

釘接合部の構造減衰並びに剛性に関する研究

金 多 潔

STUDY OF STRUCTURAL DAMPING AND STIFFNESS IN NAILED JOINTS

by Kiyoshi KANETA

Synopsis

A theoretical study of the structural damping and stiffness in nailed joints has been made. The analysis is based on a hypothetical mechanism of a nailed joint. The structural damping is discussed in terms of the specific damping capacity, and the stiffness is expressed by a "backbone" curve. The theoretical results indicate that the main sources of damping are the friction between frame and sheet and the plastic yielding of the wood in the neighborhood of the nails.

Experimental investigations of the damping and the "backbone" curve of single nailed joints as well as of simple composite nailed structures have been made. Test results have been found to check favorably with the theoretical analysis; they show that the load-distortion and energy loss-distortion characteristics of composite framed panels can be predicted with reasonable accuracy whenever their loading conditions are prescribed and the characteristics of one nailed joint is known.

1. 序 論

本研究は主として組立構造物が大きな動的荷重を受ける場合を対象とする。何となれば小さな荷重のもとでは構造物の挙動は弾性的であり、その応力は降伏点以下であるからである。大きな動的荷重によつて、ある組立架構の挙動はその荷重と変形の関係が非線型になり、また荷重—変形曲線には履歴が認められて非常に興味深い問題を提供するのである。

構造物の安全性に対してその減衰性状は重要な役割を演ずる。架構に構造減衰が存在することは、それが構造物の振動エネルギーを吸収することによつて衝撃的な外力に対する抵抗を増大するゆゑ、非常に望ましいものといえる。減衰を定量的に表わすのに振動の1サイクルごとの specific damping capacity がしばしば用いられるが¹⁾、この量は振動系の復元力と減衰の特性に密接な関係を有するものである。

1自由度の構造物については次のような三つの微分方程式を用いて、それぞれ構造物の運動を記述することができよう。すなわち、

慣性力+線型復元力+複雑な減衰力=外力

慣性力+非線型、1価復元力+複雑な減衰力=外力

慣性力+非線型、2価、履歴性復元力=外力

履歴型の荷重—変形特性を含めた種々の形の減衰力及び復元力をもつ単純な構造物の減衰性に関する基礎的な事柄は、色々な型の1自由度系について、荷重と撓み量との関係並びに繰返し載荷の過程における変形の振巾とエネルギー損失量との関係に注目して、後節で考察が加えられる。

われわれは主に組立架構の構造減衰の性質を探索しその量を求めることを目的としたから、組立架構の最も単純な形として、2×4吋の骨組材に Ply-wood, Sheetrock 及び Masonite の板を釘打ちしたものを選

んだ。この種の構造ではその釘接合部に非常に大きな減衰性を有することが観察された。従つて、かかるパネルの減衰性及び剛性を定量的に評価するため総計45の試験片について釘接合部の試験を行なつたのである。

組立架構の構造減衰を実験的に評価するためには、定常あるいは非定常状態の振動を観察する動力学的方法も考えられるが、非線形の荷重—変性曲線の形状は変形量と荷重の前歴 (history) に大いに関係することから、われわれは静的試験を採用した。この静的試験では同じ大きさの荷重を正および負の方向に載荷するような繰返し荷重を与え、最大荷重の大きさは各サイクルごとに变化させた。この実験的研究結果は後に詳述される。

2. 釘接合部の構造減衰並びに剛性に関する理論的考察

(1) Specific Damping Capacity

構造物の減衰性及び剛性はその構造物の安全度に対して重要な意味をもつ。構造減衰性はエネルギーを吸収することによつて振動の振巾を制約し応力振巾を増大せしめない作用をなし、構造物の剛性はまたそれが構造物の静荷重に対する抵抗力に関係する。動的荷重に対しては減衰と剛性は質量とともにその架構の動的特性すなわち架構の固有振動数と振動減衰率を決定づける。

減衰性は今まで色々な研究者によつて測定法や解析の仕方による種々な方式で表示されてきた。多くの場合、減衰性を計る実験のデータは対数減衰率で示されるが、この表示方法は減衰が小さい場合に自由振動の減衰の機構が等価な粘性減衰、すなわちそれが振動系の変形速度に比例し、逆方向に働らく一つの力で代表されるものとして解析し得るという仮設に基づいたものである。この場合の比例常数を粘性減衰係数という。しかし減衰が小さくなく、しかもそれが粘性減衰とは性質を異にするような場合には von Heydekampf が名付けた specific damping capacity による表示が減衰に基づく影響を測る上に合理的な方法である。

Specific damping capacity Ψ は1サイクル当りのエネルギー損失量 ΔW と系の最大歪エネルギー W の比として定義される。すなわち、

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Coulomb 減衰、粘性減衰、あるいは速度の2次または高次の冪に比例するような減衰力をもつ簡単な線型の質点—バネ系については、それぞれの場合の specific damping capacity の値を求めることができる。例えば、1サイクル当りのエネルギー損失量は

$$\text{Coulomb 減衰に対して, } \Delta W = 4cU/k, \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{粘性減衰に対して, } \Delta W = 2\delta W = k\delta U^2 \dots\dots\dots (3)$$

のように表わされる。ここに、

c = 変形の単位速度当りの摩擦力、

k = バネ常数、

δ = 対数減衰率、

U = 系の最大変形量 (振巾)。

これらの式から Coulomb 減衰の場合は1サイクル当りのエネルギー損失が系の変形振巾の1次の冪に比例し、また粘性減衰の場合は系の振巾の2次の冪に比例することがわかる。振動系に速度の2次または高次の冪に比例する減衰力が働らく場合にも、1サイクル当りのエネルギー損失量は振巾の関数として表現することができる。

振動系が複雑な減衰力と非線型の1価復元力をもつ場合、あるいは非線型の2価復元・減衰力 (履歴ループ) をもつような場合には specific damping capacity を変形振巾の関数として簡結な式で解析的に表現

することは一般には不可能である。組立架構の荷重—変形特性は主に履歴ループのタイプであつて、この場合は1サイクル当りのエネルギー損失はその履歴ループが囲む面積を測つて求められる。

(2) 釘接合部の機構に関する仮設

Fig. 1 には代表的な釘接合部の変形の模様を示す。接合部に加えられた荷重によって釘は剪断力を受け、したがつて釘にはその長さ全体にわたつてある形に分布した曲げモーメントを生ずる。釘に接する側板 (sheet) と骨組材 (frame) の微小な部分は載荷各サイクルごとに塑性変形を受ける。その結果、釘は傾斜し接合部の変形、すなわち釘の位置における側板と骨組材との間の相対変位が生ずる。

釘接合部の剛性は釘の剪断及び曲げ剛性、側板と骨組材の塑性性質、ならびに側板と骨組材との間の摩擦力によつて決定される。繰返し載荷によつて側板および骨組材の塑性変形部分は各サイクルごとに増大し、釘にも相当な量の塑性変形が生じ、このためエネルギーは釘と木材の中に逸散してしまう。

釘の内部に逸散する塑性歪エネルギー量を求め、これを接合部におけるエネルギーの総損失量と比較することは先ず重要である。いま1本の“A”型の釘 (後述)

