

# 論文 CLT 壁を内蔵する梁降伏型 RC 架構に関する解析的分析

尹 ロク現\*1・中島 弘史\*2・村田 晃康\*3・真田 靖士\*4

**要旨**：筆者らの既往研究では、CLT（Cross Laminated Timber）壁を内蔵する単層単スパン RC 架構の構造性能に CLT 壁が与える影響を把握するための静的載荷試験を実施した。とくに、CLT 壁の内蔵により RC 架構の初期剛性及び水平耐力の増大に寄与することを実験的に確認した。本稿では CLT 壁が RC 架構の構造性能に与える影響をより詳細に検討するため、数値解析を計画し上記実験の試験体の挙動を再現することを試みた。マルチスプリングモデルを用いた数値解析により荷重－変形関係を概ね再現できた。さらに、解析結果を用いて実験で観察された CLT 壁のロッキング挙動を考慮した梁応力図を示した。

**キーワード**：数値解析，鉄筋コンクリート，耐震性能，耐震壁，木質壁

## 1. はじめに

近年、地球温暖化の防止、また、持続可能な社会の実現に向けて、世界の CO<sub>2</sub> 削減への取り組みが社会的な課題となっている<sup>1)</sup>。わが国では木材の有効利用による環境問題への対応、林業や木材の産業活性化による地域経済の発展、また森林保全などの観点から、建築領域での木材資源の活用が課題となっている<sup>2)</sup>。そこで、施工が容易で高強度な CLT の利用に注目が集まっており、大規模施設等で利用され始めている。しかし、これらの大規模木造建築物には防耐火性能が要求されるため、RC 造や S 造と組み合わせた木質混構造とすることが有効である。現在、S 造と CLT 壁を組み合わせる研究は進んでいるが<sup>3), 4)</sup>、CLT 壁を内蔵する RC 架構の構造性能に関しては十分に明らかにされていない。

以上のような研究背景を踏まえ、著者らは混構造建物の靱性を確保することを目的とし、CLT 壁と周辺架構の境界を剛接合しない工法を対象とした研究を実施してきた。梁降伏型の RC 架構を対象とした既往研究<sup>5)</sup>では、単層単スパン RC 架構に CLT 壁を内蔵する試験体を対象に静的載荷試験を実施した。その結果、柱梁架構のみの場合より架構の初期剛性及び最大耐力が増大し、架構の変形性能が向上することが確認された。しかし、CLT 壁の内蔵が一般的な構造設計で計画される梁降伏型架構に与える正負の影響や、その数値解析手法の提案など、未だに十分に明らかになっていない。

そこで、本研究では CLT 壁が梁降伏型 RC 架構の構造性能に与える影響を解析的に検討することを主目的とし、マクロモデルを用いて数値解析を行い、既往研究<sup>5)</sup>の実験結果との比較することでその妥当性を検証する。さらに、解析的な分析を通して CLT 壁のロッキング挙動によるパンチングシアを受けた梁応力を評価する。

## 2. 既報の実験<sup>5)</sup>

本論で検討対象とする CLT 壁を内蔵する柱梁架構の実験結果は文献<sup>5)</sup>で詳述されている。以下では、本報の検討に必要な概要について抜粋して示す。

### 2.1 試験体概要

本研究は Fig.1 に示す RC ラーメン構造と CLT 壁の混構造である 6 階建ての試設計建物を対象とした。本研究の試験体は赤枠で示す対象建物の梁間方向構面 2 階から切り出した約 40%スケールの部分架構であり、検討対象の試験体を Fig.2 に示す。また、試験体の RC 架構の配筋図を Fig.3 に、研究対象建物と比較した試験体諸元を Table1 にそれぞれ示す。試験体 BF は柱梁架構のみの試験体である。試験体 4CLT-60 は壁厚 60mm、長さ 555mm、高さ 880mm の CLT パネルを間柱の左右に 2 枚ずつ計 4 枚組み込んだ試験体である。本実験で製作した CLT 壁を内蔵する試験体において RC 架構と

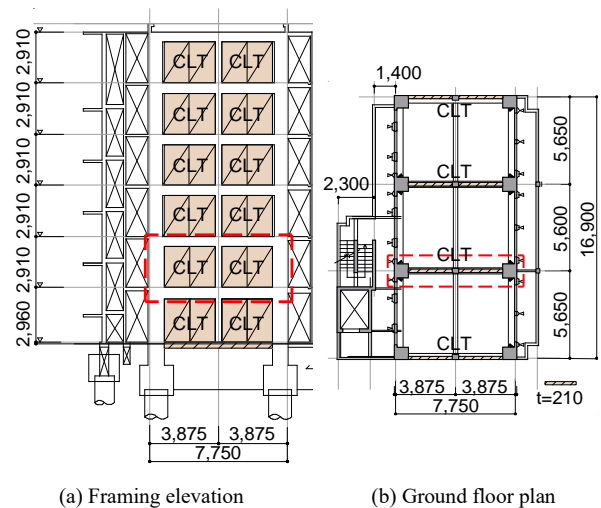


Fig.1 Prototype building (unit: mm)

