



昭和58年度 卒業論文

I 型 断 面 梁 の 剛 性 と 強 度

〈〈カラマツLVLの応用〉〉

Vol. 1

昭和59年 2月 23日 提出

北海道大学農学部林産学科

木材加工学講座

大 島 茂

## <目次>

I	序論	( 1 )
II	材料と試験体	
II-1	LVL	
II-1-1	LVLの製造方法	( 6 )
II-1-2	LVLの強度性能	( 9 )
II-2	フランジ	
II-2-1	LVL	( 11 )
II-2-2	素材	( 13 )
II-3	ウェブ	
II-3-1	LVL	( 14 )
II-3-2	45°合板	( 16 )
II-3-2	パーティクルボード	( 20 )
II-4	I型梁の作製	( 21 )
III	試験方法	
III-1	構成材料の基礎材質	( 24 )
III-2	I型梁の曲げ剛性試験	( 26 )
III-3	I型梁の曲げ破壊試験	( 28 )
III-4	使用機器	( 29 )

## Ⅳ 計 算 式

Ⅳ-1	構成材料の基礎材質	( 31 )
Ⅳ-2	I型梁の中立軸と剛性	( 33 )
Ⅳ-3	I型梁の撓みと傾斜角	( 37 )
Ⅳ-4	曲げ応力と剪断応力	( 39 )
Ⅳ-5	使用機器	( 40 )

## Ⅴ 結 果 と 考 察

Ⅴ-1	構成材料の基礎材質	
Ⅴ-1-1	フランジ	( 42 )
Ⅴ-1-2	ウェブ	( 44 )
Ⅴ-1-3	I型梁	( 50 )
Ⅴ-2	曲げ剛性試験	
Ⅴ-2-1	撓みと傾斜角	( 53 )
Ⅴ-2-2	曲げ応力と剪断応力	( 59 )
Ⅴ-3	破壊試験	
Ⅴ-3-1	撓みと傾斜角	( 65 )
Ⅴ-3-2	曲げ応力	( 71 )
Ⅴ-3-3	剪断応力	( 78 )
Ⅴ-3-4	破壊形態	( 84 )

Ⅵ	結 論	( 110 )
---	-----	---------

Ⅶ	参 考 文 献	( 114 )
---	---------	---------

# I 序 論

本研究は一昨年度の上野及び昨年度の佐藤の卒業論文「I型断面梁の剛性と強度」<sup>1), 2)</sup> に引き続いて行ったものである。

今回は特にI型梁の主な構成材料としてカラマツLVLを応用し、その適合性を重点的に調べてみた。

I型梁は、上下のフランジ材及びウェブ材から成る構造用部材で、それぞれの材料の特性を生かして単一材からは得られない性能を得ようとするものである。

Fig. 1 に代表的なI型梁の例を示した。

今回も一昨年度、昨年度と同様に①のものを製作し材料とI型梁の剛性と強度の関係を調べた。①のI型梁は製作の際、

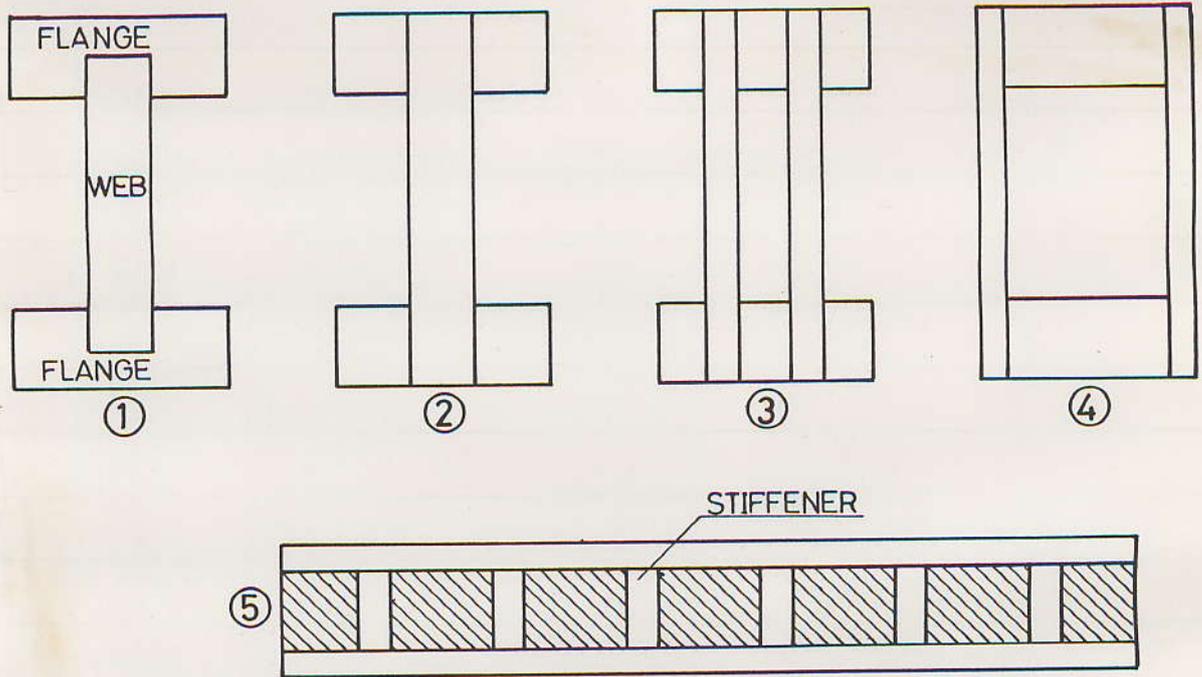


FIG. 1 Example for I-Beam

上下フランジの溝つけ加工に手間がかかるので、一般的には②のものが製作されている。③はウェブを2つにわけたもので Double-Web-I-Beam と呼ばれているもので、他にウェブを3つ以上にわけたものも作られている。④は Box-Beam と呼ばれ、I型梁とは区別されることもあるが、基本的な構造が同じなの

でI型梁の一種と言っても差しつかえないだろう。いずれの場合もウェブの剛性を増す為にウェブに複合材料を用いる事がよくある。また、ウェブの座屈を防ぐ為に、⑤の様に荷重点等数ヶ所にスチフナーをつけて支えることもある。過去の実験より、I型梁では主として上下フランジが曲げモーメントを、ウェブが剪断力を負担するので、フランジ材には曲げ性能のすぐれたものを、ウェブ材には剪断性能のすぐれたものを使用する必要があることが判明している。

ところで、カラマツ・スギ等の針葉樹小径木の利用技術の開発とこれらの製品の需要拡大は林業・林産業にとって重要

な意味をもっており、それらの用途の開発が急がれている。小径木カラマツ材によるLVLも注目されており、今回カラマツLVLをI型梁のフロンジ及びびウエブに應用してみた。LVLとは単板の繊維方向をそろえて積層接着したもので、繊維方向を直交させる合板とは異なり平面材料としてよりも、梁ないしは柱用の材料として各種の使用方法が研究されている。またこれは中小径木より大断面の長尺材を製造できるというメリットを持っている。現在、北海道立林産試験場では、カラマツLVLからテーブル・戸棚・壁材・階段・窓枠・構造材等に應用して、付加価値を高める研究をしている。<sup>3)</sup>

今回のLVLには Butt Joint が多く含まれており、Butt Joint の強度への影響も破壊試験の結果より検討した。

尚、本研究にあたり、終始御指導賜りました北海道大学農学部林産学科木材加工学教室の宮島寛教授、上田恒司助教授、生田晴家助手、ならびに多くの御協力を下さった村木正一技官、橋場マサ子事務官、大学院生、専攻生諸氏、またLVLの製造に関して多大な御協力を下さった道立林産試験場に心から感謝します。

## II 材料と試験体

### II-1 LVL

#### II-1-1 LVLの製造方法

今回は末口径20~30cmのカラマツ丸太より4mm厚の単板をロータリーレーズにて切削し、これより5ply・7ply・15plyのLVLを作製し試験に用いた。単板の切削からLVLの作製までは北海道立林産試験場に依頼した。

林産試型LVLの製造過程では、歩止まりを上げる為に、原木を50cm長とし、外周駆動装置付きのロータリーレーズで単板の厚さが均一に、かつできるだけ剥心径が細くなる様に切削している。また能率よくかつ狂いを少なく乾燥する為に

熱板乾燥機を用いて単板を乾燥し、4 mm 厚で  $45 \times 45$  cm の大きさの単板を作っている。

出き上がった単板は、辺材部からのもの、心材部からのもの、および辺心材が含まれているものがあったが、ランダムに組み合わせて、フランジ用には 15 ply と 7 ply、ウェブ用には 5 ply の LVL を高周波加熱プレスを用いて製造した。この時接着剤には尿素樹脂を用いた。また Fig. 2 の様に隣接する層の単板の Butt Joint を約 11.25 cm ずつずらして接着したので、4 枚おきに同じ所に Butt Joint がくる様になった。出き上がった全長 3.7 m の LVL を 3 等分して、道立林産試験場から北大の

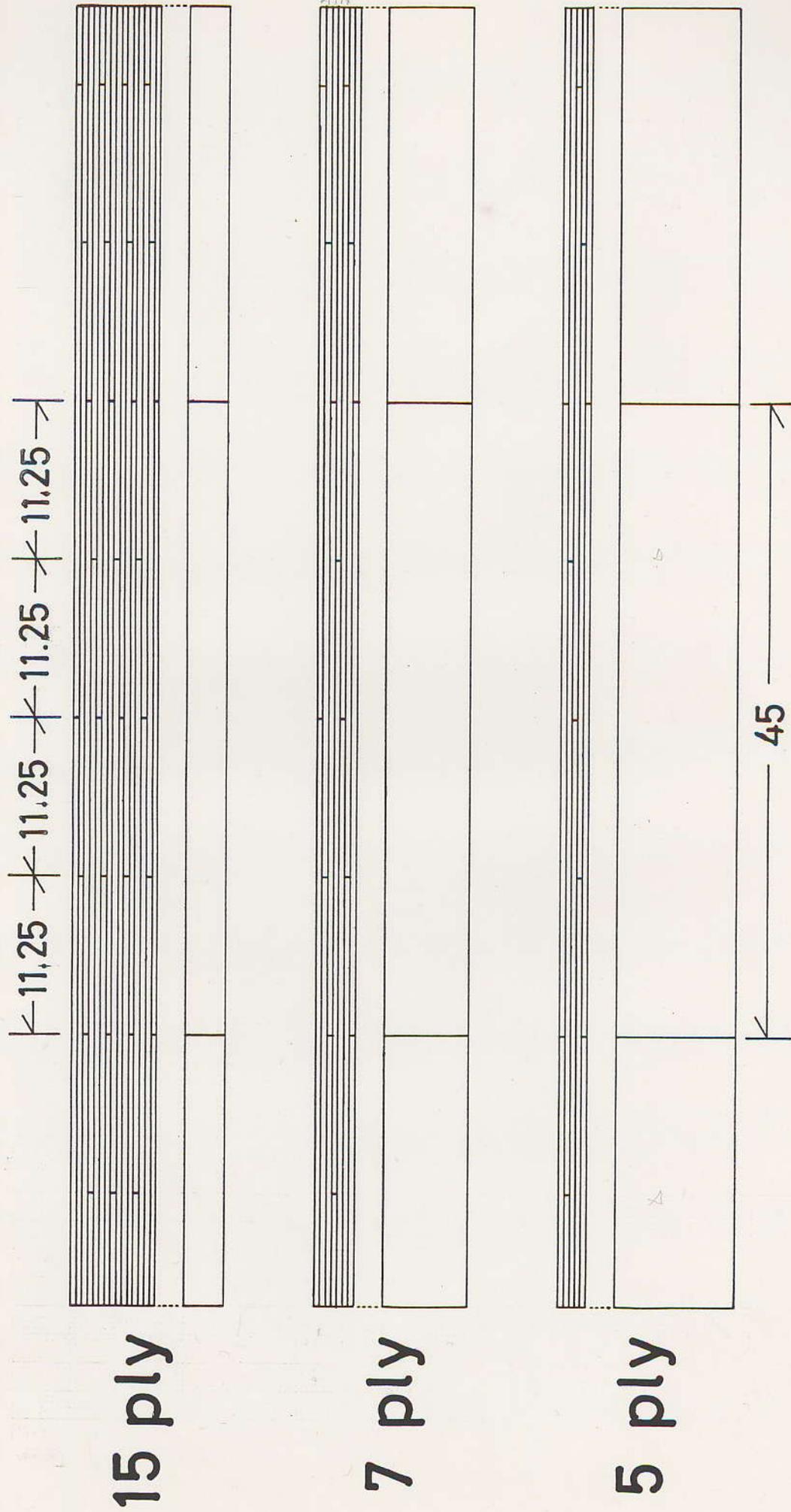


FIG. 2 Position of Butt Joints in LVL

木質材料実験室へ運搬した。

## II - 1 - 2 LVLの強度性能

LVL用小径木カラマツ材(径級16~20cm)における未成熟材部と心材の関係、ならびに裏割れの強度性能への影響<sup>4)</sup>について道立林産試験場の森泉周氏らが研究した結果が報告されているのでここで紹介しておく。

1. 原木における未成熟材部の範囲は、物理的な材質指標では明確な分類はできないが、曲げ強度は内層部(髄より4cm前後)では、外層部(同8cm前後)に対して $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 程度である。

2. 原木の心材化率から、心材の髄か

らの距離は、5.5~8.0 cmの範囲に入る。

この距離は通常いわれている未成熟材部と一致しており、工業材料としてみた場合、未成熟材部=心材、成熟材部=辺材とみなしてもよいと判断される。

3. 単板の裏割れについて、裏割れ率の平均値の差は、切削径差で5%の有意差があるが、心・辺材(未成熟材部・成熟材部)の材質差で有意差がない。末口径16~20 cm前後の原木より切削した単板の裏割れ率は60~80%、密度は3~4  $\frac{\text{本}}{\text{cm}}$  である。なお、裏割れ率60~80%の範囲では、裏割れ率の差は曲げ強度に影響しない。

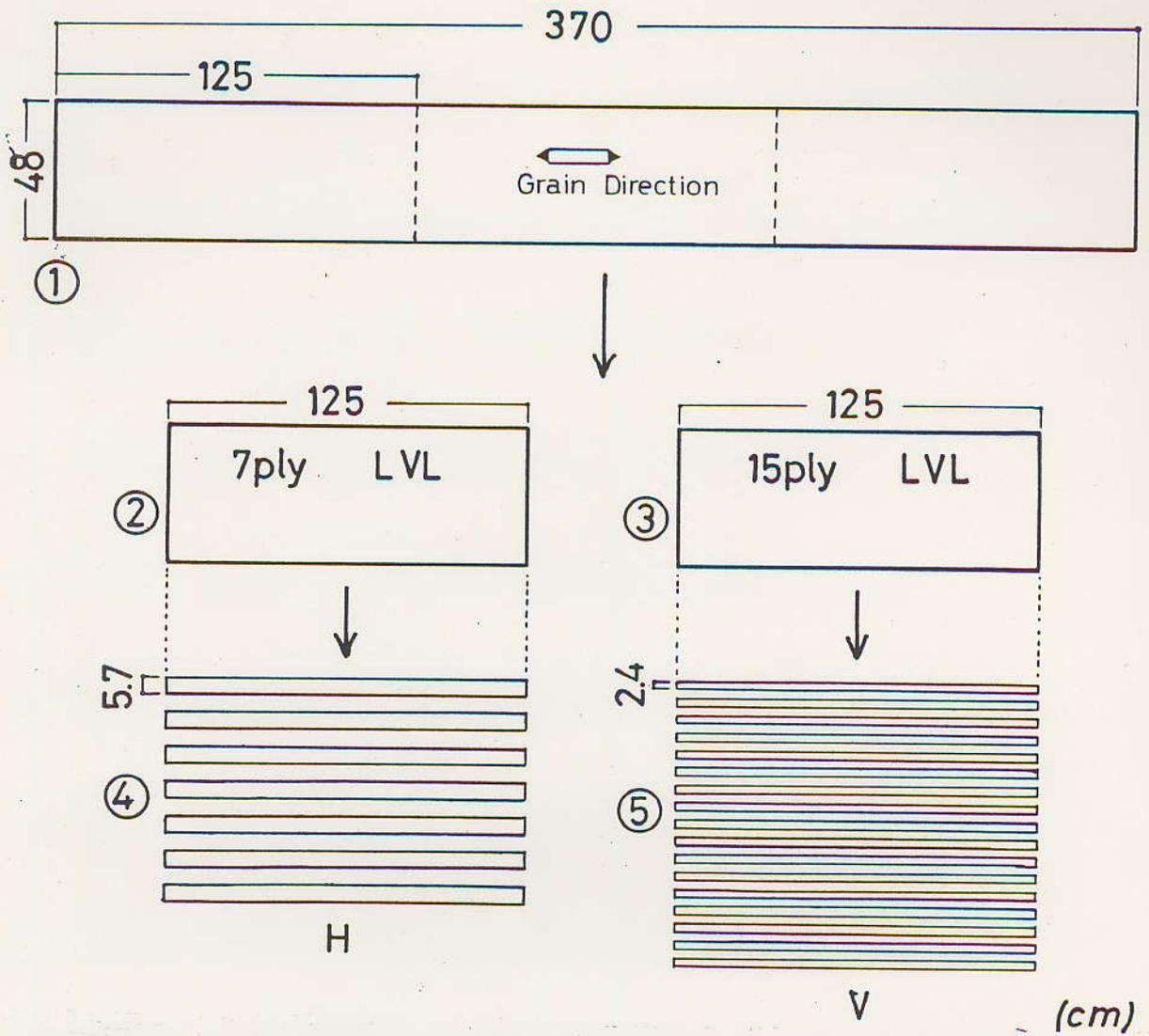
4. 挽き材積層材とLVLの心・辺材

による強度低下割合はほぼ等しく、心材部は辺材部に対して曲げ強さを75%前後、ヤング係数では65%前後である。強度に対する裏割れの影響は、曲げ強さを15%前後、ヤング係数を5%前後低下させる。

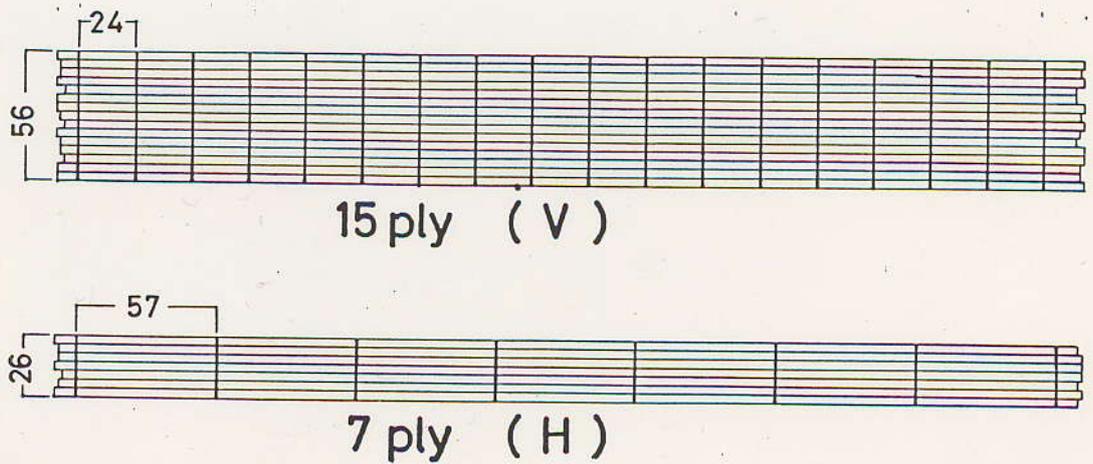
## II - 2 フランジ

### II - 2 - 1 LVL

7ply LVL と 15ply LVL は Fig. 3 に示したようにフランジ材として用いた。②の 7ply LVL は、2枚の板より約  $5.7 \times 2.6 \times 125 \text{ cm}$  の試験体を合計14本作製した(④)。また③の 15ply LVL は、1枚の板より約  $5.6 \times 2.4 \times 125 \text{ cm}$  の試験体を合計17本作



**FIG.3 Preparation of V, H Flange**



**FIG. 4 Cross Section of LVL (mm)**

製した(⑤)。その時の木口面の様子を Fig. 4 に示したが I 型梁を作製する際、7 ply のものは単板が水平に積層されている状態になるので記号を **H**。同じく 15 ply のものは垂直になるので記号を **V** とした。

## II - 2 - 2 素材

対照実験用として北海道大学雨竜地方演習林産のトドマツとアカエゾマツの挽板より、去年の残りのもの 8 本と今年新たに 5 本作製し合計 13 本をフレンジ材として用いた。寸法は約  $57 \times 24 \times 107$  cm となった。また記号は **S** とした。

## II-3 ウェブ

## II-3-1 LVL

5 plyのLVLは Fig. 5 に示した様にウェブ材として加工した。

長さ 125 cm の 5 ply LVL のうち 1 枚 (②) は、幅約 9 cm に縦挽きし、 $9.0 \times 1.9 \times 125^{cm}$  の試験体を 5 本作製した。この 5 ply LVL は I 型梁を作製する際、繊維方向が軸方向に対して平行に存るので、 $0^\circ$  LVL とし記号を **O** とした (④)。

長さ 125 cm のもう 1 枚は ③ の様に 2 等分した。また  $0^\circ$  LVL のうち 1 本も 2 等分し、そのうちの 1 枚を、③ で 2 等分された 2 枚と一緒に ⑤ の様に横はぎした。

この接着には酢酸ビニル接着剤を用いた。

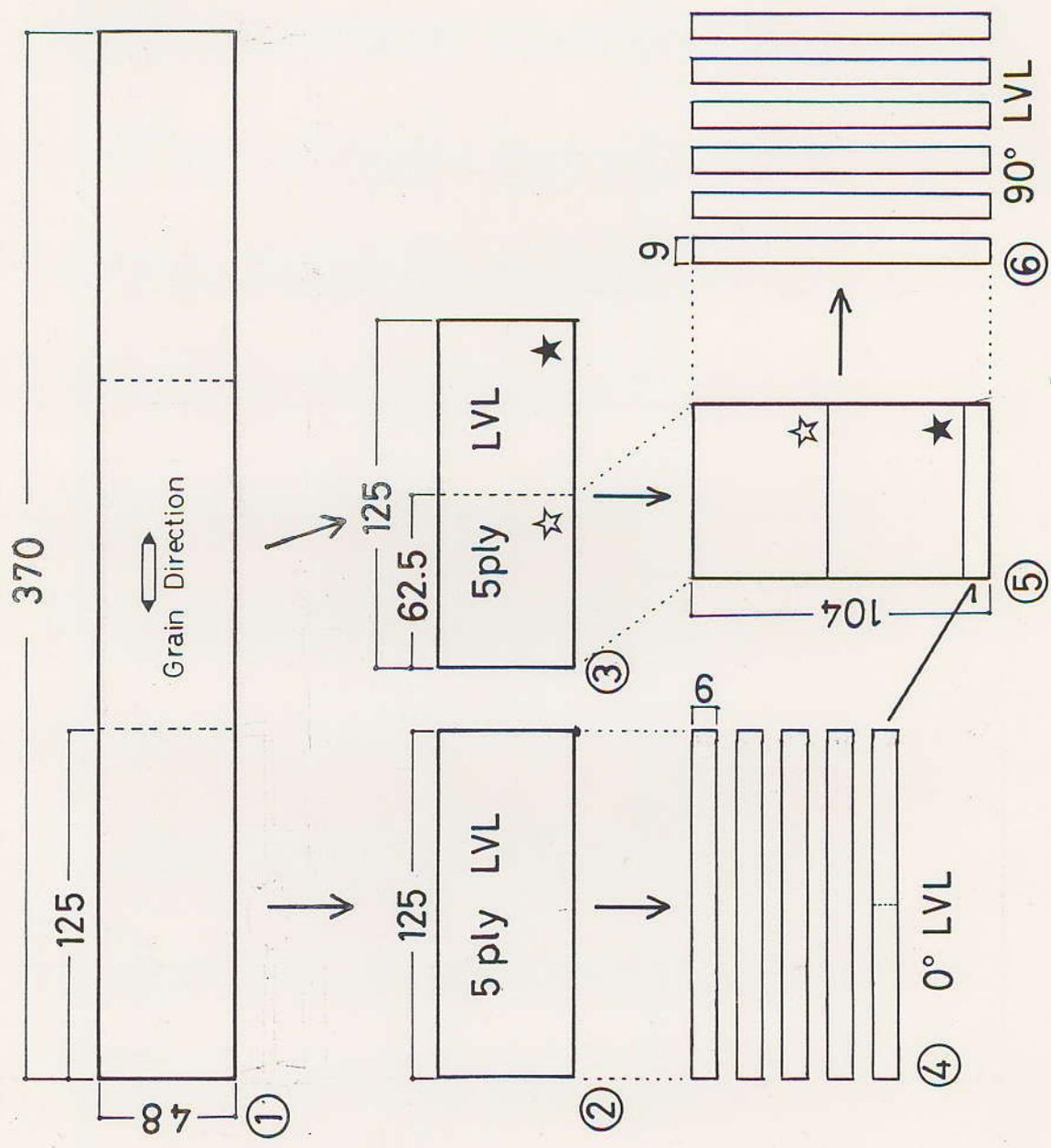


FIG. 5 Preparation of 0°, 90° Web (cm)

⑤の板より⑥の様に、 $90 \times 19 \times 104$  cmの試験体を6本作製した。この5ply LVLは、I型梁を作製する際、繊維方向が軸方向に対して垂直になるので $90^\circ$  LVLとし、記号を**90**とした。(⑥)

## II - 3 - 2 $45^\circ$ 合板

ウェッジとしてLVLを作ったのと同じカラマツの4mm厚、 $45 \times 45$  cmの単板より5plyの合板を作製した。なおこの合板は単板の繊維方向がウェッジの長手方向に対して $45^\circ$ になるようにしたので $45^\circ$ 合板とし、記号を**45**とした。

Fig. 6に作り方を示した。まず初めに心材と辺材にわけて図の①の様に横はぎ

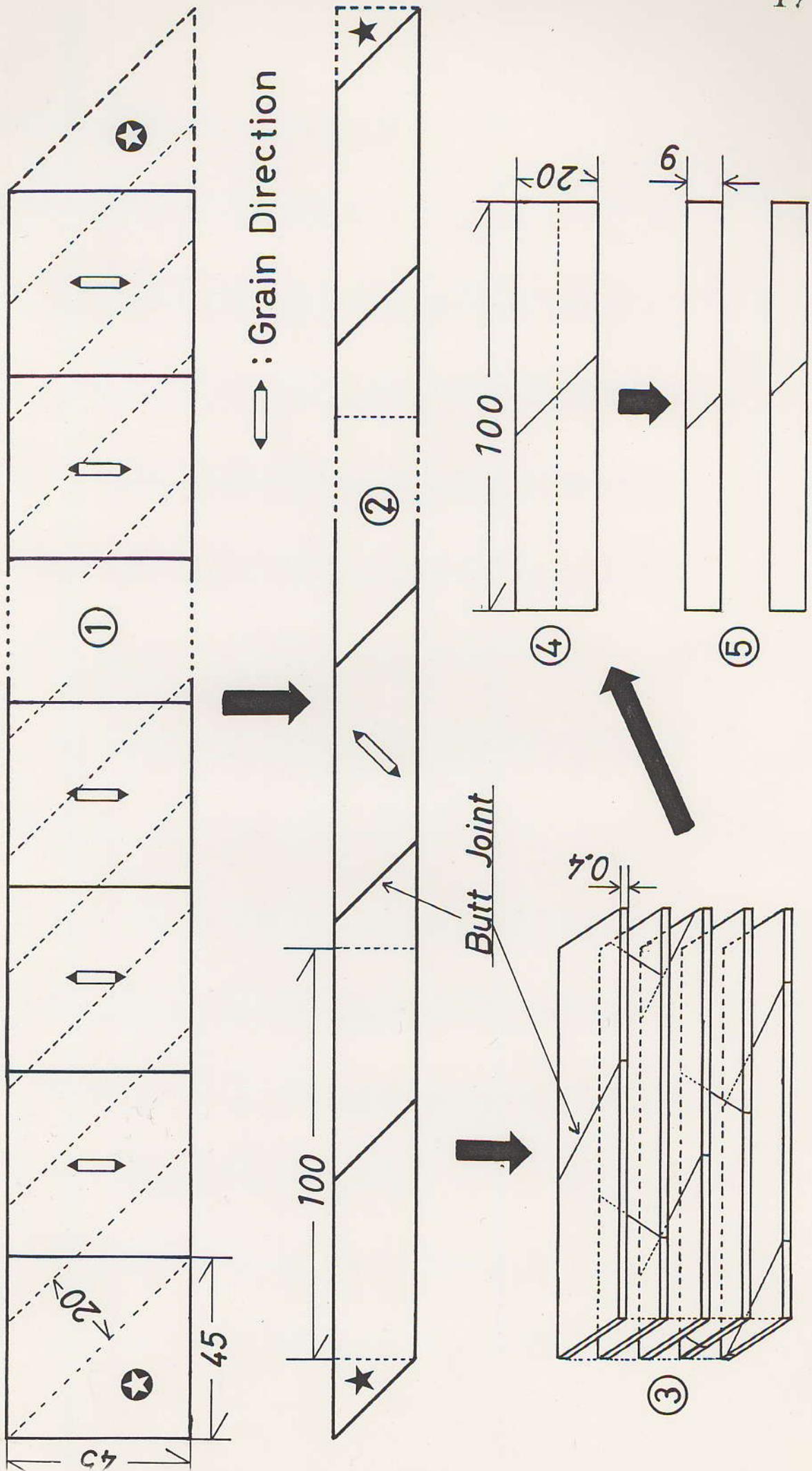


FIG. 6 Preparation of Plywood for 45° Web (cm)

