

1. はじめに

近年、CO₂ 排出の抑制について様々な対策の立案や技術開発がされている中で、CO₂ 排出量について土木工事・構造物に関する技術報告がある。¹⁾²⁾³⁾ 現在、土木分野では土木構造物の材料として適所に木材や木質材料を用いようとする試みが各地で進められ、国産材の需要拡大により地域経済の活性化、景観との調和、さらには木材使用による炭素固定効果が見込まれている。⁴⁾ さらに、小規模な建設構造物であるコンクリート擁壁と木製擁壁についての CO₂ 排出量を算出した枝澤・澤田・水口による報告⁵⁾ より木材利用の有効性が確認されている。一方で、所有橋梁の内 3 割が木橋である西オーストラリア州の交通量増加などによる橋梁架替への報告⁶⁾ では架替え案に木橋ではなく鋼橋やコンクリート橋が選定される傾向がある。

そこで、木材の特性である炭素固定に注目して、剛性や強度を考慮しながら橋梁などの土木構造物への木材の利用を考える。これまで CLT など、木材の繊維方向を変えて積層して木材の異方性による影響を低減させるような研究や開発が行われてきた。⁴⁾ しかし、現在普及している CLT でもある程度の厚さの木材を繊維方向を直交させて積層していることから、平面方向の剛性均一化はできていない。そこで本研究では、木材の繊維方向を細かく変えることで全体の剛性を保ちつつ異方性の影響を低減できるような新たな木質パネルを提案し、実験および数値解析で検討する。

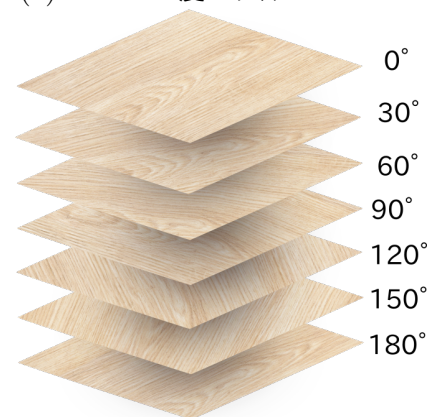
2. 多方向積層パネル

従来の CLT パネルは繊維方向を直交させて積層することで 2 軸の曲げ剛性が要求される場面で天然の木材が持つ異方性の問題を一定程度解決しているが、それと同時にパネルの強軸方向剛性が木材の繊維方向剛性の半分程度まで落ちてしまう。そこで

本研究では図-1 に示すような、木材の繊維方向を直交積層より細かく角度を変えて積層することで異方性の影響を低減し剛性の均一化を目指すモデルを提案する。図-1 のような非常に薄い木質ラミナを繊維方向を多方向に回転させて積層したモデルを MALT(multi angle laminated timber) モデルと呼び、積層方向を 45 度ずつ回転させたモデルと 30 度ずつ回転させたモデルを考案した。また、シート状の木材を積層する特徴を活かして将来的には積層単板の間に複数の繊維シートを挿入し補強することで等方的に剛性を高めた木質パネル材を目指す。



(a)MALT45 度モデル



(b)MALT30 度モデル

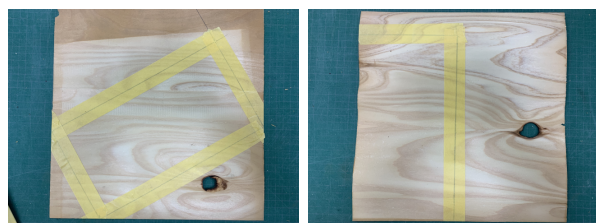
図-1 MALT のイメージ図

3. 実験概要

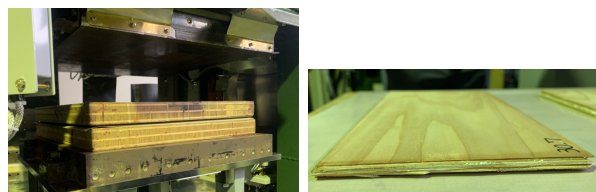
MALT の力学的特性の把握のため実際に試験体を作成して曲げと引張の試験を行った。

