

論文 CLT 耐力壁を内蔵した RC 架構の耐震性能に関する実験的研究

兼光 来美*1・Hamood Alwashali *2・権 淳日*3・晉 沂雄*4

要旨：本研究では RC 架構と CLT 壁からなるハイブリッド構造の耐震性能を把握すべく、その 1/3 スケール縮小試験体の静的載荷実験を行い、実験結果に基づき水平耐力の評価について検討した。CLT 壁の圧縮主歪みは壁面の対角線上で卓越し、対角圧縮ストラットの形成傾向を示した。その圧縮ストラット機構に基づき、圧縮ストラットの等価幅などを定量的に把握し、CLT 壁の水平耐力を評価することができた。また、RC 架構と CLT 壁のハイブリッド構造の水平耐力の算定値は実験値よりやや過小評価し評価精度向上の余地があるものの、実験結果を概ね捉えることができた。

キーワード：鉄筋コンクリート造, CLT, 合成構造, 圧縮ストラット, 圧縮主歪み

1. はじめに

近年、地球温暖化防止や林業再生への取り組みが社会的な課題と挙げられており、木材資源が豊富である日本ではその利用に取り組むことを狙いとした「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¹⁾」が 2010 年に制定されている。また、木材需要が多い建築領域での活用の一環として、「CLT の普及に向けた新ロードマップ²⁾」が示されるなど施工が容易で頑丈な CLT (Cross Laminated Timber) 壁の利用に注目が集まっている。ここで、CLT とはひき板と呼ばれる木材を薄く切ったものを繊維方向が直交するように積層接着した木質パネルであり、日本のみならず欧米諸国では建物建設に数多く適用している。特に日本では、今まで世界中広く適用されてきた鉄筋コンクリート造 (以下 RC) の架構に耐震部材として CLT 壁を合成するハイブリッド構造システムの開発が活発に行われている。

一方、RC 架構と CLT 壁のハイブリッド構造において、幅ら³⁾は CLT 耐震壁による補強方法の検討を目的とし、RC 架構に挿入する CLT 壁の繊維方向を梁に対して直交させるより 30° 斜交する方がより剛性が向上すること等を明らかにした。また、杉本ら⁴⁾は CLT 壁を有する RC 架構の基礎的な構造性能の検討を目的に、CLT 壁が RC 架構の初期剛性および水平耐力の増大に寄与し、CLT 壁のロッキング挙動が卓越したこと等を明らかにした。Aljuhmani⁵⁾も CLT 壁が内蔵された RC 架構は、RC 柱曲げ・CLT 接合部破壊、パンチングシア破壊、CLT 壁の曲げ破壊、CLT 壁のせん断破壊や CLT 壁のストラット破壊の 5 種類の破壊モードを想定している。し

かし、これらはいずれも RC 架構と CLT 壁のハイブリッド構造の応力伝達機能およびそれに応じる耐震性能評価が十分に行われず、CLT 壁の圧縮ストラットの形成メカニズムに関する定量的な評価も明確にされていない。

そこで、本研究では RC 架構と CLT 壁のハイブリッド構造の耐震性能の把握を主目的とし、CLT 壁を内包する RC 架構を模擬する 1/3 スケール縮小試験体の静的載荷実験を行った。また、本試験体は圧縮ストラット機構による耐力評価を念頭に、CLT 壁の対角方向に水平力に抵抗する圧縮ストラットを形成するように設計した。本稿では、破壊経過と荷重-変形関係の実験結果について報告し、RC 架構と CLT 壁のハイブリッド構造の破壊メカニズムを考察しつつ、CLT 壁の主歪み分布に基づきその圧縮ストラットの等価幅および水平耐力について検討を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体設計

図-1 に試験体の詳細を示す。RC 架構の柱の断面は 200×200mm、内法高さは 1000mm であり、梁の断面は 200×300mm、内法長さは 1500mm である。また、柱の主筋は 4-D16 (SD345)、帯筋は 2-D10@50mm (SD345) を配し、梁の主筋は 6-D22 (SD345)、あばら筋は 2-D10@100mm (SD345) を配した。CLT 壁は厚さ 60mm の MX60-3-3 型パネルを使用し、CLT 壁と RC 架構の間に設けた 4mm の隙間からエポキシ樹脂接着剤 (E207DW) を充填し接着接合した。

