

木鋼ハイブリッド梁「MuKu+WOOD®」の開発

Development of the MuKu+WOOD® Wood-Steel Hybrid Beam

川瀬 晶子^{※1}
Shouko Kawase

阿部 隆英^{※1}
Takahide Abe

佐藤 匠^{※1}
Takumi Satou

實成 康治^{※2}
Kouji Jitsunari

【要旨】

木鋼ハイブリッド梁「MuKu+WOOD（むくっど）」は、集成材と鋼製部材を組み合わせた小梁である。鋼製部材の働きによって長期荷重による集成材のたわみが抑制されるため、集成材のみの梁と比較して、小さな梁せいで大スパン（最大 14 m）に対応することができる。また、一般的に張弦梁と称される部材と比較しても梁せいを抑えることができるため、屋根だけでなく、庁舎や事務所ビルなどの一般階の床にも適用することができる。

筆者らは、載荷実験により MuKu+WOOD の設計手法の妥当性を確認した。また、MuKu+WOOD の設計指針について 2024 年 2 月 29 日に日本 ERI 株式会社の構造性能評価（ERI-K23005）を取得した。

本報では、MuKu+WOOD の概要と設計方針、載荷実験について述べる。

【キーワード】 ハイブリッド梁 集成材 ターンバックル たわみ抑制 張力

1. はじめに

近年、脱炭素社会の実現に向けて建築分野における木材の利用が推進されており、2010 年に制定された「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が、2021 年の法改正により「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」と改題され、対象が民間建築物を含む建築物一般に拡大されるなど、法整備が進められている。

こうした動きの中で、純木造建築物については、従来の戸建て住宅に加えて、中大規模の公共建築物、さらに事務所ビルなどの民間建築物への適用が進んでいる。しかし、純木造建築物は鉄筋コンクリート（以下、RC）造、鉄筋鉄骨コンクリート（以下、SRC）造または鉄骨（以下、S）造の建築物と比較して、部材の耐力や剛性が小さいこ

と、耐火に関する規定が厳しいことなどから、建築物の用途や規模、建築地が限定的となる。

そこで、筆者らは、より汎用性の高い建築物として木質混構造建築物に着目し、建築物の設計検討および技術開発を進めている。具体的には、耐力・剛性が高く耐久性、耐火性も期待できる RC 造、SRC 造または S 造の部材で主フレームを作り、軽量で可変性に優れた木質部材で小梁や床、壁を作る方針としており、その一環として、木鋼ハイブリッド梁「MuKu+WOOD®」を開発した。