した。つまり原木からロータリーレースで切削した時の状態に戻したわけである。

この時の接着には酢酸ビニル接着剤を用いた。そしてそれを繊維方向に対して $45^\circ$ の角度で幅が20cmになる様に切断した。

この時できた1枚目の単板の3角形の切れ端は、図の様に一番最後につなげた。

次に①でできた平行四辺形の単板を②の様に木口面で接着した。この接着にも酢酸ビニル接着剤を用いた。そして長さが1mになる様に、心材、辺材でそれぞれ10枚ずつ切断した。②で明らかなる様に、

この時の単板の繊維方向は長手方向に対して $45^\circ$ の方向である。次に②でできた $04 \times 20 \times 100^{cm}$ の単板を③の様に繊維方向が

垂直に交わりかつ Butt Joint がなるべく重ならない様に組み合わせて接着圧縮し 5 ply の合板を作った。この時の接着剤は 尿素樹脂 (三井東圧化学 (株) ユーロイド S-121) で、硬化剤として塩化アンモニウムを 0.6%、小麦粉を 30% 添加し、圧縮圧約  $2 \text{ kg/cm}^2$  で 24 時間以上室温で圧縮した。この時、 $45^\circ$  合板の組み合わせとして、  
① 心材のみのももの ② 心材 3 枚 (表、中央、裏) と辺材 2 枚のももの ③ 心材 2 枚と辺材 3 枚 (表、中央、裏) のもの ④ 辺材のみのももの 4 種類をそれぞれ 1 枚ずつ作製した。最後に ③ でできた 5 ply の  $45^\circ$  合板 (④) は、⑤ のように幅を 9 cm にとるえて縦挽きし、 $20 \times 90 \times$

100<sup>cm</sup>の試験体を合計8本作製した。

一昨年度の上野の卒業論文<sup>1)</sup>より、繊維方向が45°の合板の性能が良いということが確認されているので今回も期待できるものと思える。また今回のLVLには Butt Joint を含んでおり、厳密には合板とは言えないのだが、Butt Joint が強度におよぼす影響も興味深いものである。

### II-3-3 パーティクルボード

去年の実験結果と比較する為に去年の残りの、 $1.8 \times 9.0 \times 100^{\text{cm}}$ のパーティクルボードを4枚ウェブ材として用意した。

## II-4 I型梁の作製

フランジ材及びウェブ材は基礎材質を調べた後、組み合わせを決めた。それぞれの組み合わせは Table 1 の通りで、合計 19 体の試験体を作製した。フランジが素材でウェブがパーティクルボードの組み合わせに関しては、昨年度のデータがあるので今年では省略した。

これらの組み合わせは、フランジ材のヤング係数が上下でだいたい同じとし、

Table 1 フランジとウェブの組み合わせ

		Flange			total
		S	V	H	
Web	P	—	2	2	4
	45	2	2	2	6
	0	2	2	2	6
	90	2	2	2	6
total		5	7	7	19

フランジ材とウェブ材に関しては、それぞれヤング係数の大き<sup>た</sup>まものから適当に決めた。またフランジ材は通し番号の小さいものを上のフランジ材とした。

フランジは組み合わせるウェブの幅に合わせて、Fig. 7の様に1cmの厚さを残して、丸のこ盤及びビルターを用いて溝を切った。そして、フランジの溝の底及び側面、ウェブの接着面にそれぞれ、強

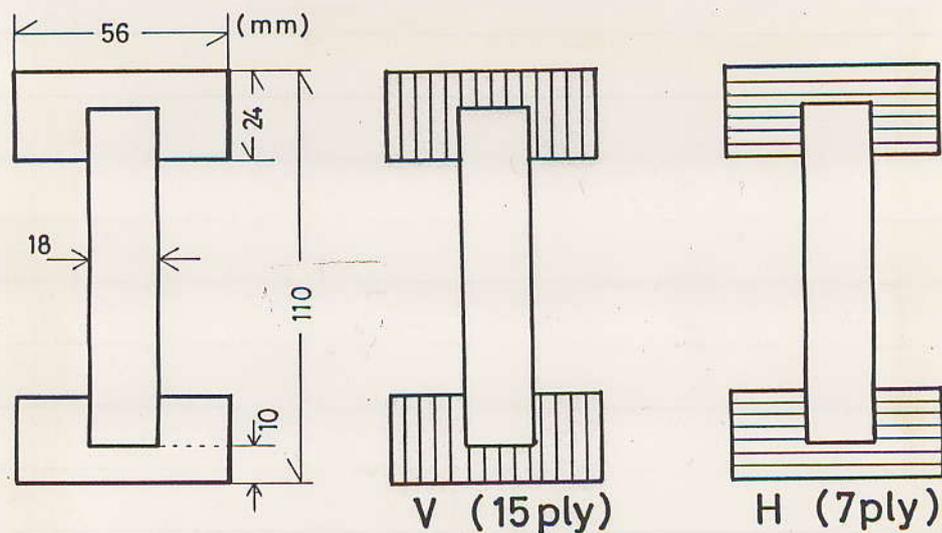


FIG.7 Cross Section of I-Beam

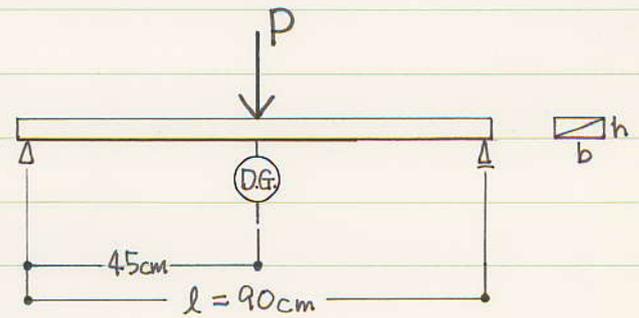
力を接着力と間隙充填性を期待してエポキシ樹脂（コニシ（株）工業用エポキシ系接着剤 ボンドE）を塗布し、ウェブをフランジの溝にはめ込んで<sup>た</sup>はがねで保持し、室内で一週間以上養生した。

尚、できあがったI型梁のだいたいの寸法は Fig. 7 の通りで、フランジが垂直 LVL（V）と水平 LVL（H）の様子も Fig. 7 に示した。

# III 試験方法

## III-1 構成材料の基礎材質

フレンジ材の  
 曲げヤング係数  
 (flatwise)、及



ズウェブ材の曲

Fig. 8 曲げ試験方法.

げヤング係数 (flatwise, edgewise)

の測定は Fig. 8

のように、スパン

90cm、中央集

Table 2. 曲げ試験の荷重 (kg)

試験体	flatwise	edgewise
Flange	10	—
Web	0	30
	90	2
	45	10
	P	10

中荷重により行った。この時のダイヤル

ゲージの精度は  $1/100$ mm で、各試験体の荷

重は表 2 に示した。

また 0° LVL、45°合板、パーティクル

ボードの剪断弾性係数は、Fig. 9のように、モーメントアーム50cm、荷重1kgのねじり試験により求めた。ダイヤルゲージの精度は $1/100$ mmで、各試験体について2ヶ所ずつ測定し、その平均値より剪断弾性係数を算出した。

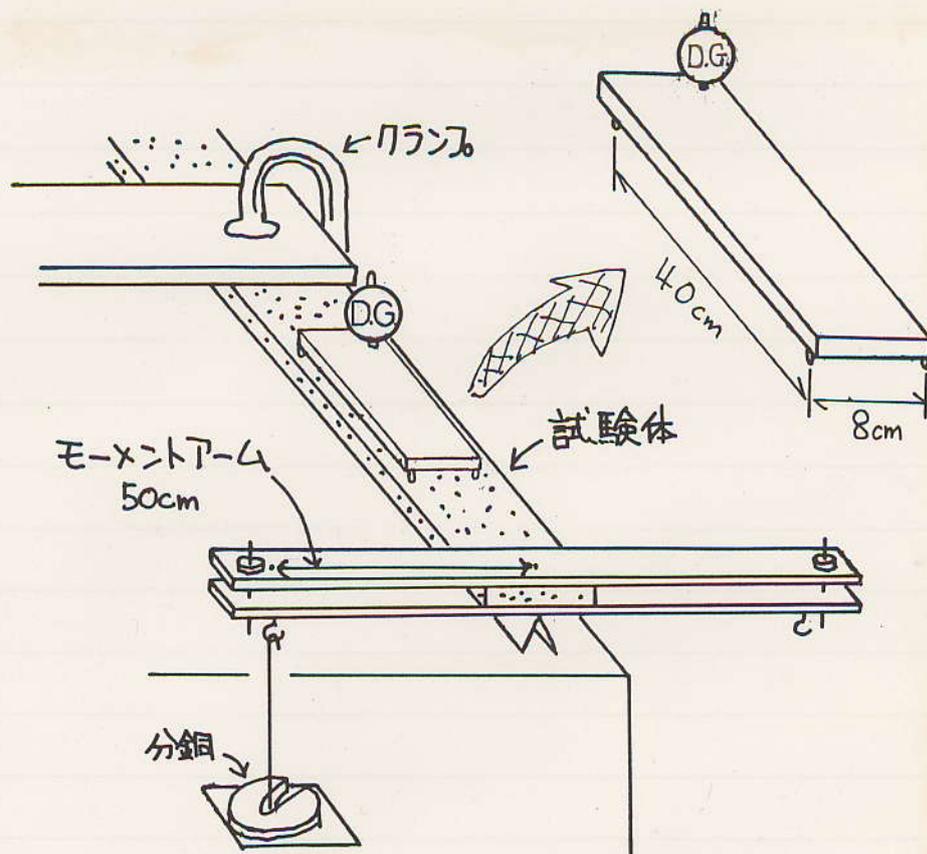


FIG. 9 ねじり試験方法

### III - 2 I型梁の曲げ剛性試験

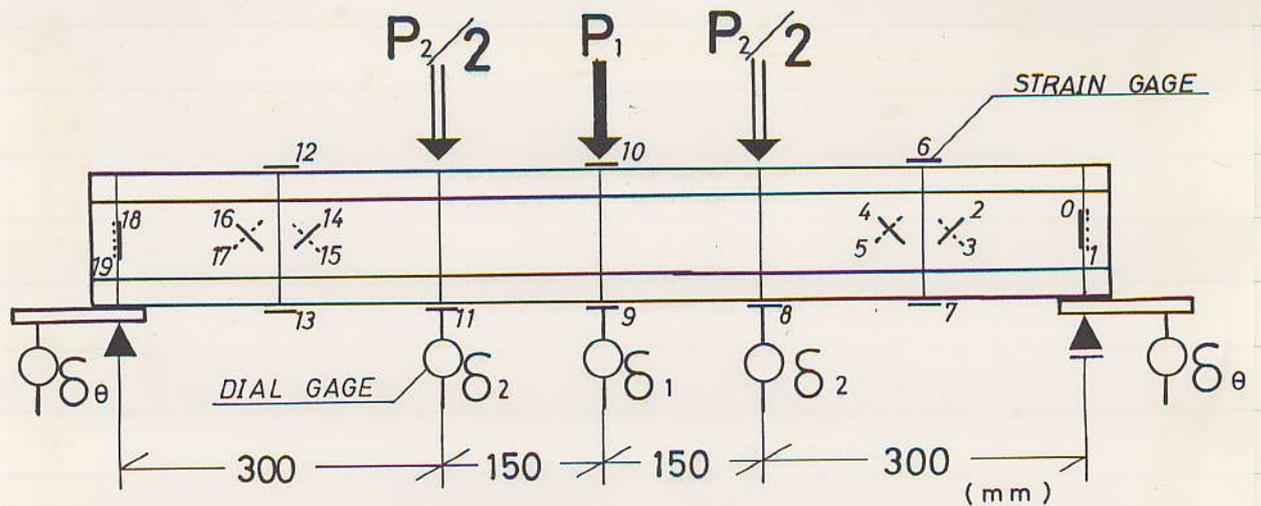


FIG.10 The Method of Bending Test

Fig.10に示す様に、まず初めにスパン  
 90cmで中央集中荷重 $P_1$ 及び、3分点2  
 点荷重 $P_2$ により曲げ剛性試験を行い、  
 中央撓み $\delta_1$ 、3分点撓み $\delta_2$ 、支点傾斜  
 角 $\theta$ を測定した。この時のダイヤルゲー  
 ジは全て精度が $1/1000\text{mm}$ のものを用いた。  
 また各試験体の荷重は、ウェブの種類ご  
 とに決めた。(Table 3)

Table 3 Load in Bending Test

Web	P1-1	P1-2	P2
0	15kg* 8=120kg	20kg*10=200kg	20kg*10=200kg
90	20kg*10=200kg	20kg*10=200kg	30kg*10=300kg
45	30kg* 9=270kg	30kg*10=300kg	50kg* 8=400kg
P	30kg* 9=270kg	30kg*10=300kg	50kg* 8=400kg

次に、Fig.10の10番以外の19ヶ所に、

16 mmの歪ゲージを図の様に貼付し、中央

集中荷重  $P_{1-2}$  で曲げ剛性試験を行い、フ

ンジ縦歪、ウェブ垂直歪（支点）、ウ

ェブ剪断歪を測定した。荷重は Table 3

の通りで、同時に精度  $1/1000$  mmのダイヤル

ゲージを用いて、中央撓み  $\delta_1$  と支点傾斜

角  $\theta$  も測定した。

歪ゲージを貼付する際、LVLと45合

板及びパーティクルボードは接着剤を吸

収して接着不良を生じやすいので、ゲー

ジを貼付する前に接着剤の捨て塗りを行った。この時の接着剤は主に(株)共和電業の GAGE CEMENT BC-11 ニトロセルローズ [含有規制成分 アセトン ( $\text{CH}_3)_2\text{CO}$  30% wt.%] を用いた。また一部には、新興通信(株)の K-4 も用いた。

### III - 3 I型梁の曲げ破壊試験

Fig.10の10番の位置にも歪ゲージを貼付して、スパン90cm、3分点2点荷重で曲げ破壊試験を行い、フランジ縦歪、ウェブ垂直歪(支点)、ウェブ剪断歪、中央撓み $\delta_1$ 、支点傾斜角 $\theta$ を測定した。中

中央撓みの測定には、ものさしを用い望遠鏡をのぞいて  $1/10$  mm の値まで測定した。

また支点傾斜角の測定には、 $1/1000$  の精度のダイヤルゲージを用いた。それぞれの値は荷重 100 kg ごとに測定した。

#### Ⅲ - 4 使用機器

##### ▶ I 型梁曲げ剛性試験・曲げ破壊試験

(株) 森試験機製作所  
・ 5 t 万能試験機

##### ▶ 撓み・傾斜角測定

###### 小野測器

- ・  $1/100$  mm デジタルゲージセンサー
- ・  $1/1000$  mm デジタルゲージセンサー
- ・ 自動記録装置 (MG-120)

## ▶ 歪測定

新興通信 (株)

- ・ 16 mm Strain gage (paper base)
- ( 8 mm Strain gage (paper base) )

(株) 共和電業

- ・ ストレインゲージ (70リットル付)  
SD - 500 A
- ・ スイッチボックス (20点用)  
ASD 52E

# IV 計算式 <sup>5), 6)</sup>

## IV-1 構成材料の基礎材質

フランジの flat-wise の曲げヤング係数及びウェブの flatwise と edgewise の曲げヤング係数は Fig.11 より次の様になった。

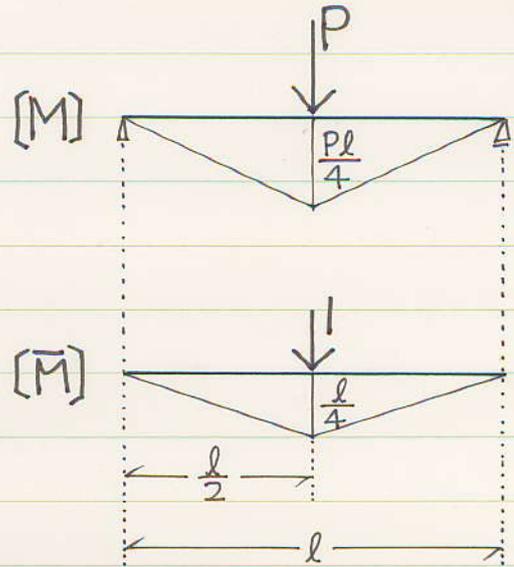


Fig. 11

$$E = \frac{l^3}{48I} \cdot \frac{P}{\delta} \dots \dots \dots <1>$$

( l = 90 cm )

ウェブの捩り試験による剪断弾性係数は次式より求めた。

$$\tau_{max} = k \cdot a G \theta = M_t / k_2 a^2 b \dots \dots \dots <2>$$

$\left\{ \begin{array}{l} M_t = \text{捩りモーメント} \\ G = \text{ウェブの剪断弾性係数} \end{array} \right.$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \varphi / l \quad (\varphi = \text{捩り角}) \\ a = \text{ウエブの幅} \\ b = \text{ウエブの高さ} \end{array} \right.$$

$$k_1 = k \cdot k_2^{5)}$$

とおけば

$$M_t = k_1 G \theta a^3 b \dots\dots\dots <3>$$

$$G = M_t / k_1 \cdot \theta \cdot a^3 b \dots\dots\dots <4>$$

Fig. 9 より

$$M_t = 50 \cdot P \dots\dots\dots <5>$$

Fig. 12 より

$$\theta = \varphi / l = \delta / 8l = \delta / 320 \dots\dots\dots <6>$$

<4><5><6> より

$$G = \frac{320 \times 50}{k_1 a^3 \cdot b} \left( \frac{P}{\delta} \right) \dots\dots\dots <7>$$

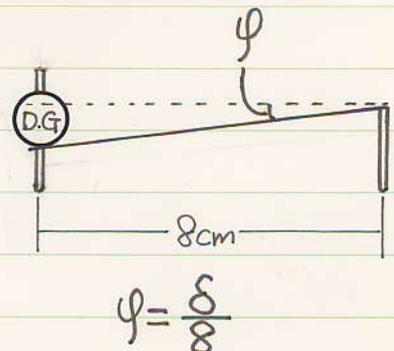
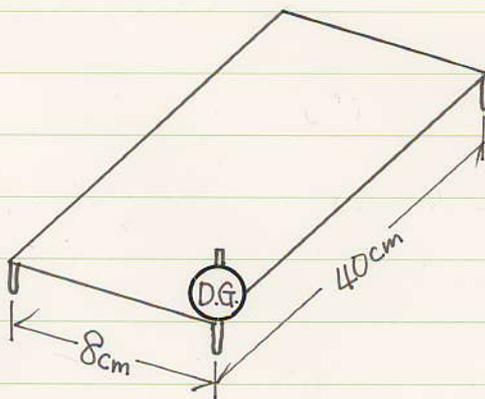


Fig. 12

IV - 2 I型梁の中立軸と剛性

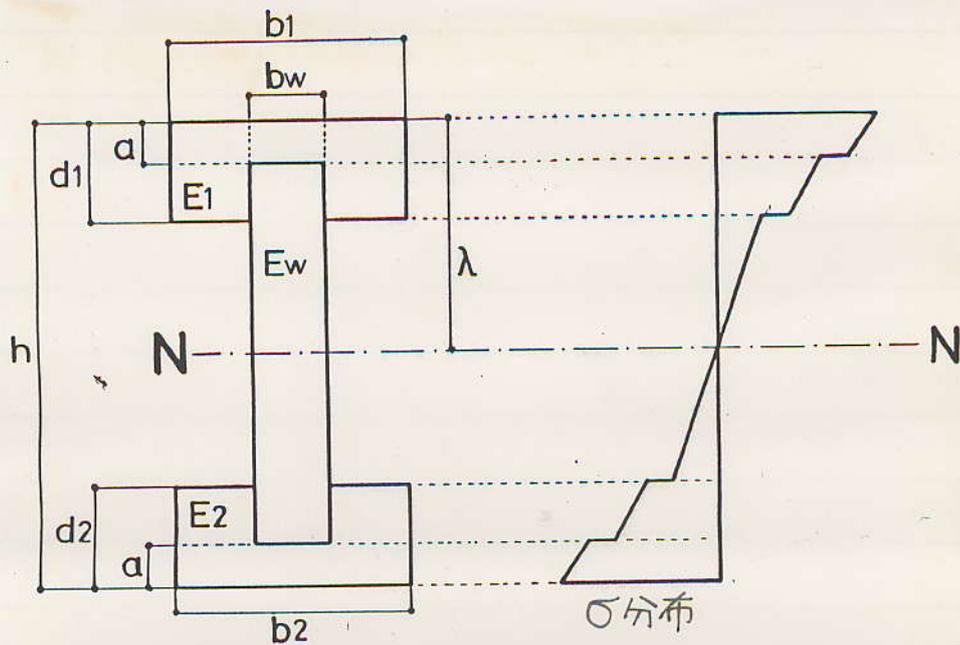


FIG.12 梁の断面と曲げ応力分布

このI型梁の場合、曲げ応力(σ)は

Fig.12のような分布となり、中立軸(λ

)は、 $\int_A \sigma dA = 0$  より

$$\int_0^a b_1 \frac{E_1}{\rho} (y-\lambda) dy + \int_a^{d_1} (b_1-bw) \frac{E_1}{\rho} (y-\lambda) dy + \int_a^{h-a} bw \frac{E_w}{\rho} (y-\lambda) dy + \int_{h-d_2}^{h-a} (b_2-bw) \frac{E_2}{\rho} (y-\lambda) dy + \int_{h-a}^h b_2 \frac{E_2}{\rho} (y-\lambda) dy = 0$$

..... <8>

<8> 式を解くと

$$\lambda = \frac{1}{2} \cdot \frac{[b_1 a^2 + (b_1 - bw)(d_1^2 - a^2)] E_1 + bw(h^2 - 2ha) E_w + [(b_2 - bw)\{(h-a)^2 - (h-d_2)^2\} + b_2(2ha - a^2)] E_2}{[b_1 a + (b_1 - bw)(d_1 - a)] E_1 + bw(h - 2a) E_w + [(b_2 - bw)(d_2 - a) - b_2 a] E_2}$$

..... <9>

となり中立軸が求められる。

また構成部材の断面二次モーメントは

$$I = \int_A y^2 dA \text{ より}$$

上フレンジ

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{\lambda-a}^{\lambda} b_1 y^2 dy + \int_{\lambda-d_1}^{\lambda-a} (b_1 - b_w) y^2 dy \\ &= \frac{b_1}{3} [\lambda^3 - (\lambda-a)^3] + \frac{b_1 - b_w}{3} [(\lambda-a)^3 - (\lambda-d_1)^3] \end{aligned} \quad \text{-----} \langle 10 \rangle$$

ウェブ

$$\begin{aligned} I_w &= \int_{h-\lambda-a}^{\lambda-a} b_w y^2 dy \\ &= \frac{b_w}{3} [(\lambda-a)^3 + (h-\lambda-a)^3] \end{aligned} \quad \text{-----} \langle 11 \rangle$$

下フレンジ

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_{h-\lambda-d_2}^{h-\lambda-a} (b_2 - b_w) y^2 dy + \int_{h-\lambda-a}^{h-\lambda} b_2 y^2 dy \\ &= \frac{b_2 - b_w}{3} [(h-\lambda-a)^3 - (h-\lambda-d_2)^3] + \frac{b_2}{3} [(h-\lambda)^3 - (h-\lambda-a)^3] \end{aligned} \quad \text{-----} \langle 12 \rangle$$

となる。

また曲げ剛性 (EI) は、 $EI = \sum E_i I_i$  より、

$$EI = E_1 I_1 + E_w I_w + E_2 I_2 \quad \text{-----} \langle 13 \rangle$$

となる。

剪断剛性 ( $GA/k$ ) については、I 型断面梁の場合  $k$  の値が求められていないので F.P.L. (アメリカ林産試験所) の研究による剪断撓み算出式から逆算した。<sup>7)</sup>

F.P.L. の式を次に示す。〔Fig. 13; <14> <15>〕

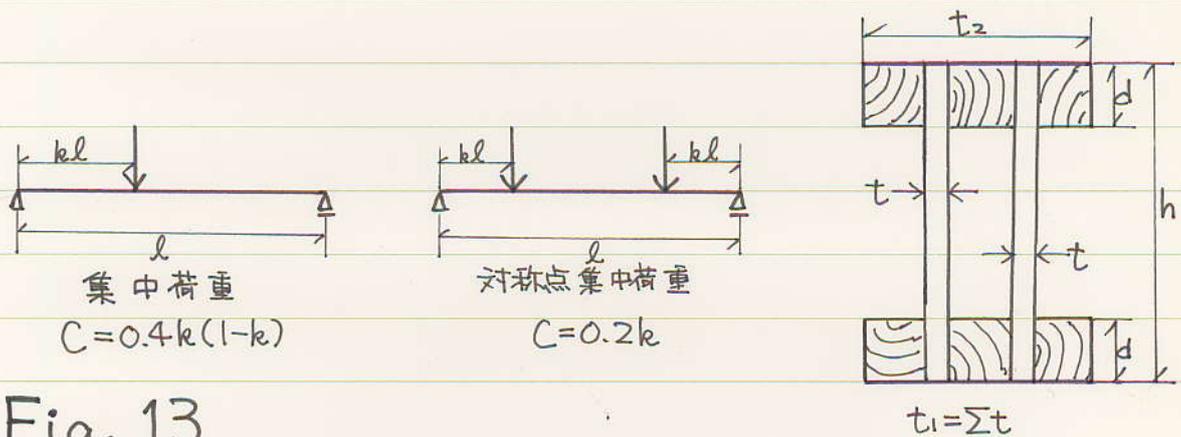


Fig. 13

$$\delta_s = \frac{PlKh^2C}{GI} \quad \text{--- <14>}$$

( $\delta_s$ ; 剪断撓み,  $G$ ; ウェブの剪断弾性係数)

$$K = \frac{1}{4} \left[ 1 + \frac{12d^3 - 18d^2h + 6dh^2}{h^3} \left( \frac{1}{\frac{t_1}{t_2}} - 1 \right) \right] \quad \text{--- <15>}$$

<14> <15> 式及び Fig. 13 より、中央集中荷

重時のスパン中央における剪断撓みを求めると、

$$\delta_s = \frac{KPlh^2}{10GI} \quad \text{--- (16)}$$

また

$$\delta_s = \int \frac{kQ\bar{Q}}{GA} dx = \frac{kPl}{4GA} \quad \text{--- (17)}$$

であるから、(16)(17)式より

$$\frac{GA}{k} = \frac{5GI}{2Kh^2} \quad \text{--- (18)}$$

(Kは(15)式による)

となる。また参考の為去年と同じ沢田式簡易法でも、剪断剛性( $G'A/k$ )を求めてみた。

$$\frac{G'A}{k} = \frac{\overset{k}{\cancel{6}}}{\underset{6}{5}} G \cdot bw \cdot h \quad \text{--- (19)}$$

## IV - 3 I型梁の撓みと傾斜角

I型梁の撓みと支点傾斜角は Fig. 13より次の様に算出した。

## i) 中央集中荷重

・ 中央撓み  $\delta_{11} = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{kPl}{4GA}$  <20>

