

# 木質釘着パネルの非線形曲げ解析 第1報

## 基本モデルとしての釘着梁の解析

神 谷 文 夫<sup>(1)</sup>

Fumio KAMIYA : Nonlinear Analysis of the  
Nailed Stressed-Skin Panel I  
Analysis for nailed layered beams as a basic model

**要 旨** : 面材を釘打ちして構成した壁や床は、面材の協力効果により高い曲げ剛性を示すが、面材をとめている釘接合部が応力を生じて非線形の剛性を示すこと、面材応力の幅方向の分布が不均等であることなどがあって、その耐力機構は複雑である。

この曲げの性状を解析的に予測する方法としては有限要素法があるが、プログラムが複雑で大型計算機を必要とする。そこで、もっと簡単に求める方法として、従来の力学理論に基づく解析を試みた。

まず、釘接合部の応力について検討するために、応力の幅方向の分布が一様とみなせる2層または3層の釘着梁を基本モデルとしてとりあげ、その解析を行った。誘導した理論式は、すべての釘接合部における力と変形の関係式を求め、連立に解くものであるが、隣り合う釘の応力の差をとることににより、逐次近似法で簡単に計算することができ、電子計算機の必要とする記憶容量もわずかである。

もし、釘接合部の応力の分布が仮定できるなら、紙上の計算も可能である。そこで、その分布は釘を打たずに単に重ね合わせた梁の応力の分布と等しいと仮定して、計算を行った。その結果、理論式とほとんど差のない解が得られ、この方法は略算法として有効であることがわかった。

実験を行って理論式、近似式の適合性を検討した結果、両式は釘着梁の曲げ性状を良く予測することがわかった。また、釘間隔や荷重方式などのパラメータを変えた数値実験を行った。その結果、釘間隔をつめたときの剛性の増加が定性的に得られ、中央集中荷重のときの剛性は他の荷重方式と比べ、もっとも低いことなどがわかった。

### 1. はじめに

面材を枠材、あるいは柱、梁等に張りつけて壁や床、屋根を構成する方法は、プレハブ工法、枠組壁工法に多くみられるが、その優れた力学的特性の故に、最近では在来工法にも取り入れられるようになってきた。

面材の接合法として、接着剤を用いる方法のほかに、釘を用いる方法があるが、後者の場合、釘接合部が力に対して非線形の変形（以後、釘の応りと称す）を生ずるために、その理論的解析は複雑である。

このために、それら壁、床、屋根の評価は、実大規模の単位部分の試験によって、実験的に行う方法が探られてきた。しかしながら、この方法は、試験体が大型となり、経費もかさむために、広範な材料、設計、荷重等の条件を網羅することはできない。

筆者は、この問題を解決すべく、非線形の変形性状を予測する解析的方法の誘導を試み、すでに耐力壁の剪断性能については報告<sup>1)</sup>しているので、今回は、曲げ性能について検討した。

耐力壁や床、屋根の構成方法は基本的に同じであるので、ここではその構成単位（ユニット）を対象とした。また、このユニットをパネルと称することとした。

釘着パネルが曲げの力を受けるとき、軸材だけでなく、その上に張られた面材（スキン、フランジなどと称せられる）も協力して抵抗し、その効果はストレート・スキン効果と称せられる。しかしながら、面材と軸材との間で迂りを生ずると同時に面材の応力度はその幅方向に不均等な分布を示し、問題は複雑である。したがって、釘着パネルの基本問題として、応力度の分布が幅方向に一様とみなせる釘着梁をとりあげ、その層間迂りについて、まず研究を行い、本報告の第 1 報とした。ついで、その釘着梁への理論を釘着パネルへ拡張適用させ、第 2 報とする。

## 2. 既応の研究と問題点

ここでは、釘着梁の研究を中心に述べ、パネルの研究については第 2 報に譲ることとする。なお、2 材以上の梁を重ねるとき、釘以外にボルト、ジベル、しゃち等のいわゆる Shear Connector が用いられるが、これらを用いた積層梁の変形機構は基本的に同じであるので、一括して釘着梁と仮称することにする。

層間迂りのない集成材の発達により、現在では釘着梁の活用場面はほとんどなくなったが、かつては非常に重要な研究課題であった。1930 年代、ドイツは鋼材不足に悩み、木材を用いて大スパンの建築をなす重木構造 (Heavy Timber Construction) が盛んに建てられ研究された。1934 年、MELAN の理論が、当時、同じ悩みをかかえていた日本に紹介された<sup>8)</sup>。この理論は、接合部の変形を考慮しないで応力を計算しており、1941 年、後藤一雄<sup>9)</sup>がその欠点を指摘した理論を発表して、わが国における釘着梁の研究が始まった。

後藤の理論は、すべての接合部において、力と変形の関係を求め、それを連立方程式として逐次法で解くものであったが、釘接合部の変形特性を直線とする線形解析であるにもかかわらず、逐次法で解かねばならないわずらわしさがあった。この論文は、釘着梁の強度を対象としたものであったが、後藤はついで 1943 年、そのたわみを計算する方法<sup>4)</sup>を発表している。

1942 年、河野輝夫<sup>6)</sup>は、2 本の梁の間に飼木をはさんで緊結する所謂ラーメン梁の理論を発表した。この理論は、対象を接合の間隔を等しくした梁に限定して微分方程式を立て、これを解いたもので、逐次法によらず一度で計算ができる便利さがあった。

同じ 1942 年、鷲尾健三<sup>5)</sup>は、河野の式で飼木の高さをゼロとすることにより、ラーメン梁の理論が釘着梁にも応用できることを示した。

1952 年、辻井静二<sup>7)</sup>は、同様の微分方程式による理論を発表し、ついで 1956 年<sup>8)</sup>、1957 年<sup>9)</sup>に接合の有効配置を決める研究へと発展させた。

これに対して後藤は 1954 年、接合を等間隔にしないでも全く理論的に矛盾しない、その連立方程式による解法を基に、接合配置を有効に決める設計法<sup>10)</sup>を発表している。この後藤と辻井の一連の研究は「新興木構造」と呼ばれた当時の活発な研究活動をほうふつさせるものがある。

菱田一郎と真野 創<sup>11)</sup>は 1959 年、木造船の設計の立場から、多層の釘着梁の微分方程式の解を発表している。

以上の研究では、接合部の実験からその特性（スリップ係数）を求めて計算式のインプットデータとする方法が採られたが、沢田 稔は、接合部の実験によらず、弾性床の理論からスリップ係数を求めて釘着梁の解析を行う一連の研究を展開した。その研究は、1976 年<sup>12)</sup>にまとめて報告された。沢田はまた、同じ

立場から1978年<sup>18)</sup>に、辻井の有効配置理論についての検討を行った。

外国では1967, 68年, イギリスの E. J. AMANA と L. G. BOOTH<sup>14), 15)</sup>が, 層間迂りを伴うパネルの解を発表している。この理論の中心となるところはフランジの応力分布の解析であるが, 層間迂りについての取り扱い方は, 釘着梁の微分方程式による解法の扱い方と同じものである。

アメリカ合衆国では1980年, R. Y. ITANI と G. H. HIREMATH<sup>16)</sup>, 1981年, R. Y. ITANI, H. M. MORSHED, R. J. HOYLE<sup>17)</sup>は, 多数の挽材を弾性接着剤で接着した床ダイヤフラムの水平剛性を微分方程式で解いている。この床は層間迂りを伴うので, 多層の釘着梁と考えられる。

以上の研究では, 接合部の変形特性を直線としており, その理論はすべて線形解析である。また, 微分方程式を解いた理論も, 基本的にはいずれも同じと考えられる。接合部の変形特性が直線とみなせるのは, その変形が小さな領域に限られるので, これらの理論の適用範囲は, 比較的荷重の小さなレンジに限定されよう。

ところで, 非線形領域であっても, 一方向の繰り返し荷重を数回受ければ, 接合部の変形特性が直線化することが知られている。したがって, 荷重条件によっては, 線形解の適用範囲は拡大されよう。しかしながら, 一方向の荷重だけが作用する場面は少なく, 例えば, 鉛直荷重を受ける床でも, 歩行や衝撃によって振動するとき, 2方向(プラス, マイナス)の力を受ける。2方向の繰り返し荷重では接合部の変形特性は直線化しないので, やはり非線形解析を行う必要があろう。

