

(基整促 S39)

木質系混構造建築物の保有水平耐力計算の 方法に関する検討

一般財団法人 日本建築防災協会

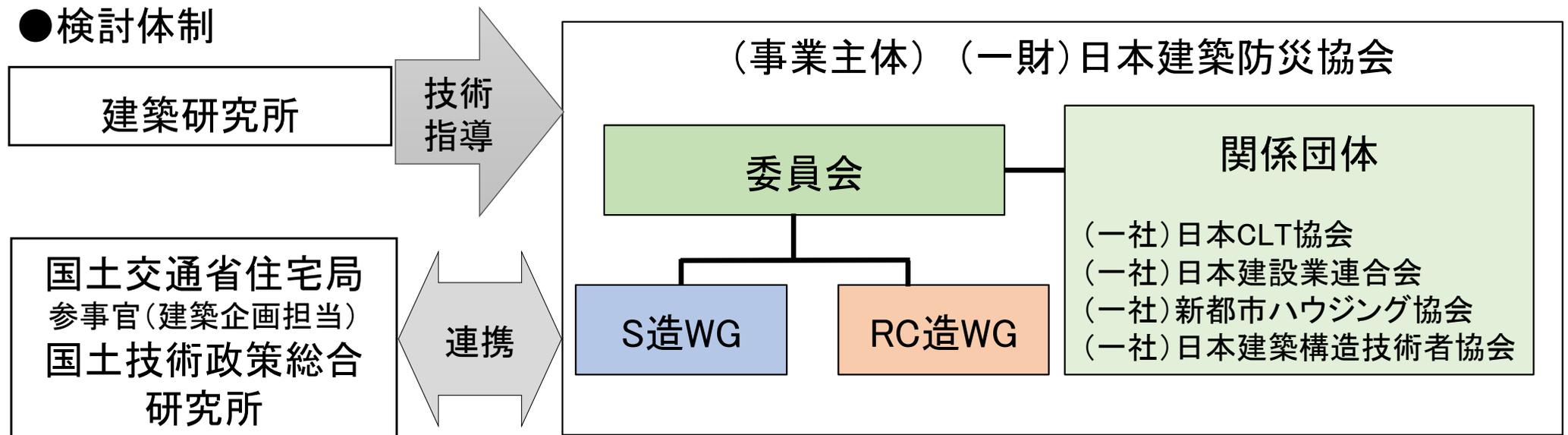
2024年4月

●調査の背景と目的

建築物における更なる木材利用の観点から木質系混構造建築物の建築基準整備が求められているが、鉄筋コンクリート造や鉄骨造にCLT等を耐力壁等として用いる場合の技術資料が十分でなく、その整備が必要である。国土交通省国土技術政策総合研究所による総合技術開発プロジェクト「新しい木質材料を活用した混構造建築物の設計・施工技術の開発」(H29-R3)(以下「総プロ」という。)において、特定の構造方法(接合部仕様や壁配置)について保有水平耐力計算の考え方が検討されたところであるが、同様の考え方で検証が可能な仕様を拡充し、一般的な設計法として整備するための検討が必要である。

本事業では、鉄骨造や鉄筋コンクリート造にCLT等を耐力壁等として用いる場合について、総プロの検討対象から接合部仕様や壁配置、建物高さを拡大して検討を行い、木質系混構造建築物の保有水平耐力計算の方法に関する技術資料をまとめる。

●検討体制



委員長

五十田 博
(京都大学 生存圏研究所
教授)

S造WG 主査

石原 直
(東京工業大学 科学技術創
成研究院 教授)

RC造WG 主査

真田 靖士
(大阪大学 工学(系)研究科
(研究院) 教授)

大地震動(極めて稀に発生する地震動)に対して、鉄骨ブレース付き架構と同等以下の变形となるために必要となるCLT 耐力壁付き架構の耐力からDs 値案を提案した。

具体的なDs 値の検討方法は以下の2つとした。

- ①限界耐力計算を用いた略算的な検討
- ②代表的な試設計モデルによる時刻歴解析・限界耐力計算検討

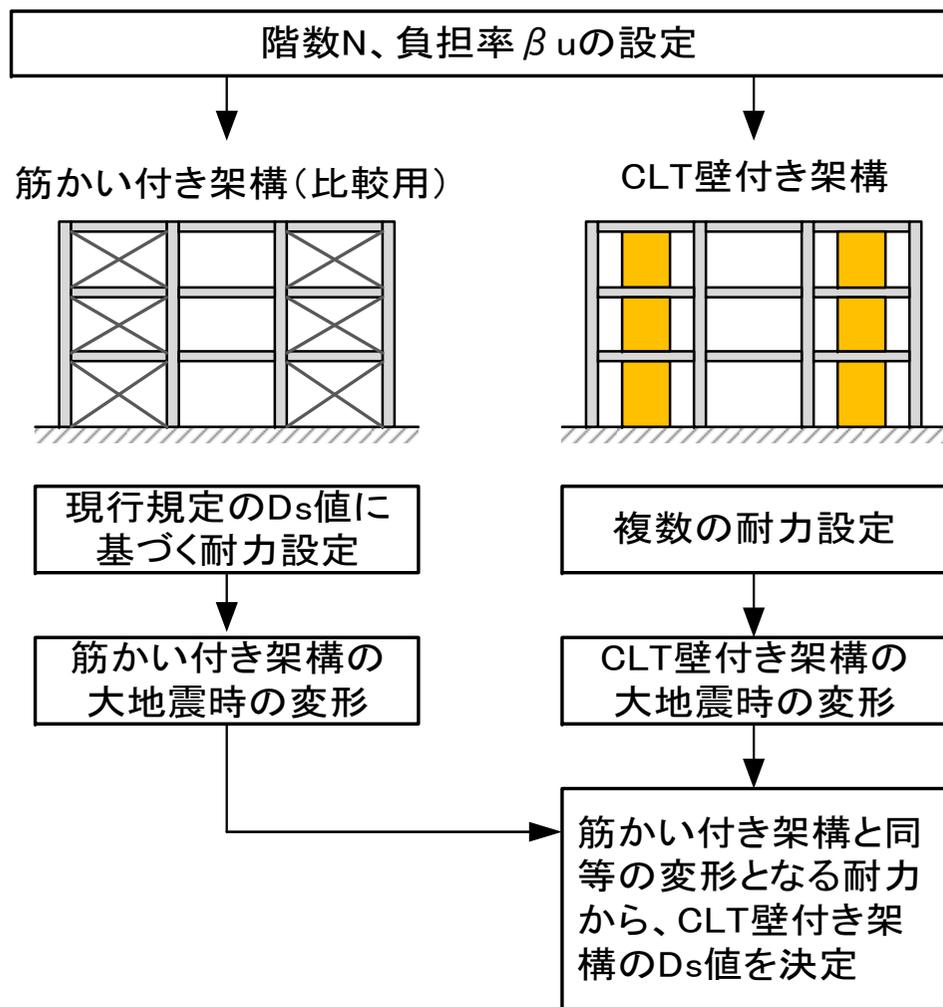
また、留意事項等をまとめている。

2023年度は

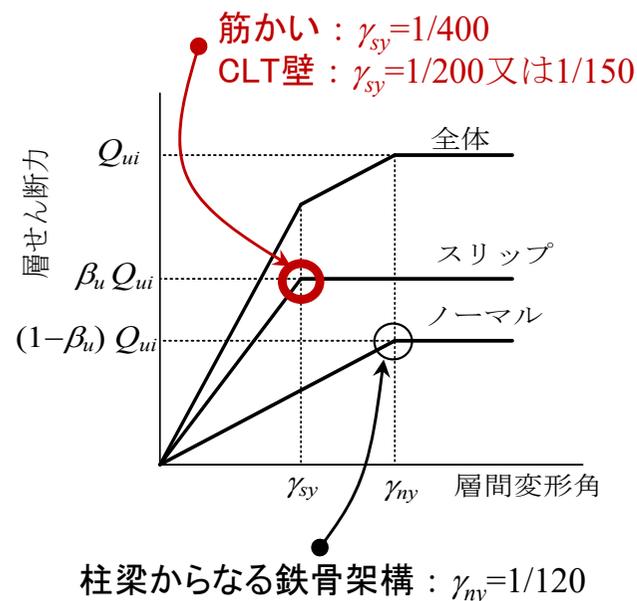
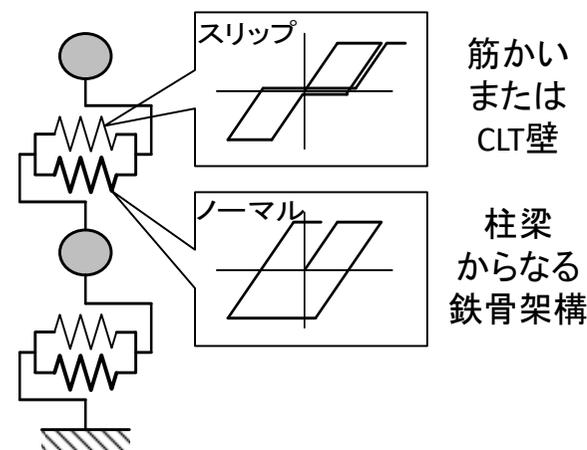
- ①民間からのご要望を受け、負担率 β_u が小さい場合の Ds 値を新たに検討し、 $\beta_u \leq 0.15 \sim 0.2$ の場合には純ラーメンと同等の Ds 値とすることを提案した。また、 β_u の広い範囲に渡って CLT 耐力壁付き架構の必要耐力を求めた上で、Ds 値の案をまとめた。
- ②2022 年度に検討した9 階モデルの見直し、また、4 階・9 階・14 階建ての代表的なCLT耐力壁付き架構のモデルを作成し、時刻歴応答解析と合わせて限界耐力計算を実施し①と比較した。

・なお、ここでいう「CLT 耐力壁」とは、梁のみに接合したCLT 壁のことをいう。

限界耐力計算で、いくつかの仮定を置くことにより(2022年度報告参照)、大地震時の最大変形を簡便に評価し、鉄骨ブレース付き架構と同等以下の変形となるために必要となるCLT耐力壁付き架構の耐力を基に、Ds案を決めた。



検討のフロー



スリップとノーマルの組合せ

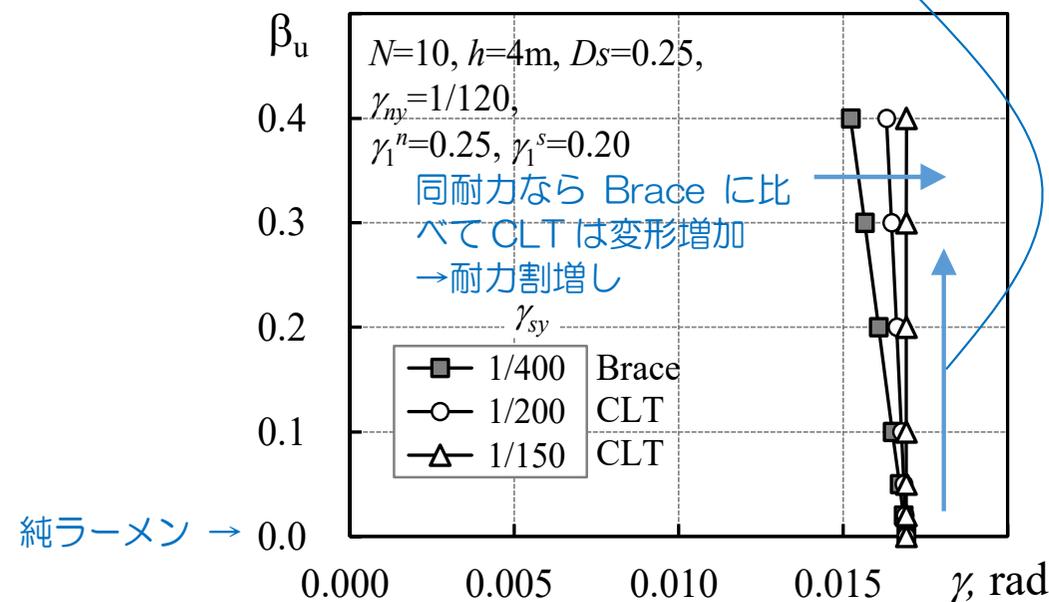
①限界耐力計算を用いた略算的な検討(負担率 β_u が小さい場合)

民間からのご要望を受け、負担率 β_u が小さい場合の D_s 値を検討し、 $\beta_u < 0.15 \sim 0.2$ の場合には純ラーメンと同等の D_s 値をすることを提案。

(※鉄骨ブレース付き架構と同等以下の変形ではない)

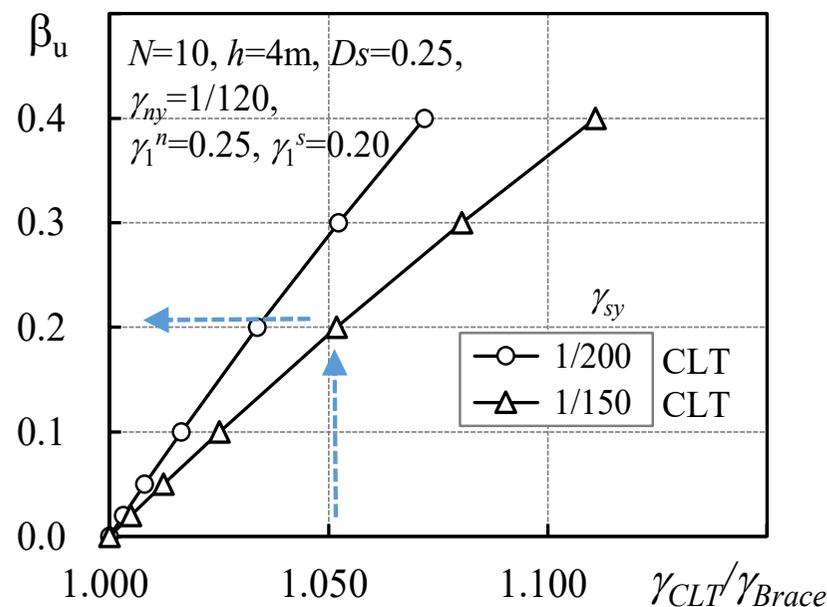
	評価対象	比較対象	判断基準
2022年度 (昨年度)	CLT壁付き架構の必要耐力	筋かい付き架構	大地震時の変形が同等
要望を受けて	負担率の小さいCLT壁付き架構の変形	純ラーメン+筋かい付き架構	純ラーメンに対して変形は同等以下(下図参照)→筋かい付き架構に対して一定の範囲で変形が大きくなることを許容する

