

□大規模地震に備える建物の耐震化と安全の確保

工学院大学 建築学部 まちづくり学科 教授 久田 嘉章

1. はじめに

100年前の1923年関東大震災や1995年阪神淡路大震災など、わが国ではこれまで多くの地震災害を経験してきた。その結果、我が国の建物は世界で最も厳しい耐震基準が整備され、かつ免震・制振など様々な最先端の対策技術が使用可能となっている。一方、近年では従来の「標準的な地震動」とは大きく特性が異なる「長周期・長時間地震動」や「長周期パルス」などが確認されており、その特性に応じた対策が求められている。さらに東京に代表される巨大都市では地震による膨大は避難者や帰宅困難者の発生が予想され、さらには

水害や土砂災害、感染症、流言飛語・群衆事故など様々な災害が連続する複合災害が懸念されている。従って従来の大地震により「建物が倒壊しない対策」や「火災から逃げる対策」から、より安全性の高い「建物が継続使用できる対策」、「逃げる必要のない対策」が求められている。

2. 近年明らかになってきた様々なタイプの地震動

近年、強震観測網が整備され、地震動には様々なタイプがあることと、それにより低層住宅から超高層建築、免震建築など多様な建物では様々な

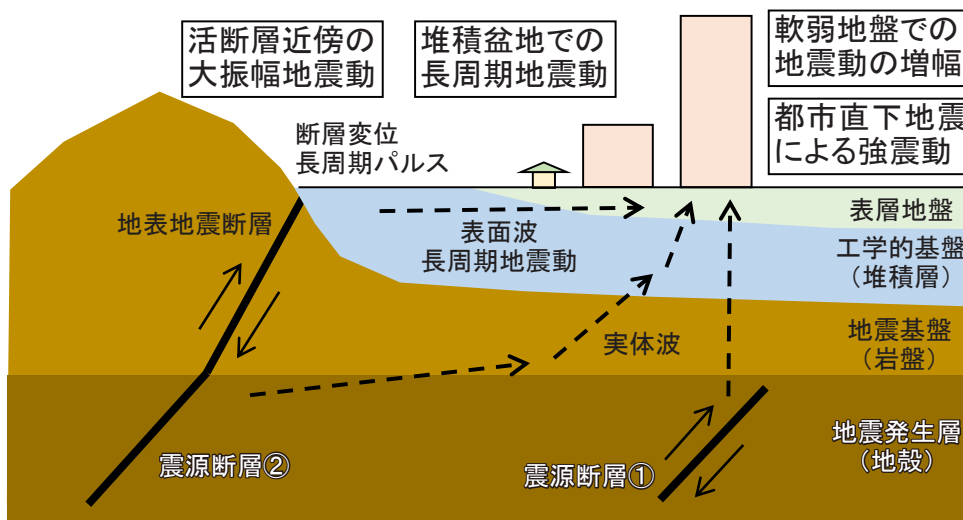
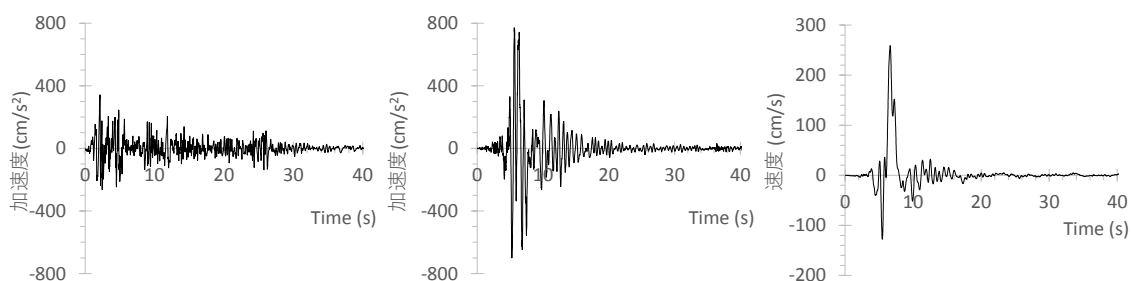


