

地震リスク明示のための家屋倒壊とそれに伴う 人的被害発生過程のシミュレーション

SIMULATION OF THE COLLAPSE OF TIMBER FRAME HOUSES AND
CASUALTY OCCURRENCE PROCESS FOR SEISMIC RISK AWARENESS

清野 純史¹・古川 愛子²

¹博士(工学) 京都大学大学院助教授 工学研究科都市社会工学専攻
(E-mail:kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

²修士(工学) 京都大学大学院博士課程 工学研究科都市社会工学専攻
(E-mail:furukawa@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

兵庫県南部地震での住宅の全壊は11万戸以上に及び、6400人にも及び死者と4万人以上の負傷者を出した。兵庫県内の死者5,480人のうち家屋・家具類等の倒壊による圧迫が4,823人で全体の88%を占め、倒壊した家屋の大部分は老朽化した木造家屋であり、倒壊しやすくなっていたものと思われる。しかし、事前の耐震対策の必要性を、実際に被害を被った当事者側が十分に知りえたかどうか、すなわち、自分の家がどのように壊れ、そして家屋内にとどまっていた場合にはどのような形で負傷するのかという情報を十分に知りえたかどうかは疑問が残るところである。本論文では、地震時に木造建物がどのような挙動をするのか、またその建物が倒壊することによって人的被害がどのように発生するのかを視覚的かつ定量的にわかりやすく提示するための方法論について述べる。

キーワード：木造構造物，地震時挙動，建物倒壊，人的被害，安全性評価，個別要素法

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災は、我が国で初めて震度7を記録した都市直下型地震であり、神戸市を中心に数多くの建築物が甚大な被害を受け、深刻な人的被害をもたらした。RC造を含む住宅の被害については全壊が約10万戸、半壊が約10万7千戸にものぼり、その中でも土葺き瓦、土塗り壁等を用いた在来工法の古い木造住宅に被害が多く、最近建てられた現行の耐震基準を満たす住宅に被害は少なかった。人的被害については死者が6,433名、負傷者は41,500余名に及んだ。平成7年度の国土庁の統計¹⁾によると、地震発生時刻が午前5時46分という早朝で多くの人は就寝中であったため、兵庫県内の死者5,480人のうち家屋・家具類等の倒壊による圧迫が4,823人で全体の88%を占め、火災による焼死が550人で10%、残り2%は落下物による脳挫傷・骨折、車両転落による全身打撲であった。死因が圧迫死の場合、ほぼ即死状態であったとみられており、救出が早ければ命が助かったと思える人は極めて少数で、住宅がしっかりしているかどうかが生死を分けたと言える。

このように、死因の大部分を占めた住宅の倒壊による人的被害の問題を考えると、地震の揺れを受けた建物がどのような挙動を示し、破壊に至るのかを知ることが

重要である。それは、その倒壊のメカニズムおよび人的被害の発生メカニズムを知ることが、すなわち、どのような状況で建物の倒壊が発生し、その時どれだけの力が人体に加わることにより死傷が発生するのかを正しく認識することが、自らの住居の耐震性について考え、いかにして地震から自分や家族を守るかを考え、そして来るべき大地震への備えについて考える契機となり得るからである。

これまで、主に工学が関わってきた地震防災は、事前対策としての施設の耐震、すなわちハード面での構造物の耐震補強と地震動予測、そして阪神淡路大震災以降の最中・直後対策としてのいわゆるリアルタイム地震防災であろう。しかし、これらの対策の必要性を、実際に被害を被っている当事者側が十分に知りえたかどうか、すなわち、自分の家がどのように壊れ、そして家屋内にとどまっていた場合にはどのような形で負傷するのかという情報を事前に十分に知りえたかどうかは疑問が残るところである。施設の耐震は事前の防災であるが故、過去の経験やそこから類推されるものを超える事柄は想定しにくいいため、様々な問題点が先送りにされているのもまた事実である。リアルタイム地震防災にしても、基本的には地震動観測情報から被害関数を經由して被害把握を行なっているケースが多いため、自分の街が、あるいは

