構造システムと施工の注意点

鋼板添え板ボルト接合部は、高度な加工や施工技術を必要とせず、木材と鋼板に孔を設けてボルトで留めつけるだけで高耐力を得る事ができることから、様々な接合部に利用されている。ボルト長さ L / ボルト径 d を大きくすることで、変形性能が高くなることが特徴であるが、ボルト長さ L / ボルト径 d が小さくなるとボルトが曲がりにくくなるため、一般的に脆性的な破壊となるため注意が必要である。

鋼板添え板ボルト接合部を施工する際、施工性を考慮してボルト径 +1.5mm 程度のボルト孔を設けることがあるが、ボルトとボルト孔のクリアランスにより初期すべりが生じるため、初期すべりが問題となる場合にはボルト孔をできるだけボルト径と一致させることが望ましい。

実験データと解析モデルの取り扱い

木質構造の接合部の耐力を実験により求める場合は、信頼水準 75% における 95% 下限許容限界値を用いるが、本項の実験データでは試験を 3 体しか行っていないため値が非常に小さくなっている。モデル化する際には仕様に合わせて理論式により剛性及び耐力を設定することも可能である。

バリエーション

ボルト長さ、木材の樹種やヤング係数によって最適なボルト径が異なる。特に、ボルトの長さによって接合部の特性も変わり脆性的な接合部になることがあるため、仕様に合わせてボルトが曲げ降伏する変形性能が高い接合部とすることが望ましい。

以下の表は、ボルトを入手しやすい材質の強度区分 4.8、木材を入手しやすい樹種の集成材としたときのボルトが曲げ降伏するボルト木部挿入長さ L の最小値とそのときの単位接合部の降伏耐力 p_y および剛性 k_{js} をまとめたものである。

木部挿入長さ L の最小値は、強度区分 4.8 の JIS B 1051 の下降伏点が 320N/mm^2 であるので、F=320N/mm^2 として算出し、木材の一般的な寸法の 90mm、105mm、120mm、150mm、180mm、210mm、240mm、270mm、300mm にあわせた値としている。

降伏耐力 p_y は、強度区分 4.8 の平 12 年建告第 2464 号の基準強度が 240N/mm^2 であるので、F= 240N/mm^2 として算出した。

剛性 k_{js} は、木部挿入長さ L の最小値付近では長さの違いで値が若干異なるため、値が一定となる木部挿入長さ L が長いときの値とした。木部挿入長さ L の最小値の時でも剛性 k_{js} が 5% 以内の相対誤差であることは確認している。

太字下線は本項の実験仕様のものであるが、ボルトの直径 d = 16mm の時の木部挿入長さ L の最小値の計算結果が 159mm であるため、実験では近い値である 150mm、表では安全側の値である 180mm としたため、実験仕様と表の値は少し異なっている。

接合部の設計では、接合具単体の剛性 k_{js} と降伏耐力 p_y から木規準[1)] の「602 曲げ降伏型接合具を用いた接合」の項に従って、接合部全体の剛性、設計用許容せん断耐力を計算することが出来る。剛性は、文献 2）の「2.3.3 接合部［全体］の設計用許容せん断耐力の算定」の項に従って、ボルトとボルト孔のクリアランスを考慮して補正する必要がある。

木材：スギ (J3)　E_0=6500N/mm^2　　ボルト：強度区分4.8

ボルトの直径 d	ボルト木部挿入長さL		単位接合部の降伏耐力p_y	単位接合部の剛性k_{js}
	1面せん断	逆2面せん断		
12mm	90mm以上	150mm以上	8.0 kN	8.7 kN/mm
16mm	120mm以上	210mm以上	14.2 kN	12.0 kN/mm
20mm	150mm以上	240mm以上	22.2 kN	15.4 kN/mm
24mm	180mm以上	300mm以上	32.0 kN	18.8 kN/mm

木材：トドマツ (J3)　E_0=8500N/mm^2　　ボルト：強度区分4.8

ボルトの直径 d	ボルト木部挿入長さL		単位接合部の降伏耐力p_y	単位接合部の剛性k_{js}
	1面せん断	逆2面せん断		
12mm	90mm以上	150mm以上	8.0 kN	10.6 kN/mm
16mm	120mm以上	210mm以上	14.2 kN	14.7 kN/mm
20mm	150mm以上	240mm以上	22.2 kN	18.8 kN/mm
24mm	180mm以上	300mm以上	32.0 kN	23.0 kN/mm

