

### 3.4.3 木造建築物の地震動による破壊に関する数値シミュレーション

## 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16年度業務目的

### (2) 平成16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) 対象範囲の設定
  - 2) 演算の高速化
  - 3) 実規模建物の応答解析
  - 4) データ入出力作業の省力化に向けた基本検討
- (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17年度業務計画案

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 木造建築物の地震動による破壊に関する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	専務取締役 主任	三宅 辰哉 河尻 出 五十嵐 冬人	miyake@nittem.co.jp kawajiri@nittem.co.jp 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振動台実験、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カ年の年次実施計画(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する。

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する。

解析結果と実験結果の比較により解析精度を評価する。  
解析時間短縮に関する検討を行う。  
入出力画面のサンプルを作成する。

4) 平成17年度：

データ入出力支援プログラムを試作する。  
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を行う。  
必要に応じて解析理論・解析モデルを拡張する。  
解析値と実験結果の比較により解析精度を確認する。

5) 平成18年度：

データ入出力支援プログラムを作成する。  
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耐震補強木造住宅の震動台実験の結果予測を行う。  
必要に応じて解析理論・解析モデルを拡張する。  
解析値と実験結果の比較により解析精度を確認する。  
解析モデルの単純化および大型コンピュータの使用などにより演算の高速化を図る。

(e) 平成16年度業務目的

平成14、15年度の解析手法構築に関する作業、および同年度において本業務と並行して行われた振動台実験等の結果に基づいて、特定の既存木造住宅(以下「対象住宅」)を対象として、対象住宅を構成する筋かい、木ずり、モルタル、柱梁接合部等の、初期状態から倒壊に至る大変形領域に渡る応力変形特性を設定し、これを当面の対応範囲とする。

平成14、15年度に構築された倒壊解析理論を統合し、実規模の建物への適用性について検討した。本解析理論に基づくプログラムにより、対象住宅の倒壊挙動が問題なく予測できることが確認する。

上記の業務項目の一環として、平成15年度に実施された対象建物抽出構面の振動台実験を対象として、解析結果が実験結果に適合することを確認する。

実規模の建物を対象とする場合には、解析で扱う全自由度が膨大になるため、解析時間短縮を目的として連立方程式の解法に関する検討を行う。

解析に必要な入力データ量は膨大であり、データ入力作業省力化のためには図化イメージを介したデータ入力プログラムが必要となる。本年度は、図化イメージ入力の画面サンプルを作成する。

## (2) 平成16年度の成果

### (a) 業務の要約

特定の既存木造住宅(以下「対象住宅」)を対象とし、解析結果が抽出壁構面振動台実験結果に適合することを条件として、対象住宅を構成する筋かい、木ずり、モルタル、柱梁接合部等の、初期状態から倒壊に至る大変形領域に渡る応力変形特性を設定した。これらの特性を用いて対象住宅全体の解析モデルを設定し、倒壊応答解析を行った。解析結果をもとに平成15年度の手法により3次元アニメーションを作成したところ、軸組構法木造住宅の地震倒壊過程として妥当であることが確認された。

本解析では扱う全自由度が1000を超え、平成15年度に作成されたプログラムでは解析時間が400時間程度に達することが明らかとなったため、解析時間短縮を目的として、連立方程式の解法を収束計算法に変更したところ、解析時間は14時間程度に短縮された。

この他、データ入力支援プログラム開発に関する基礎的検討を行った。

### (b) 業務の実施方法

#### 1) 解析対象範囲の設定

平成14年度に行われた対象住宅抽出壁構面を試験体とした静的実験、振動台実験および既往の文献による実験結果をもとに、対象住宅を構成する筋かい、木ずり、モルタル、柱梁接合部等の、初期状態から倒壊に至る大変形領域に渡る応力変形特性を設定し、これを当面の対応範囲とする。設定した特性の妥当性は倒壊応答解析結果と抽出壁構面振動台実験結果の比較により確認する。

#### 2) 演算の高速化

倒壊応答解析の演算時間のほとんどは各ステップにおける多元連立方程式の解算定に費やされる。平成15年度の解析手法で用いた演繹的解法では、解析対象の自由度の増加に伴い演算時間は級数的に増大するため、解法を収束計算法に改め、演算の高速化を図る。

#### 3) 実規模建物の倒壊応答解析

対象住宅全体の解析モデルを設定し、倒壊応答解析を行い、本解析手法の実規模建物への適用性を確認する。

#### 4) データ入出力作業の省力化へ向けた基本検討

データ入力作業省力化を目的とした、図化イメージを介したデータ入力プログラム開発へ向け、ユーザー入力情報の削減、解析モデル定義データの自動生成、およびアニメーションデータ自動生成の方針策定に関する検討を行った。

(c) 業務の成果

1) 解析対象範囲の設定(部材・接合部の荷重変形特性の設定)

a) 対象とする部材・接合部

対象建物は平成 14 年度抽出壁実験に用いた既存住宅とする。当該既存住宅の平面図、伏図、外観写真を以下に示す。

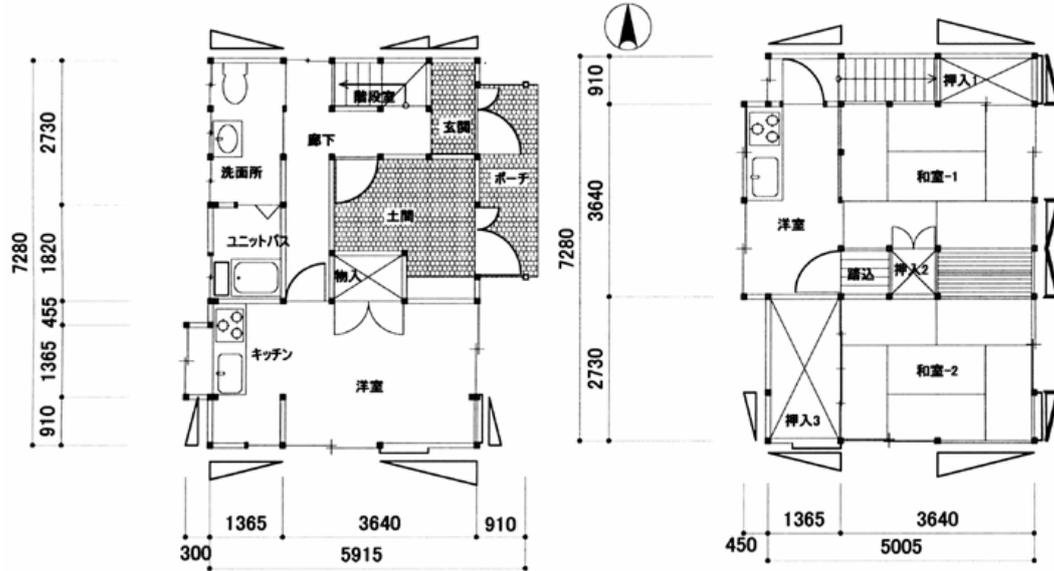
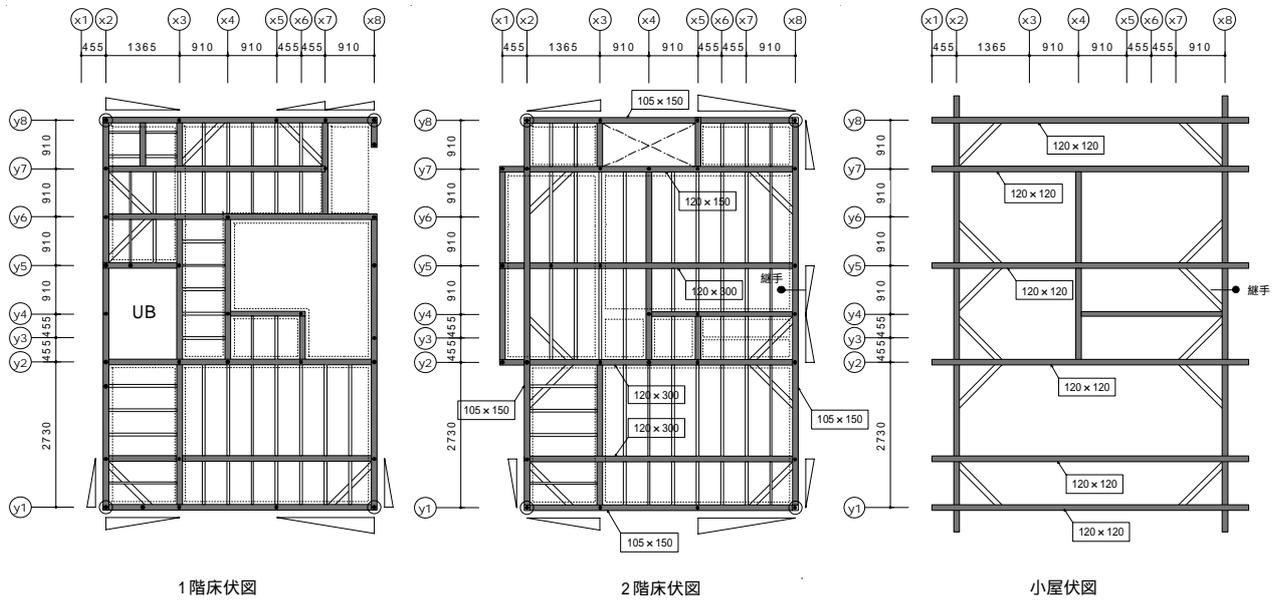


図1 解析対象建物平面図



凡例

・	当階管柱	スギ 105 × 105	1階柱脚 ほぞ差し (l=55mm)+N90
⊙	通し柱	スギ 105 × 105	その他 ほぞ差し (l=55mm)
▤	片筋かい	スギ 105 × 50	釘打ち (3本)
▬	横架材	土台 ヒノキ 梁 マツ 特記なき限り 105 × 105	
▬	床根太		

床仕上げ表

	仕上	下地
	モルタル金ゴテ	土間コンクリート
	フローリングt12	
	カーペットt7	合板t5
	ラワン合板t5.5	
	檜縁甲板t15	
	畳t55	床板t15
	集成材床板	

図2 解析対象建物伏図



写真1 対象建物外観

対象住宅を構成する鉛直構面と柱脚・柱頭接合部の荷重変形特性を設定する。鉛直構面および柱脚・柱頭接合部は次の種類となる。

- 鉛直構面 …………… ラスモルタル  
 木ずり  
 筋かい(45 × 105mm)  
 柱梁架構
- 柱脚・柱頭接合部 ……… 短ほぞ差し、2-N90 側面打ち  
 短ほぞ差しのみ

b) 復元力モデル

平成 15 年度と同様に図 3 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のうち、骨格曲線は次項で実験結果に基づいて設定する。その他のパラメータは、それらを決定するために十分な実験データが存在しないので、平成 15 年度の設定値を用いる。骨格曲線を除くパラメータを表 1 に示す。

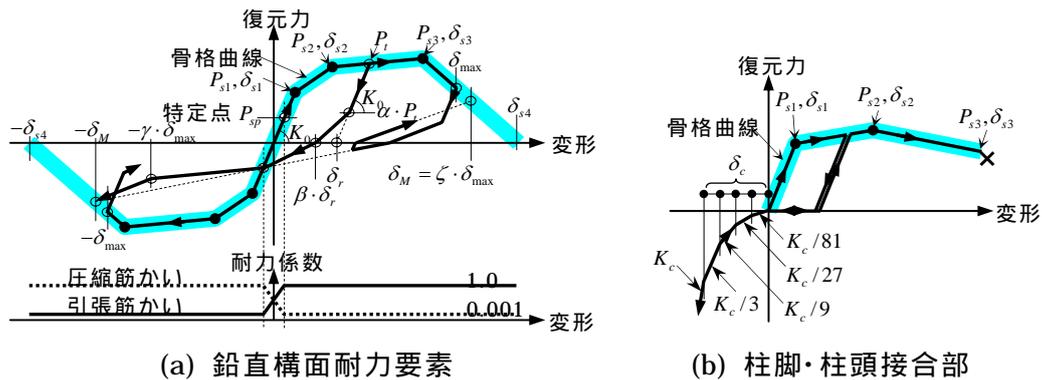


図3 復元力モデルの履歴則

表 1 復元力モデルのパラメータ (kN, cm, kN/cm)

部材	鉛直構面						柱脚・柱頭 接合部
	ラス モルタル	木ずり <sup>1</sup>	筋かい		柱梁架構 <sup>1</sup>	合板片 面張り	
			引張	圧縮			
$w_0$ <sup>2</sup>	192.5		91	91		182.0	
$h_0$ <sup>3</sup>	261.5	251.5	251.5	251.5	251.5	260.0	
$P_{sp}/P_{sp}$	0.15	0.50	0.21	0.10	0.20	0.40	
	0.3	0.5	0.2	0.2	0.25	0.25	
	0.5	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	
	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	
	0.6	0.5	0.4	0.2	0.5	0.6	
	1.1	1.1	1.05	1.05	1.1	1.04	
$K_c$							245
$c$							0.01

1 柱1本当り

2 基準幅

3 基準高さ

c) 復元力モデル骨格曲線の設定

1) 鉛直構面の骨格曲線設定の手順

鉛直構面の復元力モデル骨格曲線は次の手順で設定した。

比較的实验例の多い筋かいと柱梁架構の骨格曲線を設定する。参照文献は日本建築学会大会梗概<sup>1,2,3,6)</sup>と木造住宅の耐震設計に関する書籍<sup>8,9)</sup>である。

平成 14 年度に行われた対象住宅抽出壁構面を試験体とした静的実験(以下「H14 抽出壁静的実験」)、および文献<sup>6,7)</sup>に示される実験結果に基づいて柱梁架構と木ずり壁の骨格曲線を設定する。このとき、H14 抽出壁静的実験静的実験では、変形角が 0.1rad を上回る大変形領域でも耐力は 0 とならず、この耐力は柱梁架構と木ずり壁によるものと仮定した。

H14 抽出壁静的実験、平成 14 年度に行われた対象住宅抽出壁構面を試験体とした振動台実験(以下「H14 抽出壁振動台実験」)、および文献<sup>2~5)</sup>に示される実験結果に基づき、計測荷重から、筋かい、柱梁架構、木ずりの負担水平力を差し引いたものがモルタル壁の負担水平力と仮定してモルタル壁の骨格曲線を設定する。