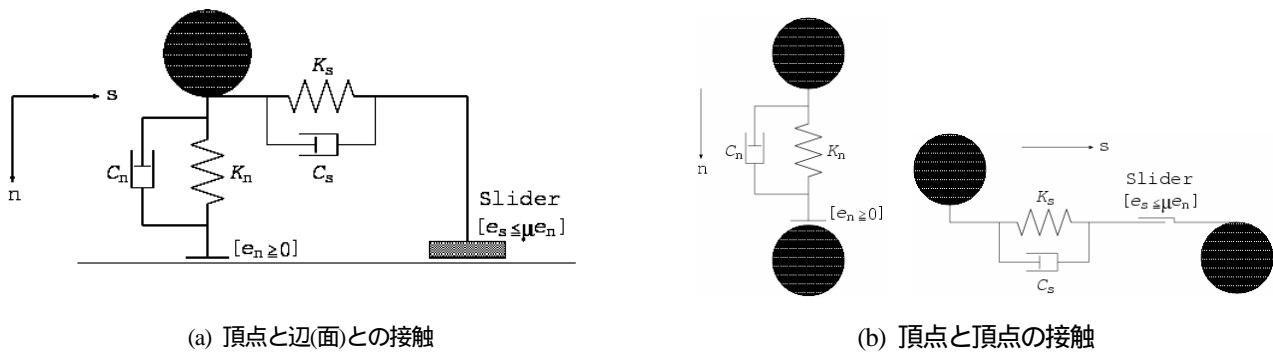


Fig.1 接触モデル

個々の家が、地震の最中あるいは地震の直後に具体的にどのような状態にあるのかを詳細に知りたい場合には、推定精度やそこに含まれる情報量に不十分な面が残る。

著者らはこれまでに2次元個別要素法を用いて物理的側面から地震時の住宅の破壊挙動、およびそれに伴う人的被害に関する検討を行ってきた²⁾。しかしながら実際の建物の挙動は3次元的なものであり、2次元的なシミュレーションでは全ての現象を表すことは不可能である。そこで、本研究ではプログラムを3次元に拡張することにより、ねじり現象も含めたより現実に近い破壊挙動のシミュレーションを行い、建物倒壊とそれに伴う人的被害発生メカニズムを視覚的かつ定量的に明示することを試みる。本研究で行うシミュレーションはまだ初期段階であるが、最終的に個人が自分の住む家を対象としてWeb上で自由に本シミュレーションを試行できるようになれば、地震災害に関する社会問題の解決(人的被害の抑制、耐震改修や地震保険へのインセンティブ)へ大きく貢献できるものと思われる。

2. 解析手法

2.1. 個別要素法

本研究では、3次元個別要素法を用いて数値解析を行った。各要素は全て剛体と仮定した。個別要素法³⁾とは、個々の要素ごとに独立した2階常微分の運動方程式をたて、これを差分近似して時間領域で前進的に解くことにより要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動を解析しようとするものである。数値シミュレーション手法としての個別要素法³⁾は、地盤工学⁴⁾や構造工学⁵⁾のみならず、避難行動⁶⁾⁷⁾などの社会科学的な分野に至るまで広く応用されている。各要素間には仮想のばねとダッシュポットがあり、要素に作用する力はこれらのばねを介して伝達される。個別要素法は前進的に運動方程式を解くため、時々刻々と変化する各要素間の接触問題を個別に取り扱いながら解析することができる。従来の

個別要素法では、要素間の力の伝達は要素が互いに接触している時にのみ行われる形になっており、要素間の引張抵抗を考慮できず、連続体としての挙動を表現することができなかった。そこで、本研究では要素間の引張抵抗を表すために、要素のばねとは別にジョイントを導入した。初期状態において各要素はジョイントによって結合されており、建物全体は連続体としての挙動を示すが、強い入力地震動によって一度ジョイントが切れると、その後はばらばらな単体として運動する。このように個別要素法を用いれば、連続体から離散体まで一貫しての取り扱いが可能であるため、建物の弾性的挙動から破壊に至る大変形挙動まで追跡でき、本研究で対象とするような梁や柱の集合体としての木造建造物の倒壊現象や、建物内部の人的被害を把握するには非常に適した解析法である。

2.2. 運動方程式

剛体の運動は、重心の並進運動と重心まわりの回転運動に分けて考えることができる。

(1) 重心の並進運動

任意の時刻 t において要素に作用する全接触力は、その要素に作用する個々の接触力 F_x, F_y, F_z を全て足し合わせたものである。したがって、解析に用いる運動方程式は次のようになる。

$$\ddot{x} = (f_x + \sum F_x) / m \tag{1}$$

$$\ddot{y} = (f_y + \sum F_y) / m \tag{2}$$

$$\ddot{z} = (f_z + \sum F_z) / m \tag{3}$$

ここで、 x, y, z は要素重心の座標、 m は質量、 f_x, f_y, f_z は要素に作用する物体力(重力、地震荷重等)である。

解析の時間間隔を Δt とすると、1つ前のステップ(時刻 $t-\Delta t$)における速度・変位、および式(1), (2), (3)によって得られた加速度を用いて、現ステップ(時刻 t)で速

度および変位は次式で求められる．

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_t \\ \dot{y}_t \\ \dot{z}_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_{t-\Delta t} \\ \dot{y}_{t-\Delta t} \\ \dot{z}_{t-\Delta t} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{t-\Delta t} \\ \ddot{y}_{t-\Delta t} \\ \ddot{z}_{t-\Delta t} \end{Bmatrix} \Delta t \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_{t-\Delta t} \\ y_{t-\Delta t} \\ z_{t-\Delta t} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \dot{x}_{t-\Delta t} \\ \dot{y}_{t-\Delta t} \\ \dot{z}_{t-\Delta t} \end{Bmatrix} \Delta t \quad (5)$$

(2) 重心まわりの回転運動

以下では2つの座標系(絶対座標系, 要素座標系)を用いる．ここで述べる絶対座標系(x, y, z)とは要素重心を原点とする絶対座標系のことであり, 要素座標系(ξ, η, ζ)とは慣性主軸を座標軸とし, 要素重心を原点とする座標系のことである．

