

大地震による人命被害とライフライン途絶

埼玉大学地圏科学研究センター 教授 川上 英二

1. 建物の被害と人命被害

大地震による人命被害の主な原因は、建物崩壊と火災延焼である。実際、1995年の阪神大震災では、6000名以上の人命が失われた。その第一の理由は地震により家屋が倒壊したため（2007年新潟県中越沖地震による木造住宅の被害例を写真-1、写真-2に示す）であり、その後、建物の耐震化の必要性が繰り返し指摘された。しかし、阪神大震災での教訓にも拘らず建物の耐震化は殆んど進んでいない。

著者は、この主な理由を、

- (1) 地震時に建物が具体的にどのように壊れるかが想像できない
- (2) 従って、どこをどう補強すれば良いかが判らない
- (3) 全てを補強するなら建替えた方が経済的である

ためであると考えた。そして、

- (4) 地震時に具体的にどのように壊れるかを動画（アニメーション）で示し、
- (5) どこを補強すべきであるか、設計変更すべきであることを明らかに示し、
- (6) 補強箇所を2、3箇所に限定した経済的な補強、設計変更を提案する

ことを可能にすれば、建物の耐震化が飛躍的に進むものと考えた。そして、新しい耐震診断方法として「崩壊解析 耐震診断法」の計算プログラムの開発を開始した。

従来、建物の地震応答解析は微小な変位での理論に基づくものが大部分であり、大変形、更には、崩壊までを解析した例はほとんどない。しかも、比較的安価な木造住宅においては、複雑な計算を行うこと自体が稀である。しかし、近年の計算機の発達著しく、優れた計算プログラムシステムを開発すれば、精度が良い耐震診断が可能である。

(1) 崩壊解析耐震診断法

著者が提案している「崩壊解析 耐震診断法」は、新しい耐震診断方法であり、本方法では、まず建物を構成する柱・梁・壁など各部材の強さを実験結果に基づいて正確にモデル化する。次に、これらの部材を組み上げることにより、建物全体のモデルを作成する。これに大地震で観測された地震動を与えることにより、建物がどのように応答・崩壊するかを力学的に精密に計算する。阪神大震災で観測された地震動などを、建物に与え応答を計算し、どのように安全であるか、または崩壊するかを動画で可視化する。

提案方法は従来の耐震診断法と比較して下記の特徴を有する。

従来の耐震診断法は静的解析であり、破壊・崩壊・振動を直接扱っていないのに対し、本方法では、動的な非線形崩壊解析を行うことにより、耐震診断の精度を向上させる。

従来の方法は安全性を考えた設計・診断であり、「この外力では少なくとも破壊しません」という論理を使用しているため、「破壊する外力」が判らない。一方、本方法では、実際の現象をなるべく正確に表すことを目的としている。つまり、建物の各部材の強度としては下限値ではなく平均値を使用し、発生し得る様々な大きさの外力に対して平均的な（最も起こりそうな）応答を算定している。

本方法では、地震時において各部材の強度の余裕がばらついていることを利用する。すなわち、建物の破壊はすべての部材が同時に破壊して生ずる訳ではなく、1番の弱点箇所から始まり、全体の崩壊に進行している。従って、建物内の少数箇所の弱点を補強しておけば、建物全体として非常に強くなる可能性が高い。このことは、新潟県中越沖地震(2007)に際し、1階部分が完全に崩壊し2階部分が落下した建物においても、2階部分が崩れることなく立っていたケースが多か



写真 - 1 新潟県中越沖地震(2007)による木造建物の被害



写真 - 2 新潟県中越沖地震(2007)による木造建物の被害

ったことを見ても明らかである。

従来の耐震診断では、判定結果が数値の羅列として表されてきたのに対し、本方法では、動画(アニメーション)で判定結果を表す。

動画で最初に壊れた部材(場所)が建物の弱点であり、どの部分が弱いかが視覚的にわかることから、家全体を耐震補強するのではなく、弱い部分だけを補強すれば良いことになる。従って、不必要な補強や過剰設計を避けることが可能であり、費用が安くすむ。改修後の応答も動画で確認できるため、家を新築・改築する際の設計のチェックや設計変更に役立つ。

