合板をウェブ材に使用した I 形および Box 形木造梁の研究 (その 1)

正会員 後 藤 一 雄*
同 大 滝 信 彦**
同 阿 部 市 郎***

序

この研究は合板をウェブ材に使用した I 形および Box 形の木造梁について実験を行ない、これに力学的解析を試みたものである。

しかし、この研究は試作的な意味のものであるため、同一試験体の個数は一個ずつで各種の形式に渉り、また工作も特別慎重には行なわず、力学的解析の可能性と粗雑な接着工法についての見通しを得んとしたものである。

類似の研究には最近北大宮島氏の報告¹⁾があるが、本

図—1

* 東京工業大学工業材料研究所教授・工博

** 永大産業 K.K. 研究開発部

*** 永大産業 K.K. ハウス設計室長

(昭和47年8月16日日本稿受理・討論期限昭和48年6月末日)

研究ではフランジの曲げ抵抗を考慮した本研究者の複合材の応力式²⁾を適用して実験値と計算値がよく合致することを確かめた。

§ 実 験

I. 試 験 体

a. 形 状 図—1 および図—2 に示す。

b. 木質材

フランジ：ベイツが1等

ウ ェ ブ：ラワン合板

構成 20.2 mm 厚 3 mm×7 ply

(3.2 mm より圧縮)

12 mm 厚=2 mm—3 mm—2 mm—

3 mm—2 mm

(2.1, 3.2 より圧縮)

材料の物理的性質は表—1 に示す。

図—2

表-1

(//: 繊維に平行 ⊥: 繊維に直角 ×: 繊維に 45°)

	引 張 (kg/cm ²)				圧 縮 (kg/cm ²)				曲 げ (kg/cm ²)					剪 断 (kg/cm ²)			
	//σ _t	⊥σ _t	//E _t	⊥E _t	//σ _c	⊥σ _c	//E _c	⊥E _c	//σ _B	⊥σ _B	//E _B	×E _B	⊥E _B	//τ	×τ	//⊥G	×G
ベイツガ	1,061	—	134 ×10 ³	—	374 (237)	—	106 ×10 ³	—	431 (285)	—	108 ×10 ³	—	—	—	—	—	—
20.6 mm 合板*)	378	396	53×10 ³	46×10 ³	288	217	65×10 ³	40×10 ³	584	342	67×10 ³	11×10 ³	33×10 ³	46	160	3.5 ×10 ³	24.5 ×10 ³ ⊕
12 mm 合板*)	475	500	55×10 ³	60×10 ³	240	250	60×10 ³	60×10 ³	404	392	85 ×10 ³	11×10 ³	35 ×10 ³	42	155	3.4 ×10 ³	23.8 ×10 ³ ⊕
									561	473	100 ×10 ³		41 ×10 ³				
									674	545	110 ×10 ³		46 ×10 ³				

*) : ASTM 試験法によって求めた値を全断面で計算した値 () : 比例限 +) : 推定値
⊕ : 実験値はどういうわけか非常に高い値となったので、理論値としての //⊥G×7 をここに掲げた。

c. 接着剤 レゾルシノール (豊年製油製 RW-201)

II. 試験体の製作

a. 接着剤 レゾルシノール 100

硬化剤 10

に混合したものを 300 g/m² の割合でハケ塗り。

b. 圧 縮

クランプ金物を使用せず、クギの打ち締めをもってこれにかえた。

クギは N 75 (I-Beam 用) および N 50 (Box Beam 用) を 100 cm² 当り 1 本の割り合いで打込み、その後 24 時間 50°C 前後の加熱室に放置した。

c. 出来上りの状況

合板に厚みの不揃いのものが多少存在し、またフランジ材にも部分的反りが多少あるため、接着は完全でなく、接着面に隙間のあるところが各所に見られた。

スカーフ接合面にも多少の隙間が見られた。

III. 試験方法

a. 試験機

東工大 ボールドウイン 150 ton 万能試験機を使用した。

荷重点は中央集中に近いが、完全集中ではめり込みを生ずるので図-3~5 のように分散して加えた。したがって、 M_{max} は下式のように計算される。

$$M_{max} = \frac{P}{2} \cdot 180 - \frac{P}{4} (0.45 + 0.15) \\ = 0.75 P \text{ kg} \cdot \text{m}$$

b. 荷 重

荷重は試験機荷重 P_0 と荷重装置 W とから成っている。すなわち、

$$P = P_0 + W$$

P_0 は 100 kg 段階で 200 kg/分の割合で加え、100 kg ごとに上昇を止めて変形の落ち着くのを待ってからたわみを測定し、破壊まで一様に上昇せしめた。