図1 様々なタイプの地震動（短周期地震動の実体波、長周期地震動の表面波、活断層帯地震の近傍の長周期パルス・断層変位、および、堆積層・表層地盤による地震動の増幅）

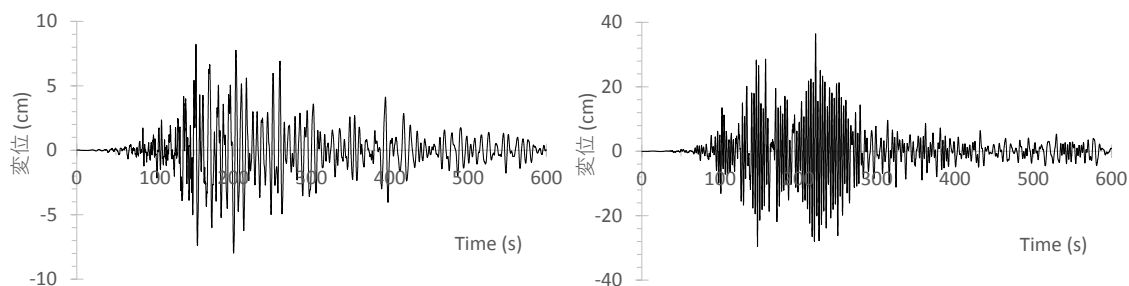
被害パターンがあることが明らかになってきた。まず図1は様々なタイプの地震動の成因を説明するための模式図である。震源断層①のように、地震は地下深くの地殻岩盤における断層運動で発生し、実体波とよばれるP波（ガタガタと上下に揺れる初期微動）とS波（ユサユサと水平に揺れる主要動）が伝播する。これが比較的柔らかい堆積層や軟弱な表層地盤で増幅される。一方、海溝型巨大地震などの浅い大地震では、ゆっくりと揺れる大振幅の地震動（表面波）が、地表近くを遅い速度で伝わり、東京や大阪のような厚い堆積層の中で増幅され、継続時間が非常に長くなる。主に実体波である前者は「標準的な地震動」と呼ばれるのに対して、主に堆積層で増幅した表面波による後者は「長周期・長時間地震動（または単に長周期地震動）」と呼ばれている。一方、震源断層②のように活断層帯で地震が発生した場合、その近くでは破壊力のある「指向性パルス（キラパルス）」、さらに地表に断層が出現した場合（図1の「地表地震断層」）は「断層変位」を伴う「長

周期パルス」という特殊な地震動が現れる場合がある¹⁾。

図2に様々なタイプの地震動の例を紹介する。(a)は世界で初めて大地震の強震記録である「エルセントロ波」の加速度波形（南北成分）である。振幅は200-300 cm/s²程度（重力加速度の2-3割）で、ガタガタと短周期（周期1秒程度以下）の揺れが約30秒程度の継続している。一方、周期2-3秒程度以上の長周期成分が小さい特徴がある。日本を含む世界の建物の耐震基準はこの「標準波」をもとにしており、現在の大半の超高層建築や免震建築が建てられている。次に(b)は2016年熊本地震の際に活断層の近くで観測された加速度記録（断層すべりの方向に近い東西成分）と、積分して求めた速度波形である。継続時間は20秒弱と短い、加速度振幅は800 cm/s²程度と大きく、速度波形は周期3秒程度の250 cm/s程度の大きな片振幅の「長周期パルス」を示している。さらに積分すると活断層の断層変位に相当する1.5m程度の永久変位となる。最後に(c)は2011年東日本



(a)「標準波」であるエルセントロ波の加速度記録(南北成分) (b) 2016年熊本地震の活断層近傍の加速度(左)と速度(右)の強震記録(東西成分)



(c) 2011 東日本震災の際、工学院大学(新宿)で観測された1階と28階の変位波形

図2 観測された様々なタイプの地震動

大震災の際に東京都新宿区の28階建て超高層建築（工学院大学）で観測された1階と28階の変位波形である。継続時間が600秒（10分間）以上の「長周期・長時間地震動」が記録されており、1階では8cm程度の振幅が、28階では約38cmまで増幅し、10cm程度の大振幅は5分間以上も継続している。「標準波」である(a)と異なり、(b)や(c)では長周期成分が卓越し、超高層建築や免震建築では対応策が必要となる。