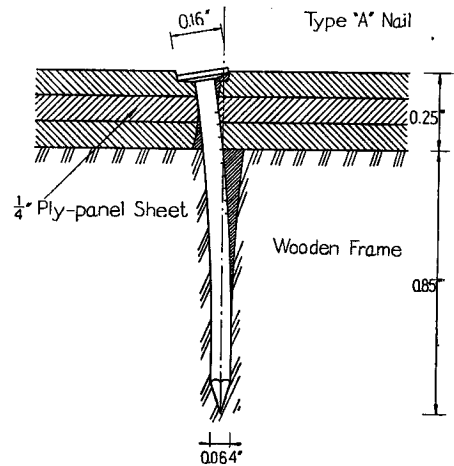


Fig. 1

述) が Fig. 2 に示すような寸法を有するものとする。曲げを受けた釘の完全塑性の状態では塑性モーメントが釘全長にわたつて働いているものとし、そして釘の形状を円弧と仮定すれば、釘1本当りの弾性及び塑性仕事の上限をつぎのように計算することができる。

$$\text{Max. } W_{elast.} = (1/2) M_{elast.} \theta_{elast.}, \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{及び } \text{Max. } W_{plast.} = M_{plast.} \theta_{plast.}, \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{そして, } M_{elast.} = \sigma_y I / r, \dots\dots\dots (6)$$

$$\theta_{elast.} = \sigma_y l / Er, \dots\dots\dots (7)$$

$$M_{plast.} = \sigma_y S = \sigma_y r / 3, \dots\dots\dots (8)$$

$$\theta_{plast.} = \frac{y_{max} - y_{elast.}}{l/2}, \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

l = 釘の長さ、

r = 釘の半径、

I = 釘の断面二次モーメント、

S = 釘の断面一次モーメント、

E = 鋼の弾性係数、

σ_y = 鋼の降伏点応力、

y = 撓み量。

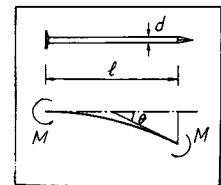


Fig. 2

“A”型釘については $I = 83 \times 10^{-8} \text{ in}^4$, $I/r = 26 \times 10^{-6} \text{ in}^3$ 及び $S = 43 \times 10^{-6} \text{ in}^3$ である。Table 1 には釘の0.3時の撓みに至る弾塑性仕事 E を三通りの降伏点応力の場合について計算して示した。

釘の撓みと釘内に消散されるエネルギーとの関係は Fig. 3 に示される。釘接合部の変形には、釘に接する木材の塑性降伏ならびに繰返し載荷の間の釘の傾斜が関与するから、釘自身の変形は接合部の変形量の約

Table 1

σ_y	$M_{elast.}$	$Y_{elast.}$	$\theta_{elast.}$	$E_{elast.}$	$M_{plast.}$	$\theta_{0.3''}$	$E_{0.3''}$
6×10^4 psi	1.56#"	0.0375"	0.0682 rad	0.053#"	2.60#"	0.48 rad	1.25#"
5×10^4	1.30	0.0313	0.0568	0.037	2.16	0.49	1.06
4×10^4	1.40	0.0250	0.0455	0.024	1.73	0.50	0.87

半分位であるとみなされるが、第3節の結果からは釘内部のエネルギー消散量は釘接合部1サイクル当りの全エネルギー消散量に比べて非常に小さいことがわかる。

(3) 釘接合部のグループに対する構造減衰と剛性の解析

本研究の前半では基本的な1対の釘接合部の変形とエネルギー損失特性が注目せられているが、しかし幾つかの釘接合部をもつ簡単な組立架構については、つぎのような疑問が生ずる。すなわち1対の釘接合部に関する結果は、より複雑な組立架構に対してもかなり十分な精度で拡張することができるであろうか？ また組立架構について実験的に得られた特性は、1対の釘接合部の荷重—変形曲線に基づいた計算結果と満足すべき一致を見るであろうか？

このことに関連して1群の釘接合部が互いに如何なる協力状態を示すかという問題を検討してみよう。最初の例として長さ23吋、6対の釘接合部を有する一種の組立梁を考える。その形状、寸法及び釘の配置を Fig. 4 に示す。この梁を剛な床の上に水平に置いてその2×4吋の骨組材の一端に荷重 P を加える。1回の載荷および除荷の後、梁を上下裏返しにして、つぎの半サイクルの載荷および除荷が行なわれる。このような方法で梁に繰返し荷重を加えることにより、荷重の作用点における荷重—変形量の関係が求められる。

2×4吋の材は荷重 P 及び釘接合部からの反力を受けるから、材には荷重の作用点とは反対側の端部付近において鉛直方向の変位が起らず、材がその周りで回転変位のみをもつような一点が存在する。しかし各接合部の反力は接合部の変形量の非線型関数であるから、釘と木材の挙動性状は厳密に言えば弾塑性地盤上に横たわる弾塑性梁の問題に帰着する。ここではしかし、この問題の厳

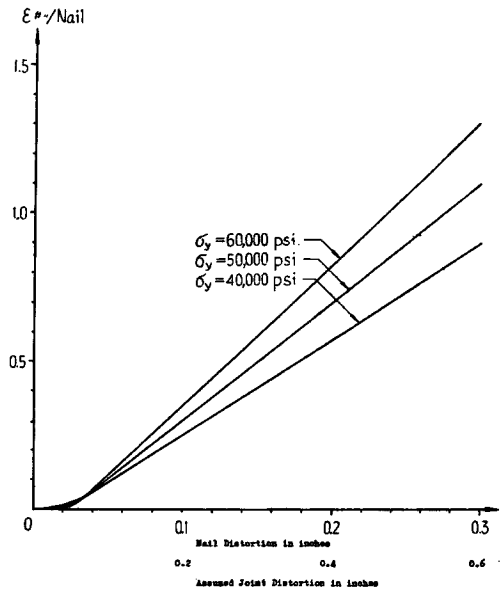


Fig. 3

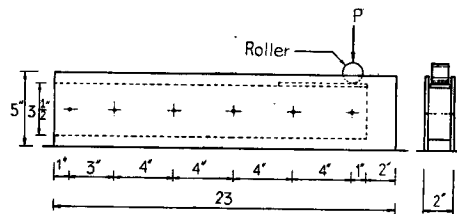


Fig. 4(a) Beam type specimen

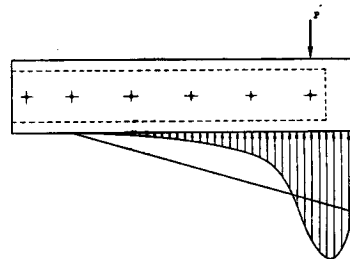


Fig. 4(b) Qualitative distribution of reaction and a possible simplification

密解については論じないことにする。

骨組材と側板自身の変形は釘接合部における変形量に比べて非常に小さいものと仮定すれば、各接合部の変形量は鉛直変位の生じない一点 O からその接合部に至る距離に比例するものと考えられる。したがって、

Δ = 載荷点の変位、

L = O 点と載荷点との間の距離、

l_i = O 点より i 番目の釘接合部迄の距離

とすれば、 i 番目の釘接合部における変形量 Δ_i は $\Delta_i = \Delta \times (l_i/L)$ で与えられ、したがって i 番目の接合部における反力 R_i は

$$R_i = f_1(\Delta_i) \dots \dots \dots (10)$$

で表わされるはずである。ここに関数 $f_1(\Delta_i)$ はただ 1 対の釘からなる接合部の基本的な荷重—変形の特性を示すものである。ゆえにわれわれは繰返し荷重の大きさ P と載荷点における変位との間につぎのような近似式を得る。

$$P = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n f_1(\Delta_i), \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 n は釘の対の数を表わす。また 1 サイクル当りに消散される梁のエネルギー損失は次式で求められる。

