第３章　SPACE における部材・接合部のモデル化と履歴特性

3.1 はじめに

前章では木質構造材料の特性及び設計上の考え方について、その概略を述べた。本章では、構造材料としての集成材もしくは LVL に着目し、SPACE における部材、接合部などのモデル化について述べる。特に、集成材、接合部（鋼板挿入型ドリフトピン接合、接合金物、ホールダウン金物による接合、斜め打ち釘接合、仕口による接合）、面材張り壁について、それらのモデル化方法について説明し、文献に従って履歴特性に必要となるパラメータの設定方法について述べる。

3.2 解析を行う際の問題点と対処法

第 2 章でも述べたが、木質構造物の構造解析を行う上で、難しい問題が多く存在する。以下にそれらの問題点をまとめる。

１）木材は異方性であり、繊維方向、繊維に直角方向、繊維に傾斜方向とそれぞれに物理的・機械的特性が異なる。
２）集成材・LVL の断面ではラミナごとに特性が異なる事がある。
３）木材には節や割れなどの欠点があり、また、木質構造材にはフィンガージョイント（以下 FJ）やスカーフジョイントなどの継ぎ目が存在する。また、木材は含水率や季節などによる環境の違いによっても特性が異なる。
４）同樹種・同等級の木材であっても強度・弾性係数が異なる。
５）木質構造の接合部は半剛接合であり、力を受けると必ず変形する性質を持つため、ピン接合や剛接合として仮定する事ができない。
６）木質パネルなどの面材耐力要素は、骨組解析ではモデル化することができない。

現在のSPACEではこれらの問題点を以下のように考え､対処している。

１）と２）の対処法
部材断面を、ファイバーモデルを用いてモデル化し、各層のラミナの特性をファイバー要素に入力し、解析を行う。そのため、繊維方向の特性に注目し、引張応力・圧縮応力についてのみ考慮する。
３）の対処法
比較的欠点を取り除いた集成材や LVL に重点を置き、含水率の強度低

下や剛性低下は無いものとして考える。また、FJ などの継ぎ目も無視して解析する。

4）の対処法

同等級・同樹種の木材やラミナであるならば、強度・弾性係数が同じであると仮定する。また、入力する値については、基準許容応力度、及び、基準弾性係数を用いて解析する。

5）の対処法

接合部にはバネモデルを用い、各力に対するバネを並列に並べて組み込み、それらに対応した適切な復元力特性を用いて複雑な特性に対応する。各バネは相互に作用しないものと仮定する。

6）の対処法

面材張り耐力壁のせん断変形に注目し、せん断バネモデルを用いて特性に対応する。

3.3 部材のモデル化

3.3.1 ファイバーモデル

前述のように集成材や LVL は、構成するラミナや単板が各層によって特性が異なる場合がある。そこで、解析では断面を縦にラミナや単板の枚数に分割し、図 3-1 に示すようなファイバーモデルを用いて解析を行う。

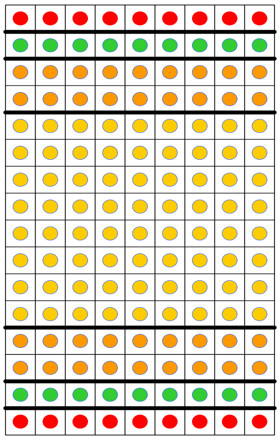


図 3-1　ファイバーモデル断面

ただし、SPACE で部材全てをファイバー要素で解析するわけではない。部材端部や中央部など、応力が塑性に達すると思われる位置にこのファイバー要素を配置し、他の部分は弾性要素を配置するのが一般的である。そこで、断面内が一様でない集成材では、等価な断面特性が必要となる。SPACE では、弾性部材の弾性係数として、木質構造設計基準・同解説[1)]

より式(3-1)を用いて算定する。

$$E_b = 0.95\Sigma(E_i I_i)/I \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.1)$$

上式中の各値は次の通りである。

E_b	:	弾性部材の弾性係数
E_i	:	各ラミナの基準弾性係数
I_i	:	各ラミナの断面二次モーメント
I	:	全断面の断面二次モーメント

3.3.2 ファイバーモデルの履歴特性

木材は繊維方向においても引張方向、圧縮方向とで異なる特性を有しており、一般的な木材の応力－ひずみ度曲線である図 3-2 の履歴を、SPACE では図 3-3 のように仮定して用いる。この履歴特性の特徴は、木材が引張方向ではほぼ線形領域で破壊する脆性的な性質を示し、一方、圧縮方向では比較的靭性があり、非線形領域において破壊する性質を有することである。この履歴特性の代表的なパラメータは、SPACE 使用者が材質、等級などを選択することで、SPACE が管理しているデータベースより取得される。

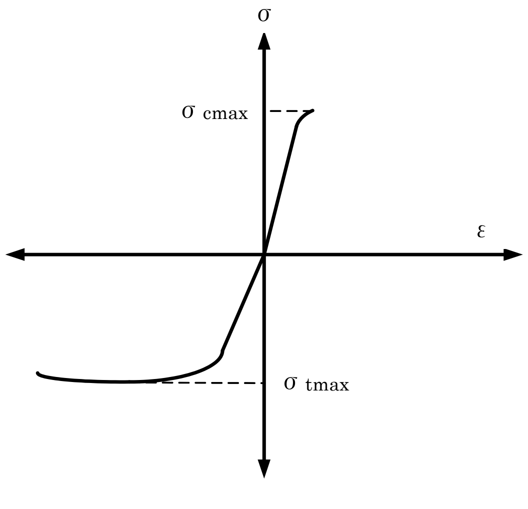


図 3-2　一般的な木材の応力－ひずみ度関係

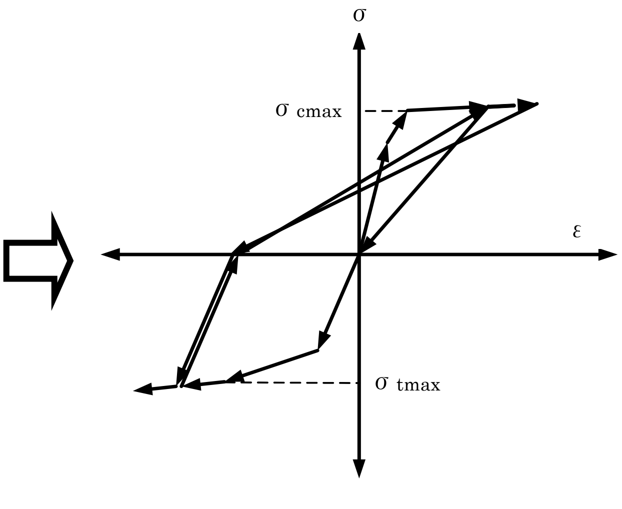


図 3-3　ファイバーモデルの履歴特性

3.4 接合部バネモデル

SPACE における木質構造の応力解析では、木質構造接合部の半剛接合を表すバネを、部材モデルに組み込んで解析を行う。モデラーでは自動

的に接合部に軸方向バネ、せん断バネ、曲げバネを組み込んだ部材モデルを作成する。各バネには、各力に適した復元力履歴特性が組み込まれ、その特性を用いて解析が行われる。しかしながら、組み込む履歴特性やその諸元は、接合具やドリフトピンなどの配置によっても異なり、また、割れや接合部端部の持ち出しの長さによっても異なる。したがって、各実験の結果を元に履歴特性を作成して解析を行う事が望ましい。

