

平成29年度 建築基準整備促進事業

M4. 長期優良住宅における鉄筋コンクリート壁式構造の損傷防止性能の評価の合理化に関する検討

事業主体名 : 株式会社 堀江建築工学研究所
国立大学法人 名古屋大学
国立大学法人 東京大学
共同研究 : 国立研究開発法人 建築研究所

第 I 編 総則

長期優良住宅の認定要件のうち耐震性については

「極めて稀に発生する地震に対し、継続利用のための改修の容易化を図るため、損傷のレベルの低減を図ること」

として、大規模地震力に対する変形を一定以下に抑制する措置を講じることが求められる。

WRC造建物は「建築基準法で定める地震力の1.25倍の力に対して倒壊しない」もしくは「大地震時の層間変形角が1/100以下」と同等以上の性能を有することを確認するため、

部分架構実験や解析によってWRC造建物の損傷防止性能の評価方法を検討し、方法案を提案する。

長期優良住宅の認定条件を満足するWRC造建物となるために、壁式告示(平成13年国交省告示第1026号)の規定に加えて評価すべき項目を策定

実施体制

	配置予定者	所属・役職	担当する 分担業務の内容
管理技術者	① 太田 勤 ② 勅使川原正臣 ③ 楠 浩一 ④ 田尻清太郎	堀江建築工学研究所・所長 名古屋大学 環境学研究科・教授 東京大学地震研究所・准教授 東京大学大学院工学研究科・准教授	部材モデル・設計法 架構実験・評価手法 架構実験・設計法 架構実験・設計法
技術担当者	① 稲井 栄一 ② 井上 芳生 ③ 神谷 隆 ④ 清原 俊彦 ⑤ 迫田 丈志 ⑥ 高橋 愛	山口大学・教授 INO建築構造研究室・代表 矢作建設工業・副所長 堀江建築工学研究所・設計部長 堀江建築工学研究所・企画開発部長 堀江建築工学研究所・所員	架構実験・評価手法 部材モデル・設計法 架構実験・評価手法 架構実験・評価手法 設計法・評価手法 設計法・評価手法

調査の背景

RC壁式構造の計算フロー

壁式鉄筋コンクリート造設計・計算規準,AIJ,2015より

6条 規模
 ・地上階数 ≤ 5
 ・軒の高さ $\leq 20m$
 ・階高 $\leq 4m$
 ・最上階階高+軒から棟までの高さ $\leq 2m$
 ・建物長さ 原則 $\leq 80m$
 ・耐力壁に囲まれた面積 $\leq 60m^2$ (PCa)
 ・壁梁のせい $\geq 450mm$ (原則)
 9条 許容応力度設計
 ・耐力壁鉄筋比 \geq 最少鉄筋比
 ・最少鉄筋比 $\geq 0.15\%$, 0.20% (PCa)
 ・壁梁主筋 $\geq D13$
 ・幅 $200mm$ 以上では複配筋

8.1節 応力・変形解析
 i) 軒の高さ $\leq 16m$
 ii) 階高 $\leq 3.5m$
 iii) 壁率 $\geq Z \cdot W \cdot A_i \cdot \beta / (2.5 \cdot S_i)$
 iv) 壁量 $\geq \alpha \cdot Z \cdot L_{w0}$ かつ $\geq L_{wm}$
 v) 耐力壁の実長 $\geq 450mm$ かつ \geq 同一の実長を有する高さの30%

10.1.2項 層間変形角の確認
 下記(1)~(3)を満たす場合不要
 (1) 階高 $\leq 3.5m$
 (2) 壁率 $\geq Z \cdot W \cdot A_i \cdot \beta / (2.5 \cdot S_i)$
 (3) 壁量 $\geq \alpha \cdot Z \cdot L_{w0}$ かつ $\geq L_{wm}$

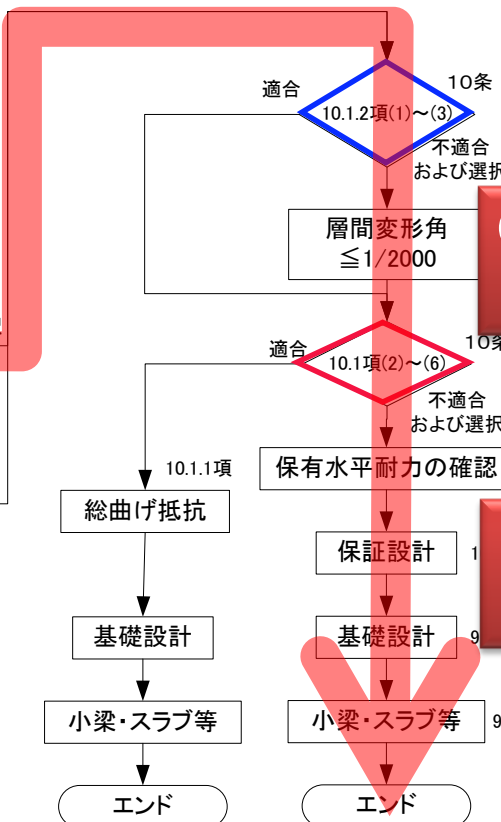
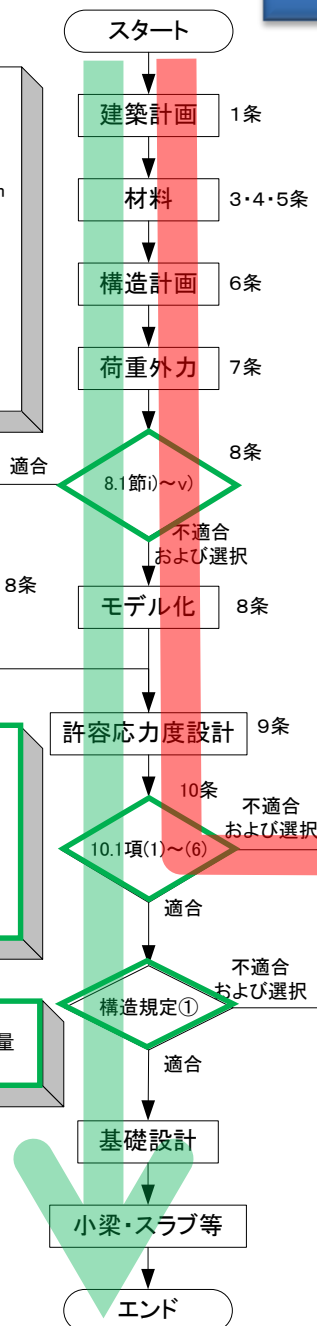
10.1項 保有水平耐力の検討
 下記、(1)~(6)を満たす場合は不要
 (1) 階高 $\leq 3.5m$
 (2) 壁率 $\geq Z \cdot W \cdot A_i \cdot \beta / (2.5 \cdot S_i)$
 (3) 壁量 $\geq \alpha \cdot Z \cdot L_{w0}$ かつ $\geq L_{wm}$
 (4) スラブがRC造
 (5) 複筋梁
 (6) 壁梁の主筋 $\geq D13$

構造規定①
 9.4節1(1) 耐力壁の最少端部曲げ補強筋量
 9.7節 壁梁の最少端部曲げ補強筋量

①平均せん断
応力度法

②壁量・壁率

③耐力壁最少曲げ補強筋
壁梁最少曲げ補強筋



④層間変形角
1/2000以下

⑤保有水平
耐力の確認

調査のフロー

I) 文献調査・パターン分類 (H28年度, H29年度)

耐力壁の配置, 壁量, 壁率, 計算ルート等のパターン分類
既往の実験調査と整理, 試験体の設計, WRC造建物の試設計

II) 部分架構実験 (H28年度)

I・T・十形断面・配筋・破壊形式
直交壁効果・損傷の分析

III) 解析 (H28年度, H29年度)

部材実験モデル等の有限要素解析
架構モデルのフレーム解析
モデルによる応答値の確認

IV) 評価方法案の検討 (H29年度)

部材実験や解析から評価方法案を検討

V) 架構実験 (H29年度)

直交壁を有する架構実験により強度発現機構の確認

VI) 評価方法案の提案 (H29年度)

WRC造建物の損傷防止性能の評価法の提案

第Ⅱ編 壁式鉄筋コンクリート造架構試験体の計画 および試設計建物

5 階建て壁式鉄筋コンクリート造建物の1～2 階部分を対象とした試験体の設計

1/2 スケールの5 階建て壁式鉄筋コンクリート造建物(5 層モデル)の試設計



5 層モデルと保有水平耐力, 破壊形式が近似するように2層試験体を設計

- (1) 1 階壁から3 階梁までを試験区間とし, 2 階梁位置・R 階スタブ位置に水平力を載荷
- (2) 1,2 階部分の層せん断力及び転倒モーメントが5層モデルと等しくなるように
載荷位置・外力分布を設定
- (3) 1 階壁から3 階梁の断面は5 層モデルと同様
- (4) 保有水平耐力が5 層モデルと等価になるように, 両端曲げヒンジを計画した4 階梁を
設置
- (5) 3～4 階壁には曲げヒンジを計画せず, せん断破壊も生じさせないよう十分に補強

○試験体の増分解析結果

層せん断力ー層間変位関係において明確な剛性低下が認められる時点でのベースシア係数は0.75 程度

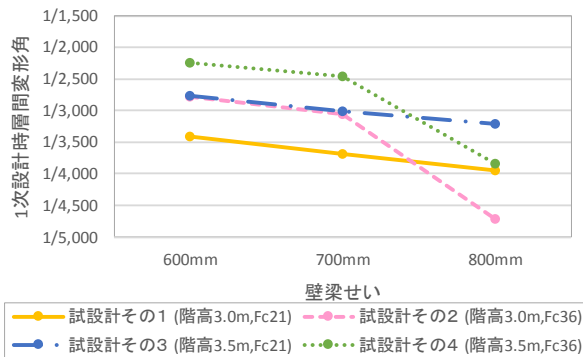
⇒概ね5 層モデルの保有水平耐力と同等

片廊下型の5階建壁式鉄筋コンクリート造共同住宅の試設計

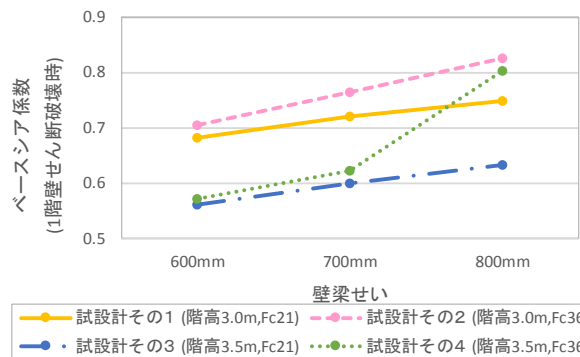
WRC造共同住宅を長期優良住宅と評価するための条件を検討

階高、コンクリートの設計基準強度が異なる「試設計その1」～「試設計その4」について、壁梁せいを600mm・700mm・800mmとした場合の層間変形角・ベースシア係数を比較