\*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 助教 博士（工学）（正会員）

\*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻（学生会員）

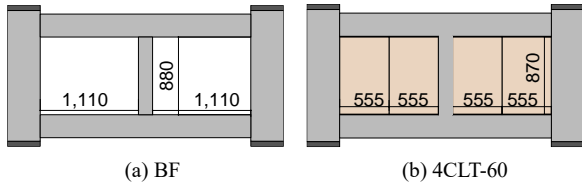
\*3 大阪大学大学院 元大学院生

\*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士（工学）（正会員）

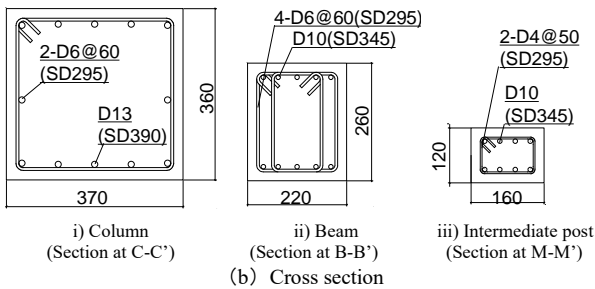
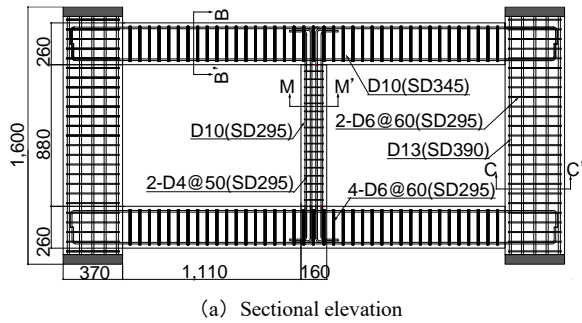
**Table1** Specificaitons of RC frame and CLT wall

		Prototype	Specimens
Column	$B \times D$ (mm)	900×900	360×370
	Long. rebar	14-D29	12-D13
	$p_{lc}$	0.48%	0.48%
	Shear rein.	D13@100	2-D6@60
	$p_{vc}$	0.28%	0.29%
Beam	$B \times D$ (mm)	550×650	220×260
	Long. rebar	Top : 5-D25 Bottom : 4-D25	10-D10
	$p_{tb}$	Top : 0.80% Bottom : 0.64%	0.71%
	Shear rein.	D13@100	4-D6@60
	$p_{wb}$	0.92%	0.96%
Intermediate post	$B \times D$ (mm)	300×400	120×160
	Long. rebar	8-D16	8-D10
	$p_t$	0.50%	1.48%
	Shear rein.	D10@100	2-D4@50
	$p_w$	0.48%	0.47%
CLT	$W \times H \times t$ (mm)	2,850×2,310×210	555×880×60
	CLT layup	5-layer 7-ply	5-layer 5-ply
	CLT tree species	Japanese cedar	Japanese cedar

$p_{lc}, p_{tb}, p_t$  : Tensile reinforcement ratio (%)  
 $p_{vc}, p_{wb}, p_w$  : Shear reinforcement ratio (%)  
 W: Width of CLT, H: Height of CLT, t: Thickness of CLT



**Fig.2** Specimen types (unit:mm)



**Fig.3** Details of RC frame specimens (unit: mm)

CLT 壁間及び CLT パネル間にアンカーを設けない方針とし、面外方向へのはらみだしを抑制するため梁との境界部に 5mm のふかしを設けた。また、コンクリート、柱梁鉄筋及び CLT の材料特性は Table2, 3 及び 4 にそれぞれ示す。

**2.2 荷重計画**

実験時の試験体設置図を Fig.4 に、水平荷重履歴を Fig.5 にそれぞれ示す。試験体は上下階の柱端部に 4 台の

**Table2** Material properties of concrete

	Elastic modulus	Compressive strength
BF	$26 \times 10^3$ N/mm <sup>2</sup>	35.5 N/mm <sup>2</sup>
4CLT-60	$27 \times 10^3$ N/mm <sup>2</sup>	37.8 N/mm <sup>2</sup>