純ラーメンに比べると変形は同等以下



(a) 層間変形角

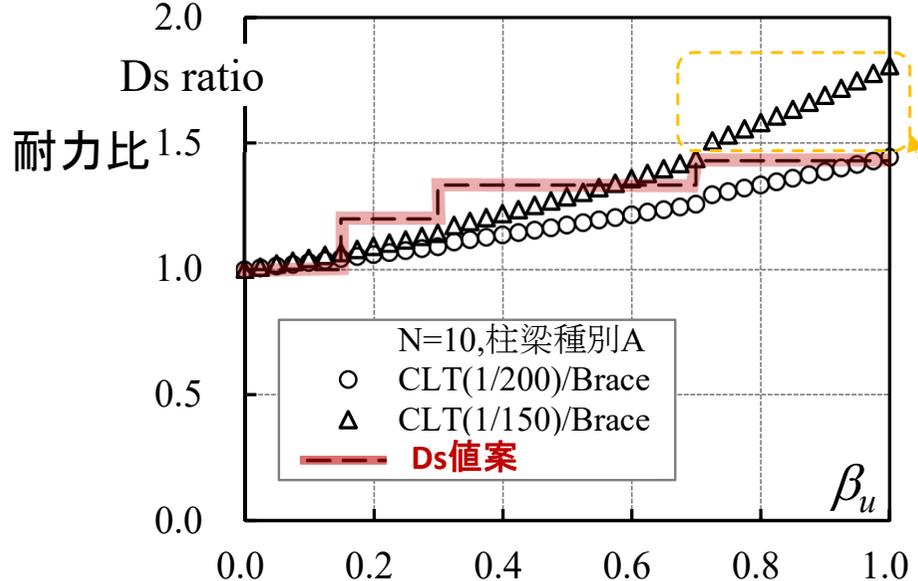
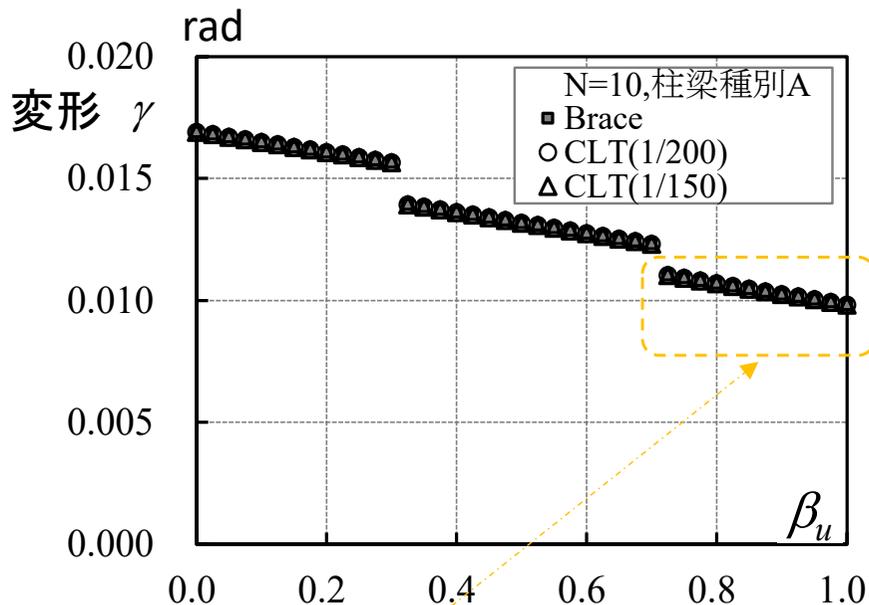
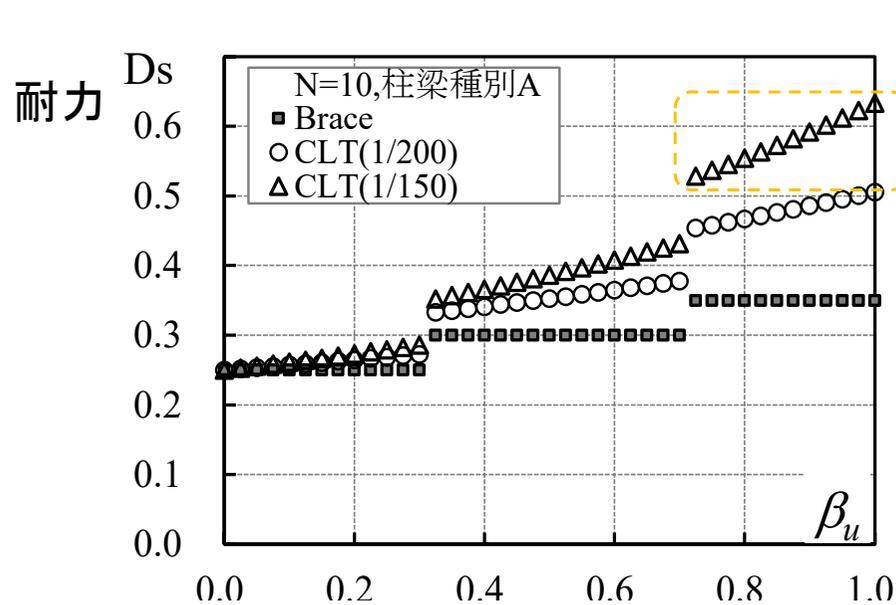
例えば Brace(筋かい付き)に比べて 5%までの増加を認めるなら、 $\beta_u \leq 0.2$ で D_s をラーメンと同等とする



(b) 層間変形角の比 (CLT/Brace)

大地震時の変形 (層数 $N=10$, 階高 $h=4m$, 耐力 $D_s=0.25$)

負担率 β_u と必要耐力の関係を示すため、鉄骨造筋かい付き架構と同じ応答変形となる場合の、CLT壁付き架構の耐力 (D_s) を繰返し計算により求めた。



昨年度は $\beta_u=0.3$ 及び 0.7 での検討に留まっていたが、 β_u の広い範囲で「昨年度 D_s 値案」は概ね妥当であることを確認した。(図は $N=10$ 、柱梁種別Aの場合)

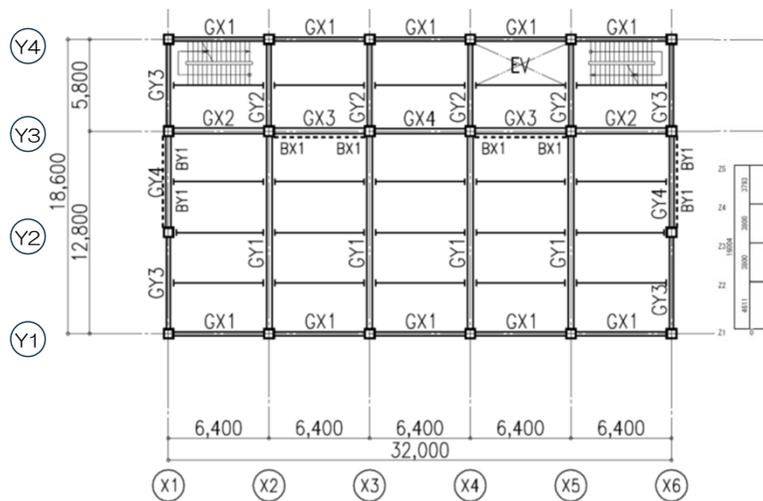
$\beta_u > 0.7$ で「CLT(1/150)/Brace」は「昨年度 D_s 値案」を上回る。しかし、 $\beta_u > 0.7$ では変形が $1/100$ 前後であって小さめであり、CLT壁の必要耐力 (D_s) が大きく、保有水平耐力計算での最大値 $D_s=0.55$ を上回る。→そのまま D_s 値に反映しなくてもよいと考えられる。

2022年度の試設計建物は9階のみであったが、4階、14階を加えた。

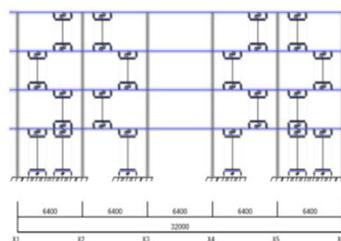
階数	耐震要素の地震力負担率 β_u *	耐震要素	CLTの破壊モード	フレームの部材ランク
4	0.3程度	引張ブレース	—	FAランク
		CLT	軸接合部の引張降伏	
	0.6程度	引張ブレース	—	
		CLT	軸接合部の引張降伏	
	0.8程度	引張ブレース	—	
		CLT	軸接合部の引張降伏	
9	0	—	—	
	0.15程度	引張ブレース	—	
		CLT	軸接合部の引張降伏	
	0.3程度	引張ブレース	—	
		CLT	軸接合部の引張降伏	
	0.6程度	引張ブレース	—	
CLT		軸接合部の引張降伏		
14	0.15程度	引張ブレース	—	
		CLT	軸接合部の引張降伏	

モデルの規模	階数	基準階階高 (m)	1階階高 (m)	高さ (m)	基準スパン (m)
中層(1時間耐火)	4	3.8	4.8	16.2	6.4
高層(90分耐火)	9	4	5	37	
ほぼ超高層(2時間耐火)	14	4.2	5.2	59.8	

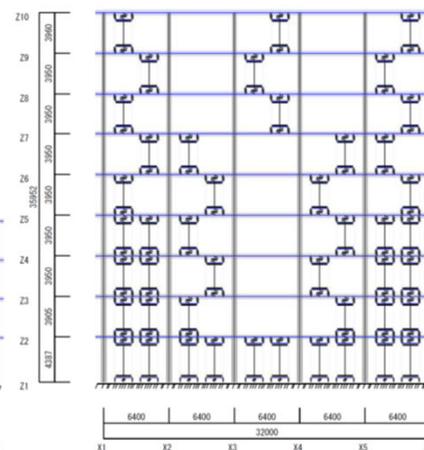
■ 本年度追加分 ※ β_u が目標値に概ね近似するように設計



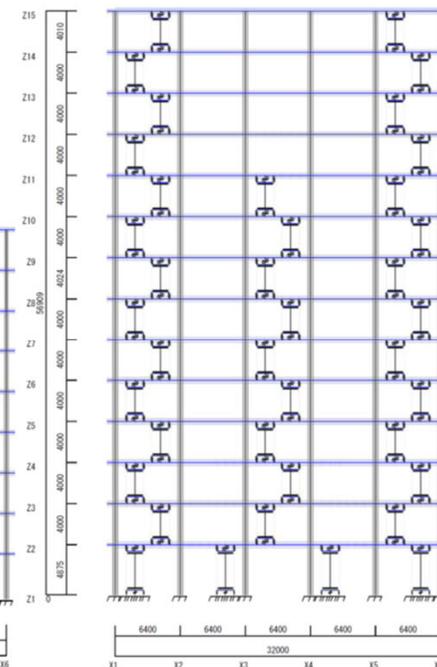
床伏図



4階 $\beta_u=0.6$ CLTモデル
Y1通り

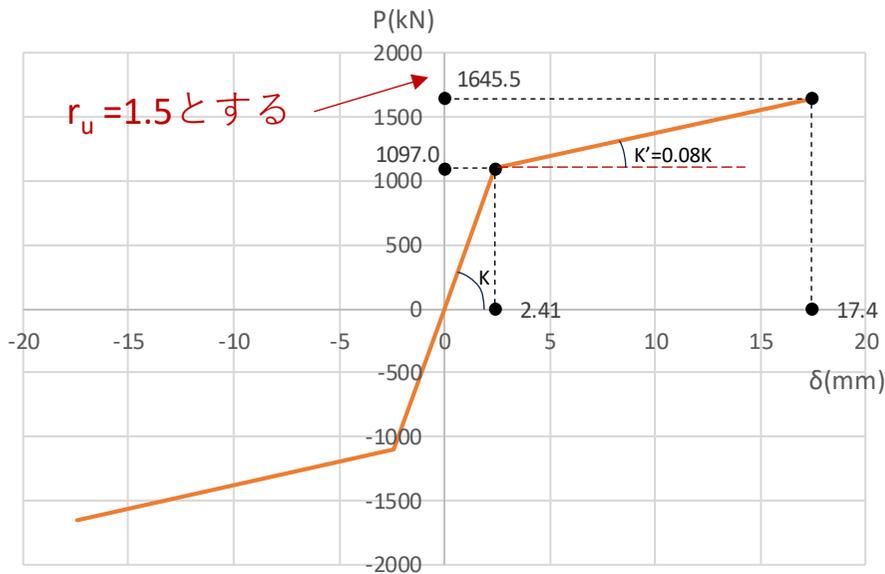


9階 $\beta_u=0.6$ CLTモデル
Y1通り



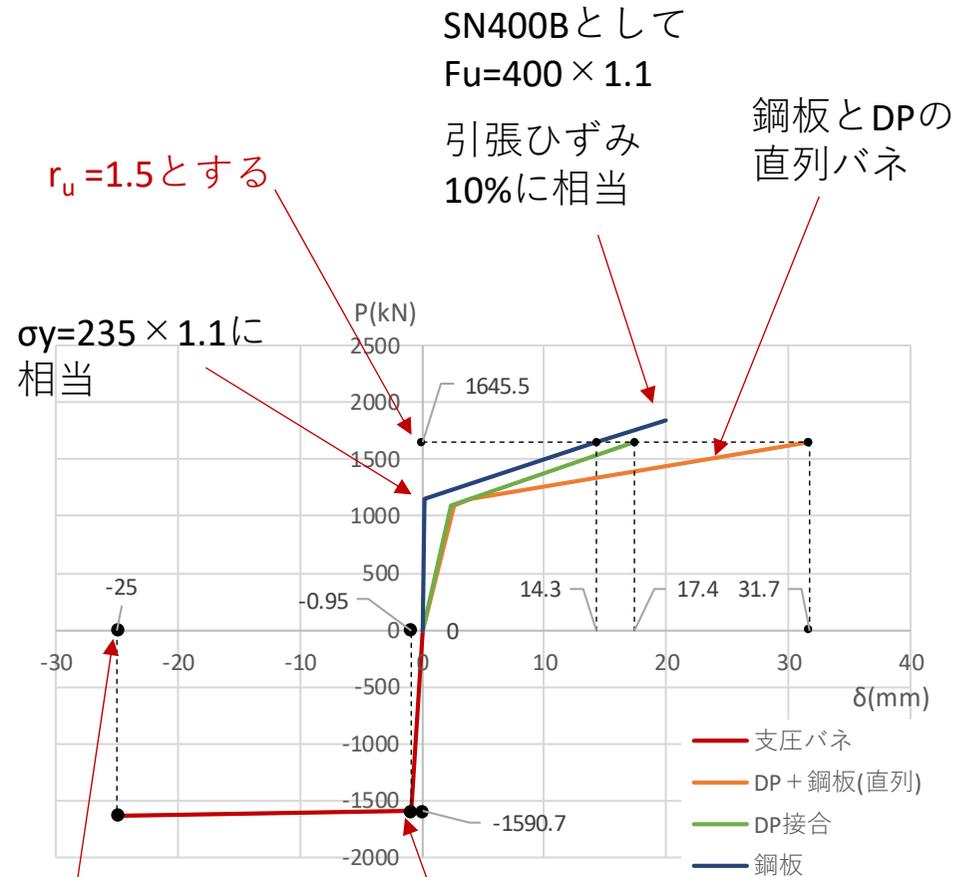
14階 $\beta_u=0.3$ CLTモデル
Y1通り

ドリフトピン接合部の終局耐力は降伏耐力の1.5倍 ($r_u=1.5$)を設定。
 1階柱脚以外の軸接合部の限界変形は17.4mm、1F柱脚部の限界変形は圧縮側で25mm、引張側で31.7mmと設定した。