要素の重心まわりの回転運動は, 次式に示すオイラーの方程式によって得ることができる．

$$I_\xi \frac{d\omega_\xi}{dt} - (I_\eta - I_\zeta)\omega_\eta\omega_\zeta = \left(\sum_i r_i \times F_i\right)_\xi \quad (6)$$

$$I_\eta \frac{d\omega_\eta}{dt} - (I_\zeta - I_\xi)\omega_\zeta\omega_\xi = \left(\sum_i r_i \times F_i\right)_\eta \quad (7)$$

$$I_\zeta \frac{d\omega_\zeta}{dt} - (I_\xi - I_\eta)\omega_\xi\omega_\eta = \left(\sum_i r_i \times F_i\right)_\zeta \quad (8)$$

ここで, ξ, η, ζ は慣性主軸を表しており, 剛体に固定した座標系である． I_i および ω_i ($i = \xi, \eta, \zeta$) はそれぞれ要素座標系における慣性モーメントおよび回転角速度である． r_i は剛体上の点の座標ベクトル(絶対座標系), F_i はその点に作用する接触力ベクトル(絶対座標系)を表す．

1つ前のステップ(時刻 $t-\Delta t$)における角速度, および式(6), (7), (8)によって得られた角加速度を用いて 現ステップ(時刻 t)での角速度は次式で求められる．

$$\begin{Bmatrix} \omega_{\xi,t} \\ \omega_{\eta,t} \\ \omega_{\zeta,t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \omega_{\xi,t-\Delta t} \\ \omega_{\eta,t-\Delta t} \\ \omega_{\zeta,t-\Delta t} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \dot{\omega}_{\xi,t-\Delta t} \\ \dot{\omega}_{\eta,t-\Delta t} \\ \dot{\omega}_{\zeta,t-\Delta t} \end{Bmatrix} \Delta t \quad (9)$$

要素座標系における角速度 $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ は, 以下のような座標変換により絶対座標系における角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ に変換される．

$$\omega_x = \lambda_x \omega_\xi + \mu_x \omega_\eta + \nu_x \omega_\zeta \quad (10)$$

$$\omega_y = \lambda_y \omega_\xi + \mu_y \omega_\eta + \nu_y \omega_\zeta \quad (11)$$

$$\omega_z = \lambda_z \omega_\xi + \mu_z \omega_\eta + \nu_z \omega_\zeta \quad (12)$$

ここで, λ_x, μ_x, ν_x は x の方向余弦(x 軸と ξ, η, ζ 軸との間の余弦), λ_y, μ_y, ν_y は y の方向余弦, λ_z, μ_z, ν_z は z の方向余弦である．

剛体上の任意の点 $r = (r_x, r_y, r_z)$ における速度は, 角速度ベクトルと座標ベクトルの外積をとって,

$$\begin{Bmatrix} \dot{r}_x \\ \dot{r}_y \\ \dot{r}_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{Bmatrix} r_{x,t} \\ r_{y,t} \\ r_{z,t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_{x,t-\Delta t} \\ r_{y,t-\Delta t} \\ r_{z,t-\Delta t} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \dot{r}_{x,t-\Delta t} \\ \dot{r}_{y,t-\Delta t} \\ \dot{r}_{z,t-\Delta t} \end{Bmatrix} \Delta t \quad (14)$$

と表される．これより, 任意の点の現ステップ(時刻 t)での座標は次式で求められる．

本研究では個別要素を直方体でモデル化しているの, r として直方体の8頂点の座標をとればよい．上記手法により時々刻々と変化する個別要素の3次元挙動を追跡することができ, 建物全体の挙動は個別要素の集合体として捉えることができる．

2.3. 要素に作用する力の算定

(1) 接触力

圧縮方向を正にとって考える(Fig.1)．このとき, 法線方向および接線方向のばね定数と減衰係数をそれぞれ K_n, K_s, C_n, C_s とすると, 微小時間 Δt における復元力の増分および減衰力($\Delta e_n, \Delta e_s, \Delta d_n, \Delta d_s$)は, 相対変位増分 $\Delta n, \Delta s$ を用いて次式で表される．

$$\Delta e_n = K_n \Delta n \quad (15)$$

$$\Delta e_s = K_s \Delta s \quad (16)$$

$$\Delta d_n = C_n \Delta n / \Delta t \quad (17)$$

$$\Delta d_s = C_s \Delta s / \Delta t \quad (18)$$

また, 任意の時刻 t における法線方向および接線方向の復元力($[e_n]_t, [e_s]_t$)と減衰力($[d_n]_t, [d_s]_t$)は以下の式で与えられる．

$$[e_n]_t = [e_n]_{t-\Delta t} + \Delta e_n \quad (19)$$

$$[e_s]_t = [e_s]_{t-\Delta t} + \Delta e_s \quad (20)$$

$$[d_n]_t = \Delta d_n \quad (21)$$

$$[d_s]_t = \Delta d_s \quad (22)$$

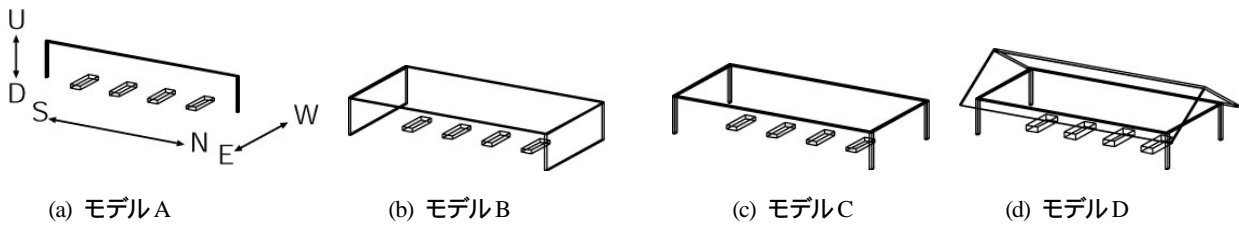


Fig.2 解析モデル

ここで, n は接触面を基準とした圧縮量である.