次に非線形解析について述べる。もし, スリップ係数を一定とせず, すなわち, 接合部の荷重-変形曲線の正接係数あるいは割線係数を考え, これらを釘応力あるいはその変形のレベルに応じて変えていく方法を採れば, 非線形の解を得ることができる。1969年, J. R. GOODMAN<sup>18)</sup>は, 微分方程式を解いた式で計算するに当たって, スリップ係数を釘応力のレベルに応じて変化させ, 非線形の解を得た。スリップ係数は, 全スパン上の釘応力の平均値に応じて変化させている。この研究は, 釘着梁の非線形性能を扱った点で先駆的なものと云えるであろう。

釘の応力は, 外力のレベルだけでなく, 釘が打たれたスパン上の位置によって異なる。したがって, 平均釘応力をスリップ係数を定める基準としている GOODMAN の方法は一種の近似解法と云えよう。

正確な解析を行うには, スパン上の釘のスリップ係数をその位置によって異なる値としなければならない。微分方程式を解く方法ではこのような扱いはできない。1976年, G. A. TREMBLAY, J. R. GOODMAN, M. E. CRISWELL<sup>19)</sup>は, エネルギー法を用いて解析を行った。ここでは Layleigh-Ritz の方法で解が近似され, 計算には有限要素法が用いられた。

同様な解析が1983年, 辻野哲司と小泉章夫<sup>20)</sup>によって行われた。この理論は, 基本的には TREMBLAY らのものと同じであるが, その計算方法としては, 有限要素法により, 荷重増分に対して繰り返し計算を行いながら, 逐次, 解を近似させていく方法が採られた。

非線形解析は, この様に有限要素法を用いたものしかない。しかしながら, 有限要素法によるものは大型の電子計算機が必要で, プログラムも複雑である。本研究の特徴は, スパン上の各位置の釘の非線形剛性を忠実に扱いながら, しかも有限要素法を必要としない簡単な計算法を誘導した点にある。

3. 釘着梁の計算式の誘導

3.1 2層釘着梁の計算式

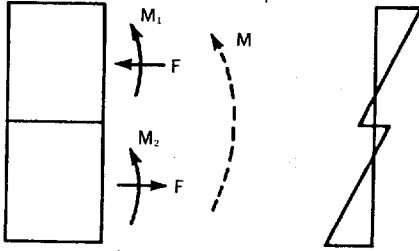


Fig. 1. 梁要素に作用する力と歪分布  
Forces acted on beam element  
and strain distribution.

梁要素をとりだし、そこにかかる力、歪りの分布等を図示すると、Fig. 1 のようになると考えられる。ここで、 $M$  は外力モーメント、 $M_1, M_2$  はラミナ自身の中立軸に作用する抵抗モーメント、 $F$  はラミナの中立軸に作用する軸力である。また、サフィックス 1, 2 は、図で上側ラミナ、下側ラミナを表すこととする。ラミナの中立軸間の距離を  $Z$  とすると、力の釣り合いから次式が成立する。

$$M = M_1 + M_2 + FZ \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Z = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2}$$

但し、 $h_1, h_2$  はラミナのせいである。

ラミナの曲率が等しいことと、式(1)とから次式を得る。

$$\frac{M_1}{E_1 I_1} = \frac{M_2}{E_2 I_2} = \frac{M - FZ}{D} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$D = E_1 I_1 + E_2 I_2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $E_1, E_2$  はラミナのヤング係数、 $I_1, I_2$  はラミナの自身の中立軸に関する断面 2 次モーメントである。

次の仮定と限定とを置いた。

イ、軸力  $F$  は、ラミナの断面に等しく分布する。

ロ、外力と釘打ちのパターンは、スパン中央に対して対象である。

釘着層の歪り ラミナの釘着側の歪み  $\epsilon_1, \epsilon_2$  は、上記の仮定と限定から次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{M_1}{E_1 I_1} \frac{h_1}{2} - \frac{F}{A_1 E_1} \\ \epsilon_2 &= -\frac{M_2}{E_2 I_2} \frac{h_2}{2} + \frac{F}{A_2 E_2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

但し、 $A_1, A_2$  はラミナの断面積である。

支点から  $X$  の距離での層間歪り  $S$  は、 $L$  をスパンとして、

$$S = \int_X^{\frac{L}{2}} \epsilon_1 dX - \int_X^{\frac{L}{2}} \epsilon_2 dX \quad \dots\dots\dots(5)$$

で表される。式(4)を式(5)に代入し、式(2)を使って整理すると、次式を得る。

$$S = \frac{Z}{D} \int_X^{\frac{L}{2}} M dX - \left( \frac{Z^2}{D} + C \right) \int_X^{\frac{L}{2}} F dX \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$C = \frac{1}{A_1 E_1} + \frac{1}{A_2 E_2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

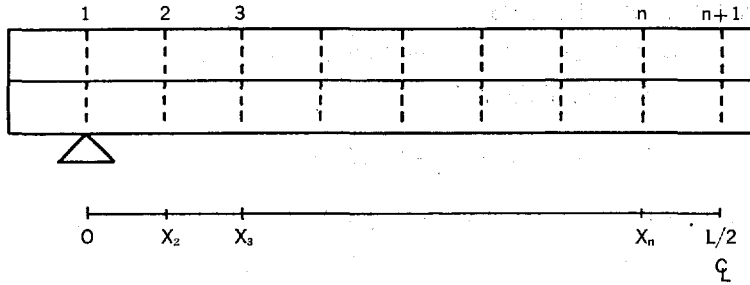


Fig. 2. 釘の番号づけ  
Numbering of nails.

ここで、Fig. 2 に示すように釘に番号をつけ、 $i$  番目の釘の剪断力、支点からの距離をそれぞれ  $q_i, X_i$  のように表わす。また、釘の総本数は  $2n+1$  本 (スパン中央の釘を含む) とする。

軸力  $F$  は、釘剪断力の総和となり、スパン上に階段状の分布となる。支点からの距離  $X_i \sim X_{i+1}$  の間では

$$F = \sum_{j=1}^i q_j \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

式(8)を式(6)に代入すると、すべての釘の応り  $S_1 \sim S_n$  が次のように表される。

$$S_1 = \frac{Z}{D} \int_{X_1}^{\frac{L}{2}} M dX - \left( \frac{Z^2}{D} + C \right) \left[ \left( \frac{L}{2} - X_1 \right) q_1 + \left( \frac{L}{2} - X_2 \right) q_2 + \dots + \left( \frac{L}{2} - X_n \right) q_n \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$S_2 = \frac{Z}{D} \int_{X_2}^{\frac{L}{2}} M dX - \left( \frac{Z^2}{D} + C \right) \left[ \left( \frac{L}{2} - X_2 \right) q_1 + \left( \frac{L}{2} - X_2 \right) q_2 + \dots + \left( \frac{L}{2} - X_n \right) q_n \right]$$

⋮ ⋮

$$S_i = \frac{Z}{D} \int_{X_i}^{\frac{L}{2}} M dX - \left( \frac{Z^2}{D} + C \right) \left[ \left( \frac{L}{2} - X_i \right) \sum_{j=1}^i q_j + \sum_{j=i+1}^n \left\{ \left( \frac{L}{2} - X_j \right) q_j \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$S_n = \frac{Z}{D} \int_{X_n}^{\frac{L}{2}} M dX - \left( \frac{Z^2}{D} + C \right) \left( \frac{L}{2} - X_n \right) \sum_{j=1}^n q_j$$

いま、任意の外部モーメント  $M$  に対するすべての釘の応りと剪断力を求めることを考える。上式で、未知の項は  $S_1 \sim S_n, q_1 \sim q_n$  の合計  $2n$  個であるが、 $S$  と  $q$  の一方がわかれば他方もわかるので、未知数の数は  $n$  個となる。一方、式の数も  $n$  個であるので、連立方程式は解けるはずである。しかし、 $S$  と  $q$  は非線形の関係になすので、その電子計算機のプログラムは非常に複雑となる。

ところが、次の関係があることを知ると、問題はごく単純になる。すなわち、隣り合う釘の応りの差をとれば、次式を得る。

$$S_{i+1} = S_i - \frac{Z}{D} \int_{X_i}^{X_{i+1}} M dX + \left( \frac{Z^2}{D} + C \right) (X_{i+1} - X_i) \sum_{j=1}^i q_j \quad \dots\dots\dots (11)$$

この式を用いれば、任意の外部モーメントに対する、すべての釘の応りと剪断力を簡単に求めることができる。但し、釘1本の剪断力-応りの関係は数値的にとらえられている必要がある。

