



Title	鋼板ウェブを持つ木材接合部の荷重－すべり性能
Author(s)	平井, 卓郎; HIRAI, Takuro
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 47(1), 215-248
Issue Date	1990-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21321
Type	departmental bulletin paper
File Information	47(1)_P215-248.pdf



鋼板ウェブを持つ木材接合部の 荷重—すべり性能

平井卓郎*

Load-Slip Relationship of Mechanical Wood-Joints with Steel Webs

By

Takuro HIRAI*

要 旨

ウェブ材として鋼板を用いた木材の各種接合部の変形解析に用いられる基本計算式をとりまとめた。対象としている接合法はボルト接合，ドリフトピン接合，ラグスクリュー接合，釘接合である。木材接合部の荷重—すべり性能は，弾性床上の梁理論を適用して計算されるが，本報では接合部に生じる軸力影響を考慮した基本計算式をあらたに誘導するとともに，著者らがこれまでに非線形数値解析で使用して来た基本計算式についても，一括して整理しておくことにした。また，ここに示された計算方法を実際の接合部設計に適用して行く際に問題となるいくつかの具体的検討課題についても簡単にふれた。

キーワード： 木材接合部，荷重—すべり性能，弾性床上の梁理論，段階的線形解析。

はじめに

釘，ボルトその他の棒状接合具を用いた木材接合部の荷重—すべり性能は，弾性床上の梁理論によって計算予測することが出来，これまでに多くの研究成果が報告されている¹⁻¹⁴⁾。特に近年は計算機の普及にともない，線形解析^{1-6,9,10)}に加えて様々な計算手法による非線形数値解析^{7,8,11-14)}も盛んに行われて来ている。しかし，この計算法を実際の接合部性能評価に適

1989年9月30日受理 Received September 30, 1989

* 北海道大学農学部林産学科木材加工学講座
Laboratory of Wood Engineering, Faculty of Agriculture,
Hokkaido University, Sapporo 060

用し、合理的な接合部設計法を確立して行くためには、基礎方程式や境界条件の与え方、計算に必要な基礎定数の測定法等、更に検討すべき多くの課題が残されているように思われる。これらには、容易に解決、改良出来る点とそれがかなり困難な点、また実用的に非常に重要な部分と、多少の誤差の要因とはなっても本質的にそれほど重要ではない部分とが混在しているように思われる。この報告では、著者がこれまで解析に用いてきた計算式の不備な部分について改良を試みながら、弾性床上の梁理論による、鋼板ウェブを用いた木材接合部の変形計算法をまとめ、あわせてこれらの問題点を整理してみることにしたい。

1. 基礎方程式と一般解

鋼板をウェブとして用いた木材接合部の主材—ウェブ間の相対すべり変位は、両材の境界面付近で接合具と木材、接合具と鋼板との間にそれぞれ生じるめり込み変位の和となるものと考えられる。これらのうち、後者は実際の接合部の構成によって無視出来る場合と出来ない場合があるものと思われるが、いずれにせよ鋼材と鋼材との接触問題となりやや扱いが難しいので別に検討するものとし、ここでは木材中における接合具の変形挙動のみを考えることにしたい。

さて、Fig. 1(a), Fig. 4(a), ……等々に示される木材接合部において、木材を弾性床、釘、ボルトその他の棒状接合具をそれに支えられた梁と考えることにしよう。計算式を非線形数値解析に適用する都合上、接合部を接合具の軸方向に、Fig. 1(b), Fig. 4(b), ……等のように n 層に分割し、それぞれの層において図中に示されるような座標系を定めると、接合具の任意の位置において、次のような一般的な撓み曲線の基礎微分方程式が成り立つ¹⁵⁾。

$$\frac{d^4 y_i}{dx_i^4} - \frac{N_i}{E_s I_{si}} \cdot \frac{d^2 y_i}{dx_i^2} + 4\mu_i^4 y_i = 0 \quad (1)$$

ここで、 N_i = 第 i 層に生じる軸力 (引張力を正とする)

$E_s I_{si}$ = 第 i 層部分の接合具の曲げ剛性

$$\mu_i = \sqrt[4]{\frac{k_{oi} d_i}{4E_s I_{si}}}$$

k_{oi} = 第 i 層における接合具面圧定数

d_i = 第 i 層部分の接合具径

ここで、面圧定数 k_{oi} は接合具がその長軸に垂直方向にまっすぐ木材中にめり込んで行くときの、単位投影面積あたりの荷重 (面圧応力) とめり込み変位との関係を示す係数である^{5,16~18)}。

(1)式で、 y_i を(2)式のようにおくと

$$y_i = e^{\lambda_i x_i} \quad (2)$$

λ_i に関する次のような特性方程式が得られる。

$$\lambda_i^4 - \frac{N_i}{E_s I_{si}} \lambda_i^2 + 4\mu_i^4 = 0 \quad (3)$$

(3)式を解くと

$$\lambda_i = \pm \sqrt{\frac{N_i}{2E_s I_{si}} \pm \sqrt{\left(\frac{N_i}{2E_s I_{si}}\right)^2 - 4\mu_i^4}} \quad (4)$$

ここで, α_i, β_i を(5), (6)式のようにおくと

$$\alpha_i = \sqrt{\mu_i^2 + \frac{N_i}{4E_s I_{si}}} \quad (5)$$

$$\beta_i = \sqrt{\left|\mu_i^2 - \frac{N_i}{4E_s I_{si}}\right|} \quad (6)$$

λ_i は(7), (8)式のように表される。

$$\lambda_i = \pm(\alpha_i \pm i \cdot \beta_i) \quad (\text{ただし, } N \leq \sqrt{4k_{oi}d_i E_s I_{si}}) \quad (7)$$

$$\lambda_i = \pm(\alpha_i \pm \beta_i) \quad (\text{ただし, } N > \sqrt{4k_{oi}d_i E_s I_{si}}) \quad (8)$$

λ_i が(7)式で与えられる場合, (1)式の一般解は次のようになる。

$$y_i = \frac{\sigma_o}{k_{oi}} (a_i A_{1i} + b_i B_{1i} + c_i C_{1i} + d_i D_{1i}) \quad (9)$$

ただし, $A_{1i} = \cosh \alpha_i x_i \cos \beta_i x_i$

$$B_{1i} = \frac{1}{2} (\cosh \alpha_i x_i \sin \beta_i x_i + \sinh \alpha_i x_i \cos \beta_i x_i)$$

$$C_{1i} = \sinh \alpha_i x_i \sin \beta_i x_i$$

$$D_{1i} = \frac{1}{2} (\cosh \alpha_i x_i \sin \beta_i x_i - \sinh \alpha_i x_i \cos \beta_i x_i)$$

$$\sigma_o = \frac{P}{A_o}, \quad A_o = \text{基準面圧面積}$$

(9)式中の基準面圧応力 σ_o は計算上の基準値で, 数値そのものに特に定量的な意味はない。したがって, この計算に用いられる基準面圧面積 A_o は計算に便利なように任意に定めて良いが, 接合具の投影面積 (例えば, Fig. 1 のボルト接合部の場合にはボルト径 $d \times$ 主材厚 t) を用いるのが一般的なようである。その場合, σ_o は平均面圧応力となる。

接合具に生じる傾斜角 θ_i , 曲げモーメント M_i , 剪断力 F_i と垂直変位 y_i との間には次の関係が成り立ち

$$\theta_i = \frac{dy_i}{dx_i} \quad (10)$$

$$M_i = -E_s I_{si} \frac{d^2 y_i}{dx_i^2} \quad (11)$$

$$F_i = -E_s I_{si} \frac{d^3 y_i}{dx_i^3} + N_i \frac{dy_i}{dx_i} \quad (12)$$

(9)式および(10)~(12)式より, θ_i , M_i , F_i はそれぞれ次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \theta_i = & \frac{\sigma_o}{k_{oi}} \{ a_i \{ (\alpha_i - \beta_i) B_{1i} - (\alpha_i + \beta_i) D_{1i} \} \\ & + b_i \{ \frac{1}{2} (\alpha_i + \beta_i) A_{1i} + \frac{1}{2} (\alpha_i - \beta_i) C_{1i} \} \\ & + c_i \{ (\alpha_i + \beta_i) B_{1i} + (\alpha_i - \beta_i) D_{1i} \} \\ & + d_i \{ -\frac{1}{2} (\alpha_i - \beta_i) A_{1i} + \frac{1}{2} (\alpha_i + \beta_i) C_{1i} \} \} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} M_i = & -\frac{d_i \sigma_o}{4\mu_i^4} \{ a_i \{ (\alpha_i^2 - \beta_i^2) A_{1i} - 2\alpha_i \beta_i C_{1i} \} \\ & + b_i \{ (\alpha_i^2 - \beta_i^2) B_{1i} - 2\alpha_i \beta_i D_{1i} \} \\ & + c_i \{ 2\alpha_i \beta_i A_{1i} + (\alpha_i^2 - \beta_i^2) C_{1i} \} \\ & + d_i \{ 2\alpha_i \beta_i B_{1i} + (\alpha_i^2 - \beta_i^2) D_{1i} \} \} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_i = & -\frac{d_i \sigma_o}{4\mu_i^4} \left[a_i \left\{ (\alpha_i + \beta_i) (\alpha_i^2 - 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N_i}{E_s I_{si}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} B_{1i} \right. \\ & - \left\{ (\alpha_i - \beta_i) (\alpha_i^2 + 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N_i}{E_s I_{si}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} D_{1i} \\ & + b_i \left[\frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i - \beta_i) (\alpha_i^2 + 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N_i}{E_s I_{si}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} A_{1i} \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i + \beta_i) (\alpha_i^2 - 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N_i}{E_s I_{si}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} C_{1i} \right] \\ & + c_i \left\{ (\alpha_i - \beta_i) (\alpha_i^2 + 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N_i}{E_s I_{si}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} B_{1i} \\ & + \left\{ (\alpha_i + \beta_i) (\alpha_i^2 - 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N_i}{E_s I_{si}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} D_{1i} \\ & + d_i \left[-\frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i + \beta_i) (\alpha_i^2 - 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N_i}{E_s I_{si}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} A_{1i} \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i - \beta_i) (\alpha_i^2 + 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N_i}{E_s I_{si}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} C_{1i} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

一方, λ_i が(8)式で与えられる場合, (1)式の一般解は次のようになり

$$y_i = \frac{\sigma_o}{k_{oi}} (a_i A_{2i} + b_i B_{2i} + c_i C_{2i} + d_i D_{2i}) \quad (16)$$

ただし, $A_{2i} = \cosh \varphi_i x_i$, $B_{2i} = \sinh \varphi_i x_i$

$$C_{2i} = \cosh \omega_i x_i, \quad D_{2i} = \sinh \omega_i x_i$$

$$\varphi_i = \alpha_i + \beta_i, \quad \omega_i = \alpha_i - \beta_i$$

(10)~(12), (16)式より, θ_i , M_i , F_i はそれぞれ

$$\theta_i = \frac{\sigma_o}{k_{oi}} \{ \varphi_i (a_i B_{2i} + b_i A_{2i}) + \omega_i (c_i D_{2i} + d_i C_{2i}) \} \quad (17)$$

$$M_i = -\frac{d_i \sigma_o}{4\mu_i^4} \{ \varphi_i^2 (a_i A_{2i} + b_i B_{2i}) + \omega_i^2 (c_i C_{2i} + d_i D_{2i}) \} \quad (18)$$

$$F_i = -\frac{d_i \sigma_o}{4\mu_i^4} \left\{ \varphi_i \left(\varphi_i^2 - \frac{N_i}{E_s I_{si}} \right) (a_i B_{2i} + b_i A_{2i}) \right. \\ \left. + \omega_i \left(\omega_i^2 - \frac{N_i}{E_s I_{si}} \right) (c_i D_{2i} + d_i C_{2i}) \right\} \quad (19)$$

接合具に軸力が生じない場合, すなわち $N_i = 0$ の場合には, (1)式は次の形をとる。

$$\frac{d^4 y_i}{dx_i^4} + 4\mu_i^4 y_i = 0 \quad (20)$$

このとき, (5), (6)式の α_i , β_i は次のようになり

$$\alpha_i = \beta_i = \mu_i \quad (21)$$

(20)式の一般解は(9)式に(21)式を代入して

$$y_i = \frac{\sigma_o}{k_{oi}} (a_i A_{3i} + b_i B_{3i} + c_i C_{3i} + d_i D_{3i}) \quad (22)$$

ただし, $A_{3i} = \cosh \mu_i x_i \cos \mu_i x_i$

$$B_{3i} = \frac{1}{2} (\cosh \mu_i x_i \sin \mu_i x_i + \sinh \mu_i x_i \cos \mu_i x_i)$$

$$C_{3i} = \sinh \mu_i x_i \sin \mu_i x_i$$

$$D_{3i} = \frac{1}{2} (\cosh \mu_i x_i \sin \mu_i x_i - \sinh \mu_i x_i \cos \mu_i x_i)$$