木材：ヒノキ (J2)　E_0=9500N/mm^2　　ボルト：強度区分4.8

ボルトの直径 d	ボルト木部挿入長さL		単位接合部の降伏耐力p_y	単位接合部の剛性k_{js}
	1面せん断	逆2面せん断		
12mm	90mm以上	150mm以上	8.6 kN	11.5 kN/mm
16mm	105mm以上	180mm以上	15.3 kN	16.0 kN/mm
20mm	150mm以上	240mm以上	23.9 kN	20.5 kN/mm
24mm	180mm以上	270mm以上	34.4 kN	25.0 kN/mm

木材：カラマツ (J1)　E_0=9500N/mm^2　　ボルト：強度区分4.8

ボルトの直径 d	ボルト木部挿入長さL		単位接合部の降伏耐力p_y	単位接合部の剛性k_{js}
	1面せん断	逆2面せん断		
12mm	90mm以上	120mm以上	9.1 kN	11.5 kN/mm
16mm	105mm以上	**180mm以上**	16.3 kN	17.2 kN/mm
20mm	150mm以上	**210mm以上**	25.4 kN	22.1 kN/mm
24mm	180mm以上	**240mm以上**	36.7 kN	26.9 kN/mm

木材：カラマツ (J1)　E_0=10500N/mm^2　　ボルト：強度区分4.8

ボルトの直径 d	ボルト木部挿入長さL		単位接合部の降伏耐力p_y	単位接合部の剛性k_{js}
	1面せん断	逆2面せん断		
12mm	90mm以上	120mm以上	9.1 kN	12.4 kN/mm
16mm	105mm以上	180mm以上	16.3 kN	19.1 kN/mm
20mm	150mm以上	210mm以上	25.4 kN	24.4 kN/mm
24mm	150mm以上	240mm以上	36.7 kN	29.8 kN/mm

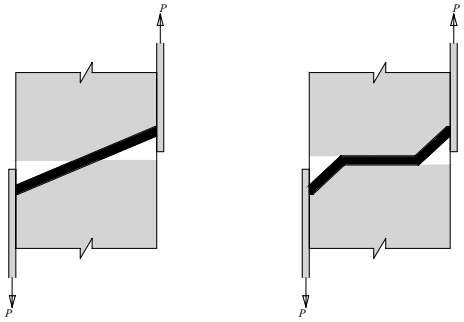
理論式と計算結果

・1 面せん断接合部

木規準[1)] の「602 曲げ降伏型接合具を用いた接合」の項に従って、鋼板添え板ボルト接合による 1 面せん断接合部の剛性、設計用許容せん断耐力を計算することができる。剛性は、文献 2）の「2.3.3 接合部［全体］の設計用許容せん断耐力の算定」の項に従って、ボルトとボルト孔のクリアランスを考慮して補正する必要がある。

・逆方向に力が作用する場合の２面せん断接合部

木規準[1)]の「602 曲げ降伏型接合具を用いた接合」の項では、逆方向に力が作用する場合の２面せん断の計算式が示されていない。そこで、1面せん断接合部と同様の方法で求めた接合具単体の剛性 k_{js} と降伏耐力 p_y の計算式を以下に示す。降伏モードは、回転めり込み降伏（モードⅢ）とボルトの曲げ降伏（モードⅣ）を想定している。接合具単体の剛性 k_{js} と降伏耐力 p_y から剛性、設計用許容せん断耐力を計算することができる。



回転めりこみ降伏（モードⅢ）　　ボルトの曲げ降伏（モードⅣ）

剛性：$k_{js} = 1 \Big/ \left(\dfrac{2\lambda}{kd} \cdot \dfrac{\cosh(\lambda L) - \cos(\lambda L)}{\sinh(\lambda L) - \sin(\lambda L)} \right)$　　$\lambda = \left(\dfrac{kd}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}}$

