

3.4.3 地震動による木造住宅の崩壊現象に関する調査分析ならびに崩壊解析手法の構築

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 ヶ年の年次実施計画
- (e) 平成 15 年度業務目的

(2) 平成 15 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) 解析モデルの設定方針
 - 2) 倒壊応答解析理論
 - 3) 解析結果のアニメーション化に関する基礎的検討
 - 4) 試解析
- (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 16 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 地震動による木造住宅の崩壊現象に関する調査分析ならびに崩壊解析手法の構築

(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	三宅 辰哉	miyake@nittem.co.jp
(株)日本システム設計	主任	河尻 出	kawajiri@nittem.co.jp
(株)日本システム設計		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 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する。

倒壊応答解析の基礎理論を拡張してより汎用性の高い倒壊応答解析用振動モデルを構築し、テストプログラムを作成する。

データ入出力に関するグラフィック化の基本方針を策定する。

3) 平成16年度：

解析結果を既往の震災例、実験例と比較して、応答解析の精度を確認する。必要に応じて振動モデルの修正を行う。

解析プログラムの入出力のグラフィック化を行い、汎用化する。

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崩壊振動実験の結果予測を行う。

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：

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振動実験の結果予測を行う。

解析値と実験結果の比較により解析精度を確認する。

(e) 平成15年度業務目的

中規模震動台実験等の結果に基づいて、本数値シミュレーションが対象とする崩壊パターンおよび耐力壁・接合部等の仕様を特定する。

中規模震動台実験等の結果を用いて、必要な耐力壁・接合部等の応力変形特性を評価する。

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う。

解析結果の三次元アニメーション化を試行する。

検討過程の必要に応じて、演算の高速化を目的としたプログラムコードの具体的記述方法等について検討する。

(2) 平成15年度の成果

(a) 業務の要約

震災被害事例および昨年度の中規模震動台実験結果を参考にして、木造住宅の地震時倒壊パターンを仮定し、解析モデル設定方針を設定した。この設定方針に基づき、部材の分離・飛散現象の追跡を目的として、昨年度構築した倒壊応答解析の基礎理論を拡張した。本拡張理論による解析モデルはトラス要素、並進バネ要素、回転バネ要素等によって構成される。本拡張理論に基づく応答解析結果は中規模振動台実験の結果に良好に一致すること、部材の分離・飛散現象が追跡可能であること、および復元力パラメータのわずかな違いにより崩壊パターンは大きく変化することが確認された。

また、解析結果の三次元アニメーション表示を試行した。柱・梁・筋かい部材を直方体として表示し、陰影をつけることで視認性が高くなることが確認された。

(b) 業務の実施方法

1) 解析モデル設定方針

震災被害事例および昨年度の中規模振動台実験結果を参考にして、木造住宅の地震倒壊パターンを特定して解析モデル設定に関する仮定を設ける。この仮定に基づき、特定され

た倒壊パターンを追跡し得ることを条件として、節点・要素の配置方法等の解析モデルの設定方法を設定する。

2) 倒壊応答解析理論

昨年度の倒壊応答解析基礎理論を拡張して、上記の解析モデルに対応した応答解析理論を構築する。また、理論構築・プログラムコードの記述に際して演算の高速化に留意する。

3) 解析結果のアニメーション化に関する基礎的検討

既往のソフトウェアを利用して、解析結果を三次元アニメーションとして表示し、解析結果の表現方法に関する基礎的検討を行う。

4) 試解析

中規模振動台実験の試験体に相当する解析モデルを用いて倒壊応答解析を行い、解析結果を実験結果と比較して解析の精度を検証する。また、解析モデルのパラメータを調整して多様な倒壊挙動を再現する。

(c) 業務の成果

1) 解析モデル設定方針

a) 解析モデル設定上の仮定条件

震災被害事例¹⁾および昨年度の中規模振動台実験結果を参考にして、解析モデル設定に関する仮定を次のように設ける。

解析モデルに取り入れる水平耐力要素として下記のことを想定する。

筋かい、土壁等(土壁、面材張り壁、木ずり壁)

土壁等に接する柱は壁材により耐力壁両側の柱は耐力壁面内の変位を拘束される(柱拘束力) [写真 1,2]。壁材は筋かいの踏み外し等により部分的に破壊されるが[写真 3]、その段階では柱拘束力を保持する。

土壁等はその仕様に依りて定まる限界せん断変形角に達した時点で柱拘束力を喪失する。

ラスモルタルも復元力を有する。所定のせん断変形角に達した時点で復元力を喪失し、その後、剥落する[写真 4]。

通し柱には上下階の層間変位の差に応じた曲げ応力が生じる。曲げ応力が断面形状・材料に応じた定まる曲げ強さに達した時点で折損し、曲げ耐力を喪失する(ピン接合となる)。その後、限界曲げ変形角に達した時点で破断する[写真 5]。

梁せいが一定以上の場合、管柱-梁接合部は曲げに対する剛性・耐力を有する[写真 6]。

土壁等による腰壁・小壁も復元力を有する。まぐさ・窓台レベルにおける柱の折損を通し柱と同様に考慮する[写真 7]。

柱脚・柱頭接合部は所定の引張変形量に達した時点で XYZ 全方向の耐力・剛性を喪失する。ただし、柱拘束力を有する壁が当該柱の XY 両側に接している場合は圧縮耐力は保持する。

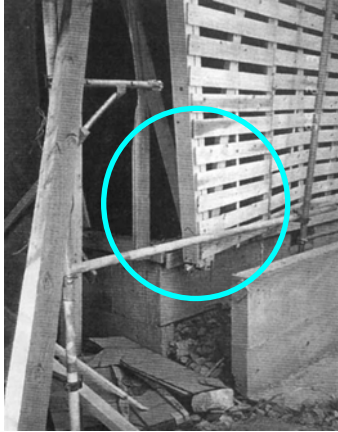


写真1 木ずりによる柱拘束



写真2 土壁による柱拘束

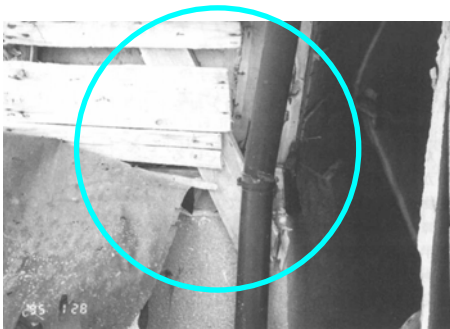


写真3 筋かいによる木ずり破壊



写真4 ラスモルタルの剥落



写真5 通し柱の曲げ破壊



写真6 管柱頭部の曲げ破壊

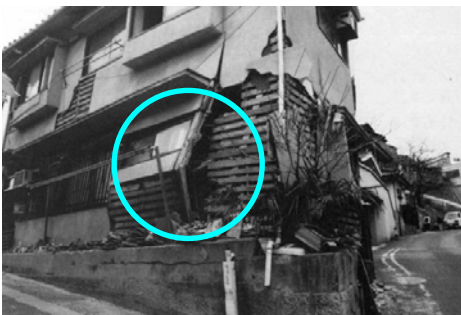


写真7 管柱の曲げ破壊

b) 解析モデルの設定方法

1) 概要

任意の鉛直構面に対する解析モデルフレームを図1のように構成する。節点は図中 印のように横架材芯レベルに設定する他、柱脚・柱頭接合部の变形と破断を表現するために図中*印のように柱端部レベルにも節点を定義する。なお、実際の解析モデルでは柱端部レベルの節点の高さは横架材芯レベルと同じとする。全ての部材を両端ピンの軸力要素とする。柱は通し柱も含めて横架材間に設定し、柱頭・柱脚には図2のように材端バネ要素を配置する。筋かいは引張筋かいと圧縮筋かいを二重に設定し、それぞれ引張、圧縮変形に対してのみ耐力・剛性を与える。土壁等、水平構面はたすき掛けブレースに置換し、面材等壁両端の柱の脚部・頭部は柱拘束材で繋ぐ。柱梁ラーメン効果もブレースに置換する。この他、横架材、通し柱および開口部に接する管柱の曲げ耐力・剛性を表現するために棒要素と回転バネ要素からなる多節点曲げ要素を配置する。

質量は支点以外の全ての節点に設定する。柱端部レベル節点の質量は柱材質量の 1/2 および解析可能な最小質量の大きい方とする。横架材芯レベル節点の質量は当該レベル水平面において節点間距離を 1/2 に分割する線分により区画される部分に含まれる床・屋根・外壁の重量に相当する値とする。

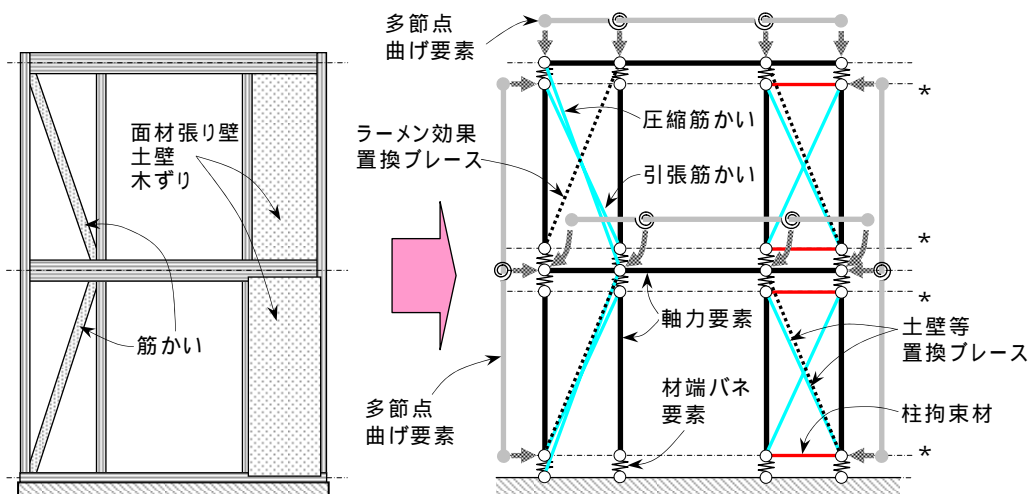


図1 解析モデルの構成

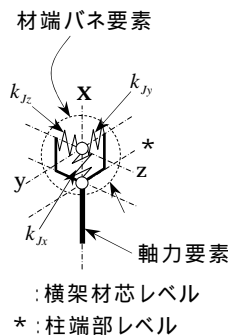


図2 材端バネ要素の構成

) 部材のモデル化

通し柱・管柱

通し柱・管柱の軸部は軸力要素とし、図 3(a),(b)のように柱端部レベルの節点間に定義する。材端には引張力・圧縮力による接合部の変形・破断を考慮するために材端バネ要素を横架材芯レベルと柱端部レベルの節点間に定義する。軸力要素の軸剛性は線形とし、軸部の破断は考慮しない。材端バネ要素の x(柱材軸)方向バネの応力変形関係は非線形とし、復元力モデルは接合部の仕様に応じて実験結果等に基づいて設定する。y,z(柱材軸直交)方向バネは剛相当の線形剛性を与える。x,y,z 方向バネは x 方向バネの引張変形が限界変形に達した時点、または柱材が接合される横架材との相対変形角が限界変形角に達した時点で同時に破断する。ただし、木ずり・ボード等のように柱拘束力を有する壁が当該柱の XY 両方向に取付いている場合は、いずれかまたは両方向の柱拘束力が失われるまでは x 方向バネは圧縮耐力を保持し、y,z 方向バネは剛性を保持する。

この他、通し柱については柱材の曲げ耐力・剛性を表現するために図 3(b)のように棒要素と回転バネ要素からなる多節点曲げ要素を柱端部レベル-横架材芯レベル-柱材芯レベル節点間に定義する。棒要素の軸剛性は 0、曲げ剛性は無限大とし、回転バネの x 軸(柱材軸)回りの回転剛性は 0、y,z 軸回りは柱材の曲げ剛性に相当する回転剛性を与える。y,z 軸回りの回転バネは曲げ応力が曲げ強さに達した時点、または材端バネ要素の破断により上下の軸力要素が分離した時点で破断する。また、柱が開口部に接する場合は図 3(c)のように、まぐさ・窓台レベルで軸力要素を分割し、多節点曲げ要素を柱端部レベル-窓台レベル-まぐさレベル-柱材芯レベル節点間に定義する。

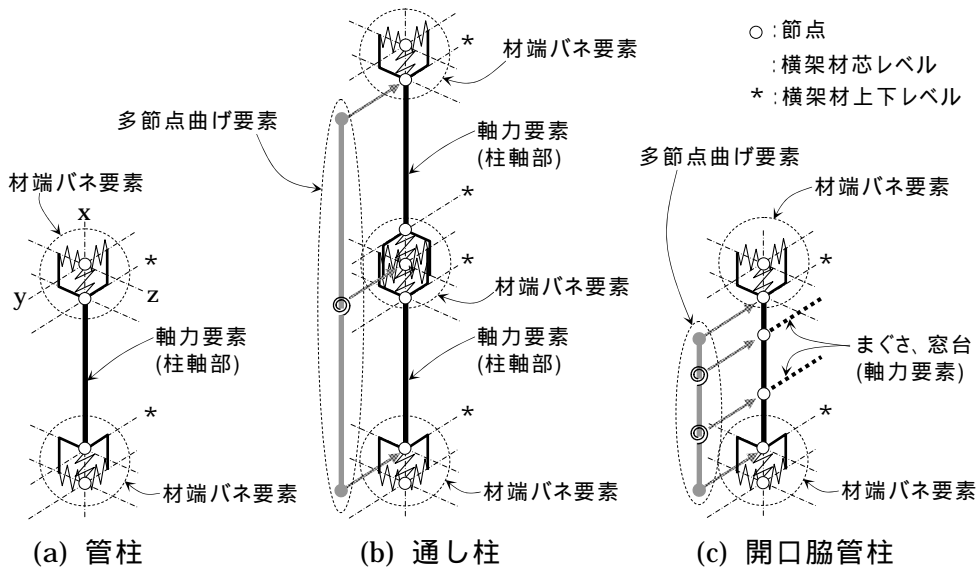


図 3 柱のモデル化

横架材

横架材は図4のように横架材芯レベル節点間に軸力要素として定義する。材端接合部の破断は考慮しないこととし、材端はピン接合とする。材中間に節点が存在する場合は通し柱と同様に、横架材の曲げ耐力・剛性を表現するために多節点要素を配置する。多節点曲げ要素を構成する回転バネの回転剛性は、y軸回りとz軸周りで異なる値を設定すると解析誤差が大きくなることが確認されたので、両者とも横架材の強軸回りの曲げ剛性に相当する値とする。曲げ強さはy,z軸回りで異なる値としても解析上の支障はないが、ここでは両者とも強軸回りの曲げ強さとする。

