

平成 28 年 5 月 20 日

耐震の原点

＜使用継続性の確保は計算に頼るのでなく材料と構造で＞

構造品質保証研究所

代表取締役 五十嵐 俊一

東日本大震災、熊本地震で、新耐震でも耐震補強済みでも使用継続できない事例が相次いでいる。周期 3 秒以上で超高層ビルも倒壊させる恐れのある地震動が観測された。現行の耐震診断・補強を根本的に見直し、新旧基準に拘わらず、倒壊防止、使用継続性の確保等の目標性能の設定、これに即した設計法・補強工法の選択と実施を施設の所有者・使用者と地域の行政当局の裁量に委ねることが有効な地震対策を生む。

M9 クラスの長時間の揺れ、また、震度 7 が繰り返すような大地震に対しては複雑な計算を用いる新耐震基準の方法に替えて、高延性材で耐震被覆することが有効である。鉄筋コンクリート系構造物に関して、東日本大震災で震度 6 以上の地域の 60 件、そして熊本地震の震度 6 以上の地域の 7 件で、旧基準建物に耐震被覆を施工した施設（SRF 工法による耐震補強事例）は全て使用継続していることが確認されている。主要な柱を耐震被覆することは、倒壊を直接防止する上に、建物全体の振動と損傷を抑える効果があることが震度 6 以上を 7 回掛ける大型震動台実験と上記の実施例調査から導かれている。

1. 活動期と静穏期

2011 年 3 月 11 日に発生したマグニチュード (M) 9 の東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波、およびその後の余震は、発生場所、規模ともに、当時の想定、予測を遥かに超えて、東日本の太平洋沿岸地域を破壊した。さらに、専門家を驚愕させる規模の地盤の液状化で、家屋、インフラに甚大な被害を及ぼした。巨大な津波と地震動は、福島第一原子力発電所の電源設備を無力化し、周辺の鉄塔をなぎ倒して送電網を破壊し、全電源喪失による大事故を引き起こした。この地震は、千年以上前の 869 年貞観地震に匹敵し、日本列島は活動期に入ったという報道、論説が多く発表された¹⁾。

貞観地震前後の約 40 年間には日本各地で大地震・火山噴火が起こっている。850 年出羽（山形）地震、863 年越中、越後地震、864～866 年富士山噴火、青木ヶ原誕生、864 年阿蘇山噴火、869 年貞観地震、871 年鳥海山噴火、878 年関東地震 相模、武蔵で大被害、平安京でも揺れ、881 年平安京地震、887 年西日本地震（南海・東南海連動地震）大阪津波、888 年八ヶ岳噴火までの状況は、1995 年の阪神大震災から 2016 年の熊本地震までの地震・火山活動と重なる部分がある。

一般には地震活動には活動期・静穏期はないと言われているが、我が国の地震の歴史を

見ると、巨大地震の前後には地震活動が活発な時期があり、その後しばらくは静穏な時期が来ることは認められる。直近では、幕末から大正時代、1923年の関東大震災までの70年間は活動期であり、1853年小田原(M6.7)、1854年伊賀・伊勢(M7.4)、安政東海(M8.4)、安政南海(M8.4)、伊予西部(M7.4)、1855年飛騨(M6.8)、宮城県沖(M7.3)、遠州灘(M7.3)、安政江戸(M7.0)、1856年青森県東方沖(M7.5)、江戸・立川(M6.3)、1857年芸予(M7.3)、1858年飛越(M7.0)、青森県東方沖(M7.3)、1872年浜田(島根)(M7.1)、1891(明治24)年濃尾地震(M8.0)、そして、幾つかの地震を経て、1923年の関東大震災が起こっている。

その後、1968年の十勝沖地震までの45年間は静穏期であった。現行の建築物・インフラ施設の材料、設計・施工法が形作られ制度化されたのが、この静穏期である。

2. 新耐震でも耐震補強済みでも使用禁止・取り壊し

2011年の東日本大震災では、東北大学、栃木県の市貝中学校など、鉄骨ブレースや壁を入れた補強済み建物で、使用できなくなり結局取り壊した事例が、専門雑誌と地方新聞には報道されている^{2,3)}。また、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。また、大手病院の関係者は、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(S造))は、設備機器の損壊で使用できなかったと述べている。

