

リスク認識のための木造骨組建物の 地震時挙動とその人的被害について

ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOR OF TIMBER FRAME HOUSE
AND HUMAN DAMAGE INDUCED BY EARTHQUAKE

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) 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門
(E-mail: furukawa@doc.kyushu-u.ac.jp)

1995年の阪神・淡路大震災では、震度7という激しい揺れに襲われ多くの住宅が倒壊し、6,400人余の尊い人命が失われた。死因の大多数を占めた窒息・圧死の場合は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、住居がしっかりしているかどうかが生死を分けたと言える。このような建物倒壊による人的被害を評価するため、筆者らは個別要素法を用いた解析手法を提案している。本研究では、接触ばねを材料特性に基づくヘルツの定理により算定し、ジョイント部を代表的なほぞモデルから決定することで、より現実に近いモデル化を行った。2階建の木造骨組建物に対して手法を適用し、挙動および建物内の人を受ける衝撃力を算出し、地震時の建物倒壊による人的被害に対して検討を行った。

キーワード：木造骨組建物，地震時挙動，人的被害，安全性評価，個別要素法

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を発端に、西日本では立て続けに大地震が起こっており、西日本が地震の活動期に入ったとされている。南海トラフに生じるプレート境界型の巨大地震も今後30年以内に40%の確率で起こると言われており、西日本に限らず日本列島全域が大地震の起こる高い時期に来ている。

兵庫県南部地震での住宅の全壊は11万戸以上に及び、6,400人にも及ぶ死者と4万人以上の負傷者を出した国土庁発行の防災白書によると、地震直後の死者数の統計による死因の9割近くが建物や家具の倒壊による窒息・圧死であり、残りの約1割が火災による焼死であると発表されている¹⁾。また、倒壊した家屋の大部分は老朽化した木造家屋であり、長い間家具等の加重や風雨にさらされて建物のジョイントが弱くなっており、倒壊しやすくなっていたものと思われる。

地震による人的被害を軽減するには、地震の揺れを受けた建物がどのような挙動を示し、破壊に至るのを知ることが必要である。また、今後の大地震に備えて建物の耐震化を進める上で、ジョイントをどの程度強くすれば建物の倒壊を防げるのかといった定量的な情報を知ることが重要である。すなわち、様々なジョイントの強度

を持つ建物が、どのような状況で倒壊し、その時どれだけの力が人体に加わるにより死傷者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。

著者らはこれまでに2次元および3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、従来の個別要素法では接触ばねやジョイント部のパラメータは試行錯誤的に決定されており、決定的な手法は確立されていない。そこで本研究では、接触ばねを材料特性に基づくヘルツの定理により算定し、ジョイント部を代表的なほぞモデルから決定することで、より現実に近いモデル化を行い、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。2階建の木造骨組建物に対して手法を適用し、地震時の建物倒壊による人的被害に対して検討を行った。将来的には個人が自由にシミュレーションを試行できるツールとしてWEB上に公開し、もし補修・補強を怠ればどのような結果になるかを可視化することで、耐震補強へのインセンティブを与えるツールになると思われる。

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

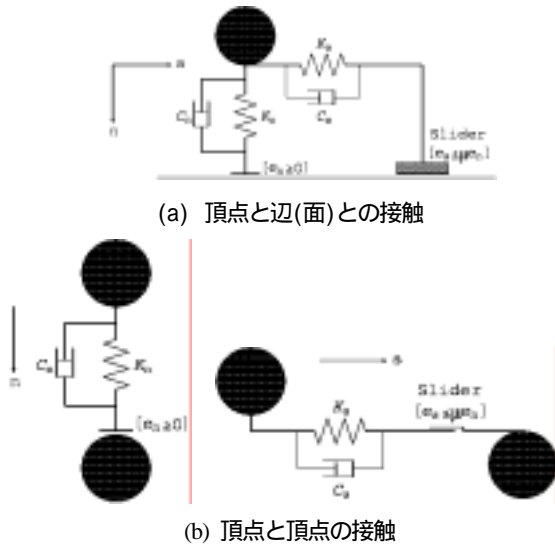


Fig.1 接触モデル

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のみ行われる形になっており、一般に要素間の引張抵抗を考慮しておらず、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構造物の倒壊現象や、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。