IV. 試験結果

a. 荷重変形曲線

試験における荷重変形曲線は図-6 および図-7 に示

図-3

図-4

図-5

す。

これによれば、一般にウェブの合板が 45° 方向に貼られているほうが剛性が高く、合板のせん断変形が思ったより大きく響いていることが示されている。

また梁の荷重変形曲線は降伏荷重までは直線状を呈し

図-6

図-7

ており、弾性的性状は良好である。

b. 最大荷重・降伏点荷重および $l/300$ のたわみ荷重
これらは表-2 に示すとおりである。

c. 破壊状況

IB-1 ウェブの継目付近における下側フランジ材とウェブとの接着が切れた(図-9)。

IB-2 引張側フランジ材の木目不良点から破壊した。破壊点はモーメント最大点よりやや外れた位置である

(図-10)。

IB-3 引張側フランジの梁中央より 40 cm のところに節があり、この点から破壊した(図-11)。

IB-4 下側フランジ、スカーフジョイントの接着部分で破壊した。ジョイント部分はモーメントがそれほど大きくないところに設けてあり、接着不良と考えられる。

IB-5 下側フランジのスカーフ部分に節があり、ス

表-2

試験体		最大荷重 P_{max} (kg)	降伏点荷重 $P_Y^{*)}$ (kg)	たわみ $l/300$ にお ける荷重 $P_{l/300}$ (kg)	$P_Y/P_{l/300}$	$r_{max}/P_{l/300}$
I 型	IB-1	4,176	2,360	1,510	1.56	2.76
	IB-2	3,586	2,040	1,960	1.04	1.83
	IB-3	3,566	2,080	2,000	1.04	1.77
	IB-4	3,416	2,360	1,510	1.56	2.26
	IB-5	4,926	2,320	1,650	1.40	2.98
ボ ック ス 型	BB-1	5,396	3,200	1,410	2.27	3.83
	BB-2	4,456	3,360	1,940	1.73	2.30
	BB-3	2,676	2,340	1,680	1.39	1.59
	BB-4	2,826	2,160	1,580	1.37	1.79

*) P_Y は stress-strain 曲線において, Initial tangent に対する 5% 偏差とする (図-8)。

図-8

図-9

図-10

カーブ接着面の剥離とともに節部分が破壊した (図-12)。

BB-1 中央より約 30 cm のところで合板ウェブとフランジとが同時に破壊した (図-13, 14)。梁として完全に近い破壊を示したのは、これだけである。したがって、耐力も最も大きい。

図-11

図-12

図-13

図-14

BB-2 ウェブ合板接手のところでフランジ切断とともにウェブとフランジの接手が外れた (図-15)。

BB-3 フランジスカーフ継手とウェブの継手とが一致しており、中央より相当離れた端部付近であるにもか

図-15

図-16

図-17

かわらず、ここが破壊した（図-16）。耐力は最も低い。

BB-4 BB-3と同じ形の試験体で、同じように破壊した（図-17）。

V. 結果の考察

a. 接着技術が十分でなかったために、BB-3, 4のようにウェブとフランジの接手位置が一致するとモーメント最大値より相当低い個所でも破壊が起こり、十分な強度が発揮されていない。しかし、それでも $l/300$ のたわみ制限による使用荷重に対して1.6倍の安全率は存在するので、接着梁の安全性は示されたと思われる。しかし、長期の許容耐力として、実験の $l/300$ における値を半減して使用せず、もっぱら震動障害のみを考えて実験値そのものを採用するとすれば、少なくとも $P_{\max}/P_{l/300}$ は2以上の値が必要である。したがって、この梁の耐力を十分活用するためには十分な接着を行なう必要がある

う。

それには接着施工時に次のような考慮を払う必要があると思われる。

i. 接着剤に増量材を混入し、接着剤の盛上りをよくする。増量材としては石綿粉もしくは乾燥木粉がよい。混入量は状況に応じて適宜とする。

ii. フランジ材を平坦に仕上げること。

圧縮治具を使用せず、釘で仮止めをする場合にはこれが大切である。これには長い前後テーブルを有するプレーナーを使うことで解決する。

b. 合板のせん断変形が意外に大きいことが示された。合板を 45° に貼ったものは平行のものに比して強度はやや落ちるが剛性は高くなっている。

今後の設計において、梁の高さ、合板の厚さ、フランジの断面等のプロポーションを如何にするのがよいかを決定するという課題が残っている。

c. スカーフジョイントを行なったものは、スカーフの破壊で最大耐力が低く現われたものがBB-3, 4に見られる。

この原因はスカーフ継手の方向性と、製造加工の順序とを改めることで改善されよう。すなわち、

i. スカーフ継手はこの試験体では、組立てるときに同時に接着を行なっているが、これを改めて、まずフランジ材だけ先に接着を行ない、十分接着剤が硬化してから、梁としての組立を行なうこと。

ii. スカーフの向きは現在のものを 90° 回転した形とする（図-18）。

図-18

iii. Box形よりI形のほうがスカーフの位置を食違わせることができより安全である。

d. フランジ材に使用したベイツガは一等材であるが、継手の付近や梁の中央付近に欠点がないように配慮する必要がある。

VI. 接着集成梁の理論計算

A. たわみの理論値と実験例の比較

(A-1) 合板 $0 \sim 90^\circ$ I型 (IB-1, IB-4, IB-5)