本研究では、RC 架構と CLT 壁の一体性を更に高めるために、高さが 100mm、幅と厚さが共に 200mm の RC

*1 大阪工業大学 工学部建築学科 (学生会員)

*2 岡山大学 学術研究院環境生命科学研究科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 大阪工業大学 工学部建築学科講師 博士 (工学) (正会員)

*4 明治大学 理工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)

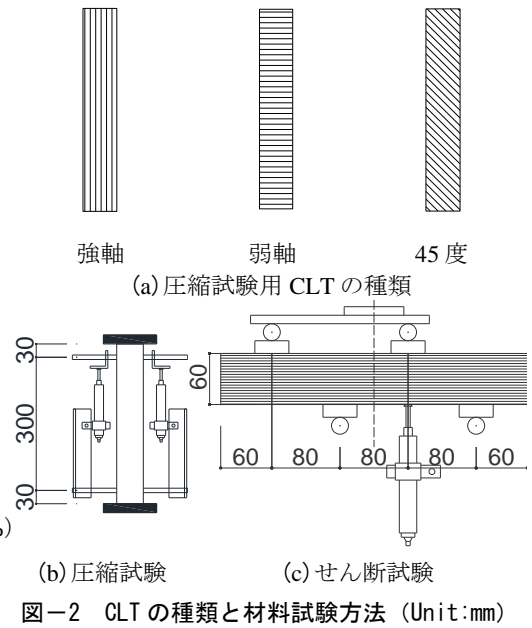
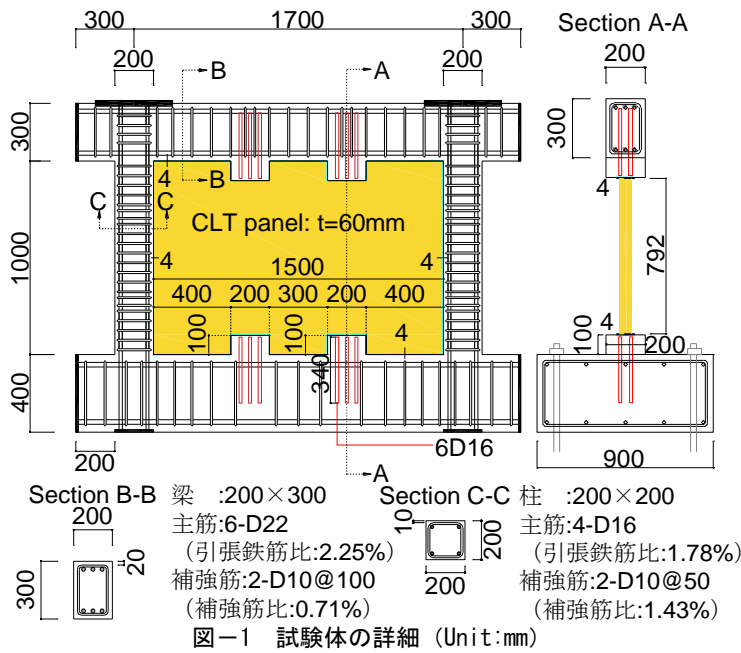


