

論文の内容の要旨

生物材料科学専攻

平成 26 年 4 月博士課程進学

氏 名 安田 保二郎

指導教員 稲山正弘

論文題目 鋼板挿入式ドリフトピン接合部を用いた
木質ラーメン構造に関する研究

1. 序
2. 既往の研究
3. 鋼板挿入式単体ドリフトピン接合部の荷重-すべり特性の評価

木質構造の一般的な接合法の 1 つである鋼板挿入式ドリフトピン接合部の荷重-すべり (変形) 関係の解析モデルについて、弾性床上的の梁理論による厳密解に対する近似解を梁線材モデルで示し、線形解析によるモデル化および非線形解析の精度について検証した。ドリフトピンの曲げ試験とドリフトピン接合部の 2 面せん断試験を行い、非線形解析結果と比較し近似解モデルの解析精度とめり込み特性による影響を検証した。

3.1 梁線材モデルによる近似解の検証

Fig.1 に示すように鋼板挿入式ドリフトピン接合部の解析モデルは挿入鋼板の中心位置での対称性を考慮した片側モデルとした。外力 P とめり込みバネは接合具に対して垂直とした。弾性床上的の梁モデル (A モデル) と梁線材モデル (B モデル) を示す。めり込みの応力と変位の関係は、A モデルでは要素間では一様とし B モデルでは各節点のバネ支点が負担する範囲のめり込み

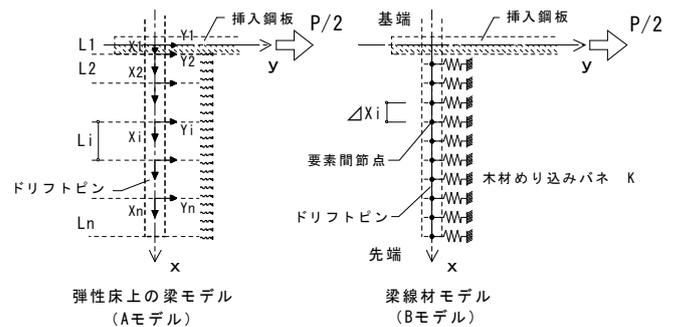


Fig. 1 弾性床上的の梁理論モデルと梁線材モデル

バネを集約し節点にバネ支点として設定する。B モデルは、A モデルに対して近似解となるため、分割要素数、解析ステップ変位量等による精度検証が必要となる。

1) 梁線材モデルによる線形解析

弾性床上的の梁理論と梁線材モデルによる解析値の比較を行う。パラメーターは厳密解の特性値 βL とドリフトピンの長さ径比 (L/d) について、 βL (L/d) が 3.0 (10.0)、2.0 (6.0)、1.0 (3.0) の 3 ケースについて検討し、ドリフトピン径を d として要素長さを $0.25d$ 、 $0.5d$ 、 $1.0d$ とした 3 ケースの結果を示し、要素分割長さを $0.5d$ 以下にすれば厳密解に対して高い精度が得られる。

2) 非線形梁線材モデル

Fig.1 の梁線材モデルの基端に剛域を設定し、ドリフトピンの梁線材要素モデルは要素の基端部側、剛域端に剛塑性回転バネを設けた。

3) 木材のめり込みバネ、ドリフトピンのモデルと解析精度

ドリフトピンによるめり込みバネ剛性には、小松による丸鋼の面圧応力度とめり込み量の理論式 (3P-exp 関数) を用いる。Fig.2 に木質構造設計規準による基準支圧強度の提案式番号、 σ - δ 関係を示す。非線形解析の精度は、変位刻み量 $\Delta y=1/50\sim 1/100\text{mm}$ 程度、ドリフトピンの要素長さまたは基端部の $1d$ 程度の範囲を $0.1\sim 0.15d$ (d : 径) とすれば解析の精度は収束する。

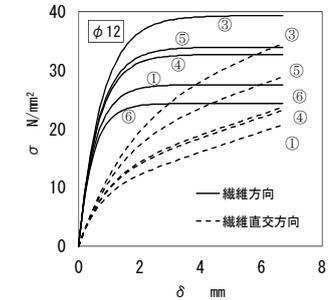


Fig. 2 支圧強度と σ - δ 関係

3. 2 実験による検証

1) ドリフトピン接合部の 2 面せん断試験

試験体は E85-F300 (ヒノキ)、E75-F270 (スギ) の同一等級集成材とし、鋼板挿入ドリフトピン接合部の繊維方向および繊維直交方向の合計 47 体のせん断試験を行った。Fig.3,4 に示す試験体は厚さ 9mm の鋼板挿入式とした。ドリフトピンは SNR400B の $\phi 12$ 、 $\phi 16$ の丸鋼とし、長さは試験体の幅と同じ長さの $L=105\text{mm}$ 、 210mm とした。繊維方向試験体は端距離 $7d$ 、縁距離 $4d$ とし、繊維直交方向試験体は端距離 $7d$ 、加力方向の縁距離 $6d$ または $9d$ とした。

