アルミニウム合金サンドイッチパネルの振り TORSION OF ALUMINIUM ALLOY SANDWICH PANELS

井上 哲郎*, 木村 衛**
Tetsurou INOUE and Mamoru KIMURA

This study is an experimental confirmation of torsional behavior of aluminium alloy sandwich panels.

Five series of panels were tested. And these are grouped into three classes such as adhesive brazed and urethane panels.

Adhesive panels consists of two series with different sizes of honeycomb core.

Brazed panel consists of two series with different types of cores such as honeycomb and round core.

Explanations of initial stiffness, ultimate strength and inelastic behavior are tried by the method of simple multi-cell substitution.

Keywords: *Torsion, Aluminium alloy, Sandwich panel, Honeycomb core, Circular core, Urethane core*

振り, アルミニウム合金, サンドイッチパネル, ハニカムコア,
丸コア, ウレタンコア

1. はじめに

サンドイッチパネルを構造壁として利用する場合、縦長形状になると横荷重に対して面外に不安定となり、横座屈の検討が必要となる。この観点からサンドイッチパネルの振り剛性を評価するため、振り実験を実施した。実験結果を説明するため、サンドイッチパネルのコアを隔壁に置換し、マルチセルパネルと仮定して振り剛性評価を試み、さらに耐力・変形挙動に言及した。

2. 振り実験

2. 1 試験体

試験体にはハニカムコア (H)、丸コア (R) およびウレタン (U R) の三種類のコア材を用いた (図1参照)。

試験体には5種類のシリーズがある。表1を参照して、表面板が等しく (板厚 1mm 材質 AS130)、コア寸法の異なる接着ハニカムパネル H I-1 A と H I-2 A シリーズ、同じく表面板が等しく (板厚 2.5mm 材質 AS65)、コア形状の異なるロウ付けハニカムパネル H II-1 B とロウ付け丸コアパネル R II-1 B シリーズ及びウレタンのコア材を持つ UR シリーズである。UR シリーズは H I シリーズと表面板が等しく、ハニカムコアとウレタンコアの比較を可能とする。各シリーズには三種類の異なる幅がある。それぞれのシリーズの試験体の寸法は表2に示されている。試験体素材の機械的性質は表3のとおりである。ただしコア材の素材試験は実施されておら

ず H II, R II シリーズについては同種の別試験体^⑥を参考値として () で示している。

表1 試験体断面特性

	表面板 板厚 t (mm)	コア 形状	コア 寸法 d (mm)	コア 箔厚 t_c (mm)	表面板 材質
H I-1 A	1.0	接着ハニカム *1	12.7	0.076	AS130 ^⑦
H I-2 A	1.0	接着ハニカム *1	9.5	0.076	AS130
H II-1 B	2.48	ロウ付けハニカム *2	20	0.2	AS65
R II-1 B	2.48	ロウ付け丸コア *2	20	0.2	AS65
UR	1.0	ウレタン *3	—	—	AS130

注) 文献(5)の呼称による。AS—基準強度 F 値 (N/mm²)

*1 折板を接着してハニカム形状のコアとし、
これと表面板を接着したもの。

*2 コア部、表面板ともにロウ付けしたもの。

*3 表面板間にポリウレタンフォームを注入、
加圧・加熱したもの

* 筑波大学システム情報工学研究科 教授・工博

** エイ構造研 代表・工博

Prof., Systems and Information Engineering, The Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.
Delegate, A Structural Lab., Dr. Eng.

図1 サンドイッチパネルのコア

表2 試験体寸法

Code	パネル幅 B (mm)	パネル厚 h (mm)	有効長 L (mm)
・31	300	50	200
・32			350
・33			800
・51	500	50	300
・52			550
・53			1,300
・81	800	50	450
・82			850
・83			1,300

表3 使用材料の機械的性質

Code	表面板		コア材		備考
	板厚 (mm)	$\sigma_{0.2\%}$ (N/mm ²)	箔厚 (mm)	$\sigma_{0.2\%}$ (N/mm ²)	
HI・1A	1.0	116	0.076	—	素材試験による
HI・2A	1.0	116	0.076	—	
HI・1B	2.48	87	0.2	(77)	
RII・1B	2.48	167	0.2	(52)	
UR	1.0	116	G=2.95 N/mm ² $\tau_{wy}=0.3$ N/mm ²		みかけ密度による推定値

