

合板箱型梁の強度性能(第1報)

平 嶋 義 彦^①

Yoshihiko HIRASHIMA: Strength of Plywood Box Beams (1)

要 旨：構造用合板をウェブ材とし、バイツガ製材をフランジ材として、レゾルシノール樹脂接着剤を用いて接着構成した合板箱型梁の設計方法について検討を行うため、いろいろな断面を持つ試験体30体を製作し、スパン360 cm、3分点4点荷重方法により、曲げ試験を行った。試験体長は400 cm、梁せい16.7 cm~40 cm、合板厚さ0.5, 0.75, 0.9, 1.2 cmである。現在提唱されている構造用合板の許容応力度および製材の許容応力度を用いて設計した場合の梁の耐力と、実験より得られた実際の耐力を、安全率を加味して比較して、最も合理的と思われる設計方法を選び出した。そして、このような構造的な見地からの検討からしても、構造用合板の許容応力度が、ほぼ妥当であるという結論を得た。一方、フランジ材(バイツガ)においては、最大応力と許容応力度の比は、平均4という大きな値となり、製材に与えられている許容応力度がかなり安全側に過ぎることを示した。

ウェブの座屈を防ぐためのスチフナ配置、およびフランジ間隔を定めるための有効な方法が実験的にたしかめられた。

目 次

1. 緒 言	195
2. 箱型梁の構造形態	196
3. 使用例および既往の研究	197
4. 試験に使用した材料	197
5. 試験体の製作	199
6. 実験方法	204
7. 試験結果と検討	206
7.1 破損の形態	206
7.2 撓み	207
7.3 曲げ応力	210
7.4 水平剪断応力	212
7.5 フランジ-ウェブ間の剪断応力	213
7.6 ウェブの座屈	214
7.7 ウェブの継ぎ手	216
8. 結 論	216
参 考 文 献	217
Summary	219
Plates	1~8

1. 緒 言

従来、わが国においては、合板はおもに化粧を目的とした内装材料に使用されてきたが、最近では合板の強度を重視した構造材料としての用途も広がってきた。

これは、合板の製造技術の進歩、合成樹脂接着剤の発達による接着信頼性の向上、構造上の工法の変化、施工技術の改良、設計法の発達などが相まって、このような状況を作り出してきたことによると言える。

欧米では、以前から建築、造船、包装など構造的な面に広く用いられ、強度設計に必要な技術資料も整備されているが、わが国ではこの面では、まだ立ち遅れていて未解決の問題が少なくない。

そこで本研究では、合板の構造的利用の一つとして箱型梁 (Box Beam) をとりあげ、その力学的挙動・性能について検討を行うことにした。

一般に、建築などに用いられる構造材のうち、柱のような縦材はあまり大きな断面を必要としないが、いわゆる横架材は、平面设计上の自由性とのかねあいもあって、梁せいの大きいものが要求される。しかし大きな断面をもつ木材の供給は、今後ますます困難となることは明らかであろう。

本研究でとりあげようとする箱型梁は、横架材として優れた性能を有するとともに、これを構成するための木材は、小断面のものでよいことから、将来、建築の分野での利用が期待されている。

第 1 報では、主として、スチフナの配置、添え継ぎ板の役割や既往の設計方法について検討を加えるとともに、現在、大きな関心をもたれている合板の許容応力度についても、言及することとした。すなわち、箱型梁のウェブ材に用いられる合板には、曲げ、圧縮、引張、せん断、ローリングシアなど、あらゆる性能が要求されるもので、構造体に用いられた状態での合板の広い範囲の許容応力度の検討が可能と考えられるからである。

なおこの試験を行うにあたり、林業試験場材料科長山井良三郎氏、強度研究室畑山義男室長、中井孝氏、金谷紀行氏のご助力を得た。

また、試験体の製造にあたっては、集成材研究室長菅野糞作氏をはじめとする研究室の方々のご指導とご助力をいただいた。さらに、試験体の製作、実験等には日本大学農獣医学部寺田正樹氏、高木恒勇氏のご協力をいただいた。ここに、これらの方に深く感謝する次第である。

2. 箱型梁の構造形態

箱型梁は、断面が箱型あるいは I 型の梁で、ウェブおよびこのウェブの上下端に接着 (あるいは釘付け) されたフランジとから構成されている (Fig. 1 参照)。

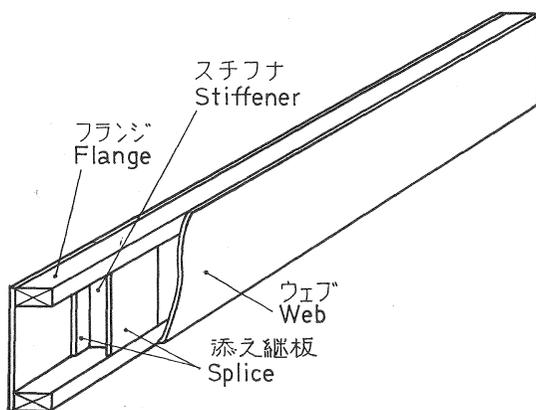


Fig. 1 箱型梁の構成
Components of plywood box beam.

また梁の長手方向には適当な間隔でスチフナが配置されており、ウェブの座屈安定性を高めるとともに、上部フランジに加わる力を下部フランジに伝達する働きをする。なお、ウェブに用いられる合板は、スカーフジョイントあるいは、添え継ぎ板 (スプライス) によって長手方向に継がれるのが普通である。

箱型梁が曲げを受ける場合は、主として曲げ応力 (圧縮と引張) はフランジ

が、剪断応力はウェブが受け持つような形態になっている。したがってそれぞれの応力に対して優れた性能を発揮するような、適当な材料を選択することにより、この梁の機能を十分有効に働かせることができる。

合板は、剪断に対して優れた性能を有しているので、このような箱型梁のウェブ材として非常に適した材料である。

箱型梁は形態上の特性から、材料使用量が少なく、かつ比強度（強度/重量）に優れている。また、製造時に乾燥された材料が使用されるので、製品の寸度安定性がよいこと、製造段階で材料の選択を受けているので、製品の性能評価の確度が高いことなども利点としてあげられる。このほか、梁の形としては、アーチ、キャンパーやテーパー、カーブなどを持った特殊な形のものも作ることができるので、設計上の自由度が高い。

3. 使用例および既往の研究

前に述べたように、箱型梁は多くの特性をもっているが、これを生かして諸外国では、単位骨組構造、床あるいは屋根の梁、また大スパンを架け渡す梁などに広く用いられてきた。また北米では、新しい建築構法として、事務所、商業ビル、モーター、学校、教会、体育館などへの利用が行われている。

最近の大規模建築への適用例として、1967年カナダ万国博における箱型梁によって構成された建物（最大の箱型梁は長さ24m、断面1.5m×1.5m）や、コペンハーゲンで作られた展覧会場（スパン18m、梁せい1.2m）が挙げられる。

日本では、箱型梁としての使用例は、それほど多くはないが、プレハブ住宅等に用いられるパネルのなかには、構造的に箱型梁と見なされるものが数多くあり、また、諸外国の例からみても、今後構造部材としての利用の道がひらかれてゆくものと考えられる。

箱型梁に関する研究は、諸外国では古くから行われてきた^{1)~8)}。特にアメリカ合衆国では、フランジ材としての木材・集成材およびウェブ材としての合板など、これら箱型梁の構成材料の応力等級区分あるいは許容応力度が与えられていると同時に、箱型梁に関する製造方法や設計方法の仕様書が用意されている^{6)~9)}。

一方、わが国においては、これに関する研究は少なく^{9)~16)}、設計方法全般にわたる検討を行ったものは、未だその数が少ない状態である。

4. 試験に使用した材料

フランジ材はカナダから輸入した枠組壁工法構造用製材のベイツガ（公称断面2インチ×6インチ、2インチ×8インチ、4インチ×4インチ、長さ4m）の単一材を使用した。

強度的に影響を及ぼすと思われるような節などの欠点を持つもの、および含水率が15%以上のもの、また比重が他の材より偏っているものなどは除き、比重によるマッチングを考慮して、フランジ材の組み合わせを決めた。

2インチ×6インチまたは2インチ×8インチ材から採取したフランジ材については、接着面のみ再度プレー

Table 1. ウェブ合板の等級
Grades of web plywoods

厚さ Thickness (mm)	等級 Grade	接着の類別 Degree of adhesion
5	C-3	1類 Type 1
7.5	C-3	特類 Special type
9	B-2	特類 Special type
12	C-3	1類 Type 1

ナー加工を施したが、材のもつ振れ、曲がりなどは、この時点では矯正されないままの状態であった。

ウェブ材には、Table 1 のような、日本農林規格 (JAS) に規定されているラワン構造用合板を用いた。7.5 mm 厚のものは、91 cm×242 cm (3 尺×8 尺)、他は 91 cm×182 cm (3 尺×6 尺) の実大のままに分銅載荷による曲げ剛性試験を行い、ヤング係数により、ウェブ材としてのマッチングを考慮した。ウェブ材およびフランジ材の性質をTable 2 に示す。

添え継ぎ板は、ウェブをとった合板の残部から採取した。

スチフナは、フランジと同じくベイツガを使用した。

Table 2. 梁構成材料の曲げヤング係数と比重
Young's modulus in bending and specific gravity of
web and flange materials

梁記号 Beam designation	ウェブ Web		フランジ Flange	
	曲げヤング係数 Young's modulus in bending (10 ⁸ kg/cm ²)	比重 Specific gravity	曲げヤング係数 Young's modulus in bending (10 ⁸ kg/cm ²)	比重 Specific gravity
1-A	111.3	0.53	128.9	0.47
1-B	98.4	0.53	116.1	0.47
2-A	108.4	0.56	139.3	0.58
2-B	100.6	0.52	160.7	0.60
3-A	122.1	0.54	142.4	0.52
3-B	104.7	0.51	176.1	0.52
4-A	108.6	0.55	139.4	0.52
4-B	95.1	0.50	135.5	0.50
5-A	105.7	0.58	136.5	0.52
5-B	94.2	0.52	136.9	0.52
6-A	114.0	0.48	152.1	0.53
6-B	99.5	0.57	124.8	0.54
7-A	102.8	0.54	151.5	0.50
7-B	91.2	0.51	147.2	0.51
8-A	103.9	0.55	140.6	0.52
8-B	89.4	0.50	132.3	0.53
9-A	105.2	0.55	142.8	0.54
9-B	99.1	0.57	150.5	0.52
10-A	114.7	0.53	140.8	0.55
10-B	119.0	0.54	127.6	0.48
11	134.8	0.55	126.7	0.48
12-A	100.2	0.54	164.1	0.59
12-B	105.8	0.52	165.3	0.61
13-A	101.6	0.59	152.0	0.58
13-B	107.4	0.55	163.5	0.57
14-A	101.6	0.49	143.4	0.60
14-B	109.1	0.49	161.9	0.61
15	113.3	0.54	108.1	0.51
16	99.2	0.58	115.3	0.47
17	107.7	0.54	149.5	0.55

5. 試験体の製作

試験体製作の細目は、Table 3 に示すようである。

圧縮圧力は、ホットプレスの油圧コントロールの関係で、細かい制御ができないため、すべての試験体について、圧縮力を 22,860 kg とした。試験体によって、フランジやスチフナの大きさが異なり、受圧面積が変わるため、試験体の受ける圧力は、Table 3 に示すような範囲にあった。

この実験では、梁の断面形はすべて箱型 (Fig. 1) とし、ウェブ合板の表板繊維方向は、フランジの長手方向に平行とした。ウェブの継ぎ手は、スチフナまたは添え継ぎ板を用いてジョイントし、その位置を左右同じにした。Fig. 2 の I のタイプの梁については、スチフナをはじめにフランジの間にはめ込んでおき、接着剤を塗布のうえ片側半分のウェブを接着し、プレスより引き出して冷却した後、残り半分のウェブを接着して完成させた。スチフナには、蒸気抜きとして、中央に直径 8 mm の孔をあけた。なお、ホットプレスを行う前に、合板は 5 本の釘 (N-38) でフランジに仮止めした。