この場合, 接合具に生じる傾斜角 θ_i , 曲げモーメント M_i は前出の(10), (11)式をそのまま用いて求められ, また剪断力 F_i は(12)式に $N = 0$ を代入した次の形で与えられる。

$$F_i = -E_s I_{si} \frac{d^3 y_i}{dx_i^3} \quad (23)$$

(10), (11), (23)式および(22)式から, あるいは(13)~(15)式に(21)式および $N=0$ を代入して

$$\theta_i = \frac{\mu_i \sigma_o}{k_{oi}} (-2a_i D_{3i} + b_i A_{3i} + 2c_i B_{3i} + d_i C_{3i}) \quad (24)$$

$$M_i = \frac{d_i \sigma_o}{2\mu_i^2} (a_i C_{3i} + b_i D_{3i} - c_i A_{3i} - d_i B_{3i}) \quad (25)$$

$$F_i = \frac{d_i \sigma_o}{2\mu_i} (2a_i B_{3i} + b_i C_{3i} + 2c_i D_{3i} - d_i A_{3i}) \quad (26)$$

また, (1)式において床反力の生じない場合, すなわち軸力を受ける梁の曲げを考えると, (1)式は次のようになる。

$$\frac{d^4 y_i}{dx_i^4} - \frac{N_i}{E_s I_{si}} \cdot \frac{d^2 y_i}{dx_i^2} = 0 \quad (27)$$

(27)式で, 前出と同じく y_i を(2)式のようにおくと, λ_i に関する特性方程式は

$$\lambda_i^4 - \frac{N_i}{E_s I_{si}} \lambda_i^2 = 0 \quad (28)$$

(28)式を解くと

$$\lambda_i = 0, \pm \sqrt{\frac{N_i}{E_s I_{si}}} \quad (29)$$

ここで, γ_i を(30)式のようにおくと

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{N_i}{E_s I_{si}}} \quad (30)$$

(27)式の一般解は

$$y_i = \sigma_o (a_i + b_i x_i + c_i C_{4i} + d_i D_{4i}) \quad (31)$$

ただし, $C_{4i} = \cosh \gamma_i x_i$, $D_{4i} = \sinh \gamma_i x_i$

(10)~(12), (31)式より, 傾斜角 θ_i , 曲げモーメント M_i , 剪断力 F_i はそれぞれ

$$\theta_i = \sigma_o \{ b_i + \gamma_i (c_i D_{4i} + d_i C_{4i}) \} \quad (32)$$

$$M_i = -\sigma_o N_i (c_i C_{4i} + d_i D_{4i}) \quad (33)$$

$$F_i = \sigma_o N_i b_i \quad (34)$$

(1)式において、軸力と床反力がともに生じないとき、(1)式は最も基本的な梁の撓み曲線の微分方程式となって

$$E_s I_{si} \frac{d^4 y_i}{dx_i^4} = 0 \quad (35)$$

(35)式の一般解は

$$y_i = \sigma_o (a_i + b_i x_i + c_i x_i^2 + d_i x_i^3) \quad (36)$$

(10), (11), (23), (36)式より、傾斜角 θ_i , 曲げモーメント M_i , 剪断力 F_i はそれぞれ次のようになる。

$$\theta_i = \sigma_o (b_i + 2c_i x_i + 3d_i x_i^2) \quad (37)$$

$$M_i = -\sigma_o E_s I_{si} (2c_i + 6d_i x_i) \quad (38)$$

$$F_i = -\sigma_o E_s I_{si} \cdot 6d_i \quad (39)$$

2. 各接合法に対する境界条件と特解

木材接合部の荷重一すべり性能は1. に示した計算方法を組み合わせることによって解析的に求められる。以下では、比較的大規模な木構造で用いられるいくつかの接合法、すなわちサイドウェブ型ボルト接合、センターウェブ型ボルト接合、センターウェブ型ドリフトピン接合、サイドウェブ型ラグスクリュー接合、サイドウェブ型釘接合（ネイルオンプレート接合）についてそれぞれの計算式を求めてみることにしたい。

2.1 サイドウェブ型ボルト接合

木材のボルト接合部では、ナットが締め付けられることによって、ボルトに軸方向引張力が、木材にこれと釣合うだけの部分横圧縮力が加わる。また、このような初期応力が加わっていない場合にも、接合部の変形が進みボルトの曲げ変形が増すと、接合部にはこれと同様な二次的な軸方向力が生じるようになる。これらの軸力は接合部に加わる外力と逆方向の曲げモーメントを生じさせ、接合部のすべり変位を減少させる方向に働く。前者の初期軸力については、施工後、実際の使用条件下においてこの力がどれだけの期間維持されるか意見の分かれるところで、著者も現時点ではこの力は考慮に入れない方が無難であるように思う。しかし、後者の二次的な軸力は、接合部の変形が進むと必ず生じるものと考えられ、また一次設計レベル

を越えた後の接合部の荷重一すべり挙動をとらえ、接合部の最大耐力についても検討を加えて行こうとすると無視出来なくなるようである。特に、最近わが国においても使用が見込まれるようになったドリフトピン接合との耐力性能比較を合理的に行うためには、どうしてもこの点を考慮する必要が生じるように思われる。以上のような視点から、ボルト接合部を軸引張力を受ける弾性床上の梁と考えて計算式を求めて行くことにしたい。

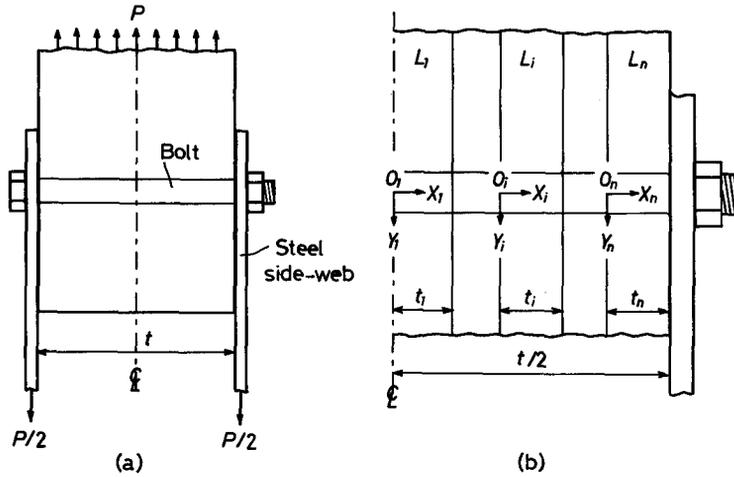


Fig. 1 Bolt joint with steel side-webs and the coordinates.

いま、Fig.1(a)のように2枚の鋼板サイドウェブを持つ左右対称なボルト接合部を考え、ボルトがその全長にわたって木材と接しているものとする。この接合部の木材部分の半分を n 層に分割し、各層において Fig.1(b)のような座標を定めると、 $L_1 \sim L_n$ の各層において前出の(1)式のような基礎微分方程式が与えられる。ここではごく一般的なボルトを考えているので、ボルト径 d は長さ方向に一樣となり、またこのボルト接合部には、ボルトの曲げ変形による軸方向長さ減少に対応して、軸方向に一樣な引張力 N が生じるものと仮定する。すなわち、 $L_1 \sim L_n$ の各層において

$$d_1 = d_2 = \dots = d_i = \dots = d_n = d \tag{40}$$

$$N_1 = N_2 = \dots = N_i = \dots = N_n = N \tag{41}$$

この接合部の変形の対称性を考慮すると、左右対称軸上、すなわち第1層の $x_1=0$ において次のような境界条件が成り立つ。

$$x_1=0 \text{ において } \theta_1=0, F_1=0 \tag{42}$$

$x_i=0$ のときの(9)式中の $A_{1i}, B_{1i}, C_{1i}, D_{1i}$ をそれぞれ $A'_{1i}, B'_{1i}, C'_{1i}, D'_{1i}$ と書くと、これ

らは次の値をとり

$$A'_{1i}=1, B'_{1i}=C'_{1i}=D'_{1i}=0 \quad (43)$$

$N \leq \sqrt{4k_{o1}dE_s I_{s1}}$ の場合 ((7)式の場合), (40), (41)式の関係 considering (13), (15)式を(42)式に代入し, (43)式の値を用いると, 次の関係が導かれる。

$$b_1(\alpha_1 + \beta_1) - d_1(\alpha_1 - \beta_1) = 0 \quad (44)$$

$$\begin{aligned} & b_1\{(\alpha_1 - \beta_1)(\alpha_1^2 + 4\alpha_1\beta_1 + \beta_1^2) - \frac{N}{E_s I_{s1}}(\alpha_1 + \beta_1)\} \\ & + d_1\{-(\alpha_1 + \beta_1)(\alpha_1^2 - 4\alpha_1\beta_1 + \beta_1^2) + \frac{N}{E_s I_{s1}}(\alpha_1 - \beta_1)\} = 0 \end{aligned} \quad (45)$$

同様に, $x_i=0$ のときの(16)式中の A_{2i} , B_{2i} , C_{2i} , D_{2i} をそれぞれ A'_{2i} , B'_{2i} , C'_{2i} , D'_{2i} と書くと, これらは次の値をとり

$$A'_{2i}=C'_{2i}=1, B'_{2i}=D'_{2i}=0 \quad (46)$$

$N > \sqrt{4k_{o1}dE_s I_{s1}}$ の場合 ((8)式の場合), $x_1=0$ における境界条件(42)式に(17), (19)式を代入し, (46)式の値を用いると

$$b_1\varphi_1 + d_1\omega_1 = 0 \quad (47)$$

$$b_1\varphi_1\left(\varphi_1^2 - \frac{N}{E_s I_{s1}}\right) + d_1\omega_1\left(\omega_1^2 - \frac{N}{E_s I_{s1}}\right) = 0 \quad (48)$$

また, 木材と鋼材サイドウェブとの境界, すなわち第 n 層の $x_n=t_n$ において, ボルト頭部が回転自由であるとする

$$x_n=t_n \text{ において } M_n=0, F_n=\frac{P}{2}=\frac{\sigma_o A_o}{2} \quad (49)$$

$x_i=t_i$ のときの A_{1i} , B_{1i} , C_{1i} , D_{1i} の値をそれぞれ A''_{1i} , B''_{1i} , C''_{1i} , D''_{1i} と書くと, $N \leq \sqrt{4k_{on}dE_s I_{sn}}$ の場合, (14), (15)式を(49)式に代入して次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} & a_n\{(\alpha_n^2 - \beta_n^2)A''_{1n} - 2\alpha_n\beta_n C''_{1n}\} \\ & + b_n\{(\alpha_n^2 - \beta_n^2)B''_{1n} - 2\alpha_n\beta_n D''_{1n}\} \\ & + c_n\{2\alpha_n\beta_n A''_{1n} + (\alpha_n^2 - \beta_n^2)C''_{1n}\} \\ & + d_n\{2\alpha_n\beta_n B''_{1n} + (\alpha_n^2 - \beta_n^2)D''_{1n}\} = 0 \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned}
& a_n \left\{ (\alpha_n + \beta_n) (\alpha_n^2 - 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2) - \frac{N}{E_s I_{sn}} (\alpha_n - \beta_n) \right\} B''_n \\
& - \left\{ (\alpha_n - \beta_n) (\alpha_n^2 + 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2) - \frac{N}{E_s I_{sn}} (\alpha_n + \beta_n) \right\} D''_n \\
& + b_n \left[\frac{1}{2} \left\{ (\alpha_n - \beta_n) (\alpha_n^2 + 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2) - \frac{N}{E_s I_{sn}} (\alpha_n + \beta_n) \right\} A''_n \right] \\
& + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_n + \beta_n) (\alpha_n^2 - 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2) - \frac{N}{E_s I_{sn}} (\alpha_n - \beta_n) \right\} C''_n \\
& + c_n \left\{ (\alpha_n - \beta_n) (\alpha_n^2 + 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2) - \frac{N}{E_s I_{sn}} (\alpha_n + \beta_n) \right\} B''_n \\
& + \left\{ (\alpha_n + \beta_n) (\alpha_n^2 - 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2) - \frac{N}{E_s I_{sn}} (\alpha_n - \beta_n) \right\} D''_n \\
& + d_n \left[-\frac{1}{2} \left\{ (\alpha_n + \beta_n) (\alpha_n^2 - 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2) - \frac{N}{E_s I_{sn}} (\alpha_n - \beta_n) \right\} A''_n \right] \\
& + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_n - \beta_n) (\alpha_n^2 + 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2) - \frac{N}{E_s I_{sn}} (\alpha_n + \beta_n) \right\} C''_n \\
& = -\frac{2\mu_n^4 A_o}{d} \tag{51}
\end{aligned}$$

同様に、 $x_i = t_i$ のときの A_{2i} , B_{2i} , C_{2i} , D_{2i} をそれぞれ A''_{2i} , B''_{2i} , C''_{2i} , D''_{2i} と書くと、 $N > \sqrt{4k_{ond} E_s I_{sn}}$ の場合、(18), (19)式を(49)式に代入して

$$\begin{aligned}
& a_n \varphi_n^2 A''_{2n} + b_n \varphi_n^2 B''_{2n} + c_n \omega_n^2 C''_{2n} + d_n \omega_n^2 D''_{2n} = 0 \tag{52} \\
& a_n \varphi_n \left(\varphi_n^2 - \frac{N}{E_s I_{sn}} \right) B''_{2n} + b_n \varphi_n \left(\varphi_n^2 - \frac{N}{E_s I_{sn}} \right) A''_{2n} \\
& + c_n \omega_n \left(\omega_n^2 - \frac{N}{E_s I_{sn}} \right) D''_{2n} + d_n \omega_n \left(\omega_n^2 - \frac{N}{E_s I_{sn}} \right) C''_{2n} \\
& = -\frac{2\mu_n^4 A_o}{d} \tag{53}
\end{aligned}$$