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n f_2(\Delta_i), \dots \dots \dots (12)$$

ただし、 $f_2(\Delta_i)$ はただ 1 対の釘よりなる接合部のエネルギー損失—変形特性を表わす。

3. 釘接合部の構造減衰並びに剛性に関する実験的研究

(1) 構造減衰の測定方法

本節の目的は釘接合による単純な組立架構における減衰量を測定することにある。構造減衰はこのような場合振動の 1 サイクル当りのエネルギー損失量すなわち **specific damping capacity** で表現するのが最も便利である。von Heydekampf らの文献によれば減衰性を測定する幾つかの方法が紹介せられ、それらの各々について論議されている²⁾。これらの方法とは

1. Starting Test,
2. Equilibrium Method,
3. Energy Input Method,
4. Damping or Free Vibration Method,
5. Lateral Deflection Method,
6. Static Method (Hysteresis Test)

などである。このうち最初の三つの方法は程度の差はあれ、いずれも熱力学的な考え方に立脚したものであって、金属の内部減衰の測定などに用いられている。四番目の方法では振動系の質点に急激に荷重を与えて、それによつて起こる自由振動の減衰が記録される。そしてその記録から自由振動の減衰が等価な粘性減衰であると仮定して 1 サイクル当りのエネルギー損失が表現される。第五番目の方法、すなわち水平撓みによる方法は主として機械の回転軸の挙動や回転軸にとつて望ましくない **whirling** の影響に関連した方法である。これら五つの方法はいずれも測定すべき減衰量が小さい場合に限られるので、これらの方法は主として固体物質の減衰量を測定する場合にのみ用いられている。

釘接合部における減衰は相当大きいので上に述べた五つの方法は用いられない。したがって、われわれは **Static Method** (履歴試験) を採用した。この方法では 1 サイクル当りのエネルギー損失量は履歴曲線の囲む

面積を測定することによつて求められる。ところが釘接合部の荷重—変形履歴曲線は変形量と載荷の前歴とに関連した極めて複雑な非線型特性であることが認められており、したがつてわれわれの採つた方法は釘接合部に交差的な、いいかえれば最初1方向に、それから逆の方向に力を加え、そしてその力の大きさを段階的に増大して載荷の各サイクルごとの接合部の変形量を記録するというものであつた。これによつて静的な載荷及び除荷に対する荷重—変形曲線が画かれ、履歴曲線の囲む面積がプランメーターによる数値積分で求められた。この面積が与えられた荷重に対する振動の1サイクルごとのエネルギー損失量を表わすものである。

この静的試験のために Stanford University の構造材料研究所にある Southwark Tate-Emery Universal 試験機が用いられた。試験機は引張および圧縮にそれぞれ 600, 6 000, 24 000, 120 000 封度という幾つかの載荷域を有し、試験に必要な精度に応じて適当な載荷範囲が選定せられる。本実験においては 600 封度の載荷範囲を最も多く使用し、必要に応じてときどき 6 000 封度の載荷域を用いた。

変形の測定には Baldwin Microformer Stress-Strain Recorder を用いた。これによつて試験片の微小な変形量が拡大せられ、加えられた荷重とそれに対応する試験片の変形が回転ドラムの上に自動的に記録せられる。変形量の検定のために dial gauge を併用した。Dial gauge の読みと自記記録装置によるものとの間には数パーセントの誤差があることが認められたが、これは微小な歪量を電氣的に拡大する際の機構に非線型電磁特性が存在するためと思われる。

(2) 試験片及び実験装置の概要

試験片は $1\frac{1}{2}'' \times 3\frac{1}{2}'' \times 8''$ の木片 (フレーム) と二枚の $4'' \times 10''$ の矩形板 (側板) よりなり、矩形板には $1/4''$ 厚の Ply-panel, $1/2''$ 厚の Sheetrock (一種の白堊板) あるいは $0.15''$ 厚の Masonite (木材繊維をプレスして作つた壁材料) の板を用いた。これらを Fig. 5 に示すように2枚の板の両端を揃えて木片の両面に釘打ちした。そして両面の釘接合部が同じ大きさの剪断を受けるように木片の両面にはともに同数の釘を打つた。木片の長さが矩形板よりも2吋短かいのは、試験片の上下に各1吋まで変形し得る余裕を与えるためである。

木片と Ply-panel の各面は紙で平滑な面に仕上げた。Masonite 板は片面が平滑であるが他面は細かい凹凸がある。したがつて、粗面および滑面がそれぞれ木片に接するような試験片を作り、これによつて側板の表面の粗度が及ぼす影響をみた。

これらの試験片について行なつた実験は色々な種類の釘および壁材料の釘接合部の減衰性状を把握することを目的としたものである。大部分の試験片には長さ1.1吋、直径0.064吋の構造用鋼材と同質の釘が用いられた。これを仮に“A”型釘と名付けることにする。本実験で用いた他の型の釘の寸法などを Table 2 に示す。

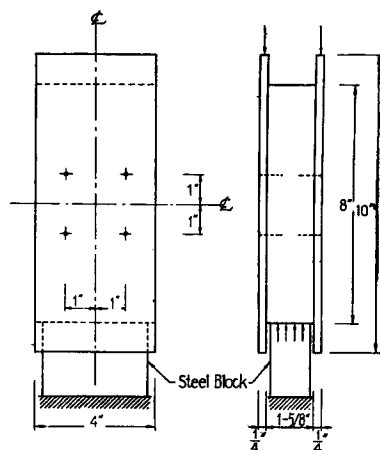


Fig. 5 Preliminary test specimen

Table 2 Nails used in the experiment

Type	Name	Length	Diameter	Nail head diameter	Note
A	Wire, blue, light	0.110"	0.064"	0.16"	Flat head
B	Box	0.125"	0.082"	0.21"	Flat head
C	Finishing	0.125"	0.069"	0.10"	Set head
D	Box	0.150"	0.082"	0.25"	Flat head, used only for Sheet-rock
E	Galvanized box	0.112"	0.076"	0.16"	Flat head
F	Wire, blue, heavy	0.187"	0.072"	0.17"	Flat head

試験片の両面には同数の釘が荷重方向と平行または直角な直線上に2時の間隔で打たれた。Beam-typeの試験片は4時間隔で、また後述のような組立架構試験片には2 $\frac{1}{2}$ "の間隔で釘打ちした。釘打ちの施工にはとくに細心の注意が払われた。まず釘を側板に垂直に、釘の頭が板から約1/8"程突出している状態までハンマーで打ち込み、それから重さ2封度の錘をガイドを通して2呎の高さから釘頭に落下せしめて釘打ちを完成した。これはどの釘に対しても均一な衝撃力で釘を打ち終え、釘打ちの不同が実験結果に及ぼす影響をなるべく小さくするよう図つたものである。また釘を側板に垂直に打込むためにとくに注意を払った。

(3) 静的試験の概略

本研究ではすべての試験片を釘1本について毎分約50封度の荷重速度で荷重した。除荷の速度は通常荷重速度よりやや早かつた。荷重—変形の関係は自記記録装置のドラム上に画かれた。最初半サイクルの荷重および除荷を一方に行なつた後試験片を倒置して反対の方向に荷重及び除荷を行ない、これで1サイクルの繰返し荷重とした。

最大荷重（荷重振巾）の値は1サイクルごとに釘1対当り25封度の割合で増加せしめた。またある場合には荷重の大きさを一定に保つたまま数サイクルの繰返し荷重を行なつた。また1対の釘当り25封度の割合で繰返し荷重の大きさを減じた場合の曲線も求められた。