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

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

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

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。

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

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

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

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, \$\lambda_x, \mu_x, \nu_x\$ は \$x\$ の方向余弦(\$x\$ 軸と \$\xi, \eta, \zeta\$ 軸との間の余弦), \$\lambda_y, \mu_y, \nu_y\$ は \$y\$ の方向余弦, \$\lambda_z, \mu_z, \nu_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,

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

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。

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

本研究では個別要素を直方体でモデル化しているので, \$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 \$\Delta t\$ 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。

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

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

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

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

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。

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

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。

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

ここに \$\mu\$ 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\$ はそれぞれ, \$[e_n]_t\$ と\$[d_n]_t\$ の和, \$[e_s]_t\$ と\$[d_s]_t\$ の和として求められる。

(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 \$\Delta t\$ における復元力の増分および減衰力(\$\Delta e_{pn}, \Delta e_{ps}, \Delta d_{pn}, \Delta d_{ps}\$)は, 相対変位増分 \$\Delta n, \Delta s\$ 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. 解析諸元

3.1. 解析モデル

(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。

a) 2次元モデル

解析モデルは Fig.2(a) に示す2階建てであり、建物の幅は5.46m、高さは7.5m、各階の高さは3mである。要素は全て幅10cmの長方形要素でモデル化されている。

b) 3次元モデル

解析モデルを Fig.2(b) に示す。建物の幅は5.46m、高さは7.5m、奥行きは7.28m、各階の高さは3mである。要素は全て幅 $10 \times 10\text{cm}$ の直方体要素でモデル化している。

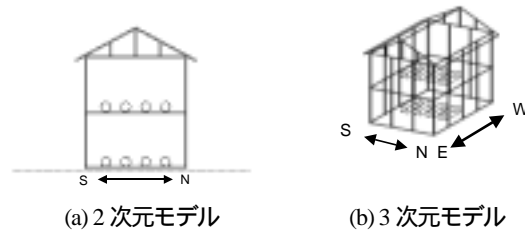


Fig.2 解析モデル

(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)。人体要素は各層に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(1層目)、人5、人6、人7、人8(2層目)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。

2次元解析では人を円要素でモデル化した。Furinの人体楕円モデル(長軸60cm、短軸45cm)と等価な断面積を持つよう半径を26cmとした。3次元解析では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。

Table 1 人体モデル

(a)2次元		(b)3次元	
Weight (kg)	36.17	Weight (kg)	82.91
Radius (cm)	26	Height (cm)	180.0
		Width (cm)	60.0
		Depth (cm)	45.0

3.2. 解析パラメータ

(1) 接触ばね・ダッシュポットのパラメータ

a) 構造部材の接触パラメータ

構造部材の接触パラメータ (K_n, K_s, C_n, C_s) についてはヘルツの定理に基づいて決定した。筆者らの従来手法²⁾では、木造家屋の倒壊実験で得られた挙動に近い挙動を示すようなパラメータを試行錯誤的に決定していた。

ヘルツ理論を用いれば、ヤング率やポアソン比といった材料定数から画一的に値が決定することができる。ヘルツ理論に基づいたばね定数を用いて解析を行ったところ、倒壊実験で得られた挙動と非常に近い挙動を示した為、ヘルツ理論を採用することに決定した。

ヘルツの定理は、2 球の接触時の法線方向の力と変位の関係を示すものである⁹⁾。二つの球 i, j が互いに接触しており法線方向に力を及ぼしあっているとす。それぞれの半径を r_i, r_j , ヤング率を E_i, E_j , ポアソン比を ν_i, ν_j とすると、2 球の等価なヤング率は次式で表される。

$$E = \left(\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \right)^{-1} \quad (35)$$

接触曲面の半径 r は次式で表される。

$$r = \left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j} \right)^{-1} \quad (36)$$