一方、木材と鋼材サイドウェブとの境界において、ボルト頭部の回転が完全に拘束されていると仮定すると

$$x_n = t_n \text{ において } \theta_n = 0, F_n = \frac{P}{2} = \frac{\sigma_o A_o}{2} \tag{54}$$

$N \leq \sqrt{4k_{ond} E_s I_{sn}}$ の場合、(13)式を(54)式に代入して、(50)式は(55)式で置き換えられる。

$$\begin{aligned}
& a_n\{(\alpha_n - \beta_n)B''_{1n} - (\alpha_n + \beta_n)D''_{1n}\} \\
& + b_n\left\{\frac{1}{2}(\alpha_n + \beta_n)A''_{1n} + \frac{1}{2}(\alpha_n - \beta_n)C''_{1n}\right\} \\
& + c_n\{(\alpha_n + \beta_n)B''_{1n} + (\alpha_n - \beta_n)D''_{1n}\} \\
& + d_n\left\{-\frac{1}{2}(\alpha_n - \beta_n)A''_{1n} + \frac{1}{2}(\alpha_n + \beta_n)C''_{1n}\right\} = 0
\end{aligned} \tag{55}$$

同様に、 $N > \sqrt{4k_{on}dE_sI_{sn}}$ の場合、(17)式を(54)式に代入して、(52)式は(56)式で置き換えられる。

$$a_n\varphi_n B''_{2n} + b_n\varphi_n A''_{2n} + c_n\omega_n D''_{2n} + d_n\omega_n C''_{2n} = 0 \tag{56}$$

(54)式中の剪断力に関する境界条件はボルト頭部が回転自由の場合と共通で、(51)式あるいは(53)式をそのまま用いることが出来る。

以上では、ボルト頭部の境界条件として回転自由、回転完全拘束の2種類の仮定を用いたが、実際の接合部におけるボルト頭部の回転挙動はこれらの中間となるものと思われる。この回転拘束の程度はウェブの曲げ剛性や先孔径、ナットの締め付け具合等、種々の条件によって異なって来るものと思われ、その定量的な評価に関しては今後の研究を待たねばならない。また両者の平均値よりも、どちらかと言えば回転自由の側に近いと言う実験結果もある¹⁹⁾。したがって現時点では、一般的な取り扱いとしては、回転自由と仮定しておいた方が無難であるように思われる。しかし、最近ではこれ考慮した変形解析¹⁴⁾も試みられており、今後はこの点についても検討を進めて行くのが望ましいであろう。ボルト頭部の回転挙動やボルトの撓み曲線、またそこから計算される面圧応力分布を正確に知りたいときには、(49)式、あるいは(54)式の代わりに次のような境界条件を与えれば良い。

$$x_n = t_n \text{ において } M_n = M_R, F_n = \frac{P}{2} = \frac{\sigma_o A_o}{2} \tag{57}$$

ここで、 M_R は Fig. 2 に示されるように、ボルト頭部の回転にともなって生じる反力モーメントである。この反力モーメントは軸力と同様に、荷重が増加し、ボルトの曲げ変形が進む程大きくなって行くものと考えられる。したがって、ボルト頭部の回転抵抗(回転剛性)は、変形が進むにつれて徐々に増加し、軸力の増加とあいまって接合部変形を抑える方向に働くことになる。

次に、Fig. 1(b)の L_1 から L_n までの各層間において満たされるべき境界条件を考えると、 i 番目の層と $(i+1)$ 番目の層との境界面では次のような変形の連続条件が成り立つは

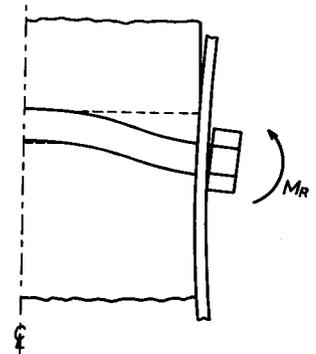


Fig. 2 Rotational deformation of a bolt head.

ずである。

$$x_i = t_i, \quad x_{i+1} = 0 \text{ において}$$

$$y_i = y_{i+1}, \quad \theta_i = \theta_{i+1}, \quad M_i = M_{i+1}, \quad F_i = F_{i+1} \quad (58)$$

$N \leq \sqrt{4k_{oi}dE_sI_{si}}$, $N \leq \sqrt{4k_{o(i+1)}dE_sI_{s(i+1)}}$ がともに成り立つとき, (9), (13)~(15), (58)式より次の各方程式が導かれる。

$$a_i A''_{1i} + b_i B''_{1i} + c_i C''_{1i} + d_i D''_{1i} - a_{i+1} \frac{k_{oi}}{k_{o(i+1)}} = 0 \quad (59)$$

$$\begin{aligned} & a_i \{ (\alpha_i - \beta_i) B''_{1i} - (\alpha_i + \beta_i) D''_{1i} \} + b_i \left\{ \frac{1}{2} (\alpha_i + \beta_i) A''_{1i} + \frac{1}{2} (\alpha_i - \beta_i) C''_{1i} \right\} \\ & + c_i \{ (\alpha_i + \beta_i) B''_{1i} + (\alpha_i - \beta_i) D''_{1i} \} + d_i \left\{ -\frac{1}{2} (\alpha_i - \beta_i) A''_{1i} + \frac{1}{2} (\alpha_i + \beta_i) C''_{1i} \right\} \\ & - b_{i+1} \frac{k_{oi}}{2k_{o(i+1)}} (\alpha_{i+1} + \beta_{i+1}) - d_{i+1} \frac{k_{oi}}{2k_{o(i+1)}} (\alpha_{i+1} - \beta_{i+1}) = 0 \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} & a_i \{ (\alpha_i^2 - \beta_i^2) A''_{1i} - 2\alpha_i \beta_i C''_{1i} \} + b_i \{ (\alpha_i^2 - \beta_i^2) B''_{1i} - 2\alpha_i \beta_i D''_{1i} \} \\ & + c_i \{ 2\alpha_i \beta_i A''_{1i} + (\alpha_i^2 - \beta_i^2) C''_{1i} \} + d_i \{ 2\alpha_i \beta_i B''_{1i} + (\alpha_i^2 - \beta_i^2) D''_{1i} \} \\ & - a_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 (\alpha_{i+1}^2 - \beta_{i+1}^2) - c_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \cdot 2\alpha_{i+1} \beta_{i+1} = 0 \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} & a_i \left\{ (\alpha_i + \beta_i) (\alpha_i^2 - 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{si}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} B''_{1i} \\ & - \left\{ (\alpha_i - \beta_i) (\alpha_i^2 + 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{si}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} D''_{1i} \\ & + b_i \left\{ \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i - \beta_i) (\alpha_i^2 + 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{si}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} A''_{1i} \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i + \beta_i) (\alpha_i^2 - 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{si}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} C''_{1i} \right\} \\ & + c_i \left\{ (\alpha_i - \beta_i) (\alpha_i^2 + 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{si}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} B''_{1i} \\ & \quad + \left\{ (\alpha_i + \beta_i) (\alpha_i^2 - 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{si}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} D''_{1i} \\ & + d_i \left\{ -\frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i + \beta_i) (\alpha_i^2 - 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{si}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} A''_{1i} \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i - \beta_i) (\alpha_i^2 + 4\alpha_i \beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{si}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} C''_{1i} \right\} \\ & - b_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \cdot \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_{i+1} - \beta_{i+1}) (\alpha_{i+1}^2 + 4\alpha_{i+1} \beta_{i+1} + \beta_{i+1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(i+1)}} (\alpha_{i+1} + \beta_{i+1}) \right\} \\ & + d_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \cdot \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_{i+1} + \beta_{i+1}) (\alpha_{i+1}^2 - 4\alpha_{i+1} \beta_{i+1} + \beta_{i+1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(i+1)}} (\alpha_{i+1} - \beta_{i+1}) \right\} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (62)$$

同様に, $N > \sqrt{4k_{oi}dE_sI_{si}}$, $N > \sqrt{4k_{o(i+1)}dE_sI_{s(i+1)}}$ がともに成り立つとき, (16)~(19), (58) 式より

$$a_i A''_{2i} + b_i B''_{2i} + c_i C''_{2i} + d_i D''_{2i} - a_{i+1} \frac{k_{oi}}{k_{o(i+1)}} - c_{i+1} \frac{k_{oi}}{k_{o(i+1)}} = 0 \quad (63)$$

$$\begin{aligned} & a_i \varphi_i B''_{2i} + b_i \varphi_i A''_{2i} + c_i \omega_i D''_{2i} + d_i \omega_i C''_{2i} \\ & - b_{i+1} \frac{k_{oi}}{k_{o(i+1)}} \varphi_{i+1} - d_{i+1} \frac{k_{oi}}{k_{o(i+1)}} \omega_{i+1} = 0 \end{aligned} \quad (64)$$

$$\begin{aligned} & a_i \varphi_i^2 A''_{2i} + b_i \varphi_i^2 B''_{2i} + c_i \omega_i^2 C''_{2i} + d_i \omega_i^2 D''_{2i} \\ & - a_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \varphi_{i+1}^2 - c_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \omega_{i+1}^2 = 0 \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} & a_i \varphi_i \left(\varphi_i^2 - \frac{N}{E_s I_{si}} \right) B''_{2i} + b_i \varphi_i \left(\varphi_i^2 - \frac{N}{E_s I_{si}} \right) A''_{2i} \\ & + c_i \omega_i \left(\omega_i^2 - \frac{N}{E_s I_{si}} \right) D''_{2i} + d_i \omega_i \left(\omega_i^2 - \frac{N}{E_s I_{si}} \right) C''_{2i} \\ & - b_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \varphi_{i+1} \left(\varphi_{i+1}^2 - \frac{N}{E_s I_{s(i+1)}} \right) \\ & - d_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \omega_{i+1} \left(\omega_{i+1}^2 - \frac{N}{E_s I_{s(i+1)}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (66)$$

また, $N \leq \sqrt{4k_{oi}dE_sI_{si}}$, $N > \sqrt{4k_{o(i+1)}dE_sI_{s(i+1)}}$ の場合, i 層に対しては(9), (13)~(15)式を, $(i+1)$ 層に対しては(16)~(19)式を適用すると

$$a_i A''_{1i} + b_i B''_{1i} + c_i C''_{1i} + d_i D''_{1i} - a_{i+1} \frac{k_{oi}}{k_{o(i+1)}} - c_{i+1} \frac{k_{oi}}{k_{o(i+1)}} = 0 \quad (67)$$

$$\begin{aligned} & a_i \{ (\alpha_i - \beta_i) B''_{1i} - (\alpha_i + \beta_i) D''_{1i} \} + b_i \left\{ \frac{1}{2} (\alpha_i + \beta_i) A''_{1i} + \frac{1}{2} (\alpha_i - \beta_i) C''_{1i} \right\} \\ & + c_i \{ (\alpha_i + \beta_i) B''_{1i} + (\alpha_i - \beta_i) D''_{1i} \} + d_i \left\{ -\frac{1}{2} (\alpha_i - \beta_i) A''_{1i} + \frac{1}{2} (\alpha_i + \beta_i) C''_{1i} \right\} \\ & - b_{i+1} \frac{k_{oi}}{k_{o(i+1)}} \varphi_{i+1} - d_{i+1} \frac{k_{oi}}{k_{o(i+1)}} \omega_{i+1} = 0 \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} & a_i \{ (\alpha_i^2 - \beta_i^2) A''_{1i} - 2\alpha_i \beta_i C''_{1i} \} + b_i \{ (\alpha_i^2 - \beta_i^2) B''_{1i} - 2\alpha_i \beta_i D''_{1i} \} \\ & + c_i \{ 2\alpha_i \beta_i A''_{1i} + (\alpha_i^2 - \beta_i^2) C''_{1i} \} + d_i \{ 2\alpha_i \beta_i B''_{1i} + (\alpha_i^2 - \beta_i^2) D''_{1i} \} \\ & - a_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \varphi_{i+1}^2 - c_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \omega_{i+1}^2 = 0 \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned}
& a_i \left\{ (\alpha_i + \beta_i)(\alpha_i^2 - 4\alpha_i\beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{s_i}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} B''_{1i} \\
& - \left\{ (\alpha_i - \beta_i)(\alpha_i^2 + 4\alpha_i\beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{s_i}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} D''_{1i} \\
& + b_i \left[\frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i - \beta_i)(\alpha_i^2 + 4\alpha_i\beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{s_i}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} A''_{1i} \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i + \beta_i)(\alpha_i^2 - 4\alpha_i\beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{s_i}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} C''_{1i} \right] \\
& + c_i \left\{ (\alpha_i - \beta_i)(\alpha_i^2 + 4\alpha_i\beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{s_i}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} B''_{1i} \\
& \quad + \left\{ (\alpha_i + \beta_i)(\alpha_i^2 - 4\alpha_i\beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{s_i}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} D''_{1i} \\
& + d_i \left[-\frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i + \beta_i)(\alpha_i^2 - 4\alpha_i\beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{s_i}} (\alpha_i - \beta_i) \right\} A''_{1i} \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_i - \beta_i)(\alpha_i^2 + 4\alpha_i\beta_i + \beta_i^2) - \frac{N}{E_s I_{s_i}} (\alpha_i + \beta_i) \right\} C''_{1i} \right] \\
& - b_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \varphi_{i+1} \left(\varphi_{i+1}^2 - \frac{N}{E_s I_{s(i+1)}} \right) \\
& - d_{i+1} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^4 \omega_{i+1} \left(\omega_{i+1}^2 - \frac{N}{E_s I_{s(i+1)}} \right) = 0 \tag{70}
\end{aligned}$$