3. 地震による建物の構造躯体や非構造部材・室内の被害事例

地震による強震動や地盤災害による建物被害の事例を紹介する。まず強震動による被害例として、写真1は1995年阪神淡路大震災の際の神戸市内の老朽化した古い木造家屋であり、震度7の激しい揺れで1階が完全に倒壊している。写真2は神戸



写真1 1階が倒壊した古い木造住宅
(1995年阪神・淡路大震災)

市内の鉄筋コンクリート（RC）造の集合住宅であるが、1階の駐車場は耐震壁のないピロティ構造であり、柱が大きく損壊し、建物全体も傾斜している。次に地盤災害による建物例を紹介する。写真3は2011年福島県浜通り地震の活断層直上の木造住宅であり、約60cm程度の上下の断層変位により建物が大きく変形している。建物は全壊したが、粘り強く変形に追随して倒壊は逃れていた。写真4は2004年新潟県中越地震の際、丘陵地の新興住宅地における傾斜地の盛土が滑落崩壊した様子である。木造住宅は大きく傾斜したが、幸いにも落下は逃れていた。

地震では構造躯体の被害だけでなく、間仕切壁や天井・内外装材、エレベータやスプリンクラー・受水槽などの設備機器、家具・什器など非構造部材にも様々な被害が発生する。部材の落下・転倒や閉じ込めで人的被害を生じるだけでなく、病院や庁舎、避難所など地震後にも機能継続が必要と



写真2 1階ピロティ柱が破壊した4階建てRC造集合住宅 (阪神・淡路大震災)



写真3 活断層変位により大きく変形した木造住宅
(2011年福島県浜通り地震)



写真4 傾斜地盛土の滑落で傾斜した木造住宅
(2004年新潟県中越地震)

なる施設にも大きな支障を生じる。図3は建物の揺れと変形による非構造部材の様々な被害を模式的に示している²⁾。

写真5は2005年福岡西方沖地震の際、福岡市内の集合住宅の非構造部材の被害の様子である。耐

震壁でない間仕切り壁が大きく損傷しており、ドアも開かなくなっている。写真6～8は2011年東日本大震災の長周期地震動による東京・西新宿の超高層建築の被害例である。エレベータのコンペンロープ（テール・釣合いロープ）の切断、吊り

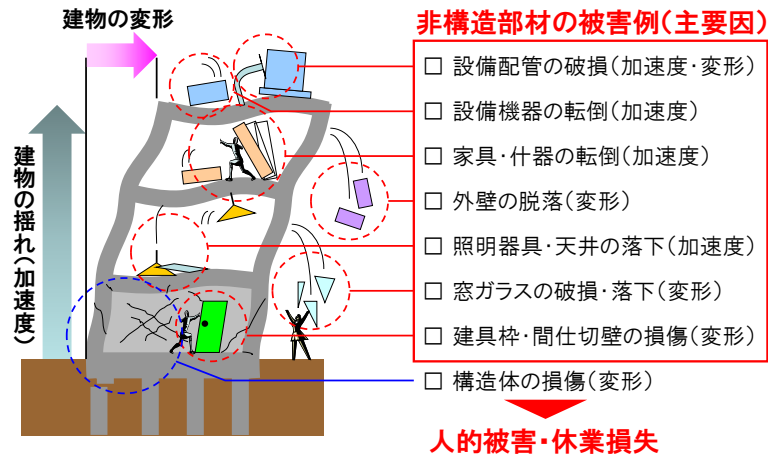


図3 建物の非構造部材の被害（地震による建物の応答加速度と変形により様々な被害が発生）²⁾



写真5 損傷した集合住宅の間仕切り壁とドア（2005年福岡県西方沖地震）



写真6 超高層建築で切断したエレベータのコンペンロープ（2011年東日本大震災）



写真7 超高層建築の高層階で固定していない本棚の転倒（2011年東日本大震災）



写真8 超高層建築の高層階での吊り天井板の落下（2011年東日本大震災）

天井板の落下、固定していない本棚の転倒が生じた。幸いにも遠方の地震であり、図2に示されるように揺れが大きくなる間に逃げる事ができたが、直下型地震では逃げる間もなく負傷した可能性があった。