まず図-19のように、等価断面に換算する。すなわち、引張側フランジの引張ヤング係数を基準として各材のヤング係数に従い、幅をその割合で縮少する。

$$g = \frac{80 \times 5 + 63.2 \times 25 + 30.9 \times 15}{10 \times 8 + 10 \times 6.32 + 30 \times 1.03} = 14.0$$

図—19

$$I_e = \frac{8 \times 10^3 + 6.32 \times 10^3 + 1.03 \times 30^3}{12} + 80 \times 9^2 + 63.2 \times 11^2 + 30.9 \times 1^2 = 17,670 \text{ cm}^4$$

$$Z_{ec} = \frac{17,670}{16} \div 1,100 \text{ cm}^3$$

(A-1-a) た わ み

せん断変形があり、フランジの曲げ剛性が大きい梁のたわみは下式²⁾で与えられる。ただし、この場合、この梁をほぼ中央集中荷重とみなして行なう。

$$y = y_M + \frac{P}{2E} \left(\frac{1}{I_{e1} + I_2} - \frac{1}{I_e} \right) \cdot K^2 \left(\frac{l}{2} - K \tanh \frac{l}{2K} \right) \quad (1)$$

y_M : 曲げモーメントによるたわみ

$$I_{e1}: \text{上側フランジの等価断面二次モーメント} = \frac{6.32 \times 10^3}{12} = 527 \text{ cm}^4$$

$$I_2: \text{下側フランジの断面二次モーメント} = \frac{8 \times 10^3}{12} = 667 \text{ cm}^4$$

K^2 : せん断剛性によって定まる値で下式による

$$K^2 = \frac{E_t S_e}{t \cdot G} \cdot \frac{I_{e1} + I_2}{I_e} \quad (2)$$

E_t : ヤング係数 (引張側弦材の引張ヤング係数)

G : ウェブのせん断剛性

t : ウェブの厚み (t_e ではない……念のため)

S_e : 梁の重心軸に関する片側フランジの等価断面一次モーメント

$$B: \frac{g_1 + g_2}{E_t I_e} \quad (3)$$

g_1, g_2 : 梁の重心軸とそれぞれのフランジ重心軸との距離

$$\frac{K^2}{E} = \frac{8 \times 10 \times (14 - 5)}{2.06 \times 3,500} \cdot \frac{527 + 667}{17,670} = 0.0067 \quad (4)$$

$$K = \sqrt{0.0067 \times 134,000} \div 30 \quad (5)$$

$$y_M = 2 \times \frac{P_1}{48 EI} [3 b_1^2 + 6 a_1 b_1 - a_1^2] a_1$$

$$+ (3 b_2^2 + 6 a_2 b_2 - a_2^2) a_2]$$

$$a_1 = 135 \quad b_1 = 225$$

$$a_2 = 165 \quad b_2 = 195$$

$$P_1 = \frac{P}{4}$$

図—20

$$= \frac{925,312}{EI} P \quad (6)$$

式(1)にそれぞれを代入

$$y = \left[\left(\frac{925,312}{134,000 \times 17,670} + \frac{1}{2} \frac{1}{527 + 667} - \frac{1}{17,670} \right) 0.0067 \left(\frac{360}{2} - 30 \tanh \frac{180}{30} \right) \right] P = 0.00078 P \text{ cm} \quad (7)$$

P : kg

$P = 2,000 \text{ kg}$ の時のたわみを求めると

計算値 1.56 cm

実験値

IB-1	1.63 cm	誤差	-4.29%
IB-4	1.63		-4.29
IB-5	1.46		+6.85
平均	1.57 cm	誤差	0.63

となり、計算値に対して実験値は僅少の誤差である。また各個に見ても誤差は7%を超えておらず、非常によく一致している。

(A-1-b) 強 さ

強さについては単純な断面係数による計算と材の応力分布を考慮*したもの、せん断変形を考慮したものとの3つの方式がある。

i. 断面係数による計算

I形や□形の梁では応力($\sigma \cdot b$)の大部分は縁端部に集中しているので、応力度の直線的3角分布と弯曲形分布とによる曲げ抵抗($b \cdot \sigma \cdot y dy$)の差は少なく、すなわち材料の応力-歪曲線の弯曲による影響で曲げ耐力の上昇する効果は少なく、応力分布を考慮した計算と断面係数による直線分布の計算とはほぼ一致し、いわゆる「曲げ強度」なる概念はいらない(図-21)。したがって、曲げ材に対する一般の慣用式

$$M_{\max} = Z_{ec} \cdot \sigma_{c \max} \quad (\text{または } Z_{et} \cdot \sigma_{t \max}) \quad (8)$$

で計算される。

すなわち、

* 木材では応力歪曲線が弯曲しているので、曲げモーメントによる材応力は縁端に近づくに従って頭打ちとなり、3角形分布より矩形分布に近くなる。そのためにソリッドの材では実験による $M_{\max}$ を Z で割った値は、 f_c あるいは f_t より上昇する。それでこの値を f_b : 曲げ強度と名付けている。したがって、厳密には曲げ強度は形状によって異なる。