$N > \sqrt{4k_{on}dE_s I_{s_i}}$, $N \leq \sqrt{4k_{o(i+1)}dE_s I_{s(i+1)}}$ のときも, i 層と $(i+1)$ 層の関係が逆転するだけで, あとは上と同様である。

以上の各境界条件を組み合わせることによって, $x_1=0$ で2個, $x_n=t_n$ で2個, 各層間で $4(n-1)$ 個, 計 $4n$ 個の方程式が得られる。一般解(9)式または(16)式はそれぞれ4つの未定係数 a_i , b_i , c_i , d_i を含み, その総計は $4n$ 個となるから, 以上の方程式を連立に解けばすべての未定係数が決まり, ボルトの撓み曲線を求めることが出来る。

基準面圧応力増分 $\Delta\sigma_o$ に対する木材側のすべり変位増分 Δs_w は木材と鋼板サイドウェブとの境界, すなわち $x_n=t_n$ におけるボルトの垂直変位増分に等しいと考えられるから $N \leq \sqrt{4k_{on}dE_s I_{s_n}}$ の場合

$$\Delta s_w = \frac{\Delta\sigma_o}{k_{on}} (a_n A''_{1n} + b_n B''_{1n} + c_n C''_{1n} + d_n D''_{1n}) \tag{71}$$

同様に, $N > \sqrt{4k_{on}dE_s I_{s_n}}$ の場合

$$\Delta s_w = \frac{\Delta\sigma_o}{k_{on}} (a_n A''_{2n} + b_n B''_{2n} + c_n C''_{2n} + d_n D''_{2n}) \tag{72}$$

さて, (40)~(72)式ではボルトがその全長にわたって木材にささえられていると仮定して

いるが、実際のボルト接合部では、種々の理由によりボルトの一部が直接木材とは接していない状態が生じる場合もある。例えば、一般に木材接合部では接合具が細長く剛度が低いと、接合具の一部が外力と逆方向に変位する場合がある。このとき、釘やラグスクリュー、ドリフトピンのように接合具と木材とが密着していると、接合具がどの方向に変位しても木材に床反力が生じる。しかし、ボルト接合で、施工精度の問題から先孔径がボルト径に比べてかなり大きいような場合には、マイナス方向の変位が生じると、Fig. 3.(a)のように、先孔の中空部でボルトが浮き上がるような状態が生じるものと考えられる。また、接合部が繰り返し負荷を受けるとき、接合具の曲げ変形の回復能と木材の面圧変形の回復能との差から、Fig. 3.(b)のように、再負荷時初期に接合具の一部が木材と接しなくなる場合もあるものと思われる。このような変形挙動が接合部のすべり変位に与える影響は実用的に見てわずかな場合も多いが、考慮しておく必要がある場合も考えられる。そのときには、その部分に相当する層において床反力が生じず、(1)式の代わりに(27)式が成り立つと考えれば良い。

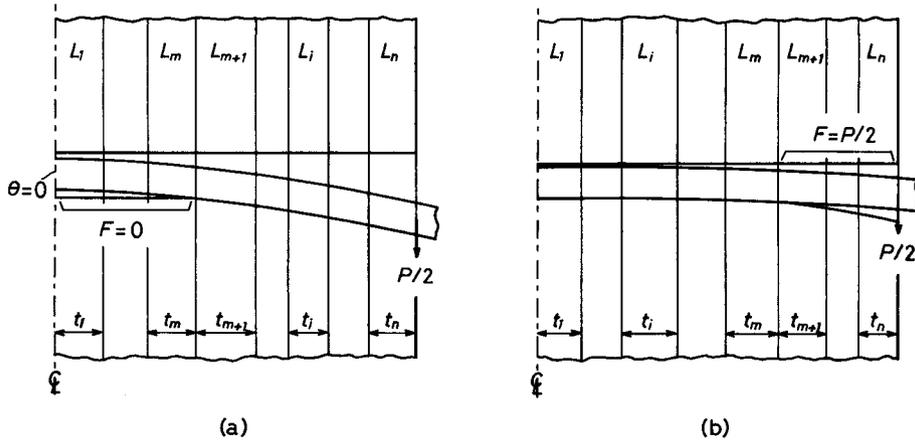


Fig. 3 Two typical cases of bolt deformation when partially supported on wood.

もし、Fig. 3.(a)のように、第1層から第 \$m\$ 層までの間でボルトが木材と接していない場合には、この部分において次のような境界条件が与えられる。

$$x_1=0 \text{ において } \theta_1=0 \tag{73}$$

$$L_1 \sim L_m \text{ の任意の位置において } F_i=0 \tag{74}$$

この間における \$F_i\$ は(34)式が示すように \$x_i\$ の値と無関係であるから、(74)式は次の(75)式と等価となり¹³⁾

$$x_1=0 \text{ において } F_1=0$$

および

$$L_1 \sim L_m \text{ の各層間において } F_i = F_{i+1} \quad (75)$$

結局この場合の境界条件は(42), (58)式をそのまま適用出来ることになる。したがって, (32), (34), (42)式より

$$b_1 = 0, \quad d_1 = 0 \quad (76)$$

第 n 層における境界条件(49)または(54) ((57)) 式は前出と全く同様である。

また, もし Fig. 3. (b)のように, 第 $(m+1)$ 層から第 n 層までの間でボルトと木材とが接していない場合には

$$L_{m+1} \sim L_n \text{ の任意の位置において } F_i = \frac{P}{2} = \frac{\sigma_o A_o}{2} \quad (77)$$

(77)式は(78)式と等価となり

$$L_{m+1} \sim L_n \text{ の各層間において } F_i = F_{i+1}$$

および

$$x_n = t_n \text{ において } F_n = \frac{P}{2} = \frac{\sigma_o A_o}{2} \quad (78)$$

結局, (49)または(54) ((57)) 式および(58)式をそのまま用いることが出来るので, これらの境界条件と(31)~(34)式を組み合わせる必要な方程式が導かれる。例えば, (33), (34), (49)式より

$$c_n C''_{4n} + d_n D''_{4n} = 0 \quad (79)$$

$$b_n = \frac{A_o}{2N} \quad (80)$$

Fig. 3. (a), (b)どちらの場合も境界条件(58)式については, 前出の(9), (13)~(15) (または(16)~(19)) 式, あるいは(31)~(34)式を適宜用いれば良い。例えば, 第 m 層ではボルトが床反力を受けているが, 第 $(m+1)$ 層ではボルトと木材とが接していない場合, これら両層の境界で与えられる方程式は, $N \leq \sqrt{4k_{om}dE_s I_{sm}}$ のとき, 垂直変位 y_i に関して

$$a_m A''_{1m} + b_m B''_{1m} + c_m C''_{1m} + d_m D''_{1m} - a_{m+1} k_{om} - c_{m+1} k_{om} = 0 \quad (81)$$

傾斜角 θ_i に関して

$$\begin{aligned}
& a_m\{(\alpha_m - \beta_m)B''_{1m} - (\alpha_m + \beta_m)D''_{1m}\} \\
& + b_m\left\{\frac{1}{2}(\alpha_m + \beta_m)A''_{1m} + \frac{1}{2}(\alpha_m - \beta_m)C''_{1m}\right\} \\
& + c_m\{(\alpha_m + \beta_m)B''_{1m} + (\alpha_m - \beta_m)D''_{1m}\} \\
& + d_m\left\{-\frac{1}{2}(\alpha_m - \beta_m)A''_{1m} + \frac{1}{2}(\alpha_m + \beta_m)C''_{1m}\right\} \\
& - b_{m+1}k_{om} - d_{m+1}\gamma_{m+1}k_{om} = 0
\end{aligned} \tag{82}$$

曲げモーメント M_i に関して

$$\begin{aligned}
& a_m\{(\alpha_m^2 - \beta_m^2)A''_{1m} - 2\alpha_m\beta_mC''_{1m}\} \\
& + b_m\{(\alpha_m^2 - \beta_m^2)B''_{1m} - 2\alpha_m\beta_mD''_{1m}\} \\
& + c_m\{2\alpha_m\beta_mA''_{1m} + (\alpha_m^2 - \beta_m^2)C''_{1m}\} \\
& + d_m\{2\alpha_m\beta_mB''_{1m} + (\alpha_m^2 - \beta_m^2)D''_{1m}\} \\
& - c_{m+1}\frac{4\mu_m^4 N}{d} = 0
\end{aligned} \tag{83}$$

剪断力 F_i に関して

$$\begin{aligned}
& a_m\left\{\{(\alpha_m + \beta_m)(\alpha_m^2 - 4\alpha_m\beta_m + \beta_m^2) - \frac{N}{E_s I_{sm}}(\alpha_m - \beta_m)\}B''_{1m}\right. \\
& \left. - \{(\alpha_m - \beta_m)(\alpha_m^2 + 4\alpha_m\beta_m + \beta_m^2) - \frac{N}{E_s I_{sm}}(\alpha_m + \beta_m)\}D''_{1m}\right\} \\
& + b_m\left\{\frac{1}{2}\{(\alpha_m - \beta_m)(\alpha_m^2 + 4\alpha_m\beta_m + \beta_m^2) - \frac{N}{E_s I_{sm}}(\alpha_m + \beta_m)\}A''_{1m}\right. \\
& \left. + \frac{1}{2}\{(\alpha_m + \beta_m)(\alpha_m^2 - 4\alpha_m\beta_m + \beta_m^2) - \frac{N}{E_s I_{sm}}(\alpha_m - \beta_m)\}C''_{1m}\right\} \\
& + c_m\left\{\{(\alpha_m - \beta_m)(\alpha_m^2 + 4\alpha_m\beta_m + \beta_m^2) - \frac{N}{E_s I_{sm}}(\alpha_m + \beta_m)\}B''_{1m}\right. \\
& \left. + \{(\alpha_m + \beta_m)(\alpha_m^2 - 4\alpha_m\beta_m + \beta_m^2) - \frac{N}{E_s I_{sm}}(\alpha_m - \beta_m)\}D''_{1m}\right\} \\
& + d_m\left\{-\frac{1}{2}\{(\alpha_m + \beta_m)(\alpha_m^2 - 4\alpha_m\beta_m + \beta_m^2) - \frac{N}{E_s I_{sm}}(\alpha_m - \beta_m)\}A''_{1m}\right. \\
& \left. + \frac{1}{2}\{(\alpha_m - \beta_m)(\alpha_m^2 + 4\alpha_m\beta_m + \beta_m^2) - \frac{N}{E_s I_{sm}}(\alpha_m + \beta_m)\}C''_{1m}\right\} \\
& + b_{m+1}\frac{4\mu_m^4 N}{d} = 0
\end{aligned} \tag{84}$$

同様に, $N > \sqrt{4k_{om}dE_s I_{sm}}$ のとき, (81)~(84)式は(85)~(88)式で置き換えられる。

$$a_m A''_{2m} + b_m B''_{2m} + c_m C''_{2m} + d_m D''_{2m} - a_{m+1} k_{om} - c_{m+1} k_{om} = 0 \tag{85}$$

$$\begin{aligned}
 & a_m \varphi_m B''_{2m} + b_m \varphi_m A''_{2m} + c_m \omega_m D''_{2m} + d_m \omega_m C''_{2m} \\
 & - b_{m+1} k_{om} - d_{m+1} \gamma_{m+1} k_{om} = 0
 \end{aligned} \tag{86}$$

$$\begin{aligned}
 & a_m \varphi_m^2 A''_{2m} + b_m \varphi_m^2 B''_{2m} + c_m \omega_m^2 C''_{2m} + d_m \omega_m^2 D''_{2m} \\
 & - c_{m+1} \frac{4\mu_m^4 N}{d} = 0
 \end{aligned} \tag{87}$$

$$\begin{aligned}
 & a_m \varphi_m \left(\varphi_m^2 - \frac{N}{E_s I_{sm}} \right) B''_{2m} + b_m \varphi_m \left(\varphi_m^2 - \frac{N}{E_s I_{sm}} \right) A''_{2m} \\
 & + c_m \omega_m \left(\omega_m^2 - \frac{N}{E_s I_{sm}} \right) D''_{2m} + d_m \omega_m \left(\omega_m^2 - \frac{N}{E_s I_{sm}} \right) C''_{2m} \\
 & + b_{m+1} \frac{4\mu_m^4 N}{d} = 0
 \end{aligned} \tag{88}$$

軸力を考慮したボルト接合部の変形計算式は以上のように与えられるが、一次設計における許容耐力程度の荷重レベルでは軸力の影響はごくわずかである。したがって、この範囲内での接合部の荷重—すべり性能がわかれば良い場合には、軸力を無視して計算を行ってもさしつかえない。その場合には、基礎方程式として(1)、(27)式の代わりに(20)、(35)式を適用すれば良い^{12,13)}。このときにも、境界条件の扱い方は全く同様である。

2.2 センターウェブ型ボルト接合

次に、Fig. 4(a)のように木材の中央部に1枚の鋼板ウェブを配置したセンターウェブ型ボルト接合部を考え、木材部分全長にわたって床反力が生じているものとする。この場合にも、ボルト頭部の回転挙動に関しては、前述のように回転自由、回転完全拘束、あるいはその

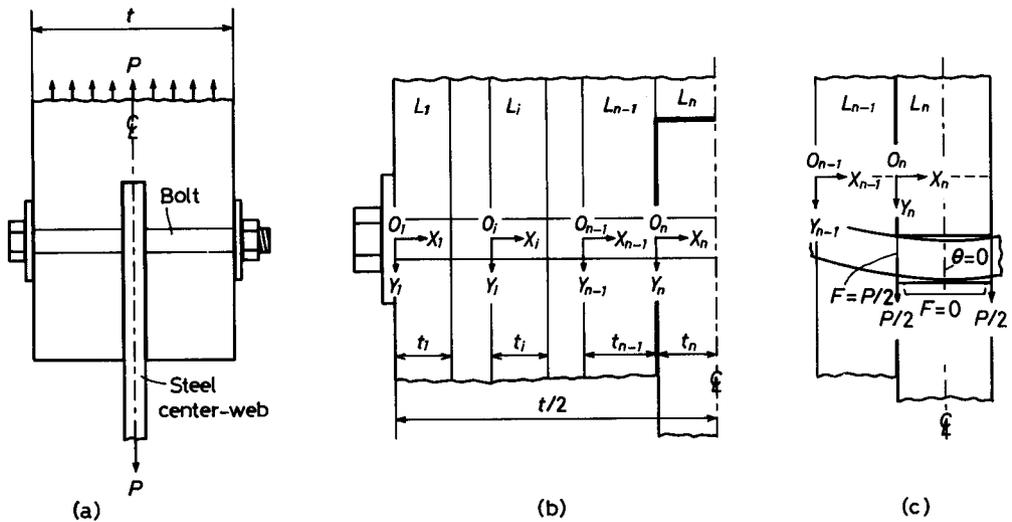


Fig. 4 Bolt joint with a steel center-web and the coordinates.

