人的被災軽減のためのDFH法を用いた家屋崩壊プロセス・シミュレーション

高田　至郎[1]，鍬田　泰子[2]

[1]フェロー　工博　神戸大学　　工学部建設学科（〒675-8501　神戸市灘区六甲台町 1-1）
[2]学生員　　工修　神戸大学大学院　自然科学研究科地球環境科学専攻（　　同　上　）

地震時の家屋崩壊による死傷者軽減のためには，家屋の耐震性を向上させるだけでなく，家屋の崩壊現象を把握することが重要である．本稿では，家屋崩壊をシミュレートするにあたり，個別要素法(DEM)と有限要素法(FEM)を複合させた方法で木造家屋の動的な応答計算を行っている．また，入力地震動には，瞬間ごとの計測震度を用いて震度のピークに達するまでの立ち上がり時間や最大加速度・速度の時刻歴を考慮しており，崩壊状況とを照査している．解析の結果，地震動のピークまでの立ち上がり時間が長くなるにつれて崩壊するまでの時間が遅くなることを示した．

Key Words: *Earthquake Casualty, DEM-FEM-Hybrid Method, Instantaneous instrumental seismic intensity, Collapse of timber houses*

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震の発生により，6,432 人が犠牲になった．死者の多くは，木造家屋の倒壊による圧死であった．地震後，家屋の耐震性向上のための研究や家屋被害と死傷者の被災状況を結びつけた分析が多く蓄積されてきている．しかし，地震最中における家屋の崩壊プロセスと人的被災の関係について研究されたものは少ない．本研究は地震時の人的被災軽減を目的として崩壊プロセスが人的被災に与える影響について，地震動特性と構造物の応答解析結果から検討したものである．

2. 時刻歴の瞬間計測震度

一般に，地震動は縦波の P 波が到達し，その後横波の S 波が到達する．しかし，地震が発生してからピークの揺れに達するまでに差異が生じることが，2000 年 10 月の鳥取西部地震での著者らの調査・分析より検討された[1]．鳥取の地震では，マグニチュード 7.2 の規模の大きな地震であったが，家屋被害数も少なく死者は発生しなかった．家屋被害は大きくなかったが，崩壊した家屋もあった．鳥取県境港市で地震時に全壊した家屋の中にいた人にヒアリングしたところ，多くの人から地震を感じて屋外に出たあとで家屋が崩壊したという証言を得た．

鳥取の地震では，地震発生から家屋が崩壊するまでに「逃げる（避難する）時間の余裕」があったと推測される．神戸の地震発生時間と異なり昼間の起床時間帯であったことも一つの要因であろう．しかし，人間の行動時間帯とは別に，地震動の特性や家屋の崩壊プロセスの関係から逃げる余裕を示す評価が必要と考えられる．

これまで，得られた地震記録から地震動強度として PGA や PGV，計測震度，SI 値などが評価指標とされてきた．しかし，これらは一つの強震動のピーク値もしくは特性値であって，時刻歴の中での瞬間の地震動強度を示すものではない．そこで，以下に示す瞬間計測震度評価法をも用いて検討を試みた．

計測震度[2]を算出するには，まず観測された 3 成分の波形をフィルター処理し，その 3 成分を合成したベクトル波をつくる．そして，ベクトル波の絶対値があるレベル以上で継続時間のパラメータをみたす条件をもつ値の最大値を河角の式に代入して算出される．本研究では，一つの地震動のピーク値ではなく，図-1 のようにベクトル波形を P 波到達時間から単位時間ごとに分け，単位時間内での継続時間をみたす最大値を算出した計測震度（以下，瞬間計測震度と呼ぶ）でもって地震動評価の一方法とした．兵庫県南部地震，鳥取県西部地震におけるいくつかの観測記録から検討したところ，P 波の到達から瞬間計測震度のピークに達するまでの立ち上がり時間では，