表-1 材料特性

(a) コンクリート

圧縮強度	ヤング係数	引張強度
26.3	2.1×10^4	2.1

Unit:N/mm²

(c) CLT の強軸せん断

平均せん断応力度	せん断弾性係数
4.2	5.2×10^2

Unit:N/mm²

(b) 鉄筋

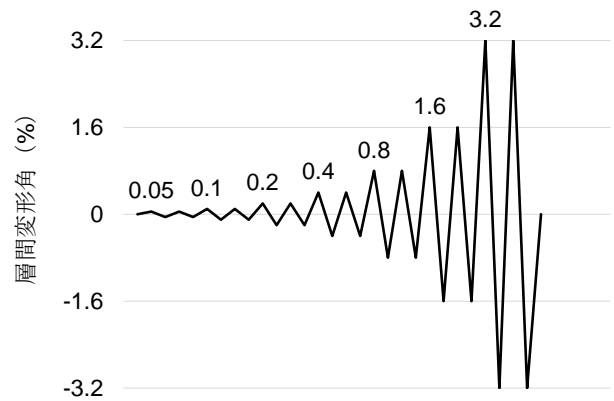
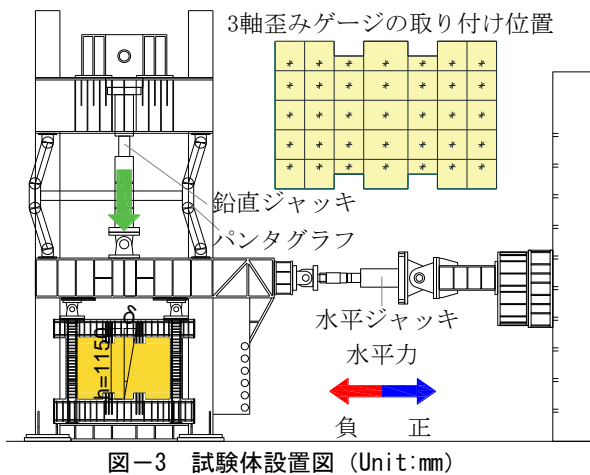
規格	ヤング係数	降伏強度	引張強度
D22(SD345)	2.0×10^5	383.2	576.9
D16(SD345)	1.9×10^5	400.8	582.4
D10(SD345)	2.0×10^5	401.4	560.0

Unit:N/mm²

(d) CLT の圧縮

種類	圧縮強度	ヤング係数
強軸	23.7	6.7×10^3
弱軸	11.4	1.7×10^3
45度	5.6	1.3×10^3

Unit:N/mm²



コッターをスタブ上面と梁下面にそれぞれ2箇所ずつ、計4箇所に設置している。図-2に圧縮試験用CLTの種類、圧縮試験およびせん断試験の方法を示す。また、表-1に本実験で用いたコンクリート、鉄筋およびCLTの材料特性をそれぞれ示す。幅と厚さが共に60mm、長さが360mmの材料試験用CLTは構造用木材の強度試験マニュアル⁹⁾に基づき材料試験を実施し、その圧縮強度、

ヤング係数、せん断強度およびせん断弾性係数を測定した。ここで、CLT圧縮試験は強軸、弱軸および後述する圧縮ストラット角度を想定した45度(繊維方向が圧縮載荷方向となす角度)軸の3種類について実施した。また、CLTのせん断強度およびせん断弾性係数は強軸方向のみを対象に、逆対称4点載荷法による試験結果に基づき測定した。

2.2 荷重および計測計画

図-3 に荷重時の試験体設置図を、図-4 に荷重プログラムを示す。本実験では、鉛直ジャッキを用いて鉛直荷重を 400kN（両側柱それぞれの初期軸力比が 0.19 に相当）に維持しながら、水平ジャッキによる正負繰り返し荷重を行った。水平荷重は、梁中心位置の水平変位をスタブ上面から梁中心位置までの高さ（1150mm）で除した層間変形角 R に基づき変位制御し、 $R=\pm 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2\%$ を 2 サイクルずつ行った。また、CLT 壁の応力度分布を把握するため、その表面は DIC (Digital Image Correlation) による計測を行い、裏面には 3 軸歪みゲージを貼り付けた（図-3 を参照）。

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係と破壊経過

図-5 に水平荷重-層間変形角関係および鉄筋降伏位置とその変形角を、図-6 に層間変形角 $R=+0.8\%$ 時の RC 架構のひび割れ図と DIC による CLT 壁の最小主歪み分布を示す。 $R=0.1\%$ のサイクルで梁端部と柱脚の危険断面位置に曲げひび割れが、 $R=0.4\%$ のサイクルでは梁にせん断ひび割れが生じた。 $R=0.8\%$ のサイクルで CLT と RC 架構の接着部分が剥離し、隙間が見られた。その後、柱頭と柱脚部共に曲げせん断ひび割れが発生し、柱脚の主筋降伏が確認された。 $R=1.6\%$ のサイクルで CLT 壁より大きな音が鳴り、柱脚部すべての主筋が降伏し、最大耐力 336kN に達した（図-5 を参照）。また、図-6 の DIC 計測結果より、CLT 壁の対角線上の最小主歪みが大きくなっている傾向を示しており、隅部の最小主歪みが特に大きく圧縮を受けることが確認できた。最後に、 $R=3.2\%$ のサイクルでは CLT 壁の上下 RC コッター間の縦方向に沿って生じた亀裂の拡大に伴い、試験体の耐力が顕著に低下し、柱頭の主筋が降伏した。