図-21

$$\begin{aligned}
 M_{\max} &= 1,100 \times 374 = 411,400 \text{ kg} \cdot \text{cm} \\
 &= \frac{P}{2} \times 180 \text{ cm} - \frac{P}{4} \times 45 \text{ cm} - \frac{P}{4} \times 15 \text{ cm} \\
 &= 75 \text{ cm } P \\
 P_{\max} &= \frac{411,400}{75} = 5,485 \text{ kg} \quad \dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

ii. セン断変形を考慮した計算式²⁾

中央集中荷重として求める。

$$\begin{aligned}
 M_1 &= P \frac{I_{e1}}{2} \left[\frac{l}{2I_e} + \left(\frac{1}{I_{e1} + I_2} - \frac{1}{I_e} \right) \right. \\
 &\quad \left. \cdot K \tanh \frac{l}{2K} \right] = {}_1C_1 \cdot P \quad \dots\dots\dots (10)
 \end{aligned}$$

$$M_2 = M_1 \times \frac{I_2}{I_{e1}} = {}_2C_1 \cdot P \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\begin{aligned}
 F &= P \frac{S_e}{2I_e} \left[\frac{l}{2} - K \cdot \tanh \frac{l}{2K} \right] = {}_1C_2 \cdot P = {}_2C_2 \cdot P \\
 &\quad \dots\dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

(上・下フランジとも同じ)

$$\begin{aligned}
 \frac{F}{A_1} + \frac{M_1}{Z_1} \cdot \frac{\sigma_{C_{\max}}}{\sigma_{B_{\max}}} \\
 = \sigma_{C_{\max}} = P \left[\frac{{}_1C_2}{A_1} + \frac{{}_1C_1}{Z_1} \cdot \frac{\sigma_{C_{\max}}}{\sigma_{B_{\max}}} \right] \quad \dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{F}{A_2} + \frac{M_2}{Z_2} \cdot \frac{\sigma_{t_{\max}}}{\sigma_{B_{\max}}} \\
 = \sigma_{t_{\max}} = P \left[\frac{{}_2C_2}{A_2} + \frac{{}_2C_1}{Z_2} \cdot \frac{\sigma_{t_{\max}}}{\sigma_{B_{\max}}} \right] \quad \dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

A_1, Z_1, A_2, Z_2 : 上・下フランジ材の断面積および断面係数

M_1, M_2 : 上・下フランジ材の受ける曲げモーメント

F : フランジ材の軸方向力

$$\begin{aligned}
 {}_1C_1 &= \frac{527}{2} \left[\frac{360}{2 \times 17,670} + \left(\frac{1}{527 + 667} - \frac{1}{17,670} \right) \right. \\
 &\quad \left. \cdot 30 \tanh \frac{360}{2 \times 30} \right] = 8.837
 \end{aligned}$$

$${}_2C_1 = 8.83 \times \frac{667}{527} = 11.176$$

$$\begin{aligned}
 {}_1C_2 = {}_2C_2 &= \frac{80 \times 9}{2 \times 17,670} \left[\frac{360}{2} - 30 \tanh \frac{360}{2 \times 30} \right] \\
 &= 3.056
 \end{aligned}$$

$$Z_1 = \frac{8 \times 10^2}{6} = 133 \text{ cm}^3 \quad A = 80 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned}
 {}_cP_{\max} &= \frac{374}{\frac{374}{431} \cdot \frac{8.837}{133} + \frac{3.056}{80}} = 3,904 \text{ kg} \\
 &\quad \dots\dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

iii. 実験値

$$P_{\max} = 4,176 \text{ kg}, 3,416 \text{ kg}, 4,926 \text{ kg}$$

$$\text{平均 } 4,173 \text{ kg}$$

上記、実験値を式(9)と比較すると、式(9)の計算値は材の欠点を考えても高く計算され過ぎている。

式(15)と比較するために実験値を中央集中荷重の場合に換算すると。

$$M_{\max} = 75 P = \frac{360}{4} P_{\text{中央}}$$

$$P_{\text{中央}} = 4.173 \times \frac{75}{90} = 3.478 \text{ kg} \quad \dots\dots\dots (16)$$

計算値の約 89% で圧縮材の欠点による低減³⁾ (70%) より大きい。

iv. なお U.S. Department of Agriculture Wood Hand Book によれば、形状による破壊に対する低減率 (F_1) は、

$$F_1 = 0.5 + 0.5 \left(\frac{K(t_2 - t_1)}{t_2} + \frac{t_1}{t_2} \right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

t_2 : 材の全幅 t_1 : ウエブの厚さ

K の値は表-3 による。

表-3

材せい 圧縮 側フ ランジせい	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
K	0.085	0.155	0.230	0.315	0.400	0.490	0.575	0.660	0.740

$$M_{\max} = Z \cdot F_1 \cdot \sigma_{B_{\max}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