一方、各種の接合具に対して設計式が提案されており、それらの代表的な設計式がモデラーに組み込まれている。この設計式によって計算されたパラメータを利用することで、適切な解析モデルが容易に構築できることになろう。

3.4.1 鋼板挿入型ドリフトピン接合

鋼板挿入型ドリフトピン接合による機械的接合は、施行条件や施行技術による耐力変動が比較的少なく、接合具１本あたりの許容耐力から計算が可能なため、現在の木質構造の主要な接合方法となっている。

SPACE では、鋼板挿入型ドリフトピン接合のモーメント抵抗接合の設計式は小松[16)]の提案した式を利用して、バネモデルの履歴特性で必要となるパラメータを設定している。SPACE では鋼板挿入型ドリフトピン接合のモデルとして、図 3-4、図 3-5 に示すＳ字型スリップバイリニアかもしくはＳ字型スリップトリリニアが用いられる。

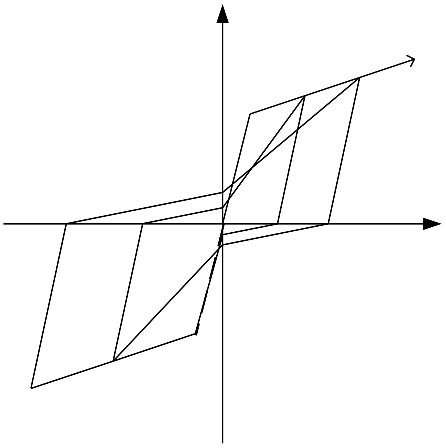


図 3-4 Ｓ字型スリップバイリニア

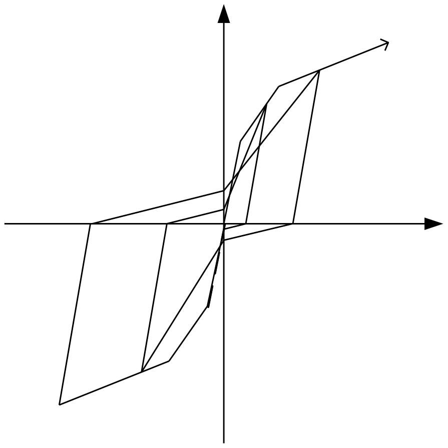


図 3-5 Ｓ字型スリップトリリニア

必要なパラメータは次の通りであり、これは、SPACE のダイアログを用いて設定することになる。

集成材 ・幅 b （cm） ・密度 TD （kg/m^3） ・ヤング係数 E_w （kN/cm^2） ドリフトピン ・直径 d （cm） ・ヤング係数 E_S （kN/cm^2） ・降伏応力度 σ_{Sy} （kN/cm^2） 鋼板 ・厚さ L_1 （cm） 初期ガタ　S （cm）	接合部をバネに置換した際の関係 曲げモーメントと回転角関係 $M = R_j \cdot \theta$ 軸力と軸方向変位関係 $N = N_{xj} \cdot u$ せん断力と v 方向変位関係 $Q = Q_{yj} \cdot v$ 上式で、R_j, N_{xj}, Q_{yj} を接合部の回転剛性、軸方向剛性、せん断剛性という。これらの剛性を以降の節で求めていく。

以上のパラメータを用いることにより、ドリフトピン接合部の剛性、及び耐力を算出することができる。以下に、文献 16)に従って SPACE で用いている設計式の概略を示す。

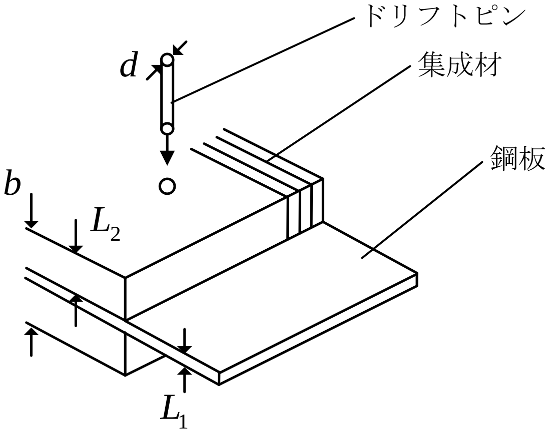


図 3-6　鋼板挿入型ドリフトピン接合部

3.4.1.1 ドリフトピンの耐力

木材のめり込み降伏応力度 σ_{ey} （kN/cm^2）は次式で推定される。この式は平井が回帰式として求めたものであり、詳細は文献 17)を参照されたい。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{ey0} &= \left(0.93215 \cdot TD - 160.74\right) \cdot 9.80665 / (1.2 \cdot 10^3) \quad kN/cm^2 \\ \sigma_{ey90} &= \left(0.25522 \cdot TD - 5.27\right) \cdot d^{-0.4} \cdot 9.80665 / 10^3 \quad kN/cm^2\end{aligned}\right\} \cdots (3.2)$$

ここで、σ_{ey0} は繊維に平行方向、また σ_{ey90} は繊維に直交する方向の降

伏応力度である。

次に、ドリフトピンの降伏耐力 P_y（kN/本）を求める。ドリフトピン一本あたりの降伏耐力 P_y（kN/本）は、

$$P_y = C \cdot F_{e1} \cdot d \cdot L_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.3)$$

で与えられる。これにドリフトピンの本数を乗じたものを軸・せん断方向の降伏耐力とする。ただし、耐力は繊維方向と繊維直行方向とでは異なるため、各々求める必要がある。

降伏耐力を計算するために、式(3.3)中のパラメータ C を決定する必要がある。そこでまず、接合具曲げ降伏モーメント M_y（kNcm）を求めておく。算定式は次式で与えられる。ここで、d はドリフトピンの直径である。

$$M_y = \frac{\sigma_{sy} \cdot d^3}{6} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.4)$$

さらに、次のパラメータを計算する。なお、以降の計算は繊維方向の場合と繊維直交方向の場合とに分けて計算を行うことになる。

$$\alpha = \frac{L_2}{L_1},\ \beta = \frac{F_{e2}}{F_{e1}},\ \gamma = \frac{\sigma_{sy}}{F_{e1}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.5)$$

ここで、F_{e2} は（$=\sigma_{ey0}$、σ_{ey90}）集成材のめり込み降伏応力度（kN/cm^2）であり、鋼板の支圧降伏応力度 F_{e1}（kN/cm^2）は、平成 13 年国土交通省告示 1024 号で次式としているため、SPACE でもこれを採用する。

$$F_{e1} = 1.5\sigma_s \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.6)$$

次に、式(3.3)中のパラメータ C は降伏モード（破壊モード）によって異なるため、次に示すモードの中で最小値を選ぶことになる。

１）鋼板が降伏する場合

$$C_1 = 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.7)$$

２）集成材が降伏する場合

$$C_2 = 2\alpha\beta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.8)$$

３）鋼板で接合具が降伏、集成材が降伏する場合

$$C_3 = \sqrt{\frac{8\alpha^2\beta^2(1+\beta)}{(2\beta+1)^2} + \frac{8\beta\gamma\left(\frac{d}{L_1}\right)^2}{6\beta+3}} - \frac{2\alpha\beta}{2\beta+1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.9)$$