・ 3分点撓み  $\delta_{12} = \frac{23Pl^3}{1296EI} + \frac{kPl}{6GA}$  <21>

・ 支点傾斜角  $\theta_1 = \frac{Pl^2}{16EI} + \frac{kP}{2GA}$  <22>

## ii) 3分点2点荷重

・ 中央撓み  $\delta_{21} = \frac{23Pl^3}{1296EI} + \frac{kPl}{6GA}$  <23>

・ 3分点撓み  $\delta_{22} = \frac{5Pl^3}{324EI} + \frac{kPl}{6GA}$  <24>

・ 支点傾斜角  $\theta_2 = \frac{Pl^2}{18EI} + \frac{kP}{2GA}$  <25>

曲げモーメント力によるもの

剪断力によるもの

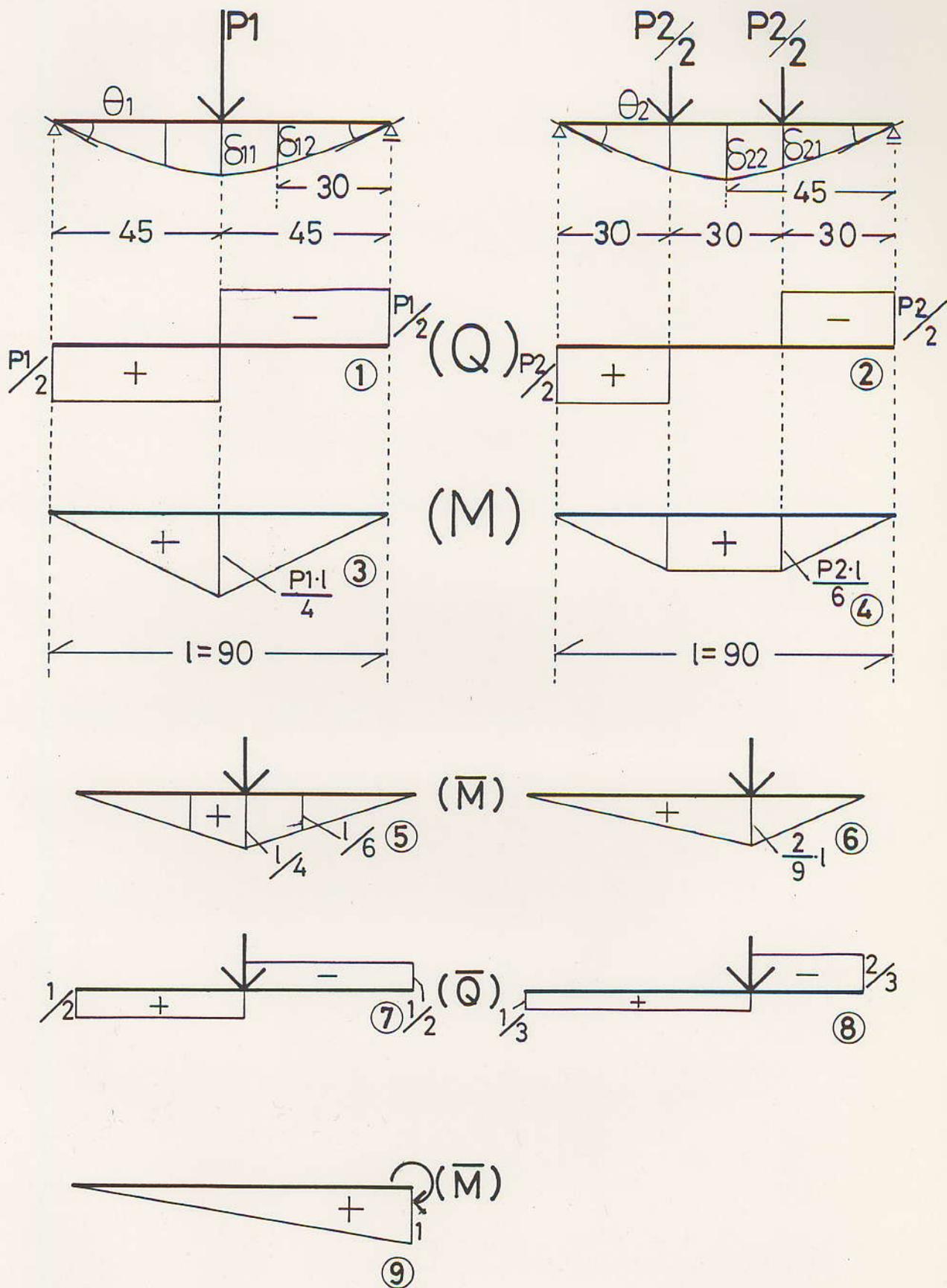


FIG. 14

IV - 4 曲げ応力と剪断応力

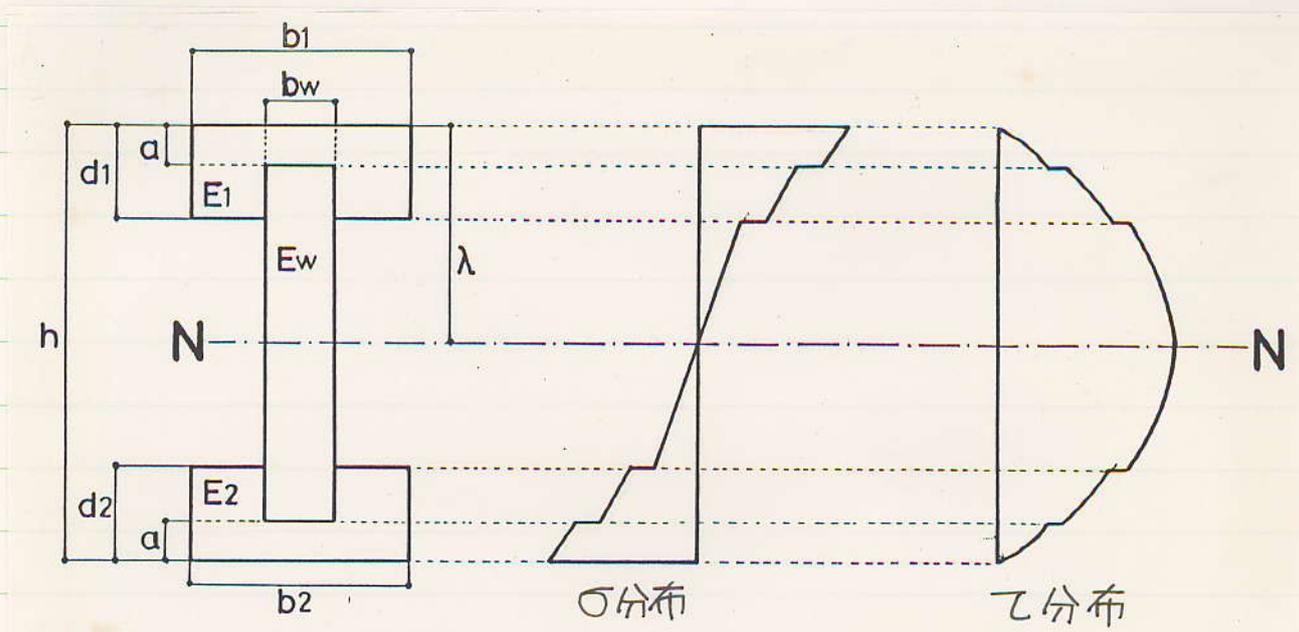


FIG. 15 曲げ応力・剪断応力分布

I型梁の曲げ応力及び剪断応力の分布は Fig. 15 の様になる。

圧縮側フランジの曲げ応力の計算値 ( $\sigma_{cal.}$ ) は次のようになる。

$$\sigma_{cal} = \varepsilon \cdot E_f = \frac{\lambda}{\rho} \cdot E_f = \frac{E_1 \rho \lambda}{6 E I} \quad \dots \dots \dots (26)$$

また実測値は、次のようになる。

$$\sigma_{exp} = \varepsilon \cdot E_1 \quad \dots \dots \dots (27)$$

( $\varepsilon = \varepsilon_{10}$ )

ウェブの最大剪断応力の実測値は次のようになる。

$$\tau_{\max} = \gamma \cdot G_{\text{web}} = 2\varepsilon \cdot G_{\text{web}} \text{ ----- (28)}$$

$$(\varepsilon = \frac{1}{8} (|\varepsilon_2| + |\varepsilon_3| + |\varepsilon_4| + |\varepsilon_5| + |\varepsilon_6| + |\varepsilon_7| + |\varepsilon_8| + |\varepsilon_9|))$$

\*ゲージの位置は Fig. 16 参照

## IV - 5 使用機器

### ▶ 計算

• CASIO	FX-602P	(Programmable Calculator)
• NEC	PC-8801	(Personal Computer)
	PC-8851	(Monochrome Display Monitor)
	PC-8822	(Dot Matrix Printer)
EPSON	TF-20	(Mini Disc Unit)
Maxell	MD1-D	(Mini-Floppy Disc)

### ▶ 歪グラフ

• NEC	PC-8801	(Personal Computer)
	PC-8011	(Expansion Unit)
	PC-8023	(Printer)
	PC-8031	(Mini Disc Unit)
	JB-1202M	(Character Display)
WATANABE	WX-4671	(Plotter)
Maxell	MD1-D	(Mini-Floppy Disc)

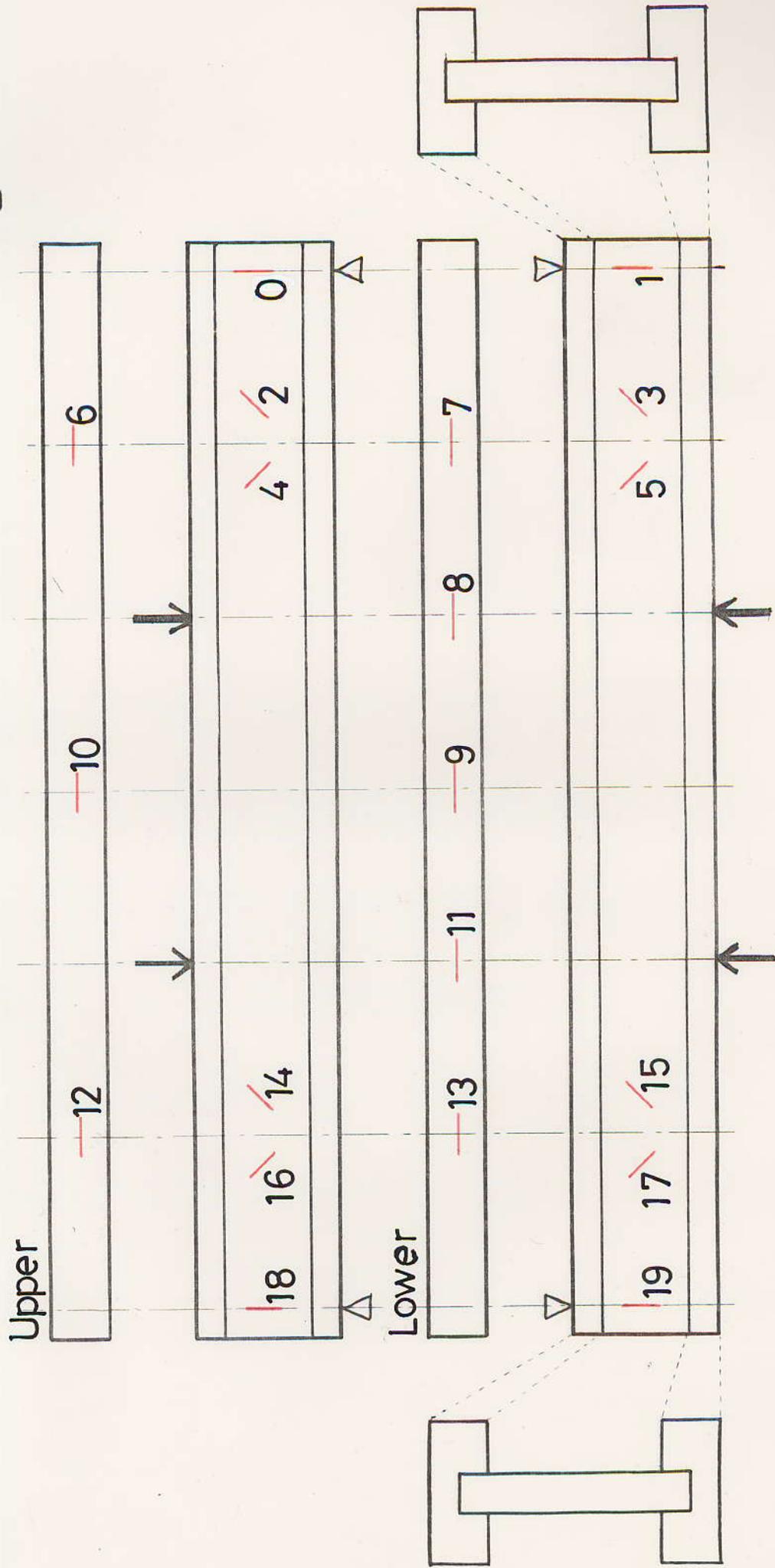


Fig.16 Position of Strain Gage

## ▽ 結果と考察

### ▽ - 1 構成材料の基礎材質

#### ▽ - 1 - 1 フランジ

Table 4 にフランジ材の寸法と材質を示した。垂直 LVL (V) と水平 LVL (H) のヤング係数は、どちらも  $110 \text{ t/cm}^2$  前後で、変動係数がそれぞれ 25%、54% ということより、LVL の材質が一定であることがわかる。また LVL の含水率は約 13.7% で、比重は  $0.578 \sim 0.627 \text{ g/cm}^3$  と素材の  $0.393 \sim 0.466 \text{ g/cm}^3$  よりも高い値を示した。

素材 (S) は、いずれも気乾材で、1 ~ 24 が去年の残りのもの、31 ~ 35 が今年新たに準備したものである。ヤング係数

Table 4 Size and Basic Properties of Flange

No.	I-Beam	Size (cm)			I (cm <sup>4</sup> )	SG (g/cm <sup>3</sup> )	Ef (t/cm <sup>2</sup> )
		b	h	l			
V1	V- P-2	5.640	2.450	125.5	6.91	0.589	111.0
V2	<del>V- 0-1</del>	5.640	2.450	125.5	6.91	0.585	118.0
V3	V-45-2	5.660	2.450	125.5	6.94	0.585	114.6
V4	V- P-2	5.680	2.460	125.5	7.05	0.579	111.0
V5	V-90-1	5.660	2.450	125.5	6.94	0.584	112.8
V6	V-45-1	5.660	2.440	125.5	6.85	0.578	109.8
V7	*****	5.635	2.450	125.5	6.91	0.585	108.3
V8	V-90-1	5.615	2.440	125.5	6.80	0.587	111.7
V9	V- P-1	5.600	2.450	125.5	6.86	0.578	116.5
V10	V-90-2	5.670	2.440	125.8	6.86	0.583	115.3
V11	V-90-2	5.610	2.450	126.0	6.88	0.595	115.0
V12	V-45-1	5.575	2.450	126.0	6.83	0.590	110.6
V13	V- 0-1	5.550	2.435	126.0	6.68	0.595	110.9
V14	*****	5.540	2.440	126.0	6.71	0.591	109.3
V15	*****	5.520	2.450	126.0	6.76	0.593	110.7
V16	V- P-1	5.560	2.445	126.0	6.77	0.590	116.2
V17	V-45-2	5.575	2.460	126.0	6.92	0.584	114.5
Av. C.V.		5.611	2.448	125.7	6.86	0.587 0.90%	112.7 2.47%
H1	H-45-1	5.740	2.600	126.0	8.41	0.609	112.2
H2	H-90-1 2	5.730	2.640	126.0	8.79	0.603	112.9
H3	H-45-2	5.690	2.680	126.0	9.13	0.609	94.1
H4	H-45-2	5.730	2.640	126.0	8.79	0.600	105.5
H5	H-90-1 2	5.710	2.600	126.0	8.36	0.627	115.7
H6	H-45-1	5.700	2.580	126.0	8.16	0.624	112.1
H7	H- P-1	5.690	2.630	126.0	8.63	0.613	118.9
H8	H- 0-1	5.735	2.675	122.2	9.15	0.579	105.7
H9	H-90-2 1	5.740	2.660	122.2	9.00	0.593	111.0
H10	H- P-2	5.740	2.700	122.2	9.42	0.586	107.5
H11	H-90-2 1	5.740	2.660	122.2	9.00	0.597	109.6
H12	H- 0-1	5.730	2.650	122.2	8.89	0.594	107.4
H13	H- P-1	5.735	2.620	122.2	8.60	0.601	117.7
H14	H- P-2	5.725	2.640	122.2	8.78	0.590	108.8
Av. C.V.		5.724	2.641	124.1	8.79	0.602 2.19%	109.9 5.41%
S1	S-90-2 1	5.650	2.370	110.6	6.27	0.393	106.2
S2	*****	5.680	2.375	110.5	6.34	0.417	118.0
S8	S-45-2	5.670	2.365	104.8	6.25	0.437	103.0
S9	S-45-2	5.680	2.375	104.9	6.34	0.466	106.0
S10	S-45-1	5.675	2.405	101.2	6.58	0.413	98.2
S11	*****	5.660	2.355	105.6	6.16	0.416	71.4
S15	<del>S- 0-1</del>	5.650	2.380	105.8	6.35	0.422	101.5
S24	S-90-2 1	5.680	2.360	105.6	6.22	0.465	109.5
S31	S-90-1 2	5.720	2.325	109.3	5.99	0.433	88.7
S32	S-90-1 2	5.715	2.335	109.3	6.06	0.443	86.1
S33	S-45-1	5.730	2.360	109.3	6.28	0.433	89.6
S34	S- 0-1	5.715	2.315	109.3	5.91	0.422	100.0
S35	*****	5.715	2.350	109.3	6.18	0.412	78.8
Av. C.V.		5.688	2.359	107.3	6.23	0.429 4.67%	96.7 13.01%
Av. C.V.		5.670	2.483	119.8	7.29	0.545 14.08%	107.1 9.69%

V-0-1

S-0-1

103.6

は、 $71.4 \sim 118.0 \text{ t/cm}^2$  まで、一昨年、昨年より  
も小さかった。

### V-1-2 ウェブ

Table 5 にウェブ材の寸法と材質を示した。ヤング係数は、flatwise, edgewise 共に  
撓みからの実測値である。edgewise のヤ  
ング係数は、剪断撓みを考慮すれば表の  
値より若干大きくなると思われる。

### ☆ $0^\circ$ LVL

$0^\circ$  LVL のヤング係数は flatwise ( $E_f$ ) >  
edgewise ( $E_e$ ) となり  $E_f$  は  $100 \text{ t/cm}^2$  前後とな  
った。15 ply LVL 及び 7 ply LVL の  $E_f$  が  
共に  $110 \text{ t/cm}^2$  (Table 4) だったので、  
5 ply LVL の曲げ剛性は若干小さい様に

Table 5 Size and Basic Properties of Web

No.	I-Beam	Size (cm)			I (cm <sup>4</sup> )		SG#	E (t/cm <sup>3</sup> )		G##
		b	h	l	edge	flat		edge	flat	
0 -1	*****	9.020	1.910	125.5	116.8	5.24	.561	75.0	104.3	7.5
0 -2	VS- 0-1	9.020	1.910	125.5	116.8	5.24	.563	81.3	107.3	7.6
0 -3	HV- 0-1	9.020	1.930	125.5	118.0	5.40	.561	80.4	105.7	7.2
0 -4	SH- 0-1	9.020	1.920	125.5	117.4	5.32	.552	77.6	89.8	7.3
0 -5	*****	9.020	1.930	125.5	118.0	5.40	.558	80.4	97.7	7.3
Av.	-----	9.020	1.920	125.5	117.4	5.32	.559	78.9	101.0	7.4
C.V.	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.69%	2.95%	6.40%	1.99%
90-1	VS-90-1	8.980	1.875	104.0	113.1	4.93	.622	4.9	4.3	7.4
90-2	HV-90-1	9.010	1.920	104.0	117.0	5.31	.581	4.7	3.9	7.4
90-3	SH-90-1	9.010	1.920	104.0	117.0	5.31	.570	4.6	3.8	7.4
90-4	VS-90-2	9.000	1.900	104.0	115.4	5.14	.559	4.3	3.6	7.4
90-5	SH-90-2	9.000	1.905	104.0	115.7	5.18	.565	4.5	3.7	7.4
90-6	HV-90-2	9.000	1.930	104.0	117.2	5.39	.565	4.4	3.4	7.4
Av.	-----	9.000	1.908	104.0	115.9	5.21	.577	4.6	3.8	7.4
C.V.	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3.68%	4.32%	7.38%	0.00%
45-1	VS-45-2	9.020	2.000	99.2	122.3	6.01	.549	28.2	27.0	11.6
45-2	HV-45-2	9.050	2.015	99.2	124.5	6.17	.533	30.0	25.6	10.7
45-3	*****	9.050	1.985	99.2	122.6	5.90	.547	23.8	22.3	9.5
45-4	VS-45-1	9.050	1.975	99.2	122.0	5.81	.541	22.6	21.6	9.4
45-5	HV-45-1	9.050	1.960	99.2	121.1	5.68	.528	25.6	21.7	9.4
45-6	SH-45-2	9.055	1.975	99.2	122.2	5.81	.525	23.4	23.3	9.5
45-7	*****	9.040	1.955	99.2	120.4	5.63	.548	27.4	20.0	8.6
45-8	SH-45-1	9.045	1.960	99.2	120.9	5.68	.558	25.1	20.3	9.1
Av.	-----	9.045	1.978	99.2	122.0	5.84	.541	25.8	22.7	9.7
C.V.	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1.99%	9.36%	10.16%	9.22%
P -1	V- P-1	9.050	1.830	100.0	113.0	4.62	.773	25.8	36.0	12.0
P -2	V- P-2	9.020	1.830	100.0	111.9	4.61	.775	26.1	36.1	12.3
P -3	H- P-1	9.030	1.840	100.0	112.9	4.69	.773	24.5	33.8	11.1
P -4	H- P-2	9.020	1.830	100.0	111.9	4.61	.774	26.6	35.3	12.0
*P-5	S- P-1	9.030	1.815	100.0	111.4	4.50	.763	28.9	39.1	22.9
*P-6	S- P-2	9.020	1.810	100.0	110.7	4.46	.769	28.6	39.6	23.7
*P-7	S- P-3	9.030	1.800	100.0	110.4	4.39	.772	29.8	40.2	23.8
Av.	-----	9.029	1.822	100.0	111.8	4.55	.771	27.2	37.2	16.8
C.V.	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.50%	6.58%	6.12%	34.26%
Av.	-----	9.025	1.909	106.3	117.0	5.25	.615	31.5	37.3	10.7
C.V.	-----	-----	-----	-----	-----	-----	15.72%	79.03%	89.56%	46.22%

Note ; # : (g/cm<sup>3</sup>)      ## : (t/cm<sup>2</sup>)  
 \* : Previous data

思える。剪断弾性係数 ( $G$ ) は、ねじり試験 (Fig. 8) による実測値だが、 $0^\circ$  L V L の場合木口面の  $G$  の影響が全くないので、正しい値と考えられる。比重は、

0.552 ~ 0.563  $g/cm^3$  で 15 ply L V L 及び 7 ply L V L (Table 4) より数%小さかった。

尚、No. 0-5 は  $90^\circ$  L V L の作製の際、材料の一部として使用した。(Fig. 5)

### ☆ $90^\circ$ L V L

$90^\circ$  L V L は Fig. 4 より明らか存様に、

繊維方向が軸方向に対して垂直な為、ヤング係数は  $E_f$  で 36 ~ 43  $t/cm^2$ 、 $E_e$  で 4.3 ~ 4.9  $t/cm^2$  と非常に小さくなった。また、 $0^\circ$  L V L とは逆に  $E_e > E_f$  となったが、これは flatwise で試験を行った時の下面の裏割れ

の影響等が考えられる。90° LVL の場合  
ねじり試験による剪断弾性係数の測定で  
は、木口面の  $G$  の影響が大きすぎて実際  
よりかなり小さな値となると考えられた  
ので、0° LVL の剪断弾性係数の平均を  
採用した。90° LVL と 0° LVL は、もと  
もと同じ 5 ply LVL なので、剪断弾性係  
数も当然同じであるから本質的に問題は  
ないだろう。また比重は、 $0.559 \sim 0.662 \text{ g/cm}^3$   
であった。

### ☆45°合板

45°合板の組み合わせは、1・2 が心材の  
み、3・4 が心材3枚辺材2枚、5・6 が心  
材2枚辺材3枚、7・8 が辺材のみとなっ  
ている。

比重は、 $0.525 \sim 0.558 \text{ g/cm}^3$ で、心材と辺材との差は認められなかった。また  $E_e$ ,  $E_f$ ,  $G$  は全て心材のみのもものが辺材のみのもものより大きくなり、心材の方が辺材よりも強いという結果になった。北海道立林産試験場の森泉らの研究<sup>4)</sup>によると、末口径  $16 \sim 20 \text{ cm}$  のカラマツ材では、未成熟材部 = 心材、成熟材部 = 辺材と見なしてよいとされている。しかし、今回の末口径  $20 \sim 30 \text{ cm}$  のカラマツ材に関しては、比重、 $E$ ,  $G$  の結果より、おき心径  $7 \text{ cm}$  の心材単板には未成熟材部がほとんど含まれていなかったと考えられる。

また、 $45^\circ$ 合板も  $90^\circ$  L V L と同様に  $E_e > E_f$  となり、辺材のみの場合には特に差が大

まくなった。なお、ねじり試験による $45^\circ$ 合板の剪断弾性係数は、木口面の $G$ の影響を実際よりも小さ目に出ている様に思われる。

### ☆パーティクルボード

パーティクルボードのヤング係数は、 $E_f > E_e$ となった。また、flatwise, edgewise共に昨年よりも小さな値となった。剪断弾性係数に関しては、昨年度の平均が $23.5 \text{ t/cm}^2$ なのに対して今年は $1/2$ の $11.9 \text{ t/cm}^2$ となった。測定方法、材料は昨年と同じなのを理由はよくわからない。パーティクルボードも $45^\circ$ 合板と同様に木口面の $G$ が影響するが、表面付近が緻密で内部が粗い3層構造の為、表面の $G$ の影響もあ

り、測定方法が難しいと思える。また、比重は  $0.773 \sim 0.775 \text{ g/cm}^3$  の範囲に入っており、 $E$ 、 $G$  の測定値からも非常に均一な材質と考えられる。

### V-1-3 I型梁

Table 6 に、I型梁の寸法と材質を示した。表の No. は、フランジ、ウェブそれぞれの構成材料を示している。

剪断剛性 ( $GA_k$ ) は、F.P.L. の式 (<18>) から導びいたものと、沢田式簡易法 (<19>) から導びいたものの両方を記載したが、全て F.P.L. の方が 2 割以上大きな値となった。いずれにせよ、剪断剛性はウェブに支配されるので、ウェブの剪断弾

Table 6 Size and Properties of I-Beam

No.	Flange			Web		I-beam				
	b1	h1	E1	bw	Ew	h	*GA/k	I	E	EI
	b2	h2	E2	hw	Gw	N	**GA/k			
V- P-1	5.600 5.560	2.450 2.445	116.5 116.2	1.830 9.050	26.5 12.0	11.000 5.477	248.8 201.0	547.8	97.8	53.58
V- P-2	5.640 5.680	2.450 2.460	111.0 111.0	1.830 9.020	26.8 12.3	11.055 5.548	257.4 207.7	563.2	94.3	53.09
H- P-1	5.735 5.690	2.620 2.630	117.7 118.9	1.840 9.030	25.1 11.6	11.040 5.525	250.1 196.5	577.9	100.1	57.84
H- P-2	5.725 5.740	2.640 2.700	108.8 107.5	1.830 9.020	27.3 12.0	11.000 5.507	259.4 201.7	576.8	92.5	53.34
S-45-1	5.675 5.730	2.405 2.360	98.2 89.6	1.960 9.045	26.0 9.1	11.115 5.391	200.9 165.1	573.8	79.3	45.49
S-45-2	5.670 5.680	2.365 2.375	103.0 106.0	1.975 9.055	24.1 9.5	11.100 5.613	209.3 172.8	567.6	87.2	49.47
V-45-1	5.660 5.575	2.440 2.450	109.8 110.6	1.975 9.050	23.3 9.4	11.080 5.523	209.7 171.5	564.8	91.4	51.63
V-45-2	5.660 5.575	2.450 2.460	114.6 114.5	2.000 9.020	29.0 11.6	11.090 5.514	262.4 214.7	567.3	96.1	54.52
H-45-1	5.740 5.700	2.600 2.580	112.2 112.1	1.960 9.050	26.5 9.4	11.100 5.524	212.3 169.5	586.9	94.5	55.45
H-45-2	5.690 5.730	2.680 2.640	94.1 105.5	2.015 9.050	31.1 10.7	11.070 5.736	251.1 198.5	588.6	84.7	49.86
90-3 S-90-1	5.650 5.680	2.370 2.360	106.2 109.5	1.920 9.010	4.6 7.4	11.055 5.602	159.2 130.9	559.0	86.2	48.18
90-5 S-90-2	5.720 5.715	2.325 2.335	88.7 86.1	1.905 9.000	4.5 7.4	11.080 5.479	157.8 130.2	564.2	70.4	39.70
90-1 V-90-1	5.660 5.615	2.450 2.440	112.8 111.7	1.875 8.980	4.9 7.4	11.085 5.496	157.9 128.2	565.4	90.8	51.31
90-4 V-90-2	5.670 5.610	2.440 2.450	115.3 115.0	1.900 9.000	4.3 7.4	11.090 5.517	159.7 129.9	566.8	92.6	52.47
90-2 H-90-1	5.740 5.740	2.660 2.660	111.0 109.6	1.920 9.010	4.7 7.4	11.035 5.491	166.4 130.7	583.4	89.1	51.98
90-6 H-90-2	5.730 5.710	2.640 2.600	112.9 115.7	1.930 9.010	4.4 7.4	11.025 5.537	165.9 131.2	577.7	92.0	53.13
S- 0-1	5.680 5.715	2.375 2.315	118.0 100.0	1.920 9.020	89.0 7.3	11.135 5.332	157.6 129.7	573.2	104.1	59.69
V- 0-1	5.550 5.520	2.435 2.450	110.9 110.7	1.910 9.020	93.3 7.6	11.125 5.556	165.1 134.9	561.7	107.1	60.14
H- 0-1	5.735 5.730	2.675 2.650	105.7 107.4	1.930 9.020	93.0 7.2	11.080 5.553	162.1 127.6	589.4	103.8	61.19

Note ; \* : F.P.L. , \*\* : ㉓㉓ ㉓㉓  
b,h,N : cm , E,G : t/cm<sup>2</sup> , I : cm<sup>4</sup> , EI : 10<sup>3</sup>tXcm<sup>2</sup>

性係数の大きいものほど、大きくなって  
いる。F.P.L.の式では、ウェブがパーテ  
ィクルボードのものが  $250 \text{ t/cm}^2$ 、 $45^\circ$ 合板  
が  $220 \text{ t/cm}^2$ 、 $90^\circ$ LVL及び $0^\circ$ LVLが  $160$   
 $\text{t/cm}^2$ となった。なお、以下の計算では、  
F.P.L.の式から求めた値を採用した。

曲げ剛性では、ウェブの断面2次モー  
メント(I)の値が比較的小さい(下フ  
ランジ:ウェブ:上フランジ) = 2:1:  
2) 為、全体的にあまり大きな差がなく  
 $50 \times 10^3 \text{ t}\cdot\text{cm}^2$ となった。

以上の事より、フランジ材にはヤング係  
数の大きいもの、ウェブ材には剪断弾性  
係数の大きいものを選び、捻みの小さ  
いI型梁を作製できる事が再確認できる。

## V-2 曲げ剛性試験

## V-2-1 撓みと傾斜角

Table 7 に、荷重 100 kg 当たりの各測定点における撓みと支点傾斜角の計算値、及び曲げ剛性試験（歪ゲージを貼付する前）によつて求められた実測値を示した。

計算値については、 $\langle 20 \rangle \sim \langle 25 \rangle$  式より、曲げによるものと、剪断によるものを別々に求めた。なお、 $\delta_{12}$  と  $\delta_{21}$  の計算値は同じである。（各測定位置は Fig. 14 参照）

Table 8 はこれらの比（実測値 / 測定値）を示したもので、Table 9 には剪断撓みを含まない区間撓み（ $\delta_{21} - \delta_{22}$ ）の計算値、実測値、及びこれらの比を示した。Fig. 17 には、Table 7 の  $\delta_{11}$  につ

いて、計算撓み、実測撓みを棒グラフにしたものである。

Table 7, 8. および Fig. 17 よりウェブが45°合板のもの以外は、計算値と実測値がきわめてよく一致した。また Table 9 より、剪断を含まない撓みでは、ウェブが45°合板のものも含めてよく一致していることより、45°合板の剪断弾性係数は、V-1-2 でも述べた様に、ねじり試験による測定では、木口面の $G$ の影響が小さめに出ている様である。また、剪断剛性は、F. P. L. の式を使うほうがよく一致したので、F. P. L. の式を使うほうが良いと考えられる。

なお、実測撓みはウェブが45°合板のもの



Table 8 Ratios of Experimental to Calculated Values

No.	d11	d12	d21	d22	θ1	θ2
*S- P-1	1.14	1.15	1.11	1.12	1.13	1.19
*S- P-2	1.16	1.15	1.09	1.09	0.98	1.00
V- P-1	1.00	1.05	1.02	1.01	0.98	0.95
V- P-2	0.98	1.04	0.99	0.98	0.95	0.87
H- P-1	1.08	1.13	1.08	1.09	1.06	1.13
H- P-2	1.06	1.10	1.00	1.00	1.10	1.00
Av.	1.07	1.10	1.05	1.05	1.03	1.02
S-45-1	0.86	0.90	0.88	0.86	0.92	0.90
S-45-2	0.84	0.90	0.86	0.85	0.91	0.91
V-45-1	0.85	0.91	0.89	0.87	0.91	0.86
V-45-2	0.91	0.96	0.93	0.91	0.89	0.83
H-45-1	0.87	0.93	0.88	0.88	0.93	0.88
H-45-2	0.86	0.91	0.86	0.86	0.78	0.74
Av.	0.86	0.92	0.88	0.87	0.89	0.85
S-90-1	0.96	0.97	0.92	0.91	0.95	0.87
S-90-2	1.00	0.99	0.97	0.95	0.89	0.86
V-90-1	0.99	1.02	0.99	0.98	0.91	0.87
V-90-2	1.00	1.03	0.98	0.97	0.75	0.71
H-90-1	1.03	1.01	0.98	0.98	0.99	0.97
H-90-2	1.00	1.03	0.97	0.97	0.78	0.76
Av.	1.00	1.01	0.97	0.96	0.88	0.84
S- 0-1	0.97	1.03	0.98	0.95	0.97	0.95
V- 0-1	1.09	1.17	1.05	1.04	0.80	0.81
H- 0-1	0.98	1.10	1.03	1.04	0.90	0.94
Av.	1.01	1.10	1.02	1.01	0.89	0.90
Av.	0.98	1.02	0.97	0.97	0.93	0.91
C.V.	0.09	0.08	0.07	0.08	0.10	0.12

\* Previous data (1983).