() : 文献(6)による

 $\sigma_{0.2}$: 素材の0.2%オフセット耐力 τ_{wy} : ウレタンの降伏せん断耐力

2.2 実験方法

実験方法は模式的には図2に示すように、y方向（図1参照）を材軸方向とした試験体両端をカマボコ断面バー四本で挟み、中央はH形断面部材二本の加力梁で挟んでそれを伸ばした先端を荷重Pで引張り、その反力Pを中心下部に取ることによりアームrとの積で試験体に振りを加えた。

実験装置は図3に示している。材端支点のカマボコ断面バーと試験体表面の間には板厚9mm、幅150mmで試験体寸法に合わせた長さの、表面をテフロン加工した板が挟んである。試験体の断面形状から単純振りの卓越することを想定しているが支点の反り拘束を極力軽減させる為である。ただし中央加力点では対称条件から完全反り拘束となる。実験装置の支点と加力点の詳細は図3に示しているが、振りモーメント T_T は(1)式となる。

加力は単調荷重とし、低い荷重で試験機と試験体の接触をなじま

せた後弾性勾配を確定し、その後崩壊に至らしめた。

変形の測定は図3（上図）の①～⑨の変位計で振り角を計り、相対振り角 θ として(2)式によって試験体の振り角を求めた。

$$T_T = Pr/2 \quad (r=900\text{mm}) \quad (1)$$

$$\theta_1 = \frac{(3)-(1)}{\ell_T}$$

$$\theta_2 = \frac{(6)-(4)}{\ell_T}$$

$$\theta_3 = \frac{(9)-(7)}{\ell_T}$$

$$\theta = \theta_1 - \frac{\theta_2 + \theta_3}{2}$$

2.3 実験結果

実験により求めた振りモーメントと振り角との関係($T_T - \theta$)を図4(a)～(e)に示す。いずれの図にも同一幅で長さの異なる三体の結果が画かれている。材長と弾性剛性は対応しており長いほど剛性は低い。

図2 実験方法

図3 実験装置

Breadth=300mm

Breadth=500mm

Breadth=800mm

図 4 (a) HI-1 A シリーズ $M_T \cdot \theta$ 関係

Breadth=300mm

Breadth=500mm

Breadth=800mm

図 4 (b) HI-2 A シリーズ $M_T \cdot \theta$ 関係

Breadth=300mm

Breadth=500mm

Breadth=800mm

図 4 (c) HII-1 B シリーズ $M_T \cdot \theta$ 関係

Breadth=300mm

Breadth=500mm

Breadth=800mm

図 4 (d) RII-1 B シリーズ $M_T \cdot \theta$ 関係

Breadth=300mm

Breadth=500mm

Breadth=800mm

図 4 (e) UR シリーズ $M_T \cdot \theta$ 関係

図4(a)(b)は接着ハニカムパネルで、コア寸法が異なる。コア寸法の小さい2Aシリーズの方が耐力は高い。大変形に伴い表面板接着部の剥離によりいずれも最大耐力以降耐力の劣化が見られる。図4(c)(d)はろう付けパネルで、コアの形状が異なるがコア寸法は等しい。表面板は同質に計画されたが素材試験によれば丸コアの方がハニカムのおよそ2倍の強度を持つ。この表面板強度差の影響が大きいものと思われ、丸コアパネルの耐力の方が高い。ろう付けの場合は、二次勾配として耐力の上昇が認められ、試験機のストロークで载荷限界をむかえている。ハニカムコアで不安定な性状を示すが丸コアでは安定して耐力が上昇している。これはハニカムコアではコアの局所的な破壊によるものと思われる。図4(a)(b)と(e)はハニカムコアとウレタンコアの差である。ウレタンコアパネルも接着ハニカムパネルと同様表面板接着部の剥離による耐力劣化を示す。耐力はハニカムコア(a)のほぼ80%程度で、剛性は低い。

3. マルチセル置換

3. 1 マルチセルの単純振り

図5に示すような中空矩形断面に外壁と等厚な隔壁を二枚対称に配したマルチセルパネルを考える。

図5 マルチセルパネル

単純振りに伴う反り変形 u_θ とせん断変形 u_γ を等しくおけば、パネル長さを L 、セル各辺のせん断流と板厚の一般表示を q, t として

$$\oint \frac{q}{tG} ds = 2A_i \theta / L \quad (3)$$

ここに $\oint ds$ は各セルの全周にわたる積分、 A_i はセル面積である。これより図5を参照して3つのセル1～3に対して連立方程式を求めればこれを解いてせん断流 q_i が得られる。

$$q_1 = q_3 = \left[\{b(1-b)+c\} / \{b(1-b+c)+c(1+c)\} \right] h t B G \theta / L \quad (4)$$

$$q_2 = \left[\{b(1-b+c)+c\} / \{b(1-b+c)+c(1+c)\} \right] h t B G \theta / L \quad (5)$$