４）鋼板、集成材で接合具が降伏

$$C_4 = \frac{d}{L_1}\sqrt{\frac{8\beta\gamma}{3+3\beta}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.10)$$

以上の４つのモードを全て計算し、最小値となるモードの値を C として選択することになる。

$$C = \min(C_1, C_2, C_3, C_4) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.11)$$

上式(3.11)の C を用いて、ドリフトピン 1 本の耐力が式(3.3)で求められるようになる。

3.4.1.2 めり込み剛性とすべり剛性

次に、本節では、各バネの初期剛性を求める。まず、繊維方向と繊維直行方向におけるめり込み剛性とすべり剛性を求める。

めり込み剛性 K_0、K_{90} は、文献 16) より、繊維並行方向のヤング係数 $E_W(kN/cm^2)$ を用いると次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned} K_0 &= \frac{E_w}{3.16+10.9d} \quad kN/cm^2/cm \\ K_{90} &= \frac{K_0}{3.4} \quad kN/cm^2/cm \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(3.12)$$

次に、同文献より、弾性床上梁理論から導かれた鋼板挿入形式のすべり剛性 K_S が次式のように求められている。

円形断面鋼棒接合具 1 本の面圧応力とめり込み量の初期傾きをすべり剛性 K_S と呼ぶ。

$$K_S = \frac{1}{0.5L_1 + H} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.13)$$

上式中のパラメータ L_1 と H は、

$$L_I = \frac{\lambda_2}{S_2}\cdot\frac{\cosh(b\cdot\lambda_2)+\cos(b\cdot\lambda_2)}{\sinh(b\cdot\lambda_2)+\sin(b\cdot\lambda_2)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.14a)$$

$$H = \frac{\lambda_2}{S_2} \cdot \frac{1}{\sinh(b \cdot \lambda_2) + \sin(b \cdot \lambda_2)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.14b)$$

で与えられ、また、

$$S_2 = K \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.15)$$

である。ここで、めり込み剛性 K は繊維平行方向の場合 K_0 を繊維直交方向の場合 K_{90} を用いて、上式を計算する。この２つの剛性を用いることで、すべり係数 K_{S0}、K_{S90} を算出する。さらに、式(3. 14)中のパラメータは、以下のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} & b = 2 \cdot L_2 \\ & \lambda_2 = \left(\frac{S_2}{4EI_s} \right)^{0.25} \end{aligned} \right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(3.16)$$

また、上式の接合具の曲げ剛性 EI_S （kN・cm²）は、

$$EI_S = E_S \cdot \frac{\pi d^4}{64} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.17)$$

で与えられ、E_S はドリフトピンのヤング係数である。

3.4.1.3 初期ガタの考慮

ドリフトピン接合には多くの場合、ガタが存在する。実際に初期ガタを考慮すると、その挙動は、図 3-7 の実線で示すように載荷直後はスリップし、その後に剛性を発揮する。SPACE では、初期ガタが生じる場合は、同図の破線で示す剛性 mK_S を見掛けのすべり剛性とする。

$$\left. \begin{aligned} & mK_{S0}, \quad mK_{S90} \quad \text{(kN/cm/本)} \\ & m = \frac{P}{\left(S + \frac{P}{K_S} \right) \cdot K_S} \end{aligned} \right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(3.18)$$

式(3.18)で、K_S は繊維並行方向では K_{S0} を、直交方向では K_{S90} を用いて、係数 m を計算する。ここで、初期ガタ S をセットすると、見掛けのすべり剛性が求められる。

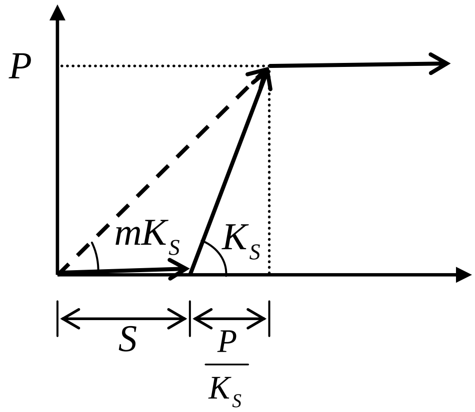


図 3-7　初期ガタ発生時の挙動

3.4.1.4 接合部の軸力とせん断力に対する耐力と剛性

前節までで、ドリフトピン１本の耐力と剛性を求めた。これらの値を元に、接合部全体の軸力とせん断力に対する降伏耐力と剛性を求める。

接合部全体の軸力とせん断力に対する耐力は、式(3.3)による１本のドリフトピンの耐力に、ただし繊維に平行（軸力）及び繊維に直行（せん断力）しているかで区別した値に、ピンの本数 i を乗じた値とする。

次に接合部の剛性であるが、これも耐力と同様、式(3.18)にドリフトピンの本数 n を乗じて、軸剛性 N_{xj} とせん断剛性 Q_{yj} を算出する。

$$N_{xj} = n \cdot m_0 l \quad , \quad Q_{yj} = n \cdot mK_{S90} \quad \text{（kN/cm）} \qquad \cdots\cdots\cdots(3.19)$$

3.4.1.5 接合部の曲げモーメントに対する耐力と剛性

次に、接合部の曲げ剛性と曲げ降伏耐力を求める。曲げ剛性と曲げ降伏耐力はドリフトピン１本の軸・せん断方向の剛性や降伏耐力を用いることによって求められる。

まず、任意の原点から測ったピンの座標（繊維平行距離 x_k、繊維直交距離 y_k）を用いて、次式より回転中心座標 (x_0, y_0) を求める。

$$x_0 = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k \quad , \quad y_0 = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} y_k \qquad \cdots\cdots\cdots(3.20)$$

接合部におけるドリフトピン位置の座標は、SPACE では矩形配列・円形配列それぞれ図 3-8 で示す位置を原点とする。即ち、得られる回転中心座標は図の位置からの距離ということになる。

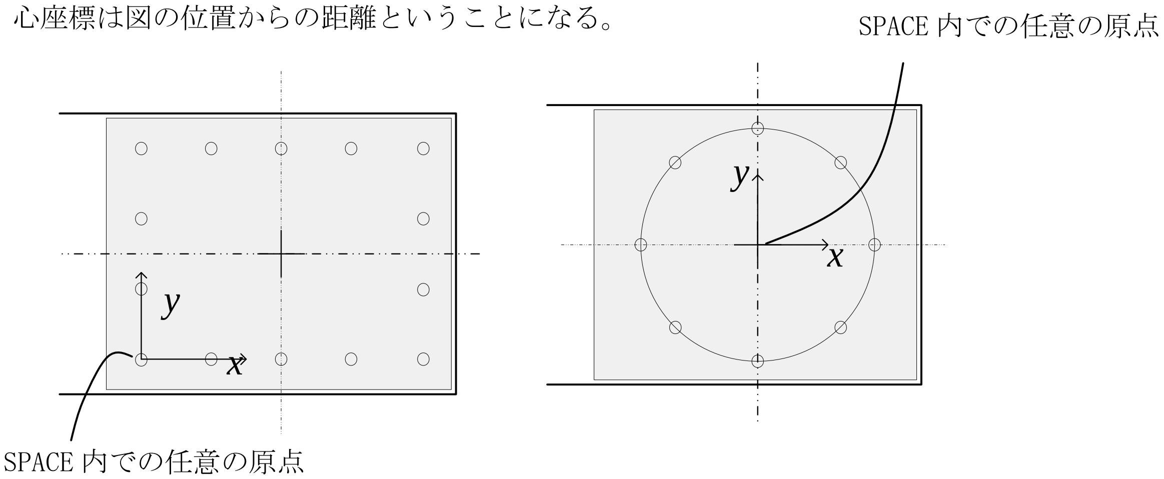


図 3-8　SPACE での原点の位置

これ以降はドリフトピンの本数毎に計算することになる。回転中心から任意のピンまで距離 r_k (cm)は次式で与えられる。

$$r_k = \sqrt{\left(x_k - x_0\right)^2 + \left(y_k - y_0\right)^2} \qquad \cdots\cdots\cdots(3.21)$$