(2) 本方法の主な改良点

本研究では、新しい耐震診断方法として、特に従来の方法の下記の問題点に改良を加えながら、「崩壊解析 耐震診断法」の計算プログラムを開発した。

従来の耐震診断法は静的解析であり、破壊・崩壊・振動を直接扱っていない

耐震問題は構造物の破壊・崩壊問題であるのに、従来、許容応力度法をはじめとして、静的解析が中心である。特に木造建物の場合には壁の長さに壁倍率を掛けて足し合わせた数で耐震性を評価している。例え動的な振動を扱っていても崩壊挙動までは扱っていない。計算機の能力が飛躍的に進展した現在、研究ばかりでなく耐震診断という実務においても、動的な非線形崩壊解析を行うことにより、耐震診断の精度が向上するものと考えた。

従来の方法は安全性を考えた設計・診断であるため、本当に破壊する外力が判らない

崩壊解析 耐震診断法では、実際の現象をなるべく正確に表すことを目的とし、実際の外力に対する平均的な応答を求めており、これが本方法の特徴である。強度としては下限値ではなく平均値を使用し、起こる可能性がある非常に大きな外力までも考慮し、これに対する平均的な(最も起こりそうな)応答を算定している。

本方法では余裕がばらつくことを利用

従来の設計基準の思想は、基準や規則の性質上、最低限の条件を課すことを目的としている。すなわち、解析中の仮定はすべて安全側であり、ばらつきを考慮して安全率を大きくとり、部材の強度などは非常に控えめな小さな値としている。しかし、これでは設計が不可能になるので、外力はそこそこの(小さな)値を用い、バランスを取っている。つまり、設計基準では、強度も外力も共に小さく想定し、安全性を検討している。このため、建物が本当にどの程度の外力で壊れるかがよく判らない。阪神大震災で指摘されたように、観測された地震外力は設計外力よりも非常に大きかったが、すべての構造物が破壊した訳ではなく安全な構造物も多かった。この理由は、安全率を考慮したために設計強度と実際の強度との違い(余裕) および、設計における安全側への仮定(たとえば非構造部材を無視)に伴い余裕が(たまたま)生じていたためである。しかし、設計の際に評価しない余裕に安全性が依存することは、不明確であり、合理的ではない。

現在の設計は、余裕を当てにした(不明確な)安全に基づいている。崩壊解析 耐震診断法では、この安全性の余裕を積極的にできるだけ正確に評価し、利用する方法である。即ち、従来の設計基準では、各部材の強度に余裕が有る様に設計されるのだが、余裕が大きい分には問題が無いと単に扱っている。このために、余裕の程度は部材により異なりばらついている。部材によっては強度に非常に余裕があり、逆に余裕が無い部材が建物の弱点となり、ここから崩壊が生じてしまう。単純に述べると、建物全体の強度は、建物を構成する多くの部材中の、最も弱い部材(グループ)の強度で決定される(いわゆる 直列システム)と考えることができる。

従来の設計では、(そこそこの大きさの)設計外力に対しては、すべて(100%)の部材が壊れないように設計されている。このため、多くの建物のほとんどの部材は、設計外力よりもずっと強く、設計外力の2倍、3倍の強度がある。しかし、1倍の強度の部材があると その部材で破壊が始まり、連鎖的に崩壊する。もし、1倍の強度の部材だけを2倍の強度にまで補強すると、建物は2倍の外力まで耐えることができる。建物内の弱点となる少数の部材のみを補強することによって、残りの部材の強度が十

分に（最大限度まで）発揮できるような補強を、崩壊解析 耐震診断法では目指している。

本方法では判定結果を数値の羅列から動画（アニメーション）に変更

従来の耐震診断の判定結果では、基準を「満足しているか否か」または、幾つかの数値で耐震性の程度が与えられる。しかし、どの様に崩壊するか等の具体性は無い。これは従来の解析が静的解析のために仕方がないことである。

一方、崩壊解析 耐震診断法では、建物を構成する柱・梁・壁などの各部材の強さを実験結果に基づいて正確にモデル化し、これらを組み上げ、建物全体のモデルを作成する。これに大地震で観測された地震動を与えることにより、建物がどのように応答・崩壊するかを力学的に精密に計算し、建物の崩壊過程を具体的に動画で示す。得られた動画に基づき、最初に破壊した箇所をまず補強し、再度崩壊解析を行う。そして、この補強と崩壊解析との手順を建物が設定した外力に耐えるようになるまで繰り返す。