Table 9      クカン タワミ <d21-d22>      (10<sup>-3</sup>mm)

No.	cal.	exp.	exp/cal
*S- P-1	32	33	1.03
*S- P-2	39	42	1.08
V- P-1	32	34	1.06
V- P-2	32	34	1.06
H- P-1	30	30	1.00
H- P-2	31	33	1.06
S-45-1	37	40	1.08
S-45-2	34	35	1.03
V-45-1	33	35	1.06
V-45-2	30	34	1.13
H-45-1	30	29	.97
H-45-2	34	30	.88
S-90-1	35	38	1.09
S-90-2	43	50	1.16
V-90-1	37	38	1.03
V-90-2	32	34	1.06
H-90-1	32	32	1.00
H-90-2	32	30	.94
S- 0-1	28	34	1.21
V- 0-1	28	32	1.14
H- 0-1	28	24	.86
Av	--	--	1.04
C.V.(%)	--	--	7.96

\* : Previous data (1983).

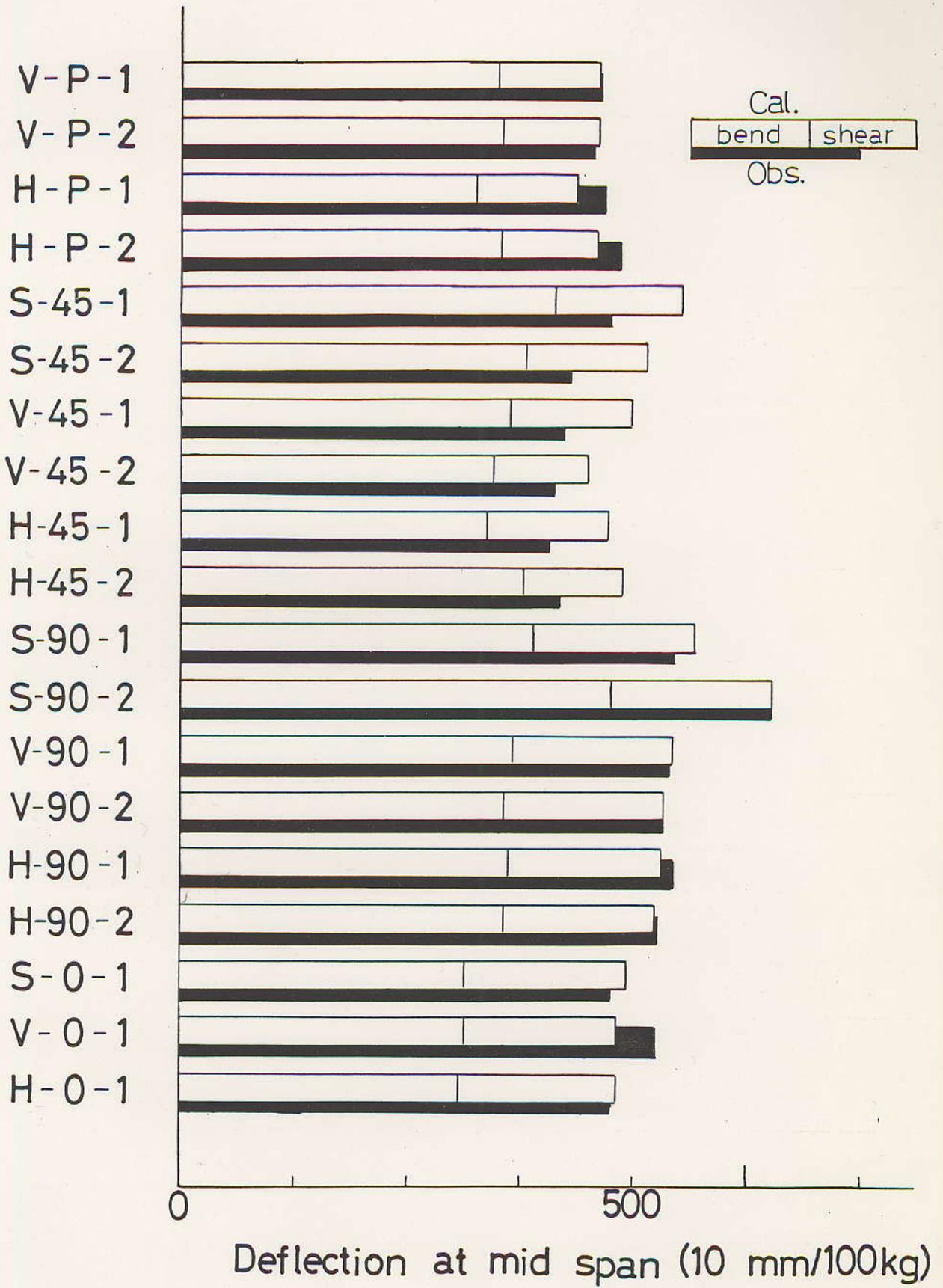


FIG. 17 計算撓みと実測撓み

のが最も小さく、次にパーティクルボードのものが小さかった。

### V-2-2 曲げ応力と剪断応力

Fig. 18には、剛性試験時のフランジの縦歪のグラフの一例として、V-45-1のものを示した。測定位置は、Fig. 16の通りで、それぞれの傾きは曲げモーメントの分布（Fig. 14③）によく一致していることがわかる。また圧縮側（-）と、引張側（+）で、よい対称性を示していることがわかる。

Fig. 19には、同じくウェブの歪を全試験体について、ウェブの種類ごとにまとめて示した。測定位置は図の通りで、圧

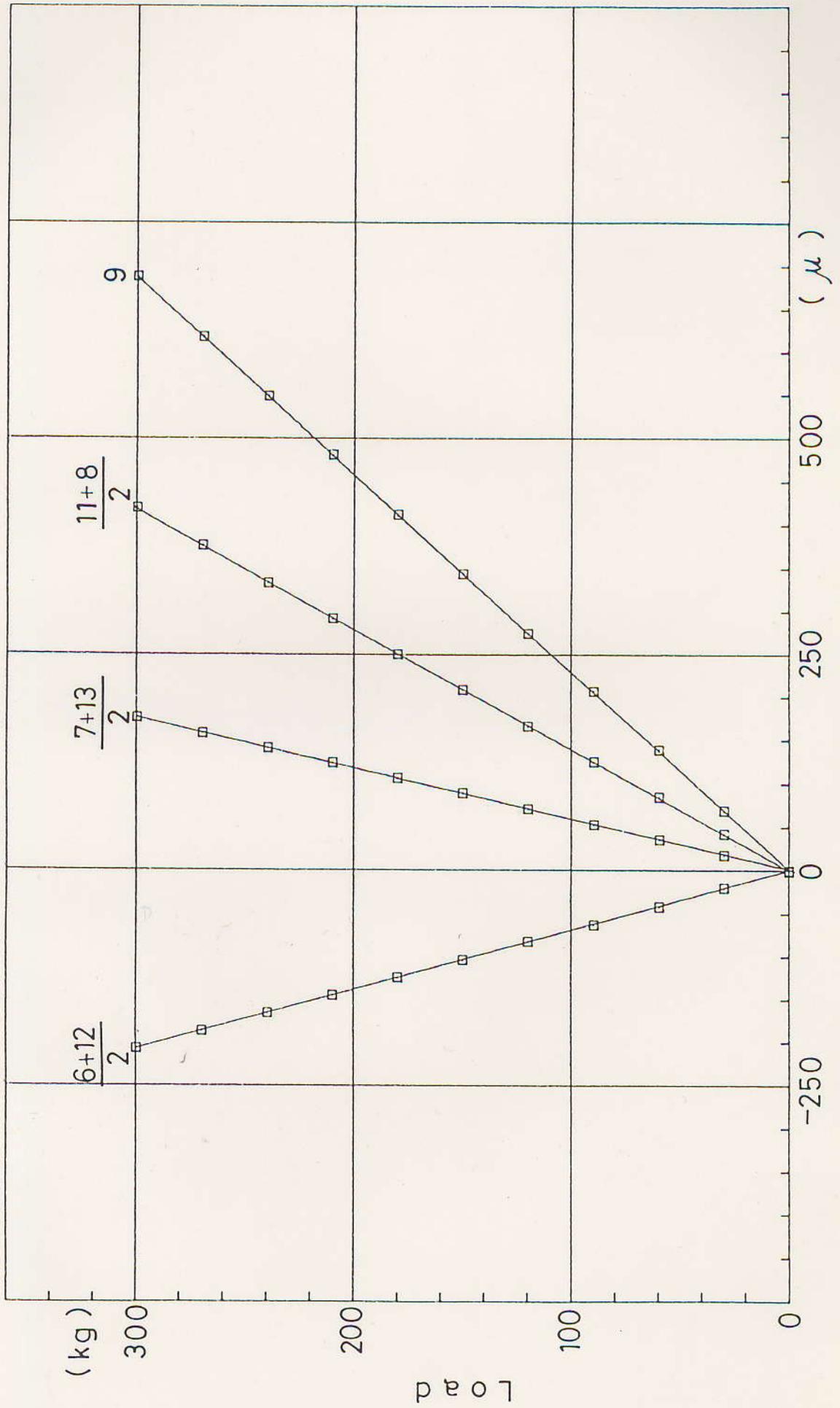


FIG.18 Strain of Flange ( P1 ) V-45-1

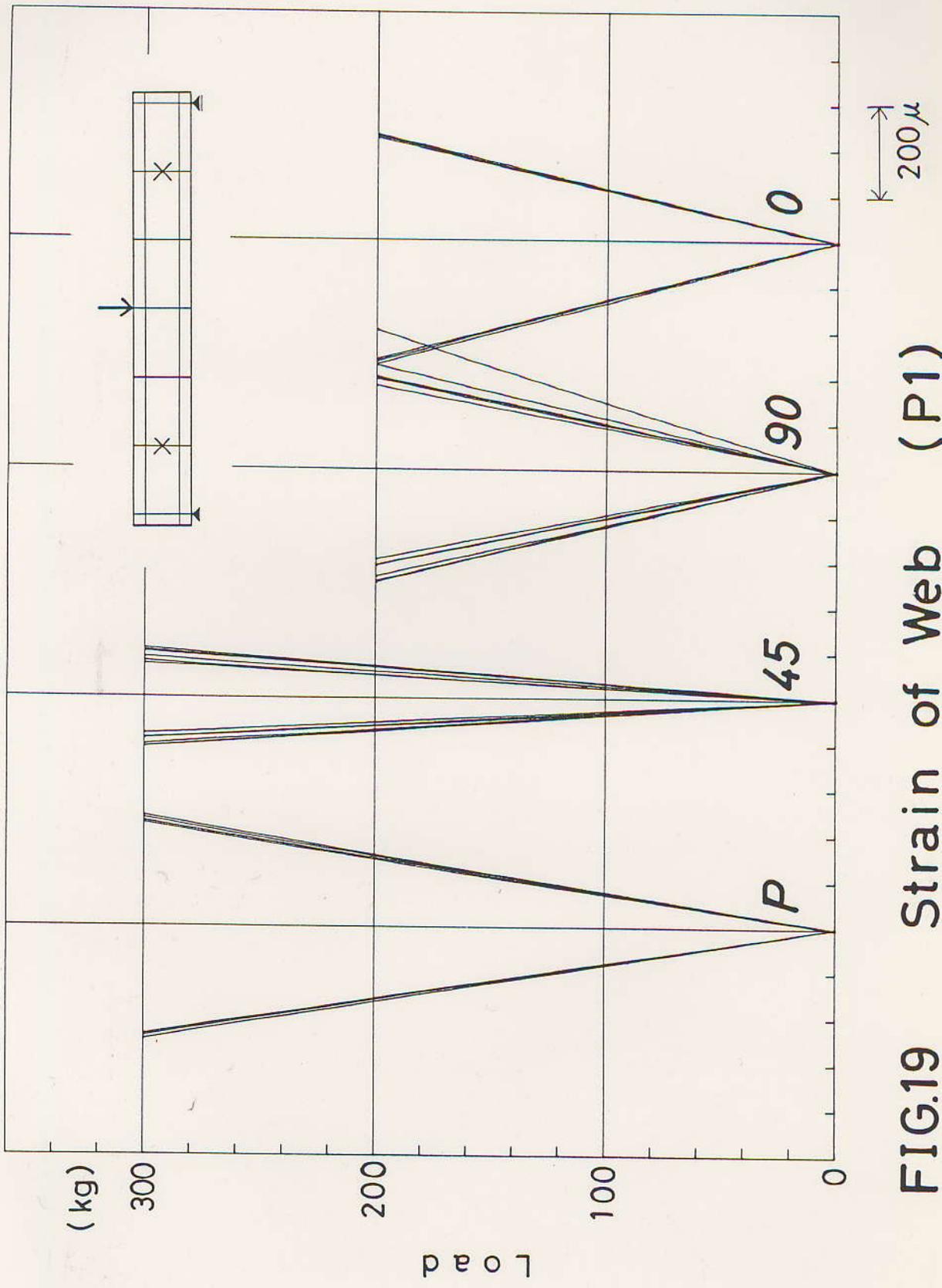


FIG.19 Strain of Web (P1)

縮側( - )、引張側( + )それぞれ平均値を示した。

グラフより、フランジの種類に関係なく、ほぼ同じ傾きを示している。 $90^\circ$  L V L の引張側で寸本大きく違うのは、歪ゲージの近くに Butt Joint があつた為、その影響と考えられる。このグラフの傾きは、ウェブの剪断剛性に依存するものと考えられ、 $45^\circ$ 合板、パーティクルボード、L V L の順に剪断剛性が強い事がわかる。また  $45^\circ$ 合板、パーティクルボードの傾きは、それぞれ  $0^\circ$  L V L の4倍、1.6倍程度であるので、Table 5 の  $0^\circ$  L V L の剪断弾性係数の  $74 \text{ t/cm}^2$  が正しいと仮定すると、 $45^\circ$ 合板、パーティクルボードの剪断弾性

係数は、それぞれ  $30 \text{ t/cm}^2$ ,  $12 \text{ t/cm}^2$  となる。

45合板のねじり試験による実測の剪断弾

性係数は  $10 \text{ t/cm}^2$  (Table 5) 前後で、前

にも述べた (V-1-2) 様に、木口面

の  $G$  の影響などでかなり小さく測定され

たと考えるのはまちがったいまいだろう。

そこで、45合板の剪断弾性係数を  $30 \text{ t/cm}^2$

として Table 7 の剪断撓みを計算してみ

るとよく一致することから、45合板の剪

断弾性係数は、 $30 \text{ t/cm}^2$  前後とみるのが妥

当と思われる。以上のことより、ねじり

試験による45合板の剪断弾性係数の測定

には問題があった事がわかり、これは今

後の研究課題となるだろう。

また、ねじり試験によるパーティクル

ボードの剪断弾性係数で、今年の実測値は  $12 \text{ t/cm}^2$  (Table 5) に歪からの推定値とよく一致した。昨年の実測値は2倍の  $24 \text{ t/cm}^2$  程度になつてゐるが、材料も測定方法も今年と全く同じなので、計算ミスか歪にかのミスがあつたものと考えられる。また、V-1-2でパーティクルボードは、木口面の $G$ と表面の $G$ の影響の爲、測定方法が困難であると述べたが、今回の実験に関する限り、ねじり試験で十分信頼できる値が得られたと言える。

以上の事を総括すると、材料のヤング係数及び剪断弾性係数が正確にわかれば、比例限界内の撓み及び傾斜角は、ほぼ予想できると言つてもいいだろう。

## V - 3 破壊試験

### V - 3 - 1 撓みと支点傾斜角

Table 10 に破壊試験の結果を示した。

比例限荷重、最大荷重共にウェブが45合板のものが一番大きく、次にパーティクルボードのものが大きかった。なお、S-45-1は、下のフランジの節近くで引張破壊が生じ、それが原因で比例限荷重と最大荷重が伸びなかった。

Fig. 20 には、荷重～撓み曲線を示した。

フランジが素材のものとH-45は、比例限界を越えてからも破壊に至るまでにかなり撓みの増加が認められ、梁として粘りがあることがわかる。しかし、フランジが垂直LVLのものとH-90では、粘

りが認められなかった。H-P に関しては、これらの中間的なタイプと考えられる。また、ウェブが  $0^\circ LVL$  のものは、 $90^\circ LVL$  のものと同様傾向を示したのを省略した。

Fig. 21 ~ Fig. 24 には、荷重 ~ 支点傾斜角曲線を示したが、Fig. 20 の荷重 ~ 撓み曲線と同様傾向を示した。また比例限荷重は、荷重 ~ 撓み曲線から求めたものと、荷重 ~ 支点傾斜角曲線から求めたもので、ほぼ同じ値をとったのを以下の計算等では、荷重 ~ 撓み曲線から求めたものを採用した。

一昨年度、昨年度の結果と比較した場合でも、節のあった S-45-1 を除けば

Table 10 Results of Fracture Test

No.	Load (kg)		**Def21 (mm)		*** Type of Failure
	Max	Pp	Max	Pp	
*S- P-1	2350	1600	10.0	5.4	U.F. Bearing
*S- P-2	2650	1700	14.3	6.8	Web Shear
V- P-1	2575	1700	9.3	5.5	L.F. Tens. B.J.
V- P-2	2500	1800	9.1	5.7	L.F. Tens. B.J.
H- P-1	2830	1700	10.1	5.2	Web Shear
H- P-2	2820	1700	10.3	5.1	L.F. Tens. B.J.
S-45-1	2625	1300	15.0	4.2	L.F. Tens. Knot
S-45-2	3265	1800	17.3	5.4	U.F. Bearing
V-45-1	2400	1900	7.7	5.7	L.F. Tens. B.J.
V-45-2	2800	2000	8.8	5.6	L.F. Tens. B.J.
H-45-1	3420	1900	14.8	5.3	L.F. Tens.
H-45-2	2630	1900	8.3	5.3	L.F. Tens. B.J.
S-90-1	2150	1700	9.0	6.0	U.F. Bearing
S-90-2	2295	1500	11.8	6.0	Web Shear
V-90-1	2480	1400	9.9	4.9	Web Shear
V-90-2	2500	1700	9.8	5.9	Web Shear
H-90-1	2290	1500	8.4	5.0	Web Shear
H-90-2	2450	1900	9.2	6.4	Web Shear
S- 0-1	2200	1600	8.3	5.4	Web Shear
V- 0-1	2040	1700	7.2	5.7	Web Shear
H- 0-1	2500	1700	9.0	5.3	Web Shear

\* Previous data (1983).

\*\* Deflection at mid-span in third point loading.

\*\*\* L.F.: Lower Flange ; U.F.: Upper Flange  
Tens.: Tension ; B.J.: Butt Joint .

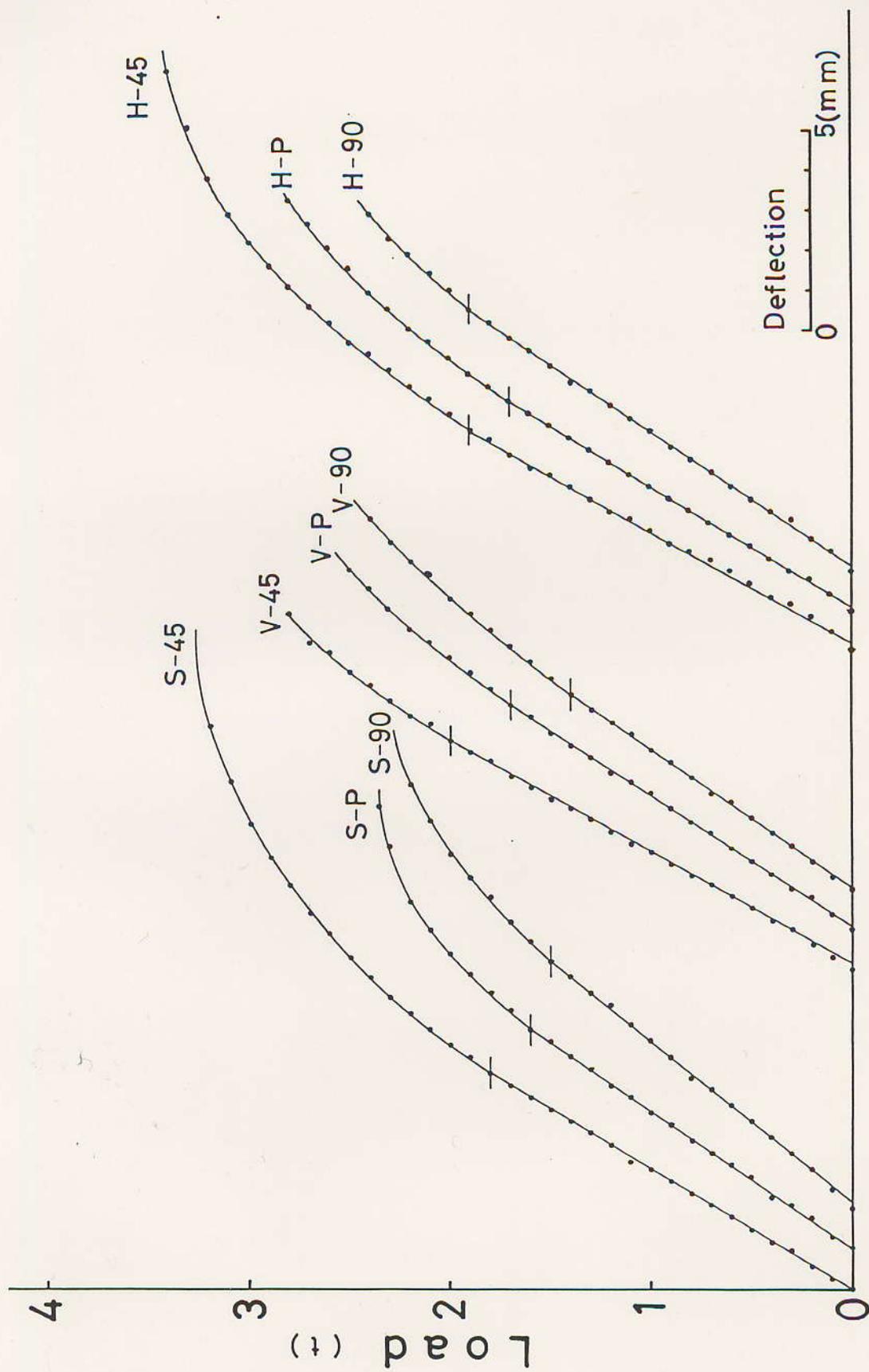
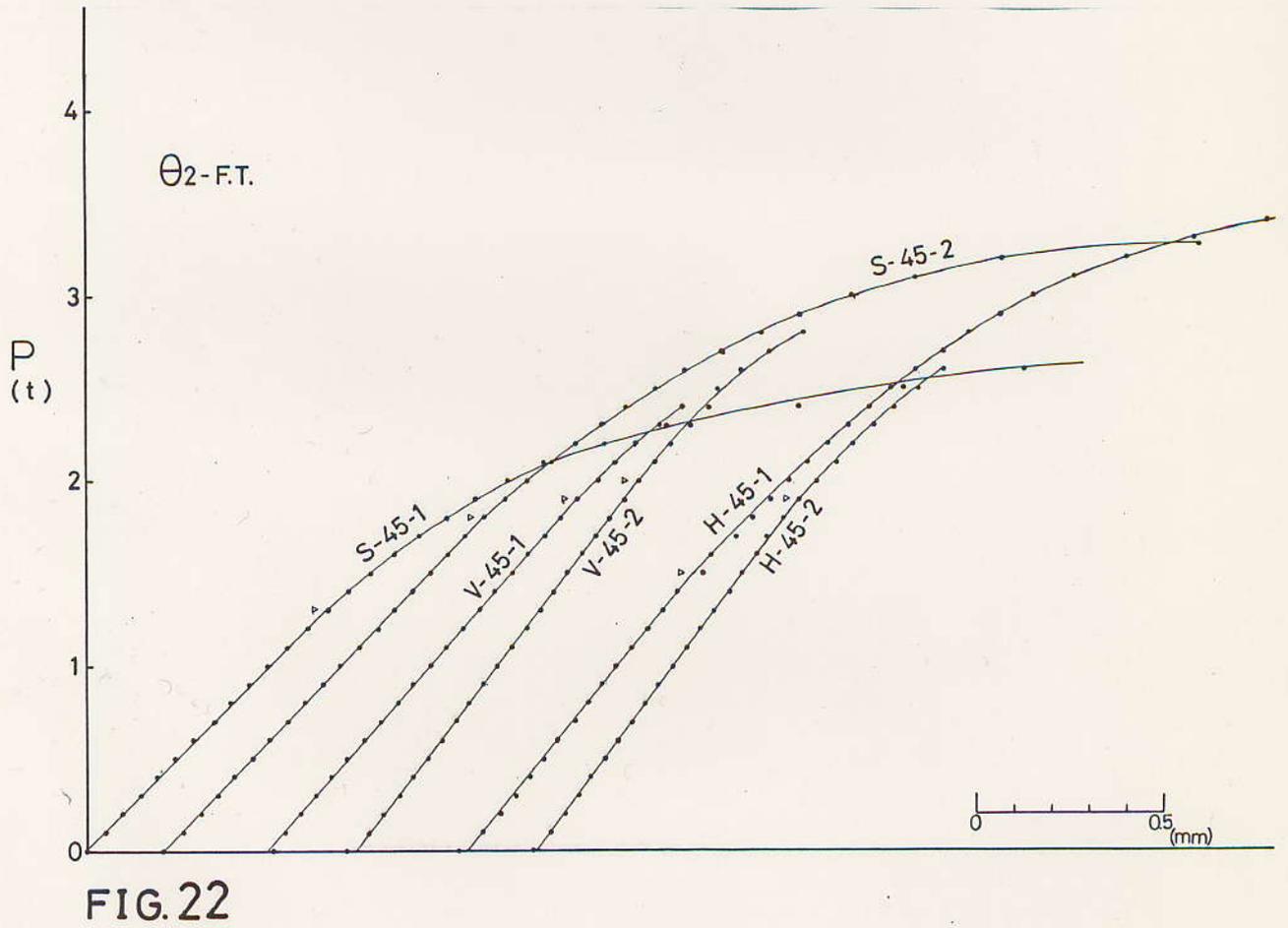
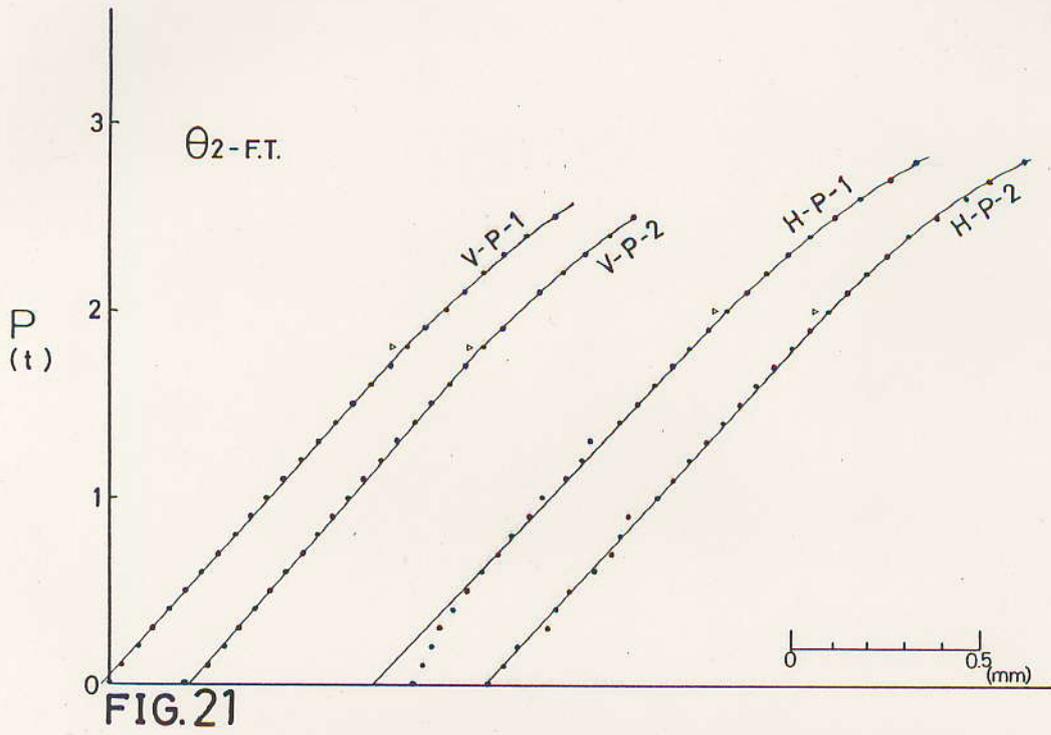