回転方向と繊維平行方向とのなす角度ϕ_kは、

$$\phi_k = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{y_k - y_0}{r_k}\right) \qquad \cdots\cdots\cdots(3.22)$$

であり、すべり剛性K_ϕ（kN/cm・rad/本）は次のようにHonkinson式によって算定される。

$$K_{\phi k} = \frac{mK_{S0} \cdot mK_{S90}}{mK_{S0}\sin^2(\phi_k) + mK_{S90}\cos^2(\phi_k)} \qquad \cdots\cdots\cdots(3.23)$$

ドリフトピン毎に計算した距離r_kの２乗とすべり剛性K_ϕとの積を求め、全ドリフトピンについて和を取りその合計R_jが曲げ剛性となる。

$$R_j = \sum_{k=1}^{n} r_k^2 \cdot K_\phi \ \text{（kN・cm/rad）} \qquad \cdots\cdots\cdots(3.24)$$

次に、接合部の耐力を求める。まず、接合部にモーメントM、軸力N、せん断力Qが加わった場合、ある位置(x_k, y_k)の接合具kにおけるx方向の力F_x及びy方向の力F_yは次式で得られる。

$$\left.\begin{aligned} F_{xk} &= K_\phi \left\{(y_k - y_0)\frac{M}{R_j} + \frac{N}{N_x}\right\}_j \\ F_{yk} &= K_\phi \left\{(x_k - x_0)\frac{M}{R_j} + \frac{Q}{Q_x}\right\}_j \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots(3.25)$$

さらに、その合力F_kと合力ベクトルの方向を表す角度ϕ_kは次式によって求めることができる。

$$\left.\begin{aligned} F_k &= \sqrt{F_{xk}^{\ 2} + F_{yk}^{\ 2}} \\ \omega_k &= \tan^{-1}\left(\frac{F_{yk}}{F_{xk}}\right) \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots(3.26)$$

次に、繊維平行方向及び繊維直交方向の接合具降伏耐力をP_{y0}、P_{y90}と

すれば、合力ベクトル方向の降伏耐力は次式で表現できる。

$$P_{\omega k}=\frac{P_{y0}\cdot P_{y90}}{P_{y0}\sin^2(\omega_k)+P_{y90}\cos^2(\omega_k)} \quad \cdots\cdots\cdots(3.27)$$

各ドリフトピンの降伏耐力と合力の割合、$F_k/P_{\omega k}$ が 1 未満であればそのドリフトピンは弾性内である。即ち、$F_k/P_{\omega k}$ が初めて 1 を越える時、接合部は塑性状態に入り、全てのドリフトピンで 1 を超えるとき、接合部全体が降伏状態となる。

これらの評価式を用いる場合、以下の配列規定が満たされなければならない。配列規定を満たしていない場合、接合部は脆性的な破壊を生じ、正確な挙動を得ることができない可能性がある。このことを接合部を設計する際、特に注意する必要がある。

ドリフトピン接合をバネに置換して、その弾塑性挙動を表す場合、最も単純な方法は、ここで採用している 3 つのバネが相互に依存せず、独立とすることである。

しかし、式(3.25)で分かるように、ドリフトピン 1 本に加わる力は、曲げモーメントとせん断力、軸力によって表される。式(3.27)では、曲げバネの耐力を求めているが、ドリフトピンに加わる力の方向を必要としている。

上記のように、曲げバネの耐力は、接合部が降伏する時点の軸力とせん断力に依存する。SPACE では、曲げバネは独立としているため、軸力とせん断力を予測して、曲げバネの耐力を計算する必要がある。例えば、長期の軸力とせん断力、あるいは、接合部の軸方向バネ、せん断バネの耐力の 1/3 を使用するなどである。

端距離（e_e）	$\geqq 7d$
縁距離（e_h）	$\geqq 4d$
鋼板側縁距離（e_{se}）	$\geqq 2d$
接合具ピッチ（S）	$\geqq 7d$
接線方向接合具間隔（S_t）	$\geqq 7d$
半径方向接合具間隔（S_r）	$\geqq 7d$
径長比（l/d）	$\geqq 8d$
l：接合具の有効長さ	$\geqq 8d$

a）矩形配列　　b）円形配列

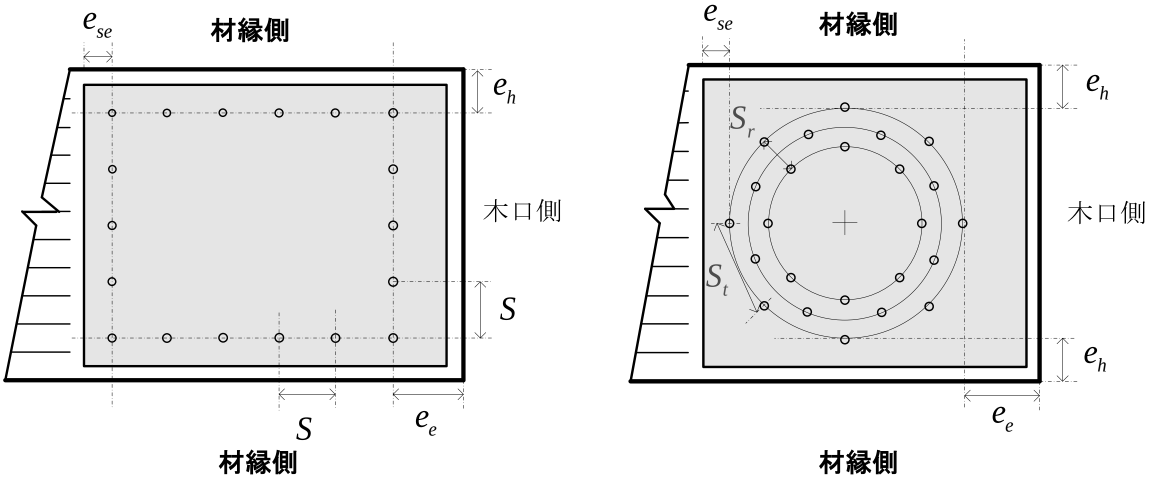


図 3-9　ドリフトピン接合における配列規定

3.4.2 接合金物を用いた接合

筋交いプレートやかど金物は、釘と組み合わされて使用されることから、接合具のすべり係数より、次式のように初期剛性を求める。

$$K = n_0 \cdot K_{S0} + n_{90} \cdot K_{S90} \quad [\mathrm{kN/cm}] \qquad \cdots\cdots\cdots(3.28)$$

ここで、各記号は次のようであり、すべり係数は、式(3. 18)で求められる。

K_{S0}	：繊維方向のすべり係数　[kN/cm]
K_{S90}	：繊維に直行方向のすべり係数　[kN/cm]
n_x	：釘本数　[本]