木造在来軸組建物に対しては、崩壊解析 耐震診断法をすでに開発済みであり、研究論文の発表と並行して、埼玉大学のホームページ(<http://www.saitama-u.ac.jp/kawakami/>)で研究成果を公開している。本ホームページでは、阪神大震災の地震動などを、幾つかの建物に対して与えた場合の応答を動画で示している。建物がどのように安全であるか、または崩壊するかを見ることができる。

本ホームページは、NHK「ゆうどきネットワーク」(2006年11月10日)、テレビ朝日「Jチャンネル：Jのこだわり」(2006年1月27日および3月16日)、毎日新聞社「サンデー毎日」(2006年1月29日)、「日刊 建設産業新聞」(2006年3月7日)などの一般向けの番組・記事でも紹介された。また、本ホームページは、YAHOOの登録サイトにも採用(カテゴリ名：地震学>地震対策)されたため、訪問者数も多い。

動画で最初に壊れた部材(場所)が建物の弱点であり、どの部分が弱いかが視覚的にわかることから、家全体を耐震補強するのではなく、弱い部分だけを補強すれば良いことになる。このため、不必要な補強や過剰設計を避けることが可能であり、費用が安くすむ。改修後の応答も動画で確認できるため、家を新築・改築する際の設計のチェックや設計変更に役立つ。

(3) 入力地震動

本解析では、地震外力として阪神大震災の際に神戸海洋気象台で観測された図 - 1 の波形を使用している。左が加速度波形、右が変位波形である。上から東西方向、南北方向、上下方向の記録である。最大加速度は約 0.8G (G:重力加速度)、最大変位は約 0.2m である。この加速度波形から求められる気象庁

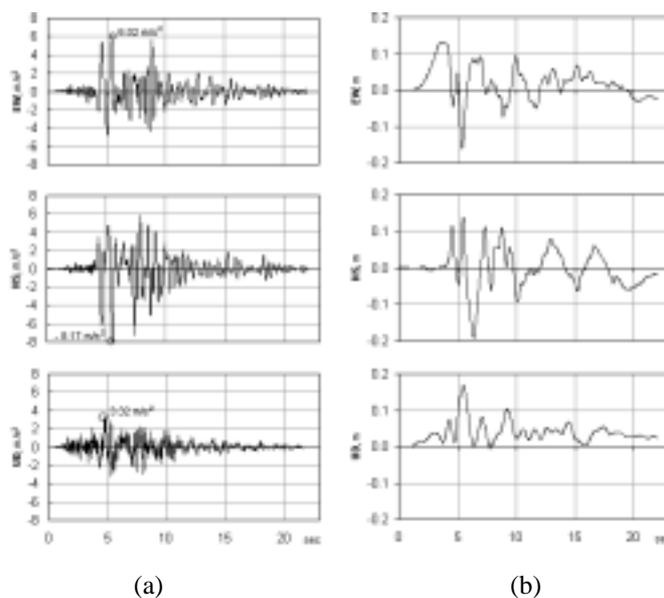


図 - 1 阪神大震災(1995)の際の(a)地盤加速度と(b)地盤変位の時刻歴波形

発表の(計測)震度は6.4(震度6強)であるが、この付近での建物の全壊率は約3%、半壊率は約55%であり、震度6強にしては被害が少ない[境ら(2002)]

本解析では、上記の観測波形そのまま(1倍)の地震動に加えて、振幅を1.5倍したもの(最大加速度:約1.2G、最大変位:約0.3m)および、振幅を2倍にしたもの(最大加速度:約1.6G、最大変位:約0.4m)を使用している。境ら(2002)の方法により木造建物に対する震度を求め直すと、観測波形の震度は約6.1(震度6弱と震度6強の間くらい)であり、また、振幅を1.5倍したものは約6.4(震度6強、木造建物全壊率:約25%)、振幅を2倍したものは約6.7(震度7、木造建物全壊率:約40%)である。

ただし、震度6弱とは震度5.5~6.0、震度6強とは震度6.0~6.5、震度7とは震度6.5以上のことを示している。震度6と7の違いは数字の6と7からイメージされるような1、2割の違いではなく、振幅が2、3倍違っていることに注意する必要がある。