設定された骨格曲線を用いて、各参照文献、H14 抽出壁静的実験、および H14 抽出壁振動台実験の試験体の骨格曲線を算定し、実験結果との適合性を確認する。

設定された骨格曲線による復元力モデルを用いて、H14 抽出壁振動台実験に対応する倒壊応答解析を行い、解析結果と実験結果との適合性を確認する。

2) 構面形状に応じた鉛直構面骨格曲線の補正方法

骨格曲線を設定する際に参照する耐力要素を基準耐力要素とする。基準耐力要素と形状の異なる耐力要素の骨格曲線は次の方法によって求められるものとする。ここで、基準耐力要素の形状および骨格曲線を次のように表す。

耐力要素形状 幅： $H_0$ 、高さ： $W_0$ 、筋かい角度： $\varphi_0$

骨格曲線 荷重： $Q_{0i}$ 、変形角： $\theta_{0i}$

また、開口周辺では図 4 のように耐力要素を長方形に分割し、それぞれの耐力要素について骨格曲線を算出する。以下、算定対象耐力要素の幅を  $W$ 、高さを  $H$ 、筋かい角度を  $\varphi$  とする。

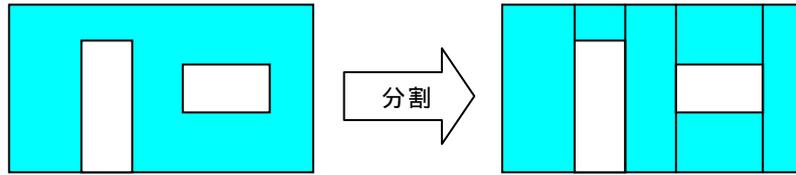
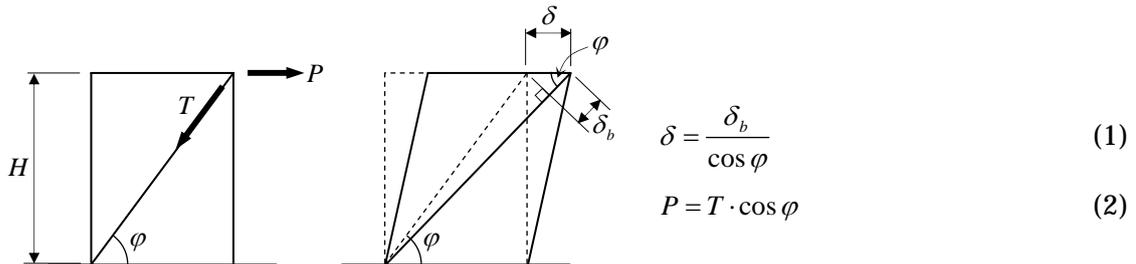


図4 開口周辺の耐力要素の分割方法

### 筋かい

端部接合部の変形を含めた筋かいの軸剛性と軸耐力は筋かいの長さに依存しないものとし、かつ変形は微小であるとすれば、



したがって、変形は  $1/\cos \varphi$  に比例し、耐力は  $\cos \varphi$  に比例する。

荷重 $P_i = Q_{0i} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_0}$	(3)
変形 $\delta_i = H \cdot \sin \theta_{0i} \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi}$	(4)

### 木ずり

荷重は耐力要素中の柱および間柱の本数に比例するものとする。

荷重 $P_i = Q_{0i} \cdot N_c$	(5)
変形 $\delta_i = H \cdot \sin \theta_{0i}$	(6)

### モルタル

モルタル壁の耐力と剛性はラスを固定するステーブルの耐力・剛性に依存するものとし、ステーブルの密度は一様であり、かつ壁面における連続体とみなしうるだけ高いと仮定する。このとき、弾性範囲におけるモルタルの回転剛性とモーメント耐力はそれぞれ次の壁面二次モーメント  $I_{xy}$  と壁面係数  $Z_{xy}$  に比例する。

$$I_{xy} = \frac{I_x \cdot I_y}{I_x + I_y} \quad (7)$$

$$Z_{xy} = \frac{Z_x \cdot Z_y}{\sqrt{Z_x^2 + Z_y^2}} \quad (8)$$

ここで、 $I_x = \frac{H \cdot W^3}{12}$ 、 $I_y = \frac{H \cdot W^3}{12}$ 、 $Z_x = \frac{H \cdot W^2}{6}$ 、 $Z_y = \frac{H^2 \cdot W}{6}$

$H$  : 当該耐力要素の高さ

$W$  : 当該耐力要素の幅

モルタルの骨格曲線の非線形性はステーブル部の応力変形特性の非線形性に起因する。非線形領域における壁面係数  $Z_{xy}$  は上式とは異なる値となるが、その差は小さいものとして非線形領域における耐力も  $Z_{xy}$  に比例するとする。このとき、

$$P_i = Q_{0i} \cdot \frac{H_0}{H} \cdot \frac{Z_{xy}}{Z_{xy0}} \quad (9)$$

ここで、 $Z_{xy0}$  : 基準耐力要素の壁面係数

モルタルの回転剛性は  $I_{xy}$  に比例するので、基準耐力要素と算定対象耐力要素の骨格曲線の第1折れ点における変形角  $\theta_{01}$  および  $\theta_1$  の比率は次のようになる。

$$\frac{\theta_1}{\theta_{01}} = \frac{P_1 \cdot H}{I_{xy}} \cdot \frac{I_{xy0}}{Q_{01} \cdot H_0} = \frac{I_{xy0}}{I_{xy}} \cdot \frac{Z_{xy}}{Z_{xy0}} \quad (10)$$

したがって、 $\theta_1$  と  $\theta_{01}$  の差  $\Delta\theta_1$  は、

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{01} = \theta_{01} \cdot \left( \frac{I_{xy0}}{I_{xy}} \cdot \frac{Z_{xy}}{Z_{xy0}} - 1 \right) \quad (11)$$

$\theta_i$  と  $\theta_{0i}$  の差は荷重  $P_i$  に比例するものとして、

$$\theta_i = \theta_{0i} + \Delta\theta_1 \cdot \frac{P_i}{P_1} = \theta_{0i} + \theta_{01} \cdot \left( \frac{I_{xy0}}{I_{xy}} \cdot \frac{Z_{xy}}{Z_{xy0}} - 1 \right) \cdot \frac{P_i}{P_1} \quad (12)$$

したがって、

$$\text{荷重 } P_i = Q_{0i} \cdot \frac{H_0}{H} \cdot \frac{Z_{xy}}{Z_{xy0}} \quad (13)$$

$$\text{変形 } \delta_i = H \cdot \sin \left\{ \theta_{0i} + \Delta\theta_1 \cdot \frac{P_i}{P_1} = \theta_{0i} + \theta_{01} \cdot \left( \frac{I_{xy0}}{I_{xy}} \cdot \frac{Z_{xy}}{Z_{xy0}} - 1 \right) \cdot \frac{P_i}{P_1} \right\} \quad (14)$$

ここで、 $I_{xy0}$  : 基準耐力要素の壁面二次モーメント

$Z_{xy0}$  : 基準耐力要素の壁面係数

#### 面材張り壁・土壁

荷重は壁幅に比例するものとする。

$$\text{荷重 } P_i = Q_{0i} \cdot \frac{W}{W_0} \quad (15)$$

$$\text{変形 } \delta_i = H \cdot \sin \theta_{0i} \quad (16)$$

#### 柱梁架構

基準耐力要素の骨格曲線はモーメント  $M_{0i}$  -変形角  $\theta_{0i}$  関係で設定する。

$$\text{荷重 } P_i = \frac{M_{0i}}{H} \quad (17)$$

$$\text{変形 } \delta_i = H \cdot \sin \theta_{0i} \quad (18)$$

）鉛直構面の骨格曲線の設定結果

設定した鉛直構面の骨格曲線を図5および表2に示す。筋かいは引張筋かいと圧縮筋かいで骨格曲線が異なる。モルタルについては、H14抽出壁静的実験結果に適合することを条件として、「1P基準」と「2P基準」の2種類の骨格曲線を設定した。また、筋かいとモルタルについて、H14抽出壁振動台実験結果に適合することを条件として「動的」骨格曲線を別途設定した。

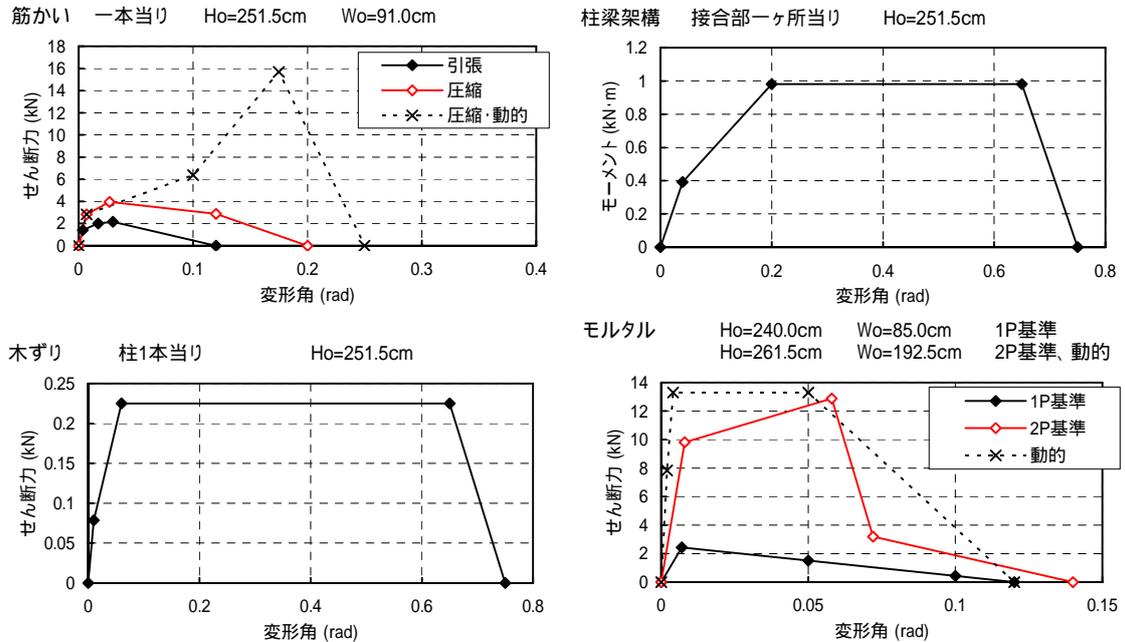


図5 鉛直構面耐力要素の復元力モデル骨格曲線

表2 鉛直構面耐力要素の復元力モデル骨格曲線  
パラメータ (cm, kN, kN・m, rad)

耐力要素	筋かい <sup>1</sup>			柱梁架構 <sup>2</sup>	木ずり <sup>3</sup>	モルタル			合板片面張り <sup>4</sup>
	引張	圧縮	圧縮動的			1P基準	2P基準	動的	
$H_0$	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	240.0	261.5	261.5	260.0
$W_0$	91.0	91.0	91.0			85.0	192.5	192.5	182.0
$P_{s1}$	1.41	2.82	2.82	0.39	0.078	2.43	9.81	7.85	4.90
$P_{s2}$	2.0	3.95	6.37	0.98	0.23	1.51	12.88	13.34	12.26
$P_{s3}$	2.17	2.87	15.69	0.98	0.23	0.43	3.2	13.34	15.20
$P_{s4}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_1$	0.004	0.007	0.007	0.04	0.01	0.007	0.008	0.002	0.002
$s_2$	0.017	0.027	0.1	0.2	0.06	0.05	0.058	0.004	0.012
$s_3$	0.03	0.12	0.175	0.65	0.65	0.1	0.072	0.05	0.030
$s_4$	0.12	0.2	0.25	0.75	0.75	0.12	0.14	0.12	0.073

1 筋かい1本当り。

2 接合部1箇所当り。荷重はモーメント。

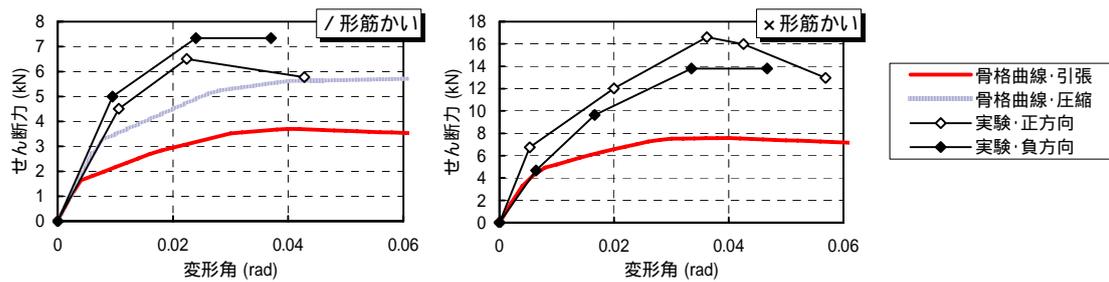
3 柱1本当り。

4 本項の検討対象外。既往の実験結果に基づいて別途設定した。

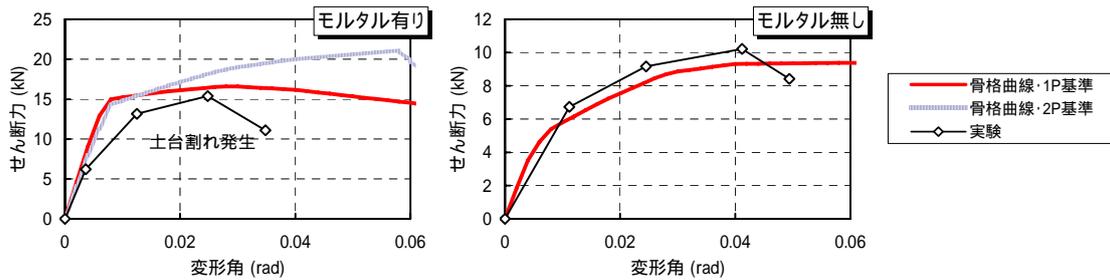
）骨格曲線と既往の実験結果との比較

「動的」を除く上記の骨格曲線および )に示す形状補正方法を用い、異種耐力要素が混在する場合は荷重の単純加算則が成立するものとして、既往の実験に用いられた試験体に対応する骨格曲線を算定する。結果を実験値と比較して図6に示す。筋かいを含む試験体の場合、文献2),6)については算定した骨格曲線は実験値にほぼ適合しているが、その他の

