

崩壊からみた建物

2016年9月19日

河村 廣

まえがき

地震による崩壊という終局状態からみれば、建物は魑魅魍魎の塊です。

建築専門家はそれを事前に想定したくないようですし、施主側も資産的な価値があり触れて欲しくないようです。両者共に一旦完成された建物から崩壊を想像することに抵抗感を覚えることは心理的にも無理からぬことです。そこで視線の方向を逆転させ、敢えて本報のタイトルを「崩壊からみた建物」としました。

しかし実際に災害時に建物が一旦崩壊すると、施主も世論やマスコミも専門家への不信の念を募らせ、プロとしての責任を厳しく問います。

地震学と同様に建物の専門家も崩壊についても正面から向き合い、自分たちが現在分かっていることと分からないことをきっちりと世間に明らかにすれば、無用の誤解は生じないでしょう。更には崩壊について現在どう考えているか、今後どのように対処してゆく積もりかについても表明できれば、ベストと言えるでしょう。

筆者は建物の材料や部材の崩壊現象を主テーマとしてきましたので、建物の崩壊には不慣れの建築実務界の実情にも配慮しつつ、本報では上記の趣旨に沿って「崩壊からみた建物」をテーマに日頃から感じていることを談話風に綴りたいと思います。

建物崩壊への諸要因

法律で設定されている地震力は最低限ですが、実務界では経済的な事情から最大設計目標になります（補 1）。実は地震による建物の崩壊現象が不問に付される理由は経済性だけでなく、崩壊を研究テーマに選ぶ専門家の数が極めて少ないからでもあります。

地震入力そのものも、当談話室でこれまでも縷々述べてきましたように、その大きさと頻度についてはべき乗則という両対数的なスケールで与えられますから、精度の面からはその程度しかないと意味しています。建物の足元の地盤振動も図1のように極めて複雑怪奇な東西南北におけるオービット(軌跡)を示します[1,2]（補 2）。

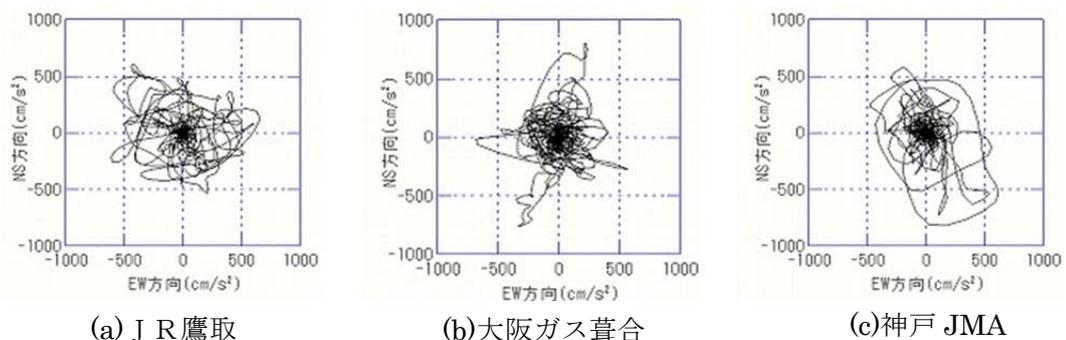


図1 1995年兵庫県南部地震の強震記録による加速度オービット[1,2]

実際には上下方向も加えた 3 次元空間の更に複雑なオービットを描きます。地盤上には建物がありますから、地盤と建物との相互作用の影響も無視できません。

表層地盤の動的かく乱は地盤の成分と地下水位の悪条件下で液状化による沈下を、或いは含水量と傾斜状況により側方流動を生じます。最悪の場合は地盤そのものの崩壊をもたらします。このような地盤変状は建物の存立そのものを脅かすものです。

上記のように複雑で予測の困難な地震入力を受ける建物の崩壊要因として主なものを挙げると図 2 のようになります。

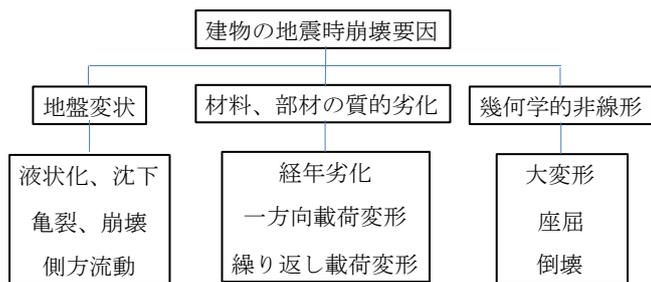


図 2 地震時建物に崩壊をもたらす諸要因

最も典型的で簡単なケースとして、構造材料や部材のレベルで塑性疲労という繰り返し変形における破壊条件について考えてみましょう。鉄筋コンクリートの柱の曲げ変形振幅と繰り返し破壊回数の関係は図 3 のように両対数軸で与えられます[3,4] (補 3)。対数軸ですから地震入力の予想値と精度的には同程度になります。従って両者を結び合わせた因果関係の精度は大雑把に見てその半分になるでしょう。更に建物になるとこのような材料や部材の複合体ですから、図 3 のような柱材のみの単純な話では済みません。