(1) 試験体作成

今回の試験体作成においては、木材の繊維方向を45度ずつ回転させ5枚積層したものと、30度ずつ回転させて7枚積層した MALT に加えて、繊維方向を直交させて5枚積層したものと同一方向に5枚積層したものも作成した。使用した木材はスギの1mm厚単板である。写真-1(a),(b)に示すような30cm×30cmの単板から積層に必要な角度に切り取る。接着剤はAPI（水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤）を使用しており、1枚あたり200g/m²になるように塗布しローラーで均等になるように広げる。写真-1に示すようなモデルの角度と合わせて積層し、写真-1(c)に示すプレス機を使用して1MPaの圧力で1時間圧着する。写真-1(d)は1時間圧着し終わったものでこれをさらに24時間養生して接着剤を硬化させる。接着剤が硬化し終わった積層部材からJISに則ったそれぞれの試験規格に合うように表-1に示すサイズで試験体を切り出す。また、使用した単板の端材で含水試験を行った結果、平均で9.0%と湿っているものではなく接着性能への悪影響がないことを確認している。



(a) (b)



(c) (d)

写真-1 試験体作成手順

(2) 曲げ試験と引張試験

曲げ試験と引張試験の両方で SHIMADZU のオートグラフ AGS-X 50kN 試験機を使用した。曲げ試験は3点曲げで試験を行い、スパン長(l)と

表-1 試験体サイズ

	曲げ		引張	
	幅 (mm)	長さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)
5枚積層	25	200	25	240
7枚積層	25	230	25	240

部材厚(t)の関係が $l \geq 25t$ となるように、5枚積層部材である MALT45、直交積層、同一方向積層の試験体のスパン長は125mmとし、7枚積層である MALT30 のスパン長は175mmとした。測定値はクロスヘッド部の荷重と変位である。また、荷重速さは1N/sで試験を行った。

引張試験では治具で挟む部分が両端45mmずつでスパン長が150mmである。測定値はクロスヘッド部の荷重と変位に加えて、スパン中央部両面に貼り付けたひずみゲージの値である。また、荷重速さは15N/sで試験を行った。



(a) (b)

写真-2 曲げ試験と引張試験の様子

(3) 試験結果

曲げ試験結果は測定したクロスヘッドの荷重と変位を式-1に代入してヤング率 E を算出した結果と最大荷重を表-2に示す。

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} \quad (1)$$

作成資材の関係上3点曲げ試験を行った試験体は MALT45 と MALT30 が5本で直交積層と同一方向積層が3本ずつである。結果としては、直交積層と同一方向積層の試験体が MALT 試験体より少ないデータではあるが、それぞれヤング率を平均すると同一方向積層の次に MALT45 が高い結果を示

表-2 曲げ試験結果

試験体	ヤング率 (GPa)		最大荷重 (N)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
45	4.88	0.48	142.5	15.1
30	4.06	0.29	133.0	12.4
C	4.35	0.41	117.6	5.1
L	6.09	0.44	151.0	40.1

して、次いで直交積層、MALT30 という結果であった。

引張試験結果は測定した荷重をスパン中央部の断面積で除することで応力を算出し、スパン中央部両面に貼り付けたひずみゲージから得られたひずみの値を平均して応力-ひずみの関係からヤング率を算出したものと破断時の応力を表-3 に示す。ヤング率

表-3 引張試験結果

試験体	ヤング率 (GPa)		破断応力 (N)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
45	3.63	0.44	15.24	0.71
30	3.69	0.47	13.99	1.29
C	4.91	0.56	17.47	0.85
L	7.05	0.30	25.95	7.71

や破断応力の結果として同一方向積層の次に直交積層が高い値を示している。

4. 解析モデルと手法

次に FEM 解析を用い、より具体的に検討した。解析には有限要素法解析ツール Salome-Meca2019 を用いた。

既往研究で行っていた多方向積層部材の 4 辺単純支持された平板の解析に引き続き、異方性の緩和具合の確認と出力された応力とひずみの値からヤング率を算出し剛性評価を行う解析を行った。加えて曲げ試験を行った試験体の再現モデルを作成し実際の曲げ試験と同様の 3 点曲げ解析を行って実験結果との比較検討を行った。

