

平成 28 年 11 月 28 日

耐震の変革
<想定を超える地震に耐える>

構造品質保証研究所
代表取締役 五十嵐 俊一

1. 耐震化制度の課題

1) 新耐震・耐震補強済み建物の被災

平成 28 年（2016 年）熊本地震では、益城町、熊本市、阿蘇市及びその周辺の市町村で木造の住宅、鉄筋（鉄骨）コンクリート造の校舎、庁舎、病院、マンション等の多くの建物が被災した。震災後半年を経過しても、損壊したまま放置されていたり、仮の支柱等を施すだけで使用し続けている建物が数多くある。益城町庁舎は外付けフレームで現行基準並み以上に余裕を持った耐震強度とする補強工事が完了していたが、柱・梁、壁にせん断亀裂が入り、立ち入り禁止になっている¹⁾。熊本大学では、地震後、一ヶ月を経過しても、医学部をはじめ、新耐震あるいは耐震補強済みの多くの建物で、躯体に亀裂が入り、雨漏り等を生じ、内部の設備、機器が落下、転倒して使用停止になっている²⁾。同大学発生医学研究所の西中村教授は、ホームページにメッセージを掲載し、「建物の損傷に加えて、特に高層階の研究室は基本的設備に大きな被害を蒙っています。固定はしてありましたが、一箇所では不十分で、固定器具が壁から抜け落ちて転倒したものが多数あります。」「今後、高層階をどう使っていくかは難しい課題です。」と述べている³⁾。

2011 年の東日本大震災では、東北大学で、鉄骨ブレースや壁を入れた補強済み建物 3 棟で、内部の損傷がひどく、ガス漏れを生じ使用できなくなった。結局、大学の判断で、取り壊し、6 階建て以下にして建て直したことが、専門雑誌に詳細に報道されている^{4)、5)}。また、栃木県の市貝中学校では、震災の前年に耐震補強工事が完了したばかりの校舎が被災した⁶⁾。専門家の調査結果に基づいて文科省は補修するよう指導したが、町は、独自の判断と費用で、仮校舎に移転し、この 3 階建ての校舎を取り壊し、2 階建てに建て直している⁷⁾。大手病院の関係者によれば、傘下の 10 病院の内、使用継続できたのは RC 造で免震の 1 棟だけで、残りの 9 病院（新耐震の鉄骨造）は、設備機器の損壊で使用できなかったとのことである。

2) 免震・制震建物の被災

免震・制震も被害を生じて大規模修繕等を余儀なくされた事例が多い。東日本大震災では仙台市営マンションで制震ブレースを付けたのに、壁が破壊し、大規模修繕を余儀なくされた事例がある。高層免震マンションで室内が滅茶苦茶になった事例を受けて高層に免震を

用いることを自粛することを決めた設計事務所がある。NHK では、阿蘇市の病院において、熊本地震の揺れで約 90cm の振幅を生じて免震装置が破損している模様が報道された。さらに、熊本県西原村で観測された直下型の地震動は、東日本大震災の東京で観測された地震動の 10 倍の振幅であり、超高層、免震建物が共振する成分を多く含む巨大な長周期地震動である。大阪の 28 棟の実際の免震ビルのデータで計算したところ、全てで、基礎は周囲の土留め壁等にぶつかり、躯体は破壊され倒壊の危険性がある。内部の家具は凶器となって飛んで来るというシミュレーションが放送されている⁸⁾。さらに、この番組では、東京の立川断層帯、大阪の上町断層帯をはじめとして全国で 100 程度の断層で同様の巨大な長周期地震動が発生する可能性があるかと警告している。

国交省は、平成 28 年 6 月 24 日、「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」⁹⁾ を発表し、新築の超高層建築物、免震建築物に関して、従来からの検討に加えて、対象地震（南海トラフ沿いで発生する M8～9 クラスの地震）によって建設地で発生すると推定される長周期地震動による検討を行うこと、家具などの転倒防止措置についての説明を求めることなどを行うとしている。政府の地震調査委員会は、関東地方に関する長周期地震動に対するシミュレーションを公表したが、遠方の地震であり、せいぜい 50cm 程度の振幅で人が立っていられなくなる程度の大きさに過ぎない結果である¹⁰⁾。このように、超高層建築物等については、従来の検討対象の地震に海洋型巨大地震を加える見直しが行われている模様だが、NHK が指摘した「直下型地震による巨大な長周期地震動」については言及していない。

3) 新耐震の硬直化

平成 28 年 9 月 12 日、熊本地震の建物被害を分析し、耐震基準の妥当性を検討する国の専門家委員会は、「現行の耐震基準は今回の地震でも倒壊の防止に有効だったと結論づけ、旧基準の耐震化を進めるように国交省に求めた。」これにより、「同省は基準の見直しを見送る方針である。」と報じられている¹¹⁾。また、2016 年熊本地震の地震動は、その他の地域がこれまでに経験した地震動に比べて小さいとは言えないにも関わらず、熊本県内の建物では、東京都などよりも小さい地震を想定する現行基準の規定（地域係数）を見直すことも報じられていない。

現行基準について、政策レビュー¹³⁾ で次のように説明されている。「昭和 56 年に導入された新耐震基準は建築基準法上の最低限遵守すべき基準として、中規模の地震に対しては、ほとんど損傷を生じず、極めて稀にしか発生しない大規模の地震に対しては、人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じないことを目標としている。」従って、「大地震で建物が使用できなくなった事例について原因を究明し検討を行う必要はあるが、被災後に継続して使用できる場所までを建築基準法令は要求しているものではない。また、僅かに倒壊しているが、例外的な事例であるか、既に、阪神・淡路大震災後に一連の運用基準の整備で対応済みの原因によるものである。基準改定の必要はない。旧耐震建物の耐震化を求める。」と

いう主旨の主張^{1 2)}は誤りとは言えない。しかし、耐震診断と補強工事に多大な負担を強いられている建物の所有者・使用者、そして、巨額の助成金を負担している納税者の立場からすると受け入れがたいものである。

耐震基準を抜本的に見直すことが出来ないことも事実である。ある時期までは、「耐震工学は経験工学である。震災から学んで耐震基準を改定する必要がある。」という認識を専門家も社会も共有していた。耐震工学の教科書には震災と基準の改定が併記された年表が掲載されている。ところが、1995年、阪神・淡路大震災の年の12月に耐震改修促進法（以下、促進法）が施行され、耐震に関する既存不適格を許容しない姿勢が打ち出され、その後度々強化されてきたことで、基準の改定に慎重にならざるを得ない状況が形成されていく。特に、耐震診断と補強工事に国と自治体が多額の助成を行うことになってから、基準の改定が事実上できなくなっている。改定すれば、既に、補強工事が終わった建物について、また、診断、判定会、助成金交付、補強設計、判定会、補強工事、助成金交付を行わなければならない。財源がなければ基準の改定ができない。阪神・淡路大震災を契機に新耐震基準は文字通り金科玉条と化していった。

促進法以来、細かい方法や数字までが、告示で定められるようになり、基準だけでなく、耐震設計法の細部にまで硬直化が浸透していく。耐震基準の改定等に長年関わった専門家は、「新耐震以前の耐震規定では、水平震度と許容応力度のみが建築基準法に規定されており、その他の計算法などは日本建築学会の技術書などに任されていたことに立ち返り、何を建築基準法で定めるべきかなどを根本的に考え直すべきであろう。（2007年の建築基準法の改正では、偽装事件などが発生したため仕方なかったのかもしれないが、全てを建築基準法に基づく告示などで決めるという方向に向かっており、非常に残念である。）」と述べている¹⁴⁾。

耐震基準の大きな改定を事実上不可能にした要因は、促進法以外にもある。1981年の新耐震基準で導入された保有水平耐力等の計算は、複雑かつ大量であり、コンピュータが必要となった。構造設計用のプログラム（ソフト）が開発、販売され、年々便利になっていった。一方で、ソフトは次第に巨大化しメンテナンスが大変になっていく。現在では、1つのメーカー（A社）のソフトが70%以上のシェアを占めるに至っている。現代の構造技術者は、ソフトがないと設計も耐震診断もできない。つまり、ソフトに組み込まれていない基準の改定は実務上履行できない状況である。今でも、ソフトメーカーは、新工法や新材料、各種規定の組み込みやバグの修正で忙殺されている状況である。巨大化したソフトを更新するには、このソフトに精通した熟練技術者でなければ出来ない。わが国の構造設計は、事実上、A社の数名のソフトウェアエンジニアによって支えられていると言っても過言でない状況に陥っている。耐震基準や、耐震診断基準を抜本的に改定しても、これに対応するソフトの製作や修正などにかなりの時間を要することになる。そもそも、構造技術者もソフトメーカーも、折角マスターした複雑な現行基準を改定することには積極的になれないことは想像に難くない。

4) 耐震強度割り増しの有効性

建築学会東北支部の東日本大震災被災調査報告書には次のように記載されている¹⁵⁾。

「都市部におけるマンションは、旧基準で設計されたものが20%程度しかなく、80%程度は既に現行基準で設計されたものである。これまで、マンションの耐震化は旧基準で設計されたものを耐震補強することに力を注いできたが、今回の東日本大震災での被害を調べてみると、現行基準で設計されたものでも多くの被害が発生しており、財産管理上でも個戸のオーナーからの苦情も多いと聞く。このようなことから考えるとマンションの耐震化はすでに新時代に入ってきているのではないかと考えている。即ち、旧基準 vs 現行基準のようなものの考え方はもう古くなってきていることが分かる。