II (Fig. 2) のタイプの梁は、I と同じ方法でウェブを接着したあと、左右の端に残った部分は、恒温室 (20°C) 内で、ボルト圧縮により接着した。

III (Fig. 2) のタイプの梁は、中央部の合板を接着した後、左右の合板を接着するという三段階に分けて接着を行った。

添え継ぎ板と、ここに配置されたスチフナは梁の長手方向に同一の長さとし、スチフナと添え継ぎ板およびウェブのジョイント部は、同時に接着した。

Table 3. 試験体製作の細目
Particulars of test model fabrication

試験体数 Number of test model	30
試験体長さ Length of test model	400 cm
接着剤 Adhesive	レゾルシノール樹脂接着剤 Resorcinol resin adhesive
配合割合 Rate of mixture	樹脂 100 : 硬化剤 15 Resin 100 : Catalyst 15
塗布量 Spread	300 g/m ²
塗布方法 Method of spread	刷毛による両面塗布 Spread both faces with brush
圧縮方法 Method of pressure	ホットプレス (熱圧盤 138 cm × 259 cm) Hot press (Pressure plates 138 cm × 259 cm)
圧縮圧力 Pressure	5 kg/cm ² ~ 12 kg/cm ²
圧縮盤温度 Temperature of pressure plates	ca. 125°C
圧縮時間 Pressure time	ウェブ厚 5 mm では約 9 分 ca. 9 min, for beam with a web thickness of 5 mm ウェブ厚 7.5 mm では約 12 分 ca. 12 min, for beam with a web thickness of 7.5 mm ウェブ厚 9 mm では約 15 分 ca. 15 min, for beam with a web thickness of 9 mm ウェブ厚 12 mm では約 20 分 ca. 20 min, for beam with a web thickness of 12 mm

接着完了後、試験体は恒温恒湿室（温度 20°C±1°C， 関係湿度 75%±5%）に、一週間以上放置して養生を行った。

養生の終わった試験体は曲げ試験時に、荷重点で荷重頭およびサポートがウェブだけに接触することのないように、プレーナーで表面を平らに仕上げた。

荷重点における、スチフナの梁の長手方向の幅は、次のようにして決めた。

$$\frac{P_{max}}{w \cdot b} = f_{br} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 w : スチフナの梁の長手方向の幅

b : これと直交する方向のスチフナの奥行きで、フランジの幅に等しい値

f_{br} : ベイツガの許容めり込み応力度（針葉樹Ⅱ類上級構造材の値の 50% 増し 48 kg/cm² を採った⁹⁾）

P_{max} : 梁に加わる予想最大荷重

で、次式から求めた。

$$\frac{M_{max}}{z} = \sigma_c \dots\dots\dots(2)$$

本試験では M_{max} は次のようになる。

$$M_{max} = \frac{P_{max}}{2} \cdot \frac{l}{3}$$

ここに、 l : スパン

z : 梁の断面係数

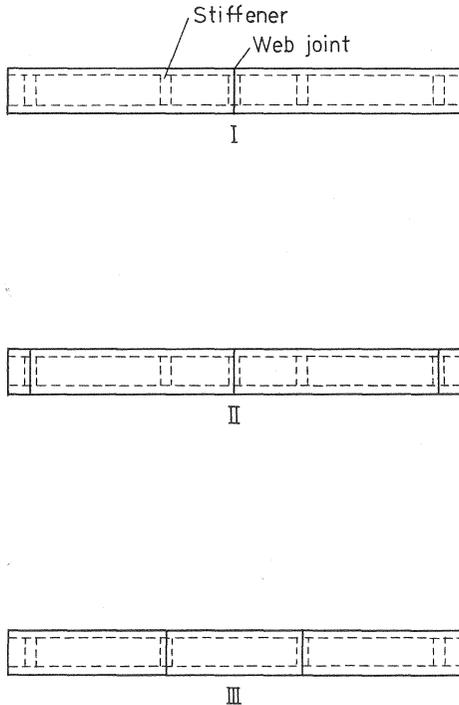


Fig. 2 ウェブの張りつけとスチフナの配置
Web joint and stiffener location.

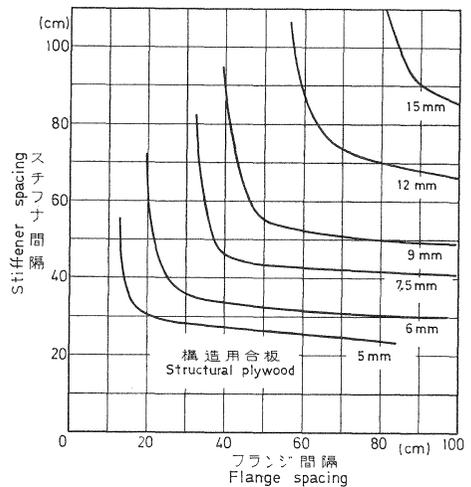


Fig. 3 座屈に安定なスチフナ間隔*
Stiffener spacing with buckling stability*.

* 合板の 0° および 90° 方向の曲げヤング係数の和を 90×10^8 kg/cm²、剪断強さを 70 kg/cm² として計算した。

These values were calculated with the assumptions that sum of plywood Young's moduli in bending for two directions, 0° and 90°, and shearing strength were 90×10^8 kg/cm² and 70 kg/cm², respectively.

Table 4. 箱型梁の寸法, 重量, 比重および合板の張り方
Dimensions in cross section, weight, specific gravity
and web joint location of box beams

梁記号 Beam designa- tion	梁せい Beam depth h (cm)	フランジ幅 Flange breadth b (cm)	フランジせい Flange depth d (cm)	ウェブ厚さ Web thickness t (cm)	梁の重量 Beam weight (kg)	梁の見かけ の比重 Beam apparent specific gravity	合板の張り方 ¹⁾ Web joint location
1-A	30	13.488	3.015	0.742	29.8	0.07	I
1-B	30	13.503	3.018	0.757	30.1	0.07	I
2-A	25	13.455	3.938	0.753	36.8	0.10	I
2-B	25	13.500	3.938	0.756	37.6	0.10	I
3-A	16.7	13.500	3.933	0.745	29.0	0.12	I
3-B	16.7	13.490	3.910	0.748	28.8	0.11	I
4-A	30	9.193	2.998	0.739	24.8	0.08	I
4-B	30	9.203	2.993	0.751	23.8	0.07	I
5-A	25	9.208	4.463	0.750	28.7	0.11	I
5-B	25	9.215	4.698	0.757	28.6	0.11	I
6-A	16.7	9.200	4.358	0.742	22.4	0.13	I
6-B	16.7	9.198	4.270	0.745	23.1	0.13	I
7-A	30	5.033	3.025	0.745	18.1	0.09	I
7-B	30	5.085	2.963	0.753	18.0	0.09	I
8-A	25	5.220	4.655	0.757	20.1	0.12	I
8-B	25	5.200	4.680	0.749	19.6	0.12	I
9-A	16.7	5.208	4.773	0.752	16.4	0.15	I
9-B	16.7	5.288	4.580	0.752	15.7	0.14	I
10-A	40	9.757	4.514	0.541	33.5	0.08	II
10-B	40	9.858	4.528	0.541	32.0	0.07	II
11	40	9.893	4.748	0.543	37.1	0.08	II
12-A	40	4.615	3.015	1.232	33.8	0.12	II
12-B	40	4.623	3.013	1.218	32.5	0.12	II
13-A	30	4.673	6.008	1.242	33.6	0.16	II
13-B	30	4.805	6.025	1.250	32.5	0.15	II
14-A	25	4.545	9.950	1.241	34.5	0.20	II
14-B	25	4.638	9.415	1.230	34.7	0.20	II
15	30	9.855	4.495	0.750	32.0	0.09	III
16	30	9.740	4.750	0.916	34.4	0.10	III
17	30	9.980	4.545	1.228	41.2	0.11	III

1) Fig. 2 参照
Cf. Fig. 2

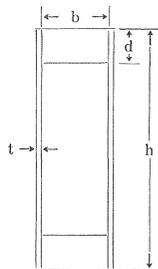


Table 5. スチフナおよび添え継板の梁長手方向の寸法
Breadth of stiffeners and length of splices along beam length

梁記号 Beam designation	スチフナ Stiffener				添え継板長さ Length of splice (cm)
	荷重点部 At loading points		ウェブ継手部 At web joints		
	幅 Breadth (cm)	個数 Number	幅 Breadth (cm)	個数 Number	
1-A	5	4	9	1	No used
1-B	5	4	9	1	"
2-A	6	4	9	1	"
2-B	6	4	9	1	"
3-A	3	4	9	1	"
3-B	3	4	9	1	"
4-A	5	4	9	1	"
4-B	5	4	9	1	"
5-A	6	4	9	1	"
5-B	6	4	9	1	"
6-A	3	4	9	1	"
6-B	3	4	9	1	"
7-A	5	4	9	1	"
7-B	5	4	9	1	"
8-A	6	4	9	1	"
8-B	6	4	9	1	"
9-A	3	4	9	1	"
9-B	3	4	9	1	"
10-A*	10	4	No used	No used	6
10-B*	10	4	"	"	6
11	10	2	10	3	No used
12-A	8	2	14	3	14
12-B	8	2	14	3	14
13-A	9	2	14	3	14
13-B	9	2	14	3	14
14-A	9	2	14	3	14
14-B	9	2	14	3	14
15	8	2	8	2	No used
16	8	2	8	2	"
17	8	2	14	2	14

* スチフナはウェブに接触していない。
Stiffeners aren't attached to webs.

Table 6. 断面の特性および曲げ剛性¹⁾
Section properties and flexural rigidity of beams

梁記号 Beam designation	断面一次モーメント ²⁾ Statical moment (cm ³)			断面二次モーメント ³⁾ Moment of inertia (cm ⁴)			計算曲げ剛性 ⁴⁾ Calculated flexural rigidity (10 ⁶ kg·cm ²) <i>EI</i>
	フランジ Flange <i>Q_{f1}</i>	ウェブ Web <i>Q_w</i>	合計 Total <i>Q_t</i>	フランジ Flange <i>I_{f1}</i>	ウェブ Web <i>I_w</i>	合計 Total <i>I_t</i>	
1-A	548.7	101.2	649.9	14,868	2,025	16,890	1,372
1-B	549.8	101.2	651.0	14,894	2,025	16,920	1,374
2-A	558.0	70.4	628.4	11,888	1,172	13,060	1,057
2-B	559.9	70.4	630.3	11,928	1,172	13,100	1,060
3-A	338.9	31.4	370.3	4,464	349	4,813	388.5
3-B	337.3	31.4	368.7	4,449	349	4,798	387.3
4-A	372.1	101.2	473.3	10,087	2,025	12,110	989.2
4-B	371.9	101.2	473.1	10,085	2,025	12,100	989.1
5-A	422.0	70.4	492.4	8,802	1,172	9,974	809.6
5-B	439.5	70.4	509.9	9,081	1,172	10,250	832.0
6-A	247.4	31.4	278.8	3,180	349	3,529	285.8
6-B	244.1	31.4	275.1	3,153	349	3,502	283.7
7-A	205.3	101.2	306.5	5,562	2,025	7,587	627.2
7-B	203.7	101.2	304.9	5,528	2,025	7,553	624.5
8-A	247.2	70.4	317.6	5,117	1,172	6,289	514.8
8-B	247.3	70.4	317.7	5,113	1,172	6,285	514.5
9-A	148.2	31.4	179.6	1,862	349	2,211	180.4
9-B	145.1	31.4	176.5	1,842	349	2,191	178.8
10-A	781.5	120.0	901.5	27,878	3,200	31,080	2,518
10-B	791.7	120.0	911.7	28,232	3,200	31,430	2,547
11	827.9	120.0	947.9	29,360	3,200	32,560	2,637
12-A	257.3	240.0	497.3	9,538	6,400	15,940	1,339
12-B	257.6	240.0	497.6	9,548	6,400	15,950	1,400
13-A	336.8	135.0	471.8	8,249	2,700	10,950	902.9
13-B	347.0	135.0	482.0	8,495	2,700	11,200	922.6
14-A	340.3	93.8	434.1	5,868	1,563	7,431	610.1
14-B	340.3	93.8	434.1	5,948	1,563	7,511	616.5
15	564.9	101.2	666.1	14,557	2,025	16,580	1,347
16	584.1	101.2	685.3	14,922	2,025	16,950	1,376
17	577.3	135.0	712.3	14,852	2,700	17,550	1,431