4. 建物の耐震規定の変遷と耐震・免震・制振などによる対策

日本の耐震規定は過去の地震による多くの被害経験を経て発展してきた。建物の耐震対策の基本は地震による水平動に耐えることにある。このために筋違や耐震壁などで構造躯体を丈夫にし、さらに強い水平力が作用した場合でも基礎や柱・梁の各部材を緊結して、躯体は変形してもできるだけ倒壊しないように粘りある構造体にする。さらに耐震設計の通りに実際の建物が建てられて性能が確保されているか、その品質を確認することも重要になる。

表1に主な耐震や品質確保のための基準類の変遷を示す。まず1923年関東大震災を契機に、1924年に現在の建築基準法に相当する市街地建築物法が改正され、世界で初めての地震の水平力を考慮した耐震規定が導入された。その後、1948年福井地震による福井市の壊滅的な被害を受けて、全国

に適用される建築基準法が1950年に制定された。次に、1968年十勝沖地震や1978年宮城県沖地震などで建物が倒壊する被害を受けて、それぞれ1971年、1981年に耐震規定が強化された。特に1981年の耐震基準は現在でも有効な規定であり、「新耐震基準」と呼ばれている。この基準では数十年に1度程度の中小地震動には構造躯体に大きな損傷が発生せず、数百年に1度程度の大地震動では構造躯体が倒壊・崩壊させないことが目標とされた。さらに、1995年阪神・淡路大震災では活断層帯地震による激しい地震動により、多数の木造住宅が倒壊した。大半は老朽化した旧基準の住宅であったが、新耐震基準でも部材を緊結する金物や耐力壁の配置、基礎の仕様などにも不十分な点が確認された。その結果、木造建物を対象とした耐震規定が2000年に大幅に強化された。さらに実際に建つ住宅の品質を確保するために、2000年に「住宅の品質確保の促進等に関する法律（品確法）」が制定された。それにより新築住宅を引き渡す事業者は、構造耐力上主要な部分等の欠陥（瑕疵）による損害が発生した場合、10年間は責任を負い賠償することが義務化された。さらに耐震性能の階級（耐震等級）を認証する住宅性能表示制度が導入された。耐震等級は1から3まであり、等級1は2000年耐震基準を満たしていること、等級2は