3.2 CLT 壁の圧縮主歪み分布

図-7 に $R=0.8\%$ 荷重時の 1 サイクル目の CLT 壁の圧縮主歪み分布を示す。ここで、圧縮主歪みは CLT 壁の裏面に貼り付けた 3 軸歪みゲージの計測結果を用い、ロゼット解析による式(1)から算定した最小主歪み ε_{min} であり、その角度 ϕ は式(2)より求めた。図-7 より、正側と負側それぞれの荷重方向の圧縮主歪みは対角方向に卓越し、CLT 壁には対角圧縮ストラットが形成される傾向を示した。このことより、本実験結果において圧縮ストラット機構により CLT 壁の負担せん断力を定量的に評価することが可能であると考えられる。

$$\varepsilon_{min} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_a + \varepsilon_c - \sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}} \right] \quad (1)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \right] \quad (2)$$

ここで、 ε_{min} : 最小主歪み (μ) , ϕ : 主歪み方向までの角度 ($^\circ$) (ε_a 軸から) , $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$: $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 方向の歪み (μ) である。ただし、 $\varepsilon_a \rightarrow \varepsilon_b \rightarrow \varepsilon_c$ 軸回りを正方向とし、最小主歪みの方向は $\varepsilon_a > \varepsilon_c$ の場合 $\phi=90^\circ$ 、 $\varepsilon_a < \varepsilon_c$ の場合 ϕ° である。

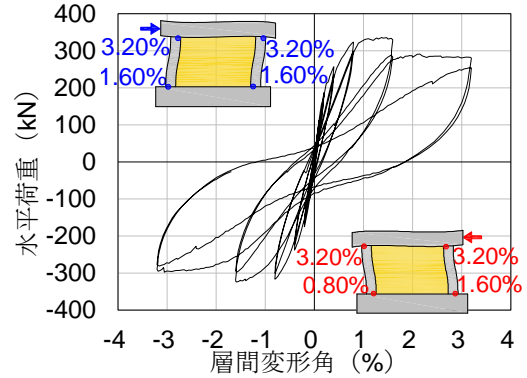


図-5 水平荷重-層間変形角関係

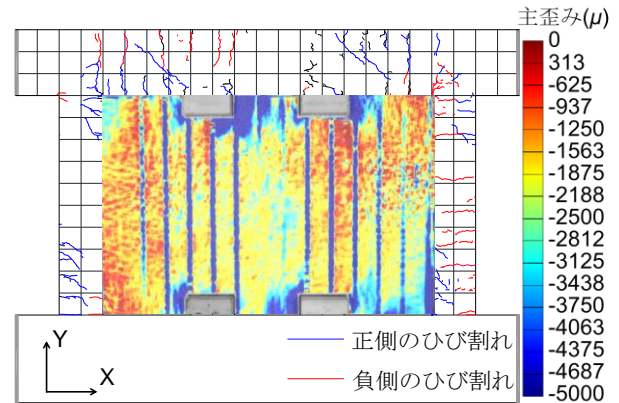


図-6 損傷状態 ($R=+0.8\%$ 時)

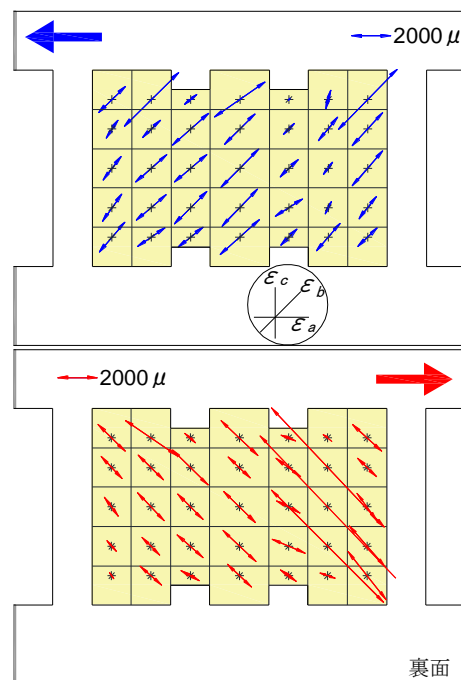


図-7 圧縮主歪みの分布 ($R=0.8\%$ 時)