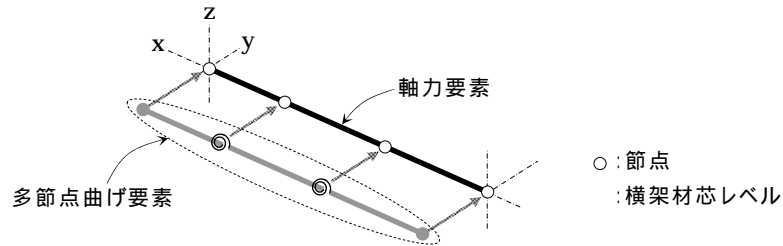


図4 横架材のモデル化

筋かい壁

一つの片筋かいを図5のように引張筋かいと圧縮筋かいに分け、それぞれを軸力要素として定義する。引張筋かいは柱端部レベル節点間に配置し、圧縮筋かいは横架材芯レベル節点間に配置する。この軸力要素の応力変形関係は非線形とし、復元力モデルは耐力壁のせん断実験結果等に基づいて設定する。引張筋かいは引張変形のみ、圧縮筋かいは圧縮変形のみに対して復元力を有し、いずれか一方が限界変形に達して耐力を喪失した時点で他方も耐力を喪失する。筋かいの飛散仮定を追跡する場合は、引張筋かいは耐力を喪失した時点で引張筋かい両端に解析可能最小質量を有する節点を新たに定義し、その時点の両端の節点の応答値を初期値として別途解析する。

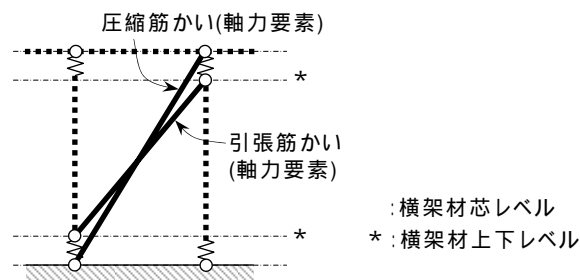


図5 筋かい壁のモデル化

筋かい・土壁・面材張り壁・木ずり壁

図6のように柱端部レベル節点間および横架材芯レベル節点間に軸力要素をたすき掛けに配置する。前者を横架材芯間要素、後者を柱端部間要素と称する。これらの軸力要素の応力変形関係は非線形とし、復元力モデルは耐力壁のせん断実験結果等に基づいて設定する。この他、柱拘束力を線形剛性を有する軸力要素による柱拘束材としてモデル化する。柱拘束材は接する柱材との相対変形角が限界変形角に達した時点で耐力を喪失する。

壁へ伝達されるせん断力のうち、横架材を介するものは横架材芯間要素により表現され、柱材を介するものは柱端部間要素により表現される。したがって木ずり壁のように壁へのせん断力伝達が柱のみを介して行われるものについては横架材芯間要素は不要である。面材張り、土壁等およびラスモルタル当の非構造壁については、壁せん断力のうち横架材および柱材を介する成分を把握して横架材芯間要素および柱端部間要素の復元力モデルを適切に設定する必要がある。

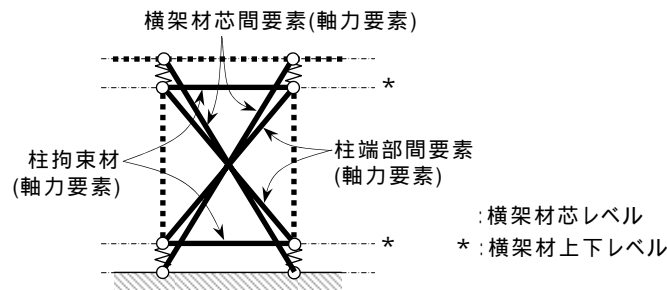


図6 筋かい・土壁・面材張り壁・木ずり壁のモデル化

小壁・腰壁

土壁等による小壁・腰壁は上記と同様に図7のように二重たすき掛け軸力要素としてモデル化する。まぐさ・窓台は線形剛性を有する軸力要素とし、両端に材端バネ要素を配置する。x(材軸)方向バネの応力変形関係は非線形とし、復元力特性は実験結果等に基づいて設定する。y,z(材軸直交)方向のバネは当初剛相当の剛性を有し、x方向バネが引張耐力を喪失した時点でy,z方向バネも耐力を喪失する。

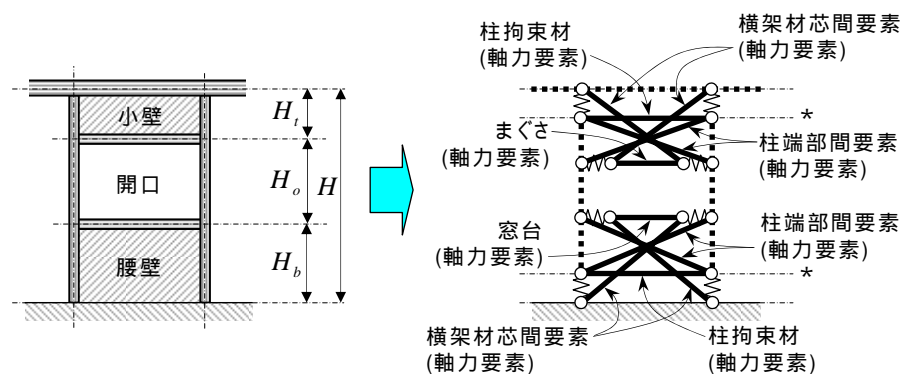


図7 小壁・腰壁のモデル化

柱梁ラーメン効果

ラーメン効果は図8のようにブレース置換により表現することとし、ラーメン効果が起因する柱梁接合部に接続する横架材上の最寄りの節点および柱材の端部節点間に軸力要素を配置する。この軸力要素の応力変形関係は非線形とし、復元力モデルは柱梁接合部の曲げ実験結果等に基づいて設定する。本要素は復元力モデルの限界変形に達するかまたはラーメン効果が起因する柱梁接合部の材端バネ要素が破断した時点で耐力を喪失する。

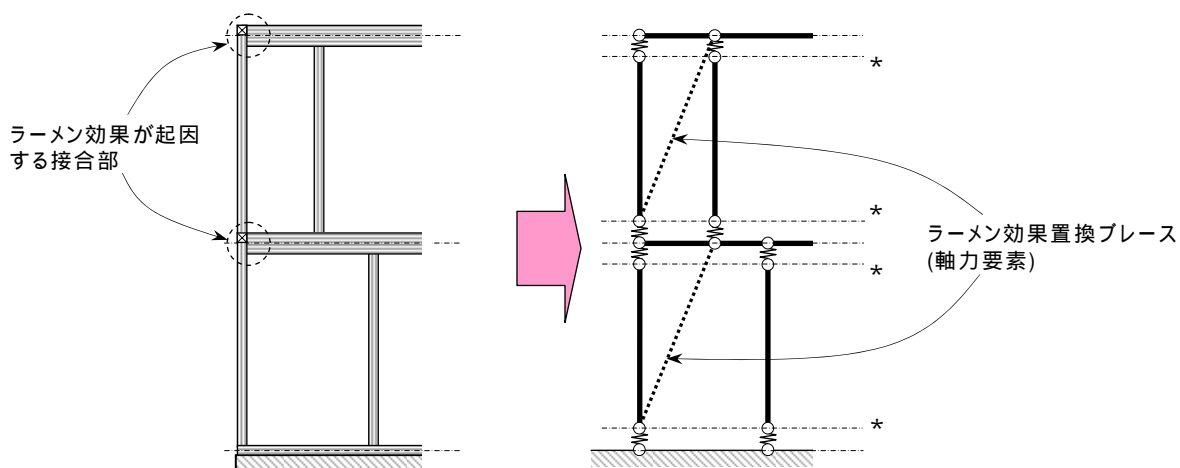


図8 柱梁ラーメン効果のモデル化

水平構面

耐力線上の横架材で囲まれる矩形内にたすき掛けでブレース材を配置する。当面このブレース材には線形剛性を与える。

接地反力

分離・倒壊によって節点のZ座標 z_i が0以下となる場合は、当該節点は接地したものとみなして、Z方向に接地剛性 K_L で支持されるものとする。接地反力は $-K_L \cdot z_i$ となり、これに摩擦係数 μ_L を乗じた摩擦力を水平方向に考慮する。解析の発散を防止するために、

$$K_L = \kappa \cdot m_i \quad (1)$$

ここで、 κ ：係数

m_i ：接地した節点の質量

とし、 κ は接地剛性として妥当であり、かつ解析可能な値とする。

）復元力特性のモデル化

要素の復元力モデルを次のように設定する。これらの設定は今後の実験結果等により変更することがあり得る。

柱・横架材

軸部に相当する軸力要素の軸剛性は線形とし、部材の断面積と材料のヤング係数を用いて算定する。曲げ剛性・耐力を表す多節点バネ要素を構成する回転バネの剛性も線形とする。回転バネの剛性と曲げ強さは断面形状、ヤング係数および基準強度に基づいて算定する。

筋かい壁・木ずり壁

筋かい壁・木ずり壁の復元力モデルは図9に示す真柄モデル²⁾とする。筋かいは引張・圧縮筋かいそれぞれの耐力に図9下段の耐力係数を乗じる。なお、大変形を考慮して耐力壁等の水平力 P ・水平変形 Δ と置換ブレースの軸力 T ・軸変形 δ に次の関係を設定する。図10の応力・変形状態について

$$\delta = \sqrt{H^2 + W^2 + 2W\Delta} - \sqrt{H^2 + W^2} \quad (2)$$

$$T = \frac{\sqrt{H^2 + W^2 + 2W\Delta}}{W + \Delta} P \quad (3)$$

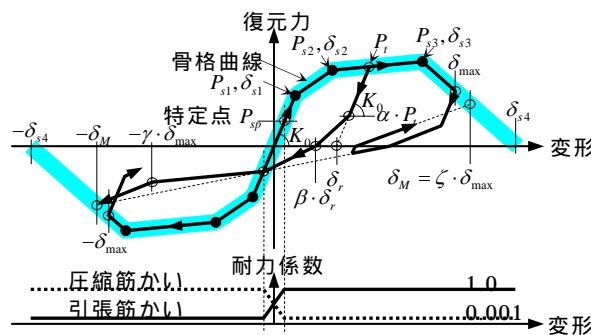


図9 耐力壁・水平構面の復元力モデル

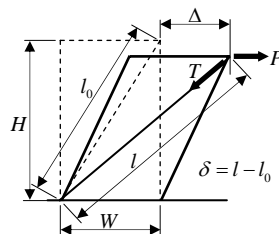


図10 耐力壁等と置換ブレースの応力・変形

柱梁ラーメン効果

柱梁ラーメン効果の復元力モデルを図 11 に示す。本モデルは真柄モデルの $\pm\delta_{s1}$ 以下の領域における履歴則を変更したものである。柱梁架構の水平力 P ・水平変形 Δ と置換ブレースの軸力 T ・軸変形 δ の関係は と同様である。

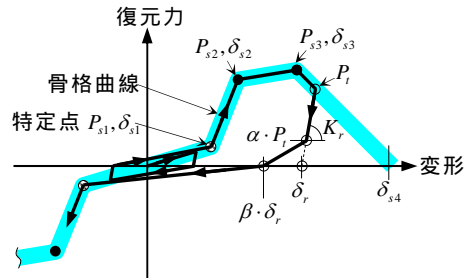


図11 柱梁ラーメン効果の復元力モデル

柱脚・柱頭接合部(材端バネ要素)

柱脚・柱頭接合部に配置する材端バネ要素の復元力モデルを図 12 に示す。正(引張)方向はトリリニアスリップ、負(圧縮)方向は非線形弾性とする。

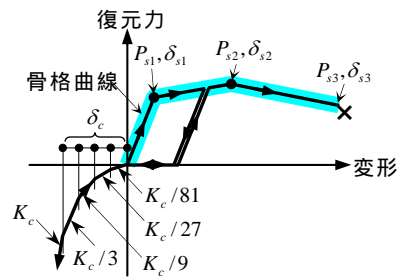


図12 柱材端バネ要素の復元力モデル

2) 倒壊応答解析理論

a) 振動方程式

軸力要素(トラス要素)によって構成される立体フレームの大変形と P- 効果を考慮した時刻歴応答解析理論³⁾に準じて木造軸組構法住宅の崩壊解析の基本理論を次のように設定する。

微小時間 Δt 内で構造物の瞬間接線剛性が一定であるとすると、応答変位増分に対して(4)式の振動方程式が成り立つ。変数名添え字と時刻の関係は図 13 のように設定する。

$$[M] \cdot \{\ddot{U}\}_{n+1} + [C]_n \cdot \{\dot{U}\}_{n+1} + [K]_n \cdot \{\Delta U\}_n + \{F\}_n = -\{Q\}_{n+1} \quad (4)$$

ここで、 $[M]$: 節点質量マトリクス

$[C]_n$: $t = t_n \sim t_{n+1}$ 間の減衰マトリクス

$[K]_n$: $t = t_n \sim t_{n+1}$ 間の接線剛性マトリクスで、 $t = t_n$ の変形状態に基づいて作成する

$$\{\Delta U\}_n = \{U\}_{n+1} - \{U\}_n$$

$\{U\}_n$: $t = t_n$ の節点変位ベクトル

$\{F\}_n$: $t = t_n$ の応力ベクトル

$$\{Q\}_{n+1} = [M] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \dots & & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{a}_{X,n+1} \\ \ddot{a}_{Y,n+1} \\ \ddot{a}_{Z,n+1} + g \end{Bmatrix}$$

$\ddot{a}_{X,n+1}, \ddot{a}_{Y,n+1}, \ddot{a}_{Z,n+1}$: $t = t_{n+1}$ における X,Y,Z 方向の地動の加速度
 g : 重力加速度

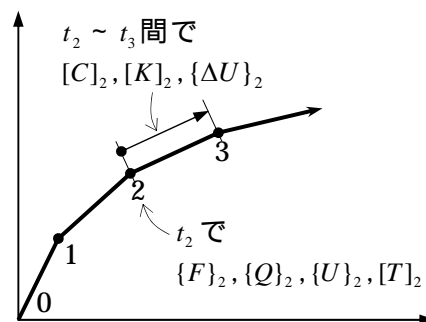


図 13 変数名添え字と時刻の関係

回転自由度は考慮しないので、一つの節点につき X,Y,Z 方向並進の 3 自由度が与えられ、時刻歴応答解析で考慮する節点数を N とすれば、節点質量マトリクス $[M]$ 、減衰マトリクス $[C]_n$ および接線剛性マトリクス $[K]_n$ の次数は $3 \cdot N$ となる。 $[K]_n$ の設定方法は c) 項で述べる。

減衰マトリクス $[C]_n$ は次式の瞬間剛性比例型とする。

$$[C]_n = \frac{2h}{\omega_1} \cdot [K]_n \quad (5)$$

ここで、 h : 減衰定数

ω_1 : 初期剛性による 1 次固有円振動数

応力ベクトル $\{F\}_n$ は(6)式のように $t = t_n$ の全体座標系要素応力ベクトル $\{F_e\}_n$ を計算し、こ

れを全要素について積算して求める。

$$\{F_e\}_n = [T]_n^T \cdot \{f\}_n \quad (6)$$

ここで、 $[T]_n$: $t=t_n$ における当該要素の座標変換マトリクス

$\{f\}_n$: $t=t_n$ における当該要素応力ベクトル

軸力要素の場合は応力ベクトルは軸方向成分のみであり、 $t=t_i \sim t_{i+1}$ 間の伸び(要素長の増分)に接線軸剛性を乗じたものを順次加算して $t=t_n$ の軸方向応力が算定され、それを(6)式により全体座標系に変換すれば、 $t=t_n$ の変形状態に対応した $\{F_e\}_n$ が正しく求められる。ただし、(4)式に示すように $t=t_{i+1}$ における節点座標は $t=t_i$ の変形状態に基づく接線剛性マトリクスを含む振動方程式を解いて求められる。したがって(6)式の $\{F_e\}_n$ には $t=t_n$ と $t=t_{n+1}$ における変形状態の差異による不釣合い力が含まれ、それは次ステップで解消される。

