

## 耐震被覆 ＜活動期の耐震化法＞

構造品質保証研究所  
五十嵐 俊一

### 1. 対策を超える新想定

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、当時の想定をはるかに超えた規模の津波を発生させ、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。

東日本大震災が千年以上前の869年貞観地震に匹敵するというので、過去を千年以上遡って、巨大地震の痕跡を探したり、震源域が幾つも即座に連動することを想定し、従来の想定を数倍上回る「新想定」が作られ、相次いで公表されている。例えば、南海トラフ地震の新想定では、東海から九州にかけての太平洋沿岸から南海トラフにかけての広大な地域が一気に動いて、マグニチュード9.1の地震が発生し、同地域及び周辺を震度6強から震度7の強烈な地震動が襲い、一時間以内に高さ30m以上の大津波が来るとされる。

巨大な津波が来ると言っても、親戚や隣人の家が潰れたら、救助せずに逃げる訳には行かない。道路が塞がれ、火災が発生すれば、逃げようがない。従来の想定でさえ、十分な対策ができていないのに、これを数倍上回る新想定に対策ができるかどうか。

建設後、50年近く経過し、既に崩落を始めている老朽化したコンクリートで埋め尽くされた日本の大都市、原子力発電所や、大量の危険物が貯蔵されている臨海工業地帯をこれらの新想定 of 巨大地震からどう守るか。果たして、守れるのか。

従来の数倍の新想定に対して、従来の対策の延長線上では、資金も時間も足りないことは、明白である。

### 2. 静穏期に生まれ育った方法の限界

1999年夏にトルコを襲ったコジャエリ地震を自宅のマンションで体験した友人が体験談と被災の様子をVTRに残してくれた。彼は、地震後、一週間はとてもカメラを向けることができなかったという。震災に遭うと、相当期間、屋根の下で寝ることにさえ恐怖心を覚える方が多い。余震に驚いて、窓から飛び降りたり、道路に飛び出

して交通事故に遭った例もある。振動台や起震車で「大地震の揺れを体験」した後に、上記のようなトラウマに苛まれる人はいない。多数の生命が奪われるような大地震の脅威は、現場で自らの命をかけてしか経験できない。

佐野利器は、1923年関東大震災直後の建築界の様子を次のように描写している。「殊に建築に従う所の者には特に深刻な一大衝撃でない訳には行かなかった。或者は自己の手になった作物の残骸を見て地に伏し土を噛んで号泣したのである。又或者は過去を呪い、将来に自分の技術を抛擲せんとしたのである。又或者は只々救護に服し、復興に粉骨するを以て社会に対する唯一の義務としたのである。実に建築に従う万人に対する絶大の教訓であり、実物教授でありました。<sup>1)</sup>」

現在用いられている耐震設計・診断、耐震補強の方法や概念が生まれ育った20世紀後半は、幕末から明治に掛けての活動期の最後に当たる関東大震災の後、数十年間続いた地震の静穏期であった。耐震設計法等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。今世紀に入って、静穏期の想定を大幅に超える大きさや長さの揺れが多数観測されているが、これらに対する検証は、ほとんど行われていない。特に、1Gを超えるような大きな上下動と数分から10分近く続く強震に対する検証は、実験でもシミュレーションでも見当たらない。現行の耐震性能評価法は、想定地震の揺れに対して倒壊しないことを検証するという方法論である。つまり、揺れが想定を超えた場合には、計算上倒壊しても良いことになっている。従って、新耐震も、免震・制震も、従来の想定を大幅に上回る大きさや長さを持った活動期の地震の揺れでは、計算上は倒壊することになる可能性が高い。

東日本大震災に代表されるマグニチュード9クラスの巨大地震の揺れのエネルギーは、従来想定していたマグニチュード8クラスのものより、少なくとも数倍以上大きい。揺れの振幅は、構造物や地盤の条件によって制限されるので、それ程大きくはならないが、継続する時間は、エネルギーに応じて長くなる。従って、現行の耐震基準が想定している「大地震の揺れの長さ」の数倍以上の長さの揺れに耐えなければ巨大地震では被害を蒙ってしまうことになる。静穏期に作られた現行の耐震性能評価法では、地震の揺れの長さは暗黙の前提となっているだけで、明確な規定はない。これが、盲点になっている。