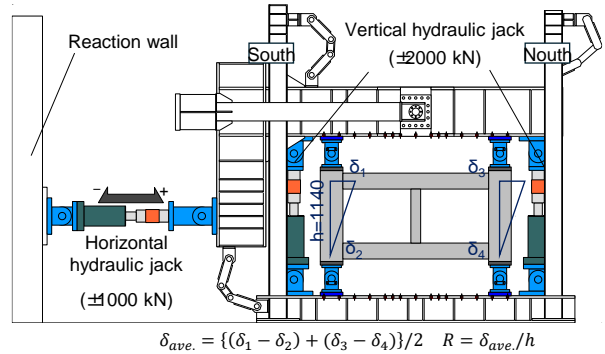
**Table3** Material properties of reinforcement

	Elastic modulus	Yield stress	Yield strain
D4* (SD295)	$199 \times 10^3$ N/mm <sup>2</sup>	412 N/mm <sup>2</sup>	$4.07 \times 10^{-3}$
D6* (SD295)	$189 \times 10^3$ N/mm <sup>2</sup>	380 N/mm <sup>2</sup>	$4.06 \times 10^{-3}$
D10 (SD295)	$197 \times 10^3$ N/mm <sup>2</sup>	360 N/mm <sup>2</sup>	$1.96 \times 10^{-3}$
D10* (SD345)	$180 \times 10^3$ N/mm <sup>2</sup>	378 N/mm <sup>2</sup>	$4.11 \times 10^{-3}$
D13 (SD345)	$182 \times 10^3$ N/mm <sup>2</sup>	460 N/mm <sup>2</sup>	$2.54 \times 10^{-3}$

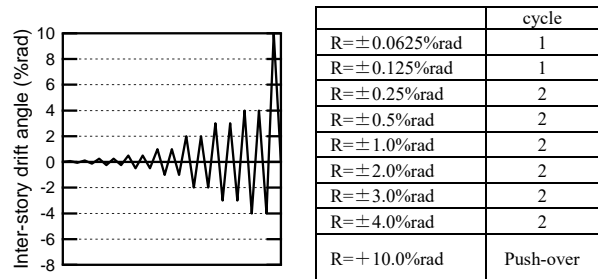
\*0.2% offset method

**Table4** Material properties of CLT

(a) Full compression		
	Elastic modulus	Compressive strength
Parallel to fiber on the surface	$74 \times 10^2$ N/mm <sup>2</sup>	21.7 N/mm <sup>2</sup>
Perpendicular to fiber on the surface	$64 \times 10^2$ N/mm <sup>2</sup>	18.1 N/mm <sup>2</sup>
(b) Partial compression		
	Elastic modulus	Compressive strength
Parallel to fiber on the surface	$39 \times 10^2$ N/mm <sup>2</sup>	23.45 N/mm <sup>2</sup>
Perpendicular to fiber on the surface	$31 \times 10^2$ N/mm <sup>2</sup>	19.34 N/mm <sup>2</sup>



**Fig.4** Test set-up and loading system



**Fig.5** Lateral loading history

ピン支承を取り付け、荷重装置に固定した。各試験体ともに南北の鉛直オイルジャッキによって各柱断面に対しコンクリート設計基準強度 ( $F_c=33$ N/mm<sup>2</sup>) に基づく軸力比 0.15 (=659kN) の初期軸力を加え、その一定軸力下で静的漸増繰り返し水平力荷重を行った。水平力荷重は両側柱の層間変形角の平均値  $R (= \delta_{ave}/h)$  に基づく変位と

