

地震動による建築物被害から見た 耐震設計の現状と今後の課題

構造研究グループ グループ長 飯場 正紀

目次

- I はじめに
- II 観測地震動の概要
 - 1) 地震緒元と観測地震動
 - 2) 建築研究所の強震観測
- III 鉄筋コンクリート造建築物の被害と特徴
 - 1) 鉄筋コンクリート造建築物の被害性状
 - 2) 1995年兵庫県南部地震の被害分類との比較
- IV 鉄骨造体育館建築物の被害と特徴
 - 1) 学校体育館の被害形態と特徴
 - 2) 被災度区分判定結果に基づく分析
- V 木造建築物の被害と特徴
 - 1) 調査地域と被害概要
 - 2) 地震応答解析による被害の検証
- VI 建築物の耐震化に向けた取り組み
 - 1) 新耐震設計基準(1981年の建築基準法改正)
 - 2) 1995年兵庫県南部地震の建築物被害を踏まえた補足規定
 - 3) 耐震改修促進法
- VII 建築物の耐震化に関する現状と課題
 - 1) 近年の建築物の耐震化率の動向
 - 2) 地震被害を踏まえた建築物の耐震化
- VIII まとめ
- 謝辞
- 参考文献と参照ウェブサイト

I はじめに

2011年3月11日東北地方沖を震源とするマグニチュード9.0の地震が発生した。気象庁により、2011年(平成23年)東北地方太平洋沖地震(以下、2011年東北地方太平洋沖地震)と命名された。断層面(断層のすべりが生じた面積)の大きさが、南北

約500km、東西約200kmに及んだことから、東北地方から関東地方にかけて広範囲に大きな地震動が観測され、また建築物等の被害も広範囲に発生した。

(独)建築研究所(以下、建築研究所)では、地震発生直後から、建築物等の被害の全体像を把握するために、現地での調

査を実施した。その結果を、被害調査報告書(速報版)としてまとめた^{1),2)}。その後も被害調査と分析を継続しており、報告書をまとめる予定である。

ここでは 2011 年東北地方太平洋沖地震における、地震動による建築物の構造被害結果を示し、過去の地震被害との比較を通して、建築物の耐震性の現状と課題をまとめた。

II 観測地震動の概要

1) 地震諸元と観測地震動

気象庁による 2011 年東北地方太平洋沖地震の諸元は、下表の通りである³⁾。マグニチュード 9.0 は日本の観測史上最大で、世界では 1900 年以降 4 番目の規模となる⁴⁾。地震のメカニズムは、海側の太平洋プレートが陸側のプレートに沈み込み、引き込まれた陸側のプレートが跳ね上がって起きる、逆断層タイプである。

表 2-1 地震諸元³⁾

日時	2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分
深さ	24 km
マグニチュード	9.0
メカニズム	低角逆断層

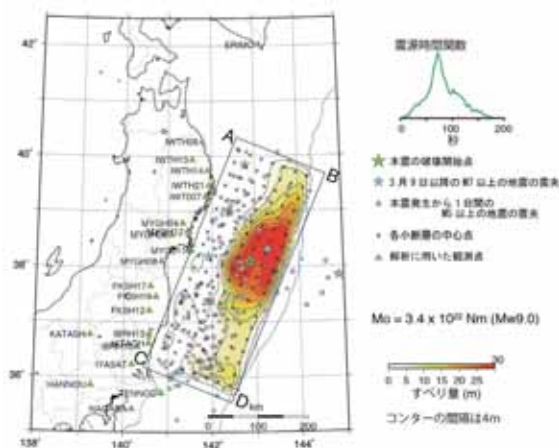


図 2-1 断層モデルの例⁵⁾

今回の地震は、長さ 500 km、幅 200 km に及ぶ地震断層が破壊したとされる。このような大規模な断層は一律に破壊(断層の滑り)するわけではなく、断層のどの領域がどのように破壊した

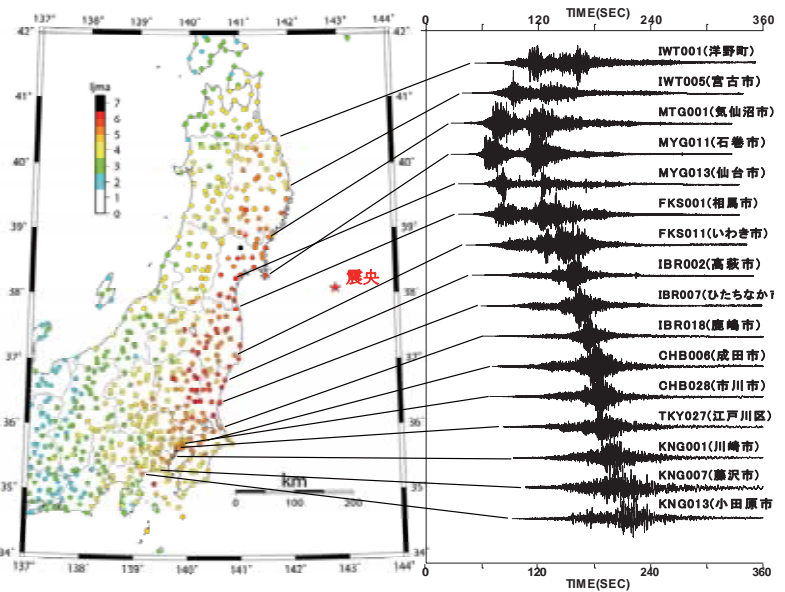


図 2-2 震度分布と代表的な加速度波形

かが、地震動や津波の生成に大きな影響を与える。断層の破壊過程は、余震の発生状況や各地で観測された地震記録、GPS 観測等による地形の変動、津波の伝播状況などから推定することができ、これまでに種々の手法で推定された断層モデルが多く提案されている。ここでは 1 例として、図 2-1 に気象庁気象研究所が強震記録から推定した震源モデルを示す⁵⁾。図中の色の濃い領域が破壊(滑り)の大きな領域である。この断層モデルの主な特徴は、破壊開始点(震源、大きな★の位置)の北東側に滑りの大きな領域があり、最大滑り量は約 25 m、破壊は震源より南北方向に分かれて進行、破壊の継続時間は約 3 分となっている。

2011 年東北地方太平洋沖地震では、広範囲で激しい揺れが観測され、膨大な強震記録が得られた。(独)防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)⁶⁾の記録を用いて、本震での震度の分布は、図 2-2 となる。星印(★)が震央の位置を表す。宮城県栗原市で震度 7 を観測したほか、宮城県、福島県、茨城県、及び栃木県に及ぶ広い範囲で震度 6 強を観測した。震度 6 弱の範囲は更に、岩手県、群馬県、埼玉県、及び千葉県に広がっている。