- 1) 計算には JAS に規定される公称単板厚さを用いた。
All values were calculated using nominal veneer thickness conforming to JAS.
- 2) バットジョイントのあるなしに関わらず中立軸より上 (または下) にある全平行繊維の、中立軸に関する断面一次モーメント。
Statical moment about the neutral axis of all parallel-grain material, regardless of any butt joints, lying above (or below) the neutral axis.
- 3) バットジョイントのあるなしに関わらず、全平行繊維の中立軸に関する断面二次モーメント。
Moment of inertia about the neutral axis of all parallel-grain material, regardless of any butt joints.
- 4) *EI* の計算には次のヤング係数を用いた。
The following values of YOUNG's moduli were used for calculating *EI*.
フランジ Flange $E_{f1} : 80 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$
ウェブ Web $E_w : 90 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$

σ_c : 圧縮強さ

である。なお等価断面の計算に用いたヤング係数は、ベイツガで $105 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$ 、ラワンで $132 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$ とし、圧縮強さはベイツガで 437 kg/cm^2 とした。

添え継ぎ板はウェブと同一の合板から採取し、その継ぎ手の長さは、板厚の 12 倍を目安⁶⁾とした。ただしウェブ厚 9 mm 以下では、添え継ぎ板を省略して、これをスチフナで代用した。そのスチフナの継ぎ手長さも、同じく板厚の 12 倍を目安とした。スチフナと添え継ぎ板の寸法を、Table 5 に示す。

試験体には、形状・寸法を同じくするものが 2 体ずつあるが、これらは記号 A, B で区別した。

スチフナの配置およびフランジの間隔を定めるにあたっては、あらかじめウェブが座屈するかどうかを検討する必要があるため、これらを知る手がかりとなるチャートを Fig. 3 のように作製¹⁾²⁾¹⁷⁾¹⁸⁾、これから座屈すると予想されるもの(梁記号 10, 11)としないもの(残り全部)の寸法を定めた。

座屈のモードの相違をみるために、特に梁記号 10 の梁では、スチフナとウェブの間に 1 cm の隙間をとって、ウェブがスチフナに接触しないような構造にした。

今回の試験では、梁の高さ方向と横方向の曲げ剛性の比を、1.7~22.2 の範囲としたが、梁の横座屈に対しては曲げ試験時に、サポートおよび荷重頭によって水平方向の移動は拘束されるため、特にラテラルサポートの用意はしなかった。

試験体のでき上がりの状況としては、概してよくでき上がっており、特に接着に関しては、ほぼ完全と言ってよいであろう。ただ、プレーナー加工を 2 面にのみ施したフランジ材のなかには、曲がりや捩れなどを有しているものがあり、これらを用いた梁のなかには、捩れが現われているものもあった。

試験体の寸法、重量などを Table 4, 5 に、梁の断面の特性を Table 6 に示す。

6. 実験方法

曲げ試験は、Fig. 4 に示すように、スパン 360 cm, 3 分点 2 点荷重法によった。

測定項目は、試験体全体の撓み、剪断力の加わらない区間での相対撓み、ウェブのフランジに対する相対的な横撓み、フランジの垂直歪みおよびウェブの歪みである。

スパン全体にわたる撓みは、サポート上で試験体高さの中心にあたる点に、9 mmφ のボルトをさしこみ、試験体の両側からナットで締め付け、このボルトに、ヨーク型撓み測定具を載せて測定した (Photo. 1~3 参照)。

ウェブの横撓みは、フランジを不動点とする装置を作り、これに変位計をとりつけて、フランジに対するウェブの相対撓みを測定した (Photo. 2)。

また、ウェブが座屈を起こしたものについては、横撓みをウェブ全般にわたって測定するために、摺動型変位計とポテンシオメータを用いて変位計を一定間隔で走査し、撓みを変位計で、変位計の位置をポテンシオメータで出力させ、これらを XY レコーダに描かせた。

撓み測定には摺動型変位計 (出力 200×10^{-6} ひずみ/mm) を用い、プリンタにて収録した。

測定から収録までのブロックダイアグラムを Fig. 5 に示す。

撓みをモニタするために、摺動型変位計およびロードセル (容量 10 ton, 出力 $3,005 \times 10^{-6}$ 歪み/F.S.) の出力を XY レコーダに入力し、荷重-撓み曲線を描かせた。この曲線が比例限度を超えたと思われる時点で、他の撓み測定用変位計を梁の破壊によるショックから保護するために取りはずした。

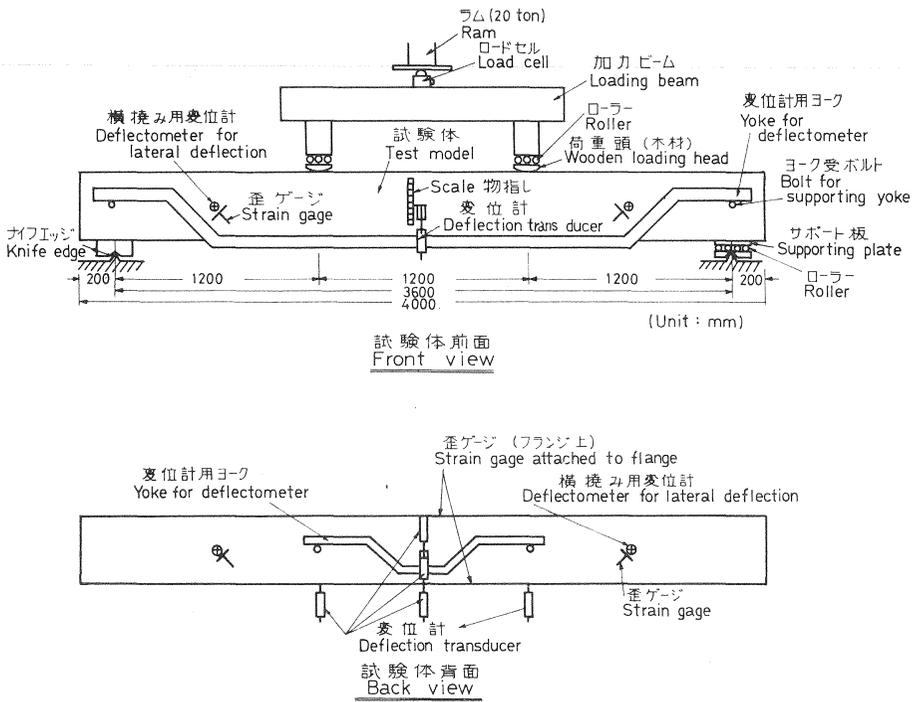


Fig. 4 箱型梁曲げ試験装置
Test apparatus for beam bending.

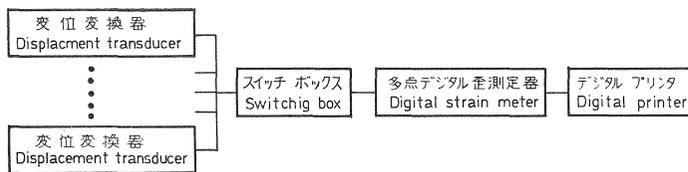


Fig. 5 撓み測定・収録ブロック図
Deflection measuring block diagram.

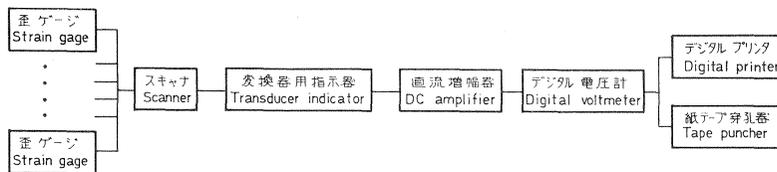


Fig. 6 歪測定・収録ブロック図
Strain measuring block diagram.

歪みは、ワイヤストレインゲージ（紙ベース、ゲージ長 60 mm）を用い、温度補償として、各測定点ごとにダミーゲージを対応させた 2 線式結線法で測定した（Photo. 2 参照）。歪みの測定から収録までのブロックダイアグラムを Fig. 6 に示す。なおデジタル電圧計の表示可能範囲の関係から、歪みの最大測定範囲は $\pm 5,999 \times 10^{-6}$ である。

荷重は、油圧式アムスラー型材料試験機（最大能力 100 ton、使用ラム 20 ton）によって、試験体が破損するまで、連続的に加えた。

撓みおよび歪みの測定は、適当な荷重間隔ごとに荷重を保持した状態で行った。

7. 試験結果と検討

7.1 破損の形態

今回の曲げ試験で現われた破損形態は、次のようなものである。

1) ウェブの水平剪断によるもの

ウェブの中央またはフランジの境界線あたりに、スパン方向に盛り上った線が現われる。荷重は最大荷重に達してしばらくその状態に維持されているが、破損線がはっきり現われてくるとともに、次第に下降し始める（Photo. 5）。

2) ウェブのローリングシアによるもの

フランジとウェブを接着した部分に現われている（Photo. 6）。

3) ウェブ合板内の接着層の剥離

座屈により破損したものやローリングシアで破損した合板に現われている（Photo. 7）。

4) ウェブの圧縮または引張によるもの

ローリングシアなどとともに、荷重点下に現われている（Photo. 8）。

5) ウェブの座屈によるもの

ウェブの水平剪断、曲げ、フランジとの接着部における剥離などが現われている（Photo. 7, 9）。

6) ウェブ合板の表板のローカルバックリング

合板内の表板の部分的接着不良あるいは欠膠部によるものと思われ、表板の一部が座屈を起こしている（Photo. 10）。

7) フランジの引張りによるもの

スチフナや添え継ぎ板の引張り破損も同時に起こしている（Photo. 11, 12）。

8) フランジの圧縮によるもの

荷重点付近で目切れによる座屈を起こしている（Photo. 13）。

9) フランジの剪断によるもの

スパン中央部から梁の端部にわたってフランジの L T 面が剪断されている（Photo. 14）。

10) スチフナまたは添え継ぎ板の引張りによるもの

これらは単独では現われず、ローリングシアやフランジの引張り破損等とともに現われている（Photo. 11, 12）。

箱型梁の曲げ試験では、水平剪断破壊以外の場合には、上記のもろもろの現象が大きな爆裂音とともに、一瞬のうちに出現し、破損の主たる原因となったものを二次的に現われたものと区別するのに困難が

多い。

Table 9 に掲げた破損の形態は、破損の現われ方や、また各種の応力レベル等をも勘案して、破損の主たる原因と思われるものを記したものである。

7.2 撓み

普通の梁では、剪断撓みは無視することが多いが、箱型梁は梁せいが大きいことから、相対的にスパン・梁せい比が小さく、また、剪断応力を受け持つウェブ材の断面積が小さいことなどから、剪断撓みの全体の撓みに占める割合が大きくて、これを無視することはできない。

Table 6 に断面の特性および曲げ剛性の値が示されているが、この計算にあたっては、合板はスパンに平行な繊維をもつ層だけを計算に入れ、また、フランジおよびウェブのヤング係数は許容応力度として与えられている⁹⁾

フランジ	$E_f = 80 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$
ウェブ	$E_w = 90 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$

を使用した。

Table 7 に掲げられた曲げ撓みの計算値は、このような曲げ剛性を用いて通常の曲げ撓みから求めたものである。

剪断撓みについては、古くから多くの研究がなされ^{19)~21)}、いろいろの計算式が提案されているが、これらのほかに、複雑な計算をしないで、Fig. 7⁸⁾、Fig. 8¹⁾⁹⁾に示すようなチャートから求める方法も提案されているので、ここではこれらのチャートの適用性について比較検討した (Table 7 参照)。なお、合板の剪断弾性係数は $4 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ とした⁹⁾。

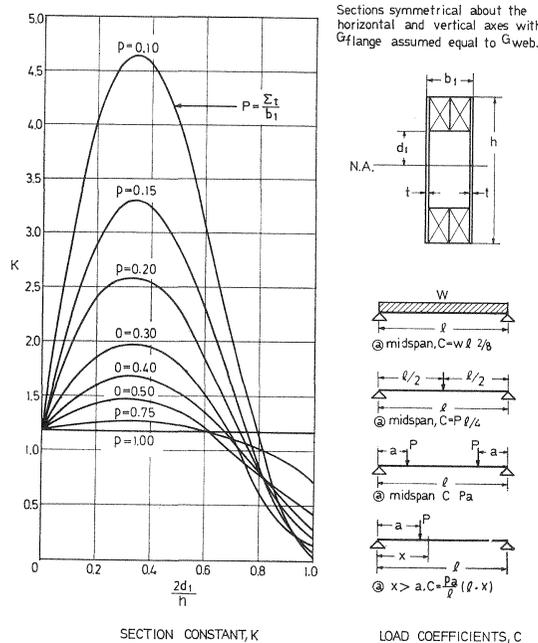


Fig. 7 剪断撓み式の断面定数と荷重係数⁸⁾
Section constant and load coefficients for shear deflection equation⁸⁾.