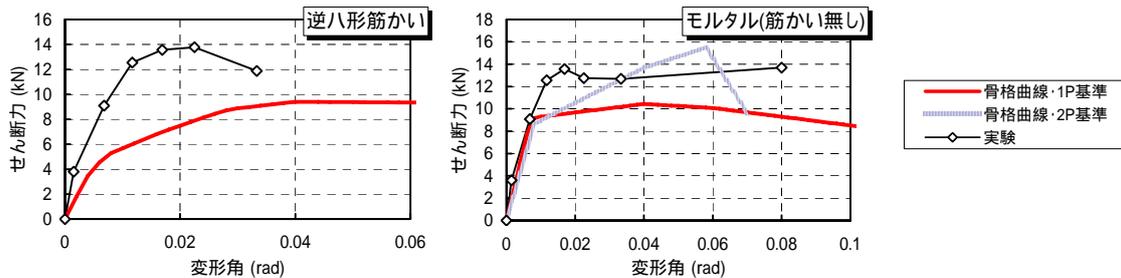
文献による実験値に対しては過小評価となっている。原因として、筋かい端部金物の相違、筋かい周囲の面材・木ずりなどによる筋かいの座屈拘束効果などが考えられる。モルタルを含む試験体の場合は、文献 2),3)に対して概ね一致している。モルタルの骨格曲線設定の際に参照した H14 抽出壁静的実験試験体のモルタル壁仕様はメタルラスであるが、算定した骨格曲線は文献 4),5)の実験値のうち「メタルラス」に対して過大評価となっており、むしろ「ラスシート」に対してよく一致している。この原因は定かでないが、H14 抽出壁静的実験試験体および参照文献の試験体に用いられたモルタル壁のラスおよびタッカーなどの仕様の相違がひとつの原因となっている可能性がある。



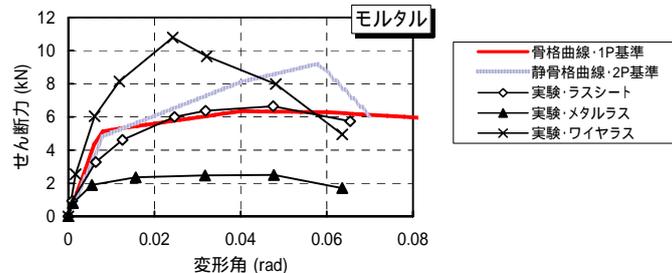
(a) 前川・渋谷の実験<sup>1)</sup>との比較



(b) 熊澤らの実験<sup>2)</sup>との比較

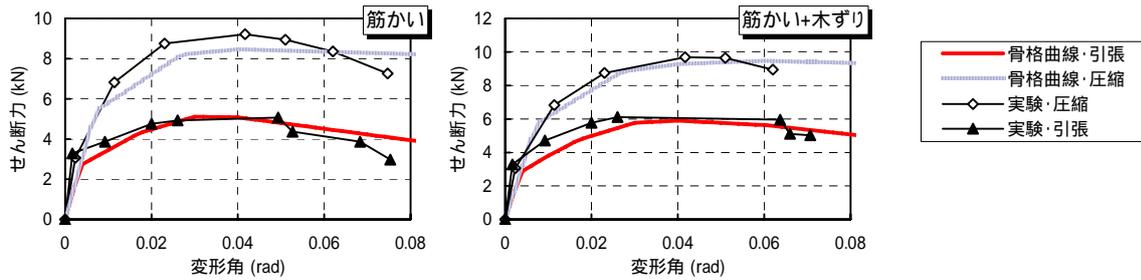


(c) 大橋らの実験<sup>3)</sup>との比較



(d) 坂本・大橋の実験<sup>4),5)</sup>との比較

図6 設定した骨格曲線と既往の実験値との比較



(e) 上西の実験<sup>6)</sup>との比較

図6 設定した骨格曲線と既往の実験値との比較(つづき)

) 骨格曲線と H14 抽出壁静的実験結果との比較

前項と同様の方法で、H14 抽出壁静的実験試験体に対応する骨格曲線を算定し、実験値と比較して図 7 に示す。当然ではあるが、モルタルの骨格曲線として 1P 基準を用いた場合は試験体 1P の実験結果によく一致し、2P 基準を用いた場合は試験体 2P の実験結果によく一致している。本来、1P 基準と 2P 基準の骨格曲線は同一であるべきである。しかし、図 7 では非線形化が始まる荷重は両者でほぼ同じであるものの、それ以降の変形領域で 2P 基準の荷重が 1P 基準を上回っている。) に示すモルタル壁の荷重変形特性補正に用いる壁面二次モーメント  $I_{xy}$  と壁面係数  $Z_{xy}$  はそれぞれ弾性剛性と弾性限耐力に比例する量であり、これらに基づいて補正を行うことが、非線形領域における 1P 基準と 2P 基準の差異の原因と考えられる。したがって、タッカー1 箇所当りの非線形応力変形特性を設定し、増分解析により骨格曲線を評価すれば、この問題は解決されると予想できる。

圧縮筋かいとモルタルについては動的骨格曲線を別途設定した。後述のように、動的骨格曲線は H14 抽出壁振動台実験結果に一致するように設定されるが、図 5 に示すように、特に圧縮筋かいで静的骨格曲線と大きく異なっており、その結果、図 7 のように試験体 2PB では実験結果と異なる骨格曲線が算定される。

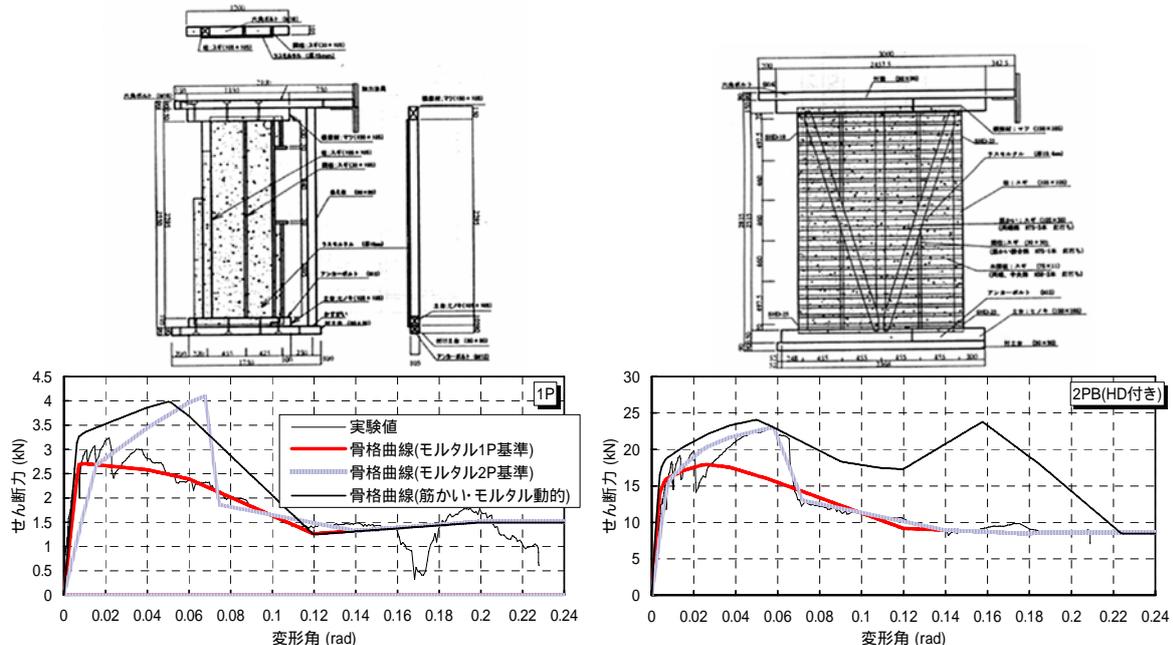


図7 設定した骨格曲線とH14抽出壁静的実験値との比較

）骨格曲線と H14 抽出壁振動台実験結果との比較

H14 抽出壁振動台実験試験体に対応する骨格曲線を算定し、実験値と比較して図 8 に示す。加振 1 回目について、筋かいの静的骨格曲線とモルタルの 1P 基準、2P 基準の骨格曲線による試験体の骨格曲線はいずれも実験結果に対して過小評価となっており、筋かいおよびモルタルの動的骨格曲線を用いた場合は、その度合いが改善されている。図 5 では、 $\pm 0.06\text{rad}$  以内の領域では圧縮筋かいの静的骨格曲線と動的骨格曲線はほぼ同じであるので、この改善は主にモルタルの動的骨格曲線採用に起因している。ただし、モルタル以外の木ずり、柱梁架構も動的荷重に対する耐力増大効果を有する可能性は否定できず、モルタルにのみ動的耐力増大効果を考慮することの妥当性は定かでない。

加振 2 回目について、実験値は負方向  $0.15\text{rad}$  程度以下の変形領域では変形の増加に伴いほとんど剛性が低下しないまま耐力が増大している。これに対して、筋かいの静的骨格曲線とモルタルの 1P 基準、2P 基準の骨格曲線による試験体の骨格曲線は負方向  $0.15\text{rad}$  程度の変形領域における荷重が実験値の  $1/2$  程度になっている(図 8 印部)。H14 抽出壁振動台実験中の観察によれば、試験体は負方向  $0.15\text{rad}$  程度の変形領域で圧縮筋かいの突

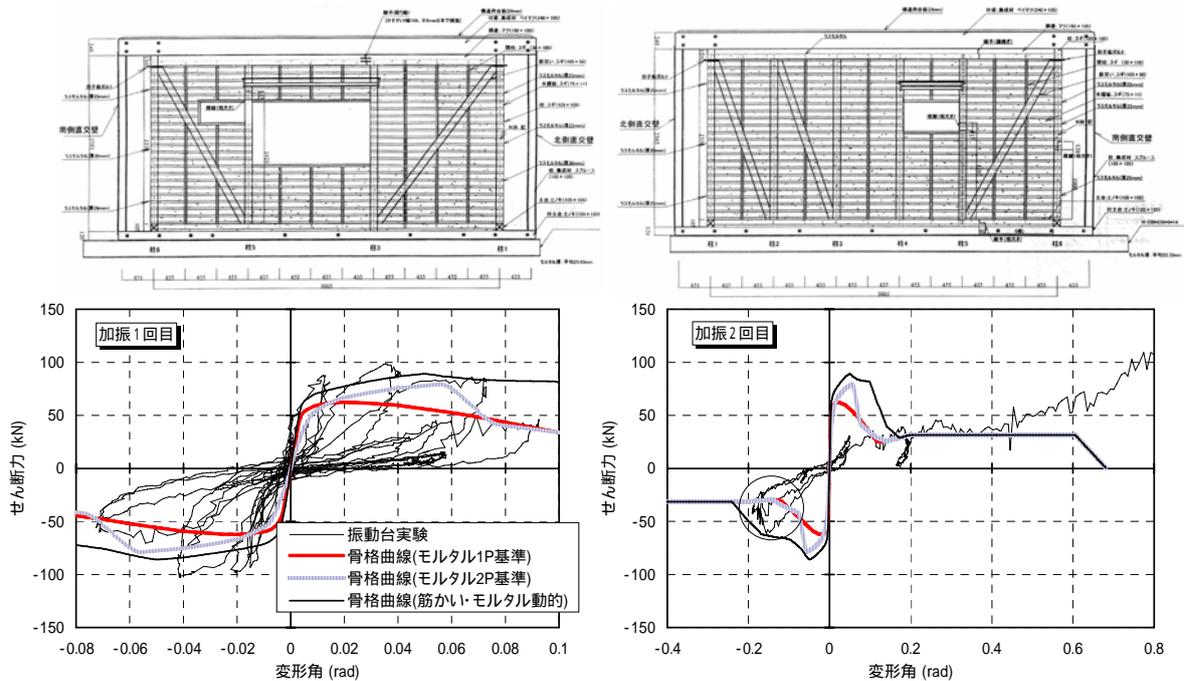


図8 設定した骨格曲線とH14抽出壁振動台実験値との比較

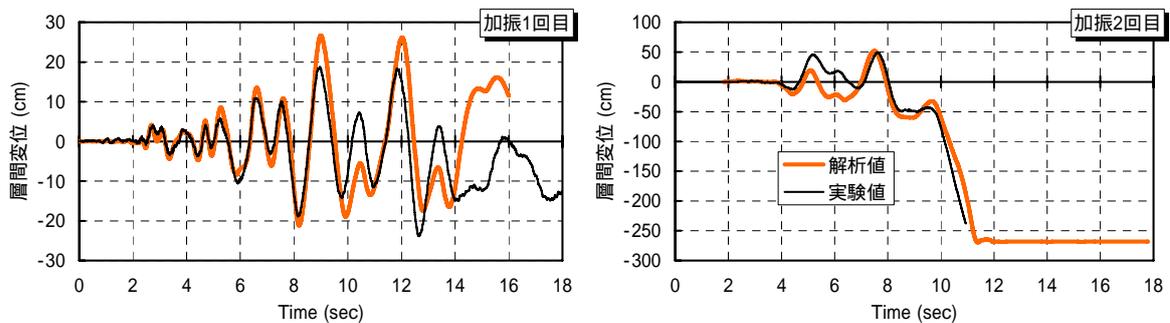


図9 H14抽出壁振動台実験結果と解析値の比較

き上げにより浮かび上がるような挙動を示しており、同変形領域における水平耐力は主に圧縮筋かいに依存していると考えられる。この推測に基づき、圧縮筋かいの動的骨格曲線を図5のように設定し、それを用いて H14 抽出壁振動台実験試験体の骨格曲線を算定すると、図8のように負方向 0.15rad 程度の変形領域における荷重は実験値にほぼ一致する。

次に、H14 抽出壁振動台実験試験体に対応する解析モデルを用いた倒壊応答解析結果と実験結果を比較する。圧縮筋かいとモルタルについては動的骨格曲線を採用する。構面左右両端の柱脚・柱頭接合部には次項に示す 25kN ホールダウン金物の骨格曲線を与える。解析結果と実験結果の比較を図9に示す。加振1回目では加振後の残留変位が両者で異なっているが、加振過程の応答変位はほぼ一致している。加振2回目では 5sec 以前の応答変位は両者でやや異なっているが、5sec 以降の応答変位および倒壊時刻は実験値にほぼ一致している。

以上のように、設定した骨格曲線はモルタル壁では 1P 基準骨格曲線と 2P 基準骨格曲線が異なり、圧縮筋かいとモルタルでは静的骨格曲線と動的骨格曲線が異なる。1P 基準骨格曲線と 2P 基準骨格曲線の差異については、より詳細な解析等により解消されと考えられる。静的骨格曲線と動的骨格曲線の差異については現時点では原因を特定できない。このような問題を残しているが、当面は倒壊応答解析結果が実験結果に概ね一致したことを重視して、圧縮筋かいについては動的骨格曲線、モルタルについては 2P 基準動的骨格曲線を用いる。