降伏耐力：$p_y = \min(C_{\mathrm{III}}, C_{\mathrm{IV}}) \cdot F_e \cdot d \cdot L$　　$C_{\mathrm{III}} = \dfrac{1}{3} \cdot \gamma \cdot \left(\dfrac{d}{L} \right)^2 + \dfrac{1}{4}$　　$C_{\mathrm{IV}} = \dfrac{d}{L} \cdot \sqrt{\dfrac{2}{3} \cdot \gamma}$

ここに、

L：ボルト木部挿入長さ（mm）　　d：ボルトの直径（mm）

k：木材のめり込み剛性（N/mm^3）　　$k = E_0 / (31.6 + 10.9d)$

E：ボルトのヤング係数（N/mm^2）　　E_0：木材のヤング係数（N/mm^2）

I：ボルトの断面二次モーメント（mm^4）

γ：ボルトの基準材料強度と木材の基準支圧強度の比　（γ =F/Fe）

Fe：木材の基準支圧強度（N/mm^2）　　F：ボルトの基準材料強度（N/mm^2）

C_{III}：モードⅢの接合形式係数　　C_{IV}：モードⅣの接合形式係数

・接合具単体の剛性 k_{js} と降伏耐力 p_y の計算値

木材の繊維方向に力が作用したときの1面せん断と逆方向に力が作用する場合の２面せん断の接合具単体の剛性 k_{js} と降伏耐力 p_y の計算値をグラフに示す。材料定数等は以下の通りとした。

d：ボルトの直径 ／ 12 mm，16 mm，20 mm，24 mm

E_0：木材のヤング係数 ／ 6500 N/mm^2，9500 N/mm^2，10500 N/mm^2，12000 N/mm^2，15000 N/mm^2

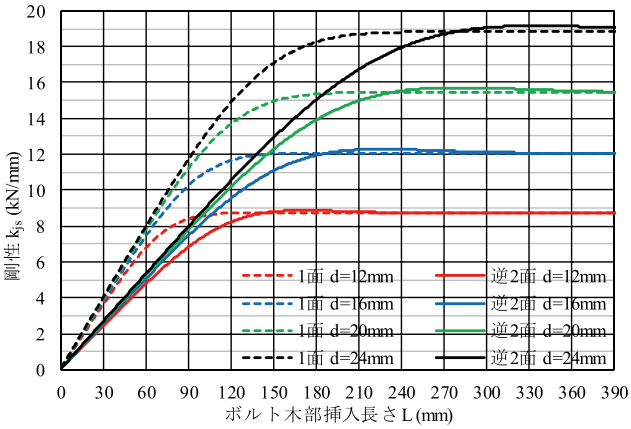
E：ボルトのヤング係数 ／ 205000 N/mm^2

F：ボルトの基準材料強度 ／ 240 N/mm^2（平 12 年建告第 2464 号の強度区分 4.6 または 4.8 の基準強度），320 N/mm^2（JIS B 1051 の強度区分 4.8 の下降伏点）

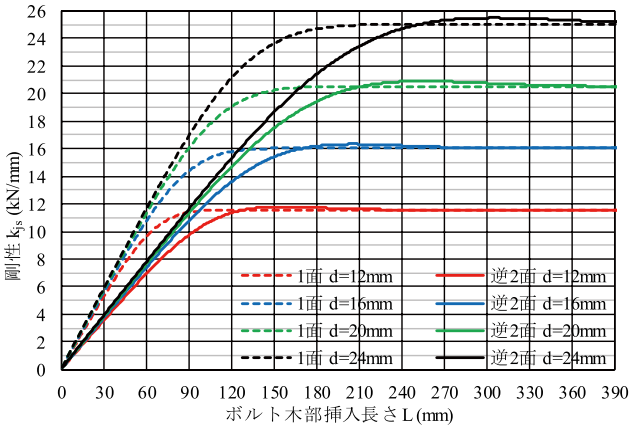
Fe：木材の基準支圧強度 ／グループ J1 25.4 N/mm^2，グループ J2 22.4 N/mm^2，グループ J3 19.4 N/mm^2（木規準[1)]の「表 6.2 木材の比重と基準支圧強度」の値）

