含水率変化に伴う CLT の寸法変化と被覆処理

本宮　由美子[1]・佐々木　貴信[2]・澤田　圭[3]
佐々木　義久[4]・山内　秀文[5]

[1]非会員　北海道大学大学院　農学院（〒060-8589 北海道札幌市北区北 9 条西 9 丁目）
E-mail: mikko-cut@for.agr.hokudai.ac.jp

[2]正会員　北海道大学教授　大学院農学研究院（〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目）
E-mail: tak-sas@for.agr.hokudai.ac.jp

[3]非会員　北海道大学講師　大学院農学研究院（〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目）
E-mail: ksawata@for.agr.hokudai.ac.jp

[4]非会員　北海道大学技術職員　大学院農学研究院（〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目）
E-mail: sasaki@for.agr.hokudai.ac.jp

[5]正会員　秋田県立大学教授　木材高度加工研究所（〒016-0876 秋田県能代市海詠坂 11-1）
E-mail: hide@iwt.akita-pu.ac.jp

CLT の土木分野での用途として，橋梁の床版用途の検討が秋田県で行われており，ラッピング処理等によるスギ CLT の高耐久化の検討がなされている．本研究では，今後，北海道内において CLT の土木利用を進めるために，道産のトドマツ CLT のラッピング等による被覆処理による耐水性等の評価を行った．ポリウレア，ウレタン塗料および FRP シートを用いて被覆処理した CLT の小試験体を対象に，乾湿繰り返し試験および浸漬試験を行い，含水率や寸法，重量の変化を比較した．FRP シートによりラッピングした試験体では，重量変化が殆ど認められなかったのに対し，ウレタン塗料やポリウレアによる被覆処理した試験体では，湿度の変動に伴い重量変化が認められた．

Key Words: *cross-laminated timber, Todo fir, waterproof treatment, dimensional change, moisture content*

1. はじめに

わが国では，CLT（直交集成板）の製造工場が全国 7 カ所に整備されており，その一つである北海道の CLT 工場は，2017 年に日本農林規格（JAS）の認定を受け生産を開始している．道内では，カラマツやトドマツの需要拡大に向けて，今後の道産 CLT の需要創出が期待されている．CLT の主な需要は建築用材であり，中大規模の木造建築を対象とした技術開発が盛んであるが，鋼やコンクリートと比較して CLT は軽量であり，輸送面や施工面での優位性から，土木分野での活用の可能性も考えられる．土木分野における CLT の用途としては，秋田県において橋梁の床版用途を念頭に置いた，ラッピング処理によるスギ CLT の高耐久化の検討がなされている[1]．本研究では，今後，北海道内で製造が見込まれるトドマツ CLT の土木分野での用途拡大を目的として，各種の被覆処理による CLT の耐水性評価に関する実験的検討を行った．CLT を屋外環境で利用する上での課題の一つは，含水率変動に伴う寸法変化である．本研究では，各種の被覆処理を施したトドマツ CLT の小試験体を用いて乾湿繰り返し試験を行い，試験体の重量や寸法変化の関係を調査した．また，各種の被覆処理を施したトドマツ CLT の小試験体を用いて浸漬試験を行い，含水率の変化を調査した．

2. 試験方法

(1) 試験体製作

実験室のプレス機を用いて，幅 300mm，長さ 300mm，厚さ 60mm の 3 層 3 プライのトドマツ CLT（ラミナ寸法，20(t)×75(b)×300(*l*)mm）を製作した（写真-1）．この製作した CLT から 145×145×60mm の試験体を切り出して試験に供した．ラミナの積層接着，幅はぎ接着には CLT の製造に一般的に用いられる水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を用いた．なお，屋外での土木利用を想定した場合，耐水性の高いレゾルシノール樹脂接