本解析理論では軸力要素以外の要素も扱う。軸力要素以外の要素応力ベクトルは次のように算出する。

$$\{f\}_n = \sum_{i=0}^{n-1} ([k]_i \cdot \{\Delta u\}_i) \quad (7)$$

ここで、 $[k]_i$: $t=t_i$ における当該要素の要素接線剛性マトリクス

$\{\Delta u\}_i$: $t=t_i \sim t_{i+1}$ 間の当該要素増分変位ベクトル

$\{\Delta u\}_i$ は次のように $\{\Delta U\}_i$ を $[T]_{i+1}$ により要素座標系に変換して得られる。

$$\{\Delta u\}_i = [T]_{i+1} \cdot \{\Delta U\}_i \quad (8)$$

ここで、 $\{\Delta U\}_i$: $t=t_i \sim t_{i+1}$ 間の全体座標系増分変位ベクトル

$$\{\Delta U\}_i = \{U\}_{i+1} - \{U\}_i$$

(8)式は微小変形仮定に基づく近似解であり、誤差を含む。したがって時刻歴応答解析の過程で誤差が累積するので注意が必要である。

b) 振動方程式の解法

) 解法の基本

Newmark 法に基づいて次の連立一次方程式を設定する。

$$[A]\{\ddot{U}\}_{n+1} = \{B\} \quad (9)$$

ここで、

$$[A] = [M] + \frac{\Delta t}{2}[C]_n + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot [K]_n$$

$$\{B\} = -([C]_n + \Delta t \cdot [K]_n)\{\dot{U}\}_n - \left\{ \frac{\Delta t}{2} \cdot [C]_n + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \cdot \Delta t^2 \cdot [K]_n \right\} \cdot \{\ddot{U}\}_n - \{Q\}_{n+1} - \{F\}_n$$

(9)式を解いて $\{\ddot{U}\}_{n+1}$ を求め、

$$\{\ddot{U}\}_{n+1} = [A]^{-1}\{B\} \quad (10)$$

$\{\ddot{U}\}_{n+1}$ を(11)式、(12)式に代入して $\{U\}_{n+1}$ 、 $\{\dot{U}\}_{n+1}$ を求める。

$$\{U\}_{n+1} = \{U\}_n + \{\dot{U}\}_n \cdot \Delta t + \frac{\{\ddot{U}\}_n}{1/2 - \beta} \cdot \Delta t^2 + \frac{\{\ddot{U}\}_{n+1}}{\beta} \cdot \Delta t^2 \quad (11)$$

$$\{\dot{U}\}_{n+1} = \{\dot{U}\}_n + \frac{\{\ddot{U}\}_n}{2} \cdot \Delta t + \frac{\{\ddot{U}\}_{n+1}}{2} \cdot \Delta t \quad (12)$$

) 方程式の分割・縮小

演算時間の短縮を目的として振動方程式を次のように分割・縮小する。

(4)式を次式のように分割して表す。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [M_a] & 0 \\ 0 & [M_b] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}_a\}_{n+1} \\ \{\ddot{U}_b\}_{n+1} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{aa}]_n & [C_{ab}]_n \\ [C_{ba}]_n & [C_{bb}]_n \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\dot{U}_a\}_{n+1} \\ \{\dot{U}_b\}_{n+1} \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} [K_{aa}]_n & [K_{ab}]_n \\ [K_{ba}]_n & [K_{bb}]_n \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\Delta U_a\}_n \\ \{\Delta U_b\}_n \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{F_a\}_n \\ \{F_b\}_n \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \{Q_a\}_{n+1} \\ \{Q_b\}_{n+1} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

このとき、(9)式は次のように分割される。

$$\begin{bmatrix} [A_{aa}] & [A_{ab}] \\ [A_{ba}] & [A_{bb}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}_a\}_{n+1} \\ \{\ddot{U}_b\}_{n+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{B_a\} \\ \{B_b\} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [A_{aa}] & [A_{ab}] \\ [A_{ba}] & [A_{bb}] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [M_a] & 0 \\ 0 & [M_b] \end{bmatrix} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \begin{bmatrix} [C_{aa}]_n & [C_{ab}]_n \\ [C_{ba}]_n & [C_{bb}]_n \end{bmatrix} + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot \begin{bmatrix} [K_{aa}]_n & [K_{ab}]_n \\ [K_{ba}]_n & [K_{bb}]_n \end{bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \{B_a\} \\ \{B_b\} \end{Bmatrix} &= - \left(\begin{bmatrix} [C_{aa}]_n & [C_{ab}]_n \\ [C_{ba}]_n & [C_{bb}]_n \end{bmatrix} + \Delta t \cdot \begin{bmatrix} [K_{aa}]_n & [K_{ab}]_n \\ [K_{ba}]_n & [K_{bb}]_n \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{Bmatrix} \{\dot{U}_a\}_n \\ \{\dot{U}_b\}_n \end{Bmatrix} \\ &\quad - \left\{ \frac{\Delta t}{2} \cdot \begin{bmatrix} [C_{aa}]_n & [C_{ab}]_n \\ [C_{ba}]_n & [C_{bb}]_n \end{bmatrix} + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \cdot \Delta t^2 \cdot \begin{bmatrix} [K_{aa}]_n & [K_{ab}]_n \\ [K_{ba}]_n & [K_{bb}]_n \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}_a\}_n \\ \{\ddot{U}_b\}_n \end{Bmatrix} \\ &\quad - \begin{Bmatrix} \{Q_a\}_{n+1} \\ \{Q_b\}_{n+1} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \{F_a\}_n \\ \{F_b\}_n \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

(14)式を展開して、

$$[A_{aa}] \cdot \{\ddot{U}_a\}_{n+1} + [A_{ab}] \cdot \{\ddot{U}_b\}_{n+1} = \{B_a\} \quad (15)$$

$$[A_{ba}] \cdot \{\ddot{U}_a\}_{n+1} + [A_{bb}] \cdot \{\ddot{U}_b\}_{n+1} = \{B_b\} \quad (16)$$

(16)式より、

$$\{\ddot{U}_b\}_{n+1} = [A_{bb}]^{-1} \cdot (\{B_b\} - [A_{ba}] \cdot \{\ddot{U}_a\}_{n+1}) \quad (17)$$

上式を(15)式に代入すれば次式が得られる。

$$[\bar{A}] \cdot \{\ddot{U}_a\}_{n+1} = \{\bar{B}\} \quad (18)$$

$$\text{ここで、} \quad [\bar{A}] = [A_{aa}] - [A_{ab}] \cdot [A_{bb}]^{-1} \cdot [A_{ba}]$$

$$\{\bar{B}\} = \{B_a\} - [A_{ab}] \cdot [A_{bb}]^{-1} \cdot \{B_b\}$$

(18)式を解いて $\{\ddot{U}_a\}_{n+1}$ を求め、これを(17)式に代入して $\{\ddot{U}_b\}_{n+1}$ を求める。

以上のように、 $\{\ddot{U}\}_{n+1}$ を求める際に $[A]$ の逆行列を計算する代わりに、より元数が小さな $[A_{bb}]$ と $[\bar{A}]$ の逆行列を計算することになり、演算時間が短縮される。分割後の元数がもとの方程式の 1/2 のとき演算時間は最短となる。もとの元数が奇数の場合は分割前半部分(添え字 "a" の部分)の元数を切り上げとし、分割後半部分(添え字 "b" の部分)の元数をその残りとする。

c) 接線剛性マトリクス・要素の応力変形

) 軸力要素

$t = t_n \sim t_{n+1}$ 間における軸力要素の要素座標系接線剛性マトリクス $[k]_n$ を次のように求める。

$$[k]_n = \begin{bmatrix} [k_1] & [k_2] \\ [k_2] & [k_1] \end{bmatrix} \quad (19)$$

ここで、

$$[k_1] = \begin{bmatrix} {}_p k_n & 0 & 0 \\ 0 & N_n / L_n & 0 \\ 0 & 0 & N_n / L_n \end{bmatrix}, \quad [k_2] = \begin{bmatrix} -{}_p k_n & 0 & 0 \\ 0 & -N_n / L_n & 0 \\ 0 & 0 & -N_n / L_n \end{bmatrix}$$

${}_p k_n$: 復元力モデルから求められる $t = t_n \sim t_{n+1}$ 間における軸力要素の接線軸剛性の予測値

L_n : $t = t_n$ における軸力要素の長さ

N_n : 復元力モデルから求められる $t = t_n$ における軸力要素の軸力

復元力特性が非線形の場合の ${}_p k_n$ は次のように求める。 $t = t_n$ における軸力要素の変形(伸び)を Δ_n 、 $t = t_{n+1}$ における軸力要素の変形の予測値を ${}_p \Delta_{n+1}$ とする。 ${}_p \Delta_{n+1}$ は次式による $t = t_{n+1}$ における節点変位ベクトルの予測値 ${}_p \{U\}_{n+1}$ を用いて算定する。

$${}_p \{U\}_{n+1} = \{U\}_n + \{\dot{U}\}_n \cdot \Delta t + \{\ddot{U}\}_n \cdot \frac{\Delta t^2}{2} \quad (20)$$

${}_p k_n$ は $t = t_n$ における応力-変形点と復元力モデル上の ${}_p \Delta_{n+1}$ による応力-変形点を結ぶ線分の勾配とする。

$${}_p k_n = \frac{{}_p N_{n+1} - N_n}{{}_p \Delta_{n+1} - \Delta_n} \quad (21)$$

$$\text{ここで、} N_n = \sum_{i=1}^n \{ {}_p k_i \cdot (\Delta_i - \Delta_{i-1}) \}$$

${}_p N_{n+1}$: 復元力モデル上の ${}_p \Delta_{n+1}$ に対応する応力

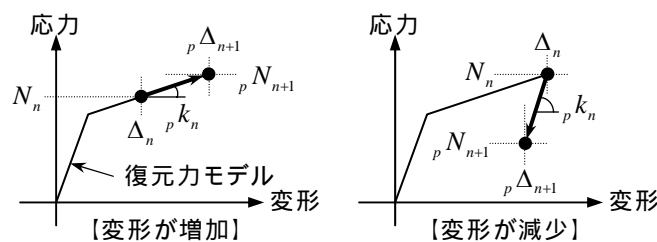


図14 接線剛性の予測

柱、横架材、まぐさ・窓台の軸剛性は線形とし、 ${}_p k_n$ は次のように求める。

$${}_p k_n = \frac{E \cdot A}{l} \quad (22)$$

ここで、 E, A : 柱、横架材、まぐさ・窓台のヤング係数と断面積

l : 軸力要素の初期長さ

柱拘束材の軸剛性も線形とし、当面 9.8(kN/cm)とする。柱拘束材は接する柱材との相対変形角が限界変形角に達した時点で耐力を喪失するものとして消去する。柱拘束材を消去する時点で当該材に応力が生じている場合は当該材を消去すると当該材が接続していた節点に不釣り合い力が生じるが、それは応力ベクトル $\{F\}_n$ に含まれ、次ステップ以降で解消される。

節点座標変換マトリクス $[T]_n$ を用いて $[k]_n$ は次式のように全体座標系における値 $[K_e]_n$ に変換される。

$$[K_e]_n = [T]_n^T \cdot [k]_n \cdot [T]_n \quad (23)$$

$[K_e]_n$ を $[K]_n$ の所定の位置に順次加算する。

なお、 $t = t_n$ における軸力要素の変形(伸び)を Δ_n および軸力 N_n は次のように求める。

$$\Delta_n = L_n - L_0 \quad (24)$$

ここで、 L_n, L_0 : $t = t_n$ および $t = t_0$ (初期状態)における要素長

$$N_n = \sum_{i=0}^{n-1} \{ {}_p k_i \cdot (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \} \quad (25)$$

) 材端バネ要素

図 15 のように、材端バネ要素は横架材芯レベル節点と柱端部レベル節点の間に定義され、接続する軸力要素の材軸(x)方向と材軸直交(y,z)方向の三つのバネによって構成される。

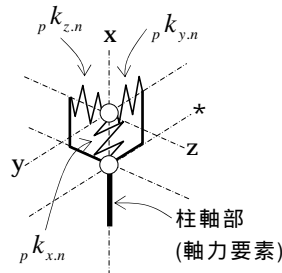


図15 管柱端部バネ要素

材端バネ要素の要素接線剛性マトリクス $[k]_n$ は次のように求められる。

$$[k]_n = \begin{bmatrix} [k_1] & [k_2] \\ [k_2] & [k_1] \end{bmatrix} \quad (26)$$

ここで、

$$[k_1] = \begin{bmatrix} {}_p k_{x,n} & 0 & 0 \\ 0 & {}_p k_{y,n} & 0 \\ 0 & 0 & {}_p k_{z,n} \end{bmatrix}, \quad [k_2] = \begin{bmatrix} -{}_p k_{x,n} & 0 & 0 \\ 0 & -{}_p k_{y,n} & 0 \\ 0 & 0 & -{}_p k_{z,n} \end{bmatrix}$$

${}_p k_{x,n}, {}_p k_{y,n}, {}_p k_{z,n}$: 復元力モデルから求められる $t = t_n \sim t_{n+1}$ 間における x,y,z 方向

バネの接線軸剛性の予測値

${}_p k_{x,n}$ は非線形とし、図 12 に示す復元力モデルを与える。柱端部の節点は質量が小さく、かつ柱軸剛性などの高い剛性で拘束されるため応答振動数が高く、(20)式による変位予測が難しい。よって、前ステップおよび前々ステップの変形・応力をそれぞれ次ステップ予測値および前ステップにおける値として ${}_p k_{x,n}$ の値を決定する。 ${}_p k_{y,n}, {}_p k_{z,n}$ は線形とし、剛相当の剛性を与える。その後、 ${}_p k_{x,n}$ が引張変形により引張耐力を喪失した時点または材端バネ

要素が接する柱材と横架材の相対変形角が限界変形角以上となる時点で耐力を喪失するものとして x,y,z 全方向のバネを消去する。ただし、柱端部レベル節点の XY 両方向に柱拘束材が接続しており、それらが耐力を保持している場合は x 方向バネは圧縮耐力を保持し、y,z 方向バネは剛性を保持するものとし、柱拘束材のいずれかまたは両方が消去された時点で全方向バネ要素を消去する。また、柱拘束材の場合と同様に、消去後の不釣り合い力は応力ベクトル $\{F\}_n$ に含まれ、次ステップ以降で解消される。

$[k]_n$ を $[K]_n$ に組み込む際の座標変換マトリクス $[T]_n$ はバネ要素が接続する軸力要素と同じものを用いる。 $t=t_n$ におけるバネ要素の要素座標系変位ベクトル $\{u\}_n$ および応力ベクトル $\{f\}_n$ は次のように求める。

$$\{u\}_n = \sum_{i=0}^{n-1} \{\Delta u\}_i \quad (27)$$

$$\{f\}_n = \sum_{i=0}^{n-1} \{\Delta f\}_i \quad (28)$$

ここで、 $\{\Delta u\}_i = [T]_{i+1} \cdot (\{U_e\}_{i+1} - \{U_e\}_i)$

$\{\Delta f\}_i = [k]_i \cdot \{\Delta u\}_i$

$\{U_e\}_i$: 全体座標系における $t=t_i$ の要素端部節点変位ベクトル

多節点曲げ要素

横架材および通し柱のように曲げに関する剛性と耐力を有する部材に対応する要素として図16上段に示す多節点曲げ要素を設定する。多節点曲げ要素は概念的には曲げ剛性が無限大で軸剛性が0の剛棒要素と剛棒要素間の回転バネからなる直線状の要素集合体であり、端部はピン接合である。この概念を実現するために数値計算上は図16下段のように半剛接剛棒要素と剛接剛棒要素を交互に組み合わせたモデルとする。このとき、多節点曲げ要素が接続される節点間の並進自由度に関する剛性マトリクスと応力ベクトルは次のように求められる。