K-NET で震度の大きかった観測地点の強震記録を、図 2-3 に示す。震度 7 を記録した K-NET 築館、震度 6 強の地点から K-NET 仙台及び K-NET 日立を取り上げ、各観測地点で得られた加速度記録と疑似速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を示す。

K-NET 築館は宮城県栗原市に位置し、東北地方太平洋沖地震の本震で、唯一震度 7 を記録している。図 2-3 の上段に示した加速度記録は、南北(N-S)方向の最大加速度が 3700 cm/s² 近くに達し、極めて激しい地震動であったことが窺える。波形の右側の疑似速

度応答スペクトルを見ると、N-S 方向の0.2秒前後の周期成分の応答が特に大きくなっており、短周期成分の卓越した地震動であったことが分かる。

K-NET 仙台は、仙台駅の東側 4 km 程の距離に位置し、本震の震度は 6 強であった。ここで得られた強震記録(図 2-3 の中段)の最大加速度は N-S 方向で 1500 cm/s^2 を超え、やはり大きなものである。疑似速度応答スペクトルでは、K-NET 築館とは対照的に、0.5 秒から 1 秒辺りの周期成分が卓越しており、最大応答速度は 200 cm/s を超えている。K-NET 仙台は厚い沖積層に覆われた地域にあり、地盤条件を反映したものと考えられる。

茨城県日立市の K-NET 日立で得られた強震記録を、図 2-3 の下段に示す。ここで計測された本震の震度は 6 強であった。N-S 方向の最大加速度は 1600 cm/s^2 近くと大きく、疑似速度応答スペクトルは周期 0.3 秒辺りに大きなピークを持っている。一方、0.5 秒より長い周期では応答が急激に低下し、短周期成分が主体の地震動であったと言える。また、K-NET 築館や K-NET 仙台では、時間軸の 20 秒辺りと 70 秒辺りにふたつの波群が表れるが、K-NET 日立など、茨城県から南の関東で得られた強震記録では、ひとつの大きな波群が表れる。震源の破壊過程と、観測地点の位置関係からこのような現象が表れる。

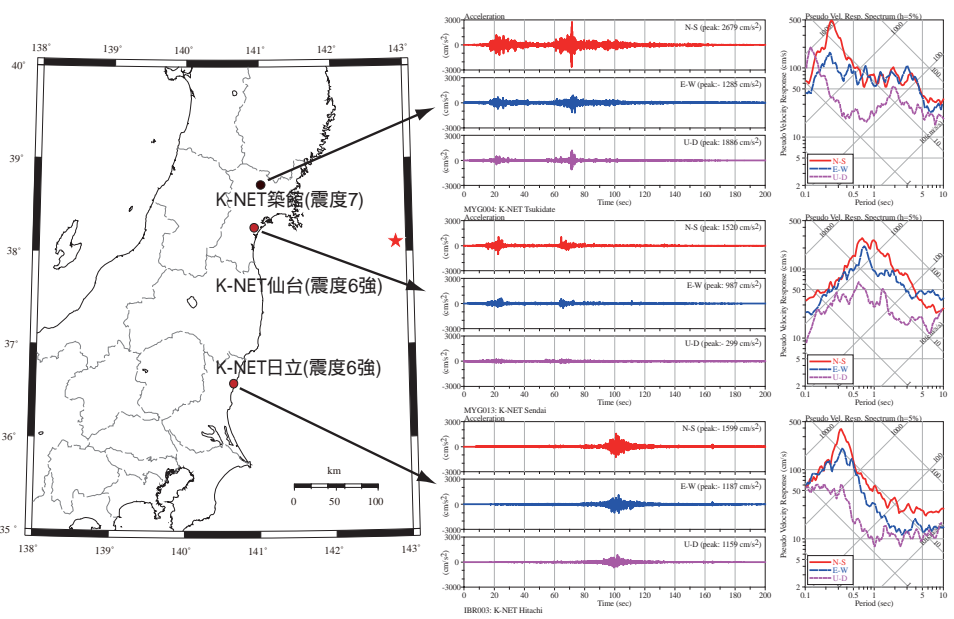


図 2-3 各地で得られた加速度波形と疑似速度応答スペクトル(減衰定数 5%)

2) 建築研究所の強震観測

図 2-4 に示すように、建築研究所では全国の主要な都市の建築物を対象とした強震観測を行っている⁷⁾。今回の地震では、北海道から関西にかけて設置してある 58 台の強震計が起動した⁸⁾。約 30 の建築物が、震度 5 弱以上の揺れを体験したことになる。ここではいくつかの特徴的な強震記録を紹介する。

建築研究所が強震観測を行っている建築物のうち、少なくとも 4 棟が、激しい地震動を受けて何らかの損傷を受けた。一例として、東北大学内建築物を取り上げる。この建築物は、東北大学青葉山キャンパスにある SRC 造 9 階建ての校舎である。この建物の強震観測の歴史は古く、1978 年宮城県沖地震で得られた 9 階の最大加速度が 1000 cm/s^2 を超える強震記録は有名である。2011 年東北地方太平洋沖地震では、連層耐震壁が曲げ破壊

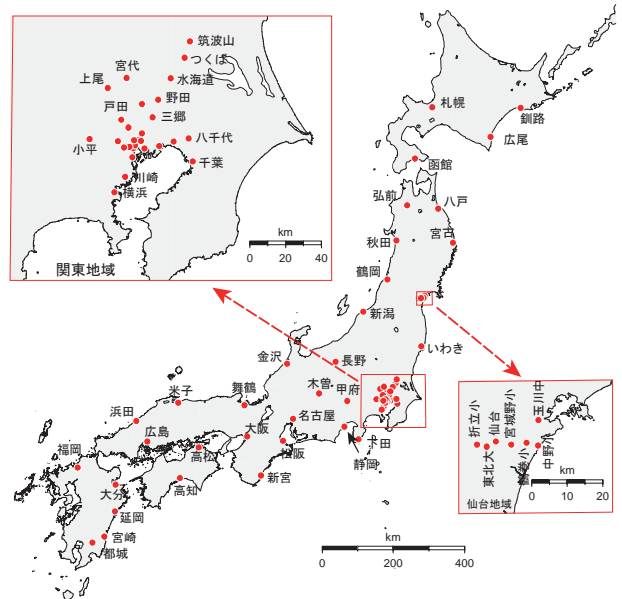


図 2-4 建築研究所の強震観測地点⁷⁾

する等の被害を受けた。建築物の外観を写真 2-1 に、本震時に得られた強震記録を図 2-5 に示す。図の上から、(a) 短辺方向の加速度記録、(b) 長辺方向の加速度記録、(c) 短辺方向の建物変位(9 階の 1 階に対する相対変位)、(d) 長辺方向の建物変位、及び(e) 10 秒ごとに算出した建物の 1 次固有周期⁹⁾の順に並んでいる。図 2-5 (a) 及び図 2-5 (b) の太線が 1 階の、細線が 9 階の加速度を表し、1 階の最大加速度は両方向とも 330 cm/s^2 を超えている。また 9 階の最大加速度は 1 階の 2~3 倍となり、短辺方向では 900 cm/s^2 を超えている。図 2-5 (e) の 1 次固有周期の変化をみ