中間的な回転挙動を考慮して計算を行う方法が考えられる。以下では現時点で最も実用的な仮定であると思われる回転自由仮定のみについての計算式を示すが、ボルト頭部の回転拘束効果を考慮して計算を行いたいときには、その部分の境界条件を入れ換えれば良いだけである。

回転自由仮定に従うと、ボルト頭部に関して次のような境界条件が与えられる。

$$x_1=0 \text{ において } M_1=0, F_1=0 \quad (89)$$

一方、ウェブ部分の第 n 層においては、2, 3 の異なった境界条件が仮定し得るものと思われる。ここでは、鋼板ウェブのボルト先孔が、施工上の理由から、ボルト径よりも若干大きめにあけられることを考慮し、ウェブからボルトへの力の伝達は、Fig. 4(c)のようにウェブと木材との境界面において、 $P/2$ の集中力として与えられ、第 n 層におけるボルトは $x_n=0$ においてのみウェブに支えられているものとする。このような仮定を用いると、境界条件は

$$x_{n-1}=t_{n-1} \text{ において } F_{n-1}=\frac{P}{2}=\frac{\sigma_o A_o}{2} \quad (90)$$

$$\text{第 } n \text{ 層の任意の任置において } F_n=0 \quad (91)$$

$$x_n=t_n \text{ において } \theta_n=0 \quad (92)$$

このとき第 1 層から第 $(n-1)$ 層までの間では(1)式が、第 n 層では(27)式が用いられることになる。

(1)式において $N \leq \sqrt{4k_{o1}dE_s I_{s1}}$ のとき、(14)、(15)、(89)式より

$$a_1(\alpha_1^2 - \beta_1^2) + c_1 \cdot 2\alpha_1\beta_1 = 0 \quad (93)$$

$$\begin{aligned} & b_1\{(\alpha_1 - \beta_1)(\alpha_1^2 + 4\alpha_1\beta_1 + \beta_1^2) - \frac{N}{E_s I_{s1}}(\alpha_1 + \beta_1)\} \\ & + d_1\{-(\alpha_1 + \beta_1)(\alpha_1^2 - 4\alpha_1\beta_1 + \beta_1^2) + \frac{N}{E_s I_{s1}}(\alpha_1 - \beta_1)\} = 0 \end{aligned} \quad (94)$$

同様に、 $N \leq \sqrt{4k_{o(n-1)}dE_s I_{s(n-1)}}$ のとき、(15)、(90)式より

$$\begin{aligned}
& a_{n-1} \left\{ (\alpha_{n-1} + \beta_{n-1})(\alpha_{n-1}^2 - 4\alpha_{n-1}\beta_{n-1} + \beta_{n-1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1}) \right\} B''_{1(n-1)} \\
& - \left\{ (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1})(\alpha_{n-1}^2 + 4\alpha_{n-1}\beta_{n-1} + \beta_{n-1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} (\alpha_{n-1} + \beta_{n-1}) \right\} D''_{1(n-1)} \\
& + b_{n-1} \left\{ \frac{1}{2} (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1})(\alpha_{n-1}^2 + 4\alpha_{n-1}\beta_{n-1} + \beta_{n-1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} (\alpha_{n-1} + \beta_{n-1}) \right\} A''_{1(n-1)} \\
& + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_{n-1} + \beta_{n-1})(\alpha_{n-1}^2 - 4\alpha_{n-1}\beta_{n-1} + \beta_{n-1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1}) \right\} C''_{1(n-1)} \\
& + c_{n-1} \left\{ (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1})(\alpha_{n-1}^2 + 4\alpha_{n-1}\beta_{n-1} + \beta_{n-1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} (\alpha_{n-1} + \beta_{n-1}) \right\} B''_{1(n-1)} \\
& + \left\{ (\alpha_{n-1} + \beta_{n-1})(\alpha_{n-1}^2 - 4\alpha_{n-1}\beta_{n-1} + \beta_{n-1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1}) \right\} D''_{1(n-1)} \\
& + d_{n-1} \left\{ -\frac{1}{2} (\alpha_{n-1} + \beta_{n-1})(\alpha_{n-1}^2 - 4\alpha_{n-1}\beta_{n-1} + \beta_{n-1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1}) \right\} A''_{1(n-1)} \\
& + \frac{1}{2} \left\{ (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1})(\alpha_{n-1}^2 + 4\alpha_{n-1}\beta_{n-1} + \beta_{n-1}^2) - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} (\alpha_{n-1} + \beta_{n-1}) \right\} C''_{1(n-1)} \\
& = -2\mu_{n-1}^4 t \tag{95}
\end{aligned}$$

また, $N > \sqrt{4k_{o1}dE_s I_{s1}}$ のときには, (93), (94)式のかわりに, (18), (19), (89)式より

$$a_1 \varphi_1^2 + c_1 \omega_1^2 = 0 \tag{96}$$

$$b_1 \varphi_1 \left(\varphi_1^2 - \frac{N}{E_s I_{s1}} \right) + d_1 \omega_1 \left(\omega_1^2 - \frac{N}{E_s I_{s1}} \right) = 0 \tag{97}$$

同様に, $N > \sqrt{4k_{o(n-1)}dE_s I_{s(n-1)}}$ のときには, (95)式のかわりに, (19), (90)式より

$$\begin{aligned}
& a_{n-1} \varphi_{n-1} \left(\varphi_{n-1}^2 - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} \right) B''_{2(n-1)} + b_{n-1} \varphi_{n-1} \left(\varphi_{n-1}^2 - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} \right) A''_{2(n-1)} \\
& + c_{n-1} \omega_{n-1} \left(\omega_{n-1}^2 - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} \right) D''_{2(n-1)} + d_{n-1} \omega_{n-1} \left(\omega_{n-1}^2 - \frac{N}{E_s I_{s(n-1)}} \right) C''_{2(n-1)} \\
& = 2\mu_{n-1}^4 t \tag{98}
\end{aligned}$$

第 n 層においては, (34), (91)式より

$$b_n = 0 \tag{99}$$

(32), (92)式より

$$b_n + \gamma_n (c_n D''_{4n} + d_n C''_{4n}) = 0 \tag{100}$$

第 $(n-1)$ 層と第 n 層との境界では, (90), (91)式が示すように $F_{n-1} \neq F_n$ となり, 次の3つの境界条件のみが成り立つ。

$$\begin{aligned}
 x_{n-1} &= t_{n-1}, \quad x_n = 0 \text{ において} \\
 y_{n-1} &= y_n, \quad \theta_{n-1} = \theta_n, \quad M_{n-1} = M_n \quad (F_{n-1} \neq F_n, \quad)
 \end{aligned}
 \tag{101}$$

したがって、 $N \leq \sqrt{4k_{o(n-1)}dE_sI_{s(n-1)}}$ のとき、(81)~(83)式より

$$\begin{aligned}
 & a_{n-1}A''_{1(n-1)} + b_{n-1}B''_{1(n-1)} + c_{n-1}C''_{1(n-1)} + d_{n-1}D''_{1(n-1)} \\
 & - a_n k_{o(n-1)} - c_n k_{o(n-1)} = 0
 \end{aligned}
 \tag{102}$$

$$\begin{aligned}
 & a_{n-1}\{(\alpha_{n-1} - \beta_{n-1})B''_{1(n-1)} - (\alpha_{n-1} + \beta_{n-1})D''_{1(n-1)}\} \\
 & + b_{n-1}\left\{\frac{1}{2}(\alpha_{n-1} + \beta_{n-1})A''_{1(n-1)} + \frac{1}{2}(\alpha_{n-1} - \beta_{n-1})C''_{1(n-1)}\right\} \\
 & + c_{n-1}\{(\alpha_{n-1} + \beta_{n-1})B''_{1(n-1)} + (\alpha_{n-1} - \beta_{n-1})D''_{1(n-1)}\} \\
 & + d_{n-1}\left\{-\frac{1}{2}(\alpha_{n-1} - \beta_{n-1})A''_{1(n-1)} + \frac{1}{2}(\alpha_{n-1} + \beta_{n-1})C''_{1(n-1)}\right\} \\
 & - b_n k_{o(n-1)} - d_n \gamma_n k_{o(n-1)} = 0
 \end{aligned}
 \tag{103}$$

$$\begin{aligned}
 & a_{n-1}\{(\alpha_{n-1}^2 - \beta_{n-1}^2)A''_{1(n-1)} - 2\alpha_{n-1}\beta_{n-1}C''_{1(n-1)}\} \\
 & + b_{n-1}\{(\alpha_{n-1}^2 - \beta_{n-1}^2)B''_{1(n-1)} - 2\alpha_{n-1}\beta_{n-1}D''_{1(n-1)}\} \\
 & + c_{n-1}\{2\alpha_{n-1}\beta_{n-1}A''_{1(n-1)} + (\alpha_{n-1}^2 - \beta_{n-1}^2)C''_{1(n-1)}\} \\
 & + d_{n-1}\{2\alpha_{n-1}\beta_{n-1}B''_{1(n-1)} + (\alpha_{n-1}^2 - \beta_{n-1}^2)D''_{1(n-1)}\} \\
 & - c_n \frac{4\mu_{n-1}^4 N}{d} = 0
 \end{aligned}
 \tag{104}$$

$N > \sqrt{4k_{o(n-1)}dE_sI_{s(n-1)}}$ のときには、(102)~(104)式のかわりに、(85)~(87)式より

$$\begin{aligned}
 & a_{n-1}A''_{2(n-1)} + b_{n-1}B''_{2(n-1)} + c_{n-1}C''_{2(n-1)} + d_{n-1}D''_{2(n-1)} \\
 & - a_n k_{o(n-1)} - c_n k_{o(n-1)} = 0
 \end{aligned}
 \tag{105}$$

$$\begin{aligned}
 & a_{n-1}\varphi_{n-1}B''_{2(n-1)} + b_{n-1}\varphi_{n-1}A''_{2(n-1)} + c_{n-1}\omega_{n-1}D''_{2(n-1)} \\
 & + d_{n-1}\omega_{n-1}C''_{2(n-1)} - b_n k_{o(n-1)} - d_n \gamma_n k_{o(n-1)} = 0
 \end{aligned}
 \tag{106}$$

$$\begin{aligned}
 & a_{n-1}\varphi_{n-1}^2 A''_{2(n-1)} + b_{n-1}\varphi_{n-1}^2 B''_{2(n-1)} + c_{n-1}\omega_{n-1}^2 C''_{2(n-1)} \\
 & + d_{n-1}\omega_{n-1}^2 D''_{2(n-1)} - c_n \frac{4\mu_{n-1}^4 N}{d} = 0
 \end{aligned}
 \tag{107}$$

このセンターウェブ型ボルト接合の場合にも、許容耐力設計レベルで考える場合には軸力影響を無視することが出来る。その場合の計算式は次の2.3に示すセンターウェブ型ドリフトピン接合の場合と全く同様である。

2.3 センターウェブ型ドリフトピン接合

接合部をセンターウェブ型とする場合には、接合具として Fig. 4(a) のようなボルトのかわりに、Fig. 5 のようなドリフトピンを使用することも出来る。ドリフトピンは頭部およびナット部分を持たないため、ごくわずかの摩擦抵抗を除いては軸方向力に抵抗することが出来ないものと考えられる。したがって、この場合には荷重が許容耐力レベルを越えた後も、接合部が破壊に至るまで軸力は生じないものとして計算を行えば良い。この場合にも 2.2 に示した境界条件(89)～(92)、(101)式はそのまま成り立つはずであるから、2.2 で用いた基礎微分方程式(1)、(27)式を(20)、(35)式で置き換えて、以下のような計算式が導かれる。

ドリフトピン端部に関し、(25)、(26)式および(89)式より

$$c_1=0, \quad d_1=0 \quad (108)$$

木材とウェブとの境界面の木材側では、(26)、(90)式より

$$2a_{n-1}B_{3(n-1)}'' + b_{n-1}C_{3(n-1)}'' + 2c_{n-1}D_{3(n-1)}'' - d_{n-1}A_{3(n-1)}'' = \mu_{n-1}t \quad (109)$$