ヘルツの定理によると、接触する 2 球の法線方向の力と変位の関係は、

$$[e_n]_t = \frac{4}{3} E \sqrt{r \cdot n^3} \quad (37)$$

で与えられる。ここで、 $[e_n]_t$ と n はそれぞれ時刻 t での法線方向の接触力と接触変位である。この力 - 変位の関係は、次のような差分形に変形できる。

$$[e_n]_t = [e_n]_{t-\Delta t} + 2E\sqrt{r \cdot n} \Delta n \quad (38)$$

ここで、 Δn は変位の増分である。これにより時間 t におけるバネ定数は次のようになる。

$$K_n = 2E\sqrt{r \cdot n} \quad (39)$$

本研究では球要素でなく直方体要素を用いているため、等価な体積をもつ球の半径を用いた。

接線方向のバネ定数については次式により定めた。

$$K_s = \frac{K_n}{2(1+\nu)} \quad (40)$$

ここで ν 木材のポアソン比である。

減衰定数については、臨界減衰を採用した。

$$C_n = 2\sqrt{mK_n} \quad (41)$$

$$C_s = 2\sqrt{mK_s} \quad (42)$$

ここで、 m は等価質量であって、2 球の質量 m_i, m_j から次式によって得られる。

$$m = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1} \quad (43)$$

これらのパラメータは、木材のヤング率を $90 \times$

10^3kgf/cm^2 , ポアソン比を 0.4 ⁹⁾ とした。

b)人の接触パラメータ

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 (Table 2)。

(2)ジョイントのパラメータ

ジョイントのパラメータ($K_{pn}, K_{ps}, C_{pn}, C_{ps}, P_{max}$)については、Fig.3 に示すほぞモデルとひのきのせん断強度から決定した。法線方向のジョイントのばね定数の決定方法は以下の通りである。全せん断面積は Fig.3 より $3\text{cm} \times 4.1\text{cm} \times 2 = 24.6\text{cm}^2$ であり、ヒノキのせん断強度は 80kgf/cm^2 であるので、せん断耐力は $24.6 \text{cm}^2 \times 80 \text{kgf/cm}^2 \times 9.8 = 1.9286 \times 10^4 \text{N}$ となる。ほぞ長さが 10cm であるので、 10cm 以上離れたらジョイントはせん断破壊が起こると仮定し、せん断耐力をほぞ長さで除することによってばね定数を $K_n = 1.9286 \times 10^5 \text{N/m}$ と決定した。せん断方向のジョイントのばね定数も同様に決定した。全せん断面積は Fig.3 より $3\text{cm} \times 10\text{cm} = 30\text{cm}^2$ であるので、せん断耐力は $30 \text{cm}^2 \times 80 \text{kgf/cm}^2 \times 9.8 = 2.352 \times 10^4 \text{N}$ となる。 10cm 以上離れたらほぞは破壊すると仮定し、ばね定数を $K_s = 2.352 \times 10^5 \text{N/m}$ と決定した。解析に用いたジョイントパラメータの値は Table 2 の通りである。

Table 2 人の接触ばね・ジョイントのパラメータ

	Human body	Joint
K_n (N/m)	7.949×10^4	1.9286×10^5
K_s (N/m)	3.974×10^4	2.352×10^5
C_n (N·sec/m)	2.095×10^3	0.0
C_s (N·sec/m)	0.0	0.0
μ	0.277	-

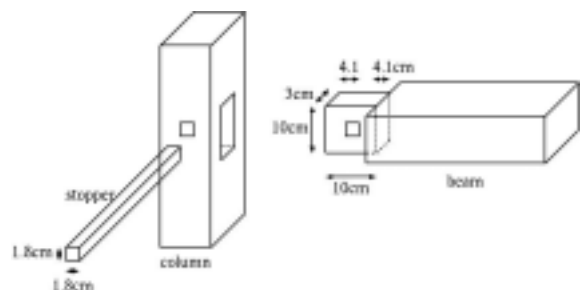


Fig.3 ほぞモデル

3.3. 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。

$$\Delta t < 2\sqrt{m/K_n} \quad (44)$$

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

3.4. 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.4に示す。

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。

$$HIC = \left[T \left\{ \frac{1}{T} \int_t^{t+T} a(\tau) d\tau \right\}^{2.5} \right]_{\max} \quad (45)$$