ると、両方向共、地震動の初期の時間では0.7秒程度の値を示しているが、40秒から50秒にかけての最初の波群で1秒位に伸び、更に80秒から100秒のふたつ目の波群で1.2秒から1.5秒程度に伸びている。最終的に構造部材損傷により、1次固有周期は初期の2倍に、剛性に換算すると1/4に低下したことになる。



写真 2-1 東北大学内建築物の外観

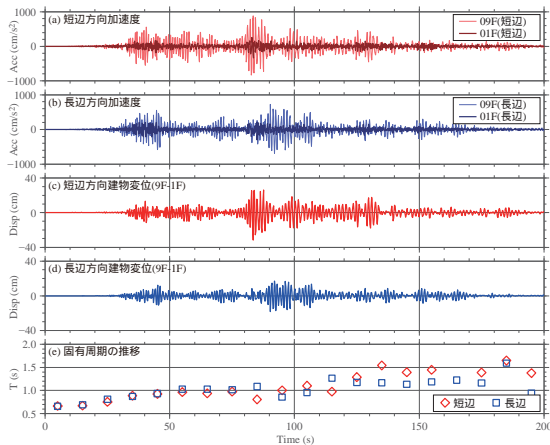


図 2-5 東北大学内建築物の強震記録と固有周期の推移

長周期地震動と、それを受けて揺れる超高層建築物等の応答は近年社会的関心を集めている。2011年東北地方太平洋沖地震でも東京や大阪など、震源から離れた大都市で長周期地震動が観測された。ここでは建築研究所の強震観測結果から東京湾岸に建つ37階建てRC造の超高層住宅の結果を紹介する。この建築物の1階と37階で得られた加速度記録を積分して得られた変位の時刻歴(それぞれ南-北(S-N)及び西-東(W-E)の水平2方向)と、それぞれの方向の37階の変位から1階の変位を引いて得られた建築物変位を図2-6に示す。地動の変位(1階の記録)の最大値は20cm程度となっており、地盤自体が大きく揺れていたことが

分かる。建築物自身の変形による変位は15cmから17cmとなっている。1階で得られた強震記録の、減衰定数5%の疑似速度応答スペクトルを図2-7に示す。記録の応答スペクトルを見ると、1秒から1.2秒、3秒、及び7秒の周期に卓越が見られるが、全体としては比較的平坦な形状をしている。

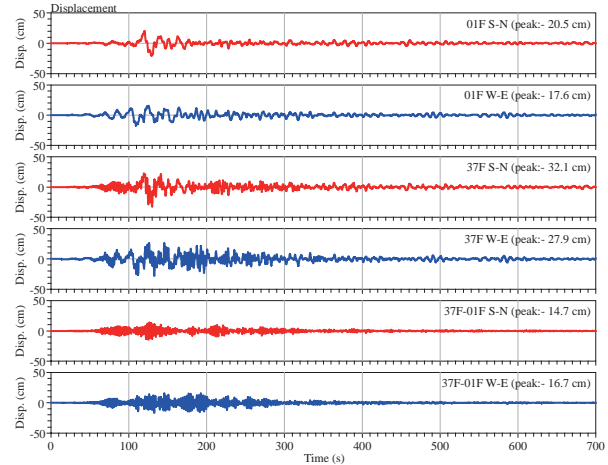


図 2-6 東京湾岸の超高層住宅の強震記録(変位)

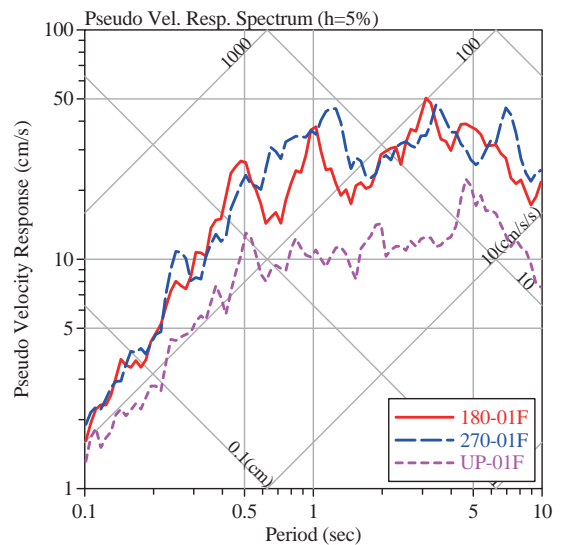


図 2-7 1階記録の疑似速度応答スペクトル(減衰定数5%)

III 鉄筋コンクリート造建築物の被害と特徴

1) 鉄筋コンクリート造建築物の被害性状

1-1) 鉄筋コンクリート造建築物の被害分類

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方にわたる広い範囲で様々な被害が確認された。観測された地震動の周期特性は、建築物に大きな被害をもたらす周期帯域であま

り大きくなかったともいわれているが¹⁰⁾、全般的には各地で観測された震度に比べると建築物の被害はさほど顕著ではなかった。また、地盤の悪い場所に建てられた建築物に局部的に被害が多い傾向は見られたが、地域による被害状況の明確な違いは確認されていない。

現地調査から明らかとなった鉄筋コンクリート（RC）造建築物（SRC 造も含む）の被害形態は、構造躯体と構造部材については下記のように分類される。被災地域が広範囲であったため、全ての地域での網羅的な調査は実施出来ていないが、他機関の調査報告等¹¹⁾も参照して総合的に判断すれば RC 造建築物の被害分類として妥当なものと考えられる。

- S-1) 1 階の層崩壊
- S-2) 中間階の層崩壊
- S-3) 柱のせん断破壊
- S-4) 柱脚部や連層耐力壁脚部の曲げ破壊
- S-5) SRC 造露出柱脚のアンカーボルトの抜け出しや主筋の座屈
- S-6) 境界梁のせん断破壊や付着割裂破壊
- S-7) 建築物の傾斜
- S-8) 塔屋の損傷や破壊、傾斜
- S-9) 耐震補強済み建築物の損傷