FIG.20 Load-Deflection Curve



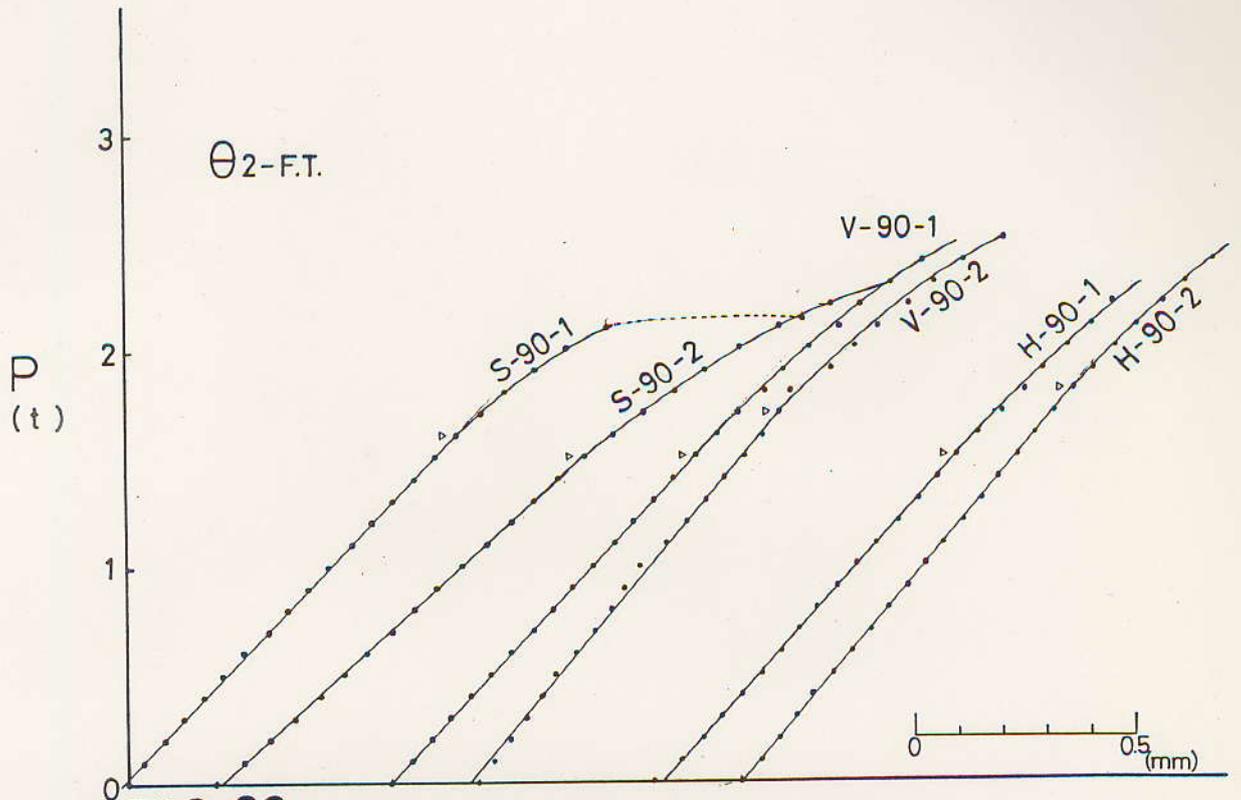


FIG. 23

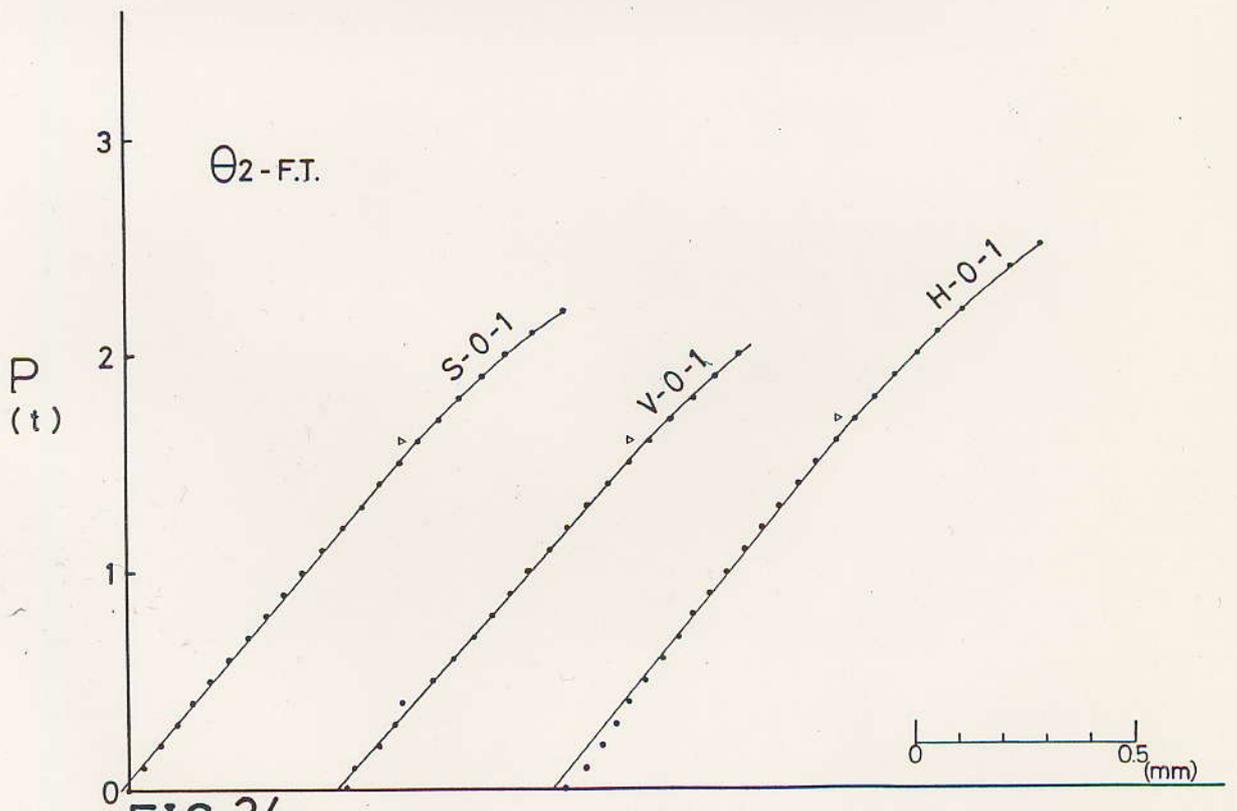


FIG. 24

比例限荷重、最大荷重、比例限撓みの全  
てにおいて、ウェブが45°合板のものが最  
もよい結果を示した。これはやはり、45°  
合板の剪断剛性が大きかった為と考えて  
よいだろう。また今回のウェブ材の中  
は性能の悪かった0°LVLと90°LVLに  
関しても、一昨年度の0°あるいは90°のラ  
ワン合板ウェブによるものよりは、良い  
結果を示した。

### V-3-2 曲げ応力

Table 11 に フランジの比例限曲げ応力  
( $\sigma_p$ ) の計算値、測定値、及びそれらの  
比を示した。測定値のフランジ別の平均  
は、垂直LVL ( $280 \text{ kg/cm}^2$ )、水平LV

Table 11 Stress in Upper Flange at Pp

No.	P (kg)		Stress (kg/cm <sup>2</sup> )		
	max	prop.	cal.	exp.	exp/cal
*S- P-1	2350	1600	307.4	212.1	0.67
*S- P-2	2650	1700	298.8	220.0	0.74
V- P-1	2575	1700	303.7	317.1	1.04
V- P-2	2500	1800	313.2	297.5	0.95
H- P-1	2830	1700	286.7	217.4	0.76
H- P-2	2820	1700	286.4	240.6	0.84
S-45-1	2625	1300	199.9	173.2	0.87
S-45-2	3265	1800	317.4	253.0	0.80
V-45-1	2400	1900	334.7	331.2	0.99
V-45-2	2800	2000	347.7	309.3	0.89
H-45-1	3420	1900	318.6	245.9	0.77
H-45-2	2630	1900	308.5	212.0	0.69
S-90-1	2150	1700	314.9	246.3	0.78
S-90-2	2295	1500	275.4	220.0	0.80
V-90-1	2480	1400	275.4	223.0	0.81
V-90-2	2500	1700	309.1	284.1	0.92
H-90-1	2290	1500	263.8	193.1	0.73
H-90-2	2450	1900	335.3	255.5	0.76
S- 0-1	2200	1600	253.0	154.5	0.61
V- 0-1	2040	1700	261.3	179.5	0.69
H- 0-1	2500	1700	244.6	195.7	0.80

\* Previous data (1983).

Strain of Flange (P2) V-P-1

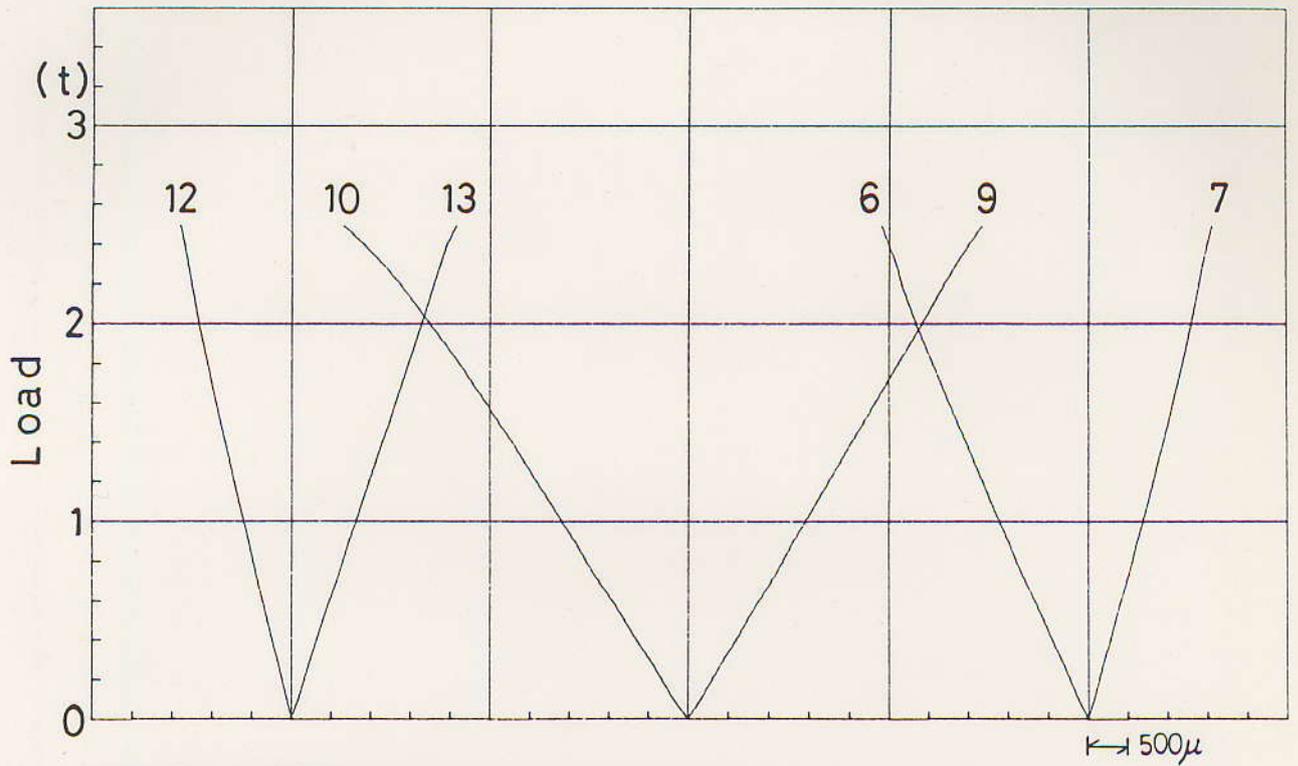


FIG. 25

Strain of Flange (P2) H-P-1

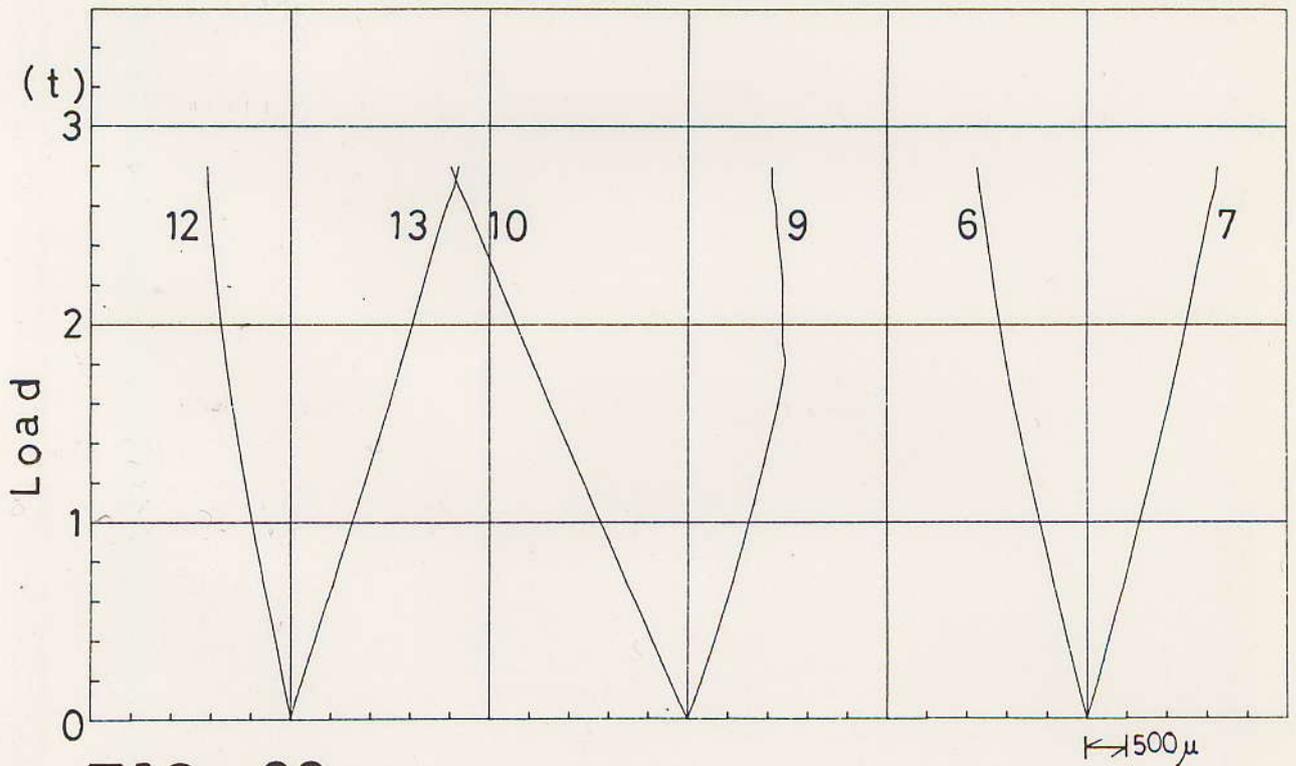


FIG. 26

Strain of Flange (P2) S-45-2

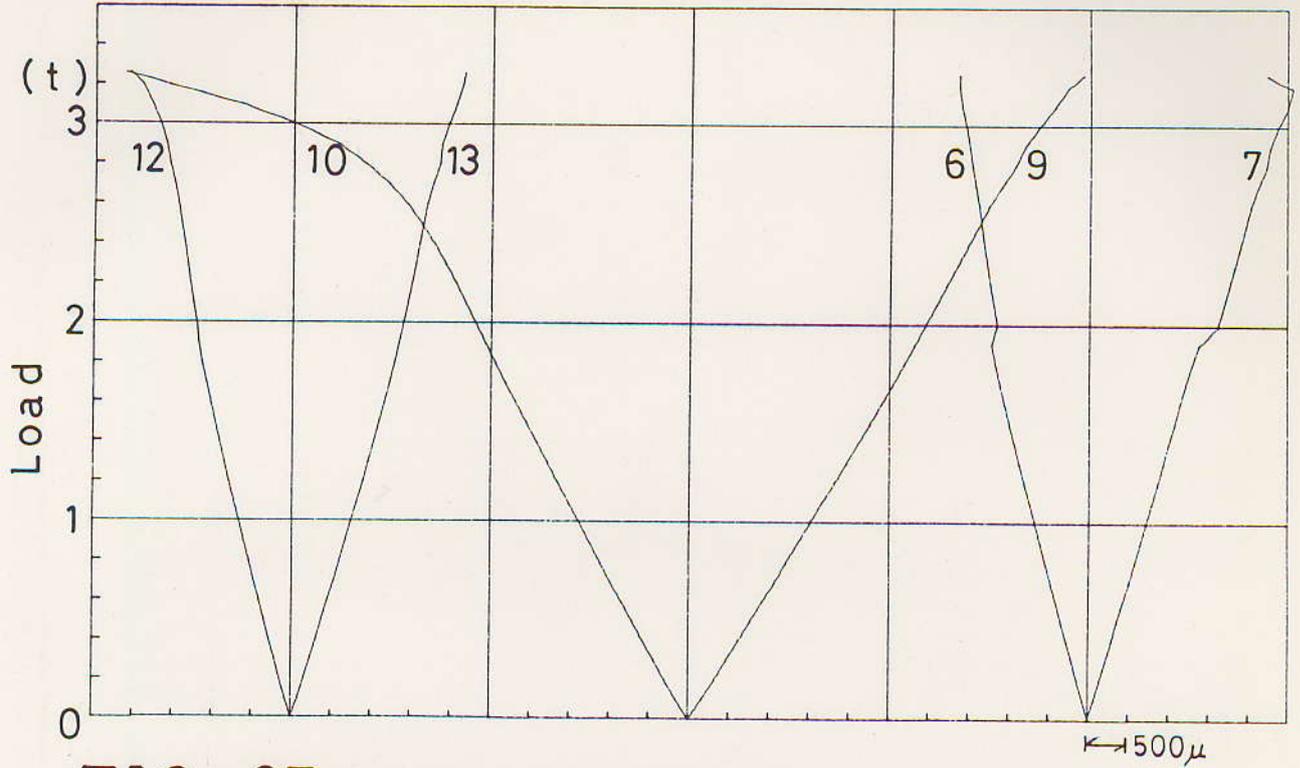


FIG. 27

Strain of Flange (P2) H-45-1

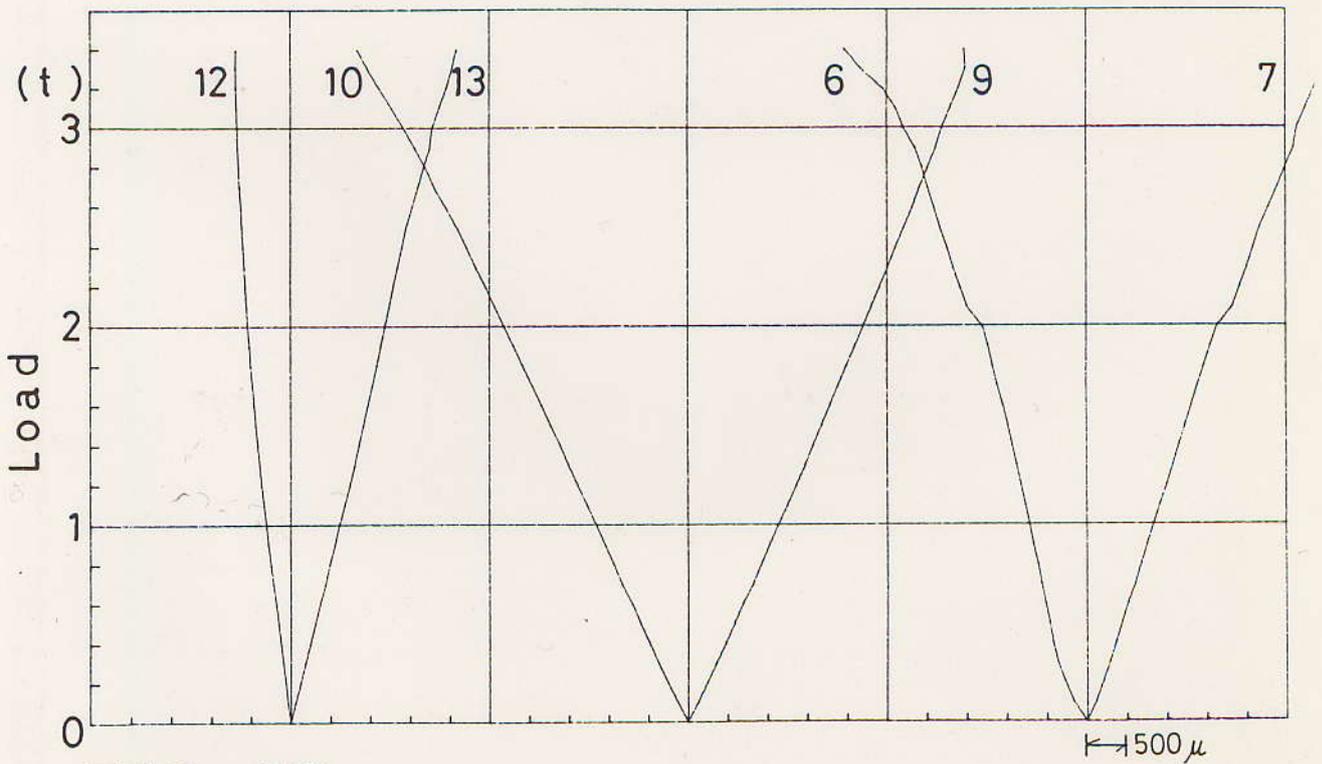


FIG. 28

## Strain of Flange (P2) S-90-2

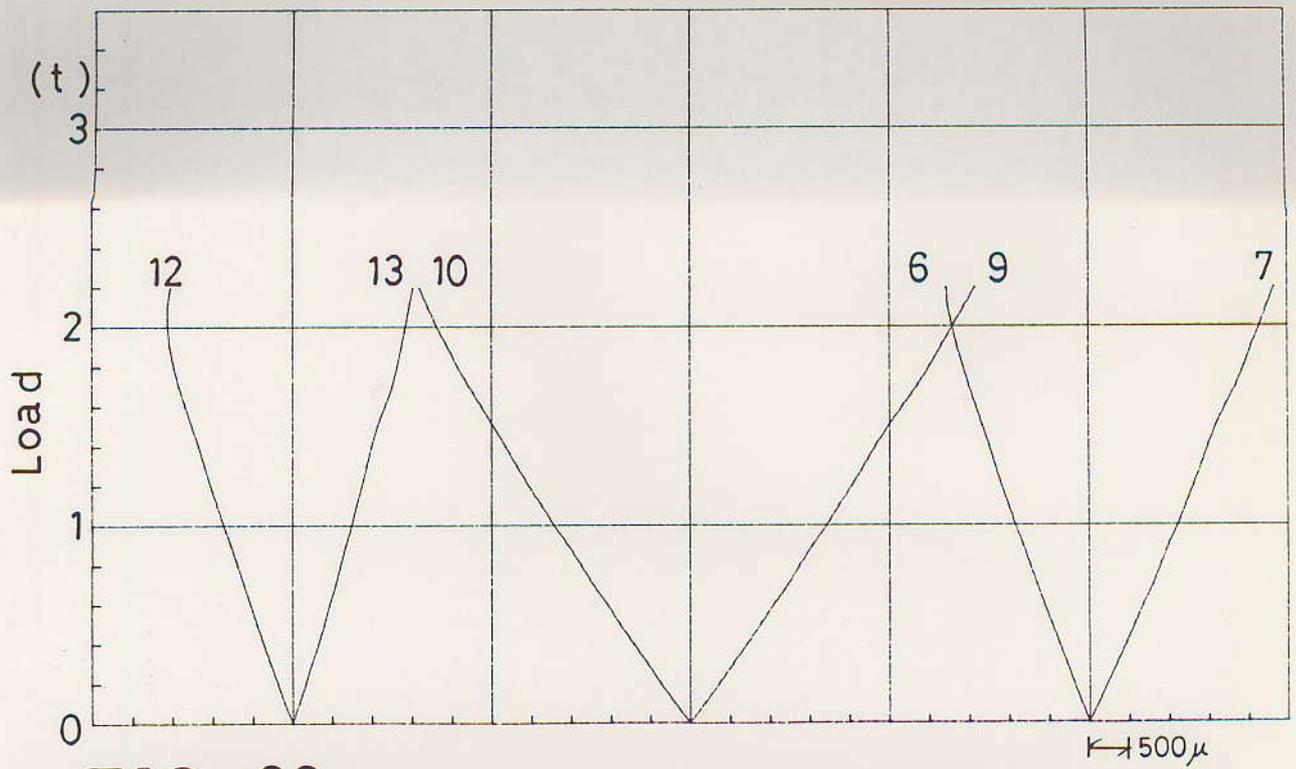


FIG. 29

## Strain of Flange (P2) V-0-1

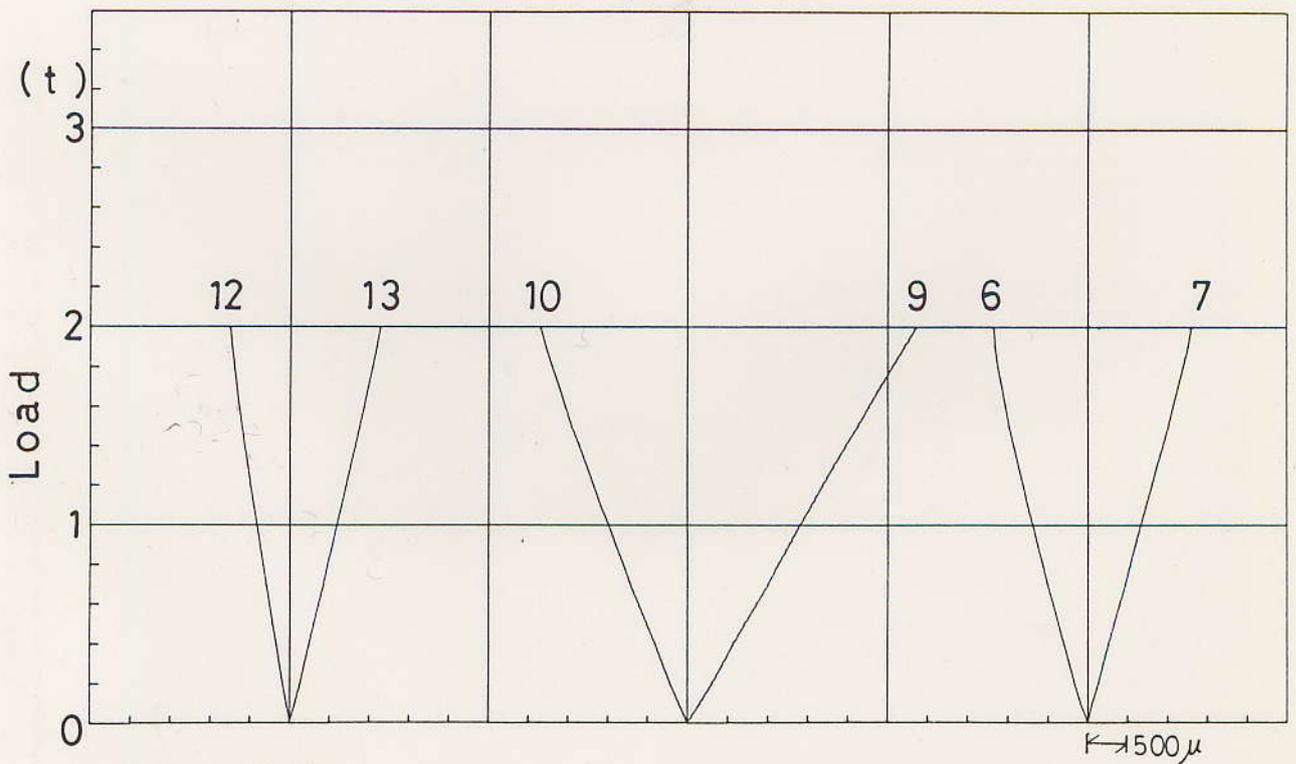


FIG. 30

L (  $220 \text{ kg/cm}^2$  )、素材 (  $210 \text{ kg/cm}^2$  ) の順に大きかった。ウェブ別では45合板のものが最も大きかった。また、一昨年度、昨年度と同じく測定値が計算値よりも低めになった。