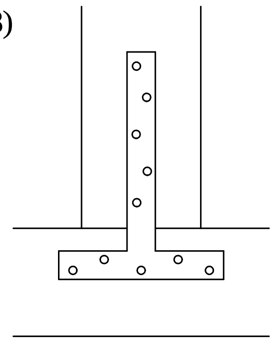


図 3-10　T 型金物接合

また、許容せん断耐力は以下のように求められる。

$$P_y = 2\sqrt{F_{e2} \times d \times M_y} \quad [\mathrm{kN}] \qquad \cdots\cdots\cdots(3.29)$$

ここで、

$$M_y = F_y \times \frac{d^3}{6} \quad [\mathrm{kN \cdot cm}]$$

P_y	：一面せん断降伏耐力　[kN]
F_{e2}	：主材のめり込みの終局強度　[kN/cm²]
M_y	：釘の曲げ降伏モーメント　[kN/cm]
F_y	：釘の降伏強度　[kN/cm²]
d	：釘の径　[cm]

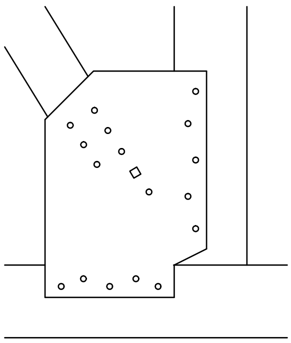


図 3-11　K 型金物接合

3.4.3 ホールダウン金物による接合

ホールダウン金物は、土台を地震などの力が加わった際に建物を支える基礎から土台や柱が抜けないように、柱と土台を緊結するための金物である。この金物は、部材の引き抜けに対して主に抵抗するものなので、SPACE では軸方向バネに置換して考える。軸バネの初期剛性は、金物に使用されているボルトのすべり係数より求める。許容降伏耐力は木質構造設計基準・同解説により、金物の種類によって提唱されている値を使用する。

ホールダウン金物を軸方向バネに置換して考える際、SPACE で使用する履歴特性は図 3-12 に示される圧縮側弾性スリップバイリニアを用い

る。ここでは、圧縮側耐力は引張側に比べ、大きな耐力を示すということを仮定している。これは、多くの実験結果により、圧縮側のめり込み剛性は引張側に対して、大きな剛性・耐力を持つことが一般的に知られているためである。さらに、第二剛性、スリップ剛性は初期剛性の 1%、徐荷剛性は初期剛性の値としている。

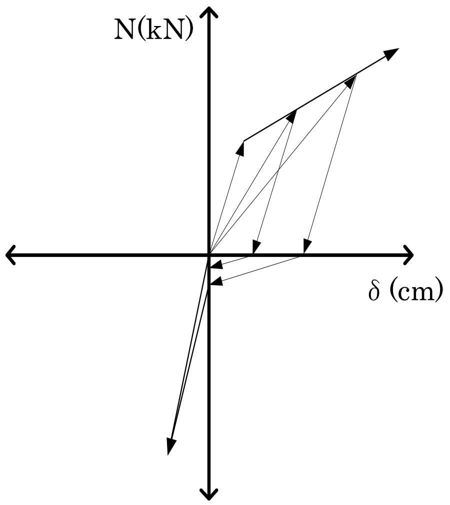


図 3-12　ホールダウン金物復元力特性
圧縮側弾性スリップバイリニア

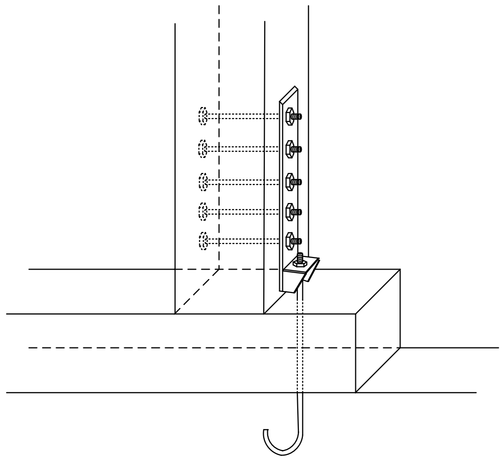


図 3-13　ホールダウン金物接合

ホールダウン金物は木質構造設計基準・同解説[1]により、金物の種類によっての許容耐力値が算出される。主な金物の算出された値を以下の表 3-1 に示す。

表 3-1　ホールダウン金物許容耐力一覧

名称	記号	短期許容耐力(kN)			使用金物
		べいまつ類	べいつが類	すぎ類	
引き寄せ金物	HD-B10	11.38	10.40	10.00	六角ボルトM12(2本)
	S-HD10				又はラグスクリューLS12(2本)
	HD-B15	17.06	15.59	15.00	六角ボルトM12(3本)
	S-HD15				又はラグスクリューLS12(3本)
	HD-B20	22.75	20.79	20.01	六角ボルトM12(4本)
	S-HD20				又はラグスクリューLS12(4本)
	HD-B25	28.44	25.99	25.01	六角ボルトM12(5本)
	S-HD25				又はラグスクリューLS12(5本)
引き寄せ金物	HD-N5	7.53	6.83	5.88	太めくぎZN90(6本)
	HD-N10	12.55	11.38	9.81	太めくぎZN90(10本)
	HD-N15	20.08	18.20	15.69	太めくぎZN90(16本)
	HD-N20	22.59	20.48	17.65	太めくぎZN90(20本)
	HD-N25	29.37	26.62	22.95	太めくぎZN90(26本)

ホールダウン金物の引張り側剛性は接合ボルトのすべり係数を用いて求める。圧縮側剛性は、引張り側剛性に部材のめり込み剛性を加えたものとする。

適用式を以下に示す。

<引張側剛性 K>

$$K = K_S \times n$$

<圧縮側剛性 K'>

$$K' = K_S \times n + K_C \qquad \cdots\cdots\cdots(3.30)$$

K_S :すべり係数（kN/cm）
n :ボルト本数（本）
K_C :めり込み剛性（kN/cm）

ここで、めり込み剛性は次式を用いる。

$$K_C = \frac{EA}{l} \qquad \cdots\cdots\cdots(3.31)$$

E: 土台のヤング係数(kN/cm²)
A : 柱材の接触断面積(cm²)
l: 土台部材のせい(cm)

SPACE では､第一折れ点は前述により求められた金物の許容耐力とし、第二折れ点は第一折れ点の 1.5 倍とする。さらに、第二剛性、スリップ剛性は初期剛性の 1/100、除荷剛性は初期剛性の値を使用する。

3.4.4 斜め打ち釘接合

図 3-14 で示されるように部材の接合(柱－土台等)は、釘１本、もしくは釘２本で結合されており、載荷された時、圧縮方向には力が伝わるが、引張あるいは、曲げモーメントは部材から部材に力が伝わらないと考えられる。このような接合状態を表すために、軸力のみ伝達するバネを配置することになる。しかも､そのバネ特性は､引っ張り剛性がゼロとなる。