その方法は、次に示す逐次計算法である。

- ①  $S_1$  を仮定する。この値を  $S_a$  とする。 $q-S$  の関係から  $q_1$  を得る。
- ② 式(11)で  $i=1$  とすると、次式を得る。

$$S_2 = S_1 - \frac{Z}{D} \int_{X_1}^{X_2} M dX + \left( \frac{Z^2}{D} + C \right) (X_2 - X_1) q_1$$

ステップ①で仮定した  $S_1$  ( $S_a$ ) と得られた  $q_1$  を上式に代入すると  $S_2$  を得る。 $q-S$  の関係から  $q_2$  を得る。

- ③ 式(11)で  $i$  を 2, 3…… $n$  と順次変えて、ステップ②の方法を繰り返していくと、最終的にすべての  $S$  と  $q$  を得る。
- ④  $S_2 \sim S_n, q_1 \sim q_n$  を式(9)の右辺に代入すると  $S_1$  が得られる。この  $S_1$  の値は、ステップ①で仮定した  $S_a$  とは異なる。
- ⑤  $S_1 \approx S_a$  を検定する。もし  $S_1 \approx S_a$  とみなせるなら、そのときの  $S_1 \sim S_n, q_1 \sim q_n$  を解とする。もし  $S_a > S_1$  なら、 $S_a$  を小さくし、 $S_1 > S_a$  なら、 $S_a$  を大きくしてステップ①から繰り返す。繰り返しながら、 $S_a$  を  $S_1$  に近づけていく。収束を早くするには、新たな仮定値  $S_a$  を、それまで  $S_1 > S_a$  となった仮定値の最大値と、 $S_1 < S_a$  となった仮定値の最小値との中間に設定すれば良い。なお、後の実際の計算では、 $S_1 \approx S_a$  の判定基準は、その差が 0.1% 以内とした。

釘着梁のたわみ たわみ  $W$  は、式(2)より、次の重ね合わせの原理で求められる。

$$W = W_0(M) - W_0(FZ) \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 $W_0(M)$  は、釘を打たない重ね梁にモーメント  $M$  が作用したときのたわみ、また、 $W_0(FZ)$  は、同じ梁に偶力モーメント  $FZ$  が作用したときのたわみである。

$W_0(M)$  は初等力学が教えるところにより求められる。 $W_0(FZ)$  は仮想仕事法で求められ、荷重方式には関係なく、 $m$  番目の釘の位置 ( $X$  の位置) では、次のようになる。

$$W_0(FZ) = \frac{Z}{2D} \left[ \sum_{i=1}^{m-1} \left\{ (XL - X^2 - X_i^2) q_i \right\} + \sum_{i=m}^n \left\{ 2X \left( \frac{L}{2} - X_i \right) q_i \right\} \right] \dots\dots\dots(13)$$

スパン中央では、

$$W_0(FZ) = \frac{Z}{2D} \sum_{i=1}^n \left\{ \left( \frac{L^2}{4} - X_i^2 \right) q_i \right\} \dots\dots\dots(14)$$

スパン中央で、釘間隔が等しい梁の場合、

$$W_0(FZ) = \frac{ZL^2}{8D} \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \left[ \{ n^2 - (i-1)^2 \} q_i \right] \dots\dots\dots(15)$$

### 3.2 3 層釘着梁の計算式

3層釘着梁では、釘着層が2となるので、二つの通りの仮定値を設定する逐次法となる。この計算は不可能ではないが、非常に複雑である。

ここでは、第3のラミナの寸法と物性がラミナ1と等しい場合だけを対象とした。この場合、二つの釘着層における釘のびりと剪断力は等しくなり、一つの釘着層について解けば良いことになる。

2層釘着梁の式は、(1)～(4)、(7)、(12)を除いてそのまま使え、これらの式に対しては、次式を用いれば良い。

$$M = 2M_1 + M_2 + 2FZ \quad \dots\dots\dots(1')$$

$$\frac{M_1}{E_1 I_1} = \frac{M_2}{E_2 I_2} = \frac{M - FZ}{D} \quad \dots\dots\dots(2')$$

$$D = 2E_1 I_1 + E_2 I_2 \quad \dots\dots\dots(3')$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{M_1}{E_1 I_1} \frac{h_1}{2} - \frac{F}{A_1 E_1} \\ \varepsilon_2 &= -\frac{M_2}{E_2 I_2} \frac{h_2}{2} \\ \varepsilon_3 &= -\frac{M_1}{E_1 I_1} \frac{h_1}{2} + \frac{F}{A_1 E_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4')$$

$$C = \frac{1}{A_1 E_1} \quad \dots\dots\dots(7')$$

$$W = W_0(M) - 2W_0(FZ) \quad \dots\dots\dots(12')$$

### 3.3 近 似 式

ここでは、電子計算機がなくても、机上で近似解を得る方法を検討した。

Fig. 3 は、釘着梁と釘を打たない重ね合わせ梁の、層間迂りのスパン上の分布の計算値を示したものである。釘着梁は、後に試験したもので、D190Fは4等分2点荷重、D190Cは中央集中荷重が加えられている。

この図をみると、釘着梁と重ね梁の迂りの分布は、荷重方式や荷重の大きさによって異なるが、それほど大きな違いはないことが看取される。

そこで、釘着梁の層間迂りの分布は、釘を打たない重ね梁のそれと等しい、との仮定を設けた。

重ね梁の支点から  $X$  の距離での層間迂り  $S_x$  は、

$$S_x = \frac{Z}{D} \int_x^{\frac{L}{2}} M dX$$

したがって、支点での迂り  $S_1$  に対する  $S_x$  の比は、

$$\frac{S_x}{S_1} = \left( \int_x^{\frac{L}{2}} M dX \right) / \left( \int_0^{\frac{L}{2}} M dX \right) \quad \dots\dots\dots(16)$$

近似解の求め方は、次のようになる。

- ① 支点での迂り  $S_1$  を決める。式(16)からすべての釘の迂りを、 $q-S$  また、の関係から、すべての釘の剪断力を得る。
- ② 式(9)から外部モーメント (荷重) を得る。
- ③ 式(13)から  $W_0(FZ)$  を、したがって、式(12)からたわみを得る。

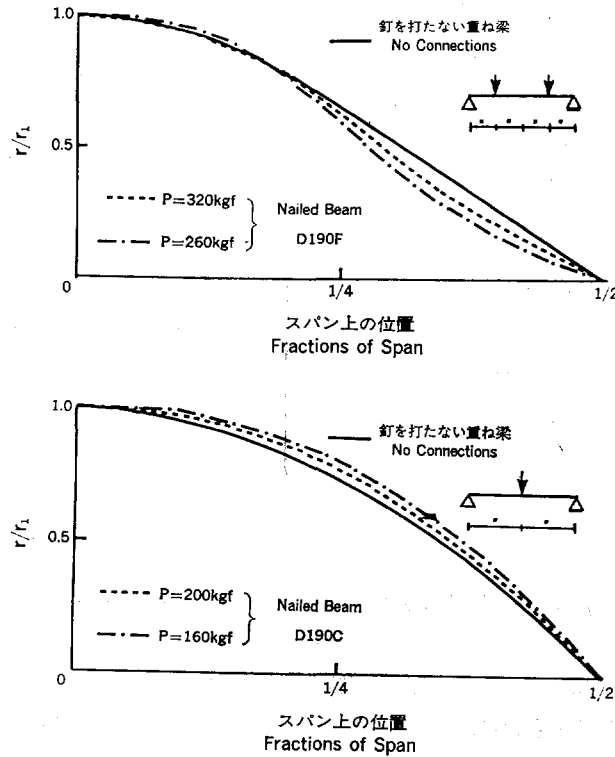


Fig. 3. 釘着梁と釘を打たない重ね梁のり分布の比較  
Comparison of slip distribution of nailed beam  
with that of no connections beam.