Fig. 25 ~ 30 は、フランジの縦歪のグラフの一部である。(歪測定位置は Fig. 16 参照) いずれのグラフも比例限界内で実測された歪の大きさは、曲げモーメントの分布 ( Fig. 14 ④ ) と、ほぼ一致している。

ウェブがパーティクルボードのもので、フランジが垂直 LVL のもの ( Fig. 25 ) は、圧縮側と引張側を対称性を示したのに対して、フランジが水平 LVL のもの

( Fig. 26 ) では、中央部では引張側において、荷重点と支点の中間部では圧縮側において、それぞれ比例限後に増加が純る傾向が見られた。

また昨年度の結果では、荷重点のめり込み等が原因で、比例限を過ぎてから荷重点間の、下部フランジの引張側の歪が増加し、上部フランジの圧縮側の歪の増加が純る傾向が見られたが、ウェブが $45^\circ$ 合板のもの ( Fig. 27, 28 ) では、特に認められなかった。しかし、ウェブが $0^\circ$  LVL のもの ( Fig. 30 ) と、 $S-90$  ( Fig. 31 ) に関しては、ある程度その傾向が見られた。

Fig. 27, Fig. 28 より、 $S-45-1$  と H

-45-1 では共に、荷重が 1900 ~ 2100 kg  
で右側の荷重点と支点の間で何らかの小  
さな破壊が起きたことが推察される。

### V-3-3 剪断応力

Table 12 には、比例限剪断応力 ( $\tau$ )  
と、荷重 100 kg 当たりの比例限剪断歪 ( $\gamma$ )  
の実測値を示した。比例限剪断応力  
は  $\langle 28 \rangle$  式より求めたが、V-2-2 で  
述べた様に 45 合板の剪断弾性係数は、ね  
じり試験による実測値の約 3 倍と考えら  
れ、Table 12 の値も約 3 倍になると考え  
られる。なお、この事については、Table  
12 の剪断歪の実測値の大きさをより、再確  
認できる。

Table 12 Shear Stress of Web

No.	Pp	Pmax	$\tau$	$\gamma$
V- P-1	1700	2575	54.48	268
V- P-2	1800	2500	59.14	268
H- P-1	1700	2830	52.13	264
H- P-2	1700	2820	52.37	256
S-45-1	1300	2625	14.76	124
S-45-2	1800	3625	20.39	120
V-45-1	1900	2400	17.07	96
V-45-2	2000	2800	26.52	114
H-45-1	1900	3420	16.96	94
H-45-2	1900	2630	16.37	80
S-90-1	1700	2150	40.45	322
S-90-2	1500	2295	41.88	378
V-90-1	1400	2480	31.57	304
V-90-2	1700	2500	45.08	358
H-90-1	1500	2290	43.79	394
H-90-2	1900	2450	42.77	304
S- 0-1	1600	2200	45.04	386
V- 0-1	1700	2040	54.89	424
H- 0-1	1700	2500	52.86	432

Note : P ; kg ,  $\tau$  ; kg/cm<sup>2</sup>  
 $\gamma$  ; 10<sup>-6</sup>rad/100kg

比例限剪断応力は以上の事を考慮すると、ウェブが45°合板とパーティクルボードのものが大きかった。90°LVLは0°LVLより小さい値を示した。90°LVLと0°LVLの剪断剛性は同じなので、本来は比例限剪断応力も同じになるはずなのだが、ウェブの繊維方向の関係で、上

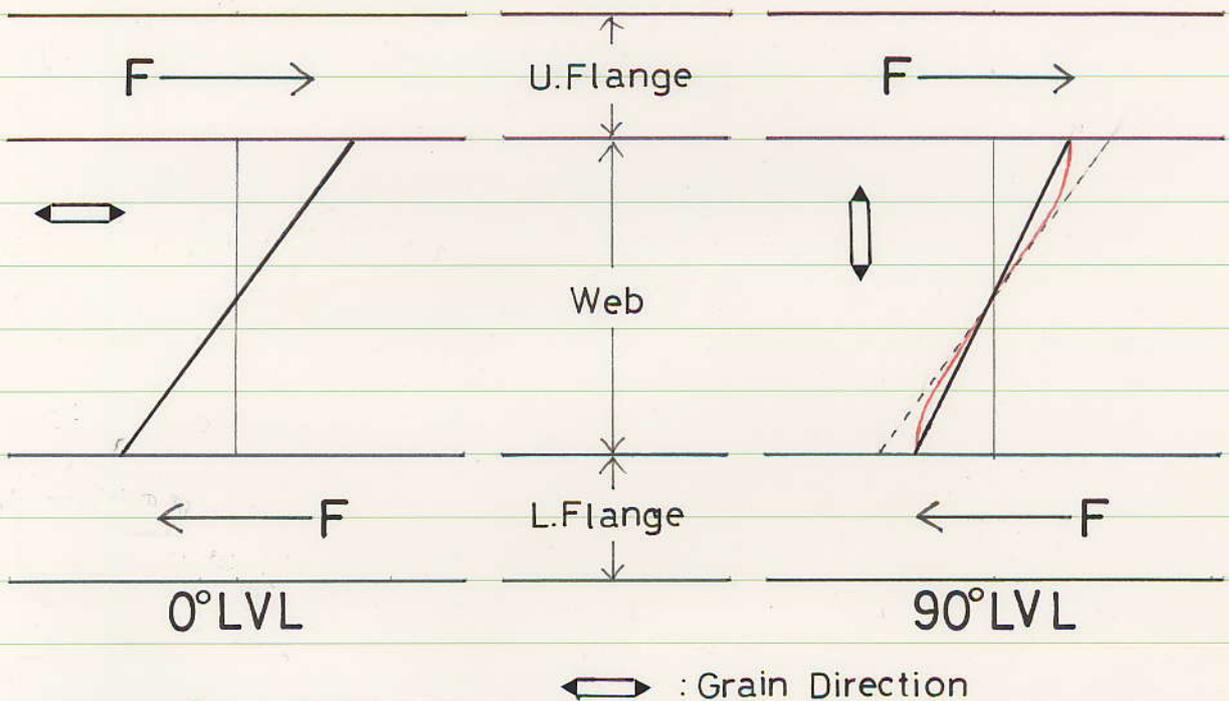


FIG. 31

下のフランジに生じた剪断力  $F$  がウェブに剪断変形を生じさせる場合、Fig. 31 のように、 $0^\circ LVL$  ウェブの剪断変形は、ウェブの高さ方向にほぼ直線的になると考えられる。しかし、 $90^\circ LVL$  ウェブの場合、上下端をフランジに埋込んでいる為剪断変形が拘束され、本来  $0^\circ LVL$  と同じ様に図の点線のような変形をすることで、赤線のような変形をして、その結果見掛上は実線のように過少になる為と考えられる。

Fig. 32 には、破壊試験時のウェブの剪断歪をフランジごとにとりまとめ示した。 $90^\circ LVL$  の引張側 (+) を一本だけ示しているのは、H-90-1 で、Fig. 19 と同

様に歪ゲージの近くに Butt Joint があつた為と考えられる。グラフの圧縮側と引張側で荷重の大きさが違うのは、途中でゲージが断線した為である。

比例限内での傾きの割合は、Fig. 19 とほぼ一致する。ウェブが45合板のものは比例限後も歪の増加がほとんど認められないが、その他のものでは、若干増加している様に思われる。パーティクルボードのものは、全之ほとんど同じ曲線を描き、品質が均一な事が再確認できた。これらのことより、今回のウェブ材の中では45合板が一番すぐれているものと思われる。

## V-3-4 破壊形態

破壊形態は、Table 10, Fig. 33-1 ~ 33-19, Photo 1 ~ 7 に示した。図の青線は、表面の Butt Joint の位置、及び特に目立った表面の節等の欠点を表わしている。ウェブが  $90^\circ$  LVL 及び  $0^\circ$  LVL のほとんど全てがウェブの剪断により破壊したのに対して、 $45^\circ$ 合板のものではウェブの剪断破壊がなかった。また、パーティクルボードはこれらの中間的なタイプだった。

ウェブが  $90^\circ$  LVL 及び  $0^\circ$  LVL は、共に繊維方向の剪断で破壊した。これは LVL の繊維方向の強度が低い為であり、初めの予想通りの結果となった。そのた