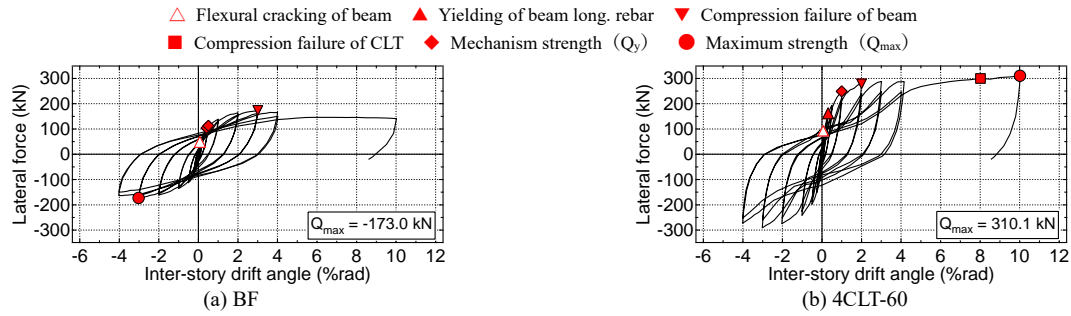


Fig.6 Lateral force vs. inter-story drift angle relationships

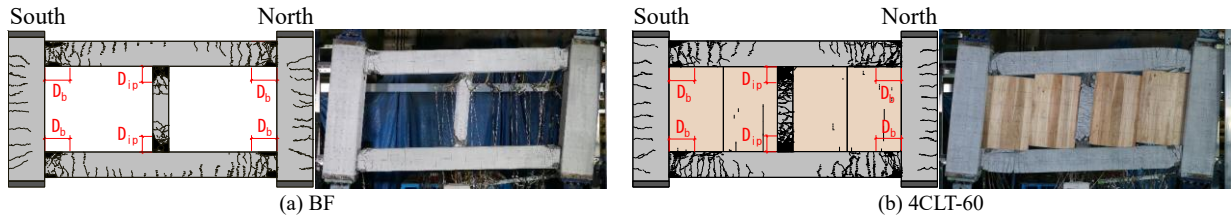


Fig.7 Final failure state of specimens (R=10.0%rad)

し、Fig.5 に示す荷重履歴に従い正負交番の繰り返し荷重を行った。

### 2.3 実験結果

各試験体の荷重—変形角関係を Fig.6 に、最終破壊のひび割れ図と写真を Fig.7 にそれぞれ示す。

以下に、実験結果より得られた知見をまとめる。

- (1) RC 柱梁架構に内蔵する CLT 壁が RC 架構の初期剛性及び水平耐力の増大に寄与することを実験的に確認した。CLT 壁を内蔵した試験体の初期剛性を柱梁架構のみの試験体と比較した結果、初期剛性は約 2.5 倍、メカニズム形成時耐力は約 2.1 倍増大した。
- (2) CLT 壁の内蔵が RC 架構の損傷状況に影響を与えることを確認した。CLT 壁を設けることで柱梁架構のみの試験体 BF より梁主筋が早期に降伏した。また、RC 梁のひび割れ状況に着目すると、梁両端部でせん断ひび割れが増大する端部と曲げひび割れが支配的となる端部が発生した。さらに、間柱においては材軸に直交する水平ひび割れが発生した。上記の損傷は Fig.7(b) に示す CLT 壁のロッキング挙動によるパンチングシアが周辺架構に伝達されたことが要因と考えられる。

### 3. 数値解析の方法と結果

2 章の実験結果より、CLT 壁を設けることで RC 架構の構造性能（初期剛性及びメカニズム耐力）が向上したことから、上記のメカニズムを把握するために数値解析を計画した。検討ではマクロモデルを用いて数値解析を実施し、試験体の実験的な挙動と性能を再現することで解析モデルの妥当性を検証する。なお、解析は汎用の非線形フレーム構造解析プログラム SNAP<sup>®</sup>を用いた。

### 3.1 架構のモデル化

2 章の実験結果より、試験体の挙動や性能を評価するためには、梁に対する軸力と曲げの相関及び試験体 4CLT-60 では CLT 壁のロッキング挙動を考慮する必要がある。そこで、これらを合理的に考慮するため、3.2 節で詳述するマルチスプリング (MS) モデル<sup>7)</sup>を主に用い、各試験体を Fig.8 に示すようにモデル化した。解析モデルは実験と同様に階高を 1,140mm、柱中心間距離を 2,750mm とし、上層及び下層のピン中心までを表現した。解析モデルにおいて試験体の上下層の柱に取り付くピン支承は剛体と仮定した。

各試験体において柱、梁、間柱の危険断面位置は接続する部材のフェース位置とし、剛域は節点から危険断面位置より  $D/4$  ( $D$ : 各部材のせい) 内側までとした。CLT 壁を有する試験体 4CLT-60 において、CLT 壁の危険断面は節点から梁せいの  $1/2$  (梁フェース位置) とし、剛域は節点から危険断面までの範囲とした。また、梁部材の柱から間柱の区間を一本の部材として、CLT 壁による節点は中間節点として取り扱った。解析では実験と同様に上部ピン支点到長期軸力を模擬した節点荷重 659kN を各柱柱頭に載荷し、上層頂部に強制変位を与え、各節点の  $x$  方向変位から求まる左右の中間層柱の層間変形角によって制御した。層間変形角は、2.2 節に示す荷重計画と同様に、両側柱の平均値を用いた。