東北大学の人間環境系研究棟他の3校舎では、大きな揺れで、壁に向こうが見えるほどの亀裂が走り、内部の設備機器が転倒損壊し、ガス漏れを起し、エレベータが落下して、即刻立ち入り禁止となった⁴⁾。この被害を受けて、東北大学では、RC系建物は6階建てまでに制限するという⁵⁾。栃木県市貝町立市貝中学校(RC3階建て)は、平成22年までに鉄骨ブレースによる耐震改修を完了していたが、大きく被災した。建築学会の速報⁶⁾には、(補強の無い)3階においてRC短柱が、せん断破壊し、梁間方向においてもせん断破壊した柱が見られ、1階の耐震補強した構面でも柱のせん断破壊を生じている旨が記載されている。

下野新聞³⁾によれば、『3年生の教室がある3階は天井から蛍光灯が垂れ下がり天井パネルの一部が落下。トイレの天井も落ちた。1階トイレの女子入り口がゆがんでドアが開かず、男子入り口前の壁には幅10センチほどの亀裂もできて外がのぞける状態。1階理科室や別棟の音楽棟では、蛍光灯や天井パネルが落下、教科書や文房具が机の上にそのままに残され、避難の慌ただしさを物語った。「校内放送が使えない中でけが人も出さなかったのは教員の的確な指示と生徒の冷静な行動が生きた」と石川一夫校長。余震が続く中、35人の教職員総出で生徒の文具や荷物、文書、書籍類を安全な保管場所に避難させていた。』とのことである。

町は、『町で唯一の中学校普通教室棟の柱が各所でせん断破壊されて、きわめて危険な状

態となっています。文部科学省の指導では、鉄筋の取り替えとコンクリートの再打設によって復旧が可能とのことではありますが、家庭にとりかけがえのない小さな命を預かる町にとっては、安全な学習環境を確保することは、町の最低限の義務と考えます。折しも、市貝町を被害想定区域に含む関東大震災が高い確率で発生すると予想される中で、可能性が低い出来事であろうと起こり得ることがあるという立場を堅持し、技術的には最高水準の対応を施す方針です。したがって文部科学省の指導書に従うことなく、新しく建て替える考えであります。』との表明⁷⁾を行っている。この中学は、平成 25 年末まで移転して被災した校舎を取り壊し、3 階建ては止め、2 階建ての校舎を新設して平成 26 年から元の場所で授業が再開されている。

平成 28 年（2016 年）4 月 14 日から続いている熊本地震では、新耐震でも、耐震診断結果が OK であっても、耐震補強済みでも、柱・壁にせん断亀裂が入り、内部の設備、機器が落下、転倒して使用停止になった建物が数多く確認されている。

熊本大学では、原田学長が同年 4 月 21 日に学生に向けて声明を発し、多くの校舎で大きな被害が発生していると述べている⁸⁾。同大学の発生医学研究所（発生研）西中村教授は 5 月 2 日にメッセージをホームページに掲載している。また、同日夜の日本テレビ NEWS ZERO では京都大学の山中教授が東京で、「熊大の研究者が研究面でも非常に大きな被害を受けて科学の面でも取り返しのつかないことが起ころうとしている」と述べた模様が放映された。続いて、建物内部の映像と西中村教授のインタビューが詳しく報道されている。これらによれば、発生研では、iPS 細胞での臓器の出来方等のマウスを使った研究を行っているが、柱や壁にせん断亀裂が入り、窓枠がゆがみ、漏水が発生している。さらに、内部では高価な機材が折り重なって倒れている状況である。マウスは教授らの懸命の努力で危機を脱したが、機器の被害は数億円に上り、復旧には半年から 1 年を要するとのことである。同教授は、9 階建ての建物の高層階（5 階から上）は今後どう使っていくか分からないと述べている。また、上記のようなことは、発生研の立地する地区だけではなく、すべての建物、学部・部局で起きているとのことである⁹⁾。