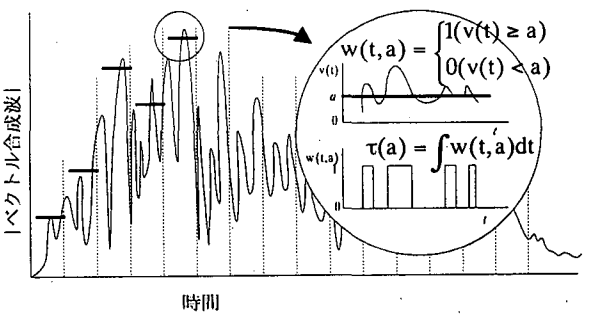

図-1　瞬間計測震度算出法

神戸の地震は急速で，3～5sec と短いが，鳥取の地震では比較的緩やかで，JMA 境港では 10sec 程度にも達することがこの評価法で示された．

3．DEM-FEM-Hybrid 法を用いた家屋崩壊プロセス・シミュレーション

本研究で用いる解析手法は，筆者ら[3]により開発された個別要素プログラム DEFA に改良を加え，木造の軸組工法のモデル化を行い，木造家屋の崩壊プロセスを把握しようというものである．個別要素法(以下，DEM)で粒々の媒体をモデル化する場合，要素間の放線方向と接線方向にバネを並列に配し，二つのバネを介して力が伝達される．要素変位から要素に作用している力を求め，時間間隔において要素の運動方程式が成り立つように，時刻歴で数値積分する．また，要素間距離がある一定距離より離れるとバネは切断し，力は伝達されない．本稿では連続体に関わるバネを複合させた．

(1) モデル化の方法

軸組工法には，柱による曲げ，壁によるせん断耐力の他に，非線形特性をもつ接合部によって成り立っている．本解析では，これらの特性を考慮して，図-2 のような 2 次元で軸組フレームのモデル化を試みた．隅柱は断面が 12cm 角，中柱は隅柱の断面の 2 倍としている．このフレームは奥行き 2 間分の荷重を支えているものとして集中荷重として荷重を与えている．梁，柱部材のヤング係数は木質構造設計基準・同解説[3]より，ベイツガの 9,000kgf/cm^2 を用いた．

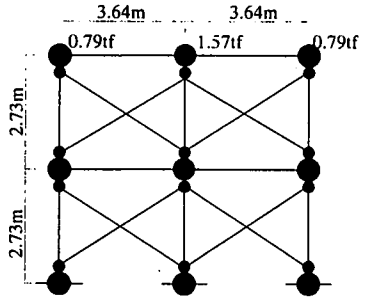

図-2　解析モデル

梁・柱部材について，小さな要素でパッキングするのではなく，弾性体とみなして部材端を結ぶバネは曲げ剛性をもつ弾性はりとした．これは，これまで非連続体解析である DEM に，曲げ剛性を持つ弾性連続体の間隙バネを複合させた方法を用いている．これにより，要素数を減り，要素サイズが大きくなることで解析時間の短縮を計った．

壁や筋交いによる耐力は，図-3 のように耐力壁の剛性値から壁面を 2 本のブレースで置換する方法でモデル化した．ブレースのバネは，軸力方向のみとしている．引張に対しては，水平変位が 1/150rad で降伏して完全塑性化となり，1/30rad でブレースのバネは切断される条件とした．圧縮に対しては，1/60rad を越えるとバネが切断されるとした．

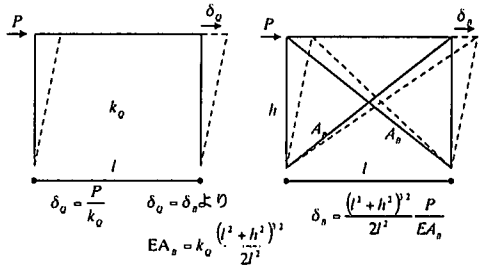

図-3　ブレースの置換

接合部バネは，圧縮の場合は部材のめりこみとして，部材の剛性を用いた．引張の場合は，過去に行われた接合部の耐力実験における荷重変位関係をもとに，完全弾塑性バネに置換した．図-4 に示すのは接合部の軸方向の荷重変位関係である．また，接合部のせん断方向には，ほぞ接触面積における木材の圧縮特性を表現するバネを配した．