### 3.2 部材及び材料のモデル化

柱及び梁、間柱、CLT 壁は軸力—曲げモーメント相関関係を評価するために MS モデルを採用し、せん断は弾性として定義した。Fig.9 に各部材における MS モデルの要素分割を示す。また、同図中の記号は Fig.8 に示す記号とそれぞれ対応している。

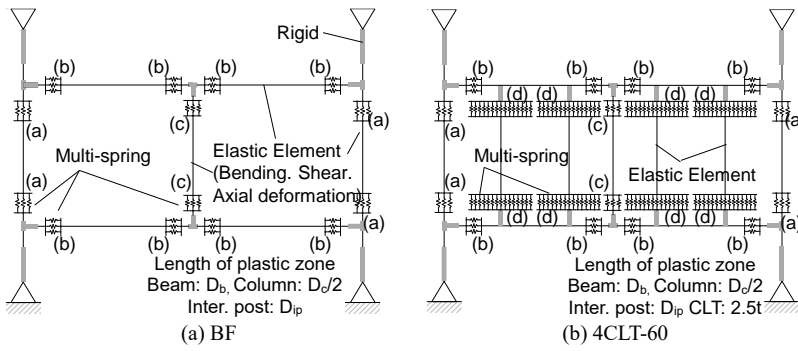


Fig.8 Overall analysis models for the specimens

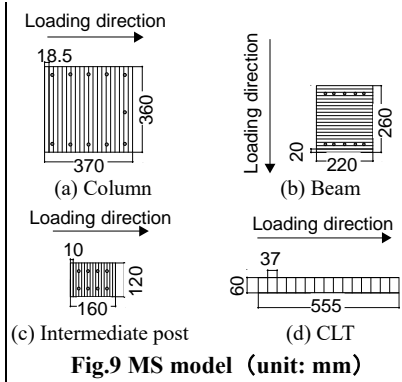


Fig.9 MS model (unit: mm)

### (1) 試験体 BF

柱の塑性ヒンジ長さは柱せい  $D_c$  の半分 (=185mm) と仮定し、梁と間柱の塑性ヒンジ長さは Fig.11 に示す実験の損傷状況に基づき、梁せい  $D_b$  (=260mm) と間柱せい  $D_{ip}$  (=160mm) を与えた。なお、MS モデルを除く線材部分の軸剛性、曲げ剛性及びせん断剛性については各部材の断面性能の値を与えた。

### (2) 試験体 4CLT-60

CLT 壁を有する試験体において、柱及び梁、間柱は試験体 BF と同様のモデルとした。CLT 壁は実験において CLT パネルがロッキング挙動を示したことから、CLT パネルは曲げ挙動が支配的と考え、MS モデルを用いてモデル化した (Fig.8(b) と 9(d))。また、CLT 壁の塑性ヒンジ長さの設定方法には明確な根拠がないが、圧縮挙動を表現する必要があることから RC 壁を参考に壁厚の 2.5 倍<sup>8)</sup> と仮定した。CLT 壁の塑性ヒンジ長さの妥当性については今後さらなる検討が必要である。なお、CLT 壁の MS モデルを除く線材部分の軸剛性、曲げ剛性及びせん断剛性についても CLT パネルの断面性能の値を与えた。

Fig.10 に MS モデルの要素に用いたコンクリート及び鉄筋、CLT の材料モデルをそれぞれ示す。コンクリートの圧縮側は Hognestad モデル<sup>9)</sup> とした。引張側はひび割れ強度までを線形で定義し、ひび割れ後においては線形劣化モデルで定義し、応力零点は引張強度時変形の 2 倍と仮定した。ただし、コンクリートの引張強度は鉄筋コンクリートの構造計算規準<sup>10)</sup> から求めた。また、鉄筋は Fig.10(b) に示す Bi-linear 型とし、圧縮側・引張側ともに降伏後の剛性を  $0.001 \times E_s$  ( $E_s$ : 鉄筋のヤング係数) とした。なお、解析における材料特性は Table2 及び 3 の材料試験値を用いた。Fig.10(c) に示すように CLT 壁の圧縮側は既往研究<sup>11)</sup> で適合性を確認した Hognestad モデルを採用した。また、引張側は CLT 壁がロッキング挙動をしたため、応力を負担しないものとした。解析における CLT 壁の材料特性は Table4 (b) に示す部分圧縮試験の強軸方向の値を用いた。