将来、家がどの程度の地震に襲われるかは、確率的にしか判らない。しかし、その際、周囲の家の数%(1割弱)が倒壊した場合に、自分の家が倒壊しないためには、震度6弱(本解析で1倍)でチェックすれば良い。また、周囲の家の約3割が倒壊した場合に、自分の家が倒壊しないためには、震度6強(本解析で1.5倍)でチェックする必要がある。更には、周囲の家の5割(半分)程度が倒壊しても、自分の家が倒壊しないためには、震度7(本解析で2倍)でチェックする必要がある。

(4) 本耐震診断法の適用例と補強例

図-2、3には、木造住宅の耐震診断を実際に行い、設計変更・補強・改修・耐震リフォームに役立てた例を示す。また、ホームページ(<http://www.saitama-u.ac.jp/kawakami/>)では、阪神大震災の地震動などを、幾つかの建物に対して与えた場合の応答を動画で示している。建物がどのように安全であるか、または崩壊するかを見ることができる。これらの図より、木造住宅の崩壊がどのように生ずるかが判る。また、現状では阪神大震災の1倍の外力でも崩壊していたような住宅であっても、住宅の弱点を正確に把握すれば、わずか2~3箇所を補強することにより、阪神大震災の2倍の外力でも崩壊しないような補強が可能になることが理解できる。

(5) 本耐震診断法の信頼性

木造住宅は、軸組および壁要素により構成されている。(4)節で実際の木造建物全体に対して適用したプログラムシステムと同一のシステムを用いて要素の崩壊応答の計算を行い、実験データとの比較を行うことにより、この崩壊解析耐震診断法の信頼性を確認した。

図-4に示す6つの構造物(軸組および壁要素)は右から

- 軸組(金物無)
- 軸組(金物有)
- 内壁(石こうボード)
- 外壁(サイディング)
- 外壁(片筋交+石こうボード+サイディング)
- 外壁(両筋交+石こうボード+サイディング)

であり、それぞれの上端に右方向に水平力を加え、時間と共に徐々に増加させている。力の大きさはホームページの動画(アニメーション)の中の数値で示されている。

動画より得られた水平力と要素上端の水平変位の関係(復元力特性)を図-5の実線で示し、破線には三芳(2001)らによる実験結果を示している。この図より、本崩壊解析耐震診断法では、軸組および壁が崩壊するまでの特性が精度良くモデル化されていることが判る。また、その他の壁要素の復元力特性は、国土交通省住宅局建築指導課・日本建築防災協会(2004)による「木造住宅の耐震診断と補強方法」などに示された実験結果に基づいて作成した。



図 - 2 木造家屋の崩壊過程の例



(a)



(b)