第 n 層すなわちウェブ内において、(39)、(91)式より

$$d_n=0 \quad (110)$$

接合部の左右対称軸上において、(37)、(92)式より

$$b_n + 2c_n t_n + 3d_n t_n^2 = 0 \quad (111)$$

木材とウェブとの境界面において、(22)、(24)、(25)、(36)～(38)、(101)式より

$$a_{n-1}A_{3(n-1)}'' + b_{n-1}B_{3(n-1)}'' + c_{n-1}C_{3(n-1)}'' + d_{n-1}D_{3(n-1)}'' - a_n k_{o(n-1)} = 0 \quad (112)$$

$$-2a_{n-1}D_{3(n-1)}'' + b_{n-1}A_{3(n-1)}'' + 2c_{n-1}B_{3(n-1)}'' + d_{n-1}C_{3(n-1)}'' - b_n \frac{k_{o(n-1)}}{\mu_{n-1}} = 0 \quad (113)$$

$$a_{n-1}C_{3(n-1)}'' + b_{n-1}D_{3(n-1)}'' - c_{n-1}A_{3(n-1)}'' - d_{n-1}B_{3(n-1)}'' + c_n \frac{4\mu_{n-1}^2 E_o I_{sn}}{d} = 0 \quad (114)$$

第1層から第 $(n-1)$ 層までの各層間における連続条件から導かれる各方程式は、(22)、

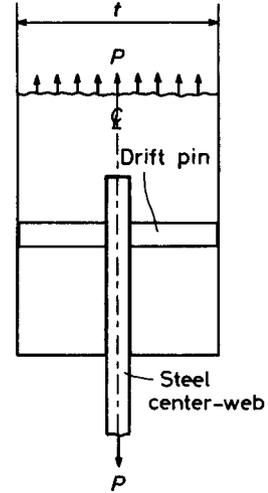


Fig. 5 Drift pin joint with a steel center-web.

(24)~(26)式および(58)式を用いて、これまでに示したと同様な方法で求められる^{10,12)}。

2.4 サイドウェブ型ラグスクリュー接合

今度は Fig. 6(a) のような鋼板サイドウェブを持つラグスクリュー接合部を考え、図中に示されるラグスクリューの先端テーパ部分は、面圧力に対しても軸力に対しても、有効に働かないものと仮定し、Fig. 6(b) のような座標を与えることにする。図中の t_e は接合具の有効長さである。また、ネジ部の径 d_i は谷径を用いることにする。

さて、ラグスクリュー接合部では、変形が進むとネジ部分には引き抜き抵抗力が、ラグスクリュー自体にはこれと釣合うだけの軸方向力が、また木材には横圧縮力が生じるはずである。ラグスクリュー接合部に実際に加わるこのような力の分布を正確にとらえるのはなかなか難しいが、ここでは Fig. 6(c) に示すように、単位長さあたり dN の引き抜き抵抗力(反力)が有効ネジ部長さ t_{se} の部分に一様に分布し、その総和が胴部および頭部に加わる軸方向引張力 N と釣合うものとする。

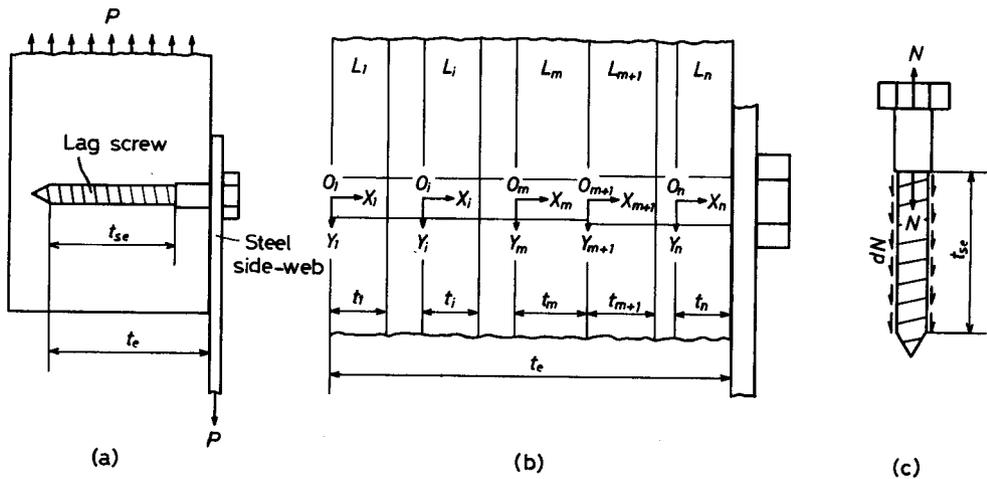


Fig. 6 Lag screw joint with a steel side-web and the coordinates.

いま、ラグスクリューに加わる軸力は、Fig. 6(b) の各層内においてそれぞれ一定値 N_i をとるものと仮定すると、この N_i は近似的に次のように表される。第1層から第 m 層までの各層 ($1 \leq i \leq m$) において

$$N_i = dN \left(\sum_{j=1}^{i-1} t_j + \frac{t_i}{2} \right) = N \frac{\sum_{j=1}^{i-1} t_j + \frac{t_i}{2}}{t_{se}} \quad (115)$$

第 $(m+1)$ 層から第 n 層までの各層 ($m+1 \leq i \leq n$) において

$$N_i = dN_{tse} = N \quad (116)$$

ラグスクリューに加わる軸力がこのように与えられると、軸力 N_i が層ごとに異なること、また径 d_i が第 m 層と第 $(m+1)$ 層との間で異なることを考慮しさえすれば、ボルト接合の場合と同様な手順で方程式を導くことが出来る。

Fig. 6 のラグスクリュー接合部に対して与えられる境界条件は次の通りである。ラグスクリューの有効部分の先端において

$$x_1=0 \text{ において } M_1=0, F_1=0 \quad (117)$$

ラグスクリュー頭部が回転自由であると仮定すると

$$x_n=t_n \text{ において } M_n=0, F_n=P=\sigma_o A_o \quad (118)$$

ラグスクリュー頭部の回転が完全に拘束されていると仮定すると

$$x_n=t_n \text{ において } \theta_n=0, F_n=P=\sigma_o A_o \quad (119)$$

あるいは、両者の中間の回転拘束挙動を考慮に入れると

$$x_n=t_n \text{ において } M_n=M_R, F_n=P=\sigma_o A_o \quad (120)$$

また、第 i 層と第 $(i+1)$ 層との境界における連続条件は(58)式をそのまま適用することが出来る。ここで扱っているようなラグスクリューでは、ネジ部と胴部との境界（第 m 層と第 $(m+1)$ 層との境界）で急激な断面変化があり、正確には梁断面における応力分布仮定が成り立たない²⁰⁾。しかし、ここでは計算を簡略化するため、梁仮定がそのまま成り立ち、この仮定に基づいて(58)式の境界条件もまたそのまま成り立つものとする。以上のような境界条件を適用すると、これまで述べてきたと同様に、以下のような方程式が導かれる。

$N_1 \leq \sqrt{4k_{o1}d_1E_sI_{s1}}$ の場合、(14)、(15)、(117)式より

$$a_1(\alpha_1^2 - \beta_1^2) + c_1 \cdot 2\alpha_1\beta_1 = 0 \quad (121)$$

$$b_1\left\{(\alpha_1 - \beta_1)(\alpha_1^2 + 4\alpha_1\beta_1 + \beta_1^2) - \frac{N_1}{E_sI_{s1}}(\alpha_1 + \beta_1)\right\} + d_1\left\{-(\alpha_1 + \beta_1)(\alpha_1^2 - 4\alpha_1\beta_1 + \beta_1^2) + \frac{N_1}{E_sI_{s1}}(\alpha_1 - \beta_1)\right\} = 0 \quad (122)$$

また、 $N_1 > \sqrt{4k_{o1}d_1E_sI_{s1}}$ の場合、(18)、(19)、(117)式より

$$a_1\phi_1^2 + c_1\omega_1^2 = 0 \quad (123)$$

$$b_1\varphi_1\left(\varphi_1^2 - \frac{N_1}{E_s I_{s1}}\right) + d_1\omega_1\left(\omega_1^2 - \frac{N_1}{E_s I_{s1}}\right) = 0 \quad (124)$$

ラグスクリュー頭部が回転自由であるとする、 $N_n \leq \sqrt{4k_{on}d_n E_s I_{sn}}$ のときには、(14)、(15)、(118)式より

$$\begin{aligned} & a_n\{(\alpha_n^2 - \beta_n^2)A''_{1n} - 2\alpha_n\beta_n C''_{1n}\} + b_n\{(\alpha_n^2 - \beta_n^2)B''_{1n} - 2\alpha_n\beta_n D''_{1n}\} \\ & + c_n\{2\alpha_n\beta_n A''_{1n} + (\alpha_n^2 - \beta_n^2)C''_{1n}\} + d_n\{2\alpha_n\beta_n B''_{1n} + (\alpha_n^2 - \beta_n^2)D''_{1n}\} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (125)$$

$$\begin{aligned} & a_n\left\{\left(\alpha_n + \beta_n\right)\left(\alpha_n^2 - 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2\right) - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\left(\alpha_n - \beta_n\right)\right\}B''_{1n} \\ & - \left\{\left(\alpha_n - \beta_n\right)\left(\alpha_n^2 + 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2\right) - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\left(\alpha_n + \beta_n\right)\right\}D''_{1n} \\ & + b_n\left\{\frac{1}{2}\left(\alpha_n - \beta_n\right)\left(\alpha_n^2 + 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2\right) - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\left(\alpha_n + \beta_n\right)\right\}A''_{1n} \\ & + \frac{1}{2}\left\{\left(\alpha_n + \beta_n\right)\left(\alpha_n^2 - 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2\right) - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\left(\alpha_n - \beta_n\right)\right\}C''_{1n} \\ & + c_n\left\{\left(\alpha_n - \beta_n\right)\left(\alpha_n^2 + 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2\right) - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\left(\alpha_n + \beta_n\right)\right\}B''_{1n} \\ & + \left\{\left(\alpha_n + \beta_n\right)\left(\alpha_n^2 - 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2\right) - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\left(\alpha_n - \beta_n\right)\right\}D''_{1n} \\ & + d_n\left\{-\frac{1}{2}\left(\alpha_n + \beta_n\right)\left(\alpha_n^2 - 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2\right) - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\left(\alpha_n - \beta_n\right)\right\}A''_{1n} \\ & + \frac{1}{2}\left\{\left(\alpha_n - \beta_n\right)\left(\alpha_n^2 + 4\alpha_n\beta_n + \beta_n^2\right) - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\left(\alpha_n + \beta_n\right)\right\}C''_{1n} \\ & = -4\mu_n^4 t \end{aligned} \quad (126)$$

また、 $N_n > \sqrt{4k_{on}d_n E_s I_{sn}}$ のときには、(18)、(19)、(118)式より

$$a_n\varphi_n^2 A''_{2n} + b_n\varphi_n^2 B''_{2n} + c_n\omega_n^2 C''_{2n} + d_n\omega_n^2 D''_{2n} = 0 \quad (127)$$

$$\begin{aligned} & a_n\varphi_n\left(\varphi_n^2 - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\right)B''_{2n} + b_n\varphi_n\left(\varphi_n^2 - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\right)A''_{2n} \\ & + c_n\omega_n\left(\omega_n^2 - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\right)D''_{2n} + d_n\omega_n\left(\omega_n^2 - \frac{N_n}{E_s I_{sn}}\right)C''_{2n} \\ & = -4\mu_n^4 t \end{aligned} \quad (128)$$

境界条件として、(119)、(120)を用いた場合も同様にして計算式が求められる。

第 i 層と第 $(i+1)$ 層との境界における連続条件から導かれる方程式は前述のようにボルト接合と同様で、 i 層、 $(i+1)$ 層において生じる軸力 N_i 、 N_{i+1} の大きさを考慮しながら、(58)

式の y_i, y_{i+1} 等にそれぞれ必要な式を代入すれば良い。

なお、ラグスクリュー接合部に生じる軸力はほとんどの場合、 $N_i \leq \sqrt{4k_{oi}d_iE_sI_{si}}$ の関係を満たすものと考えられる。したがって、通常は軸力の大きさに関する吟味は不要なものと思われるが、数値計算途中での不測のエラーを防ぐためには一般的な形でプログラムを書きおいた方が安全かもしれない。

2.5 サイドウェブ型釘接合 (ネイルオンプレート接合)

続いて、Fig. 7(a)に示されるような釘接合部を考える。図中の t_e はラグスクリューの場合と同じく釘の有効長さを示している。木材に打ち込まれた釘には Fig. 7(c)のように、軸方向に分布する引き抜き抵抗力（摩擦力）と釣合う軸力が生じるはずである。しかし、この引き抜き抵抗力はラグスクリューや木ネジのようにネジ部分を持つ接合具と比べると小さく、また摩擦力に依存しているだけに使用期間中の応力緩和による低下も考えられる。そこで、釘接合部では軸力影響を無視出来るものと仮定することにしたい。軸力影響を無視すると、釘接合部に関する基礎微分方程式は(20)式となり、Fig. 7(b)に示される各層の任意の位置における釘の垂直変位、傾斜角、曲げモーメント、剪断力はそれぞれ(22), (24)~(26)式で与えられる。この場合の境界条件は2.4のラグスクリュー接合部の場合と全く同様で、基礎微分方程式(1)式が(20)式で置き換わっただけである。

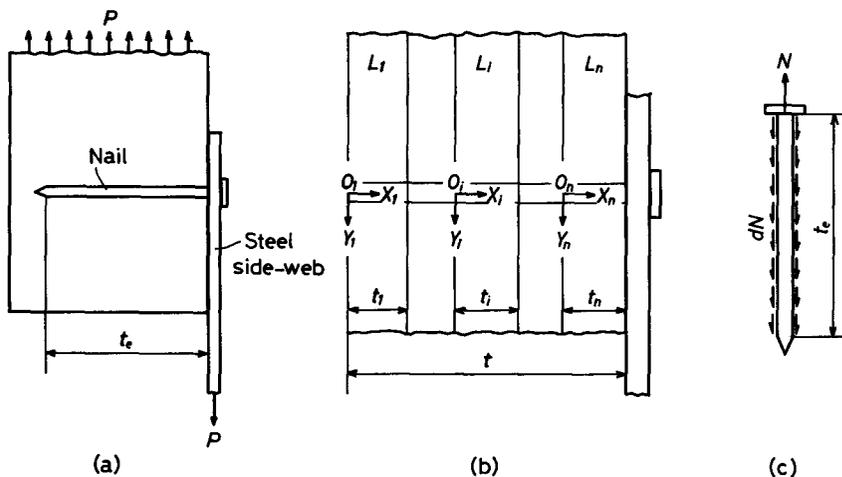


Fig. 7 Nail joint with a steel side-web and the coordinates.