(4) 試験結果

実験結果を次の曲線で表示する。自動記録装置によつて得られた荷重—変形履歴の代表的な曲線をFig. 6に示す。Figs. 7, 8は荷重の大きさを順次増大あるいは減少せしめたときの履歴曲線をプロットしたものである。これらの履歴曲線の形状は荷重の模様すなわち荷重の歴史に関係するが、曲線は二つの定点を通り、それらの点の位置は荷重の大きさや荷重の歴史にほとんど関係しないことがわかる。最大変形量すなわち変形の全振巾は履歴曲線の各サイクルごとに測定された。また曲線（ループ）内の面積は各サイクルごとにプランメーターで求められた。

Fig. 9は“backbone”曲線すなわち1対の釘に加えられた荷重の大きさと接合部の最大変形量との関係をプロットしたものの一例を示す。この変形量と履歴ループ内の面積すなわち1対の釘接合部が1サイクル当りに生ずるエネルギー損失量との関係はFig. 10に示される。

骨組材ならびにPly-panelは異方性の材料であるから“backbone”

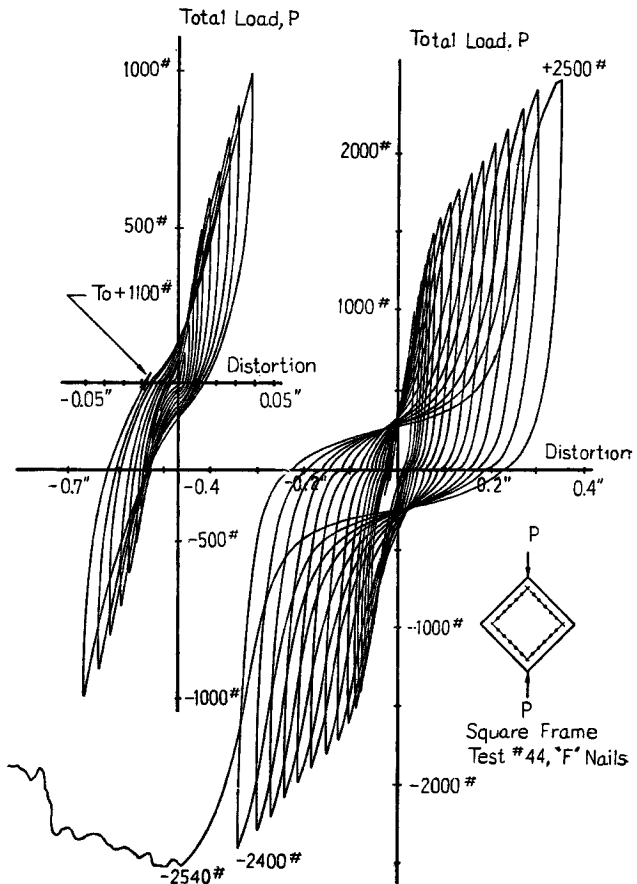


Fig. 6

曲線及びエネルギー損失—変形曲線の性状は多分に载荷の方向に影響されることは容易に考えられる。そこで骨組材と側板の木目の方向が釘接合部の挙動に及ぼす影響を見るために合計8回の試験を行なつた。木目の方向が载荷方向と垂直、C、及び平行な場合、P、の4種の組合せについてその挙動の変化する模様をFig. 11に示す。PP, PC, CP及びCCという記号の最初の文字は骨組材の木目方向を、そして二番目の文字はPly-panel 側板の表面の繊維方向を示すものである。