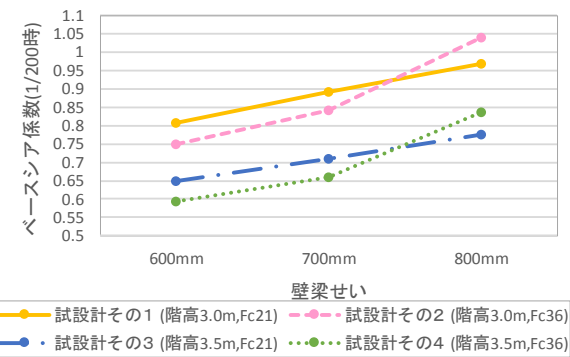
	試設計その1	試設計その2	試設計その3	試設計その4
階高	3.0 m	3.0 m	3.5 m	3.5 m
コンクリート設計基準強度	21 N/mm ²	36 N/mm ²	21 N/mm ²	36 N/mm ²



1次設計時層間変形角



ベースシア係数 (1階耐力壁せん断破壊時)



ベースシア係数 (1/200時)

- ・ 全ての試設計で1次設計時層間変形角は1/2000以下
- ・ 1階耐力壁せん断破壊時 C_B は、階高3.0mの場合0.7程度以上、階高3.5mの場合0.60程度以上
- ・ 層間変形角1/200時 C_B は、階高3.0mの場合壁梁せい600mm以上、階高3.5mの場合壁梁せい800mm以上で0.75程度以上

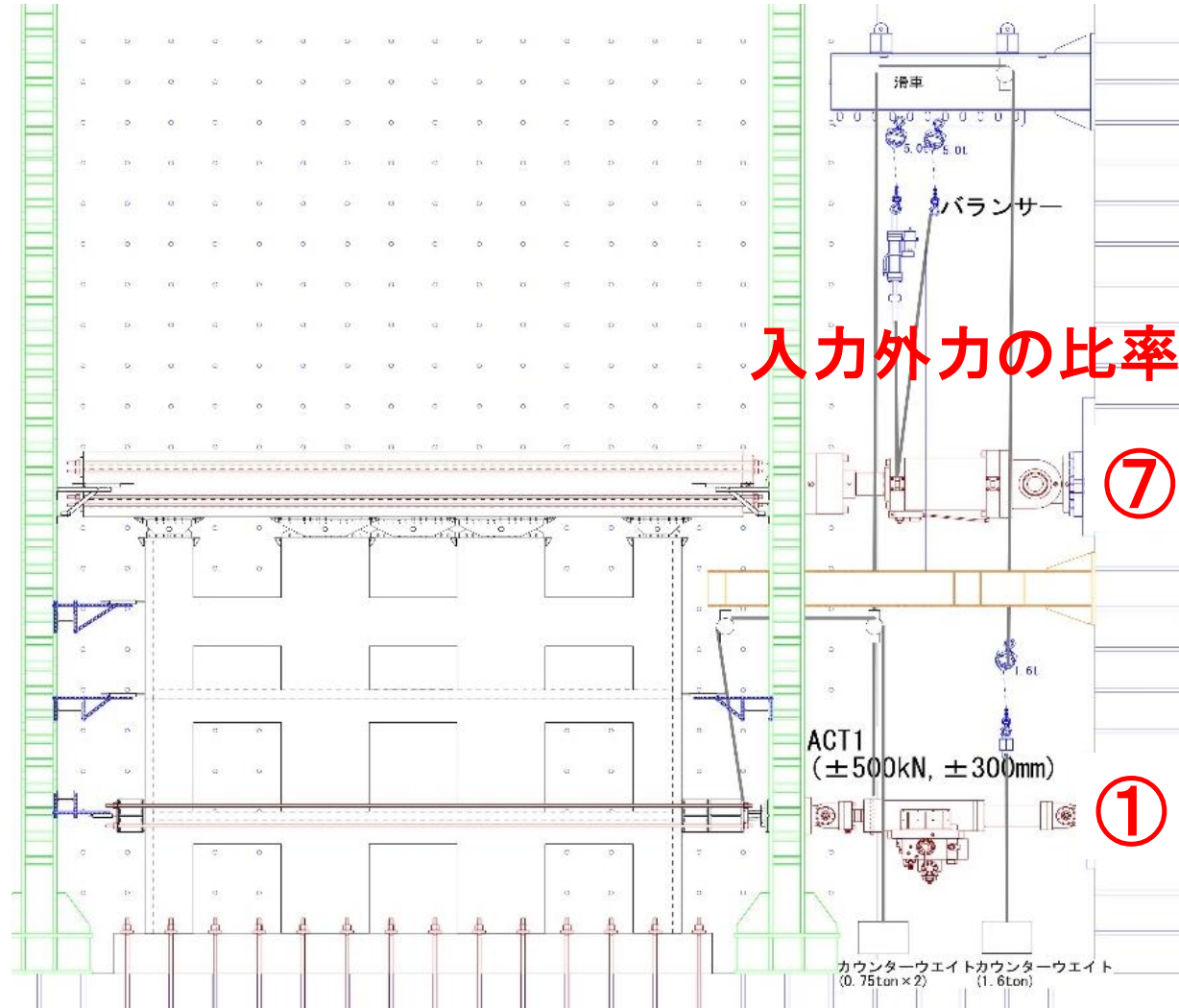
第Ⅲ編 壁式鉄筋コンクリート造架構試験体の 損傷防止性能確認実験

コンクリート強度

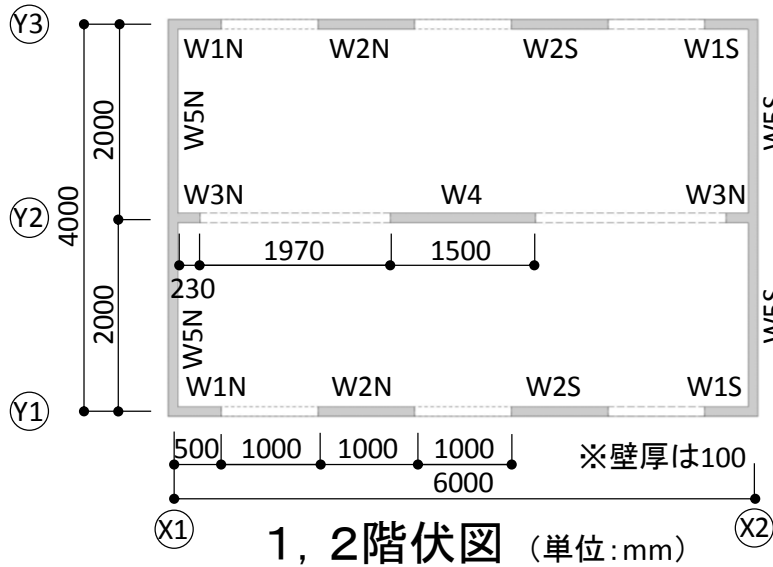
階	圧縮強度 [N/mm ²]
1 FL～2 FL	23.7
2 FL～3 FL	19.7
3 FL～4 FL	19.8
4 FL～	58.9