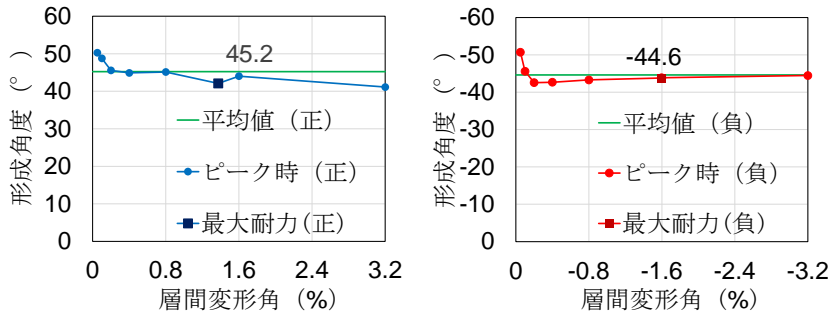


図-8 正側と負側の圧縮ストラット形成角度 θ の分布

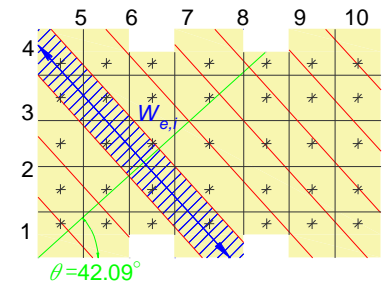


図-9 正側最大耐力時の壁体の区間分割法および $W_{e,i}$ の算定線

4. CLT 壁の圧縮ストラット

4.1 圧縮ストラットの形成角度

前述した通り CLT 壁の圧縮主歪みは壁面の対角線上で卓越し、対角圧縮ストラットの形成傾向を示したため、本研究では圧縮ストラット機構に基づき CLT 壁の水平耐力の評価を行う。その際、圧縮ストラットの等価幅は Jin⁷⁾らが提案した手法より算出した。まず、CLT 壁に 3 軸歪みゲージを貼り付け設けたブロックを各計測ユニットとし、その各計測ユニットの圧縮主歪み (図-7 を参照) を用いて、式(3)より反時計回りを正とし CLT 壁の対角圧縮ストラットと水平方向の形成角度 θ を求める。ここで、圧縮主歪みの大きい計測ユニットほど圧縮ストラットの形成角度に与える影響が大きいと考え、式(3)のように θ_j を ε_j の加重平均した値として θ を定義する。また、正側は $0 \sim 90^\circ$ 、負側は $-90^\circ \sim 0$ の間に分布する圧縮主歪みが対角圧縮ストラットを形成していると考えられるため、 θ_j はそれぞれの荷重方向において、その間に分布する圧縮主歪みのみを選定する。なお、計測した圧縮主歪みの値が使用した歪みゲージの計測限界として定められた 20000μ 以下となるもの⁸⁾を選定対象圧縮主歪みとし圧縮ストラットの形成に関与するものとする。各荷重方向 1 サイクル目ピーク時および最大耐力時の圧縮ストラットと水平方向の形成角度 θ の推移を図-8 に示す。正側と負側加力時の形成角度 θ の平均値はそれぞれ 45.2° と -44.6° となり、荷重方向に関わらず 45 度に近似することが分かった。

$$\theta = \left(\sum_{j=1}^l \varepsilon_j \times \theta_j \right) / \sum_{j=1}^l \varepsilon_j \quad (3)$$

ここで、 ε_j : 選定対象圧縮主歪み (μ)、 θ_j : 選定対象圧縮主歪みが水平方向となす角度 ($^\circ$)、 l : 選定対象ブロックユニット総数である。

4.2 圧縮ストラットの等価幅

CLT 壁の圧縮ストラットの等価幅の算定においてその精度を確保するため、図-9 に示すように 3 軸歪みゲージを設けた壁体の裏面を圧縮ストラットの形成角度 θ (緑実線) の直交方向に等間隔区間の分割を行う (赤実