Fig. 12は梁のタイプの試験片に対する実験結果と基本的な1対の釘接合部の性状から計算した結果とを比較したものである。

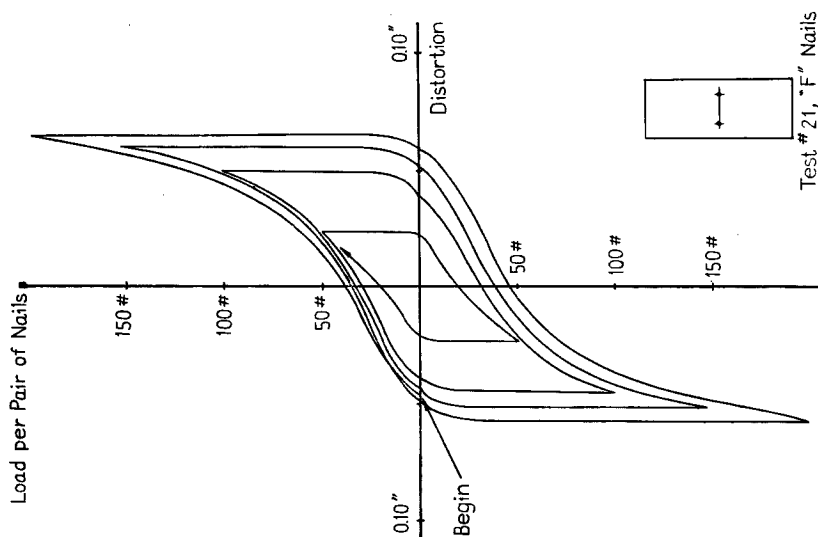


Fig. 8

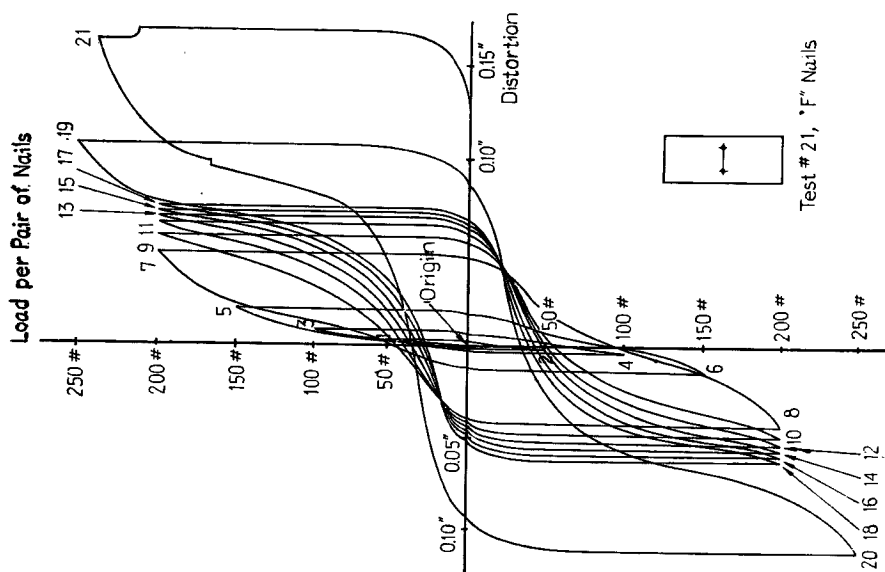
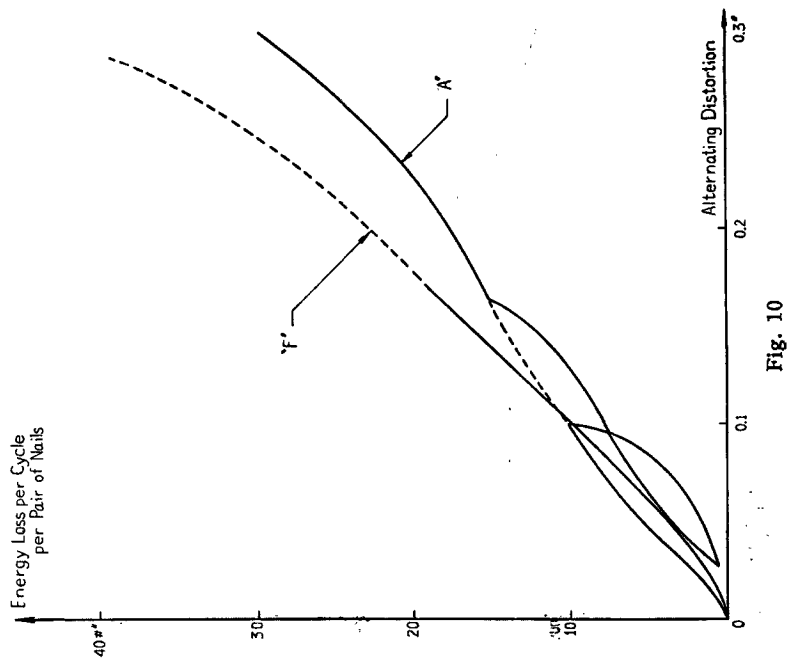
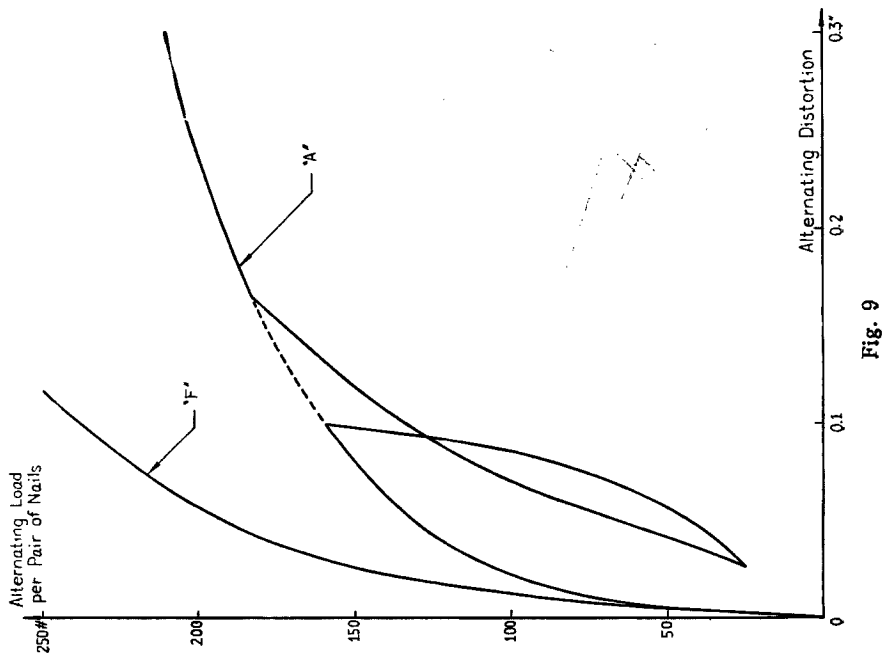


Fig. 7



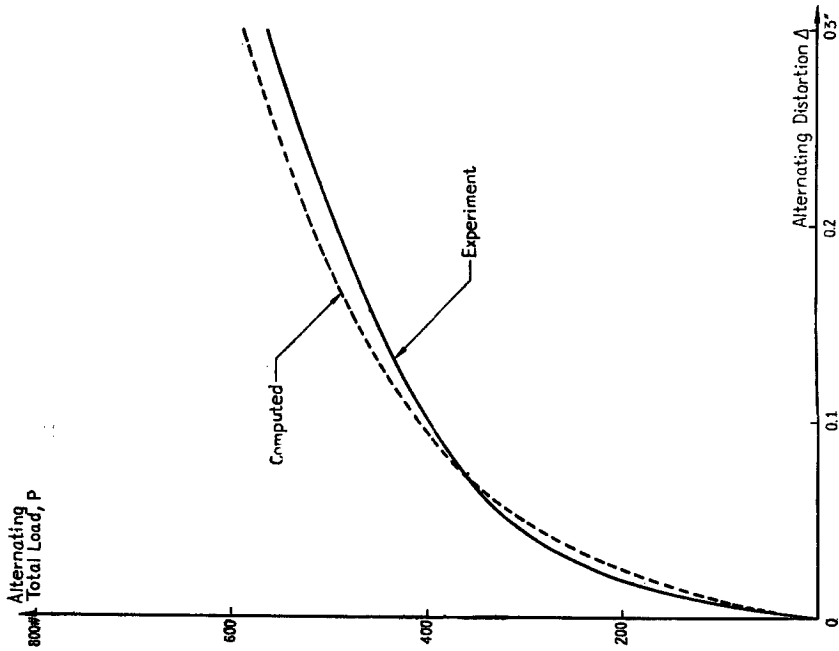


Fig. 12

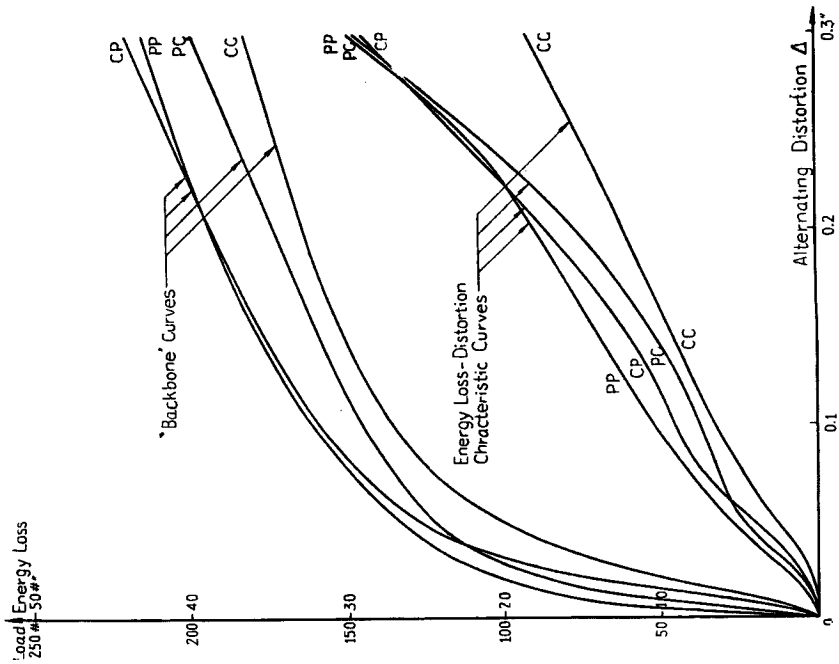


Fig. 11

(5) 実験結果の比較

実験結果を解析するに当つては同種の釘を用い、しかも本数の異なる幾つかの試験片から求めた釘1対当りの荷重—変形曲線及びエネルギー損失—変形曲線を比較した。そしてそれらの結果は非常に良く一致することが認められた。Figs. 9, 10, 11 には、したがって釘の本数を異にする多くの試験片の実験結果から釘1対当りの曲線を求めて平均したものが示してある。