また、軸力を考慮に入れて計算する必要がある場合には、第1層から第 n 層までのすべての層で、軸力が(115)式によって与えられること、釘径が有効長さ全長にわたって一定であること以外はラグスクリュー接合部と全く同じ計算式を適用することが出来る。

ただし、釘接合の場合には他の接合法と異なり、普通先孔なしに釘が木材中に打ち込まれ

るため、外力の加わる前に既に初期応力の生じた状態（同時に初期破損の生じた状態）となっており、この初期条件をどのように想定し、どのような基礎定数を用いるかが重要な検討課題となって来るものと思われる^{8,14}。

2.6 非線形数値解析法

以上のように、初めに接合部を n 層に分割した上で、基本的な線形計算式を導いておくと、段階的線形近似法を適用することによって、比較的容易に非線形数値解析を行うことが出来る。この種の非線形問題に関しては様々の数値解析手法が開発されており、問題の要求や計算機の能力に応じて、あるいは各研究者の好みによって各方法が用いられている。また、基本的な計算法に関しても、2. で示したような基礎微分方程式を直接適用して数値解を求める方法^{12,13}と、同様の基礎微分方程式に基づく梁要素の剛性マトリックスを誘導して、有限要素法によって数値計算を行う方法¹¹とがある。基本的な計算法に関しても、また数値解析手法に関しても、どの方法もそれぞれ一長一短はあるものの決定的な差はなく、状況に応じて適宜好みの方法を組み合わせれば良いものと思われる。

参考までに著者の採用している数値解析法^{12,13,21}の概略を示すと次のようになる。基礎微分方程式(1)式を用いて、段階的線形近似法による接合部の非線形変形解析を行う場合、数値計算の各ステップで必要となる定数値は、基礎定数である接合具面圧定数 k_{oi} と接合具の曲げ剛性 $E_s I_{si}$ 、そして接合具の曲げ変形にともなって生じる軸力 N_i であるが、軸力 N_i の取り扱いについては後述するので、ここではふたつの基礎定数のみについて考えることにしたい。いま、面圧応力—めり込み曲線および曲げモーメント—曲率曲線がそれぞれ Fig. 8(a), (b) のように連続的な折れ線で近似され、面圧定数 k_{oi} と曲げ剛性 $E_s I_{si}$ の値として各線分の傾き $k_{o(1)}, k_{o(2)}, \dots$ および $E_s I_{s(1)}, E_s I_{s(2)}, \dots$ が用いられるものとする。数値解析の最初のステップでは、第1層から第 n 層までのすべての層に対し初期値 $k_{o(1)}, E_s I_{s(1)}$ を与え、これらの

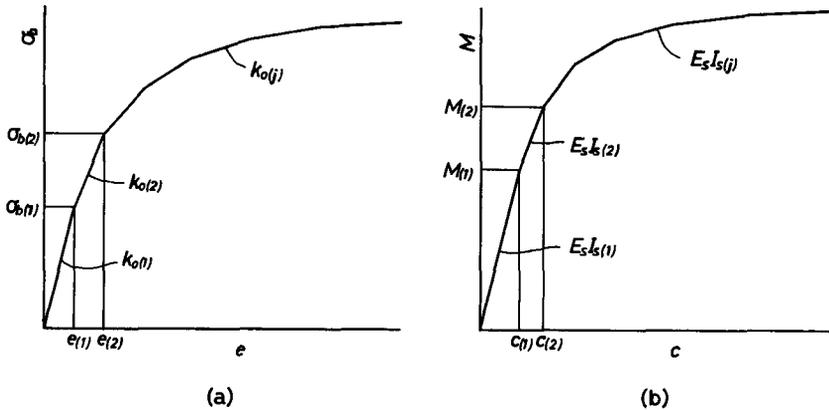


Fig. 8 Stepwise linear approximation of basic properties.

数値を用いて単位基準面圧応力 ($\sigma_0=1 \text{ kg/cm}^2$) に対する解を求める。次にこのときの各層中央点 ($x_i=l_i/2$) の垂直変位 y_{coi} と図(a)の $e_{(1)}$ との比 $e_{(1)}/y_{coi}$, 各層中央点の曲率 c_{coi} と図(b)の $a_{(1)}$ との比 $a_{(1)}/c_{coi}$ を求める。こうして得られた $2n$ 個の比 ($e_{(1)}/y_{coi}$, $a_{(1)}/c_{coi}$) のうち最も小さい値を最初の基準面圧応力増分 $\Delta\sigma_{o(1)}$ とする。この操作は要するに、面圧力を受けている木材と曲げモーメントを受けている接合具のどの位置で最初に降伏が起り、そのときの外力はいくらであるかを求めているのに他ならない。この範囲内ではどの層においても定数値の入れ換えは不要であるから、最初に単位基準面圧応力に対して計算された各数値と $\Delta\sigma_{o(1)}$ との積を求めれば、それで最初のステップは終了である。以後の説明を簡単にするために、仮に第 r 層中央点の垂直変位 y_{cr} を基準として最初の面圧応力増分 $\Delta\sigma_{o(1)}$ が決められたとしよう。次のステップでは、この y_{cr} は必ず最初の判別値 $e_{(1)}$ を越えるはずであるから、第2ステップの計算を実行する前にこの層の面圧定数 k_{or} の値を $k_{o(1)}$ から $k_{o(2)}$ に入れ換える。この時点では他の垂直変位および曲率の値はまだ最初の判別値 $e_{(1)}$, $a_{(1)}$ 以下のはずであるから、残りの $(2n-1)$ 個の定数値はそのままが良い。さて、第1ステップでは各層の垂直変位および曲率に関する初期値 (y_{ci} , c_{ci}) が0であったので、 $e_{(1)}$, $a_{(1)}$ をそのまま用いて面圧応力増分を計算することが出来た。しかし、第2ステップ以降ではすでに変形が生じているので、面圧応力増分を決めるための基準値を補正しておく必要がある。すなわち、 $e_{(1)}$ および $a_{(1)}$ と第1ステップで計算された各層の中央点垂直変位 $y_{ci(1)}$ および曲率 $c_{ci(1)}$ との差 ($e_{(1)}-y_{ci(1)}$, $a_{(1)}-c_{ci(1)}$) を求め、それらを第2ステップにおける各層の判別基準値とする。ただし、 y_{cr} に関しては、第1ステップでの計算値は当然 $e_{(1)}$ であるから、第2ステップにおける判別基準値は $(e_{(2)}-e_{(1)})$ となる。以上の準備が出来れば、第1ステップと同様に、単位基準面圧応力に対する解と各層のその時点における変形の進行状態から第2ステップにおける基準面圧応力増分 $\Delta\sigma_{o(2)}$ を決定し、接合部すべり変位およびその他の必要な情報に関する第2増分を求めることが出来る。この手順を順次繰り返して行けば、接合部の非線形変形挙動を比較的容易に解析することが出来る。この方法の長所は繰り返し収束計算が不要で、また荷重増分が計算の過程で決められるために、例えば比例限度以下における増分計算のような無意味な計算を実行しなくても済み、計算時間を短縮出来る点にある。したがって、どちらかと言えば処理速度の遅いマイクロコンピュータ向きの数値解析法であると言えるように思われる。

3. 変形解析に関する問題点および検討課題

2. では鋼板ウェブを持つ木材接合部の変形解析法が示されたが、この種の解析では基礎計算式の誘導や数値解析プログラムの開発もさることながら、同時に基礎定数の決定法や境界条件の適否に関する検討が非常に重要である。以下では、2. で示した計算式を実際の接合部設計に適用して行く際に問題となるいくつかの検討課題について簡単にふれてみたい。

3.1 接合具と鋼板ウェブとの面圧挙動

2. では接合具の木材中での変形挙動だけに注目して、木材側の接合部すべり変位増分 Δs_w を求めたが、実際の接合部では接合具と鋼板ウェブとの接触面のつぶれによる変位も同時に生じるはずであるから、正確にはこの変位成分も考える必要がある。すなわち、基準面圧応力増分 $\Delta \sigma_0$ に対する鋼板ウェブ側のすべり変位増分を Δs_s とすると、接合部すべり変位増分 Δs は次のように与えられるはずである。

$$\Delta s = \Delta s_w + \Delta s_s \quad (129)$$

(129)式中の Δs_s は普通 Δs_w に比べると小さいので、鋼板ウェブが十分な厚さを持っている場合には、接合部すべり変位が必然的に多少小さめに計算される（接合部剛性が幾分過大に評価される）ことを承知した上で、計算上無視することも出来るように思われる。しかし、接合部の設計や使用される木材の材質との関係において相対的に鋼板厚が不足している場合や、施工上の理由から接合具径と先孔径とのクリアランスが大きくとられているような場合には、これを考慮しておいた方が良いことがある。この問題を厳密に解析しようとする、同種材料どうしの弾塑性接触問題となり、かなり複雑な解析を要することになる。そのため、木材接合部の変形解析の一部として扱うには少々問題が大き過ぎるように思われるので、ここではもう少し簡単な計算法について考えてみることにする。

計算法のひとつは、木材部分で用いている弾性床上の梁理論を鋼板ウェブ部分に対しても形式的に適用する方法である。力学的な内容を見れば、接合具と鋼板との面圧による荷重一変位曲線¹³⁾も、木材の2面剪断型接合具面圧試験^{17,18)}に準じた試験方法で実験的に求めることが出来る。実験から荷重一変位曲線が得られれば、接合具が一方的に鋼板中にめり込んで

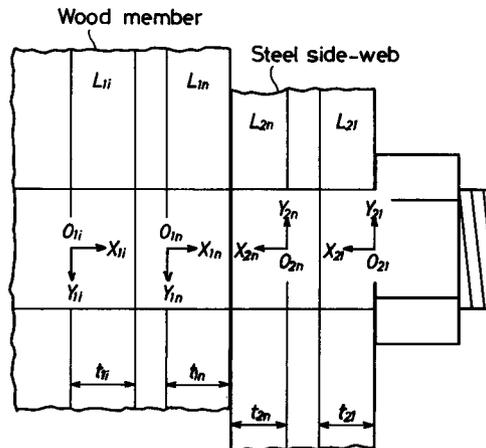


Fig. 9 The coordinates defined in the wood main-member and the steel side-web.