2. MuKu+WOOD の概要

2.1 部材構成

MuKu+WOOD の概要を図-1 に示す。MuKu+WOOD は、集成材（木梁および間柱）と鋼製部材（ターンバック

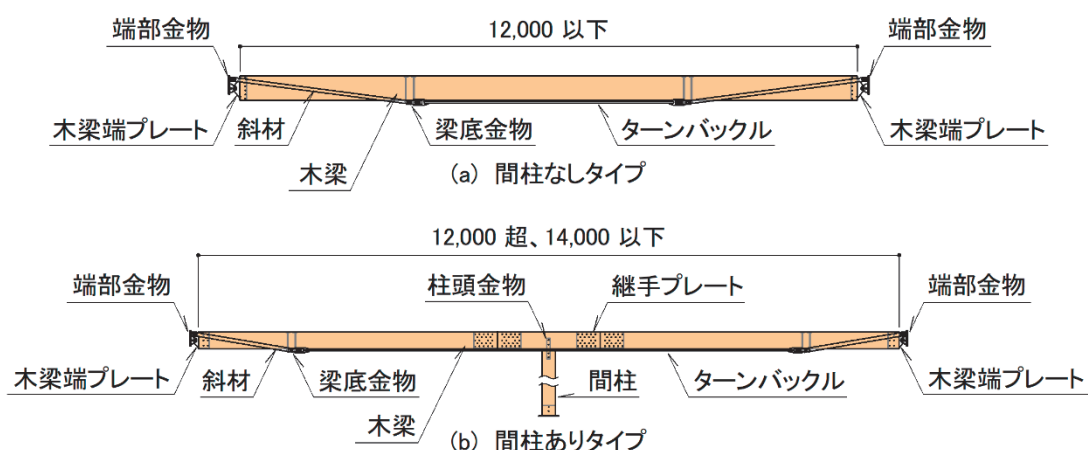


図-1 MuKu+WOOD の概要

図-2にMuKu+WOODの詳細を示す。ターンバックルと斜材を木梁の両側面に配置し、木梁と端部金物の接合部、ターンバックルと梁底金物の接合部、斜材と端部金物および梁底金物の接合部については、いずれもピン接合としている。また、アンカーボルトなどを用いて端部金物をRC造などの主フレームに接合し、六角ボルトを用いて梁底金物を木梁に接合している。間柱ありタイプでは、柱頭金物を用いて間柱頭部を木梁に接合し、柱脚金物を用いて間柱脚部をRC造スラブなどに接合している。なお、木梁には必要に応じて、鋼板挿入式ドリフトピン接合の継手を設けてもよい。

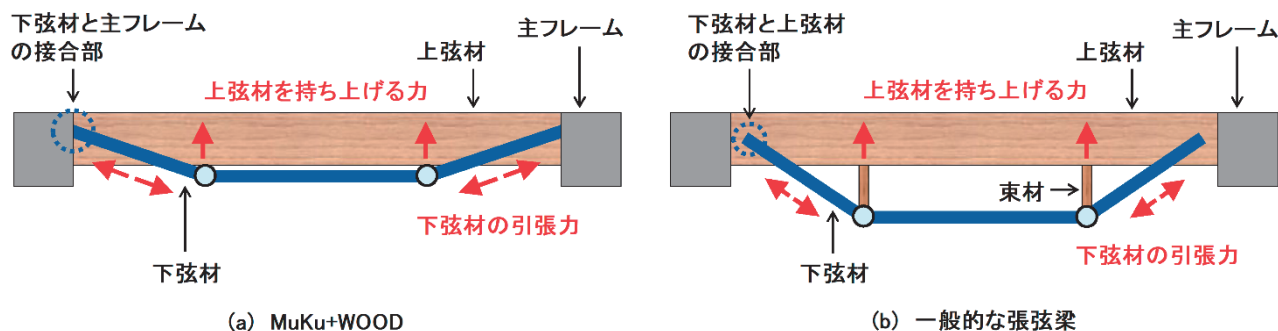
集成材のみの梁は剛性が小さく、たわみを抑えるために梁せいを大きくする必要があるため、一般流通サイズ（梁幅 105 mm または 120 mm、梁せい 450 mm 以下）の集成材では対応できず、特注サイズの集成材を使用することから材料のコストが増大するケースがある。また、梁せいを大きくすると建築物の階高が高くなる必要が生じ、意匠計画に影響する可能性がある。

(以下、床荷重)が作用して斜材およびターンバックルに引張力が生じると、斜材の引張力の鉛直成分と釣り合うように木梁を持ち上げる力が生じる。この理由から、MuKu+WOOD は木梁のせいを大きくせずにたわみを抑えることが可能となる。また、施工時にターンバックルを締結して張力を導入し、木梁にむくり(凸状の変形)を生じさせることで、床荷重による木梁のたわみをより小さく抑えることができる。集成材のみの梁では特注サイズであった場合でも、MuKu+WOOD の採用により一般流通サイズの集成材で対応でき、コストの削減にもつながる。

一般的な張弦梁は上弦材，下弦材と束材から成り，下弦材の端部を上弦材に接合する．下弦材が負担できる引張力は，下弦材と上弦材の接合部の耐力によって決定される．上弦材を木材とした場合は接合部の耐力が小さいため，下弦材の引張力も小さく抑える必要がある．下弦材の引張力の鉛直成分が上弦材を持ち上げる力と釣り合うため，下弦材の勾配を大きくして引張力に対する鉛直成分の割合を増やせば，上弦材を持ち上げる力も増やすことができるが，この場合は全体の梁せいが大きくなるため，適用箇所が大空間の屋根などに限られる．