(1) 解析手法

異方性の緩和具合を精査する解析では、単板を 45 度ずつ積層方向をずらして積層した MALT モデル

に加えて 30 度ずつずらしたモデルを作成した。30 度ずつ積層方向をずらす MALT モデルは 0 度、30 度、60 度、90 度、120 度、150 度、180 度と 7 枚で積層方向の角度が 1 周するので、45 度 MALT モデルと 30 度 MALT モデルの板厚を揃えるために板厚は 35mm とした。また、モデルは 1 辺 1000mm の正方形平板で 1kN 荷重想定で $0.001N/mm^2$ の等分布荷重を載荷した。

実際の試験を再現するモデルは各試験体と同じように積層角度を変えながら幅や厚さ、長さを合わせて作成した。この時、解析上で設定する材料のヤング率は同一方向積層部材の前試験の結果を参考に強軸方向 (E_x) を 6000MPa とした。異方性の設定としてはシート状の木材ということを考慮して弱軸方向ヤング率 (E_y, E_z) は強軸方向ヤング率の $\frac{1}{100}$ (60MPa) とし、せん断弾性係数 G とポアソン比 ν は全方向一様とし、それぞれ 60MPa、0.016 とした。また、試験体は積層単板を API (水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤) で接着しているが、解析モデルにおいては考慮せず、各積層単板は剛結である。行った解析は線形解析であるため試験結果との比較は弾性域内で行う。

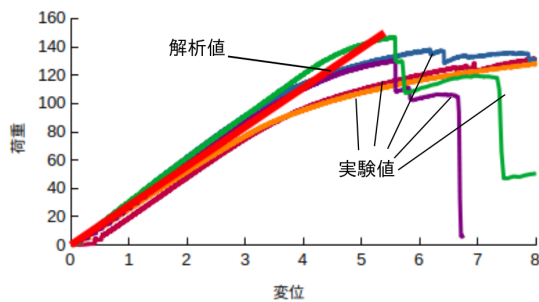
5. 解析結果

(1) 試験再現モデル

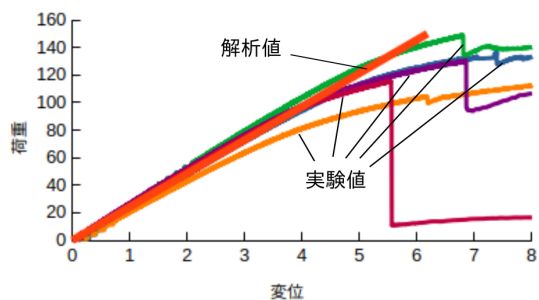
試験データと解析データを縦軸に荷重、横軸に変位をとってプロットした結果としてそれぞれ図-2 の MALT45 は (a)、MALT30 は (b)、直交積層は (c)、同一方向積層は (d) に示す。全モデルの結果において弾性域内での試験結果と解析結果の挙動がとても近いような結果が得られた。解析モデルの再現性の高さが確認できた事に加えて、試験体において接着剤の影響が無く、単板同士が剛結して作用していることを示唆するような結果であった。

(2) 異方性緩和具合の確認

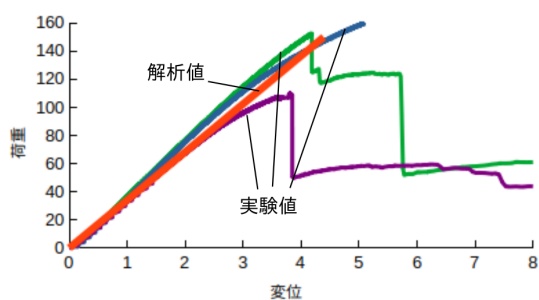
異方性緩和具合の確認のため 0 度から 180 度の間で 15 度ずつ回転させながらの解析して得られた直交するひずみの値を部材厚方向にプロットした。回転角を 15 度としたことから MALT モデルにお