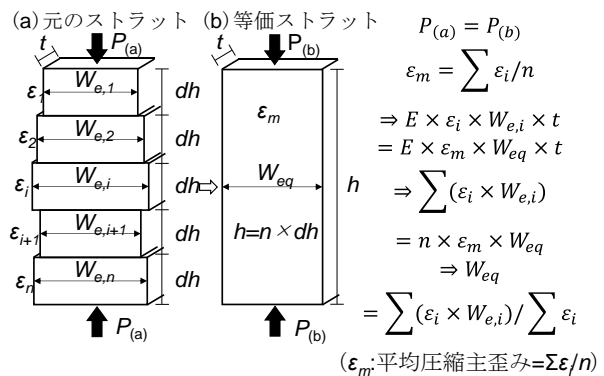


図-10 圧縮ストラットの等価幅の算定概念

線)。その際、各区間内には 3 軸歪みゲージ計測点が 1 箇所以上含まれることを前提に、最多の区間分割数である 10 区間に分割する。また、各区間 i における選定対象圧縮主歪みの算術平均値 ε_i を算定し、その区間の代表圧縮主歪みとする。そして、前述した選定対象圧縮主歪み ε_j に応じる計測ユニット幅に基づき、各区間 i における対象圧縮ストラットの有効幅 $W_{e,i}$ (青矢印) を算定する。CLT 壁の対角圧縮ストラットの等価幅 W_{eq} は、式(4)より算定する。同式は図-10 に示すように壁面に一定の等価ストラット幅 W_{eq} で圧縮ストラットが形成され、この時に元のストラットおよび等価ストラットには等しい圧縮力 ($P_{(a)}=P_{(b)}$) が作用すると仮定し、その圧縮力による各区間ストラットの代表圧縮主歪み ε_i の平均値と等価ストラットの平均圧縮主歪み ε_m ($\sum \varepsilon_i / 10$) の釣り合いに基づき、定式化したものである。図-11 に各荷重方向 1 サイクル目ピーク時および最大耐力時の圧縮ストラット等価幅 W_{eq} の推移を示す。層間変形角 R が大きくなるほど壁面の損傷が著しくなり、またそれに伴う選定対象外歪みの数が増加したため、 W_{eq} は徐々に低下する傾向が見られた。

$$W_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i \times W_{e,i}) \right) / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (n = 10) \quad (4)$$

ここで、 ε_i : 区間 i における選定対象圧縮主歪み ε_j の平均値 (μ)、 $W_{e,i}$: 区間 i におけるストラットの有効幅 (mm)、 n : 分割した区間の数である。

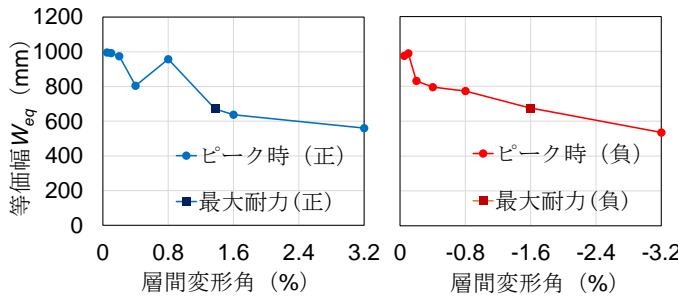


図-11 正側と負側の圧縮ストラットの等価幅 W_{eq} の推移

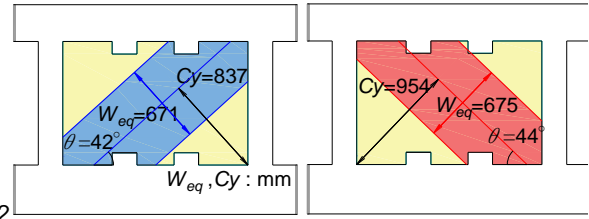


図-12 圧縮ストラットの形成角度 θ 、等価幅 W_{eq} および作用中心軸 Cy の位置

4.3 圧縮ストラットの作用位置（中心軸）

CLT 壁の等価圧縮ストラットの形成位置を特定するため、各荷重方向の圧縮縁（3 軸歪みゲージを貼り付けた CLT 壁の裏面において、正側は壁面右下隅位置、負側は壁面左下隅位置）からの距離で定義した区間 i の圧縮ストラットの作用点 Cy_i に基づき、式(5)より等価圧縮ストラットの中心軸 Cy を算定する。ここで、 Cy_i は区間 i における選定対象圧縮主歪み ϵ_j の図心とし、各区間における ϵ_j およびその圧縮縁までの距離 y_j を考慮し、式(6)より算出する。また、距離 y_i において、正側は壁面右下隅位置、負側は壁面左下隅位置を通る形成角度と並行な直線から選定対象圧縮主歪み ϵ_j までの距離である。

以上のように、CLT 壁の圧縮主歪みに基づき、圧縮ストラットの形成角度 θ 、等価幅 W_{eq} および作用中心軸 Cy の位置を算定することができ、正負の最大耐力時の等価圧縮ストラットの算定結果を図-12 に纏めて示す。

$$Cy = \left(\sum_{i=1}^n \epsilon_i \times Cy_i \right) / \sum_{i=1}^n \epsilon_i \quad (n = 10) \quad (5)$$

$$Cy_i = \left(\sum_{j=1}^m \epsilon_j \times y_j \right) / \sum_{j=1}^m \epsilon_j \quad (6)$$