上記の熊本大学発生医学研究所の内部の被災状況は、東日本大震災における東北大学人間環境系研究棟と酷似している。発生研は、2005 年竣工の新耐震、また、人間環境系研究棟は、1969 年竣工の旧耐震で 2001 年に耐震補強済みである。両者とも鉄骨鉄筋コンクリート造（SRC 造）9 階建である。

3. 現行法の限界

第 2 章の被災事例は、東日本大震災のような M9 クラスの大地震や、熊本地震のように、震度 6 以上が何度も襲うような大地震の群発による地震動に対しては、現行基準（新耐震、耐震改修設計指針）で設計・施工しても、せん断亀裂の発生とせん断破壊が避けられないこと、また、S 造はもとより、RC 造・SRC 造でも、大きな揺れで内部の什器備品、精密機器等が損壊する危険性が高いことを改めて明らかにしている。

現行の耐震設計法は、「大地震」に対する備えを、材料や基本的な構造は変えずに、計算法や想定の変更で賄おうとする方法である。これは、1940年～1960年代の地震の静穏期に米国で観測された地震動を用いた研究によって形作られ、我が国の新耐震基準を始めとする各国の耐震基準の骨格になっている。1960年代以降、コンピュータを駆使した複雑な「耐震計算」によって、長大、巨大な構造物、高層ビル、原子力施設などが、環太平洋地震帯地域や欧亜地震帯地域に続々と設計され建設された。また、1995年の阪神大震災を契機に制定された耐震改修促進法によって1981年以前の「旧基準」建物を現行基準なみの強度に引き上げるべく、鉄骨ブレース等を用いた耐震補強が多数の建物で実施されている。

熊本市は、平成28年熊本地震発生時点で、小中学校の耐震化率（耐震診断の結果OKであるか、耐震補強してOKになった校舎の割合）が100%であった。しかし、ほとんどの校舎で何等かの被害が発生しており、多数が使用禁止になっている。熊本大学を始めとする大学校舎も前項に述べた通り同様の被害状況である。

2015年1月18日のNHKスペシャル¹⁰⁾で大阪の上町断層帯による直下型地震では、周期3秒以上のキラーパルスが発生し、国の基準通りに作られた高さ100mの高層ビルが倒壊し、周囲の建物まで巻き添えにする危険性があると報道された。2016年5月14日のNHKスペシャル¹¹⁾では、上記の地震動が熊本地震の震源に近い熊本県阿蘇郡西原村で実際に観測され、この地震動でシミュレーションすると超高層ビルに特にダメージを与え、低層階に大きな負荷がかかり倒壊する恐れがあると京都大学林康裕教授が指摘していると報じられている。同教授は、「3秒のパルスが実際に観測されたという事実は全国の都市部に大きなインパクトがある。大都市部でも熊本地震の経験を生かして防災対策を進める必要がある」とコメントしている。また、同日のNHKニュースでは、次のように報道されている。「工学院大学の久田嘉章教授の東京・新宿区にある高さ140メートル余りの29階建ての大学のビルが、この長周期の揺れ（上記地震動）によってどのような影響を受けるか、実際の波形を使ってコンピュータ上でシミュレーションを行いました。その結果、長周期地震動によって建物全体が大きく揺れ、最上階の揺れ幅は最大で3メートル50センチ前後に達しました。建物を支える梁や筋交いの多くが地震の揺れによって激しく損傷し、揺れが収まっても変形が残り、建物が傾いたままになるという結果となりました。久田教授によりますと、今回の長周期の揺れの大きさは設計で想定する基準の3倍程度に達していて、最悪の場合、超高層の建物の倒壊につながるおそれもあるということです。」さらに、K-NET一の宮でも、周期3秒付近で速度応答スペクトルが非常に大きな振幅（対数軸で判読すると250kine程度）になっていると報告されている¹²⁾。

1923年の関東大震災での米国式设计による構造物の崩壊を目の当たりにして、日本独自の設計技術が評価され、建物の高さを全国で100尺（後に31m）以下に制限した。また、濃尾地震、サンフランシスコ地震などの経験から、地震に対しても材料強度に大きな安全率をもって設計するなどの配慮をしていた。地震活動が静穏になり、太平洋戦争を経て、1960年代に高度経済成長を遂げる中で、基準が緩和され、コンクリート造の構造物が大量生産