#### 4. 実 験

##### 4.1 試験体と試験方法

Table 1 に示す 2 層釘着梁, あるいは 3 層釘着梁を試験した。ラミナには十分に自然乾燥したベイツガの 2" × 4" 材を使用し, 釘着面における摩擦の影響を少なくするためにプレーナ掛けを行った。仕上り寸法は, 幅 84.2 mm, せい 36.8 mm であった。

釘は N65 を使用し, 間隔 90 mm で単列, または 2 列に打った。

曲げ試験は, Fig. 4 および Photo. 1 に示すように, スパン 1800 mm の 4 等分 2 点荷重, または中央集中荷重方式にて行った。なお, ラミナ, 釘を打たない重ね梁, 釘着梁の三つの状態での曲げ試験を順次行った。

スパンを 8 等分する点でのたわみと, 梁の端部における層間りを, 歪変換式の変位計で測定した。

各釘のりりを, スクリューコンパレータで測定した。その測定原理は以下のごとくである。まず, ラミナの釘着位置の側面に, カミソリで上下方向の細い刻線を入れる。荷重が加わりりりが生じると, 上下ラミナの刻線に開きが生じる。この開きはりりそのものである。このキズの開きをスクリューコンパレータで測定する。望遠鏡の移動距離がキズの開きに相当することになるが, それを精度 1/1000 mm のエンコーダ式変位計で測定した。しかし, この方法の精度は, カミソリキズの細さと, キズにクロスヘアを合わ



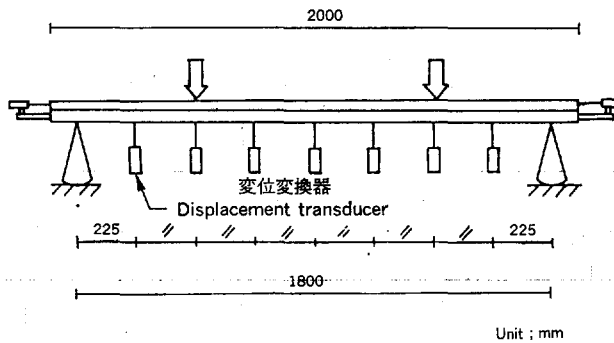
Table 1. 釘着梁試験体  
Test specimens of nailed beam.

試験体 Specimen	ラミナ Layers*		釘列数 Nailing***	荷重方式 Loading	
	層数 ply	曲げヤング係数 MOE (kgf/cm <sup>2</sup> )			
D190F	2	122600	117400	1	4等分2点荷重 Two point
D290F	2	85800	92600	2	"
T290F	3	145400**	148600	2	"
D190C	2	135900	104800	1	中央集中荷重 Central point
D290C	2	127400	140000	2	"
T290C	3	135900**	123700	2	"

\* 寸法は 84.2 mm(せい)×36.8 mm(幅)  
The dimension is 84.2 mm(W)×36.8 mm(D)

\*\* 外層の曲げヤング係数の平均値  
Average MOE of outer layers

\*\*\* 釘間隔は 90 mm  
Nail spacing is 90 mm

Fig. 4. 釘着梁の曲げ試験  
Bending test of nailed beam.

せる技術に依存する。同じサンプルを10回繰り返して測定したバラツキから、その精度を1/20 mm程度と判断した。スクリーコンパレータを Photo. 2 に示した。

試験体 D290F, D290C では、スパン中央附近, 1/4 スパン附近でラミナの歪を歪ゲージで測定し、そのせい方向の分布を求めた。

釘接合部の剪断力一辺りの関係を得るために、Fig. 5 に示す接合部剪断試験を行った。辺りは2本の歪変換式変位計で測定し、アナログコンピュータで平均処理を行った後、X-Y レコーダに記録した。ここで使用した X-Y レコーダは、フルスケールになると、その電圧を相殺する電圧が自動的に供給され、ペンはゼロの位置へ移動して記録を続けるので、荷重一辺り曲線の初期の立ち上がりでも十分な精度で記録することができる。得られたグラフをディジタイザで読み取り、磁気テープに収録した。

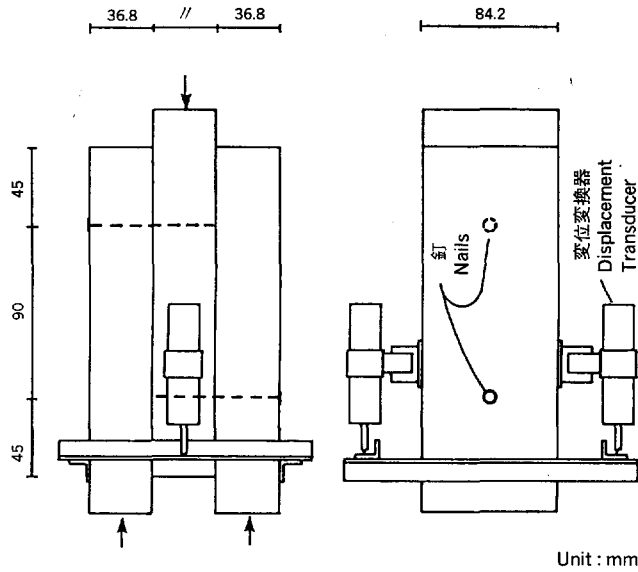


Fig. 5. 釘接合部の試験  
Nailed joint test.

Table 2. 釘着梁の耐力の計算値と実験値との比較  
Comparison of calculated load with experimental load, nailed beam.

試験体 Specimen	W=6 mm 時 at W=6 mm		W=18 mm 時 at W=18 mm	
	実験値 理論値 Exp. load Theo. load	実験値 近似式計算値 Exp. load Approx. load	実験値 理論値 Exp. load Theo. load	実験値 近似式計算値 Exp. load Approx. load
D190F	0.94	0.92	0.99	0.98
D290F	0.99	0.91	0.99	0.97
T290F	1.08	1.03	1.02	1.01
D190C	0.93	0.98	0.94	0.94
D290C	0.90	0.93	0.93	0.93
T290C	0.91	0.93	0.92	0.92
(Ave.)	0.96	0.95	0.97	0.96

4.2 実験結果と考察

たわみについて 釘着梁の荷重たわみ曲線を Fig. 6 に示した。これらの図から、計算値と実験値とは良く一致していること、また、近似式は理論式と差のない解を与えていることが看取される。

Table 2 は、たわみが 6 mm (スパンの 1/300), 18 mm (同 1/100) 時の荷重について、実験値と計算値とを比較したものである。実験値と計算値との差は平均で、5%以下となっている。

Fig. 7 は、たわみ曲線 (スパン中央のたわみに対する比で示してある) を示したものである。

計算では、釘着梁のたわみ曲線は、普通の梁のそれより下にきているが、実験でもそれが正しく観測されている。但し、その差は僅少である。

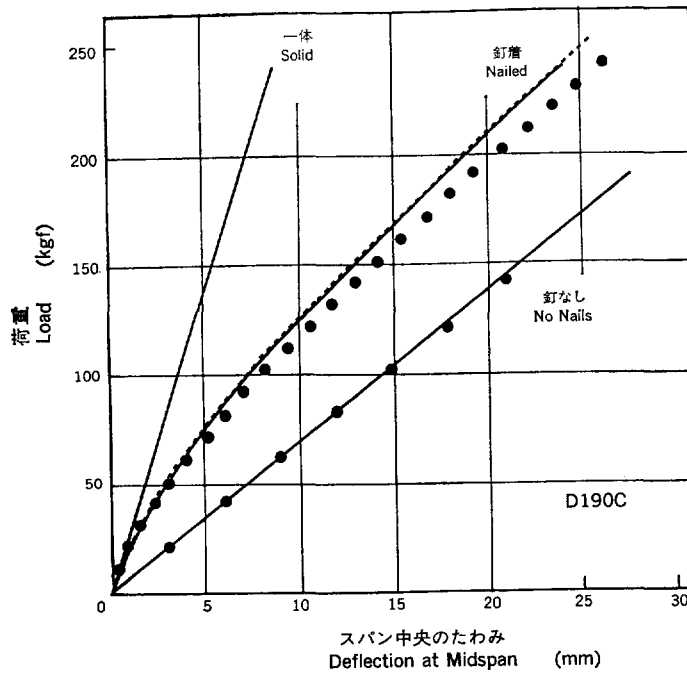
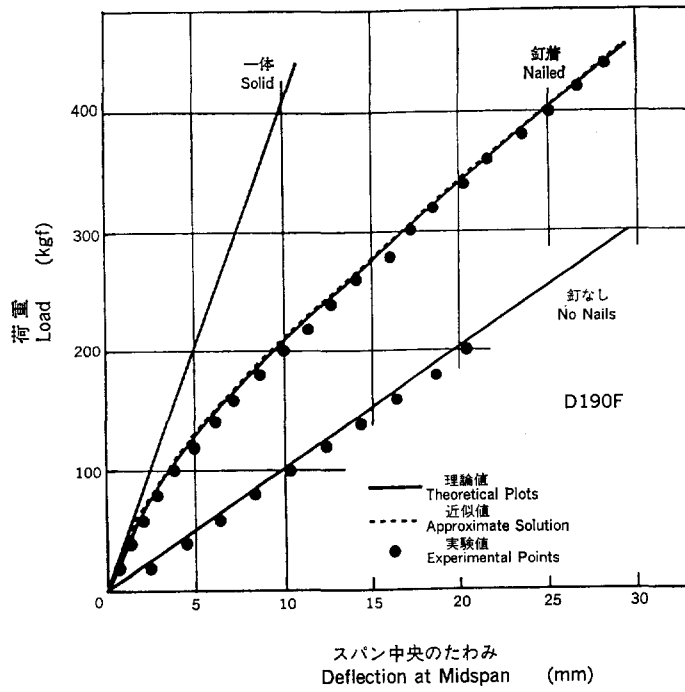


Fig. 6. 荷重 - たわみ 曲線  
Deflection versus load.