これからのマンションの耐震化は、非構造部材、設備などの主体構造以外の所にも十分配慮したものでなければならない。もう、マンションの耐震化は新時代に突入していることに気付く必要がある。マンションの個戸のオーナーの意見として無被害化を目指してほしいという希望が多いことを申し添えておく。」

熊本地震における熊本大学医学部発生医学研究所の被災、及び東日本大震災における東北大学人間環境研究棟の被災は、構造、高さによっては、新耐震基準、及び新耐震基準と同等の強度を持たせる耐震補強では使用継続性の確保は望めないことを端的に物語っている。一見、これは、新耐震基準が「倒壊等の防止」を目的としているので仕方がないとも言えそうである。しかし、第3章に詳述するように、学校等については、使用継続性の確保を目標に、用途係数、重要度係数を乗じて、耐震強度を割り増して設計あるいは診断されている。これが必ずしも有効でないということである。

新旧耐震、新築、既存を問わず、使用継続性を具体的に評価する新たな指標を構築することが課題である。

5) 耐震強度不足による退去、建替えの是非

学校、庁舎等で、耐震診断で得られた構造耐震指標 (I_s 値) が0.3以下になり、その建物から退去し、プレハブや賃貸で凌いでいる事例が数多く報道されている。また、促進法の I_s 値の公表期限が迫り、助成金を受けて耐震診断と補強設計を設計事務所にしてもらったが、結果が悪く、補強工事も大掛かりであった。結局、「危ない旅館」と言われては営業できない。ところが、耐震補強工事の費用が工面できないと困っていたり、仕方なく、老舗旅館が廃業に追い込まれた事例も多いと聞く。

確かに、古い建物の中には、老朽化が激しく建て替えが必要なものもある。増改築を繰り返した結果、当初設計のバランスを大きく損ない、大地震で倒壊する危険性が増大したものもあるだろう。しかし、第2章に詳述するように、耐震診断基準及び現行基準で事実上想定している地震動の強さは、阪神・淡路大震災で実測された地震動の半分程度であり、最近観測された地震動から見れば一桁小さい。計算上の耐震強度という意味では、新旧耐震基準に関わらず大幅に不足しているのが現状である。しかるに、第6章に詳述するように阪神・淡

路大震災、東日本大震災の倒壊事例を分析すると、旧基準で、耐震補強をしていなくても、ピロティでない中低層鉄筋コンクリート系の建物に見れば、倒壊した建物は5%以下である。半数近くは無被害である。この意味では、これらの建物は、想定を超える地震に耐えている。単に、計算上の耐震強度 (I_s 値) が基準値を満たさないというだけで退去したり、建て替えることに合理性はない。

旧基準の建物を計算上耐震強度が不足しているという理由で取り壊し、耐震強度を割り増して、大量の鉄とコンクリートを投じて新耐震で建て直しても、結局、東北大や熊大のように内部の設備機器が地震で損壊してしまえば、建物を使い続けることはできない。他に方法がある筈である。

6) 安全で快適な街と国を目指して

本章に総括した新耐震、旧耐震、新築、耐震補強済み建物の被害・無被害事例は、新耐震基準を中心とする現行の耐震化制度が多大な負担を施設の所有者・使用者、そして納税者に強いているが、これに見合う効果を上げていないことを物語っている。耐震強度不足を理由に廃業したり取り壊すのでは、現行の耐震化は、却って、震災が来る前から長い歴史を経て営々と築かれた街並みを壊し、地場産業を破壊していると言わざるを得ない。

現行の耐震化制度の合理性、有効性を再度検証し、必要に応じて抜本的に見直し、新たな枠組みで耐震化を進めることは安全で快適な街と国造りに欠かすことはできない。これが、本論のテーマである。

文献

- 1) 壁谷澤 寿海、壁谷澤 寿一、五十嵐 俊一：平成 28 年（2016 年）熊本地震被害調査速報、2016 年 4 月 29 日
- 2) 熊本大学学長声明、2016 年 4 月 21 日、熊本大学ホームページ
- 3) 西中村教授メッセージ、2016 年 5 月 2 日、熊本大学発生医学研究ホームページ
- 4) 皆川 浩：東日本大震災を経験して得た教訓、コンクリート工学、pp39～41、Vol.50 No.1 日本コンクリート工学会、2012 年 1 月
- 5) 日経アーキテクチャ 10 月 25 日号、pp.34～35、日経 BP 社
- 6) 下野新聞 3 月 15 日朝刊
- 7) 市貝町ホームページ、9 月 1 日更新版
- 8) NHK スペシャル「あなたの家が危ない～熊本地震からの警告～」、平成 28 年 10 月 9 日放映
- 9) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について、平成 28 年 6 月 24 日、ホームページ
- 10) 首都圏で巨大地震の場合 ビルの揺れ幅 50 センチ超も、日本経済新聞、平成 28 年 10 月 13 日、朝刊

- 11) 新耐震 国の専門委「有効」、朝日新聞、2016年9月13日 朝刊
- 12) 熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会報告書、平成28年9月
http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000633.html
- 13) 国土交通省：住宅・建築物の耐震化の促進、平成23年度政策レビュー結果（評価書）
p4、平成24年3月
- 14) 石山 祐二：耐震規定と構造動力学、p116、三和書籍、2008年3月
- 15) 日本建築学会東北支部：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査、p89、2013年5月

2. 想定地震動

1) 現行基準の想定地震動

建物の耐震基準を定める上で、前提となるのは、どのような地震を想定するかという問題である。具体的には、どのような地震で壊れない建物にするか、逆に言えば、どのような地震で壊れる建物にするかという問題である。大地震は想定を超えるものなので、建物が壊れることは避けられない。従って、本来は、壊れたときにどうするか、どのような壊れ方をするかが、一番重要である。しかし、現行基準にはこの観点はなく、「どのような地震」というところから極めて曖昧になってしまっている。

国土交通省が公表しているQ&A集¹⁾の中で、「現在の建築基準法の耐震基準（新耐震基準）を満たしている建築物は、どの程度の地震に耐えられるのですか？」という設問に対して、以下の回答が掲載されている。「現行の耐震基準（新耐震基準）は昭和56年6月から適用されていますが、中規模の地震（震度5強程度）に対しては、ほとんど損傷を生じず、極めて稀にしか発生しない大規模の地震（震度6強から震度7程度）に対しても、人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じないことを目標としています。」この説明では、第1章に引用した公式の説明の中規模の地震、及び極めて稀にしか発生しない大規模の地震に対して、（震度5強程度）、（震度6強から震度7程度）という括弧書きが加えられている。「新耐震は震度6強から震度7の地震に耐える」という説明は、地震関連の報道にもよく使われて一般化している。

上記の説明に登場する「震度」は、地震発生のニュースの度に報じられるので、私たちは、震度5というと体感的に「ああ、このくらいの地震か」という感覚がある。「震度6強から震度7程度」と言えば、熊本地震や阪神淡路大震災で建物が激しく壊れた地震であることを想起する。そこで、「震度5強程度で、ほとんど損傷を生じず」という説明は、確かに、経験的にも建物が震度5程度で壊れた話は聞いたことがないので納得できるが、「震度6強から震度7程度で人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じない」と言われると、「実際は、建物が多数壊れ、人が亡くなっているではないか」と疑問になる。そこで、壊れたのは、旧基準であり、新耐震は大丈夫と言われれば、「ああ、そうか。旧基準の耐震補強が大事なんだ。」と腑に落ちる。また、最近でも、震度7以上の地震は観測されていないから、現行基準の地震想定を見直す必要はないと誰もが思う。しかし、事実はそうではない。

「震度」は、阪神・淡路大震災後の1996年4月に気象庁により計算法が定められたものであり、正式には、気象庁震度階級と呼ばれている。専用の地震計で測定した地震動（地面の揺れ時刻暦）をコンピュータ処理して、計測震度と呼ばれる数値（整数）を計算する。これが、5.0以上5.5未満ならば、震度5強、6.5以上なら震度7となる²⁾。つまり、震度は7までしかなく、どのような激しい揺れでも震度7となる。従って、「震度6強から震度7程度で人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じない」ことは、現実的には、不可能であるという事になる。そもそも、現行の震度が定められたのは、新耐震基準ができて15年たったからである。一部に、「旧基準は震度5強程度までしか耐えられない。これ以上の地震では倒壊する」という説明が行われているが、これも同じ理由で誤りである。