矢作建設工業
地震工学技術研究所



試験体概要

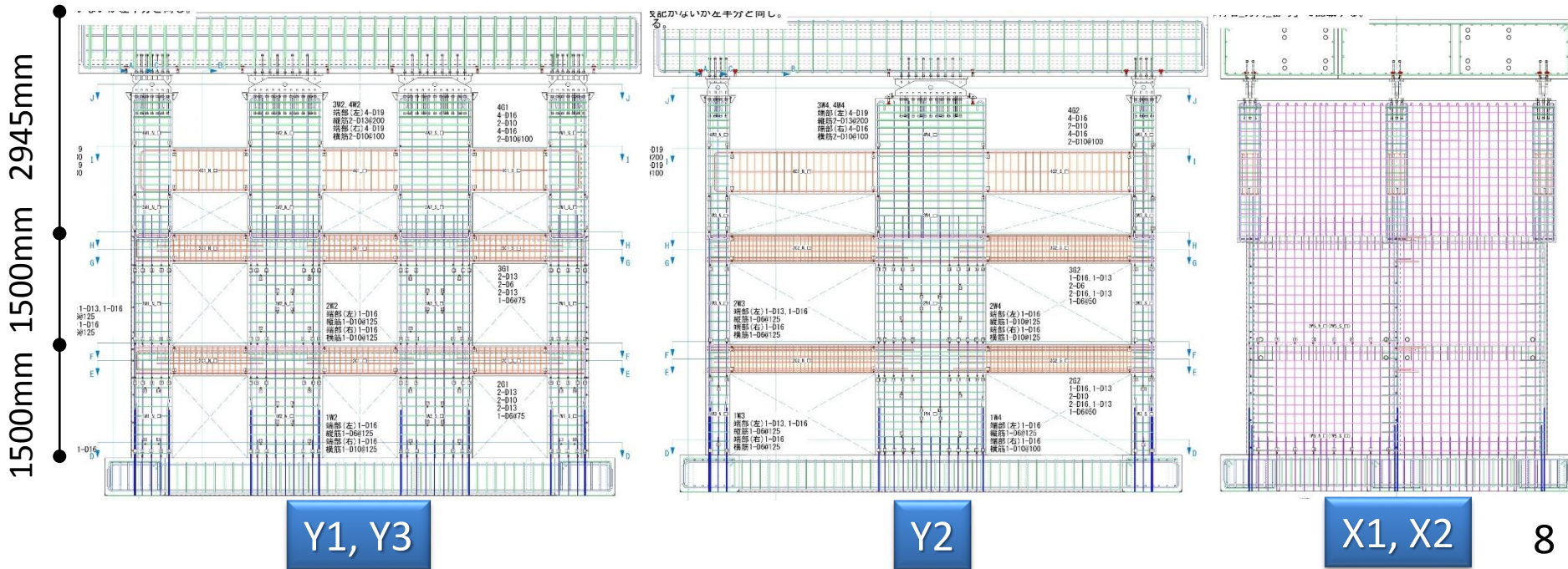


- ・1/2スケール
- ・階高: 1,500 mm (= 3,000 / 2)
- ・梁せい: 400 mm (= 800 / 2)
- ・壁量

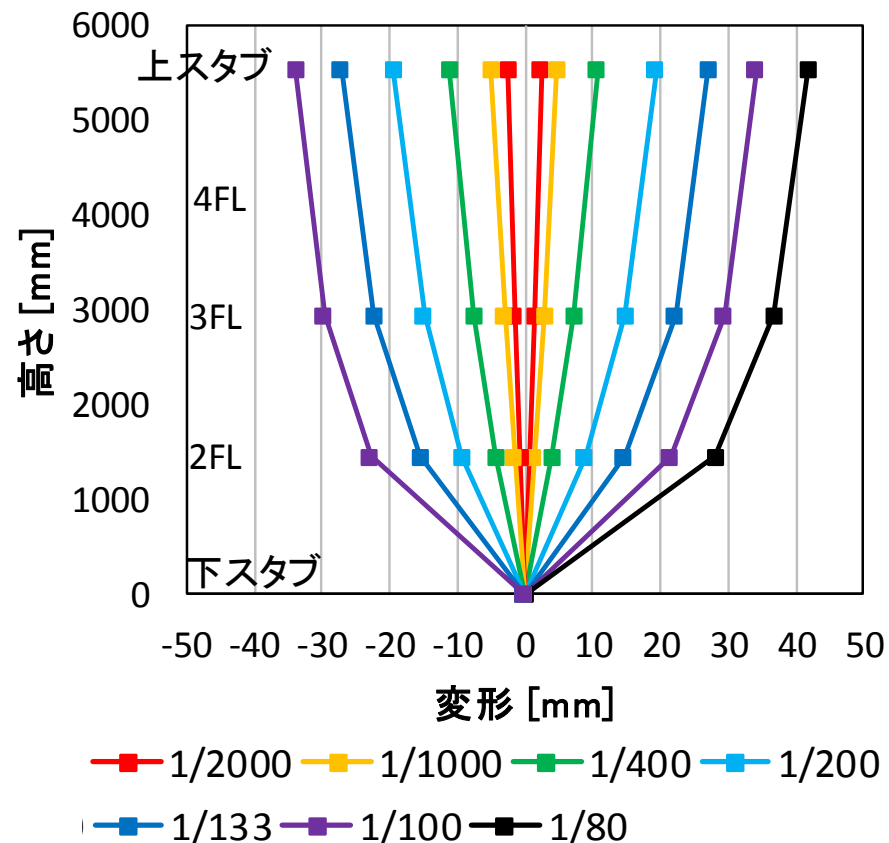
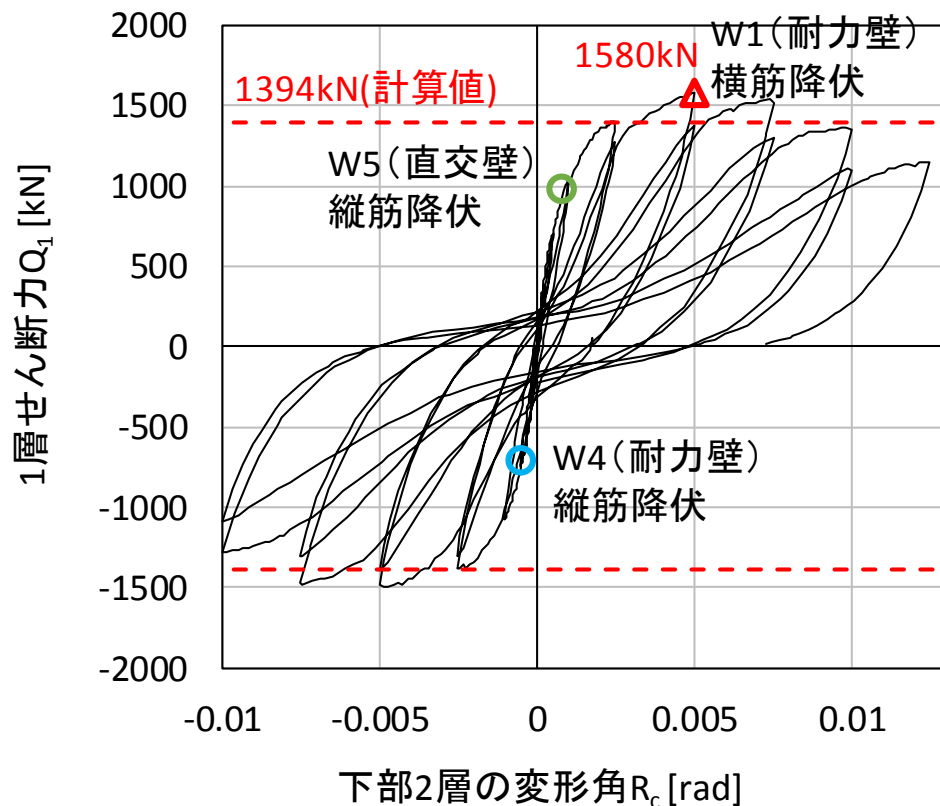
加力方向 $34,833\text{mm}^2/\text{m} > 31,350\text{mm}^2/\text{m}$

直交方向 $33,333\text{mm}^2/\text{m} > 31,350\text{mm}^2/\text{m}$

必要壁率



荷重－変形角と変形モード

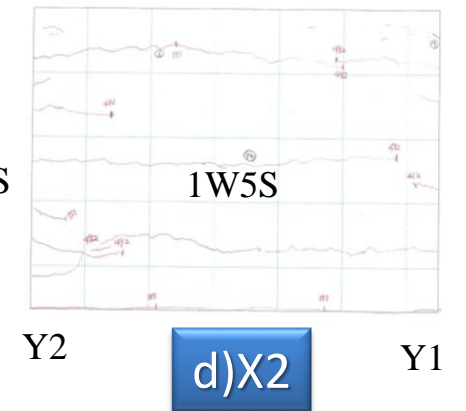
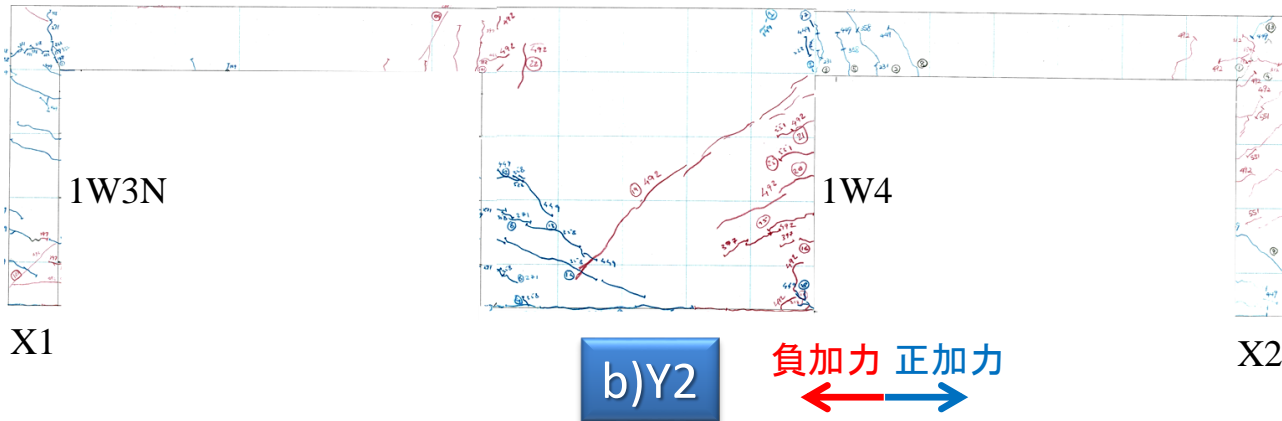
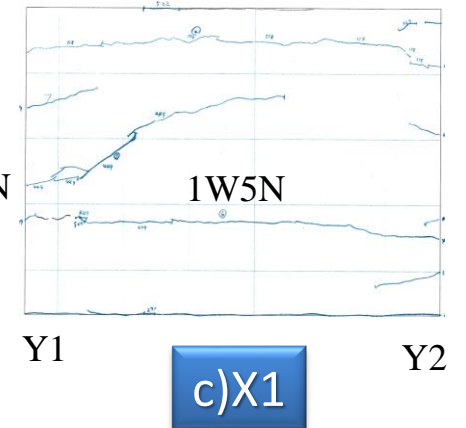
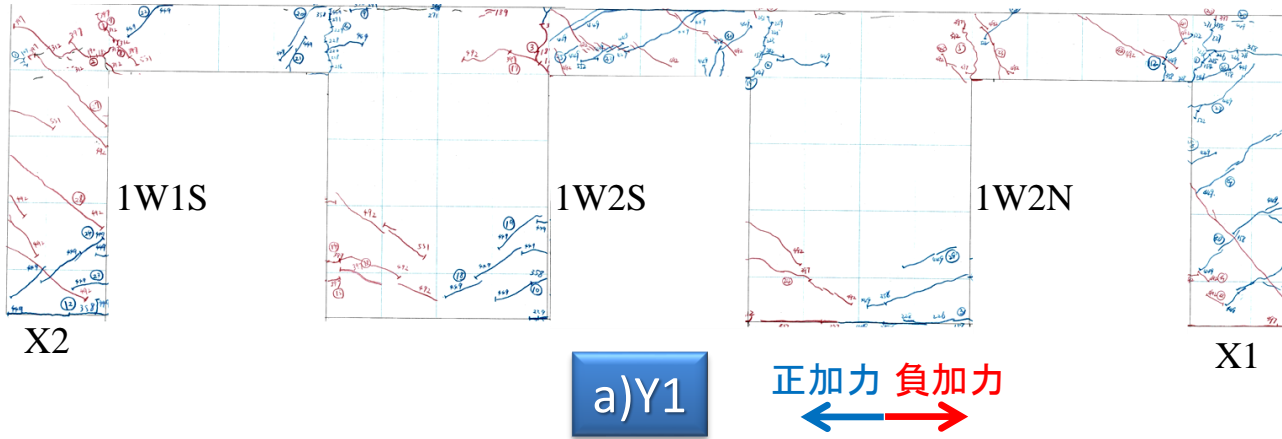
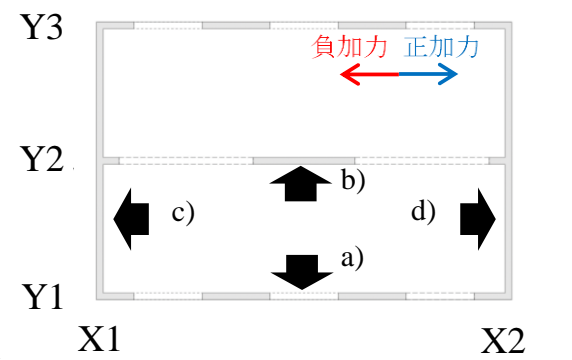