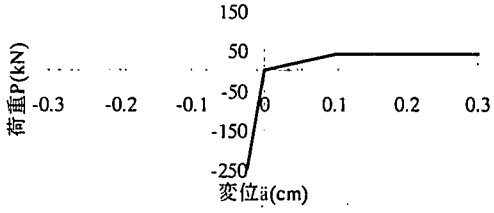

図-4　接合部の荷重変位関係

部材端の接触を一つの要素で表現した場合，要素同士の接触判定が難しくなる．そこで，図-5 のように梁・柱の部材端になる要素を正方形の剛体要素とし，その接触面には剛体要素に含まれる要素（以下，部分要素と呼ぶ）をもつような部材端をモデル化した．剛体要素，部分要素の計算の流れは，まず接触面の相対変位を部分要素間の相対変位から算出し，接触している部分要素に作用する力を算出する．次に部分要素の応答変位は，剛体要素に含まれる全ての部分要素に作用する力より剛体要素の中心に作用する合力を求め，剛体要素の中心の応答変位を求めることで算出される．部分要素のバネ特性は図-4 の部材端の関係を満たしている．

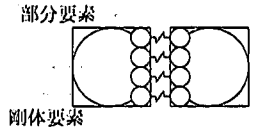

図-5　接合部の要素

図-6 は，図-2 のモデルの内，3.64m×2.73m 分のフレームにおいて，左上端に水平荷重を加えた時に得られる荷

重と相対変位の関係である．弾性域から，まず引張側のブレースが塑性し，次に圧縮側，引張側のブレースが切断され，最後に軸組のみで抵抗する．ブレース，結合部のバネ特性によって，図-6 の関係が得られるが，軸組のみではほとんど抵抗していない．

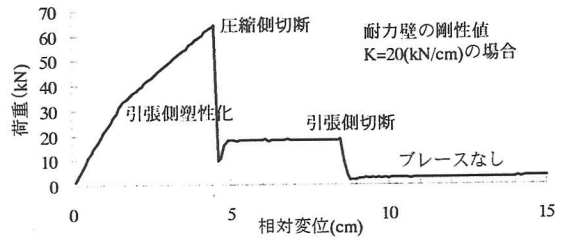

図-6　1 フレームの荷重相対変位の関係

(2) 解析ケースと入力地震動

ブレースの剛性値を変化させて解析を試みた．表-1 は各ブレースの剛性値と解析モデルで自由振動を行った場合の各ケースの固有周期と減衰定数である．これらはブレースや接合部のバネが弾性範囲内における応答によるものである．固有周期は 0.3～0.5sec 程度である．

表-1　解析ケースの特性値

解析ケース	耐力壁の剛性値(kN/cm)	固有周期(sec)	減衰定数
ケース1	8.3	0.56	0.022
ケース2	12.3	0.40	0.020
ケース3	20.6	0.33	0.016

入力地震動は，フレームモデルの底部にある荷重要素から水平・鉛直の 2 方向の入力を行う．入力地震動は兵庫県南部地震における神戸海洋気象台(JMA-kobe)と鳥取県西部地震での境港市測候所(JMA-sakaiminato)で観測された加速度記録の主要動 20 秒を用いた．水平成分には，NS，EW の合成ベクトルの絶対値が最大値となるベクトルが水平加速度の強軸として，強軸方向の加速度を算出した．ベクトル合成された波形と鉛直波形の 2 成分で計測震度を算出したところ，元の 3 成分より若干小さいが周期成分，瞬間計測震度のピーク値とほとんど差異が見られなかった．また，神戸海洋気象台の方が若干強い地震動であるため，入力時には水平最大加速度値が同値になるように境港の地震動を増幅させた．表-2 に入力地震動特性値と示す．立ち上がり時間とは，瞬間計測震度で評価した時の P 波から瞬間計測震度のピークまでの時間を示している．図-7 に水平加速度の時刻歴波形，図-8 に瞬間計測震度を示す．

表-2　入力地震動特性値（上段は H 成分，下段は V 成分）

呼名	地震	観測点	作成した地震動			
			固有周期(sec)	2成分 PGA(gal)	計測震度	立上り時間(sec)
KOBE	兵庫県南部	神戸海洋気象台	0.7	847	6.36	4.5
			1.2	332		
SAKAI	鳥取県西部	境港市測候所	3.3	762	5.98	10
			3.1	183		