着剤を用いることが一般的であるが，被覆処理によって水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤の利用を期待している．屋外での使用を想定し，乾湿の繰り返しや雨水への暴露などに対して抵抗できる被覆処理材として，ポリウレア（大同塗料(株)製　ハイボンドRUS），ウレタン塗料（大同塗料(株)製　ボースイテックス#3000 立面用），FRP シート（積水化学工業(株)製　PPS シート）を用いた．CLT の幅はぎ接着の有無についてそれぞれ2 体ずつ，各処理計4 体の試験体を製作した．また，コントロールとして無処理のCLT を幅はぎ接着の有無について各1 体ずつ用意した．用水路補修などにも用いられる，ポリウレアによる被覆処理を写真-2 に示す．ハンドガンを用いて吹付塗布し，塗布量は1.0kg/m^2 である．屋上防水として施工実績の多い，ウレタン塗料による被覆処理を写真-3 に示す．コテを用いて塗布し，塗布量は3.0kg/m^2 である．FRP シートによる被覆処理を写真-4 に示す．FRP シートは紫外線硬化タイプであり，シートの厚みは約2mm 程度である．なお，FRP シートの付着を確実に行うため，試験体の面取りを行った（写真-5）．

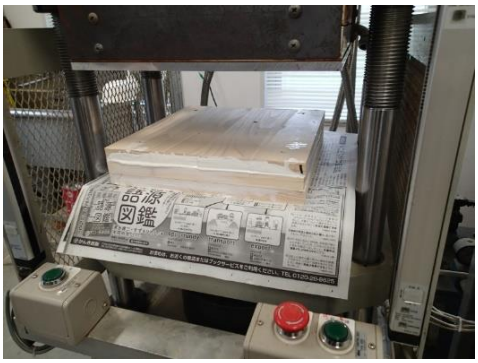

写真-1　トドマツ CLT の製作

写真-2　ポリウレアによる被覆処理

写真-3　ウレタン塗料による被覆処理

写真-4　FRP シートによる被覆処理

写真-5　試験体（被覆処理前）

(2) 乾湿繰り返し試験

乾湿繰り返し試験では，恒温恒湿器内において50℃・40%および40℃・95%の温湿度条件で2 週間毎に乾湿を繰り返し，試験体の寸法および重量を定期的に測定した（写真-6）．なお，使用した恒温恒湿器の性能で平衡含水率が最も低くなる条件と高くなる条件を考え，設定した．

(3) 浸漬試験

浸漬試験では，試験体を写真-7 に示すように水槽内に浸漬し，定期的に重量を測定した．

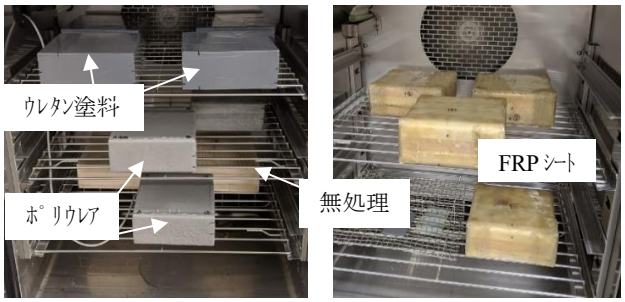

写真-6 乾湿繰り返し試験

写真-7 浸漬試験

3. 試験結果

(1) 乾湿繰り返し試験

図-1に乾湿繰り返し試験における無処理および各処理の試験体の重量変化率の変動を示す．なお，重量変化率は（1）式より求めた．

$$\frac{W-W_0}{W_0}\times 100 \quad (\%) \qquad (1)$$

ここで，W：試験体重量，W_0：試験開始前重量．また，無処理の試験体について，試験開始時の試験材の初期含水率 11.5%を基準として推定含水率も求めた．恒温恒湿器内の湿度変化に対応するように推定含水率は変動し，湿潤時は約 24%，乾燥時は約 9%であった．本研究の温湿度設定における平衡含水率は 22%，8%であるため[2]，推定含水率は平衡含水率にほぼ等しい．

無処理の試験体では重量変化率が-1.9%～10.9%であったのに対し，ポリウレア及びウレタン塗料で被覆した試験体は何れも湿潤過程で 2%程度の重量増加が認められた．乾燥過程では重量が減少したが，初期重量よりも減少することはなかった．ポリウレアやウレタン塗料は水と馴染みやすい性質があり，本研究では塗膜の厚み（約 2mm）で防水効果を高めているが，塗膜中で水蒸気が出入りし重量が変動していることが示唆された．

