

### 3.1.6 木造建物実験における三次元数値シミュレーション解析

#### 目 次

##### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5カ年の年次実施計画
- (e) 平成17年度業務目的

##### (2) 平成17年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
  - 1) 震動台実験に対応した倒壊解析シミュレーション
  - 2) 演算の高速化に関する検討
  - 3) 解析理論の拡張 免震建物への対応
  - 4) 解析アプリケーション全体の基本設計
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

##### (3) 平成18年度業務計画案

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 木造建築実験における三次元数値シミュレーション

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
(株)日本システム設計	取締役副社長	三宅 辰哉	miyake@nittem.co.jp
	取締役	花井 勉	hanai@nittem.co.jp
	主任	河尻 出	kawajiri@nittem.co.jp
		五十嵐 冬人	igarashi@nittem.co.jp

(c) 業務の目的

木造住宅の地震動による応答状態を倒壊に至るまで時系列的に追跡することのできるプログラム(木造住宅倒壊シミュレーションソフト)の開発が本業務の主要な目的である。本業務と並行して行われる各種動の実験、静的実験の結果および文献調査等により必要な部材・接合部の構造特性が得られ、解析の精度は振動台実験結果との比較により検証される。本プログラムはE-ディフェンスにおける三次元震動破壊実験の試験体策定等の実験計画および実験結果分析に利用される。また、個別の木造住宅の倒壊挙動を提示することは耐震改修の動機付けとなり、耐震改修の促進に寄与すると期待できる。

(d) 5 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成14年度：

木造住宅の倒壊パターンについて、地震被害報告書等の文献調査により数種類に分類されることを確認した。並行して行われた中規模振動台実験の結果はそのいずれにも該当しない。その理由の一つとして非構造壁の水平耐力が挙げられる。

木造住宅の部材・接合部の応力変形特性については大変形領域に渡る情報は皆無であり、今後、本プロジェクトに関連して行われる各種実験の結果から新たに特性を評価する必要性が確認された。

倒壊応答解析の基礎理論を構築し、試解析によりその有用性を確認した。

2) 平成15年度：

文献調査および中規模震動台実験結果から必要な構造特性を得るとともに、木造住宅の崩壊パターンを特定した。

平成14年度の作業による基礎理論に曲げ要素(梁要素)の追加、および要素の分離・飛散現象解析機能の追加を行った。

解析結果の三次元アニメーション化を試行した。

3) 平成16年度：

耐力壁・接合部等の初期状態から建物の倒壊に至る変形領域に渡る応力変形特性を整

理し、本解析手法の当面の対応範囲を設定した。  
実規模の木造軸組構法住宅に対する倒壊解析手法の適用性を確認した。  
解析結果と実験結果の比較により解析精度を評価した。  
解析時間短縮に関する検討を行った。  
入出力画面のサンプルを作成した。

4) 平成17年度：

開発した解析プログラムにより、E-ディフェンスで行われる木造住宅の震動台実験の結果予測・分析を行う。  
演算の高速化に関する検討を行う。  
免震建物に対応するために解析理論を拡張する。  
データ入出力部を含む解析アプリケーション全体の基本設計を行う。

5) 平成18年度：

解析アプリケーションの構築  
復元力特性データの拡充・整理  
木造建物震動台実験結果の予測・分析

(e) 平成17年度業務目的

木造建物震動台実験結果の予測・分析

E-ディフェンスで行われる木造建築物の震動台実験の結果を解析により予測して、実験計画の資料とする。また、実験結果と解析結果の比較により部材・接合部の復元力特性を推定する。

倒壊シミュレーション活用促進を目的とした演算高速化の検討

解析プログラムのソースコード言語およびコンパイラを最適なものに变更して演算の高速化を図る。関連して、解析概略フローチャート、変数一覧表などを作成する。

解析理論・プログラムの拡張

平成16年度までに構築した解析理論および解析プログラムは基礎固定の木造軸組構法住宅を対象としている。本業務と並行して行われる震動台実験の試験体には免震木造住宅が含まれるため、これに対応するための準備として解析理論の拡張を行う。

解析アプリケーションの構築

図化イメージを介したデータ入力プログラム、解析結果の自動アニメーション化プログラム、および復元力特性等のデータベース編集プログラムを作成し、それらを上記解析プログラムに結合して、解析アプリケーションを構築することを本業務のひとつの目標とする。本年度はアプリケーション全体の基本設計および各プログラムの試作を行う。

## (2) 平成17年度の成果

### (a) 業務の要約

本年度は昨年度までに構築された解析プログラムをもとに、本業務と並行して行われる木造建物震動台実験試験体に対応できるように解析理論を修正・拡張し、本実験結果の予測・分析を行った。事前解析の時点では試験体の重量および耐力の正確な値は不明であったが、既往の知見に基づきそれらを受当と考えられる値に設定したところ、無補強試験体は倒壊し、補強試験体は倒壊しないという本実験が想定する結果が得られることが確認された。実験後、実験結果および実測重量などに基づいて解析モデルと復元力特性の調整を行い、実験結果を再現できる解析モデルを設定するとともに、本年度までに得られた耐力壁などの復元力モデルを整理した。加えて免震建物への対応準備として解析理論の拡張を行った。また、解析プログラムのソースコードおよびコンパイラの変更による演算高速化の可能性について検討したところ、演算時間が従来の1/15程度に短縮されることが確認された。このほか、データ入出力部分を含む解析アプリケーション全体の基本設計およびデータ入出力プログラムを試作した。

### (b) 業務の実施方法

#### 1) 震動台実験に対応した倒壊解析シミュレーション

本年度の既存木造住宅実験試験体に対応した解析モデルを設定する。解析は実験前の事前解析と実験後の事後解析の2回を行った。事前解析では、解析モデル重量は構成材料の公称重量に基づいて設定し、耐力壁・接合部などの復元力モデルは昨年度までの設定と既往の実験結果などに基づいて設定する。事後解析では実測重量に基づいて重量を修正し、解析結果が実験結果に適合することを条件に復元力モデルを調整する。

#### 2) 演算の高速化に関する検討

市販のパーソナルコンピュータで一般的な演算プロセッサに最適な言語およびコンパイラを用いることで演算の高速化を図る。主たる作業は昨年度までに作成した解析プログラムの当該言語への翻訳と演算結果の確認となる。

#### 3) 解析理論の拡張 免震建物への対応

免震建物の地震応答解析に関する既往文献などに基づいて解析理論を構築し、プログラムソースコードを試作する。

#### 4) 解析アプリケーション全体の基本設計

解析プログラム、および図化イメージを介したデータ入力プログラム、解析結果の自動アニメーション化プログラム、復元力特性等のデータベース編集プログラムの相互関係を整理した上で、各プログラムの試作を行う。

(c) 業務の成果

1) 震動台実験に対応した倒壊解析シミュレーション

a) 解析対象建物の構成

対象建物は本年度の移築既存建物実験に用いた試験体とする。対象建物の平面図を図1に、解析モデルに考慮する部材による伏図を図2に、軸組図を図3-1~3に示す。本試験体は図1に示すようにほぼ同一の形状・仕様の2棟(A棟,B棟)からなり、両者を同時に加振している。A棟は既存状態のままであり、B棟は所定の耐震診断基準を満足するように補強されている。B棟の耐力壁には図3に示すように耐震補強のために筋かい(45×90)と構造用合板(12mm)が増設されているほか、柱端部には図4のように補強金物が設置されている。なお、A棟とB棟で実際の部材配置は若干異なるが、耐震性能に与える影響は無視できると判断して、伏図・軸組図はB棟を基準として作成した。

柱・梁部材の断面寸法は実測結果に基づき次のように設定した。

柱 100×100mm

2階床梁 X8 通り・Y4-Y7 間：100×200mm その他：100×150mm

小屋梁 100×150mm

以降、震動台実験以前に行った解析を「事前解析」、実験後の解析を「事後解析」と称する。

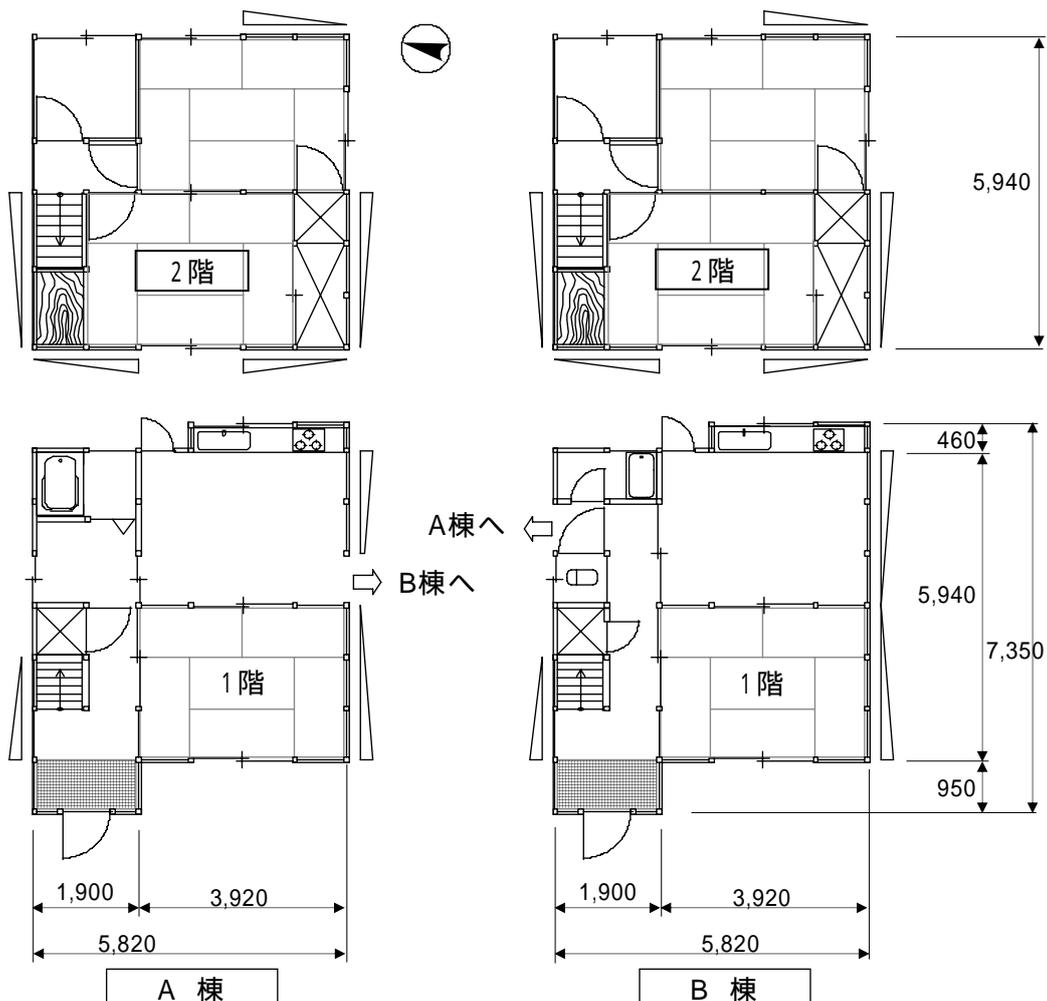
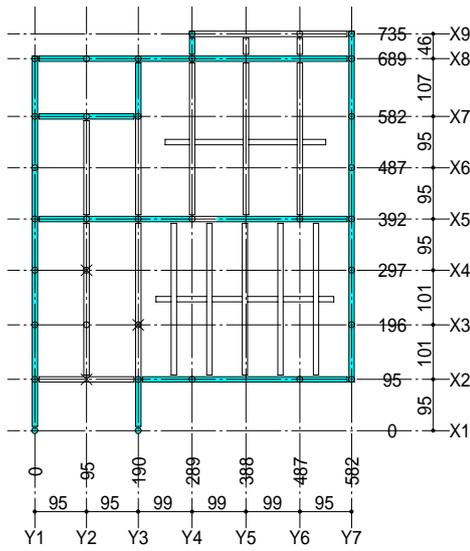
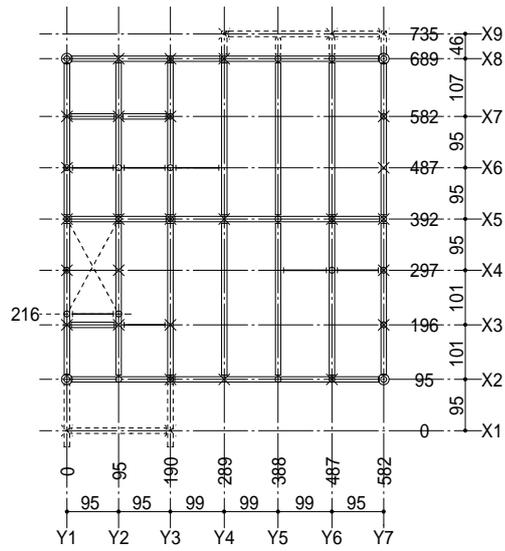


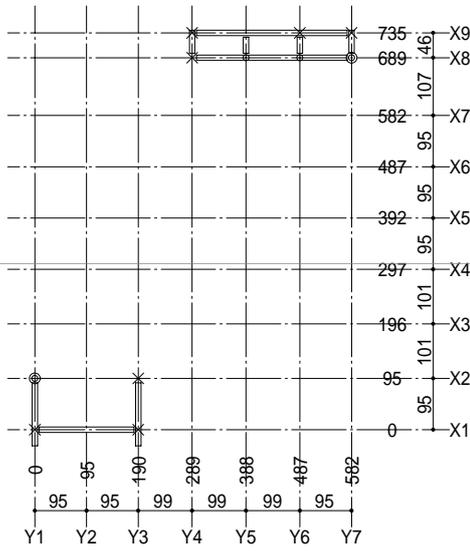
図1 解析対象建物平面図



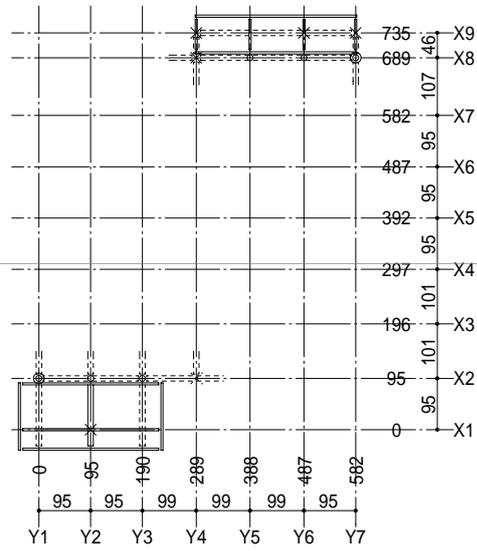
基礎・土台伏図



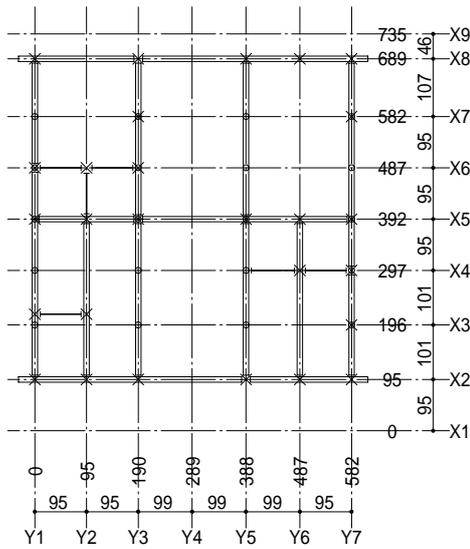
2階梁伏図



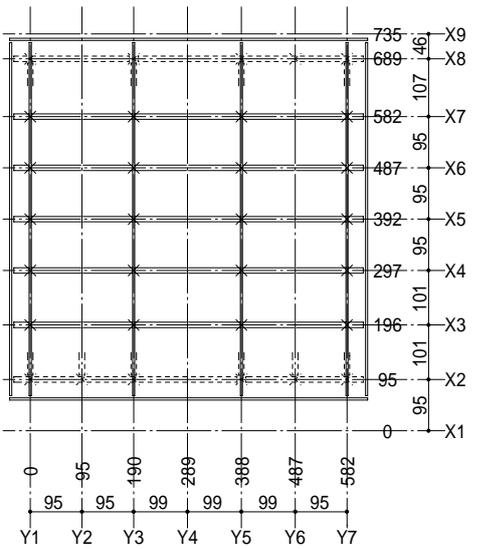
下屋梁伏図



下屋伏図

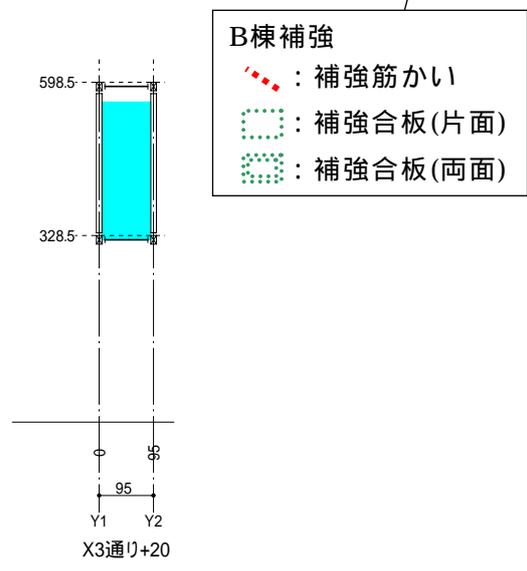
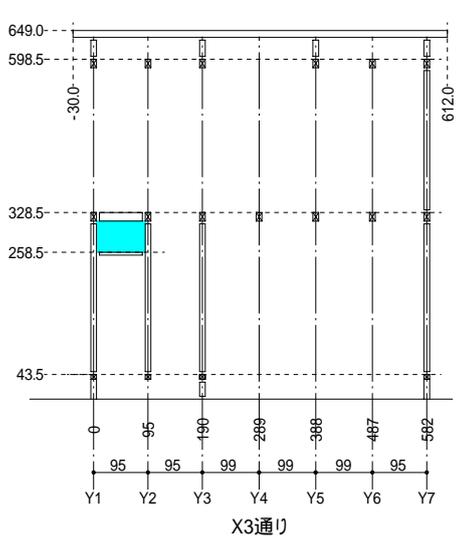
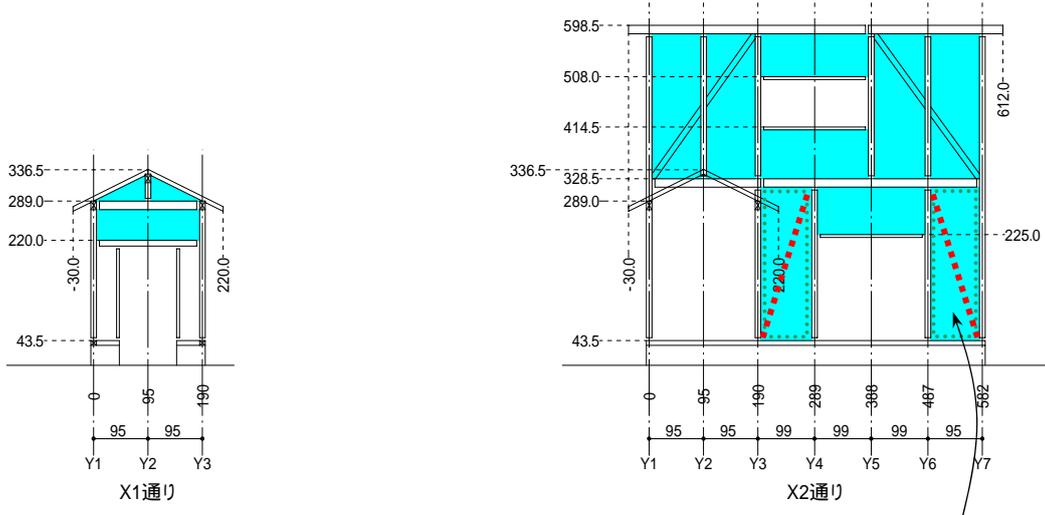


小屋梁伏図



小屋伏図

図2 解析モデル伏図



**B棟補強**

- : 補強筋かい
- : 補強合板(片面)
- : 補強合板(両面)

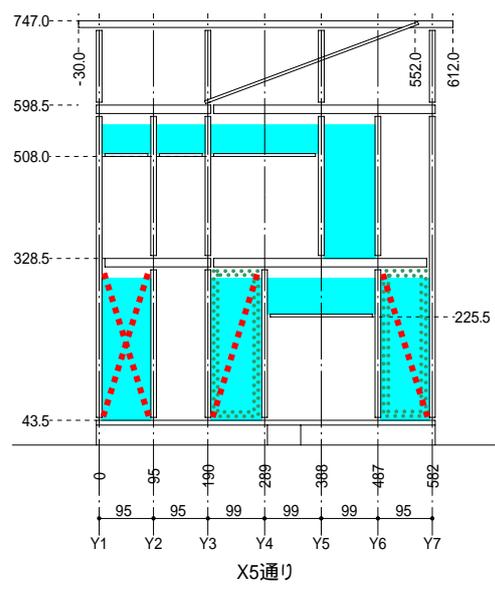
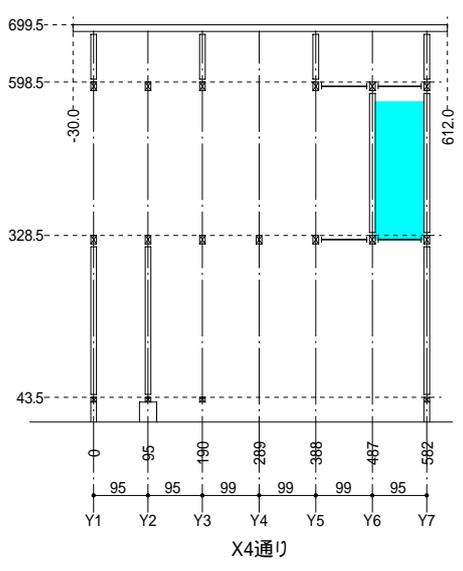


図3-1 解析モデル軸組図(X1 ~ X5通り)

