瀬佳之，田中圭，河野孝太郎，野田康信，森満範，栗崎宏，小松幸平：生物劣化を受けた木材の曲げおよび圧縮強度特性とその劣化評価，材料，Vol. 62, No. 4, pp.280-285, 2013.

6) Kent, S., Leichti, J., Rosowsky, D., Morrell, J.: Effects of Decay on the Cyclic Properties of Nailed Connections, *J. Matel. Civil Eng*., Vol. 17, No. 5, pp. 579-585, 2005.
7) Takanashi, R., Sawata, K., Sasaki, Y., Koizumi, A.: Withdrawal Strength of Nailed Joints with Decay Degradation of Wood and Nail Corrosion, *J. Wood Sci*., Vol. 63, No. 2, pp. 192-198, 2017.
8) 戸田正彦，森満範，大橋義徳，平井卓郎：木材腐朽が釘接合部のせん断性能に及ぼす影響，木材学会誌，Vol. 56, No. 1, pp. 41-47, 2010.
9) 森拓郎,野田康信,東智則,森満範,戸田正彦：強制腐朽処理を施した木ねじ接合部の一面せん断性能評価，構造工学論文集, Vol.60B, pp.371-375, 2014.
10) 森拓郎,野田康信,東智則,森満範,戸田正彦,五十田博：強制腐朽処理を施した木材にあと施工した木ねじ接合の一面せん断性能評価，構造工学論文集，Vol.61B, pp.237-241, 2015.
11) JIS Z 2101，木材の試験方法 26 耐朽性試験, 2009.
12) 日本住宅･木材技術センター : 木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2008 年版), pp.561-592, 2008.
13) 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―, pp.26-71, 2006.
14) 高梨隆也，戸田正彦，宮内輝久，森満範，森拓郎：腐朽した木材における複数本ビスの接合部耐力，木材学会誌. Vol. 64, No. 3, pp. 122-129, 2018.

(Received August 31, 2019)
(Accepted November 11, 2019)

EFFECTS OF WOOD DECAY ON THE STRENGTH PROPERTIES AND DEFORMATION PROCESS OF THE SCREWED JOINTS

Rintaro UEDA, Kei SAWATA, Ryuya Takanashi, and Takanobu SASAKI

Single shear tests were conducted on screwed joints that were loaded parallel to the grain after the decay treatment of the main members. Observation of the deformed screws revealed that dominant failure modes of the decayed and control specimens were clearly different. Therefore, it is suggested that the degradation of bearing strength of the main member caused by decay made a difference to the deformation process of the screwed joints.

Penetration depth of Pilodyn and the depth of decay in the screwed point were measured so that degradation of the strength properties and the change in deformation process of screwed joints were considered in association with the extent of decay. Whereas penetration depth of Pilodyn showed no significant correlations with the strength properties of the screwed joints, the depth of decay showed significant inverse correlations with the initial stiffness of the screwed joints at the 1% level. In multiple regression analysis of the strength properties on the depth of decay and the wood density of sound part of the specimens, the multiple regressions of maximum load, yield load, initial stiffness, and shear energy capacity were all significant at the 5% level and above. Therefore, it is demonstrated that the 2 variables can explain the strength properties with high accuracy.