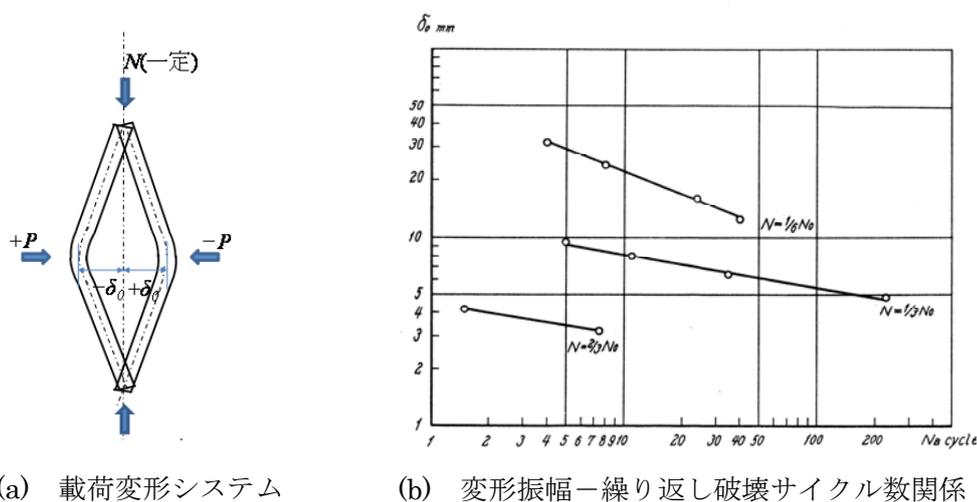


図 3 定軸圧を受ける鉄筋コンクリート柱の曲げ疲労実験[3,4]

現行耐震設計法の効用と限界

建築はデザイン、環境設備、構造の 3 大分野から成り立っていますが、中でも構造が最

も客観性と論理性に富んだ分野だと思われています。しかし、各地で生じる大きな地震の度に建物がいろいろと異なった被害の様相を呈しますので、次々と新しい問題点が指摘され、対策として法律が厳しい方向に改正されると基準の項目及び既存不適格建築が増える一方ということになります。結果として構造の分野は余り科学的ではないのではないか、という厳しい世評を受けがちです。

その主たる理由は、繰り返しになりますが、①地震入力の前測精度の精度が低いこと、②想定地震入力が下限なのに設計では上限と見做されていること、③建物の崩壊を設計上は想定外としていること、④住民は建物に生じた損傷や崩壊という視覚的な現象から専門家の責任を問うこと、⑤地盤の側方流動を無視していること、などですから、これらへの認識を改めない限り今後とも同様の後追いの事態が繰り返されることになります。

現行の長期荷重や中地震に対する一次設計における許容応力度設計法は精緻に体系化され社会的貢献度は評価すべきものと思います。しかし大地震に対する二次設計では塑性状態が考慮されていますが、上記のように崩壊へのイメージがぼやかされています。しかし、建物は大地震時には人的災害をもたらす凶器ともなるものです。その最大のリスクを想定外においていることに違和感を覚えるのは筆者だけでしょうか。このように人命をも左右する構造設計専門職への社会的処遇として、設計報酬や設計時間が十分でないこともその職能の社会的機能を大きく狭めているように思います。

崩壊性状の究明へのアプローチ

科学的な観点からみても、地震現象及び建物の崩壊性状共に偶然性や不確かさを本質的に持っており、全容の解明は人智を超えたところにあるのかも知れません。従って建物の崩壊を想定外とする設計法の下では、崩壊の様相は一言で言えば種々様々、起こってみないと分からないのも無理からぬことです。

しかし分野を問わず科学者や研究者は例えば未開発地の開拓農民として禄を食んでいます。地震による建物の崩壊についても、一般住民の素朴な疑問や要望に応え、①分かっていること、②曖昧だが分かっていること、③全く分からないことなどをはっきりと示すことが大切だと思います。

その具体的なアプローチは専門家により各人各様となりますが、大学に在籍していた現役時代の若い頃の筆者は主として①試験機による材料、部材、構造物の破壊実験及び解析、②地震時における建物崩壊例の調査及び分析、などに携わっていました。