（2017.12）

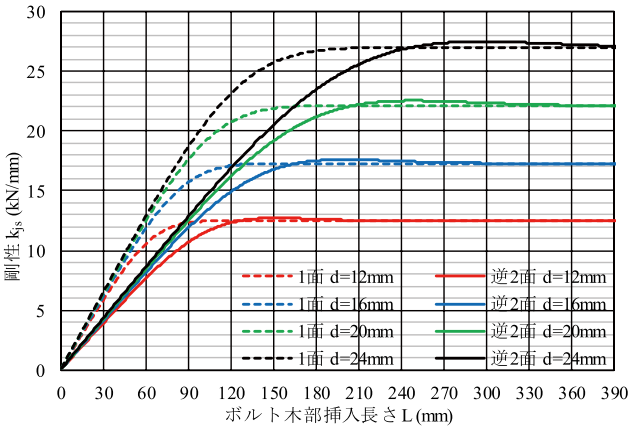
計算結果から一定のボルト長さ以上であれば1面せん断と逆方向に力が作用する場合の２面せん断は同等の剛性および降伏耐力となることがわかる。



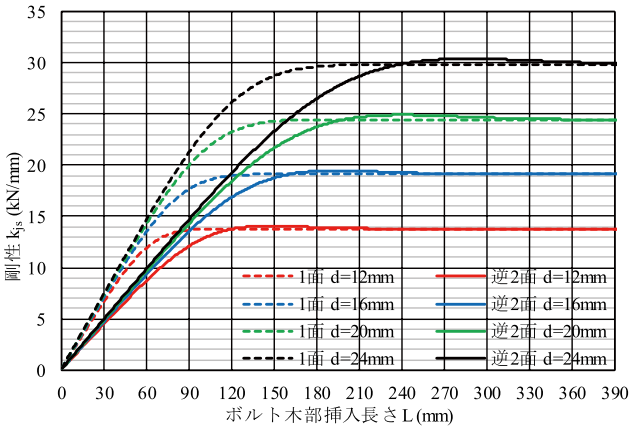
E_0=6500N/mm^2 の時の剛性 kjs



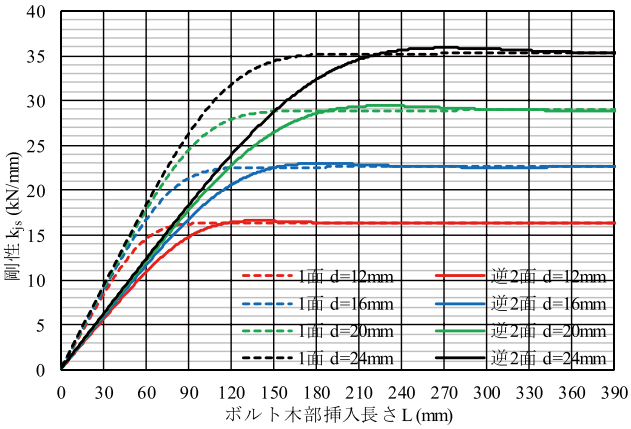
E_0=9500N/mm^2 の時の剛性 kjs



E_0=10500N/mm^2 の時の剛性 kjs

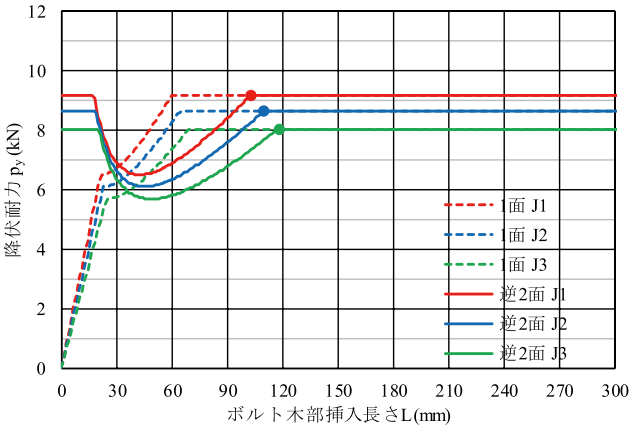


E_0=12000N/mm^2 の時の剛性 kjs

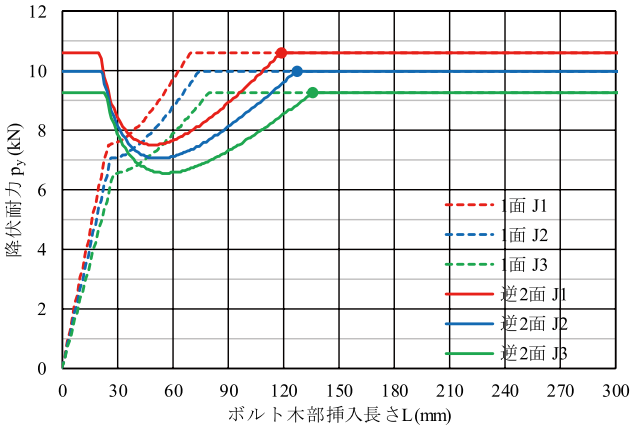


E_0=15000N/mm^2 の時の剛性 kjs

（2017.12）

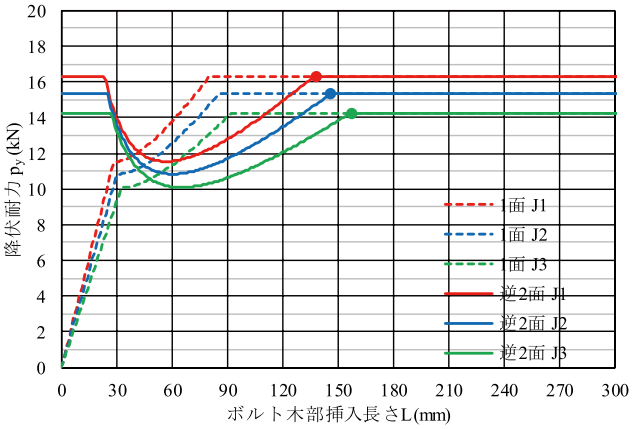


F=240N/mm^2（基準強度）