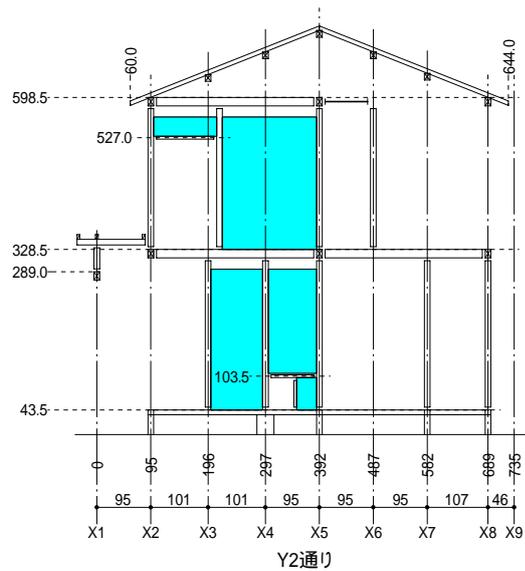
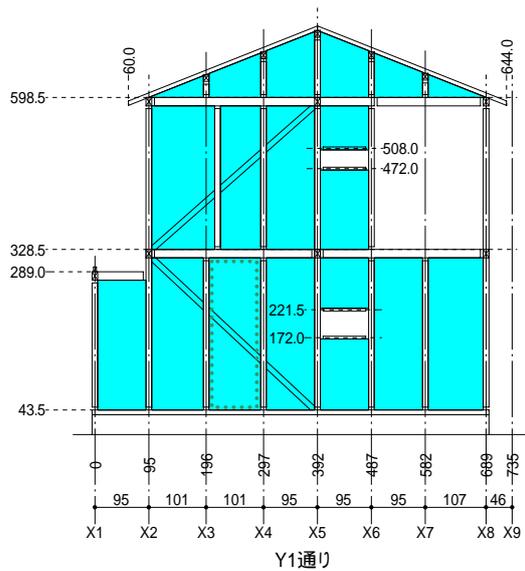
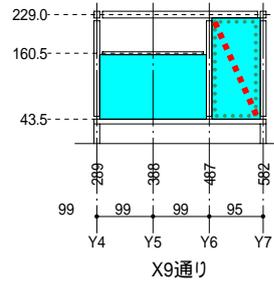
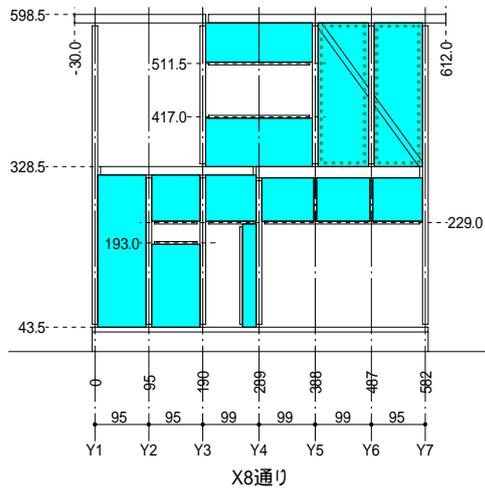
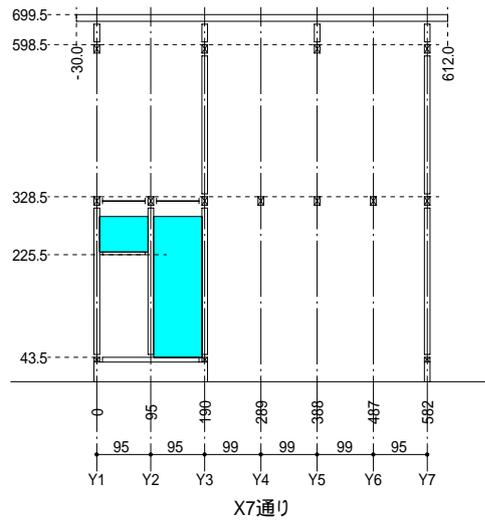
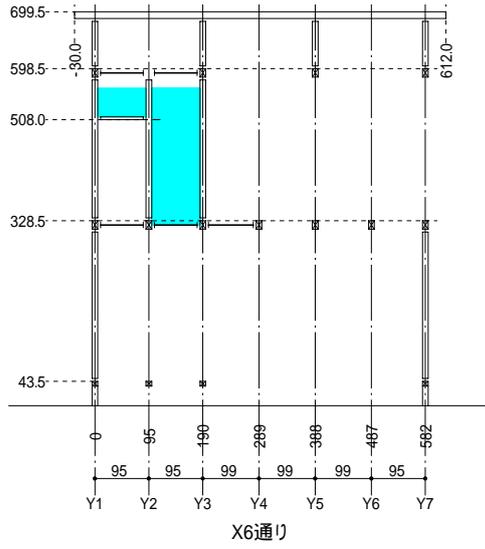


図3-2 解析モデル軸組図(X1 ~ X9, Y1 ~ 2通り)

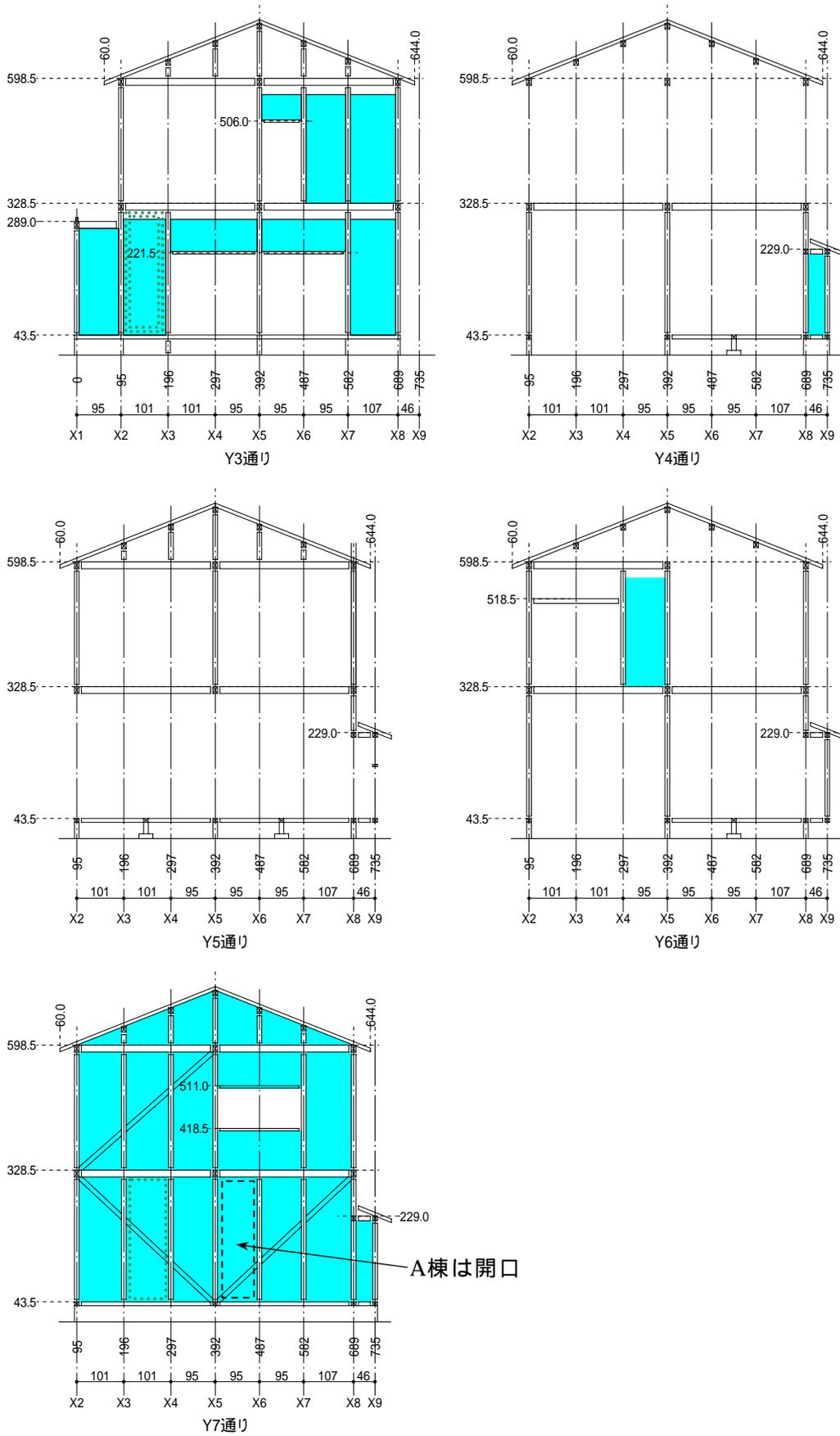


図3-3 解析モデル軸組図(Y3～Y7通り)



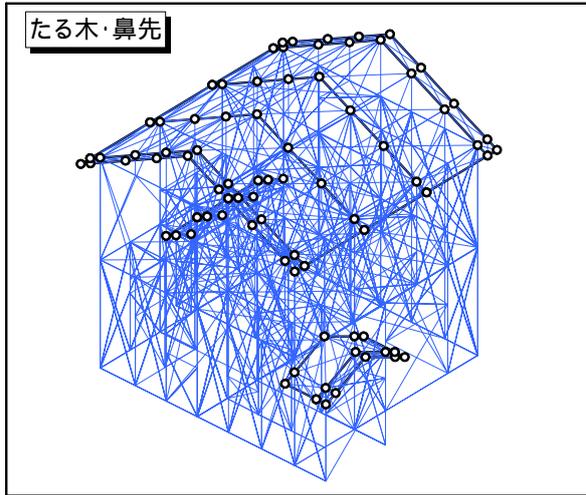
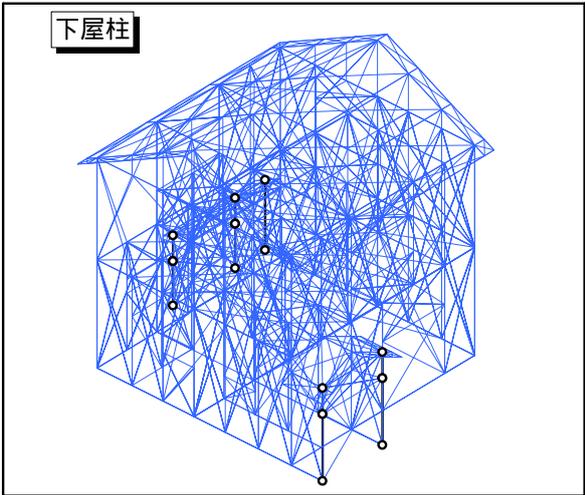
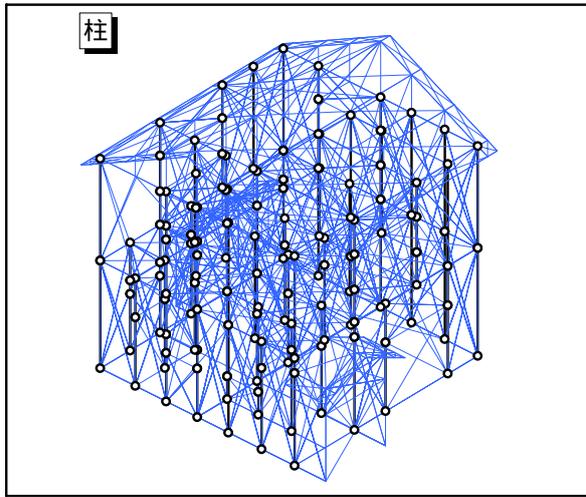
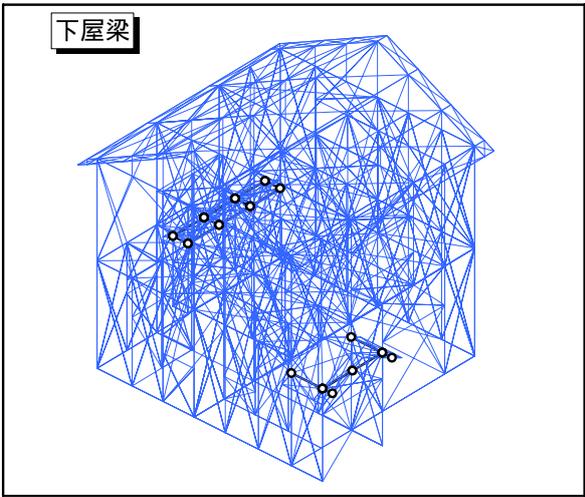
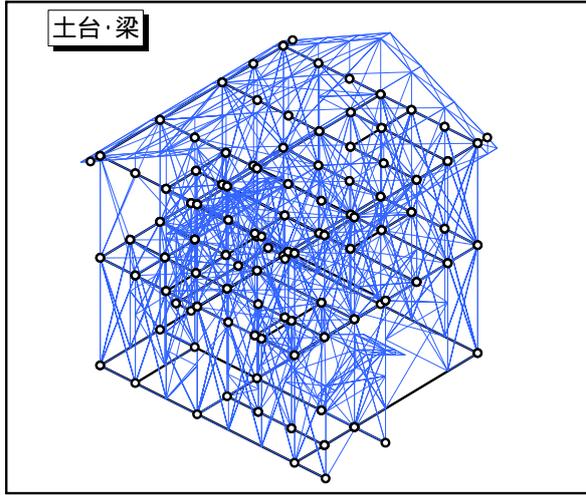
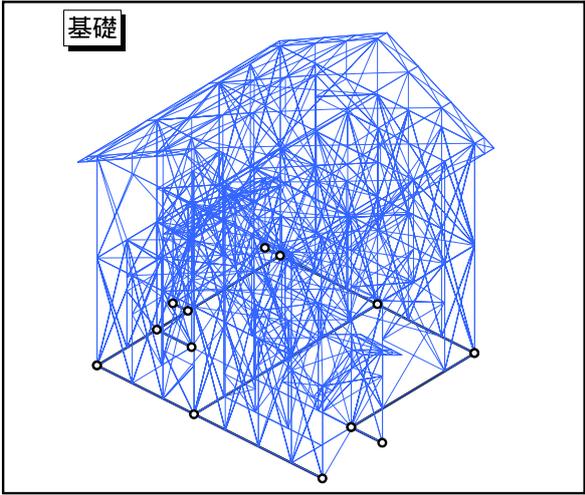


図5-1 解析モデルの構成・その1

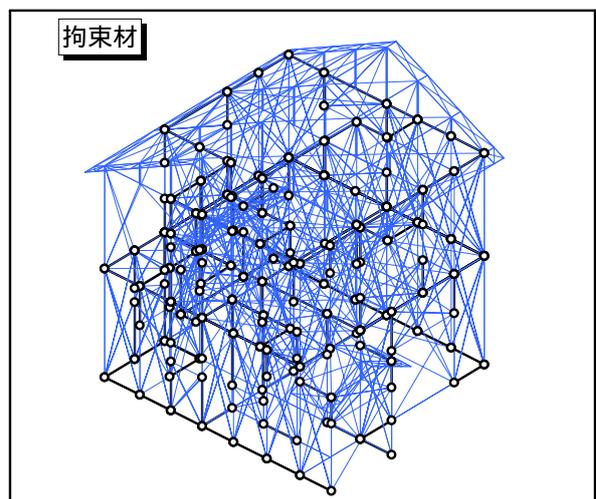
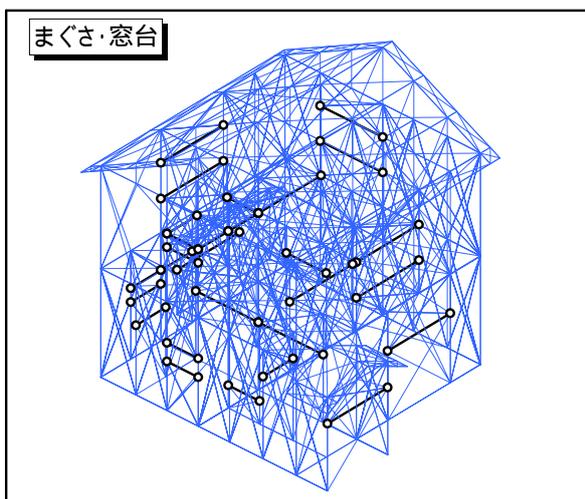
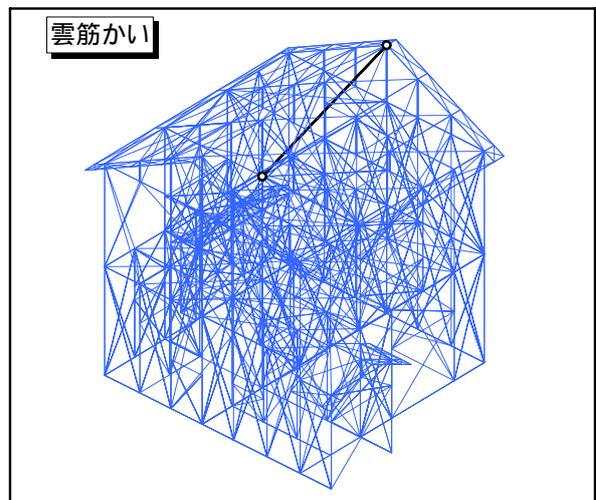
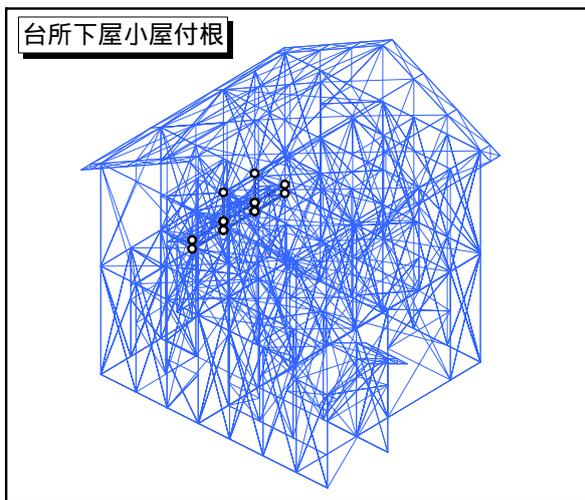
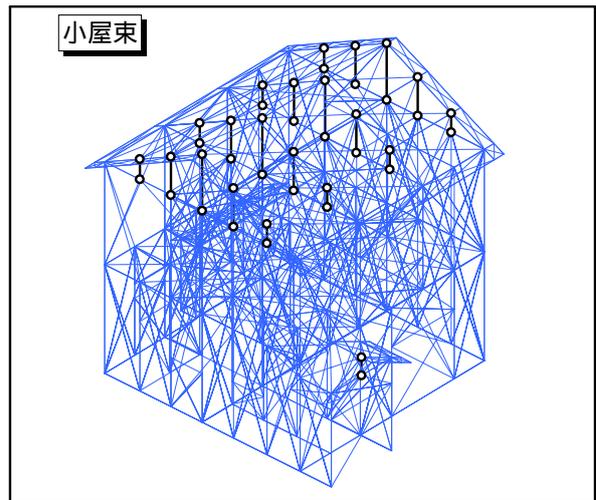
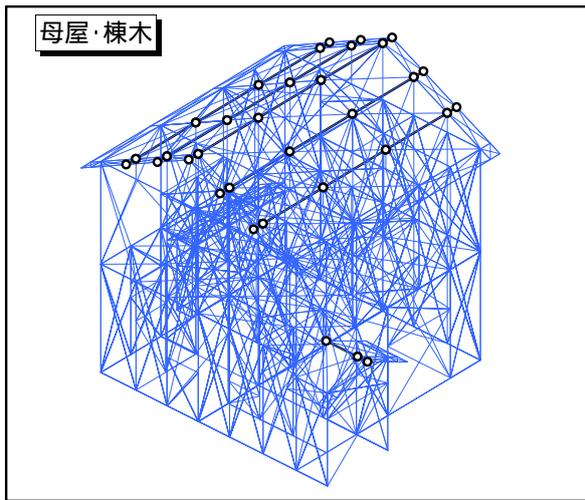