一方、MuKu+WOOD は、上弦材（木梁）と下弦材（斜材、ターンバックル）から成り、束材は無い。斜材の端部





図－3 MuKu+WOOD と一般的な張弦梁の概要

表－1 MuKu+WOOD と一般的な張弦梁の特徴の比較

	MuKu+WOOD	一般的な張弦梁
主な構成部材	上弦材、下弦材	上弦材、下弦材、 束材
下弦材の端部	主フレーム に接合	上弦材 に接合
下弦材の接合部耐力	大きい	小さい
下弦材の引張力	大きくできる	小さくする必要がある
下弦材の勾配	小さくできる	大きくする必要がある
梁せい	小さい	大きい
適用箇所	事務所などの 一般階 の床	階高に余裕のある 大空間の屋根 など

を端部金物に接合しており、斜材の引張力は端部金物を介して耐力の大きい主フレームに伝達されるため、斜材にも大きな引張力を負担させることができる。斜材の勾配を小さくして全体の梁せいを抑えても、木梁のたわみを抑える効果を十分に得ることができるため、庁舎や事務所ビルの一般階の床にも適用することができる。

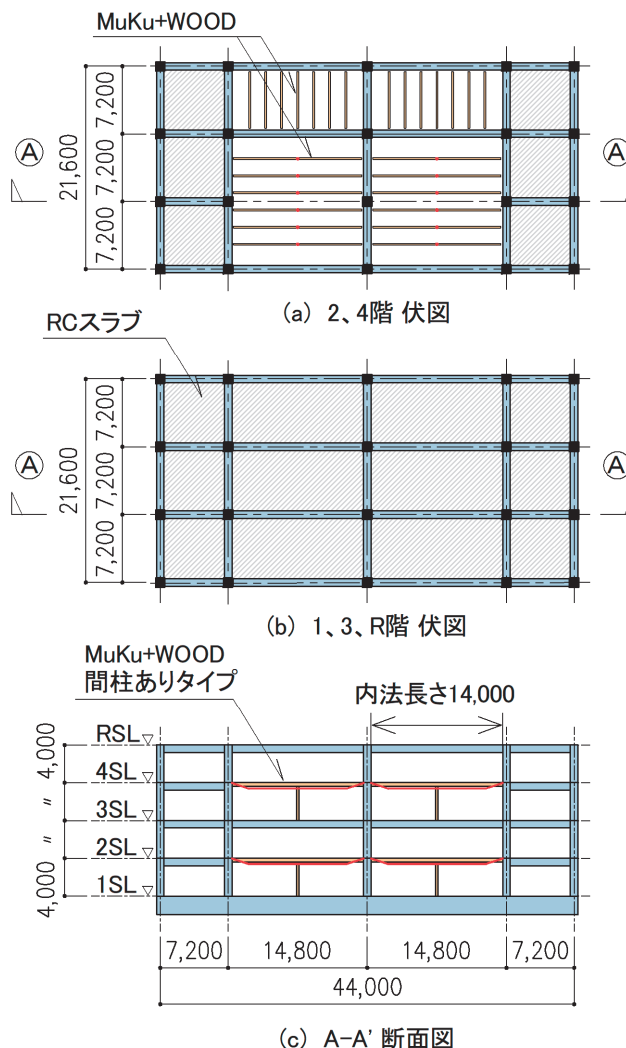
2.3 MuKu+WOODを適用した建築物の提案

MuKu+WOOD を適用した建築物の提案例を図－4に示す。この建築物は4階建であり、主フレームをRC造として、1、2階と3、4階にそれぞれ2層にわたる吹き抜け空間を設け、MuKu+WOOD および木材の床板を設置することで層を区切る計画としている。将来的な用途変更の際には、MuKu+WOOD の撤去・架け替え等を行うことが可能であり、水平方向だけでなく鉛直方向にも内部空間を自由に作り変えることができる。よって、主フレームを長期間使用し、内部についてはライフスタイルの変化に対応して更新・改修を行うことができる。