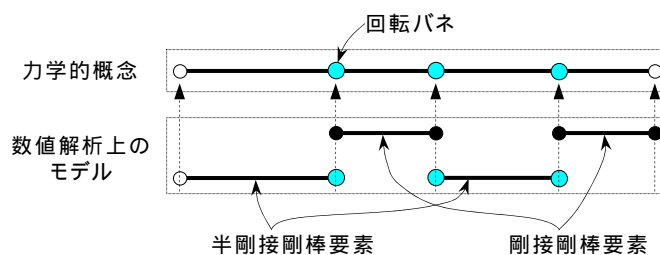


図16 多節点曲げ要素の構成

剛棒要素端部の要素座標系における変位・応力および回転剛性を図17のように定義する。このとき半剛接剛棒要素端部の応力ベクトル $\{e f\}_n$ と変位ベクトル $\{e u\}_n$ は次のように関係付けられる。

$$\{e f\}_n = [e k]_n \cdot \{e u\}_n \quad (29)$$

ここで、 $[e k]_n$: 半剛接剛棒要素接線剛性マトリクス

$$\{e f\}_n = \{f_{xi} \ f_{yi} \ f_{zi} \ M_{xi} \ M_{yi} \ M_{zi} \ f_{xj} \ f_{yj} \ f_{zj} \ M_{xj} \ M_{yj} \ M_{zj}\}^T$$

$$\{e u\}_n = \{u_{xi} \ u_{yi} \ u_{zi} \ \theta_{xi} \ \theta_{yi} \ \theta_{zi} \ u_{xj} \ u_{yj} \ u_{zj} \ \theta_{xj} \ \theta_{yj} \ \theta_{zj}\}^T$$

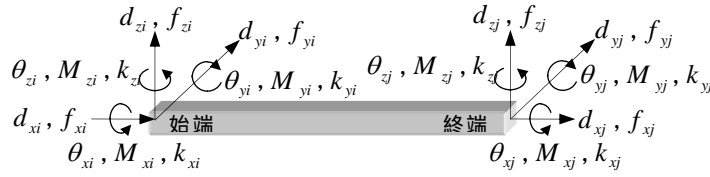


図 17 自由度の定義

半剛接剛棒要素接線剛性マトリクス $[e k]_n$ は次のように表される。

$$[e k]_n = \begin{bmatrix} [k_{11}] & [k_{12}] \\ [k_{21}] & [k_{22}] \end{bmatrix} \quad (30)$$

ここで、

$$[k_{11}] = \begin{bmatrix} A_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_z & 0 & 0 & 0 & B_z \\ 0 & 0 & A_y & 0 & -B_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -B_y & 0 & C_y & 0 \\ 0 & B_z & 0 & 0 & 0 & C_z \end{bmatrix} \quad [k_{12}] = \begin{bmatrix} -A_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -A_z & 0 & 0 & 0 & D_z \\ 0 & 0 & -A_y & 0 & -D_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -B_z & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[k_{21}] = [k_{12}]^T$$

$$[k_{22}] = \begin{bmatrix} A_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_z & 0 & 0 & 0 & -D_z \\ 0 & 0 & A_y & 0 & D_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_y & 0 & E_y & 0 \\ 0 & -D_z & 0 & 0 & 0 & E_z \end{bmatrix}$$

$A_x = 0$ (軸剛性)

$$A_y = \frac{k_{yi} + k_{yj}}{l^2} \quad A_z = \frac{k_{zi} + k_{zj}}{l^2}$$

$$B_y = \frac{k_{yi}}{l} \quad B_z = \frac{k_{zi}}{l}$$

$$C_y = k_{yi} \quad C_z = k_{zi}$$

$$D_y = \frac{k_{yj}}{l} \quad D_z = \frac{k_{zj}}{l}$$

$$E_y = k_{yj} \quad E_z = k_{zj}$$

S :ねじり剛性 (本論では0とする)

$[e k]_n$ は次式により全体座標系における剛性マトリクス $[e K]_n$ に変換される。

$$[e K]_n = [T]^T \cdot [e k]_n \cdot [T] \quad (31)$$

多節点曲げ要素を構成する半剛接剛棒要素群について、それぞれの端部の全体座標系自由度に応じて $[e K]_n$ を重ね合わせて多節点曲げ要素の全体座標系剛性マトリクス $[g K]_n$ を作成する。

次に、剛接剛棒要素の存在を考慮して $[{}_g K]_n$ を並進自由度のみの剛性マトリクス $[{}_g \bar{K}]_n$ に縮小する。変位ベクトル $\{e u\}_n$ を次のように並進に関するものと回転に関するものに分けて記述する。

$$\text{並進： } \{e u_d\}_n = \{u_{xi} \ u_{yi} \ u_{zi} \ u_{xj} \ u_{yj} \ u_{zj}\}^T \quad (32a)$$

$$\text{回転： } \{e u_r\}_n = \{\theta_{xi} \ \theta_{yi} \ \theta_{zi} \ \theta_{xj} \ \theta_{yj} \ \theta_{zj}\}^T \quad (32b)$$

剛接剛棒要素の曲げ剛性は無限大であることを考慮し、要素端部の x 軸回りの回転自由度は拘束されているものとする。次式が成立する。

$$[b_d] \cdot \{e u_d\}_n + [I] \cdot \{e u_r\}_n = \{0\} \quad (33)$$

ここで、

$$[b_d] = \begin{bmatrix} [a] & [a]^T \\ [a] & [a]^T \end{bmatrix} \quad [a] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/l \\ 0 & 1/l & 0 \end{bmatrix}$$

$[I]$ ：6行6列の単位マトリクス

l ：剛接剛棒要素の長さ

$\{e u_d\}_n, \{e u_r\}_n$ は次式により全体座標系における変位ベクトル $\{e U_d\}_n, \{e U_r\}_n$ に変換される。

$$\{e U_d\}_n = [T] \cdot \{e u_d\}_n \quad \{e U_r\}_n = [T] \cdot \{e u_r\}_n \quad (34)$$

上式を(33)式に代入して、

$$[b_d] \cdot [T] \cdot \{e U_d\}_n + [T] \cdot \{e U_r\}_n = \{0\} \quad (35)$$

上式より $\{e U_d\}_n$ と $\{e U_r\}_n$ が次のようにバインドマトリクス $[e B_{dr}]$ により関係付けられる。

$$\{e U_r\}_n = [B_{dr}] \cdot \{e U_d\}_n \quad (36)$$

ここで、 $[B_{dr}] = -[T]^T \cdot [b_d] \cdot [T]$

多節点曲げ要素を構成する剛接剛棒要素群について、それぞれの端部の全体座標系自由度に応じて $[e B_{dr}]$ を重ね合わせて多節点曲げ要素全体のバインドマトリクス $[g B_{dr}]$ を作成する。この $[g B_{dr}]$ により多節点曲げ要素全体の変位ベクトル $\{g U_d\}_n$ と $\{g U_r\}_n$ も(36)式と同様に関係付けられる。

$$\{g U_r\}_n = [g B_{dr}] \cdot \{g U_d\}_n \quad (37)$$

全体座標系における多節点曲げ要素全体の応力ベクトル $\{g F\}_n$ と変位ベクトル $\{g U\}_n$ の関係は次のようになる。

$$\{g F\}_n = [g K]_n \cdot \{g U\}_n \quad (38)$$

上式を並進自由度、回転自由度の順に要素を並べ替え、次式のように分割する。

$$\begin{Bmatrix} \{g F_d\}_n \\ \{g F_r\}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [g K_{dd}]_n & [g K_{dr}]_n \\ [g K_{rd}]_n & [g K_{rr}]_n \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{g U_d\}_n \\ \{g U_r\}_n \end{Bmatrix} \quad (39)$$

ここで、 $\{g F_d\}_n, \{g U_d\}_n$ ：並進自由度に関する増分応力ベクトル、増分変位ベクトル

$\{g F_r\}_n, \{g U_r\}_n$ ：回転自由度に関する増分応力ベクトル、増分変位ベクトル

(37)式の関係より、

$$\begin{Bmatrix} \{g F_d\}_n \\ \{g F_r\}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [g K_{dd}]_n & [g K_{dr}]_n \\ [g K_{rd}]_n & [g K_{rr}]_n \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{g U_d\}_n \\ [g B_{dr}] \cdot \{g U_d\}_n \end{Bmatrix} \quad (40)$$

上式より、

$$\{ {}_g F_d \}_n = [{}_g K_{dd}]_n \cdot \{ {}_g U_d \}_n + [{}_g K_{dr}]_n \cdot [{}_g B_{dr}] \cdot \{ {}_g U_d \}_n \quad (41)$$

$$\{ {}_g F_r \}_n = [{}_g K_{rd}]_n \cdot \{ {}_g U_d \}_n + [{}_g K_{rr}]_n \cdot [{}_g B_{dr}] \cdot \{ {}_g U_d \}_n \quad (42)$$

(14)式の両辺に $[{}_g B_{dr}]^T$ を左乗して、

$$[{}_g B_{dr}]^T \cdot \{ {}_g F_r \}_n = [{}_g B_{dr}]^T \cdot [{}_g K_{rd}]_n \cdot \{ {}_g U_d \}_n + [{}_g B_{dr}]^T \cdot [{}_g K_{rr}]_n \cdot [{}_g B_{dr}] \cdot \{ {}_g U_d \}_n \quad (43)$$

上式左辺は回転応力(モーメント)に対応する並進応力である。(41)式と(43)式の両辺をそれぞれ加算すると次式が得られる。

$$\{ {}_g \bar{F} \}_n = [{}_g \bar{K}]_n \cdot \{ {}_g U_d \}_n \quad (44)$$

$$\text{ここで、} [{}_g \bar{K}]_n = [{}_g K_{dd}]_n + [{}_g K_{dr}]_n \cdot [{}_g B_{dr}] + [{}_g B_{dr}]^T \cdot [{}_g K_{rd}]_n + [{}_g B_{dr}]^T \cdot [{}_g K_{rr}]_n \cdot [{}_g B_{dr}]$$

$$\{ {}_g \bar{F} \}_n = \{ {}_g F_d \}_n + [{}_g B_{dr}]^T \cdot \{ {}_g F_r \}_n$$

この $[{}_g \bar{K}]_n$ を多節点曲げ要素の剛性マトリクスとする。

振動方程式を解いて $\{ {}_g U_d \}_n$ が求められると、(37)式より $\{ {}_g U_r \}_n$ が得られ、これらを座標変換して要素座標系における変位ベクトル $\{ {}_e u \}_n$ とし、(29)式により応力 $\{ {}_e f \}_n$ を求める。実際の解析ではこれらの処理は材端バネ要素と同様に増分を対象として行う。

) 接地反力

解析の過程で支点以外の節点の Z 座標が 0 以下となる場合は、当該節点は接地しており、Z 方向に接地剛性 K_L で支持されているものとして、 K_L を $[K_n]$ の当該節点 Z 方向の要素に加算する。 K_L の値(kN/cm)は解析の安定性を考慮して次のように設定する。

$$K_L = \kappa \cdot m_L \quad (45)$$

ここで、 m_L : 接地する節点の質量(t)

κ : 係数 (当量 490 とする)

また、X,Y 方向には摩擦による抵抗力を考慮する。 $t = t_n$ における当該節点の X,Y,Z 座標を X_n, Y_n, Z_n 、 $t = t_{n+1}$ の X,Y,Z 座標の予測値を X_p, Y_p, Z_p とする。 $t = t_{n+1}$ における Z 方向反力 F_{zp} と X,Y 方向の摩擦力 F_{xp}, F_{yp} は、

$$F_{xp} = K_L \cdot Z_p \quad (46a)$$

$$F_{xp} = \mu_L \cdot F_{zp} \quad (46b)$$

$$F_{yp} = \mu_L \cdot F_{zp} \cdot \frac{Y_p - Y_n}{\delta} \quad (46c)$$

ここで、 μ_L : 接地面の摩擦係数 (当量 0.4 とする)

$$\delta = \sqrt{(X_p - X_n)^2 + (Y_p - Y_n)^2}$$

ただし、 Z_p が正の値の場合は F_{zp}, F_{xp}, F_{yp} は 0 とする。摩擦力による X,Y 方向の接線剛性 K_{fx}, K_{fy} を次のように設定する。

$$K_{fx} = \frac{F_{xp} - F_{xn}}{X_p - X_n} \quad K_{fy} = \frac{F_{yp} - F_{yn}}{Y_p - Y_n} \quad (47)$$

K_L, K_{fx}, K_{fy} を $[K_n]$ の当該節点 Z,X,Y 方向の要素に加算する。

d) 増分累積型座標変換マトリクス

線材を用いた有限要素法に用いる座標変換マトリクス作成では一般に次の条件を設定

する 4)。

材軸が鉛直(Z)方向に一致しているとき

x 軸は全体座標系の Z 軸の向きにとる

y 軸は全体座標系の X 軸の向きにとる

z 軸は全体座標系の Y 軸の向きにとる

それ以外の場合

x 軸は材軸方向にとる。

y 軸は水平面内にとる

z 軸は材軸を含む鉛直面内にとる

z 軸は上向きを正にとる

その結果、 $t = t_n$ における座標変換マトリクス $[T]_n$ は次のようになる。

$$[T]_n = \begin{bmatrix} [T_0]_n & 0 \\ 0 & [T_0]_n \end{bmatrix} \quad (48)$$

ここで、 $X_{i,n} = X_{j,n}$ かつ $Y_{i,n} = Y_{j,n}$ のとき $[T_0]_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

上記以外の場合 $[T_0]_n = \begin{bmatrix} \frac{\bar{X}}{L_n} & \frac{\bar{Y}}{L_n} & \frac{\bar{Z}}{L_n} \\ -\frac{\bar{Y}}{l_n} & \frac{\bar{X}}{l_n} & 0 \\ -\frac{\bar{X}}{l_n} \cdot \frac{\bar{Z}}{L_n} & -\frac{\bar{Y}}{l_n} \cdot \frac{\bar{Z}}{L_n} & \frac{l_n}{L_n} \end{bmatrix}$

$X_{i,n}, Y_{i,n}, Z_{i,n}$: $t = t_n$ における i 端(要素始端)側節点の X,Y,Z 座標

$X_{j,n}, Y_{j,n}, Z_{j,n}$: $t = t_n$ における j 端(要素終端)側節点の X,Y,Z 座標

$\bar{X} = X_{j,n} - X_{i,n}$ 、 $\bar{Y} = Y_{j,n} - Y_{i,n}$ 、 $\bar{Z} = Z_{j,n} - Z_{i,n}$

$$L_n = \sqrt{\bar{X}^2 + \bar{Y}^2 + \bar{Z}^2}、l_n = \sqrt{\bar{X}^2 + \bar{Y}^2}$$

大変形問題の場合も解析モデルが軸力要素のみで構成される場合は、要素の軸(x)方向に関する応力・変形のみが変換の対象となるので支障はないが、材端バネ要素および多節点曲げ要素のように y,z 軸方向の応力・変形も変換の対象とする場合は上述の座標変換マトリクス