図5-2 解析モデルの構成・その2

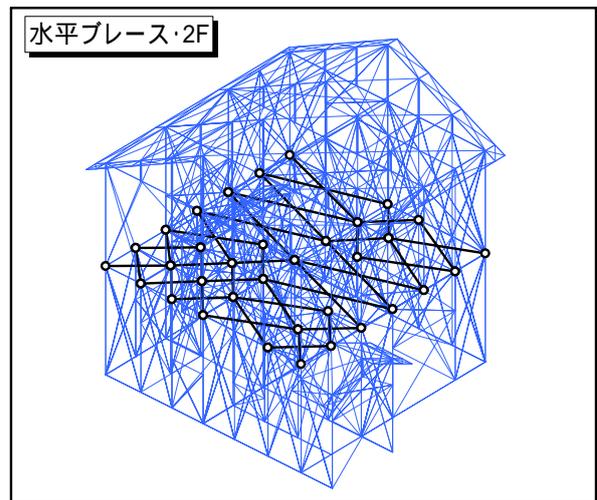
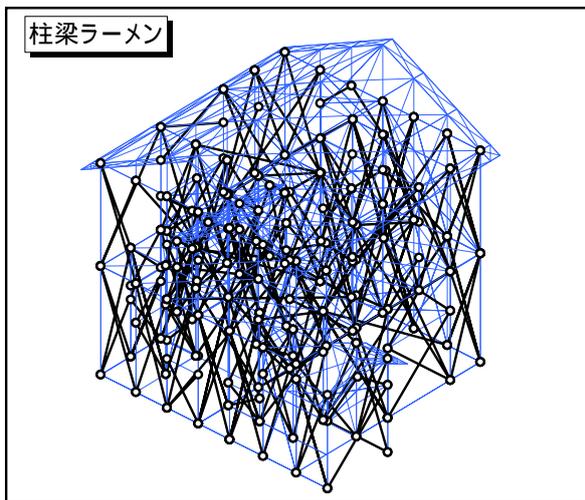
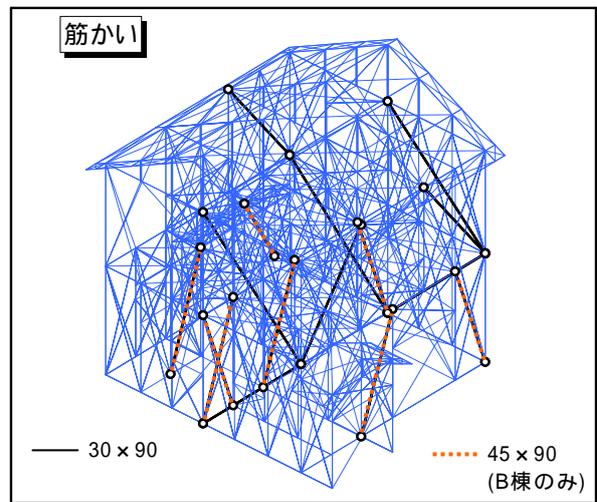
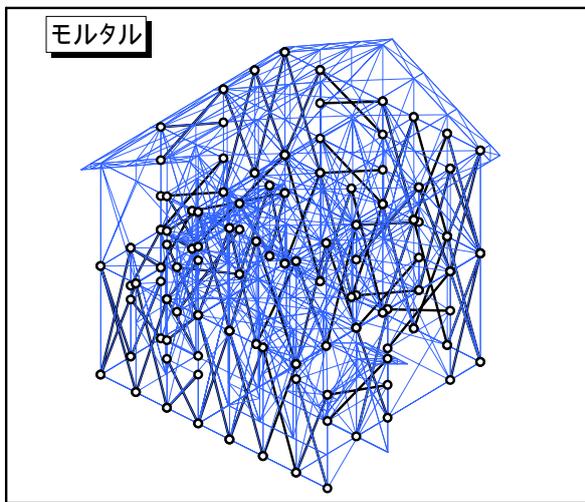
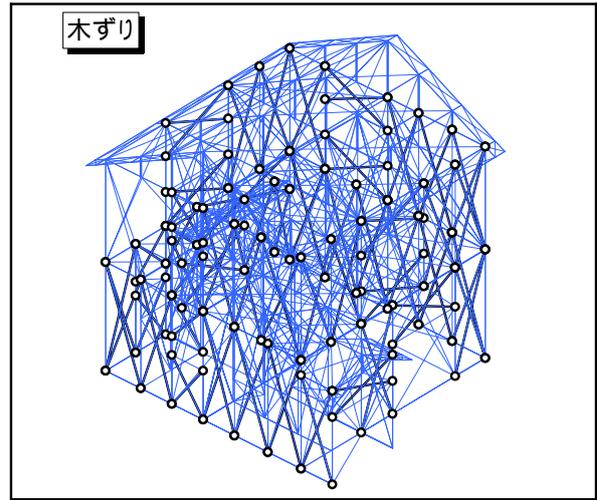
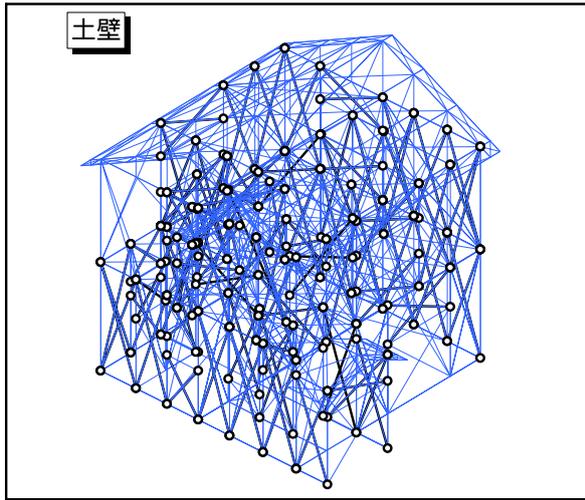


図5-3 解析モデルの構成・その3

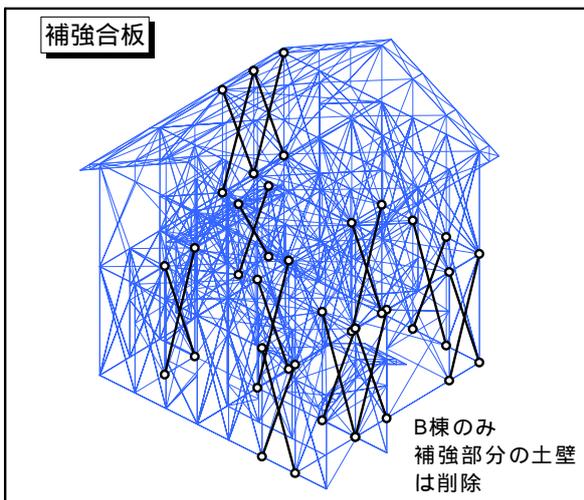
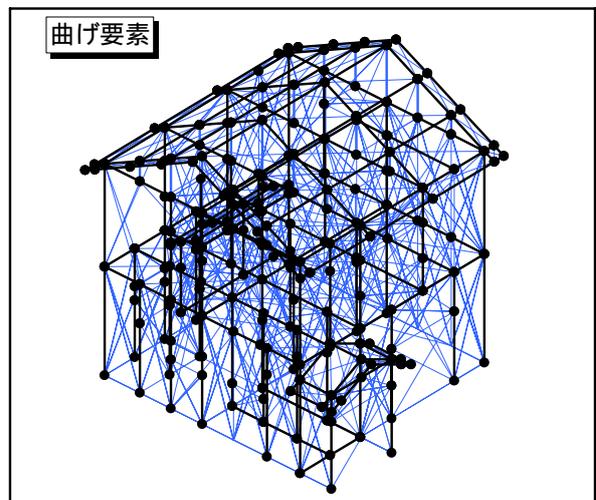
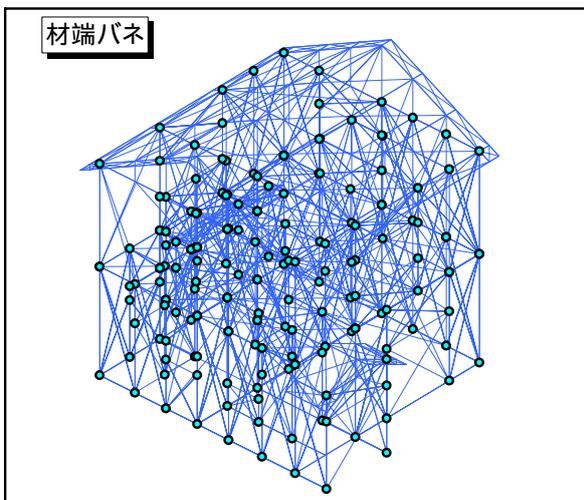
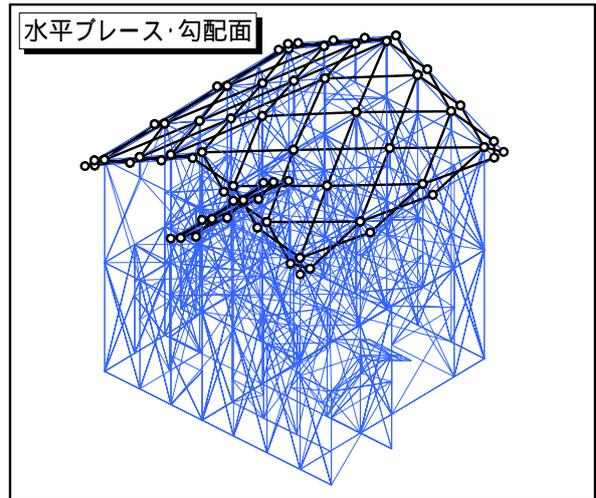
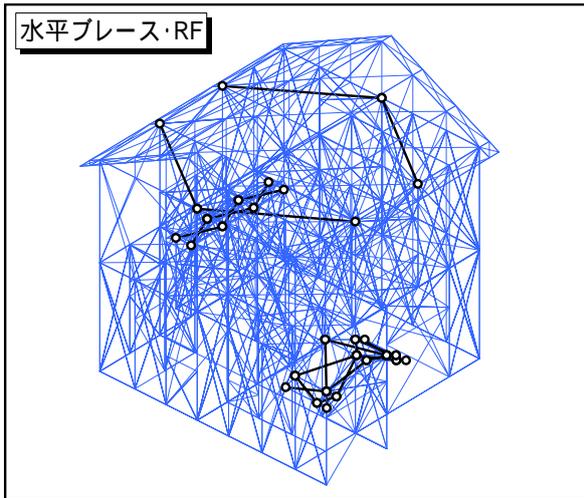


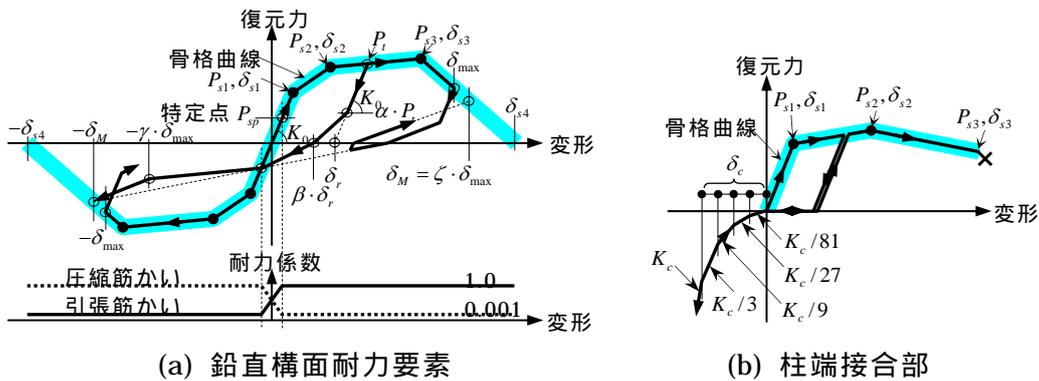
図5-4 解析モデルの構成・その4

c) 復元力モデル

昨年度<sup>3)</sup>と同様に図6に示す復元力モデルを用いる。復元力モデルを規定するパラメータは、事前解析では昨年度の検討結果に含まれる耐力要素については昨年度と同じとし、それ以外の耐力要素については既往の実験結果などを参考に新たに設定した。事後解析では事前解析で設定したパラメータをもとに、解析結果が実験結果に適合するように妥当と考えられる範囲内で試行錯誤的に調整した。骨格曲線を除くパラメータを表3に示す。

鉛直構面耐力要素の骨格曲線パラメータを表5に示し、骨格曲線の形状を既往の設定値<sup>3-5)</sup>と比較して図7に示す。なお、これらは耐力壁については幅が100cm、高さが285cmの場合の値である。幅と高さがこれと異なる場合の補正方法は昨年度と同様とする。なお、土塗り壁のうち頭部に梁が無いものの骨格曲線耐力は表4の値の0.5倍、頭部・脚部とも梁が無いものは同0.2倍とする。2階床レベル水平構面および野地板面の復元力特性は合板張りと同じとし、骨格曲線耐力は表4の値の1/0.6倍とする。

柱端接合部の復元力モデルは昨年度と同じする。また、まぐさ・窓台端接合部はかすがいの復元力特性とする。骨格曲線パラメータを表5に示し、その形状を図8に示す。



(a) 鉛直構面耐力要素

(b) 柱端接合部

図6 復元力モデルの履歴則

表3 復元力モデルのパラメータ (kN, cm, kN/cm)

(a) 事前解析

部材	鉛直構面							柱端接合部
	筋かい		土塗り壁	モルタル	木ずり	柱梁架構	合板張	
	引張	圧縮						
	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.25	0.25	
	0.75	0.75	0.75	0.5	0.5	0.75	0.75	
	0.7	0.7	0.7	0.5	0.6	0.6	0.5	
	0.4	0.2	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	
	1.05	1.05	1.05	1.1	1.1	1.1	1.04	
$K_c$								245
$c$								0.01

(b) 事後解析

部材	鉛直構面							柱端接合部
	筋かい		土塗り壁	モルタル	木ずり	柱梁架構	合板張	
	引張	圧縮						
	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.25	0.15	
	0.75	0.75	0.8	0.8	0.8	0.75	0.75	
	0.7	0.7	0.7	0.5	0.6	0.6	0.5	
	0.4	0.2	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	
	1.05	1.05	1.05	1.1	1.1	1.1	1.04	
$K_c$								245
$c$								0.01

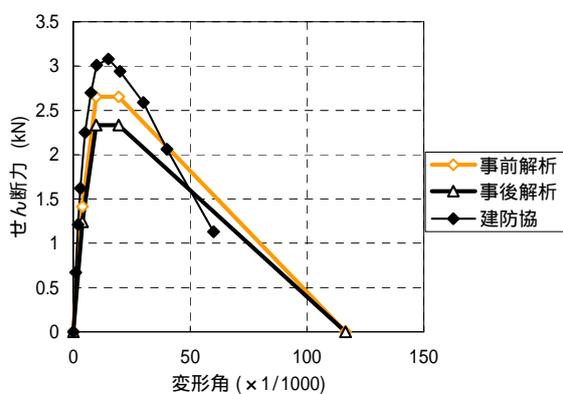
表 4 鉛直構面耐力要素の骨格曲線パラメータ (kN,  $\times 10^{-3}$ rad)

(a) 事前解析

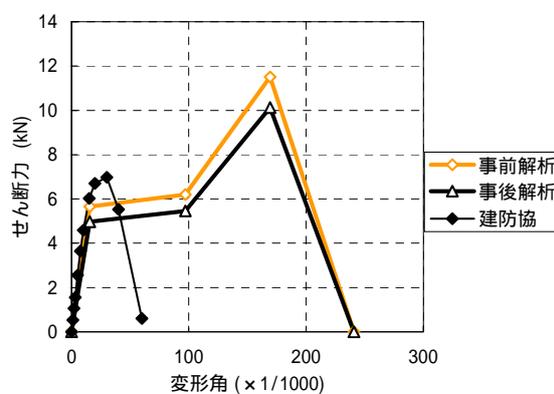
パラメータ	筋かい 30×90		筋かい 45×90		土塗壁	モルタル	木ずり	柱梁架構	合板張
	引張	圧縮	引張	圧縮					
$P_{sp}$	0.286	0.286	0.477	0.477	0.735	0.837	0.039	0.165	1.077
$P_{s1}$	1.412	5.649	4.008	8.818	2.500	5.581	0.078	0.825	2.436
$P_{s2}$	2.653	6.203	7.262	8.856	5.000	9.488	0.226	2.065	7.554
$P_{s3}$	2.653	11.51	7.081	15.27	5.000	9.488	0.226	2.065	7.554
$P_{s4}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_1$	3.89	15.6	8.76	19.3	5.00	3.29	10.0	40.0	2.10
$s_2$	9.73	97.1	34.1	118.4	16.0	6.19	60.0	198.7	13.1
$s_3$	19.4	169.4	58.4	169.4	79.9	52.2	605.2	605.2	50.0
$s_4$	116.5	240.7	97.1	240.7	139.5	119.7	681.6	681.6	79.9

(b) 事後解析

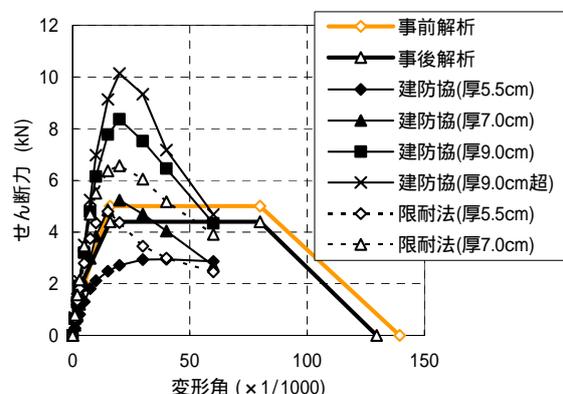
パラメータ	筋かい 30×90		筋かい 45×90		土塗壁	モルタル	木ずり	柱梁架構	合板張
	引張	圧縮	引張	圧縮					
$P_{sp}$	0.252	0.252	0.315	1.679	0.863	0.819	0.035	0.545	0.947
$P_{s1}$	1.243	4.971	3.527	7.759	1.760	3.274	0.069	0.727	2.143
$P_{s2}$	2.335	5.458	6.391	7.793	4.401	5.567	0.198	1.817	6.649



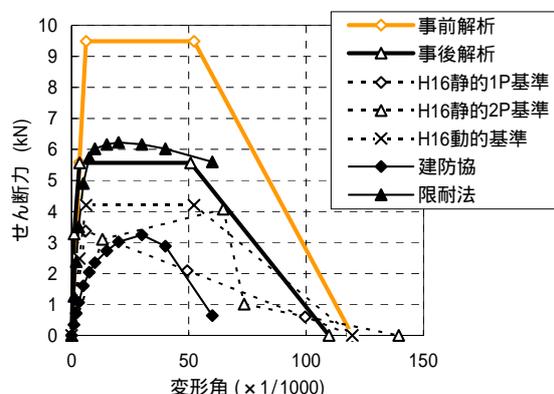
(a) 引張筋かい30×90 (既存)



(b) 圧縮筋かい30×90 (既存)



(c) 土塗り壁 (既存)



(d) モルタル (既存)

図 7 鉛直構面耐力要素の骨格曲線

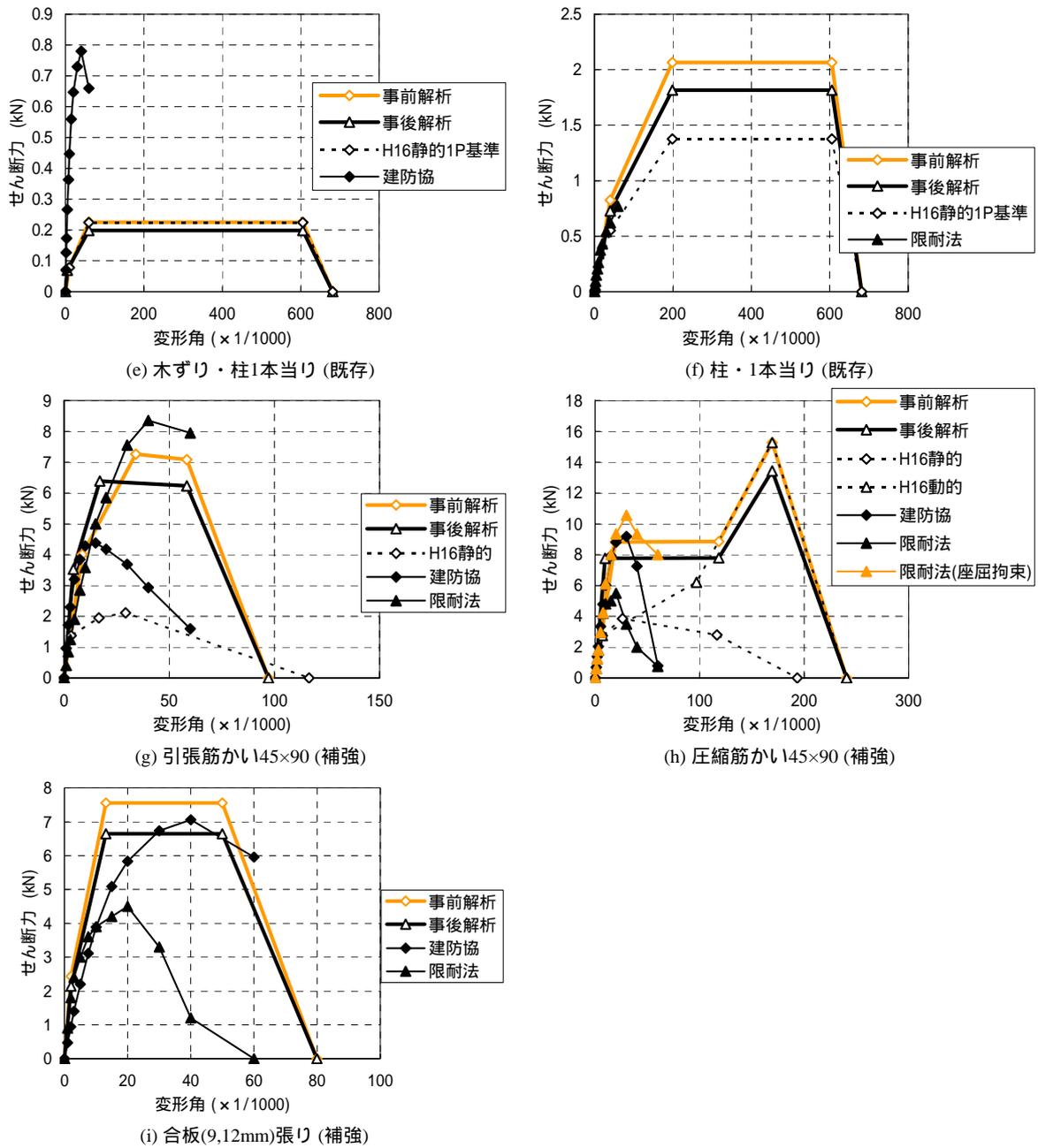


図 7 鉛直構面耐力要素の骨格曲線 (続き)

表 5 柱端接合部の骨格曲線パラメータ (kN, cm)  
(事前解析・事後解析共通)

パラメータ	端ほぞ差	かすがい	CP-T	VP	羽子板ボルト	ホールダウン金物			
						10kN	15kN	20kN	25kN
$P_{s1}$	0.588	1.765	9.807	14.71	7.354	35.30	38.83	42.36	45.90
$P_{s2}$	0.981	2.354	12.45	14.71	13.14	35.30	38.83	42.36	45.90
$P_{s3}$	0.981	0.235	7.159	0.981	23.24	35.30	38.83	42.36	45.90
$s_1$	0.30	0.25	0.12	0.07	0.10	0.25	0.25	0.25	0.25