FRP シートでラッピングした試験体は重量変化が認められなかった．

図-2には，一例として，乾湿繰り返し試験における無処理（幅はぎなし）およびポリウレア処理の試験体厚さおよび外層と内層の幅と長さの寸法変化率の変動をそれぞれ示す．寸法変化率は次の式（2）より求めた．

$$\frac{l-l_0}{l_0}\times 100 \quad (\%) \qquad (2)$$

ここで，l：試験体寸法，l_0：試験開始前寸法．また，図中の凡例の外層幅および内層長さはラミナの繊維直交方向を，外層長さ及び内層幅は繊維方向をそれぞれ示している（写真-8）．

写真-8 湿潤時の無処理試験体

無処理の試験体では，厚さの寸法変化が 3%と最も大きく，次いで外層幅で 1.5%，内層長さで 1%程度（何れも繊維直交方向）の寸法変化が確認された．被覆処理を施した試験体でも同様の寸法変化の傾向が認められたが，無処理に比べてその量は小さかった．

表-1に無処理のそれぞれの方向についての推定寸法変化率を示す．

表-1 無処理の推定寸法変化率

	含水率（%）		推定寸法変化率（%）			
	推定	ΔMC	L	R	T	R,T 平均
Start	11.5	0	0	0	0	0
Max.	23.6	12.1	0.424	1.69	4.24	2.96
Min.	9.0	-2.5	-0.088	-0.35	-0.875	-0.612

なお，推定寸法変化率はトドマツの含水率 1%当たりの平均収縮率（繊維方向（L）0.035%，半径方向（R）0.14%，接線方向（T）0.35%）[3]を用いて，無処理の推定含水率から求めた．測定した無処理の寸法変化率は厚さが約3%で推定寸法変化率の R,T 平均値とほぼ同じ値となっているが，外層幅の寸法変化率は約 1.5%で推定寸法変化率の R,T 平均値よりも小さい値となっており，ラミナの層間の繊維方向を直交させた積層接着で寸法変化が抑えられるという CLT の特徴が現れている．

CLT は寸法安定性が高いことが知られているが，本試験の結果より含水率の変化によるラミナ幅の膨潤・収縮

が生じることが分かる（写真-8）．

(2) 浸漬試験

図-3 に浸漬試験における被覆処理を施した試験体の重量変化率の変動を示す．50 日間浸漬した状態で無処理試験体の重量変化率は約 90%であることが分かる．また被覆処理を施した試験体の重量変化率は 4%以下であり，被覆処理により重量の変動は抑えられていることが分かる．ポリウレア，ウレタン塗料の試験体では日数が経過するにつれて重量が増加している．しかし，FRP で被覆した試験体では重量はほとんど変化しなかった．ポリウレア，ウレタン塗料，FRP は共に遮水性の高い処理材だが，ポリウレア，ウレタン塗料は被覆処理時に発生した気泡などの隙間から水が入った可能性がある．