されていく。その中で生まれ育ったのが新耐震基準を始めとする現行の耐震基準であり、免震、制震、そして、旧基準建物に対する壁の新增設や鉄骨ブレース、柱の鉄板巻き、あるいは炭素繊維、エポキシ樹脂等の高強度材料を用いた耐震補強技術である。これらの耐震設計法、補強工法の有効性を検証したとされるコンピュータシミュレーションや、室内外での実験は、あくまで、当時、想定した条件下で行われているし、規模や受容できる危険性にも限界があった。現代から見ると、誠に小規模なものに過ぎない。新耐震建物や耐震補強済み建物でも、6階以上の処に高価な機材や人を置くことが重大な損害を招くことは、東北大学と熊本大学の被災事例が多大な犠牲の上に明らかにしている。

現代構造物の大半は、鉄筋コンクリート（Reinforced Concrete: RC）を主要構造材料として造られている。これは19世紀に発明され、その基本構造が1920年代に確立したものである。RCは、地震により繰り返し変形すると、かぶり部分に亀裂を生じ、剛性と強度が低下し、遂には、かぶりが崩落し、鉄筋は付着力を喪失、座屈し、鉛直支持力を喪失して構造物を倒壊に至らせる。かぶりは、震動を受けなくとも経年劣化し、中性化するので、鉄筋に対する保護機能を喪失し、鉄筋が腐食して軸力支持能力を失う。現代の鉄筋コンクリートは、耐震的にも耐久的にも大きな構造的弱点を抱えた複合材料であると言わざるを得ない。これが無防備のまま放置されているのが現代都市である。

鉄筋コンクリートの設計・施工法が開発され、制度化されたのが、1930年代であり、丁度、地震の静穏期であった為、上記の弱点は、1968年の十勝沖地震でRC造の学校校舎が崩壊するまでは隠れたままであった。この被害を契機として開始された日米を中心とする研究の結果、「想定する大地震に対して、計算上破壊しないように鉄筋・コンクリートの配置と量を決めるという」現行法（新耐震）が1970年代に作られた。しかし、これは、当時、首都高速道路、原子力発電所、超高層ビルなどが既に完成していたこともあり、基本的な見直しではなく、量的な変更にとまっている。現行法には次のような問題点がある。

- ① 構造物に作用する想定地震力の作用パターンと大きさを決めなければ構造物の変形が許容値以内に収まり、コンクリートが破壊しないかどうかを計算できない。現行法では、告示や、マニュアルで定められているが、実際の大地震が、告示やマニュアルを守る保証はない。特に、継続時間（繰り返し回数）、作用方向（上下動）の影響の現実的な評価は困難である。今後は、2013年に相次いで公表された新想定地震動、及び熊本地震で観測された地震動に対する安全性の評価が問題になる。入力地震の大きさやパターンが想定を外れれば、計算上、構造物が崩壊することになる。
- ② 現行法では、保有水平耐力、構造耐震指標等（ I_s 値）の数値で安全性の判定が行われる。これを求める計算は、分岐を含む非線形問題である、モデル化や数値計算方法の詳細が計算に大きく影響するので、判定に客観性を欠くことを避けられない。計算は、専用計算プログラム（ソフト）を用いて行われるが、長年、改訂を繰り返し巨大化しており、メンテナンスにも多大な労力を要する。バグを修正すると計算結果が大きくなる