本研究では, 要素間の引張りは全てジョイントによって考慮し, 接触ばねにおいては要素間の引張りを考慮しないと仮定する. よって, 式(19), (20), (21), (22)は以下の制約を受ける.

$$\text{when } [e_n]_t \Delta n < 0, \text{ then } \begin{cases} [e_n]_t = 0 \\ [e_s]_t = 0 \\ [d_n]_t = 0 \\ [d_s]_t = 0 \end{cases} \quad (23)$$

また, 接線方向の復元力 $[e_s]_t$ および減衰力 $[d_s]_t$ に以下の制約を設ける.

$$\text{when } |[e_s]_t| > \mu |[e_n]_t|, \text{ then } \begin{cases} [e_s]_t = \mu (|[e_n]_t| / |[e_s]_t|) [e_s]_t \\ [d_s]_t = 0 \end{cases} \quad (24)$$

ここに μ は動摩擦係数であり, 式(23)は剛体要素の非接触条件, 式(24)は摩擦力の限界をそれぞれ表す.

以上により, 法線方向および接線方向の接触力 $[F_n]_t$, $[F_s]_t$ は次式で求められる.

(2) ジョイントの抵抗力

ジョイントの法線方向および接線方向のばね定数, 減衰係数をそれぞれ K_{pn} , K_{ps} , C_{pn} , C_{ps} とするとき, 微小時間 Δt における復元力の増分および減衰力(Δe_{pn} , Δe_{ps} , Δd_{pn} , Δd_{ps})は, 相対変位増分 Δn , Δs を用いて次式で表される.

$$\Delta e_{pn} = K_{pn} \Delta n \quad (25)$$

$$\Delta e_{ps} = K_{ps} \Delta s \quad (26)$$

$$\Delta d_{pn} = C_{pn} \Delta n / \Delta t \quad (27)$$

$$\Delta d_{ps} = C_{ps} \Delta s / \Delta t \quad (28)$$

したがって, 任意の時刻 t における復元力($[e_{pn}]_t$, $[e_{ps}]_t$)および減衰力($[d_{pn}]_t$, $[d_{ps}]_t$)は以下の式で与えられることとなる.

$$[e_{pn}]_t = [e_{pn}]_{t-\Delta t} + \Delta e_{pn} \quad (29)$$

$$[e_{ps}]_t = [e_{ps}]_{t-\Delta t} + \Delta e_{ps} \quad (30)$$

$$[d_{pn}]_t = \Delta d_{pn} \quad (31)$$

$$[d_{ps}]_t = \Delta d_{ps} \quad (32)$$

ただし, 式(29), (30), (31), (32)は次の制約を受ける.

$$\text{when } |[e_{pn}]_t + [e_{ps}]_t| < P_{\max}, \text{ then } \begin{cases} [e_{pn}]_t = 0 \\ [e_{ps}]_t = 0 \\ [d_{pn}]_t = 0 \\ [d_{ps}]_t = 0 \end{cases} \quad (33)$$

ここに P_{\max} はジョイントの強さである. 式(33)はジョイントの引張抵抗力の限界を表す.

以上のようにして求められた($[e_{pn}]_t$, $[e_{ps}]_t$, $[d_{pn}]_t$, $[d_{ps}]_t$)より, ジョイントの引張抵抗力 $[F_p]_t$ が次式で与えられる.

$$[F_p]_t = [e_{pn}]_t + [e_{ps}]_t + [d_{pn}]_t + [d_{ps}]_t \quad (34)$$

2.4. 接触パターン

本研究では, 柱や梁などの構造部材を直方体でモデル化しており, 住宅は直方剛体の3次元集合体として表現される. ただし, 要素間の接触判定を簡便化するために, 適当な半径 r を用いて頂点を1/8球, 辺を1/4円柱と仮定する⁸⁾. この仮定により, 接触パターンは頂点と頂点の接触, 頂点と辺の接触, 頂点と面の接触, 辺と辺の接触の4パターンに分類でき, 接触力算定の簡便化と鋭い角を有した要素の場合に生じる頂点の引っかかりなどの問題を解決できる. 本研究では各要素毎に異なった r の値を用いており, 各要素の最も短い辺長の1割とした.