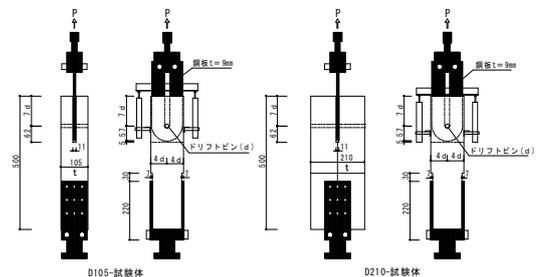


Fig. 3 繊維方向 試験体

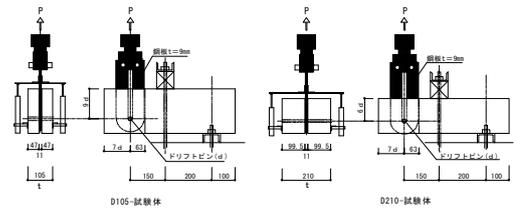


Fig. 4 繊維直交方向 試験体

2) 実験結果と解析結果の比較

Fig.5 に実験結果に対して Fig.2 の支圧強度③、④、⑥式による解析結果

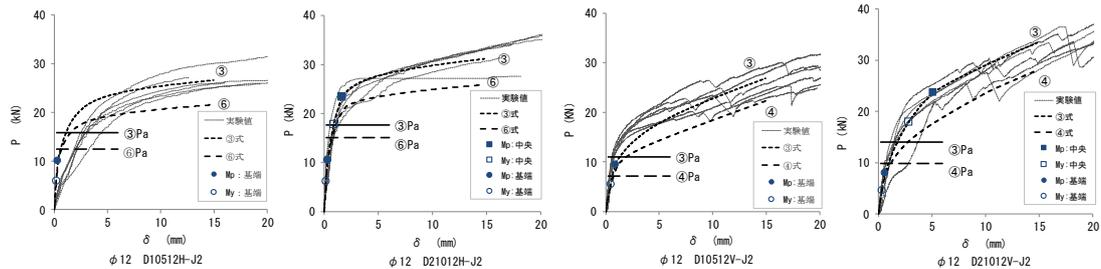


Fig. 5 実験結果と解析値との比較 (ヒノキ)

の P - δ 曲線と式番号を表示し、支圧強度③式による P - δ 曲線上に曲げ降伏 (M_y)、降伏ヒンジ (M_p) の発生時ポイントを表示し、実験結果と解析結果の比較を示す。実験値に対して解析結果の P - δ 曲線は繊維方向、繊維直交方向では③式の対応は比較的良く、④⑥式の場合は実験結果に対して下側あるいはそれよりも低くなっている。

3) 損傷限界変位について

EYT に基づく式により降伏せん断耐力 dPy を求め、短期許容せん断耐力は $Pa=2/3 \cdot dPy$ となる。地震時の短期許容せん断耐

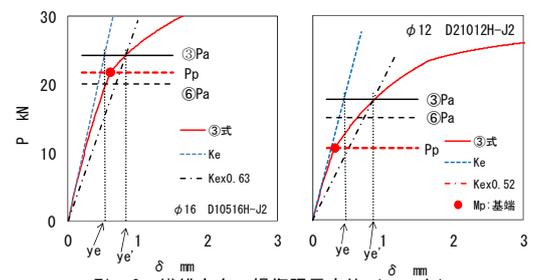


Fig. 6 繊維方向 損傷限界変位 (ヒノキ)

力 P_a を損傷限界の耐力とし、初期剛性（線形解析による）に基づく P_a 時の変位を損傷限界の変位 y_e とする。Fig.6には支圧強度③式による解析値の $P-\delta$ 曲線および③⑥式による P_a 値（③ P_a 、⑥ P_a ）を示している。初期剛性 K_e の直線と直線③ P_a の交点変位を y_e 、解析値の $P-\delta$ 曲線と直線③ P_a の交点変位を y_e' とする。 $P-\delta$ 曲線においてドリフトピンの基端部に降伏ヒンジ（ M_p ）が発生する時の耐力を P_p とする。 P_a 値が P_p 値より大きくなると基端部の降伏ヒンジにより変形が増幅し y_e と y_e' の差が大きくなる。支圧強度が高い場合、接合部の許容せん断耐力を大きく採用することができるが、接合部でのすべり量も大きくなるので損傷限界時にドリフトピン基端部に生じる降伏ヒンジの有無などを考慮して初期剛性を設定する必要がある。