耐震設計においては、地震動の強さは、震度ではなく、最大加速度（地動最大加速度）で表されている。現行基準の制定に深く関わった専門家によれば、新耐震基準は大地震として地動最大加速度0.33~0.4G程度（Gは重力加速度の大きさ）を用いているという³⁾。阪神大震災前後までは、耐震基準の専門家の中で、観測された地震動の最大加速度と基準の地動最大加速度を比較することが行われており、報道機関もフォローしていた。ところが、1993年釧路沖地震では、釧路の気象台で0.9Gの最大加速度の揺れが観測され、即時に発表された為、驚いた報道機関や研究者が現地に殺到する事態になった。また、1995年阪神・淡路大震災では、神戸で0.8G、2004年新潟県中越地震では、川口町の震度計で2.5G、2008年岩手・宮城内陸地震では、岩手県一関市で、4.1Gが観測され、2011年1月にギネスに認定されたと発表されている⁴⁾。これらの実測値は、上記の新耐震の想定大地震動（約0.4G）の2倍から10倍以上である。しかし、神戸海洋気象台周辺を始め観測点の周辺で倒壊した建物はほとんどなく人的被害も無かった。計算上は倒壊するはずである。最近では、専門家も報道機関も、地震観測記録と現行基準の想定地震動の大きさの乖離を問題にしなくなってしまった。それどころか、震度7を絶対上限とする震動階級を用いて想定地震動が説明されていることで、想定地震動を上回る地震動が観測されないという事態が生じている。即ち、現行基準の想定地震動は改定する必要がないとの全く誤った認識が社会に広まりつつある。

2) 桁違いの観測地震動

国土交通省が公表しているQ&A集の「現在の建築基準法の耐震基準（新耐震基準）を満たしている建築物は、どの程度の地震に耐えられるのですか？」という設問に対する解答としての「極めて稀にしか発生しない大規模の地震（震度6強から震度7程度）に対しても、人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じないことを目標としています。」という説明は、どのように堅固な構造物を造ったとしても、これを倒壊させる「震度6強から震度7程度」の地震動が無数に存在することは、震度（気象庁震度階級）の定義から明らかであるので、現行基準に限らずどのような耐震基準であろうとも誤りになる。さらに、約30年間という短い期間に相次いで起こった阪神・淡路大震災、東日本大震災、熊本地震などで震度6強から震度7の地震動が何度も観測されている事実からすれば、これが、果たして「極めて

稀にしか発生しない大規模の地震」と言えるかという問題も残る。

現行の耐震基準の想定地震動については、次のような説明がより正確である。『現行基準は、中小地震（最大加速度 0.066G～0.08G 程度）の地震動に対して、損傷を生じないことを計算で確認しています。また、大地震（最大加速度 0.33G～0.4G 程度）の地震動に対して倒壊しないことを計算で確認しています。なお、上記の中小地震は、震度 5 弱程度に相当します。また、大地震は、震度 6 強程度に相当します。ただし、1995 年兵庫県南部地震等の近年の地震では、想定を遥かに上回る地震動が観測されていますが、建物の倒壊率は、10%程度以下に留まっています。』

上記の説明に挿入した震度の数値は、気象庁震度階級の計算方法²⁾に従って、次のように地動最大加速度を震度に換算したものである。震度は、まず、地震動加速度の各成分の時刻暦をそれぞれフィルター処理して周期 0.5 秒～1 秒付近以外の周期成分を低減する。次にこれらをベクトルの的に合成して、その絶対値の超過時間累計が 0.3 秒となる閾値 (a) を求め、この常用対数を気象庁が定めた一次式に代入して計測震度 (I、整数) を計算する。これを階級表によって震度 5 強等に読み替える。そこで、前記フィルター処理及びベクトル合成では、最大加速度は減少することはあっても増加はしないと仮定し、また、閾値は最大値を越えないので、0.4G 等の最大加速度値の常用対数を震度に換算した。気象庁の計測震度計算式と換算表によれば、震度 7 となる為には、閾値は 0.6G 以上である必要があるので、最大加速度 0.33G～0.4G 程度では、震度 7 にはなり得ないと判断している。また、震度 5 強は、0.1G 以上必要であり、同様に震度 5 弱としている。

耐震基準の計算がどのような強さの地震動を対象としており、最近観測された地震動との関係はどのようなものかを正しく説明することは、耐震診断と補強工事に多額の負担を強いられている建物の所有者・使用者に対する責任であると同時に、合理的な耐震設計を行う上での前提である。気象庁震度階級は、地震動の強さを示す有力な指標ではあるが、地震動の加速度の閾値の常用対数を階級に換算したものであり、これを耐震設計計算の入力地震動の強さに結び付けることは大きな不確定性を伴う。誤差を無視して形式的にでも行うとすれば、上限を 7 とする階級ではなく、計測震度そのものを用いることが必要である。

地震動の強さを表す指標としては本章に紹介した最大加速度、気象庁震度階級の他に一自由度系の最大応答である応答スペクトルもよく用いられている。しかし、これらには地震動の継続時間（繰り返し回数）の影響はほとんど反映されていない。最近の地震のマグニチュードは 9 クラスである。最大値だけでなく揺れの長さ（継続時間）も新耐震の想定地震動よりも一桁近く大きくなっている。この影響を正しく評価するには、地震動の強さを表す指標自体も新たに見直す必要がある。

文献

- 1) マンションの耐震性等についての Q & A について

http://www.mlit.go.jp/kisha/kishia05/07/071208_2_.html

- 2) 気象庁：震度について、気象庁ホームページ
- 3) 石山 祐二：耐震規定と構造動力学、p38、三和書籍、2008年3月
- 4) 地震時の観測最大加速度のギネス認定、防災科学技術研究所ホームページ、2011年1月

3. 性能評価指標

1) 保有水平耐力

現行基準には、前章までに引用したとおり、「ほとんど損傷を生じず」と「人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じないこと」という2つの目標性能が掲げられている。前者については、建物を構成する構造部材の各点の応力度と許容応力度の比（検定比）を性能評価指標として用いている。つまり、「地震に際して、建物各点に生ずる力を材料の強度が余裕を持って上回れば、建物は損傷しない。」ということで、合理的である。ただし、これはあくまで、中規模の地震（最大加速度0.066G～0.08G程度）に対するものである。

上記を上回る地震に対しては、現行基準は、「人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じない」ことを目標性能として掲げている。これに関しては、建物の各点で検定することに代えて、階毎に保有水平耐力と呼ばれる数値を計算してこれが基準値（必要保有水平耐力）を上回ればよしとしている。また、既存の建物の耐震診断においては、構造耐震指標と呼ばれる数字を計算し基準値と比較する。両指標とも、定義からは、直接、人命に危害を及ぼすような倒壊等と関連する指標であるとは言えない。

保有水平耐力の基準値は、必要保有水平耐力と呼ばれている。この値の決定に関した専門家によれば、これは最大加速度0.33G～0.4G程度の地面の揺れを想定して決められており、想定最大加速度を大きくとれば、これに比例して大きな値になる（第2章 文献3）。例えば、1993年に釧路気象台で観測された0.9G、1995年の神戸海洋気象台で観測された0.8Gなどは、現行基準の想定の上2倍以上であるので、これらの地震動に即して計算すれば、大半の建物は基準を満たさない、即ち、倒壊するとの計算結果となる。しかし、実際には、釧路気象台周辺でも、神戸海洋気象台周辺でも、新旧耐震建物とも、ほとんど倒壊していない。

新耐震基準は、1995年の阪神・淡路大震災でその妥当性が確認されたとされているが、これは、あくまで、新耐震基準建物の倒壊率が小さかったというだけで、個々の建物の保有水平耐力の値如何によって倒壊するかどうかは区別できたということではない（第1章 文献13）。新耐震で想定していた2倍以上の最大加速度の揺れが観測された阪神・淡路大震災で確認された事実は、計算上は、ほとんど倒壊するはずが、倒壊しなかったという事である。むしろ、保有水平耐力という指標が倒壊の危険性を計算する上で妥当でないことが示されたということになる。同震災後、この問題が議論され、地盤と建物の相互作用による影響、建物自体の計算外の余裕などを総合すると、この程度（2倍程度）になるとの認識もあった。しかし、これを定量的に基準に取り入れる改訂は為されていない。さらに、今世紀に入って、想定の数倍から10倍の最大加速度の地震動が次々に観測されるに及んでは、2倍の余裕などという議論では間に合わなくなっている。

新耐震基準が導入された当時は、それまでに観測されていた地震動と耐震計算に用いる地震動の関係性を明確にする。即ち、耐震設計を合理化するという意味合いも大きかった¹⁾。しかし、制定後、続々と想定(0.4G程度)を大幅に上回る地震動が観測される一方で、倒壊する建物が稀である現実に直面し、合理性を置き去りにして、新耐震の必要保有水平耐力は、想定地震動の強さを表すものではなく、設計計算上のルールの一つと化している。保有水平耐力という指標自体を見直す時期に来ている。

2) I_s 値

既存建物の耐震診断には、構造耐震指標(I_s 値)が用いられている。これは、(一財)日本建築防災協会が刊行している耐震診断基準に、構造体の耐震性能を表す指標であると定義され、詳細な算定法が示されている。また、同基準の解説には、『「建築物の耐震改修促進に関する法律(以下、促進法と略記)」における「地震の震動及び衝撃に対して破壊し、又は崩壊する危険性が低い」と判定されるための構造耐震指標に関する判定値は、本基準における I_s 指標を用いて表せば、(中略)中低層建物においては(中略)0.6に対応する。』旨が記載されている²⁾。促進法では、「破壊し、又は崩壊する」と記載されているが、法律の主旨からして、これは、「倒壊等」と同義であると考えられる。即ち、ある既存建物が倒壊するかどうかは、保有水平耐力を計算し、これを必要保有水平耐力と比較する方法だけでなく、構造耐震指標を基準値0.6と比較することによっても確認できるとしている。この値(0.6)が決められたのも、1978年宮城県沖地震の被災程度等からであり²⁾、新耐震基準の必要保有水平耐力と同様に、現在まで変更されていない。