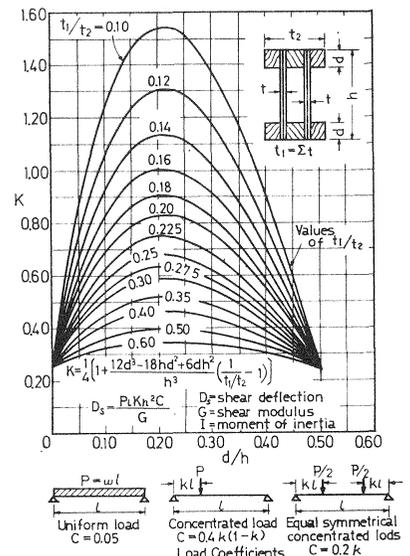


Fig. 8 剪断撓みの断面定数 (水平・垂直軸に関して対称な断面)¹⁾
Section constant for shear deflection (Sections symmetrical about horizontal and vertical axes)¹⁾.

Table 7. 実測および計算撓み
Observed and calculated values of deflection at midspan

(Deflection 10^{-3} cm/kg)

梁記号 Beam designation	実測値 Observed values		計算撓み Calculated values of deflection						
	撓み Deflection	曲げ剛性 Flexural rigidity (10^6 kg·cm ²)	曲げ撓み ¹⁾ Bending def.	Fig. 7 による Obtained from Fig. 7			Fig. 8 による Obtained from Fig. 8		
				剪断撓み Shear def.	合計撓み Total def.	実測値/ 計算値 Obs./Cal.	剪断撓み Shear def.	合計撓み Total def.	実測値/ 計算値 Obs./Cal.
1-A	0.649	1,276	0.604	0.135	0.739	0.88	0.396	1.000	0.65
1-B	0.774	1,070	0.603	0.134	0.737	1.05	0.389	0.992	0.78
2-A	0.775	1,068	0.784	0.222	1.006	0.77	0.422	1.206	0.64
2-B	0.789	1,049	0.781	0.221	1.002	0.79	0.422	1.203	0.66
3-A	1.797	461	2.131	0.430	2.561	0.70	0.539	2.670	0.67
3-B	1.531	541	2.138	0.431	2.569	0.60	0.537	2.675	0.57
4-A	0.803	1,031	0.837	0.141	0.978	0.82	0.415	1.252	0.64
4-B	0.883	938	0.837	0.140	0.977	0.90	0.406	1.243	0.71
5-A	0.925	895	1.023	0.268	1.291	0.72	0.421	1.444	0.64
5-B	0.923	897	0.995	0.274	1.269	0.73	0.410	1.405	0.66
6-A	1.992	416	2.897	0.456	3.353	0.59	0.526	3.423	0.58
6-B	2.275	364	2.919	0.457	3.376	0.67	0.535	3.454	0.66
7-A	0.873	948	1.320	0.156	1.476	0.59	0.441	1.761	0.50
7-B	1.166	710	1.326	0.156	1.482	0.79	0.436	1.762	0.66
8-A	1.288	643	1.608	0.283	1.891	0.68	0.441	2.049	0.63
8-B	1.446	573	1.609	0.284	1.893	0.73	0.447	2.056	0.70
9-A	2.893	286	4.590	0.478	5.068	0.57	0.537	5.127	0.56
9-B	2.800	296	4.631	0.481	5.112	0.55	0.550	5.181	0.54
10-A	0.463	1,788	0.329	0.157	0.486	0.95	0.402	0.731	0.63
10-B	0.451	1,836	0.325	0.155	0.480	0.94	0.400	0.725	0.62
11	0.500	1,656	0.314	0.161	0.475	1.05	0.395	0.709	0.71
12-A	0.453	1,828	0.618	0.066	0.684	0.66	0.253	0.871	0.52
12-B	0.494	1,676	0.618	0.066	0.684	0.72	0.253	0.871	0.57
13-A	0.642	1,290	0.917	0.166	1.083	0.59	0.256	1.173	0.55
13-B	0.639	1,296	0.898	0.164	1.062	0.60	0.256	1.154	0.55
14-A	0.803	1,031	1.357	0.168	1.525	0.53	0.192	1.549	0.52
14-B	0.754	1,098	1.343	0.180	1.523	0.50	0.205	1.548	0.49
15	0.713	1,161	0.615	0.198	0.813	0.88	0.368	0.983	0.73
16	0.563	1,471	0.602	0.170	0.772	0.73	0.312	0.914	0.62
17	0.471	1,758	0.579	0.121	0.700	0.67	0.246	0.825	0.57

1) Table 6 の EI を用いて計算した。

These values were calculated using the values of EI tabulated in Table 6.

アメリカの新しい仕様書⁸⁾では、剪断撓みを求める式は次によっている。

$$d_s = \frac{KC}{AG} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 d_s : 剪断撓み

K : 梁の断面で決定される定数で Fig. 7 から求められる。

Table 8. 曲げ剛性および計算撓み
Flexural rigidity and calculated values of deflection

(Deflection 10^{-3} cm/kg)

梁記号 Beam designation	計算曲げ剛性 ¹⁾ Calculated flexural rigidity (10^6 kg·cm ²)	曲げ撓み Bending def.	Fig. 7 による Obtained from Fig. 7		Fig. 8 による Obtained from Fig. 8	
			合計撓み Total def.	実測値/計算値 Obs./Cal.	合計撓み Total def.	実測値/計算値 Obs./Cal.
1-A	2,099	0.395	0.530	1.22	0.791	0.82
1-B	1,911	0.433	0.567	1.37	0.822	0.94
2-A	1,761	0.470	0.692	1.12	0.892	0.87
2-B	2,022	0.410	0.631	1.25	0.832	0.95
3-A	667	1.241	1.671	1.08	1.780	1.01
3-B	815	1.016	1.447	1.06	1.553	0.99
4-A	1,588	0.521	0.662	1.21	0.936	0.86
4-B	1,549	0.535	0.675	1.31	0.941	0.94
5-A	1,307	0.634	0.902	1.03	1.055	0.88
5-B	1,349	0.614	0.888	1.04	1.024	0.90
6-A	515	1.608	2.064	0.97	2.134	0.93
6-B	425	1.949	2.406	0.95	2.484	0.92
7-A	1,025	0.808	0.964	0.91	1.249	0.70
7-B	996	0.831	0.987	1.18	1.267	0.92
8-A	825	1.004	1.287	1.00	1.445	0.89
8-B	782	1.059	1.343	1.08	1.506	0.96
9-A	297	2.785	3.263	0.89	3.322	0.87
9-B	309	2.683	3.164	0.88	3.233	0.87
10-A	4,213	0.197	0.354	1.31	0.599	0.77
10-B	3,890	0.213	0.368	1.23	0.613	0.74
11	4,008	0.207	0.368	1.36	0.602	0.83
12-A	2,141	0.387	0.453	1.00	0.640	0.71
12-B	2,154	0.384	0.450	1.10	0.637	0.78
13-A	1,497	0.553	0.719	0.89	0.809	0.79
13-B	1,632	0.507	0.671	0.95	0.763	0.84
14-A	982	0.843	1.011	0.79	1.035	0.78
14-B	1,104	0.750	0.930	0.81	0.955	0.79
15	1,756	0.472	0.670	1.06	0.840	0.85
16	1,903	0.435	0.605	0.93	0.747	0.75
17	2,463	0.336	0.457	1.03	0.582	0.81

1) フランジの E に実測した曲げヤング係数を使用。

These values were calculated using the observed values of E in bending test.

C : 荷重方法による係数, Fig. 7 に示される。

A : 梁の断面積

G : ウェブの剪断弾性係数

ここで、梁の断面積 A は、合板ウェブの場合には、合板設計仕様書²⁾に与えられている剪断に対する有効厚さを用いるように規定されている。この有効厚さは、単板の裏割れや、また、これを補強する接着剤の効果等を考慮して定めたものであるため、実際の厚さとは多少異なる値である。

しかし、わが国では、いまだこの種のデータや規定がないので、ここでは合板の実際の厚さを用いて計算した。

Fig. 7 を用いた実測値と計算値を比較すると、その比は 0.50~1.05 の範囲にあるが、剪断撓みの割合が大きい梁ほど、その値は大きい傾向にある。また Fig. 8 によるものとの比較では、Fig. 7 の方がその比は大きい傾向にある。

ここで、曲げ撓みの計算に用いたヤング係数、特にフランジのそれは、試験体を構成する前に測定した値 (Table 2) よりは、かなり小さい値であることを考えれば、Fig. 7 から求められる剪断撓みは、過小にすぎるとは思われる。

そこで、フランジのヤング係数として、曲げヤング係数の測定値 (Table 2) を用いて EI を求め、この EI から曲げ撓みおよび剪断撓みを加えた合計撓みを計算して実測値と比較してみた (Table 8)。

これからわかるように、Fig. 7 から求めた剪断撓みは、過小の傾向にあり、実際の設計にあたっては危険側にある。

一方、Fig. 8 の場合には、フランジのヤング係数に許容応力度を用いた時は、実測値と計算値の比は、0.49~0.78、またフランジの実測のヤング係数を用いた時は、この比は、0.70~1.01 の範囲にあった。このことから、Fig. 8 は、剪断撓みを適確に計算し、かつ安全側の値を与えると言える。

なお、比例限度荷重と最大荷重との比は、0.43~0.70 の範囲にあり、総平均は 0.58 であった。

7.3 曲げ応力

梁せいが大きくなるに従って、曲げ強さが減少してゆくのは、よく知られた事実で、これについては古くからいろいろ研究がなされている^{22)~24)}。

これらは、ある応力レベルに達して座屈を生ずる繊維を、まだそれ以下の応力レベルの繊維がサポート

するという考え方に基ついている。この考え方によれば、曲げ応力のうちの圧縮応力の分布状態と断面の形状によって、その強さが変ることになる。

実際の設計では、安全側の値を与えるということもあって、曲げ応力を、その材料の圧縮 (または引張り) の許容応力度以下にとる簡便な方法が採用されていることが多い⁸⁾⁹⁾。

ここでは、梁に発生した応力の大きさを見るということから、Fig. 9 に与えられている形状係数¹⁾²⁸⁾を用いてフランジ最外繊維の曲げ応力を次式によって計算した。

$$\sigma_b = \frac{Mh}{2FI_n} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 M : 抵抗曲げモーメント

σ_b : 曲げ応力

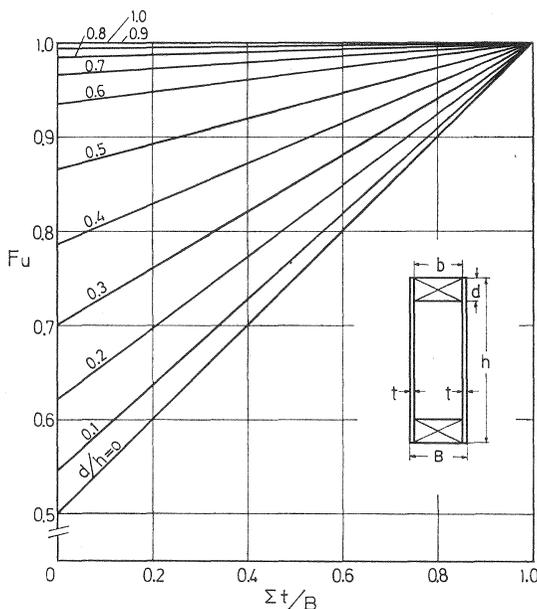


Fig. 9 形状係数 F_u (終局強さ)
Form factor F_u for ultimate stress.