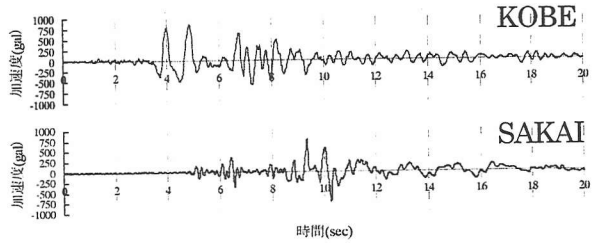

図-7　入力地震動の水平成分加速度波形

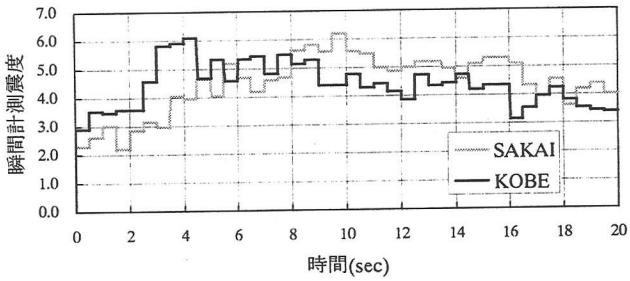

図-8　KOBE と SAKAI の瞬間計測震度

(3) 解析結果

入力地震動と各ケースの解析の結果，全てのケースにおいて崩壊プロセスをシミュレートすることができた．崩壊プロセスの一例として，図-9 に KOBE ケース 3 の 1 階部が層崩壊する全体と接合部の様子を示す．図-10 は 1 階部分の荷重（2 階床部分の応答加速度×2 質点モデルに置換した時の 1 階質量）と相対変位の関係を示している．ブレースが切断された後，構造物の固有周期が長くなり，慣性力がほとんど伝わらないことが伺える．

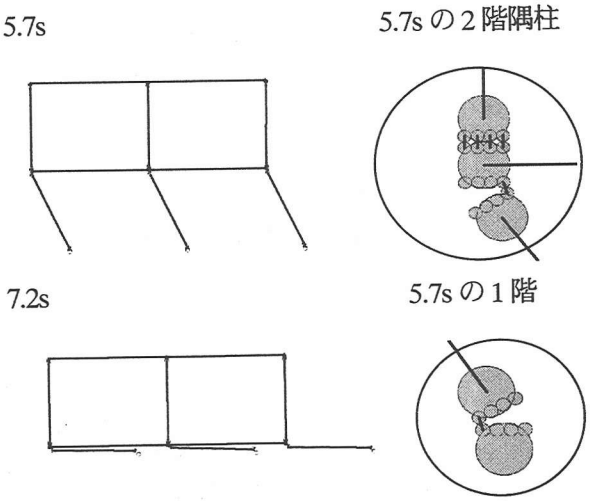

図-9　KOBE -ケース 3 の崩壊過程

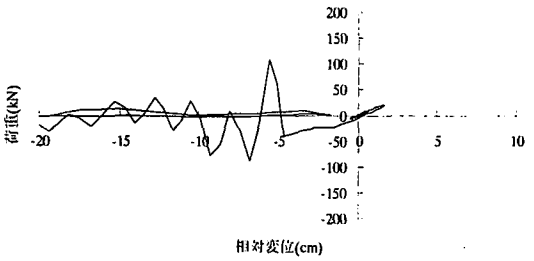

図-10　KOBE-ケース3の荷重と相対変位の関係

4．地震動時刻歴と崩壊プロセスとの検討

解析により得られた崩壊プロセスから，地震時に家屋崩壊による人的被災への指標として，屋内の生存空間の変化として評価することを試みる．つまり，地震前に対する1階部分の面積変化割合を残有内部空間率(%)として示した．すると，KOBE，SAKAI とも瞬間計測震度のピークから3～4秒に崩壊することが知られた．

崩壊プロセスを見る上で，2階床部水平変位と瞬間計測震度や加速度，速度の時刻歴地震動と比較することで検討を行った．図-11 は KOBE ケース3の場合である．まず，1階部の引張によるブレースが切断される 4.0sec 付近