学校施設に関しては、大地震に対しても倒壊防止に加えて、「教育研究活動の速やかな回復、また、被災後の一時的避難施設としての機能を考慮する」ことが耐震診断と補強の目的に加えられている。なお、この目的を達成する方法として、「設計用地震力の割り増し(1.25倍)程度が望ましい」としている³⁾。また、新築の校舎等に関しても、同様の規定がある⁴⁾。これらは、新築の設計では、必要保有水平耐力を計算する際にこの値を25%程度割り増すこと、また耐震診断では構造耐震指標の基準値を同様に割り増すこととして実際の設計に反映されている。しかし、保有水平耐力等による検討は、あくまで、倒壊するかどうかの検討であり、これを1.25倍の地震力で行うことは、1.25倍の大きさの地震動で倒壊しないことを確認するに過ぎず、1.0倍の大地震で、教育研究活動の速やかな回復等が計算上確認できることにはならない。しかも、この大地震とは、最大加速度0.4G程度の地震動であり、今世紀に入って観測された地震動の数分の1にしか過ぎない。

熊本では、耐震補強が必要と判定された校舎は全て耐震補強が完了していた。即ち、耐震化率100%であったにも関わらず、多数の学校校舎が地震後使用できなくなっている現状を見ても、現行基準で、耐震強度を割り増しても、大地震後に教育研究活動の速やかな回復、また、被災後の一時的避難施設としての機能維持は望めないことは明らかである。

耐震診断基準の解説に阪神・淡路大震災を経験した学校校舎74棟の I_s 値と損傷割合(D)

の関係が図示されている。図の所見として、「 I_s 値と各建物の被災程度はある程度対応し、 I_s 値が高くなるとともに被災度は小さくなる傾向が見られ、 I_s 値が 0.6 を上回れば被害は概ね小破以下となっている。」と述べられている²⁾。上記の図で、 I_s 値と損傷割合 (D) の相関係数を計算すると-0.38 であり、負の相関は見出せるが、絶対値は 0.5 以下であり、相関は弱いと判断される。即ち、 I_s 値で損傷度合いを定量的に評価した場合の誤差は無視できないほど大きくなると言える。同図には、調査者の判断として、倒壊、大破等の区別が記号で記載されている。これに基づいて、倒壊したかどうかと I_s 値の相関係数を計算すると-0.21 となり、ほぼ無相関であると結論される。即ち、統計的にも、 I_s 値を倒壊するかどうかの判断に用いることは、ほとんどできないと言える。これは、以下に実例でも検証されている。

東日本大震災において、北関東から東北地方の震度 5 強以上の揺れを受けた地域（津波被災地を除く）には、 I_s 値が 0.3 以下で、未だ耐震補強が行われていない庁舎・学校の建物が少なくとも 98 棟あることが公開資料で確かめられた（震度 6 弱以上 63 棟、震度 5 強 35 棟）。上記の説明からすれば、かなりの数が倒壊していると想定される。ところが、電話等でヒアリング調査したところ、この内、倒壊したものは 1 棟もない。外壁に亀裂が入り使用中止をした校舎が一つあるのみである。一部で天井落下等の軽微な被害がある 3 棟を含め 97 棟が使用継続している。

建築学会東北支部は、仙台周辺の学校建物 82 棟について I_s 値と被害の関係を調査した。 I_s 値が 0.7 未満で、未改修建物は 7 棟であった。冒頭の説明では、かなりの数で被害が出ていると予想された。しかし、全て被害は軽微であった。また、 I_s 値が 0.7 以上であるか、耐震改修して 0.7 以上になった建物は 75 棟あった。被災率は小さいと予測される。ところが、この内、D3（構造体被害）が 3 棟、D2（非構造部材の剥落）が 8 棟であった。この結果を受けて、東北支部は、「使用継続性を言及する新たな耐震性能の評価手法の構築が急務であると思われる。」と述べている⁵⁾。

現行基準は、目標性能、想定地震動の表示方法とその大きさ、性能評価方法のそれぞれについて根本的に見直す必要がある。

文献

- 1) 石山 祐二：耐震規定と構造動力学、pp30～116、三和書籍、2008 年 3 月
- 2) （一財）日本建築防災協会：2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説、pp181～184、2001 年 10 月、平成 17 年 2 月改訂版
- 3) 文部科学省：学校施設の耐震補強マニュアル 2003 年改訂版、pp9～10、平成 17 年 6 月
- 4) 文部科学省大臣官房文教施設企画部：建築構造設計指針 平成 21 年版、p30、ホームページに掲載
- 5) 日本建築学会東北支部：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査、pp74～78、2013 年 5 月

4. 高さ制限撤廃

現行基準では、高さ 60m を超える建物（超高層建築物）については、地震による時々刻々の建物の揺れ（応答）を計算で求める時刻歴応答解析と呼ばれる方法を用いて、中小地震で「ほとんど損傷を生じず」ということと、大地震で「人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じないこと」を確認している。高さ 60m 以下の中低層建物は、これとは異なり、地震の作用を方向が変わらない力（地震力）に置き換えて建物内部に生ずる力と変形を計算する方法（震度法）を用いている。

超高層建築物を中低層建物と同じ方法で設計しようとするると地震力を余程小さくしない限り、ピラミッドのような構造になってしまう。しかし、高い塔状の建物は、「地震の揺れの周期より長い固有周期を持つので、地震の影響を受けにくい。また、自身の揺れによって地震の作用によって内部に生ずる力が互いに打ち消しあって、地震力が小さくなる。この効果を設計に取り入れれば日本のような地震国でも超高層を建設することができる。」とする主張は、古くからあったが実現しなかった。震度法を考案し、建築基準法の前身である市街地建築物法（1919 年～1950 年）の耐震規定制定の中心となった佐野利器（1880 年～1956 年）は、1927 年の建築雑誌で、以下の理由を挙げて上記の主張に明確に反対している¹⁾。

- ① 我が国は世界で最も著しい地震国であり、日本全国は等しく大地震帯の中に閉じ込められたようなもので、いつ、どこで、どのような地震が起こるかは予測できない。
- ② 地震動は不規則であり、揺れ方を予測できない。
- ③ 加えて、構造物の揺れ方も複雑であるので、地震の作用がどれだけ小さくなるかは、計算で正確に求めることはできない。

上記の反論は耐震の本質であり、時代を超えて妥当である。しかし、1962 年 7 月の河野建設大臣の高さ制限撤廃の発言を経て、1970 年に掛けて政官財学が一致して高さ制限を撤廃し、100m を超える建物が続々と建設されていく²⁾。1974 年の新宿住友ビル（210m）、1991 年の東京都庁第一本庁舎（243m）、1993 年の横浜ランドマークタワー（296m）、2014 年のあべのハルカス（300m）と記録は更新され続けている。東京では、超高層を中心とした再開発プロジェクトが目白押しである。

現在のコンピュータを用いた数値計算技術は、佐野の反論が発表された 1920 年代、そして、建築学会の委員会が高さ制限撤廃可能と結論した 1960 年代とは比較にならない量の計算を瞬時に行うまでに発達している。しかしながら、これをもってしても、上記①～③の反論を覆すことはできない。地震動の不規則性、地殻、地盤、そして、構造物の複雑さは、遥かに大きく深いことは、地震という現象が、数十年から数百年、時には何千年もの間に蓄えられたエネルギーを地下数キロから数十キロの深さで地盤が数十キロから数百キロに渡って破壊することで一気に放出するものであるということからも明らかである。仮に、1 万個の地震動で計算を行ったとしても、将来起こり得る地震動を尽くしたことはない。自然の地盤の上に、膨大な数の材料を組み立てる建物についても同様である。仮に、十万自由度（運動方程式の独立変数の数）を用いた詳細なモデルをコンピュータ上にくみ上げたとし

でも、実物の建物と周囲の地盤を詳細かつ正確にモデル化したとは言えない。しかも、現在の解析技術では、このように複雑なモデルでは数値的な不安定を生じやすく、計算結果が得られない可能性が大きい。超高層は破壊すれば倒壊する危険性が大きい。倒壊すれば、周囲の建物や道路を破壊する。その影響は、中低層ビルの破壊とは比較にならない。

上記の事実は、時刻歴応答解析による設計を行う立場の専門家の間にも十分認識されている³⁾。しかし、現在行われている時刻歴応答解析は、数種類の地震動について計算するに過ぎず、モデルの自由度も、多くても数百程度である。

設計用地震動の強さは、1自由度系の時刻歴応答解析から得られた最大応答速度（応答速度）で表すことが一般的である。これは、系の固有周期の関数になるので、横軸に固有周期、縦軸に応答速度を表示した図が応答スペクトルと呼ばれている。超高層等の時刻歴応答解析に用いる設計用地震動に関しては、告示とこれに準拠した解説書で詳細に応答スペクトルの内容が規定されている。当初は、倒壊等の危険性をチェックする大地震としては、応答速度 0.5m/sec の強さであったが、近年、改定され、1m/sec 程度にまで引き上げられている³⁾。しかし、熊本地震では、20階建～70階建建物の固有周期に相当する2秒～7秒付近で、上記の改定値をも3倍程度上回る地震動が観測されている⁴⁾。