変わることも往々にしてある。

- ③ 新耐震で導入された保有水平耐力、 I_s 値等の大地震時の設計指標は、構造物全体、あるいは、フロア（各方向）毎に、強度等を集計して算出されるので、フロア内の個々の場所の変形の大きさや損傷の程度は不明確である。特に、ブレース等による補強は、一部のスパンや部材に限られるので、残りの部分が破壊する危険性が残る。
- ④ 耐震性評価の基本になっている終局耐力、保有水平耐力などは、構造材料が降伏した後に発揮するものであるため、この時点では、構造物が損傷して使用性が損なわれている危険性が高い。非構造部材の損傷や破壊については、直接は検討せず、仕上げや設備の安全性、使用性に関する検討は、極めて単純な方法でしか行われていないので、大地震時の内部の人の安全性や施設の使用性については、十分には確認できない。
- ⑤ 保有水平耐力、 I_s 値を計算する上で重要な役割を占める構造特性係数 D_s 値、及び靱性指標 F 値の導出根拠となっている Newmark のエネルギー一定則は、等価弾性応答 $C_E=E_0$ が增大すると、これに比例して、弾性限界変位 δ_E も増大するモデルに基づいて導かれている。しかしながら、鋼材など現実の材料で造られた構造物の弾性限界変位（降伏変位）は、強度によらずほぼ一定値である。即ち、強度の増減は、剛性の増減になる。したがって、エネルギー一定則を背景とした現行法の強度型耐震改修設計は強度を過大評価している（強度不足である）懸念がある。中低層の建物のような応答スペクトルの加速度一定領域に属する短周期の構造物では、剛性の変化が地震力の変化を生まず、上記の違いは問題になりにくい。しかし、東日本大震災で、仙台市若林区卸町で観測された地震動の応答スペクトルは、中低層の建物の周期帯でも変位一定領域の形状をしており、剛性増加が地震力の増加を生むことになり、上記の懸念があてはまる。
- ⑥ 震災後の使用性判定には、用途係数、重要度係数等で、必要保有水平耐力 (Q_m) や構造耐震判定指標 (I_{s0}) を割増す方法がマニュアル等で慣行となっている。しかし、上記耐力等を割増すということは、割増した想定地震（地震荷重、地震動）で倒壊しないことを計算で確かめることにはなるが、割増す前の想定地震で、使用性が確保されるかどうかについて計算したことにはならない。現行基準の枠組みで、大地震時の使用性確保を保証するならば、「損害を軽微に収める（弾性範囲で応答すること）」が目標性能である一次設計の震度を割増すべきである。しかし、現行の一次設計の地震荷重は、応答で 0.2、地盤で 0.08 程度の震度に相当するに過ぎず、これを仮に大地震時（応答で 1.0）まで割増すと現実的でない程重厚な構造になってしまう。
- ⑦ コンクリートが経年劣化し、中性化すれば、当然、耐震性は落ちる。これを、耐震計算に明確に反映する方法がない。
- ⑧ 現行法は、構造物の供用期間に 1 度来るか来ないかという大地震に対して、鉄・コンクリート等の構造材料を用いて耐えようとするので、大部分の構造材料は大地震まで備蓄されることになる。これは、勿体ないだけでなく、建設後、長期間を経て、大地

震が起こった時点で、材料が劣化等で機能しない危険性をはらむ。

4. 問題は基準の新旧を超えている

建築学会は、1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）の神戸市灘区、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3894棟の被災状況をまとめている¹³。まず、建物をピロティ建物とそれ以外（一般建物）に大別し、それぞれについて、建築年代を1982年以降（新耐震）、1972年～1981年まで（旧基準第2世代）、そして、1971年以前（旧基準第1世代）の3つに区分、被害程度を崩壊（倒壊）から軽微までの5つに区分してそれぞれについて比率を計算している。これによれば、一般建物の倒壊の比率は、新耐震では、1%であり、旧基準の第2世代5%、第1世代2%に比べ大きく減少している。しかし、軽微な被害の比率に注目すれば、新耐震で22%、旧耐震でも、約25%とそれほど変わっていない。新耐震は、倒壊防止には効果があるが、軽微な被害は避けられないということが読み取れる。また、無被害の比率も同様で、新耐震の66%に比べれば少ないが、旧基準でも、約半数が無被害である。