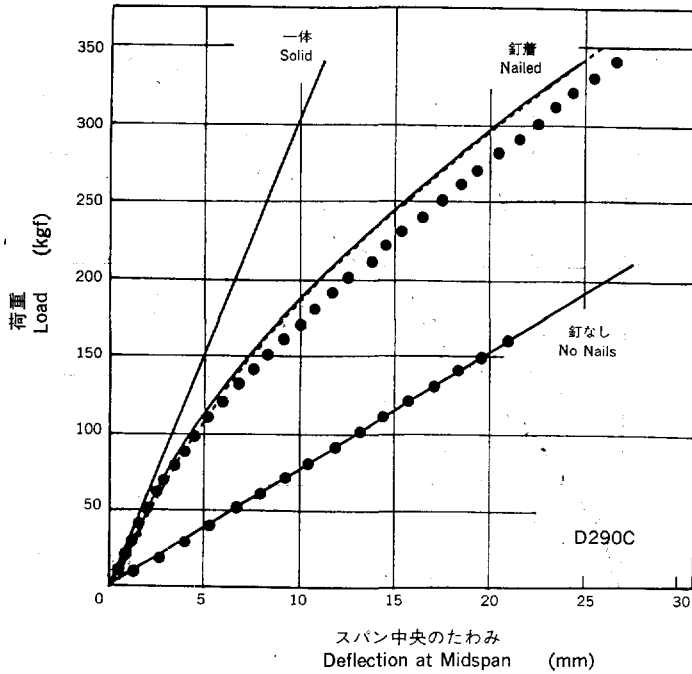
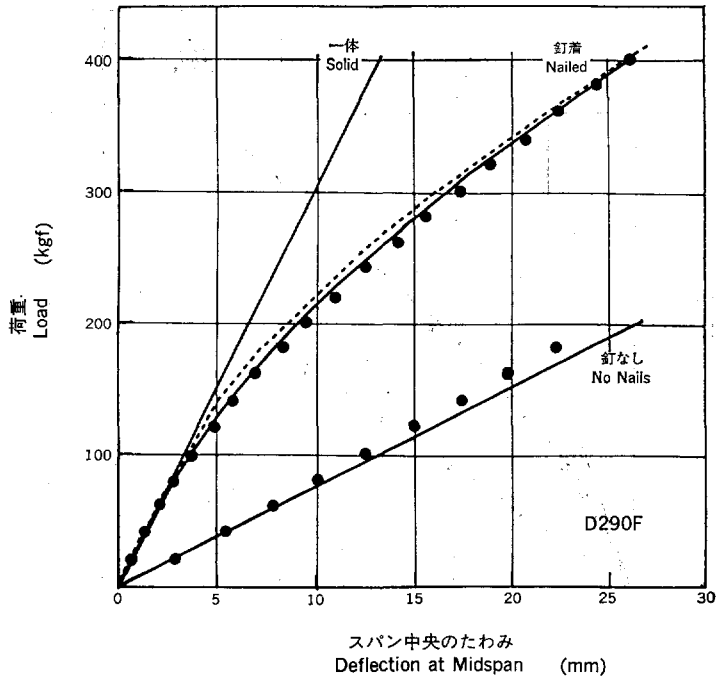


Fig. 6. (つづき) (Continued)

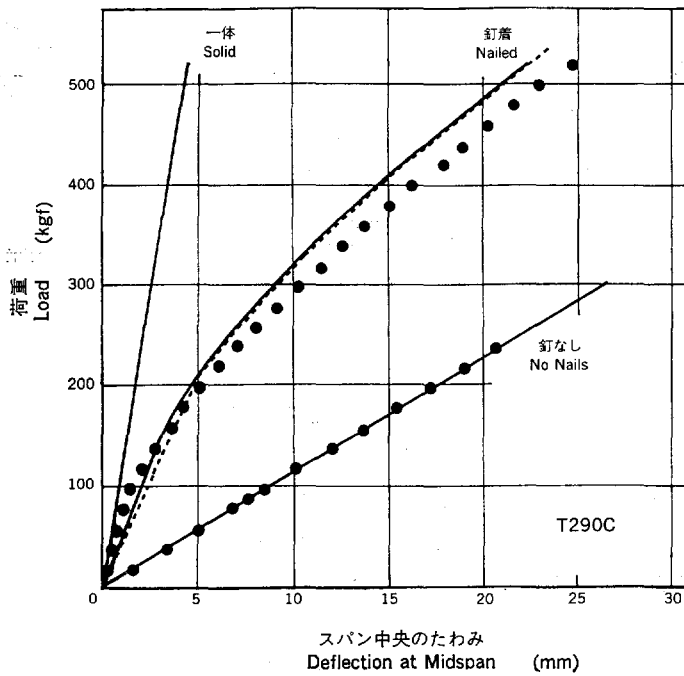
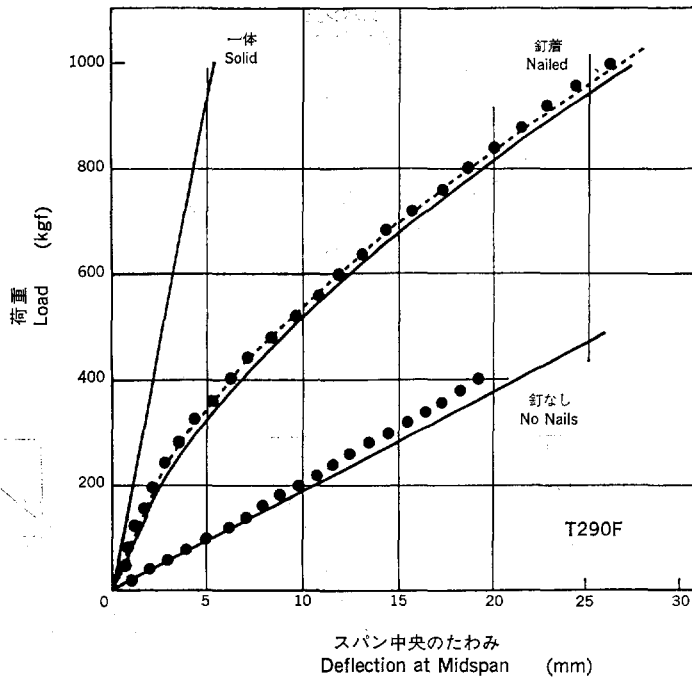


Fig. 6. (つづき) (Continued)

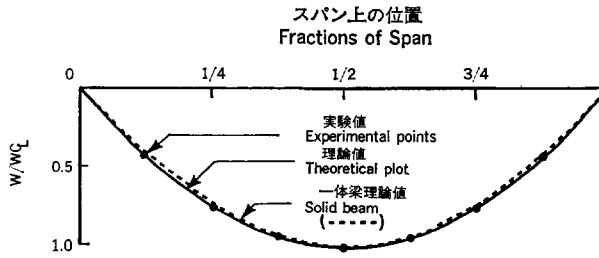


Fig. 7. 釘着梁のたわみ曲線  
Typical deflection curve of nailed beam.