自然界や歴史的建築物には、超高層の類例はない。五重塔は、一見、超高層に似ているが、全く違う。前者は、人間が手で押しても動くように作られており、台風では倒壊するので、防風の為に周囲を高い樹木で覆っている⁵⁾。人が住んだり、働いたりできる物ではない。高い樹木は、広く、深い根を張っており、先端は細く軽くしなやかで、根元は太い。私たちの周囲にあるスレンダーな超高層ビルは、1960年代に初めて出現した人工物である。単純な計算（震度法）では、地震力を中低層建物に比べて数分の1程度に低減しない限り破壊してしまう。超高層は、コンピュータが造り出した建物である。自然によって淘汰されないとは言いきれない。世界に比類ない地震エネルギーを蓄積しており、今将に、百年に一度、あるいは千年に一度の規模で、これが放出されようとしている日本の大都市に、超高層を続々と建設することの妥当性に関する見直しが必要である。少なくとも、高さに比例して揺れの大きさは増す。使用継続性と無被害化に向けては、建物の高さを制限することは必須である。

文献

- 1) 佐野 利器：耐震構造上の諸説、建築雑誌、pp39～45、1927年1月号
- 2) 大澤 昭彦：建物高さの歴史的変遷（その1）p23、土地総合研究、2008年春号
- 3) 日本建築センター：高層建築物の構造設計実務、pp3～20、pp85～90、2007年12月
- 4) 大野晋：2016年熊本地震の強震記録、東北大学 災害科学国際研究所ホームページ
- 5) 上田 篤 編：五重塔はなぜ倒れないか、p265、新潮選書、2008年12月

5. 新たな指標

1) 危険度

現行の耐震基準がその目標として掲げている「人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じないこと」が、耐震の基本であることには異論を挟む余地はない。これを明確に示す新たな指標が得られれば耐震設計を合理的に行うことができる。まず、地震動によって引き起こされる現象（事象）の内、人命に危害を及ぼす危険性のあるものを列挙する。

- ① 仕上げ、設備、什器備品等が崩落、落下、転倒して人にぶつかる。
- ② 構造物が全体として転倒し、人に衝撃が加わる。
- ③ 接合部が外れて、鉛直部材が転倒するか、梁が落ちて、人にぶつかるか、構造物の内部空間が大きく減少し、人が挟まれる。
- ④ 鉛直部材が座屈あるいは圧潰して、支持力を失い構造物の内部空間が大きく減少し、人が挟まれる。
- ⑤ 人が逃げ出そうとして飛び降りたり、互いにぶつかったりする。
- ⑥ ガス漏れによる中毒、感電、爆発等
- ⑦ 火災によるやけど、呼吸困難等。
- ⑧ 上記以外で、人命に危害を及ぼす危険性のある事象。

上記各号は、独立ではなく、一つが他を引き起こすことがある。なお、構造物の全体としての運動には、②に掲げた転倒の他、浮き上がり、滑動があるが、これらが上記各号のいずれにもつながらなければよい。なお、1964年新潟地震における県営川岸町アパートのようにゆっくり転倒した為、人命に危害が及ばなかった事例もある。

想定する地震動によって上記の現象が生ずる危険性を定量的に評価し、これを防止することが耐震設計の基本となる目標である。これには、地震動により構造物及び内容物がどのような力を受け、どのように振動するかを計算する必要がある。これは、地震応答解析と呼ばれており、佐野利器の家屋耐震構造論（1916）には地震動の作用を時間的に変化しない加速度（震度）に置き換えて計算する方法と実例が詳細に述べられている。現在では、構造物と地震動の作用を様々な形でモデル化し、コンピュータで計算する方法が開発され実用化されている。現行基準の一次設計では、中低層建物については、佐野の方法に各種の修正を加えた震度法を用いており、超高層・免震等については、地震の作用を時事刻々変化する加速度に置き換える方法（時刻歴応答解析）で計算している。

上記各号の現象は破壊現象であるので、どこか一箇所の破壊が引き金となって全体に波及すると考えられる。そこで、地震応答解析に基づいて、上記各号のそれぞれについての駆動力と復元力の比（検定比）を計算し、構造物のある部分あるいは全体に関する最大値を求めて、人命に対する危険度を評価する。ただし、地震動は構造物と内容物に対して大きく変動する力と変形を繰り返し与えるので、これによる復元力の劣化も適切に評価する必要がある。

上記各号に対する危険度は、次のようになる。即ち、崩落危険度(I_b 値)は、崩落危険部分

に作用する地震力と復元力の比、落下・転倒危険度 (I_f 値) は、地震動の作用で仕上げ・設備等が落下・転倒しようとする力と支持力の比、建造物の転倒危険度 (I_{gr} 値) は、建造物の転倒モーメントと復元モーメントの比、また、接合破壊危険度 (I_j 値) は、各接合部の作用力と耐力の比、軸圧潰危険度 (I_p 値) は、各鉛直部材の作用軸力と軸耐力の比である。ただし、ある設備等が落下等を起こしても人にぶつからない場合は最大値の集計から除く、また、その部材あるいは接合部が破壊しても、他の部材等が代わって力を負担して構造系を維持できると考えられる場合にも集計から除くこととする。建造物としての倒壊危険性は、②～④の危険度の最大値として評価できる。これを特に、倒壊危険度 (I_d 値) と呼ぶ。

危険度を用いることには以下の利点がある。

- 1) 計算に用いた地震動と事象が明確になる。
- 2) 建造物の倒壊危険性が具体的な数値で評価できる。
- 3) どの設備等の崩落、落下、転倒、あるいは、どの部材・接合部の破壊が危険度を決定しているか、また、不足している復元力の大きさが明確になり、補強設計を具体的にを行うことができる。

現行基準の保有水平耐力比あるいは構造耐震指標は、一部の部材が降伏あるいは破壊した後（崩壊過程）についても基準等に定められたルールに従った計算を行って、耐力等を集計した値である。しかし、実際の建造物の崩壊過程が、このルールに従うとは限らない。また、現行基準の補強は、保有水平耐力等が必要値（基準値）を満たすように壁等を配置する補強となるが、実際の建造物が、前記ルールに従わなければ、この補強の効果は期待通り発揮されないことになる。危険度を用いる場合には、その部分（例えば一階）の危険度を決めている、即ち、危険度が最大の部材あるいは接合部に対して所要の強度を持たせ、危険度が許容値を下回るようにする補強となる。即ち、倒壊等の原因を一つずつ潰していくことになる。

2) 損傷度

現行基準が中小地震に対して掲げている目標である「ほとんど損傷を生じず」という性能を想定地震、あるいはこれを超える大地震に対して実現することは、現代の建物、インフラ施設（総称して建造物）の所有者・使用者の願いであり、耐震補強工事の目的である。これを評価し実現する方法として、現行基準の1次設計の方法である弾性地震応答解析を行って材料の許容応力度に対して発生応力度を検定することも有力であるが、想定大地震に対してこれを満たす建造物、即ち、弾性範囲で応答する建造物は堅固になり過ぎ経済的でない。

部材、留め具等が弾性範囲を超えた後に多数の繰り返し荷重を受けた場合にも損傷が許容限界に収まれば上記の目標が達成できる。これを評価する一つの指標として、部材に作用するエネルギーと部材等の損傷限界エネルギーの比を用いることとし、損傷度 (I_d 値) と称している。これは、部材等の履歴ループ（荷重変形関係）と、これが損傷限界に達する履歴エネルギー（損傷限界エネルギー）、及び地震応答解析から得られた想定地震動により部材

等に作用する荷重変形から計算される。一般には、損傷限界エネルギーは、履歴ループに依存すると考えられるが、これが、ほぼ一定であるとの仮定を設けることで、パラメータを減らし、設計計算を単純化することができる。上記の定義による損傷度と前節に記載した各種の危険度を用いた耐震設計に関しては設計指針が作成され、実施例もある¹⁾。

マグニチュード9クラスの地震動は、従来の想定を1桁上回る繰り返し回数の履歴を各部材に強いる。繰り返し荷重の効果、部材等の損傷を評価する指標、そして、効果的な補強方法を得ることに向けての実験的、理論的研究を実施していくことが活動期の地震対策を合理的に行う上で重要である。

文献

- 1) 五十嵐 俊一：SRF 工法設計施工指針と解説 2015 年改訂版、構造品質保証研究所、2015 年 10 月

6. 想定を超える地震に耐える

1) 経験と計算を生かす

歴史的に見ると、大地震の前後には地震・火山活動が活発な期間（活動期）があり、その後、しばらく静穏期がくる。活動期に耐震性の無い構造物が淘汰され、耐震に対する工夫が生まれ、良いものが残っていくという繰り返しの中で、日本、トルコ、ペルー・チリ等の地震国の住宅・寺院等の伝統建築には各種の耐震構造が蓄えられてきた。

活動期は大きな気候変動を伴うようである。カント（1724 年～1804 年）は、地震論（1756 年）の中で 1755 年リスボン大地震前後には、ヨーロッパ全域に渡り、異常気象（暖冬）が発生していて、これが、余りに並はずれなので、その為にあのような大地震が起こったといっても許されるだろうと述べている¹⁾。大震災による重要建造物の崩壊は、既存の体制をも覆し、経済社会の大変革の引き金となることもあった。リスボン大地震は、大聖堂を崩壊させ、カトリックの権威の失墜、絶対君主制の崩壊から市民革命へとつながる政治経済の一大変革期につながっている。