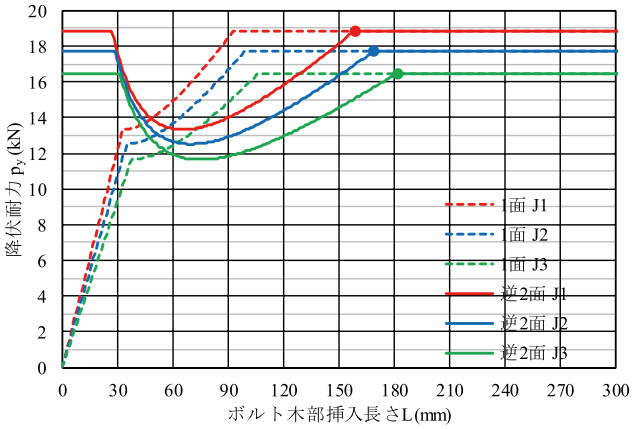


F=320N/mm^2（JIS B 1051 下降伏点）

d=12mm の時の降伏耐力 p_y

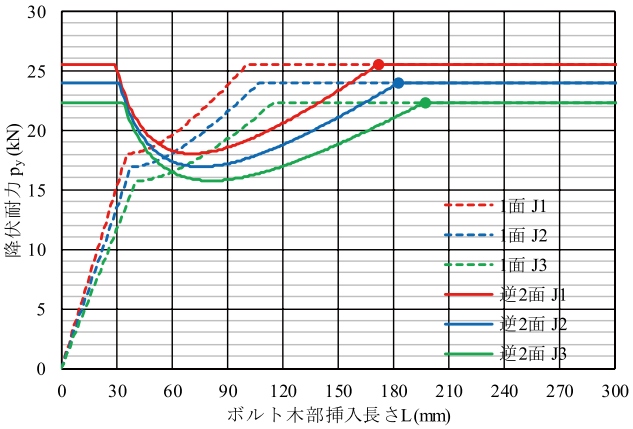


F=240N/mm^2（基準強度）

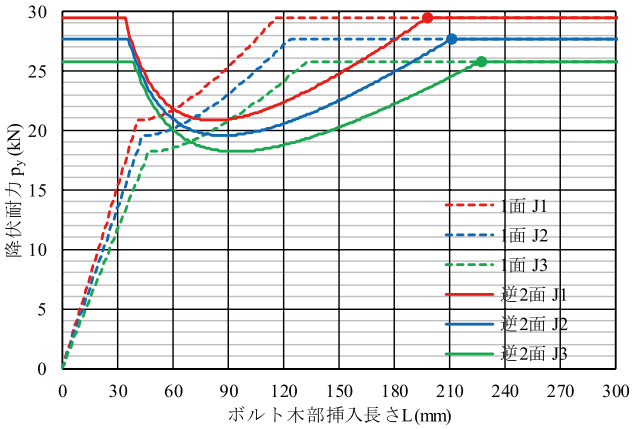


F=320N/mm^2（JIS B 1051 下降伏点）

d=16mm の時の降伏耐力 p_y



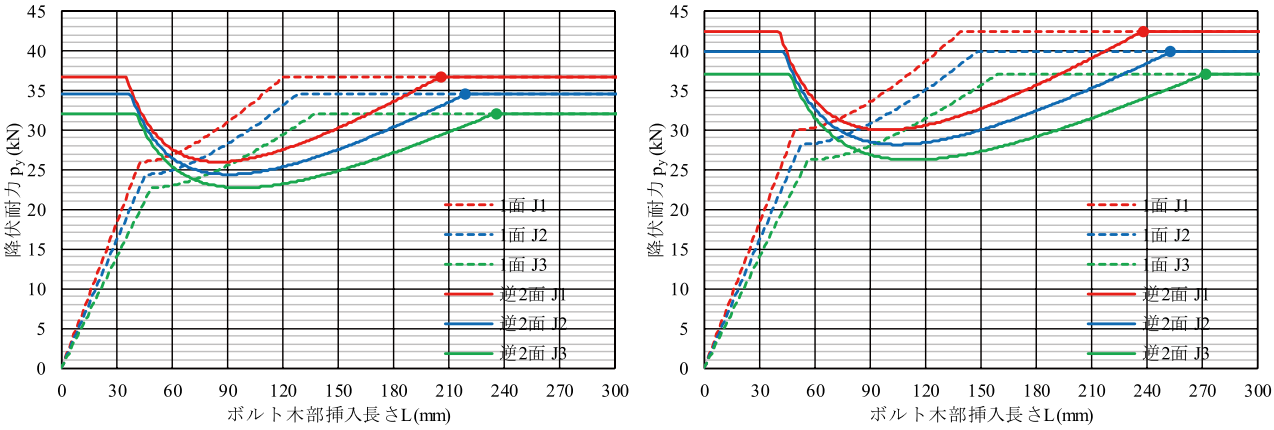
F=240N/mm^2（基準強度）



F=320N/mm^2（JIS B 1051 下降伏点）

d=16mm の時の降伏耐力 p_y

（2017.12）



F=240N/mm^2（基準強度）　　F=320N/mm^2（JIS B 1051 下降伏点）

d=24mm の時の降伏耐力 p_y

・実験仕様の設定

本資料では、前で示した計算通りにボルト木部挿入長さが一定以上であれば1面せん断と逆方向に力が作用する場合の 2 面せん断の剛性および降伏耐力がほぼ同等となることを確認するために、ボルトの直径 d = 16 mm，20 mm，24 mm、木材を E_0 = 9500 N/mm^2 のカラマツ集成材とし、ボルト木部挿入長さ L の最小値を定めて実験仕様とした。この実験では、本取り組みにて提案している大断面集成材の標準寸法である 150mm、180mm、210mm（本実験では積層方向）を想定してボルト木部挿入長さ L を設定している。

実験データシートに示しているように、実験結果と計算値の比較を行ったところ、一面せん断の場合も逆方向に力が作用する 2 面せん断の場合も共に、剛性の計算値は精度良く推定でき、短期許容耐力の計算値は安全側に推定できることが確認できた。

実験仕様のボルト木部挿入長さ

ボルトの直径 d	16mm	20mm	24mm
ボルト木部挿入長さ L	150mm	210mm	240mm

【文献】

1）木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－，日本建築学会，2006.12
2）木質構造接合部設計事例集，日本建築学会，2012.10

（2017.12）