図 - 3 木造家屋の補強案。黒い壁は、筋交と構造用合板で補強した場所を示す。

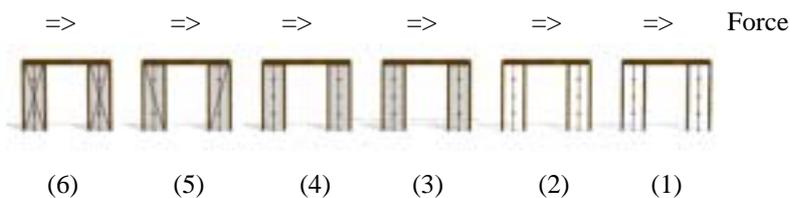


図 - 4 軸組および壁要素のモデル

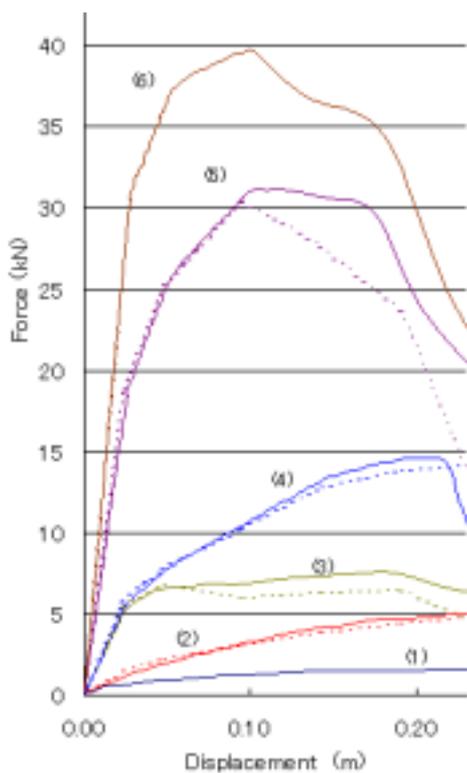


図 - 5 軸組および壁要素の復元力特性

2. ライフラインの被害と人命被害

地震後に、建物の被害と同様に、大きな問題になることは、ライフラインの被害である。この被害の、特に人命の被害への影響について以下に簡単に説明する。

(1) 鉄道，道路の被害と人命被害

鉄道、道路の被害は、車（両）の高速下での脱線や転覆を引き起こし、多くの人命を奪うばかりでなく、地震後に人命救助に直接関係する救急車、消防車などの緊急車両の活動を妨げる。また、勤務先や学校から自宅に帰るべき人が交通機関が麻痺しているために駅周辺に群がり帰宅困難者となり、緊急物資の輸送や復旧車両の移動を困難にさせるなどの長期にわたっての混乱に影響を与える重要な問題になる。

(2) ライフライン（供給処理施設）の被害と人命被害：

ライフライン（供給処理施設）とは、主に上下水道、電力、ガス、電話を指し、都市の生活には不可欠である。ライフラインの被害の特徴は、非常に多くの人々が長期間影響を受けるといえる点である。阪神大震災では、数百万人の方が停電、断水などの機能停止を被り、完全復旧までには数ヶ月を要している。地震直後の断水により火災延焼を止めることができず、人命に著しい影響を与えるのは勿論であるが、このことを除いては、ライフラインの機能停止は、一般には人命に直接大きく影響しない。健康で自由に動き回れる人が、飲み水が無いために地震後に死ぬことは一般的ではない。しかし、病人やお年寄などの社会的弱者にとっては人命に関わる問題になり得る。

(3) 社会生活上の被害と人命被害：

都市にあっては、各構造物の被害ばかりでなく、地震後の生活上の被害、社会活動上の被害も重要な問題である。食料、飲料水の支障や、住宅支障による避難所での生活は、快適な生活には程遠く、特に病人やお年寄などの社会的弱者には人命にかかわる問題である。

3. まとめ

過去の大地震において、人命に最大の影響を与える地震被害は、建物倒壊と火災延焼であった。これら二点に対して対策を講ずれば地震に対しての安全性が大幅に向上するものと考えられる。本小文では、新潟県中越沖地震(2007)による木造住宅の地震被害と、この被害の解析方法および結果を中心に、特に説明を行った。

参考文献

1. Kawakami, H., Tingatinga, E. and Chang, H.Y.: Three-dimensional Seismic Damage Simulation of Wooden Houses Using Rigid Body-Spring Method (Earthquake Resistant Engineering Structures VI, WIT Press, Vol. 93, pp.421-430, 2007)
2. Kawakami, H., Mogi, H. and Tingatinga, E.: A Note on Spatial Variations in Response Spectra of Earthquake Ground Motions (ISET Journal of Earthquake Technology, Vol. 44, No. 1, 2007)
3. Kawakami, H., Tingatinga, E. and Chang, H.Y.: Seismic Retrofitting of Woodframed Buildings Using Three-Dimensional Rigid Body-Spring Method, (First International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, PROTECT2007, 2007)
4. Kawakami, H., Tingatinga, E. and Chang, H.Y.: An Innovative Strategy for Performance Assessment and Earthquake Retrofitting of Woodframed Buildings (1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, P392A, 2006)
5. 国土交通省住宅局建築指導課・日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法，2004.
6. 境有紀，瀧澤一，神野達夫：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案（日本建築学会構造系論文集，第555号，pp.85-91，2002）
7. 三芳・大橋・高橋・綿引・中野：軸組構法住宅用各種壁の静加力試験及び振動台実験 その1 各種壁の静加力試験（日本建築学会大会学術講演梗概集，2001）
8. 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書，1997．
9. 埼玉県：埼玉県地震被害想定調査報告書，1998．