) 柱脚・柱頭接合部の骨格曲線

既往の実験結果に基づき、柱脚・柱頭接合部の引張力に対する復元力モデル骨格曲線を図10および表3のように設定する。

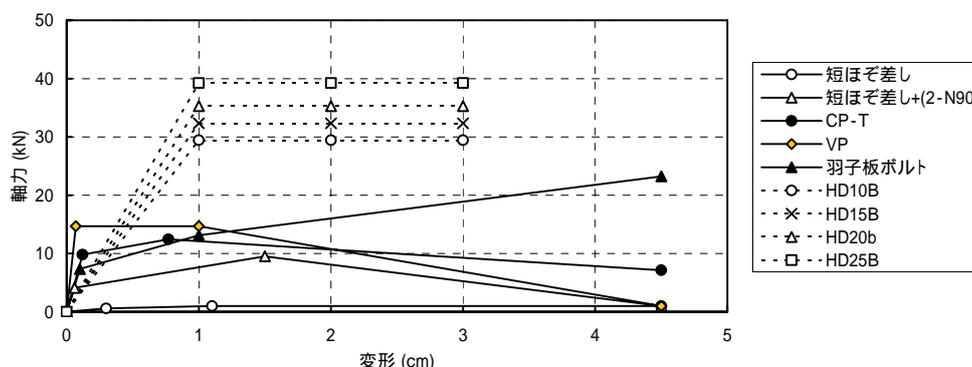


図10 柱脚・柱頭接合部の復元力モデル骨格曲線

表3 柱脚・柱頭接合部の復元力モデル骨格曲線  
パラメータ (kN, cm)

種類	短ほぞ差	2-N90	CP-T	VP	羽子板ボルト	HD10B	HD15B	HD20B	HD25B
$P_{s1}$	0.59	4.12	6.47	14.71	7.35	29.42	32.36	35.30	39.22
$P_{s2}$	0.98	9.51	9.32	14.71	13.14	29.42	32.36	35.30	39.22
$P_{s3}$	0.98	0.98	6.47	0.98	23.24	29.42	32.36	35.30	39.22
$s_1$	0.3	0.06	0.11	0.07	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0
$s_2$	1.1	1.5	0.89	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$s_3$	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.0	3.0	3.0	3.0

2) 演算の高速化

後述のように、実規模建物に対応する解析モデルの自由度  $n$  はほとんどの場合 1000 を上回る。平成 15 年度は多元連立方程式の解法をガウスの消去法としていた。本解法では演算時間は  $n^3/3$  に比例するため、このような巨大な連立方程式を応答解析の各ステップで解くことにより膨大な演算時間が必要となる。後述の既存住宅に対応する解析モデルの解析では、CPU クロック周波数 3.5GHz のコンピュータを用いた場合、解析時間は約 400 時間となり、解析プログラムとしての実用性を大きく損なうことが明らかとなった。ガウスの消去法以外の解法としてコレスキー法があるが、本方法を用いても解析時間はガウスの消去法の 1/2 程度にしか短縮されない。この問題に対応するために解法を収束計算法に変更することとした。これにより、解析速度は約 30 倍に向上し、解析プログラムの実用性を確保することができた。

収束計算法は SOR(Successive Over-Relaxation)法的一种である Gauss-ザイデル法に過大修正法を併用した方法<sup>10)</sup>とする。本収束計算法の理論を以下に示す。

対象とする多元連立方程式を次のように表す。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

収束計算の反復回数  $k+1$  回目の解  $x_i^{(k+1)}$  を次のように求める。

$$\begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= x_1^{(k)} + \phi \cdot (\hat{x}_1^{(k+1)} - x_1^{(k)}) \\ x_2^{(k+1)} &= x_2^{(k)} + \phi \cdot (\hat{x}_2^{(k+1)} - x_2^{(k)}) \\ &\dots\dots \\ x_n^{(k+1)} &= x_n^{(k)} + \phi \cdot (\hat{x}_n^{(k+1)} - x_n^{(k)}) \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、 $\hat{x}_i^{(k+1)}$  : 反復回数  $k+1$  回目の過大修正前の解  
 $\phi$  : 過大修正係数

$\hat{x}_i^{(k+1)}$  は次のように求める。

$$\begin{aligned} \hat{x}_1^{(k+1)} &= \{b_1 - (a_{12} \cdot x_2^{(k)} + a_{13} \cdot x_3^{(k)} + \dots + a_{1n} \cdot x_n^{(k)})\} / a_{11} \\ \hat{x}_2^{(k+1)} &= \{b_2 - (a_{21} \cdot x_1^{(k+1)} + a_{23} \cdot x_3^{(k)} + \dots + a_{2n} \cdot x_n^{(k)})\} / a_{22} \\ &\dots\dots \\ \hat{x}_n^{(k+1)} &= \{b_n - (a_{n1} \cdot x_1^{(k+1)} + a_{n2} \cdot x_2^{(k+1)} + \dots + a_{nn-1} \cdot x_{n-1}^{(k)})\} / a_{nn} \end{aligned} \quad (21)$$

反復回数  $k+1$  回目の解の誤差  $err_i$  を次のように計算する。

$$err_i = \left| b_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \right| \quad (22)$$

自由度  $i$  に対応する節点質量  $m_i$  に対する  $err_i$  の比率  $err_i / m_i$  がすべて 0.01 未満となるまで反復することとした。なお、初期値  $x_i^{(0)}$  は 0 とする。過大修正係数  $\phi$  は収束反復回数が最小となることを条件として、試行錯誤的に 1.25 とした。

### 3) 実規模建物の倒壊応答解析

#### a) 解析モデル

平成 15 年度の解析モデル設定方法、および 1)b),c)の復元力モデル設定方法によって、対象建物に対応する解析モデルを図 11 のように設定する。本解析モデルの規模は次のようになる。

自由節点数 394  
自由度数 1182  
トラス(軸力)要素数 1136  
材端バネ要素数 214  
多節点曲げ要素群数 72

鉛直構面耐力要素として筋かい、モルタル、木ずり、柱梁架構を考慮する。鉛直構面耐力要素および柱脚・柱頭接合部の復元力モデルパラメータは 1)b),c)で設定した値を用いる。柱脚・柱頭接合部の仕様は次の 2 種類を設定する。

#### Case 1 (既存状態)

1 階柱脚：2-N90      その他：短ほぞ差

#### Case 2 (補強仕様)

通し柱柱脚：HD15B      通し柱柱頭：羽子板ボルト      その他：CP-T

水平構面には 1)b),c)に示す合板張り耐力要素の復元力モデルを設定する。

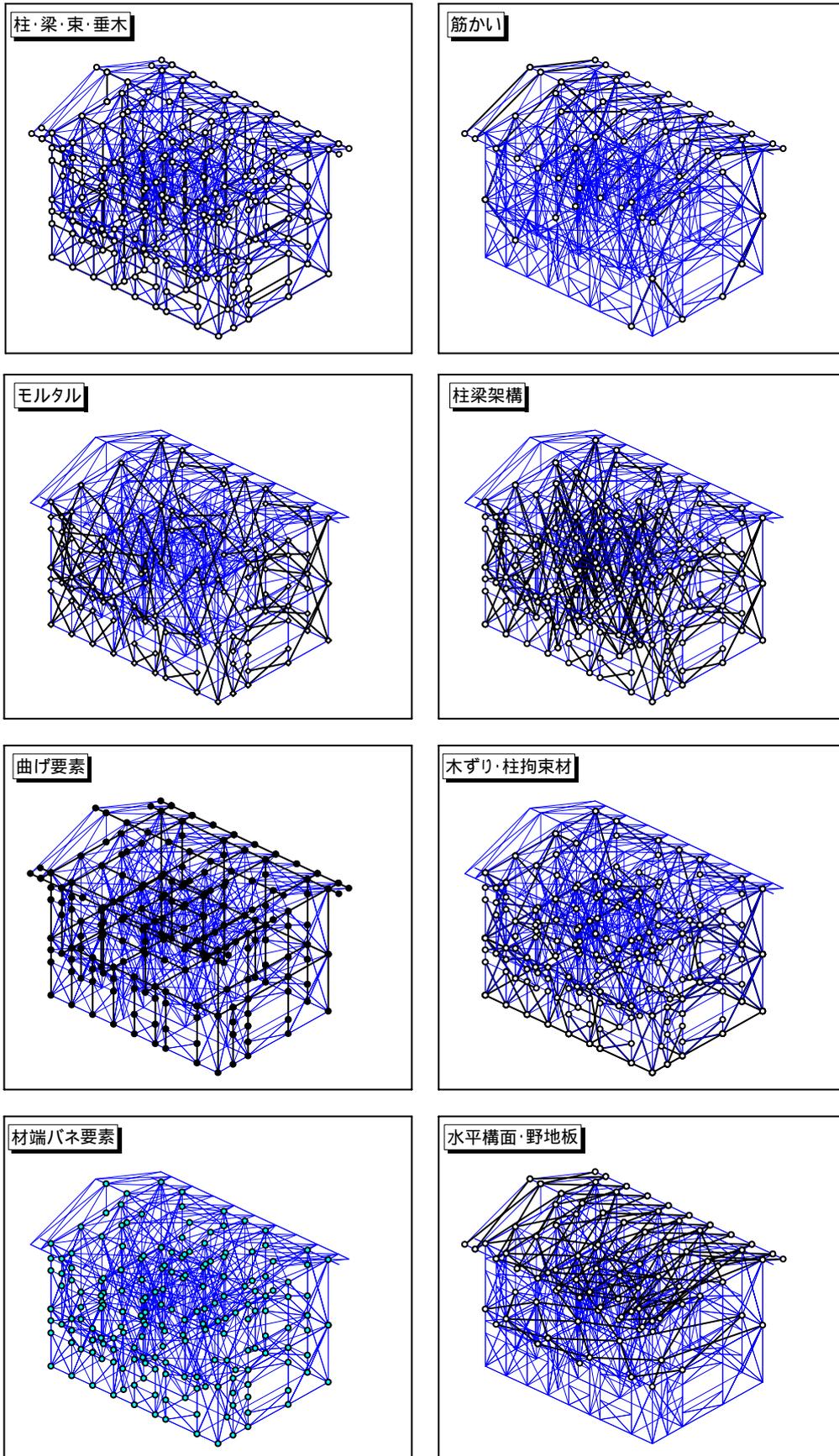


図11 解析モデルの構成

b) 入力波 解析対象時間 解析の時間刻み

入力波は平成 14 年度の振動台実験に用いた兵庫県南部地震(1995)における JR 鷹取記録、および新潟中越地震(2004)における川口記録・小千谷記録<sup>11)</sup>とする。図 12、13 に入力波の加速度時刻歴、および加速度応答スペクトル  $S_a$  - 変位応答スペクトル  $S_d$  曲線を示す。解析対象時間は記録先頭から 20sec とし、解析の時間刻みは 1/1000sec とする。

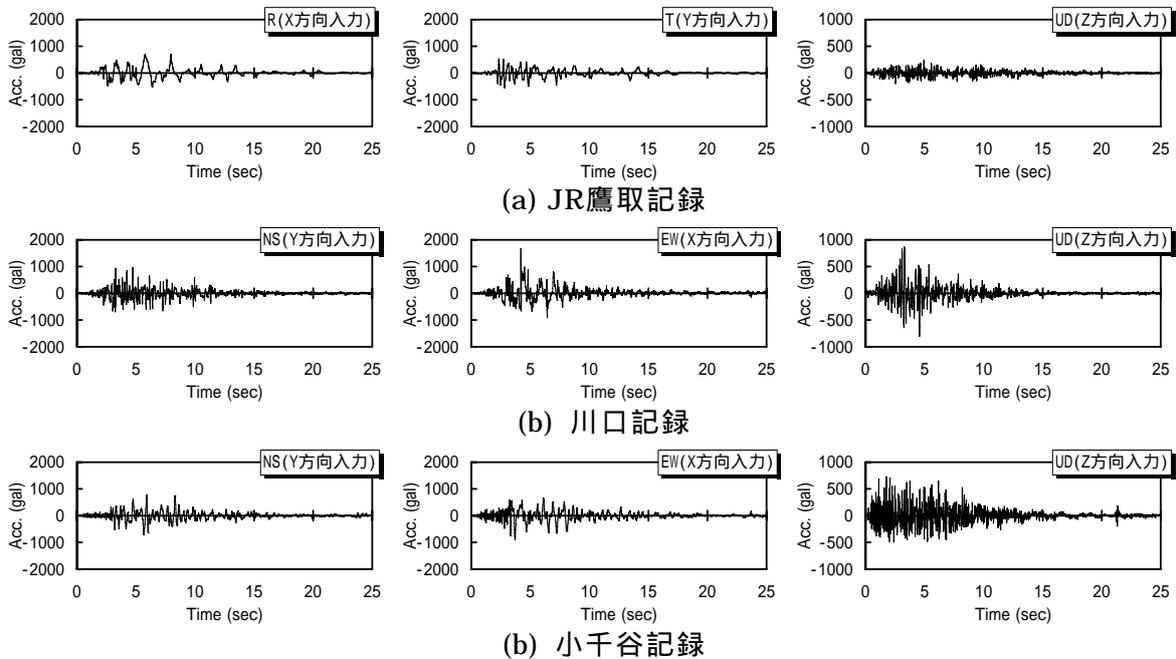


図12 入力波の加速度時刻歴

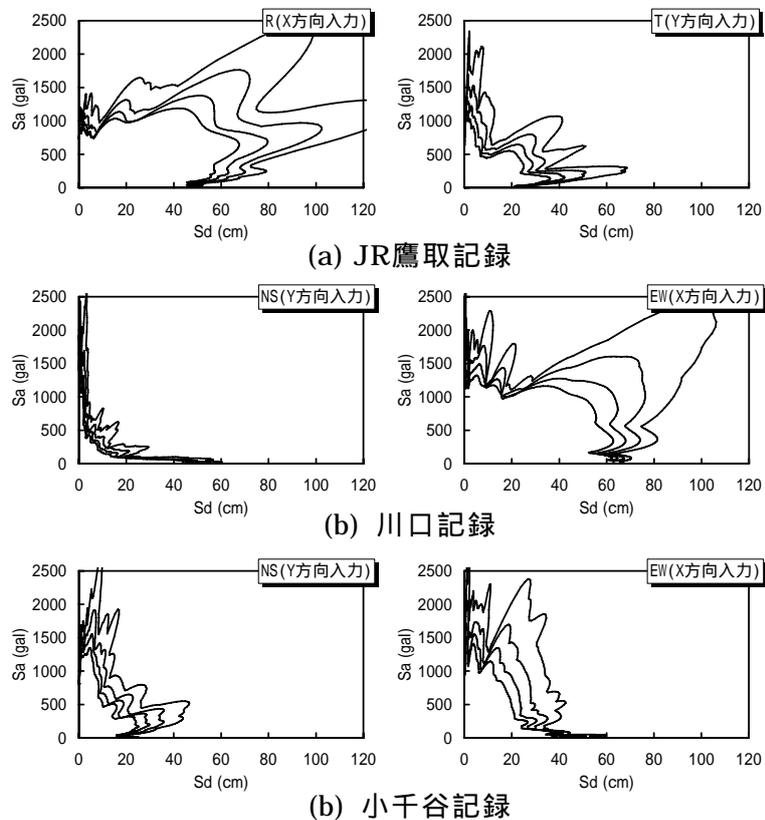


図13 入力波の  $S_a - S_d$  曲線

c) 解析結果

応答層間変位時刻歴を図 14 に示す。柱脚・柱頭接合部仕様 Case1 の解析モデルでは JR 鷹取記録および川口記録を入力した場合に、開始後 8sec 付近で倒壊に至っている。小千谷記録を入力した場合は倒壊していない。柱脚・柱頭接合部仕様 Case2 の解析モデルではいずれの地震動に対しても倒壊していない。柱脚・柱頭接合部の金物補強は倒壊防止に有効といえる。ただし、小千谷記録入力の場合、1 階 X 方向では最大変位および残留変位のいずれ