実際に、2011年東日本大震災で、新耐震の建物が構造的に破壊したり、設備が破壊して使用できなくなったものが幾つも報告されている。鉄骨ブレースや壁を入れた補強済み建物で、壊れた建物が幾つもある。免震装置が破損し、取り替えに一か月以上

を要し長期の休業を強いられたホテルもある。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マンションがある<sup>2)</sup>。

### 3. 地盤、老朽化、施工不良こそが倒壊の原因

1995年兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）では、当時の想定を2倍以上上回る振幅の揺れが幾つも観測されている。高速道路、新幹線等が倒壊し、地盤が液状化した。建築物では、木造住宅は、多数倒壊したが、鉄筋コンクリートのビルは、一部が壊れたのみであった。

建築学会は、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<sup>3)</sup>。これによれば、軽微な被害及び無被害とされた建物は、78.5%に上る。建築年代別に見れば、1982年以降の所謂新耐震基準が86.7%、これ以前の旧基準が、71.0%である。当時の想定を2倍以上上回る振幅の揺れを受けても、RC系建築物の8割近くは、ほとんど被害を受けていないということになる。特に、耐震補強が必要だとされている旧耐震建物の7割以上がほとんど無事であった。また、大破あるいは倒壊した比率は、5.2%に留まっている。1982年以前の旧基準建物だけを取り出しても、8.8%である。確かに、新耐震だけを取り出せば、大破・倒壊の比率は、1.3%に落ちるので、倒壊防止には新耐震の方が有効であると言える。一方で、旧基準建物でも9割以上が大破・倒壊していない。震度7の地域だけで見て、この比率であるので、震度6以上の地域に広げれば、被災率はさらに小さくなる。

耐震診断で計算されたIs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。2011年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、Is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。

1995年兵庫県南部地震以降、今世紀に入り観測された地震の揺れの大きさは、新耐震基準の想定を、数倍から10倍以上上回っている<sup>註)</sup>。しかし、上記の統計数字と、その他の被害報告から、このような揺れに対して、土木構造物や地盤は被害を生ずるが、建物は、旧基準の物も含め、ごく一部が倒壊したに留まっており、大半は軽微な被害

か無被害であると言える。これは、建物が大破・倒壊するのは、旧基準という設計規  
準自体に問題であるというよりも、設計規準で十分にカバーされていない個々の建物  
の問題が大きく影響していると解釈できる。即ち、地盤、老朽化、施工不良等が原因  
であると考えられる。阪神淡路大震災から東日本大震災まで、著者自身が、大破倒壊  
した建物や構造物を調査し、関係者の話を聞いた範囲ではあるが、地盤の問題、ある  
いは、施工不良が倒壊の原因ではないかと疑わせる事例が多かった。新旧耐震を問わ  
ず、これらの問題に注目した調査と診断が求められる。

現在は、新耐震であるというだけで大丈夫であるとし、旧耐震は、診断と補強が必  
要とされている。設計が、1981年以前かどうかは、運命の分かれ道程に大きな違いで  
ある。しかし、最近の大地震で実際に倒壊したかどうかという点では、新旧耐震はそ  
れほど大きな差はないと言える。想定を大幅に上回る活動期の揺れを受けても、日本  
の建物は、旧耐震であっても、しっかり造られていれば、地震で倒壊することはほと  
んどないと言える。我が国の耐震基準と建設現場には、旧基準と雖も、幕末から明治  
時代に渡る地震の活動期に蓄えられた数多くの経験と、佐野が描写した構造技術者の  
魂を揺さぶるような関東大震災の失敗が深くしみ込んでいることが、この強さを生ん  
でいると想えてならない。