### 3.3 解析結果とその分析

Fig.11 に層間変形角  $R=1.0\%$  rad まで (本稿では概ね実

$f_c, f_w$ : Compressive strength	$f_t$ : Tensile strength	$f_w$ : Yield stress
$E_c, E_s, E_w$ : Elastic modulus		
$\epsilon_0$ : Strain at peak compressive strength	$\mu\epsilon_0$ : Ultimate strain at failure	
$\lambda$ : Reduction factor	$\tau$ : Strain at zero tensile strength	

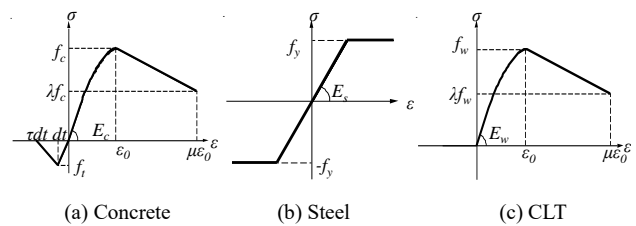


Fig.10 Stress-strain behavior models for the MS model

務で想定する範囲の変形について比較とする方針とした)の実験結果及び単調載荷による解析結果における骨格曲線の比較を示す。試験体 BF について初期剛性、梁降伏後の耐力を精度よく評価しており、総じて実験で得られた架構全体の水平荷重-水平変形角関係を概ね評価することができた。一方、CLT 壁を有する試験体 4CLT-60 は解析結果が実験結果の梁降伏後の耐力を概ね評価したものの、初期剛性は解析値が実験値を過小評価した。これは、数値解析においては RC 梁への CLT パネルの埋め込みを無視したため、CLT パネルの引張抵抗を考慮していないためと考えられる。また、両試験体ともに解析結果におけるメカニズム形成は実験より早期に発生している。これは MS モデルの解析において平面保持仮定をしたことにより、鉄筋の抜け出し効果を考慮していないことが一因と考えられる。

試験体 4CLT-60 における架構の柱(間柱を含む)と CLT 壁のせん断力負担の内訳を水平荷重-層間変形角関係により比較して Fig.12 に、軸力負担の内訳を Fig.13 にそれぞれ示す。なお、Fig.12 及び、Fig.13 におけるせん断力及び軸力は各鉛直部材端部に設けているマルチスプリングより、応力(曲げモーメント及び軸力)を抽出して算定した。また、Fig.12 では試験体 BF の解析結果を併せて示す。試験体 4CLT-60 の RC 架構のメカニズム時の耐力は 57.7kN であり、試験体 BF に対し約 45%であった。また、CLT 壁の耐力に着目すると、メカニズム時の耐力は 158.0kN であり、その際にせん断力負担の割合は RC 架