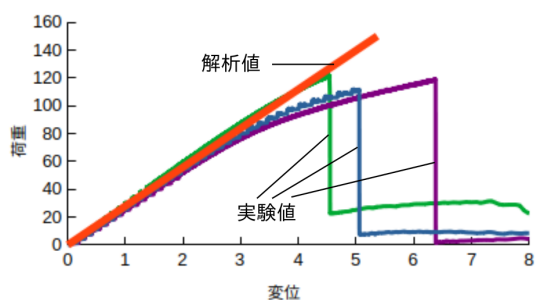
(a) MALT45



(b) MALT30



(c) 同一方向積層

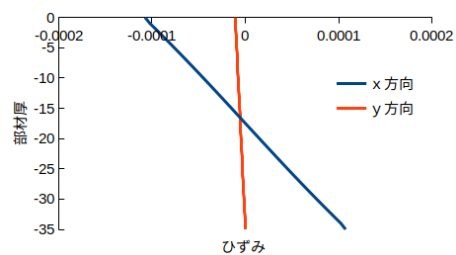


(d) 直交積層

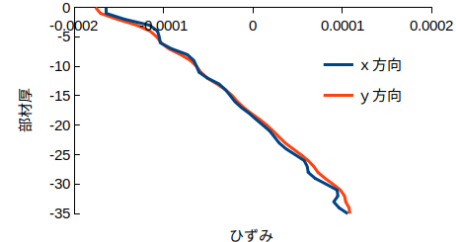
図-2 荷重と変位の関係

いて 12 パターンのグラフができたが、全てのパターンで直交方向ひずみが重なる等方性のような挙動を示す傾向がみられた。そこで、MALT モデルの代表例として MALT45 モデルを 15 度回転させた時の解析結果を図-3(a) に示す。さらに、比較対称として直交異方性モデルの結果を図-3(b) に示す。

結果としては直交異方性モデルでは x 方向ひずみと y 方向ひずみが全く違う挙動を示しているのに対して、45 度モデルでは x 方向ひずみと y 方向ひずみが重なるような挙動で等方性に近い挙動を示した。



(a) 直交異方性モデル



(b) 45 度 MALT モデル

図-3 厚さと xy 方向ひずみの関係

(3) 剛性評価

図-3 で示すひずみの結果を得たノードの直交方向それぞれの直応力結果を出力し、応力-ひずみの関係から 1 層毎のヤング率を算出した。1 層毎 35 層のヤング率を算出した後に厚さ方向に平均することで解析モデル全体のみなしヤング率とした。直交方向のひずみで異方性緩和具合を確認したときと同様に、0 度から 180 度の間で 15 度ずつ回転させた時のヤング率を出すことで解析モデル全体のヤング率を確認した。各層ごとのヤング率を厚さ方向に平均してさらに平面方向に平均した結果はモデルの強軸ヤング率が $2421.8MPa$ で弱軸ヤング率が $2442.1MPa$ とその差が 0.8% であった。これより、繊維方向ヤング率が $6000MPa$ で設定していたのに対して半分以下のヤング率しか発揮できていないものの、剛性の均一化という点では良好な結果が得られた。

6. 橋梁モデル

上記の結果から、MALT を等方性のパネル材とみなして合成桁橋の床板として使用した時にコンク

リート床板と比較してどのような挙動が得られるのかを確認する。一般的なコンクリートと木材の材料特性を比較すると、橋全体の重量や強度、剛性などに差異が出ることが予想できるため、合成桁橋の鋼桁にかかる応力を FEM 解析で算出して比較検討をおこなう。

(1) 橋梁諸元とモデルの妥当性

橋梁モデルは簡単な合成桁橋の 1 径間単純支持として、図-4 に示すようなモデルを対象とする。ここで幅 6000mm、厚さ 300mm の部分が床板であり、厚さ 70mm のアスファルト舗装があることも想定している。加えて鋼 I 桁の断面としてフランジは上下同様に 540mm であり、ウェブは 11mm である。この橋梁モデルを FEM で作成し、スパン長 30000mm とし、死荷重と B 活荷重を想定荷重とした単純曲げの静的解析を行う。ここで設定した材料諸元を表-4 に示す。解析上で設定する死荷重は各モデルで想定している材料の単位重量に体積を乗じて算出している。