ここに $c = \frac{G}{G_w} \frac{h}{\varpi}$ で、 G, G_w は表面板と隔壁のせん断剛性である。

従って q_2 に対する隔壁のせん断流 q_w の比率は次式となる。

$$\overline{q_w} = (q_2 - q_1) / q_2 = c b / \{b(1-b+c)+c\} \quad (6)$$

(6)式を種々の隔壁の位置 b に対して示したものが図6である。

実験で用いられたアルミニウムコアパネルの表面板とコア材厚、断面形状を考慮すれば

$$c = 0.78 \sim 2.08$$

これより隔壁のせん断流の影響を次式で仮定できる。

$$\overline{q_w} = b/2 \quad (7)$$

(7)式より

$$\overline{q_1} = q_1 / q_2 = 1 - \overline{q_w} = 1 - b/2 \quad (8)$$

$$\overline{q_2} = 1$$

図6 内壁せん断流の影響

図7 隔壁の仮定

3. 2 サンドイッチパネルへの適用

アルミコアパネルを N 個の等しいセルを持つ集合体のマルチセルとみなす。 N は幅をコア寸法で除した $N = B/d$ とする(図7参照)。今ここで、その中の任意の対称な2枚の隔壁のマルチセルを考え、その幅を $b_i B$ とする。ここに $b_i = 1 - 2i/N$ である。図5より振りモーメントは、次式より求めることができる。

$$\Delta T_i = [4A_1 q_1 + 2A_2 q_2]_i = [(1-b_i)(1-b_i/2) + b_i] 2A q_2$$

$$= \left[1 - \frac{i}{N} + \frac{2i^2}{N^2} \right] 2A q_2 \quad (9)$$

$$A = hB^2$$

N 個のセルを持つマルチセルの振りモーメントに対して、簡単のため(9)式を $i=0 \sim N'$ まで重畳して求める。 N' は $N/2$ 以下の自然数で N が偶数のとき $N' = N/2$ 奇数のとき $N' = (N-1)/2$ である。

$$T_{N'} = \frac{1}{N'+1} \sum_{i=0}^{N'} \Delta T_i = \left[\frac{11}{12} + \frac{1}{12N} \right] 2A q_2 \quad (10)$$

$$\overline{N} = \begin{cases} N' : N \text{ が偶数} \\ N : N \text{ が奇数} \end{cases}$$

各セルのせん断流 q_i が全て等しい場合は $q_w = 0$ となり、隔壁の影響は無い。これは表面板と外壁のみの、いわゆる中空矩形断面の振りと等価となる。

図 9 (a) 弾性勾配 (理論値) との比較 「接着ハニカム (コアサイズ 12.7mm)」

図 9 (b) 弾性勾配 (理論値) との比較 「接着ハニカム (コアサイズ 9.5mm)」

図 9 (c) 弾性勾配 (理論値) との比較 「ろう付けハニカム (コアサイズ 20mm)」

図 9 (d) 弾性勾配 (理論値) との比較 「ろう付け丸コア (コアサイズ 28mm)」

図 9 (e) 弾性勾配 (理論値) との比較 「ウレタンコア」

$$T_1 = 2Aq_2 \quad (11)$$

(10)式を(11)式より、隔壁を無視して振り剛性を評価する。

$$T = 2Aq \quad (12)$$

(3) 式により

$$q = G[hb/(l+c)]\theta/L \quad (13)$$

これより振り剛性 GJ は次式で表わす事ができる。

$$T = GJ\theta/L \quad (14)$$

$$GJ = G\left\{2h^2/(l+c)\right\}B^3 = 2A^2\left/\left(\frac{B}{Gt} + \frac{H}{G_w w}\right)\right. \quad (15)$$

