

アルミニウム箱形断面材と木材による合成構造柱に関する実験的研究

- 合成構造柱の耐力評価式 -

鉄建建設(株) ○石渡 康弘 千葉県庁 伊藤 有美
日大生産工 小松 博

1. はじめに

循環型社会が推進されている背景から、本研究ではアルミニウム箱形断面材に木材を挿入する合成構造柱を提案する。木材は節や繊維方向により耐荷性能のばらつきを生じ、アルミニウムは板の局部座屈を起こすため、合成構造とすることで互いの欠点を補うことが既往¹⁾の実験で確認されている。また、アルミニウムは一般的にアルマイト溶接を用いて利用されるが、本研究の提案であれば、図-1に示すように木質構造の仕口金物等によるネジやボルト留めが可能となり、簡易的な施工が実現できる。将来的には、木材を小径木などの未利用材や集成材とすることで、より資源の有効活用が期待できる。

前報¹⁾では木材の肌すきによる構造特性を確認するため、予め肌すきを有する柱材を用いて曲げ座屈実験を行い、座屈耐力や変形性能について検証した。

本報告では、曲げ座屈実験で得られた実験結果を参考に、柱材としての合成構造柱の耐力評価式の誘導を行い、それぞれの結果および耐力評価の妥当性を検証する。

2. 耐力評価式

耐力評価式を誘導するにあたり、木材（以下Wという）は異方性材料であることから引張実験により降伏応力を求めることができないため、Wの降伏応力は短柱圧縮実験により得られた最大耐力の平均値を使用して算出している。なお、前方における曲げ座屈実験においては、短柱圧縮実験により得られた値を用いた理論式による耐力評価が可能であると確認されたため、数値的な問題はないといえる。しかし、Wの評価方法に関しては明確な基準が存在しないことから、ここでの式の誘導では、すべて応力を耐力に置き換えて算出し、曲げ座屈実験で得られた実験結果との比較を行う。

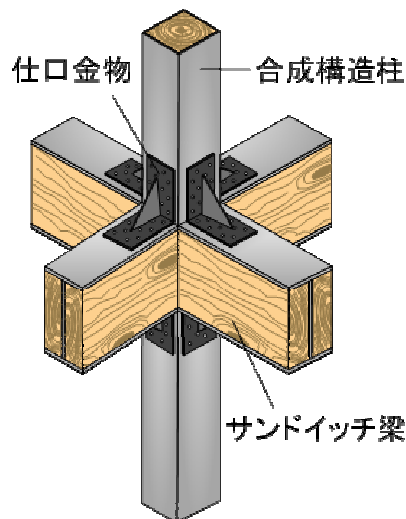


図-1 合成構造柱施工例

先に、耐力評価式の誘導において用いる記号および数値を以下に示す。

- A : 断面積(mm²)
- A_{AL} : アルミニウム箱形断面材
(以下ALという)の断面積(mm²)
- A_w : Wの断面積(mm²)
- E_{AL} : AL公称ヤング係数
(70000N/mm²)
- E_w : W公称ヤング係数
(杉: 7000N/mm²)
- E_{ALW} : 合成構造柱(以下ALWという)
ヤング係数 (N/mm²)
- EA : ALWヤング係数耐力換算値
($E_{AL} A_{AL} + E_w A_w$) (kN)
- i : 断面二次半径(mm)
- I : 断面二次モーメント(mm⁴)
- L : 座屈長さ(mm)
- n : 端末条件係数(両端ピン $n=1$)
- $(N_{max})_{AL}$: ALにおける実験値の
最大耐力(kN)

Experimental Study on Structural Properties of Aluminum and Wood
- Strength evaluation formula of Aluminum and Wood -

Yasuhiro ISHIWATA, Yumi ITO and Hiroshi KOMATSU

$(N_{\max})_W$: Wにおける実験値の
最大耐力(kN)

$(N_{\max})_{ALW}$: ALWにおける実験値の
最大耐力(kN)

$(P_{cr})_{AL}$: AL座屈耐力(kN)

$(P_{cr})_W$: W座屈耐力(kN)

$(P_{cr})_{ALW}$: ALW座屈耐力(kN)

$(P_y)_{AL}$: AL降伏耐力(kN)

$(P_y)_W$: W降伏耐力(kN)

$(P_y)_{ALW}$: ALW降伏耐力(kN)

$(\sigma_y)_{AL}$: 各ALの機械的性質より
降伏応力(N/mm²)