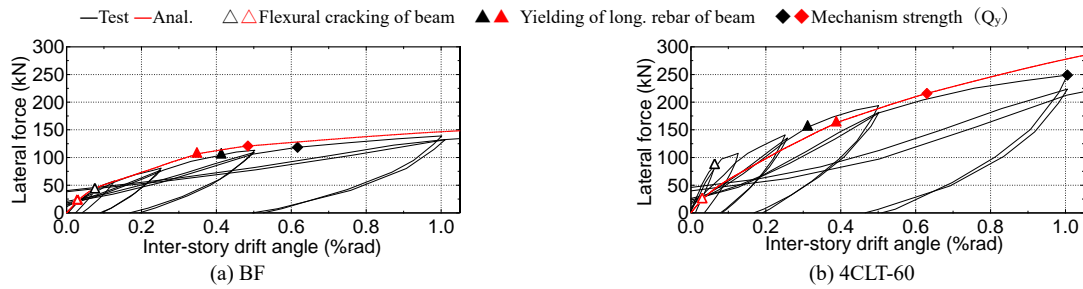


Fig.11 Analytical performance curves compared with the experimental results

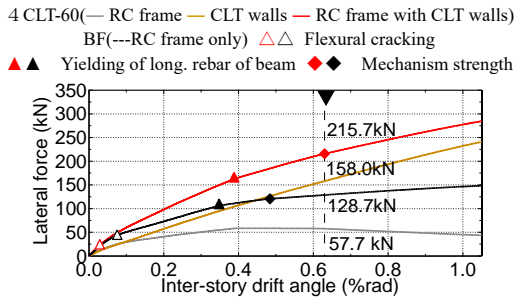


Fig.12 Lateral force contributions of RC columns and CLT infill wall

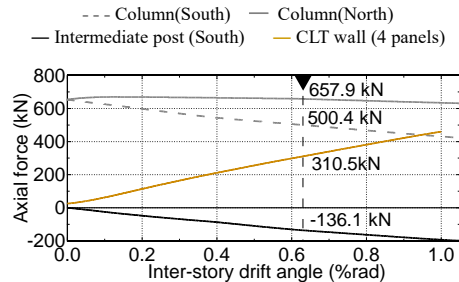


Fig.13 Axial force contributions of RC columns and CLT infill wall

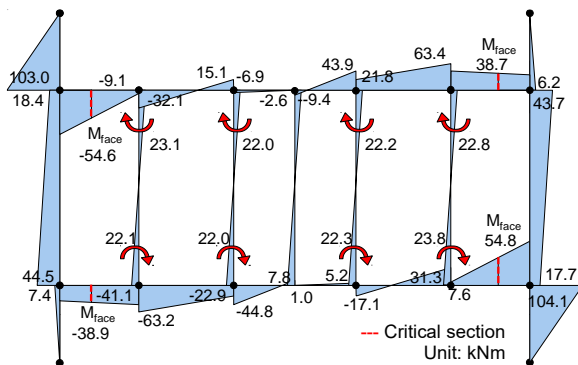


Fig.14 Bending moment diagram ( $R=+0.63\%rad$ )

構が 27%, CLT 壁が 73%であった。上記のように CLT 壁が架構全体に対し、大きくせん断力を負担するのは変形の進行に伴う CLT 壁のロッキング挙動により Fig.13 に示す大きな軸力が CLT 壁に作用したことに起因する。

以上の解析結果より、解析モデルは実験結果の骨格曲線を比較的良好に評価することができた。しかしながら、試験体 4CLT-60 の解析結果における応力図をみると Fig.14 に示すように梁が CLT 壁との解析モデル上の節点で曲げ戻しを受けるため、実際の実験結果に対する梁の応力状態が正しく評価されていないことを確認した。これは本解析において CLT 壁を線材要素に置換したことに起因するため、以下では実際の梁の応力を解析結果に基づいて推定する方法について提案し考察する。

#### 4. 梁応力図の補正

本章では、実験で観察された試験体挙動に対応した梁応力図を得ることを目的とし、CLT 壁のロッキング挙動によって梁に作用するパンチングシア（鉛直力）を RC 架構モデルに直接入力し、梁応力の補正を行う。その具体

的な手順について以下に詳述する。

- Step①: 3 章で示した解析モデルを用い、任意の層間変形角の条件の下で、CLT 壁及び線材要素から上下梁に伝達されるせん断力及び線材端部の MS 要素における軸応力を抽出する (Fig.15(a))。また、本試験体は間柱を有するため、間柱端部の応力（曲げモーメント、せん断力、軸力）も併せて抽出した。
- Step②: RC 架構のみのモデルに対して、Step①で抽出した応力（CLT のせん断力と軸応力）を初期荷重として入力した後、目標変形角  $R$  に至るまで増分解析を行う。初期荷重として扱うせん断力（青色矢印）は節点への集中荷重、軸応力（赤矢印）は分布荷重としてそれぞれ入力する (Fig.15(b))。また、解析対象の試験体は架構内に間柱を有しているため、step①で抽出した間柱応力（灰色矢印）を初期荷重として同様に入力する必要がある。なお、本解析において CLT 壁要素及び間柱より抽出した応力を初期荷重として入力した場合でも本来の数値解析結果 (Fig.14) と大差ないことを併せて確認した。

上記の補正方法より、実験で観察された試験体挙動（CLT 壁のロッキング挙動）に対応した梁応力図を得ることができた。その応力図を試験体 4CLT-60 のメカニズム時 ( $R=+0.63\%rad$ ) を対象として Fig.15(c)に例示する。

#### 5. まとめ

本研究では CLT 壁を有する RC 架構（梁降伏先行型）の基礎的な構造性能の把握を主な目的として、CLT 壁の有無を変動因子とする静的繰り返し載荷実験を対象に数値解析を実施し、CLT 壁が RC 架構の構造性能に与える