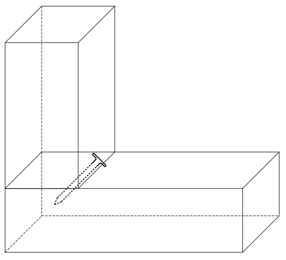


図 3-14　斜め打ち釘接合

3.4.5 仕口による接合

金物を使わない伝統的な接合方法であり、仕口の仕様により剛性、強度が異なり、現状では機械的特性を把握するに至っていない。そこで、実験等によって得られた諸性能を参考にし、その特性をバネに持たせることになる。現在のモデラーには、前節の斜め打ち釘接合のバネと仕口による接合の設計式が組み込まれていない。ユーザーは、実験や文献などの資料を基に、履歴モデルを選択し、そのパラメータを設定する必要がある。手動で設定する方法については第４章で説明する。

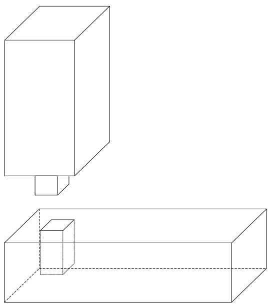


図 3-15　仕口接合

3.5 面材張り壁の特性

SPACE で面材張り壁を有する骨組を解析するにあたり、面材をせん断型バネモデルに置き換えていく必要がある。そこで、以下にせん断型バネモデルに置換する方法を示す。

面材釘打ち張り壁の特性は、釘の繰り返し載荷によるせん断耐力に依存することが若島[5)]らの研究によって分かっている。そこで、SPACE では、合板釘打ち面材の耐力性能を簡略化したせん断型バネモデルに置換し、解析を行うことにする。今回紹介する算定式は、(財) 日本住宅・木材技術センター「木造軸組構造住宅の許容応力度設計」により提案されている式を参考にする。

3.5.1 せん断耐力算定式

柱の曲げ変形の影響が小さい場合、面材張り釘の許容せん断耐力とせん断剛性は以下のように求められる。最初に、面材の寸法を次の記号で定義する。H：面材のせい(cm)であり、B：面材の幅(cm)、A_w：面材の面積(cm^2)である。

許容せん断耐力$Pa(N)$は、次の 3 つの耐力式で最も小さい値で決定される。

$$Pa(N)=\frac{1}{H}\min\begin{cases}M_y\\K_0/150\\0.2\sqrt{2\mu-1}\times M_u\end{cases}\quad\cdots\cdots\cdots(3.32)$$

ここで、M_yは面材の曲げ耐力、K_0は回転剛性、M_uは終局モーメント、またμは釘で決まる靭性率を表す。

次に、せん断剛性Kは、

$$\left.\begin{aligned}K(N/rad)&=K_0/H\\K_0(N\cdot cm/rad)&=A_w\cdot\Delta K_0\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(3.33)$$

となり、ここで、単位面積あたりの回転剛性ΔK_0は次式で与えられる。

$$\Delta K_0=1\bigg/\left(\frac{1}{I_{xy}\cdot k}+\frac{1}{G_B\cdot t}\right)\quad\cdots\cdots\cdots(3.34)$$

せん断バネの剛性として使用するためには単位が異なるため、ここで次式を用いて単位変換を行い、せん断バネの初期剛性$K_{SB}(N/cm)$を求める。

$$K_{SB}(N/cm) = K(N/rad)/H(cm) \qquad \cdots\cdots\cdots(3.35)$$

式(3.34)中の I_{xy}、k は次節で説明する。また、G_B は面材のせん断弾性係数であり、t は面材の板厚を表す。

次に、降伏せん断力 P_y は、次式で与えられる。

$$P_y(N) = B \cdot \Delta P_y \qquad \cdots\cdots\cdots(3.36)$$

ここで、単位幅あたりの降伏せん断力 ΔP_y は次式となる。

$$\Delta P_y(N) = Z_{xy} \cdot \Delta P_V \qquad \cdots\cdots\cdots(3.37)$$

上式で、Z_{xy} は単位面積あたりの釘配列係数であり、また ΔP_V は面材釘の一面せん断耐力であり、表 3-2 で与えられる。

最後に、終局せん断力 P_u は、

$$P_u(N) = B \cdot \Delta P_u \qquad \cdots\cdots\cdots(3.38)$$

で与えられ、単位幅あたりの終局せん断力 ΔP_u

$$\Delta P_u(N) = C_{xy} \cdot \Delta P_y \qquad \cdots\cdots\cdots(3.39)$$

となる。釘で決まる面材壁の靭性率 μ は、次式で与えられる。

$$\mu = \frac{\delta_u \cdot G_B \cdot t + \delta_V \cdot I_{xy} \cdot k}{\delta_V \left(G_B \cdot t + I_{xy} \cdot k \right)} \qquad \cdots\cdots\cdots(3.40)$$

I_{xy}、Z_{xy}、C_{xy} は次節で示す釘配列諸定数を使用する。さらに、ΔP_V、k、δ_V、δ_u は、図に示すように、面材に打たれた釘１本あたりの一面せん断データ(実験による)の値を用いる。その主な仕様を以下に示す。

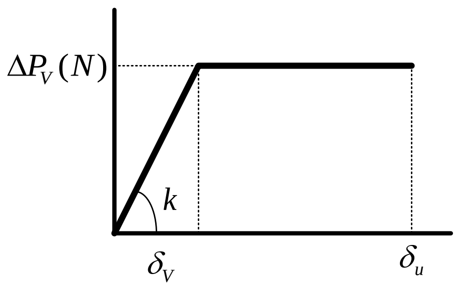


図 3-16　面材釘の一面せん断データ

表 3-2　一面せん断データ

面材	釘	k (N/cm)	δ_V (cm)	δ_u (cm)	⊿P_V (N)
構造用合板9または12mm	N50	4800	0.21	1.53	980
構造用合板24mm	N75	6600	0.25	2.30	1620
石膏ボード12mm	GN40	3900	0.07	0.95	290
石膏ボード12mm	ボードビス l=38	7700	0.04	0.70	310
石膏ラスボード12mm	ボードビス l=38	7000	0.05	0.40	350
杉板9または12mm	N50	6900	0.12	0.52	830
杉板27mm	N90	11100	0.16	0.60	1760

面材	G_B(N/cm^2)
構造用合板(ラワン)	39200
構造用合板(ベイマツ)	58800
OSB	137200
石膏ボード	88200
スギ	Eの1/15

3.5.2 面材を軸材に釘打ちした耐力要素の釘配列諸定数

前節で説明した算定式を計算する際必要となる釘配列諸定数I_{xy}、Z_{xy}、C_{xy}は、単位面材に打たれた釘配列によって決まる。その代表的な釘配列諸定数を表 3-2 に示す。さらに、この表に載っていない任意サイズ、任意釘配列の場合、これらの諸定数を計算する方法が次節で説明される。

3.5.3 面材を軸材に任意の釘配列で釘打ちした耐力要素の釘配列諸定数

本節では、任意釘配列の諸定数の計算方法について述べる。まず、仮定条件として釘のせん断剛性に比べて、面材はほぼ剛体であるとする。また、面材釘の打たれる軸材の曲げ変形の影響が小さい場合について、面材を軸材に任意の釘配列で釘打ちした耐力要素の釘配列諸定数の諸定数を求める。本節で求める諸定数は、釘配列諸定数I_{xy}、Z_{xy}、C_{xy}である。