CLT : S90-5-7
 ドリフトピン : d20 × 24本(SS400)

1階柱脚以外



SN400Bとして
 $F_u=400 \times 1.1$

引張ひずみ
 10%に相当

鋼板とDPの
 直列バネ

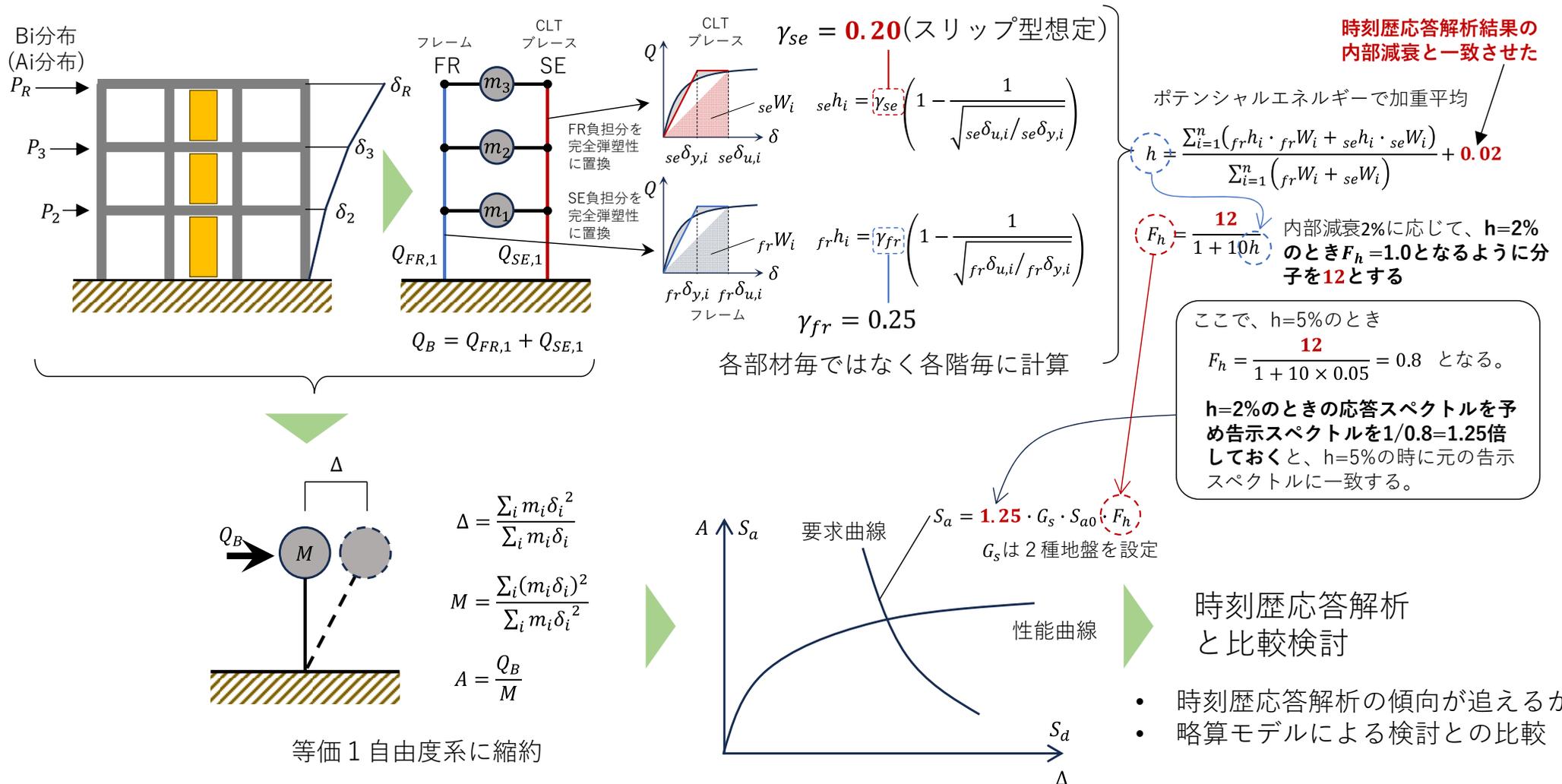
$\sigma_y=235 \times 1.1$ に
 相当

CLT : S90-5-7
 ドリフトピン : d20 × 24本(SS400)

支圧側の
 限界変形

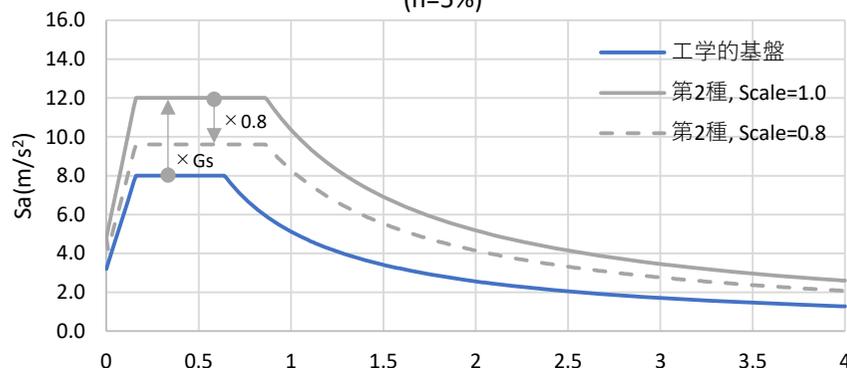
支圧降伏
 1階柱脚

限界耐力計算における減衰の設定は、内部減衰を時刻歴応答解析と整合させ2%とし、履歴減衰にかかわる係数 γ は、フレーム負担分を $\gamma=0.25$ 、ブレースとCLTの負担分についてはスリップ型を想定し $\gamma=0.2$ と設定。

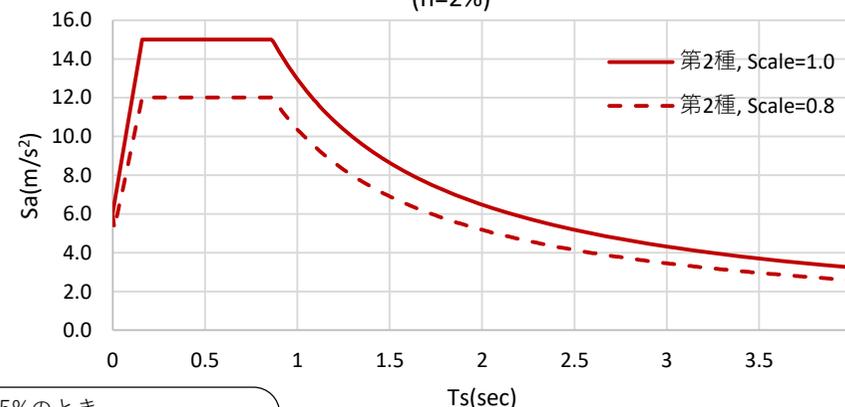


加速度応答スペクトルは2種地盤(Gs略算)で設定。内部減衰2%に対応して、応答スペクトルを減衰による低減係数(F_h)により調整。地震動はランダム位相3種類とし、スケールは「0.8倍」と「1倍」を設定する。

Sa : 加速度応答スペクトル (h=5%)

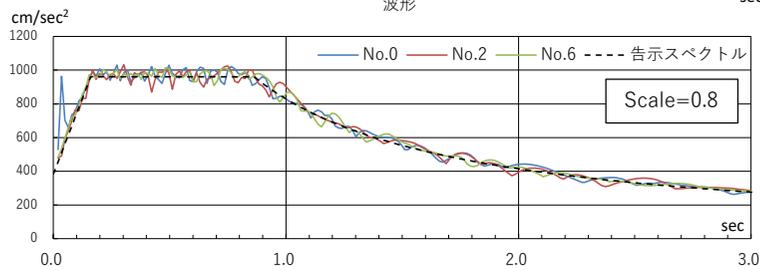
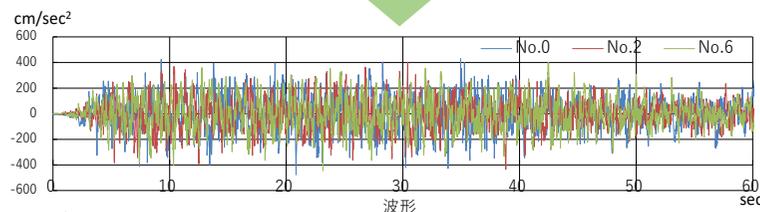


Sa : 加速度応答スペクトル (h=2%)



正弦波合成法により応答スペクトルに適合する地震波を作成

- ランダム位相3種類
- スケール0.8倍、及び1倍の2種類



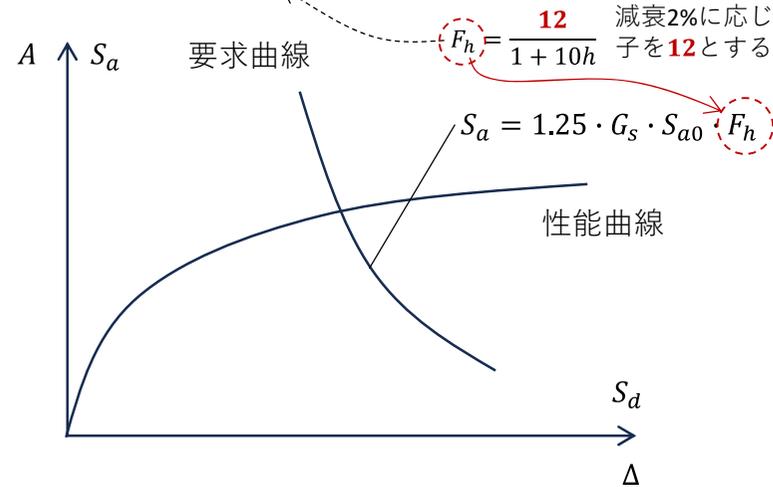
時刻歴応答解析

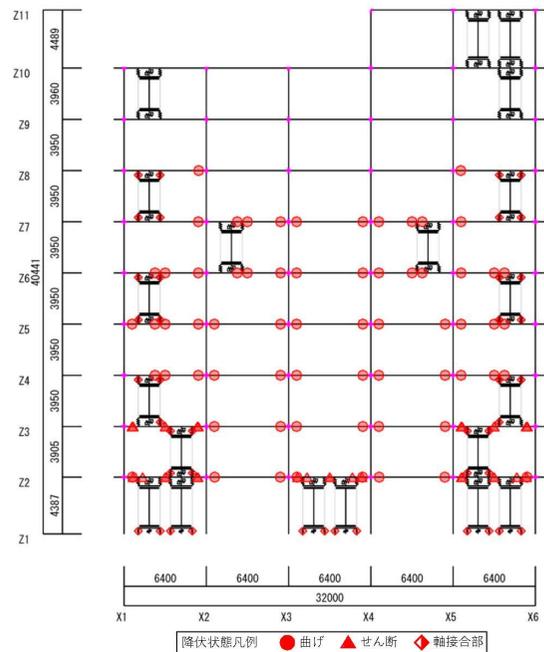
ここで、h=5%のとき

$$F_h = \frac{12}{1 + 10 \times 0.05} = 0.8$$
 となる。
 h=2%のときの応答スペクトルを予め告示スペクトルを1/0.8=1.25倍しておくこと、h=5%の時に元の告示スペクトルに一致する

限界耐力計算

h=2%のとき $F_h = 1.0$ となるように、内部減衰2%に応じて、分子を12とする



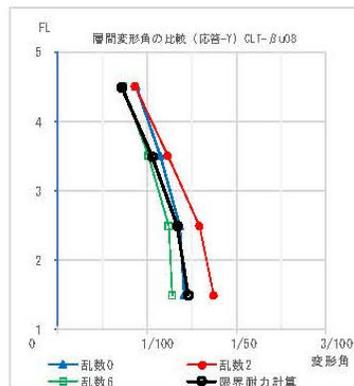
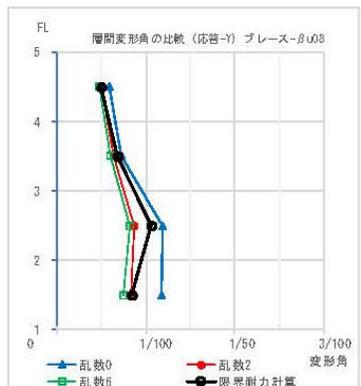


ヒンジ図(9F $\beta u=0.6$ Y1 通り)
検討用外力(0.8倍)の場合

- 時刻歴応答解析におけるヒンジ図(時刻歴の累積結果)の例を示す。
- 終局時のメカニズムは、軸接合部の降伏(引張, 支圧)、鉄骨梁の材端曲げ降伏, 鉄骨梁のせん断降伏が混在したものとなった。
- CLTパネルの接合部は、概ね全ての軸接合部において圧縮方向・引張方向ともに限界変形以内に納まっており、CLTパネル及びせん断接合部は弾性範囲にあることを確認した。

「CTL付き架構」

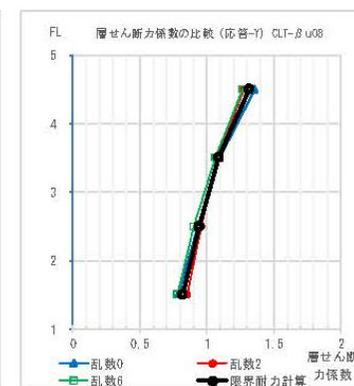
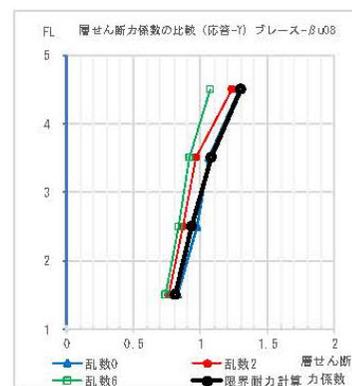
「鉄骨ブレース付き架構」



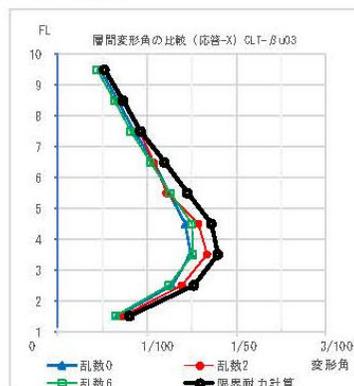
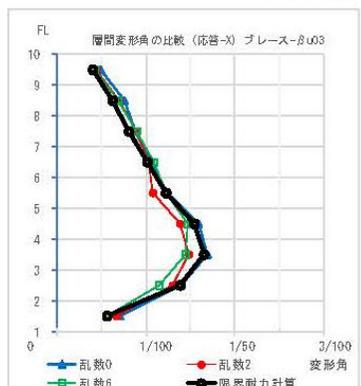
4F モデル $\beta u=0.8$ Y 方向