これによれば、 $K \approx 0.45$

$$F_1 = 0.5 + 0.5 \left[\frac{0.45(10 - 8)}{10} + \frac{2}{10} \right] = 0.78$$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{8 \times 10^3}{12} \times 2 + \frac{2.06 \times 30^3}{12} + 10 \times 8 \times 10^2 \times 2 \\
 &= 21,968 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

$$Z = \frac{21,968}{15} = 1,464 \text{ cm}^3$$

$$P_{\max} = \frac{1,464 \times 431 \times 0.78}{75} = 6,562 \text{ kg}$$

となって実験値に比し非常に高い値となる。

(A-1-c) 許容荷重

この梁を日本建築学会の「木構造設計規準」において規定した木材の許容応力度で算定した場合と実験値の比例限から考えた許容値とを比較して見ると、

式(8), (9) による場合

$$f_c = 120 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{\text{許}} = \frac{1,100 \times 120}{75} = 1,760 \text{ kg}$$

式(13) による場合

$$P_{\text{許}} = \frac{120}{\frac{120}{140} \cdot \frac{8.837}{133} + 0.0382} = 1,262 \text{ kg}$$

U.S.A. Wood Hand Book によるものは比例限にお

ける低減率,

$$\begin{aligned} F_2 &= 0.58 + 0.42 \left(\frac{K(t_2 - t_1)}{t_2} - \frac{t_1}{t_2} \right) \\ &= 0.58 + 0.42 \left(\frac{0.45(10-8)}{10} + \frac{2}{10} \right) \\ &= 0.83 \\ P_Y &= \frac{140 \times 1,464 \times 0.83}{75} = 2,268 \text{ kg} \end{aligned}$$

実験値から推定される許容耐力は P_Y または $2/3 P_{\max}$ のうち小さいほうの値の 0.8 として:

$$\begin{aligned} P_Y &= 2,360 \text{ kg}, 2,277 \text{ kg}^*), 2,320 \text{ kg} \\ \text{平均} & 2,320 \\ P_{\text{許}} &= 2,320 \times 0.8 = 1,856 \text{ kg} \\ P_{1/300} &= \frac{1,510 + 1,510 + 1,650}{3} = 1,556 \text{ kg} \end{aligned}$$

となり, 簡単な面から言って式(8)によっても十分なように思える。

(A-2) 合板 45° I 型 (IB-2) および (IB-3)

(A-2.1) IB-2

まず, 図-22 のように等価断面に換算する。

図-22

$$\begin{aligned} g &= \frac{80 \times 5 + 63.2 \times 25 + 3 \times 15}{10 \times 8 + 10 \times 6.3 + 30 \times 0.1} = 13.85 \text{ cm} \\ I_e &= \frac{8 \times 10^3 + 6.32 \times 10^3 + 0.1 \times 30^3}{12} \\ &\quad + 80 \times 8.85^2 + 63.2 \times 11.15^2 + 3 \times 1.15^2 \\ &= 15,545 \text{ cm}^4 \\ Z_{ec} &= \frac{15,545}{16.1} = 963 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

(A-2.1-a) たわみ

$$\begin{aligned} y_M &= \frac{925,312}{134,000 \times 15,545} P = 0.00044 P \\ \frac{K^2}{E} &= \frac{8 \times 10 \times (13.85 - 5)}{1.2 \times 23,800} \cdot \frac{527 + 667}{15,545} = 0.0019 \\ K &= \sqrt{0.0019 \times 134,000} = 16 \\ y_Q &= \frac{1}{2} \left(0.00084 - \frac{1}{15,545} \right) \\ &\quad \cdot 0.0019 \left(180 - 16 \tanh \frac{180}{16} \right) P = 0.00012 P \\ y &= (0.00044 + 0.00012) P = 0.00056 P \text{ cm} \\ P &: \text{kg} \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

$P = 2,000 \text{ kg}$ のときのたわみ

$$* 3,416(P_{\max}) \times \frac{2}{3}$$

計算値 1.12 cm

実験値 1.22 cm 誤差 8.2%

(A-2.1-b) 強 さ

式(8)による場合

$$P_{\max} = \frac{374 \times 963}{75} = 4,800 \text{ kg}$$

欠点による低減³⁾

$$P_{\max} = 4,800 \times 0.7 = 3,360 \text{ kg}$$

式(13)による場合

$$\begin{aligned} {}_1C_1 &= \frac{527}{2} \left[\frac{360}{2 \times 15,545} + \left(\frac{1}{527 + 667} - \frac{1}{15,545} \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot 16 \tanh \frac{360}{32} \right] = 6.33 \\ {}_1C_2 &= \frac{(13.85 - 5) \times 80}{2 \times 15,545} \left[\frac{360}{2} - 16 \tanh \frac{360}{32} \right] \\ &= 3.73 \end{aligned}$$

$${}_cP_{\max} = \frac{374}{\frac{374}{431} \cdot \frac{6.33}{133} + \frac{3.73}{80}} = 4,254 \text{ kg}$$