$R_c=1/2000$ サイクルから耐力壁縦筋の降伏が、 $R_c=1/1000$ サイクルから直交壁縦筋の降伏が、 $R_c=1/200$ サイクルで耐力壁横筋の降伏が生じ、最大耐力1580kN ($C_B=0.84$)に至った。 $R_c=1/200$ では2サイクル目においても計算耐力を保持した。1層に変形が集中し、 $R_c=1/200$ のとき $R_1=1/168$ であった。

※ C_B の算出において、試験体重量は $C_o=0.2$ の時に1層で $\tau=0.45\text{N/mm}^2$ を仮定して算出 9

損傷状況

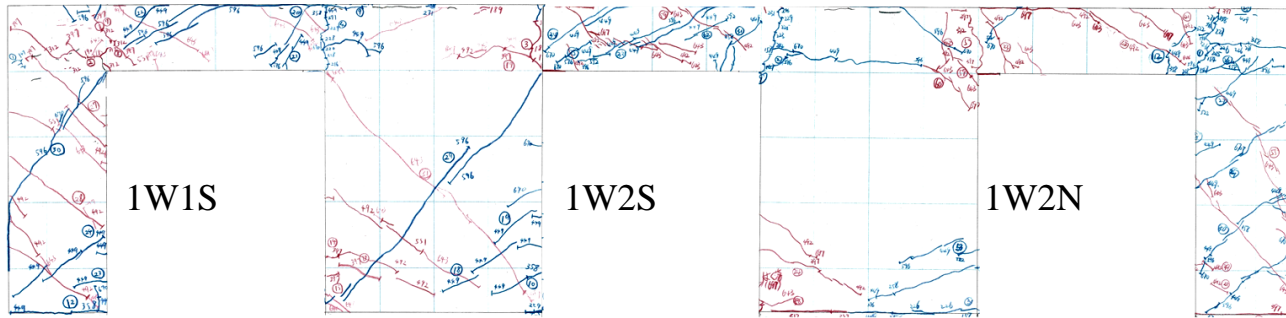
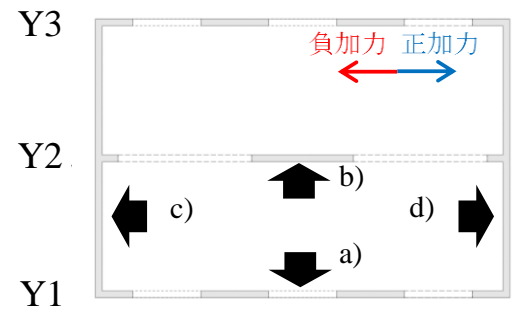
1/400サイクル終了後



1/400までには主に耐力壁の曲げひび割れ、直交壁(W5)の引張ひび割れが進展した(両壁の縦筋に降伏が生じた)。

損傷状況

1/200サイクル終了後



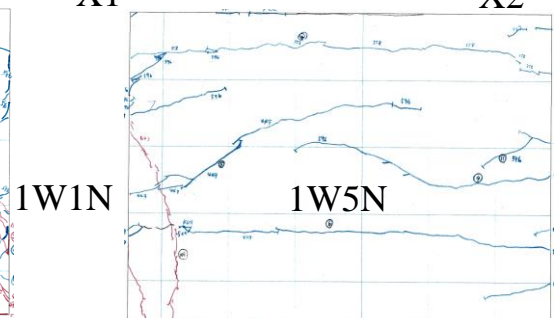
X2

1W1S

1W2S

1W2N

X1



X1

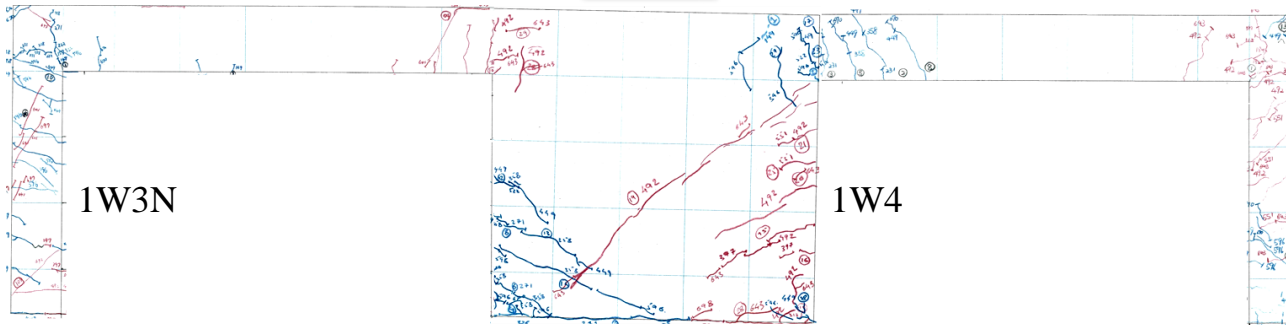
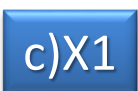
X2

1W1N

1W5N

Y1

Y2



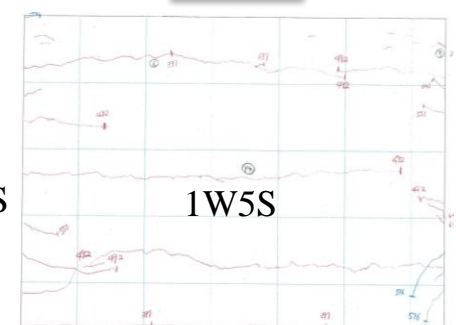
X1

1W3N

1W4

1W3S

X2



Y2

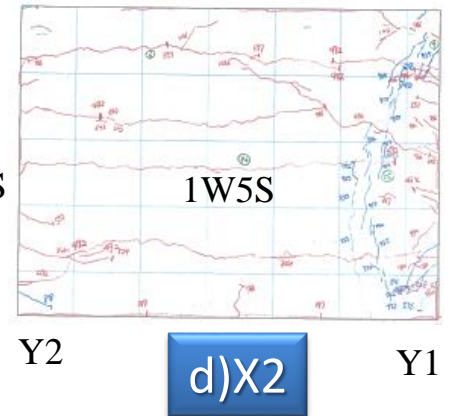
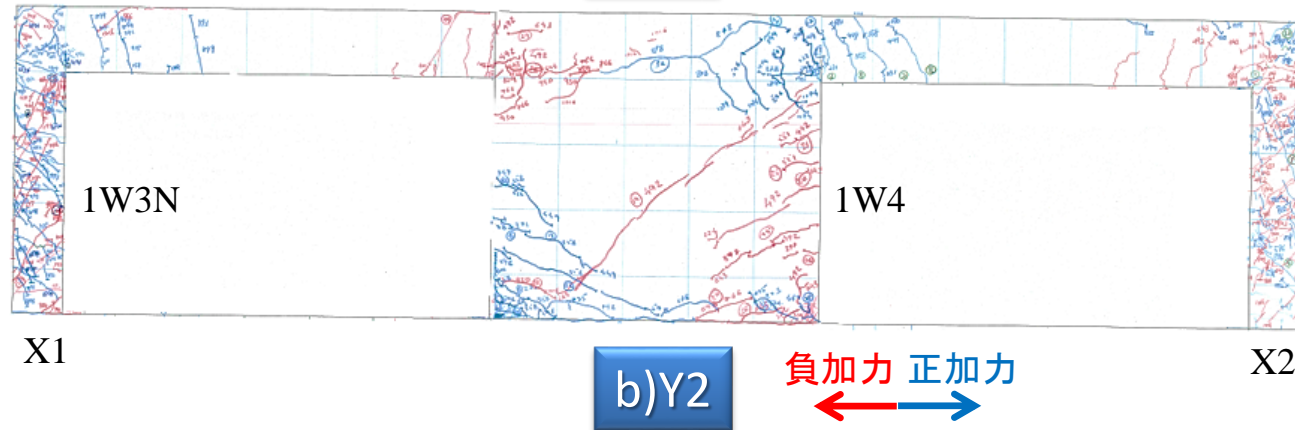
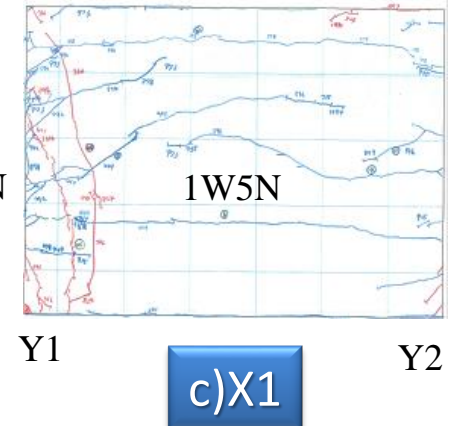
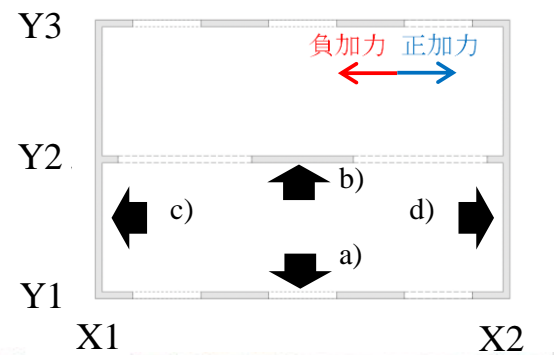
Y1