Table 9. 実験および計算結果
Results of test and calculations

梁記号 Beam designation	最大荷重 Max. load (kg)	梁に発生した最大応力 Max. stress occurred in beam (kg/cm ²)			最大設計荷重 Max. design load (kg)			比 ¹⁾ Ratio	破損の形態 ²⁾ Form of failure
		曲げ Bending	水平剪断 Hori- zontal shear	ローリン グシア Rolling shear	曲げ Bending	水平剪断 Hori- zontal shear	ローリン グシア Rolling shear		
1-A	4,920	505	63.8	13.3	2,640	1,850*	1,480	2.7	H. S.
1-B	4,630	474	53.8	12.5	2,650	1,890*	1,490	2.4	"
2-A	4,470	448	71.4	12.1	2,540	1,500*	1,470	3.0	"
2-B	3,500	349	55.7	9.5	2,540	1,510*	1,470	2.3	"
3-A	2,850	464	73.6	12.8	1,430	930*	890	3.1	"
3-B	2,600	424	66.8	11.7	1,420	930*	890	2.8	"
4-A	4,150	607	54.9	10.6	1,790	1,810*	1,560	2.3	"
4-B	4,420	647	57.5	11.4	1,790	1,840*	1,560	2.4	"
5-A	4,770	616	78.4	11.3	1,880	1,460*	1,690	3.3	"
5-B	4,050	507	66.5	9.2	1,940	1,460*	1,750	2.8	"
6-A	2,290	508	61.0	9.2	1,020	900*	990	2.5	"
6-B	2,950	660	77.8	12.0	1,010	910*	980	3.2	"
7-A	3,900	971	52.9	8.7	990*	1,770	1,790	3.9	Shear in flange
7-B	4,320	1,082	57.9	9.8	980*	1,790	1,760	4.4	Tension and shear in flange
8-A	4,120	863	68.8	8.7	1,090	1,440*	1,890	2.9	H. S.
8-B	3,700	775	62.5	7.8	1,090*	1,420	1,900	3.4	Compression in flange
9-A	2,550	903	68.9	9.0	590	890*	1,140	2.9	H. S.
9-B	2,280	816	61.1	8.3	590	900*	1,110	2.5	"
10-A	3,980	286	53.3	5.5	3,720	1,790*	2,870	2.2	Web buckling
10-B	3,230	229	43.3	4.5	3,760	1,790*	2,880	1.8	"
11	4,200	286	56.1	5.6	3,910	1,800*	3,140	2.3	"
12-A	6,780	1,219	42.9	9.1	1,270*	3,790	2,990	5.3	Tension in flange
12-B	7,000	1,257	44.8	9.4	1,270	3,750	2,980*	2.3	Rolling shear in web
13-A	6,900	1,004	59.8	8.8	1,470	2,770*	3,130	2.5	H. S.
13-B	6,300	890	54.2	8.1	1,510	2,790	3,110*	2.0	Rolling shear in web
14-A	5,330	792	62.7	6.1	1,250	2,040*	3,480	2.6	H. S.
14-B	5,380	789	63.2	6.5	1,270	2,040*	3,320	2.6	"
15	4,800	464	64.3	9.1	2,590	1,790*	2,110	2.7	"
16	6,500	603	71.7	11.8	2,650	2,360	2,210*	2.9	Rolling shear in web
17	6,900	624	57.0	12.5	2,640	2,900	2,210*	3.1	"

1) 比=最大荷重/破損の因となった応力による最大設計荷重 (*印が付されている)

Ratio=Max. load/Max. design load (attached mark *) calculated from the stress which causes beam failure.

2) H. S. はウェブの水平剪断破損を示す。

H. S. means the web failure by horizontal shear.

F : 形状係数

I_n : その断面内の連続している平行繊維を持つ材料の正味の断面二次モーメント

h : 梁せい

正味の断面二次モーメント I_n は、今回の試験ではウェブのバットジョイントがフランジの両サイドにおいて同一断面内に配置されているため、ウェブは何ら関与しないものとしたので⁸⁾、フランジのみの断面二次モーメントに等しい (Table 6)。

式 (4) から、梁に発生した最大曲げ応力を計算し、Table 9 に示した。

曲げ応力で破損した梁では、これらの値は 775~1,219 kg/cm² の範囲にあった。

ベイツガの許容圧縮応力度を 160 kg/cm² (上級構造材, 短期応力)⁹⁾ とすれば、フランジが曲げ応力によって破損した梁では、この梁に発生した最大曲げ応力と許容圧縮応力度との比は、4.8~7.6 の範囲にあった。

また、現在行われている設計方法⁸⁾⁹⁾

$$M = \frac{2F_f I_n}{h} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 M : 抵抗曲げモーメント

F_f : フランジ材の許容圧縮 (または引張り) 応力度

から求められる設計荷重 P_d と、実際の最大荷重 P_{max} の比 P_{max}/P_d (仮にここで安全率と呼ぶ) は、3.4~5.3 の範囲にあった。

わが国の木材等に対する許容応力度の誘導方法から考えれば短期許容応力度の 2 倍以上の強さを有していることは、許容応力度を満足しているとみて差し支えない。

一般に、材料の安全率は一律には決め難く、種々の条件や数多くのデータによって定められるものではあるが、今回の試験から得られた安全率 3.4~5.3 は幾分余裕があり過ぎる感じがする。更に実際に梁に生じた最大応力と許容応力度との比較ではこの値はもっと大きくなる。

このことは、現在のわが国での木材の許容応力度が、極めておどろばにくくられ、良品質材に対しても安全をみて小さい値を採用していることに原因がある。

材料の安全性・経済性を考えるならば木材の品質に応じてもっとキメ細かな応力等級区分を行って、木材に対する適正な評価を行うことが必要であろう。

7.4 水平剪断応力

梁に生ずる水平剪断応力は対称断面の場合、中立軸で最大となり、その値は次式から計算される。

$$\tau = \frac{VQ_t}{I_t \Sigma t} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 τ : 中立軸における水平剪断応力

V : 断面の剪断力

Q_t : 梁の軸に平行な繊維で、中立軸より外にある部分の中立軸に関するトータルの断面一次モーメント (ウェブがバットジョイントされていても計算に入れる)

I_t : 梁の軸に平行な繊維の中立軸に関するトータルの断面二次モーメント (ウェブがバットジョイントされていても計算に入れる)

Σt : 中立軸におけるウェブの合計厚さ

断面一次および二次モーメントの値は、Table 6 に計算されている。

梁に発生した最大水平剪断応力（すなわち最大荷重時の応力）を Table 9 に示す。水平剪断応力で破損した梁では、これらの値は 53.8～78.4 kg/cm² の範囲にあった。

ウェブが座屈した梁では、これらは、43.3～56.1 kg/cm² の範囲にあり、前記の値より低下していることが認められる。

水平剪断応力で破損した梁で、最大荷重 P_{max} と、合板の短期許容剪断応力度（等級Bは 26 kg/cm²，Cは 24 kg/cm²）⁹⁾を用いて式（6）から求めた最大設計荷重 P_d の比 P_{max}/P_d の値（これはそのまま梁に発生した最大応力と許容応力度との比に等しい）は、2.3～3.3 の範囲にあった（Table 9）。

前の曲げ応力の場合と同じ考え方でこの値を見れば、これは許容応力度を満足しており、かつ並外れて大きな値ではないと言うことができよう。すなわち、合板の許容剪断応力度は妥当な値と言えよう。

ウェブが座屈した梁では、この比の値は、1.8～2.3 の範囲にあり、2 以下のものが現われている。すなわち、座屈を起こすものは、許容応力度を満足しない低い応力で破損してしまうわけで、フランジ間隔、スチフナ配置等を考えて、座屈を防ぐ方策を採る必要があるわけである。

7.5 フランジーウェブ間の剪断応力

フランジーウェブ間には、剪断応力が発生するが、ウェブが合板の場合には、この剪断は、合板のローリングシアが支配的となる。

今回の試験のように、ウェブの片側のみがフランジに接するような、2つの対称ウェブを持つもの、または I 型の場合のローリングシア応力は、次式から計算される¹⁾。

$$\tau_r = \frac{VQ_{fl}}{2dI_t} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 τ_r ：ローリングシア応力

d ：フランジとウェブの接着部の深さ

Q_{fl} ：中立軸に関するフランジの断面一次モーメント

I_t, V ：式（6）で定義

梁に発生した最大ローリングシア応力（すなわち、最大荷重時の応力）を Table 9 に示す。

ローリングシア応力で破損した梁では、この値は 8.1～12.5 kg/cm² の範囲にあった。

合板のローリングシアに対する許容応力度は、等級 A, B, C とも 8 kg/cm²（短期）が提案されている⁹⁾。

ところで、箱型梁や接着ストレスド・スキンパネルのように、合板の一部分にローリングシア応力が発生するような構造の場合には、応力集中の影響のため、許容ローリングシア応力度を 50% 低減して用いることが指示されている⁶⁾。

そこで、合板の許容ローリングシア応力度を 4 kg/cm² とし、この値を用いて式（7）から求めた最大設計荷重 P_d と、最大荷重 P_{max} との比 P_{max}/P_d は、ローリングシアで破損した梁では、2.0～3.1 の範囲にあった。

これから、前記水平剪断応力の場合と同様に、合板の許容ローリングシア応力度の値も、妥当なものと言えるであろう。

7.6 ウェブの座屈

梁の両側の支持点と荷重点との間には、剪断応力がフランジとスチフナに沿って分布し、この部分のウェブは、剪断を受ける。

従って、この部分の寸法によっては、ウェブが座屈を起こすことが考えられる。

前述した Fig. 3 は、座屈を起こさないような寸法を定めるためのものであるが、これは、板の周辺支持条件が単純支持という条件の下に作られたものである。現実の支持条件は、接着されているということから、単純支持と固定との間にあると考えられる。従って、この図から求められる寸法は、安全側のものであると考えられる。

今回の試験では、Fig. 3 から、座屈を起こすものとして、梁 10, 11 の寸法が定められたが、実際の曲げ試験によっても、これらの梁は座屈を起こした。

合板の剪断座屈、特に今回の実験のような支持条件を有する板の座屈については、まだ十分な研究がなされておらず、設計方法も適当なものがない状態である。従って Fig. 3 は、実状とは異なる条件下で作られたものではあるが、現時点では、座屈に対する目安を得るものとして有効な方法と言えるであろう。

座屈を起こした梁の、荷重-撓み曲線と、荷重-横撓み曲線の一例を Fig. 10, 11 にそれぞれ示した。この梁では、荷重が 2,400 kg あたりから、ウェブ内に座屈の波が出現し始めるのが観察され、荷重の増加に従って、この波も次第に大きくなり、最後にウェブの破損が生ずる。この間、梁全体の撓みは、横撓

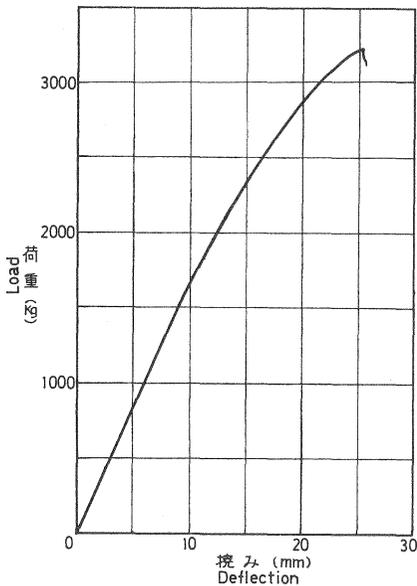


Fig. 10 荷重-撓み曲線 (梁 10-B)
Load-deflection curve (Beam 10-B).