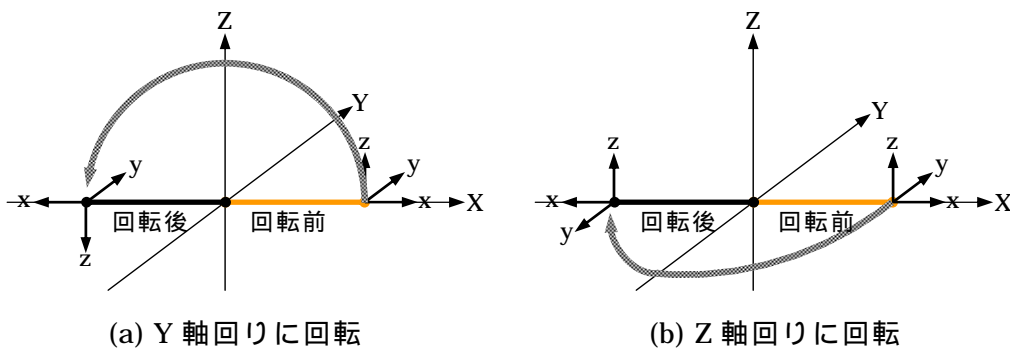


図18 要素の変位による座標系の変化

では問題が生じる。例えば、図 18 のように材軸(x)方向が全体座標系 X 軸方向に一致する要素が Y 軸または Z 軸回りに 180° 回転すると、回転後の部材座標系 x,y,z の方向は両者で異なる。回転後の状態のみに注目して座標変換マトリクスを作成する場合はこの違いを考慮できない。この問題を解決するために次の増分累積型座標変換マトリクスを用いる。

$$[\bar{T}]_n = [T_{init}] \cdot \prod_{i=1}^n [\Delta T]_i \quad (49)$$

ここで、 $[\bar{T}]_n$: $t = t_n$ における増分累積型座標変換マトリクス

$[T_{init}]$: 初期状態における(48)式による座標変換マトリクス

$[\Delta T]_i$: $t = t_{i-1}$ の要素座標系を全体座標系とみなした場合の $t = t_i$ の増分座標変換マトリクス

e) 飛散部材の扱い

柱材と筋かい材の分離・飛散を考慮する。柱材については材端バネ要素の破断として分離・飛散は自動的に求められる。筋かい材については引張筋かいの耐力が 0 となった時点で分離したものとして、その時点の引張筋かい両端の節点に解析可能最小質量を与え、それらの節点の応答加速度・速度・変位を初期値として飛散仮定を別途解析する。

3) 解析結果のアニメーション化に関する基礎的検討

a) はじめに

解析結果をアニメーション化する手法について基礎的な検討をおこない、具体的なアニメーション化システムを試験的に構築した。試作システムの使用性・作業効率および成果物アニメーションについて技術的な考察を行い、今後の展開を図る。

b) 手法についての基礎的検討

アニメーション化のプロセスを図 19 に示す。

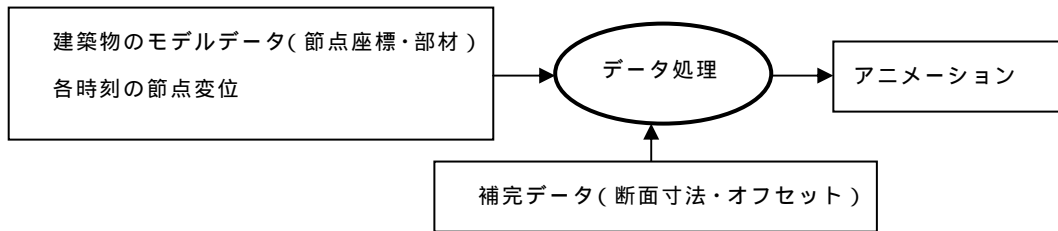
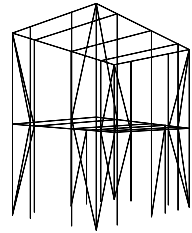
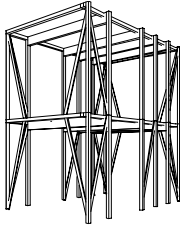
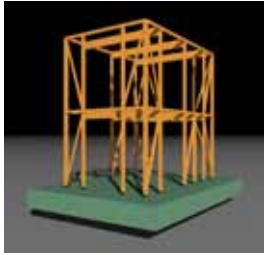


図 19 アニメーション化プロセス

建築物のモデルデータは倒壊解析プログラムの入力として、各時刻の節点変位は倒壊解析プログラムの解析結果として与えられる。補完データについては、本来倒壊解析プログラムの入力として与えられるべきものであるが、今回は補完データとして別に準備した。これらのデータをアニメーションとして視覚化する手法、およびアニメーション画像の種類を表 1 にまとめる。

表 1 視覚化手法・アニメーション画像の種類

画像の種類	ワイヤフレーム画像	ソリッド画像	シェーディング画像
手法			
a. メモリ上で処理を行いながらリアルタイムでディスプレイに表示	a- ワイヤフレーム画像リアルタイム表示	a- ソリッド画像リアルタイム表示	a- シェーディング画像リアルタイム表示
b. 動画ファイルを出力し、市販ビューアにより表示	b- ワイヤフレーム画像動画ファイル生成	b- ソリッド画像動画ファイル生成	b- シェーディング画像動画ファイル生成

a- , a- については、計算コストとコンピュータの処理能力を考えると実現化は困難である。また、b- ,b- についてはリアルさという点で b- に著しく劣る。従って今回は a- および b- について、具体的なシステムを試験的に構築した。以下、その概要を述べる。

c) ワイヤフレーム画像リアルタイム表示システムの構築

ワイヤフレームモデルでは、節点を結んだ大きさのない線で各部材を表現する。処理プロセスを図 20 に示す。

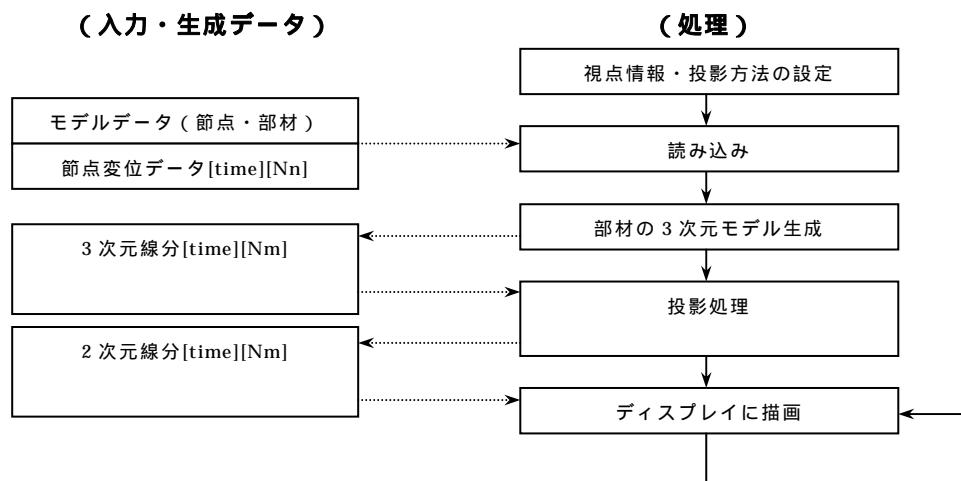


図 20 ワイヤフレーム画像リアルタイム表示システムの処理プロセス

本手法は写実性・視認性が著しく犠牲になるが、主なデータ処理は3次元線分の投影のみとなるため計算時間がほとんどかからないという利点がある。従って、質の高いイメージを得ることができるが時間のかかる「シェーディング画像動画ファイル生成」を実行する前に、アングルを決定するなどのプレビューツールとして有効である。

d) シェーディング画像動画ファイル生成システムの構築

）概要

シェーディングモデルでは光による陰影を表現できるため、写実的な画像を得ることができる。本手法の処理プロセスを図 21 に示す。

）部材のソリッドモデルの構築

シェーディングモデルにおいては、各部材を3次元的な大きさを持った物体(ソリッド)として構築する必要がある。入力となる解析結果データには部材の大きさや部材軸回りの回転に関する情報は含まれていないため、それらを補う必要が生じる。ソリッドモデル、特に角柱を表現するためのモデルを図 22 に示す。このモデルによって、角柱を空間上に一意的に表現することができる、なお、 O_S, O_E は部材の取り合い部分を表現するために導入したパラメータである。時刻 T_i における主軸および部材軸ベクトル e_{1i}, e_{2i}, e_{3i} を以下の過程で求める。

$$\mathbf{e3}_i = \frac{\mathbf{N}_{Si} - \mathbf{N}_{Ei}}{|\mathbf{N}_{Si} - \mathbf{N}_{Ei}|} \quad (50)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{e3}_0 \times \mathbf{e3}_i \quad (51)$$

$$\sin \theta = |\mathbf{N}| \quad (52)$$

$$\cos \theta = \mathbf{e3}_0 \cdot \mathbf{e3}_i \quad (53)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} N_x^2 \cdot (1 - \cos \theta) + \cos \theta & N_x \cdot N_y \cdot (1 - \cos \theta) - N_z \cdot \sin \theta & N_x \cdot N_z \cdot (1 - \cos \theta) - N_y \cdot \sin \theta \\ N_x \cdot N_y \cdot (1 - \cos \theta) + N_z \cdot \sin \theta & N_y^2 \cdot (1 - \cos \theta) + \cos \theta & N_y \cdot N_z \cdot (1 - \cos \theta) - N_x \cdot \sin \theta \\ N_x \cdot N_z \cdot (1 - \cos \theta) - N_y \cdot \sin \theta & N_y \cdot N_z \cdot (1 - \cos \theta) + N_x \cdot \sin \theta & N_z^2 \cdot (1 - \cos \theta) + \cos \theta \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$\mathbf{e1}_i = \mathbf{R} \cdot \mathbf{e1}_0 \quad (55)$$

$$\mathbf{e2}_i = \mathbf{R} \cdot \mathbf{e2}_0 \quad (56)$$

ここで $\mathbf{e1}_0, \mathbf{e2}_0, \mathbf{e3}_0$ は各ベクトルの初期値、 \mathbf{R} は \mathbf{N} 軸まわりの回転を表わす行列、 \mathbf{N} は $\mathbf{e3}_0$ と $\mathbf{e3}_i$ に直交する単位ベクトルである。(図 23 参照)

この手法では、各時刻の主軸・部材軸ベクトルは、端部節点座標のみの関数となるため、ソリッドモデルも端部座標のみで決まり、変位のプロセスにはよらない。端部座標が一定の移動の後元に戻った場合、ソリッドモデルも完全に元にもどる(図 23 参照)。この他に、単位時間前の主軸・部材軸ベクトルと現在の端部節点座標を使用して主軸・部材軸ベクトルを求める方法が考えられる。この場合にはソリッドモデルは変位のプロセスに依存する。いずれのモデルが適切であるかは今後の検討課題である。

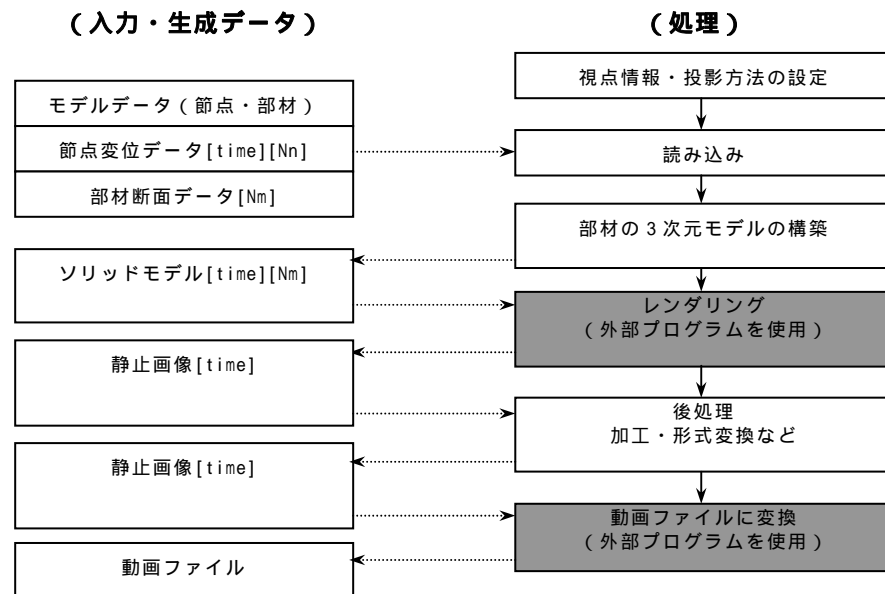
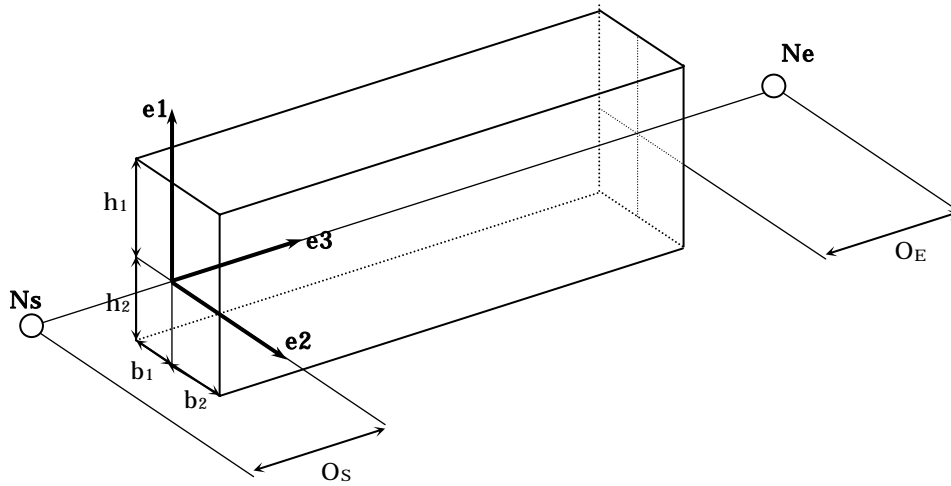


図21 シェーディング画像動画ファイル生成システムの処理プロセス



Ns : 始点
e1 : 断面主軸 1 を表わす単位ベクトル
e3 : 部材軸を表わす単位ベクトル
 O_s, O_E : 部材軸方向のオフセット値

Ne : 終点
e2 : 断面主軸 2 を表わす単位ベクトル
 h_1, h_2, b_1, b_2 : 断面寸法

図22 四角柱のソリッドモデル

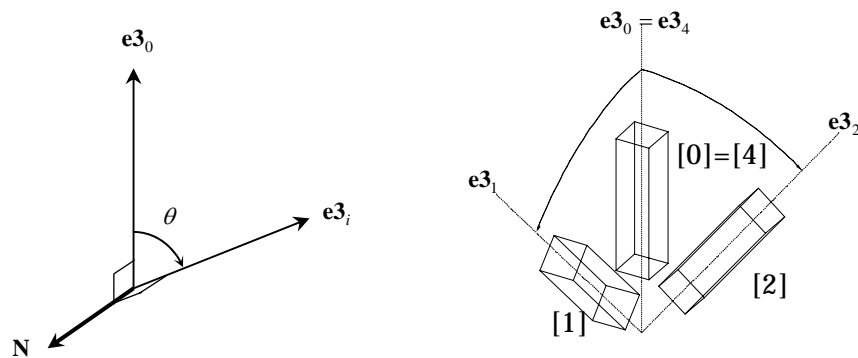


図23 部材軸の回転

) レンダリング

レイトレーシング法（光線追跡法）によってソリッドモデルをレンダリングし、各時刻の静止画像を得る。レイトレーシング法は、計算コストは大きいですが、質の高い画像が得られる手法である。レイトレーシング法に関する研究は数多くなされており、技術的な課題は少ない。今回は外部プログラム「PovRay3.1 MSDOS 版」を使用してレンダリングを行った。