わが国では、869 年貞観地震を中心とする活動期に、全国各地で直下型地震が相次ぎ、富士山、阿蘇山等の火山噴火、そして、大阪を津波が襲った南海・東南海地震が発生、貴族が地方政治を投げ出し、律令国家の崩壊、そして武士の台頭を招いたと言われている。

直近の活動期は、明治 24 年（1891 年）濃尾地震を中心とする約 70 年間であり、1853 年の小田原地震から、1906 年サンフランシスコ地震、1923 年の関東大震災に至る 19 世紀末から 20 世紀初頭の期間である。この時期に、日米で、木造、石造、レンガ造、組石造、鉄骨造、鉄筋コンクリート造の各種の建物が被災した。これらの被害事例、無被害事例を詳細に調査し、物理学と数学を駆使して、計算に基づいた耐震、即ち、近代的な耐震設計法の原点とも言うべきものが形作られ、佐野利器により、家屋耐震構造論として纏められている²⁾。この第一は、「地震により建物の個々の部分に掛かる力を定量的に計算し、これに対して、

十分な安全率を持つような強度の材料を配置した構造とする」こと、第二は、「構造物の高さを制限する」ということである。これが、1919年に公布された市街地建築物法、及びその施行令、施行規則で制度化されていく。

1920年9月の市街地建築物法施行令で、構造毎に高さ制限が設けられた。さらに、1923年の関東大震災の試練を経て、その翌年に施行規則で、世界で始めて地震力の規定が導入される。ところが、太平洋戦争の混乱と、その後、1968年の十勝沖地震まで続いた静穏期に耐震基準が緩和されていった。第一の材料強度に対する安全率については、戦時中の物資欠乏により地震時には、ほぼ材料強度まで使うという考え方が基準に反映され、戦後も引き継がれている³⁾。また、前章に述べた通り、高さ制限については高度成長期に撤廃されて現在に至っている。

1968年十勝沖地震での鉄筋コンクリート造校舎、庁舎の崩壊は、「計算に基づいて設計された構造物は地震で破壊することはない。絶対安全である。」と信じていた当時の社会にとって大きな衝撃であった³⁾。これを受け、耐震基準強化の動きが始まる。1971年のせん断補強鉄筋配置の強化規定、1978年宮城県沖地震を契機とした1981年の新耐震基準の導入、そして、1995年阪神・淡路大震災でのピロティ等に関する規定の強化である。しかし、これらは量的な変更であり、安全率の削減、高さ制限の撤廃などの根本的な点に関しては手がつけられていない。1968年当時、オリンピック、万博があり、既に、霞ヶ関ビル等の超高層、首都高速、原子力発電所等の重要な施設が完成していて、今更、耐震基準を根本から見直すことが出来ない状況であった。

今、将に、わが国は、2011年東北地方太平洋沖地震を中心とした活動期に入ったと言われている。これは、869年貞観地震に匹敵する千年に一度の大規模なものであり、今後、全国各地で直下型地震、火山噴火、そして、M9クラスの南海・東南海地震が起これると予測されている。熊本地震で実測された地震動は、超高層、免震ビルも倒壊させるという長周期の強い揺れを伴う。また、海洋型巨大地震の揺れは、現行基準の10倍以上の継続時間とエネルギーを持つと予測されている。現行の耐震基準と耐震化制度は硬直化しており、毎年のように起こる震災で長期間避難所生活を強いられる人々が多数出ている。耐震補強済みの校舎が被災し取り壊した事例もある。新耐震でも重大な被害を生じた建物も多い。一方で、構造耐震指標が0.3以下で倒壊の危険性があるとされた庁舎、学校で実際に倒壊したものはほとんどない。旧基準だけを追いかけている現行の耐震化制度を抜本的に見直さない限り、東京、大阪などの大都市で重大な被害を招く危険性を軽減することは困難である。

耐震設計に用いる計算は、想定地震動（地震力）に基づくもので、想定を超える大地震では、構造物は計算上破壊することは避けられない。ところが、地震動も構造物も複雑であり、実際に起こる地震で、全てが計算どおりに破壊するとは限らない。これまでの震災での被害・無被害事例を見ると、中低層の鉄筋コンクリート系建物については、計算と実際の被害の間には相当の余裕があることが分かる。日本建築学会の調査報告書によれば、阪神・淡路大震災における神戸市灘区、東灘区の震度7の地域における鉄筋・鉄骨コンクリート（RC

系) 建物 3911 棟の内、ピロティを除いた 3534 棟では、旧基準でも倒壊した建物は、4%に過ぎない⁴⁾。即ち、旧基準で耐震補強を行っていないくとも、ピロティでなければ 96%は倒壊していないという事である。また、第 3 章で詳述した通り、東日本大震災において、震度 5 強以上の揺れを受けた地域には、 I_s 値が 0.3 以下で、未だ耐震補強が行われていない庁舎・学校が 98 棟確認されたが、この内、地震動で倒壊したものは 1 棟もない。

新耐震基準の想定を遥かに超える地震動が数多く観測されている。さらに、これらをも超える地震動が襲来することは地震の活動期には避けられない。このような地震動に対して人命に危害を及ぼすような被害を防止することが求められている。さらに、使用継続性を確保し、無被害化を求めるにはどうすればよいか。東京大学地震研究所の壁谷澤教授は、RC 構造設計の現状と課題と題した建築学会のパネルディスカッション資料の中で、今後の設計法について、以下の 9 項目を掲げている。①過去の被害を理解する。②層降伏と全体降伏を区別する。③真の安全限界状態を明らかにする。④損傷、修復限界の評価法を検証する。⑤観測、実験、調査などの研究を地道に続ける。⑥研究成果を基準、指針に反映する。⑦地震動の不確定性を意識する。⑧地盤構造系で設計を考える。⑨フェイルセーフの設計法を考える⁵⁾。また、大手建築設計事務所の構造部門責任者は、阪神・淡路大震災で、兵庫県内で同事務所が手がけた建物 245 棟の内、転倒や層崩壊は皆無であり、大きな被害は 1950 年代のビルで柱のせん断破壊が 1 棟、1980 年代の駐車場で鉄骨柱の大変形が 2 棟だけであったことについて、「幸運もあったが、建築基準法施行令などを最低限守りつつ、設計者のカンと経験を重んじてきたのがよかったのかも知れない。」と述べ、将来について「今後は、耐震基準をどの程度超えた強い建物にするかは、建築主と構造設計者が予算も含めて相談する時代に向かうでしょう。医療のインフォームドコンセントの建築版です。」と述べている⁶⁾。

人命に危害を及ぼす地震被害を防止するには、仕上げ、設備等まで含めた建物全体の設計・施工、さらに、使用者・所有者の判断と行動が大きく関わっている。従って、想定を超えるような大地震に対するには、これまでに蓄積された経験と計算技術、建設技術を総合的に活用する仕組みを造ることが必要である。これに向け、耐震設計に用いる計算と指標を分かりやすく単純化して、危険性の内容と度合い、そして、対処方法を構造設計の専門家だけでなく、構造物の設計と建設に関するそれぞれの分野の専門家の間、さらに、施設の使用・所有者の間で共有化したい。設計指標については第 5 章に述べた危険度と損傷度を用いることができる。

想定地震動を現実近づけたものとし、複雑な計算を避け、個々の事象の危険度、個々の部材の損傷度を計算し、結果に対して大きな安全率を用いることで計算と現実の違い、及び想定を超える地震に対処する。これまでの地震での被害・無被害事例を分析し大地震に耐える構造を追及し実装する。経験と計算を生かし、施設に関する全ての専門家の英知を結集して取り組んでこそ、千年に一度の大きな活動期を最小被害で乗り切ることができる。

2) 点検・修理・増設可能性

構造物は経年劣化する。また、増改築がある。一方、大地震は、今日来るか、30年後に来るか定かでない。従って、構造物が所要の耐震性を有することを常に確認し、適宜、補修、補強を行うことは必要である。旧基準建物だけを対象とした耐震強度再計算を主とする現行の耐震診断に代え、この意味での耐震診断（点検）を新・旧基準に関らず耐震補強材に対して定期的実施したい。点検項目としては、補強材の健全度、劣化度（現有強度）及び、その時点の想定地震動に対する安全率の大きさである。

現在の構造物では、大地震に対する備えが、その他の荷重に対するものと渾然一体となっているので、点検、追加補強を行うとなれば、結局、構造物全体に対する大掛かりな点検作業と補強工事になってしまう。大地震に対する備えをその他の荷重に対するものから切り離して外側に設置することができれば、この問題が大幅に軽減される。

3) 高延性材

想定地震動の大きさと継続時間を一桁大きくし、さらに、大きな安全率を設け、定期的な点検を行うことが、想定を超える大地震に耐える構造物には求められる。これは、鉄やコンクリートのように重く、容易に亀裂を生じ、あるいは、降伏する構造材料を用いて実現することはほぼ不可能である。