2011 年東北地方太平洋沖地震による RC 造建築物の被害形態は、そのほとんどが過去の地震被害において観察されたものと同様のものであった。構造躯体と構造部材の被害は、主に旧耐震基準（1981 年 5 月以前）により設計された建築物に発生したもので、現行耐震基準（1981 年 6 月以降）で設計された建築物で被害を受けたものは少ない。現行耐震基準で設計された建築物の被害としては、S-5)の被害や、柱梁接合部のせん断ひび割れ、コンクリート打継部の水平ひび割れなどの損傷が挙げられる。各被害分類の特徴を、事例とともに以下に示す。

S-1) 1 階の層崩壊

写真 3-1 に示すように、ピロティ形式の建築物の 1 階柱がせん断破壊して、捩れ変形を伴って落階するという被害が見られた。また、ピロティ形式ではない建築物でも、1 階柱のせん断破壊により層崩壊した被害が見られた。

S-2) 中間階の層崩壊

写真 3-2 は、柱がせん断破壊して軸力保持能力を喪失し、3 階建ての 2 階部分が層崩壊した建築物である。この建築物では、3 階の一部も大破しており、1 階の柱にもせん断破壊が生じていた。他にも、3 階建てで 2 階のみ短柱を有する建築物の 2 階が層崩壊した事例も見られた。

S-3) 柱のせん断破壊

腰壁や垂れ壁が取り付くことで短柱化した柱のせん断破壊が、多数確認されている（写真 3-3 左）。長柱であっても、せん断補強筋が少ない柱にせん断破壊が発生した事例もあった。また、1 階柱において基礎から立ち上がった主筋の段落とし部を起点とするせん断破壊も見られた（写真 3-3 右）。

S-4) 柱脚部や連層耐力壁脚部の曲げ破壊

柱の脚部や連層耐力壁脚部の曲げ破壊により、コンクリートの圧壊、主筋の座屈及び破断といった被害が見られた（写真 3-4）。

S-5) SRC 造露出柱脚のアンカーボルトの抜け出しや主筋の座屈

SRC 造の露出柱脚において、写真 3-5 に示すようなアンカーボルトの抜け出しや主筋の座屈等の被害が見られた。これは、ベースプレート直下の断面にひずみが集中して、アンカーボルトの抜け出しと鉄筋の引張降伏が発生し、その後の圧縮により座屈したものと推測される。この状態からさらに引張が作用すると、鉄筋の破断が生じる可能性も高い。

S-6) 境界梁のせん断破壊や付着割裂破壊

並列する連層耐力壁を連結する境界梁に、写真 3-6 に示すよ



写真 3-1 1 階の層崩壊



写真 3-2 中間階の層崩壊



写真 3-3 柱のせん断破壊



写真 3-4 連層耐力壁側柱脚部の圧壊

うなせん断破壊や付着割裂破壊が生じていた。損傷は、中央部に設けられた近接する2つの開口付近に発生していた。

S-7) 建築物の傾斜

4階建て及び14階建て建築物に傾斜の被害が見られた(写真3-7)。原因としては、地盤変状や杭の損傷等が考えられる。

S-8) 塔屋の損傷・傾斜

塔屋の損傷・破壊や、それによる傾斜の被害が見られ、写真3-8のように損傷した塔屋の一部が屋上に落下した事例もあった。

S-9) 耐震補強済み建築物の損傷

枠付き鉄骨ブレースが取り付けられた柱にせん断ひび割れが発生した事例(写真3-9)が見られた。また、過去の地震でせん断破壊し、その後、応急補強された極短柱が再び同様の被害を受けた建築物(写真3-10)もあった。しかし、調査した範囲では、耐震補強された建築物はほとんど被害を受けていないか、ごく軽微な被害に留まっていた。

一方、非構造部材の被害については、以下のようにまとめられる。

N-1) 袖壁付き柱の袖壁脚部の曲げ破壊：袖壁付き柱の袖壁脚部の端部圧壊が見られた。この袖壁部分は、設計上は非構造部材として構造耐力上は無視していた可能性が高いため、非構造部材の被害に分類した。ただし、今後、袖壁付き柱を積極的に構造部材として考慮するような場合には、このような被害が生じる可能性があることを念頭に置いて設計する必要がある。

N-2) 集合住宅の非構造壁の損傷：マンション等の都市型集合住宅の玄関回りの非構造壁やベランダ側の方立て壁などに、せん断ひび割れやせん断破壊の被害が見られた(写真3-11)。玄関回りの非構造壁が損傷して玄関ドアの開閉ができなくなり、避難上の支障が生じたり、無理矢理こじ開けた後は締まらなくなって防犯上の問題が生じたりすることになる。このような被害は、旧耐震基準による設計や現行耐震基準による設計に係わらず、いずれの年代の建築物にも比較的多く見られており、制震ダンパーで補強された建築物においても確認された(写真3-12)。



写真3-5 柱脚ベースプレート付近の主筋座屈 写真3-6 開口付き境界梁の損傷



写真3-7 4階建て建築物の傾斜 写真3-8 塔屋の損傷及び落下



写真3-9 補強後の柱のせん断ひび割れ 写真3-10 応急補強した柱の被害



写真3-11 非構造壁(玄関側) 写真3-12 制震ダンパーで補強された建築物における非構造壁の被害

その他の被害として、仕上げモルタルやタイル等の外装材の損傷や落下、看板や屋上水槽などの屋上突出物の傾斜や脱落など、また石積み塀やコンクリートブロック塀の倒壊が多く見られた。

1-2) 公共建築物の被災度区分判定

2011年東北地方太平洋沖地震直後におけるRC造建築物の被

害調査では災害時に防災拠点として機能すべき庁舎等の公共建築物の被害が目立った¹⁾。これは一般的に市町村の公共建築物が文教施設などに比べて耐震診断実施率・耐震化率が低いことに起因していると考えられる（第七章で説明）。

被災した公共建築物について被災度区分判定²⁾による詳細な調査を行い、被害の特徴と被害が生じた構造的要因について検討を行った。また、いくつかの公共建築物については構造図面や耐震診断資料等を収集し、建物に入力された地震動と確認された建築物被害の関係について解析的な検証を行っている。

表 3-1 に調査を行った公共建築物の被災度区分判定結果を示す。調査した公共建築物は 12 棟であり、うち 5 棟が大破、2 棟が中破、3 棟が小破であった。また、応急危険度判定結果が「危険」であり、被災箇所のみ調査した建築物 2 棟を含んでいる。

これらの建築物はいずれも旧耐震基準(1980 年以前)で設計されており、約半数が耐震診断を行っておらず、耐震補強も 1 棟を除いて実施されていなかった。耐震補強した建築物の被害については構造計画に起因する部分が大きいと考えられる。