3. 設計方針

3.1 基本方針

木梁および斜材の端部を主フレームに対してピン接合としていることから、建築物において、MuKu+WOODはターンバックルへの張力導入と床荷重を合わせた荷重（以下、長期荷重）のみ負担する。MuKu+WOODの設計では、長期荷重に対して各部材の応力度が長期許容応力度以下、変形増大係数を考慮したたわみが $1/250$ rad以下となることを確認する。変形増大係数は2とする。



図－4 MuKu+WOOD を適用した建築物の提案例

3.2 解析モデル

微小変形解析により MuKu+WOOD の各部材の変形・応力を算定する。解析モデルを図-5に示す。張力導入時と床荷重作用時でターンバックルの応力-変形関係が異なるため、「初期モデル」と「床荷重モデル」をそれぞれ作成して、張力導入と床荷重に対する変形・応力を別個に算定する。初期モデルではターンバックルを配置せず、張力導入によるターンバックルの引張力を節点荷重として与える。床荷重モデルではターンバックルを線材モデルに置換し、軸剛性を考慮する。

木梁、間柱および斜材については、それぞれ線材モデルに置換し、木梁では曲げ剛性・せん断剛性・軸剛性を考慮し、間柱および斜材では軸剛性を考慮する。木梁に継手を設ける場合は、継手の回転剛性・せん断剛性・軸剛性を考慮する。

図-6に示すように、斜材・ターンバックルの接合部と木梁の間には線材モデル（以下、束材）を配置する。束材の軸剛性は梁底金物の木梁へのめり込み剛性とし、曲げ剛性およびせん断剛性はいずれも剛とする。

梁底金物と木梁の間では、六角ボルトの引張や梁底金物の木梁へのめり込みなどによって応力伝達が行われる。そのため、束材と木梁の接合部（以下、束材基端）については半剛接合とするのが妥当と考えられる。しかし、束材基端の剛性は、六角ボルトの引張剛性や梁底金物のめり込み剛性を考慮した等価剛性とする必要があり、部材形状などから算定することは困難である。そこで、束材基端については、①ピン接合とした場合、②剛接合とした場合について、それぞれ変形・応力を算定する。

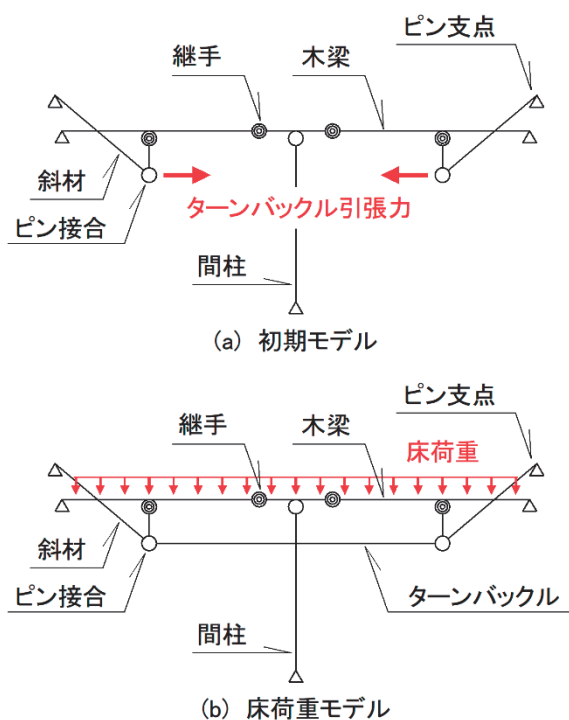


図-5 解析モデル

3.3 応力と変形

長期荷重に対する変形・応力は、張力導入に対する変形・応力と、床荷重に対する変形・応力の和とする。

ただし、間柱ありタイプの木梁の変形および曲げモーメント、間柱の軸力については、張力導入に対する値と床荷重に対する値に割増係数1.06を乗じた値との和を長期荷重に対する値とする。なお、割増係数は、4章に示す載荷実験の結果に基づき設定した値である。