) 後処理

レンダリングによって得られた画像に必要な応じて後処理を行う。今回は各静止画の右下に時刻の追加描画を行った。

) 動画生成

静止画から動画を生成するためのソフトウェアも種々市販されている。今回は外部プログラム「Graphic Convertor」を使用して静止画から QuickTime ムービーを生成した。

e) ソフトウェアの構築

以上の処理を行うための試作ソフトウェアを構築した。

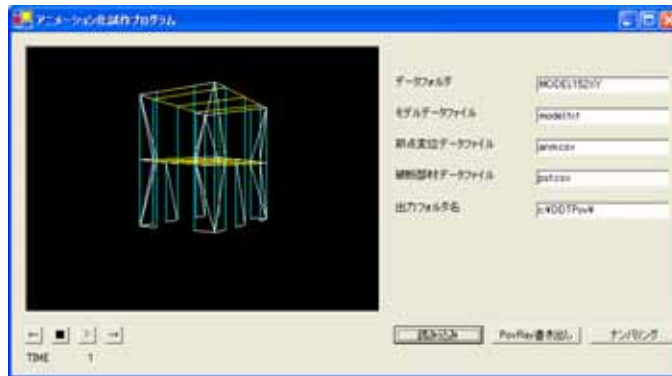


図24 試作ソフトウェアの壁面

試作ソフトウェアのユーザー処理プロセスを図 25 に示す。グレー色の項目は外部プログラム上での処理を表す。外部プログラムの使用に伴い、ファイルの書き出しおよび読み込み処理が煩雑となり、ユーザーの負担が大きい。

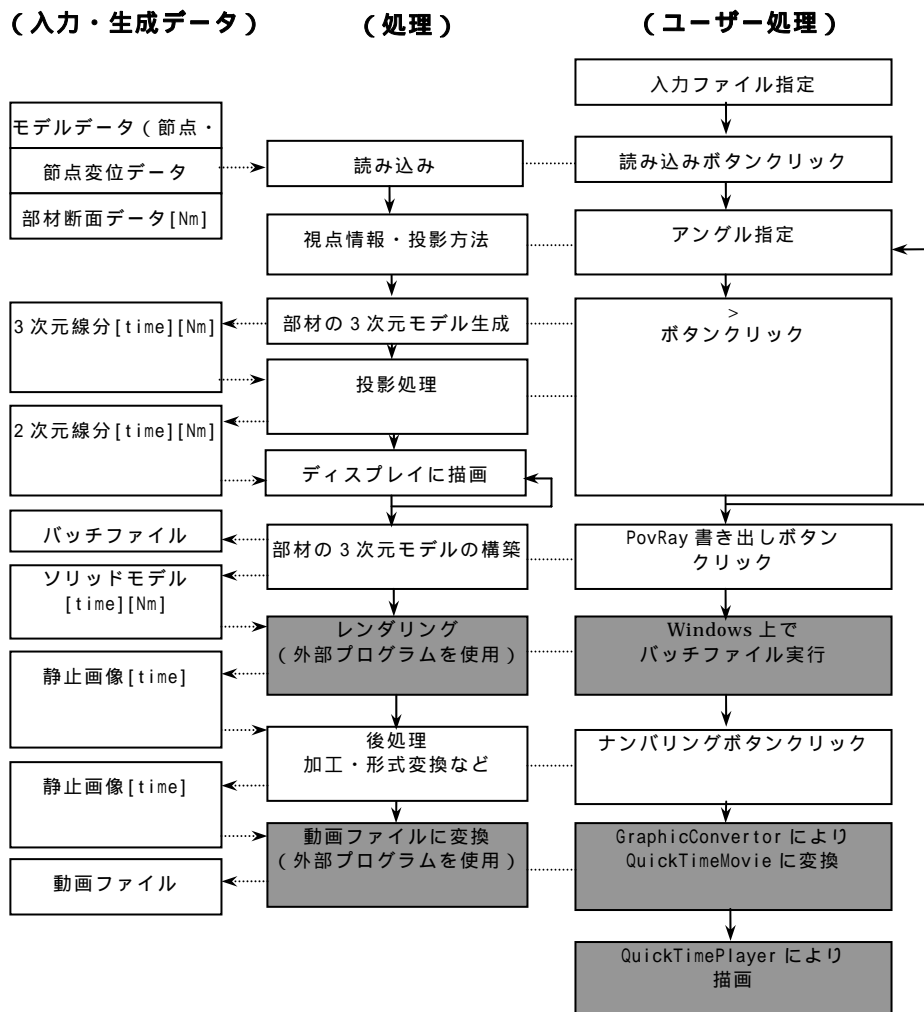


図25 アニメーション生成のユーザー処理プロセス

f) 考察

) 処理時間

試作システムによる処理時間を表 2 に示す。

表 2 試作システムによる処理時間

処理	時間	トータル 16 秒 ,24FPS の 動画作成時
読み込み	微小	微小
ワイヤフレーム表示	時系列数による	16 秒/回
3次元モデルの構築	微小	微小
レンダリング(PovRay3.1Dos 版 による)	20 秒/枚 (800x600 pixel)	2 時間 8 分
後処理	約 1 秒/枚	約 6 分
動画ファイル構築 (GraphicConvertor Mac 版)	約 1 秒/枚	約 6 分

計 2 時間 20 分

処理時間のほとんどはレンダリングによるものである。なお、透過や複雑なテクスチャマッピングがないという条件の下では、レンダリング時間は部材の数にはほとんど依存しないという結果が得られた。

) アニメーションの品質

動き、画質とも良好である。

) ユーザーインターフェイス

ワイヤフレーム表示

ワイヤフレーム表示は、シェーディング画像動画のためのプレビューとして有効であるが、アングルが完全には一致しないなどの問題点がある。

外部プログラム

現段階では、レンダリングおよび動画ファイル構築を外部プログラムに委譲しているため、

外部プログラムの入手およびインストール作業が必要である

ひとつのプログラムで全ての作業を行うことができず、煩雑である

などの問題がある。

g) 今後の課題

個々のプロセスに関して大きな問題はない。主な課題は解析プログラム、外部プログラムとの連携を強化し、処理の効率化を増大することである。

解析プログラムとの一体化

現段階では解析プログラムとのデータのやりとりはテキストファイルを介して行っている。将来的には解析プログラムとアニメーション化プログラムを一体化し、解析およびアニメーション化を一連の作業として行えるように改良する。

ワイヤフレーム表示と動画のアンゲル的一致可。
ワイヤフレーム表示画面における光源配置などの機能追加。
レンダリングおよび動画ファイル構築機能追加。

いずれも技術的な問題は少なく、機能追加は可能であるが、開発には相当の期間が必要である。

4) 試解析

a) 解析モデル

本研究の一環として平成14,15年度に実施された振動台実験の試験体No.3,5,6に対応する解析モデルを図26のように構成する。柱、横架材に相当する軸要素の軸剛性および多節点曲げ要素の曲げ剛性・曲げ強さはヤング係数、曲げ強度の基準値を用いて算定する。その他の条件設定を以下に述べる。

) 要素の復元力特性

筋かい、木ずり(No.6のみ)、ラーメン効果置換ブレース、端部バネ要素の復元力モデルを図9,11,12および表3に示す。筋かいは引張・圧縮筋かいそれぞれの耐力に図9下段の耐力係数を乗じる。木ずりに付随する柱拘束材の線形軸剛性は9.8kN/cmとする。端部バネ要素と柱拘束材の限界変形角は60°および45°とする。水平構面の面内剛性は床倍率3.88相当の値とする。

) 接地剛性・摩擦力

節点が接地した時のZ方向剛性は節点質量(t)に490を乗じた値(kN/cm)とする。そのときX,Y方向の摩擦係数は0.4とする。

) 質量分布

柱端部レベルの節点質量は0.025(t)、その他の節点質量は当該レベル水平面において節点間距離を1/2に分割する線分により区画される部分に含まれる床・屋根・外壁の重量に相当する値とする。

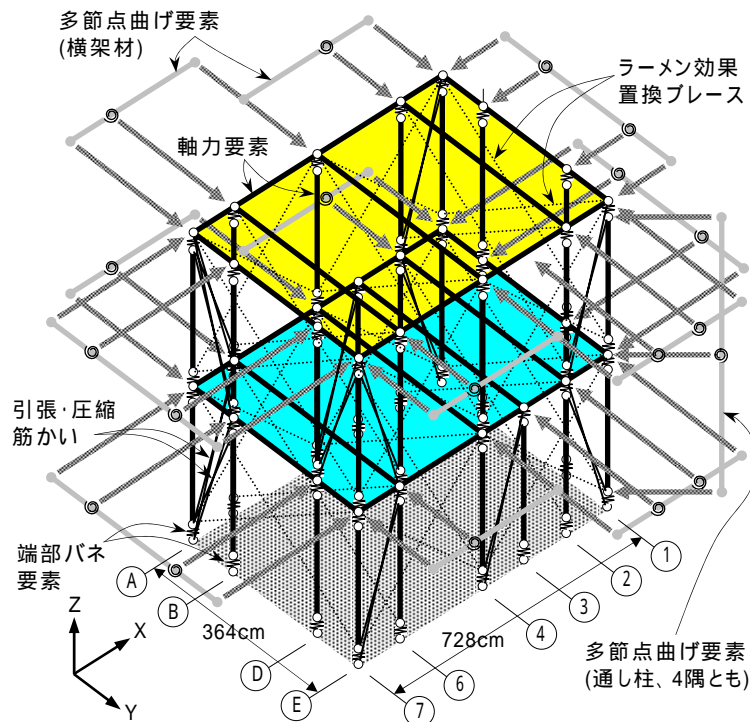


図26 解析モデルの構成

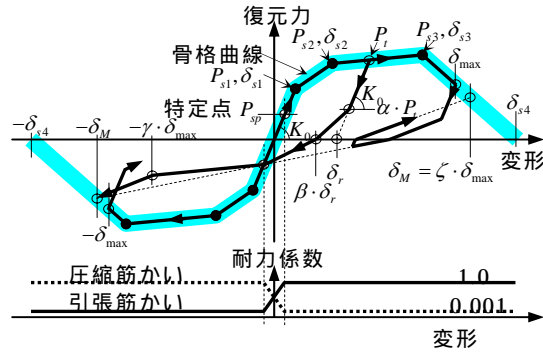


図9 筋かい・木ずりの復元力モデル(再掲)

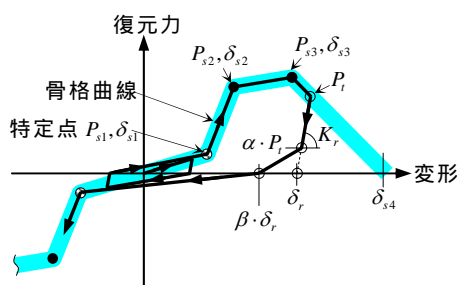


図11 ラー妙置換ブレースの復元力モデル(再掲)

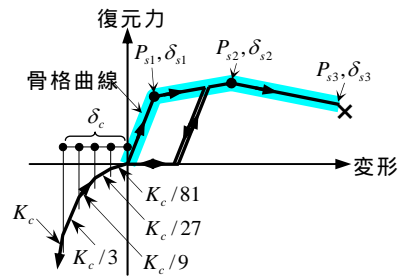


図12 材端バネ要素の復元力モデル(再掲)

表3 復元力モデルのパラメータ (kN, cm, kN/cm)

部材	筋かい ¹		木ずり ²	ラー妙効果ブレース ³			柱脚・柱頭 接合部 ⁴	
	引張	圧縮		(X方向)			3, 6	5
試験体	共通	共通	共通	共通				
階方向	共通	共通	共通	1		2		
				正	負	正負		
P_{s1}	0.589	0.589	1.32	6.28	6.28	3.16	9.81	0.59
P_{s2}	1.373	3.727	1.64	24.5	18.7	11.8	12.5	0.98
P_{s3}	2.157	5.39	0.65	19.6	25.5	13.7	7.16	0.98
P_{s4}	0	0	0	0	0	0		
s_1	0.24	0.24	2.94	8.14	8.14	8.65	0.12	0.30
s_2	2.50	3.20	7.08	17.8	14.9	15.1	0.77	1.10
s_3	12.0	7.90	28.0	50.0	175	50.0	4.50	1.50
s_4	15.0	13.1	40.0	220	225	125		
P_{sp}	0.392	0.39	1.08					
	0.20	0.20	0.50	0.80	0.30	0.30		
	0.75	0.75	0.50	0.20	0.20	0.20		
	0.70	0.35	0.50	0.30	0.30	0.40		
	0.40	0.30	0.60	0.70	0.70	0.30		
	1.05	1.05	1.10	1.20	1.70	1.10		
K_r				2.94	2.94	2.94		
K_c							245	245
c							0.01	0.01

1 壁幅910mm当り。2階筋かいはNo.6 Case2では上記の0.99倍、その他では0.67倍。 2 壁幅910mm当り。 3 一層当り。1,2,4,6,7通りに1/5ずつ割り当てる。No.5の耐力は上記の0.2倍。 4 通し柱2階床レベルは245kN/cmの線形剛性とする。

) 粘性減衰

瞬間剛性比例型とし、減衰定数は端部バネ要素で0.05、その他の要素で0.02とする。

b) 解析条件

入力波は振動台上で計測された加速度記録とし、入力方向はX,Yの2方向とする。解法はNewmark 法($\gamma=1/4$)とし、解析の刻み時間は1/1000secとする。また、多節点曲げ要素の曲げ剛性と応力は棒要素の曲げに対して剛であることに基づいて並進方向の剛性と応力に変換する。引張筋かいについて、耐力が0となった時点で分離するものとして、その時点の両端の応答加速度等を初期値として飛散過程を別途解析する。

c) 解析結果

No.3について端辺(X)方向の応答層間変位時刻歴および倒壊過程を実験値と比較して図27、図28に示す。倒壊時刻に若干の相違があるが、応答過程と倒壊状態はほぼ一致している。

特定時刻の変形状態を図29～34に示す。E通り・7通りからA通り・1通り方向を見る場合をAngle1、逆方向を見る場合をAngle2としている。No.6については2種類の復元力モデルを設定した。それぞれの復元力モデルの相違がわずかであるにも拘らず倒壊挙動は大きく異なっている。Case2が実験時の目視観察結果に近い。No.7は金物補強が無ことにより全体的に崩壊する様子が追跡できている。