注) 耐震基準の制定に深く関わった専門家によれば、新耐震基準は最大加速度が、  
0.4G程度の地面の揺れを「稀にしか発生しない大規模の地震」として想定している  
ということである(文献A)。ところが、1993年釧路沖地震では、釧路の気象台で0.9G  
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、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(文献B)。これらは、  
新耐震の想定する揺れであるとされる0.4Gの2倍から10倍以上になる。2011年東  
日本大震災でも、2.7Gが観測されている(文献C)。

注の文献

A) 石山 祐二：耐震規定と構造動力学、37～38頁、三和書籍、2008年

B)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

C)2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、44～61頁、日本建築学会、2011年7  
月

#### 4. 強度型補強の限界

1923年の関東大震災直後は、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、建物の高さを制限し、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たという。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、あるいは炭素繊維、エポキシ樹脂等の高機能材料を用いた耐震補強工事である。

2011年の東日本大震災を受けて、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。これは、妻壁を厚くし、ブレースを多用した強度型で耐震補強しているので、揺れが小さく収まる筈だった3校舎が、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、ガス漏れを起こし、エレベータが落下して、即刻立ち入り禁止となり、取り壊しを余儀なくされたことを考慮しての決断である<sup>4)</sup>。関東大震災の被害を受けて、鉄筋コンクリート造の高さが6階建てまでに制限されたが、これと同じことが約1世紀を経て再来したことになる。寺田寅彦の「天災は忘れたる頃来る」という言葉が重く響いている。

現行基準に従って、耐震診断を行うと1981年以前の旧耐震建物のほとんどは耐震強度が、基準値以下であり、耐震補強が必要であると判定される。壁を厚くしたり、増設して、窓側にはブレースを入れる定番の耐震補強工事が新築の何割にも達する費用を投じて次々に実施されている。公共施設であれば、税金で工事ができるが、民間では、耐震工事費が工面できず、危ない建物との評価が下り、テナントが逃げていき、ビルを手放さざるを得なくなる中小のオーナーが多い。資金的に問題なくとも、ブレースが使用性や景観を壊すと躊躇するオーナーが多い。静岡県の幼稚園では、設計事務所に耐震補強設計を依頼したところ、どうしてもブレースがプレイルームの真ん中に入ることを避けられないと言われ、園長先生は、「これでは、幼稚園でなくなってしまふ。」と嘆いていた。

これらは、必要な負担かどうか。旧耐震と雖も、しっかり造ってある建物は、最近の新耐震の想定を大幅に上回る揺れを受けてもほとんど倒壊していないという前節に詳述した事実を見れば、首をかしげざるを得ない。しかも、耐震補強工事の目的は、倒壊させないことであり、地震後に使える保証はない。今の耐震補強は、費用対効果の点で、現代のニーズからかけ離れていると言わざるを得ない。

幕末から明治大正時代を通じての活動期の経験と1923年の関東大震災の成功と失敗を生かして作られた耐震基準では、建物の高さを制限し、材料強度に大きな安全率

をもつように規定されていた。また、建物がばらばらにならないように、梁・柱、スラブの鉄筋は、網のようになって離れないような仕様とすることが義務付けられている。基本的な考え方として、個々の材料が十分な安全率を持って材料強度に達しないので壊れない、だから、構造物も壊れないという設計法であった。ところが、現行の新耐震では、想定地震の揺れを受けて材料がその強度に達し、構造物が損傷しても倒壊しないことを計算で確かめられればよいことに変更されている。例えば、ブレースの鉄骨が材料強度に達しても、建物の変形が、許容値以内に収まれば良いとなる。さらに、鉄骨ブレースや壁を多用した「強度型補強」を行えば、建物の変形が小さくて済むので、柱や壁の変形性能が小さくとも倒壊しないと信じられている。