表 3-1 被災した公共建築物の被災度区分判定結果

県名	竣工	階数	耐震診断	被災度	耐震性能残存率
岩手	1963	3 階	済	大破	57.8%
福島	1967	6 階	済	小破	81.0%
	1960	3 階	済	大破	26.7%
	1970	4 階	済	大破	38.2%
	1958	2 階	済	小破	93.9%
栃木	1961	3 階	未	小破	87.7%
茨城	1974	2 階	不明	「危険」	
	1969	2 階	済(補強)	大破	59.4%
	1958	3 階	未	中破	68.9%
	1966	2 階	未	中破	63.1%
	1964	3 階	未	大破	37.6%
		4 階	未	「危険」	

2) 1995 年兵庫県南部地震の被害分類との比較

2011 年東北地方太平洋沖地震の被害分類を、1995 年兵庫県南部地震の被害分類¹³⁾と比較して、表 3-2 に示す²³⁾。東北地方太平洋沖地震では兵庫県南部地震で見られた部材レベルの被害(表の 1)~12)を除いてほぼ全ての被害が見られているが、建築物の層レベルでの破壊(表の 13)~22)に示す)に関しては多くの種類は見られていない。また、層レベルの被害は現行耐震基準により設計された建築物では見られていない。今回の地震で、層レベルの破壊に関する項目の数が少

ないのは、多くの地点でごく短周期側の応答加速度が卓越する特性の地震動が記録されており、兵庫県南部地震の鷹取の記録のように、建築物が破壊に至るような周期帯のパワーが大きくなかったことが考えられる。今後、建築物の破壊に影響を及ぼすような周期帯の成分が卓越する地震動が発生する可能性はあり、今回の地震動のみで、個々の建築物の構造安全性が検証できたとは必ずしも言えない。

表 3-2 1995 年兵庫県南部地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震で確認された RC 造建築物の被害分類の比較²³⁾

	1995 年兵庫県南部地震で見られた RC 造建築物の被害の分類(文献 13)を基に整理)	被害の有無 [*]	
		1995 地震	2011 地震
建築物の部材レベル	1) 柱のせん断破壊	○	○
	2) 柱の曲げ圧壊	◎	◎
	3) 柱頭・柱脚の曲げ破壊(含:引張・圧縮の軸力による破壊)	◎	◎
	4) 柱段落とし部の軸降伏	◎	—
	5) 柱帯筋端部 90°フックの定着破壊	○	○
	6) 柱や梁の付着割裂破壊	○	○
	7) 梁のせん断破壊(含:有開口)	◎	○
	8) 壁のせん断破壊(含:有開口)	◎	◎
	9) 壁の曲げ破壊	◎	◎
	10) 柱はり接合部のせん断破壊	◎	△
	11) 鉄筋のガス圧接部の破壊	○	—
	12) 集合住宅の非構造壁の損傷	◎	◎
建築物の層レベル	13) ピロティ階の崩壊または大破	◎	○
	14) 壁の偏在に起因する振れ応答による隅柱等の破壊	○	○
	15) 低層建築物での中間の特定階の崩壊・大破	○	○
	16) 中高層建築物での中間の特定階の崩壊・大破	○	—
	17) セットバックの影響による層崩壊	○	—
	18) 建築物全体の転倒	○	—
	19) パンケーキ状の崩壊	○	—
	20) 隣接建物との衝突	○	—
	21) 異種構造間での破壊	◎	—
	22) ペントウスの傾斜、転倒、落下	○	○
	23) プレキャストコンクリート屋根の落下	○	—

※「被害の有無」の欄には、該当する被害が 1995 年兵庫県南部地震、もしくは、2011 年東北地方太平洋沖地震で見られた場合に○を、見られなかった場合に—を記す。なお、破壊までは至っていないがある程度の損傷が見られたものには△を記し、現行耐震基準により設計された建築物に被害が見られたものには◎を記す。

IV 鉄骨造体育館建築物の被害と特徴

1) 学校体育館の被害形態と特徴

1-1) 学校体育館の調査方法と分類

2011年東北地方太平洋沖地震に対する鉄骨造建築物の調査は、地震後の2週間程度で、茨城県から宮城県の広範囲な地域における事務所等の一般的な鉄骨造建築物について主に外観による被害の確認を行った。その調査からは、一部の自走式駐車場のように構造躯体が露出している鉄骨造建築物では柱脚の損傷やブレースの座屈などの被害を確認することができた。

しかし、一般的に、鉄骨造建築物では構造躯体が内外装材等の仕上げ材に覆われているため、外観調査からは、柱、梁等の構造躯体の被害の実態を正確に把握できない可能性があった。そのため、3月下旬からは、構造躯体が露出して、避難所としても重要な役割を担っている学校体育館を対象を絞って、内部も含めた詳細な調査を実施した。2004年新潟県中越地震の際にも学校体育館の調査を実施していることから、その調査結果^{14)~16)}との比較も行った。

ここでは、学校体育館の被害形態及び被災度区分判定結果に基づいた特徴を示し、体育館の被害から得られた設計上の留意点等について述べる。

学校体育館の地震被害調査は、茨城県内の旧耐震基準及び現行耐震基準の小学校、中学校、高等学校体育館を対象とした。それらの調査地域を表4-1に示す。まず広範囲の地域の旧耐震基準による高等学校体育館の調査を行った。その調査結果から、内陸地域よりは震源に近い太平洋沿岸地域で被害が多いことが確認できたため、現行耐震基準の高校体育館については、沿岸付近の震度6弱以上の地域を中心として調査を行った。また、高校より建物の規模が小さいと考えられる小、中学校の体育館の調査は、水戸市内の体育館を対象とした。

表4-2に、調査した高校及び小、中学校体育館それぞれについて、旧耐震基準、現行耐震基準、耐震改修に対応する体育館の棟数を示す。調査数は89棟で、そのうち旧耐震基準は55棟(61%)、現行耐震基準は29棟(33%)、耐震改修5棟(6%)である。また、約6割が高校体育館である。表中の「2階建て」とは、床により階が完全に区切られ、2階がアリーナとなっている体育館であり、規模が大きい。このような2階建ての体育館は現行耐震基準の高校体育館に多い。また、小・中学校体育館は、全て1階建てである。

体育館の構造形式を、1)下部RC造ギャラリーから上部鉄骨(S)造(以下、下部RC造上部S造と呼ぶ)、2)純S造、3)RC

造屋根のみS造、の3種類に分類し、その棟数(割合)を、図4-1(a)旧耐震基準、(b)現行耐震基準に示す。旧耐震基準の体育館では、下部RC造上部S造、純S造はそれぞれ35%程度で、RC造屋根のみS造が22%程度であるのに対して、現行耐震基準の体育館では、RC造屋根のみS造の体育館の割合が80%以上になっている。