3. 解析モデル

3.1. 建物のモデル

建物を構成する柱や梁等の全ての要素は直方体でモデル化した. 木造建造物を対象としているので, ヒノキの気乾重量 0.34g/cm^3 を用いて要素の質量・慣性モーメントを求めた. 解析した構造モデルを Fig.2 に示す. モデルAは2本の柱と1本の梁から構成され, 梁は柱の上に乗っている. 要素の断面積はともに $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ である. 建

Table 1 人体モデル

身体諸元	値
体重 (kg)	60.0
身長 (cm)	160.0
幅 (cm)	50.0
厚み (cm)	30.0

Table 2 接触ばね・ジョイントのパラメータ

	人	構造部材(1/kg)	ジョイント
K_n (N/m)	7.949×10^4	3.948×10^3	1.341×10^5
K_s (N/m)	3.974×10^4	3.948×10^3	1.341×10^5
C_n (Nsec/m)	2.095×10^3	1.256×10^1	4.270×10^2
C_s (Nsec/m)	0.0	1.256×10^1	4.270×10^2

物の幅は 10m, 高さは 3m, 奥行きは 10cm であり, 奥行き方向に不安定なモデルである. モデル A では要素間の引張抵抗を考慮しなかった.

モデル B は 3 枚の板から構成され, モデル A が奥行き方向に長くなったモデルである. 幅 10m, 高さ 3m, 奥行き 5m であり, モデル A に比べて奥行き方向に安定なモデルである. モデル B についても要素間の引張抵抗を考慮しなかった.

モデル C は 4 本の柱と 4 本の梁と天井を表す 1 枚の板から構成される. 4 本の柱の上に 4 本の梁が, その梁の

上に天井が乗っている. 柱と梁の断面積はモデル A と同じでともに 10cm x 10cm, 天井の厚さは 10cm である. 建物の大きさはモデル B と同じで幅 10m, 高さ 3m, 奥行き 5m である. モデル C では要素間の引張抵抗を考慮する場合としない場合との 2 パターンの解析を行った. モデル D はモデル C の上に屋根を表す板が 2 枚乗ったモデルである. 屋根の厚さは 10cm である. モデル D についても要素間の引張抵抗を考慮する場合としない場合との 2 パターンの解析を行った.

3.2. 人のモデル

建物の倒壊による人的被害を検証するため, 人を表す要素を床の上に設置した (Fig.2). 人体要素は 4 体置かれており, 南から北に向かって人 1, 人 2, 人 3, 人 4 と呼ぶこととする. 建物と人の接触により人体要素に作用する接触力の大きさから人的被害を評価する. 本研究では, 人も直方体要素でモデル化した. 人体要素の大きさは Table 1 のとおりである.

3.3. 接触ばね・ジョイントのパラメータ

人の接触パラメータ (K_n, K_s, C_n, C_s) は簡易な実験によって得られた値を用いた. 構造部材の接触パラメータ (K_n, K_s, C_n, C_s) については, 部材の寸法や密度が大きいものほど接触時の反力も大きくなると考えられるので, 要素の質量に比例すると仮定した. ($K_{pn}, K_{ps}, C_{pn}, C_{ps}, P_{max}$) については, 木材の引張強度と, 10cm 離れるとジョイントが切れるという仮定から決定した. 解析に用いた人の接触パラメータ, 建物の単位質量あたり接触パラメータおよびジョイントパラメータの値は Table 2 の通りである. 要素が接触した際は, 要素間のばねが直列につながるとして接触力を算出した.

3.4. 計算時間間隔

個別要素法による解析では, 解析の時間間隔 Δt が解の安定性に大きな影響を及ぼす. Δt が大きすぎると解は発散してしまい, 逆に小さすぎると計算時間の増大の要因となる. Cundall³⁾ は, 差分近似する際の解の収束性と安定性を得るための条件から, 次式を満足するような時間間隔 Δt をとることを推奨した.

$$\Delta t < 2\sqrt{m / K_n} \tag{35}$$

本研究では, この条件式を満足する値として $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ (sec) を用いて解析を行った.

3.5. 入力地震動

解析に用いる地震動として, 1995 年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された加速度波形の 3 成分を用いた. この地震動の時刻歴波形を Fig.3 に示す.

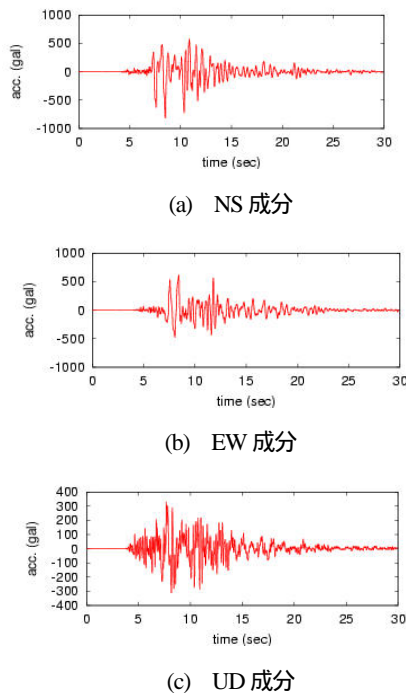
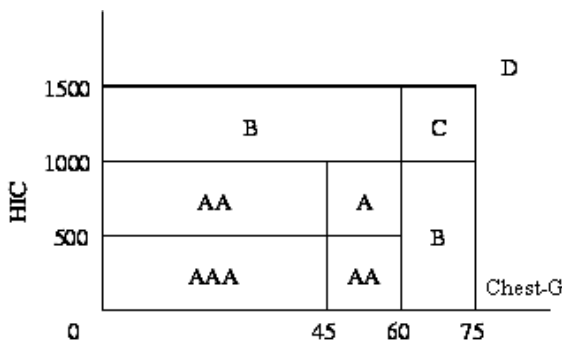