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

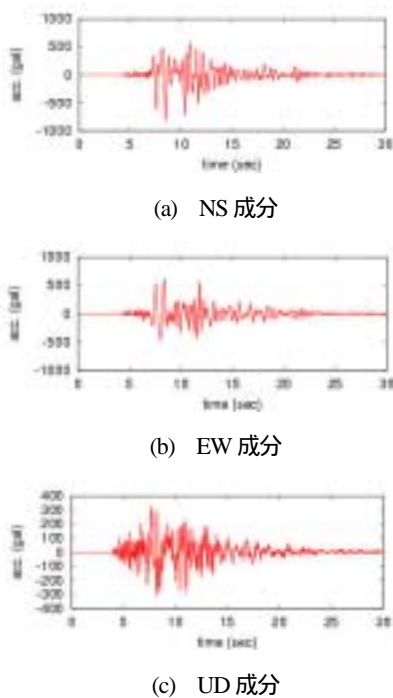
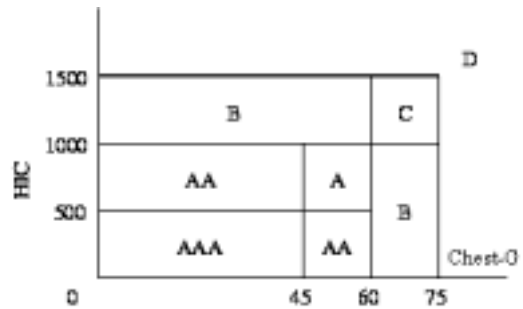


Fig.4 入力地震動



- 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.5 乗員傷害の評価区分

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.5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¹²⁾。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. 解析ケース

5.1. モデル2A & 3A

モデル2A(2次元)と3A(3次元)では、1階および2階のジョイントのばね定数と強度を、3.2.(2)で決定した値の半分とした。

5.2. モデル2B & 3B

兵庫県南部地震で倒壊した多くの木造家屋は、1階部分だけが倒壊し、2階部分は原型を保ったまま残るというものであった。1階部分のジョイントが弱すぎて、強い地震動に耐え切れなかったと思われる。そこで、モデル2B(2次元)と3B(3次元)では、1階部分だけのジョイントのばね定数と強度を、3.2.(2)で決定した値の半分とし、2階部分のジョイントは3.2.(2)と同じ値を用いた。

5.3. モデル2C & 3C

ジョイントの強度が十分に高ければ、兵庫県南部地震のような大地震であっても倒壊せず、人的被害の発生を防ぐことができたと思われる。そこで、モデル2C(2次元)と3C(3次元)では、全てのジョイントのばね定数および強度を3.2.(2)で決定した値であるとした。

6. 解析結果

6.1. 2次元モデル

(1) モデル2A

モデル2Aの地震時挙動をFig.6に示す。8.4秒後から傾き始め、10.4秒に完全倒壊した。得られた胸G、HICの値およびダメージレベルをTable 3(a)に示す。このモデルでは、両階ともにジョイントのばね定数と強度を正規の値の半分と仮定しているため、地震動がピークの値を迎えるや否や倒壊し、人々は建物の下敷きとなった。4人(人1,2,7,8)のダメージレベルは「D」となっており、被害を被る確率が高くなっている。1階では建物が左側に倒壊したため、左側の人の方が損傷を受けている。2階部分は右側に倒壊したため、右側の人の方が損傷度は高くなっている。

(2) モデル2B

モデル2Bの地震時挙動をFig.7に示す。8.4秒後から傾き始め、11.4秒に完全倒壊した。得られた胸G、HICの値およびダメージレベルをTable 3(b)に示す。このモデ

ルでは、1階部分のジョイントのばね定数と強度が正規の値の半分となっているため、1階部分だけが倒壊し、2階部分は原型を留めたまま落下した。2階部分は倒壊しなかったため、2階の人の受けた損傷は許容値以内であった。1階では、人1と人2が天井の下敷きとなって「D」レベルとなった。1階の人3と人4は、柱の衝撃を受けたものの許容値以内であった。