V-P-1

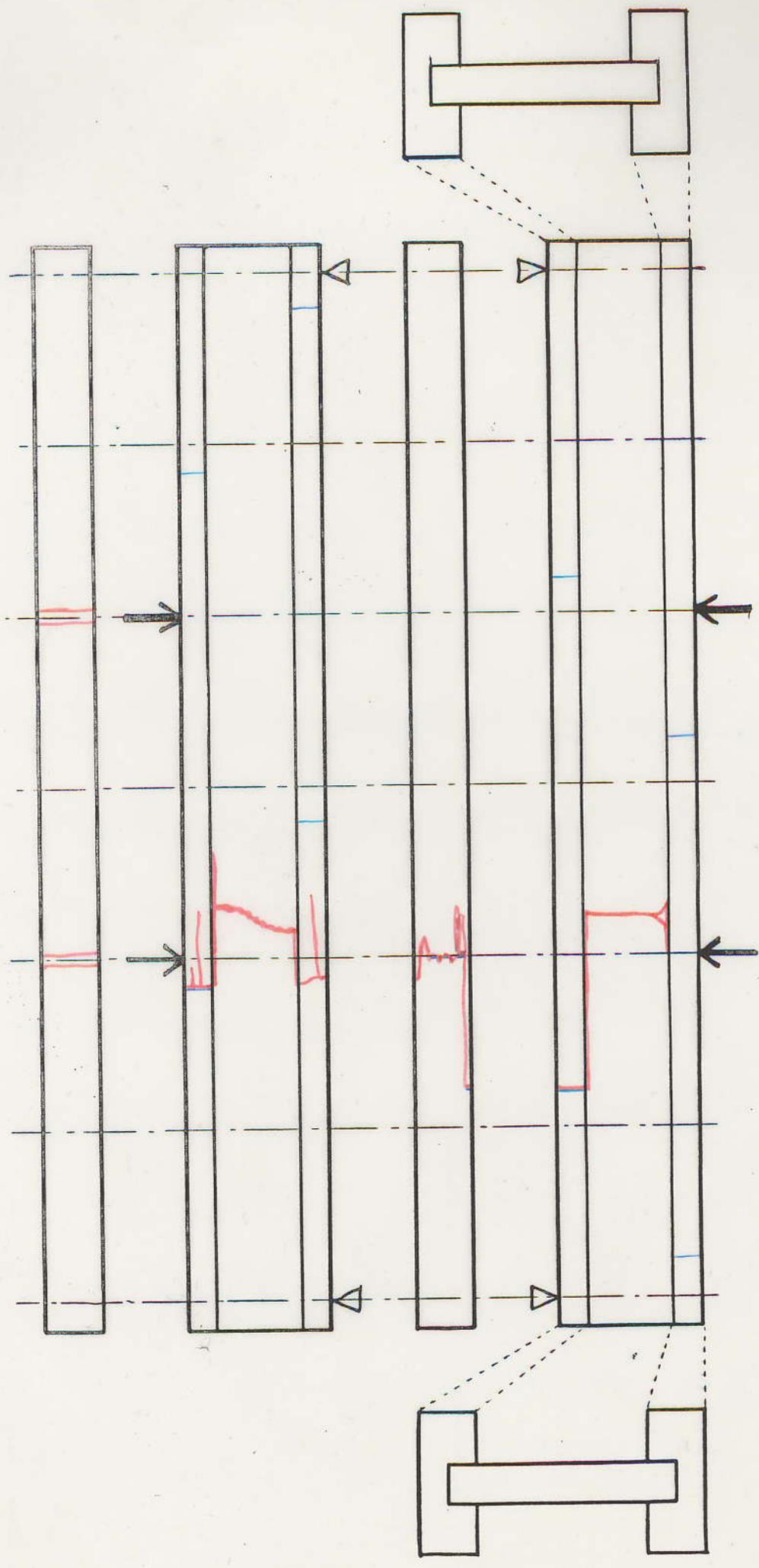


Fig. 33-1 V-P-1

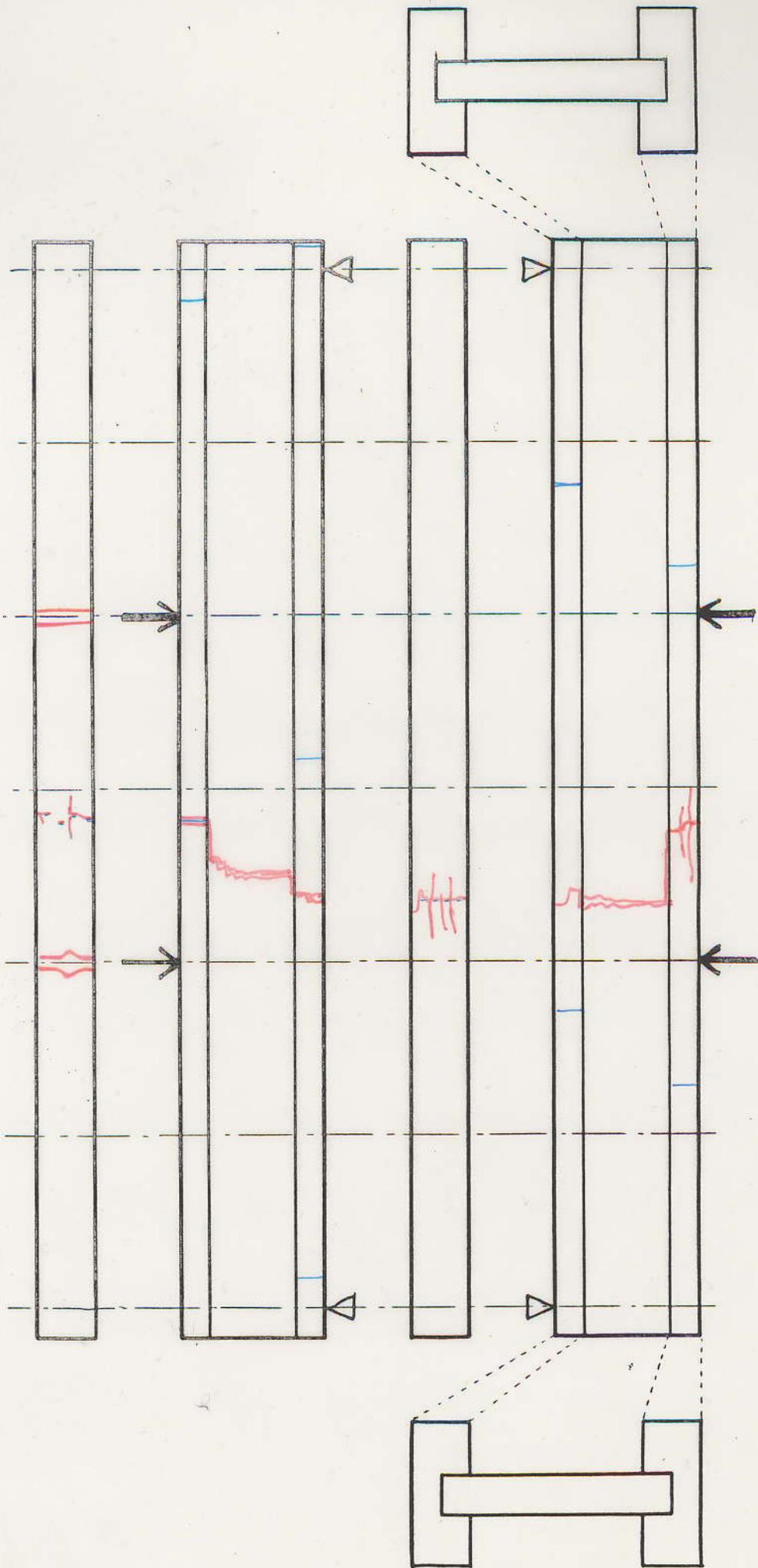


Fig. 33-2 V-P-2

V-P-2

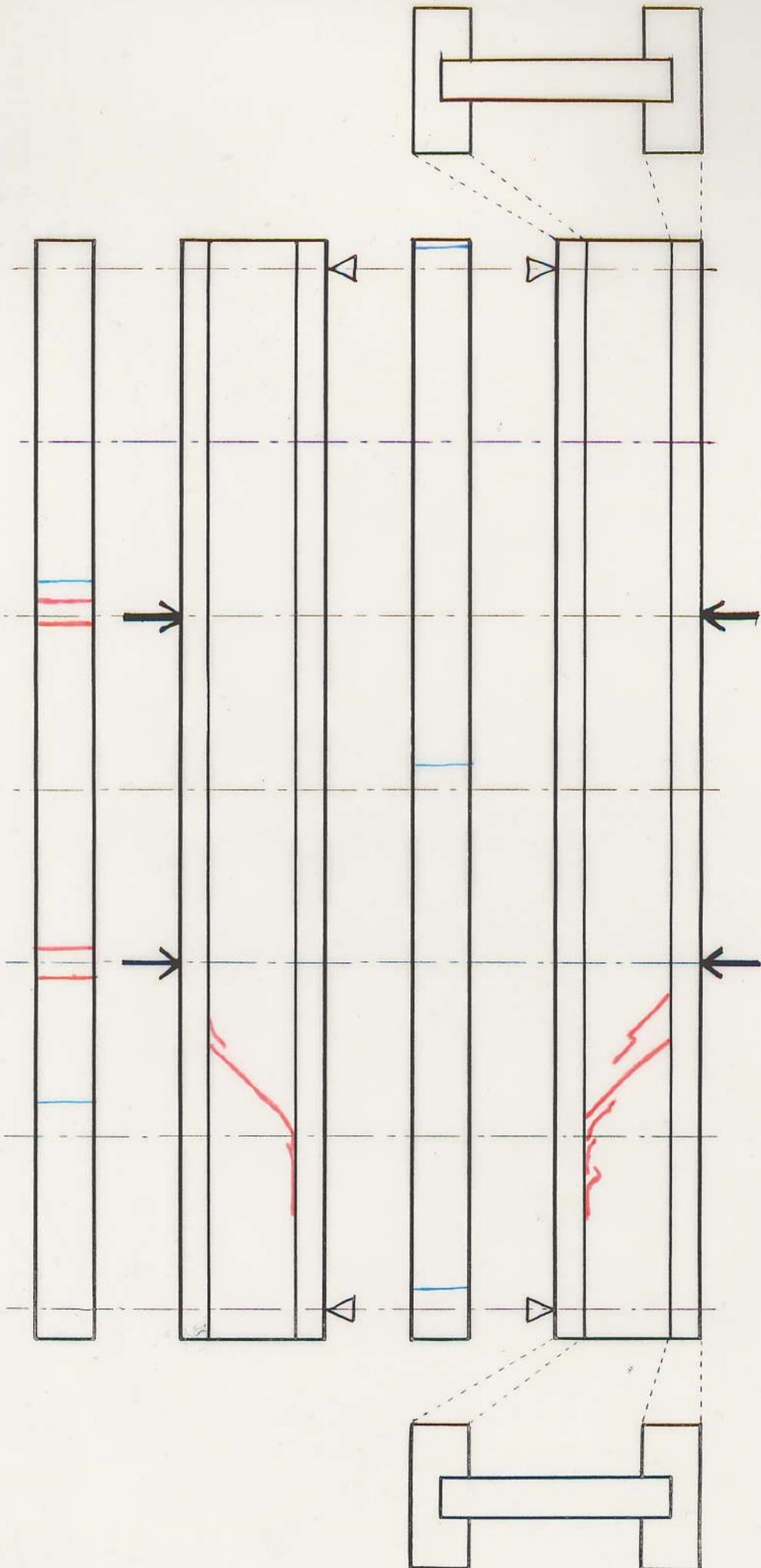


Fig. 33-3 H-P-1

H-P-1

H-P-2

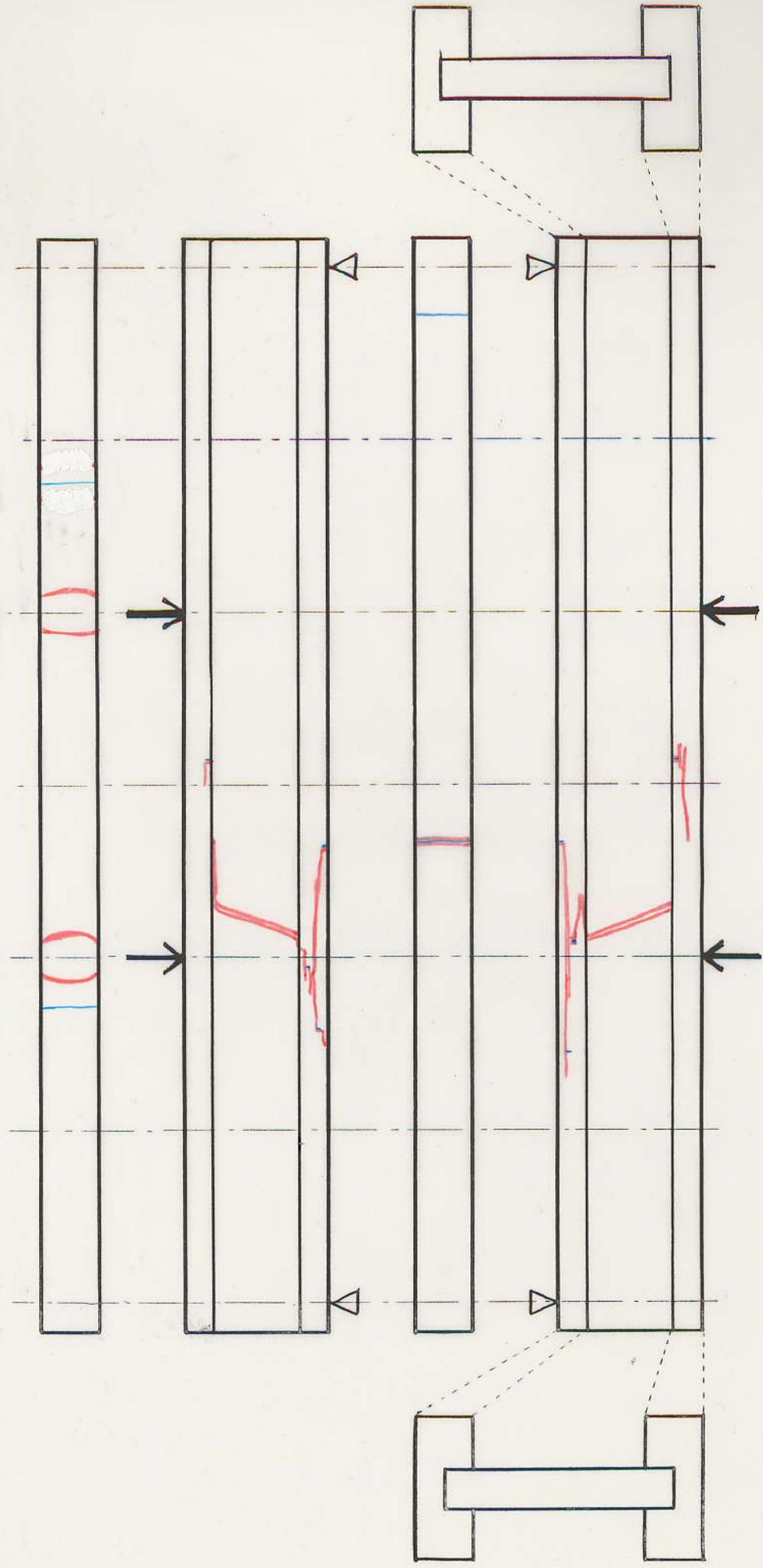


Fig. 33-4 H-P-2

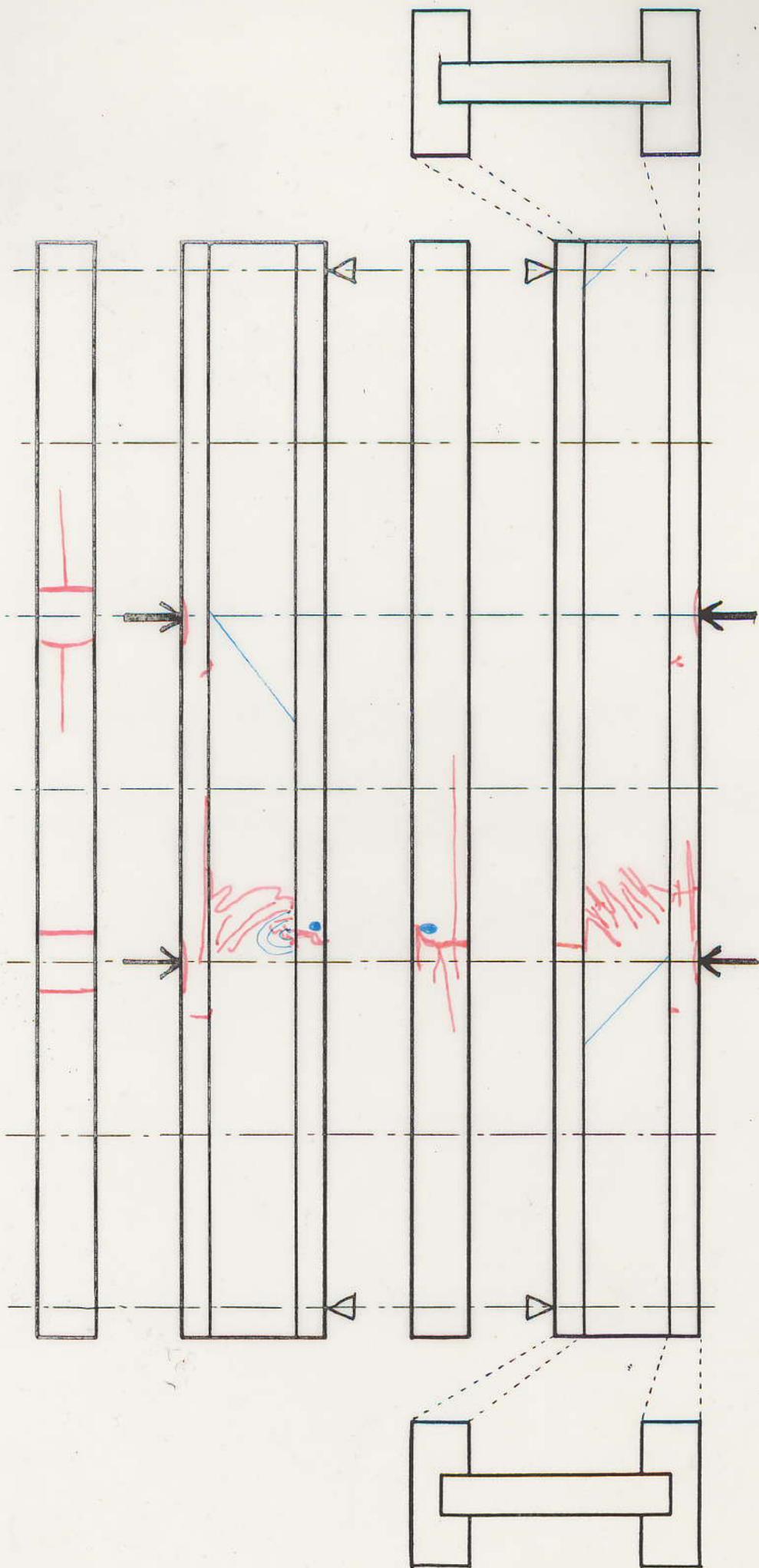


Fig. 33-5 S-45-1

S-45-1

S-45-2

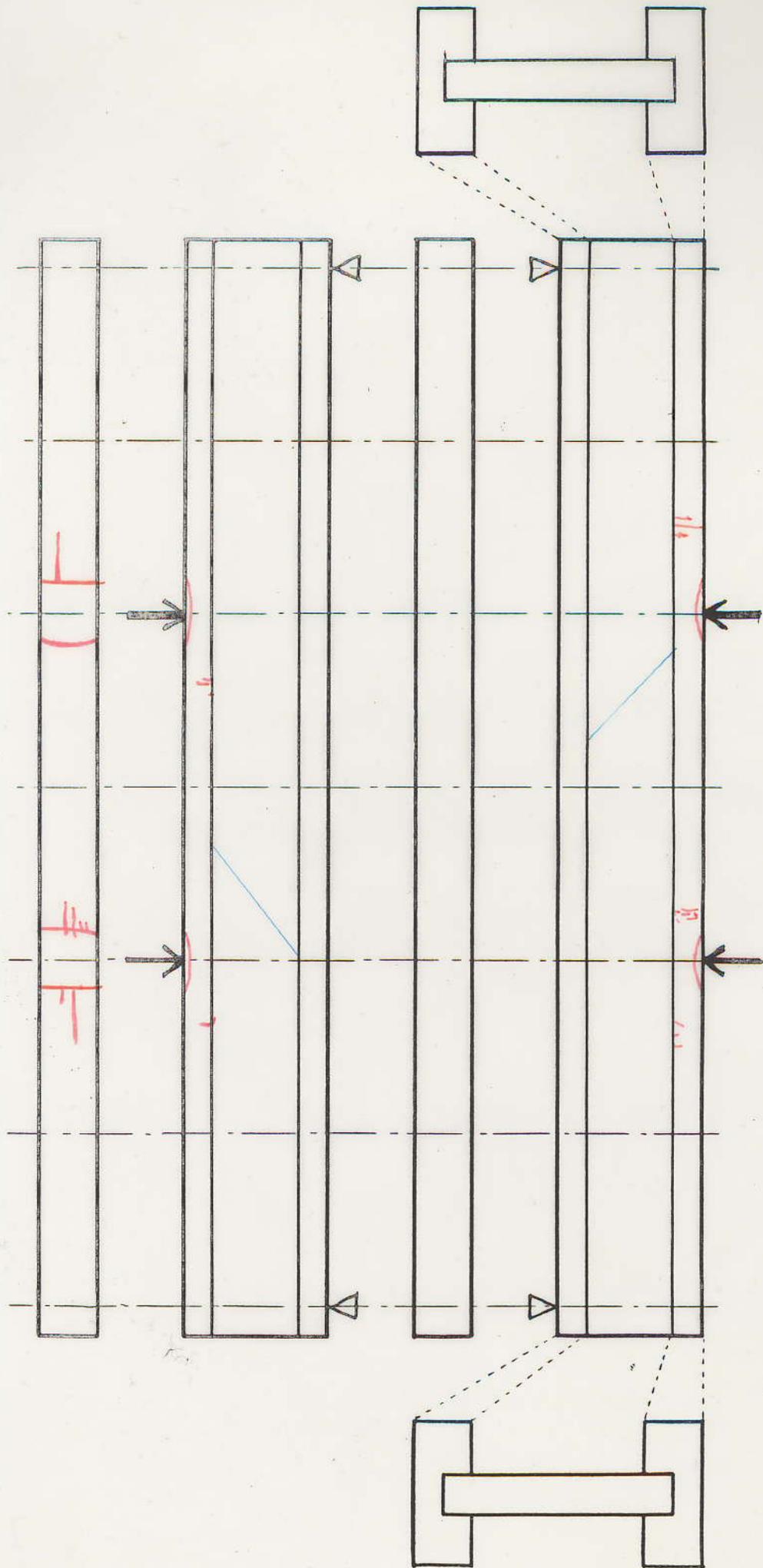


Fig. 33-6 S-45-2

V-45-1

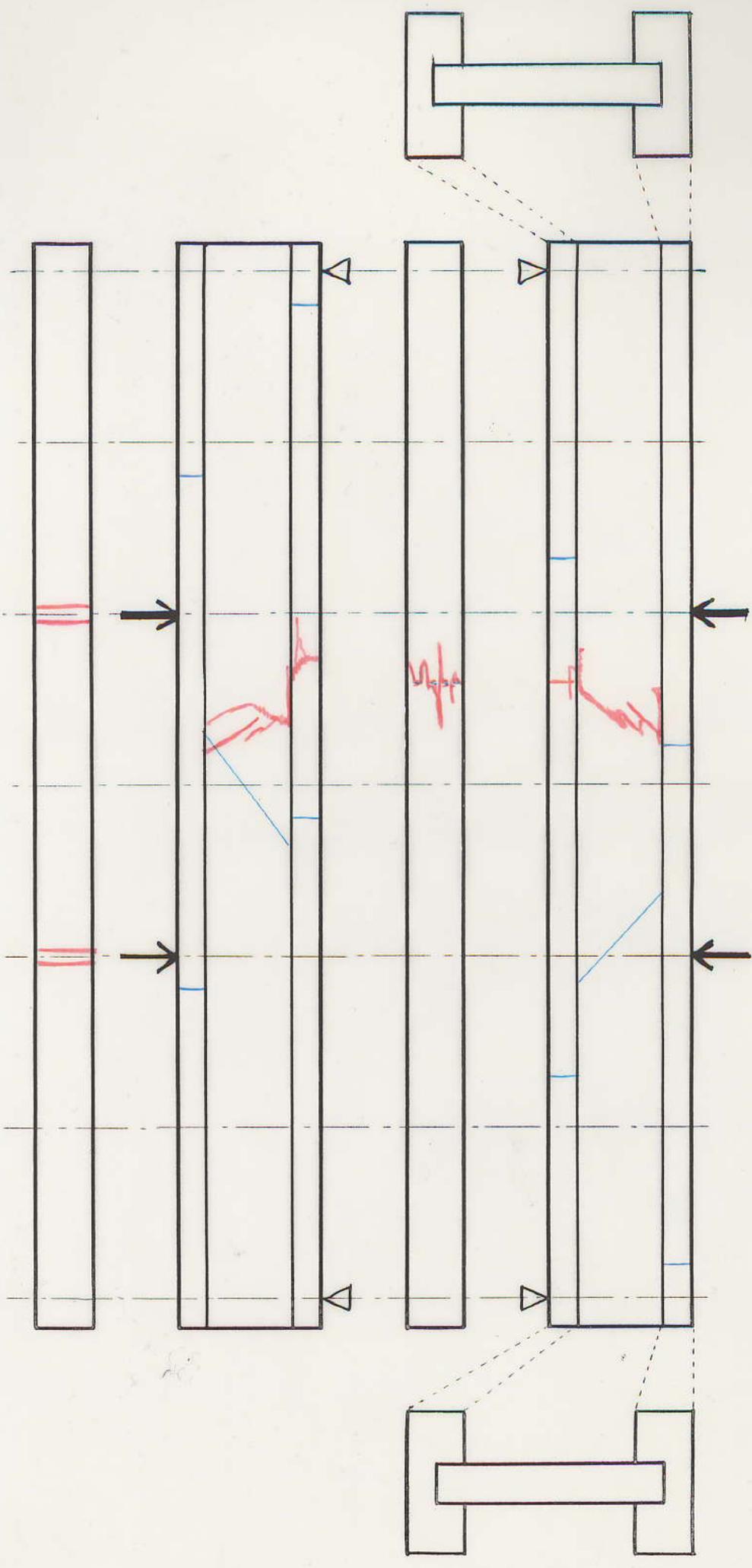


Fig.33-7 V-45-1

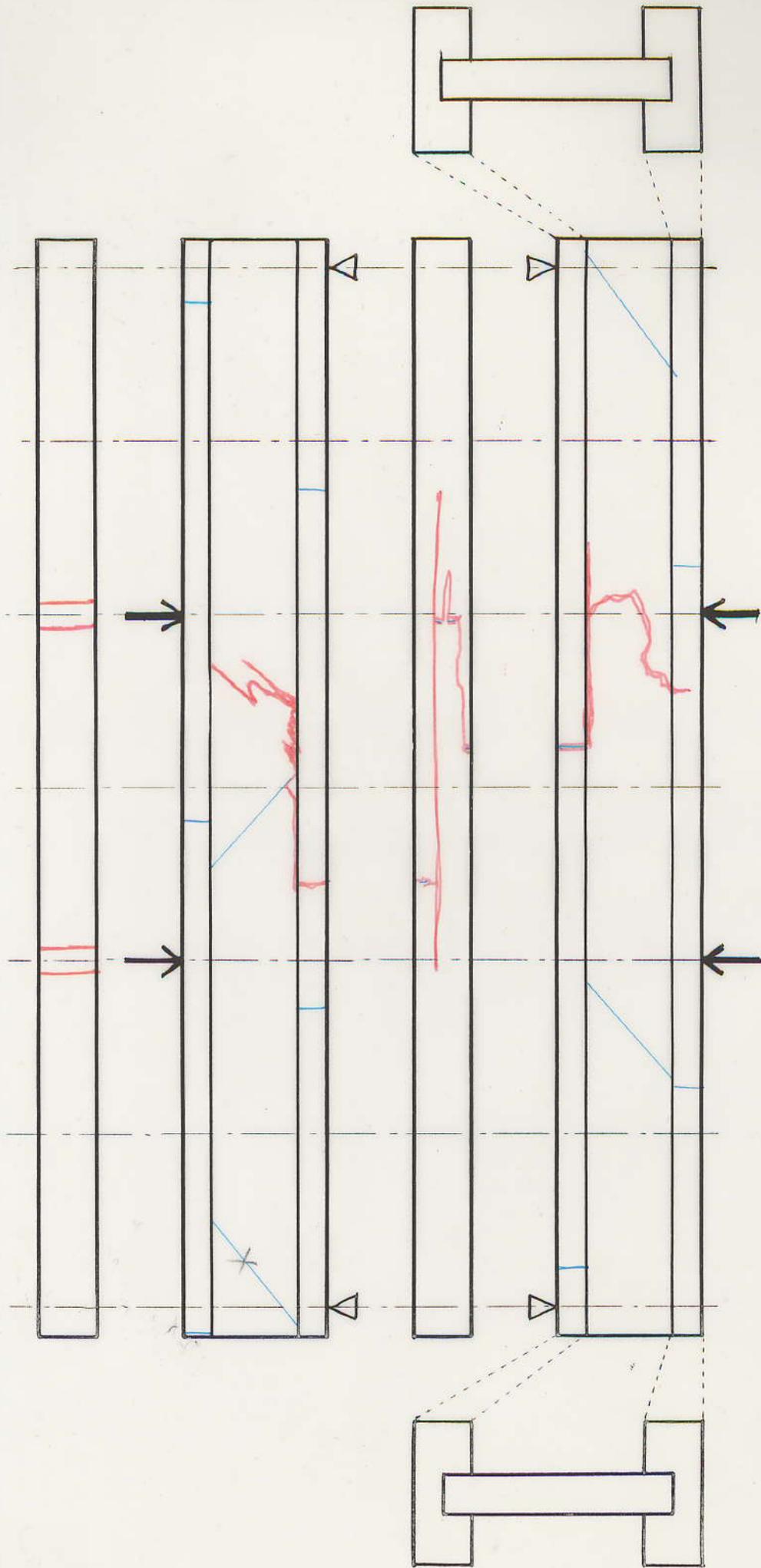


Fig. 33-8 V-45-2

U-45-2

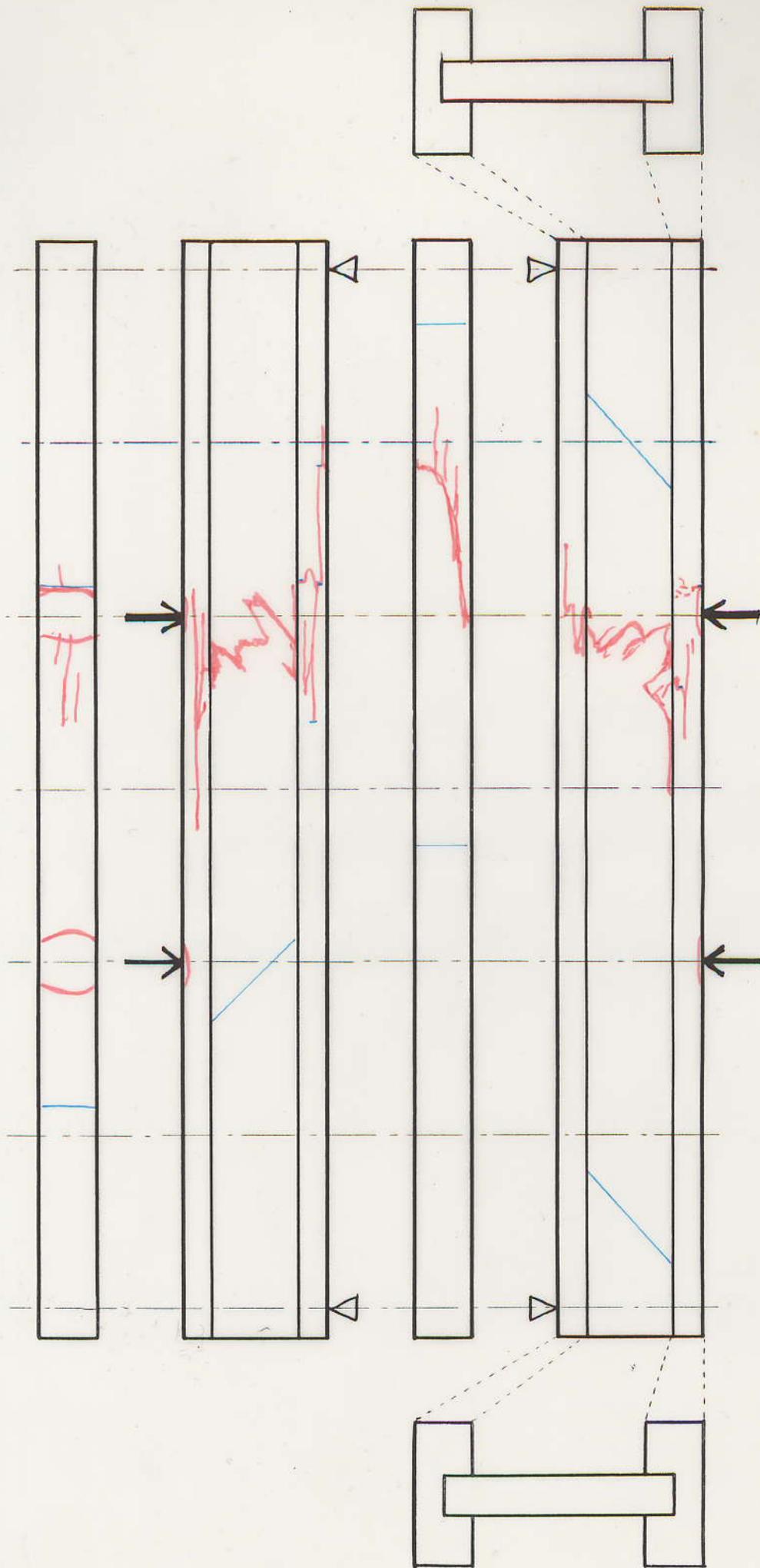


Fig. 33-9 H-45-1

H-45-1

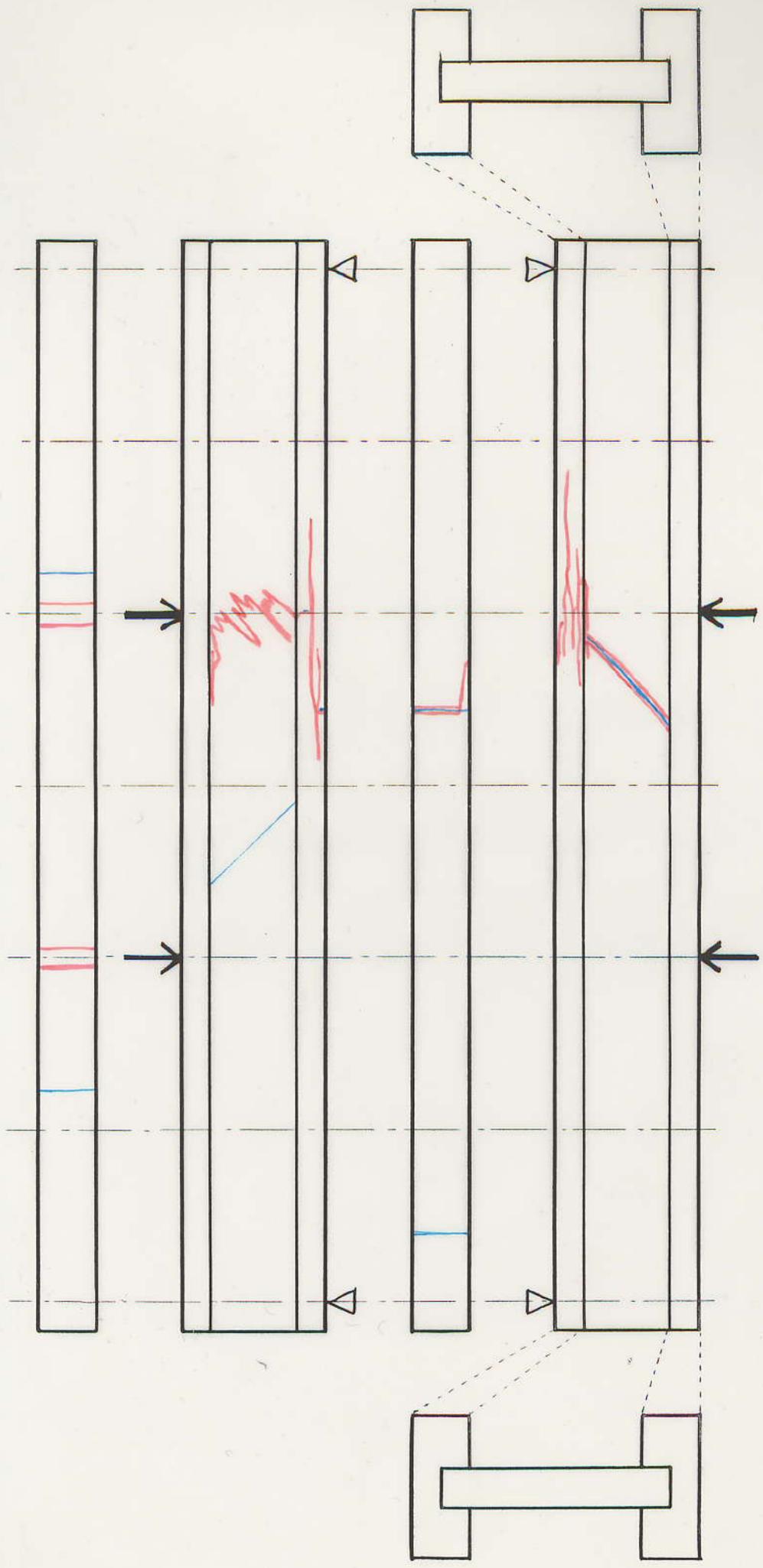


Fig. 33-10 H-45-2

H-45-2

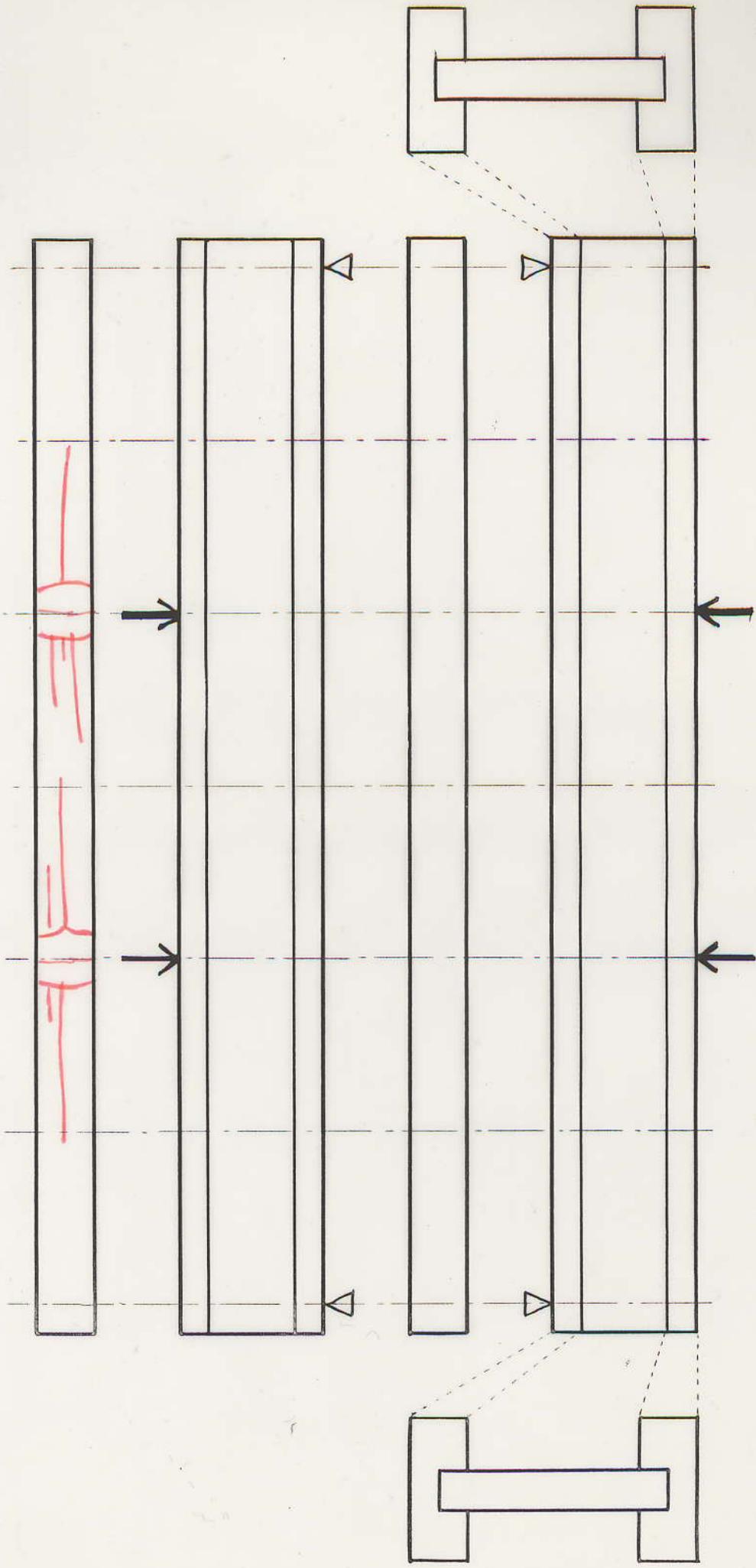


Fig. 33-11 S-90-1

S-90-1

S-90-2

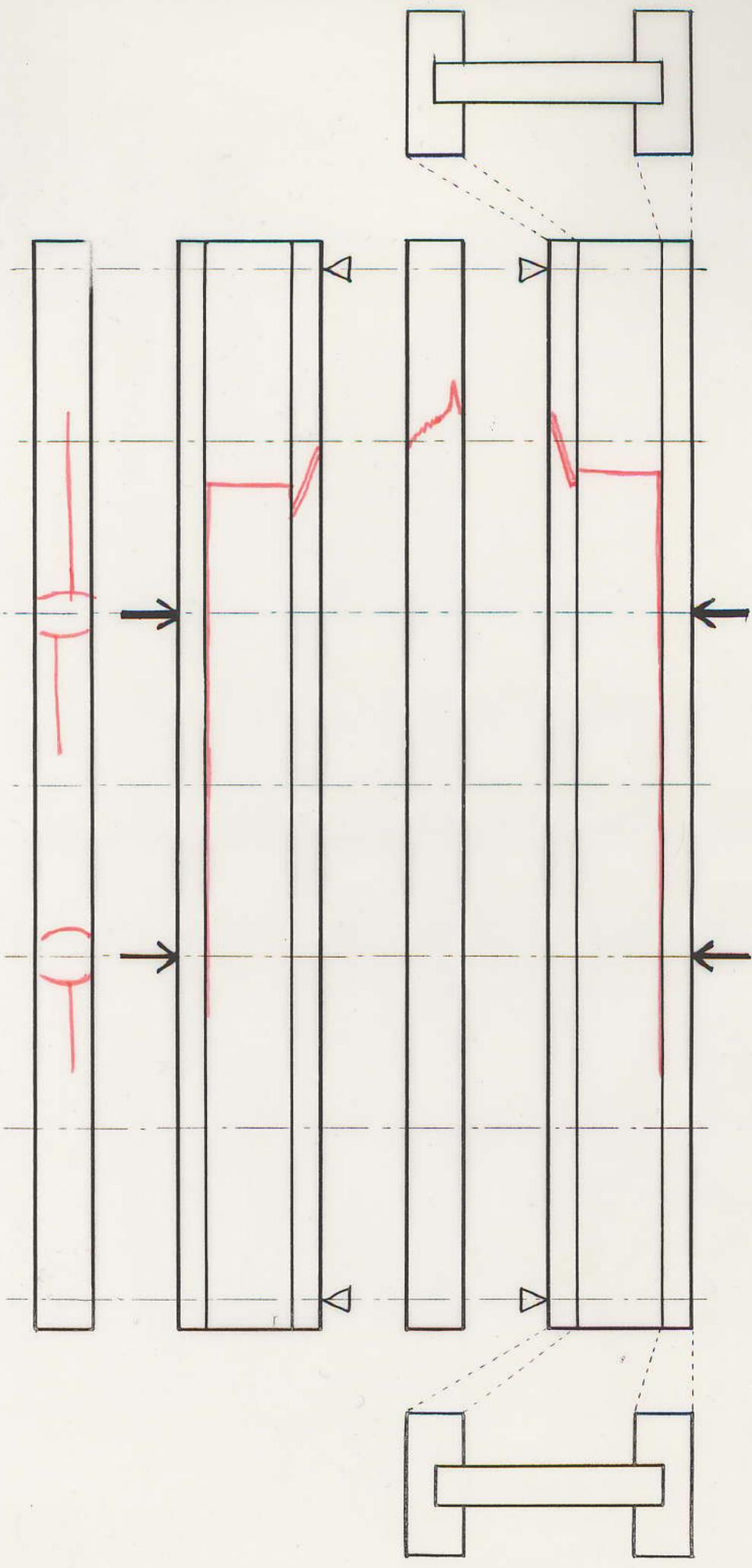


Fig. 33-12 S-90-2

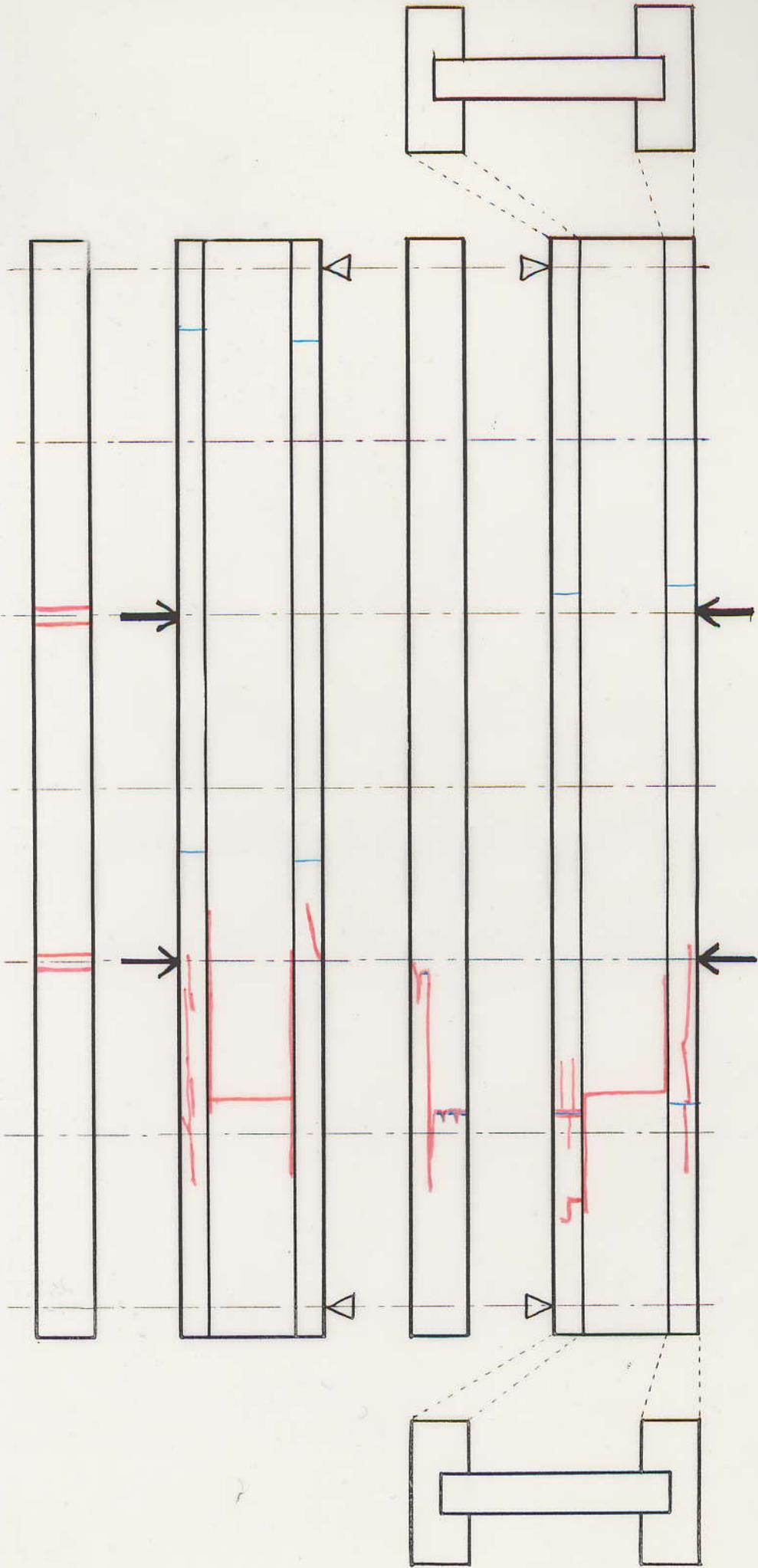


Fig. 33-13 V-90-1

V-90-1

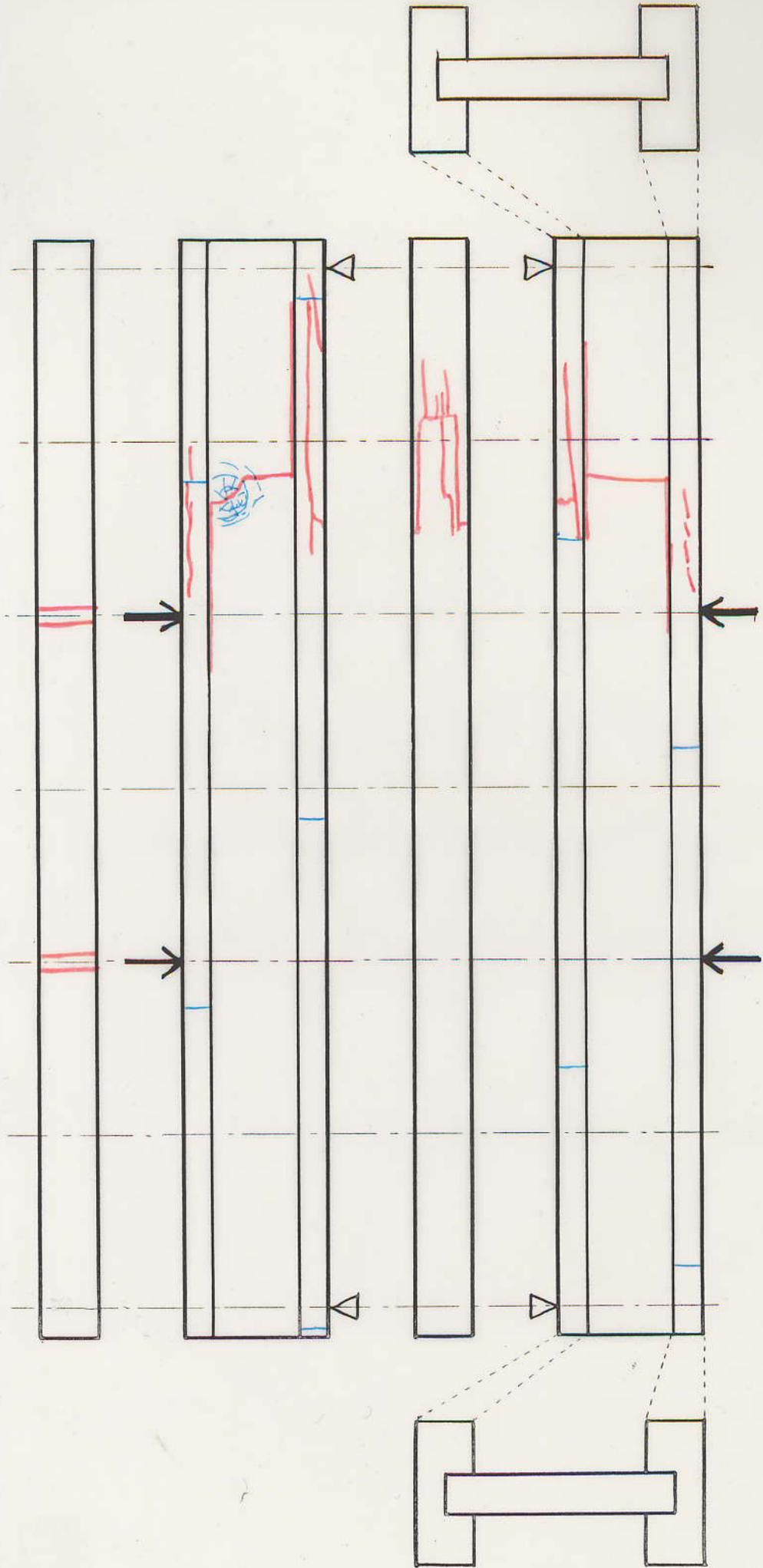


Fig. 33-14 V-90-2

V-90-2

H-90-1

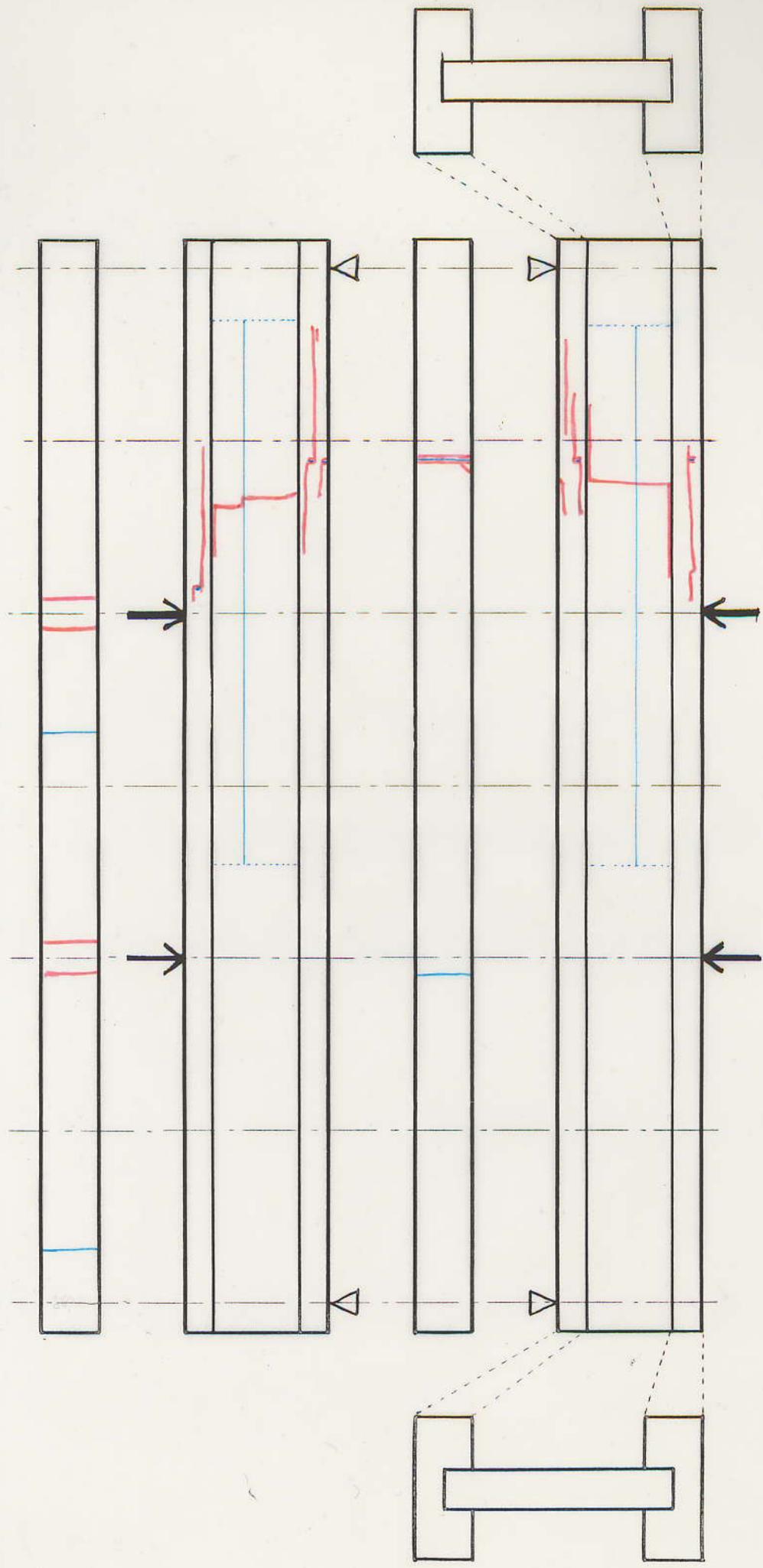


Fig. 33-15 H-90-1

H-90-2

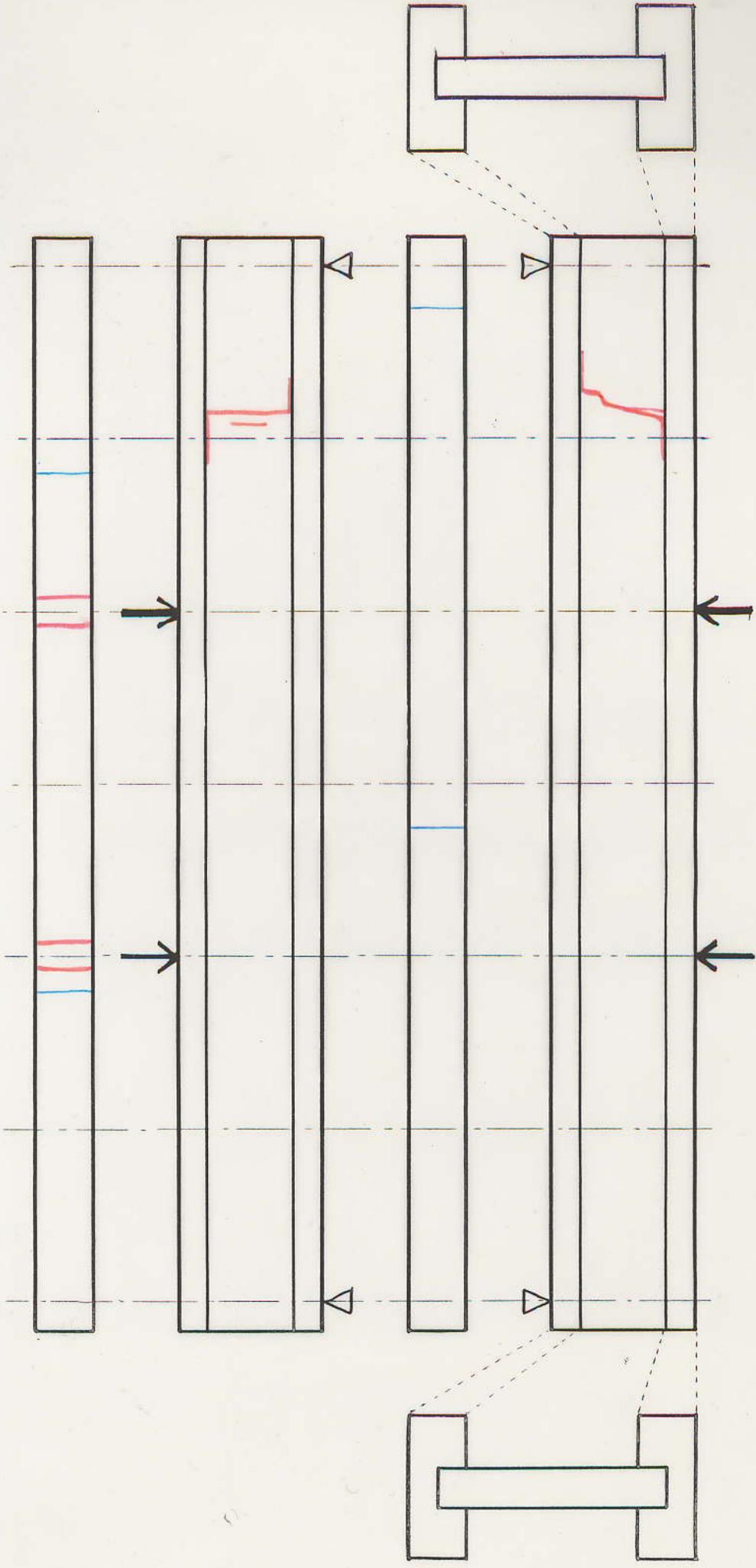


Fig. 33-16 H-90-2

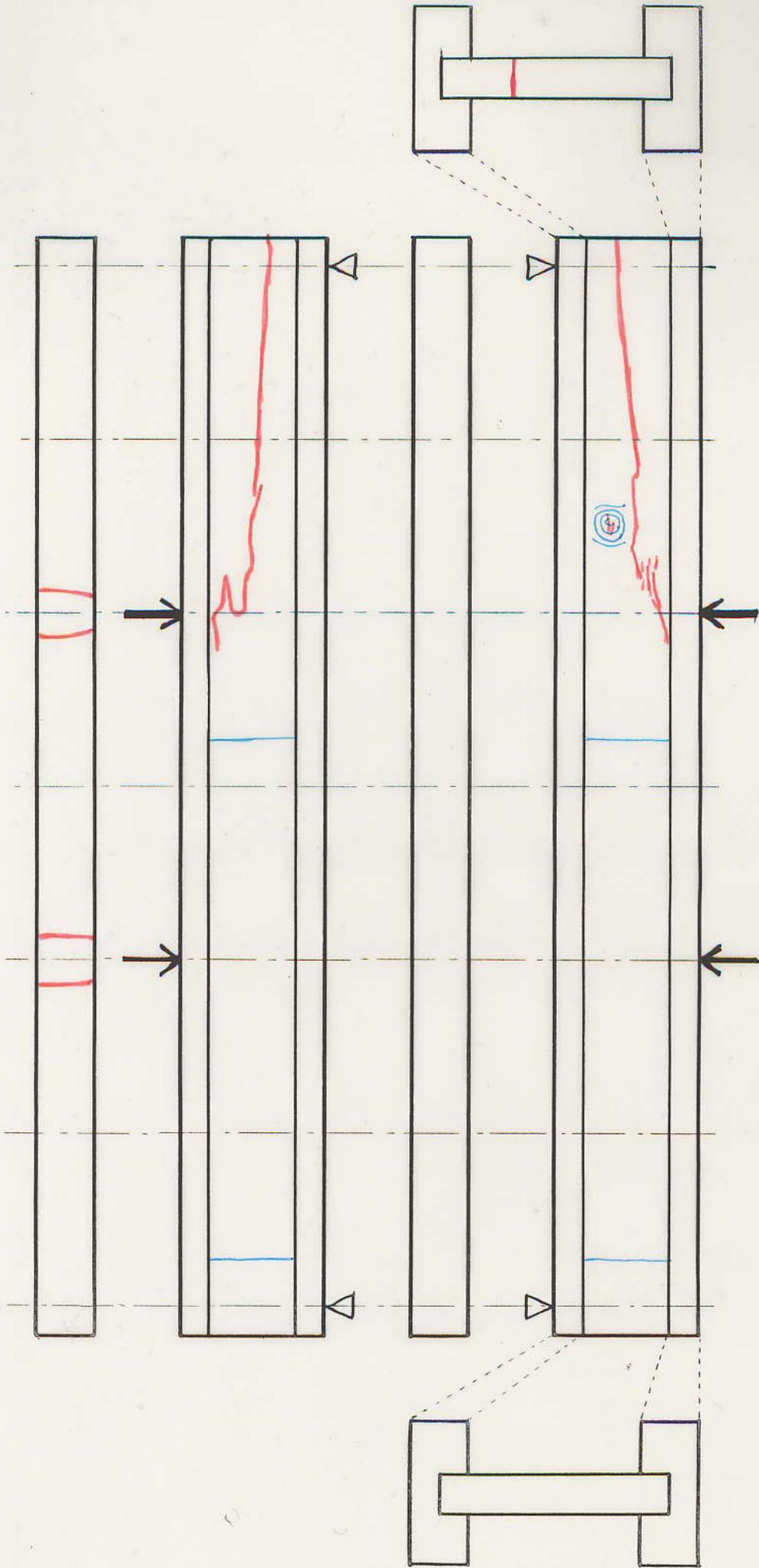


Fig. 33-17 S-0-1

S-0-1

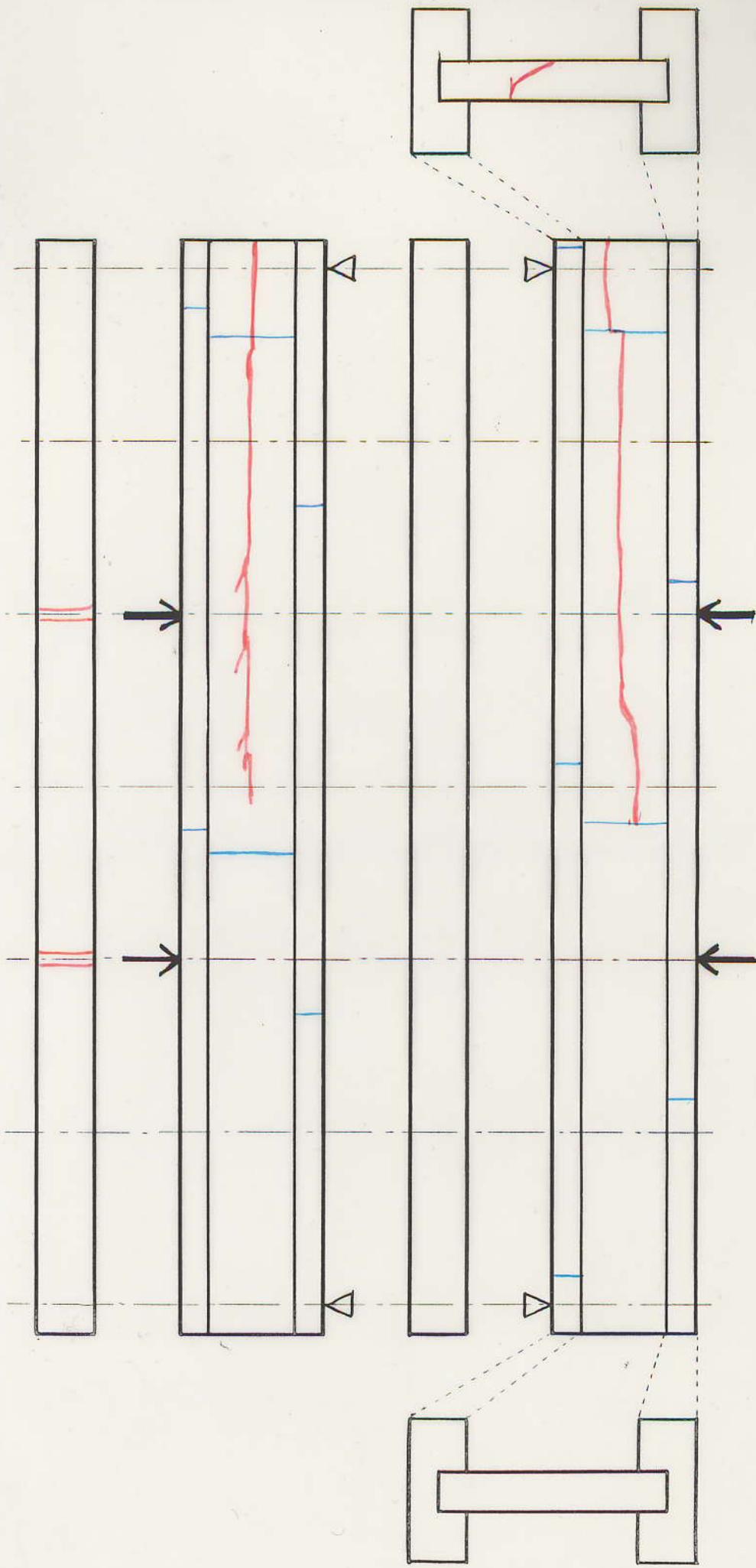


Fig.33-18 V-0-1

V-0-1

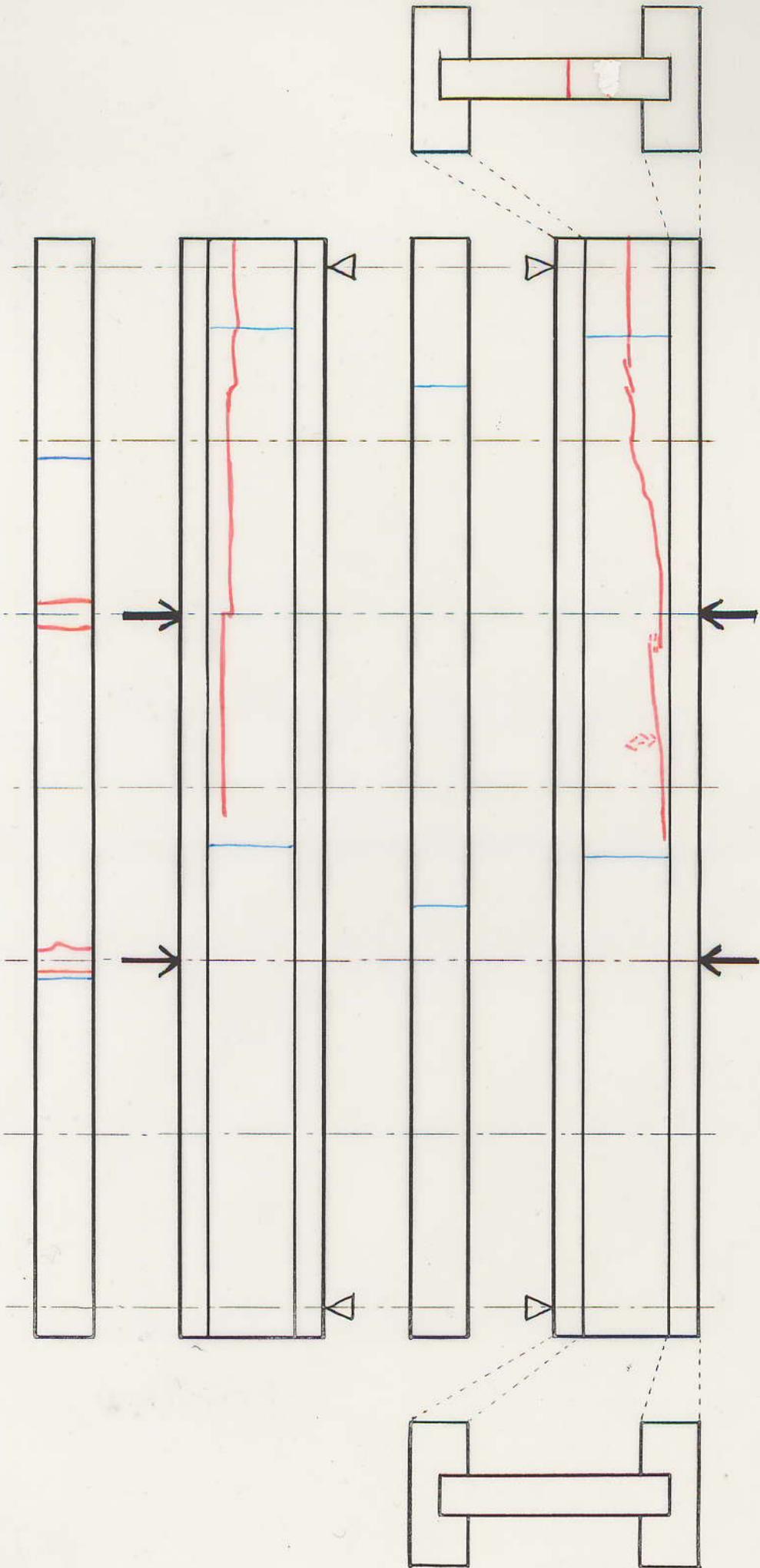


Fig. 33-19 H-0-1

H-0-1



Photo 1



Photo 2



Photo 3



Photo 4

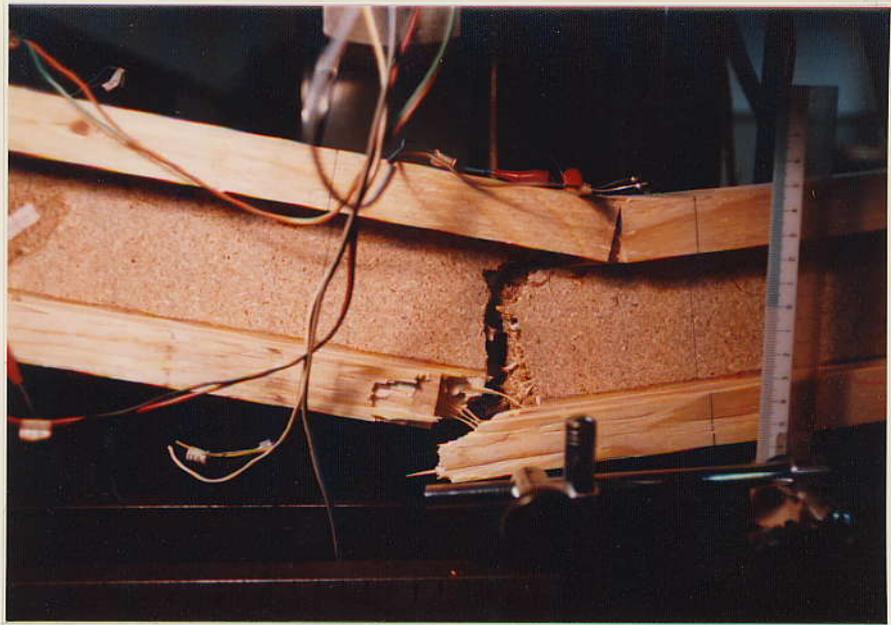


Photo 5



Photo 6

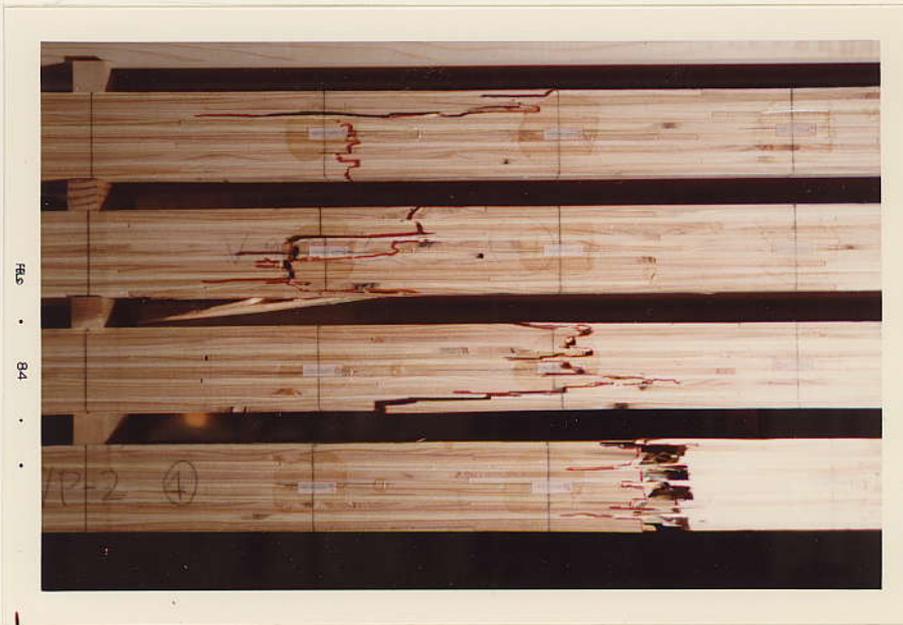


Photo 7

め、最大荷重も他に比べると小さかった。

Photo 6 は、 $90^\circ$  LVL ウェブの破壊部の拡大だが、ウェブの剪断破壊の結果、フランジも破壊しているのがわかる。また  $90^\circ$  LVL では、フランジとウェブの接着層付近の破壊も顕著だった。これに対して  $0^\circ$  LVL のものは、ウェブの剪断破壊だけで、フランジや接着層には破壊が見られなかった。

ウェブが  $45^\circ$  合板のものは、ほとんど下のフランジの引張により破壊した。S-45-1 に関しては、V-3-1 でも述べた様に下のフランジの節が致命的となったが、これは材料選択時のミスである。

しかし、それ以外は一昨年、昨年度の結

果と比較しても、ウェブ材としての性能は最も良かった。また、Butt Jointの影響は特に見合たらなかった。