「CTL付き架構」

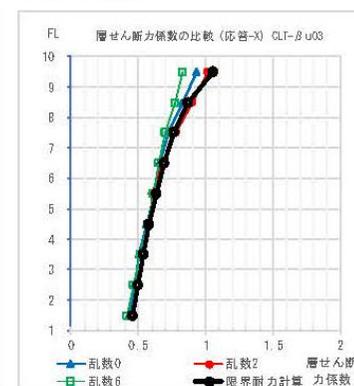
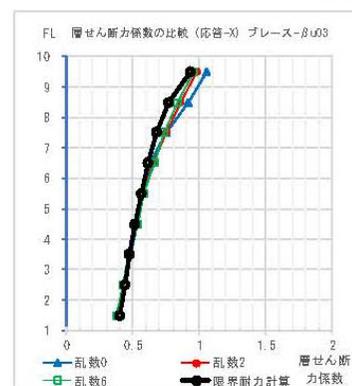
「鉄骨ブレース付き架構」



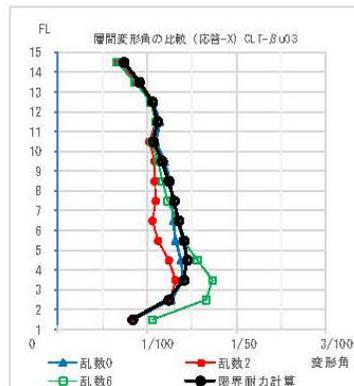
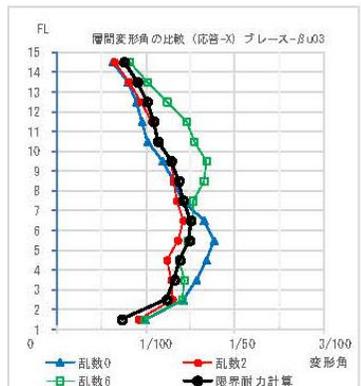
4F モデル $\beta u=0.8$ Y 方向



9F モデル $\beta u=0.3$ X 方向

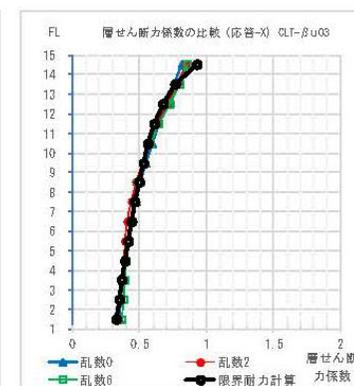
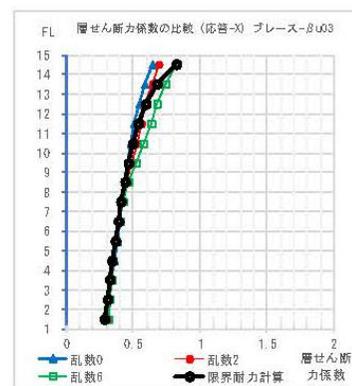


9F モデル $\beta u=0.3$ X 方向



14F モデル $\beta u=0.3$ X 方向

最大応答層間変形角
検討用外力(0.8倍)の場合



14F モデル $\beta u=0.3$ X 方向

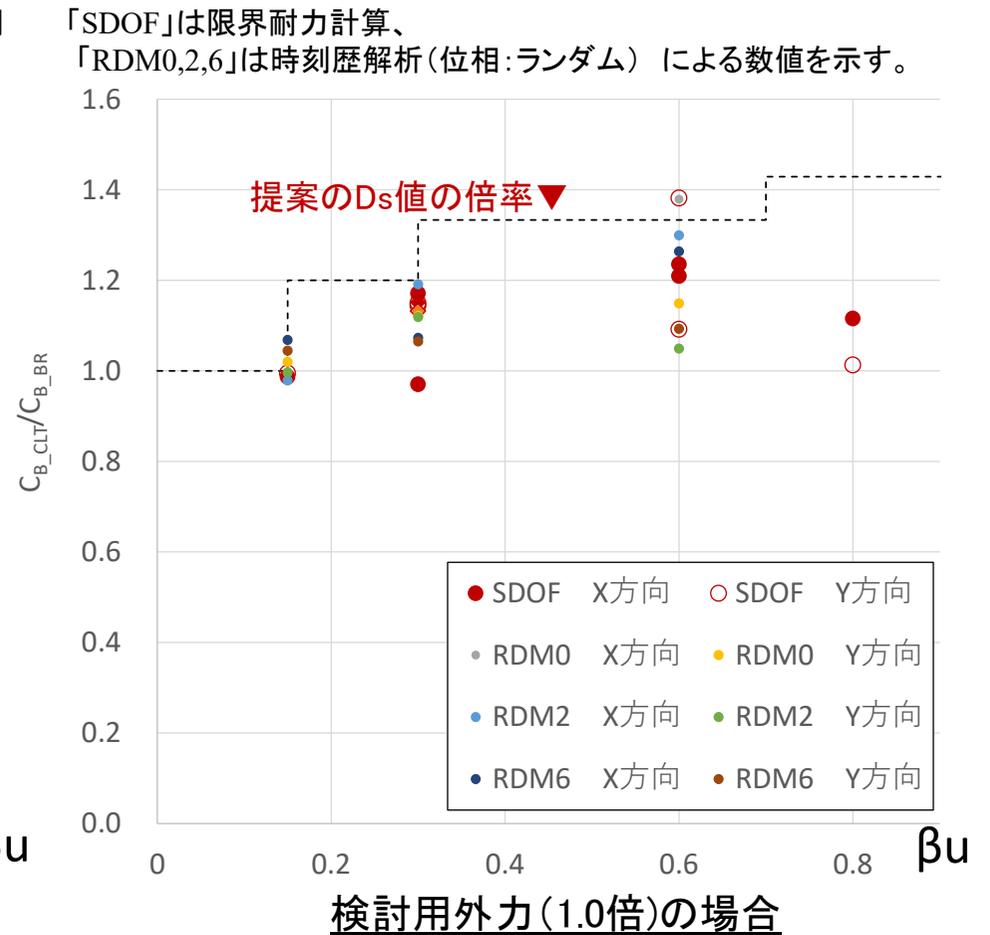
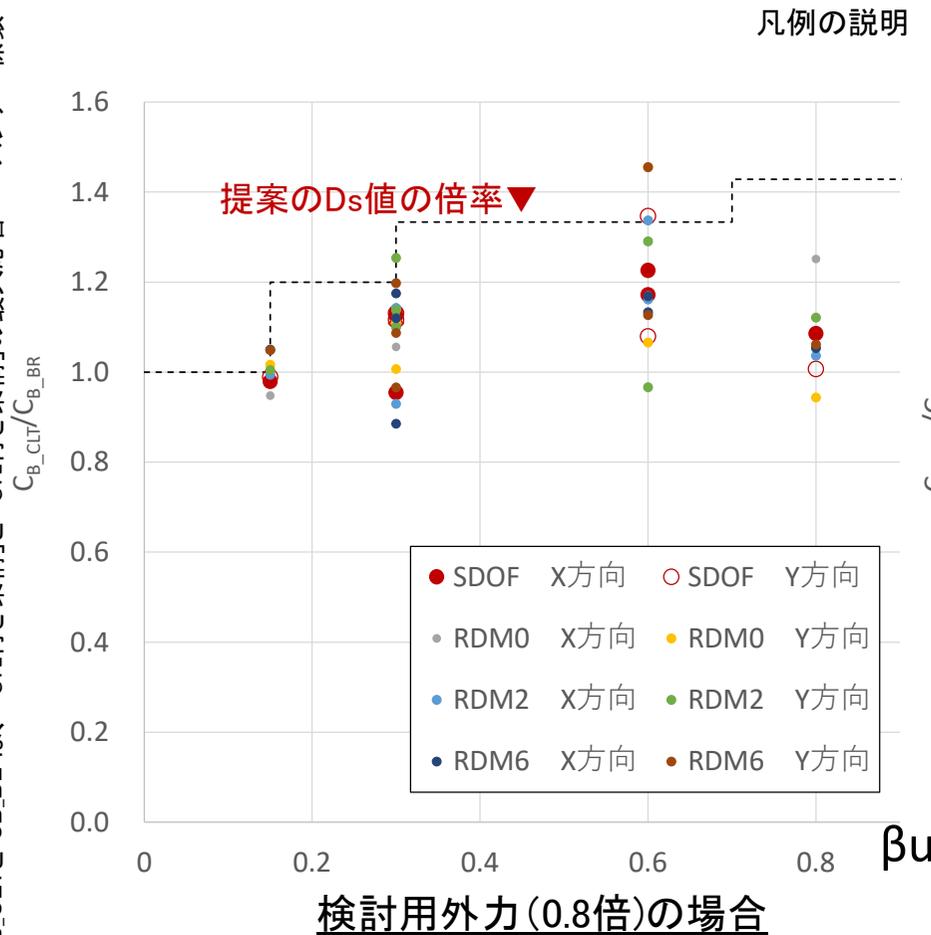
最大応答層せん断力係数
検討用外力(0.8倍)の場合

「鉄骨ブレース付き架構」と応答変形が同等程度となる「CTL付き架構」のベースシア係数の倍率は、提案のDs値の倍率を概ね下回る結果となった。また、以下のことが言える。

- ・限界耐力計算の結果は時刻歴解析結果の平均的な値を示した。
- ・検討用外力(0.8倍)と(1.0)倍の結果は大差なかった。

「鉄骨ブレース付き架構」と応答変形が同等程度となる「CTL付き架構」のベースシア係数の倍率

※ C_{B_CTL} と C_{B_BL} は、「CTL付き架構」と「CTL付き架構」の最大応答ベースシア係数



「鉄骨ブレース付き架構」と応答変形が同等程度となる「CTL付き架構」のベースシア係数の倍率 と β_u の関係

鉄骨ブレース付き架構と同等以下の変形となるために必要となる CLT耐力壁付き架構の耐力を基にしたDs値案

水平力分担率	筋かい 部材群 B	CLT 耐力壁 (筋かいに対する比)
$0 < \beta_u \leq 0.15$	0.25	0.25 (1.00)
$0.15 < \beta_u \leq 0.3$		0.30 (1.20)
$0.3 < \beta_u \leq 0.7$	0.30	0.40 (1.33)
$\beta_u > 0.7$	0.35	0.50 (1.43)

注) CLT耐力壁が取りつく梁の部材種別はFAに限定し、その他の柱梁の部材種別はFA又はFBとする。柱梁の部材群としての種別はAのみに制限して、B、C及びDのDsは定めない。

●代表建物の試設計検討結果

- ・「鉄骨ブレース付き架構」と応答変形が同等程度となる「CTL付き架構」のベースシア一係数の倍率は、提案のDs値の倍率を概ね下回る結果となった。
- ・試設計架構は「(a) 鉄骨-CLT間の接合部の降伏」、「(b)鉄骨梁(又は鉄骨柱)の降伏」が混在した崩壊形である。なお、鉄骨-CLT壁の接合部変形は概ね限界変形以内に収まることを確認した。

留意事項等

対象とする崩壊形と保証設計

- ①の限界耐力計算を用いた略算的な検討では、「(a) S-CLT 間の接合部の降伏」による崩壊形を想定してスリップ型の復元力特性を設定した。
- ②の試設計による検討では、(a)とともに「(b) 鉄骨梁(又は鉄骨柱)の降伏」が混在した崩壊形となった。現実的な設計では(a)と(b)が混在するケースが多いと考えられる。また履歴特性から考えて(a)の方が D_s 値は高めに設定されるべきである。

よって本検討では、(a)と(b)の混在を許容した上で(a)を中心に想定した D_s 値を検討した。

避けるべき崩壊形としては、「(c) S-CLT 間の接合部の脆性破壊」、「(d) CLT 壁のせん断破壊」が挙げられる。

(c)についてはドリフトピン接合部の集合型破壊の回避、接合部の変形性能の確認、などが考えられる。

(d)については、例えば崩壊メカニズム時のCLT 壁の応力を割り増した上でせん断の許容応力度以内にあることを確認することなどが考えられる。

鉄骨梁のせん断降伏や軸力への配慮

②の試設計による検討ではCLT 壁を設けることで鉄骨梁がせん断力により降伏し、時刻歴応答解析では部材変形角が1/20程度の大きな変形に達するものも見られた。鉄骨梁のせん断降伏は脆性的な挙動でないため、ウェブ幅厚比が小さければ耐力としては大きな問題にはならない。

しかし、応答解析で見られたような大きな変形が予想される場合には、偏心ブレースのリンクビームなどの研究を参考に、せん断降伏後の塑性変形能力が十分確保されるように適宜スチフナを設ける等の措置が必要と考えられる。また十分な横補剛も必要である。一方で、梁の一部に大きなせん断変形が集中するため、床スラブが損傷する可能性があることに注意する。さらに、ブレース構造と同様であるが、梁に発生する軸力の影響にも配慮すべきである。

鉄骨造の規定の準用

鉄骨部材同士の保有耐力接合、保有耐力横補剛、冷間成形角形鋼管柱に関わる規定(ルート3では平19 国交告第594 号第4 第三号口)などの鉄骨造の規定はそのまま適用する。

2022年度は、

CLT耐力壁についての既往の**実験事例を収集**し、仕様等に関する分析を行ったが、事例が限られていたため、標準的な仕様を抽出することはできず、二つの異なる構造特性を有する実験事例として「**靱性型タイプ**」、「**強度型タイプ**」の2つを選定して、**モデル化の方法**を示した。

2023年度は、

- ①「**靱性型タイプ**」、「**強度型タイプ**」を有するRC架構について、それぞれ**RC架構** ($D_s=0.3$:純フレーム、 0.55 :耐震壁フレーム)と同等以下の変形となるために必要となる **D_s 値案**を提案した。
- ②その結果を踏まえ、RC造建築物と同等以上の安全性を確保するために必要と思われる、**保有水平耐力計算の方針や方法**を整理した。
- ③②の妥当性や**実現性を検証**するための2棟の建築物を対象とした**設計検討**を実施した。
- ④CLT壁板が充填されるRC架構の**RC部材のパンチング耐力の評価実験**を行い資料とした。

・なお、ここでいう「CLT耐力壁」とは、RC造の柱はりとなりに囲まれた無開口のCLT壁板を合わせた架構のことをいう。

CLT耐力壁を有するRC架構を対象に、RC造建築物の保有水平耐力計算を適用することを目的に、CLT耐力壁を有するRC架構について、設定する保有水平耐力を有するRC架構と同等の応答変形に抑制するために必要となる保有水平耐力を評価した。

RC 架構に想定する保有水平耐力(ここでは構造特性係数 D_s)として0.30(RC純フレーム構造を想定)と0.55(RC耐震壁フレーム構造を想定)の二通り、CLT耐力壁を有するRC架構のCLT耐力壁の水平力負担率 β_u を主要な変数とした。

応答推定方法は、鉄筋コンクリート造建物の等価線形化法に基づく耐震性能評価型設計指針・同解説を参考に、等価一自由度系縮約系の等価線形化法を用いた。

【建物の条件】

○RC架構とCLT耐力壁を有するRC架構に共通する条件

層数:1層, 2層, 3層, 4層, 5層、階高:4m

地盤種別:第2種地盤

構造特性係数 D_s :0.30(純フレーム), 0.55(耐震壁フレーム)