(3) モデル2C

モデル2Cの地震時挙動をFig.8に示す。得られた胸G、HICの値およびダメージレベルをTable 3(c)に示す。このモデルではジョイントの強度が地震動に勝ったため、激しく揺れたものの倒壊には至らず、全ての人の人的被害レベルは「AAA」となった。1階の人に比べて2階の人はわずかに胸GとHICの値が大きい。これは2階の方が1階よりよく揺れるためであると考えられる。

6.2. 3次元モデル

(1) モデル3A

モデル3Aの地震時挙動をFig.9に示す。8.4秒後から傾き始め、10.4秒に完全倒壊した。これらの値はモデル2Aと同じである。倒壊挙動も非常に似ているが、モデル3Aはねじれ挙動を示し南西の方向に倒壊した。このようなねじれモードは2次元モデルでは得られなかったものである。得られた胸G、HICの値およびダメージレベルをTable 4(a)に示す。モデル2Aと同様に4人(人1,2,7,8)が天井の重みを受けて大きな損傷を受けた。Fig.12(a)に示すように建物は人が隠れる空間を残して倒壊したため、その空間に隠れた人3,4,5は損傷を被らなかった。

(2) モデル3B

モデル3Bの地震時挙動をFig.10に示す。8.4秒後から傾き始め、11.4秒に完全倒壊した。これらの値はモデル2Bと同じである。倒壊挙動も非常に似ており、正面から見たFig.12(b)も酷似している。得られた胸G、HICの値およびダメージレベルをTable 4(b)に示す。この値もモデル2Bと非常に似た傾向を示している。

(3) モデル3C

モデル3Cの地震時挙動をFig.11に示す。建物は激しく揺れたもののジョイントの強度が勝ったため倒壊には至らなかった。得られた胸G、HICの値およびダメージレベルをTable 4(c)に示す。建物の強度が保たれていたため、人的被害は発生していない。これは、ジョイントの強度が十分に保たれておれば兵庫県南部地震のような激しい揺れを受けても倒壊しないということ、すなわち、事前に耐震補強が施されておれば6,400人にもおよぶ尊い命の何割かは失わずに済んだのではなからうか。

7. 考察

6章での解析結果より、地震時の構造物の安全性にジョイントの強度が与える影響が大きいことがわかった。提案手法を用いれば、老朽化によりジョイント強度が低下し、壊れやすくなっていた建物が、耐震補強によりジョイントの強度を向上することによって、地震に対する耐震性が著しく向上する様子を、非常に分かりやすい形で提供することができる。このように、木造軸組み住宅の倒壊と人的被害発生のしくみが具体的に明示されることにより、市民を対象とした防災講座や学校での防災教育の場ばかりでなく、工務店や住宅設計者の講習会等においても耐震診断や耐震補強の重要性を喚起することが可能となると考えられる。

また関心の低い人の注意を集めるため、解析結果を3次元アニメーションツールにより可視化したり、さらにはバーチャルリアリティの世界として大地震の疑似体験を提供するといったゲーム的な要素も盛り込んでいくことも視野に入れ、今後も研究を進めていきたいと考えている。

8. 結論

本研究では、木造軸組建物の地震による倒壊と、それに伴う人的被害発生のメカニズムを解明するための一連の手法を提示した。提案手法は離散体の解析手法である個別要素法を援用するものである。筆者らの従来の手法では、木造家屋の倒壊実験で得られた挙動に近い挙動をするようなパラメータを試行錯誤的に決定していた。個別要素法の解析結果は、接触ばねとジョイントのパラメータに支配されるので、これらパラメータを互いに調整することによって数多くの異なるシミュレーション結果が得られることになる。すなわち、パラメータの違いと実際のモデルの違い・強度の違いとが1対1に対応していなかった。本研究のように、接触ばねについてヘルツ理論を用いることにより、ヤング率やポアソン比といった材料定数から画一的に値が決定できることになる。そして、具体的なほぞモデルからジョイントの定数を決定することによって、建物の挙動をジョイントの強度の違いと直接リンクさせることが可能となった。この意味で、より現実に近いモデル化が実現されたと考えられる。2次元および3次元の2階建て木造家屋を対象として手法を適用し、建物強度と倒壊挙動および人的被害との関係について検討を行った。倒壊パターンはジョイントの強度の影響を受けること、事前の補修・補強等によりジョイントの強度が十分に保たれておれば1995年兵庫県南部地震のような大地震でさえ倒壊を防止できたことを示した。また、仮に倒壊に至った場合でも、人が隠れるこ