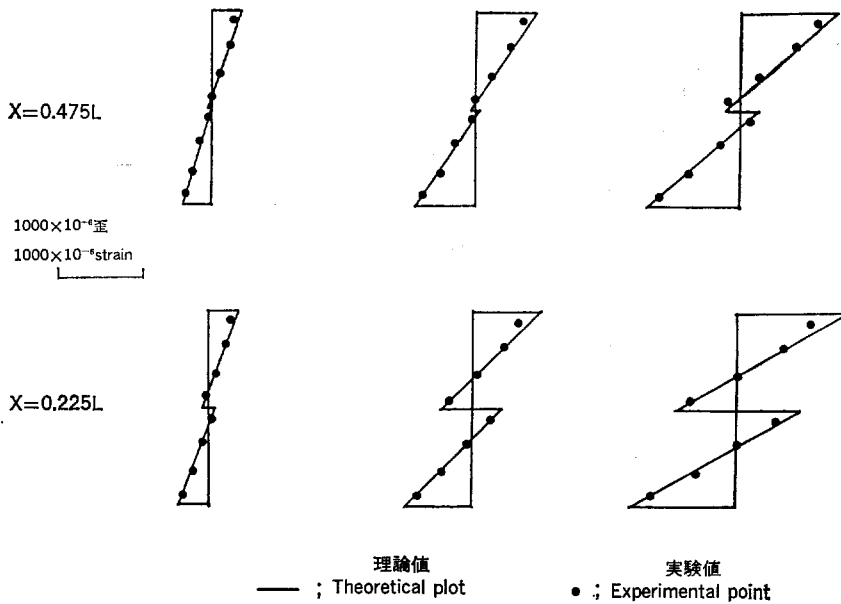


Fig. 8. 釘着梁の歪分布  
Strain distribution of nailed beam.

ラミナの歪について 一部の試験体では、ラミナの歪分布を測っている。Fig. 8 は、その一例を示したものである。計算値と実験値とは良く一致しており、これは計算仮定(イ)軸力  $F$  は、ラミナの断面に等しく分布することがほぼ満たされていることを示唆している。

釘着層のひびきについて 釘着梁端部のひびきを Fig. 9 に示した。一部に、実験値と計算値との開きがわずかにあるものもあるが、全体的に良く適合している。

Fig. 10 は、コンパレータを用いて測定したひびきのスパン上の分布を示したものである。測定精度があまり高くないので、データのバラツキがあるが、ひびきの分布の形をよくとらえているといえよう。

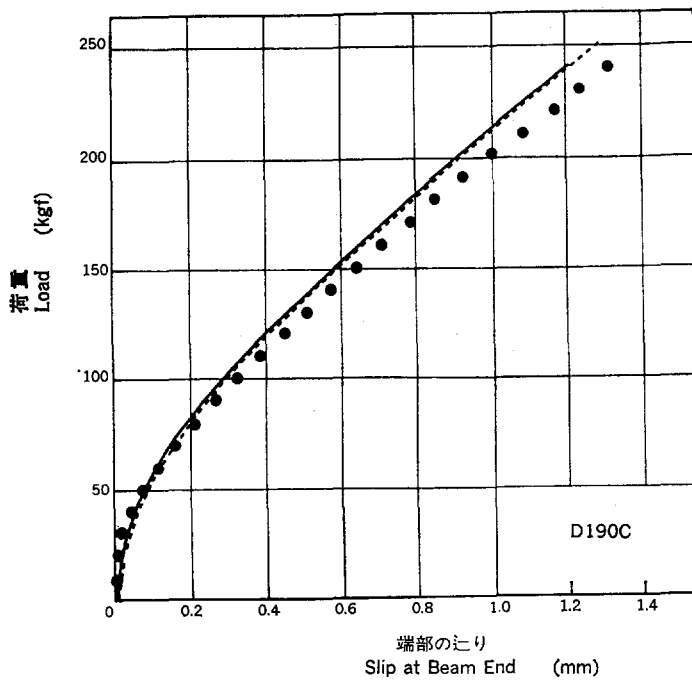
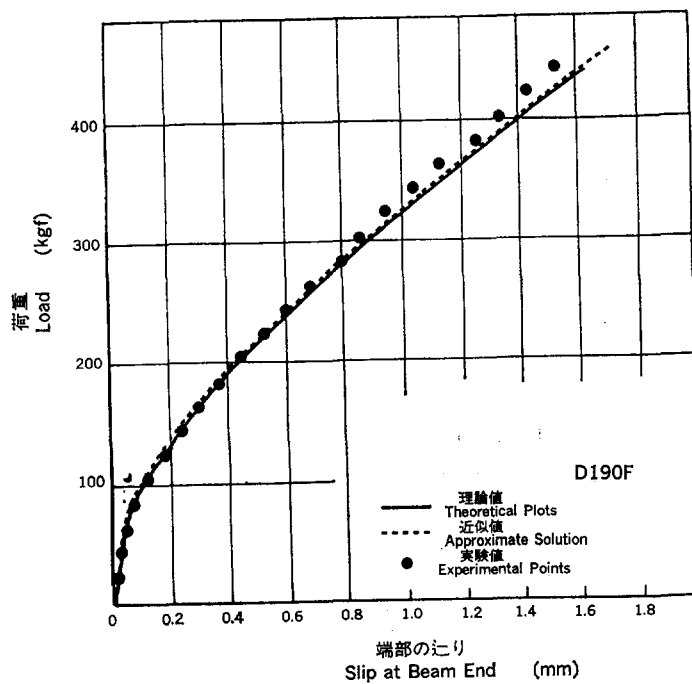


Fig. 9. 荷重 - 梁端部のはり曲線  
Slip at beam end versus load.

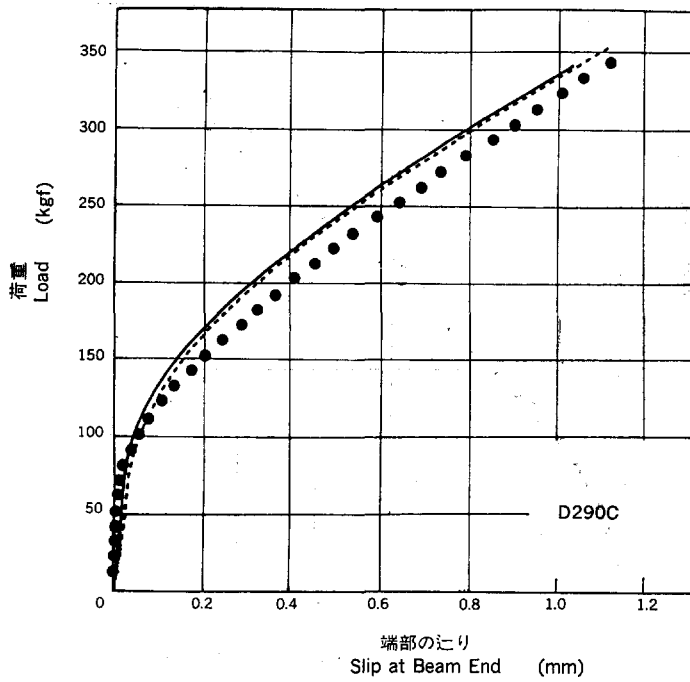
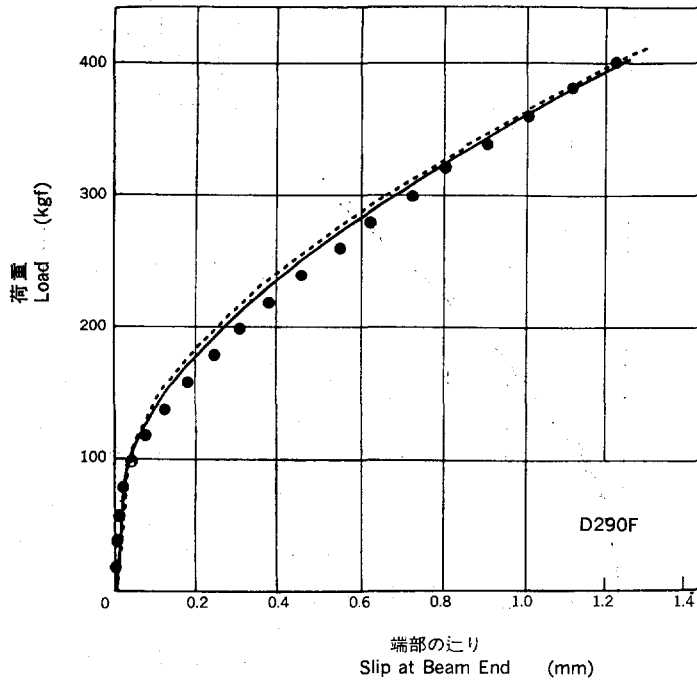


Fig. 9. (つづき) (Continued)