ここで、 ϵ_j ：区間 i における選定対象圧縮主歪み (μ)， y_j ：選定対象圧縮主歪み ϵ_j までの距離 (mm)， m ：区間 i における選定対象圧縮主歪み ϵ_j の数， n ：分割した区間の数である。

5. RC 架構と CLT 耐力壁の水平耐力評価

CLT 壁を有する RC 架構のせん断耐力は、式(7)のように両側 RC 柱と CLT 壁それぞれの負担せん断力の総和より評価する。

$$Q = \sum Q_c + Q_w \quad (7)$$

ここで、 Q ：RC 架構と CLT 壁の総せん断耐力 (N)， $\sum Q_c$ ：RC 両柱の負担せん断力 (N)， Q_w ：CLT 壁の負担せん断力 (N) である。

試験体最大耐力時の RC 柱の負担せん断力 Q_c は式(8)のように柱の曲げ終局耐力 M_u を鉄筋の降伏が先行した柱脚の危険断面から反曲点までの高さで除したもので評

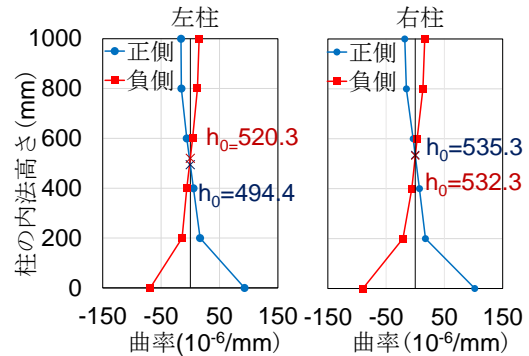


図-13 最大耐力時の柱の曲率分布と反曲点位置

表-2 両柱の負担せん断力の算定結果

荷重方向	左柱	右柱	$\sum Q_c$
正側	84.3	78.2	162.5
負側	80.1	78.3	158.3

Unit:kN

価する。ここで、式(9)による RC 柱の曲げ終局耐力 M_u の算定において、変動軸力を考えず、各柱が鉛直荷重の半分ずつ軸力として分担すると仮定した⁹⁾。また、柱主筋に貼り付けた歪みゲージの測定値を用い、最大耐力時の柱の曲率を算定し、曲率分布より柱脚の危険断面から反曲点までの高さ h_0 を推定し図-13 に示し、また表-2 に両柱の負担せん断力の計算結果を示す。同表より正側と負側の試験体の最大耐力時における両柱の負担せん断力は近似していることが分かる。

$$Q_c = \frac{M_u}{h_0} \quad (8)$$

$$M_u = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bDF_c} \right) \quad (9)$$

ここで、 Q_c ：曲げ終局度時のせん断力 (N)， M_u ：柱の曲げ終局モーメント (N・mm)， h_0 ：反曲点高さ (mm)， a_t ：引張鉄筋断面積 (mm^2)， σ_y ：鉄筋の降伏点強度 (N/mm^2)， D ：柱せい (mm)， N ：柱 1 本にかかる軸方向荷重 (N)， b ：柱の幅 (mm)， F_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2) である。

試験体最大耐力時の CLT 壁の負担せん断力 Q_w は、圧縮ストラット機構に基づき、式(10)より算定し表-3 に算定結果を示す。ここで、 σ_m は前節で定義した圧縮ス

トラットの等価幅に作用する平均圧縮主歪み ε_m に応じる平均圧縮主応力であり、本研究では図-14 に示すように CLT 壁の圧縮ストラット形成角度に近似する 45 度軸の圧縮試験結果を用い推定した。同図に正側と負側の最大耐力時の ε_m および σ_m の算定結果を併記する。

$$Q_w = W_{eq} \times t \times \sigma_m \times \cos\theta \quad (10)$$

ここで、 W_{eq} ：対角圧縮ストラットの等価幅 (mm)， t ：壁体の厚さ (mm)， σ_m ：平均圧縮主歪み ε_m に応じる平均圧縮主応力 (N/mm²)， θ ：対角圧縮ストラットの形成角度 (°) である。