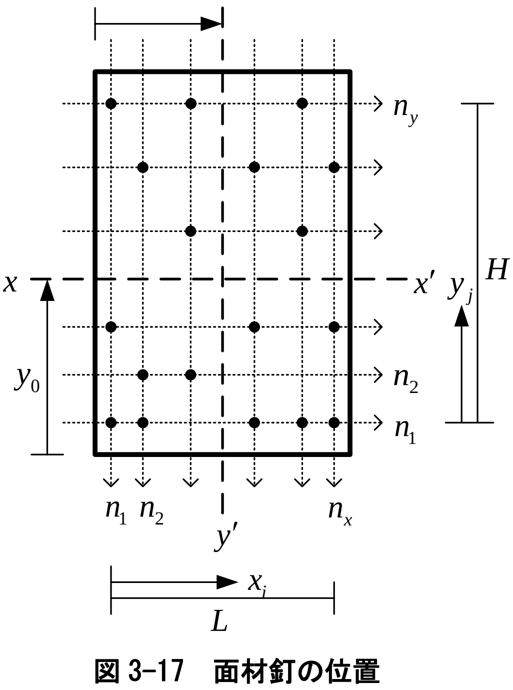


図 3-17　面材釘の位置

各記号の定義

x_i , y_j ： j 番目の釘の x 座標と y 座標
n_i ：各列での釘の本数
$x — x' , y — y'$ ：x 方向、y 方向中立軸
x_0 , y_0 ：釘配列中立軸の x,y 座標
H ,L：釘の端から端までの距離
Aw：面材の面積

最初に、単位面積あたりの釘配列 2 次モーメント I_{xy} (cm²/cm²)を次式で求める。

$$I_{xy} = \left(\frac{I_x \cdot I_y}{I_x + I_y} \right) \Big/ A_W \qquad \cdots\cdots\cdots(3.41)$$

ここで、I_x 及び I_y は次式で与えられ、また、X、Y 方向の弾性中立軸位置 (x_0, y_0) は、式(3. 43) で与えられる。

$$I_x = \sum (y_j - y_0)^2 \cdot n_j \qquad I_x = \sum (x_i - x_0)^2 \cdot n_i \qquad \cdots\cdots\cdots(3.42)$$

$$x_0 = \frac{\sum x_i \cdot n_i}{\sum n_i} \qquad y_0 = \frac{\sum y_j \cdot n_j}{\sum n_j} \qquad \cdots\cdots\cdots(3.43)$$

次に、単位面積あたりの釘配列係数 Z_{xy} (cm/cm²)が次式で求められる。

$$Z_{xy} = \frac{1}{A_W \sqrt{\dfrac{1}{{Z_{xi}}^2} + \dfrac{1}{{Z_{yi}}^2}}} \qquad \cdots\cdots\cdots(3.44)$$

ここで、

$$Z_{xi} = \frac{I_x}{(y_j - y_0)_{\mathrm{m}}} \qquad Z_{yi} = \frac{I_y}{(x_i - x_0)_{\mathrm{m}}} \qquad \cdots\cdots\cdots(3.45)$$

最後に、釘配列諸定数 C_{xy} を求める。まず、面材の形状と釘配列によって次のパラメータを決定する。

Y方向の釘配列が上下対称のとき、$y_{0P} = y_0$
非対称のとき、$y_{0P} = -0.106H + 1.212y_0$

X方向の釘配列が上下対称のとき、$x_{0P} = x_0$
非対称のとき、$x_{0P} = -0.106L + 1.212x_0$

$I_y \le I_x$ のとき、$\theta_{Px}/\theta_{Py} = 1.285 I_y / I_x$

$I_y \ge I_x$ のとき、$\theta_{Px}/\theta_{Py} = I_y / (1.285 I_x)$ ………(3.46)

決定したパラメータを用いて、次の順序で単位面積当りの塑性釘配列係数 Z_{Pxy} (cm/cm²)を求める。まず、両方向での塑性釘配列係数は、次式で求められる。

$$Z_{Px} = \sum \frac{(y_j - y_{0P})^2}{\sqrt{(x_i - x_{0P})^2 \left(\theta_{Py}/\theta_{Px}\right)^2 + (y_j - y_{0P})^2}}$$

$$Z_{Py} = \sum \frac{(x_i - x_{0P})^2}{\sqrt{(x_i - x_{0P})^2 + (y_j - y_{0P})^2 \left(\theta_{Px}/\theta_{Py}\right)^2}}$$

…..(3.47)

次に、単位面積当りの塑性釘配列係数は、

$$Z_{Pxy} = \frac{0.941\left(Z_{Px} + Z_{Py}\right)}{2 \cdot Y_{err} \cdot A_W}$$ ………(3.48)

ここで、

$$X_{err} = \frac{2\left|Z_{Px} - Z_{Py}\right|}{\left(Z_{Px} + Z_{Py}\right)}$$

$$Y_{err} = 0.998 + 0.068X_{err} + 0.906X_{err}^{\ 2}$$

…..(3.49)

係数 C_{xy} は釘配列係数 Z_{xy} と塑性釘配列係数 Z_{Pxy} の比より求められる。

$$C_{xy} = Z_{Pxy} / Z_{xy}$$ ………(3.50)

なお、$C_{xy} \le 0$ の場合、$C_{xy} = 1$ とする。これで任意釘配列によって打たれた面材の単位面積に対する釘配列諸定数が求められることになる。

3.5.4 せん断バネモデルの履歴特性

これまでで、せん断バネの初期剛性及び第一折れ点を求めることができた。SPACE で使用しているせん断バネの履歴特性を図 3-18 に示す。その他の履歴特性のパラメータは、現在では経験的方法で決定することになる。以下で設定した値は、SPACE で自動的に設定しており、他の値としたい場合は、第 4 章で示すダイアログを用いて変更することが可能である。

図 3-18 の履歴モデルで使用する値は、式(3.36)の許容せん断耐力 $P_a(N)$ と式(3.35)で与えられるせん断剛性 $K_{SB}(N/rad)$ である。許容せん断耐力 $P_a(N)$ をせん断バネの第一折れ点、せん断剛性を初期剛性とする。さらに、第二折れ点は、許容せん断耐力 $P_a(N)$ を長期許容応力度と考え、その 1.5 倍とする。また、第二剛性は、面材張り壁要素の実験式より多くの面材は初期剛性の 15%程の値をとっていることが分かっているため、ここでは安全側として、初期剛性の 10%とする。

さらに、第三剛性は初期剛性の 1%とし、スリップ剛性は初期剛性の 1%、徐荷剛性は初期剛性の値とする。

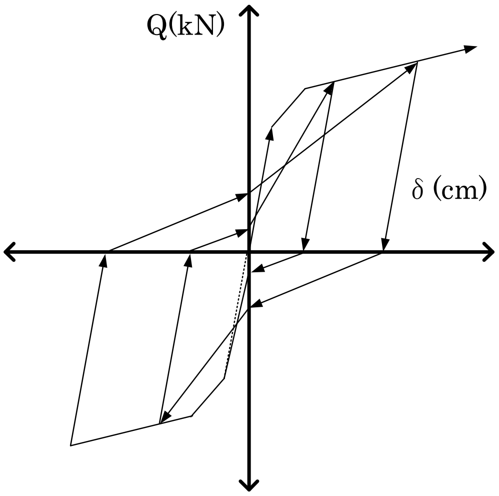


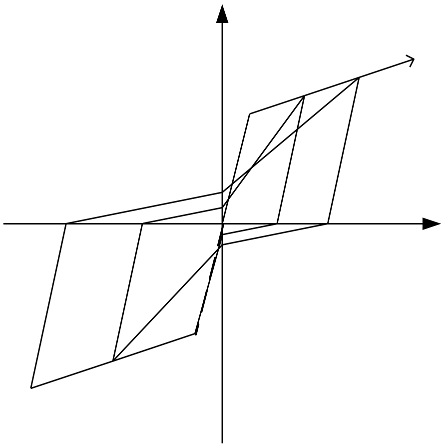
図 3-18　面材のせん断バネ履歴特性
(S 字スリップトリリニア)