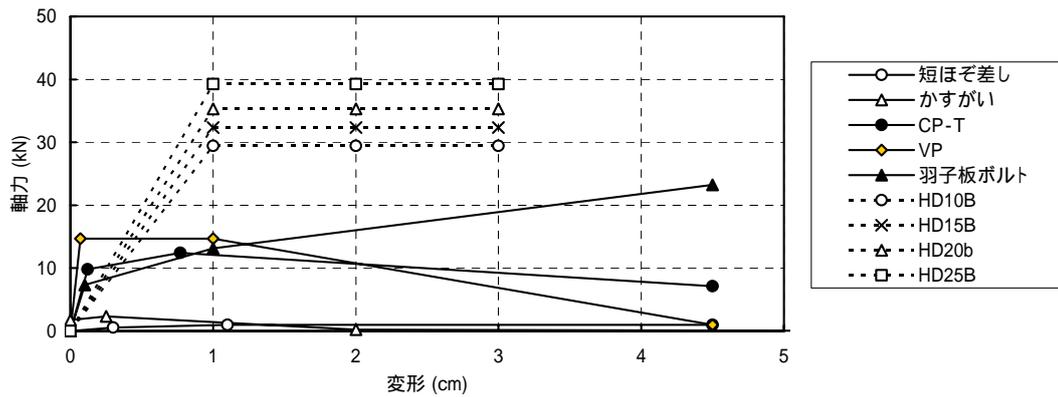


図 8 柱端接合部の骨格曲線

耐力壁・柱端接合部以外の部材の軸方向剛性は線形とする。柱・梁部材についてはヤング係数と断面積の積を 108045(kN)として軸方向剛性を算定し、その他の部材については 9.8(kN/cm)の軸方向剛性とした。また、曲げ要素群の回転バネの剛性と耐力は、ばらつきの上限に相当する値として、ヤング係数を 2000(kN/cm<sup>2</sup>)、曲げ強度を 8.8(kN/cm<sup>2</sup>)として設定した。

d) 入力波

事前解析では震動台上で再現しようとする目標波を入力波とし、事後解析では実験における実際の震動台の動き(加振波)を入力波とする。目標波および加振波の加速度時刻歴を図 9 に、擬似速度応答スペクトルを図 10 に示す。

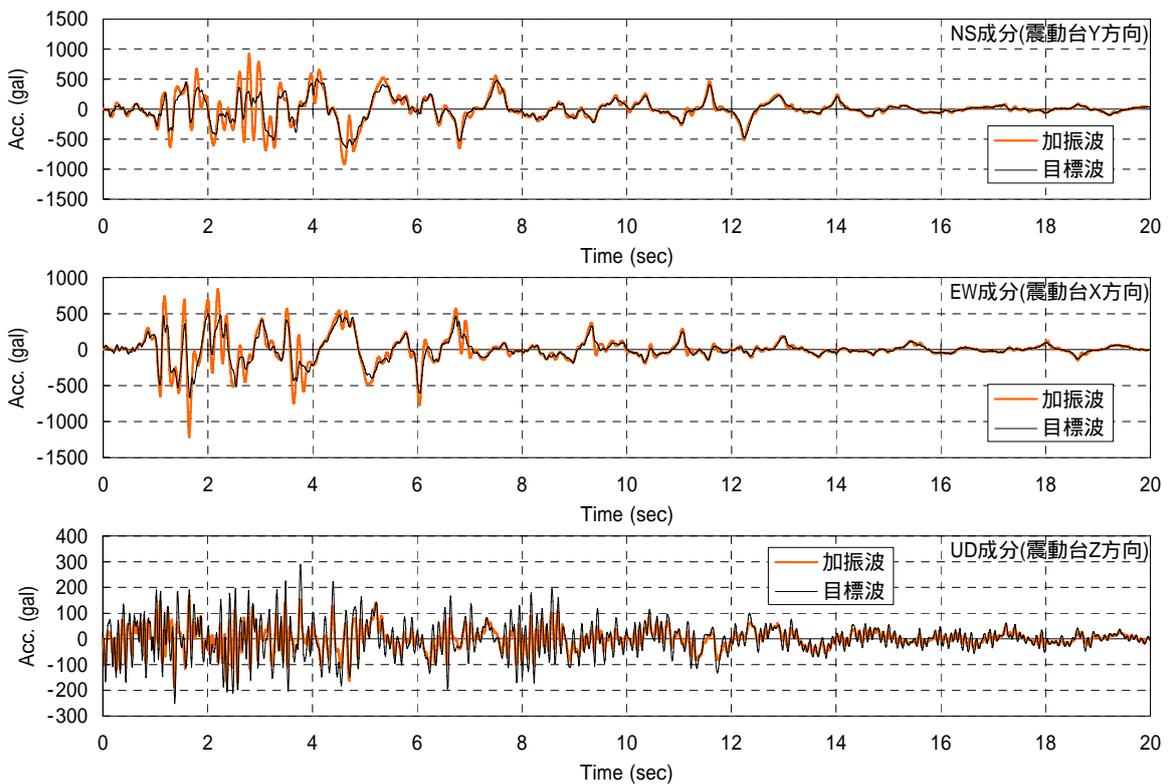


図 9 入力波の加速度時刻歴

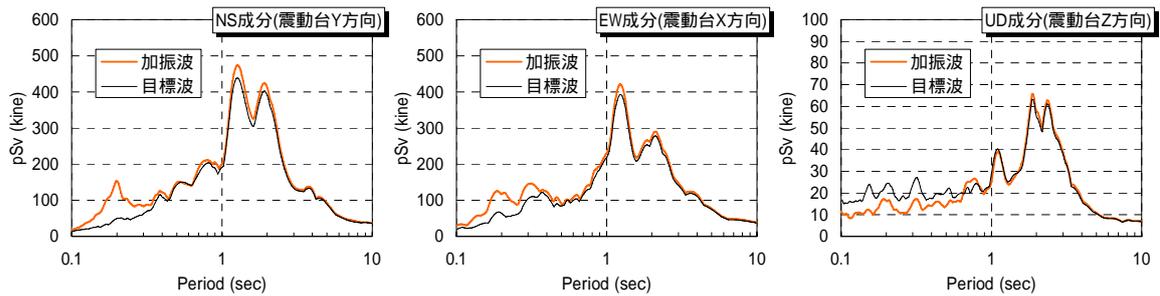


図 10 入力波の擬似速度応答スペクトル

e) 解析結果

) 事前解析

震動台実験の結果予測を目的として事前解析を行った。解析作業と並行して行われた試験体設置作業の過程で、クレーン吊り上げ重量に基づく試験体実重量が b) で設定した解析モデル重量より小さいことが確認された。これを考慮して、入力加速度に乗じる低減率(入力低減率)  $R$  をパラメータとして解析を行った。入力低減率  $R$  は 0.75, 0.90, 0.95 および 1.0 の 4 種類とした。

解析結果を図 12,13 に示す。A 棟では  $R=0.95$  の場合を除き倒壊に至り、B 棟では  $R=1.00$  の場合を除き倒壊を免れる結果となった。クレーン吊り上げ重量に基づく試験体実重量は b) で設定した解析モデル重量の 0.9 程度以下と見積もられ、本解析結果によれば震動台実験の初期の目的である A 棟倒壊・B 棟不倒壊という結果が得られることが確認された。

図 12,13 には実験結果を併記してある。解析による層せん断力の最大値は実験値の 1.1 ~ 1.3 倍程度になっている。もちろんこれは実験前には知り得なかったことであるが、事前解析モデルは重量だけでなく復元力モデルの耐力も過大評価となっていた。

) 事後解析

試験体構成材料の公称重量、試験体設置作業時のクレーン吊り上げ重量、および試験体移築解体時の計測重量に基づいて解析モデル重量を再評価した。その結果、事前解析重量の 80% とすることが妥当と確認された。併せて、復元力モデル耐力も過大評価となっていたので、耐力を全体に 88% に低減することを目安として、解析結果が実験結果に適合するように妥当と考えられる範囲内で試行錯誤的に各耐力要素の復元モデルを調整した。

解析結果を図 14,15 に示す。A 棟について、1 階では層せん断力-層間変位曲線および層間変位時刻歴のいずれも解析値は実験値にほぼ一致している。2 階では 1 階部倒壊後に解析値と実験値が異なっているが、これは実験では 1 階部倒壊後に 1 階の構成部材が 2 階部の下敷きになり接地の衝撃が緩和されたのに対して、解析ではこの効果が考慮されていないことによると考えられる。B 棟では 1,2 階とも層せん断力-層間変位曲線および層間変位時刻歴のいずれも解析値は実験値にほぼ一致している。

解析結果を用いて作成したアニメーション画像とビデオ撮影による実写画像を比較して図 11 に示す。両者は良好に一致している。

) 柱端接合部補強の効果

B棟の柱端接合部は所定の耐震診断基準を満足する補強仕様となっている。下記のようにこれらの補強が無い場合、および補強が軽微であった場合の挙動を解析により予測した。

Case 1 全て無補強(端ほぞ差しのみ)

Case 2 全て CP-T による補強

Case 3 耐力壁両端の柱端部のみ CP-T による補強

解析結果を図 16～18 に示す。Case 1 を除いて倒壊を免れており、やはり柱端部には何らかの補強が必要であること、および必ずしもホールダウン金物などによる高度な補強は必要ないことを示唆している。

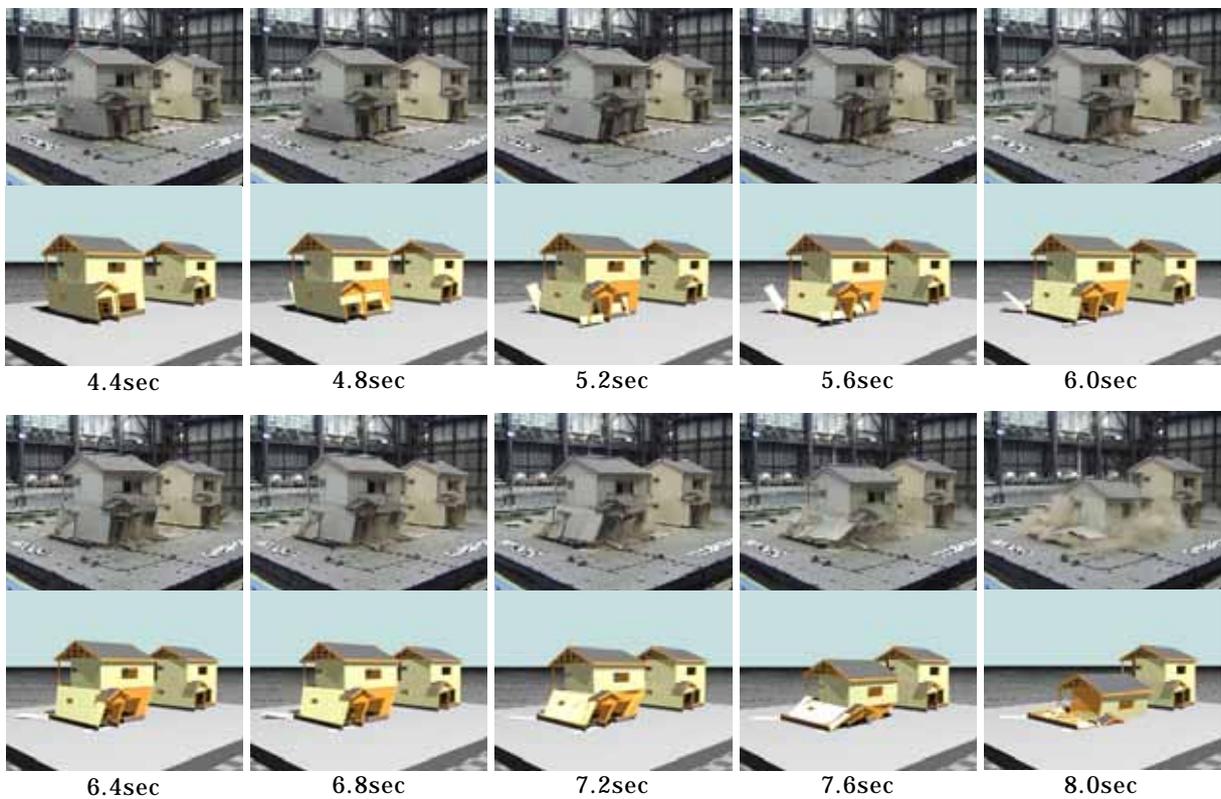
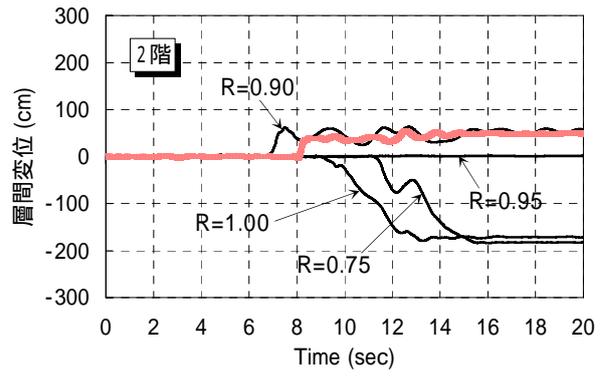
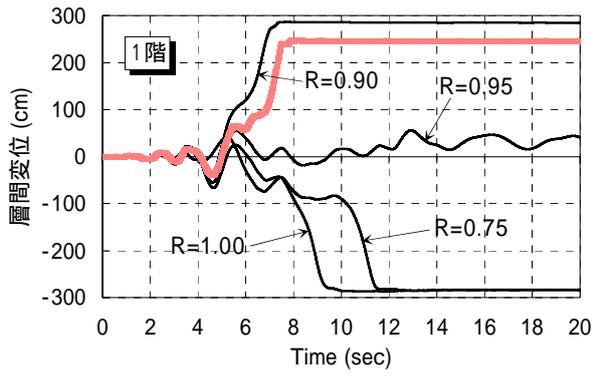
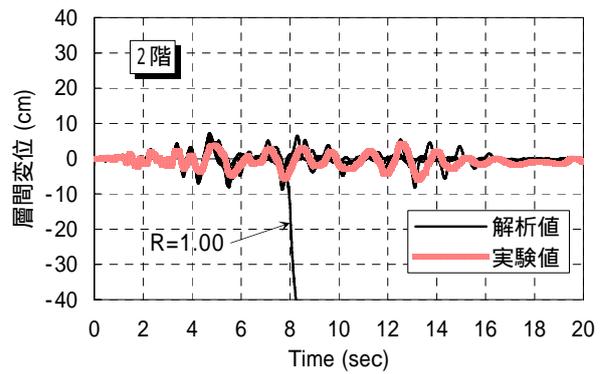
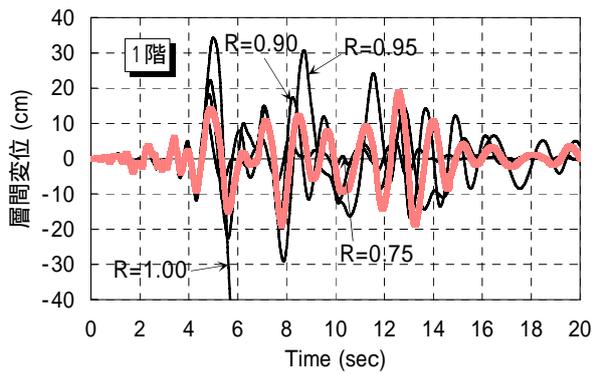


図 11 解析アニメーション画像(事後解析)と実写画像の比較

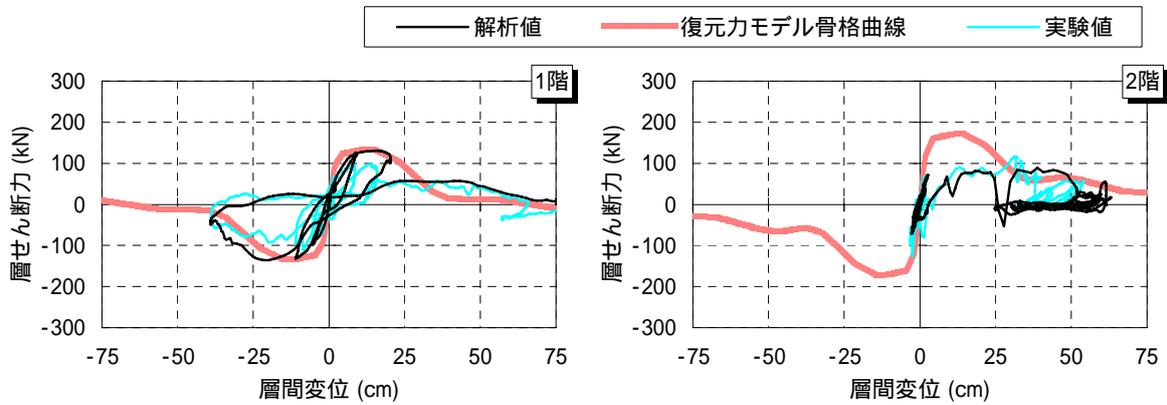


(a) A棟

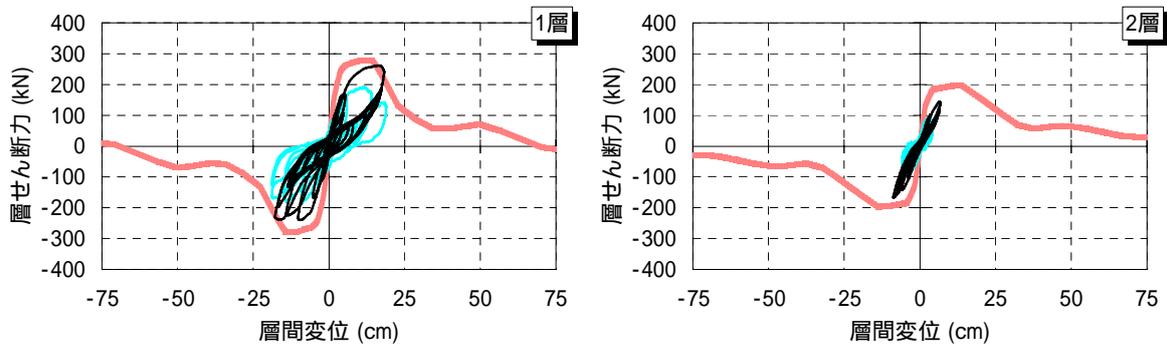


(b) B棟

図 12 事前解析・層間変位時刻歴(震動台 Y 方向)

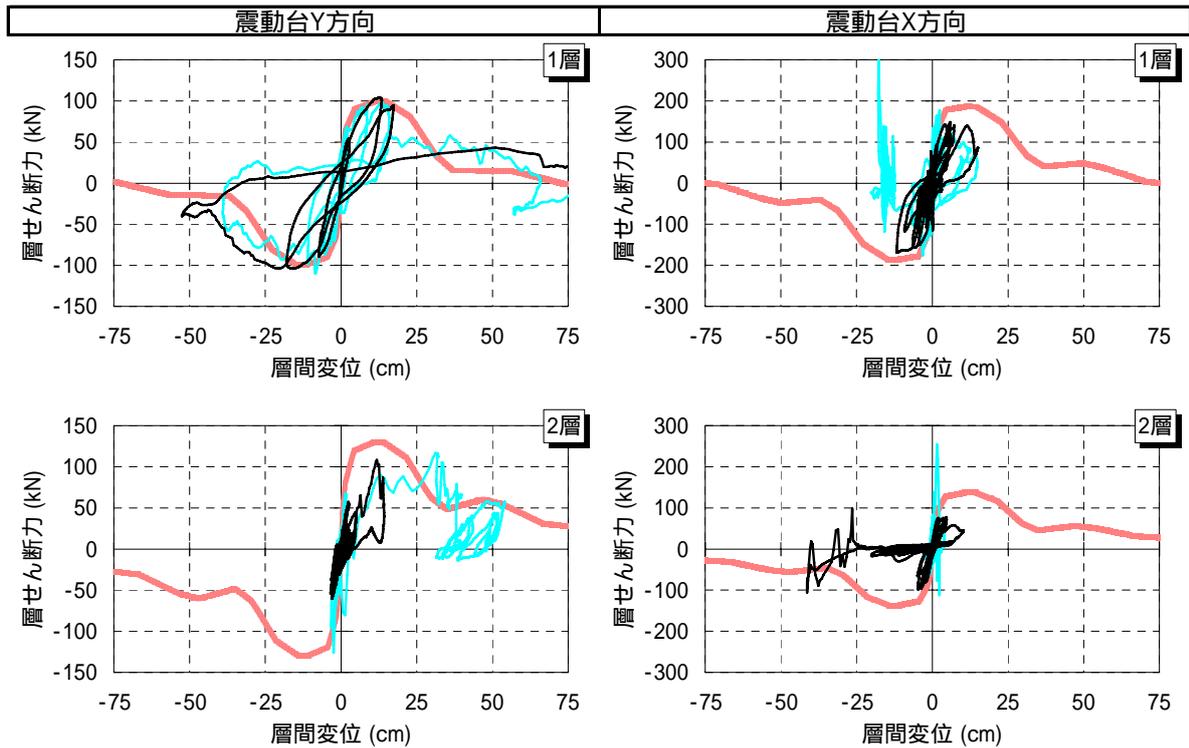


(a) A棟

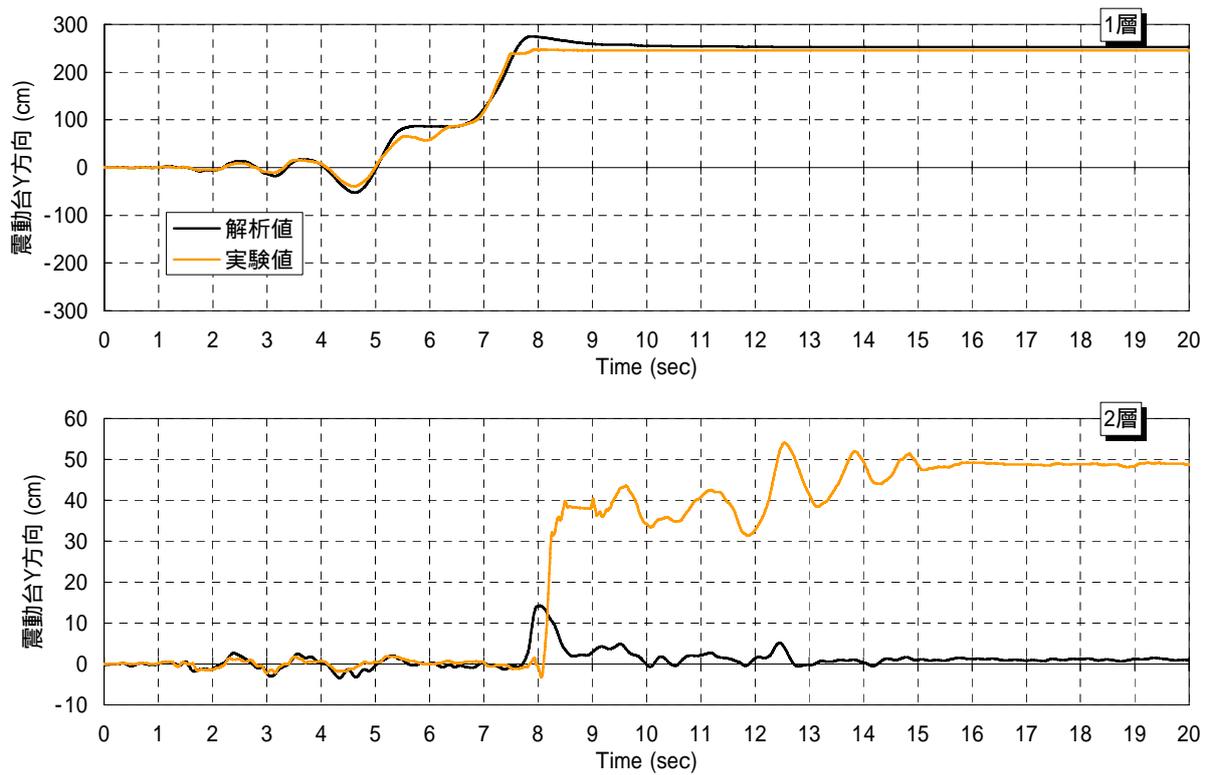


(b) B棟

図 13 事前解析・層せん断力-層間変位曲線(震動台 Y 方向・入力低減率 0.90)