建物の各層重量は全層共通とする

○RC架構の条件 構造特性係数 D_s :0.30, 0.55

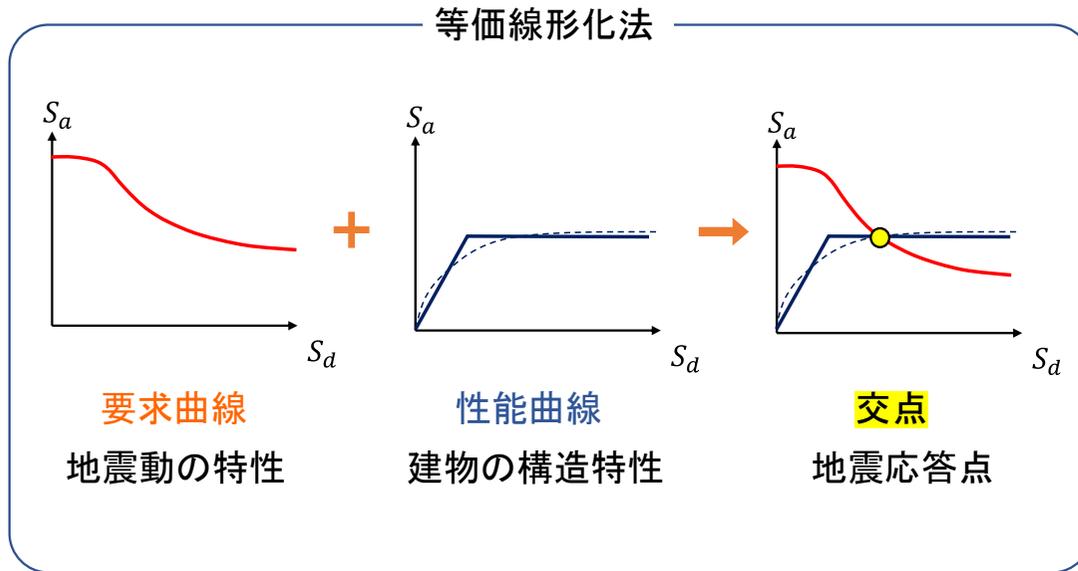
○CLT耐力壁を有するRC架構の条件(CLТ耐力壁の水平力負担率 β_u)

$D_s=0.30 \Rightarrow \beta_u=0.05\sim 0.50(0.05\text{刻み})$

$D_s=0.55 \Rightarrow \beta_u=0.20\sim 1.00(0.20\text{刻み})$

応答推定方法:

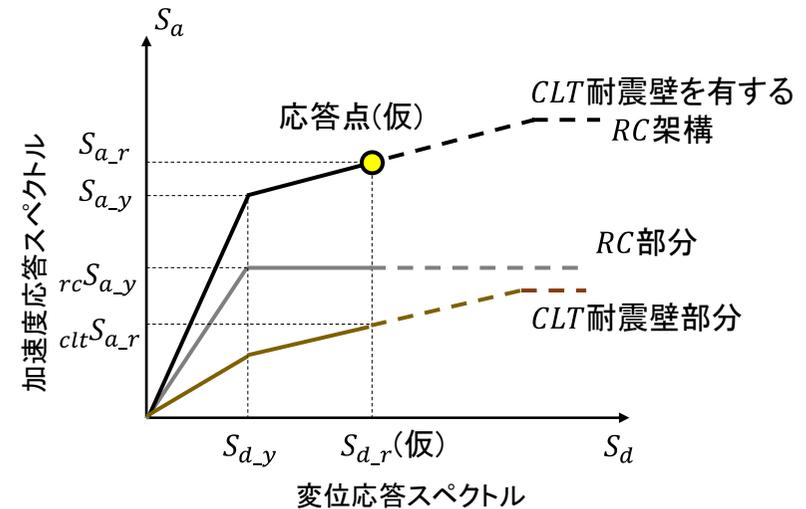
○等価一自由度系縮約系の等価線形化法



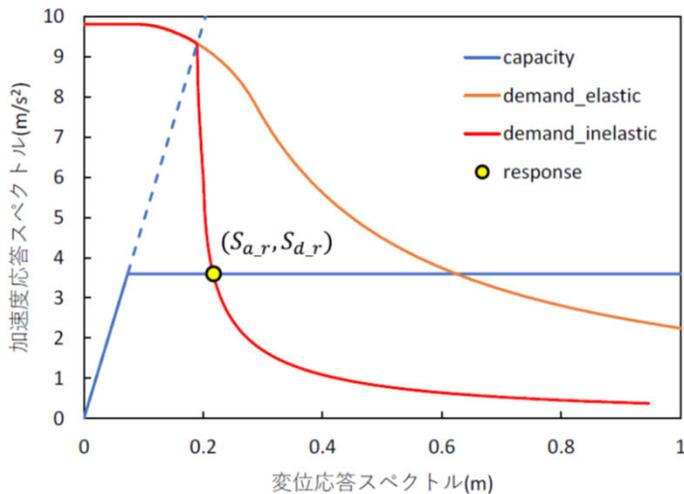
CLT耐力壁を有するRC架構のモデル化:

○CLT耐力壁の性能曲線: RC側柱の降伏に相当する第一折れ点後の二次剛性が大きいBilinear

○CLT耐力壁の履歴減衰: RC架構よりもやや小さいことを考慮

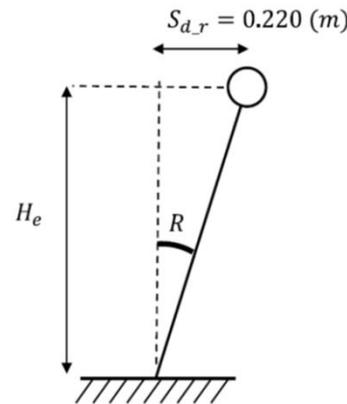


5層RC架構(Ds=0.30)の応答推定の例



$$S_{a,r} = 3.60 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

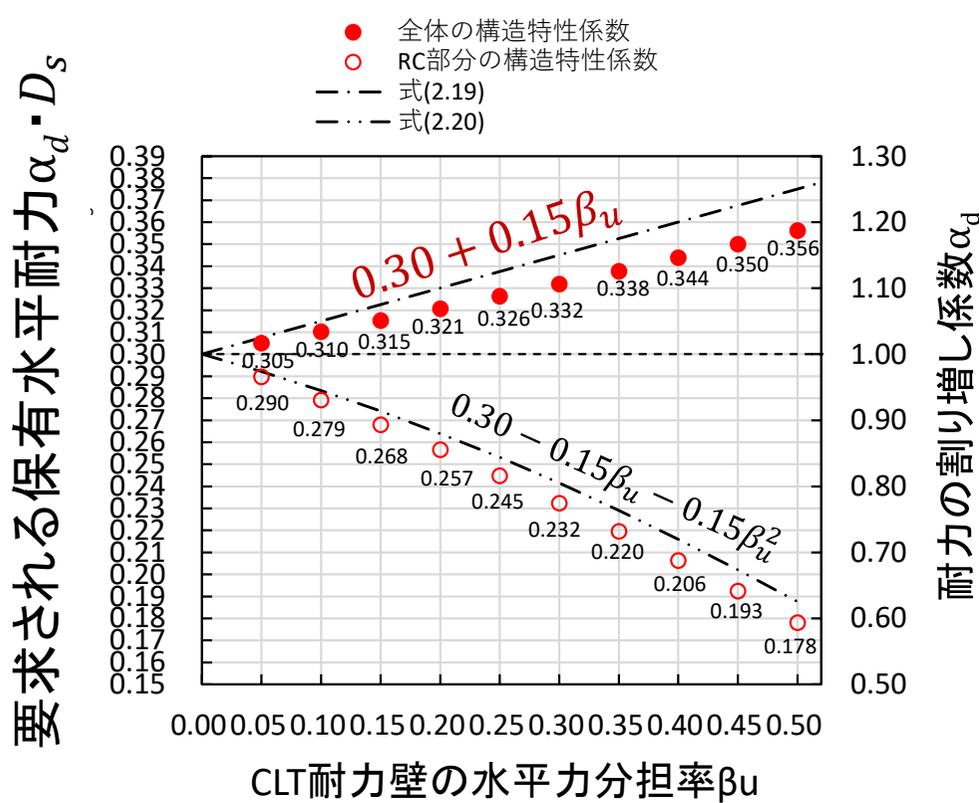
$$S_{d,r} = 0.220 \text{ (m)}$$



$$R = \frac{S_{d,r}}{H_e} = 1.48 \text{ (%rad)} = \frac{1}{67.5}$$

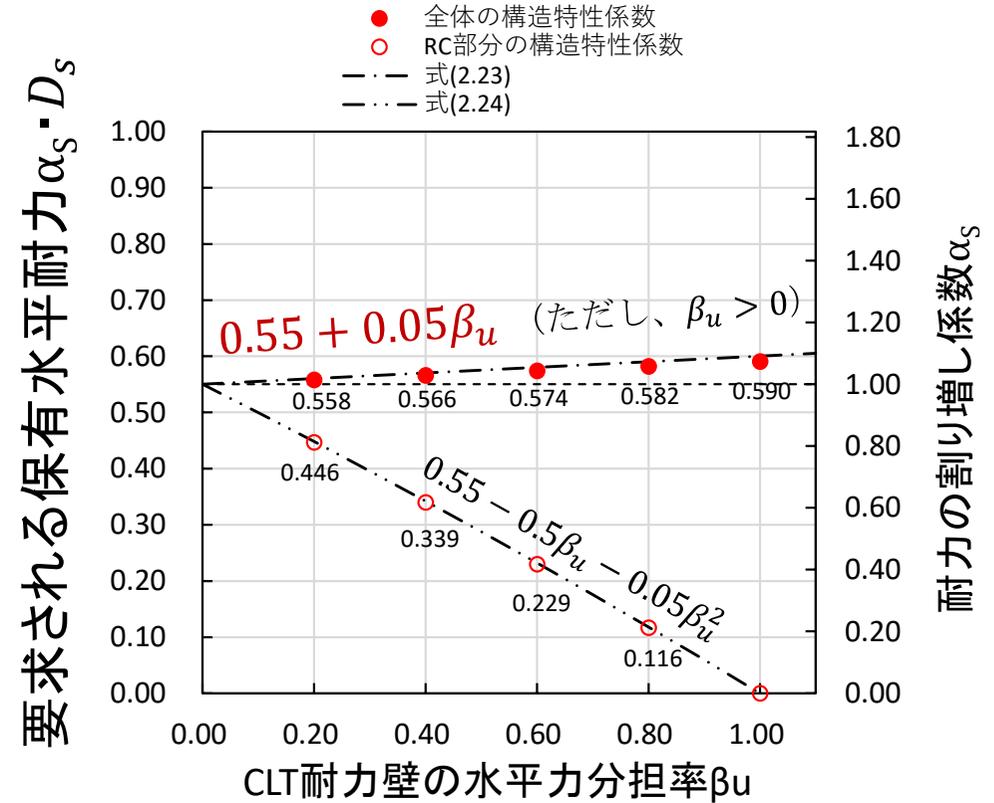
RC部分の負担割合: CLT耐震壁部分の負担割合
 $= rcS_{a,r} (= rcS_{a,y}) : cltS_{a,r} = 1 - \beta_u : \beta_u$

「靱性型タイプ」、「強度型タイプ」を有するRC架構について、それぞれRC架構(D_s=0.3:純フレーム、0.55:耐震壁フレーム)と同等以下の変形となるために必要となるD_s値を検討



「靱性型タイプ」のCLT耐震壁を用いた場合の想定

・RC架構(D_s=0.30)と同等のCLT耐力壁を有するRC架構に要求される保有水平耐力(5層の場合)



「強度型タイプ」のCLT耐震壁を用いた場合の想定

・RC架構(D_s=0.55)と同等のCLT耐力壁を有するRC架構に要求される保有水平耐力(5層の場合)

②保有水平耐力計算における設計方針(設計手法の提案)

CLT耐力壁を有する RC造混構造建築物の設計フロー

- 対象建築物
- 許容応力度計算
- 保有水平耐力計算1
 - ・剛性率・偏心率、層間変形角の確認
 - ・適用条件の確認
 - ・崩壊形の確認
 - ・保証設計1
 - ・保証設計2
 - ・CLT耐力壁の応力負担の確認
 - ・保有水平耐力の確認
- 保有水平耐力計算2



対象建築物

- ・RC柱やRC梁が引張降伏することのない5階建て以下の建築物
←実験で確認された崩壊機構のみを対象とする
- ・地震時の崩壊機構や各部材の応力負担が明瞭な建築物
←RC耐力壁とCLT耐力壁の同一方向での混在は避ける

許容応力度計算

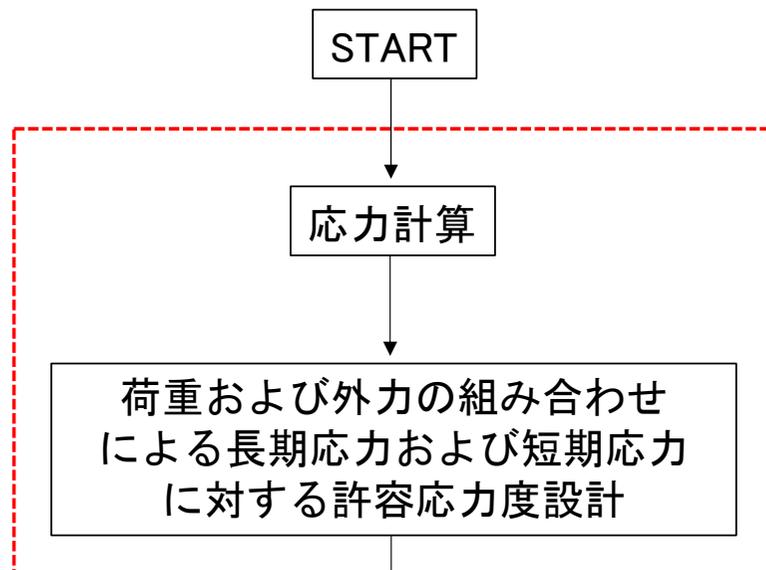
- ・長期設計では、CLT壁板を取り除いた架構モデル0が対象
←CLT壁板の軸力負担は考慮しないが、重量は考慮する
- ・短期設計では、CLT壁板を挿入した架構モデル1が対象

対象建築物

- ・5階以下(検討の範囲内)の建築物
- ・下記で定義する崩壊形が形成される前に他の部材が脆性的に破壊するものや、RC壁板とCLT壁板が混在しており、応力負担の評価が難しいものは対象外とする。
なお、RC壁板の周囲を3方スリットとする等して、CLT耐力壁の変形に追随できるように配慮しているものは対象としてよい。

許容応力度計算

- ・長期設計: CLT壁板を取り除いた**架構モデル0**(靱性型タイプ・強度型タイプ)
- ・短期設計: CLT壁板付き**架構モデル1**(靱性型タイプ・強度型タイプ)