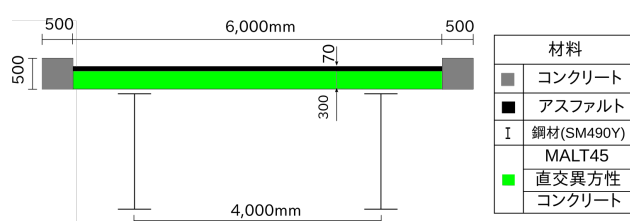


図-4 橋梁モデル断面図

表-4 材料諸元		
建材	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
鋼 (SM490Y)	325	0.3
コンクリート	28	0.2
アスファルト	2	0.4

解析モデルの妥当性確認のため、コンクリート床板モデルにおける理論値と解析値の比較を行う。ここで、単純支持構造物に作用する引張応力は理論的に式-2 から求められる。式-2 における $\gamma_{p1}, \gamma_{p2}, \gamma_{q1}, \gamma_{q2}$ は荷重の組み合わせによって決まる係数であるが、本モデルで想定している荷重が死荷重 (D) と B 活荷重 (L) であるため、 $\gamma_{p1} = 1.0, \gamma_{q1} =$

$1.05, \gamma_{p2} = 1.0, \gamma_{q2} = 1.25$ である。従って、理論的に求めたスパン中央部の鋼桁 1 本あたりに作用する引張応力 σ_{td} は $236.2N/mm^2$ である。さらに、曲げモーメントを受ける鋼部材の引張側の制限値は式-3 から算出される。また、SM490Y の降伏応力は $355N/mm^2$ であり、死荷重と活荷重の組み合わせにおける解析係数 ξ_1 、部材係数 ξ_2 、抵抗係数 Φ_{Ut} はそれぞれ $\xi_1 = 0.90, \xi_2 = 1.00, \Phi_{Ut} = 0.85$ である。従って、コンクリート床板モデルの鋼桁の制限値 σ_{tud} は $271.5N/mm^2$ であり、 $\sigma_{td} \leq \sigma_{tud}$ であることから設計上問題のないモデルである。同様の条件になるように FEM 上でモデル作成を行い解析すると、スパン中央部の鋼桁 1 本作用する最大主応力は $245.8N/mm^2$ であり、制限値を超えておらず理論的な作用引張応力と比較しても相対誤差が約 4% であったため、ある程度妥当なモデルであると評価した。

$$\sigma_{td} = \frac{\gamma_{p1}\gamma_{q1}M_D + \gamma_{p2}\gamma_{q2}M_L}{I}y \quad (2)$$

$$\sigma_{tud} = \xi_1\xi_2\Phi_{Ut}\sigma_{yk} \quad (3)$$

(2) 解析結果

本解析では 45° MALT 床板モデルの比較対象としてコンクリート床板モデル、木集成材を想定した直交異方性床板モデルの解析もおこなった。それぞれのモデルにおいて死荷重と B 活荷重を想定した荷重を載荷した時の鋼桁 1 本あたりに作用する最大主応力の結果を表-5 表に示す。まずここで本解析モデルにおいて想定している鋼 I 桁の応力の制限値は $271.5MPa$ であり、示した結果はどれもこの値を超えていないことから橋梁構造部材としての耐荷性能は十分にあることが分かる。それぞれの結果を比較すると鋼桁 1 本あたりに作用する応力が最も小さくなったのは 45° MALT 床板モデルで、次いで集成材を想定した直交異方性床板モデル、コンクリート床板モデルという結果となった。コンクリートと比較した 45° MALT の応力の低減率は約 18% であり、さらに直交異方性モデルと比較しても約 5.7% の低減が確認できた。

表-5 鋼桁 1 本あたりに作用する応力

床版タイプ	応力 (MPa)
MALT45	204.6
直交異方性部材	216.9
コンクリート	249.6

また、各モデルの床版中央下部の応力分布を図-5に示す。最も応力が作用しているのは直交異方性床版モデルであり MALT45 床版モデルとの差異が確認できた。しかし、どちらのモデルにおいても木材の許容応力 7MPa を大幅に超えているため適切な橋梁の構造形式にするなどの改善が求められる。例えば、木材を利用することで死荷重の減少が見込めるので桁高を低くしたり応力の分散を図るため桁の本数を増やしたりなどが挙げられる。また MALT 部材においては、 1mm 程度の単板を積層する特徴を活かして積層部材の中に強化繊維シートを挿入するなどして強度や剛性の向上が見込める。