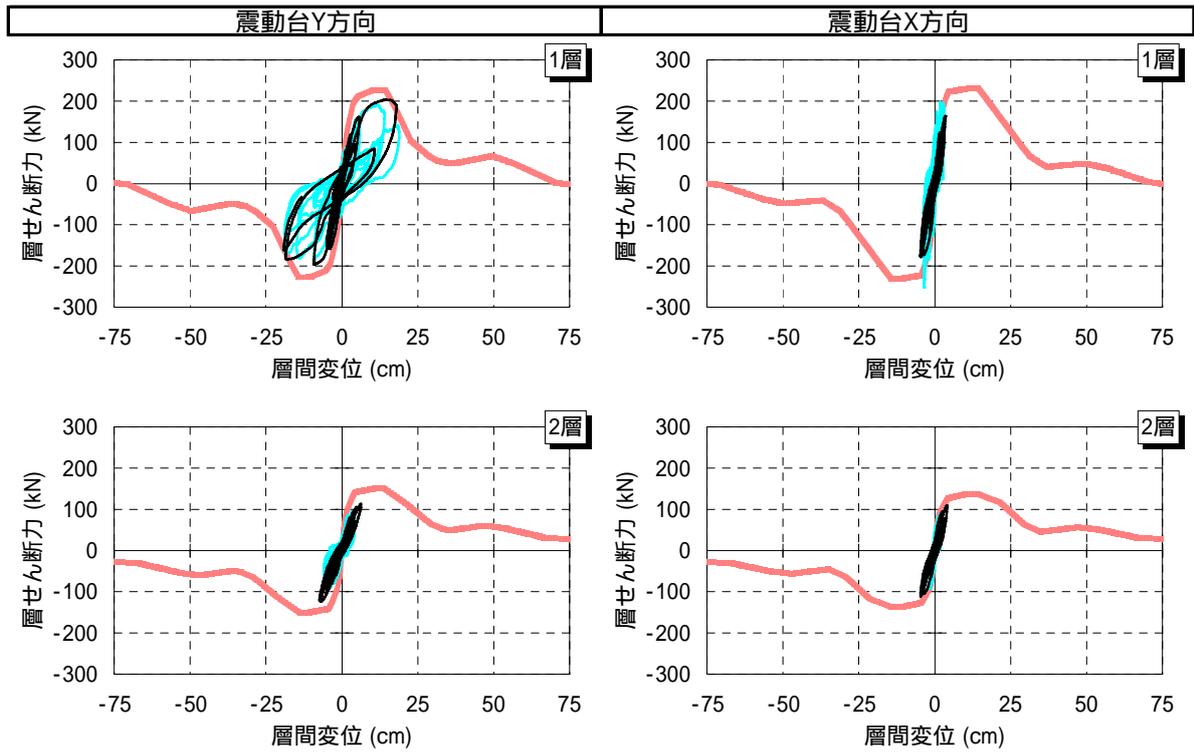


(a) 層せん断力-層間変位曲線

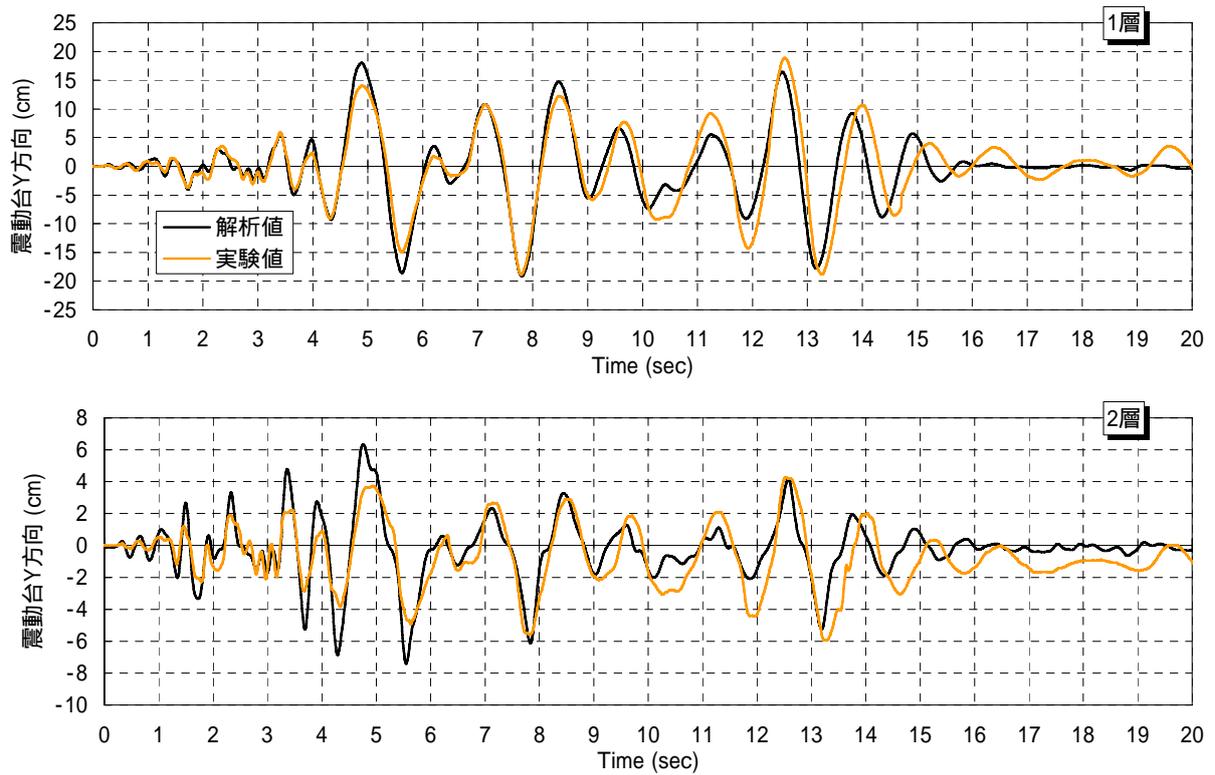


(b) 層間変位時刻歴

図 14 事後解析・A棟

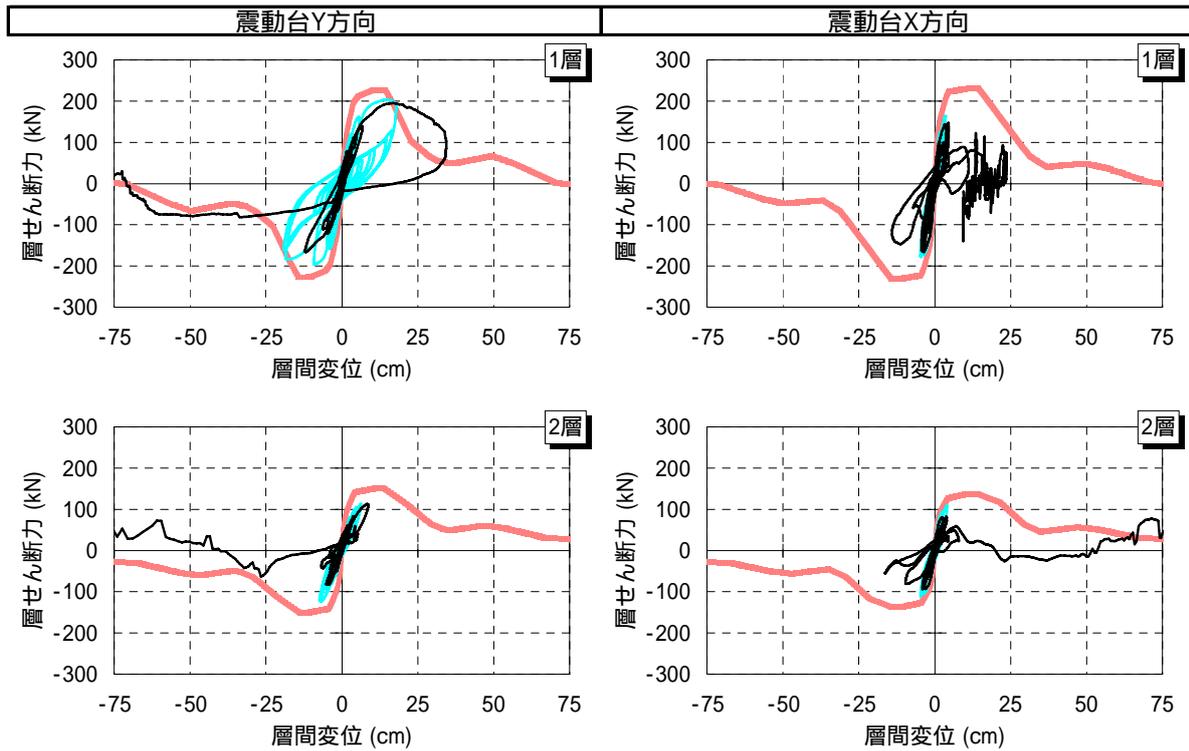


(a) 層せん断力-層間変位曲線

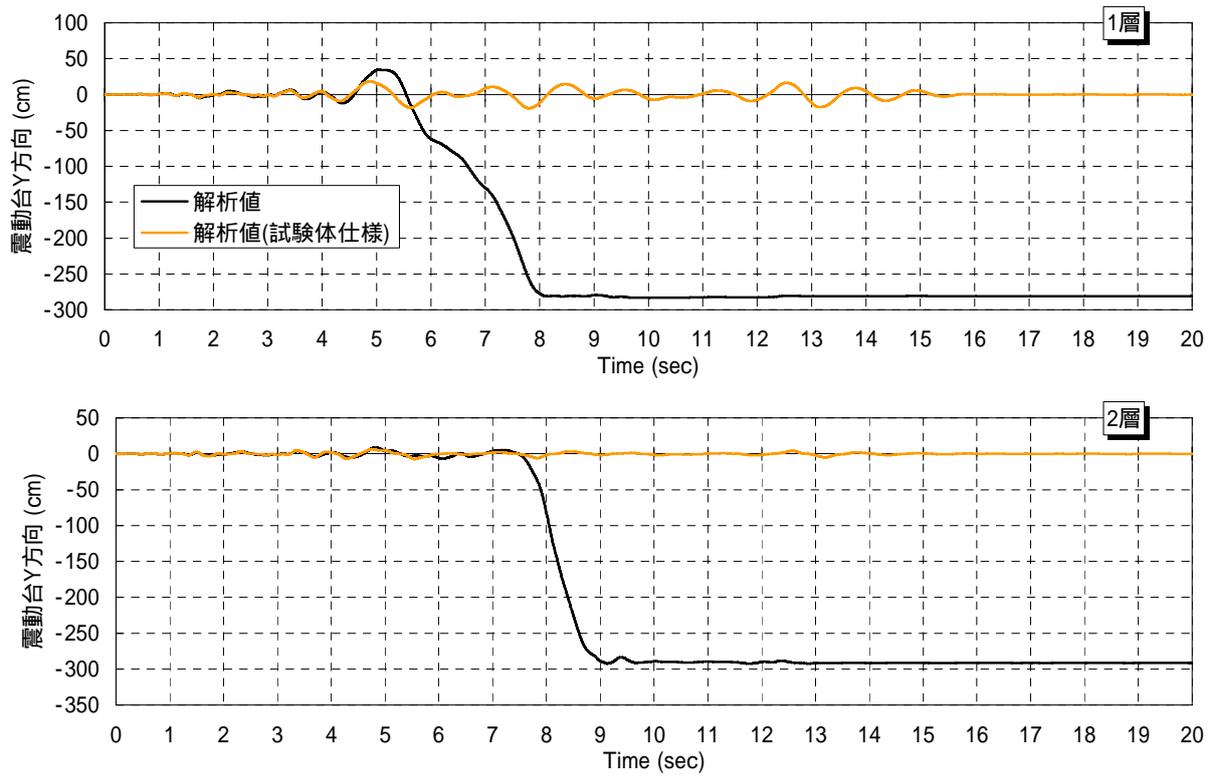


(b) 層間変位時刻歴

図 15 事後解析・B棟

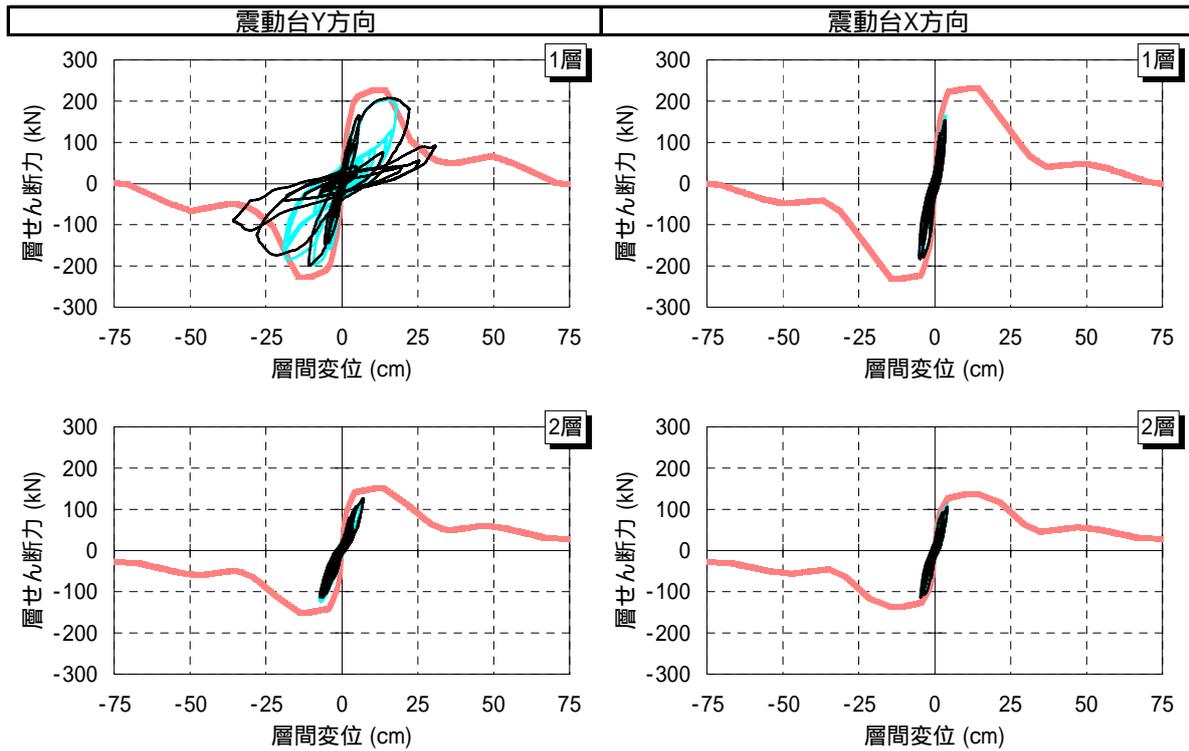


(a) 層せん断力-層間変位曲線

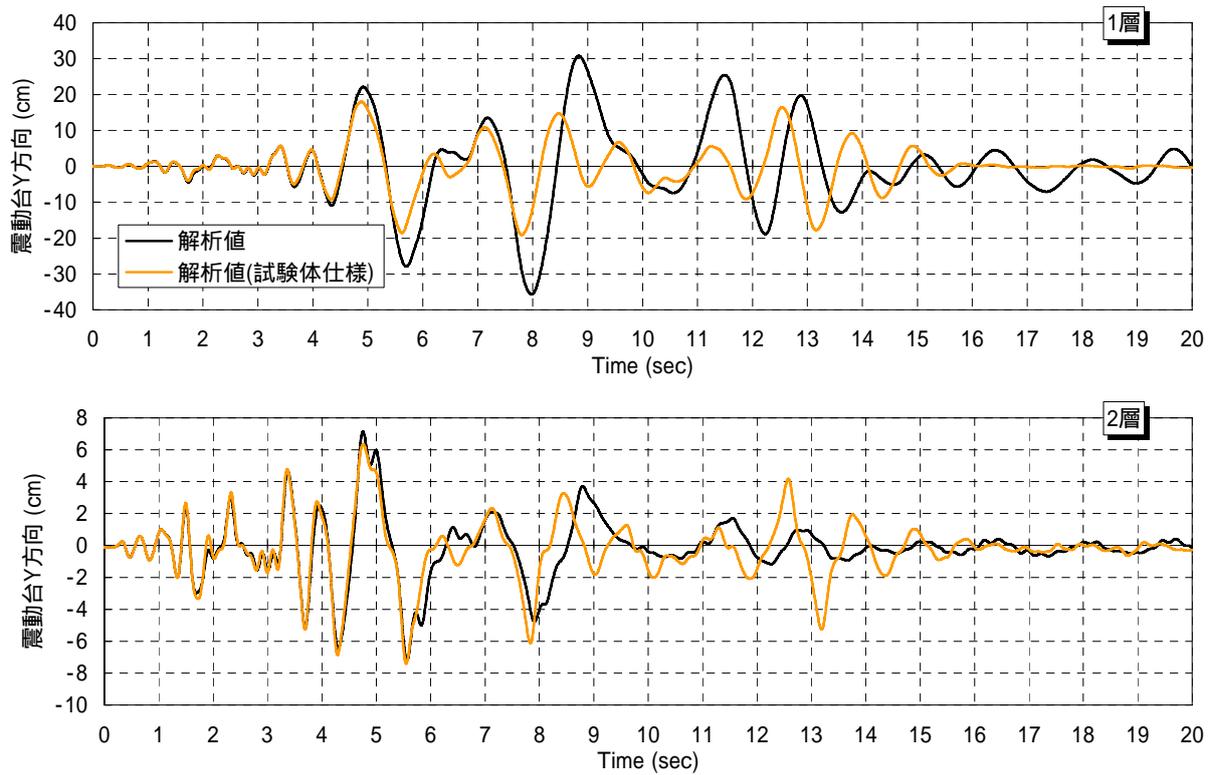


(b) 層間変位時刻歴

図 16 柱端部補強の検討・Case 1

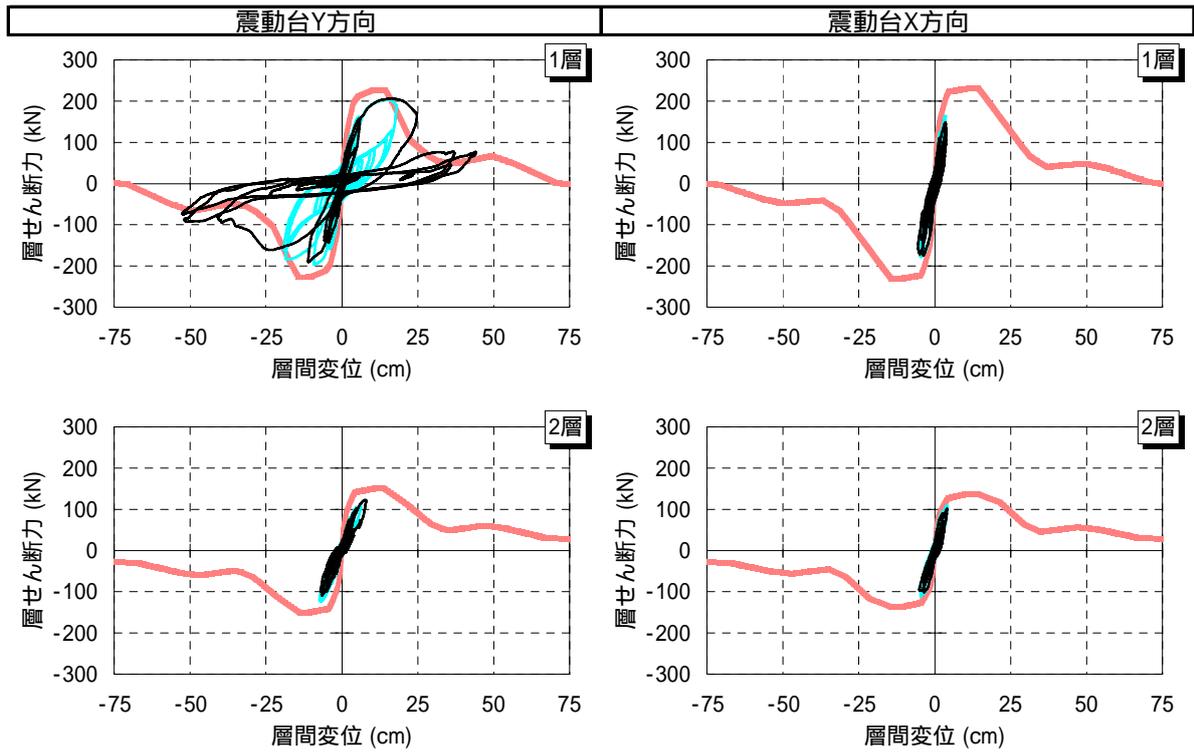


(a) 層せん断力-層間変位曲線

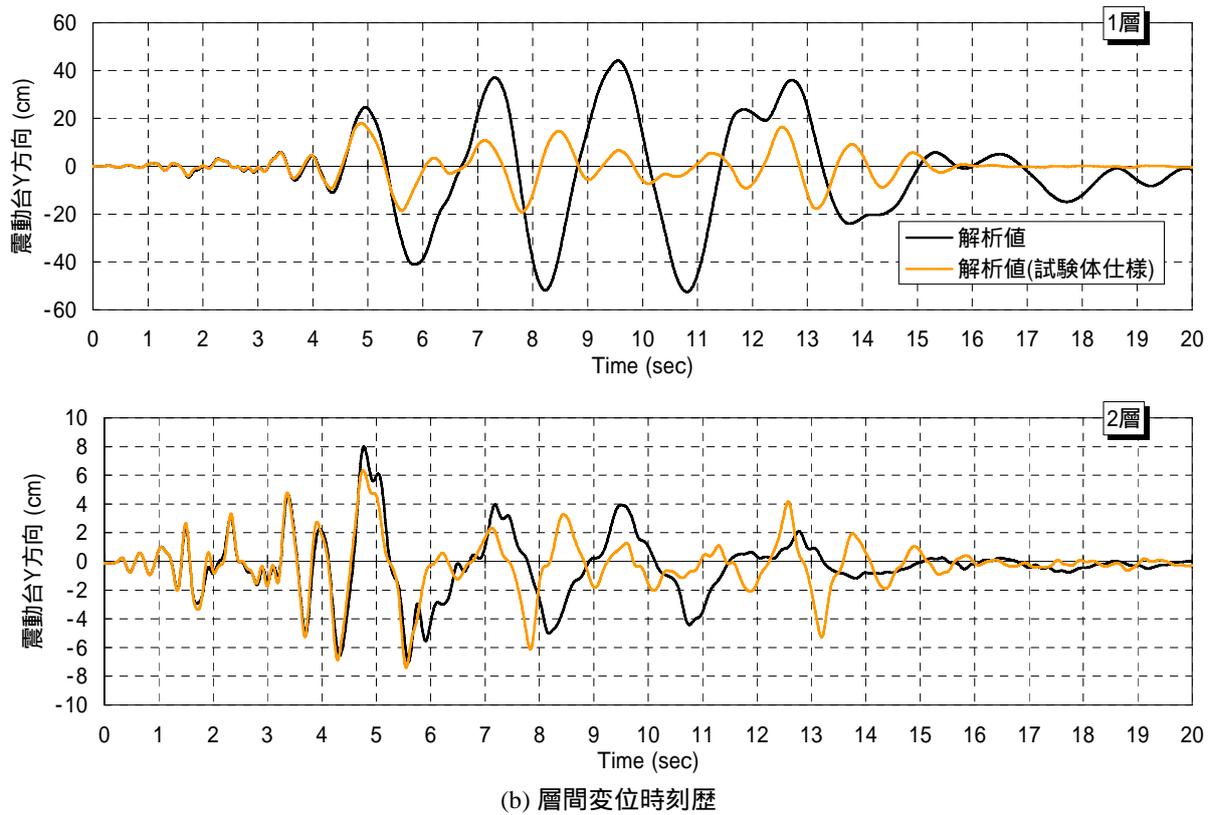


(b) 層間変位時刻歴

図 17 柱端部補強の検討・Case 2



(a) 層せん断力-層間変位曲線



(b) 層間変位時刻歴

図 18 柱端部補強の検討・Case 3

2) 演算の高速化に関する検討

a) 倒壊解析プログラムの構成

) 概略フローチャート

倒壊解析プログラムの概略フローチャートを図 19 に示す。

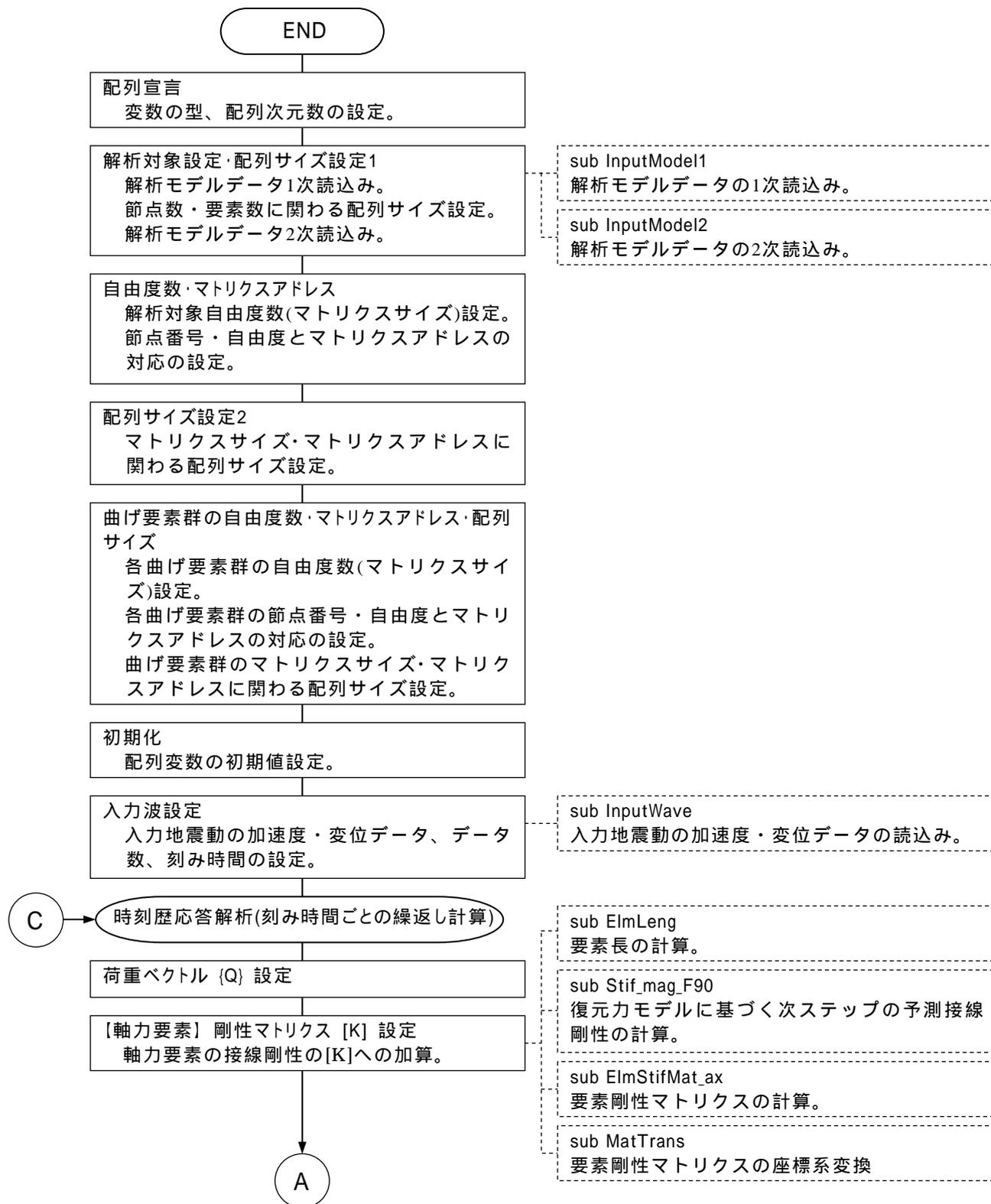


図19 倒壊解析プログラムの概略フローチャート

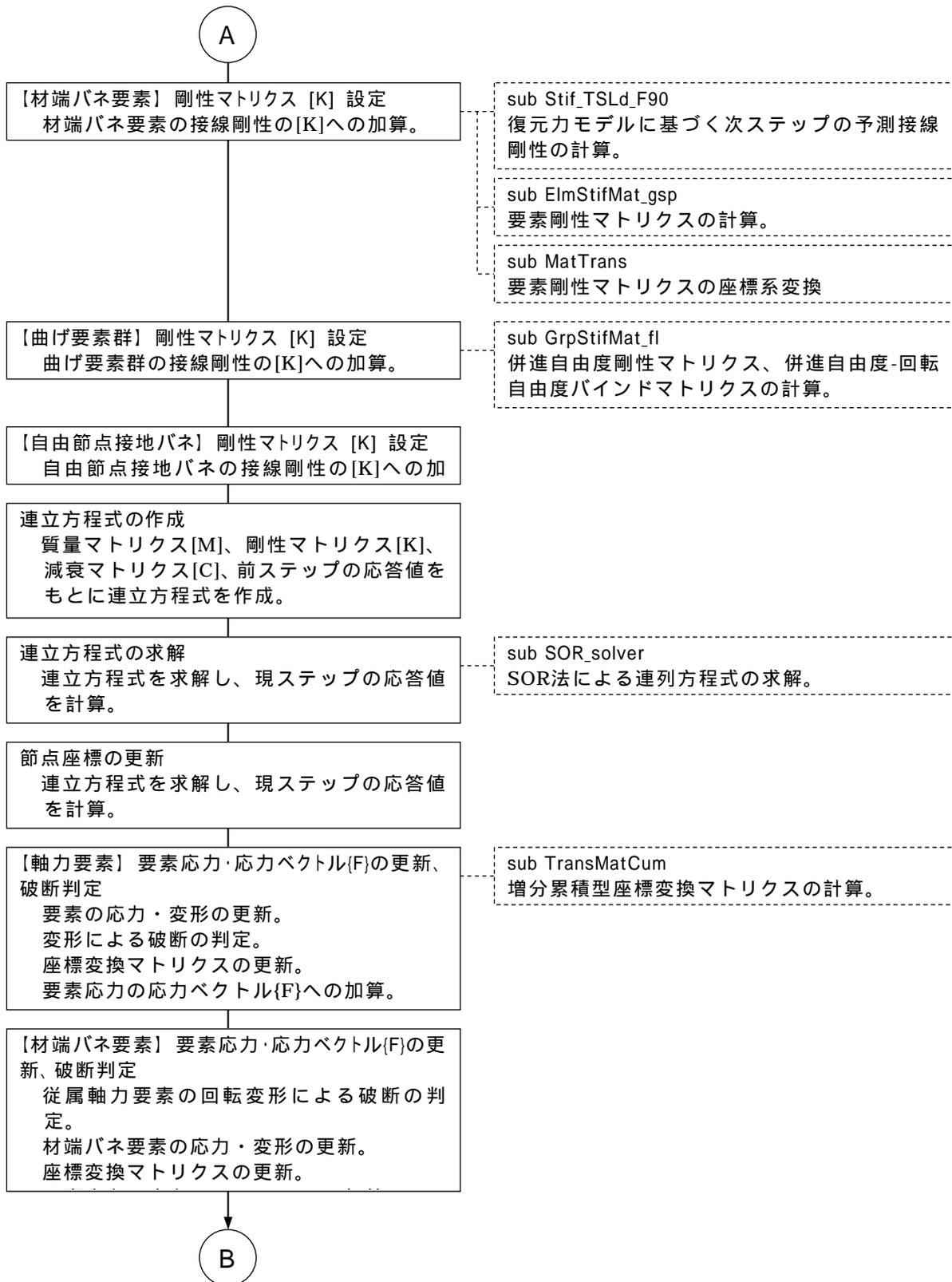


図19 倒壊解析プログラムの概略フローチャート (つづき)

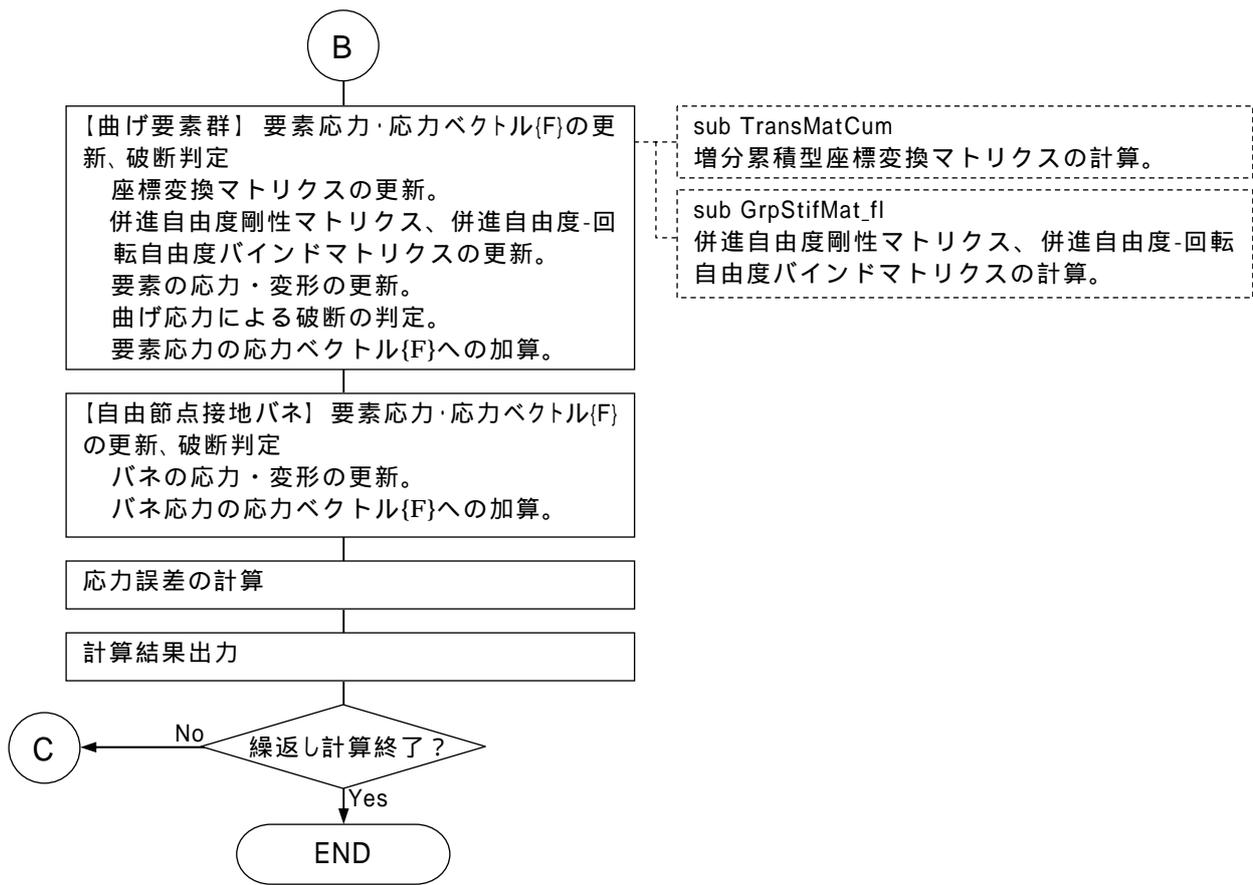


図19 倒壊解析プログラムの概略フローチャート (つづき)

) 入力データ概要

倒壊解析プログラムの解析対象モデルは以下のデータにより定義される。

節点条件

- n\_nod ..... 節点数
- i = 1 ~ n\_nod について
  - xyz0(j,i) ..... 初期座標 j=1:X, j=2:Y, j=3:Z
  - spt(j,i) ..... 支持条件 0:自由, 1:拘束 j=1:X, j=2:Y, j=3:Z
  - mas(i) ..... 節点質量

軸力要素

- nelm\_ax ..... 全要素数
- nelm\_axf ..... 柱拘束材要素数
- nelm\_axr ..... 半剛ラーメン置換ブレース要素数
- i = 1 ~ nelm\_ax について
  - snod\_ax(i) ..... 始端節点番号
  - enod\_ax(i) ..... 終端節点番号
  - hyst\_ax(i) ..... 復元力モデル番号

- 1 ~ 70:柱・梁
- 71 ~ 100:柱拘束材
- 101 ~ 160:垂直ブレース (面材・土壁等)
- 161 ~ 180:垂直ブレース (木ずり)
- 181 ~ 200:垂直ブレース (モルタル)
- 201 ~ 300:垂直ブレース (筋かい 正:引張,負:圧縮)
- 301 ~ 400:垂直ブレース (半剛ラーメン)
- 401 ~ 500:水平ブレース

始端と終端の Z 座標が異なるとき

- 401 ~ 450:Y 方向斜面 451 ~ 500:X 方向斜面

stam\_ax(i).....耐力倍率

i = 1 ~ nelm\_axf について (柱拘束材のみ)

Rbrk\_ax(i).....破断回転角

sref\_ax(i).....回転角算定用参照節点番号・始端用

eref\_ax(i).....回転角算定用参照節点番号・終端用

i = 1 ~ nelm\_axr について (半剛ラーメンのみ)

sbbs\_ax(i).....破断が従属する柱端部バネ要素番号

引張・圧縮筋かいでは対となる圧縮・引張筋かい

#### 材端バネ要素

nelm\_esp .....要素数(=2\*nelm\_ax)