1/200(最大耐力時)までには主に耐力壁のせん断ひび割れ, すべりひび割れが進展した(耐力壁のせん断補強筋に降伏が生じた)。

損傷状況

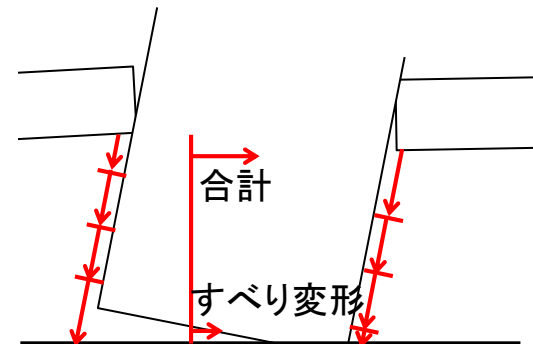
1/80サイクル終了後



1/80までにはせん断ひび割れがさらに進展したが、すべり破壊が先行した耐力壁（直交壁が取り付かないW2, W4）ではせん断ひび割れは少なかった。

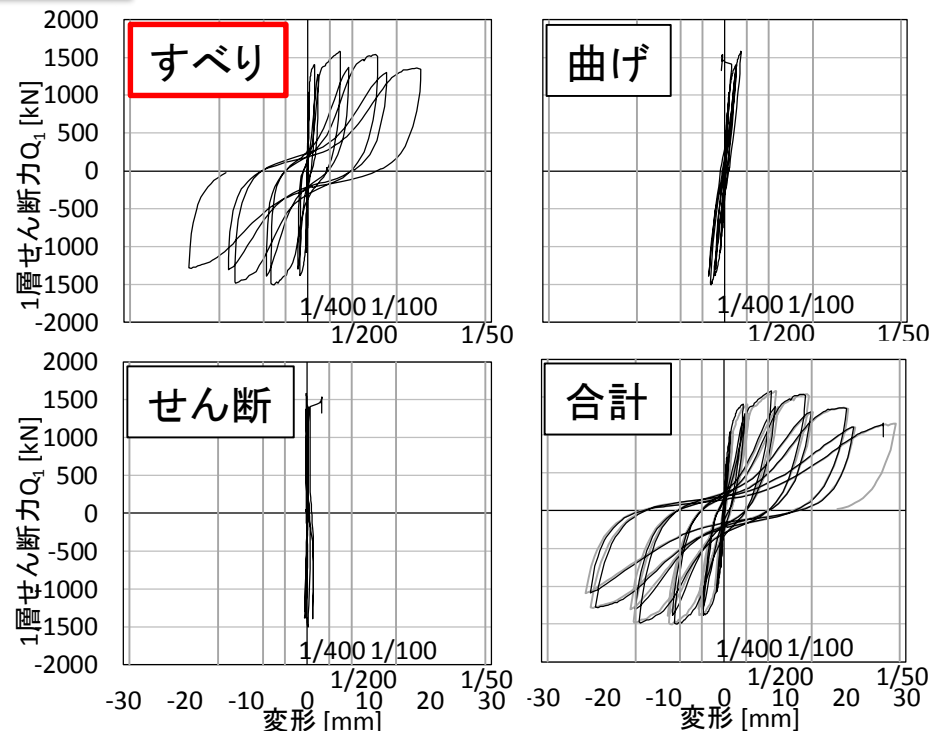
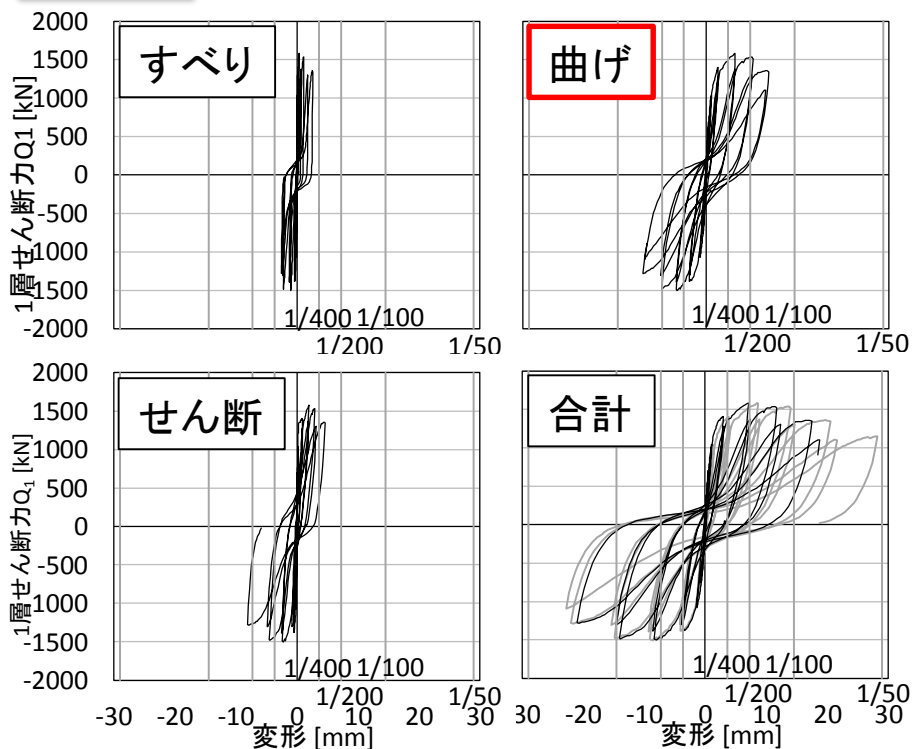
耐力壁の変形

- 耐力壁に設置した水平変位計，鉛直変位計（右図）を用いて算出。



1W1N : 直交壁が取り付く耐力壁

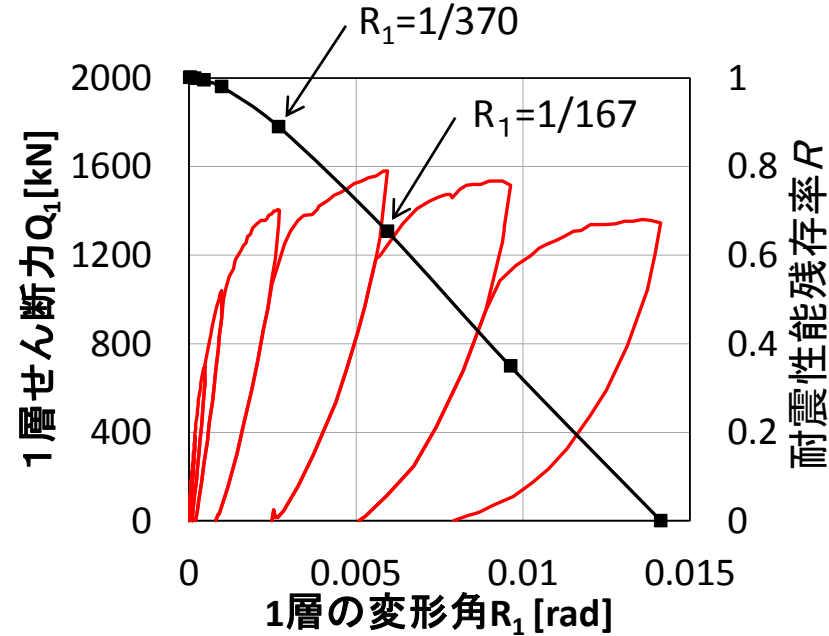
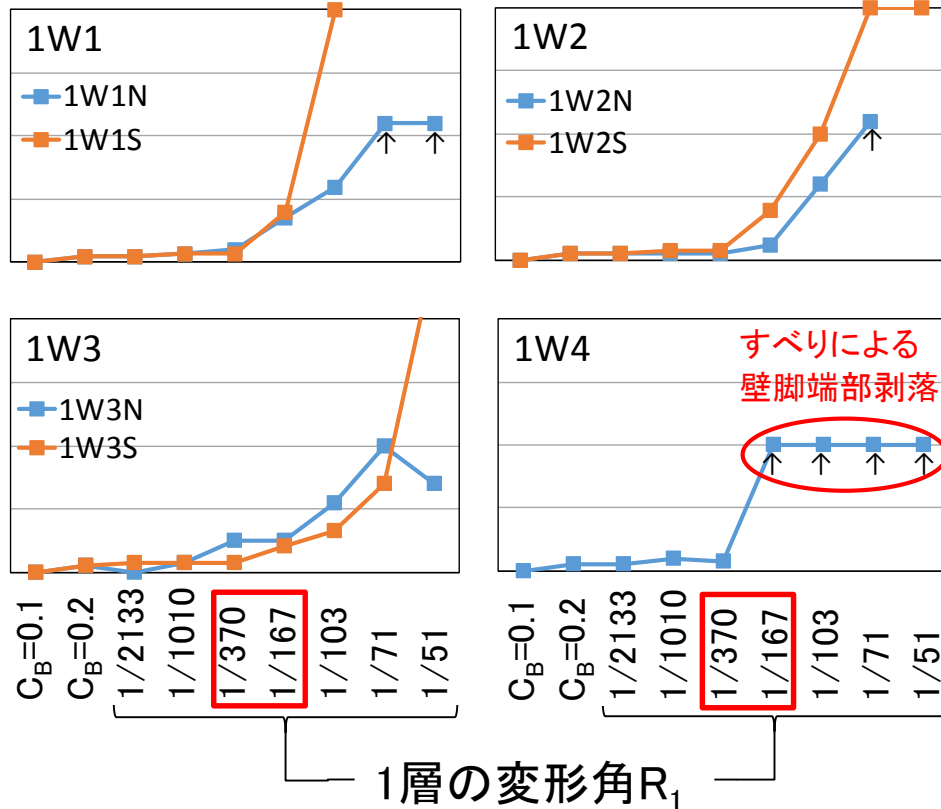
1W4 : 直交壁が取り付かない耐力壁



直交壁が取り付く耐力壁では曲げ変形およびせん断変形が，直交壁が取り付かない耐力壁ではすべり変形が，それぞれ支配的であった。

残留ひび割れ幅と残存耐震性能

残留ひび割れ幅(実測値) [mm]