行くものと仮定して、これを形式的に面圧応力—めり込み曲線に置き換え、この曲線から等価面圧定数を計算することが出来る。このようにして、等価面圧定数が決まれば、あとは木材と木材との接合の場合と全く同様にして数値解析を進めることが出来る。この場合の境界条件は、例えば Fig. 9 のようなサイドウェブ型ボルト接合部でボルト頭部が回転自由であると仮定すると、次のようになる⁹⁾。

$$x_{21}=0 \text{ において } M_{21}=0, F_{21}=0 \quad (130)$$

$$x_{1n}=t_{1n}, x_{2n}=t_{2n} \text{ において}$$

$$\theta_{1n}=\theta_{2n}, M_{1n}+M_{2n}=0, F_{1n}=F_{2n}=\frac{P}{2}=\frac{\sigma_o A_o}{2} \quad (131)$$

他の境界条件は2.で示したと同様で、接合部すべり変位増分のふたつの成分 ΔS_w および ΔS_s はそれぞれ次のように与えられる。

$$\Delta S_w = y_{1n}(x_{1n}=t_{1n}) \quad (132)$$

$$\Delta S_s = y_{2n}(x_{2n}=t_{2n}) \quad (133)$$

また、より簡単な方法としては、鋼板ウェブ内ではその厚さ方向に一樣に面圧力が働き、ウェブ内での接合具の変形挙動は、木材中での接合具の撓み曲線に影響を与えないものと考えて、実験によって得られた荷重—変位曲線から $\Delta \sigma_o$ に対応する ΔS_s を直接求め、これを単純に ΔS_w に加えることも出来る¹³⁾。非常に初歩的な計算法ではあるが、数値の補正にはある程度有効なので、実用的には利用価値があるものと思われる。その際、数値解析によって得られた木材と鋼板ウェブとの境界における接合具傾斜角から、近似的に鋼板の有効面圧面積比を求めると言う方法も考えられよう。いずれにせよ、現時点ではまだ一般的な基礎データが整えられておらず、今後の実験データ蓄積が望まれる。

3.2 木材の基礎面圧性能

木材の接合具面圧試験にはいくつかの方法がある。最大面圧応力を求める場合には試験方法による差が非常に大きく、適切な方法を採用する必要があるが、接合部の変形計算に必要な面圧定数 k_{oi} のみを知りたいときには、どのような試験方法を採用しても大きな差はないようである²²⁾。ただし、釘接合の場合には、前述のように釘が木材に打ち込まれた状態で既に初期応力が生じているので、これをどのように取り扱うかが問題である。Foschi⁸⁾ は釘を木材の平滑な木口面にめり込ませる面圧試験によって得られた基礎データを使用し、釘径の1/2に相当する初期めり込み変位とこれに対応する初期面圧応力を仮定して解析を行っている。また、Hunt¹⁴⁾ は薄い木材板に釘を打ち込んだ状態で2面剪断型の面圧試験を行い、この実験から得

られた基礎定数を用いて計算を行っている。いずれにせよ、確定的な結論を得るにはもう少し各種のデータ蓄積が必要で、今後とも継続的な検討課題として考えて行かねばならない問題であろう。

なお、接合具径 8 mm から 20 mm までの範囲における、一般的な構造用針葉樹材を対象とした基礎面圧性能データが文献 18) にまとめられている。

3.3 接合具の弾塑性曲げ性能

釘, ボルト等接合具の曲げ性能は, 直接曲げ試験から求めることも出来, 計算結果の適合性そのものを問題にすれば, 当然この方法が最適である¹³⁾。しかし, 解析の実用性を考えると, もう少し一般的なかたちで接合具曲げ性能を与えておく必要がある。弾性限度を越えた後の接合具の弾塑性曲げ性能を簡単に扱うには, 接合具材料の応力-歪特性を, 完全弾性-完全塑性型または降伏後一定歪硬化型のどちらかと仮定して, 接合具断面内の曲げ応力分布を考えるのが普通である^{7,8,11,12,14,23)}。また, これらの中間的な応力-歪関係を仮定して計算精度を向上させることも可能であろう。ただ, 実用的な簡便さから言うと, 多くの計算基準やハンドブックに記載されているヤング係数と降伏応力の値のみから曲げ剛性が計算出来る, 完全弾性-完全塑性仮定が最も現実的であるように思われる。

3.4 接合部に生じる軸力

1. では接合部に生じる軸力を考慮した計算式を誘導したが, 実際に数値解析を行うには, この軸力の大きさを決める必要がある。その定量的な扱い方については, 今後更に実験的, 理論的な検討を加えながら合理的な評価法を求めて行く必要があるが, 基本的には次のような考え方が適用出来るものと思われる。いま, 例として Fig. 10(a-1) のようなボルト接合部に外力

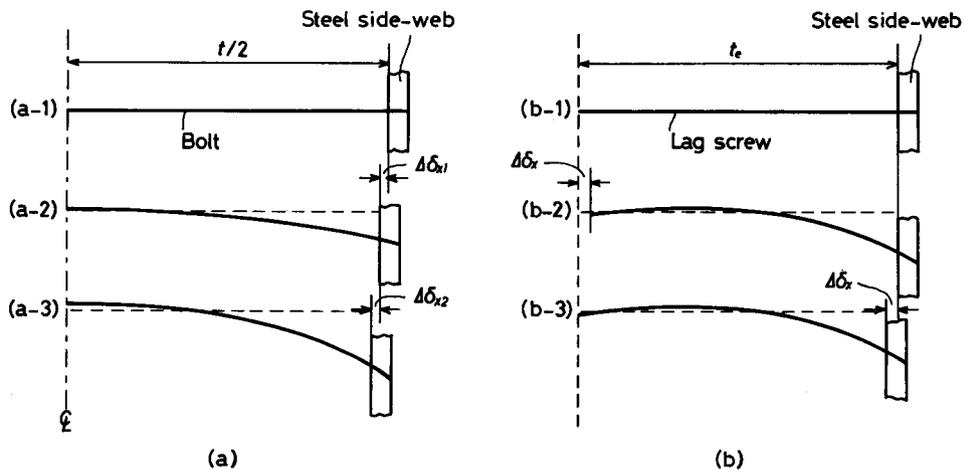


Fig. 10 Deflection curve and axial displacement of the fastening.

が加わり、ボルトが図(a-2)のように曲げ変形した状態を考えることにする。この接合部では、ナットの締め付けによる初期応力は発生していないが、ボルト頭部およびナットは鋼板ウェブ(座金)と密着しているものと仮定すると、ボルトの曲げ変形にともない、ボルト周辺の木材厚の半長 $t/2$ は $\Delta\delta_{x1}$ だけ減少しなければならないはずである。この厚さ減少 $\Delta\delta_{x1}$ は、ボルト長さを一定とすれば、数値解析によってボルトの撓み曲線から計算される。一方、この厚さ減少 $\Delta\delta_{x1}$ は鋼板ウェブ(座金)の木材へのめり込み変位によって生じると考えることが出来る。したがって、鋼板ウェブ(座金)と木材との部分圧縮試験から荷重—めり込み曲線を求めておけば、めり込み変位が $\Delta\delta_{x1}$ となるときの荷重すなわち軸力が計算される。この荷重—めり込み曲線は、直接実験によって求める他に、適当な荷重ブロックを用いて得られた面圧応力—めり込み曲線を基に弾性床土上の板曲げとして解析的に求めることも可能であろう。さて、上に述べたように、接合部に生じる軸力はボルトの撓み曲線から求められるが、同時にボルトの撓み曲線もまた軸力の影響を受けるはずである。したがって、この問題を正確に解くためには、数値解析の各ステップで繰り返し収束計算を要することになる。しかし、大型計算機を使用する場合はともかく、マイクロコンピュータレベルでの数値解析を想定すると、計算に要する時間の点でやや難があるように思われる。そこで近似的に、段階的線形解析の各ステップで与えられる荷重増分によるボルトの撓み曲線の増分(各位置の撓み増分)は、前ステップの撓み曲線から得られた軸力を用いて計算しても大きな誤差は生じないものと考え、取り扱いが非常に簡単になる。すなわち、最初のステップでは(1)式における軸力 N ((41)式参照)を0として第1荷重増分に対する図(a-1)のボルトの変形を計算する。計算の結果得られた撓み曲線を適当な折れ線で近似してその長さを求め、ボルト長さが一定であると言う仮定から図中に示される $\Delta\delta_{x1}$ を計算する。この $\Delta\delta_{x1}$ を用いて、撓み曲線(a-2)が与えられるとともに、この x 軸方向変位に対応する軸力が求められる。次に第2ステップでは、この軸力を(1)式の N に代入して図(a-2)から(a-3)への撓み曲線の増分(各位置の撓み増分)を求め、 $\Delta\delta_{x2}$ または $(\Delta\delta_{x1} + \Delta\delta_{x2})$ を前のステップと同様に計算する。この計算手順を繰り返して行けば、軸力の影響を考慮したボルト接合部の荷重—すべり曲線が求められる。通常軸力の影響は接合部すべり変位が小さいときにはごくわずかなので、前述のように許容設計耐力レベルでは実質的に無視出来るものと考えられる。

次に、Fig. 10 (b-1) のようなラグスクリュー接合部について考えてみることにする。釘やラグスクリューのような形状の接合具は引き抜き抵抗が非常に小さい場合には、図(b-2)のような変形性状を示し、木材から少しづつ引き抜けて行くものと思われる。この場合には軸力はごくわずかしか生じないはずであるから無視してさしつかえない。一方、ネジ部分の保持力によって引き抜き変位が完全に拘束されている場合には、ボルト接合同様に図(b-2)の引き抜き変位 $\Delta\delta_x$ と等しいだけの鋼板ウェブのめり込み変位が生じ、ラグスクリューにはそれに対応した軸力が生じるはずである。ただし、2. で示したように、この場合の軸力はボルト接合部

と異なり長軸方向に一定ではない。実際のラグスクリュー接合部では鋼板ウェブのめり込み変位とラグスクリューの引き抜き変位が同時に生じるものと考えられるが、めり込み変位に対応する軸力と引き抜き変位に対応する軸力は当然等しいはずであるから、鋼板ウェブの荷重一めり込み曲線と、ラグスクリューの荷重一引き抜き変位曲線が与えられれば、これらを基礎データとして数値解を求めることが出来る。

3.5 接合具頭部の回転挙動

接合具頭部の回転挙動が接合具の撓み曲線に与える影響を定量的に取り扱おうとする場合、2.1に示したような境界条件の与え方や、基本的な数値解析手法に関しては特に難しい点はないように思われる。しかし、実際に計算を実行するには、それに必要な基礎定数をどのように定めるかが課題となろう。また、計算の容易な回転自由仮定と比較し、どの程度の実用的な計算精度の向上が見込めるかの比較検討も重要であるように思われる。接合具の頭部回転剛性の評価に関する既往の研究としては、有限要素法による釘接合部の変形解析のなかで、釘の頭部を木材にめり込ませて得られた面圧定数を用いて、釘頭部の回転による仕事量を求めている Hunt¹⁴⁾の論文があげられる。鋼板サイドウェブ(座金)を用いた接合部における、接合具頭部および鋼板ウェブ(座金)の変形挙動は前掲の Fig. 2 のようになるものと思われるので、接合具頭部に生じる反力モーメント M_R は、Fig. 10 に示された鋼板ウェブが $\Delta\delta_x$ だけ木材にめり込むのに要する荷重とボルト頭部径の $1/2$ との積で与えられるものと考えられる。したがって、接合具頭部の回転拘束挙動は、結局、鋼板ウェブ(座金)の木材へのめり込み抵抗に依存することになり、軸力の発生と一体となったメカニズムによって生じるものと考えられる。

文 献

- 1) 原田正道：東大生技研報，2(3)，(1951)
- 2) Kuenzi, E. W.: Rep. D1951, F. P. L. (1955)
- 3) Wilkinson, T. L.: *J. Structural Div.*, ASCE 97(ST5), Proc. Pap., 8/21, 1381-1398 (1971)
- 4) 沢田 稔：北大演研報，33(1)，139-166 (1976)
- 5) 中谷 浩，沢田 稔：同上，37(3)，687-719 (1980)
- 6) 松尾 博，沢田 稔：同上，38(2)，285-304 (1981)
- 7) Foschi, R. O.: *Wood Sci.*, 7(1)，69-81 (1974)
- 8) Foschi, R. O.: *ibid.*, 9(3)，118-123 (1977)
- 9) Hirai, T. and Sawada, M.: *Mokuzai Gakkaishi*, 28(9)，543-547 (1982)
- 10) Hirai, T. and Sawada, M.: *ibid.*, 28(10)，609-613 (1982)
- 11) 辻野哲司，平井卓郎：木材学会誌，29(12)，833-838 (1983)
- 12) Hirai, T.: *Mokuzai Gakkaishi*, 29(12)，839-844 (1983)
- 13) Hirai, T.: *ibid.*, 31(3)，65-170 (1985)
- 14) Hunt, R.: Rep. No. 393, Dept. Civil Eng., Univ. Auckland (1987)
- 15) 横山幸満：“くい構造物の計算法と計算例”，山海堂 (1977)

- 16) 平井卓郎, 沢田 稔: 木材学会誌, 28(1), 39-44 (1982)
- 17) 平井卓郎: 同上, 30(12), 959-964 (1984)
- 18) 平井卓郎: 同上, 46(4), 967-988 (1989)
- 19) 平井卓郎, 沢田 稔: 同上, 28(11), 685-694 (1982)
- 20) 平井卓郎, 沢田 稔: 北大演研報, 36(2), 387-420 (1979)
- 21) 平井卓郎, 北大演研報, 44(1), 297-326 (1987)
- 22) 平井卓郎, 同上, 46(4), 959-966 (1989)
- 23) Nadai, A.: "Theory of Flow and Fracture of Solids, Vol. 1", 2nd ed., McGraw-Hill, p. 353-370 (1950)

Summary

Basic equations derived from the generalized theory of a beam on an elastic foundation were presented for the load-slip relationship of mechanical wood-joints with steel webs.

The general form of the basic differential equation is given by Eq. (1), in which the foundation force and the axial force are both taken into account. Eq. (1) is transformed into Eq. (20) when the axial force can be neglected. It can also be transformed into Eq. (27) when some part of the fastening is considered not to be supported on wood. Eq. (35) is the simplest form of Eq. (1), which is the basic differential equation for a beam. The general solutions of these equations are shown in Sec. 1.

In Sec. 2, the boundary conditions were considered for some actual cases of common wood-joints with steel webs, *i. e.*, bolt joints with side-webs, bolt joints with a center-web, drift pin joints with a center-web, lag screw joints with a side-web, and nail joints with a side-web. Using the general solutions derived in Sec. 1 and these boundary conditions, the basic simultaneous equations for use in the numerical analysis of the nonlinear load-slip relationships of the joints were derived. In this section, a brief description is also given on the stepwise linear approximation in the numerical analysis.

Some practical problems concerning basic constants and the improvement of the assumptions used in the analysis were discussed in Sec. 3.