同様に、釘の型や寸法が異なる場合、側板の材料が異なる場合あるいは骨組材と側板の木目の方向の影響についても比較した。

4. 結果の考察

1. 一般に釘接合部の挙動は載荷の前歴に関係する。荷重—変形曲線の形は正の方向の載荷の最初のサイクルでは softening type の剛性を示し、原点における曲線の勾配は最も大きい。釘接合部から荷重を取り除くとき、対応する曲線は荷重がかなり小さくなるまで非常に大きな勾配で減少する。そしてある大きさの永久歪が生じ多量のエネルギー吸収がみられる。いいかえれば specific damping capacity すなわち比 $4W/W$ の値はほとんど1に等しい。つぎに逆方向（負の方向）に載荷する際にも最初のサイクルの荷重—変形曲線は前と同様に softening な特性を示す。これら第1サイクル目の正負両方向の載荷曲線を比較すると負の方向に載荷した際の曲線の初期勾配は通常最初の正方向載荷時の初期勾配よりやや小さく、変形量は逆に第1半サイクルの方が大きい。これは第1半サイクルのに生じた永久歪が第2半サイクルの変形量に加わる結果と見られる。——すなわち第2半サイクルではすでに載荷の前歴に左右されるのである。

大きさの等しい載荷を何サイクルも繰返すとき、各荷重—変形曲線は増荷時に比較的荷重の小さい所で変曲点を示す。したがって、この変曲点に対応する荷重以上に載荷する場合には、曲線は stiffening type となり、その勾配は荷重とともに増大する。

最大載荷の大きさを終局荷重より小さいある範囲で一定に保つならば、繰返し載荷によつて釘接合部の変形量は常に増大するが、その増分はサイクル数を増すごとに段々と小さくなり、もし最大荷重の大きさがかなり小さければ、何サイクルかの繰返し荷重の後に変形はある大きさに収斂する。数多くのサイクルの繰返し載荷の後、接合部の変形量がある値に収斂するか否かはその載荷重の大きさに左右されるが、しかしこの「釘接合部の疲労限界荷重」ともいふべき荷重の極限値を実験的に求めるのは非常に困難な事柄である。

2. “Backbone” 曲線の定義 —— 交番荷重の大きさと交番変形量の全振巾との関係を示す曲線をここで “backbone” 曲線と定義する。これは一定の荷重増分での単純な増加荷重の繰返し載荷による実験から得られるが、本実験では1対の釘に対して50封度、すなわち釘1本について25封度の荷重増分に対して “backbone” 曲線が求められた。しかしこの荷重増分の値が異なる場合には “backbone” 曲線の位置もやや異なるであろうことは当然考えられる。

“Backbone” 曲線は接合部における釘の型、寸法、及び数と側板や骨組材の材料によつて支配されるが、一般にこの曲線は原点において最大の勾配をもつ softening type となる。荷重が釘接合部の終局強度に近づくにつれて、曲線の勾配は0に近づき、また曲線は通常最大荷重が極めて小さくない限り最大荷重の増減によつて開型 (unclosed) のループを形成する。(Fig. 9 参照)

3. 交番変形量の関数として各サイクルごとの吸収エネルギーを表わす曲線は、1サイクル中に消散されるエネルギーが交番変形量の増大とともに増すことを示すが、Ply-panel の試験片については変形量が±0.2吋に達するまではその曲線の勾配の変化が極めて少ないことがわかる。

これらの試験では釘接合部の終局強度に対応する変形量は、大略±0.3吋であることが明らかになった。この結果から±0.2吋の変形の範囲内では、載荷の1サイクルごとのエネルギー損失量はただ変形量のみに関連し、荷重の絶対値には余り関係がないことが指摘される。

4. 1本の釘が貯え得る最大歪エネルギーを計算した結果、載荷各サイクルごとに釘接合部で消散するエ

エネルギーは主に釘の近傍の木材の塑性変形と、合成された骨組材と側板の表面間における摩擦に基づくものであることが明らかにされた。釘自身に生ずるエネルギー逸散は釘接合部における全エネルギー吸収量の数パーセントにも満たない。

5. 釘の寸法は非常に重要であつて、これは釘接合部の終局強度と吸収エネルギーの量を支配するものである。長さ1.1吋、直径0.064吋で頭部の径0.16吋なる鋼釘“A”は、Ply-panelの接合部で釘1本当たり約±100封度の終局強度を与える。1½吋の長さで直径0.069吋、釘頭の径0.10吋の仕上釘“C”では、荷重—変形曲線の傾向は大体上と同じであるが、直径および釘頭径が小さいためかなり弱かつた。これらより若干太い“B”、“E”および“F”の釘を同本数を用いた接合部について行なつた試験記録では、それらの終局強度の値が割合に良く一致し、また荷重—変形量の関係でも同様な性状を示している。

6. 等しい距離をおいて2本の釘を載荷方向とそれぞれ平行および垂直な直線上に打つた2種の試験片についての結果を比較したが、その荷重と変形量との関係には大した差はほとんど認められなかつた。

7. 試験片の終局強度ならびに各サイクル当りのエネルギー損失量は、その試験片の釘接合部の数にほぼ比例する。本数の色々異なつた試験片について、釘1本当りの荷重—変形量曲線および各サイクルごとのエネルギー損失量曲線は極めて良い一致を見た。

8. 骨組材と Ply-panel 側板の木目の方向による影響は相当顕著なものである。このため合計八つの試験が行なわれ、骨組材と Ply-panel の繊維が載荷方向と直角、C、および平行、P、の場合の組合せ PP、PC、CP および CC を考え、各々の場合の接合部の挙動の差異が調べられた。

9. Sheetrock あるいは Masonite を用いた釘接合部の一般的挙動は Ply-panel を用いた試験片のそれに非常に似通っている。すなわち、これら3種類の試験片については類似の“backbone”曲線およびエネルギー損失—変形量曲線が得られた。0.15吋厚の Masonite と 0.25吋厚の Ply-panel の試験片は釘1対当りの終局強度としてはほとんど同じ値を与えたが、1/2吋厚の Sheetrock を用いた試験片は太い釘を使用したにもかかわらずより小さな値を示した。Masonite 板の表面の粗度は荷重が小さいときには、かなりの効果をもつが、接合部の終局強度に近い荷重に対してはあまり効果がない。

10. 梁のタイプの試験片については、実験結果と1対の釘接合部の“backbone”曲線から計算によつて求めた結果とは満足すべき一致を示した。この計算は骨組材ならびに側板自体に生ずる変形が釘接合部の変形量に比して微小であるとの仮定に基づいて、骨組材は真直のままであるとして行なわれたものである。計算と実験結果との差異は変形量が±0.1吋までのときに3%以下、また0.1吋ないし0.2吋の変形量の範囲内で約6%である。

11. 架構としての側板パネルの構造減衰と剛性の予測：1対の釘接合部の“backbone”曲線に基づいて梁のタイプの試験片についてその特性を計算によつて求めた結果が実験値と良く一致したことは、この考え方を更に拡張して、もつと複雑な構造のパネルに対しても、その特性を基本的な荷重—変形曲線並びにエネルギー損失特性曲線から予測することの可能性を示唆するものである。一例として Ply-panel または他の材料を両面に貼つた簡単な矩形の架構を考えてみよう。このパネルの両面には同数の釘を同じように配列する。簡単のために骨組(フレーム)と側板は十分剛であつてそれら自身の弾性変形量は釘接合部近傍に生ずる変形量に比べて無視し得るものとする。またフレーム自身は筋違などの対角線方向の部材をもたず、したがつてフレームの剪断的な変形に対しては抵抗し得ないものと仮定する。ゆえにパネルの剪断剛性はすべて釘接合部を通じて側板に働らく力によつて受けもたれるものと考えらる。