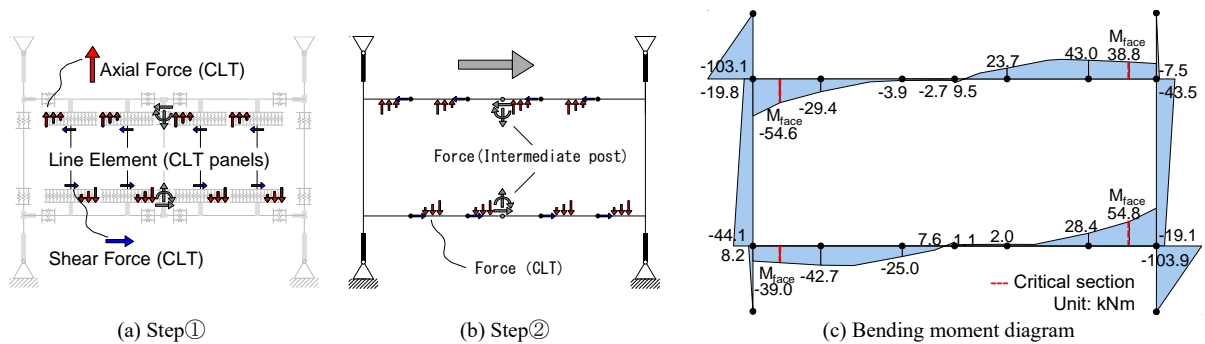


Fig.15 Correction method for the beam stresses ( $R=0.63\%rad$ )

影響を分析し報告した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験結果より CLT 壁のロッキング挙動が見られたため、これを MS モデルに置換する解析モデルを示した。本解析モデルは実験で得られた架構全体の水平荷重－水平変形関係（実務で想定される  $R=1.0\%rad$  まで）を概ね評価することができた。しかし、CLT 壁を有する試験体 4CLT-60 の初期剛性において、解析値が実験値を過小評価した。これは、数値解析において RC 梁への CLT パネルの埋め込みを無視したため、CLT パネルの引張抵抗を考慮していないことに起因する。
- (2) 解析においては CLT 壁を線材要素としてモデル化したため、梁の実際の応力状態を直接的に評価していない問題を指摘し、その補正方法を提示した。

### 謝辞

本研究の実験は(一社)ニューテック研究会の RC+CLT 研究委員会の活動の一環として実施されたものである。実験の計画、実施にあたり関係者各位より貴重な助言と支援を頂いた。また、ここに記して感謝の意を表す。数値解析は JSPS 科研費 22K14361 (研究代表者: 尹ロク現) の助成及び林野庁令和 6 年度 CLT 等木質建築部材技術開発・普及事業「R39 木質系混構造建築物の耐震安全性確保にかかわる計算の方法に関する検討」(事業主体: 日本建築防災協会・京都大学生存圏研究所) の RC 造 WG の活動の一環として行われたものである。

### 参考文献

- 1) 外務省:「持続可能な開発目標 (SDGs) 達成に向けて日本が果たす役割」, 2015.9  
[https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/gic/page3\\_001387.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/gic/page3_001387.html), (閲覧日:2024-12-20)
- 2) 林野庁:「建築物における木材の利用の促進に関する基本方針の概要」  
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/kidukai/kihonhou>

n.html (閲覧日:2024-12-20)

- 3) 福本晃治, 國府田まりな, 久保和民, 宇佐美徹, 北守顕久, 宮内靖昌, 五十田博: 鉄骨架構に耐震要素として挿入された CLT の実験による構造特性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 787 号, pp.1345-1356, 2021.9
- 4) 金澤和寿美, 五十田博, 北守顕久, 宇佐美徹, 荒木康弘: CLT をドリフトピン接合し耐震壁として挿入した鉄骨架構の構造性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 788 号, pp.1430-1439, 2021.10
- 5) 村田晃康, 中島弘史, 黄亮, 尹ロク現, 真田靖士, 五十田博, 迫田丈志, 太田勤, 菊池紀恵, 高畑真二: CLT 壁を有する RC 架構の耐震性能評価に関する研究 (その 5-7), 日本建築学会大会学術講演便覧集, 構造 III, pp.1353-1358, 2023.7
- 6) (株) 構造システム: SNAP ver.8 テクニカルマニュアル, 2020
- 7) Li, K.N., Aoyama, H., and Otani, S.: Reinforced Concrete Columns under Varying Axial Load and Bi-Direction Lateral Load Reversal, Procs. of 9th WCEE, Japan, pp.537-544, 1988.8
- 8) 高橋之, 吉田和也, 市之瀬敏勝, 真田靖士, 松本健規, 福山洋, 諏訪田晴彦: 圧縮側に柱型がない RC 耐震壁の曲げ変形性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 660 号, pp.371-377, 2011.2
- 9) Hognestad, E., Hanson, N.W., and McHenry, D.: Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design, ACI Journal, Vol.52, No.12, pp.455-480, 1955.12
- 10) T. Pauly and M. J. N. Priestley: Seismic Design of Reinforced and Masonry Buildings, John Wiley & Sons, 1992.3
- 11) 村田 晃康, 杉本 佳奈, パラダグン スーザン, 真田 靖士: CLT 壁を有する RC 架構のパイロット実験と構造解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.517-522, 2022.7