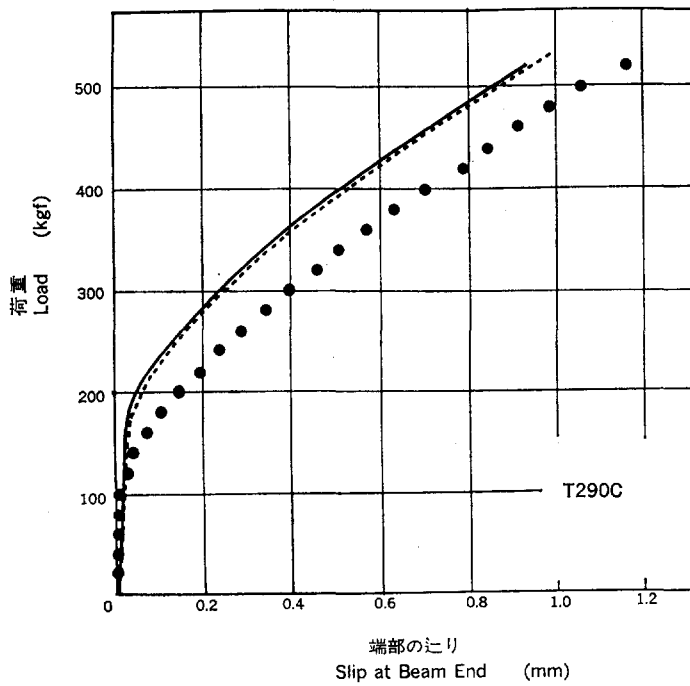
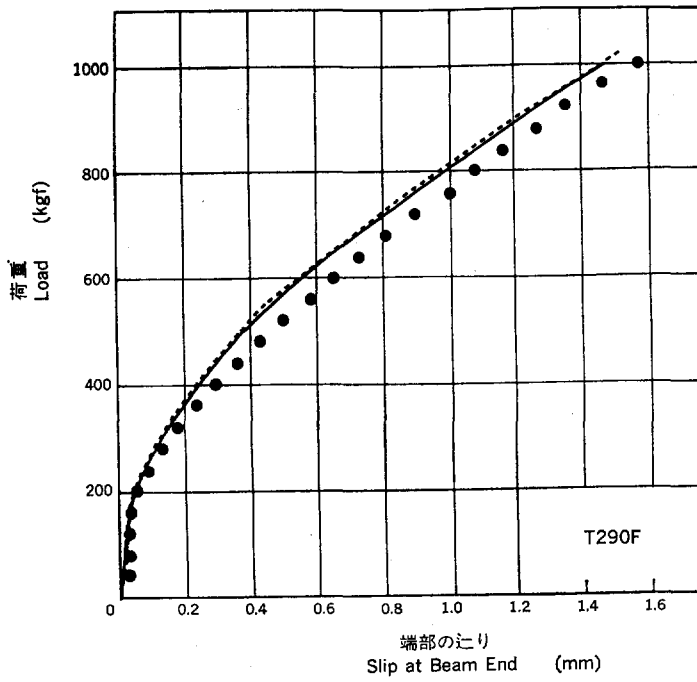


Fig. 9. (つづき) (Continued)

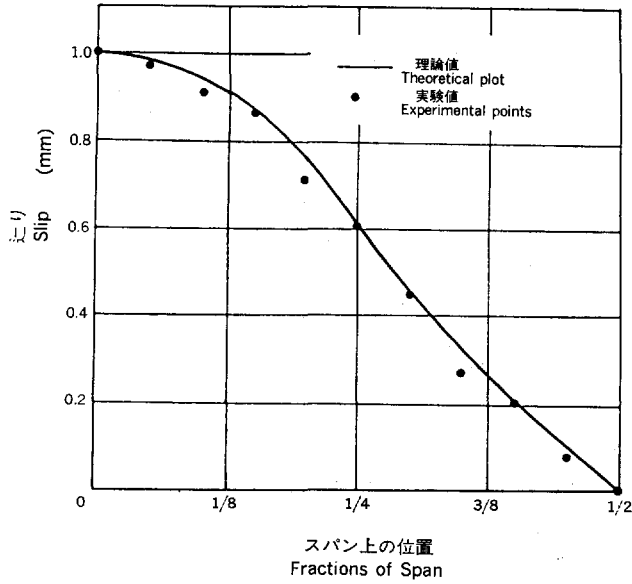


Fig. 10. 釘のスパン方向分布  
Typical slip distribution along the span.

### 5. 数 値 実 験

パラメータの影響を調べるために数値実験を行った。試験体として、D190Fを選んだ。

#### 5.1 荷重方式が剛性に及ぼす影響

普通の梁の場合、荷重方式が変わっても、その剛性  $EI$  は変らない。しかし、釘着梁の場合、総荷重の値が同じでも荷重方式が違くと、釘剪断力の分布が異なるので、剛性も変化する。

Fig. 11 は、総荷重  $P$  を一定にしたまま荷重点を変えていったときの、スパン中央のたわみの変化を調べたものである。たわみは、中央集中荷重のときに対する比で表してある。この図から、釘着梁の場合、中央集中荷重のときが、最も低い剛性を示すことがわかる。

#### 5.2 スパンの長さの影響

釘着梁は、釘を打たない重ね梁と接着梁との中間の剛性を有する。そこで、次の係数  $K$  を考えると、これは、釘着梁の剛性を良く表すと考えられる。

$$K = \frac{P - P_0}{P_G - P_0}$$

ここで、 $P$  : 釘着梁の荷重

$P_0$  : 釘着梁と同じたわみのときの、釘を打たない重ね梁の荷重

$P_G$  : 釘着梁と同じたわみのときの、接着梁の荷重

$K$  は、釘を打たないときゼロ、接着のとき 1 になる。 $K$  を緊結度係数と呼ぶこととする。

Fig. 12 は、釘着梁のスパン中央のたわみが 6 mm のときの緊結度係数の変化を示したものである。これから、釘着梁は、一定のたわみ制限の下では、スパンが長いほど有効であるといえよう。

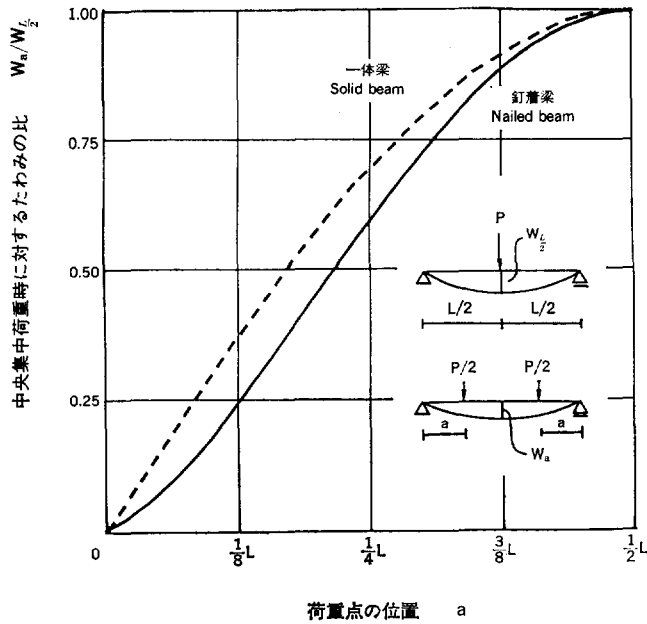


Fig. 11. 荷重方法が釘着梁剛性に及ぼす影響  
Effect of loading method on stiffness.

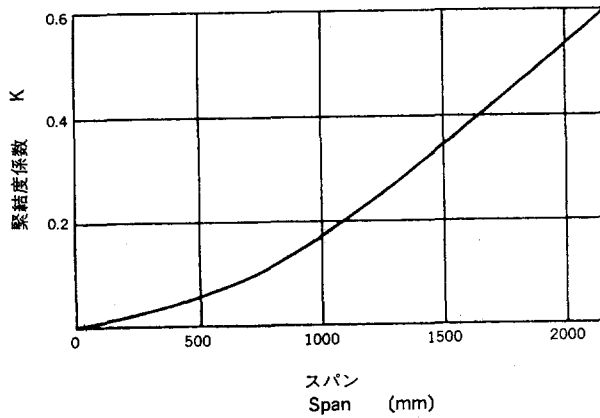


Fig. 12. スパン長さが緊結度係数に及ぼす影響  
Effect of span length on  $K$ .