表4-1 調査地域一覧

	旧基準	現行基準
高校体育館	大洗町、城里町、日立市、水戸市、那珂市、ひたちなか市、銚田市、筑西市、笠間市、土浦市、坂東市、古河市、下妻市、筑西市、常総市	日立市、常陸太田市、常陸大宮市、水戸市、那珂市、銚田市
小・中学校体育館	水戸市	水戸市

表4-2 調査体育館の棟数の耐震基準別内訳

	高校体育館		小、中学校体育館		計
	1階建て	2階建て	1階建て	2階建て	
旧基準	34棟	1棟	20棟	0棟	55棟(61%)
現行基準	1棟	11棟	17棟	0棟	29棟(33%)
耐震改修	5棟	0棟	0棟	0棟	5棟(6%)
計	52棟(58%)		37棟(42%)		89棟

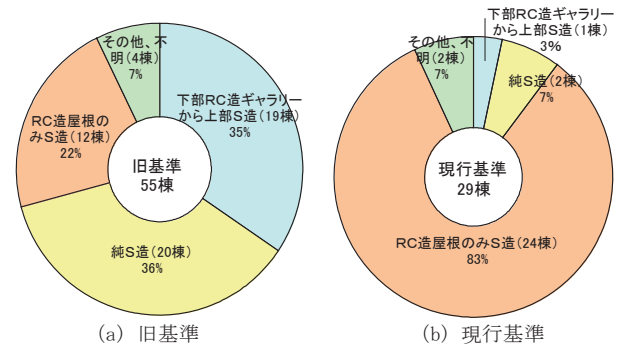


図4-1 調査体育館の構造形式

1-2) 旧耐震基準の体育館

表4-2で示した調査体育館のうち、旧耐震基準の体育館55棟の被害を、以下の1)~7)のように分類した。このうち、1)~6)は構造的な被害を分類したものであり、7)は非構造部材の被害についてまとめて示したものである。

- 1) 鉛直ブレース材の座屈、破断と接合部の破断
- 2) ラチス柱の斜材の座屈

3) RC造柱と屋根の接続部（支承部）のコンクリートのひび割れ

4) 屋根面水平ブレースのたわみ、座屈、破断

5) 柱脚コンクリートのひび割れ

6) その他（床束の転倒等）

7) 天井、外壁等の脱落、窓ガラスの破損等の被害

構造的な被害として、1)と2)の被害は、被災度区分判定では、大破に分類される。1)の鉛直ブレース材の座屈、破断と接合部の破断は、これまでの地震被害調査でも、旧耐震基準の体育館では、たびたび観察された被害であり、基本的には、ブレース材自体の耐力不足や保有耐力接合が適切に行われていないこと等に起因する被害である（写真4-1）。2)は、ラチス柱の張間方向で生じた斜材の座屈の被害である（写真4-2）。このような、張間方向での柱の座屈の被害は、1棟で見られただけであり、2004年新潟県中越地震では確認できなかったことから、被害の形態としては稀な被害と考えられる。3)から6)の被害は、被災度区分としては、小破程度に分類される比較的軽微な被害である。

非構造部材の被害としては、天井、照明の脱落、外壁の脱落、内壁の脱落、軒天の脱落、窓ガラスの破損など、比較的大きな被害が観察された。天井が広範囲に脱落したものが4棟程度あり、特に、小、中学校の体育館に比べ、高校の体育館では、広範囲での脱落等、大きな被害が観察された。

1-3) 現行耐震基準の体育館

表4-2で示した調査体育館のうち、現行基準の体育館29棟の被害を、以下のa)~d)のように分類した。このうち、a)~c)は構造的な被害であり、d)は非構造部材の被害である。

- a) 妻壁とS造屋根の接続部（接合部）のボルト抜け出し、変形
- b) RC柱とS造屋根の接続部（支承部）のコンクリートの剥落
- c) 屋根面水平ブレースのたわみ



写真4-1 ブレースの破断、座屈



写真4-2 ラチス柱斜材の座屈



写真4-3 RC柱とS造屋根接続部被害



写真4-4 妻壁とS造屋根接続部のアンカーボルト抜け出し

d) 天井材の脱落、破損

妻壁とS造屋根の接続部やRC柱とS造屋根の接続部など、RC造柱とS造屋根の接続部分で、比較的多くの被害が観察された（写真4-3、4-4）。これらの被災度区分判定結果は、小破から中破程度に区分されるものである。天井材の被害は、広範囲に脱落したものも含め、比較的多くの体育館で破損や脱落の被害が観察された。