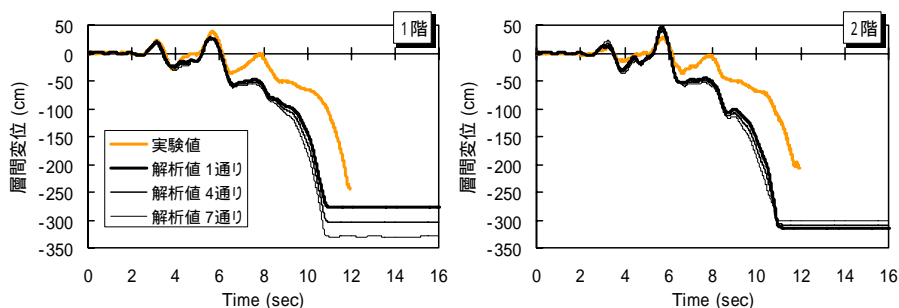


図27 層間変位時刻歴 (No.3, X方向)

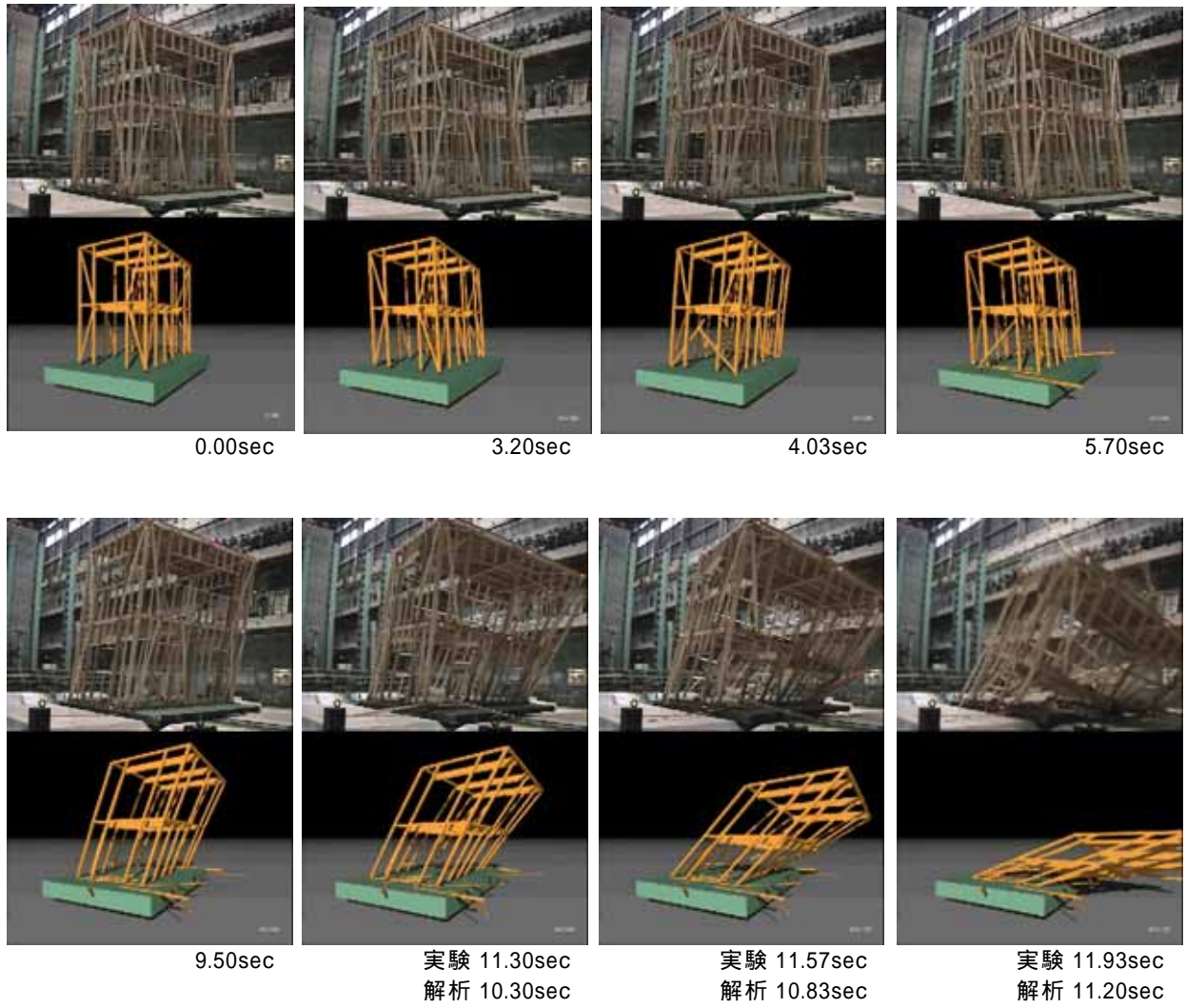


図 28 解析値と実験地の比較 (No.3, Angle1)

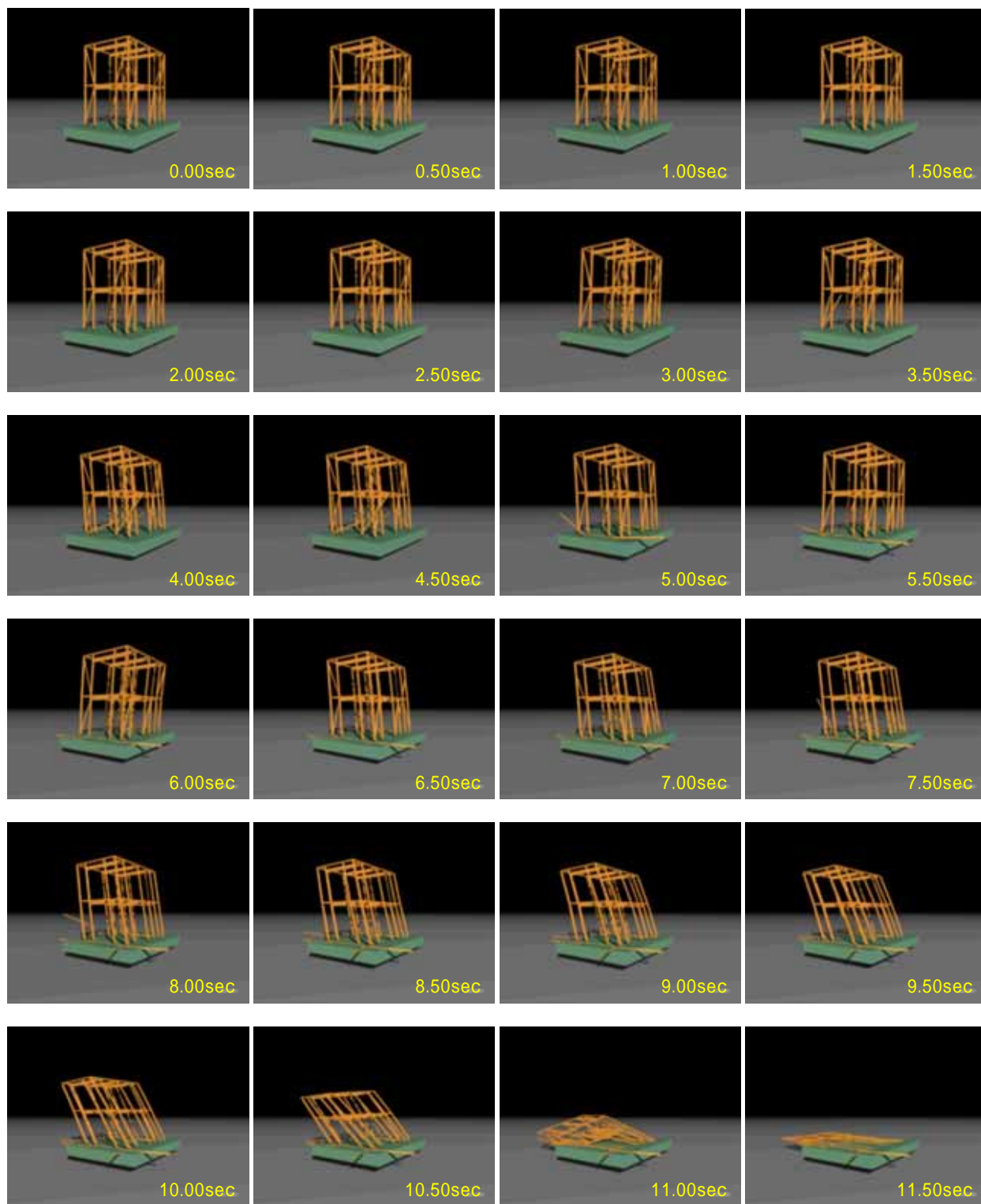


図 29 解析による倒壊過程 (No.3, Angle1)

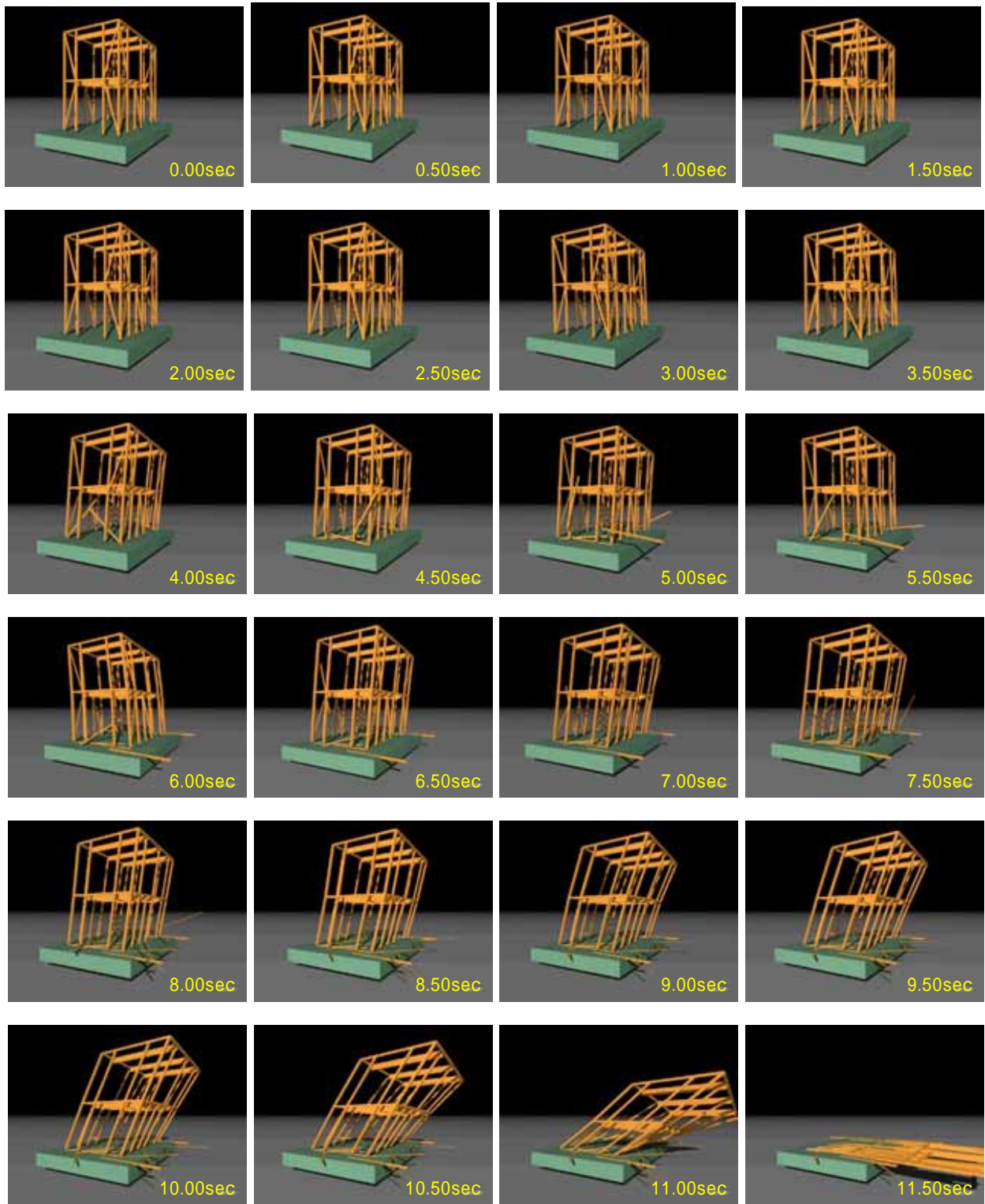


図 30 解析による倒壊過程 (No.3, Angle2)

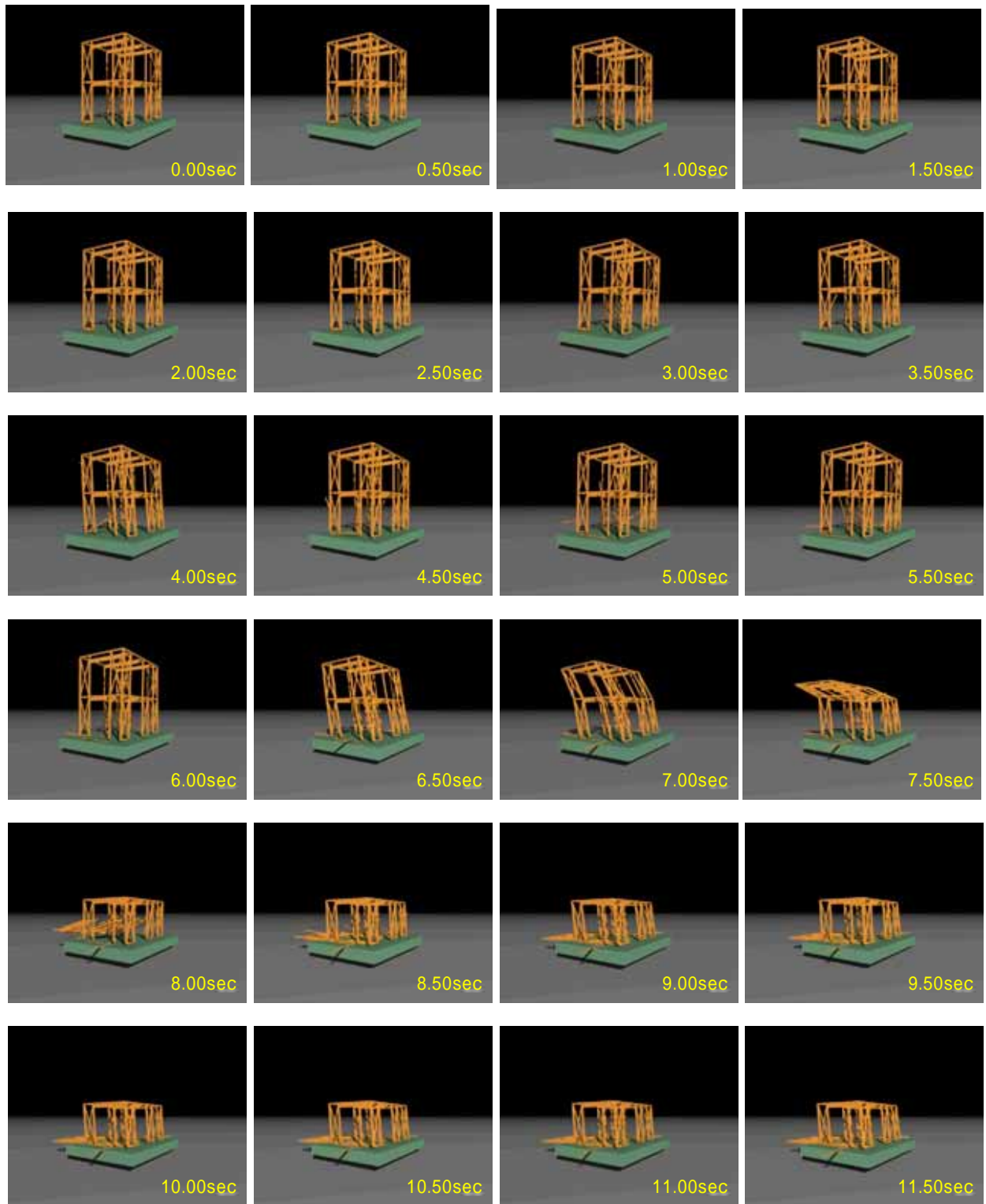


図 31 解析による倒壊過程 (No.6 Case1, Angle1)