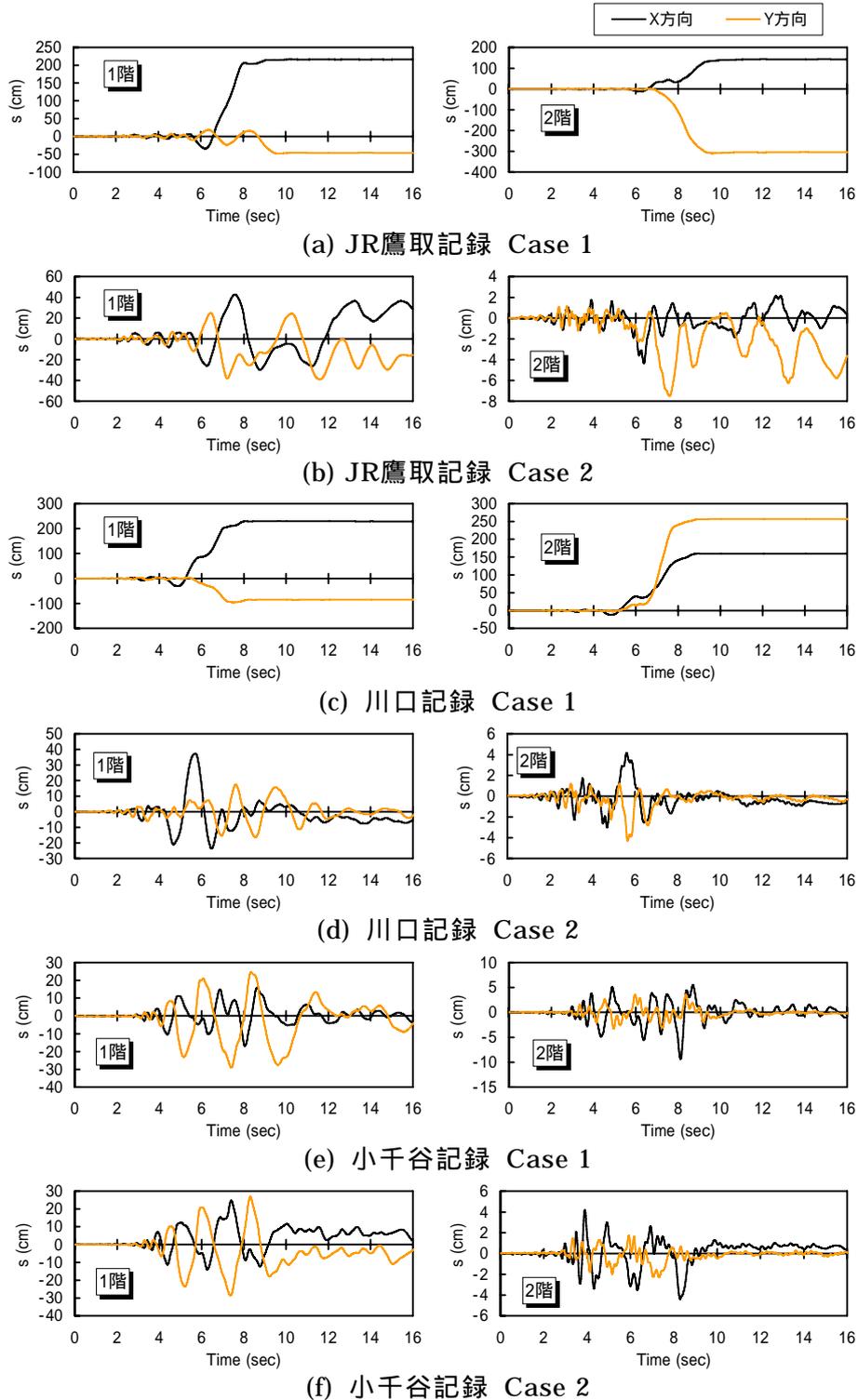


図14 応答層間変位時刻歴

れも Case 1 より Case 2 の方が大きい。

解析モデルの応答変形・倒壊過程を図 15～20 に示す。定性的には軸組構法木造住宅の地震動による変形・倒壊過程として妥当といえるが、定量的妥当性については比較対照となる実験結果が存在しないので、判断できない。

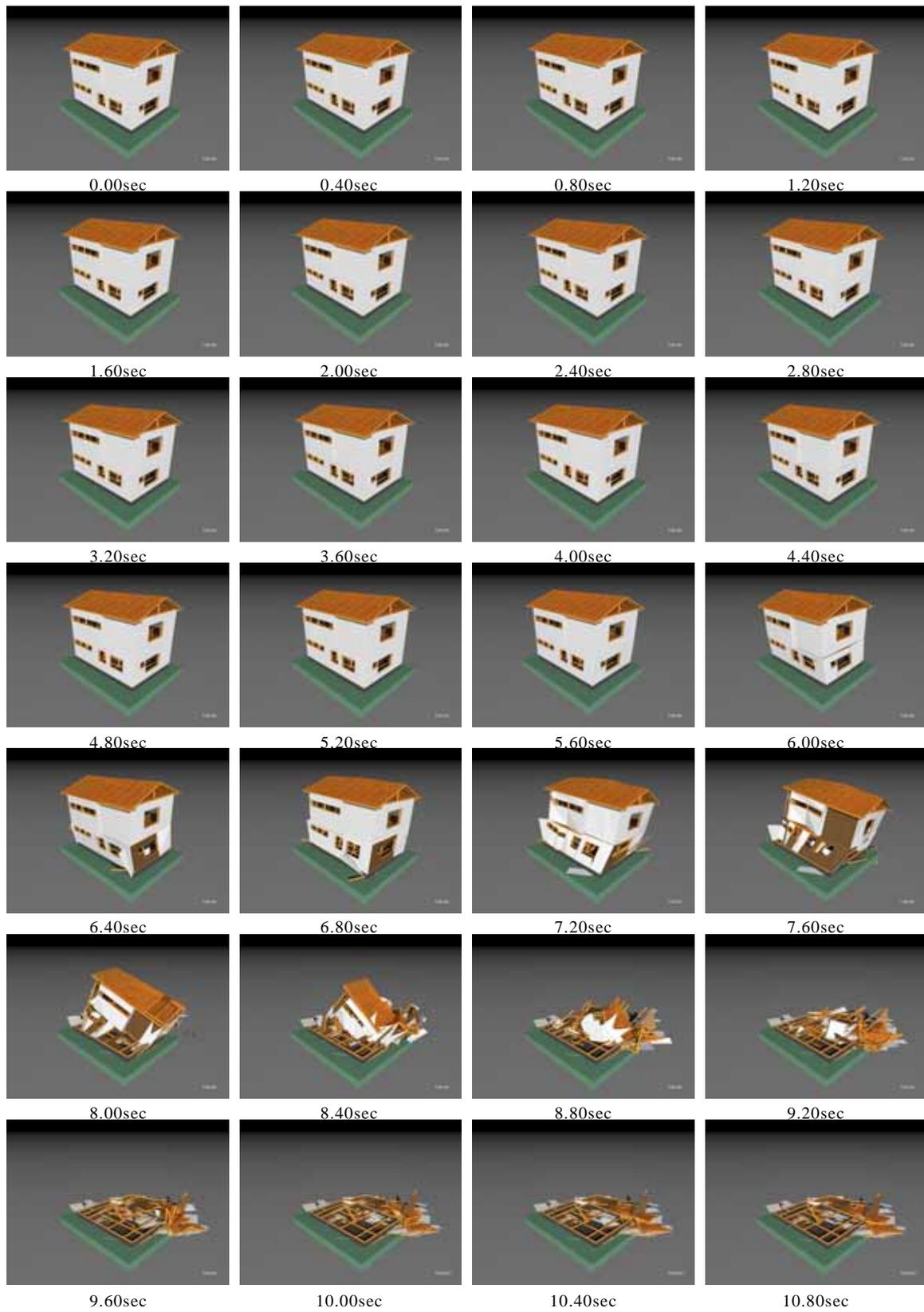


図15 解析による応答変形・倒壊過程 (JR鷹取記録 Case 1)

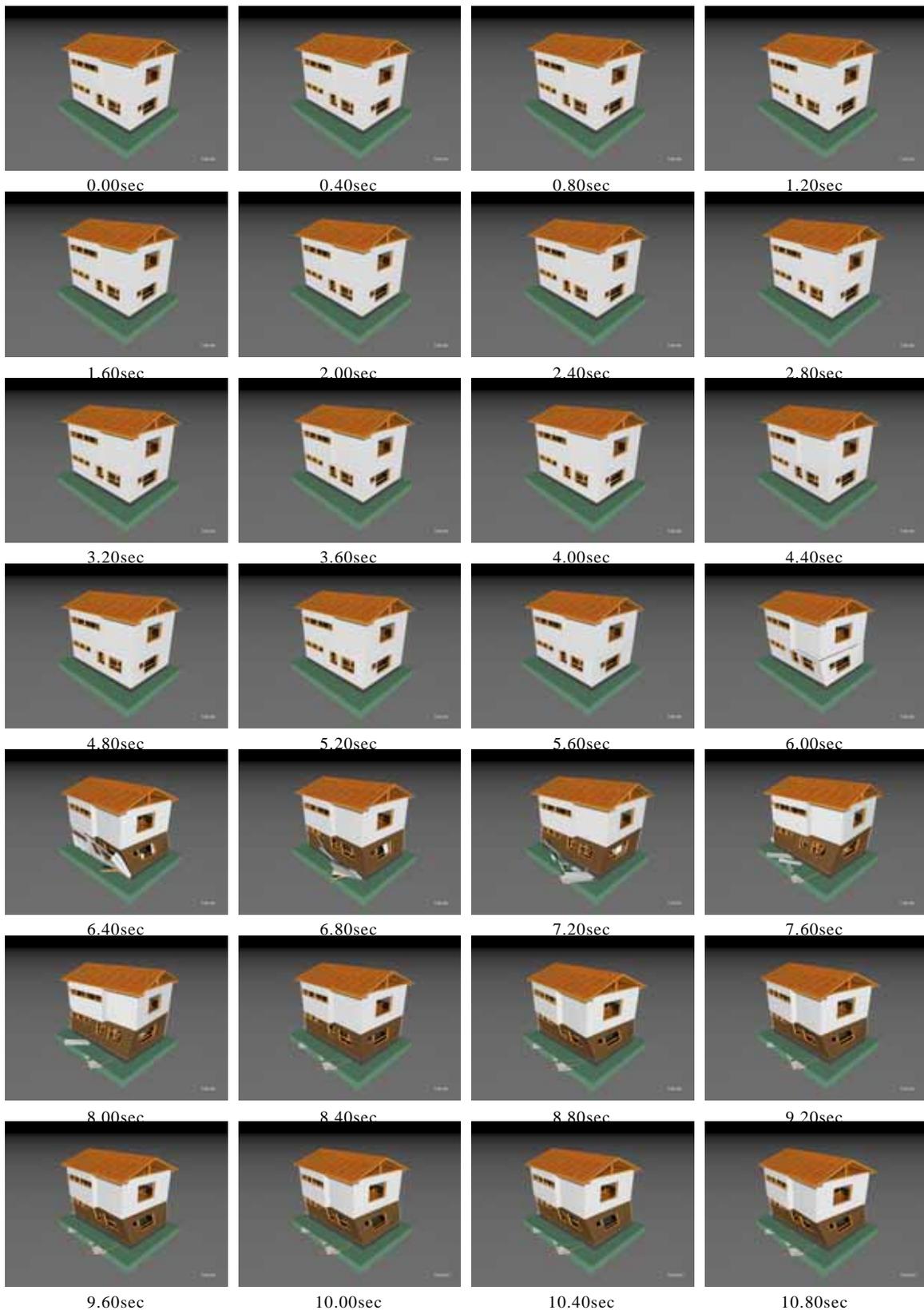


図16 解析による応答変形・倒壊過程 (JR鷹取記録 Case 2)