1-4) 耐震改修の体育館

表4-2で示した5棟の耐震改修建物のうち、4棟がV型のブレース補強、1棟がX型のブレース補強であり、5棟とも無被害（軽微含む）であった。

2) 被災度区分判定結果に基づく分析

ここでは、被害調査を行った全ての体育館の被災度区分判定結果を、耐震基準（新・旧耐震基準および耐震改修）と震度か

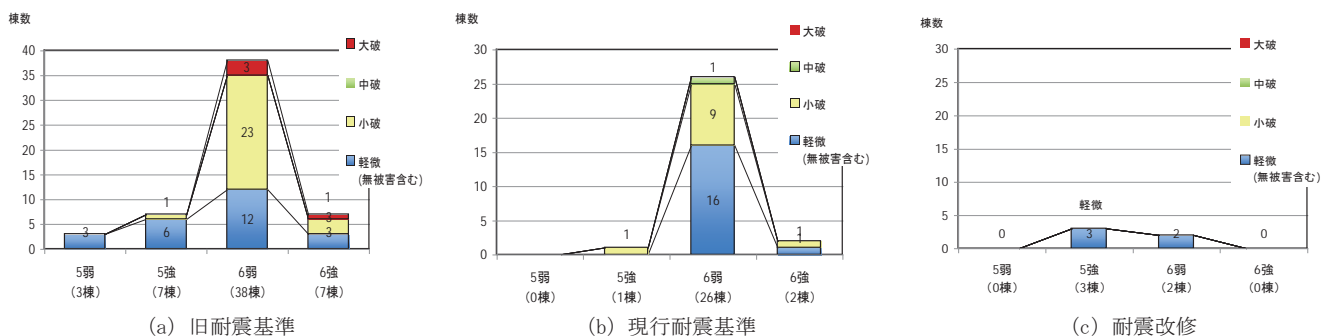


図4-2 震度区分毎の被災度(総合判定)の棟数

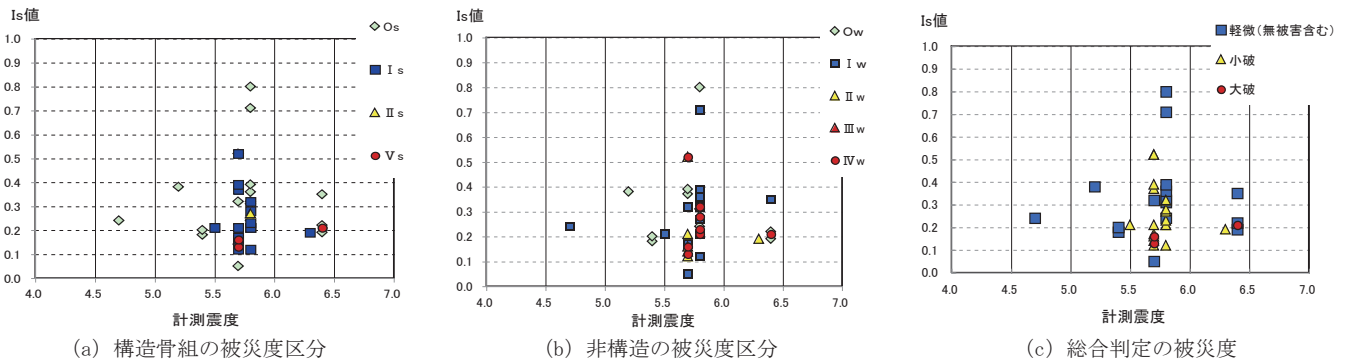


図4-3 計測震度とIs値と被災度の関係

ら分析した。

2-1) 震度と被災度の関係

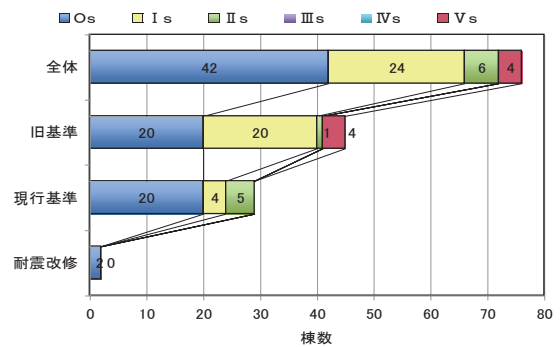
調査した体育館について、最寄りのJMAやK-NET等の観測地点での震度を調査し、震度と体育館の被災度の状況を図4-2にまとめた。(a)は旧耐震基準、(b)は現行耐震基準、(c)は耐震改修の結果である。図(a)の旧耐震基準の体育館では、震度5の地域では、ほとんどが軽微な被害または無被害であった。震度6弱の区域では、2/3以上が小破の被害であるが、大破は3棟だけである。図(b)の現行耐震基準の体育館は、概ね震度6弱以上の地域で調査が行われ、中破と判定された1棟が確認されたが、調査体育館の半分以上が軽微または無被害であった。図(c)の耐震改修体育館では、調査された5棟全てが軽微または無被害であった。

2-2) 震度、Is値と被災度の関係

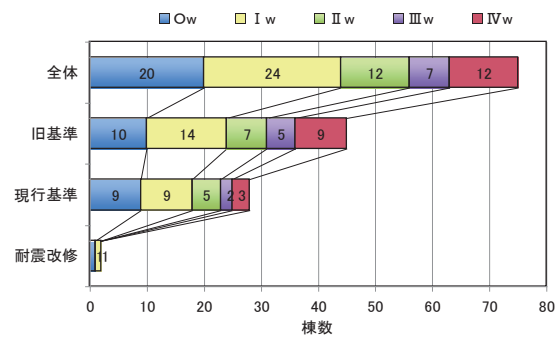
調査を行った旧耐震基準の体育館55棟のうち、37棟については、耐震診断が行われ、構造耐震指標Is値¹⁷⁾が得られている。図4-3には、各体育館の最寄りの地点で観測された計測震度を横軸、体育館のIs値を縦軸として、体育館の被災度を区別してプロットした。図(a)は、構造骨組の被災度を示し、計測震度が5.5~6の範囲には、比較的多くプロットがあり、その範囲では、Is値が小さいほど大きな構造被害ランクとなる傾向が見られる。図(b)は、非構造部材、仕上げの被災度であり、非構造部材の被害ランクとして大きな被害であるIIIwとIVwは、Is値が0.1~0.5程度の範囲に分布しており、Is値が比較的大きい建物においても、非構造部材の被害が大きい場合がある。図(c)の総合判定(構造骨組被害と非構造部材被害の両方を考慮して決定される)の被災度は、図(a)と同様の傾向であり、Is値が小さいほど、大きな被災度ランクになるような傾向が見られる。

2-3) 耐震基準と被災度の関係

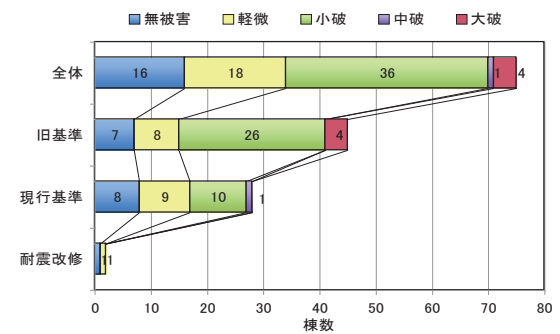
図4-4に耐震基準毎の被災度の棟数の状況を示す。ここでは、



(a) 構造骨組の被災度区分の棟数



(b) 非構造部材の被災度区分の棟数



(c) 総合判定の被災度区分の棟数

図4-4 耐震基準毎の被災度区分の棟数

なるべく同程度の震度における体育館の被災度を比較するため、震度 6 弱以上の体育館を検討対象とした。図(a)は構造骨組の被災区分、図(b)は非構造部材、仕上げの被災度区分、図(c)は総合判定の被災度である。図(a)から、大きな被害ランクであるVsは、旧耐震基準の体育館で見られたが、その数は 4 棟である。現行耐震基準の体育館では、構造骨組の被災度は、II s 以下である。I 以上の被害の割合を比較すると、旧耐震基準は 55%で、現行耐震基準では 30%程度である。図(b)から、旧耐震基準、現行耐震基準ともに、非構造部材に関しては、全ての被災度区分の被害が生じていることがわかる。現行耐震基準の方が大きな被害の割合はやや少なくなっているが、旧耐震基準と現行耐震基準の被災度の状況はそれほど変わらない。図(c)において、旧耐震基準で大破と判定されたものは 4 棟であるが、割合としては 1 割弱である。小破以上の被害の割合を比較すると、旧耐震基準は 65%、現行耐震基準は 40%程度で、現行耐震基準では被害率が小さくなっている。大破などの大きな被害に関して、2004 年新潟県中越地震における調査では、旧耐震基準の体育館の大破の割合は 3 割程度であり、今回の調査における大破の被害率は、新潟県中越地震の調査結果よりも小さい。