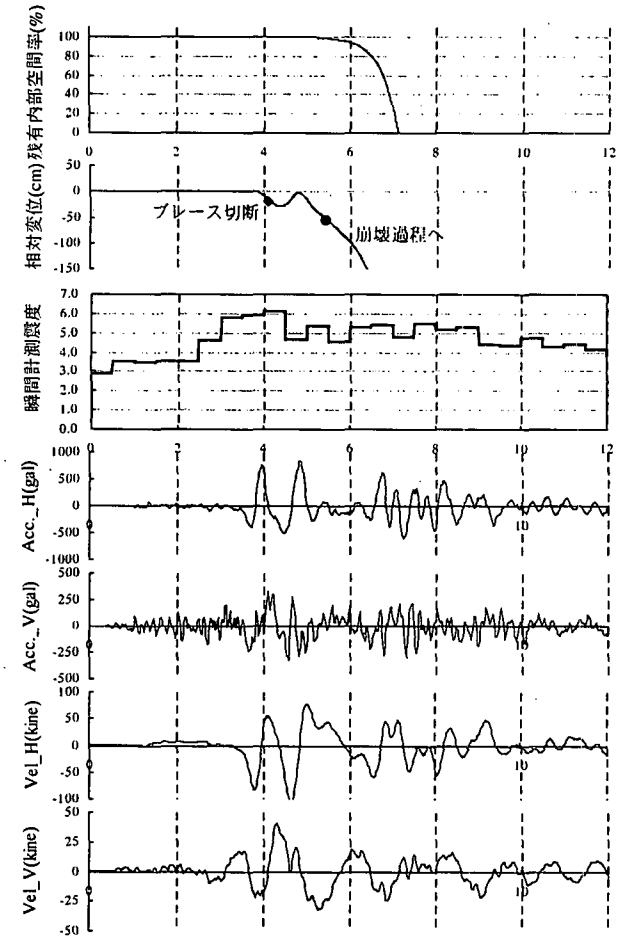

図-11　KOBE ケース3の残有内部空間率(%)と時刻歴地震動

では，瞬間計測震度がピークに近づくが，構造物の応答には加速度の慣性力がトリガーとなっていると考えられる．構造物変形は再び振り戻され，反対方向に変位するが，その後崩壊へと向かう．

瞬間計測震度のピークとブレース切断の時刻は PGA，PGV よりも良い対応を示しているが，その後の振り戻しや崩壊へと導くことを本計算例から一般的に評価することは難しい．時刻歴が，家屋崩壊と関わっていることは間違いないが，崩壊に至る全プロセスを結びつけて説明するためには，今後，さらに多くの地震動や家屋構造についてのシミュレーションを行った上で，人的被害の危険性に繋がり，家屋崩壊プロセスを評価できる時刻歴での指標を検討することが必要である．

5．まとめ

本稿における，まとめを以下に示す．

- 地震動強度を時刻に対する瞬間計測震度として評価し，P 波到達からピークまでの立ち上がり時間に差異があることを示した．
- DEM に連続体要素を複合させて，木造フレームをモデル化し，地震動を入力することで家屋崩壊プロセスをシミュレートした．
- 地震最中における人的被災への危険性を地震動特性と家屋の崩壊プロセスから検討した結果，瞬間計測震度のピーク後に崩壊することが示された．しかし，崩壊の全プロセスを充分説明できるものではなく，今後さらに検討が必要である．
- 家屋の被害だけでなく，地震動強度の立ち上がり時間の特性が，地震時における家屋倒壊までの時間に，すなわち人的被害に影響する要因であると考えられる．このようなハードな解析による評価や指標を用いて，ソフトな対象にアプローチしていくことが必要である．

参考文献

1) 神戸大学工学部建設学科地震工学研究室　高田至郎他：平成12年10月6日鳥取県西部地震被害調査報告書，pp.25-35，2000.10
2) 気象庁：震度を知る，ぎょうせい，pp.1-238,1996.9
3) 例えば，Takada S., Hassani N. and Nakajima K. : Fracture and failure analysis of bridge structure of Kobe Route in Hanshin Expressway, during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, using Distinct Element Algorithm, Proc. of JSCS conf. On Hanshin-Awaji Great Earthquake, pp.219-226, 1997
4) 木質構造設計基準・同解説：日本建築学会，p.17，1995