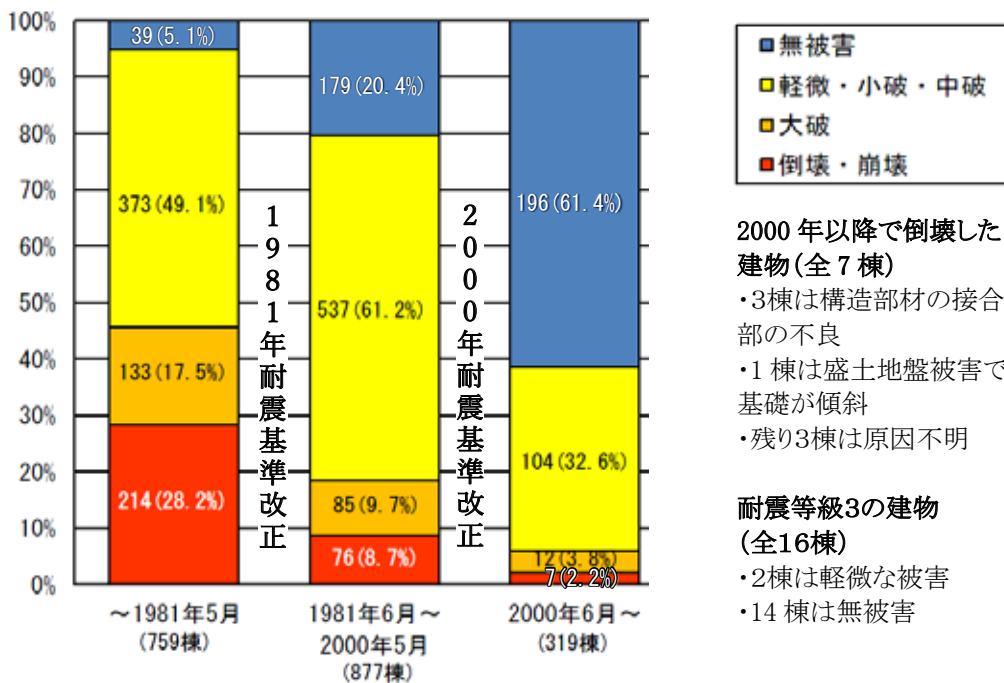
表1 主な耐震や品質確保のための規定類の変遷

建築基準法等の改正	主な内容（耐震基準・品質など）	契機となった主な地震
1924年市街地建築物法の改正	耐震設計法導入、筋違推奨など	1923年関東大震災
1950年建築基準法の制定	全国対象とした耐震基準の導入	1948年福井地震など
1971年建築基準法の改正	耐震基準の強化（RC造短柱等）	1968年十勝沖地震
1981年建築基準法の改正	新耐震基準の導入	1978年宮城県沖地震
2000年建築基準法の改正	木造建物の耐震性の強化	1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）
2000年住宅の品質確保の促進等に関する法律の制定	10年間の瑕疵担保責任の義務化、住宅性能表示制度など	
2009年住宅瑕疵担保履行法	保険加入義務化、現場検査など	
2013年建築基準法施行令の改正・技術告示など	特定天井の耐震化、エレベータ・エスカレータの脱落防止など	2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）

等級1の1.25倍、等級3は同1.5倍の耐力を有する。さらに2009年には、「住宅瑕疵担保履行法」が施行され、事業者は瑕疵担保責任を保証するために「保証金の供託」または「保険加入」が義務化された。工事中に第3者として専門の検査員（建築士）による検査が行われ、これらにより木造住宅の耐震性能と品質は飛躍的に向上した。一方、2011年東日本大震災では大規模天井の落下事故などで死者が発生し、多数のエスカレータ等が落下した。このために2013年に基準法が改正され、大規模天井（特定天井）やエスカレータ・エレベーター等の脱落防止が義務化された。

タ等の脱落防止が義務化された。

耐震規定の強化により、最新の耐震基準の建物であれば大地震でも建物の倒壊を防ぐという当初の目標はほぼ達しつつある。例えば、図4は2016年熊本地震の際、2度の震度7を経験した熊本県益城町の木造住宅の被害調査結果である³⁾。1981年基準より古い建物では約28%が倒壊し、無被害はわずか約5%である。一方、最新の2000基準の住宅では倒壊は約2%で、無被害が約61%まで増えている。さらに益城町には16棟の耐震等級3の住宅があったが、うち2棟は軽微な被害、残りの



2000年以降で倒壊した建物(全7棟)

- ・3棟は構造部材の接合部の不良
- ・1棟は盛土地盤被害で基礎が傾斜
- ・残り3棟は原因不明

耐震等級3の建物(全16棟)

- ・2棟は軽微な被害
- ・14棟は無被害

図4 2016年熊本地震の震度7を2度経験した益城町における木造住宅の被害統計³⁾



写真9 活断層直上でも無被害であった2000年基準の木造住宅（2016年熊本地震）



写真10 大規模な縦ずれ断層変位で傾斜したRC造住宅（後に修復、1999年台湾・集集地震）

14棟は全て無被害であった。

写真9は熊本地震の際、活断層直上の激しい揺れと断層変位を経験した2000年基準の木造住宅の様子である。手前のコンクリート製の壁は断層変位で崩れているが、建物は無被害である。写真10は、1999年台湾・集集地震で約4m近い縦ずれ断層の直上のRC造建物である。建物は大きく傾斜したが、耐震性が極めて高く、傾斜以外の目立った被害は確認されなかった。後にこの建物はジャッキで傾斜を戻して修復されている。現在の高い耐震基準を満たした建物は、震度7の激しい揺れだけでなく、断層変位や地すべり、液状化などの地盤災害にも大きく被害を低減し、速やかな復旧が可能になることを強調したい。