地震力は重量に比例するので軽い材料が選択される。しかし、炭素繊維等の高機能材料は、1%程度のひずみで破断するので、大きな安全率を設けるには、構造物に生ずるひずみを極めて小さく抑える必要が生じてしまい、やはり、実現性が無い。軽くて、破断ひずみが大きく、ひずみにほぼ比例して抵抗力を発揮する材料が、上記の要件を満たす。これを高延性材と呼んでいる。

4) 受動的耐震補強構造

これまでの多数の被害・無被害事例から、我が国の中低層の鉄筋コンクリート系建物については、耐震診断、あるいは設計計算で得られる耐震強度と実際の建物の強度の間には相当の余裕があると言える。即ち、これらの建物の柱・壁等の部材が実際に破壊するのは、現行の計算方法で判定されるよりも相当大きな地震が来たときに限られる場合が多いと言える。従って、既存の部材等の剛性、重量等をほとんど変えず、これらが本当に破壊を始めた後に効果を発揮する受動的な耐震構造が合理的な選択となる。なお、既存の部材等の外側に補強材を設置する構造は、上記の効果を発揮しやすい。また、第二項に述べたように点検・補修・追加が容易であるとのメリットもある。

地震動は、構造物が地盤と接する面を通じて、地盤の縦波、横波、あるいは地表面波となって構造物に入ってくる。従って、周辺地盤及び構造物の地盤との境界面の強度が構造物に作用する地震力の上限となる。例えば、周辺地盤が液状化してしまえば、構造物は泥水に浮かんだ船のような運動をするだけで直接の地震力は受けない。従って、転倒、あるいは転覆

を生じない限り、基礎と土台を余り強く固定しない方が、地震力が小さくなり、耐震性は高くなる。2009年に行われた木造住宅の実大震動台実験で、現行基準を上回る耐震強度の住宅とこれを下回る住宅の内、前者が倒壊し、後者は倒壊を免れるという予想外の結果になったが、後者の土台が一部基礎から浮き上がることで震動を吸収した模様がビデオから読み取れる⁷⁾。

構造物内に発生する力（応力）も同様で、ある部分が破壊あるいは降伏してしまえば、それ以上の力は周囲に伝達されない。想定を超える地震動に対する耐震構造としては、大きな強度を発揮する構造ではなく、万一大きく変形しても強度を概ね維持する構造、即ち、変形能力の大きな構造とすることが効果的である。大きな強度は、却って周辺に大きな負担を強いて破壊する原因になることがある。東北新幹線で確認された鉄板巻き柱周囲の梁の破壊、東北大学青葉山キャンパスでの耐震補強済み建物の柱破壊、ペントハウスの破壊等、構造耐震指標（ I_s 値）を用いた強度型の耐震補強が却って破壊を招いたと見られる事例は数多い。

以上から、軽くて、破断ひずみが多い材料（高延性材）を既存の部材等に添うように設置し、これが実際に破壊を始めた後に耐力を保持し、大きな変形能力を部材に付与する構造、即ち、受動的耐震補強構造が合理的であると言える。

5) 2次設計の変更と3次設計の導入

上記の内容を実施する為に、現行基準の2次設計に代えて、危険度を設計指標として新たに設定した想定地震で人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じないことを確認することとする。さらに、3次設計として、使用継続性、無被害化を求める為に、構造に応じて構造物の高さを制限するとともに、損傷度等の設計指標に従って大地震対策工を施工（設置）する。現行の1次設計と上記の2次設計までは、法的に義務付けるが、3次設計に関しては方法、指標、工事内容等を原則として設計者の判断に委ねる。ただし、2次設計に関しては、十分な安全率を持つこと、及び点検計画に基づいて維持管理することを義務付ける。また、これまでに設計地震力を超える大地震に被災したことの無い超高層等に構造物に対しては、新たに想定する大地震あるいはこれを超える大地震で構造物が倒壊した場合の対策を必ず立案し実施することとする。倒壊した場合に敷地外に直接被害が生ずる可能性がある超高層建物等は原則として建設を認めない。

以下は、上記の2次設計及び3次設計に用いる設計指針の骨子である。

1) 適用範囲

本指針は、構造物の耐震設計に適用する。対象とする構造物は、既設、新設を問わないが、想定地震以外の荷重等については、それぞれ、準拠すべき公的な基準類に適合して設計・施工されている事を前提とする。

2) 想定地震動

本指針でいう想定地震動の大きさ及び継続時間は、これまでにわが国で観測されたもの、また、予測されているか今後予測される大地震（各種の直下型地震、南海・東南海地震などによる揺れ）を下回らず、これを超えるものとする。想定地震動は、時刻暦、あるいは、最大加速度、卓越周期、及び継続時間で示す。なお、最大加速度と卓越周期を応答スペクトルで置き換えてもよい。

3) 要求性能

本指針に従って耐震補強した構造物に求める性能は、まず、第一に人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害を生じないことである。第二に、使用継続性が確保できる可能性が高いこと等、施設の目的、使用者・所有者の求める性能とする。

4) 性能評価

前項の各要求性能に対して、それぞれ個別に評価指標を定義する。第一の要求性能については、原因となる各事象の駆動力に対する復元力の比である危険度を用いて評価する。第二の使用継続性確保等に関しては、部材に対する入力エネルギーと限界エネルギーの比である損傷度等を用いる。上記の計算に用いる駆動力、あるいは、入力エネルギーは、想定地震動に対する震度法、時刻暦応答解析等の地震応答解析により計算する。なお、前記解析では構造物と地盤の相互作用、構造物内でのメカニズム形成等による応力の上限を考慮してよい。

高さ 60m以上の建築物に対しては、倒壊した場合の対策を立案し、実施することとする。なお、敷地外に直接被害が生ずる可能性がある場合には原則として建設を認めない。

5) 構造

本指針の耐震補強は、鉄、コンクリート等の構造材や止め具等が亀裂等を発生し、破壊を開始した後に、これを支持して破壊の進行を防止し、耐荷力を概ね保持し、所要の変形能力を付与する構造とする。

6) 安全率

本指針の耐震補強に用いる材料は、地震応答解析で得られる応力度に対して、その強度が十分な安全率を持つように配置する。

7) 点検

本指針の耐震補強は、時間の経過、対象構造物の増改築等による変化、想定地震動の変更に応じて、点検、補修、取替え、追加可能であるものとし、定期点検計画を施工（設置）時に作成することとする。

文献

- 1) カント全集1、大橋 容一郎、松山 壽一、pp275～337、岩波書店、2000年
- 2) 佐野 利器：家屋耐震構造論、震災予防調査会報告第83号、1916
- 3) 外岡 秀俊：地震と社会（上）、pp224-245、みすず書房、1977年12月
- 4) 日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計、pp.4-6、1998.10
- 5) 壁谷澤 寿海：1995年兵庫県南部地震の被害の概要、RC構造設計の現状と課題—阪神・淡路大震災から20年の歩み—、2015年度日本建築学会大会、PD資料、pp3-13、2015年9月
- 6) 建築基準+「カンと経験」、朝日新聞（夕刊）、1995年3月20日
- 7) 兵庫地震工学研究センター：【25】3階建て木造軸組構法住宅（2009年10月）
<http://www.bosai.go.jp/hyogo/research/movie/movie-detail.html>

7. 実証例

想定を超える地震に対して使用継続性と無被害化を求める耐震補強の実証例としてSRF工法がある¹⁾。これは、以下の特徴を持つ。

- 1) 高延性材として、ポリエステル繊維をベルト状、あるいはシート状織製したものをを用いる。これは、設計強度を発現するひずみの10倍程度のひずみを受けても破断せず、ほぼ弾性的に復元力が増加する。
- 2) 高延性材を既存の構造材、仕上げ、設備、什器等（既存材）にウレタン系一液性無溶剤の「高靱性接着剤」で貼り付け、巻きつけて設置する補強構造を用いる。必要に応じて、高延性材を既存材に機械的に定着する。高靱性接着剤の接着強度はコンクリートの表面剥離強度よりも大きくないので剥離するときにコンクリートを破壊せず、まだ剥離しない部分が接着力を発揮し続けることにより、大きな変形に対しても余長が全て剥離しない限り接着は解除しない。
- 3) 上記補強構造は、コンクリート系部材に対しては、亀裂、段差に弾性的な復元力を与え、体積膨張を拘束し、曲げ耐力、せん断耐力、及び軸耐力を維持する機能を発揮する。部材を覆うように閉鎖型に設置した場合には現行基準の想定する10倍を超える変形、エネルギーを受けても破壊せず、損傷も許容値内に収めることができることが多数の実験で確認され物理的な背景の明確な設計式で定量化されている。面部材（壁）の一面に設置した場合でも、ひび割れを均等に分散することで大きな変形下でもせん断耐力を維持し、崩落を防止する効果を発揮する。
- 4) 上記補強構造は、木造接合部に対しても復元力を付与し、釘打ち部に対しては釘の貫通、釘による合板等の引き裂きを防止する効果を奏する。これらの効果は、物理的な背景の明確な設計式で定量化されている上、多数の試験で基準耐力値等が算定されている。

5) 上記補強構造は、仕上げ等の崩落、落下、転倒に対しても復元力あるいは支持力を発揮する。

SRF 工法は、RC 系及び木造で（一財）日本建築防災協会の技術評価を取得、また、コンクリート製棒部材及び面部材で（一財）土木研究センターの審査証明を受けており、現行基準の枠組みの中で用いることも可能である。