Fig.3 入力地震動



AAA : 頭と胸の双方に重大な傷害を受ける危険性が極めて低いもの。
 AA : 頭か胸のいずれか一方に重大な傷害を受ける危険性が極めて低く、他の一方は重大な傷害を受ける危険性が低いもの。
 A : 頭と胸の双方に重大な傷害を受ける危険性が低いもの。
 B : 頭か胸のいずれか一方に重大な傷害を受ける危険性が低く、他の一方は重大な傷害を受ける危険性がややあるもの。
 C : 頭と胸の双方に重大な傷害を受ける危険性がややあるもの。
 D : 頭か胸のいずれか一方またはその双方に重大な傷害を受ける危険性があるもの。

Fig.4 乗員傷害の評価区分

4. 人的被害の検討に用いる指標

自動車の分野では、衝突時の乗員安全性評価の指標として胸部合成加速度(胸Gと略す)および頭部傷害基準値HIC(Head Injury Criteria)がよく用いられる。なお、HICは次式により求められる。

$$HIC = \left[T \left\{ \frac{1}{T} \int_t^{t+T} a(\tau) d\tau \right\}^{2.5} \right]_{\max} \quad (36)$$

ただし、 t は任意の時刻、 T は $T=36(\text{msec})$ を満たす衝撃の継続時間であり、 $a(\tau)$ は合成衝撃加速度(G)である。

ここで、胸部の耐性値は $60G$ とされており、また、HICについては、この値が 1000 になると生命に危険のある脳損傷発生率が 15% に相当するとされ、法規上はこれを超えたときに頭部に重大な傷害を受ける可能性が高いとさ

れている。

これらの指標を導入すれば、人的被害の定量的な検討を行うことが可能となるので、本研究においても、これらの指標にしたがって行うこととする。これは、事故の形態がどのようなものであれ、人体の耐性は変化しないことを考慮してのものである。

しかし、これらを個別に用いて評価すると、ある条件に対する人的傷害値が2つ求まることになり、これを総合的に評価することはできない。そこで、実際に人的被害を評価する基準として、Fig.4に示すようなこの両者の組み合わせによる評価区分を用いることにする⁹⁾。これは、それぞれの傷害基準値(HIC1000、胸G60)および、衝突試験において生じる試験結果のばらつきの程度(HIC500、胸G15:ばらつきを確認するための予備試験における標準偏差の約6倍に相当)を考慮して頭と胸のそれぞれについて危険性の評価を行ったうえで、これらの組み合わせとして6段階の評価基準を設定したものである。

ここで1つ問題となるのが胸部合成加速度の取り扱いである。自動車の分野では乗員安全性の評価に関する研究が進んでおり、乗員モデルは人体に近いものとなっているため、胸部の合成加速度を測定することは可能である。しかし、本研究では人を直方体要素でモデル化しているため、このような部位別の測定はできない。そこで本研究においては、数値解析により求められる最大衝撃加速度をこの指標として代用することにする。

5. 解析結果

5.1. モデルA

モデルAの挙動をFig.5に示す。モデルAは奥行き(EW)方向が 10cm と非常に薄くEW方向に不安定なモデルである。地震動を受けて約4秒後に傾き始め、ねじりを伴いつつ約6秒後に南側に倒壊した。このねじりモードは2次元的なシミュレーションでは表現し得なかったモードである。人が受ける胸GとHICはTable 3(a)のとおりである。人1、人2、人3は梁の下敷きになり、人4は北側の柱の下敷きとなった。人1~人3のダメージがほとんどゼロに近い理由は、梁が南側の柱に荷重を掛けながら倒壊したためエネルギーが吸収されたからであると思われる。人4は北側の柱の衝撃を受けたため、人1~人3に比べるとやや損傷は大きい。柱の幅が 10cm と薄いのでダメージレベルは「AA」となっている。

5.2. モデルB

モデルBの挙動をFig.6に示す。モデルBは奥行き(EW)方向が 5m もありEW方向に安定しているため、NS方向の

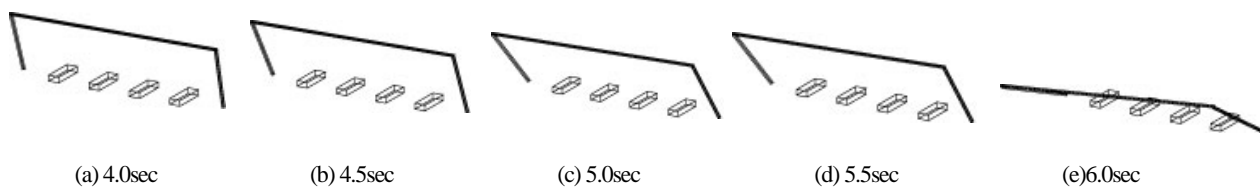


Fig.5 モデルAの挙動(ジョイント無)