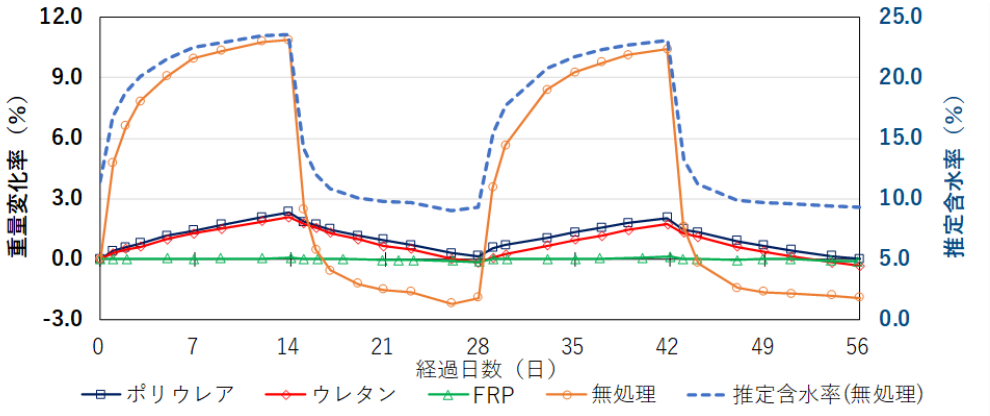

図-1 重量変化率および推定含水率

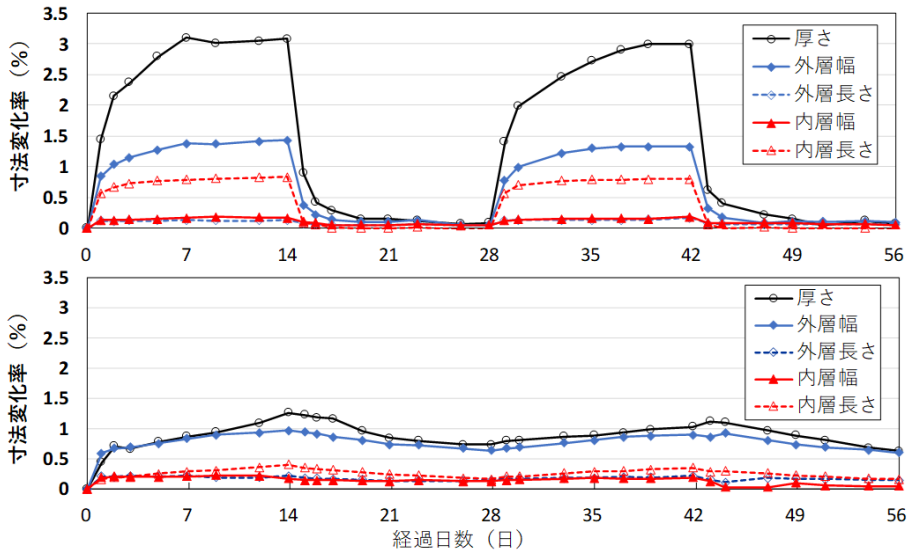

図-2 寸法変化率（上：無処理、下：ポリウレア）

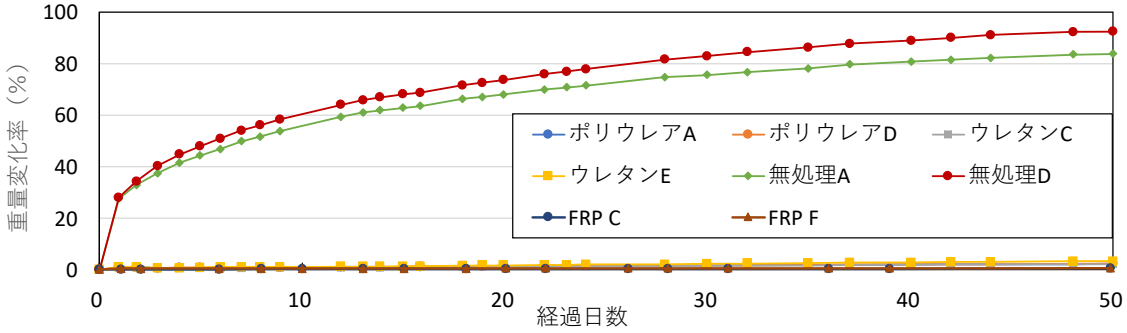

図-3 浸漬試験における試験体の重量変化率

4．FEM 解析

本研究では，CLT の含水率変化に伴う寸法変化の挙動をシミュレーションすることを目的として FEM（有限要素法）解析を試みた．解析にはオープンソース CAE ソフトウェアである Salome-Meca 2017 を用いた．

(1) 解析モデル

幅はぎをしていない無処理の試験体の CLT（150×150×60mm）を対象として，対称構造の上半分を図-4 に示すようにソリッド要素でモデル化した（節点数 115553，要素数 85500）．なお，外層および内層の 75mm 幅のラミナ間はそれぞれ接触とし，外層と内層ラミナの積層接着面は LIAISON_MAIL コマンドで変位を拘束するようにした（図-5）．

試験体に用いたトドマツラミナの繊維方向のヤング係数（E_L）の平均は 8GPa であり，接線方向のヤング係数（E_T）と板目面内のせん断弾性係数（G_{LT}），半径方向のヤング係数（E_R）と柾目面内のせん断弾性係数（G_{LR}），木口面内のせん断弾性係数（G_{RT}）はそれぞれ以下の関係を用いて表-2 のように仮定した[4]．