とのできる空間が残るような倒れ方をした場合には、人的被害が低減されることがわかった。我々のモデルが扱う人的被害は、構造部材が直接人に接触する事による損傷であり、窒息や貧血、餓え等による被害は扱っていないが、これらは迅速で適切な事後のSAR(Search and Rescue)活動により防止することができると考えられる。一方、我々が扱う人的被害は、事前の耐震補強・補修によってしか防ぐことができない。本研究で開発した手法を広く一般に公開し、個々の人が自分の住む家のシミュレーションを自由に実施できるようにすれば、崩壊挙動の可視化によってリスクを認識しやすくなり、耐震補強・補修へのインセンティブを与えることができると考えられる。

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) Johnson, K L. Contact mechanics, 2nd edn. Cambridge University Press, 1985.
- 10) 日本建築学会(1995) 木質構造設計規準・同解説.
- 11) Fruin J (1974) 歩行者の空間, 鹿島出版社.
- 12) 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)」.

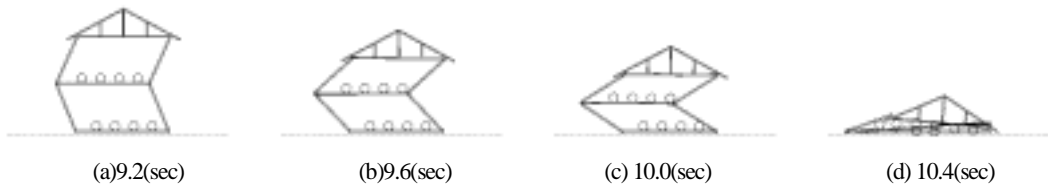


Fig.6 モデル2Aの倒壊挙動

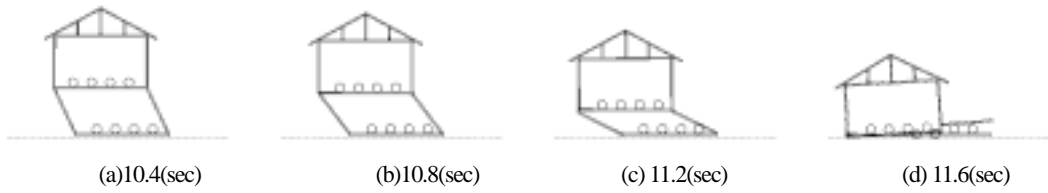


Fig.7 モデル2Bの倒壊挙動

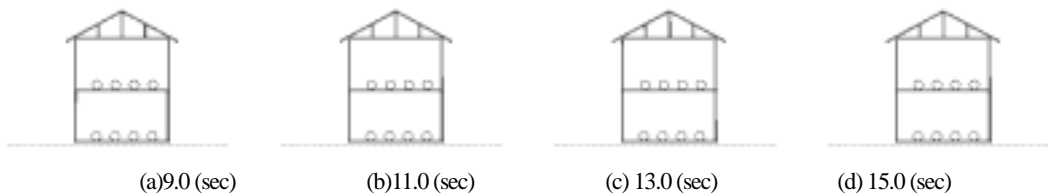


Fig.8 モデル2Cの地震時挙動

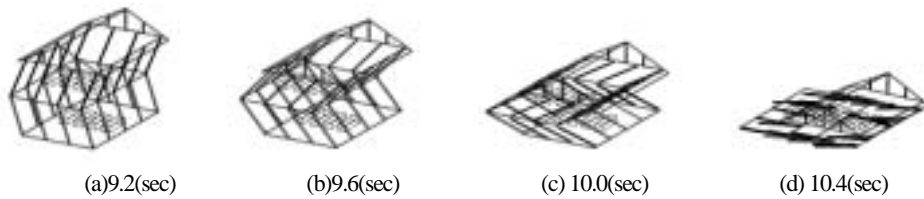


Fig.9 モデル3Aの倒壊挙動

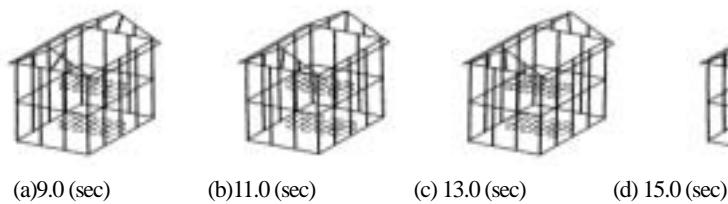
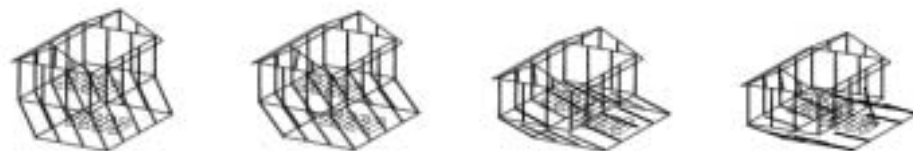


Fig.11 モデル3Cの地震時挙動



Fig.12 モデル3A・3Bの正面図

Table 3 2次元モデルの人的被害

(a) モデル 2A				(b) モデル 2B				(c) モデル 2C			
	Chest-G	HIC	Level		Chest-G	HIC	Level		Chest-G	HIC	Level
P1	96.4	3416.	D	P1	105.1	4199.	D	P1	1.43	0.09	AAA
P2	104.0	4094.	D	P2	92.4	2973.	D	P2	1.43	0.09	AAA
P3	60.9	843.	B	P3	18.9	55.3	AAA	P3	1.43	0.09	AAA
P4	71.3	1246.	C	P4	14.1	26.3	AAA	P4	1.43	0.09	AAA
P5	47.8	552.	A	P5	27.0	41.4	AAA	P5	1.72	0.13	AAA
P6	15.2	26.8	AAA	P6	11.5	4.84	AAA	P6	1.69	0.13	AAA
P7	81.3	2202.	D	P7	6.9	3.34	AAA	P7	1.66	0.13	AAA
P8	112.5	3654.	D	P8	8.1	4.44	AAA	P8	1.64	0.12	AAA

Table 4 3次元モデルの人的被害

(a) モデル 3A				(b) モデル 3B				(c) モデル 3C			