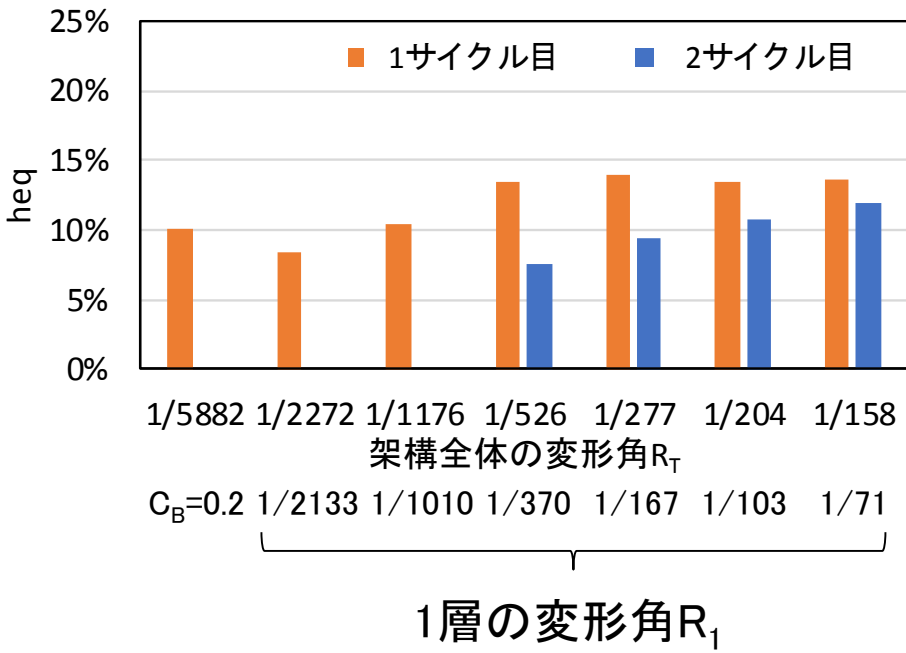


※ $R_1=1/71$ を終局変形として算出

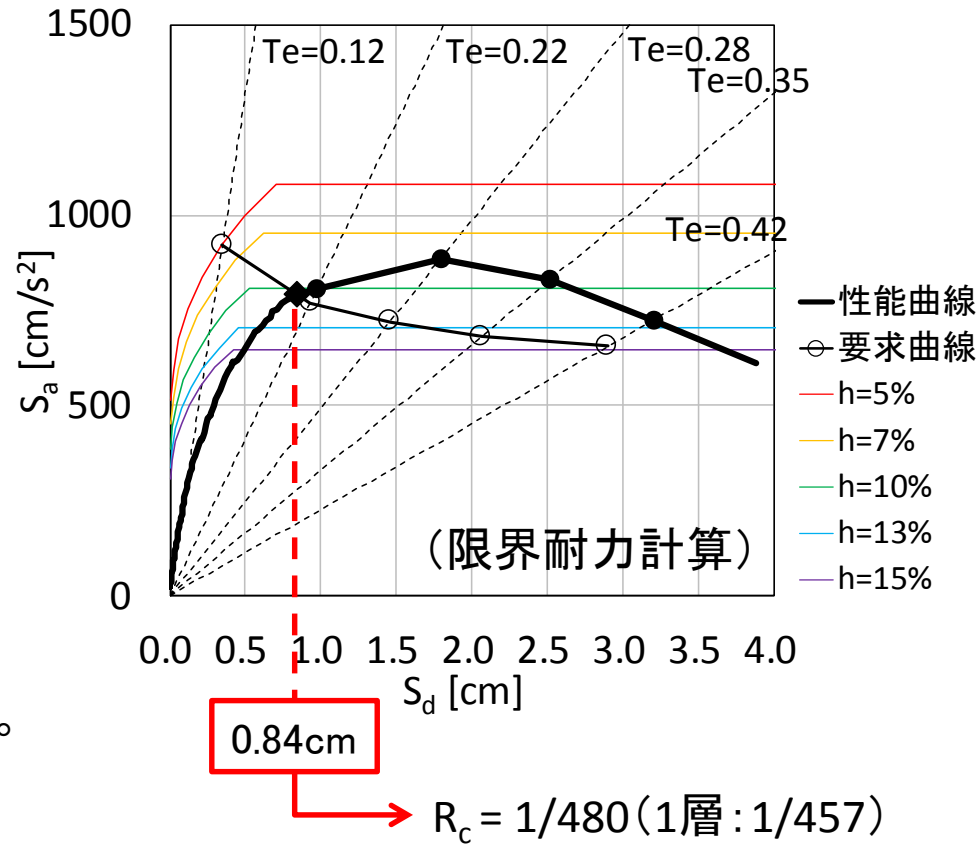
※”↑”は実際の幅がプロット値以上であることを示す。

残留ひび割れ幅は、 $R_1 = 1/370$ で0.5 mm以下、 $1/167$ で1 mm以下であった。参考値として、終局変形を変形角 $R_1 = 1/71$ として耐震性能残存率 R を求めると、 $R_1=1/370$ で0.89程度(小破)、 $R_1=1/167$ で0.65程度(小破)であった。

履歴減衰と大地震時に対する応答



※架構全体の荷重変形関係を用いて算出。



履歴減衰は2サイクル目 ($R_c=1/400$ サイクル以降)では7%~12%程度であった。WRC架構の大地震時応答を限界耐力計算により求めると、下部2層の変形角 $R_c=1/480$ (1層の変形角 $R_1=1/457$) と算定された。

架構実験結果のまとめ

本報で対象としたWRC架構の大地震に対する応答は限界耐力計算により $R_c=1/480$ ($R_1=1/457$)と算出され、その変形角時には、

- 最大耐力 ($R_c=1/200$, $R_1=1/168$) に達していないこと、
- 耐力壁の縦筋の降伏は生じているものの、横筋の降伏は生じていないこと、
- 残留ひび割れ幅は0.5 mm以下 (試験体は1/2スケールのため、簡易的に実大換算すると1.0 mm以下) にとどまること、
- 耐震性能残存率 R は0.9程度を有していること、

に加え、架構の最大耐力は2サイクル目においても計算耐力を保持すること、を考慮すると、本報で対象としたWRC架構は大地震に対しても十分な損傷防止性能を有していると考えられる。

第IV編 壁式鉄筋コンクリート造建築物の大地震動時における 損傷防止性能確保に必要な剛性および強度に関する解析的検討

大地震時応答が損傷限界に収まるための必要強度を限界耐力計算に基づいた
等価線形化解析により算定

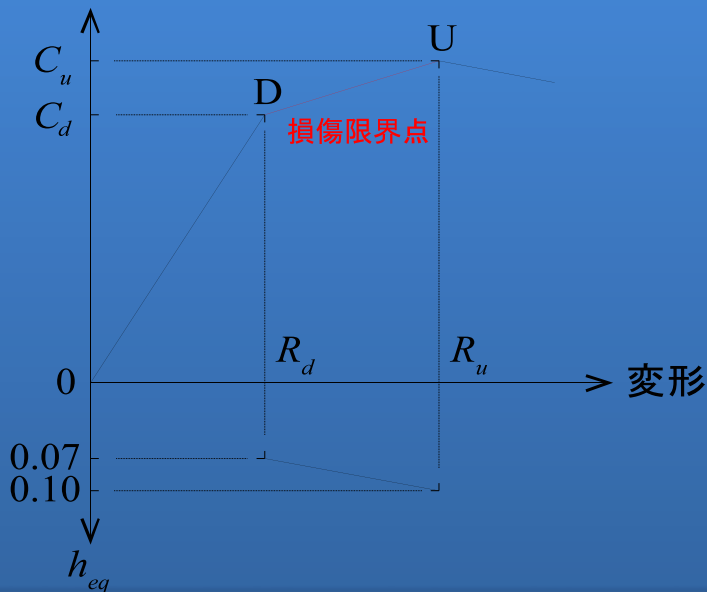
検討対象

階数: 地上1~5階建, 階高: 3.0, 3.5, 4.0 m
質量は各階同一で, 平面, 立面とも剛性ア
ンバランス無し

復元力特性・減衰

タイプA: $C_d = 0.90C_u$ タイプB: $C_d = 0.85C_u$

ベースシア係数



検討方法

必要ベースシア係数

$${}_D C = S_{a0} p q \frac{M_e}{M} F_h Z G_s / g$$

$$\Rightarrow {}_D C = \frac{12}{g} p \frac{M_e}{M} \frac{1.5}{1 + 10(0.8h_{eq} + 0.05)}$$

安全側に簡略化

$S_{a0} = 8 \text{ m/s}^2$, $p = 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1.00$ (1~5階)

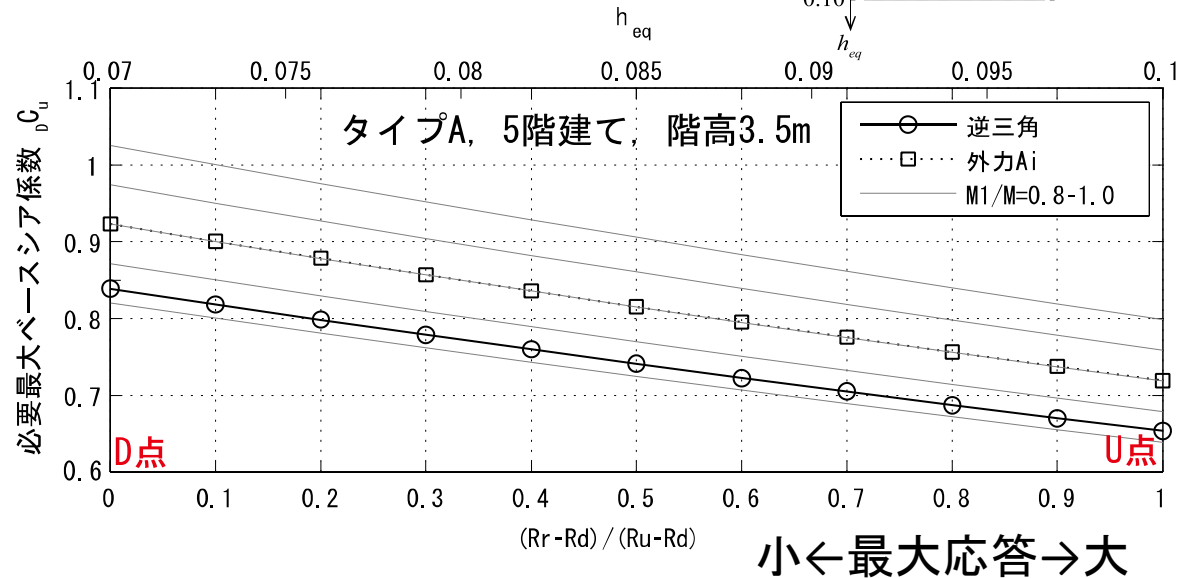
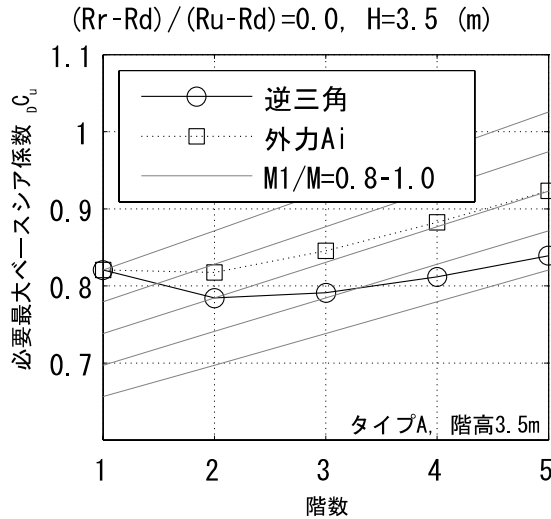
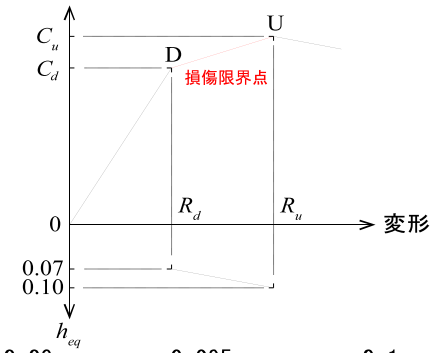
$q = 1$, $Z = 1$, $G_s = 1.5$, $h = 0.8h_{eq} + 0.05$ (h_{eq} : 等価粘性減衰定数)