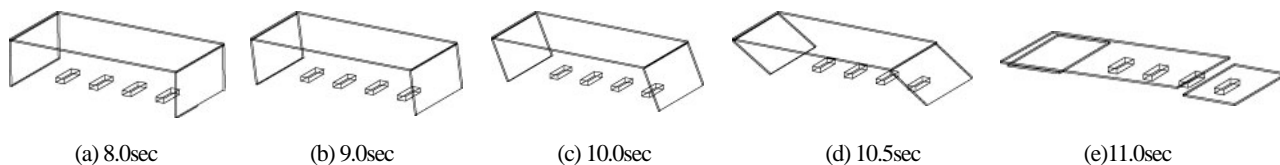


Fig.6 モデルBの挙動(ジョイント無)

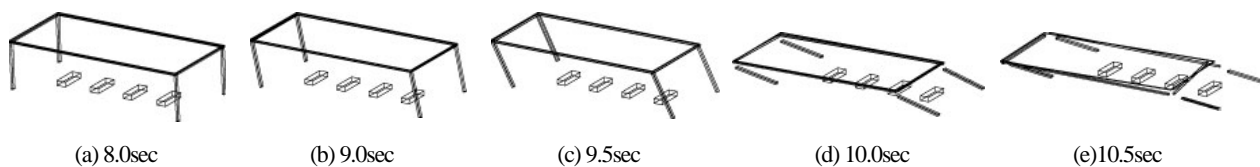


Fig.7 モデルCの挙動(ジョイント無)

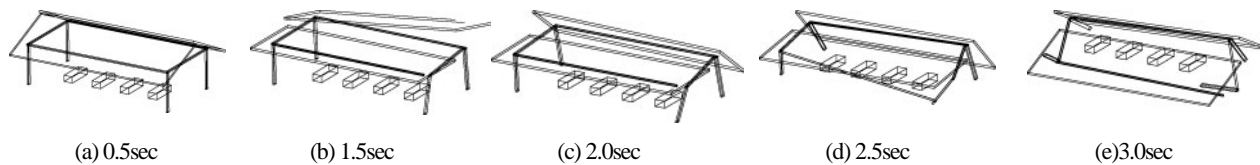


Fig.8 モデルDの挙動(ジョイント無)

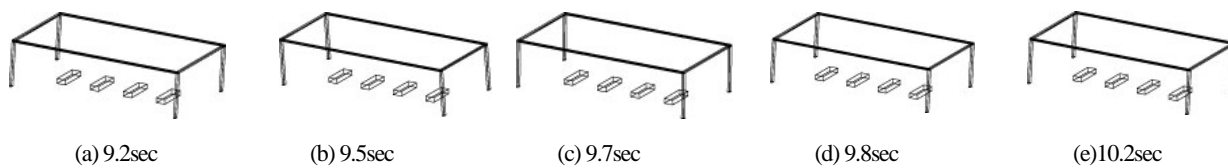


Fig.9 モデルCの挙動(ジョイント有)

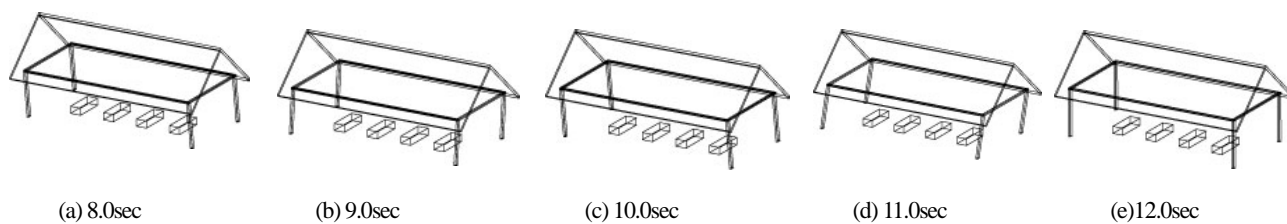


Fig.10 モデルDの挙動(ジョイント有)

Table 3 人的被害の評価

(a) モデルA			
	胸G	HIC	レベル
人1	5.9	0.64	AAA
人2	0.7	0.01	AAA
人3	0.7	0.01	AAA
人4	46	115	AA

(b) モデルB			
	胸G	HIC	レベル
人1	122	2293	D
人2	37	234	AAA
人3	1.5	0.09	AAA
人4	26	51.8	AAA

(c) モデルC			
	胸G	HIC	レベル
人1	74	481	B
人2	13	6.37	AAA
人3	3.1	0.28	AAA
人4	1.4	0.09	AA

(d) モデルD			
	胸G	HIC	レベル
人1	521	8331	D
人2	497	6205	D
人3	463	5406	D
人4	432	6317	D

みに振動するという2次元的な挙動を示した。地震動の振幅がピークを向える8秒頃に傾き始め、約11秒後に南側に倒壊した。人が受ける胸GとHICはTable 3(b)のとおりである。人1は天井の下敷きになったため大きな衝撃加速度を受けダメージレベルは「D」となった。人2と人3は天井と床との間のスペースに入ったため、損傷を被らなかった。人4が北側の板の下敷きとなったにもかかわらずダメージレベルが「AAA」と安全である理由は、板が天井に荷重を掛けながら倒れることでエネルギーが吸収されたためであると思われる。