保有水平耐力計算1

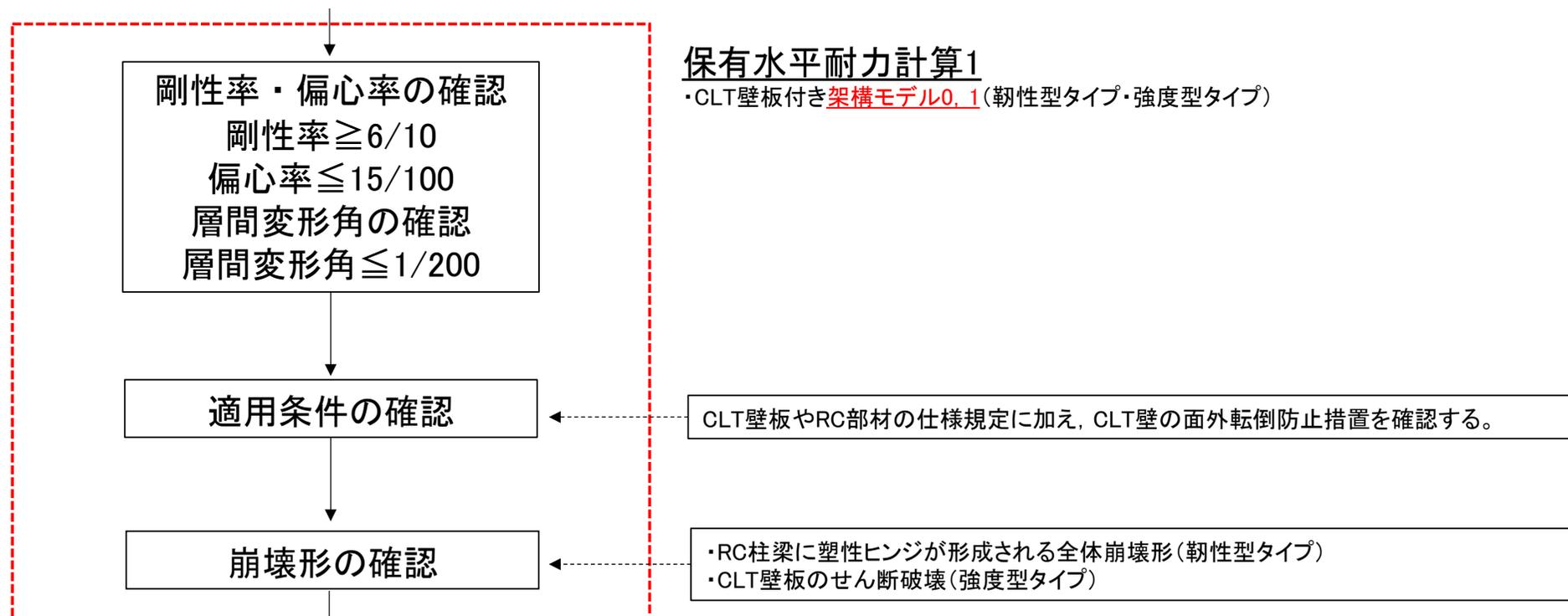
- ・ CLT壁板を挿入した架構モデル1が対象
 - ← **靱性型**では、**CLTの強度上昇を考慮した架構モデル2も活用**
- ・ 地震時の崩壊機構や各部材の応力負担が明瞭な建築物

(適用条件の確認)

- ・ CLT壁板やRC部材の仕様規定、CLT壁板の面外転倒防止措置を確認

(崩壊形の確認)

- ・ **靱性型**: RC柱はりに形成される塑性ヒンジによる全体崩壊形
- ・ **強度型**: CLT壁板のせん断破壊による局部崩壊形
 - ← **いずれの場合もCLT壁板周辺のRC部材の脆性的な破壊は許容しない。**



(適用条件の確認)

- ・CLT壁板やRC部材の仕様規定、CLT壁板の面外転倒防止措置を確認

CLT壁板

- ・壁厚(靱性型のみ)

90mm以上

←面外方向への座屈やはらみ出しの防止

- ・アスペクト比(高さ/長さ)

2.2以上(靱性型)

←RCはりでのロッキング、摩擦抵抗を保証

0.5前後を目安(強度型)

←水平せん断力の伝達、RCはりの長期設計に配慮

- ・高さ/壁厚、長さ/壁厚(靱性型、強度型)

25以下

←面外方向への座屈やはらみ出しの防止

RC部材

- ・CLT壁厚/RCはり幅(靱性型、強度型)、CLT壁厚/RC柱幅(強度型のみ)

0.4以下

←CLT壁板からの過度の応力伝達の防止

- ・CLT壁板の水平断面積/両側のRC柱2本分の断面積(強度型のみ)

1.2以下

←軸力支持能力や履歴吸収エネルギーに配慮

- ・CLT壁板の鉛直断面積/上下のRC梁2本分の断面積(靱性型、強度型)

0.8以下

←履歴吸収エネルギーに配慮

②保有水平耐力計算における設計方針(保有水平耐力計算1 (保証設計1))

保有水平耐力計算1(保証設計1)

(RC部材の部材種別判定とせん断余裕度の確認)

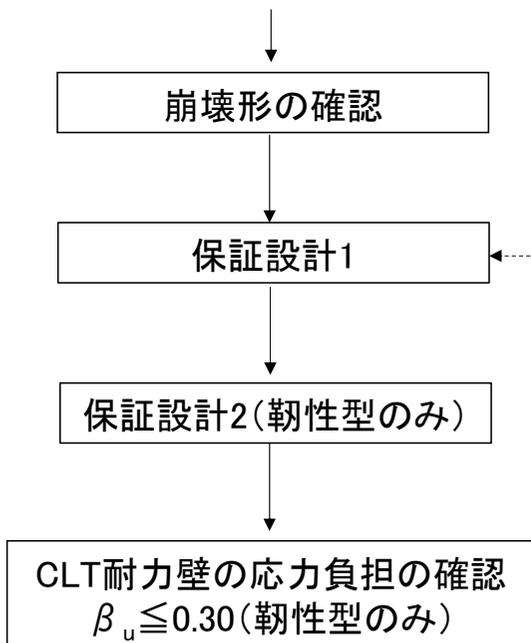
- ・塑性ヒンジが形成されるRC柱はりの部材種別が**FA**
- ・塑性ヒンジが形成されないRC柱はりで**脆性的な破壊が生じないこと**
(RC部材に作用する引張軸力の確認)

・RC柱はり**が軸降伏しないこと、引張軸力や応力伝達の影響に配慮した断面設計**
(CLT壁板のせん断余裕度の確認)

- ・**1.25倍した設計用せん断力**に対して、**短期許容せん断応力未満(靱性型)**
- ・**せん断の基準強度もしくは2.0N/mm²の小さい方の値以下(強度型)**

(RC-CLT間の接合要素のせん断余裕度の確認(強度型で滑り止めを用いる場合))

- ・**CLTの支圧で耐力が決まる場合は他の耐力に対する余裕度を1.25倍以上確保**
- ・その他の場合は**1.25倍した設計用せん断力**に対してせん断耐力が上回ることを確認



「靱性型タイプ」、「強度型タイプ」の両方で検討が必要

・塑性ヒンジが形成されるRC部材の部材種別がFAとなることを確認する。但し、CLT壁板からのせん断力等がスパン内に作用し、部材に作用する応力が増大する可能性がある場合は、両端ヒンジとなる部材でも、梁では**1.2倍**、柱では**1.25倍**の設計用せん断力に対して、せん断余裕度を確保する。

・塑性ヒンジが形成されないRC部材において、脆性的な破壊が生じないことを確認する。梁では**1.2倍**、柱、耐力壁では**1.25倍**の設計用せん断力に対して、せん断余裕度を確保する。

・RC柱はりの部材端にCLT壁板からのせん断力が作用し、せん断スパン比が1.0を下回るような場合については、せん断耐力式とパンチング耐力式のいずれか大きい方をせん断耐力として用いてよい。

・RC柱はり接合部のせん断破壊が生じないことを確認する。

・RC柱はりの引張降伏は許容しない。

・CLT壁板に作用するせん断応力が、「靱性型タイプ」では**短期の許容せん断応力**(せん断の基準強度の2/3倍)未満、「強度型タイプ」では**せん断の基準強度と2.0N/mm²の小さい方の値以下**となることを確認する。

「強度型タイプ」のみで検討が必要

・RC-CLT間の接合要素において、脆性的な破壊が生じないことを確認する。滑り止めを用いた設計を行う場合には、以下のいずれかの方法によること。

方法1: 滑り止めのせん断耐力がCLTの**木口面の支圧耐力で決まる**ようにし、滑り止めに作用するせん断力を頭打ちとする。この際、滑り止めにおいて、他の崩壊機構が形成されないように他の耐力には**1.25倍以上の余裕**を持たせる。

方法2: 滑り止めに作用するせん断力を**1.25倍した設計用せん断力**を、滑り止めのせん断耐力が上回ることを確認する。

(RC部材の部材種別判定とせん断余裕度の確認)

- ・塑性ヒンジが形成されるRC柱はりの部材種別がFA
- ・塑性ヒンジが形成されないRC柱はりで脆性的な破壊が生じないこと

設計用せん断力

- ・両端ヒンジとなる場合でも、CLT壁板からスパン内に伝達されるせん断力が増大する可能性がある場合には、RCはりで1.2倍、RC柱で1.25倍の割り増しを行う。

せん断耐力

- ・RC部材のせん断耐力は、RC造建築物の設計と同じように荒川式によればよいが、部材端において局所的にせん断力が作用する場合(せん断スパン比1.0以下を目安)には、5章の実験結果に基づき、耐震診断基準・耐震改修設計指針のパンチング耐力式を用いてもよい。

(RCはりの場合)

荒川式

$${}_b Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 {}_b p_t^{0.23} ({}_c F_c + 18)}{M / (Qd_b) + 0.12} + 0.85 \sqrt{{}_b p_w {}_b \sigma_{wy}} \right\} {}_b j_b$$

パンチング耐力式

$${}_b Q_{pu} = K_{av} \cdot {}_b \tau_0 \cdot {}_b b_e \cdot D_b$$

$$K_{av} = 0.58 / (0.76 + a_b / D_b)$$

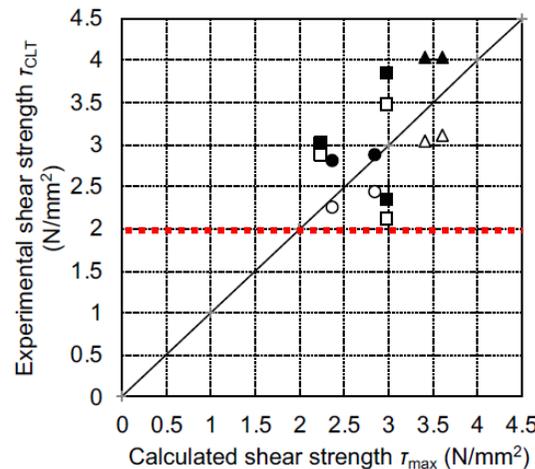
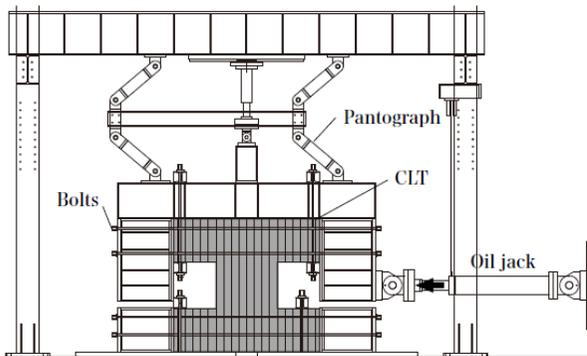
a_b : CLT壁板からRCはりに伝達される鉛直せん断力が集中的に作用すると仮定した場合の作用点からはり端までの距離で、CLT壁板のモデル化の状況に応じて決定すればよいが、同距離に関する知見の蓄積が十分でないことを踏まえ、 $a_b / D_b = 1/3$ 以上の値を取ることとする(靱性型では壁長さの1/6倍)

(CLT壁板のせん断余裕度の確認)

- ・1.25倍した設計用せん断力に対して、短期許容せん断応力未満(靱性型)
- ・せん断の基準強度もしくは 2.0N/mm^2 の小さい方の値以下(強度型)
- ← 実験において検証された範囲とCLTパネル単体の実験結果を参照

(RC-CLT間の接合要素のせん断余裕度の確認 (強度型の滑り止め))

- ・CLTの支圧で耐力が決まる場合は他の耐力に対する余裕度を1.25倍以上確保
- ・その他の場合は1.25倍した設計用せん断力に対してせん断耐力が上回る
- ← 滑り止めで想定される複数の破壊モードを考慮



中島昌一、荒木康弘、大橋義徳、中島史郎、宮武敦：実大水平載荷実験によるCLTの幅方向のせん断強度の評価 樹種の違いが幅方向のせん断強度に与える影響、日本建築学会大会構造系論文集 Vol.760、pp.843-849、2019.6

CLTの幅方向のせん断強度の評価

$${}_j Q_u = \min({}_b Q_u, {}_n Q_u, {}_w Q_y, {}_f Q_y, {}_s Q_u, {}_t Q_u, {}_l Q_{u1}, {}_p Q_{u2})$$

- ${}_j Q_u$: 滑り止めの水平せん断耐力
- ${}_b Q_u$: 滑り止めにおけるCLTの木口面の支圧耐力
- ${}_n Q_u$: 滑り止めを設けるための切り欠き部分のせん断耐力
- ${}_w Q_y$: 滑り止めにおけるウェブのせん断降伏耐力
- ${}_f Q_y$: 滑り止めにおける曲げ降伏時せん断力
- ${}_s Q_u$: 滑り止めにおける寸切りボルトのせん断耐力
- ${}_t Q_u$: 滑り止め底面における寸切りボルトの引張降伏時せん断力
- ${}_l Q_{u1}$: 滑り止めの支圧板(フランジ)における崩壊線理論による曲げ耐力時せん断力
- ${}_p Q_{u2}$: 滑り止め底板における崩壊線理論による曲げ耐力時せん断力

滑り止めのせん断耐力式

保有水平耐力計算1

(保証設計2)