$$E_T = G_{LT} = 0.05E_L \quad (3)$$

$$E_R = G_{LR} = 0.10E_L \quad (4)$$

$$G_{RT} = 0.02E_L \quad (5)$$

また，ポアソン比はそれぞれ$\mu_{LR} = 0.40, \mu_{LT} = 0.55, \mu_{LR} = 0.70$ とした[4]．

含水率変化に伴う変形挙動をシミュレーションするには，線膨張係数を用いた温度応力のような解析が考えられたが，含水率をパラメーターとした同様の解析は困難であったため，本研究では，含水率変動に伴い生じる木材の膨潤および収縮を再現するような圧縮および引張応力をそれぞれ作用させて線形解析を行った．なお，解析ではラミナの接線方向（外層幅方向および内層長さ方向）の寸法変化に着目し，各層のラミナの幅方向にのみ応力を作用させた．含水率 1%当たりのトドマツ材の接線方向の平均収縮率（0.35%）と乾湿繰り返し試験に用いた無処理の CLT 試験体の初期含水率（11.5%）と湿潤時および乾燥時の推定含水率（24%および 9%）との差（12.5%および -2.5%）はそれぞれ 4.38%，-0.875%となる．したがって，これらの膨潤・収縮量にトドマツの接線方向のヤング係数（0.4GPa）を乗じた値（17.5MPa および-3.5MPa）を引張応力および圧縮応力と仮定した．

(2) 解析結果

解析結果の一例として，湿潤時の x 方向（外層幅方向）と y 方向（内層長さ方向）の変位を図-5 に示す．このときの x 方向の最大値と最小値は 1.40mm，-1.48mm であり，y 方向の最大値と最小値は 0.34mm，-0.36mm であった．

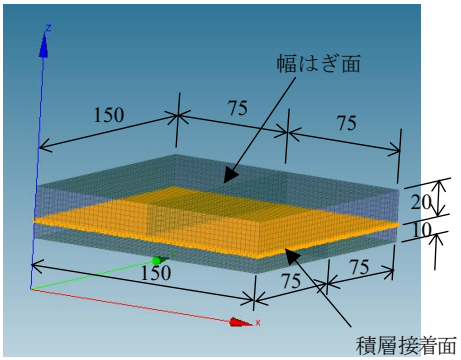

図-4 解析モデル（単位：mm）

表-2 直交異方性板の弾性係数

ヤング係数（N/mm²）	繊維方向（E_L）	8,000
	接線方向（E_T）	400
	半径方向（E_R）	800
せん断弾性係数（N/mm²）	板目面内（G_{LT}）	400
	柾目面内（G_{LR}）	800
	せん断弾性係数（G_{RT}）	160

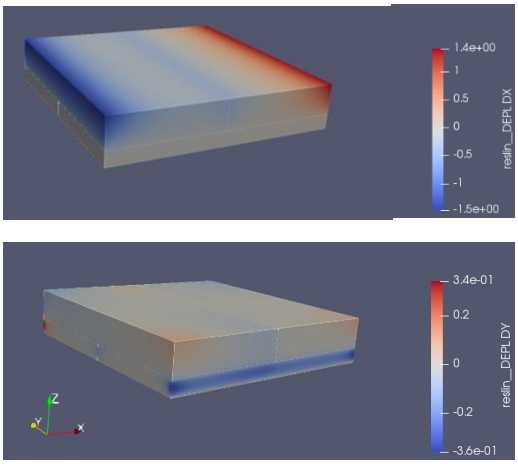

図-5 湿潤時の解析結果（上：x 方向，下：y 方向）

それぞれの絶対値の和と解析モデルの寸法（150mm）を用いて寸法変化率を求めると，x 方向：1.92%，y 方向：0.47%であった．これは前述の乾湿繰り返し試験の結果（図-2）で示した外層幅で 1.5%，内層長さで 1%程度（何れも繊維直交方向）の寸法変化と 0.5%程度の誤差であるが，寸法変化率の傾向は概ね一致した．湿潤時の x 方向の寸法変化の形状を拡大して示すと図-6 のようになる．

同様にして求めた乾燥時の x 方向の最大値と最小値は 0.30mm，-0.28mm であり，y 方向の最大値と最小値は 0.073mm，-0.068mm であった．それぞれの絶対値の和と解析モデルの寸法（150mm）を用いて寸法変化率を求めると，x 方向：0.39%，y 方向：0.09%であった．乾燥時の寸法変化も乾湿繰り返し試験の結果（図-2）と概ね傾向が一致した．