i = 1 ~ nelm\_esp について

snod\_esp(i).....始端節点番号

enod\_esp(i).....終端節点番号

hyst\_esp(i).....復元力モデル番号

stam\_esp(i).....耐力倍率

blga\_esp(i).....属する軸力柱要素番号

Rbrk\_esp(i).....破断回転角

Rnod\_esp(i,j).....回転角算定用参照節点

j=1:当該, j=2:下または上側, j=3:X 軸廻り, j=4:Y 軸廻り

#### 曲げ要素群

ngrp\_fl .....全要素群数

nod\_max .....全要素群中の最大節点数

nem\_max .....全要素群中の最大要素数

i = 1 ~ ngrp\_fl について

nnod\_fl(i).....節点数

nelm\_fl(i).....要素数

j = 1 ~ nnod\_fl(i) について

node\_fl(i,j).....節点 j に対応する全体系節点番号

rotf\_fl(i,j) ..... 節点 j の回転自由度 (0:無し、1:有り)  
j = 1 ~ nelm\_fl(i) について  
snod\_fl(i,j) ..... 要素 j ・ 始端節点番号  
enod\_fl(i,j) ..... 要素 j ・ 終端節点番号  
cndt\_fl(i,j) ..... 要素 j の種類、1:剛バネ要素、2:剛要素  
sk\_fl(i,j) ..... 始端曲げ剛性 --- cndt=1 のみ  
ek\_fl(i,j) ..... 終端曲げ剛性 --- cndt=1 のみ  
sMS\_fl(i,j) ..... 始端曲げ強さ --- cndt=1 のみ  
eMS\_fl(i,j) ..... 終端曲げ強さ --- cndt=1 のみ  
i = 1 ~ ngrp\_flb について (柱要素群のみ)  
j = 1 ~ nelm\_fl(i) について  
k = 1 ~ 2 について  
ssbb\_fl(i,j,k) ..... 要素 j ・ 始端バネの破断が従属する柱端部バネ要素番号  
二つ  
esbb\_fl(i,j,k) ..... 要素 j ・ 終端バネの破断が従属する柱端部バネ要素番号  
二つ

b) 高速化の手法

倒壊解析プログラムの PC での動作環境を表 6 に示す。本プログラムのソースコードは昨年度までの開発過程では表 6 左のように Visual Basic (以下“VB”) で記述されていた。演算の高速化を目的として表 6 右に示すように、このソースコードを使用しているプロセッサに最適な Fortran90 (以下“F90”) に書き換える。併せてコンパイラも最適なものに変更する。

表 6 倒壊解析プログラムの PC での動作環境

コンピュータ	HP Compaq d330 uT	
プロセッサ	Intel Pentium 4 3.20GHz (システムバス 800MHz)	
OS	Windows XP	
言語	Visual Basic	Fortran 90
コンパイラ	Windows Visual Basic Ver.6	Intel Visual Fortran Compiler Ver.9 for Windows

c) 高速化の検証

) 検証用解析モデル

検証には図 20 に示す Model A, B, C の 3 種類のモデルを用いる。Model A, B は本年度の震動台実験に用いた試験体 A 棟および B 棟に対応し、両者で耐力壁および柱端接合部の復元力特性が異なるほか、1 階柱脚の支持状態が一部異なるが、図 20 のモデル図としては同じである。各モデルの規模を表 7 に示す。

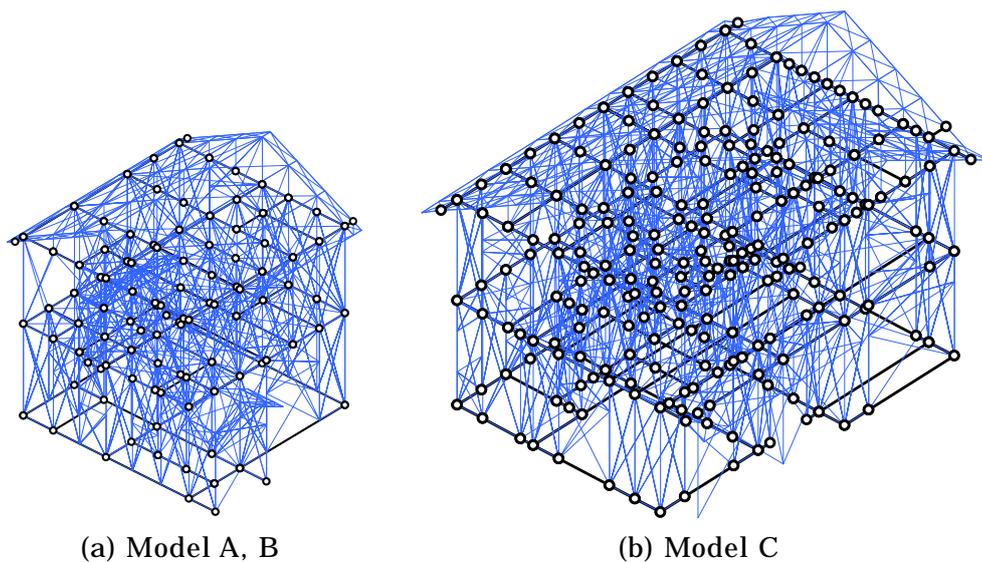


図20 検証用解析モデル

表 7 検証用解析モデルの規模

Model		A	B	C
節点数		421	421	730
軸力要素数		1373	1405	2453
材端バネ要素数		182	182	296
曲げ要素群	要素群数	127	127	179
	要素群中の最大節点数	7	7	10
	要素群中の最大要素数	6	6	9
自由度数		1173	1170	1998