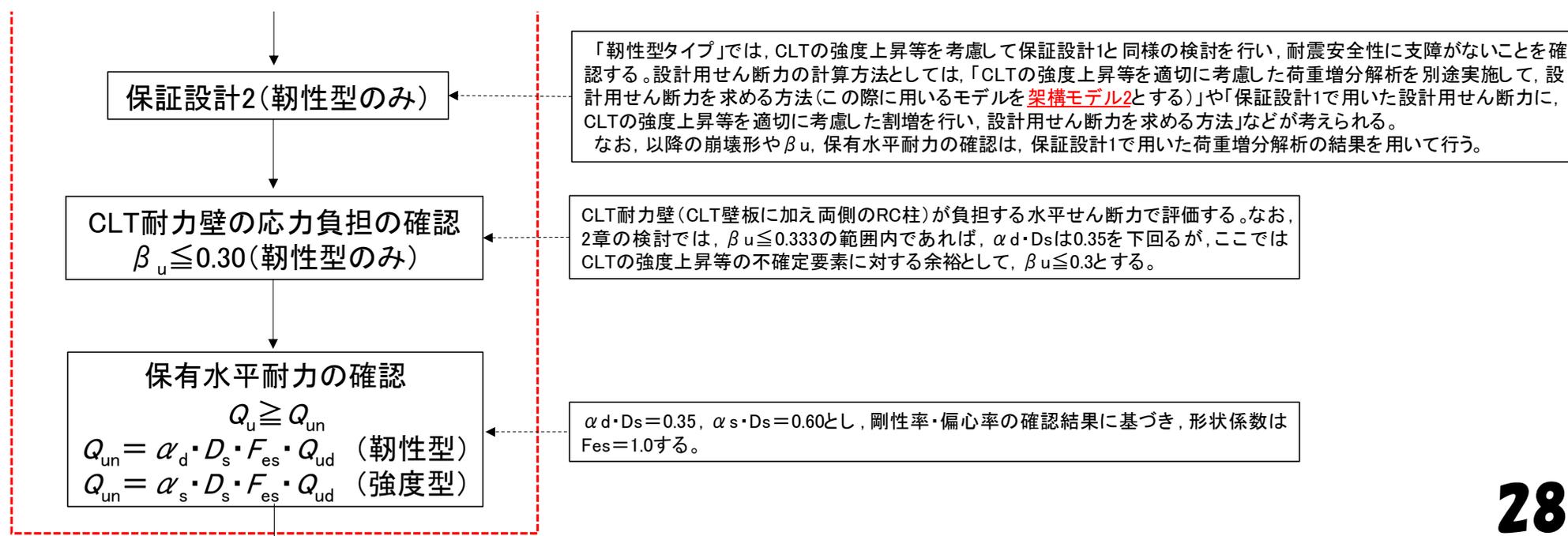
- ・「**靱性型タイプ**」では、RC部材に作用するせん断力等が増大する可能性を考慮し、**CLTの強度上昇(圧縮強度)の影響等を適切に考慮**した検討を行う。
例えば、「**架構モデル1**においてCLTの強度上昇等を考慮した**架構モデル2**を用いる」もしくは「**架構モデル1**の設計用せん断力をCLTの強度上昇等を考慮して割り増して用いる」等。

(CLT耐力壁の応力負担の確認)

- ・「**靱性型タイプ**」でCLT耐力壁の水平せん断力(RC柱を含む)の割合 β_u が**0.3を越えない**ことを確認

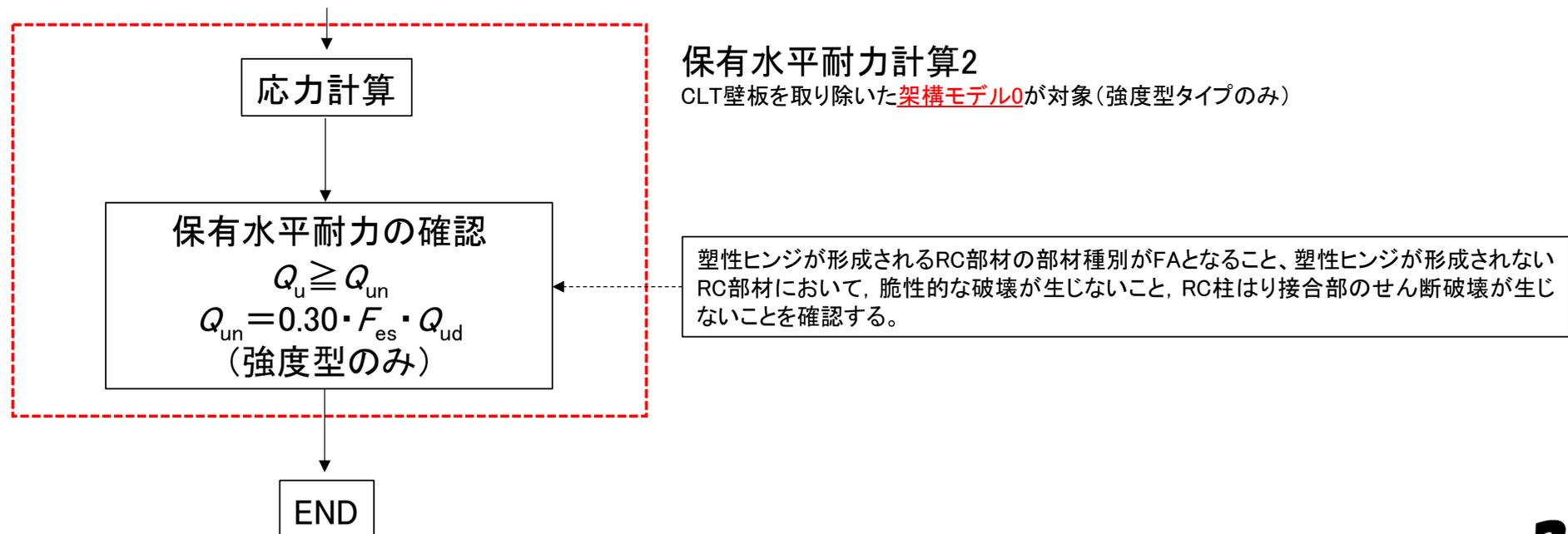
(保有水平耐力の確認)

- ・「**靱性型タイプ**」では $\alpha_d \cdot D_s = 0.35$ 、「**強度型タイプ**」では $\alpha_s \cdot D_s = 0.60$ とした場合の必要保有水平耐力を上回ることを確認

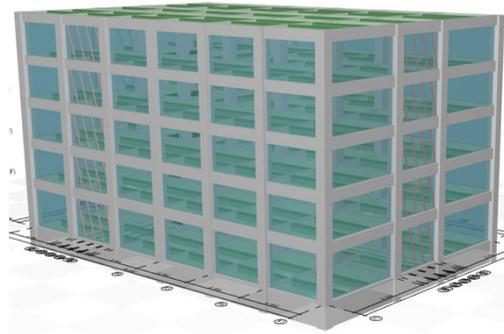


保有水平耐力計算2

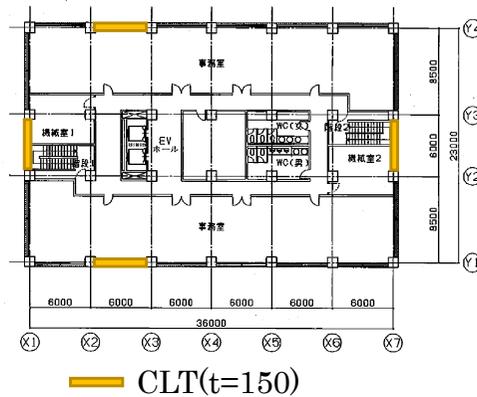
- ・「強度型タイプ」では、「靱性型タイプ」のようにCLT耐力壁の水平せん断力の負担割合に制限を設けない代わりに、CLT壁板を取り除いた架構モデル0を対象とした荷重増分解析を別途実施し、 $D_s=0.30$ に相当する必要保有水平耐力を上回る保有水平耐力が確保されていることを確認する。
- ・ $D_s=0.30$ での確認を行うため、塑性ヒンジが形成されるRC柱はりの部材種別がFAとなること、塑性ヒンジが形成されないRC柱はりにおいて脆性的な破壊が生じないこと、RC柱はり接合部のせん断破壊が生じないことも確認する。



靱性型CLT耐力壁を用いた事務所ビル



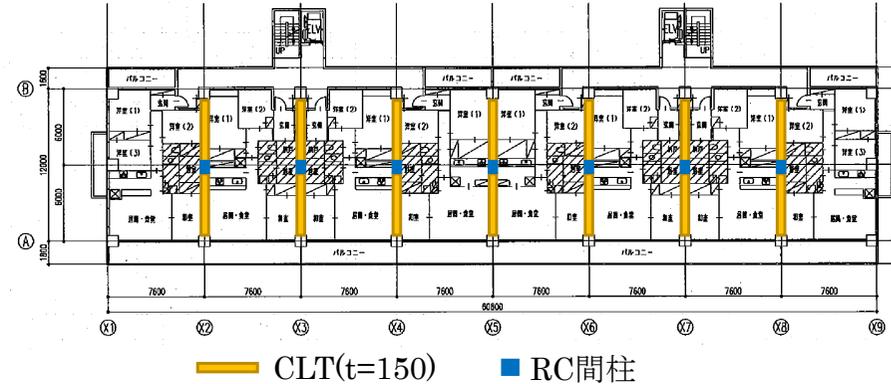
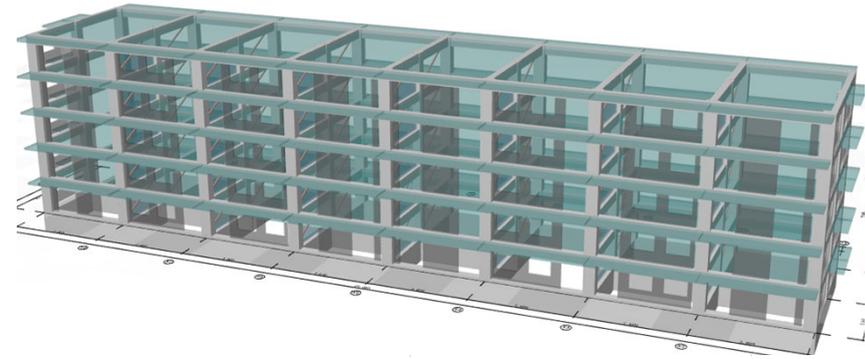
建物全景図



基準階平面図

- ・ CLT耐力壁のアスペクト比2.2
- ・ ブレース置換モデルの剛性と強度はCLT壁板幅のL/2をストラット幅とした
- ・ CLT耐力壁の耐力上昇1.5倍とRCの保証設計の割増係数を考慮
- ・ パンチング耐力とメカニズム時せん断力に対して梁は1.20倍
- ・ RC架構のみでCB=0.3程度、建物全体で $\beta u=0.3$ 以下でCB=0.35以上

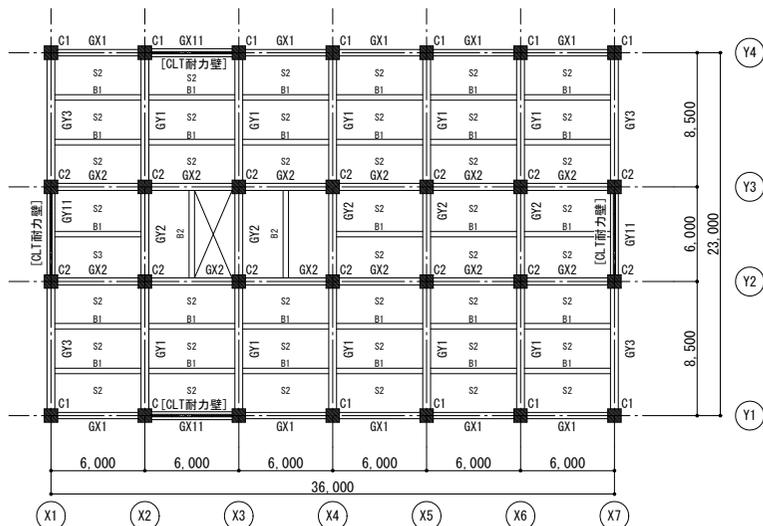
強度型CLT耐力壁を用いた集合住宅



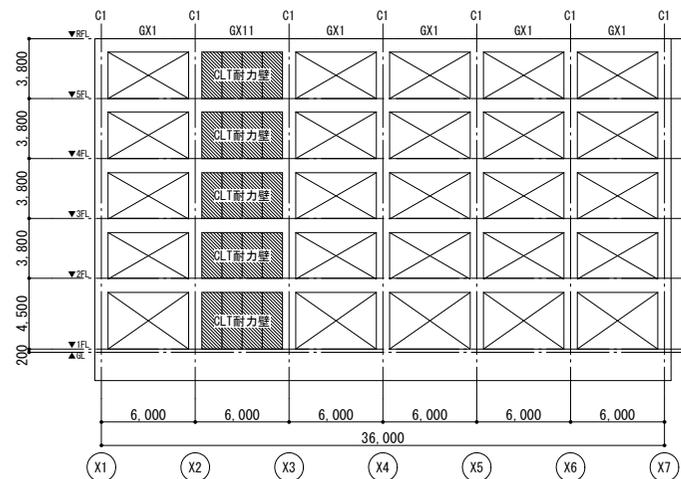
- ・ ブレース置換モデルの剛性と強度は $\tau=2.0\text{N/mm}^2$, 0.5%せん断降伏
- ・ RC枠柱梁の保証設計として、パンチング耐力とメカニズム時せん断力に対して梁は1.20倍、柱は1.25倍
- ・ RC架構のみでCB=0.3程度、建物全体でCB=0.6以上
- ・ 接合部の設計と、付帯RC柱と付帯RC梁への応力分配および保証設計
- ・ CLT耐力壁枠梁への軸力を考慮した設計

※ 対象:RC造建物2棟(2007設計事例集(日本建築防災協会)より引用)

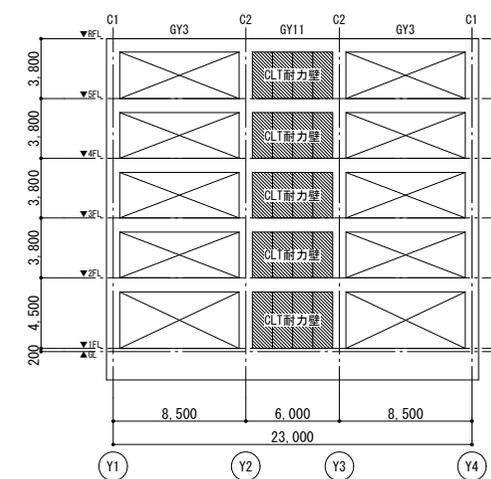
靱性型CLT耐力壁を用いた事務所ビル



基準階伏図



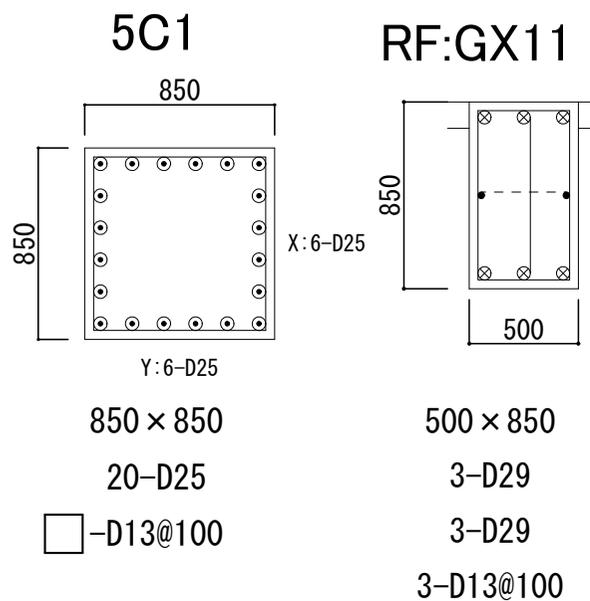
X方向軸組図



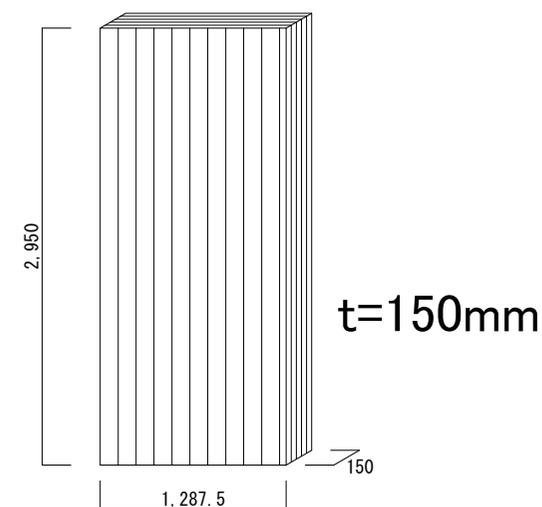
Y方向軸組図

コンクリート
 $F_c=27(1\sim 2F)$ 、 $F_c=27(3\sim 5F)$

鉄筋
 SD295(～D16)
 SD345(～D25)、SD390(D29～)