4. 載荷実験

4.1 実験計画

ターンバックルに張力を導入して木梁をむくらせた状態で、木梁に鉛直載荷を行った。

試験体は、間柱なしタイプと間柱ありタイプを各1体とした。間柱なしタイプは木梁長さを5,970 mmとした。間柱ありタイプは木梁長さを13,620 mmとして、中央から1,000 mm離れた位置に1か所ずつ継手を設けた。

試験体の設計用床荷重は、室用途を事務室と仮定して、5.6 kN/mとした。木梁および間柱は対称異等級構成集成材とし、樹種はオウシュウアカマツ、強度等級はE105-F300とした。断面形状は、間柱なしタイプの木梁を120 mm×240 mm、間柱ありタイプの木梁を120 mm×330 mm、間柱を120 mm×270 mmとした。斜材、梁底金物および端部金物の材質はSM490A、木梁端プレートおよび継手プレートの材質はSS400とした。ターンバックルの材質はSN400BおよびSNR400Bとし、ねじの呼び径は間柱なしタイプでM22、間柱ありタイプでM27とした。

載荷装置を図-7に示す。高力ボルトにより端部金物を鉄骨治具に固定し、間柱ありタイプでは間柱脚部をRC造の反力床に固定した。

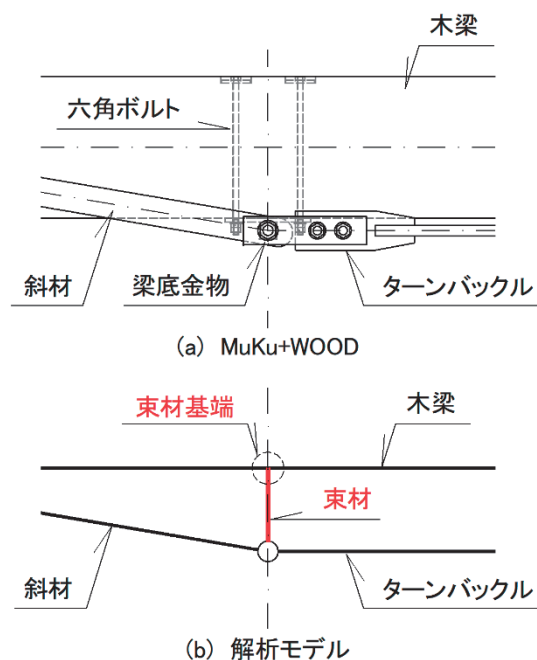


図-6 束材

張力導入時のターンバックルの引張力（2本の合計値） tN は、間柱なしタイプで9.1 kN、間柱ありタイプで63.5 kNとした。

設計用床荷重は等分布荷重としたが、4.3に示すように実験結果と解析結果を比較することを踏まえ、実験では、再現性の高い集中荷重による鉛直載荷を行った。載荷点は2箇所とした。なお、集中荷重の場合は載荷位置によって各部材に生じる応力が変化するため、予備解析により等分布荷重の場合と同程度の応力が生じる載荷位置を確認し、その結果として梁底金物の芯の位置を載荷位置とした。間柱なしタイプでは、鉛直荷重（2点の合計値） $P=5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$ kNの片押しを3サイクルずつ繰り返し、間柱ありタイプでは、 $P=10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200$ kNの片押しを3サイクルずつ繰り返した。

4.2 実験結果

実験による張力導入および鉛直荷重に対する変形・応力を表-2に示す。なお、試験体の設計用床荷重は5.6 kN/mであり、長さに乗じると間柱なしタイプは35 kN、間柱ありタイプは78 kNとなることから、表中の鉛直荷重に対する変形・応力については、間柱なしタイプでは $P=40$ kNのサイクル、間柱ありタイプでは $P=80$ kNのサイクルにおける値を示している。

4.3 実験結果と解析結果の比較

初期モデルを用いて張力導入に対する変形・応力、床荷重モデルを用いて鉛直荷重に対する変形・応力を算定した。それぞれの結果を表-3に示す。解析における各部材の材料特性は、試験体の実験結果に基づき設定した。また、実験結果との比較のために、張力導入時の tN は間柱なしタイプで9.1 kN、間柱ありタイプで63.5 kNとし、 P は間柱なしモデルで37.4 kN、間柱ありモデルで80.4 kNとした。載荷位置は梁底金物の芯の位置とした。