上記の調査を始めとする1995年阪神大震災の被害率調査に基づいて、新耐震基準の妥当性が検証されたとされ、同年末に施行された耐震改修促進法により、旧基準の建物の耐震診断と耐震改修が促進され、その後、度々の改正により強化されている。しかし、旧基準建物だけを取り出して診断し新耐震並みの強度を持つように改修することは、ピロティを除けば、何もしなくても、倒壊しない95%以上の旧基準の建物に倒壊防止を目的にした補強を強いることである。さらに、補強しても、2割程度が軽微な被害や小破・中破を生ずることは避けられないということである。さらにはっきりした結果が、東日本大震災で東北・関東46,365棟のマンションの被害調査から得られている。高層住宅管理業協会は、「旧・旧耐震規準、旧耐震規準、新耐震基準による建物の被害状況に阪神・淡路大震災のような経年数や耐震基準別の被災傾向はみられない」とはっきり述べている¹⁴。

構造耐震指標（ I_s 値）は耐震診断で計算されるが、この数値が0.3以下である建物とは、耐震強度が、現行基準の50%未満であり、震度5強から被害がでて、震度6では倒壊するので、取り壊しか、大掛かりな耐震補強が必要とされる建物である。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）。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棟であったが、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75棟の内、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¹⁵⁾。

建築学会東北支部の調査報告書には、また、次のように記載されている¹⁶⁾。「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。」

現行の耐震改修促進法及びこれに基づく耐震診断・改修設計への補助金制度、報告義務等は、巨額な負担を行政と民間の建物所有者に強いているが、その根本にある新耐震基準と一連の技術は、50 年近く前の静穏期に作られたものであり、目的、方法ともに現代社会のニーズにも活動期の地震動にも合っていないと言うのが現場の実感である。

5. 耐震の原点

1853 年の小田原地震から、安政江戸地震、明治 24 年（1891 年）濃尾地震、明治 27 年（1894 年）東京地震、及びその前後に頻発した北海道、岩手、酒田、熊本等の地震、そして、1906 年サンフランシスコ地震、さらに 1923 年の関東大震災に至る 19 世紀末から 20 世紀初頭は、今の一つ前の活動期であった。これらの地震被害の詳細な調査に基づいてこの時代に形成された耐震の基本的な考え方が、家屋耐震構造論¹⁷⁾に示されている。即ち、「地震により建物の個々の部分に掛かる力を定量的に明らかにし、これに対して、材料の強度が十分な安全率を持つような材料と構造を考究する」というものである。上記各地震による各種構造物損壊の詳細な調査分析の中で見出された耐震の原点である。

関東大震災から十勝沖地震までの地震の静穏期と米国でのコンピュータの開発と進歩に押されて、現行の新耐震、即ち、「大地震の地震動を仮定し、構造全体あるいは各層を対象とした計算上の耐震強度が基準を上回ることで済みます。材料が塑性化することは肯定する。」という形に変貌してしまった。また、先の活動期に生まれ、関東大震災の教訓から全国に展開された建物の高さ制限（100 尺制限）も、計算で OK であればよいとして撤廃され、現在に至っている。

前章までに述べたように、新耐震、耐震補強済みの多くの建物で被害が生じていること、東北大学で RC 系は 6 階建て以下にする措置が取られていること、熊本大学の発生医学研

究所で5階以上の階をどう使うか分からない状況であること、さらに超高層を倒壊させる恐れのある（現行基準の3倍以上の大きな応答を示す）長周期地震動が実際に観測されたことは、耐震を上記の原点に戻って考え直す必要があることを示している。

SRF工法は、1999年8月のトルコの震災で、応急被災度判定で安全とした建物が11月の地震で倒壊し、多数の死傷者を出した失敗から生まれた¹⁸⁾。ポリエステル繊維織物のような、しなやかで切れない材料（高延性材）でコンクリートを被覆することで、損傷を制御し、従来の想定を数倍から10倍上回る変形や繰り返し回数の力を加えても、破壊しない強靱さを持った柱、梁、壁、スラブをつくる方法である。木造の接合部、釘打ち部にも優れた繰り返し変形性能を付与する。これらの効果は、理論的に導かれる他、東京大学、東北大学、京都大学、職業能力開発総合大学校、及び科学技術庁との多数の協同実験で確かめられている。大型震動台で、震度6～震度7の揺れを7回連続して加える実験も行われ、対損傷性を確認している^{19),20)}。