入力波を継続時間 20sec の実地震動、刻み時間を 1/1000sec とした場合の VB および F90 による演算時間を表 8,9 に示す。Model A,B とともに F90 による演算速度は VB の 15.7 倍程度となっており、ソースコード言語およびコンパイラの変更により高い演算高速化効果が得られた。また、F90 による Model C の演算時間は Model A,B の 4~5 倍程度であり、自由度数の二乗に概ね比例している。

表 8 VB による演算時間 (sec)

処理内容		Model A	Model B
配列宣言から入力波設定まで		1	1
荷重ベクトル{Q}設定		2	3
剛性マトリクス [K]設定	軸力要素	2433	2817
	材端バネ要素	374	433
	曲げ要素群	1872	2167
	接地バネ	7	8
連立方程式の作成		35092	36625
連立方程式の求解		1076	5246
節点座標更新		24	27
要素変形・応力計算、 応力ベクトル {F}更新	軸力要素	678	785
	材端バネ要素	163	189
	曲げ要素群	1731	2004
	接地バネ	2	3
応力誤差算定		4073	4685
計算結果出力		140	162
合計		47668	55155

表 9 F90 による演算時間 (sec)

処理内容		Model A	Model B	Model C
配列宣言から入力波設定まで		0.05	0.06	0.08
荷重ベクトル{Q}設定		0.08	0.141	0.22
剛性マトリクス [K]設定	軸力要素	215.66	237.44	605.81
	材端バネ要素	6.41	9.27	18.28
	曲げ要素群	23.83	24.92	53.50
	接地バネ	3.77	2.95	6.91
連立方程式の作成		903.95	899.47	2594.06
連立方程式の求解		1678.23	2138.86	10725.81
節点座標更新		0.78	0.88	1.25
要素変形・応力計算、 応力ベクトル {F}更新	軸力要素	11.50	14.98	28.22
	材端バネ要素	1.78	2.53	4.78
	曲げ要素群	54.14	56.58	125.11
	接地バネ	0.52	0.55	0.52
応力誤差算定		133.86	130.45	379.98
計算結果出力		4.69	5.30	9.14
合計		3039	3524	14553

### 3) 解析理論拡張 免震建物への対応

本年度の木造建物震動台実験には免震建物が含まれている。この建物の免震層は滑り支承、積層ゴム支承、粘性ダンパー、ストッパーによって構成される。これらの免震装置に対応する解析要素の接線剛性マトリクスおよび応力変形の算定方法を以下に示す。

#### a) 免震装置の復元力モデル

各免震装置の復元力特性を図 21 のように仮定する。

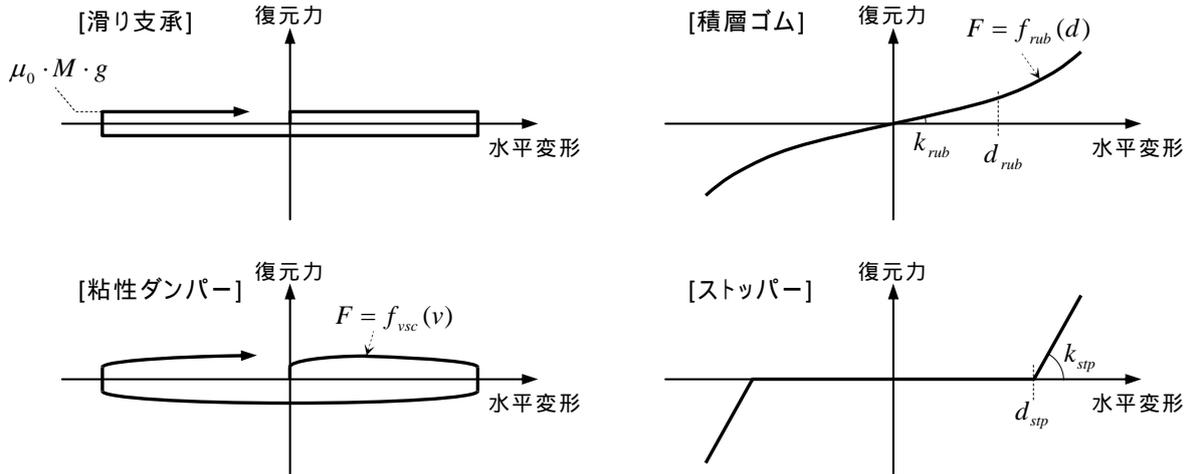


図21 免震装置の復元力特性

#### b) 解析要素の接線剛性マトリクスおよび応力変形

免震装置が接続する節点を非線形弾性支持節点とする。当該節点の X,Y,Z 座標を次のように表す。

$X_0, Y_0, Z_0$  : 初期座標

$X_n, Y_n, Z_n$  :  $t = t_n$  における座標

$X_p, Y_p, Z_p$  :  $t = t_{n+1}$  における予測座標

これらを用いて当該節点の変位・速度等を次のように算定する。

$t = t_n$  における当該節点の X,Y,Z 方向の変位

$$\text{X 方向 } D_{xn} = X_n - X_0 \quad \text{Y 方向 } D_{yn} = Y_n - Y_0 \quad \text{Z 方向 } D_{zn} = Z_n - Z_0 \quad (1)$$

$$\text{初期座標からの距離 } D_n = \sqrt{D_{xn}^2 + D_{yn}^2} \quad (2)$$

$t = t_{n+1}$  における当該節点の X,Y,Z 方向の予測変位

$$\text{X 方向 } D_{xp} = X_p - X_0 \quad \text{Y 方向 } D_{yp} = Y_p - Y_0 \quad \text{Z 方向 } D_{zp} = Z_p - Z_0 \quad (3)$$

$$\text{初期座標からの距離 } D_p = \sqrt{D_{xp}^2 + D_{yp}^2} \quad (4)$$

$t = t_{n+1}$  における当該節点の X,Y,Z 方向の予測変位増分

$$\text{X 方向 } d_{xp} = X_p - X_n \quad \text{Y 方向 } d_{yp} = Y_p - Y_n \quad \text{Z 方向 } d_{zp} = Z_p - Z_n \quad (5)$$

$t = t_{n+1}$  における当該節点の初期座標方向の予測速度

$$V_p = \frac{D_p - D_n}{\Delta t} \quad (6)$$

$t = t_{n+1}$  における各免震装置による当該節点予測反力を次のように求める。

滑り支承

$$\text{Z 方向 } F_{zp} = K_{z.sld} \cdot D_{zp} \quad (7)$$

$$\text{X 方向 } F_{xp} = \mu_{slid} \cdot F_{zp} \cdot \frac{d_{xp}}{d_{xyp}} \quad (8)$$

$$\text{Y 方向 } F_{yp} = \mu_{slid} \cdot F_{zp} \cdot \frac{d_{yp}}{d_{xyp}} \quad (9)$$

ここで、 $K_{z,slid}$  : 滑り支承の Z 方向支持剛性 (196kN/cm とする)

$\mu_{slid}$  : 滑り支承の摩擦係数

本年度実験に用いた装置では  $\mu_{slid} = 0.06$  である。

積層ゴム支承、ストッパー

$$\text{X 方向 } F_{xp} = \{f_1(D_p) + c \cdot V_p\} \cdot \frac{D_{xp}}{D_{xyp}} \quad (10)$$

$$\text{Y 方向 } F_{yp} = \{f_1(D_p) + c \cdot V_p\} \cdot \frac{D_{yp}}{D_{xyp}} \quad (11)$$

ここで、 $f_1(D_p)$  : 復元力関数

$c$  : 粘性減衰係数

本年度実験に用いた積層ゴム支承の  $f_1(D_p)$  は次のようになる。

$$D_p < 40 \text{ cm のとき } f_1(D_p) = 0.3925D_p \text{ (kN)}$$

$$D_p \geq 40 \text{ cm のとき } f_1(D_p) = 0.0094D_p^2 - 0.1908D_p + 8.292 \text{ (kN)}$$

ダンパー

$$\text{X 方向 } F_{xp} = f_2(V_p) \cdot \frac{D_{xp}}{D_{xyp}} \quad (12)$$

$$\text{Y 方向 } F_{yp} = f_2(V_p) \cdot \frac{D_{yp}}{D_{xyp}} \quad (13)$$

ここで、 $f_2(V_p)$  : 復元力関数

本年度実験に用いたダンパーの  $f_2(V_p)$  は次のようになる。

$$f_{vsc}(v) = \left( \frac{1.23 \cdot |V_p|}{1 + 0.01164 \cdot (34.18 \cdot |V_p|)^{0.7889}} + 3 \right) \cdot \text{sgn}(V_p) \text{ (kN)}$$

以上の予測反力を用いて各免震装置による接線剛性を次のように求める。

$$\text{X 方向 } K_{xp} = \frac{F_{xp} - F_{xn}}{d_{xp}} \quad (14)$$

$$\text{Y 方向 } K_{yp} = \frac{F_{yp} - F_{yn}}{d_{yp}} \quad (15)$$

$$\text{Z 方向 } K_{zp} = \frac{F_{zp} - F_{zn}}{d_{zp}} \quad (16)$$

各免震装置による  $K_{xp}$ ,  $K_{yp}$ ,  $K_{zp}$  ごとの合計を当該節点 X,Y,Z 方向に対応する剛性マトリクスの要素に加算する。

#### 4) 解析アプリケーション全体の基本設計

##### a) アプリケーションの処理概要

アプリケーションのデータ及び処理の全体像を図 22 に示す。

但し、太矢印が処理を、細矢印は参照をそれぞれ表す。直方体表現のデータはユーザーに対し 1 次的な情報を指し、これ以外のデータはプログラムによって生成されるユーザーに対し 2 次的な情報を指す。

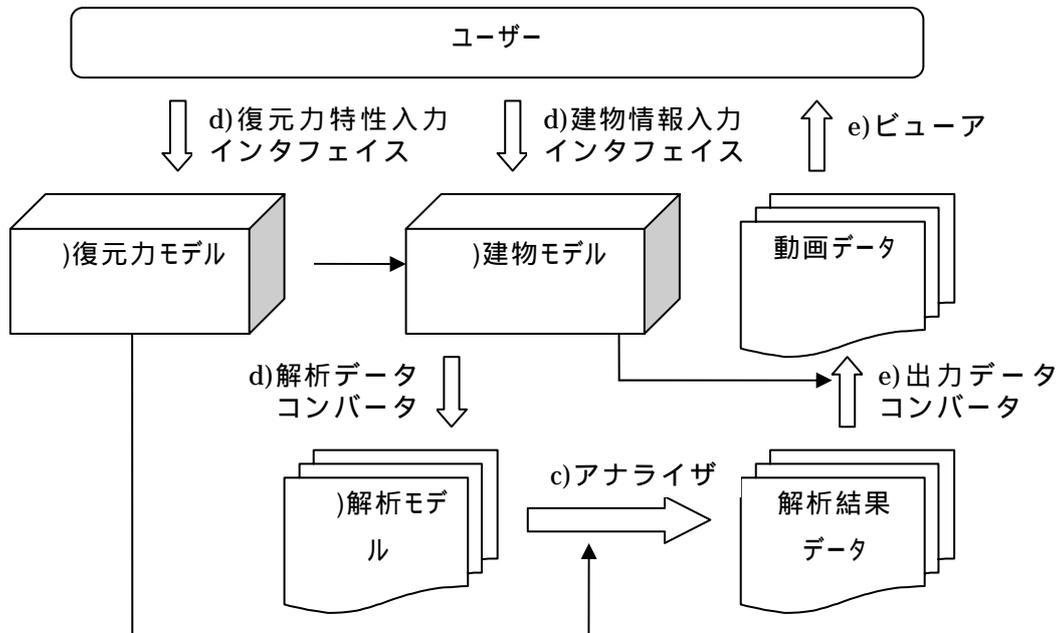


図 22 アプリケーションの処理

ユーザーが入力（ファイル読み込み、選択または図化イメージを介した対話入力等）した復元力特性及び、建物情報に基づき、ユーザーによる解析実行コマンドをトリックとして解析データを生成、解析を実行する。解析が終了しているとき、解析結果ファイル及び建物情報に基づき、結果表示コマンドをトリックとして画像データを生成し、表示する。

##### b) データの概要

###### ) 建物モデル

建物モデルは、ユーザーが把握しやすいことを目的とし、大きくは以下の 3 群によって構成する。

各解析ステップの剛性行列を構成する解析要素に基づく部材単位の情報

本群には、下表 10 左欄の部材種があり、各部材種には同表右欄中の部材がある。各部材は名称、部材種、端部座標、材料特性情報、端部接合状態、解析定義データその他の情報を、それぞれ参照可能な状態で保持する。

表 10 部材種とそれに属す部材

部材種	部材
横架材	土台、床梁、屋根梁、棟木、窓台、まぐさ、垂木
柱	通し柱、管柱
筋かい	筋かい、雲筋かい
面材壁	木ずり、モルタル、合板張り耐力壁
水平せん断部材	床、野地板

解析における質量行列を構成する要素が基づく荷重要素単位の情報

本群には、下表 11 左欄の荷重種があり、各荷重種には同表右欄中の荷重要素がある。各荷重要素は名称、荷重種、端部（頂点）座標、荷重値データその他の情報を、参照可能な状態で保持する。

表 11 荷重種とそれに属す荷重要素

荷重種	荷重要素
面荷重	屋根、床、壁、吹抜け、開口部
線荷重	柱、横架材
点荷重	追加点荷重

上記 及び の既定値の設定、または形状の規定等に用いる建物仕様の情報

本群には、下表 12 左欄の仕様があり、各仕様には同表右欄中の内容がある。各仕様はその内容を、参照可能な状態で保持する。

表 12 仕様と内容

仕様	仕様の内容
識別用物件概要	名称、備考
高さ情報	各階梁レベル（GL からの距離）
基準平面グリッド	通りに対応する、部材をその面内に含む鉛直面
荷重表	面荷重、線荷重、点荷重
既定の樹種	柱、梁、土台、筋かい、その他
既定の部材端部接合	柱端部、梁端部、筋かい端部、その他

）復元力モデル

復元力モデルは、アナライザが内蔵する図 6 に示すタイプに対して与えるパラメータとする。既知の部材、接合等については事前に登録しておく。

実験等によって新たに得られた特性は、内蔵するタイプに適用する場合にはパラメータとして入力する。

）解析モデル定義データ

解析モデル定義データは、アナライザが使用するデータで、下表 13 左欄に示す項目を持ち、各項目は右欄の内容を持つ。また、解析モデル定義データは解析データコンバータが建物モデルから生成し、原則としてユーザーは直接関知しないが、必要に応じてユーザーが編集できるようにテキスト形式のデータとする。

表 13 解析モデル定義データの項目と内容

項目	項目の内容
節点	番号、座標3軸、固定条件3軸、質量
軸力要素	番号、端部2節点番号、復元力番号、耐力倍率、破断回転角、相対回転角参照節点番号、破断参照要素番号
端部バネ要素	番号、端部2節点番号、復元力番号、耐力倍率、接続要素番号、破断回転角、座標系設定4節点番号
曲げ要素	曲げ要素群番号、群に含まれる要素数、群が接続する節点番号配列、{要素番号、端部固定条件、端部2固定度、2限界値、従属する軸バネ4要素}

表中 { } 内は複数回繰返し

c) アナライザ

2)a)に概略フロー及び変数の一覧を示す。

d) 建物情報入力、復元力モデル入力インタフェース及び解析データコンバータ

) 建物情報入力インタフェース

処理概要

建物情報入力インタフェースは、入力パネルを介し、主としてマウス操作によるユーザーの指定情報を、部材、荷重及び仕様の3つで構成される建物モデルに保持する。指定情報は、表示ルールに従って画面に表示する。

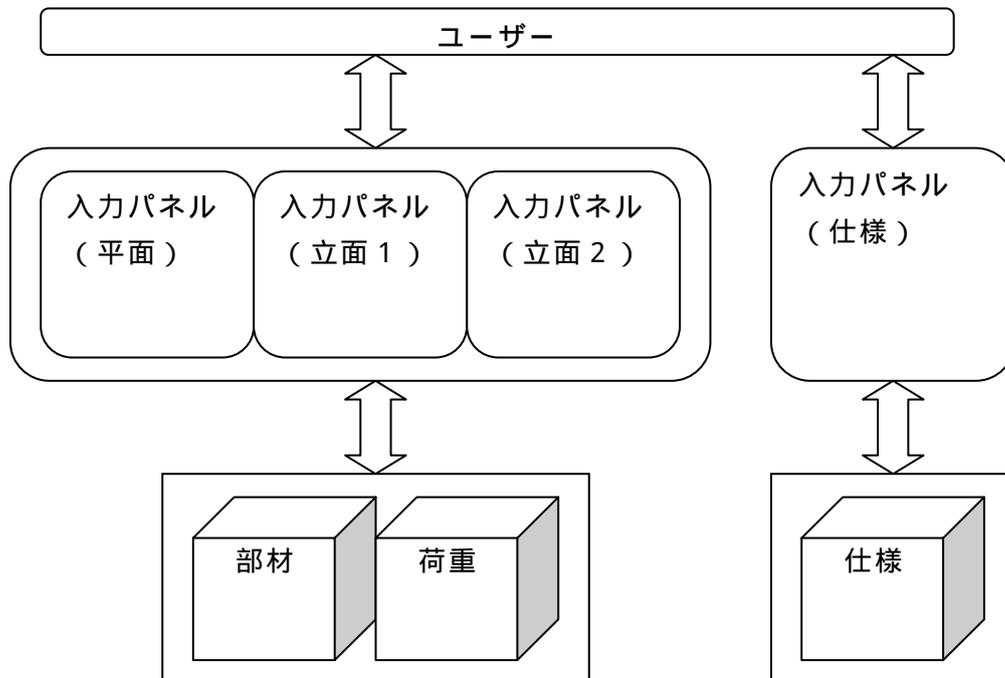


図 23 建物情報入力インタフェースの処理概要

入力パネルは、プログラム内部において上図 23 に示すように、入力情報の特性より大きく2つのブロックで構成する。一方は座標情報入力を主体とするブロックで、

更に下位の入力パネル（平面）（立面 1）及び（立面 2）により構成される。他方は唯一の入力パネル（仕様）により構成する。

#### 座標情報入力を主体とするブロック

入力操作は下図 24 の処理を繰返して行う。

但し、既入力要素選択時は既入力要素オプションを、それ以外は未定入力要素オプションを表示する。いずれのオプションも表示されている間は編集可能とする。

三つの入力パネルは、3 軸直交座標の XY 平面、XZ 平面、YZ 平面（以下、「基準平面」と呼ぶ）それぞれに平行な平面である画層を複数保持することができる。

画層は、その平面内にすべての頂点が含まれる要素のインデクスを保持し、ユーザーの指定に従って入力パネルに表示する。

画層は、要素が確定される度に更新する。更新は、確定した要素に応じて追加または削除という形で行う。

内部的な既定の初期動作として、入力パネルにて水平面画層を一つ GL レベルで初期化する。また、仕様に高さ情報、基準平面グリッドが設定されている場合、設定されたすべての高さ及び平面座標で画層を初期化する。

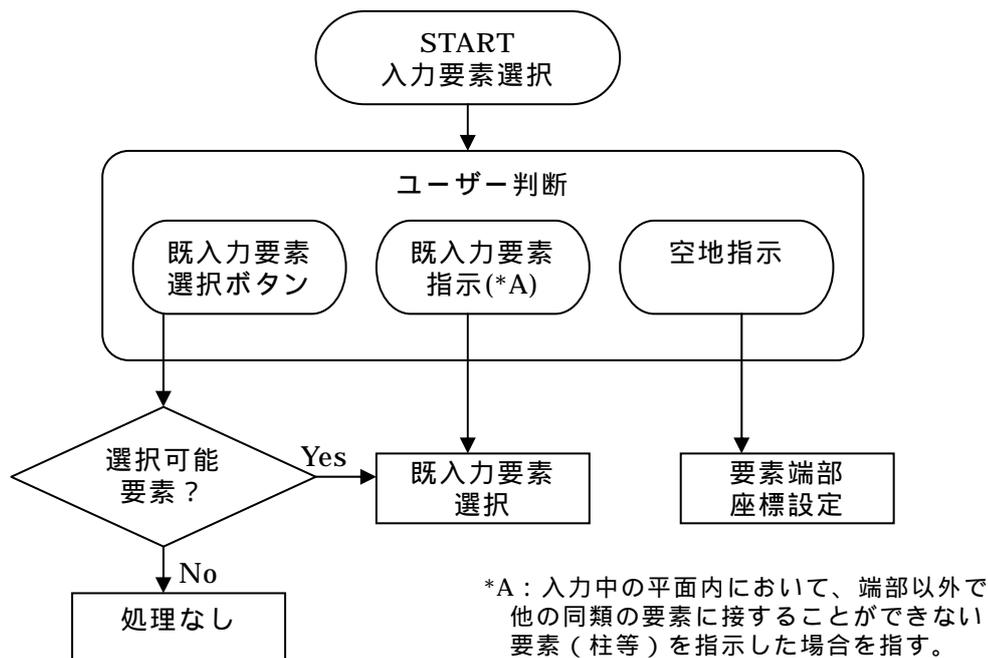


図 24 座標入力主体のブロック動作概要

#### キーボード及び提示リストからの選択を主体とするブロック

入力操作は、該当欄にキーボードから入力またはリストから選択する。

入力なき場合の動作を保証するため、内部的な既定値を持つ。

) 復元力モデル入力インタフェース

入力操作は、該当欄にキーボードから入力またはリストから選択する。

) 解析データコンバータ

解析モデル定義データは対応する入力要素から生成する。

解析モデル定義データの入力要素に対する依存関係に基づき生成する。

生成の手順

-1 面荷重要素（壁、開口部）の分割

壁を柱位置で分割する。

端部に柱を持たない壁を耐力上無効化する。

（立面左右端に柱の配置を強要し、立面上下端が梁、土台に達しないことは容認する。

梁または土台に達しない場合は、ダミー横架材を左右端の柱間に生成する）

（準耐力壁のように「上下に隙間があり川の字釘打ち」であっても、標準的な耐力壁と同列に扱われる準備がなされているものは、特別な配慮をしない）

開口部を柱位置で分割する。

壁にある開口部の上下に、両脇の柱に達する長さでまぐさ及び窓台を生成する。

（腰壁または垂壁に盲壁が隣接する場合、間にある柱の曲げ剛性、耐力を上げるため、形状を認識する必要がある）

分割した壁の各矩形領域に二組のX型ブレース（接続節点未定）を生成する。

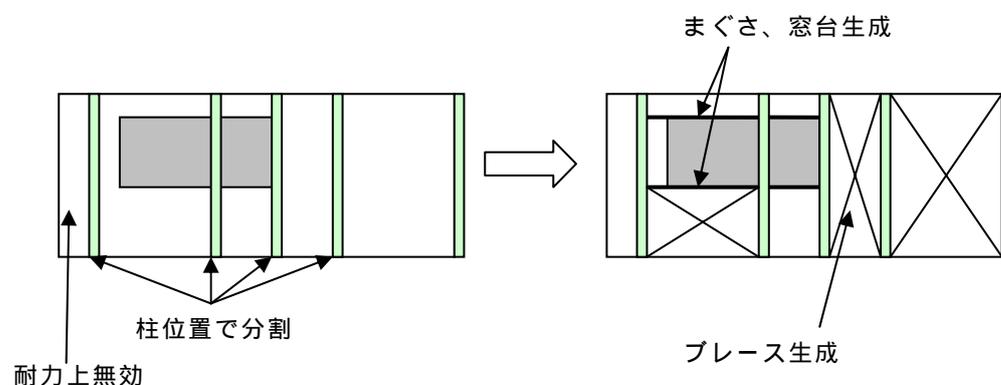


図 25 面荷重要素（壁、開口部）の分割手順

-2 面荷重要素（床、吹抜け）の分割

梁を基準に床を分割する。

（同一画層に属する梁及びその延長線で矩形のメッシュに区切る。）

（4辺の内梁のない辺が存在するとき、当該辺を共有する隣接メッシュと結合する。）

（結合した結果のメッシュが矩形でない場合、ダミー横架材を生成し矩形にする。）

（吹抜けによって床面がとぎれ、腰壁に対する窓台に当たる梁を隣接する床側に延長する位置に他の梁が存在しない場合、当該位置にダミー横架材を生成することが必

要となる可能性がある)