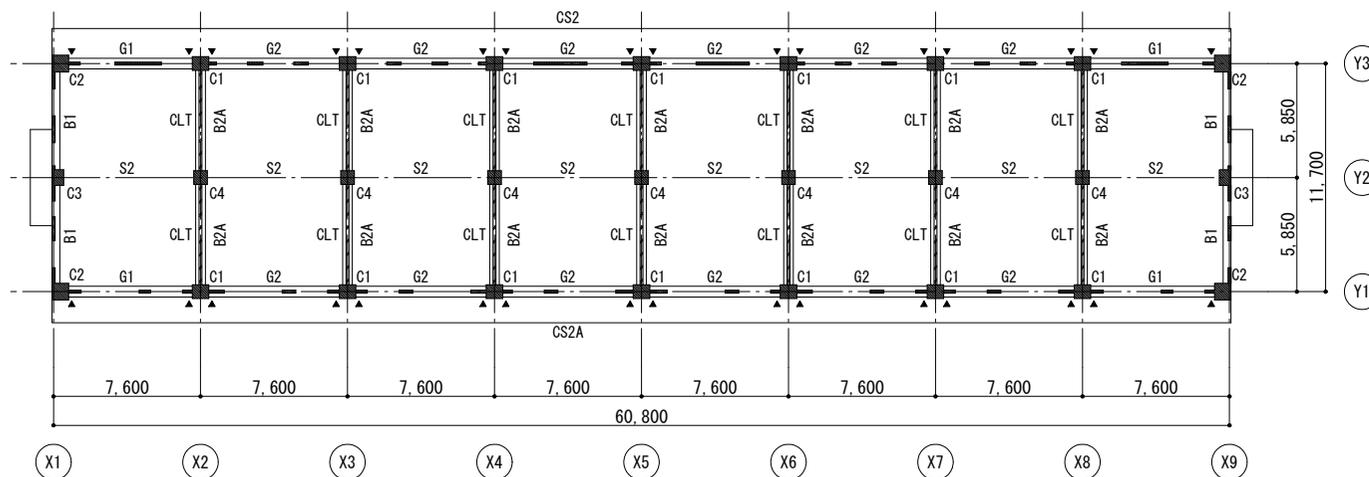


CLT耐力壁の枠柱梁

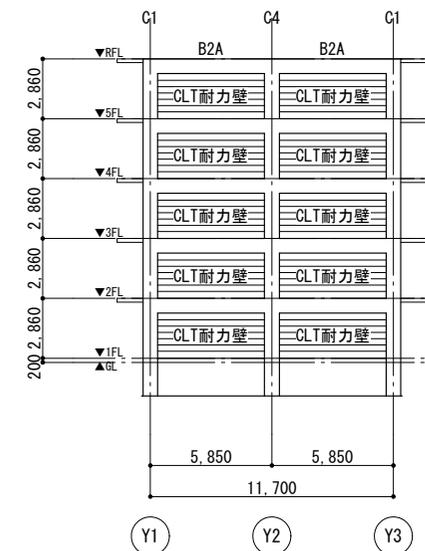


スギ: Mx60-5-5
 CLT壁板リスト

強度型CLT耐力壁を用いた集合住宅



基準階伏図



Y方向軸組図

コンクリート

$F_c=24(5F)$

$F_c=27(4F)$

$F_c=30(2\sim 3F)$

$F_c=33(1F)$

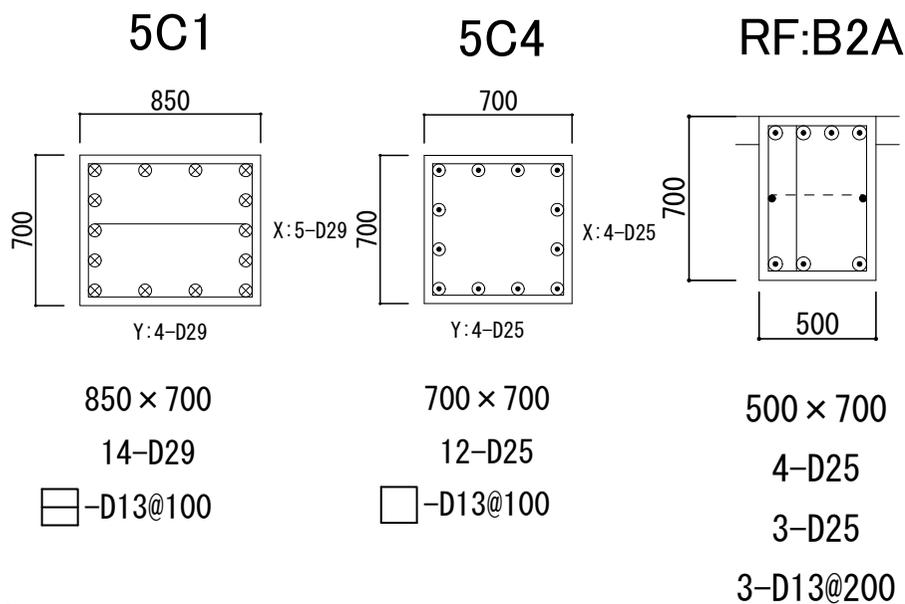
鉄筋

SD295(～D16)

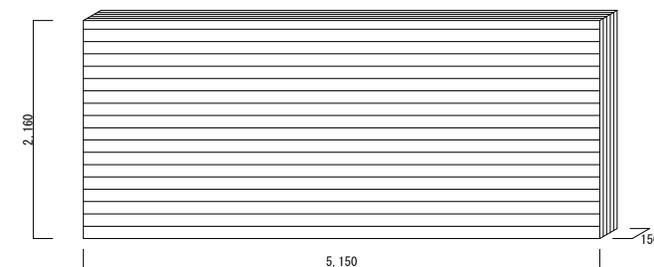
SD345(～D29)

SD390(D32～)

KSS785(S13)柱帯筋



CLT耐力壁の枠柱梁



$t=150\text{mm}$

スギ: S90-5-5
CLT壁板リスト

2022年度に選定してモデル化方法を提案した「靱性型タイプ」、「強度型タイプ」の2つについて検討した。

①「靱性型タイプ」、「強度型タイプ」を有するRC 架構について、それぞれRC 架構($D_s=0.3$:純フレーム、 0.55 :耐震壁フレーム)と同等以下の変形となるために必要となる D_s 値案

「靱性型タイプ」のCLT耐力壁を用いた場合の $\alpha_d \cdot D_s = 0.30 + 0.15\beta_u$

「強度型タイプ」のCLT耐力壁を用いた場合の $\alpha_s \cdot D_s = 0.55 + 0.05\beta_u$

※②に示す適用範囲に限る

②保有水平耐力計算における設計方針の提案

RC造建築物と同等以上の構造安全性を確保するために必要な方針・方法を整理

- ・適用範囲は当面は5階以下とし、実験等で検証された「靱性型タイプ」及び「強度型タイプ」の適用条件とした周辺の柱はりとはCLT壁板について示した。
- ・剛性率・偏心率、層間変形角、適用条件、崩壊形、保証設計、CLT耐力壁の応力負担割合等や、保証設計のための周辺の柱はりのCLT壁板による付加応力の例を留意点として示した。

③ 靱性型と強度型のCLT耐力壁を有する建築物の設計検討

純フレーム構造の事務所ビルに靱性型タイプ、耐震壁フレーム構造の集合住宅に強度型タイプのCLT耐力壁を導入した場合の構造計算を試行することができた。

④ CLT壁板が充填されるRC架構のRC部材のパンチング耐力の評価実験

構造計算に不可欠な基礎的な実験データを取得することを目的に、とくにRC部材の脆性破壊を計画するCLT耐力壁の静的繰り返し載荷実験を実施した。

その結果、CLT壁板を有する試験体の梁端部で、パンチング破壊が発生し、CLT壁板が充填されるRC架構の梁端部のパンチング耐力に関する実験データを得た。

- ・検討の対象とした部材種別、接合や壁の配置、アスペクト比の範囲などは限られている。よって、実務設計において追加検討や判断が求められることも予想される。
- ・最近他事業で実施されている実験や実例などについて、本事業では時間の制約等があり、検討対象とするまでには至っていない。
- ・本事業では、木質系材料をいち早く実務に落とし込むことを目的として、木質系材料はCLT、計算法は保有水平耐力計算に限定して検討を行った。そのため、CLT以外の木質系厚板の適用や、設計で用いた数値（現状では現行の数値を参考に設定している）の合理化や根拠の提示等、残されている課題も多い。
- ・木質部材の特性を考慮した合理的な設計法の選択、例えば、木質構造の保有水平耐力計算の方法の導入、限界耐力計算を選択するなど、前提に立ち返った検討も必要である。
- ・乾燥収縮、クリープ、経年劣化などの材料の中長期特性の影響などの検討も今後必要となる。

靱性型タイプ:

RC柱はりに形成される塑性ヒンジによる全体崩壊形を想定したもの。後述する適用条件や保証設計を満足する場合には、RCはり-CLT壁板間の水平接合部、RC柱-CLT壁板間の鉛直接合部には、せん断力を伝達するための接合材を設ける必要はないが、CLT壁板の面外方向への転倒防止措置は必要となる。

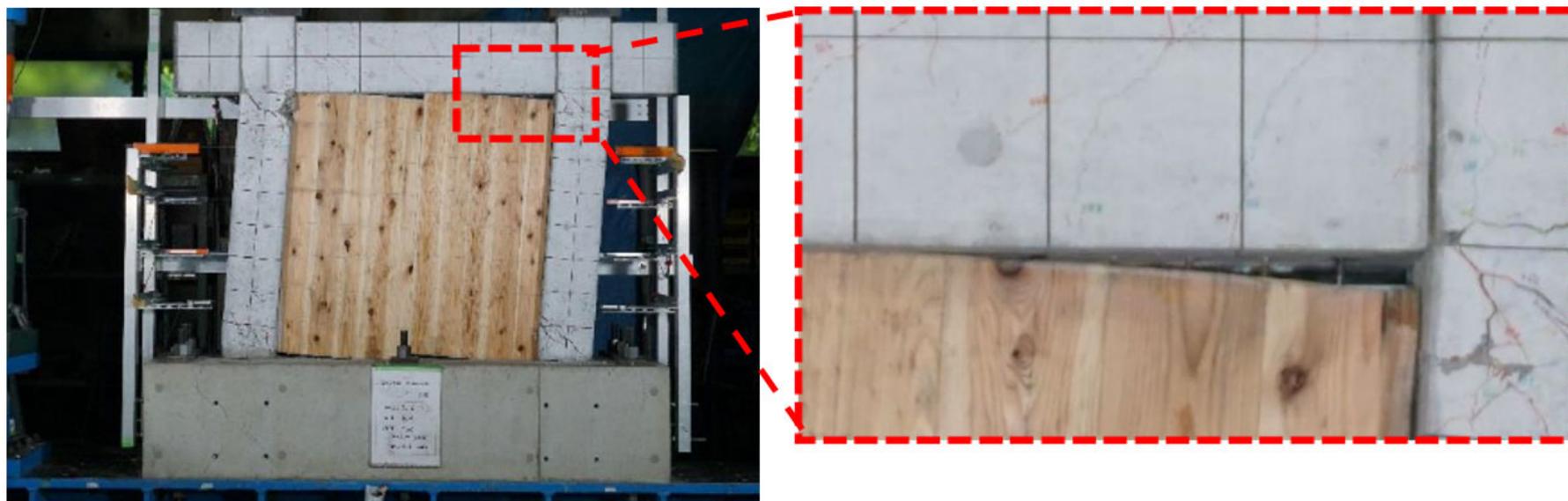


図 層間変形角6%における変形性状 (CLT耐震壁 (WF))

強度型タイプ:

CLT壁板のせん断破壊による局部崩壊形を想定したもの。RC柱—CLT壁板間の鉛直接合部において、CLT壁板から伝達される支圧力による水平せん断力の伝達を許容する。鉛直接合部には、実験試験体で用いられた鋼板挿入ドリフトピンによる接合部を必ずしも設ける必要はないが、CLT壁板の圧縮ストラットの伝達に支障がないように、「RCはり—CLT壁板間の水平接合部においてすべり止め等を用いた水平せん断力の伝達を行う」、「CLT壁板の圧縮ストラットの水平成分について各階のRCはり主筋を介した引張軸力の伝達を行う」といった対応が必要となる。

また、「靱性型タイプ」と同様に、水平接合部や鉛直接合部に接合材を設けない場合には、CLT壁板の面外方向への転倒防止措置を行う。



図 R=1/33rad時の損傷状況 (a) WA

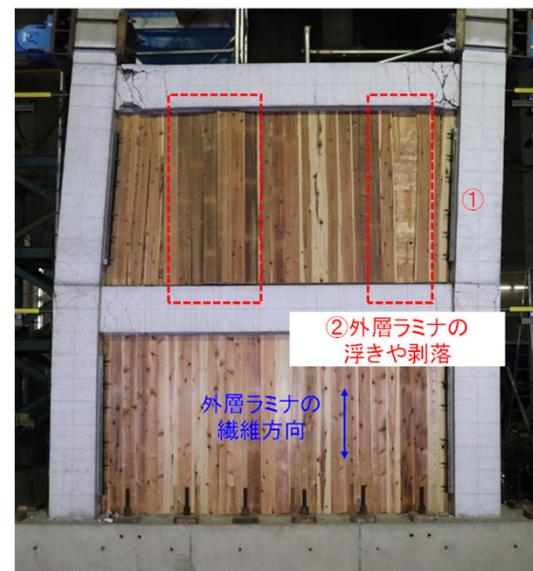


図 R=1/33rad時の損傷状況 (b) WB