$(\sigma_y)_W$: 各Wの短柱圧縮実験結果より
算出した降伏応力(N/mm²)

$(\sigma_y)_{ALW}$:
ALW降伏応力($(\sigma_y)_{AL} + (\sigma_y)_W$ (N/mm²))

λ : 細長比

λ : 限界細長比

曲げ座屈実験において得られた結果より、
ALWの最大耐力は

$$(N_{\max})_{ALW} = (N_{\max})_{AL} + (N_{\max})_W \quad \dots(1)$$

で評価可能となる。

ここで、ALおよびWの単一柱において理論式を用いた耐力評価を行うため、限界細長比 λ を境界にJohnson式およびEuler式を適用する。このうち、木質構造の設計基準においては一般的にJohnson式ではなくTetmajer式を使用しているが、本研究においては最終的にALWとした場合の耐力評価を行うため、WにおいてもALと同様にJohnson式を用いて評価している。これより、ALWの耐力評価式を算出する場合も同一の式による累加が可能となる。また、WにおいてJohnson式を採用することで、Tetmajer式を適用したものと比較すると、Wの不均一性による影響である耐力低下がみられた場合にも、耐力評価式によって安全側に評価できると考えられる。

ALの耐力評価式は

$$(P_{cr})_{AL} = (P_y)_{AL} - \left(\frac{(P_y)_{AL}^2}{4n \pi^2 E_{AL} A_{AL}} \right) \lambda^2 \quad \dots(\lambda \leq \lambda) \quad \text{Johnson式} \quad (2)$$

$$(P_{cr})_{AL} = \left(\frac{n \pi^2 E_{AL} A_{AL}}{\lambda^2} \right) \quad \dots(\lambda > \lambda) \quad \text{Euler式} \quad (3)$$

で与えられる。

Wの耐力評価式は

$$(P_{cr})_W = (P_y)_W - \left(\frac{(P_y)_W^2}{4n \pi^2 E_W A_W} \right) \lambda^2 \quad \dots(\lambda \leq \lambda) \quad \text{Johnson式} \quad (4)$$

$$(P_{cr})_W = \left(\frac{n \pi^2 E_W A_W}{\lambda^2} \right) \quad \dots(\lambda > \lambda) \quad \text{Euler式} \quad (5)$$

となる。ただし、式(2)、(3)、(4)、(5)中の $(P_y)_{AL}$ 、 $(P_y)_W$ 、 λ は

$$(P_y)_{AL} = (\sigma_y)_{AL} \cdot A_{AL} \quad \dots(6)$$

$$(P_y)_W = (\sigma_y)_W \cdot A_W \quad \dots(7)$$

$$\lambda = \frac{L}{i} \quad \dots(8)$$

であり、 $(P_y)_{AL}$ 、 E_{AL} 、 A_{AL} 、 $(\sigma_y)_{AL}$ 、 $(P_y)_W$ 、 E_W 、 A_W 、 $(\sigma_y)_W$ 、 n 、 λ 、 L 、 i については耐力評価式の誘導において用いる記号および数値で示した通りである。

ここで、式(8)中の i は

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \dots(9)$$

である。

次に、ALWにおいてもALおよびWの単一柱と同様に理論式を用いた耐力評価を行うため、限界細長比 λ を境界にJohnson式およびEuler式を適用する。

ALWの耐力評価式は

$$(P_{cr})_{ALW} = (P_y)_{ALW} - \left(\frac{(P_y)_{ALW}^2}{4n \pi^2 EA} \right) \lambda^2 \quad \dots(\lambda \leq \lambda) \quad \text{Johnson式} \quad (10)$$

$$(P_{cr})_{ALW} = \left(\frac{n \pi^2 EA}{\lambda^2} \right) \quad \dots(\lambda > \lambda) \quad \text{Euler式} \quad (11)$$

で与えられる。なお、式(10)、(11)中の $(P_y)_{ALW}$ 、 EA は

$$(P_y)_{ALW} = (P_y)_{AL} + (P_y)_W \quad \dots(12)$$

$$EA = E_{AL} A_{AL} + E_W A_W \quad \dots(13)$$

である。各単一柱 (AL, W) において使用した $(P_y)_{AL}$ 、 $(P_y)_W$ および $E_{AL}A_{AL}$ 、 $E_W A_W$ を単純に累加し、ALW の降伏耐力ならびにヤング係数の耐力換算値として評価している。そして、それぞれの値を Johnson 式と Euler 式に適用することで ALW の耐力評価式の誘導を行った。