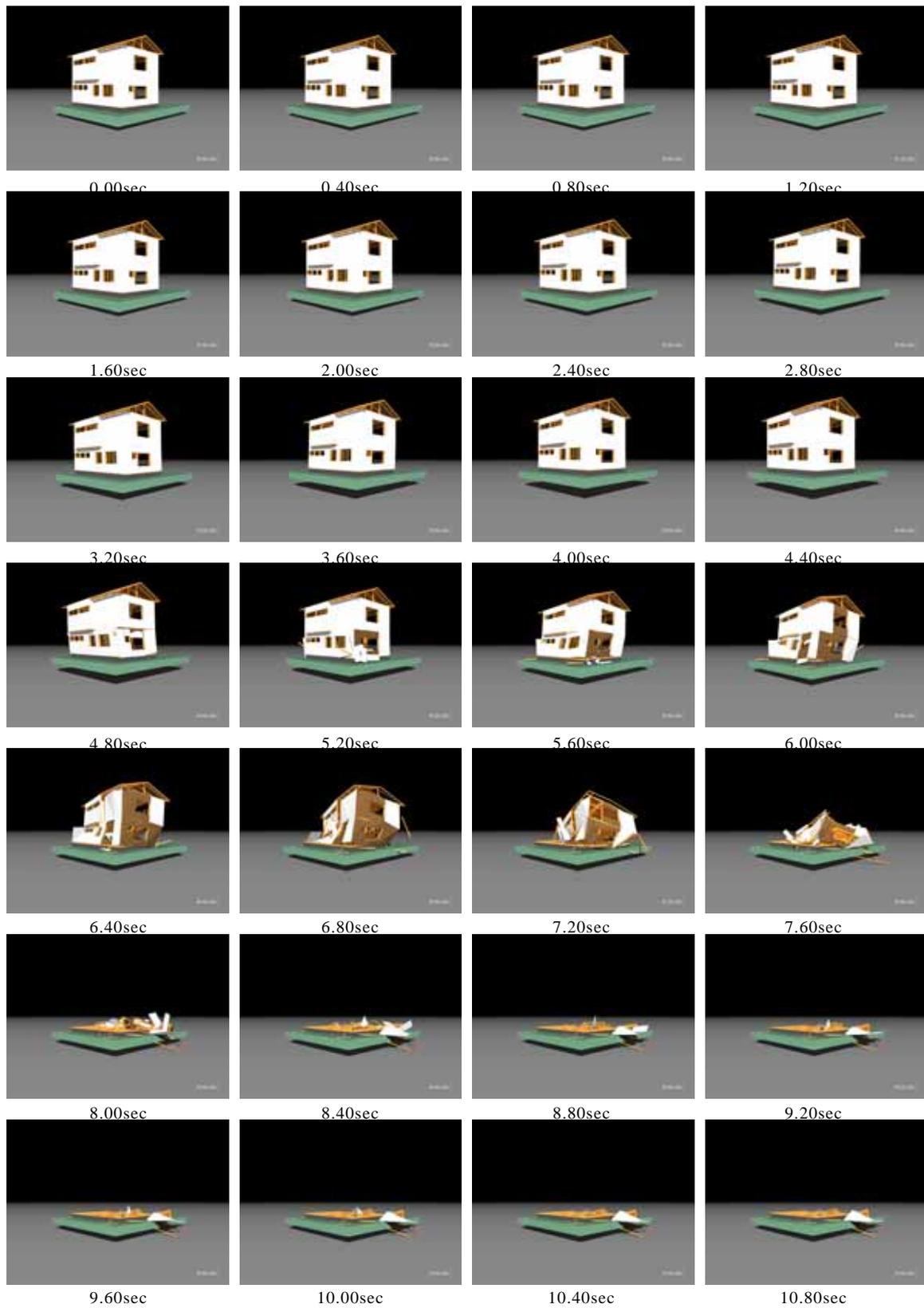


図17 解析による応答変形・倒壊過程 (川口記録 Case 1)



図18 解析による応答変形・倒壊過程 (川口記録 Case 2)



図19 解析による応答変形・倒壊過程 (小千谷記録 Case 1)

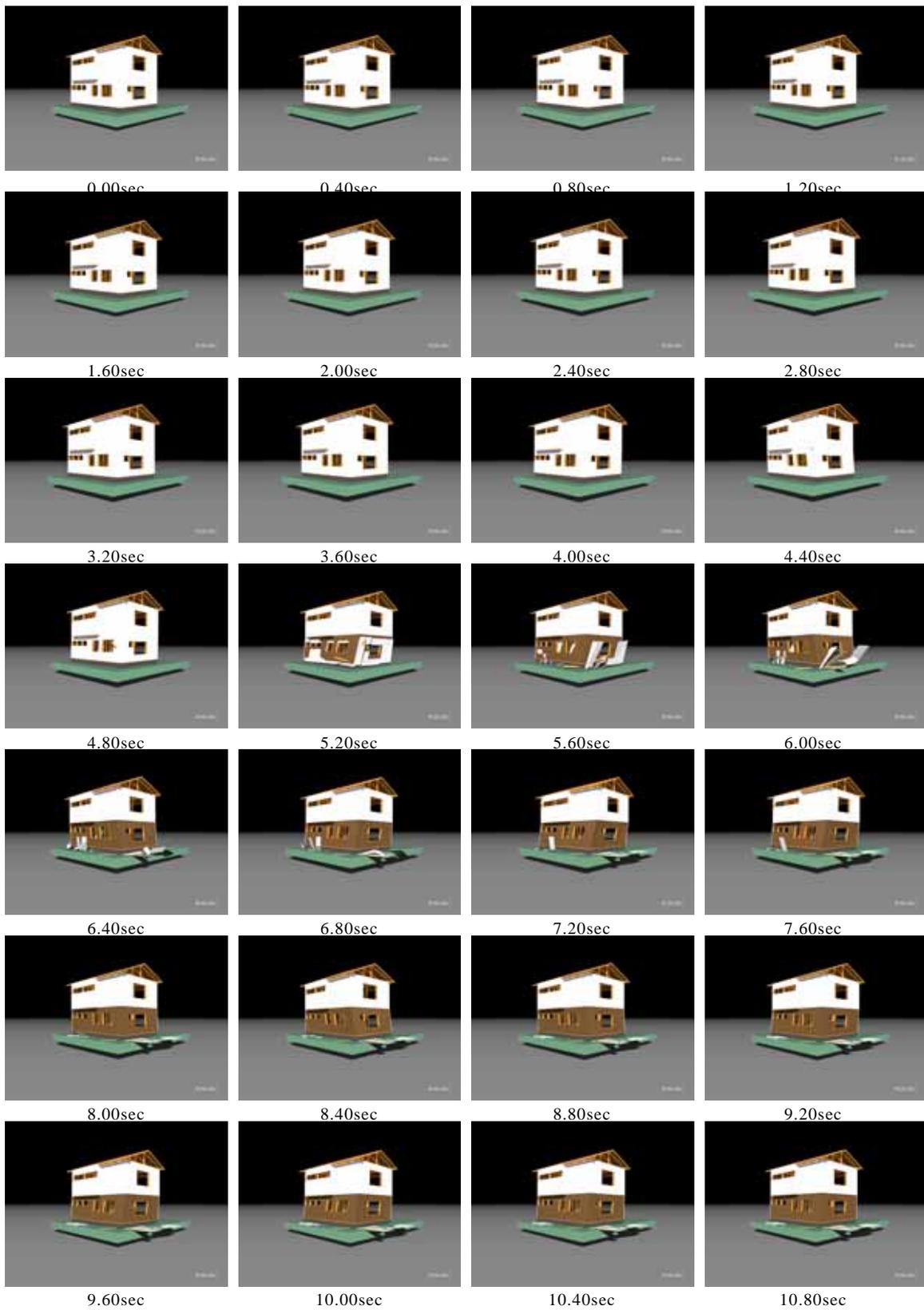


図20 解析による応答変形・倒壊過程 (小千谷記録 Case 2)

#### 4) データ入出力作業の省力化に向けた基本検討

##### a) データ入力作業省力化の方針

###### 1) 解析モデル定義データ

解析モデルを定義するために必要なデータを以下に示す。

#### 節点

1 節点当り 1 レコード(行)で定義する。[ ]内数値はフィールド(列)番号を表す。

- [1]番号: 整数
- [2]座標(X): 実数(cm)
- [3]座標(Y): 実数(cm)
- [4]座標(Z): 実数(cm)
- [5]固定条件(X): 整数(固定:1 または自由:0)
- [6]固定条件(Y): 整数(固定:1 または自由:0)
- [7]固定条件(Z): 整数(固定:1 または自由:0)
- [8]質量: 実数(t)

#### 軸力要素

1 要素当り 1 レコードで定義する。

- [1]軸力要素番号: 整数
- [2]始点側節点番号: 整数
- [3]終点側節点番号: 整数
- [4]特性番号: 整数
- [5]耐力倍率: 実数
- [6]破断回転角: 実数
- [7]始点側相対回転角参照先節点番号: 整数
- [8]終点側相対回転角参照先節点番号: 整数
- [9]破断参照要素番号: 整数

なお、軸力要素の種類には下記のものがある。

土台、床梁、屋根梁、棟木、柱、小屋束  
筋かい、木ずり、モルタル、柱梁フレーム  
窓台・まぐさ、柱拘束材、水平ブレース、野地板  
垂木、雲筋かい

#### 要素端部バネ

1 要素当り 1 レコードで定義する。

- [1]端部バネ要素番号: 整数
- [2]始点側節点番号: 整数
- [3]終点側節点番号: 整数
- [4]特性番号: 整数
- [5]耐力倍率: 実数
- [6]接続先要素番号: 整数

- [7]破断回転角: 実数
- [8]座標系設定節点番号 1  
(接続要素との共有節点): 整数
- [9]座標系設定節点番号 2  
(端部バネ要素軸上で接続要素方向にある節点): 整数
- [10]座標系設定節点番号 3  
(座標系設定節点 1 から全体座標系 X 方向にある節点): 整数
- [11]座標系設定節点番号 4  
(座標系設定節点 1 から全体座標系 Y 方向にある節点): 整数

なお、要素端部バネの種類には下記のものがある。

柱頭、柱脚、小屋束脚部、小屋束頭部、窓台・まぐさ端部

### 多節点曲げ要素

1 要素群当り複数レコードで定義する。

第一レコードのフィールド

- [1]曲げ要素群番号: 整数
- [2]群に含まれる要素数: 整数
- [3以降]群が接続する節点番号の配列: 整数

第二以降のレコードのフィールド

- [1]要素番号: 整数
- [2]端部固定条件: 整数(両端回転バネ:1 または両端固定:2)
- [3]始端固定度: 実数(フィールド[2]が 1 のとき有効)
- [4]終端固定度: 実数(フィールド[2]が 1 のとき有効)
- [5]始端限界値: 実数(フィールド[3]が 0 以外のとき有効)
- [6]終端限界値: 実数(フィールド[4]が 0 以外のとき有効)
- [7]従属する軸バネ要素 1: 始点回転バネの破断が従属する材端バネ要素番号#1
- [8]従属する軸バネ要素 1: 始点回転バネの破断が従属する材端バネ要素番号#2
- [9]従属する軸バネ要素 1: 終点回転バネの破断が従属する材端バネ要素番号#1
- [10]従属する軸バネ要素 1: 終点回転バネの破断が従属する材端バネ要素番号#2
- ([7]~[10]はフィールド[2]が 1 のとき有効)

なお、多節点曲げ要素には下記のものがある。

通し柱、管柱、梁

### ) ユーザー入力情報

前項の解析モデル定義データはできるだけユーザー入力情報から自動生成することとして、ユーザー入力情報を削減し、入力作業の省力化を図る。また、ユーザー入力情報は、復元力特性のような数値データを除き、座標データ・位置データなどの視覚化が可能なデータは Graphical User Interface による入力とし、併せて省力化を図る。

表 4 に、解析モデル定義データと、これを生成するために参照するユーザー入力情報の対応を示す。

表4 解析モデル定義データとユーザー入力情報の依存関係

解析モデル定義データ	依存関係	ユーザー入力情報
節点		モデル識別情報
土台(要素)		基準高さ
床梁(要素)		基準平面グリッド
屋根梁(要素)		荷重表
棟木(要素)		復元力特性リスト
垂木(要素)		断面リスト
柱、小屋束(要素)		梁類(部材)
柱梁フレーム(要素)		柱類(部材)
筋かい、雲筋かい(要素)		筋かい(部材)
水平ブレース、野地板(要素)		接合部(部材)
木ずり、モルタル(要素)		荷重
まぐさ、柱拘束材(要素)		屋根
要素端部バネ		床等(水平構面)
曲げ要素		吹抜け(水平構面)
	壁(壁面)	
	開口部(壁面)	

モデル識別情報 ( []内数は項目番号 )

[1]モデル名: 任意長文字列

[2]備考:任意長文字列

基準高さ平面 ( 小屋組を除く各階床の代表高さ当り 2 項目で指定 )

[1]名称:任意長文字列 ( 「 2 階床 」 等 )

[2]高さ:実数(cm)

基準平面グリッド ( 各通りの間隔ごとに 2 項目で指定 )

[1]名称:任意長文字列 ( 「 い 」 等 )

[2]間隔:実数(cm)

等間隔であることは要しない。入力時点ではサブグリッド ( 整数分の 1 グリッド ) および数 c m 単位 ( 拡大状態に依存する ) のスナップを可能とする。

荷重表 ( 部分の重量ごとに 2 項目で指定 )

[1]名称:任意長文字列 ( 「 居室 」 等 )

[2]重量:実数(kN,kN/m,kN/m<sup>2</sup>)

復元力特性リスト

[1]名称: 任意長文字列 ( 「 筋かい 」, 「 CP-T 」, 「 スギ 」 等 )

[2]特性タイプ: 設定可能なものからタイプ名称で選択

[3以降]パラメータ群: 実数 ( 特性設定に必要なパラメータ )

特性タイプ ( 線形、非線形弾性、履歴を持つもの等 ) に必要なパラメータ群を与えるこ

とで、個々の要素に対応させるものとする。特性タイプの追加は、規定するインターフェイスを有した動的参照可能なライブラリを登録することにより行う。

断面リスト（断面ごとに3項目で指定）

[1]名称:任意長文字列（「105×105」等）

[2]幅: 実数(cm)

[3]せい:実数(cm)

復元力特性と組合せ個々の特性とするが、出力時に参照するため寸法を操作することにより、より現実感のある出力とできる。

部材（部材ごとに以下の項目を指定）

図 21 に基準高さ平面上の部材入力のイメージを示す。

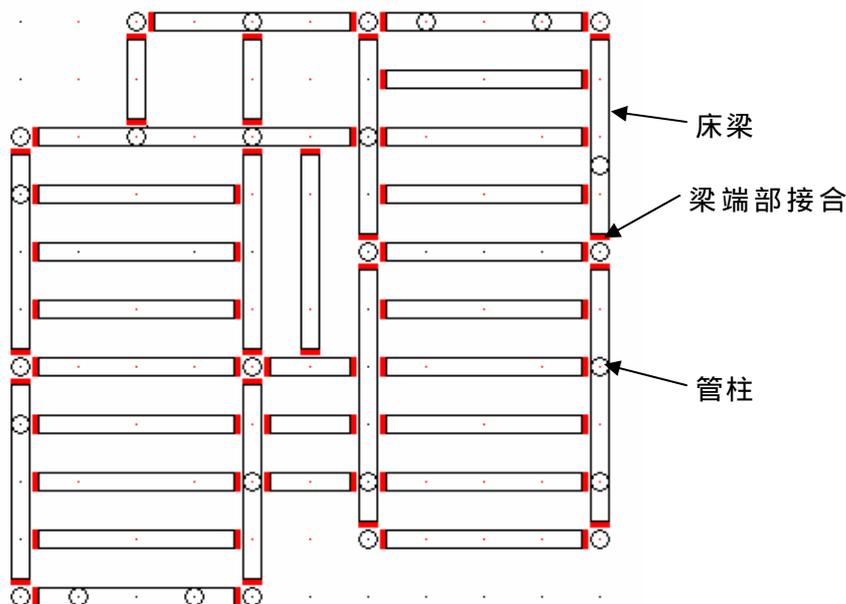


図 21 部材入力イメージ

#### 梁類

[1]部材名: 選択

[2]部材種類: 「梁類」選択

[3]樹種: で登録した特性より選択

[4]母材断面: で登録した特性より選択

[5]位置情報: 入力選択中の基準高さ平面上で2点指定

[7]特殊高さ: 実数（端部が基準高さ平面以外の高さにある場合）cm

#### 柱類

[1]部材名: 選択

[2]部材種類: 「柱類」選択

[3]樹種: で登録した特性より選択

[4]母材断面: で登録した特性より選択

[5]位置情報: 入力選択中の基準高さ平面上で1点指定

[7]方向: 幅とせいが異なる場合、せいの方向を指定

[8]特殊高さ: 実数（頭部が基準高さ平面以外の高さにある場合）cm

## 筋かい

- [1]部材名: 選択
- [2]部材種類: 「筋かい」選択
- [3]樹種: で登録した特性より選択
- [4]母材断面: で登録した特性より選択
- [5]端部接合: で登録した特性より選択
- [6]位置情報: 入力選択中の基準平面上で2点指定
- [7]方向: 高い位置に取付く側を指定
- [8]特殊高さ: 実数(頭部が基準平面以外の高さにある場合) cm