Figs. 13, 14 に示すように荷重 P がパネルの対角線方向に作用するとき、接合部が変形して最初矩形であつた骨組は平行四辺形となり荷重が作用する二点間には変位 d が生ずるものとする。

正方形のフレームではいずれの釘接合部の変形量もほぼ荷重の作用点間の全変位の、半分すなわち $d/2$ に等しく、接合部の変形の方向は 0° から 90° までの間で色々異なっている。もし釘接合部が等間隔に配置されているならば、接合部の変形の方向は作図によつて 0° から 90° までの間ほぼ等間隔に段階的に変化

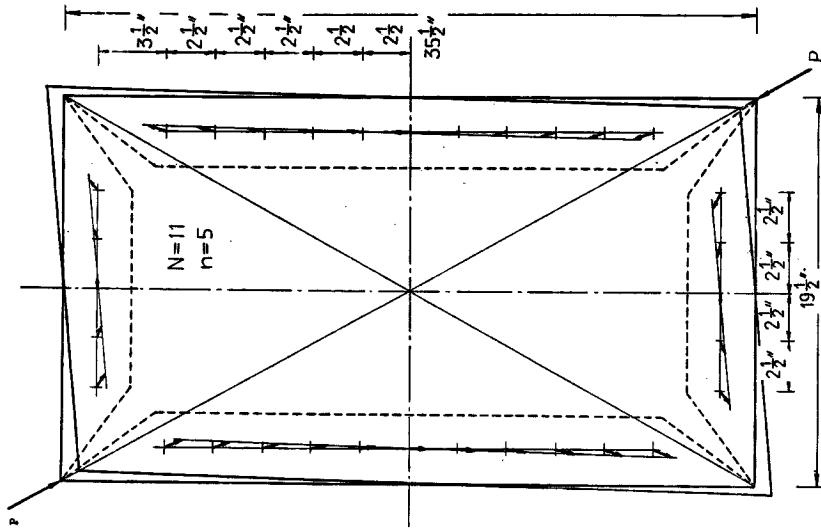


Fig. 14

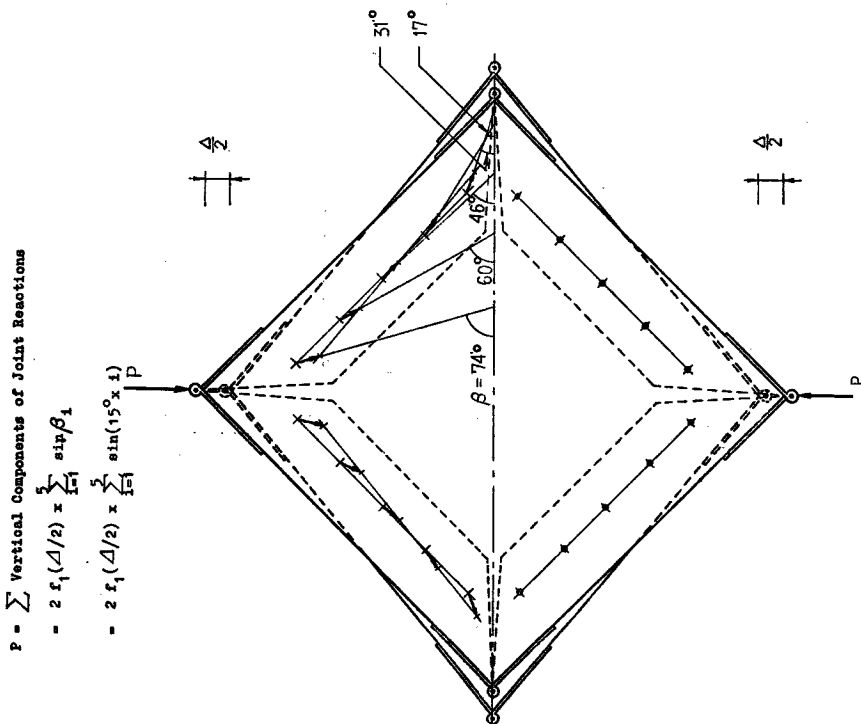


Fig. 13

$P = \sum \text{Vertical Components of Joint Reactions}$

$$= 2 \sum_{i=1}^5 \epsilon_i (\Delta/2) \times \sum_{i=1}^5 \sin \beta_i$$

$$= 2 \sum_{i=1}^5 \epsilon_i (\Delta/2) \times \sum_{i=1}^5 \sin(15^\circ \times i)$$

Distortions of all nailed joints are approximately the same and equal to $\frac{\Delta}{2}$

することがわかる。それゆえに荷重 P とその変形量 Δ との間には近似的に次の関係式が成立する。

$$\begin{aligned}
 P &= \sum \text{各接合部の反力の垂直方向成分} \\
 &= 2f_1(\Delta/2) \times \sum_{i=1}^n \sin \beta_i \\
 &\approx 2f_1(\Delta/2) \times \sum_{i=1}^n \sin\left(\frac{90^\circ \times i}{n+1}\right), \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

ここに、 n はフレームの一辺に打たれた釘の数であり、 $f_1(\Delta/2)$ は1対の釘の接合部についての基本的な荷重—変形特性曲線を表わす。

また1サイクル当りのエネルギー吸収量は1対の釘接合部の基本的エネルギー損失—変形曲線 $f_2(\Delta/2)$ を用いて

$$\Delta W = 4n \times f_2(\Delta/2) \dots\dots\dots (14)$$

で表わされる。

矩形のフレームの場合には作図によつて^{*}、フレームの長辺にある釘接合部の変形量はほぼ一様に分布し、その値は大体 $\Delta/2$ に等しい。一方パネルの短辺にある接合部の変形量の大きさはかなり変化し、フレームの隅に近い所ではほぼ $\Delta/2$ であるが、短辺の中央部では大体 $(\Delta/2) \times (l/L)$ に等しくなる。フレームの変形の模様ならびに接合部の変形量の絶対値の分布は Fig. 14 および Fig. 15 に示される。

いかなる比例(形状)の矩形のパネルの場合でも、接合部の変形の方法はフレームの長辺では0から $(2l/L)$ rad. の間ではほぼ段階的に変化し、短辺では0から $\pi - (2l/L)$ rad. の間で段階的に変化する。

荷重 P とその作用点の変位量 Δ との関係は若干複雑となるが、近似的に次の式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 P &= f_1(\Delta/2) \times \sum_{i=1}^N \sin\left\{\frac{2l \times i}{(N+1)L}\right\} \\
 &+ \sum_{j=1}^n \left| f_1(\Delta_j/2) \times \sin\left\{\frac{\pi - \frac{2l}{L}}{(n+1)} j\right\} \right|, \\
 &\dots\dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

ここに、

N = パネルの長辺にある釘接合部の総数、

n = パネルの短辺の釘接合部の総数、

f_1 = 1対の釘の接合部の荷重—変形量特性、

Δ_j = パネルの短辺上にある接合部 j の変形量の絶対値。

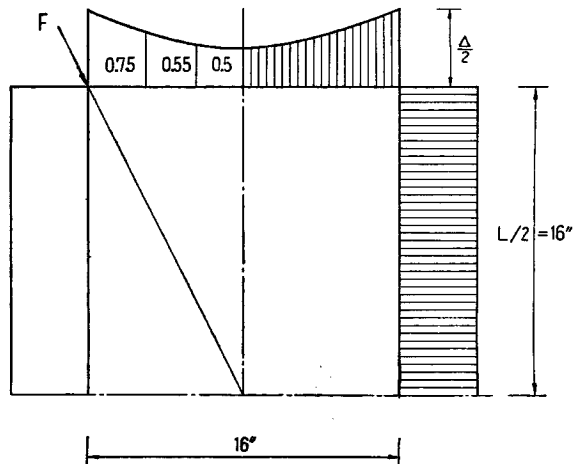


Fig. 15 Approximate distribution of absolute values of distortion

* すべての釘接合部の変形量および方向を解析幾何学によつて求めることができるが、その場合の式はいたずらに長くなり、時間もおかかる。厳密に言えば骨組および側板自身の弾性の影響も考慮せねばならないことになる。したがつてここでは接合部の変形量とその方向を求めるのに、冗長な解析的表現を用いてもあまり意味がないと結論される。