4 点荷重の値に換算すると

$${}_cP_{\max} = 4,254 \times \frac{90}{75} = 5,105 \text{ kg}$$

欠点による低減

$${}_cP_{\max} = 5,105 \times 0.7 = 3,574 \text{ kg}$$

式(18)によると

$$\begin{aligned} K &= 0.45 \\ F_1 &= 0.5 + 0.5(0.39 + 0.13) = 0.76 \end{aligned}$$

$$P_{\max} = \frac{1,336 \times 431 \times 0.76}{75} = 5,835 \text{ kg}$$

欠点による低減

$$P_{\max}' = 4,085 \text{ kg}$$

実験値 3,586 kg 式(8) -6.3%

式(13) -3.3%

式(18) +14%

この場合, 実験値は欠点による低減を考えれば, ほぼ一致する。

この低下は中央付近の木目不良(図-10)のためと思われる。

実験個数が1個しかないので, このような結果となったのではなかろうか。

計算式では依然アメリカ式が最も高い値となっている。筆者の式ではせん断変形が少ないことによって耐力が上がることが示されている。

(A-2.1-c) 許容荷重

$$P_{\text{許}} = 1,540 \text{ kg} \dots\dots \text{式(8)による}$$

$$= 1,365 \text{ kg} \dots\dots \text{式(13)による}$$

$$= 1,546 \text{ kg} \dots\dots \text{式(18)による}$$

実験値 $0.8 \times P_Y = 1,630 \text{ kg}$

$$P_{1/300} = 1,960 \text{ kg}$$

許容荷重については慣用式(8)でもよいことが,

0-90° 合板貼と同じように示された。

図-23

(A-2.2) IB-3

等価断面は図-23 のとおりである。

$$g = \frac{80 \times 5 + 63.2 \times 25 + 5 \times 15}{10 \times 8 + 10 \times 6.32 + 30 + 0.17} = 13.87 \text{ cm}$$

$$I_e = \frac{8 \times 10^3 + 6.32 \times 10^3 + 0.17 \times 30^3}{12} + 80 \times 8.82^2 + 63.2 \times 11.13^2 + 5 \times 1.13^2 = 15,705 \text{ cm}^4$$

$$Z_{ec} = \frac{15,705}{16.13} = 974 \text{ cm}^3$$

(A-2.2-a) たわみ

$$y_M = \frac{925,312}{134,000 \times 15,705} = 0.00044 P$$

$$\frac{K^2}{E} = \frac{8 \times 10 \times (13.87 - 5)}{2.06 \times 24,500} \cdot \frac{1,194}{15,705} = 0.00107$$

$$K = \sqrt{0.00107 \times 134,000} = 12$$

$$y_Q = \left[\frac{1}{2} \left(0.00084 - \frac{1}{15,705} \right) \times 0.00107 \times 168 \right] P = 0.00007 P$$

$$y = (0.00044 + 0.00007) P = 0.00051 P \text{ cm} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$P=2,000 \text{ kg}$ のときのたわみ

計算値 1.20 cm 誤差 15%

(A-2.2-b) 強 さ

式(8)によれば

$$P_{\max} = \frac{374 \times 974}{75} = 4,860 \text{ kg}$$

欠点による低減³⁾

$$P_{\max}' = 4,860 \times 0.7 = 3,400 \text{ kg}$$

式(13)による場合

$$C_1 = \frac{527}{2} \left[\frac{360}{2 \times 15,705} + \left(\frac{1}{1,194} - \frac{1}{15,705} \right) 12 \right] = 5.47$$

$$C_2 = \frac{8.85 \times 80}{2 \times 15,705} (180 - 12) = 3.79$$

$$P_{\max} = \frac{374}{\frac{374}{431} \cdot \frac{5.47}{133} + \frac{3.79}{80}} = 4,500 \text{ kg}$$

4点荷重に換算

$$P_{\max} = 4,500 \times \frac{90}{75} = 5,400 \text{ kg}$$

欠点による低減

$$P_{\max}' = 5,400 \times 0.7 = 3,780 \text{ kg}$$

実験値 3,566 kg 誤差 式(8) -5%

式(13) +6%

(A-2.2-c) 許容荷重

式(8)によると

$$P_{\text{許}} = \frac{974 \times 120}{75} = 1,558 \text{ kg}$$

実験値 $0.8 \times P_Y = 1,664 \text{ kg}$

$$P_{1/300} = 2,000 \text{ kg}$$

(A-3) 合板 0-90° Box 型 (BB-1) (BB-3) (BB-4)

等価断面は図-24 のとおりである。

図-24

計算は前と同様

$$g = 14.24 \text{ cm}$$

$$I_e = 15,950 \text{ cm}^4 \quad I_{e1} = 395 \text{ cm}^4 \quad I_2 = 500 \text{ cm}^4$$

$$Z_{ec} = 1,012 \text{ cm}^3$$

(A-3-a) たわみ

$$y_M = 0.00043 P$$

$$\frac{K^2}{E} = 0.0037 \quad K = 22$$

$$y = 0.00074 P$$

$P=2,000 \text{ kg}$ のときのたわみ

計算値 1.48 cm

実験値

BB-1 1.73 cm 誤差 -14.5%

BB-3 1.47 +0.68

BB-4 1.57 +5.7

平均 1.59 cm -6.9

(A-3-b) 強 さ

式(8)によるもの

$$P_{\max} = \frac{374 \times 1,012}{75} = 5,047 \text{ kg}$$

$$P_{\max}' = 5,047 \times 0.7 = 3,533 \text{ kg}$$

式(13)によるもの

$$C_1 = 197.5 \left[\frac{360}{2 \times 15,950} + \left(\frac{1}{895} - \frac{1}{15,950} \right) \cdot 22 \right] = 6.81$$