有効質量比 M_e/M は2パターン検討

- ① 逆三角形の水平変位分布 (← 対象建物はこちらに近い)
- ② 梁が剛で各階の水平剛性が等しい建物にAi分布に基づく外力が作用した場合の水平変位分布 (← 安全側)

解析結果・考察

ベースシア係数

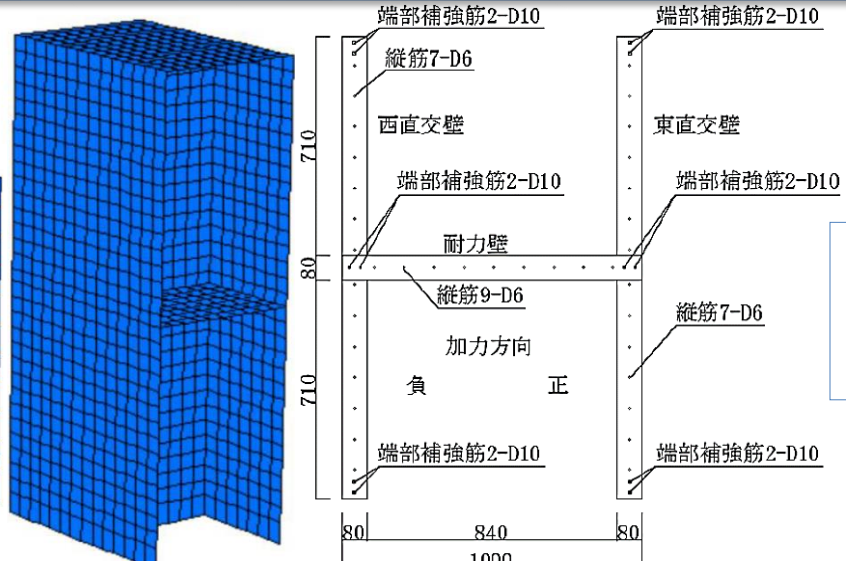
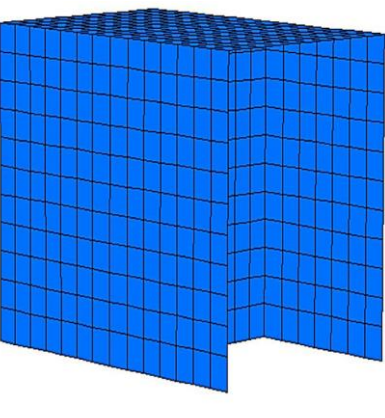


- 必要最大ベースシア係数 $D C_u$ は階数が大きいほど大きく、5階建てで最大。
- 逆三角形変位分布はAi外力分布より $D C_u$ は小さい。
- 損傷限界をD点とU点の中央程度と考えると、 $D C_u$ は0.75程度。
- 最大強度に到達する直前の範囲で応答を収めるためには $D C_u$ は0.65程度、D点で抑えるためには $D C_u$ は0.85程度必要。

第V編 壁式鉄筋コンクリート造部分架構試験体のFEM解析

目的1: FEM二次元解析で壁式鉄筋コンクリート造部分架構試験体の再現

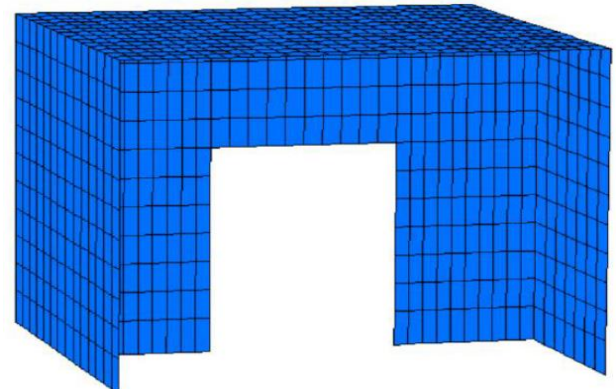
解析モデル



- 検討1: 荷重-変形図の比較
- 検討2: 有効幅の比較

目的2: 開口部のパラメータが有効幅に与える影響に関する検討

解析モデル



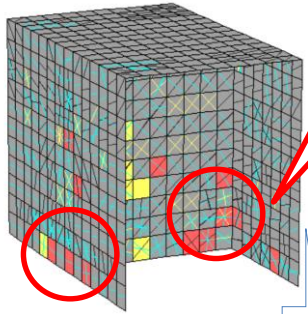
検討1: 開口部の大きさと直交壁の有効幅の関係

内容: 前述のモデルを基本モデルとして, 耐力壁に開口部を加えて, 耐力壁全体に対して, 開口部の長さ比, 高さ比と面積比をパラメータとして直交壁有効幅にそれらが与える影響を確認して検討する。