大地震の揺れで材料が降伏した後の構造物の変形を正確に計算することは、ほとんど不可能に近いので、新耐震基準や耐震診断計算では、揺れに対しても、構造物の変形の仕方に対しても多数の仮定を設けている。それぞれの仮定は、理論的な裏付けを持ち、多数の実験で検証されているとは言え、その理論も、実験も静穏期の地震動を前提にしたものである。この方法の限界を露呈したのが、3.11に代表される活動期の地震であり、東北大学の校舎の事例である。幸い、倒壊し、コンクリートの下敷きで死傷者を出すことは避けられたが、貴重な研究機器、データが多数失われた。

鉄骨ブレースや壁を用いて、計算上の耐震強度を新耐震並みに引き上げた強度型補強を行っても、弱点に揺れが集中すれば、そこから壊れ、大きく揺れるのは当然である。その結果、内部の設備が破損し、人命が危険に晒される。現代の建物は、構造的に倒壊しなくとも、生命財産を奪うことは簡単に出来てしまう。具体的には、次のようなことが起こり得る。

- ① 想定を遥かに上回る大きさ、長さの揺れを受けて計算通りに壊れる。
- ② 老朽化した箇所、施工不良箇所が壊れる。
- ③ 壁やブレースで固くなったところの周囲の負担が増えて壊れる。
- ④ 壁やブレースの取り付け部分が壊れて、効果が無くなり、他も壊れる。
- ⑤ 壁やブレースが効かない方向の揺れで壊れる。
- ⑥ 壁やブレースが曲がったり、亀裂を生じて壊れ、効果が無くなり、他も壊れる。

強度型補強に代表される現行の耐震補強技術は、ある限界までは極めて効果的である。しかし、活動期の地震の揺れはその限界を超える可能性が高い。

## 5. 耐震被覆で損傷制御

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で鉄筋コンクリートを耐震被覆することで、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、破壊しない強靭さを持った柱、梁、壁、スラブができることが、多数の実験と東日本大震災で確かめられている。これは、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方法である<sup>6)</sup>。大型振動台で、大地震の揺れを7回連続して加える実験も行われている<sup>7)</sup>。

耐震被覆は、耐震設計の基本的な考え方を、19世紀末から20世紀初頭にかけての先の活動期に導かれた原点に戻すことを可能にする。即ち、耐震被覆で、構造物を構成する個々の材料の損傷を抑え、壊れなくする。だから、構造物も壊れないし、揺れない、設備等の被害も少なく、人命が危険に晒されることが少ない。この方法は、設計計算、施工とも大幅に単純化する。しかも、しなやかで切れない材料による耐震被覆は、コンクリートの損傷と破壊を根本的に抑えるので、昭和初期のように、大量の鉄とコンクリートを使って要塞のように建造する必要も無くなる。第3節に述べたように、阪神淡路大震災から東日本大震災に掛けての大地震で、耐震補強していない旧基準建物でも、被害率が小さく、地盤、施工不良等の問題が無ければ、ほぼ倒壊しないと言えること、並びに、同震災の震度6以上の地域において、既に耐震被覆した60棟の建物の被害がほとんど無く、揺れも少なく仕上げもほぼ損傷しなかった事実<sup>8)</sup>を見れば、旧基準で設計し、主要な柱・壁を耐震被覆することで損傷を制御する方法が、工事の負担の面からも、効果の面からも現実的な耐震化法であると考えられる。

新耐震基準に代表される現行の耐震設計・補強法が作られてから、既に40年近く経過している。もう一度、原点に戻って、考え直す時期ではないか。

## 文献

- 1) 佐野 利器：耐震構造上の諸説、建築雑誌、pp.40-41頁、1927年1月号
- 2) 五十嵐 俊一：耐震被覆による活動期の地震防災、ISBN978-4-902105-26-1、pp.35-81
- 3) 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
- 4) 日経アーキテクチュア 10月25日号、pp.34-35、日経BP社
- 5) 2)と同じ、pp.102-147
- 6) 五十嵐 俊一：包帯補強、ISBN4-902105-21-7 構造品質保証研究所、2009年4月

- 7) 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
- 8) 2) と同じ、pp.139-147