建物の耐震対策には、図5に示すように耐震のほかには免震や制振がある。まず「耐震」は、筋違や耐震壁を平面・立面的にバランスよく配置し、地震による水平力に対して変形を抑える構造である。中低層建物では最も標準的で確実な対策であるが、建物内の特に上層階では大きな応答加速度が発生するため、室内の安全対策は必須である。次に「免震」は建物の低層階（一般には基礎下）に免震装置（積層ゴムやすべり支承など）を設置し、地震による水平動を免震層で吸収する。上部の建物はゆっくりと平行移動し、建物の応答加速度は大きく低減する。このため室内の設備機器や什器類が守られ、現在では病院や庁舎など大地震

後にも機能継続が必要な建物はほぼ必須となっている。一方、免震層が大きく変形するため、周辺地盤との接続部（エクспанション・ジョイント）の動きには注意が必要である。人的被害が生じる可能性もあり、注意喚起の掲示板を設置する等の対策が必要である⁴⁾。さらに、免震は万能ではないことにも注意を要する。特に写真3、10など縦ずれ断層の真上や、写真4のように傾斜地の盛土地盤、さらには液状化する可能性のある軟弱地盤など、地盤が傾斜する可能性がある場合は要注意である。さらに活断層帯地震の近くでは長周期パルスなどが発生して想定した地震動レベルを超える可能性がある。きわめて発生する確率は低い現象であるが、対応策としては免震層の変位を抑制するフェースーフ機能などが必要になる。最後に「制振」は、地震による建物の揺れを低減する装置を付加した構造である。様々な種類があり、例えば、筋違の部材にエネルギーを吸収するダンパーを設置する場合や、屋上などに建物の周期と同じ錘構造を設置し、建物の揺れと反対側に慣性力を作用させる場合（TMD: Tuned Mass Damper）などがある。制振により建物の揺れは低減するが、やはり室内の安全対策は必須である。ちなみに「制震」ではなく「制振」を用いるのは、地震だけでなく、強風など他の外乱による建物の振動の低減を対象とする場合があるためである。