実験結果と解析結果の比較を表-4に示す。表中の「実験値」は表-2に示した張力導入および鉛直荷重に対する変形・応力の和、「解析値」は表-3に示した張力導入および鉛直荷重に対する変形・応力の和、「解析/実験」は、解析値の最大値を実験値で除した値である。ただし、間柱ありタイプの本梁の最大変形、本梁の載荷点の曲げモーメント、間柱の軸力の解析値については、張力導入に対する値と鉛直荷重に対する値に割増係数1.06を乗じた値との和を長期荷重に対する値とした。

実験値と解析値に差異が生じた理由としては、解析モデルにおいて本梁と梁底金物の接合部を束材によりモデル化したことで、斜材・ターンバックルと本梁の間の応力伝達が実態と異なるものとなったことが挙げられる。しかし、解析/実験はいずれも1以上となったことから、解析モデルを用いて設計用の変形・応力を算定する点においては、3章に示した設計方針は妥当なものであると

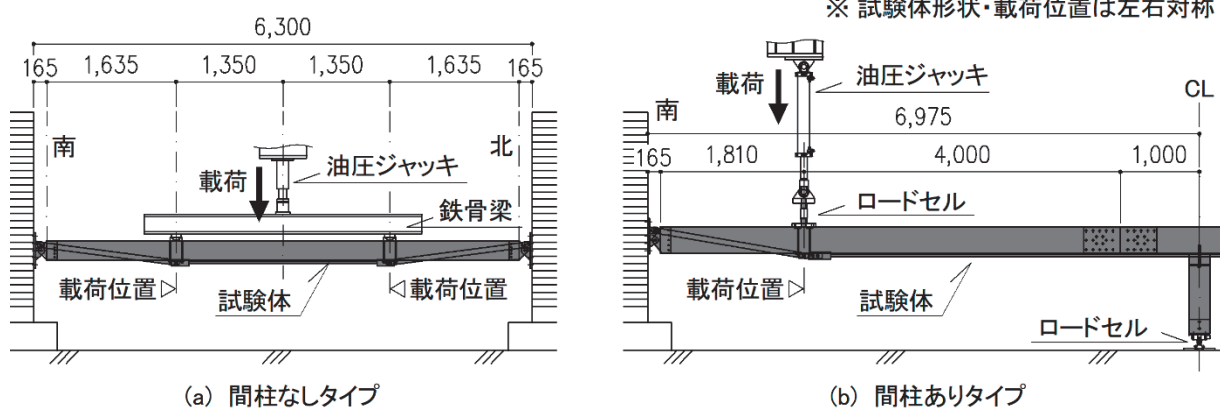


図-7 載荷装置

表-2 実験による張力導入および鉛直荷重に対する変形・応力

試験体	間柱なしタイプ		間柱ありタイプ	
	張力導入	鉛直荷重 (40kNサイクル)	張力導入	鉛直荷重 (80kNサイクル)
P (kN)	—	37.4	—	80.4
δ (mm)	-3.2	22.7	-7.2	17.2
${}_wM$ (kN・m)	1.7	-9.4	11.4	-29.7
${}_wQ$ (kN)	-0.7	5.0	-5.4	13.3
${}_tN$ (kN)	9.1	91.4	63.5	70.6
${}_sN$ (kN)	5.1	97.1	58.2	95.5
${}_mN$ (kN)	—	—	8.0	-20.0

δ : 本梁の最大変形

(正が下向き、負が上向き)

${}_wM$: 本梁の載荷点の曲げモーメント

${}_wQ$: 本梁の載荷点のせん断力

${}_tN$: ターンバックルの引張力

(2本の合計値)

${}_sN$: 斜材の引張力

(2本の合計値)

${}_mN$: 間柱の軸力

(正が引張力、負が圧縮力)