4. 鋼板挿入式複数ドリフトピンのモーメント抵抗接合部の実験と解析

鋼板挿入式ドリフトピンによる柱梁接合部の非線形回転バネの $M-\theta$ 関係を、単体ドリフトピンによる接合部解析を利用して複数のドリフトピンによる回転接合部の $M-\theta$ 関係を求めることを目的とする。解析モデルは3章の梁線材モデルを用いた。ドリフトピンのすべり方向角度 ϕ のめり込みバネ剛性の算出にハンキンソン式を利用する場合、非線形なめり込みバネ剛性について直交異方性を考慮した。また、接合部に作用するせん断力 Q 、軸力 N を考慮した解析についても検討した。

対称異等級構成集成材を用いるため構成ラミナのめり込みバネを考慮した回転接合部の解析とし、めり込みバネに影響する基準支圧強度式は上下強度を与える2式を用いた。解析結果と比較するため実験を行った。

4.1 ドリフトピン回転接合部の2面せん断試験

1) 試験体

Fig.7に試験体の接合部は厚さ9mm（SS400）の鋼板挿入式で、ドリフトピンはSNR400Bとし円形接合部では8本、矩形接合部では6本使用した。木材は対称異等級構成集成材 E105-F300（オウシュウアカマツ）、E65-F225（スギ）を採用した。

4.2 複数ドリフトピンのモーメント抵抗接合部の解析

1) 回転接合部の $M-\theta$ 関係

Fig.8に示すモーメント M によるドリフトピンの反力 P_i は角度 ϕ_i の方向に生じる。回転中心から半径 r_i の円の接線方向の変位を S_i とすると回転角 θ_i と抵抗モーメント M は以下の関係がある。

$$M = \sum P_i \cdot r_i \quad \dots \text{Eq. (1)} \quad \theta_i = S_i / r_i \quad \dots \text{Eq. (2)}$$

2) 任意のすべり方向 ϕ を有する場合の解析

任意角度 ϕ 方向の丸鋼によるめり込み剛性 K_ϕ はハンキンソン式による下式の間接関係があるとされている。

$$K_\phi = \frac{K_0 \cdot K_{90}}{K_0 \cdot \sin^2 \phi + K_{90} \cdot \cos^2 \phi} \quad \dots \text{Eq. (3)}$$

ハンキンソン式を用いる場合について、線形解析では角度 ϕ 方向の初期剛

No. 1, No. 2, No. 3, No. 4
Circle joint type

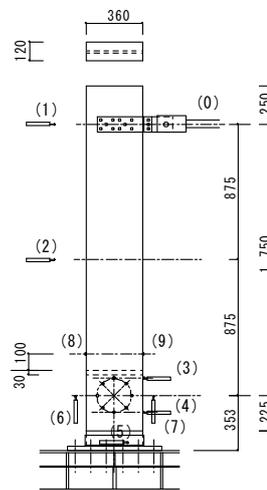


Fig. 7 片持ち梁式加力試験方法 (mm)

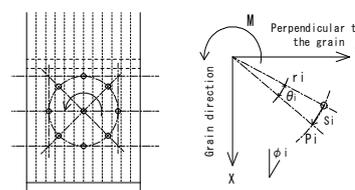


Fig. 8 回転接合部の $M-\theta$ 関係

性 $K_{s\phi}$ は $\phi=0^\circ, 90^\circ$ の K_{s0}, K_{s90} と Eq.(3)の関係がある。非線形解析の場合は ϕ° の角度を有する接線剛性には繊維方向、繊維直交方向の変位成分により行うこととする。

4.3 基準支圧強度式による解析と実験結果の比較

Fig.9 に回転接合部の実験と Fig.2 の式③ (F3) ,⑥ (F6) による解析の M- θ 関係を示す。解析結果と実験結果は概ね対応しており、No.2,3、No.4 は F3 と F6 の間に実験結果があることが確認できる。No.1 では F3 が高くなり F6 の対応がよく、No.5 の場合は F3 による対応がよく F6 の場合は解析値が低くなる傾向がある。