比 l/L の値が小さい場合には上式の右辺の第2項は省略し得る大きさとなる。ゆえに l/L の値が小さい場合、近似式は

$$P \approx f_1(\Delta/2) \times \sum_{i=1}^N \sin \left\{ \frac{2l \times i}{(N+1)L} \right\} \dots \dots \dots (16)$$

と書ける。

1 対の釘の接合部のエネルギー損失—変形特性を表わす曲線から、矩形フレーム全体のエネルギー損失量は次式で与えられる。

$$\Delta W = 2N \times f_2(\Delta/2) + 2 \sum_{j=1}^n f_2(\Delta_j/2) \dots \dots \dots (17)$$

そして、比 l/L の値が小さければ第2項はやはり省略し得る。

計算例：

1. Fig. 13 に示すように各辺5対づつの接合部をもつ $19\frac{1}{2}" \times 19\frac{1}{2}"$ の正方形パネルを考える。荷重 P 撓み Δ との関係は、したがって次の近似式で与えられる。

$$\begin{aligned} P &\approx 2f_1(\Delta/2) \times \sum_{i=1}^5 \sin \left(\frac{90^\circ i}{6} \right) \\ &= 2f_1(\Delta/2) \times \sum_{i=1}^5 \sin (15^\circ i) \\ &= 6.60f_1(\Delta/2) \dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

“F”型の釘を用いたときのこのパネルの荷重—変形曲線、すなわち “backbone” 曲線は Fig. 16 に示すようである。

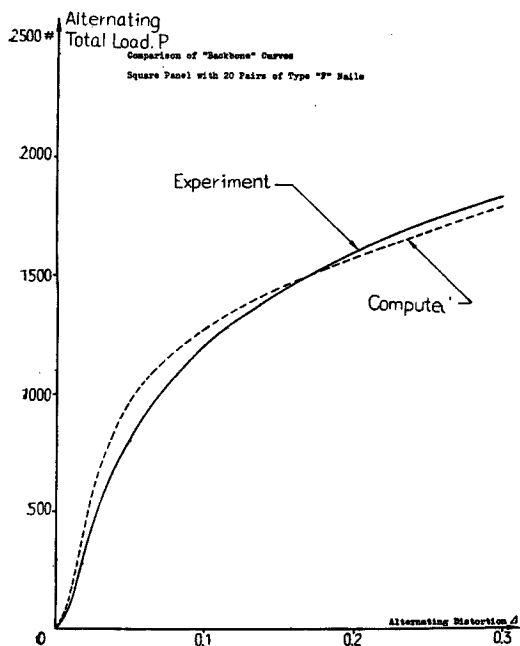


Fig. 16

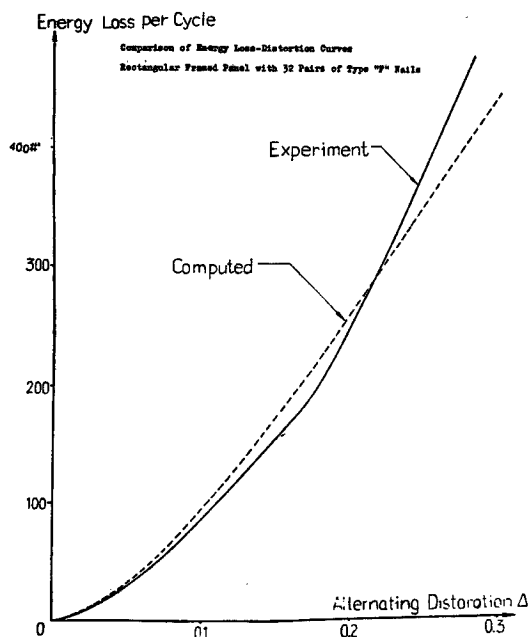


Fig. 17

この正方形パネルの1サイクル当りのエネルギー損失量と変形量との間の関係は

$$\begin{aligned}\Delta W &= 4n \times f_2(\Delta/2) \\ &= 20 \times f_2(\Delta/2) \dots\dots\dots(19)\end{aligned}$$

と書かれる。

2. 同様に Fig. 14 に示されるような総計32対の釘接合部を有する矩形パネルについて。

$N=11$, $n=5$ であるから, P と Δ との関係は近似的に

$$\begin{aligned}P &= f_1(\Delta/2) \times \sum_{i=1}^{11} \sin \left\{ \frac{i}{12} \right\} \\ &\quad + \sum_{j=1}^5 |f_1(\Delta_j/2) \times \sin \left\{ \frac{(\pi-1)}{6} j \right\}| \\ &= 5.08 \times f_2(\Delta/2) + \sum_{j=1}^5 |f_1(\Delta_j/2) \times \sin 0.358j| \dots\dots\dots(20)\end{aligned}$$

と書くことができる。

またこの場合のエネルギー損失—変形特性は

$$\Delta W = 22 \times f_2(\Delta/2) + 2 \sum_{j=1}^5 f_2(\Delta_j/2) \dots\dots\dots(21)$$

から得られる。 Δ の種々の値に対して ΔW の値を求めた結果を Fig. 17 に示す。

5. 結 論

数種の釘および壁板材料を用いた単純な釘接合部に関する実験的研究から次の結論が導かれる。

1. 減衰の主な原因は骨組材と側板との間の摩擦および釘の近傍の木材の塑性降伏に基づくものである。
2. 釘接合部における specific damping capacity の値は非常に大きくほとんど1に等しい。載荷の各サイクルにおけるエネルギー損失量は変形量が0から±0.2時の範囲では変形量のみに関連する。
3. Ply-panel を用いた試験片については、そのエネルギー損失量は変形の振巾が0から±0.2時の範囲では変形量の1次に正比例して変化し、また変形振巾が±0.2時よりも大きくなると変形量の1乗よりやや高い幂に比例して変化する。
4. 1対の釘の接合部の特性を用いて beam type あるいは架構型のフレームの試験片の挙動を計算によつて類推した結果は満足すべき一致をみた。したがつて、より複雑な組立フレームについてもその載荷状態が規定されれば、その荷重—変形量の特性を予測することができる。

謝 辞

本研究は米国 California 州庁建築課をスポンサーとする「地震動を受けた構造物に対する摩擦力の影響に関する研究」の一環として Stanford University の Vibration Research Laboratory で完成されたものである。

著者は本研究に当つて問題の所在を提示し、つねに御指導、御援助を賜つた Lydik S. Jacobsen 教授に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) J. M. Robertson and A. J. Yorgiadis : Internal Friction in Engineering Materials, Journal of Applied Mechanics, Vol. 13, No. 3, September, 1946, pp. A-173-182.
- 2) G. S. von Heydekampf : Damping Capacity of Materials, Proceedings of American Society of Testing Materials, Vol. 31, Part I, 1931, pp. 157-175.