アプローチ①では、仮説を立ててそれを検証するという側面と先入観を持たずに観察するという側面の2面性を必要とするのが難しいところです。実験を行っても全てに成功するという訳ではありませんし、実験には試験機や供試体そして人手も必要です。更に危険性も伴います。経費も嵩みますが、無色透明のお金はこの世にはありません。このような難関に立ち向かうのは苦しいことですが、それを突破できればその喜びも大きいものです。

アプローチ②では、被災者には申し訳ないのですが、地震や地盤、建物により災害の実

大の様相が多岐に亘ることを思い知らされること、無傷から崩壊に至る各ステージの損傷例が同時に観察できることなど、得難い情報を身を以て学習する機会となります。勿論、ある仮説の検証として調査することもできますし、全く白紙の目で観察し新たな問題点を発見するとか問題意識に目覚めることもあります。地震や地盤によって異なる特徴的な損傷や崩壊例から問題点や補強法が分かれば、定性的な改善そして安心に繋がります。定量的には補強しても他の箇所では壊れるかも知れませんし、もっと大きな地震が来れば壊れる可能性があります。

本 HP の筆者担当の小窓「新・極限耐震設計論」[5]は上記①②の研究成果の上に地震学及び情報や社会システムの知見を導入し設計や評価に至る体系化を試みたものですから、ご参照ください。勿論、幾つかの限られた仮説や理想化の下に構築したものですから、今後とも更なる検証が必要ですし、特に、本構想や理論は一質点系を基本としていますので、一般の空間的な広がりのある建物への応用や展開には克服すべき多くの課題が残されています。

今後の研究課題

研究の成果には、①既知が増えますが、それより以上に②曖昧、③未知が増えて行くという厄介なところがあります。

筆者が耐震設計から情報、社会システムに研究対象を広げたのも上記の理由によりますが、現在直面している問題は地域（市町村など）の防災、減災の現状認識とその対応策です。

科学的にみれば本談話室前報「耐震・防災における数値的曖昧性」で触れましたように地震災害現象は複雑系に属し、その定量的な側面は本談話室の前々報「地震マクロスケッチⅢ」で導いた震災規模（最大加速度、人的損失率、建物の損壊率など）の累積度数分布がべき乗則に従うことに典型的に示されています。

実際には、地震の型や地盤特性だけでなく、建物もプランや用途はもとより、材料、構造、設計者、設計基準、施工者、経年劣化度など様々な異なった因子の組み合わせとして、地震時の震害例も様々なパターンを示します。複雑系であって何の不思議もありません。

「地震マクロスケッチⅢ」で明らかにしましたが、べき乗則の負勾配は現象の規模を抑える要因と拡大する要因のバランスで決まる自己組織的臨界現象の一例です。特に後者の拡大要因は全くの偶然性に起因し、確率的に記述するしか他に術がありません。

建物の崩壊に対し耐震設計や補強、免震、制振などは抑制要因となり、地域の防災計画では自助、共助、公助、減災などが抑制要因となります。

建物や地域の損傷や崩壊に対して、地震、地層や地盤、天候、季節、日時などの不確定性は抑制よりも拡大要因としてより大きく寄与するものと思われます。

建物やインフラ、都市などの、複雑化、高度化、ハイテク化が今後益々進んでゆくことと思いますが、複雑系の抑制要因と拡大要因の効果的なバランスへの配慮が望まれます。

現在の筆者としては、上記の抑制と拡大の各種要因の仕分けを定性的に進め、更には定量化することが今後の大きな課題の一つになると思っております。同じ趣旨ですが、本HPの筆者担当の小窓「免疫防災論」[6]では社会・情報システムの視点から考察を加えていますのでご参考にして頂ければと思います。

まとめと釈明

本報では建物の地震時における崩壊現象について筆者なりの①既知、②曖昧、③未知の箇所について概要を述べ、最後に今後への関心の対象も触れました。いずれも談話風を心掛けたためか、更には筆者自身が建築実務界に不案内なこともあり、不完全、未消化な点も多々あると思っておりますが、ご容赦頂ければ幸いです。

あとがき

1916年9月13日付の朝刊新聞で、国の専門家委員会が熊本地震の被害を検討した結果、現行の耐震基準の見直しは不必要との結論に至ったと報じられています[7]。此の度の地震では新しい木造住宅の倒壊例が見られましたが、その建築年数を軸に倒壊、大破、中破などの比率を比較すると、図4[7]に示されるように、1981年の新耐震基準への改正及び2000年の更なる改正毎に減少していることから、現行法の有効性が認められたとのこと。この論法は1995年の阪神大震災でも用いられ、14年以前に改正された1981年の新耐震基準は有効とされましたが、木造住宅の被害例及び犠牲者が余りにも多かったので、2000年に若干の改正が追加されました。