各試験体の断面性能を表-2 に、機械的性質を表-3 に示す。耐力評価式の誘導にはこれらの値を用いている。また、表-3 に示す ALW1 および ALW2 では、各単一柱 (AL, W) の値を単純に足し合わせたものである。

3. 破壊性状

曲げ座屈実験における1シリーズの破壊性状一覧を表-4に示す。破壊性状は、AL1では $\lambda=36$ において端部での局部座屈のみ生じたが、 $\lambda=55$ においては局部座屈および曲げ座屈がみられ、 $\lambda=76$ 、 97 では曲げ座屈のみとなった。ALW1においても、 $\lambda=36$ 、 55 で曲げ座屈および局部座屈の双方が生じたが、 $\lambda=76$ 、 97 では曲げ座屈のみ観察できた。また、W1では破断により試験機に設置した変位計を壊す可能性があるため、すべての試験体において破断までは荷重を行わなかった。そのため、実験中は弓なりの形状をみせたが、除荷後は弾性性能が現れたことでほぼ実験前と同様の形状となった。ただし、W1の破壊性状の確認のため細長比ごとに1体ずつは、曲げ破断に至るまで実験を行った。

表-4に示すように、AL1、ALW1では細長比が小さい試験体において、局部座屈を起こしたのもあったが、 $\lambda=76$ 以降の細長比が大きい試験体においては曲げ座屈のみ生じる結果となった。これは、細長比が大きくなるほどALの局部座屈よりも先に、Wの曲げ座屈により破壊性状が決定することが推測できる。

写真-1にALW1内部の破壊性状を示す。比較として、破断したW1の実験直後の写真をともに示している。ALW1においては、写真-1(a)のようなW1の曲げ破断が生じず、写真-1(b)に示す破壊性状となり、写真-1(c)のように内部の

W1には曲げ部分にクラックが発生しているものの、AL1の拘束効果によりW1の割れを抑えていることが確認できる。さらに、ALW1では写真-1のようなAL1の局部座屈も補剛する結果となった。

表-2 各試験体の断面性能

試験体	$A(\text{cm}^2)$	$I(\text{cm}^4)$	$i(\text{cm})$
AL (100×100×3)	11.6	183	3.97
W (94×94)	88.4	651	2.71
ALW (100×100)	100	834	2.89

表-3 各試験体の機械的性質

試験体(シリーズ)	$\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	$P_y(\text{kN})$	$E(\text{N/mm}^2)$	$EA(\text{kN})$
AL1	201	234	70000	81480
AL2	194	226		
W1	36.5	323	7000	61852
W2	29.5	261		
ALW1	238	556	77000	143332
ALW2	224	486		

表-4 曲げ座屈実験における2シリーズの破壊性状一覧

λ	試験体	破壊性状
36	AL1	端部での局部座屈
	W1	曲げ座屈(曲げ破断)
	ALW1	端部での局部座屈と中央部での曲げ座屈
55	AL1	局部座屈と曲げ座屈
	W1	曲げ座屈(曲げ破断)
	ALW1	局部座屈と曲げ座屈
76	AL1	曲げ座屈
	W1	曲げ座屈(曲げ破断)
	ALW1	曲げ座屈
97	AL1	曲げ座屈
	W1	曲げ座屈(曲げ破断)
	ALW1	曲げ座屈



(a) W1



(b) ALW1



(c) (b)ALW1の内部状態

写真-1 ALW1内部破壊性状

4. 耐力評価式の妥当性の検証

続いて、誘導した耐力評価式の妥当性を検証する。図-1および図-2に、曲げ座屈実験で使用した荷重・細長比関係を示す。理論式との比較のため、各材料における本来の細長比で実験値をプロットしている。図-1に示すように、1シリーズにおいてAL1では全ての細長比で耐力評価式と実験値がほぼ一致しているが、W1に関しては $\lambda=36, 55$ で概ね実験値の平均と一致し、 $\lambda=76, 97$ で実験値が耐力評価式を若干上回っている。ALW1においてもW1と同様に $\lambda=36, 55$ で概ね一致し、 $\lambda=76, 97$ で実験値が耐力評価式を上回る結果となった。このことから、1シリーズでは細長比が小さい場合もW1の耐力が概括的に高いため、ALW1の耐力はW1の耐力が影響し、W1と同様の細長比において実験値がALW1の耐力評価式を1.2倍程度上回っていることが確認できる。また、図-2に示す2シリーズにおいては、1シリーズと同様にAL2では耐力評価式と実験値が概ね一致しており、W2では $\lambda=76, 97$ で実験値の平均付近が耐力評価式とほぼ近似している。しかし、 $\lambda=55$ において実験値がW2の耐力評価式を下回ることから、1シリーズと比較しても2シリーズのW2は耐力が低くなっている。これは、W2を乾燥する過程でW1よりも材の反りなどが存在したことが要因となっていると考えられる。そのため、ALW2およびALWG（肌すきを有する材）においてもW2と同様の結果が得られた。なお、ALWGについてもALW2と同様の耐力評価が可能であることが確認できた。