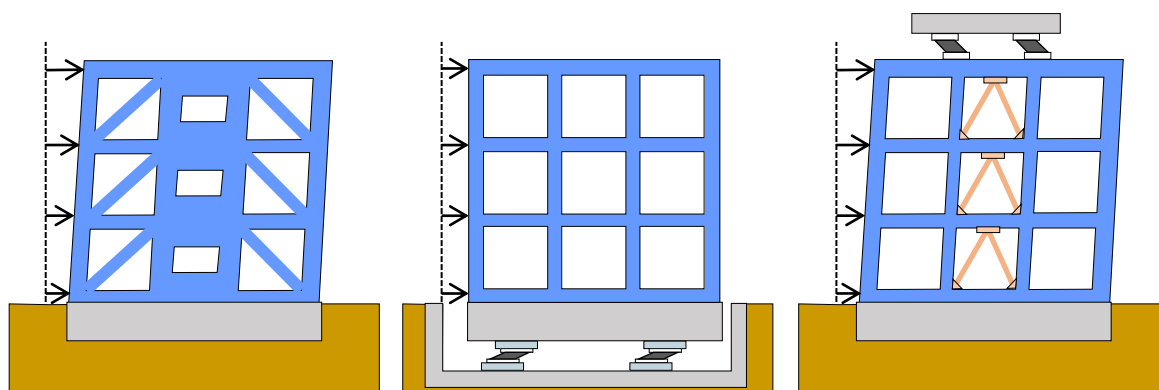


図5 「耐震構造 (左)」、「免震構造 (中)」、「制振構造 (右)」の地震時の揺れと効果の模式図

5. 「想定外」に備えた建物のソフト対策

上で説明したように、最新の基準による耐震構造や、免震や制振の構造を採用すれば建物の揺れによる被害は大きく低減することが可能である。但し、現在の東京や大阪のような巨大都市では、多数の超高層建築や木造密集市街地が隣接し、巨大なターミナル駅や地下街に膨大な人口が密集する。首都直下地震などの大地震や南海トラフ巨大地震が発生した場合、激しい揺れや長周期地震動、延焼火災、巨大津波、土砂災害、群衆事故、停電などライフラインの停止、さらには疫病や猛暑などが連続する複合災害が懸念されている。従来の経験が通用しない「想定外の災害」はいつか必ず起きることを想定して防災計画や訓練などを実施するソフト対策も重要である。そのためには「災害を出さない対策」に加えて、「災害が出た場合の対応策」が必要になる。

最後に「災害が出た場合の対応策」としての震災対応訓練の事例を紹介する。写真11は超高層建築である工学院大学と新宿駅周辺の自治体・事業

者等が連携した「新宿駅周辺防災対策協議会」が実施している訓練の様子である。従来の「避難訓練」ではなく、想定される様々な被害に柔軟に対応し、できるだけ「逃げない」ための「発災対応型訓練」である。(a)は火災発生を想定した消火器や屋内消火栓の使用訓練、(b)、(c)は傷病者を想定した応急救護・担架搬送、(d)は地元医師会と連携した多数の傷病者を想定したトリアージ訓練、(e)は地元建築士と連携した建物の被害状況の確認訓練、(f)は地元事業者と連携した災害対策本部の情報収集と対応の優先順位を判断する災害対応訓練の様子である。「発災対応型訓練」は木造密集市街地や集合住宅など様々な特性の地域にも適用可能な実践的なソフト対策である⁵⁾。準備は大変であるが、地域の多様な住民や専門家が知り合い、災害に強いコミュニティも形成される。

6. おわりに

近年明らかになった様々な地震動と建物や室内の被害例と、建物や耐震性の品質を確保するため



(a) 屋内消火栓の使用訓練



(b) 傷病者の応急救護訓練



(c) 傷病者の担架搬送訓練



(d) 医師会によるトリアージ訓練



(e) 建築士による被害確認訓練



(f) 災対本部による災害対応訓練

写真11 工学院大学・新宿駅周辺防災対策協議会による地震災害対応訓練の様子

の基準類の変遷、耐震構造から最新の免震・制振構造のハード対策、さらに想定外に備えた発災対応型訓練などのソフト対策を紹介した。東京や大阪のような大都市は巨大化し、超高層建築や巨大ターミナル駅など都心部での人口集中が続いている。現在の耐震対策は進化しており、従来の「建物を倒壊させない・延焼火災から逃げる対策」から「機能を継続させて、建物・地域に留まれる対策」が求められている。

謝辞

本報告で使用したエルセントロ波は一般社団法人建築性能基準推進協会、熊本地震波は気象庁と熊本県より提供頂きました。

【参考文献】

- 1) 久田嘉章：～震源近傍の強震動～指向性パルスとフリングステップ～、「新・強震動地震学基礎講座（第15回）」、日本地震学会ニューズレター、Vol.70, No.6, 18-21、2018
- 2) 鱒沢 曜：2.2.3 非構造部材の耐震対策、逃げないですむ建物とまちをつくる一大都市を襲う地震等の自然災害とその対策― 日本建築学会編、技報堂出版、2015
- 3) 国土交通省：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、2016
https://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000633.html
- 4) 日本免震構造協会：免震エキスパンションジョイントの安全性確保及び損傷防止についての留意事項、2022
<https://jssi.or.jp/report-2>
- 5) 総務省消防庁：地域防災の実践、発災対応型防災訓練、防災・危機管理 e カレッジ
<https://www.fdma.go.jp/relocation/e-college/cat66/cat62/cat57/3-25.html>