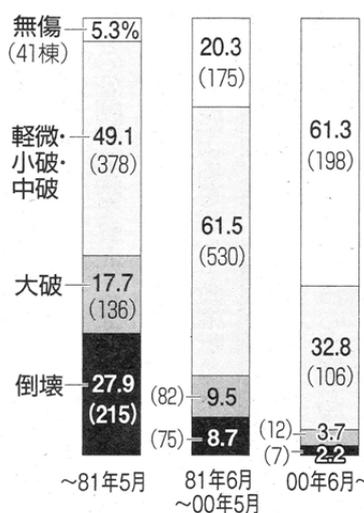


図4 熊本県別益城町の木造建物の建築時期の被害状況 (国交省など調べ) [7]

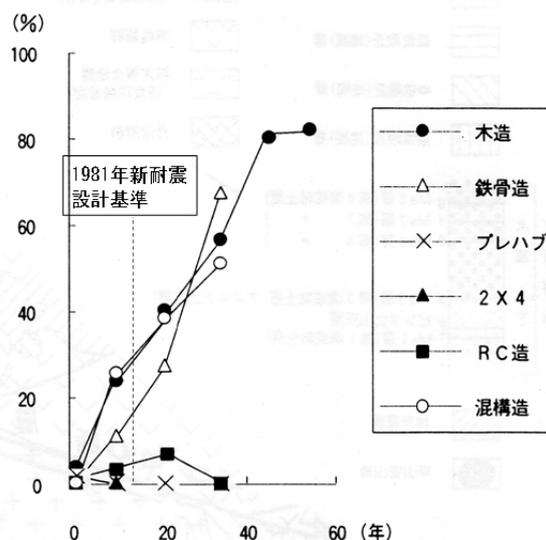


図5 阪神大震災における構造種別建物の全半壊と建築年数の関係[8]

上記の論法で注意しなければならないのは、木造住宅の耐震性は経年劣化の影響を強く

受けますので、基準改正以前の倒壊率が改正以後に比して高いのは、基準改正だけでなく経年劣化の影響があるかも知れないことです。

図 5 は阪神大震災時に筆者の研究室で担当した震害調査結果の一部ですが、木造、鉄骨造などの住宅の建築年数に対する全半壊率をプロットしたものです[8]。本震災の 14 年前に新耐震基準に改正された年度（縦破線位置）においても全半壊率の増加が連続的ではほぼ同じ勾配です。基準改正の効果があれば、改正の年度で不連続な階段状の段差を生じるはずですが。従って木造や鉄骨造住宅では新耐震設計への改正よりも経年劣化の影響のほうが大きいとも読み取れますが、如何でしょうか。

同様のことが図 4 から窺えるのですが、如何でしょうか。

基準改正の効果を調べたい場合、建築年数を基準改正年度ごとに区切ると経年劣化の影響と基準改正の効果が混在されますので、もう少し細かい区間の年数で区切らなければならないと思います。一般に統計量はマクロな性状の把握には適していますが、逆に気を付けないと、意図的に操作される恐れがあります。

想像力を逞しくしますと大地震の下では、設計基準の改正程度の強度アップよりは、経年劣化やその他（地震の型や強さ、地盤状況、諸因子の組み合わせによる偶発性など）の影響のほうが大きいのではないかということです。対数的な地震入力に対しては設計基準の改正によるリニアスケール的で特に定量的な補強策ではその効果が十分に発揮されないような気がします。

想定を超えた大地震時には、建物に損傷が生じても損傷の生じた部材の交換で容易に修復できるようにするとか、崩壊が生じても人命を守るためにシェルターを併用するなど、フェールセーフの発想を活用することも考えられます。

建物の設計時には建物の損傷モードや崩壊モードも想定ないしは設計するという姿勢が、万が一の災害への対策やひいては地域の防災や減災活動にも繋がるものと思います。既に現役を退いて久しい筆者に実際に先陣を切って旗を振る力はありませんが、先にも引用しました筆者の最新の免疫防災論[6]の今後の展開にも資するところがあればと秘かに思っています。

補足 1

日本語の魔力でしょうか、①「50 年間にマグニチュード 8 クラスの地震の発生する確率は xx 」、②「50 年間に震度 6 強程度の地震の生じる確率は yy 」、③「50 年間に生じる確率 zz の地震動は最大加速度 500gal 程度」と言われると、大方の人は素直にそれを信じるでしょうし、「まあそれくらいのもんだろう」と納得するでしょう。