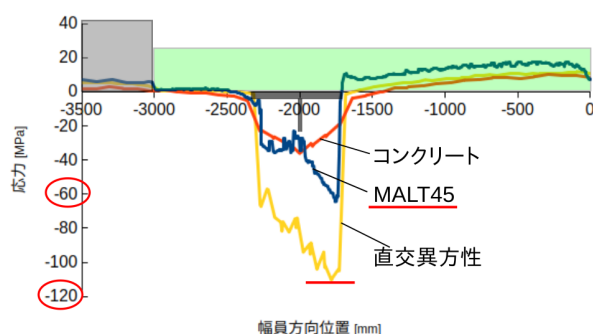


図-5 床版部の応力分布

7. まとめ

本研究では木材利用の幅を広げる事を目的に木材の新しい活用方法の提案として 1mm 厚の薄い単板を繊維方向を直交積層するより細かい角度をつけて積層した多方向積層部材について実験と解析から力学的特性の把握をするとともに、一つの使用例として橋梁床版に適用した際の橋梁の挙動について静的解析を行って確認した。実験の結果より、45 度ずつ積層した多方向積層部材を曲げ材として使用した際に直交積層や 30 度積層より剛性と強度の面で優位性があった。また、試験を再現した数値解析では実

験結果と解析結果を比較して、弾性域内において非常に再現性の高い数値解析モデルである事を確認した。以上の事より、多方向積層部材をパネル材として使用想定した平板の数値解析を行った結果、平面方向の剛性が均一化されている事が確認できた。

橋梁モデルの解析においてはコンクリート床版やと 45 度積層した MALT 床版モデルに B 活荷重がかかった時の鋼桁 1 本に作用する応力を比較すると MALT 床版モデルで最も小さい応力が得られた。また、重量が同程度の集成材を想定した直交異方性床版との比較においても作用応力の低下が確認できたため、MALT 床版を利用する優位性が確認できた。しかし、床版部へ応力が集中してしまい木材の許容応力を超えてしまっているため、適切な橋梁構造形式の模索や多方向積層部材そのものの強度向上など改善の余地がある。加えて、パネル材以外の活用方法も合わせて検討していく。

参考文献

- 1) 三上 市蔵, 川原 隆士:コンクリートダムの施工と保全業務における環境負荷評価, 関西大学学術フロンティア・センター研究成果報告書, p.p.75-83,1999
- 2) 盛岡 通, 吉田 登:持続可能な産業社会のための土木建築システムの環境負荷評価, 地球環境シンポジウム講演集, p.p.147-153, 1998
- 3) 丹波 薫, 並河 良治:建設事業における地球環境影響を評価した社会的費用の算出に関する研究, 建設省土木研究所資料, No.3454, p.p.73-78, 1996
- 4) 佐々木 貴信, 秋田県立大学木材高度加工研究所教授:土木分野での木材利用-木材の特長を活かした用途開発-,
- 5) 枝澤 啓司, 澤田 俊明, 水口 裕之:コンクリート及び木製小規模擁壁の CO_2 排出量に関する基礎的研究, 環境システム研究論文集 Vol.28,2000
- 6) Emson Makita:Replacement of Timber Bridges in Western Australia, 9th Australian Small Bridges Conference, 2019
- 7) 田村 陸, 青木 由香利, 君島 真美, 後藤 文彦, 及川大輔:ツーバイ材を用いた木・鋼ハイブリッド梁の数値解析的基礎研究, 木材工学研究発表会講演概要集 21, pp.22-26, 2022.[Riku TAMURA, Yukari AOKI, Mami KIMIJIMA, Humihiko GOTOU and Daisuke OIKAWA: Basic numerical analysis of timber-steel hybride beam making with 2x timber materials, Absiracts of the 21st Symposium on Wood Engineering, 22-26, 2022.]
- 8) L.Kia , H.R.Valipour : Composite timber-steel encased columns subjected to concentric loading , Engineering Structures ,Volume 232,Article 111825, pp1-22, 2021.