SRF 工法を用いた鉄筋コンクリート系構造物の倒壊危険性は、柱の地震時軸力の検定比である倒壊危険度 (I_f 値)、あるいは、長期軸力に対する残存軸耐力の検定比である軸破壊危険度 (N_f 値) を用いて評価する。損傷の危険性については、繰り返しを考慮した入力エネルギーと損傷限界エネルギーの比である損傷度 (I_d 値) を用いる。仕上げ等の崩落あるいは落下・転倒に関しては、それぞれの地震荷重とこれに対して高延性材が発揮する支持力の比である崩落危険度 (I_b 値)、あるいは落下・転倒危険度 (I_t 値) を用いる。

SRF 工法は、1999 年に研究開発を開始、東京大学地震研究所、科学技術庁防災科学研究所との共同研究の大型震動台実験等で効果を確認し²⁾、2002 年には、（一財）日本建築防災協会の技術評価を受けた。その後も、東京大学地震研究所³⁾、⁴⁾、横浜国立大学⁴⁾、東北大学⁵⁾、京都大学⁶⁾、及び職業能力開発総合大学校との各種の共同実験で、柱、壁、梁等を同工法で被覆すると現行基準が想定している 10 倍程度のエネルギーや変形を加えても破壊しない部材ができることが実証されている。

2016 年 8 月までの 17 年間で、同工法を用いて改修設計した構造物は合計、2,677 箇所に入る。この内訳は、非木造建物が 1,756 棟、木造が 847 棟、インフラ施設が 74 箇所である。設計指標として、 I_s 値を用いたものは 821 件、現行基準の保有水平耐力許容応力度等を用いたものが 7 件である。この中には、姉歯建築士の耐震偽装マンションも含まれており、告示第 1024 号の引張の許容応力度及び材料強度 F の指定を受けている⁷⁾。上記実施例の内、第 1 項に掲げた倒壊危険度等の新指標を用いて、設計・施工した建物は 476 件に達する。この内、倒壊危険度 (I_f 値) を用いたものは 402 棟、損傷度 (I_d 値) を用いたものは 21 棟、軸破壊危険度 (N_f 値) を用いたものは 56 件である。

SRF 工法を用いた構造物の内、東日本大震災で、震度 5 以上の揺れを受けたものは、合計 462 箇所（非木造 301 棟、木造 154 棟、インフラ施設 7 箇所）あった。電話、ファクシミリ、訪問等で調査した結果、問題は一件も報告されていない。倒壊しないことはもとより、「揺れも少ない。被害も少ない。」との反響を多数受けている⁸⁾。この内、構造耐震指標 (I_s 値) 等の現行基準の評価法によらず、倒壊危険度 (I_f 値) で補強設計した建物は、104 棟に入る。

同工法を用いることで、従来工法では、コスト面、施設の使用上の問題等で補強ができなかった施設に対しても、低コストで耐震補強を実現した事例が多く報告されている。コストが削減された理由としては、以下の点が挙げられる。

① 使用材料が軽量であり、設置工事が単純である。

- ② 鉄筋コンクリート製の壁、鉄骨製のブレース等、新たな構造部材を持ち込まない。
- ③ 目標性能を絞り、これに即した対策工をピンポイントで設置している。
- ④ 部分的な施工、段階的な施工を行うことで施設の稼働を妨げない。

熊本地震発生当時、熊本県内に 7 件の SRF 工法の施工実績があった。すべてに関して訪問調査したが補修が必要な被害はなく、使用継続されていた。一方で、同じ敷地内で新耐震建物、あるいは、他工法で耐震補強した建物が被災し、立ち入り禁止になっているものが確認されている^{9)、10)}。

SRF 工法で、倒壊危険度 (I_f 値) を設計指標として耐震補強をおこなった旧基準の 104 棟の建物で、2011 年東北地方太平洋沖地震による現行基準の想定を一桁上回る大きさと継続時間の地震動を受けても、倒壊せず、かつ、使用継続と無被害化という目的が達成されている。以上は、前章に示した新しい方法の実証例であると言える。

文献

- 1) 五十嵐 俊一：SRF 工法設計施工指針と解説 2015 年改訂版、構造品質保証研究所、2015 年 10 月
- 2) 壁谷澤 寿海、金 裕錫、五十嵐 俊一、加藤 敦、小川 信行：鉄筋コンクリート偏心ピロティ壁フレーム構造の震動破壊実験、第 11 回日本地震工学シンポジウム、2002 年
- 3) 荻野 亮、壁谷澤 寿海、五十嵐 俊一：ポリエステル製繊維シートによる補強鉄筋コンクリート柱のせん断強度に対する接着剤強度の効果、コンクリート工学論文集、pp1057~1062、vol38, No.2、2016
- 4) 大杉 泰子、壁谷澤 寿海、田才 晃、田村 玲、蔦壁 潤一郎、丹羽 貴子、鎌野 賢吾、ウサレム ハッサン、五十嵐 俊一：ポリエステル製繊維シートによる RC 造柱の耐震補強に関する実験的研究 (その 1~その 5)、建築学会大会梗概、pp805~814、2002. 8
- 5) 前田 匡樹、佐藤 晃章、利根川 純平、堀 則男、五十嵐 俊一、五十田 博、白鳥 行則、四釜 健治、田邊 美由紀：ポリエステル繊維織物を用いた既存木造建物の耐震補強工法の開発 (その 1~その 5)、建築学会大会梗概、2005. 8
- 6) 森 恭平、藁科 誠、王 激揚、帖 佐和人、坂下 雅信、河野 進、田中仁史、渡邊 史夫：偏在開口を有する RC 造連層耐震壁のせん断性状に関する研究 (その 1~その 5)、日本建築学会学術講演概要集、2007 年、2008 年
- 7) 国住指第 1814 号、平成 20 年 8 月 7 日
- 8) 五十嵐 俊一：SRF 工法による耐震被覆の損傷抑制効果 その 1 3.11 の震度 5 以上の地域における補強建物の調査結果、2012 年 日本建築学会大会 (東海) 講演概要集、C-2 分冊、p803
- 9) 五十嵐 俊一：平成 28 年 (2016 年) 熊本地震被害調査報告、構造品質保証研究所、2016 年 5 月 20 日
- 10) 壁谷澤 寿海、壁谷澤 寿一、五十嵐 俊一：平成 28 年 (2016 年) 熊本地震被害調査速報、2016 年 4 月 29 日

8. 結論

近年観測された地震動は、新耐震基準及び耐震診断基準の想定地震動を大きさ、継続時間ともに1桁上回っている。一方、中低層RC系建物は旧基準でもピロティを除けば、倒壊率は数パーセント以下である。現行基準の保有水平耐力、耐震診断の構造耐震指標ともに人命に危害を及ぼすような倒壊等の被害の危険性を判定する精度は理論的にも統計的にも低い。また、これらを割り増しても、構造、高さによっては新築、耐震補強ともに使用継続性確保は望めないことは近年の被害事例から明らかである。

現行基準の2次設計の想定地震動を観測地震動に近いものにし、保有水平耐力等の計算に代えて地震応答解析により、人命に危害を及ぼすような個々の事象の危険度、及び個々の部材の損傷度等を計算するように改めることで、構造専門家だけでなく、各分野の設計者、施工者、そして、所有者・使用者が個々の部材・仕上げ・設備等の危険度と目標性能について具体的に協議し、合理的な対策を講ずる道を拓くことができる。さらに、既存の部材、留め具等（既存材）が亀裂等を生じた以降に、破壊を防止し耐力を保持させる補強材（高延性材）を既存材の外側に、変形と強度に対して大きな安全率をもつように配置する受動的耐震補強構造を用いることで、想定を超える地震動にも対処することができる。以上を制度化できれば、構造躯体の中に埋め込まれている鉄筋、コンクリートの内の耐震部分を高延性材に置き換え、設計・建設・維持管理コストを削減し、想定被害を大幅に軽減できる。

9. 謝辞

東京大学地震研究所 伯野 元彦先生には、観測地震動を用いた非線形系の応答解析に関する研究、1994年米国ノースリッジ地震を始めとする国内外の多くの震災調査において、永年に渡り多大なご指導を賜りました。また、壁谷澤 寿海先生には、SRF工法に関する各種の実験的研究、1999年トルコ国コジャエリ地震被害調査、2016年熊本地震被害調査等を通じ、多くのご指導とご示唆を賜りました。ここに、深く感謝いたします。

安井建築設計事務所 辻 英一氏には、建築設計実務、建築構造分野の設計・施工に関わる諸課題について、貴重なご意見とご示唆を賜りました。誠にありがとうございます。

本論は、上記の調査・研究と、これまでSRF工法で施工した2700箇所以上の建物・施設において、東日本大震災、熊本地震等の各種の地震に遭遇しても被害がなく、使用継続していたことが確認されたことから生まれたものです。SRF工法設計施工指針を用いて丹念に設計、施工していただいたSRF研究会会員の皆様、同工法品質管理マニュアルに従って現場での作業と品質管理を担当していただいた方々に深く感謝いたします。また、本論の内容は、東日本大震災以降、全国各地で開催させていただいた「新時代の耐震セミナー」でお話したことを基本にしています。ご参加いただき、ご意見、ご質問を頂いた皆様に深く御礼申し上げます。