しかし正しくは、①の 8 クラス、②の 6 強、③の 500gal 程度は全て「～以上」と解さなければなりませんし、公式の文書ではそのように記されているはずですが。

例えば、体重 60kg 程度の人の数の確率は数値化が不可能で、60kg±5kg と範囲を区切れば推定できます。区間が小さければ、確率はその区間の幅に略比例します。従って小数点

以下全てゼロの厳密に体重 60.0…kg の人は区間がゼロですからその確率はゼロですし、事実体重 60kg 丁度の人にはなかなか見つけることができません。しかし体重 60kg 以上の人の数の確率は求まります。適当な数のサンプル集団があれば数えるだけで推定が可能です。

地震現象になりますと、数値自体がファジィですから、～程度とファジィ化するほうが自然ですし、確率を求めるには～程度以上としなければなりません。勿論範囲を限定すれば確率は求まりますが、区間の幅に略比例することからもその幅をどう与えるか、その幅の意味は何か、などの新たな問題が生じ議論は発散します。

補足 2

図 1 は文献[1,2]から引用したのですが、1995 年兵庫県南部地震の強震記録です。同図 (a)は JR 総合技術研究所により JR 鷹取駅で (JR 鷹取)、(b)は大阪ガスにより大阪ガス葺合供給所で (大阪ガス葺合)、(c)は気象庁により神戸海洋気象台で (神戸 JMA)、それぞれ観測された加速度の水平オービット記録です。

補足 3

筆者の恩師山田稔先生は、山田研究室全体のテーマを「構造物の弾塑性変形並びに崩壊性状に関する研究」と設定しておられ、筆者は「定軸圧を受ける鉄筋コンクリート柱」を対象にその「曲げ性状」を分担し、その実験と解析による解明を卒論と修論の研究テーマとしていました。図 3 は 3 種類の一定軸圧の下で水平力を受ける鉄筋コンクリート柱の曲げ塑性疲労破壊実験結果です[3,4]。同図(a)は載荷変形システムを、同図(b)は縦軸に変形振幅を横軸に繰り返し破壊サイクル数をそれぞれ両対数軸としてプロットしたものです。破壊は定軸圧の保持ができなくなる時点と明確に定義されています。

柱材中央部のクリティカルな断面は鉄筋とコンクリートの複合材料からなり、一定軸力と繰り返し曲げモーメント及びせん断力の複合応力状態にありますから、解析的な追跡もいささか複雑になります。詳細は文献[4]をご参照下さい。

同文献[4]は鉄筋コンクリート構造物の崩壊性状を踏まえた実験結果、解析結果、耐震設計法の集大成で、当時としては画期的な啓蒙書でした。その後の建築防災協会の鉄筋コンクリート構造物の耐震診断法における崩壊モードの分類や、国の建築基準法における新耐震設計法への改正で剛構造物の地震入力 1G の設定などに貢献しました。しかし新耐震設計法においては残念ながら、繰り返し変形による塑性疲労破壊という終局状態は導入されませんでした。

文献

- [1]境有紀、熊本匠：地震動の方向性の定量的な検討と地震荷重推定のための平均方向の提案、日本地震工学会論文集、第 10 巻、第 5 号、2010、pp.1~20.
- [2]境有紀のホームページ：1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の強震記録について。

<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/hgn.htm> (2016年9月1日現在)

- [3] Yamada, M., Kawamura, H., Furui, S.: Low Cycle Fatigue of Reinforced Concrete Columns, International Symposium on Effects of Repeated Loading of Materials and Structural Elements of R.I.L.E.M., Interim Report Thema 4-2, 1966 Mexico, pp. 1~13.
- [4] 山田稔 編著：鉄筋コンクリート構造物の耐震安全性、技法堂出版、昭和51年8月2日。
- [5] 河村廣：新・極限耐震設計論、(社)住まいと耐震工法研究会のホームページ、
<http://www.sumaitotaishin.com/g.html> (2016年9月14日現在)
- [6] 河村廣：免疫防災論、(社)住まいと耐震工法研究会のホームページ、
<http://www.sumaitotaishin.com/f.html> (2016年9月14日現在)
- [7] 新耐震 国の専門委「有効」：朝日新聞(朝刊)、2016年9月13日付、p.3.
- [8] 河村廣、谷明勲、瀧澤重志：阪神地域における住宅・建材の被害、1995年兵庫県南部地震一木造建物の被害一、日本建築学会近畿支部、1995年9月、p.105~123.