$$C_2 = \frac{(14.24 - 5) \times 60}{2 \times 15,950} \left[\frac{360}{2} - 22 \right] = 2.75$$

$$P_{\max} = \frac{374}{\frac{374}{431} \cdot \frac{6.81}{1,012} + \frac{2.75}{60}} = 7,248$$

$$P_{\max}' = 7,248 \times 0.7 = 5,075 \text{ kg}$$

実験値 5,396, 2,676, 2,824

平均 3,623 kg

となって計算値と一応一致するが、内容的には BB-3 および 4 が非常に弱い値を示しており、この点は問題である。

(A-3-c) 許容荷重

式(8)による

$$P_{\text{許}} = \frac{1,012 \times 120}{75} = 1,619 \text{ kg}$$

実験値 2,560 kg, 1,427 kg, 1,507 kg

$0.8 P_Y$ または $0.8 \times 2/3 P_{\text{max}}$

平均 1,830 kg $> P_{\text{許}} \cdot \text{計算}$

(A-4) 合板 45° Box 型 [BB-2]

等価断面は図-25 のとおりである。

図-25

$$g = \frac{60 \times 5 + 47.4 \times 25 + 6 \times 15}{6 \times 10 + 4.74 \times 10 + 0.2 \times 30} = 13.9$$

$$I_e = \frac{6 \times 10^3 + 4.74 \times 10^3 + 0.2 \times 30^3}{12}$$

$$+ 60 \times 8.9^2 + 47.4 \times 11.1^2 + 6 \times 1.1^2 = 11,945 \text{ cm}^4$$

$$Z_{e_c} = \frac{11,945}{16.1} = 742 \text{ cm}^3$$

$$I_{e1} = 395, I_2 = 500$$

(A-4-a) たわみ

$$y_M = \frac{925,312}{134,000 \times 11,945} P = 0.00058 P$$

$$\frac{K^2}{E} = \frac{6 \times 10 \times (13.9 - 5)}{2.4 \times 23,800} \times \frac{895}{15,950} = 0.00053$$

$$K = \sqrt{0.00053 \times 134,000} = 8$$

$$y = 0.00058 P + \frac{1}{2} \left(0.00112 - \frac{1}{11,945} \right)$$

$$\cdot 0.00053 (180 - 8) P = 0.00067 P$$

$P = 2,000 \text{ kg}$ のときのたわみ

計算値 1.34 cm

実験値 1.44 cm 誤差 -6.9%

(A-4-b) 強さ

(8) 式によるもの

$$P_{\text{max}} = \frac{374 \times 742}{75} = 3,700$$

$$P_{\text{max}}' = 3,700 \times 0.7 = 2,590$$

式(13)によるもの

$${}_1C_1 = 197.5 \left[\frac{360}{2 \times 11,945} + \left(\frac{1}{895} - \frac{1}{11,945} \right) \times 8 \right]$$

$$= 4.60$$

$${}_1C_2 = \frac{(13.9 - 5) \times 60}{2 \times 11,945} (180 - 8) = 3.84$$

$$P_{\text{max}} = \frac{374}{\frac{374}{431} \cdot \frac{4.60}{742} + \frac{3.84}{60}} = 5,390 \text{ kg}$$

$$P_{\text{max}}' = 3,770 \text{ kg}$$

実験値 4,456 kg (8) 式 -40%

(13) 式 -15%

(A-4-c) 許容荷重

式(8)による

$$P_{\text{許}} = \frac{742 \times 120}{75} = 1,187 \text{ kg}$$

実験値 $0.8 \times P_Y$ または $2/3 P_{\text{max}}$

2,376 kg $> P_{\text{許}} \cdot \text{計算}$

b. 結論

1. 等価断面を用い、せん断変形を考慮したたわみ式は計算値と理論式と非常によく一致した。

等価断面とは

各材の幅をヤング係数比に応じて増減して求めた値、

$$b_{ei} = \frac{E_i}{E_0}$$

E_0 : 引張側弦材の引張ヤング係数

2. たわみの計算式としては

$$K^2 \frac{d^2 A_s}{dx^2} - A_s - B \int M dx = 0$$

$$K^2 = \frac{E_t \cdot S_e}{t \cdot G} \cdot \frac{I_{e1} + I_2}{I_e}$$

$$B = \frac{g_1 + g_2}{I_e} \cdot \frac{1}{E_t}$$

t : 合板の厚み (t_e ではない)