外壁の降伏せん断流 q_{wy} が表面板の降伏せん断流 q_{ty} より小さい

とき降伏は外壁に生じ、降伏振りモーメントは(12)式より

$$T_y = 2Aq_{wy} \quad (16)$$

図8を参照して、以降順次内側の隔壁が降伏し、表面板せん断流が降伏するまで耐力上昇するとすれば、最大耐力は次式となる。

$$T_u = \sum_{i=0}^n b_i T_y = T_y (n+1)(1-n/N) \quad (17)$$

ここに n は次式を満足する自然数である。

$$n = q_{ty}/q_{wy} \quad (\leq N') \quad (18)$$

図8 降伏後のせん断流

(17)式より外壁から j 番目の内側の隔壁まで降伏した時の振りモーメントは、次式で表わされる。ただし、 $j \leq n$

$$T_j = \sum_{i=0}^j b_i T_y = T_y (j+1)(1-j/N) \quad (19)$$

この時の接線振り剛性は(15)式より $B = bB$ 、 $H = hB$ として

$$GJ_j = G\left\{2h^2 b_j^2 / (b_j + c)\right\}B^3 \quad (20)$$

従って T_j 時の振り変形は、次式となる。

$$\theta_j = \sum_{i=0}^j \frac{b_i T_y L}{GJ_i} = \frac{T_y L}{2AGhtB} \left[(j+1) + c \sum_{i=0}^j \frac{N}{N'-2i} \right] \quad (21)$$

ウレタンコア材の場合は、幅方向に厚さ H で分割しその中心に位置する $w = H$ の隔壁を考える。また $G/G_w = 9,000$ とする。この時 c の値は最大 40 以下であり、図6より(7)式をほぼ満足する。

4. 振り挙動評価

(14)(15)式で表わされる弾性勾配を実験結果と比べたのが図9(a)~(e)である。図4と同様にそれぞれ同断面について材長を変化させた3体づつをまとめて示した。評価式はいずれも実験結果の初期勾配をウレタンも含めほぼ安全側に評価している。

図4中に(19)、(21)式より求めた振り変形状を点線で示している。図4(a)(b)の接着パネルはコアの機械的性質が不明のため表面板と等しくとったが、最大耐力まで評価式は比較的良好に追従している。(18)式から判断すれば最大耐力がほぼ表面板の降伏で決まるためと思われる。図4(c)(d)のロウ付けパネルはコア材の機械的性質を表面板の値と表3中()で示した値を共に示した。見掛け上の降伏は後者の評価位置に近いが以降素材の歪硬化の影響が考えられる。ちなみに後者の素材の引張強さはハニカムコアで 153N/mm^2 、丸コアで 132N/mm^2 である。丸コアパネルでは表面板の強度を考慮すれば大きな耐力の上昇がうなづける。図4(e)のウレタンパネルではマルチセルに置換する大胆な仮定にもかかわらずよく対応している。

5. 結び

アルミニウム合金サンドイッチパネルの振り性状を実験的に確認し、簡単なマルチセル置換によりその挙動の説明を試みた。

1. 初期の振り剛性は、外壁のみとした中空矩形断面評価で推測が可能である。
2. 振り耐力はコア材が表面板よりそのせん断耐力が低い場合、外壁から順次隔壁の内側へ降伏していくものとして評価できるものと思われる。
3. 接着ハニカム及びウレタンパネルは最大耐力以降耐力劣化する。
4. ロウ付けパネルは見掛け上の降伏から二次勾配で耐力上昇が認められる。ハニカムコアは丸コアに比較して耐力上昇に対して不安定な挙動を示す場合がある。

尚本研究は、アルミニウム建築構造協議会（松岡建会長）における研究活動の一環として行われたものである。

参考文献

- (1)井上哲郎、木村衛、橋本篤秀：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究（その54）—振り実験—日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp. 499~500、2001.9
- (2)木村衛、井上哲郎、橋本篤秀：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究（その68）—サンドイッチパネルの振り計画—日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp. 573~574、2003.9
- (3)日本アルミニウム協会：アルミニウム材料の特性データベースの整備、pp339~356、2001.3
- (4)例えば E.Schapitz（石崎訳）：軽量構造の力学、コロナ社、1966
- (5)アルミニウム建築構造協議会：アルミニウム建築構造設計規準・同解説 2003.5
- (6)寺西学、岡田久志、木村衛、橋本篤秀：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究（その38）—サンドイッチパネルの面外曲げ実験 I—日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp. 1013~1014、2000.9

(2005年2月9日原稿受理、2005年6月8日採用決定)