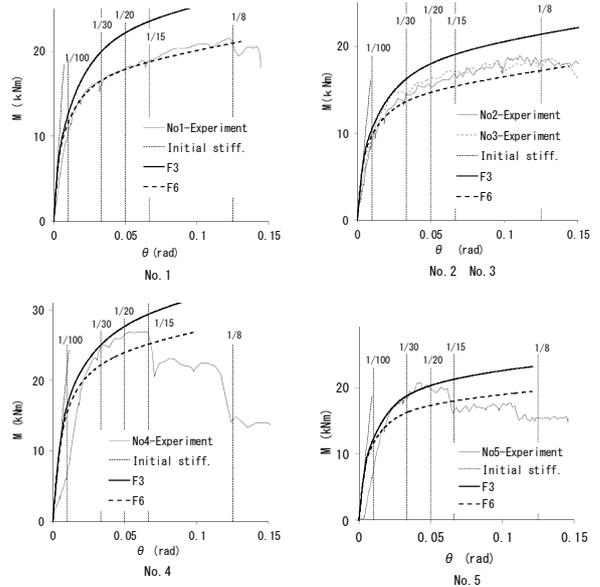


Fig. 9 M- θ 関係 Q, N=0.0 (kN)

4.4 複合応力を考慮した解析

1) せん断力 Q, 軸力 N が作用する場合の接合部の解析

M, Q, N が回転接合部に作用する場合の合成力 R を Fig.10 に示す。接合部および各接合具の M- θ 関係を求め損傷限界時、安全限界時の変形と曲げ耐力を、損傷限界時はドリフトピン接合具が初めて P_a に達した時、安全限界時は全ての接合具が P_y に達した時とする。

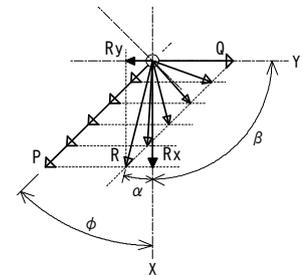


Fig. 10 せん断力 Q による複合応力 R (R_x, R_y)

2) 解析結果の考察

Fig.11 は No.4 について接合部の M- θ 関係 (M- θ curve of Joint: 上図) および各接合具の M- θ 関係 (M- θ curves of driftpin: 下図) を示し、回転変位の損傷限界時を θ_d 、安全限界時を θ_s とした。Q, N を考慮した接合部の M- θ 曲線には Q, N=0.0kN の場合を点線で重ねて示した。M- θ 曲線は殆ど一致していることから、接合部の M- θ 関係は Q, N の存在による影響が少ないことが分かる。しかし、各接合具の M- θ 関係は Q, N の影響により変化する。

5. 木質ラーメン架構の計算例

前章で求めた回転接合部の M- θ 関係を用いて、Fig.12 のラーメン架構の荷重増分解析を行い層の Q- δ 関係を求める。限界耐力計算により耐震性について検討する。

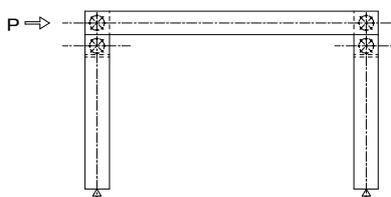


Fig. 12 木質ラーメン架構の例

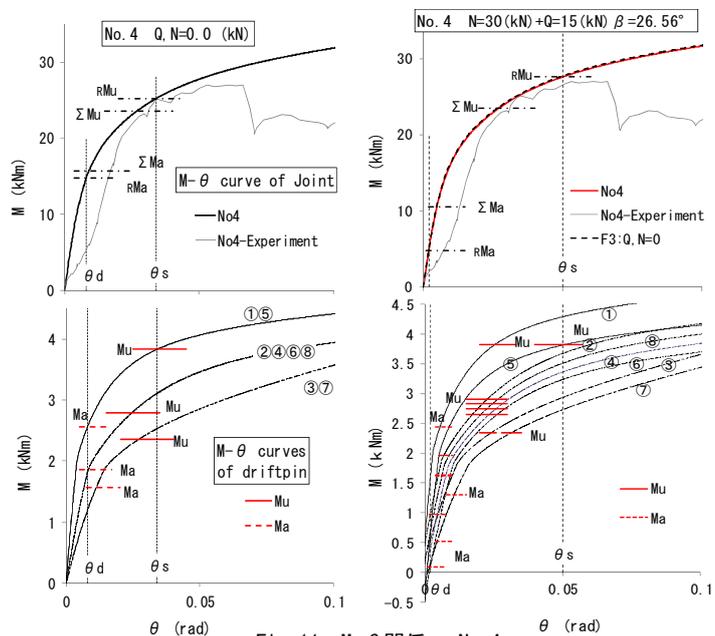


Fig. 11 M- θ 関係 No. 4