鉄筋、連続繊維等の材料は自身が圧縮剛性、せん断剛性を持つので大地震で繰り返し変形を受けると、コンクリートに発生する圧縮力と干渉してコンクリートを破壊するか自らが塑性化・破壊・剥離を生じてしまう。一方、SRF工法の高延性材は、せん断剛性、圧縮剛性がほとんど無いのでコンクリートの圧縮力伝達機構を阻害せずに引張力を伝達する。この違いが、SRF工法で耐震被覆することで、鉄筋で補強した「鉄筋コンクリート」に比べ、事実上破壊しないと言える程桁違いの繰り返し変形能力を生む。木造の接合部、釘打ち部に関しても同様である。

SRF工法による耐震は、「鉄筋コンクリート（RC）は、経年劣化や、地震を受けるとかぶり部分から亀裂を生じ、崩落して破壊する」という構造的弱点に対して、直接対処する方法である。

我が国のRC系構造物は、旧基準でも自重に対しては、3倍程度の余裕を持って形状を保持できるように柱梁が配置され、寸法・強度が決定されている。また、大きく引っ張られるように変形しても、梁柱はバラバラにならぬように軸方向の鉄筋・鉄骨が十分定着されている。従って、新旧耐震に関わらず、耐震被覆してあり、個々の部材の損傷が小さく、曲げ圧縮、あるいはせん断圧縮破壊しなければ、大地震に遭遇して大きく振動した場合でも構造全体としても倒壊しないと言える。さらに、損傷が少ないので振動を抑え、仕上げや内部の設備に対する被害を最小に抑えることができる。即ち、現行の構造設計法の内、新耐震基準で導入された複雑な計算に頼る部分を除いて、SRFを組み合わせることで旧耐震+SRFで、材料強度に対して十分な安全率をもった構造を造り、大地震で倒壊せず、損傷も少なくすることが可能である。

旧基準建物をSRF工法で耐震補強したということは、上記の旧基準+SRFの設計・施工例であると解釈できる。東日本大震災当時、震度5以上の地域には、400以上のSRF工法による耐震補強事例があり、その内60件は震度6以上であった。調査の結果、何れも倒壊しないことは勿論、揺れも少なく仕上げの補修等も必要なく使用継続できている²¹⁾。平成

28年熊本地震では、震度6以上の地域に7件の実施例があった。同年4月25日と5月12日の調査の結果、全ての施設で被害無く、使用継続していることが確認された。一方、熊本市内の大学では、同じキャンパス内の新耐震、鉄骨ブレース等で耐震補強済みの建物には大きな損傷があり、使用停止になっている施設も確認されている^{22),23)}。

将来は、全てのコンクリート系部材に、所要の厚さの耐震、劣化等に対する被覆（機能的被覆）を施すことが理想である。これを義務付けることで、コンクリート構造物の耐震性、耐久性を飛躍的に向上させるとともに、大地震の備えとして備蓄されている鉄とコンクリートの量を減らし、ひいては、地震国でも地震の無い国々とほぼ同じ量の構造材料で建物やインフラ施設を建設し維持することが可能になる。また、大地震への備えを外側（被覆）にすることで、点検可能、かつ、施設への要求性能の変化、地震環境予測の変化、被覆自体の損傷や劣化に応じて、取り替えや追加補強措置が容易になる利点がある²⁴⁾。

耐震被覆（SRF工法）を既存施設の改修に用いる場合には、既存の仕上げを仮に外して復旧する工事を要するので、補強箇所は少ない方が実用的であり、現在までの改修事例では大半が、下階壁抜け柱、ピロティ柱、短柱などに限って用いられたものである。それでも、周辺のSRF工法を使わずに耐震補強した建物、新耐震建物に比べて、揺れが少なく、被害がほとんどないことがほぼ全ての事例調査で確認されている。下階壁抜け等の柱は、構造の要となる柱であり、これらをSRF工法で補強することで振動を抑える効果があると考えられる。偏心ピロティ建物模型を用いた大型震動台実験結果からも震度5程度の小さい震動から無被覆の建物模型に比べ、ピロティ部分をSRF工法で補強した建物模型は振動が小さくなっていることが確認されている²⁵⁾。