E_t : 引張側フランジの引張ヤング係数 kg/cm^2

G : 合板のせん断剛性 kg/cm^2

S_e : 片側フランジの重心軸に関する断面一次モーメント cm^3

I_e : 引張側フランジを基準とした等価断面による梁の断面二次モーメント

I_{e1} : 圧縮側フランジの等価断面二次モーメント cm^4

I_2 : 引張側フランジの断面二次モーメント cm^4

g_1, g_2 : 重心から上側フランジ・下側フランジの重心までの距離

A_s : せん断変形を伴うハリの上下フランジと下側フランジの軸方向の縮みと伸びの差

から導びかれた式が一応正しいとすれば、解は下のとおりになる。

中央集中荷重によるたわみ

$$y = \frac{Pl^3}{48 E_t I_e} + \frac{P}{2 E_t} \left(\frac{1}{I_{e1} + I_2} - \frac{1}{I_e} \right) \cdot K^2 \left(\frac{l}{2} - K \tanh \frac{l}{2K} \right)$$

ウェブのせん断応力度

$$\tau = Q \frac{S_e}{t I_e} \left[1 - \frac{1}{\cosh \frac{l}{2K}} \right]$$

等布荷重の場合によるたわみ

$$y = \frac{5 w l^4}{384 E_t I_e} + \frac{w}{E_t} \left(\frac{1}{I_{e1} + I_2} - \frac{1}{I_e} \right) \cdot K^2 \left\{ \frac{K^2}{\cosh \frac{l}{2K}} - K^2 + \frac{l^2}{8} \right\}$$

$$\tau = Q \frac{S_e}{t I_e} \left[1 - \frac{2K}{l} \tanh \frac{l}{2K} \right]$$

2. 許容耐力については、工作が粗雑であるにもかかわらず、慣用式((8)式)に許容応力度を代入した計算値より常に安全を示した。したがって、慣用式を使うのが簡便であり、これで十分と思われる。すなわち、

$$M_{\max} = Z_{ec} \cdot f_c$$

または、

$$(= Z_{et} \cdot f_t)$$

Z_e : 引張側弦材(フランジ)を基準として計算した等価断面係数

3. 許容たわみ $l/300$ に対応する荷重に比して梁の許容耐力(計算値)はおおむね低い。したがって、たわみの少ない梁にはなっているが、より経済的とするには断面のプロポーシヨンを改めたほうがよいようである。

4. 計算による最大耐力に対しては、試験体の製作・材質・同一形状のものの個数が一つしかないことなどからどの計算方式が真の値に近いかを推定することは、今回は不可能であったどちらかと言えば2項の理論式のほうがよいように見える。しかし、工作の如何によって、ほぼ計算値に近い値から著しく弱いものまでがあり、一応は許容耐力においては満足であるが、製作上の管理の重要性を示した。特にスカーフ継手については工作に注意を要することが示された。

参考文献

- 1) 宮島 寛: 木造箱型梁のウェブ材としてのシナおよびラワン合板の性質比較(日本木材学会北海道支部講演会第3号昭和46年7月)。
- 2) 後藤一雄: 曲げ剛性の大きい弦材をせん断変形の伴う機構で結び付けた合成ばりについて、日本建築学会論文報告集第63号, 昭和43年10月, 557頁。
- 3) 日本建築学会: 木構造設計規準・同解説 表-403.2, p. 114 における $k_R \times k_G$ 丸味はないので k_w ははぶいた。

TRANSACTIONS OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN

March 1973

Number 205

SYNOPSIS

U.D.C. 624.078.3.014.5

STUDIES ON ULTRASONIC ANGLE BEAM TESTING FOR STEEL WELDS (PART 5)

(Response Characteristics of Inner Incomplete Penetration)

By **TOSHIAKI FUJIMORI**, Research Laboratory of Shimizu
Construction Co., LTD. Member of A.I.J.

In this paper response characteristics of inner incomplete penetration in ultrasonic angle beam testing is described on the basis of results of tests for natural defects.

The echo height of inner incomplete penetration varies remarkably according to the angle of refraction. In case of 45 degrees, it ranges from +10 dbs to -30 dbs and in case of 70 degrees, it ranges from +13 dbs to -6 dbs compared with 4×4 drill hole of NDI-STB-A 2. Therefore when the thick plate is detected, the probe of 70 degrees must be use jointly with the probe of 45 degrees.

Many sorts of methods for estimating the sizes of defects of steel welds are arranged and classified and 6 methods which are available for estimating the length of the natural defects of steel welds are proposed.

Distance amplitude characteristics of inner incomplete penetration is unique and different from the characteristics of 4×4 drill hole of NDI-STB-A 2.

U.D.C. 624.072.33.011.1

STUDY ON WOODEN I AND BOX BEAMS

By Dr. **KAZUO GOTOH**, prof. of Tokyo Institute of Technology.
NOBUHIKO OTAKI and **ICHIRO ABE**, Edai Industry
Corporation, Members of A.I.J.

This report is experimental tests on I and Box beams and mechanical analyses on them.

The experimental tests show the shearing deformation of the plywood webs is so large to be neglected.

And mathematical analyses on the tests show good result with the formula, introduced by Prof Gotoh.*).

*) K. Gotoh : On Beams with flanges (or chords) of high bending stiffness and with web of low shearing rigidity, Bulletin of the Tokyo Institute of Technology, Dec. 1961