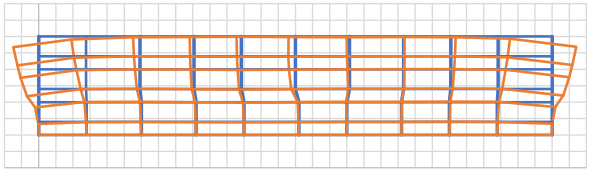

図-6 外層幅方向（xz 面）の変形図（変形量×5）

4. まとめ

本研究では，トドマツ CLT の土木分野での用途拡大を目的として，ポリウレア，ウレタン塗料および FRP シートを用いて被覆処理した CLT の小試験体を対象に，乾湿繰り返し試験および浸漬試験を行った．

乾湿繰り返し試験では，無処理の試験体の重量変化率が-1.9%～10.9%であったのに対し，ポリウレア及びウレタン塗料で被覆した試験体は何れも湿潤過程で 2%程度の重量増加が認められ，FRP シートでラッピングした試験体は重量変化が認められなかった．無処理および被覆処理を施した試験体では寸法変化の傾向が認められたが，被覆処理を施した試験体の寸法変化量は無処理に比べて小さかった．また，FEM 解析により，無処理の試験体の寸法変化を試算した結果，ラミナ（幅 75mm）の幅方向の最大変形量は膨潤時 1.3mm，乾燥時－0.19mm であった．

浸漬試験では，50 日間浸漬した状態で無処理試験体の重量変化率は約 90%であったのに対し，被覆処理を施した試験体では 4%以下であり，特に FRP で被覆した試験体では日数が経過しても重量はほとんど変化しなかった．

本研究より，処理材料によって性能に違いはあるが，被覆処理による耐湿･耐水効果を確認することが出来た．FRP で被覆した試験体で最も重量変化が小さかったが，FRP は伸び縮みできない材料のため，施工ミス等で内部に水分が入ると，木材の膨張により割れが入るリスクがある．今後は，割れが入りにくい材料や処理方法の開発が求められる．また，FRP やポリウレアはウレタン塗料と比較して高価であり，コストを抑えられる材料の開発も課題である．

参考文献[1]の先行研究で用いられたスギ CLT と同様の傾向が，本研究で用いたトドマツで見られた．なお，今後は道産のカラマツを対象として同様の実験を行い，寸法変化の傾向や被覆処理の効果について検討を行う必要がある．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP 17K06514 の助成を受けた．

参考文献

1) 佐々木貴信，山内秀文，足立幸司，林 知行：ラッピング等で処理した CLT の耐水性評価，木材保存協会，第 35 回年次大会研究発表論文集，p.136-137，2018.
2) 信田聡・川崎弥生編：木材科学基礎講座 7，木材の乾燥 I 基礎編，p.71, 2020.
3) 農林省林業試験場：木材工業ハンドブック，丸善株式会社，p.232，1973.
4) 沢田 稔：直交異方性材料としての木材の弾性および強度，材料 12 巻 121 号, 1963.

(Received October 16, 2020)
(Accepted January 31, 2021)

DIMENSIONAL CHANGES OF CROSS-LAMINATED TIMBER UNDER MOISTURE CONTENT VARIATION AND EFFECT OF WATERPROOFING TREATMENT

Yumiko HONGU, Takanobu SASAKI, Kei SAWATA,
Yoshihisa SASAKI and Hidefumi YAMAUCHI

In Hokkaido, in order to expand the use of Larch and Todo fir, demand for cross-laminated timber (CLT) made of them is expected. One of the advantages of CLT is its light weight compared to steel or concrete. CLT panels are mainly used as construction materials and developments of technology regarding CLT are mainly for middle or high buildings construction. However, a high demand of CLT in civil engineering field is also expected due to its advantages in transportation and construction. As a usage of CLT in civil engineering field, wood decks of bridge structure are proposed and studied in Akita prefecture and it was reported that higher durability of CLT decks made of Japanese cedar could be provided by wrapping treatment. One of the problems with using CLT outdoor is its dimensional change accompanied by changes of the moisture content. This paper presents an experimental investigation of the waterproofing performance of a humidity resistance using 3 types of water-resistant treatment

including polyurea coating, polyurethane coating, and FRP-sheet wrapping. Moisture content, dimension and weight are investigated and compared through dry-wet cycles and water immersion tests and compared between 3 types of treatment. Whereas the weight of CLT coated by polyuria and polyurethane change as humidity change, almost no change is observed in CLT wrapped with FRP sheet.