## 接合部

- [1]部材名: 選択
- [2]部材種類: 「接合部」選択
- [3]特性: で登録した特性より選択
- [4]位置情報: 入力選択中の基準平面または立面上で1点指定(重複可)

## 屋根

- [1]屋根種類: で登録した特性より選択
- [2]勾配: 実数
- [3]勾配方向: 入力選択中の基準平面上で2点指定
- [4]位置情報: 入力選択中の基準平面上で多角形頂点指定
- [5]高さ情報: 入力選択中の基準平面と多角形が交差する線分上の点または多角形で最高となる頂点の高さ(cm)

## 水平構面

図 22 に水平構面(多角形頂点指定による領域情報)入力イメージを示す。

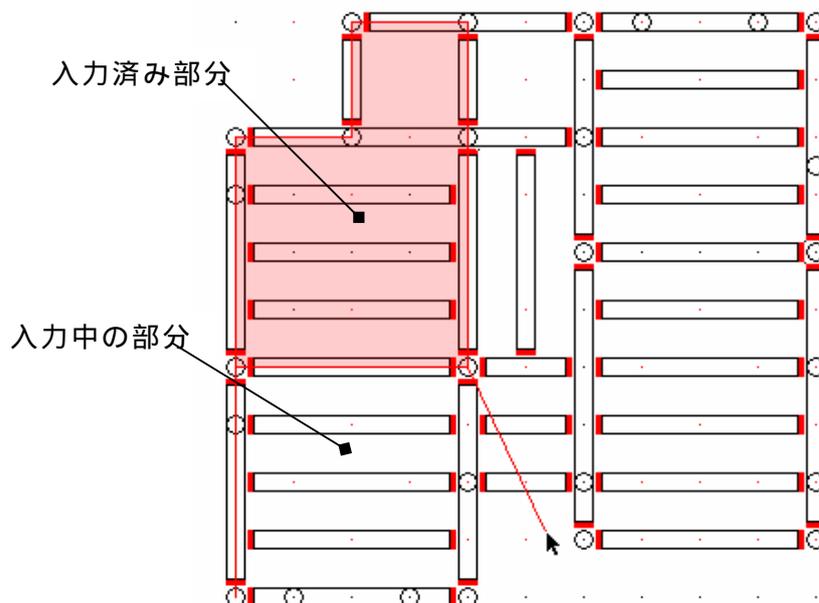


図 22 水平構面入力イメージ

## 床等

- [1]名称: 選択
- [2]種類: で登録した特性より選択
- [3]位置情報: 入力選択中の基準平面上で多角形頂点指定

## 吹抜け

- [1]種類: の「開口」を選択（既定の特性に含む）
- [2]位置情報: 入力選択中の基準平面上で2点（矩形の場合）または多角形頂点指定

## 荷重

- [1]種類: で登録した荷重より選択
- [2]位置情報: 入力選択中の基準平面上で2点（矩形の場合）または多角形頂点指定

## 壁面

### 壁

- [1]種類: で登録した特性より選択
- [2]位置情報: 入力選択中の基準立面上で2点（矩形の場合）または多角形頂点指定

## 開口部

- [1]種類: の「開口」を選択
- [2]位置情報: 入力選択中の基準立面上で2点（矩形の場合）または多角形頂点指定

## b) データ出力作業省力化の方針

解析結果をシェーディング画像を用いたアニメーションとして可視化するためのシステムに関して、現在までの成果および作業省力化の方針を報告する。

）アニメーション化システムの概要

アニメーション化システムの処理の全体像を図 23 に示す。

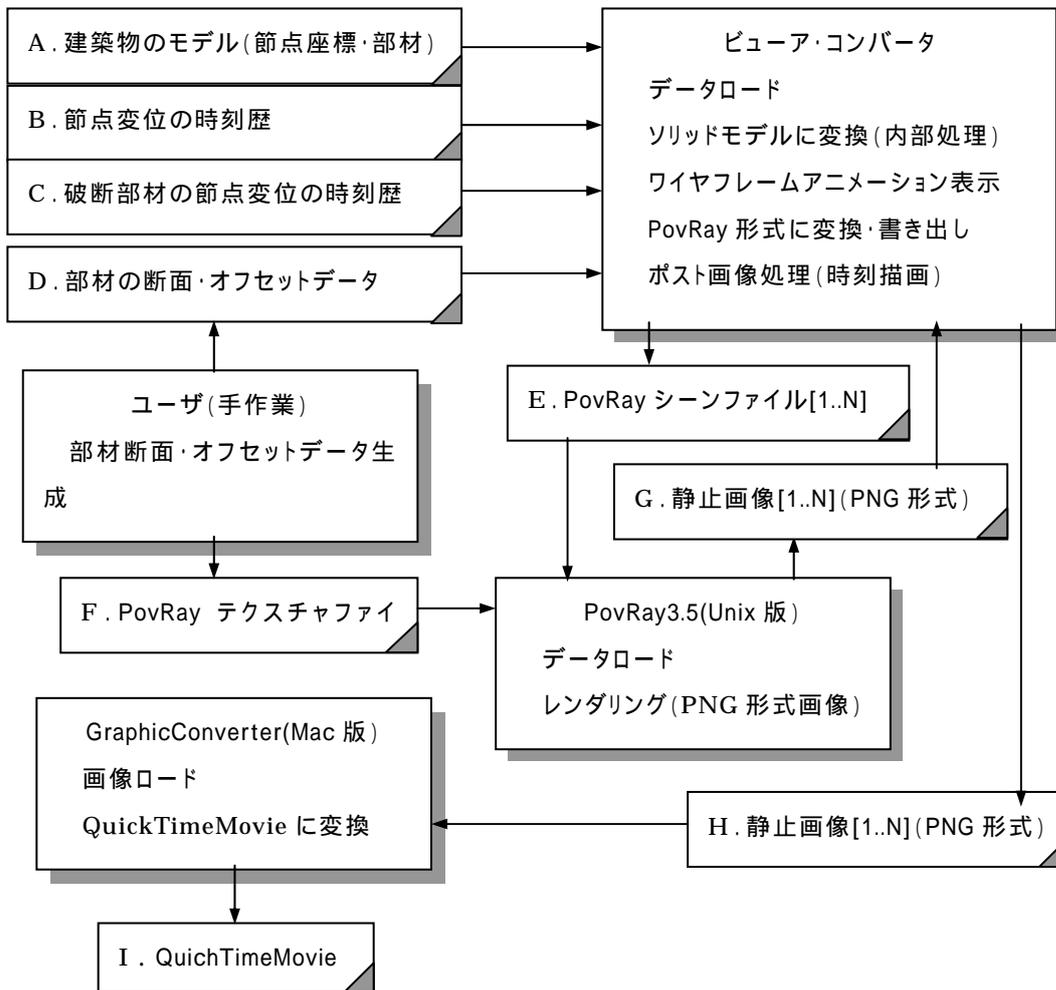


図 23 アニメーション化システムの処理

A 建築物のモデルは解析プログラムの入力として、B 節点変位の時刻歴および C 破断部材の接点変位の時刻歴は解析プログラムの出力として与えられる。D 部材の断面・オフセットデータおよび F テクスチャファイルは、アニメーション化プロセス特有の情報であり、新たに生成する必要がある。現時点では、手作業でテキストファイルを編集し生成している。

）部材の 3D グラフィックモデルの生成

本アニメーション化システムでは、部材の可視化をおこなうために、解析上のモデルを 3D グラフィックモデルに置き換えている。可視化の対象とした部材の解析上のモデルと、3D グラフィックモデルの対応を表 5 に示す。

表 5 解析モデルとグラフィックモデル

	柱・横架材・筋かい等	面材
解析モデル		
3Dグラフィックモデル	<p>ステップ 0</p> <p> <math>Ns_0</math>: ステップ 0 における始点  <math>Ne_0</math>: ステップ 0 における終点  <math>e1_0 \sim e3_0</math>: 部材直交座標軸  <math>h1, h2, b1, b2</math>: 断面寸法 (部材ごとに指定)  <math>Os</math>: 始点側オフセット (部材ごとに指定)  <math>Oe</math>: 終点側オフセット (部材ごとに指定)                 </p> <p>ステップ i</p> <p> <math>Ns_i</math>: ステップ i における始点  <math>Ne_i</math>: ステップ i における終点  <math>N = e3_0 \times e3_i</math>: 回転軸ベクトル  <math>\theta</math>: 回転角 但し <math>\sin\theta =  N </math>, <math>\cos\theta = e3_0 \cdot e3_i</math>  <math>R</math>: <math>N</math>を軸とした角度<math>\theta</math>の回転を表す行列  <math>e1_i = R e1_0</math>  <math>e2_i = R e2_0</math> </p>	<p>ステップ 0</p> <p> <math>Ns1_0, Ns2_0, Ne1_0, Ne2_0</math>: ステップ 0 における解析モデル節点                      Offset: オフセット (部材ごとに指定)                 </p> <p>ステップ i エッジ</p> <p> <math>Ns1_i, Ns2_i, Ne1_i, Ne2_i</math>: ステップ i における解析モデル節点                      一般に <math>Ns1_i, Ns2_i, Ne1_i, Ne2_i</math> は同一平面にないため、2つの3角形の境界上にはエッジが現れる。                 </p>

) ビューア・コンバータの概要

ビューア・コンバータは、主に解析モデルをグラフィックモデルに変換する役割を担うウィンドウズ・アプリケーションである。ビューア・コンバータの機能一覧を表 6 に示す。解析モデル読み込み直後の画面イメージを図 24 に示す。

表 6 . ビューア・コンバータの機能一覧

・解析モデルの読み込み、ワイヤフレーム表示 (透視投影)
・ワイヤフレームのアニメーション表示 (透視投影)
・解析モデルの 3 D グラフィックモデルへの変換
・PovRay 形式への変換

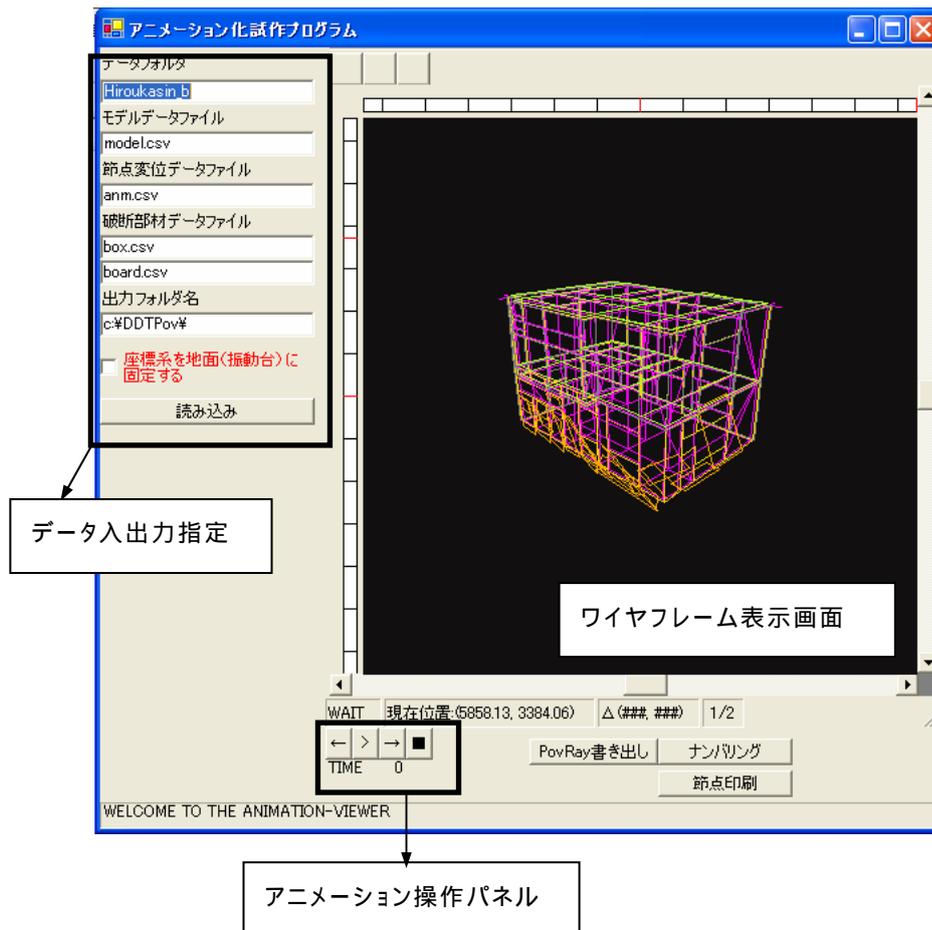


図 24 ビューア・コンバータの画面イメージ

### ）レンダリング

グラフィックモデルのレンダリングは、フリーウェア「PovRay(Unix 版)」を使用している。「PovRay」はレイトレーシング (光線追跡法) アルゴリズムをサポートしており、写実的な画像を得ることができる。「PovRay」は Windows 版、MacOS 版など様々な OS に対応しているが、アニメーション化プロセスにおいては時刻ステップ数のファイルを一括処理する必要があるため、外部スクリプト処理が可能な Unix 版もしくは MSDOS 版が適している。