3.6 接合部バネモデルの履歴特性

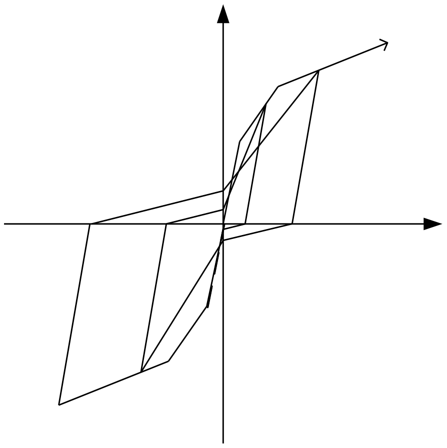
木質構造物の接合部用に開発された任意型部材におけるバネモデルの復元力履歴特性は、S 字型スリップバイリニア、S 字型スリップトリリニア、スリップバイリニア、スリップトリリニア、ボックス型モデル、圧縮側弾性スリップバイリニア、圧縮側弾性スリップトリリニアの 7 種類である（図 3-19)。

S 字型スリップバイリニア、S 字型スリップトリリニアは、主に、鋼板挿入型ドリフトピン接合などの復元力特性に用いられる。スリップバイリニア、スリップトリリニアは、引張ボルト接合などの接合部の復元力特性に用いられる。また、ボックス型モデルは、軸方向バネの復元力特性に用いられる。圧縮側弾性スリップバイリニア、圧縮側弾性スリップトリリニアは、接合金物やホールダウン金物の軸方向バネに用いられる。

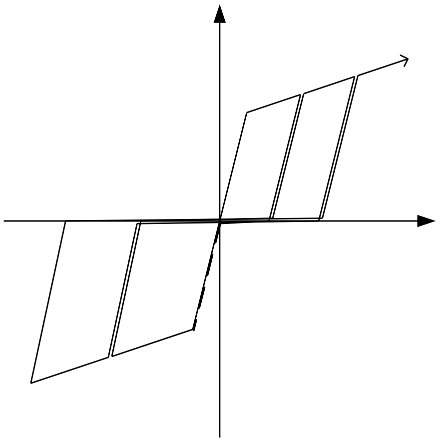
SPACEVer.3.1 のモデラーで採用している木質部の履歴、及び接合部の履歴が表 3.3 にまとめられている。



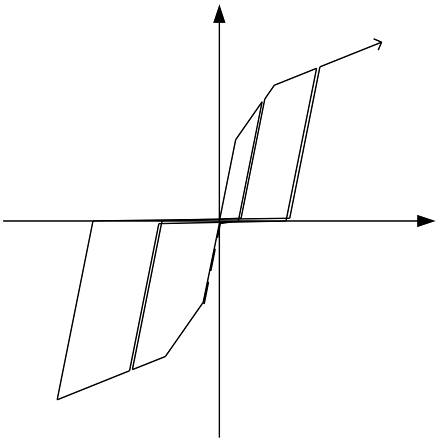
a) S 字型スリップバイリニア



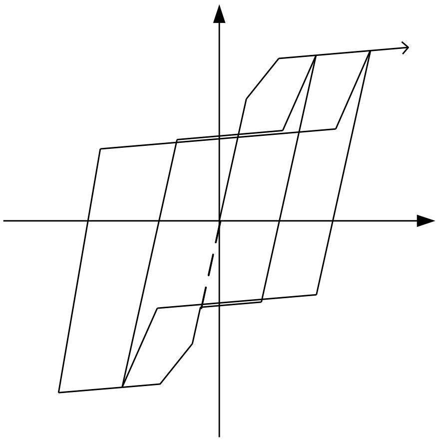
b) S 字型スリップトリリニア



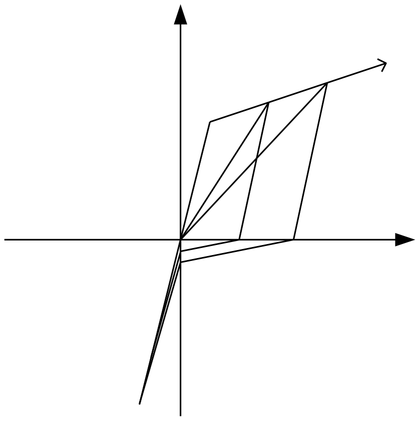
c) スリップバイリニア



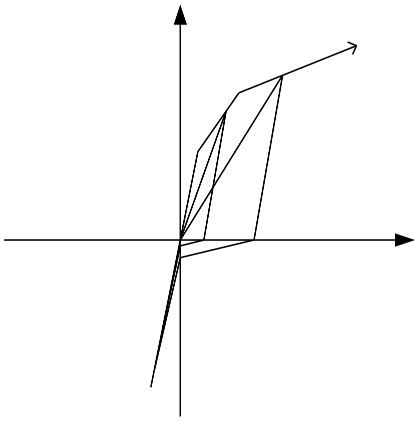
d) スリップトリリニア



e) ボックス型モデル



f）圧縮側弾性スリップバイリニア



g）圧縮側弾性スリップトリリニア

図 3-19　各種接合部の履歴特性

表 3-3　SPACE で自動定義される履歴モデル

	バネ種別	履歴モデル	圧縮側					引張側				
			第１剛性	第２剛性	第３剛性	第１折れ点	第２折れ点	第１剛性	第２剛性	第３剛性	第１折れ点	第２折れ点
木質部	軸方向応力―ひずみ	非対称トリリニア	データベース	第１剛性の 0.35 倍	第１剛性の 0.01 倍	短期許容応力度	第１折れ点の 1.5 倍	データベース	第１剛性の 0.7 倍	ほぼ 0	短期許容応力度	第１折れ点の 1.5 倍
ドリフトピン接合	軸方向バネ	ボックス型モデル	式 (3.19)							圧縮側と同じ		
	せん断バネ	S 字型スリップバイリニア	式 (3.19)		―		―			圧縮側と同じ		
	曲げバネ＊	S 字型スリップトリリニア	式 (3.24)	第１剛性の 0.2 倍	第１剛性の 0.01 倍	式 (3.24)	第１折れ点の２倍			圧縮側と同じ		
金物接合	軸方向バネ		式 (3.28)			式 (3.29)						
	せん断バネ		式 (3.28)			式 (3.29)						
ホールダウン接合	軸方向バネ	圧縮側弾性スリップバイリニア	式 (3.24)									
	せん断バネ											
面材張り壁	せん断バネ	S 字スリップトリリニア	式 (3.35)	第１剛性の 0.15 倍	第１剛性の 0.01 倍	式 (3.36)	第１折れ点の 1.5 倍			圧縮側と同じ		

＊曲げバネの詳細は、第 6.2.2 参照