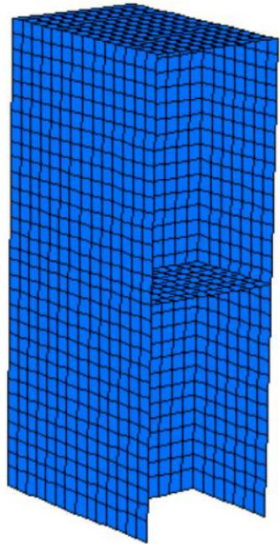
目的1: FEM二次元解析で壁式鉄筋コンクリート造部分架構試験体の再現

結果の二例

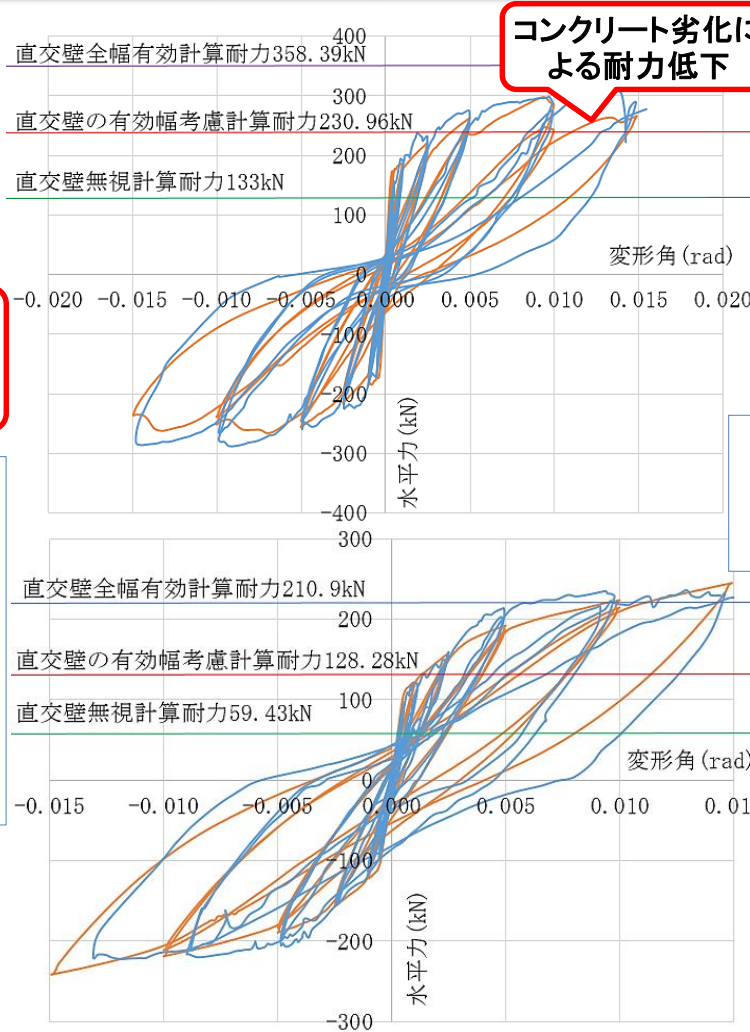
—: 実験結果
—: 解析結果



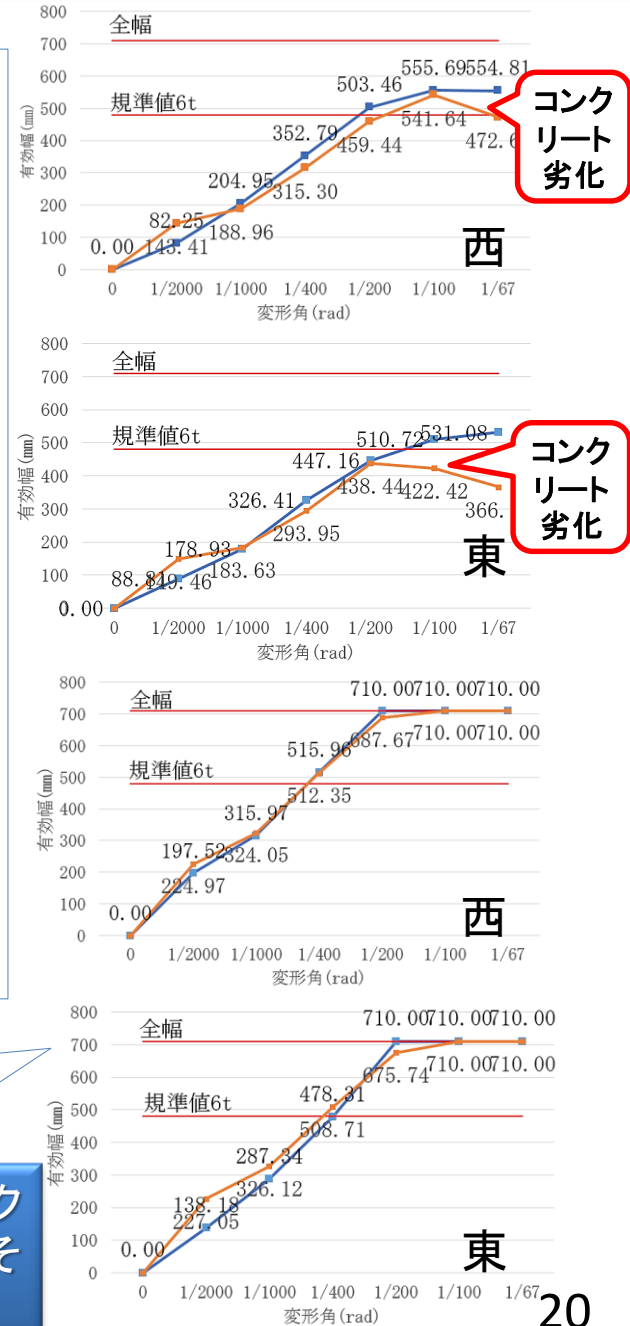
コンクリート劣化



荷重と変形図



直交壁が引張側時の有効幅の計算値

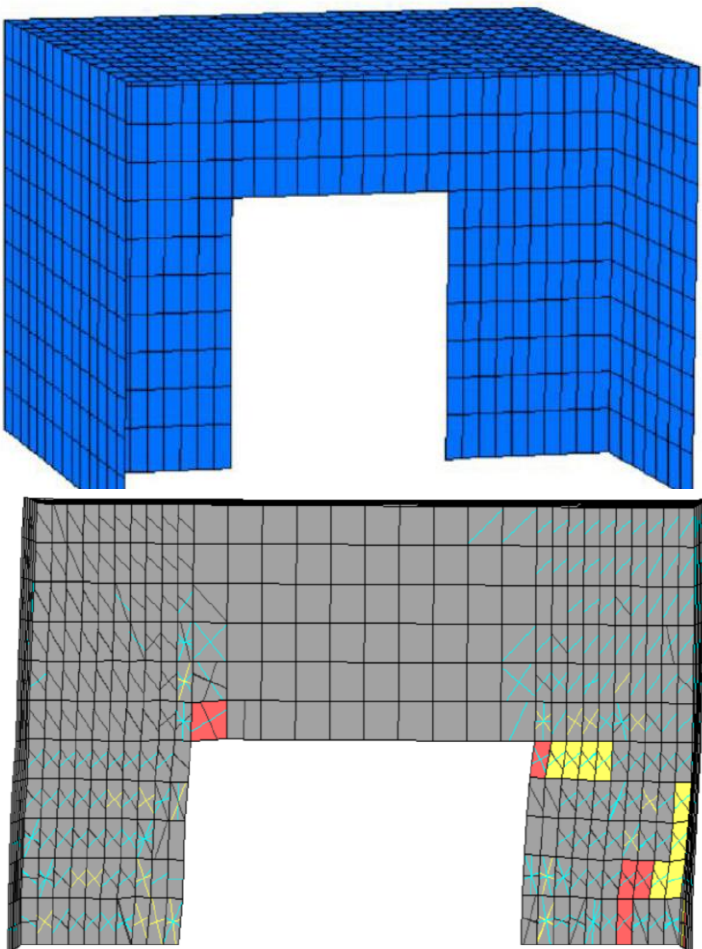


西: 正方向加力時に引張側となる直交壁
東: 負方向加力時に引張側となる直交壁

結論: 解析結果を見ると、荷重-変形関係は良好に一致、ただし、コンクリート劣化による耐力低下は対応しなかった; 規準の有効幅におよそ1/300radで到達、ただし、コンクリート劣化の影響は再現できなかった。

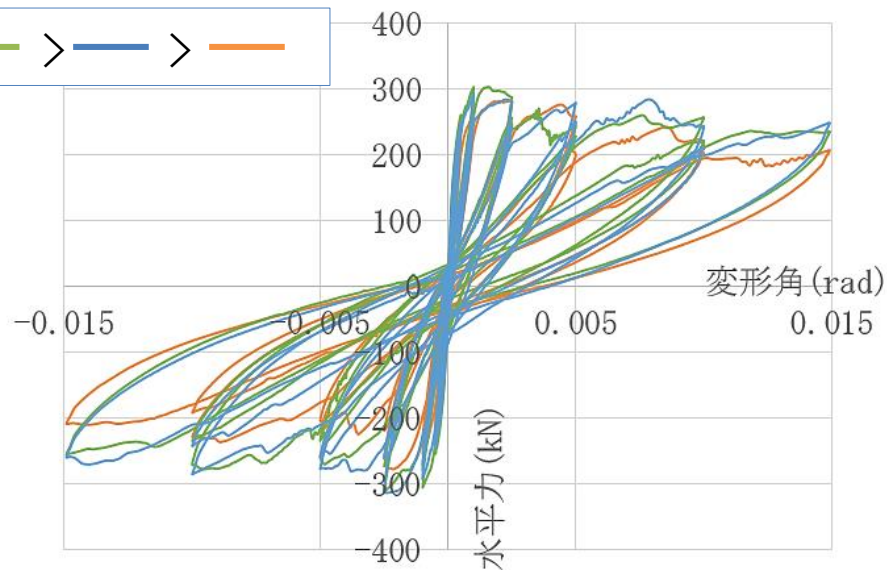
目的2: 開口部のパラメータが有効幅に与える影響に関する検討

高さをパラメータとして直交壁の有効幅に与える影響結果の例

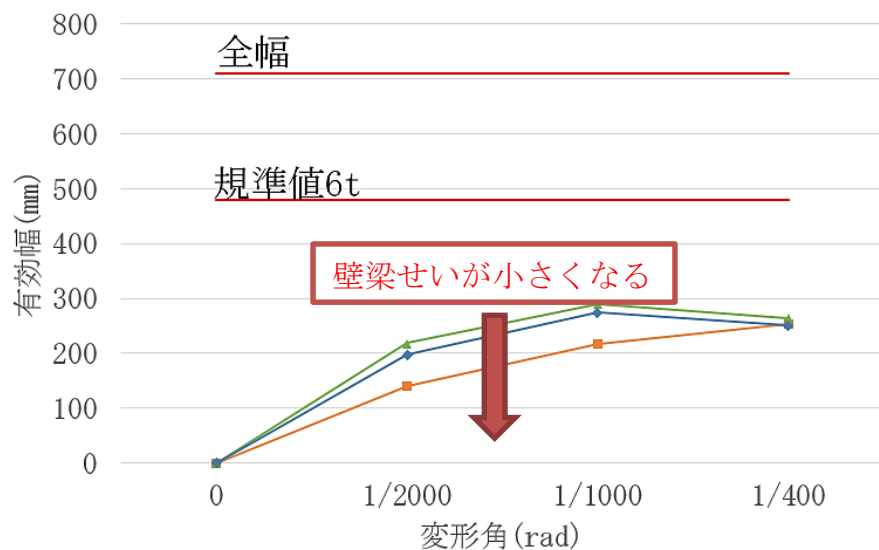


壁梁せい: — > — > —

荷重と変形図



引張側有効幅の計算値



結論: 直交壁の有効幅に対して、開口部高さは影響が大きい。規準の曲げ強度式による耐力では開口部の高さの影響を考慮していないが、解析結果によると、開口部高さが高くなるにつれて、直交壁の有効幅は短くなる。

第VI編 長期優良住宅における鉄筋コンクリート壁式構造の損傷防止性能の合理化(案)

極めて稀に発生する地震に対し、継続利用のための改修の容易化を図るため、損傷のレベルの低減を図ることを目的とし、

- ・短期荷重時の層間変形角1/2000以下
- ・保有水平耐力をベースシア係数にして概ね0.75以上が確保されるよう規定を追加

<壁式告示(平成13年国交省告示第1026号)の規定に加えて評価すべき項目>

- (1) 現場打ち壁式鉄筋コンクリート造とする。
- (2) 使用するコンクリートは、普通コンクリートとする。また、設計基準強度は 21 N/mm²以上とする。
- (3) 耐力壁は、剛性率は0.6以上、偏心率が0.15以下となるよう釣り合い良く配置する。剛性率が0.6未満または偏心率が0.15を超える階にあっては、壁量を割り増すものとする。
- (4) 各階各方向の壁量は、次式を満たすものとする。
$$L_w \geq \alpha \cdot \beta \cdot Z \cdot L_{w0} \cdot F_{es} \quad \text{かつ} \quad L_w \geq (L_{w0} - 30) \cdot F_{es} \quad (\text{mm/m}^2)$$
- (5) 階高に応じた壁梁の強度若しくは壁梁の平均せいを確保することとする。
なお、壁梁の平均せいは下式による。

$$\bar{D}_b = \{ \sum b_i \cdot D_{bi} \cdot l_{oi} + \sum (b_j \cdot D_j \cdot l_j) \} / \sum (b_i \cdot l_{oi})$$

H29年度のまとめ

- 5階建てWRC造建物の1～2階部分を対象とした試験体の設計と片廊下型の5階建てWRC造共同住宅の試設計(第Ⅱ編)
- WRC造架構の大地震時における損傷防止性能について、1/2スケール5層WRC架構の下部2層に着目した試験体の静的加力実験に基づき評価(第Ⅲ編)
- 等価一自由度系モデルを用い、限界耐力計算による等価線形化解析を行って最大応答を推定し、応答が長期優良住宅に要求される耐震性能を満足するための要件について検討(第Ⅳ編)
- FEM解析により直交壁を有する耐力壁の立体挙動を検討し、直交壁のパラメータが有効幅に与える影響を検討(第Ⅴ編)
- 長期優良住宅の認定条件を満足するWRC造の評価方法として、壁式告示に加えて評価すべき項目を提案(第Ⅵ編)