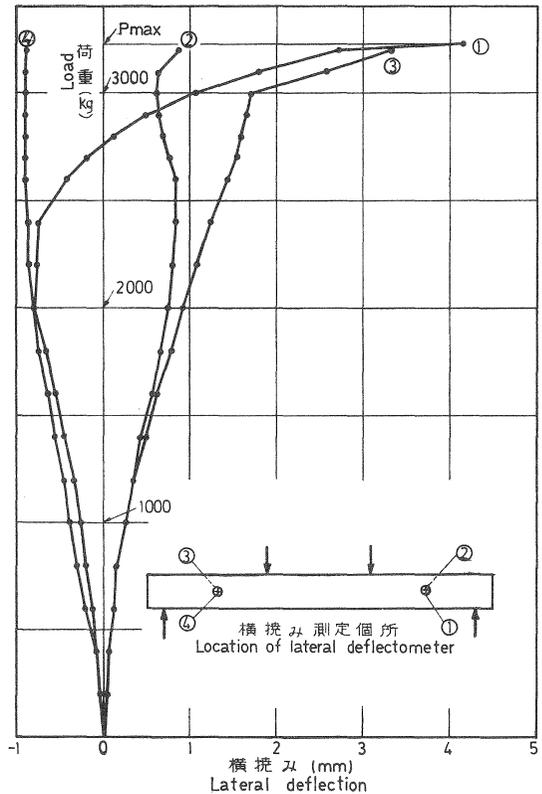


Fig. 11 荷重-横撓み曲線 (梁 10-B)
Load-lateral deflection curve (Beam 10-B).

み程には急激に増加せず、概して漸増していて、座屈との関連性を見つけ出すのは難しい。

荷重と横撓みの関係 (Fig. 11) では、固有値問題的な座屈、言い換えれば、特異点は図上に現われていない。今回の実験のように、周辺を支持された板では、板が座屈を起こしてもなお、荷重負担能力を有していることは、古くから実験的に確認されていることであるが、Fig. 10 に荷重急増点が存在しないこと、また、Fig. 11 で、座屈出現後も撓みが増加しているのは、このことと現象を一にするものと思われる。また、Fig. 11 で、横撓みが荷重の初期段階から既に出現し、その後、漸増していくのは、材料の力学的不整 (imperfection) に起因するものであるが、明確な座屈現象を現わさず、じわじわと進行するため、座屈がすぐそのまま材料の破損に結びつかないで、ウェブ内に複雑な応力状態を引き起こしていると思像される。これは、前述した破損形態の複雑さからも想像されることである (Photo. 7, 9)。

ウェブに出現した座屈の波の模様を Photo. 15 に示す。剪断を受ける部分には、1.5 波長の撓みが現われている。横撓みの等高線を Fig. 12 に示したが、この梁では、スチフナとウェブとの間には 1 cm のすき間があるため、等高線が、剪断力を受けない内部にまで入り込んで、乱れた形となっているが、これにもやはり、1.5 波長の撓みが現われているのが認められる。

座屈現象をも含めた場合には、剪断応力を受ける合板の終局の強さを適確に判定することは、極めて難しい問題である。そこで、実験的にこれを定めようと、多くの試験がなされ²⁾、便宜的に次の 3 領域が定義されている。

- $0 \leq a/a_0 < 1.2$ 非弾性座屈域
- $1.2 \leq a/a_0 < 2.2$ 中間域
- $2.2 \leq a/a_0$ 弾性座屈域

ただし、 a : ウェブの高さ

b : ウェブの剪断を受ける幅

a_0 : 剪断を受ける幅 b なる板で、剪断力が f_s なる時、座屈を起こす板の辺長

f_s : ウェブ材料の剪断強さ

非弾性座屈以外の領域にある板は、その材料固有の強さ f_s に達する以前に座屈を起こしてしまい、材料の強さを十分に発揮できない状態にあるわけである。

今回の試験では、 a/a_0 は、0.076~1.87 の範囲にあたったが、これと、ウェブに発生した最大剪断応力 $f_s \text{ ult}$ とウェブの剪断強さ f_s (構造用合板の許容応力度 24 kg/cm^2 とした) の比 $f_s \text{ ult}/f_s$ との関係

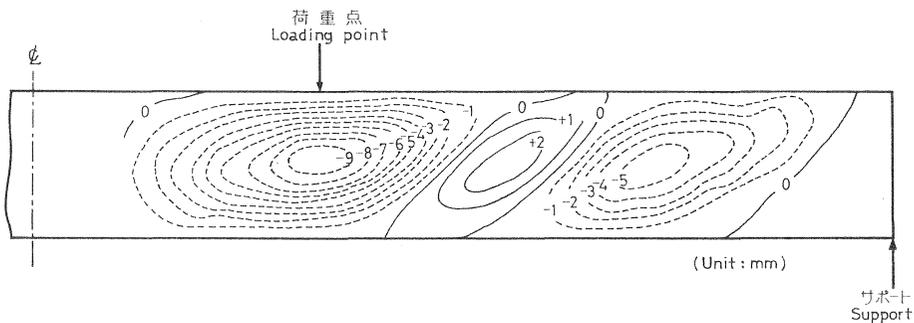


Fig. 12 座屈したウェブの等高線
Contour line of buckled web.

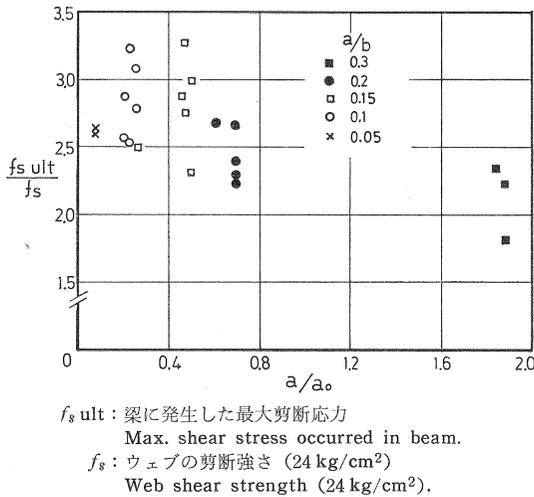


Fig. 13 ウェブの辺長と終局剪断強さとの関係
 Relation between web lengths and ultimate shear strength.

Fig. 13 に示した。この図から、 a/a_0 が 1 より小さい範囲では $f_s \text{ ult}/f_s$ の値は 2 以上あり、 a/a_0 が 1.8 付近では、この値は下がってきて 2 以下のものもあることがわかる。この図では、材料の剪断強さは許容応力度として一定の値を用いているが、この値を材料の真の剪断強さとおきかえれば、前記の 3 領域の傾向が判明するであろう。現時点では、 $f_s \text{ ult}/f_s$ の値を 2 以上とするために (すなわち許容応力度を満足するように)、 a/a_0 は少なくとも 1 以下とすべきであろう。

7.7 ウェブの継ぎ手

フランジの破損したもの、特に引張り破損を起こしたものは数が少なく、2体

しかないが、いずれもフランジに発生した最大曲げ応力は 1,000 kg/cm² を超えている。うち 1 体 (梁 7-B) はスチフナが添え継ぎ板を兼ねたものであり、他 (梁 12-A) は添え継ぎ板でジョイントされている。いずれもこのジョイント部では、継ぎ板の引張り破損 (スチフナにおいては LT 面、合板では 0° 方向) を起こしている (Photo. 11, 12)。

ウェブのジョイント部が両側で同一の位置にくるのは、弱点部が集中し、ひいては応力集中をも引き起こすので、避けた方がよいとされている⁸⁾。実際、両試験体とも、このウェブバットジョイントの位置から、フランジの引張り破損が発生している。ウェブのバットジョイント部は、より大きな曲げ応力を期待するためには、両サイドで位置をずらし、いわゆる千鳥に配置することが必要であろう。

合板の継ぎ手に関しては、わが国ではその評価方法が確立されていないので、具体的な設計ができない状態にある。今後、合板についてスカーフ、バットジョイント、添え継ぎ板等による継ぎ手性能を検討することが重要な課題と思われる。

8. 結 論

今回の試験から得られた結論は、次のようなものである。

1. Fig. 8 から求めた撓みは、実験値との適合がよい。曲げ撓みを計算する際、フランジのヤング係数に実測値を用いると実験値との適合は一層よくなる。
2. 比例限度荷重と最大荷重との比は、平均 0.58 であった。
3. 梁に発生した最大応力と許容応力度との比は、

曲 げ	3.4~5.3
水 平 剪 断	2.3~3.3
ローリングシア	2.0~3.1

の範囲にあった。この値から、合板に対する剪断応力、ローリングシアの許容応力度は双方とも妥当な値

と思われる。

4. 最大荷重と設計荷重 (曲げ, 水平剪断, ローリングシアの3種類のうちで最も小さい設計荷重) との比は,

曲げによるもの	3.4~5.5 (平均 4.3)
水平剪断によるもの	2.5~3.3 (平均 2.9)
ローリングシアによるもの	2.4~3.3 (平均 2.9)

であった。これから, この試験に採用した設計方法が適確なものであることが認められる。

5. ウェブの座屈を防ぐためのスチフナ配置, フランジ間隔を求めるのに, Fig. 3 が有効である。この時 a/a_0 の値は, 1 以下としておく必要がある。

参 考 文 献

- 1) DIETS, G. H.: Engineering Laminates, Chapter 4 Plywood, John Wiley & Sons, New York, (1949)
- 2) LEWIS, W. C.: Design of Plywood Webs in Box Beams, USDA Forest Products Lab., No. 1318 et seq., (1952)
- 3) STIEDA, C. K. A.: Strength of Plywood Box Beams, Forest Products Lab., Vancouver, B. C., (1967)
- 4) EGNER, K.: Elastizität und Festigkeit geleimter Stegträger, Holz als Roh- und Werkstoff, 22 Jg. Heft 1., (1963)
- 5) PERKINS, N. S.: Plywood, Properties, Design and Construction, The Douglas Fir Plywood Association, Tacoma, (1962)
- 6) The American Plywood Association: Plywood Design Specification, (1974)
- 7) —————: Fabrication of Plywood Beams, Plywood Fabrication Specification BB-8, (1974)
- 8) —————: Design of Plywood Beams, Plywood Design Specification, Supplement 2, (1974)
- 9) 日本建築学会: 木構造設計規準・同解説, (1973)
- 10) 高見 勇: Box Beam に関する研究 (第1報) 曲げ剛性について, 木材学会誌, (1961)
- 11) —————: Box Beam に関する研究 (第2報) 曲げ剛性および強度試験について, 木材学会誌, (1961)
- 12) —————: 木製 Box Beam について, 木材工業, (1963)
- 13) 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能比較, 木材学会, (1971)
- 14) 後藤一雄: 合板をウェブ材に使用した I 型および Box 型木造梁の研究 (その1), 建築学会論文報告集, (1973)
- 15) —————: 7.8 m スパン膠着梁の実施に関する研究, 建築学会論文報告集
- 16) —————: 曲げ剛性の大きい弦材を剪断変形のともし機構で結び付けた合成ばりについて, 建築学会論文報告集, (1959)
- 17) Design of Wood Aircraft Structures, ANC-18 Bulletin, (1951)
- 18) MARCH, H. W.: Buckling of Flat Plywood Plates in Compression, Shear or Combined Compression and Shear, USDA Forest Products Lab., No. 1316-F et seq., (1943)
- 19) EHLBECK, J.: Durchbiegungen von Biegeträgern aus Holz unter Berücksichtigung der Schubverformung, Holz als Roh- und Werkstoff, 27 Jg. Heft 7, (1969)

- 20) NEWLIN, J. A.: Deflection of Beams with Special Reference to Shear Deformations, USDA Forest Products Lab., No. 1309, (1941)
- 21) BIBLIS, E. J.: Shear Deflection of Beams, F. P. Journal, (1965)
- 22) MARKWARDT, L. J.: Form Factors and Method of Calculating the Strength of Wooden Beams, USDA Forest Products Lab., R 1184, (1938)
- 23) USDA Forest Products Laboratory: Form Factors of Beams Subjected to Transverse Loading only, No. 1310, (1941)
- 24) BOHANNAN, B.: Effect of Size on Bending Strength of Wood Members, USDA Forest Products Lab., FPL 56, (1966)

Strength Properties of Plywood Box Beams (I)Yoshihiko HIRASHIMA⁽¹⁾

Summary

Plywood box beams are the units which have superior structural performances and, therefore, in many countries, especially in the United States of America, have been used successfully up to today.