### 5.3 釘間隔の影響

Fig. 13 は、釘着梁の釘本数を変えたときの緊結度係数の変化を示したものである。この梁の場合、釘本数を増やしていくと、かなり直線的に緊結度係数が上昇することがわかる。

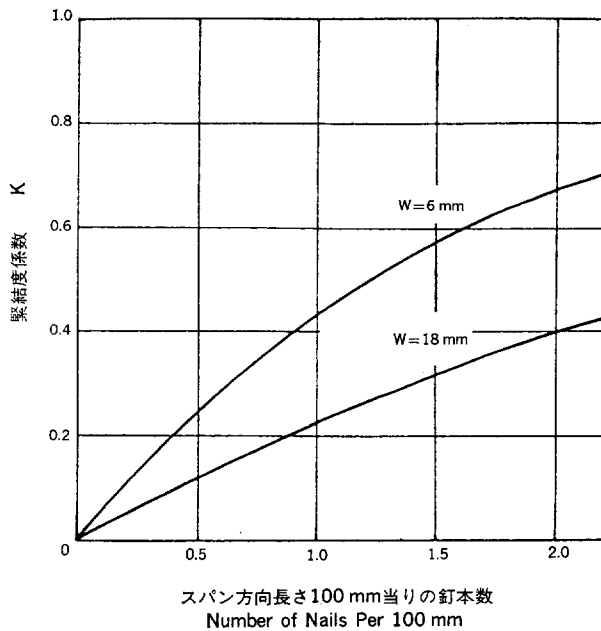


Fig. 13. 釘本数が緊結度係数に及ぼす影響  
Effect of number of nails on K.

## 6. 結 論

釘着パネルの非線形曲げの解析を行うにあたって、基本モデルとして釘着梁の解析を行った。ここに誘導した理論式は、逐次近似法によって解くことになったが、従来の方法のように有限要素を必要としないものである。計算を行うにあたって電子計算機を必要とするが、プログラムは簡単である。また、紙上で計算できる近似式も併せて誘導した。近似式の精度は良く、理論式とほとんど差のない解を与えることがわかった。

実験を行って、計算式の適合性を検討した結果、非常に良好であることがわかった。

さらに数値実験を行って、釘間隔、荷重方式、スパンの長さなどのパラメータが釘着梁の剛性に及ぼす影響を調べた。その結果、釘間隔をつめたときの剛性の上昇度合が得られた。また、中央集中荷重に対する剛性は他の荷重方式と比べてもっとも低いことがわかった。さらに、スパン長さに対する一定の比率のたわみ制限下では、スパンが長いほど剛性が高いことがわかった。

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、数々の助言を賜った当场構造性能研究室の畑山巖男、平嶋義彦の両氏に、心から謝意を表します。また、試験体の作製にあたり、ご協力をいただいた木工室の方々にお礼を申し上げます。

## 引用文献

- 1) 神谷文夫：面材を釘打ちした耐力壁のせん断剛性および強度に関する理論的研究，日本建築学会論文報告集，309，86～94，(1981)
- 2) 高等建築学，8，木構造，p.262，(1934) に紹介
- 3) 後藤一雄：木造重ね梁計算法の一考察，日本建築学会論文集，21，205～212，(1941)
- 4) 後藤一雄：撓みを一定限度に収めんとする場合の木造重ね梁設計法一案，日本建築学会論文集，29，187～192，(1943)
- 5) 河野輝夫：新発明合成ラーメン式重ね梁に就いて，建築世界，36(3)，(1942)
- 6) 鷲尾健三：ラーメン式重ね梁の計算式に就いて，日本建築学会論文集，26，123～128，(1942)
- 7) 辻井静二：木造鋼木組立材の曲げ剛性，日本建築学会研究報告，20，(1952)
- 8) 辻井静二：木造複合材の曲げ剛性及び強度に対する計算式，日本建築学会論文報告集，53，(1956)
- 9) 辻井静二：木造複合材におけるつなぎの配置，千葉大学工学部研究報告，8(14)，(1957)
- 10) 後藤一雄：木造重ね梁設計法，日本建築学会論文集，49，112～117，(1954)
- 11) 菱田一郎・真野 創：木船縦強度の理論的研究 (第1報)，造船協会論文集，104，131～137，(1959)
- 12) 沢田 稔：2層釘着梁の曲げ剛性と強度，北大演習林報，33(1)，139～166，(1976)
- 13) 沢田 稔・山田順治：木造釘着組立梁の腹材有効剛比，北大演習林報，35(1)，123～138，(1978)
- 14) AMANA, E. J., and L. G. BOOTH: Theoretical and Experimental Studies of Nailed and Glued Plywood Stressed-skin Components: Part I, Theoretical Study, J. of the Institute of Wood Sci., 4(1). 43～69, (1967)
- 15) AMANA, E. J., and L. G. BOOTH: Theoretical and Experimental Studies of Nailed and Glued Plywood Stressed-skin Components: Part II Experimental Study, J. of the Institute of Wood Sci., 4(2). 19～34, (1967)
- 16) ITANI, R. Y., and G. S. HIREMATH: Partial Composite Action in Diaphragms, J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 106, No. EM 4. 739～752, (1980)
- 17) ITANI, R. Y., H. M. MORSHED, and R. J. Hoyle: Experimental Evaluation of Composite Action, J. of the Structural Division, ASCE, 107, No. ST 3. 551～565, (1981)
- 18) GOODMAN, J. R., M. D. VANDEBILT, M. E. CRISWELL, and J. BODIG: Composite and Two-way Action in Wood Joist Floor Systems, Wood Sci., 7(1). 25～33, (1974)
- 19) TREMBLAY, G. A., GOODMAN, and M. E. CRISWELL: Nonlinear Analysis of Layered T-beams with Interlayer Slip, Wood Sci., 9(1). 21～30, (1976)
- 20) 辻野哲司・小泉章夫：2層釘着梁の非線形曲げ解析，木材誌，29(9)，553～557，(1983)

**Nonlinear Analysis of the Nailed Stressed-Skin Panel I**  
**Analysis for nailed layered beams as a basic model**

Fumio KAMIYA<sup>(1)</sup>

Summary

The objective of this study is to develop a basic theory for the analysis of the nonlinear bending behavior of the nailed layered components.

For the analytical procedure, the numerical repetitive calculation and electronic computer are needed. A simple procedure which enable us to predict the approximate behavior without the computer is also presented. The validity of the procedures are examined by conducting the experiments. Both procedures give excellent agreements with the experimental results.

---

Received December 27, 1983

(1) Wood Utilization Division

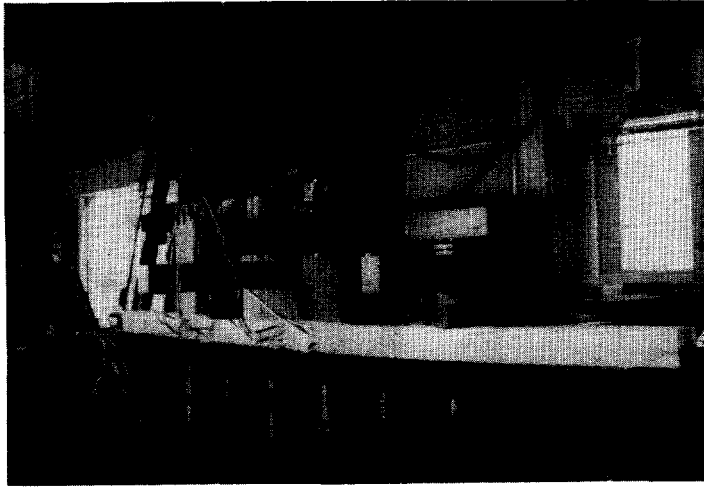


Photo. 1. 釘着梁の曲げ試験  
Bending test of nailed layered beam.

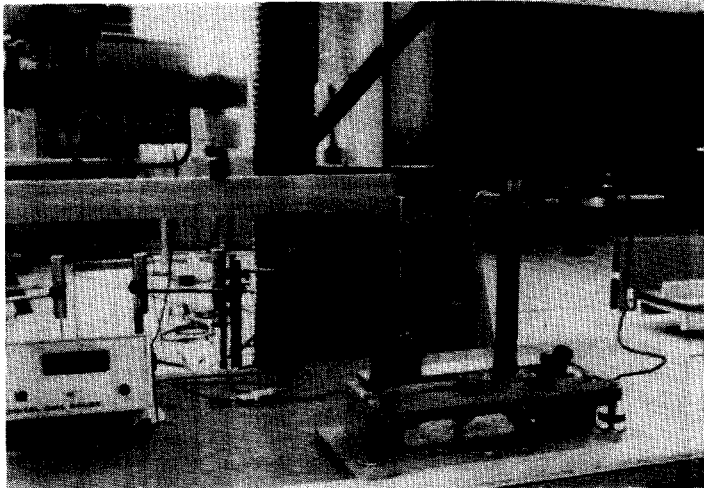


Photo. 2. 釘着層の辻りの測定に用いたスクリーコンパレータ  
Screw comparator used for measurement of nail slip.