以上の結果から、ALWの耐力評価を行う際にはWの耐力の影響を考慮することが必要であり、Wの材質のばらつきを考慮した指標を示すことも検討すべきであると考えられる。Wによるばらつきはあるものの、実験値と耐力評価式が概ね一致したことから、ALWの耐力評価式による座屈耐力評価は妥当であると判断できる。

4. まとめ

曲げ座屈実験で得られた実験結果を参考に、アルミニウム箱形断面材と木材の単一柱および合成構造柱の耐力評価式の誘導を行い、それぞれの結果および耐力評価式の妥当性を検証し、以下のことが明らかとなった。

1) アルミニウム箱形断面材と木材の単一柱および合成構造柱の耐力評価式の誘導にあたり、限界細長比を境界にJohnson式およびEuler式を適用し、実験値と概ね一致したため耐力評価式の妥当性が検証できた。

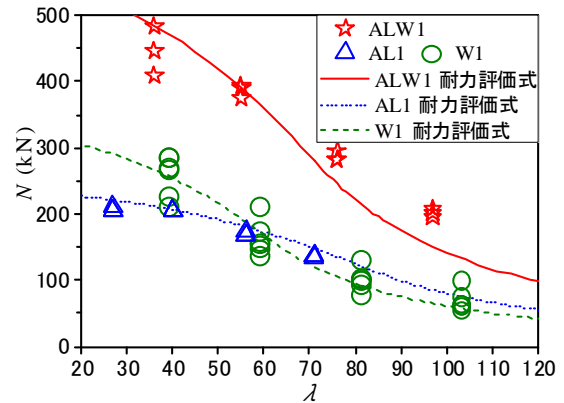


図-1 1シリーズの荷重—細長比関係

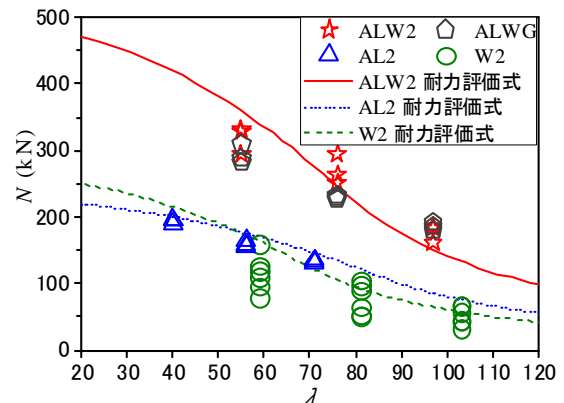


図-2 2シリーズの荷重—細長比関係

2) アルミニウム箱形断面材および木材の各単一柱において使用した降伏耐力およびヤング係数を単純に累加したものを、合成構造柱の降伏耐力ならびにヤング係数として評価した。それぞれの値をJohnson式とEuler式に適用することで合成構造柱の耐力評価式の誘導が可能となった。

3) 木材の不均一性による影響である耐力低下や耐力上昇がみられた場合は、合成構造柱においても耐力に影響を及ぼす結果となった。耐力評価式によってより安全側に評価するためには木材の耐力を考慮した指標が必要である。

4) 本実験の範囲での肌すきを有する材においては、一般材の耐力評価と同様の耐力評価式による評価が可能である。

以上のことから、アルミニウム箱形断面材と木材による合成構造柱の耐力評価式は、最大耐力と同様にアルミニウム箱形断面材および木材の値を単純累加することにより評価可能であることが明らかとなった。

「参考文献」

1)伊藤有美, 小松博:「アルミニウム箱形断面材と木材による合成構造柱に関する実験的研究—木材の肌すきによる構造性能—」2014年度日本大学生産工学部第47回学術講演会講演概要