) 作業省力化の方針

レンダリング機能の搭載

現状ではレンダリング処理を外部プログラム「PovRay」によって行っているため、余分なファイル入出力が多く、処理効率が劣るという問題がある。この問題を解決するため、ビューア・コンバータにレンダリング機能を付加するという対策が考えられる。汎用の3Dグラフィックライブラリである「OpenGL」や「Direct3D」を利用したレンダリングシステムは比較的容易に開発が可能であり、実現性が高い。また、「OpenGL」「Direct3D」に対応したハードウェア演算機能をサポートするグラフィックカードは種々発売されている。これらのグラフィックカードを使用すれば、静止画像を生成・保存することなくリアルタイムでのアニメーション表示が可能となり、大きな省力化を計ることができる。

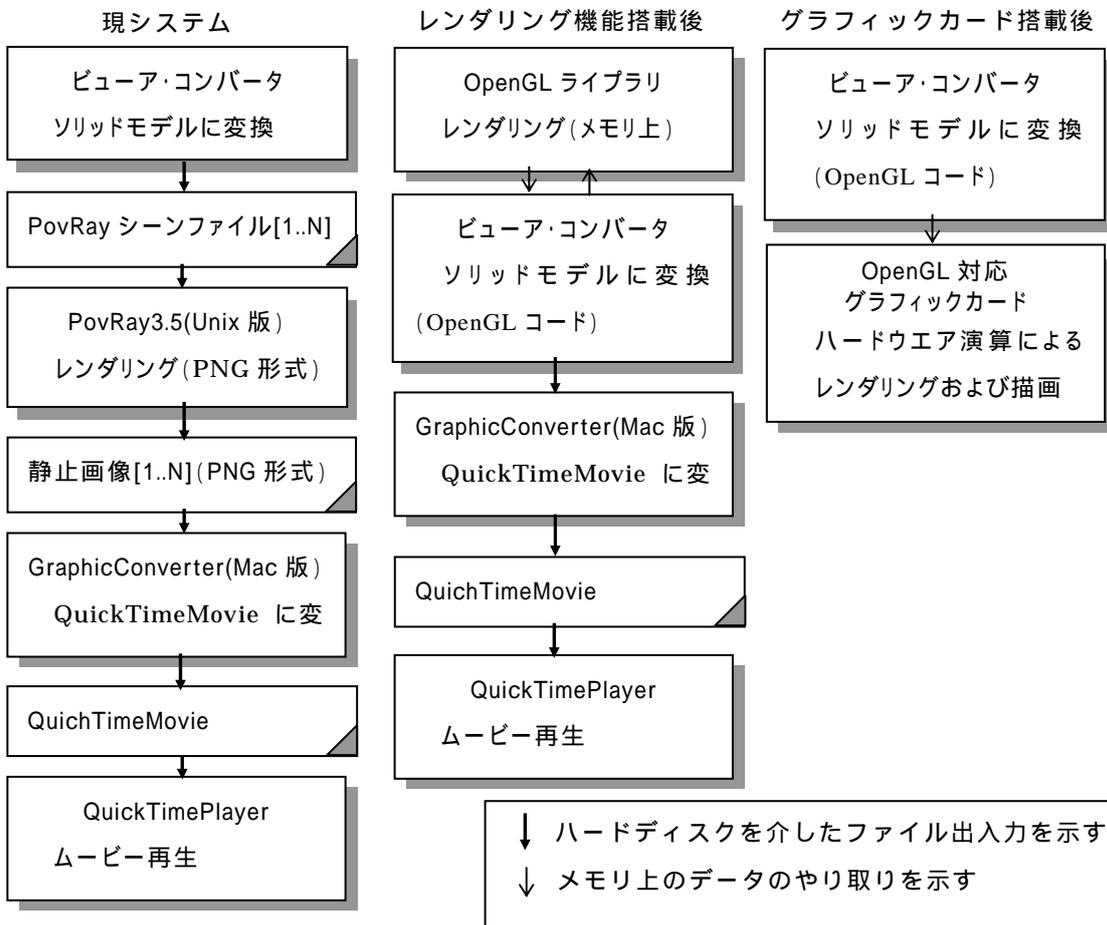


図 25 レンダリング機能搭載による出力作業省力化

ただし、現時点においては「PovRay」に比べて「OpenGL」のレンダリング機能には制約があるものの、複雑なテクスチャマッピングや透過・バンプ指定などを用いない条件下では、それほどの違いはない。

## 入力インターフェースの整備

アニメーション化プロセスにおける断面・オフセット情報およびテクスチャデータのは、現時点では手作業で行っており、相当の時間を要している。この問題を解決するためには、部材の断面・オフセット情報、および部材のテクスチャ情報を、ビューア上での GUI を介して入力可能なインターフェイス開発を行うことが効果的である。インターフェイスの画面イメージを図 26 に示す。

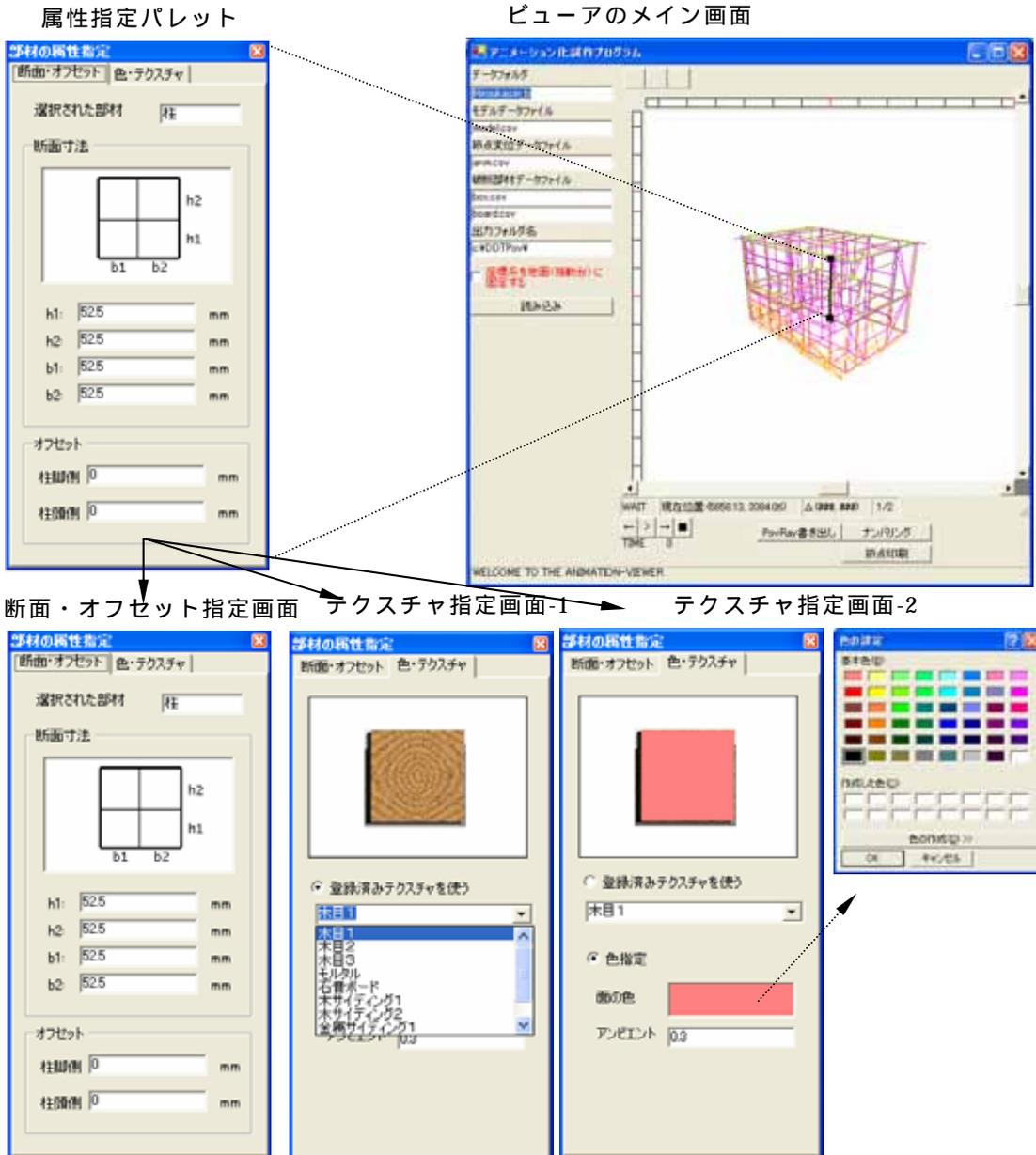


図 26 部材の断面・オフセットおよびテクスチャ指定インターフェイス

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 当面の解析対象範囲として、平成 14 年度に行われた対象住宅抽出壁構面を試験体とした静的実験、振動台実験および既往の文献による実験結果をもとに、対象住宅を構成する筋かい、木ずり、モルタル、柱梁接合部等の、初期状態から倒壊に至る大変形領域に渡る応力変形特性を設定した。得られた応力変形特性に基づく復元力モデルを用いて、平成 14 年度の抽出壁構面振動台実験試験体に対応する倒壊応答解析を行い、解析結果が実験結果に適合することを確認した。
- 2) 倒壊応答解析の演算時間のほとんどは各ステップにおける多元連立方程式の解算定に費やされる。平成 15 年度の解析手法で用いた演繹的解法では、解析対象の自由度の増加に伴い演算時間は級数的に増大し、実規模建物に対応する解析モデルを用いる場合は解析時間が 400 時間程度となることが明らかとなった。この問題を解消するために、解法を収束計算法に改めたところ、解析速度は約 30 倍に向上した。
- 3) 今後の倒壊解析プログラムの本格的利用に向けた動作確認を目的として、特定の既存木造住宅を対象とした倒壊応答解析を行った。解析には 13 時間程度を要するが、支障なく終了し、得られた結果は軸組構法木造住宅の倒壊挙動として妥当であった。
- 4) 実規模建物に対応する解析モデルを定義するための数値データ量は膨大であり、現在、データ作成および入力に 7~10 人日を要する。また、解析後のアニメーション作成には 1 人日程度を要する。これらのデータ入出力作業省力化を目的とした、図化イメージを介したデータ入力プログラム、および解析結果のアニメーションデータ変換プログラム開発の基礎的検討として、解析モデル定義データを自動生成するために必要なユーザー入力情報の特定、ユーザー入力情報を用いた解析モデル定義データの自動生成、および解析後のアニメーションの自動生成の方針を策定した。
- 5) 今後の課題として次のものが挙げられる。

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・柱頭接合部の復元力特性が設定されたが、静的荷重と動的荷重に対する特性が異なる場合があり、その評価方法を今後検討する必要がある。また、壁面形状が任意であるときのモルタル壁の応力変形特性評価について、非線形化領域における精度を向上する必要がある。また、ごく限られた仕様を対象としており、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を特定する必要がある。

演算の高速化

連立方程式解法の変更により解析速度は向上したものの、実規模建物の解析には十数時間を要する。本解析プログラムの開発目的のひとつは木造住宅所有者の耐震補強・耐震改修に関する理解促進であり、解析時間が短いほど用途が拡大し、より高い効果が得られると考えられる。今後、本解析プログラムの具体的用途を明確にするとともに、スーパーコンピュータのオンライン利用も視野に入れた解析時間短縮について検討する必要がある。

データ入出力プログラムの開発

上記と同様の理由により、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

グラムの開発は必須といえる。

解析理論・解析モデルの拡張

今後予定されている、地盤を含む震動台実験の結果予測および結果分析のために、土台・基礎梁の曲げ・せん断に対する復元力特性、それらの接合部の引張に対する復元力特性、および基礎梁下の地盤の変形特性を特定する必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 前川秀幸、 渋谷 泉：木造軸組構法耐力壁の性能評価に関する研究、 その 1 新旧の耐力評価法によるせん断耐力の比較、 日本建築学会大会学術講演梗概集、 講演番号 22090、 2002.8
- 2) 沖林 聡、 井上正文、 田中 圭、 矢頭盛吾、 熊澤範興：外壁仕上げ付き木造耐力壁の耐震性能について、 日本建築学会大会学術講演梗概集、 講演番号 22110、 1999.9
- 3) 三芳紀美子、 大橋好光、 高橋浩一、 綿引 誠、 中野一郎：軸組構法住宅用各種壁の静的加力試験及び振動台実験、 その 1 各種壁の静的実験、 日本建築学会大会学術講演梗概集、 講演番号 22100、 2001.9
- 4) 坂本 功、 大橋好光：木造軸組ラスモルタル壁の水平せん断実験(その 1)、 日本建築学会大会学術講演梗概集、 講演番号 2779、 1982.10
- 5) 大橋好光、 坂本 功：木造軸組ラスモルタル壁の水平せん断実験(その 2)、 日本建築学会大会学術講演梗概集、 講演番号 2780、 1982.10
- 6) 上西秀夫：筋かいとラス下地板を併用した耐力壁の面内せん断試験結果について、 日本建築学会大会学術講演梗概集、 講演番号 2737、 1988.10
- 7) 平坂継臣、 木下加奈子：木造仕口部の剛性と耐力に関する実験的研究、 ほぞの耐力評価、 日本建築学会大会学術講演梗概集、 講演番号 22017、 1999.9
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 戸川隼人：マトリクスの数値計算、 pp.64-87、 オーム社、 1971.7.20
- 11) 気象庁ホームページ

## (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 9 月 (発表予定)
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 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
実建物倒壊応答予測のための試解析プログラム	実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

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成17年度業務計画案

(a) 震動台実験の結果予測・結果分析

平成17年度に予定されているE-ディフェンスにおける木造住宅の震動台実験試験体に対応する解析モデルを用いた応答予測解析を行い、実験計画のための資料とする。また、実験後、解析結果と実験結果を比較することで、試験体の力学的特性の分析を行う。

(b) 部材の復元力特性の精度向上

上記震動台実験の結果予測精度の向上を目的として、これまでに本プロジェクトの一環として実施された振動台実験および静的加力実験の結果、および、今後必要に応じて行われる、上記震動台実験試験体と同じ仕様の試験体を用いた部分実験の結果に基づいて、部材の復元力特性の精度を向上する。

(c) 入出力プログラム開発

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試作する。

(d) 解析高速化に関する基本検討

「地震防災対策への反映、1. 事前対策に関する研究」と連携して、本解析プログラムの用途具体化を図るとともに、スーパーコンピュータのオンライン利用、および解析モデルの簡略化などによる解析高速化の基本的可能性に関する検討を行う。