However, their application is not widespread in Japan.

It can be pointed out as one of the causes that the design method of plywood box beam has not been accomplished because the plywood allowable stress, which was needed through design procedures, has not been proposed in Japan.

Recently, however, as the recommended allowable stress for structural plywood is published, the design method will be able to accomplish by using such a stress.

In this study, the design methods of the box beams which structural plywood webs and lumber flanges (Western Hemlock) are joined by gluing are discussed.

Thirty test models, with a length of 400 cm, having different dimensions in cross sections, were fabricated. The kinds of plywood thickness used for webs were 5 mm, 7.5 mm, 9 mm and 12 mm, and the depth of beams ranged from 16.7 cm to 40 cm.

After fabricating the test models, bending tests were carried out under the condition of third point loadings in a span of 360 cm. In these tests, the maximum load at the beam failure, the gross beam deflection at midspan, the deflection within the range where the external shear force was absent, the web lateral deflection relative to flanges and web and flange strains were measured.

Comparing the actual strength of the plywood box beam, considering the safety factor, with the strength obtained by the designs using the current recommended allowable stress for plywood and the allowable stress for lumber, the most reasonable design method was selected.

And then, from the results of tests, the allowable stress for structural plywood used in these designs was regarded as appropriate.

The test results in this study demonstrated that more profound investigations were required for the buckling stability of webs, the web joint methods and the location of web joints.

The discussions about the ultimate strength of webs which have possibilities of occurring the buckling and the form factors of deep beams will be reported in the next paper by using the results which are obtained from the minor tests such as panel shear tests using small specimens cut from beam webs and flange strength tests.

Received December 1, 1976

(1) Wood Technology Division

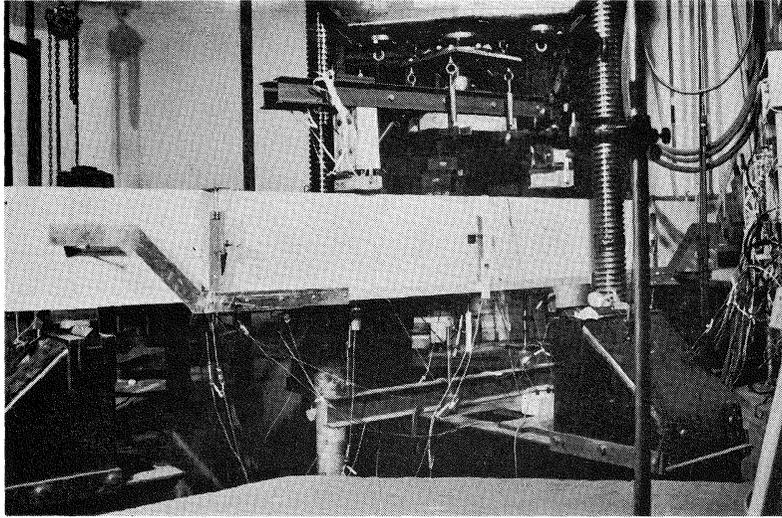


Photo. 1. 曲げ試験装置
Apparatus of bending test.

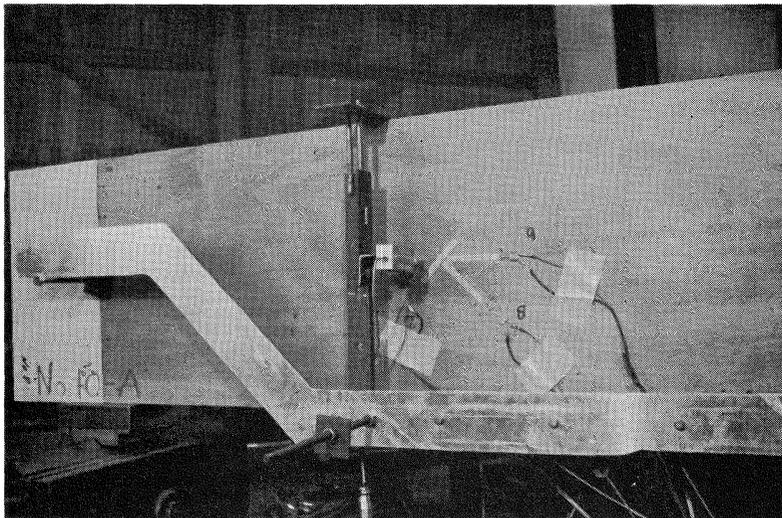


Photo. 2. 撓み・歪測定具
Instruments for measuring deflection and strain.
(横撓み測定具, ロゼット型に張りつけた歪ゲージおよび撓み測定用ヨーク)
(Instrument for measuring lateral deflection, rosette strain gage
sticked on a web and yoke of deflectometer).

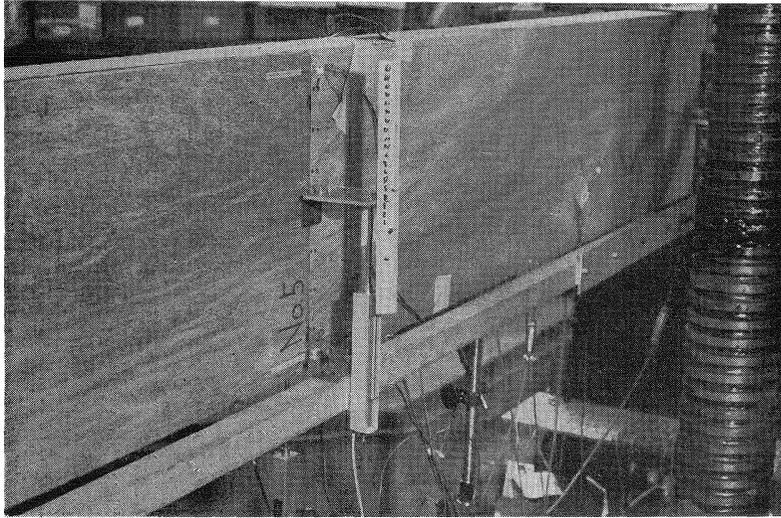


Photo. 3. 撓み測定
Measuring instruments for deflection.
(ヨーク型変位計およびものさし)
(Yoke deflectometer and scale for measuring
deflection through telescope).

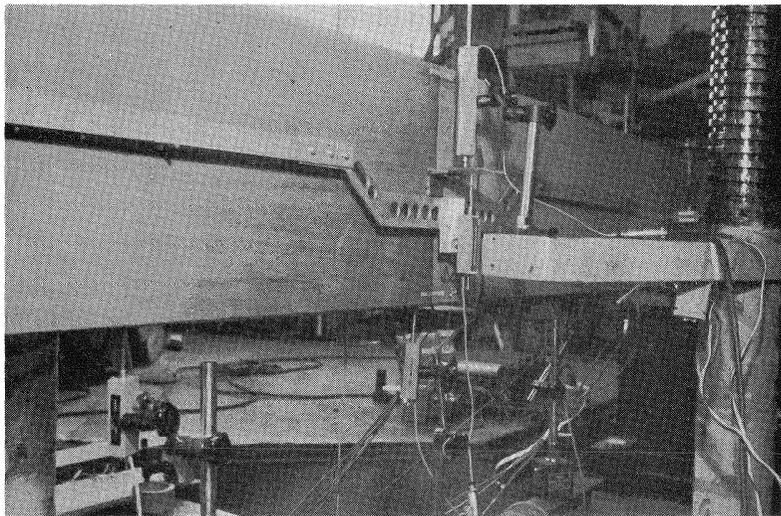


Photo. 4. 撓み測定具(梁裏面)
Measuring instruments for deflection (Back side of beam).
(ヨーク型変位計およびモニター用変位計)
(Yoke deflectometer and monitor defletometer).

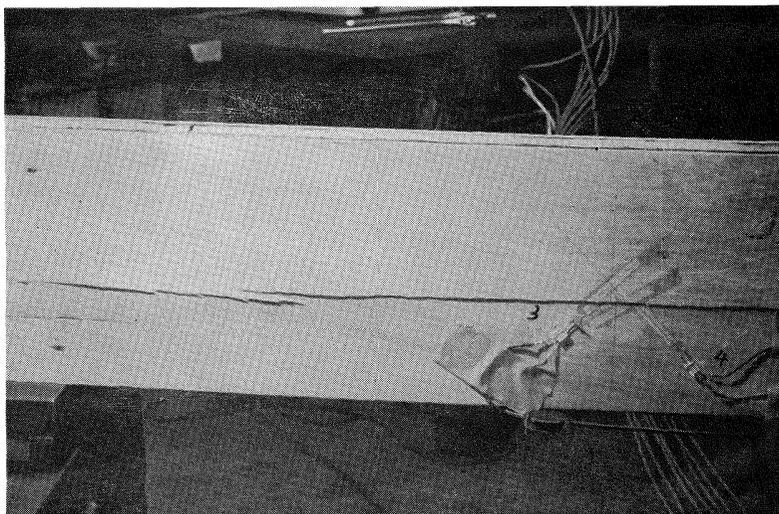


Photo. 5. 水平剪断によるウェブの破損
Web failure by horizontal shear.

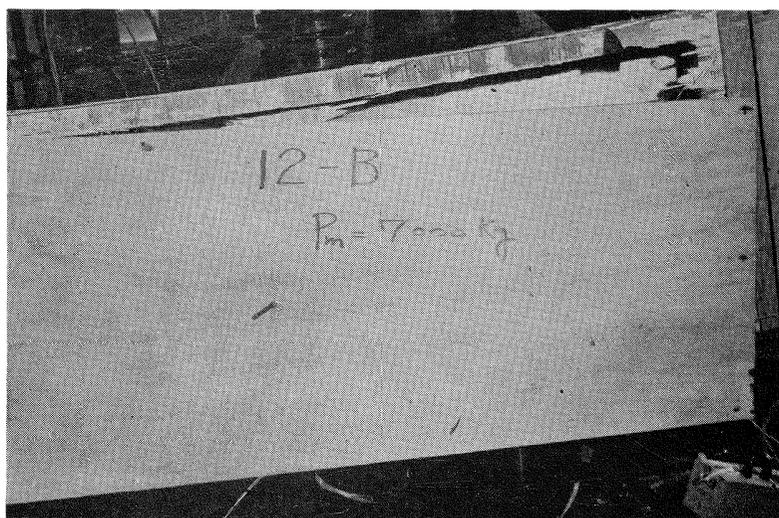


Photo. 6. ローリングシアによるウェブの破損
Web failure by rolling shear.

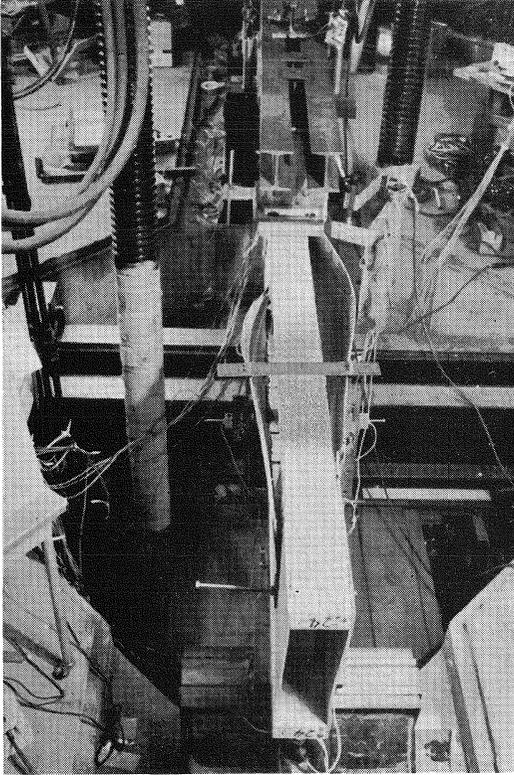


Photo. 7. 座屈によるウェブの破損
Web failure by buckling.