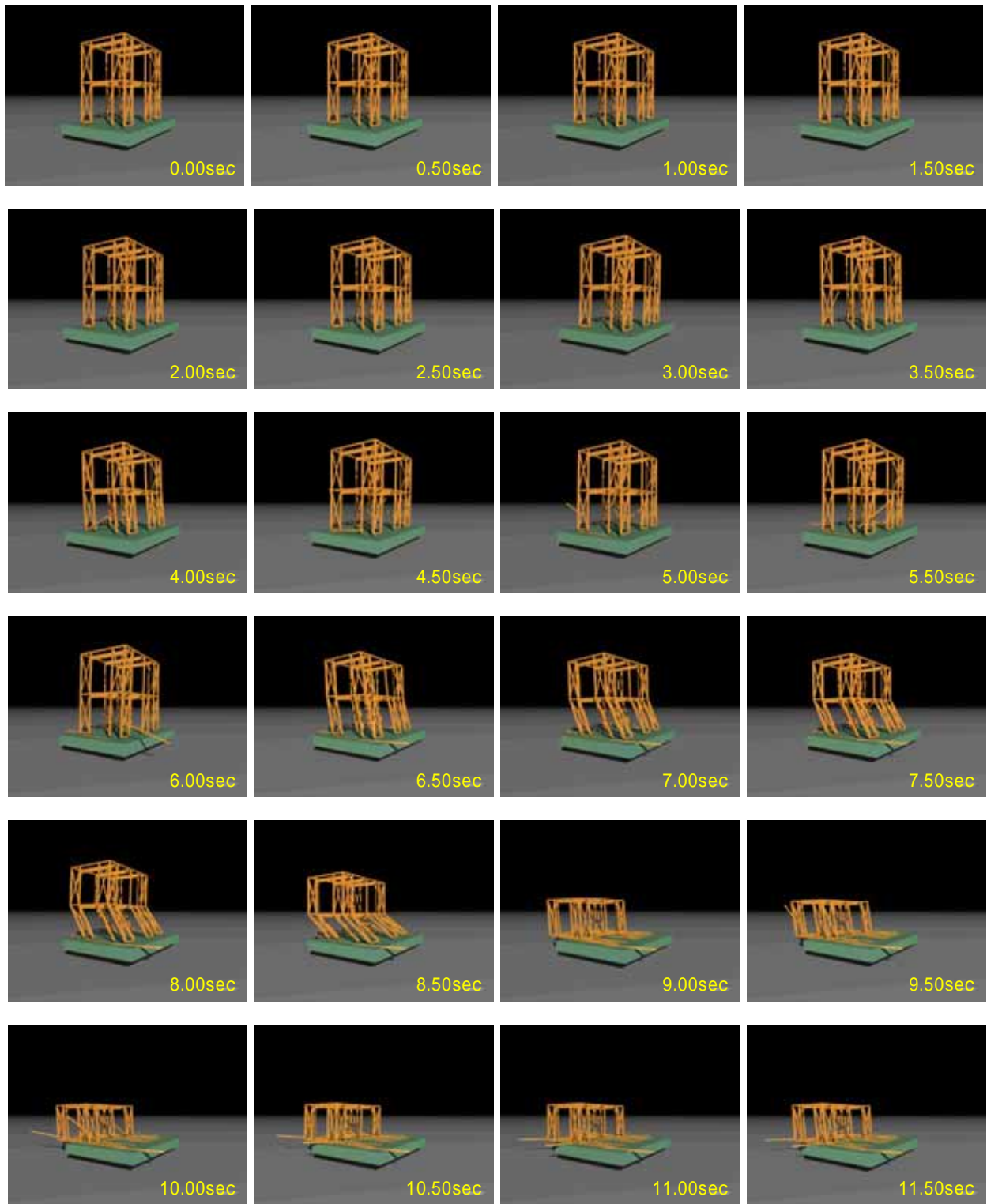


図 32 解析による倒壊過程 (No.6 Case2, Angle1)

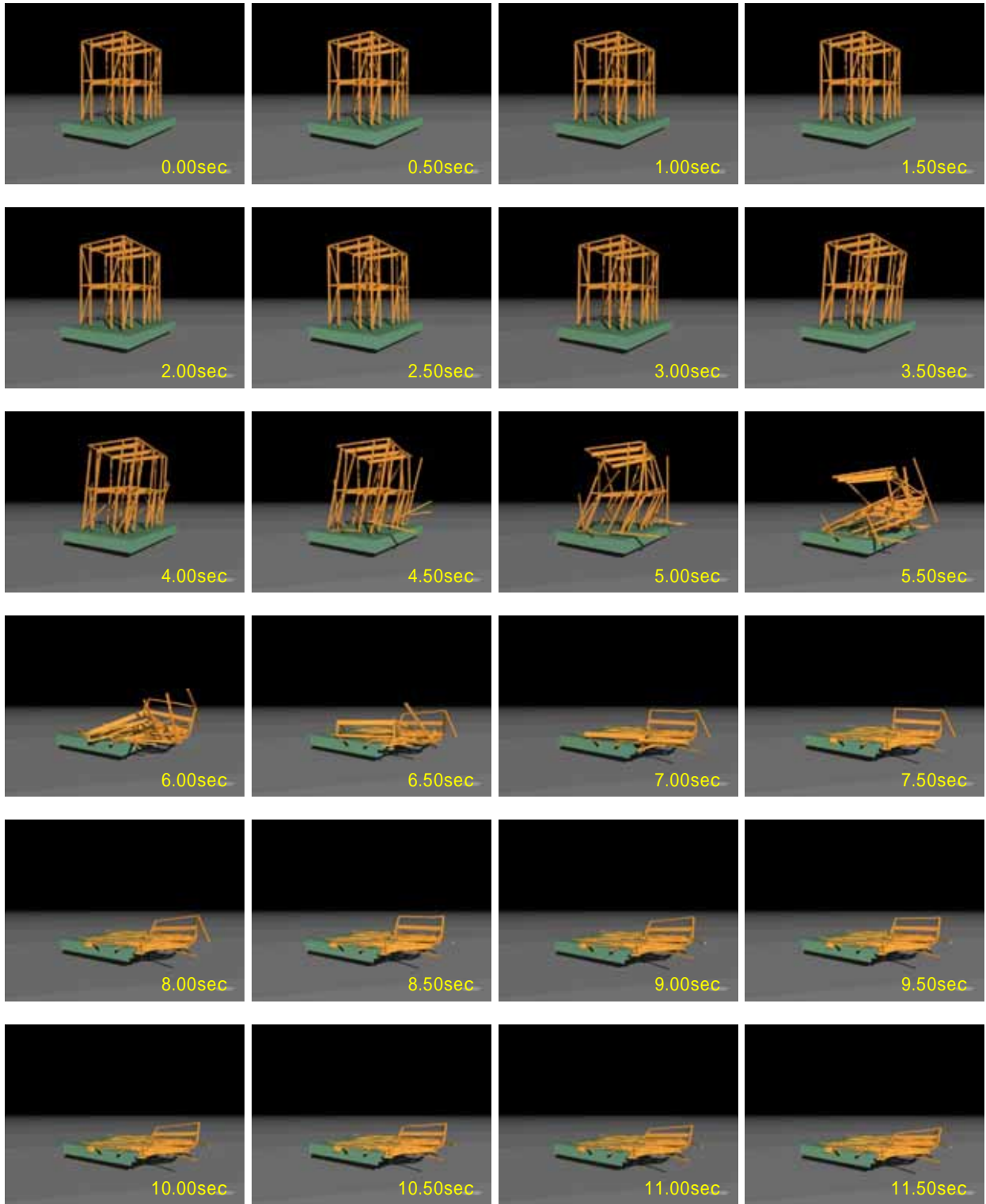


図 33 解析による倒壊過程 (No.7, Angle1)

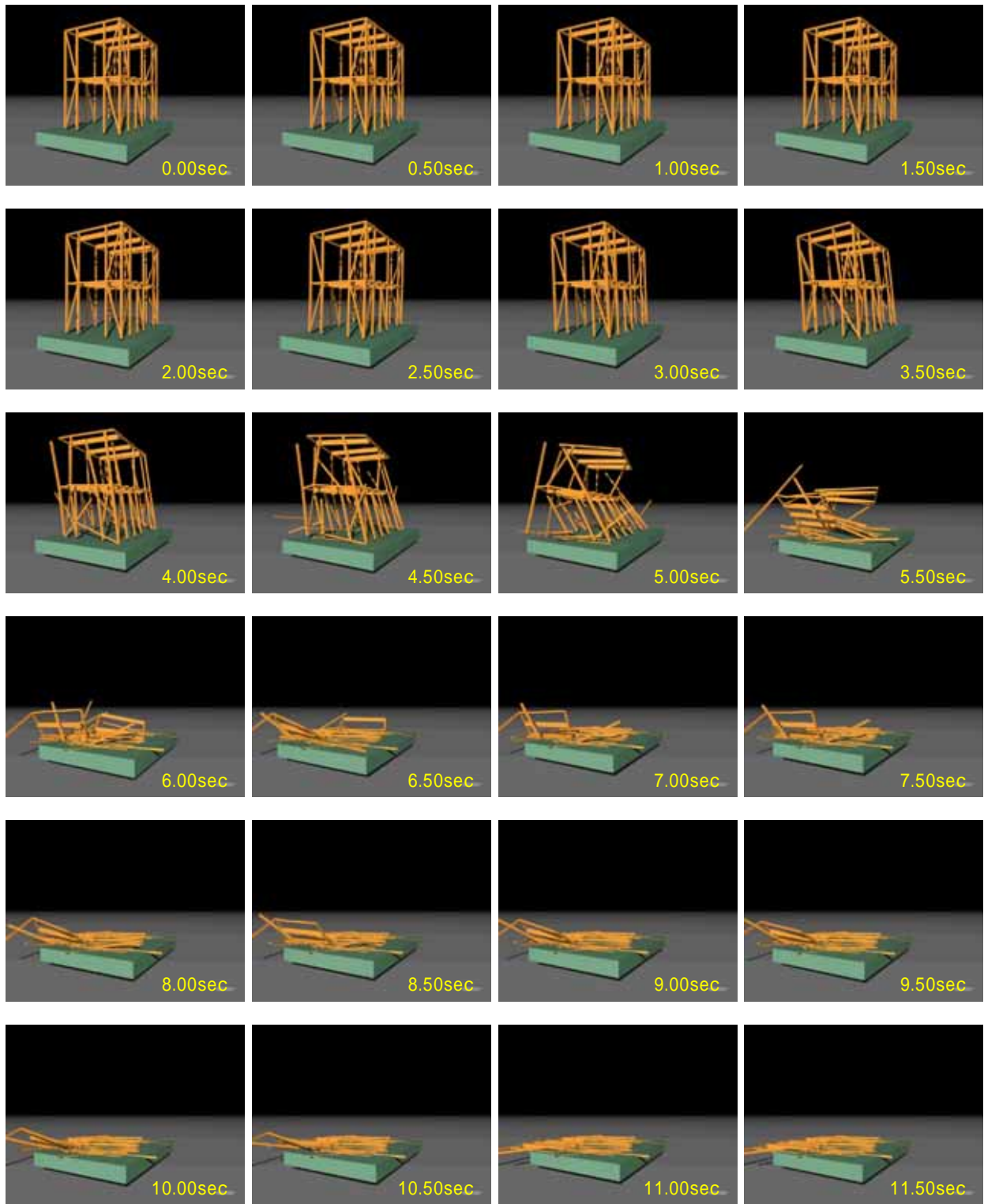


図 34 解析による倒壊過程 (No.7, Angle2)

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 震災被害事例および昨年度の中規模震動台実験結果を参考にして、木造住宅の地震時倒壊パターンを仮定し、解析モデル設定方針を設定した。この設定方針に基づき、部材の分離・飛散現象の追跡を目的として、昨年度構築した倒壊応答解析の基礎理論を拡張した。
- 2) 拡張された解析理論を用いて応答解析を行ったところ、解析結果は昨年度の中規模震動台実験の結果に良好に一致すること、部材の分離・飛散現象が追跡可能であること、および復元力パラメータのわずかな違いにより崩壊パターンは大きく変化することが確認された。
- 3) 解析結果の三次元アニメーション表示を試行した。柱・梁・筋かい部材を直方体として表示し、陰影をつけることで視認性が高くなることが確認された。
- 4) 今後の課題として次のものが挙げられる。

復元力特性の特定

本年度の作業により、筋かい壁、木ずり壁、柱脚・柱頭接合部、柱・梁ラーメン効果、接地反力等の復元力特性が設定されたが、ごく限られた仕様を対象としており、また推定が含まれている。まぐさ・窓台端部接合部も含め、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。

水平構面の破壊

本年度の解析理論によれば横架材端部接合部の破断を表現することも可能である。しかし、水平構面端部の引張応力は横架材の他に床面材・床根太等によって分担されるため、水平構面の破壊を表現するためには床面材・床根太等を含めたモデル化について検討する必要がある。また、床面材・床根太等による水平面の復元力特性を特定する必要がある。

土台・基礎梁を含む場合のモデル化

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) 木造住宅等震災調査委員会：平成 7 年兵庫県南部地震木造住宅等被害調査報告書(中間報告)，平成 7 年 3 月
- 2) 真柄琢哉，三宅辰哉，五十田博，田守伸一郎，笹川明：枠組壁工法建築物の地震時最大応答変位に関する考察，日本建築学会構造系論文報告集，第506号，pp.75-82，1998.4
- 3) 和田 章，向 秀元：一方向大スパン複層円筒トラス構造物の地震応答解析，日本建築学会構造系論文報告集，第 413 号，pp.87-96，1990.7
- 4) 戸川隼人：有限要素法の基礎と応用シリーズ 1，有限要素法概論，培風館，昭和 56 年 11 月 25 日

(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 th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada	平成 16 年 8 月 (発表予定)
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 (発表予定)
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 (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
拡張倒壊応答解析理論確認用の試行解析プログラム	拡張された倒壊応答解析理論に基づく木造立体軸組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16年度業務計画案

(a) 解析対象範囲の設定

平成14,15年度の作業結果ならびに、本プロジェクトの一環として実施された振動実験および静的加力実験の結果に基づいて、既知となった耐力壁・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。

(b) 倒壊解析手法の構築

平成14年度の作業により軸力要素によって構成される解析モデルを用いた倒壊解析が可能となった。平成15年度の作業により曲げ要素(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が行われた。平成16年度はこれらの成果を統合し、任意の木造軸組構法住宅を対象とした倒壊解析手法を構築する。

(c) 解析精度の評価

平成14,15年度に本プロジェクトの一環として実施された振動実験に対応する倒壊解析を行い、解析結果と実験結果の比較により解析精度を評価する。

(d) 入出力サンプル作成

本シミュレーションソフトのデータ入力および結果出力はいずれも図化イメージを媒介して行われることを想定し、入出力画面のサンプルを作成する。