5.3. モデルC

ジョイントを考慮しない場合のモデルCの挙動をFig.7に示す。モデルCは4本の柱に支えられておりNS方向へもEW方向へも動きやすい構造になっている。地震動の振幅がピークを向える約8秒後に傾き始め、3次元的な挙動

を示しながら約10.5秒後に南西方向に倒壊した。人が受ける胸GとHICはTable 3(c)のとおりである。人1は天井の衝撃に会いダメージレベルは「B」となった。人2～人4は天井と床との間のスペースに入ったため、ほとんど損傷を被らなかった。

5.4. モデルD

ジョイントを考慮しない場合のモデルDの挙動をFig.8に示す。モデルDは屋根の重みのため不安定な構造となっており、わずか3秒で倒壊に至った。人が受ける胸GとHICはTable 3(d)のとおりである。全ての人は天井と屋根の下敷きとなり、重大な損傷を受けるものと予想される。

5.5. ジョイントの影響

ジョイントの影響を検証するため、モデルCとモデルDに対してジョイントを導入した。初期状態において要素は接触しているが、引張力が上限に達したらジョイントが切れる仕組みになっている。ジョイントを有したモデルCの挙動をFig.9に、モデルDの挙動をFig.10に示す。両モデルともに兵庫県南部地震の入力を受けて激しく振動したが、Table 2に示したジョイントの強度の方が勝ったため建物は倒壊に至らず人的被害も発生しなかった。

6. 結論

本研究では建物の破壊挙動の現実に近い3次元シミュレーションを行い、建物倒壊とそれに伴う人的被害発生メカニズムを視覚的かつ定量的に明示することを試みた。3次元の解析をすることで、2次元では表現し得なかったEW NS両方向への倒壊挙動やねじれ現象等を表現することができた。人的被害を軽減するには建物が壊れないようにジョイント部の強度を強くすることが必要だが、仮に倒壊してしまったとしても、人が隠れることのできる空間を残すことができれば人的被害を軽減できる様子を表現することができた。

今後は、「事実の明示」という命題により近づけるために、構成則等物理的因子に基づいたパラメータ決定を行うとともに、家屋を構成する要素数を増やすなど、シミュレーションの精度の向上を図った上で、最終的に個人が自分の住む家を対象としてWeb上で自由に本シミュレーションを試行できるようにすることを目指す。このようなシミュレーション結果の明示により、地震災害に関する社会問題の解決（人的被害の抑制、耐震改修や地震保険へのインセンティブ）にも貢献できるものと思われる。

参考文献

- 1) 国土庁編 (1995) 「平成 7 年度版 防災白書」, 大蔵省印刷局.
- 2) Kiyono, J., Toki, K. and Furukawa, A. (2001). Failure Simulation of Wooden House Based on the Distinct Element Method. *Proc. of the Fourteenth KKNN Symposium on Civil Engineering*, 135-140.
- 3) Cundall, P. A. (1974). Rational Design of Tunnel Supports - A Computer Model for Rock Mass Behavior Using Interactive Graphics for the Input and Output of Geometrical Data, *Technical Report MRD-2-74, Missouri River Division, U. S. Army Corps of Engineers*.
- 4) 木山英郎, 藤村 尚 (1983) カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動解析, 土木学会論文報告集, No.333, 137-146.
- 5) 目黒公郎, 伯野元彦 (1988) 粒状態シミュレーションによるコンクリート構造破壊解析, 地震研究所彙報, Vol.63, 409-468.
- 6) 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃 (1998) 個別要素法を用いた被災時のシミュレーション, 土木学会論文報告集, No.591/I-43, 365-378.
- 7) 清野純史, 土岐憲三, 犬飼信広, 竹内 徹 (2001) 避難行動シミュレーションに基づく地下街の安全性評価, 土木学会論文報告集, No.686/I-57, 31-43.
- 8) 榎本美咲, 目黒公郎 (2001) 三次元拡張個別要素法を用いた家具の動的シミュレーション, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 236-237.
- 9) 運輸省 自動車事故対策センター (1999) 「自動車安全情報(自動車アセスメント)」.

SIMULATION OF THE COLLAPSE OF TIMBER FRAME HOUSES AND CASUALTY OCCURRENCE PROCESS FOR SEISMIC RISK AWARENESS

Junji KIYONO¹ and Aiko FURUKAWA²

¹Dr. Eng. Assoc. Professor, Kyoto University, Dept. of Urban Management
(E-mail:kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

²M.Eng. Graduate Student, Kyoto University, Dept. of Urban Management
(E-mail:furukawa@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

The collapse of timber frame houses during an earthquake was analyzed by the 3-dimensional (3D) Distinct Element Method (DEM). The structure is modeled as an assembly of distinct elements which are connected by virtual springs and dashpots where element are in contact. A timber frame house with simple structural elements such as beams, columns, floors and a roof was modeled. Damage to human bodies also was considered. Human bodies were modeled as circles and placed on the floor. The maximum impact acceleration experienced by a human body during an earthquake was calculated. Damage to humans in houses is discussed based on the Chest-G index and Head Injury Criteria (HIC) widely used in automobile engineering.

Key Words: *Timber frame house, seismic behavior, collapse simulation, damage to human body, DEM, safety evaluation*