分割した各矩形領域にX型ブレースを生成する。

梁を基準に吹抜けを矩形分割する。(床と同様。但し、矩形である必要はない)

周囲に梁のない床は無視する。

#### -3 部材分割 1

入力部材を軸力要素と端部バネ要素に分割する。端部バネ長さは 1cm とし、軸力要素長さに端部バネ長さを加えた値は入力部材長さに一致すること。

筋かいはここで圧縮要素と引張要素に、壁は二組のX型ブレースに、床は一組のX型ブレースにそれぞれ置換する。

(壁の置換ブレースは柱付と梁付の二組となるが、その外力負担比率は縦横比により変化する)

#### -4 節点生成

軸力要素及び端部バネ要素の両端に節点を生成する。

重複節点は最初に見つけたものを残し、それ以外を削除する。

(削除する節点に接続する軸力要素及び端部バネ要素の節点番号を変更するか、または残した代表節点の別名として記憶しておき、検索時に考慮する。)

#### -5 部材分割 2

軸力要素中間部に節点が存在する場合、各節点位置で分割する。

軸力要素中間部に節点が存在する場合、部材全長にわたる曲げ要素群を生成する。

(曲げ要素には従属軸要素を登録する。)

#### -6 柱梁フレーム生成

柱部材頭が接続する節点を起点として、当該柱部材にある直近の節点(1)を検索する。但し、柱軸力要素頭部は除く。

直上の梁(直交して存在する場合にはその両方)上の直近の節点(2)を検索する。但し、当該柱頭側にある梁軸力要素端部は除く。

節点(1)と節点(2)とを結ぶ置換ブレースを生成する。

#### -7 筋かい更新

部材分割 1 で生成された引張要素は筋かい部材が接続する柱部材端部の節点を接続先節点とし、圧縮要素は柱軸力要素端部の節点を接続先節点とする。

#### -8 面材壁更新

部材分割 1 で生成された二組のX型ブレースの任意の一組は壁両端にある柱部材端部(梁高さ)の節点を接続先節点とし、他の一組は柱軸力要素端部の節点を接続先節点とする。

-9 水平せん断部材更新

面荷重要素分割（床、吹抜け）で生成されたX型ブレースはこれを囲む横架材にある節点を接続先節点とする。

-10 質量生成 1

分割後の各面荷重重心から最短距離にある4節点に、振分け後の重心が振分け前の重心に一致するように質量を振分ける。

-11 質量生成 2

部材を構成する各軸力要素端部節点に部材比重に基づく質量を対象節点の質量に追加する。（既定値を下回る場合は既定値とする。）

-12 破断参照要素設定

柱梁フレーム（起点となった節点に取付く柱端部バネ要素を参照する。）

筋かい（引張要素が圧縮要素を参照する。）

壁（二組のX型の置換ブレース要素が、それぞれ組となった相手を相互参照する。）

床、野地板（X型の置換ブレース要素が相手を相互参照する。）

-13 参照節点設定

端部バネ要素の要素軸上にあつて当該端部バネ要素の生成元となった部材端部と共有する節点(1)、同部材の軸上で当該接合部と共有しない側の直近の節点(2)、及び部材端部で端部バネ要素軸に直交する軸上にある節点を検索し、登録する。

生成したデータは、c)アナライザの要求する書式に従い、テキスト形式で出力する。

e) 出力モジュール

i) 出力モジュールを用いた動画生成処理の流れ

出力モジュールは、レイトレーサ PovRay<sup>1</sup> および動画エンコーダ<sup>2</sup>との協働によって、建築物のモデルデータおよび節点変位データから動画を生成する。出力モジュールを用いた動画生成処理の流れを図 26 に示す。

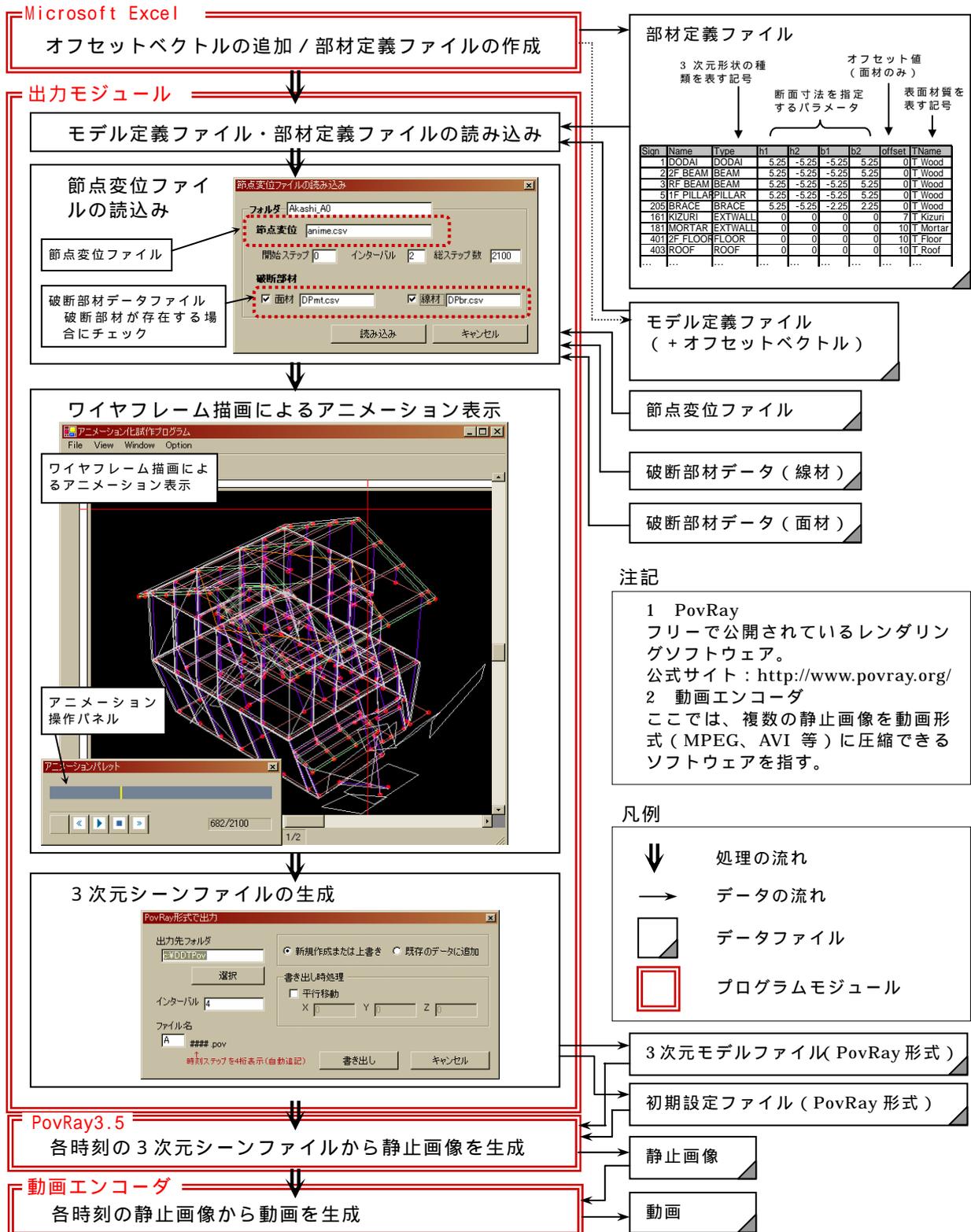


図 26 出力モジュールを用いた解析結果の動画生成処理の流れ

ii) 各処理の概要

画像化のための追加データの作成

画像化にあたり、解析上のデータにいくつかのデータを追加する必要がある。

イ) 節点に対するオフセットベクトルの追加

建物モデル定義ファイル内の節点記述部分に、面材のオフセット処理のためのオフセットベクトルを追記する。オフセットベクトルはオフセットの方向をのみ示す基準化されたベクトルであり、オフセット距離は部材側で別途指定される。オフセットベクトルの種類は外壁用、間仕切り壁用、床・屋根用の3種類である(図27)。

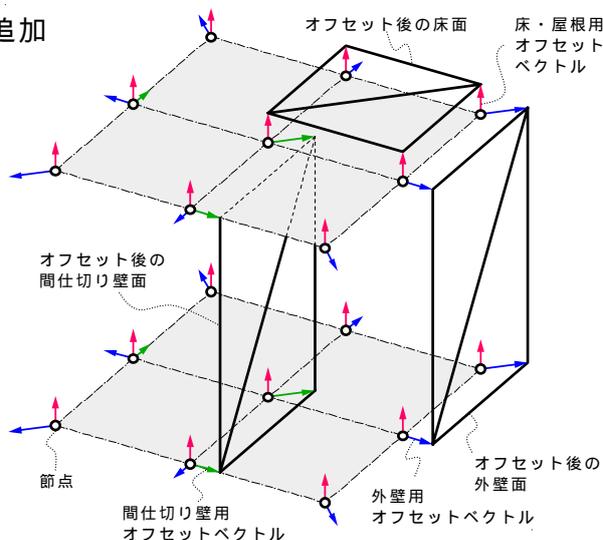


図27 オフセットベクトルの種類

ロ) 部材に対する表現情報の追加

部材に対する表現情報 A) ~ C) を定義した部材定義ファイルを作成する(表14)。

表14 部材定義ファイル

Sign	Name	Type	h1	h2	b1	b2	offset	TName
建物モデルで定義されている部材記号	部材の名称(和名)	定義済み形状記号	断面寸法を指定するパラメータ			offset	オフセット距離	テクスチャ名の定義

A) 3次元形状情報の追加

線材および面材に、表現上の3次元形状を指定する。3次元形状の種類は、プログラム内で定義済みの形状記号(表15)によって指定する。さらに、線材の場合は、数値によって断面寸法を指定する。(プログラムの最終形では、断面寸法は入力モジュール側で指定される。)

表15 定義済み形状記号と対応する3次元形状

種別	定義済み形状記号	対応する3次元形状
線材	PILLAR	角柱
	BEAM	角柱
	BRACE	角柱
	CYLINDER	円柱
面材	EXTWALL	3次元3角形
	INTWALL	3次元3角形
	FLOOR	3次元3角形
	ROOF	3次元3角形

PILLAR、BEAM、BRACE および EXTWALL、INTWALL、FLOOR、ROOF は、それぞれ3次元形状は同じであるが、オフセット処理時の扱いが異なるため、定義上区別している。

B) オフセット距離の指定

面材(WALL・FLOOR・ROOF)に対して、解析上の節点位置からのオフセット距離を指定する。オフセット距離にマイナス値を指定することもできる。

C) テクスチャ(色や質感)の指定

部材に対しては、テクスチャの名称のみを指定する。テクスチャ名に対応する実

際の色や質感は、PovRay の初期設定ファイル内で定義する。

#### データの読み込み

##### イ) 建物モデルの読み込み

入力モジュールによって生成された建物モデルデータから節点および部材情報を読み込む。部材情報は、部材定義ファイルを参照し、定義されているもののみ読み込む。

##### ロ) 節点変位データの読み込み

解析モジュールによって生成された節点変位データを読み込む。建物本体から分離した破断部材の情報がある場合は、併せて読み込む。

#### ワイヤフレーム描画による解析結果のアニメーション表示

ワイヤフレーム描画による解析結果のアニメーション表示を行い、動きの確認やカメラアングルの調整を行う。

#### 3次元シーンファイルの生成

##### イ) 部材の3次元モデルへの変換

線材・面材を表現上の3次元モデルに変換する。

##### ロ) 3次元シーンファイルの書き出し

PovRay によって静止画像を生成するためのシーンファイルを生成する。シーンファイルは、部材の形状情報を記述した3次元シーンファイルと、カメラアングルや光源、テクスチャを記述したインクルードファイルに分けて生成される(表16)。

表 16 シーンファイルの種類

3次元シーンファイル	各時刻の部材の3次元モデルを記述したファイルで、時刻ごとに生成される。
インクルードファイル	カメラアングル、光源およびテクスチャ定義は、各時刻のシーンに共通となるため、別途インクルードファイルとして生成する。光源およびテクスチャ定義は、この段階ではダミーとして記述される。

#### 静止画像の生成

##### イ) 光源・テクスチャの再定義

で生成された初期設定ファイルにダミーで定義されている光源およびテクスチャを再定義する。必要に応じてカメラアングル等の修正も行う。

##### ロ) レンダリング処理

PovRay によって3次元モデルファイルのレンダリングを行い、各時刻の静止画像を得る。

#### 動画の生成

各時刻の静止画像を適切な動画形式にエンコーディングし、最終的な動画を得る。

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 本年度の既存木造建物震動台実験に対応する倒壊解析シミュレーションを行った。実験前の事前解析では解析モデル重量および復元力特性を概ね妥当と考えられる範囲で設定した結果、初期の目的どおりの実験結果が得られるであろうことが確認された。ただし、解析による倒壊挙動は解析モデルの重量および水平耐力のわずかな相違によって大きく異なり、倒壊挙動を精度よく予測することの困難さが併せて確認された。実験後の事後解析では解析結果が実験結果に適合することを条件に、妥当と考えられる範囲内で復元力特性を調整した。その結果、復元力特性の骨格曲線は概ね従来の設定に近いものとなった。
- 2) 補強試験体(B棟)の柱端部補強金物が無い状態で解析を行ったところ倒壊に至った。また、耐力壁両端の柱端部にのみ CP-T 金物が配置された状態では倒壊しなかった。耐力壁の補強だけでなく、柱端部の補強も重要であること、および必ずしもホールダウンなどの高度な補強は必要ないことが確認された。
- 3) プログラムのソースコード言語およびコンパイラをパーソナルコンピュータの演算プロセッサに最適なものに変更して演算の高速化を図った。その結果、演算時間は従来の 1/15 程度に短縮された。
- 4) 木造免震建物の三次元応答解析が行えるように解析理論を拡張した。
- 5) データ入出力部を含む解析アプリケーション構築の準備として、解析プログラムとデータ入出力プログラム等の相互関係を整理した。また、データ出力プログラムを試作した。
- 6) 今後の課題として次のものが挙げられる。

解析精度の詳細検討

重量分布および復元力特性を適切に設定できれば建物全体の倒壊挙動は精度良く予測できる。しかし、接合部の応力変形は倒壊挙動の決定因子の一つなので、部材・接合部の応力変形分布の実態への適合性を確認する必要がある。

復元力特性の精度向上

本年度の作業により、筋かい壁、モルタル壁、木ずり壁、柱梁架構、および柱脚・柱頭接合部の倒壊解析用復元力特性が設定されたが、その根拠は一つの震動台実験への適合性のみである。また倒壊解析プログラムの用途拡大のためには、より広範な仕様に対する復元力特性の特定が望まれる。今後の実験データの蓄積を俟って復元力特性の精度向上と拡充を図る必要がある。

解析アプリケーションの構築

倒壊解析プログラムの利用促進のためには、データ入出力作業省力化を目的としたデータ入出力プログラムを含む解析アプリケーションの構築が必須といえる。

解析理論・解析モデルの拡張

地盤を含むなど、今後予定されている震動台実験試験体に対応した解析理論・解析モデルの拡張がその都度必要である。

## (e) 引用文献

- 1) 文部科学省研究開発局，防災科学技術研究所：大都市大震災軽減化特別プロジェクト  
震動台活用による構造物の耐震性向上研究，平成 14 年度成果報告書，pp.515-549，  
平成 15 年 4 月
- 2) 文部科学省研究開発局，防災科学技術研究所：大都市大震災軽減化特別プロジェクト  
震動台活用による構造物の耐震性向上研究，平成 15 年度成果報告書，pp.538-579，  
平成 16 年 5 月
- 3) 文部科学省研究開発局，防災科学技術研究所：大都市大震災軽減化特別プロジェクト  
震動台活用による構造物の耐震性向上研究，平成 16 年度成果報告書，pp.607-648，  
平成 17 年 5 月
- 4) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法， 木造住宅の耐震精密診断と補強  
方法(改定版) ，2004.7.12
- 5) 日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の限界耐力計算による設計の手引き，  
平成 17 年 3 月

## (f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
三宅辰哉 河尻 出 腰原幹雄 五十田博	既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究、その 11 実大震動台実験結果(解析による倒壊挙動追跡)	2003 年度日本建築学会大会、学術講演会	平成 15 年 9 月 7 日
Tastuya MIYAKE Chikahiro MINOWA Mikio KOSHIHARA Isao SAKAMOTO	A Collapsing Behavior of Timber Structure House Subjected to Seismic Motion	2003 Pan-Pacific Symposium for Earthquake Engineering Collaboration, NIED	平成 15 年 10 月 2 日
三宅辰哉 河尻 出	新耐震以前の木造住宅を対象とした震動台実験、その 3 解析による倒壊挙動の追跡	2003 年度日本地震工学会大会	平成 15 年 11 月 11 日
三宅辰哉 河尻 出 五十田博 腰原幹雄	新耐震基準以前の仕様による木造住宅の地震時破壊挙動、その 3 数値解析による倒壊挙動の追跡	第 7 回木質構造研究会技術発表会	平成 15 年 12 月 4 日
Tastuya MIYAKE Mikio KOSHIHARA Hiroshi ISODA Isao SAKAMOTO	An Analytical Study on Collapsing Behavior of Timber Structure House Subjected to Seismic Motion	13 <sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada	平成 16 年 8 月
河尻 出 三宅辰哉 腰原幹雄 五十田博	既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究、その 28 倒壊事例に基づく倒壊応答解析理論の拡張	2004 年度日本建築学会大会、学術講演会	平成 16 年 8 月

三宅辰哉 河尻 出 腰原幹雄 五十田博	既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究、その 29 拡張された倒壊応答解析理論による試行解析	2004 年度日本建築学会大会、学術講演会	平成 16 年 8 月
三宅辰哉 河尻 出 腰原幹夫 箕輪親宏	既存木造住宅の耐震性能の把握と補強建物の評価、その 4 数値解析による既存木造住宅の倒壊挙動の予測	2004 年度日本地震工学会大会	平成 16 年 1 月 12 日
三宅辰哉 河尻 出 腰原幹雄 五十田博	既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究、その 49 倒壊応答解析に関する研究経緯と今後の展望	2005 年度日本建築学会大会、学術講演会	平成 17 年 8 月
河尻 出 三宅辰哉 腰原幹雄 五十田博 槌本敬大 箕輪親宏	軸組構法木造住宅の地震倒壊応答解析に関する研究、新潟中越地震記録を用いた既存木造住宅の倒壊解析例	2005 年度日本建築学会大会、学術講演会	平成 17 年 8 月
三宅辰哉	実大震動実験と時刻歴応答解析	建築技術, No.675	平成 18 年 4 月
三宅辰哉 腰原幹雄 五十田博 槌本敬大 箕輪親宏	震動台による既存木造住宅の耐震性能検証実験、その 10 震動台実験に対応する倒壊解析	2006 年度日本建築学会大会、学術講演会	平成 18 年 9 月 (発表予定)

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
木造建物倒壊応答解析プログラム	木造建物に対応する多自由度解析モデルの地震倒壊挙動時刻歴解析
解析結果の画像処理プログラム	解析結果を用いた三次元アニメーションの作成

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 平成18年度業務計画案

#### (a) 木造建物震動台実験結果の予測・分析

E-ディフェンスで行われる木造建築物の震動台実験の結果を解析により予測して、実験計画の資料とする。また、実験結果と解析結果の比較により部材・接合部の復元力特性を推定する。併せて、部材・接合部の応力変形分布の妥当性について検討する。

#### (b) 復元力特性データの整理

平成18年度までの作業で得られた耐力壁・接合部の復元力特性データを解析アプリケーションのサンプルデータとして整理する。

#### (c) 解析アプリケーションの構築

解析アプリケーションは、1) 図化イメージを介したデータ入力プログラム、2) 時刻歴応答解析プログラム、3) 解析結果のアニメーション化プログラムによって構成される。この三つのプログラムを順次起動して解析を行い、プログラム間のデータ授受は外部ファイルを介して行うことを想定する。平成17年度までの作業で、2)については主要部がほぼ完成しており、1),3)についてはプログラムの試作が一部終了している。本年度はこれらのプログラムの相互関係を整理・統合して解析アプリケーションを構築する。