表-3 解析結果

試験体	間柱なしタイプ				間柱ありタイプ			
	ピン接合		剛接合		ピン接合		剛接合	
	張力導入	鉛直荷重	張力導入	鉛直荷重	張力導入	鉛直荷重	張力導入	鉛直荷重
P (kN)	—	37.4	—	37.4	—	80.4	—	80.4
δ (mm)	-5.6	29.8	-3.5	28.8	-7.4	15.5	-4.9	14.3
${}_wM$ (kN・m)	2.0	-10.9	1.5	-11.5	12.7	-27.6	10.5	-28.0
${}_wQ$ (kN)	-1.2	6.4	-0.3	4.4	-6.8	14.7	-2.4	10.9
${}_tN$ (kN)	9.1	94.0	9.1	82.9	63.5	100.3	63.5	83.8
${}_sN$ (kN)	9.2	94.8	2.1	110.1	64.4	101.7	33.6	124.0
${}_mN$ (kN)	—	—	—	—	7.9	-17.2	6.3	-17.3

表-4 実験結果と解析結果の比較

	間柱なしタイプ				間柱ありタイプ			
	実験値	解析値		解析/実験	実験値	解析値		解析/実験
束材基端	—	ピン接合	剛接合	—	—	ピン接合	剛接合	—
P (kN)	37.4	37.4	37.4	1.00	80.4	80.4	80.4	1.00
δ (mm)	19.5	24.2	25.3	1.30	10.0	9.1	10.3	1.03
${}_wM$ (kN・m)	-7.7	-8.8	-10.0	1.30	-18.3	-16.5	-19.2	1.05
${}_wQ$ (kN)	4.3	5.2	4.1	1.20	7.9	7.9	8.5	1.08
${}_tN$ (kN)	100.5	103.1	92.0	1.03	134.2	163.9	147.4	1.22
${}_sN$ (kN)	102.3	103.9	112.2	1.10	153.7	166.2	157.5	1.08
${}_mN$ (kN)	—	—	—	—	-12.0	-10.3	-12.0	1.00

判断できる。ただし、前述の割増係数 1.06 は、実験結果を基に設定した値であることから、適用範囲を適切に設定して用いる必要がある。

6. まとめ

本報では、MuKu+WOOD の概要と設計方針、載荷実験について述べ、実験結果と解析結果の比較により、以下に示す MuKu+WOOD の設計方針の妥当性を確認した。

- ①初期モデルと床荷重モデルを用いて張力導入および床荷重に対する変形・応力を別個に算定し、それぞれの和を長期荷重に対する変形・応力とする。
- ②木梁と梁底金物の接合部は束材によりモデル化し、束材基端はピン接合とした場合、剛接合とした場合でそれぞれ変形・応力を算定する。

MuKu+WOOD の設計手法については、「木鋼ハイブリッド梁『MuKu+WOOD』設計指針」にまとめ、2024 年 2 月 29 日に日本 ERI 株式会社の構造性能評価 (ERI-K23005) を取得した。今後は、RC 造などの主フレームと MuKu+WOOD を組み合わせた木質混構造建築物の提案を行い、木材の有効利用を進めていく。

【参考文献】

- 1) 大野啓介, 石鍋雄一郎, 中島肇: 鉛直荷重に対する張弦梁構造の弾塑性挙動に関する基礎的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, 2020.3

Summary The wood-steel hybrid beam “MuKu+WOOD” is a beam that combines laminated timber and steel members. The steel members suppress the deflection of the laminated timber due to long-term loads, allowing the material to handle larger spans (up to 14 m) with smaller beam depth compared to beams made solely of laminated timber. In addition, since the beam depth can be reduced compared to components generally referred to as string beams, it can be used not just for roofs, but for floors on office floors in government buildings and office buildings.

The authors conducted loading experiments to confirm the validity of the design guidelines for MuKu+WOOD and obtained a structural performance evaluation certificate (ERI-K23005).

This paper presents an overview and the design policy for MuKu+WOOD and the loading experiment.

Key Words : Hybrid Beam, Laminated Timber, Turnbuckle, Deflection Suppression, Tension