6. 結論

第4章で詳述した通り、旧基準で耐震補強していなくとも、倒壊する確率は小さい。新耐震で建直しても、あるいは、高額な費用と長期間を掛けて鉄骨ブレース等で耐震補強しても軽微な被害を生ずる確率は、ほぼ変わらない。東日本大震災、熊本地震で新旧基準に関わらず、2割～3割のマンション、学校、病院等が使用継続できなくなっているのが現状である。

現在、大都市では超高層ビルを中心とした再開発計画が目白押しである。10階建て前後を中心とした既存の街並みのあちこちに忽然と超高層が出現し、周辺からテナントと来訪者を吸い取っている。旧基準で耐震診断結果が悪いということが、建物の取り壊しと、再開発を後押ししている。これまでは、超高層ビルは大地震でも安全であると信じられていた。しかし、東日本大震災等、最近の地震ではエレベータが止まり、天井・設備が崩落し、屋上の施設・機器が損傷して長期間使用停止になる事例も生じている。さらに、熊本地震の震源に近いサイトで現行基準の3倍以上のパワーを持つ長周期地震動（キラールズ）が実際に観測されたことにより、直下型地震で、超高層が倒壊する危険性も論じられている。

以上の事実は、耐震診断の結果が良くないといって取り壊して新耐震で建直したり、超高層ビルを中心とした都市再開発を行っても、今後想定されている相次ぐ大地震で、施設の所有者、使用者、来訪者が、生命・財産を失う危険性を減ずるどころか、却って増大させる可能性すらあることを示唆している。

震災後の復旧・復興は、地元の行政担当者と施設の所有者、使用者の努力によって行われる。震災前に、個々の施設の地震後の役割に応じて倒壊防止、損傷制御等の目標性能を定め、地域の行政当局と施設の所有者・使用者が協力し、SRF工法を始めとする各種の方法の中から最善と考えるものを選択して実施しておくことが先決である。前回の活動期に見出された耐震の原点に立ち、複雑な計算に頼ることを止め、目的と制約に即した材料と構造を選択することこそが、今回の活動期を乗り切る道である。

文献

- 1) 貞観地震 国家崩壊の序章、読売新聞、2011年5月18日 朝刊
- 2) 耐震改修済みSRC造が大破 東北大・建築研究棟の被災で見た新たなリスク、日経アーキテクチュア、2011年5月11日号、pp14～18
- 3) 下野新聞 3月15日朝刊
- 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) 日経アーキテクチュア 10月25日号、pp.34～35、日経BP社
- 6) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、p338、2011年7月
- 7) 市貝町ホームページ、9月1日更新版
- 8) 熊本大学学長声明、2016年4月21日、熊本大学ホームページ
- 9) 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
- 10) NHK：都市直下地震20年目の警告、NHKスペシャル シリーズ 阪神・淡路大震災20年、2015年1月18日
- 11) NHK：NHKスペシャル、最新報告、“連鎖大地震”終わらない危機、2016年5月14日
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 高層住宅管理業協会：東日本大震災の被災状況について(続報)、平成23年9月21日、同協会ホームページ
- 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、pp74～78、2013年5月
- 16) 15)と同じ p89、
- 17) 佐野 利器：家屋耐震構造論、震災予防調査会報告第83号、1916
- 18) 五十嵐 俊一：包帯補強、pp3～4、構造品質保証研究所、2009年4月

- 19) 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
- 20) SRF 工法設計施工指針と解説 2015 年改訂版、pp101～108、pp124～128、構造品質保証研究所、2015 年 10 月
- 21) 五十嵐 俊一：耐震被覆による地震防災、pp139～147、構造品質保証研究所、2012 年 3 月
- 22) 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
- 23) 壁谷澤 寿海：平成 28 年（2016 年）熊本地震被害調査速報、2016 年 4 月 29 日
- 24) 五十嵐 俊一：地震を超える材料、高分子、65 巻、2016 年 7 月号
- 25) 21) と同じ、pp118～126