(合板内接着層の剝離も現われている)
(Peeling in glue line of plywood were accompanied).

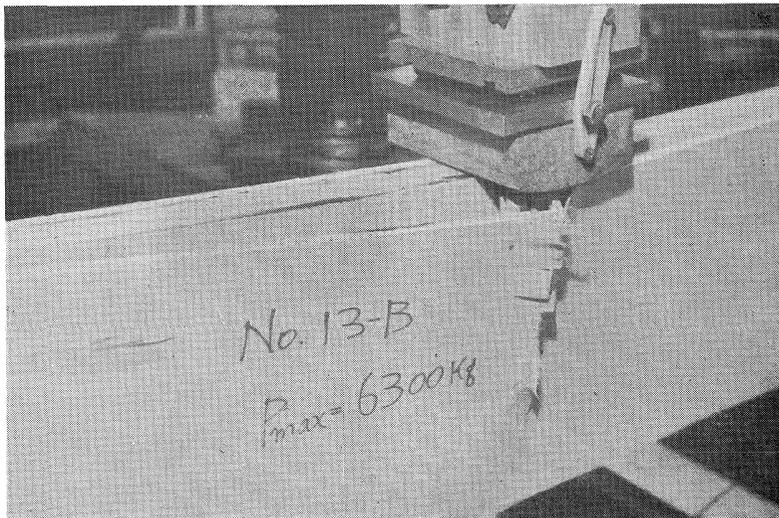


Photo. 8. ウェブローリングシアおよび圧縮破損
Web failure by rolling shear and compression.

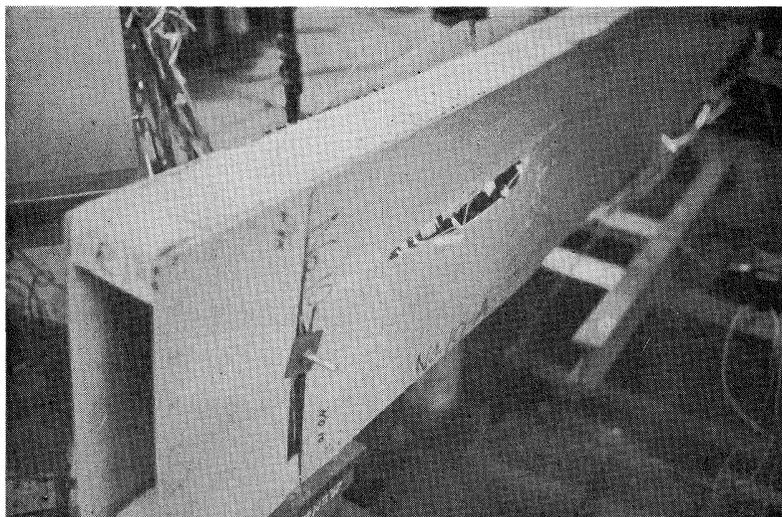


Photo. 9. 座屈によるウェブの破損
Web failure by buckling.

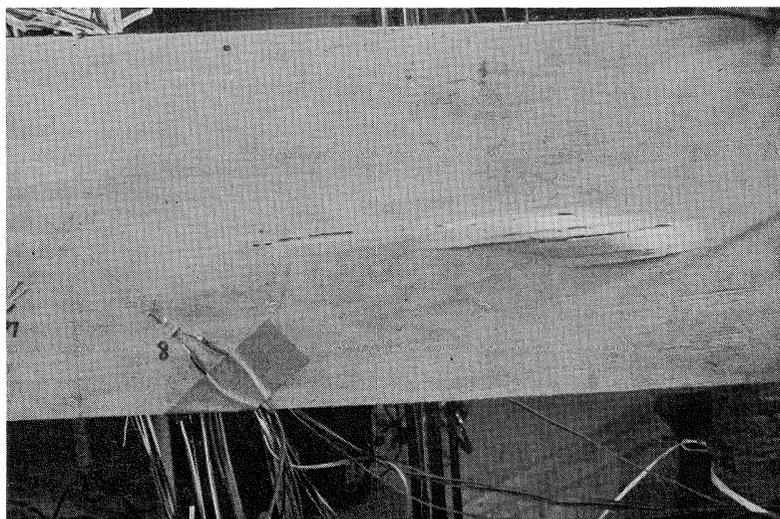


Photo. 10. ウェブのローカルバックリング
Local buckling in web.

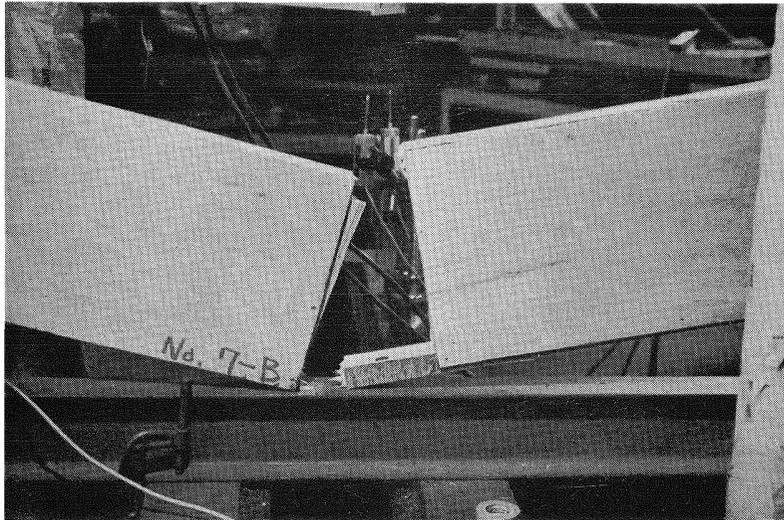


Photo. 11. フランジの引張および剪断破損
Flange failure by tension and shear.
(ローリングシアおよびスチフナの引張破損も現われている)
(Rolling shear and stiffener tension failure were accompanied).

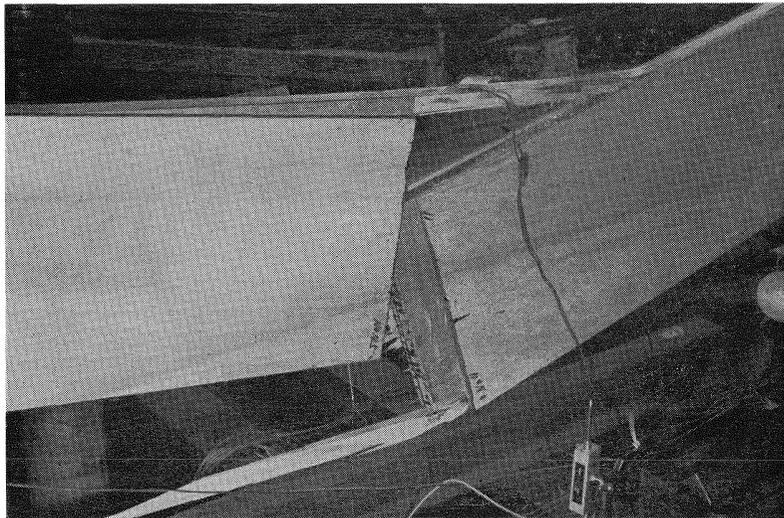


Photo. 12. フランジ引張破損
Flange failure by tension.
(添え継板も引張破損を起している)
(Splices were also broken down by tension).

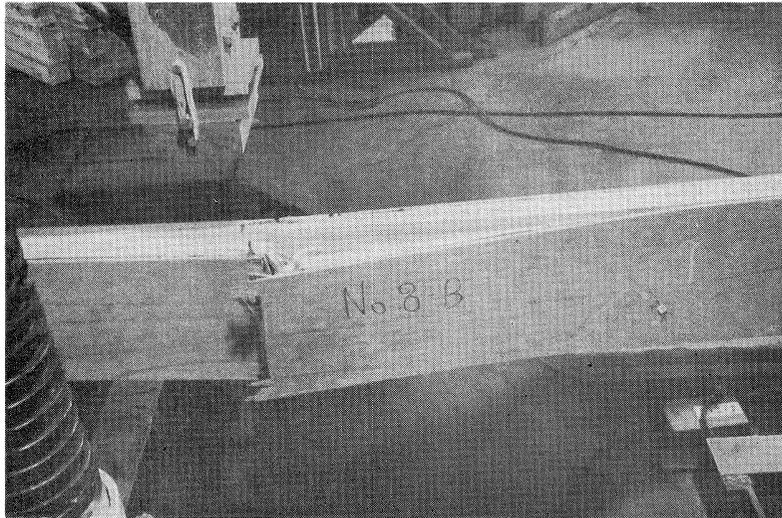


Photo. 13. フランジ圧縮破損
Flange failure by compression.

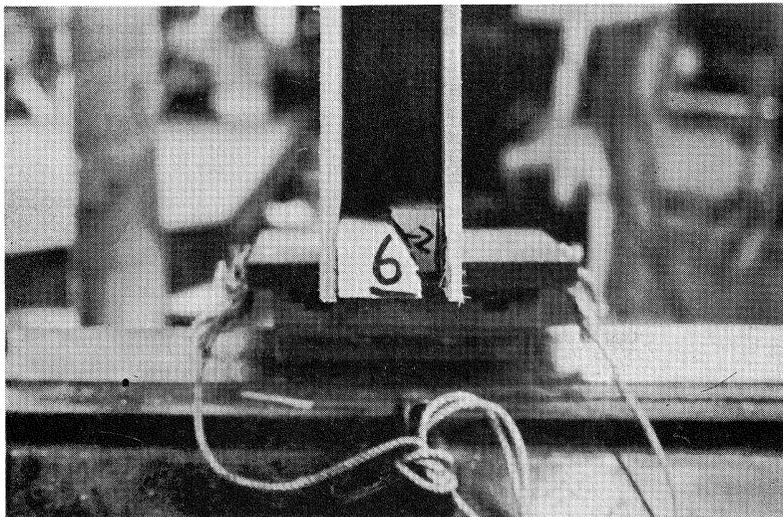


Photo. 14. フランジの剪断破損
Flange failure by shear.

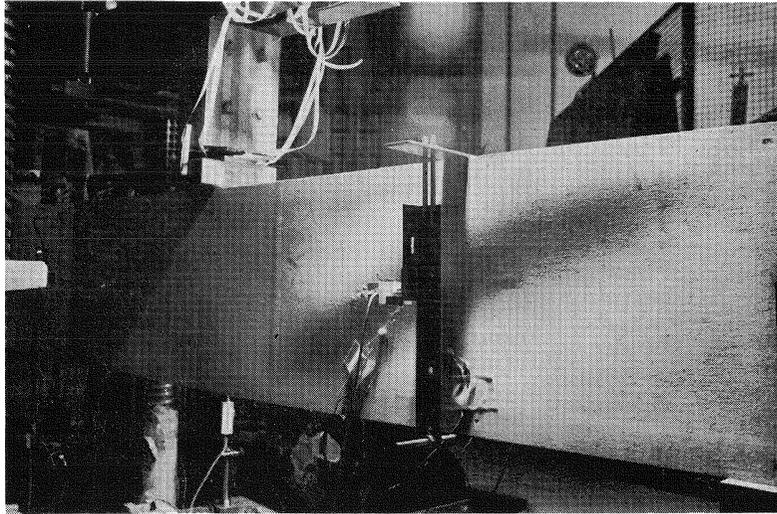


Photo. 15. ウェブの座屈
Web buckling.