表-4 に試験体の水平耐力の計算値と実験値を示す。試験体の水平耐力の実験値と比べ、その計算値は約 2 割小さい安全側の評価となった。これは、試験体最大耐力時の CLT 壁の圧縮ストラット等価幅 W_{eq} の算定において、壁面損傷により歪みがかなり大きくなり、前述した選定対象外となる 20000 μ 以上の歪みが計測されたユニット数の増加しており、 W_{eq} が過小に評価されることが原因であると考えられる。

表-3 CLT 壁の負担せん断力の算定結果

载荷方向	Q_w
正側	93.1
負側	113.5

Unit:kN

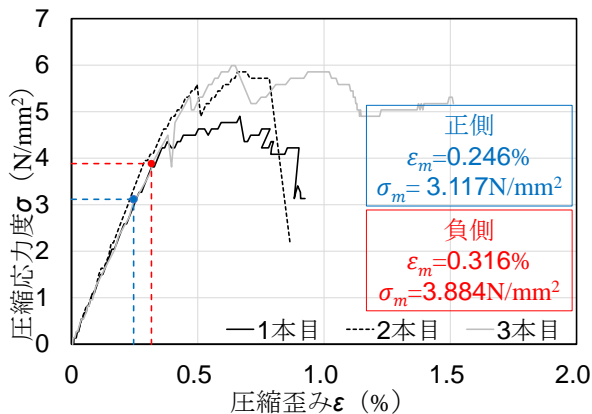


図-14 CLT の 45 度軸の圧縮試験結果と σ_m の推定

表-4 実験値と計算値の比較 (最大耐力時)

载荷方向	計算値	実験値
正側	255.6	336.0
負側	271.8	324.0

Unit:kN

6. まとめ

本研究では、CLT 壁を内包する RC 架構を模擬する 1/3 スケール縮小試験体の静的载荷実験結果に基づき、その水平耐力の評価について検討した。本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) 3 軸歪みゲージおよび DIC の計測結果に基づき算定した CLT 壁の圧縮主歪み分布より、壁体の圧縮主歪みは対角方向に最も卓越することが分かった。
 - 2) CLT 壁の圧縮主ひずみの分布に基づき、その圧縮ストラットの形成角度や等価幅などを定量的に把握し、圧縮ストラット機構により CLT 壁の水平耐力を評価することができた。
 - 3) RC 架構と CLT 壁のハイブリッド構造の水平耐力の算定値は実験結果をやや過小評価し評価精度向上の余地があるものの、25%以内で安全側の評価となり、実験結果を概ね捉えることができた。
- 今後の研究では、RC コッターを設けていない試験体の载荷実験を加え、それが CLT 壁の破壊メカニズムに及ぼす影響について検討する予定である。

参考文献

- 1) 林野庁：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，農林水産省 2021.10.01
- 2) 林野庁および国土交通省：CLT の普及に向けたロードマップ，内閣官房，2022.9.20
- 3) 幅亮太，北守顕久，森拓郎，福原武史，栗原嵩明，五十田博：CLT パネルを接着挿入した RC フレームの耐震補強効果に関する実験，日本建築学会構造系論文集，Vol. 81, No.726, pp.1299-1308, 2016.8
- 4) 杉本佳奈，真田靖士，尹 ロク現，パラダン スーザン，ベラスケス メサアレハンドロ，村田晃康，五十田博，迫田丈志，太田 勤，菊池紀恵，高畑真二：CLT 壁を RC 架構に内蔵する合成耐震壁の静的繰返し载荷実験—構造性能の実験的評価—，日本建築学会構造系論文集，Vol.88, No.806, 633-644, 2023.4
- 5) Hamood Alwashali and Ahmad Ghazi Aljuhmani : Study on Failure Mechanisms of Hybrid Structure of Reinforced Concrete Frame with CLT Infill, Proceedings World Conference on Timber Engineering 2023, pp.3309-3317, Jun.2023
- 6) 日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル，pp.13-19, 2021.3.25
- 7) Jin, Kiwoong., Choi, Ho. and Nakano, Yoshiaki. : Experimental Study on Lateral Strength Evaluation of Unreinforced Masonry-Infilled RC Frame, Earthquake Spectra, Vol.32, No.3, pp1725-1747, 2016
- 8) 株式会社東京測器研究所：TML PRODUCT CATALOG 2023/2024, pp32-33, 2023
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，2010