	Chest-G	HIC	Level		Chest-G	HIC	Level		Chest-G	HIC	Level
P1	220.	6618.	D	P1	90.9	2827.	D	P1	1.38	0.08	AAA
P2	109.	1111.	D	P2	67.2	985.	B	P2	1.37	0.08	AAA
P3	20.4	68.8	AAA	P3	10.2	51.4	AAA	P3	1.36	0.08	AAA
P4	24.8	18.9	AAA	P4	13.6	9.12	AAA	P4	1.34	0.08	AAA
P5	32.1	49.3	AAA	P5	12.8	5.33	AAA	P5	1.60	0.12	AAA
P6	46.5	116.	AA	P6	9.92	4.01	AAA	P6	1.60	0.12	AAA
P7	79.8	575.	D	P7	18.6	12.8	AAA	P7	1.61	0.12	AAA
P8	187.	3860.	D	P8	24.1	80.3.	AAA	P8	1.62	0.12	AAA

ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOR OF TIMBER FRAME HOUSE AND HUMAN DAMAGE INDUCED BY AN EARTHQUAKE

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., Research Associate, Kyushu University, Dept. of Civil Engineering
(E-mail:furukawa@doc.kyushu-u.ac.jp)

Collapse of timber frame houses during an earthquake was analyzed by the 2-dimensional (2D) and 3-dimensional (3D) Distinct Element Methods (DEM). A timber frame house with simple structural elements; beams, columns, floors, and a roof, was modeled. Contact parameters were decided based on Hertz theory, and joint parameters were calculated from a typical tenon modeling. Injury to human bodies also was considered. Human bodies modeled as circles (2D) or rectangular parallelepipeds (3D) were placed on its floors. The maximum impact acceleration on the human body during an earthquake was calculated. Injury to humans in houses was assessed by the Chest-G index and Head Injury Criteria (HIC) widely used in automobile engineering.

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