ウェブがパーティクルボードのものは、ウェブの剪断破壊とフランジの引張破壊の両方が見られ、また最大荷重は一昨年、昨年の結果と比較しても大きな部類に入るの、今回のフランジ材に対しては、釣り合いのとれたウェブ材と言っても差しつかえは、ないだろう。また、Photo 5は、フランジの引張で破壊したものの、破壊部の拡大である。

荷重点のめり込みによる破壊は、素材のフランジにのみ見られた。また、荷重点のめり込みは、垂直 $\perp$ が最も小さ

く、素材が最も大きかった。

フロンジが垂直LVLのもの、引張による破壊では、Photo 7からみられる様に全て Butt Jointが影響し、その結果フロンジが水平LVLのものより最大荷重も小さかった。水平LVLでもある程度 Butt Jointの影響が見られたが、素材と同程度あるいはそれ以上の耐力がみられた。これらのことより、今回の小型I型梁では、垂直LVLの方が Butt Jointの影響が大きかったと言える。今後、実大梁では Butt Jointがどう影響するかも興味深いものである。

## VI 結論

今回の実験結果より、LVLの剪断強度が低い為、このままでのウェブへの応用は困難と思える。昨年度の結果より、表面にLVL(ラワン)、内部にファイバーボードを使ったウェブ材料ではよい結果が得られているので、LVLを加工して剪断強度を上げれば、ウェブへの応用も可能となるだろう。しかし、LVLと同じカラマツ単板から作製した45合板は、一昨年、昨年度のウェブ材と比較しても最もすぐれた性能を示し、ウェブの剪断剛性を大きくした成果が顕著だった。この45合板は、今回のフランジ材との組み合わせでは十分耐力を備えており、

これ以上剪断強度の高いウェブ材を使うことは、フランジとウェブのバランスの点から無意味だと思える。今回の45合板や、もっと剪断強度の高い材料をウェブに用いるのであれば、フランジ材の強度性能の向上が要求されるだろう。ただ、45合板には、製造過程における手間とコストの問題があり、工業化の際には大きな障害となるだろう。

フランジ材に関しては、水平レベルが素材と同程度かあるいはそれ以上の性能を示した。特に荷重点のめり込み等では素材より優れていると考えられる。しかし、破壊形態からはある程度 Butt Joint の影響も見受けられるので改善の余地も

あろう。これに対して、垂直 LVL のものは、Butt Joint に起因する破壊が顕著であり、このままでは引張フランジ材としては不適當である。ただ、圧縮フランジでは、Butt Joint による破壊が明らかでなく、また荷重点のめり込みが最も少なかったので、圧縮フランジにはこのままでも使用できると思われる。

LVL は、比較的品質がそろっているので、使いやすい材料だと言える。水平 LVL では、I 型梁の外縁に未成熟材でない心材を、内側には辺材を使用すれば材料が有効的に利用できかつ剛性が上がるものと考えられる。

今回、45合板の剪断弾性係数の測定に

問題があったが、材料のヤング係数と剪断弾性係数が正確にわかれば、比例限度内での撓みと傾斜角がほぼ予想できることがわかった。

今後の研究課題として、I型梁が座屈しない程度の、幅と高士の比及びウェブの幅の比を確立すること、I型梁を作製する際のフランジとウェブの接着剤の問題、LVLを作製する際の縦継ぎ方法の改善、LVLを実大のI型梁に応用する際の Butt Joint の影響、45合板の剪断弾性係数の測定法の確立等、まだまだいろいろの問題が残っている。さらには、今後の研究に期待したい。

本研究では、LVLのI型梁の応用に

に関して、水平LVLのフランジへの応用等に明らかな結果が出たが、本研究がI型梁の設計、LVLの構造材としての評価、及びカラマツの有効利用のための一助となれば幸いである。

## VII 参 考 文 献

- 1) 上野里津子 : "I型断面梁の剛性と強度", 昭和56年度卒業論文
- 2) 佐藤良子 : "I型断面梁の剛性と強度", 昭和57年度卒業論文
- 3) 真田康弘 : "カラマツLVLの利用", 木材の研究と普及, No. 357, (1973.5)
- 4) 森泉周・真田康弘・前田典昭・小倉高規 : "カラマツLVLの強度性能", 林産試月報, No. 384, (1984.1)
- 5) 沢田稔 : "材料力学講義資料"
- 6) 日本建築学会 : "木構造設計規準・同解説", 技報堂, (昭和48年)
- 7) Albert G. H. Dietz : "Engineering Laminates", John Wiley & Sons, New York, (1949)