2-4) RC 柱及び妻壁と屋根接続部（支承部）の被害

図 4-5 に、RC 柱及び妻壁と屋根接続部の被害について、構造の被災度区分としての棟数を示す。RC 柱と S 造屋根の接続部の被害は、構造の被災度区分 I s または II s ランクの被害である。現行耐震基準でも、25%程度の被害率でこのような被害が発生している。これらの旧耐震基準と現行耐震基準の被害の内訳を図 4-6 に示す。旧耐震基準の被害は、接続部のコンクリートの剥離程度であるが、現行耐震基準では、妻壁との接続部でボルトの抜けだし、変形等の被害が見られた（妻壁と屋根の接続部の被害は、屋根水平プレースの破断と同様の被災度ランクとした）。

V 木造建築物の被害と特徴

1) 調査地域と被害概要

震災直後の 3 月 14 日から計 7 回、木造建築物を中心とした被害調査を実施した。調査地域は、図 5-1 に示すように、宮城県では震度 7 が計測された宮城県栗原市をはじめとして、4 県 13 市町である。被害の全体像を把握するため、主として市役所または町役場において応急危険度判定の実施状況や市内または町内の建築物の被害状況と被害形態、被害の大きな地区に関する情報収集を行い、被害地域の建築物について外観調査を実施し

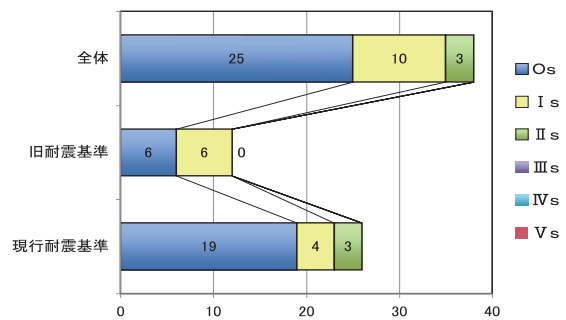


図 4-5 RC 柱及び妻壁と屋根接続部被害の被災度区分の棟数

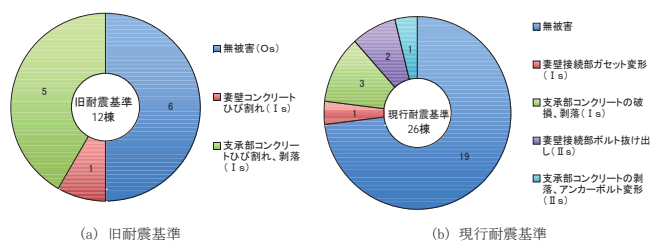


図 4-6 RC 柱及び妻壁と屋根接続部被害の内訳

た。その後、個別建築物の構造仕様や被害状況に関する詳細情報を収集する調査を実施した。

調査範囲内での木造建築物の被害形態としては、「地震動の揺れに起因」する被害と、「地盤の変状に起因」する被害に大別される。地震動の揺れに起因する被害として、以下のものが挙げられる。

- i) 棟瓦や瓦の脱落等
- ii) 内装材・外装材の割れや脱落
- iii) 残留変形
- iv) 倒壊

今回調査を行った地域の多くで屋根瓦の被害が観察された（写真 5-1）が、福島県や茨城県で被害が多く見られた。

地震による建築物の揺れが大きくなるに従い、内装材及び外装材の割れや脱落といった被害が見られ（写真 5-2）、さらに揺れが大きくなると建築物に残留変形が残る（写真 5-3）。特に店舗併用住宅では、耐力壁の平面的配置が悪いため、壁の少ない

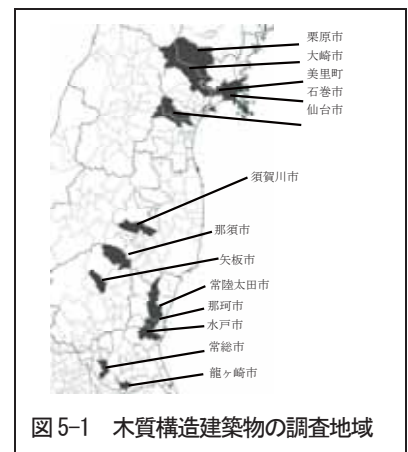


図 5-1 木質構造建築物の調査地域

構面に変形が集中し、大きな残留変形が残る例が多い。また2階建では、2階に比べ1階の残留変形が大きい場合が多いが、2階の残留変形が1階よりも大きい事例が数例確認された。

さらに揺れが大きくなると、地震力に対し耐力要素が不足している建築物では倒壊に至る(写真5-4)。今回の調査範囲では、須賀川市、大崎市、那珂市、常陸太田市等で建築物の倒壊が確認されている。

民家型の木造住宅でも大きな被害が確認された。那珂市の築100年の民家型の木造住宅では、耐震要素として土塗り垂れ壁と4段貫による板壁が確認されたのみであり、最大で約1/3.5傾斜しており、柱は垂れ壁の下端部の足固め部でほとんどが折損していた(写真5-5、5-6)。柱脚は礎石の上に固定されていない。

今回の調査地域では、校舎等の大規模木造建築物の地震被害も複数確認され、現在廃校舎となっている2階建木造校舎の2階部分が漸行方向の両端の壁面を残して完全に崩壊していた(写真5-7)。

昭和60年代に建設された湾曲集成材を用いた木造体育館では、鋼製ブレースの伸び・座屈、ブレース端部の基礎コンクリートの破損、ひび割れが確認された(写真5-8)。写真5-9の木造校舎では、大断面の木製筋かい端部のはずれ等が確認された(写真5-10)。

地盤の変状に起因する被害は、敷地や擁壁の崩壊が起こる際に基礎が損傷し、それに伴い建築物に被害が生じるものであり、敷地の崩壊や擁壁の崩壊に伴う基礎や壁面の損傷(写真5-11)、さらに建築物の傾斜・崩壊(写真5-12)が複数確認されている。



写真5-1 屋根瓦の被害



写真5-2 外装材の脱落



写真5-3 建築物の傾斜 (残留変形)



写真5-4 建築物の倒壊



写真5-5 民家型住宅の被害



写真5-6 写真5-5の住宅の柱の折損



写真5-7 2層が崩壊した木造校舎



写真5-8 ベースプレート部基礎の被害



写真5-9 木造校舎の外観



写真5-10 写真5-9の筋かい端部のはずれ

今回の地震被害調査で確認された瓦の脱落、内外装材の損傷、建物の傾斜・倒壊といった木造建築物の被害は、過去の地震被害で確認された被害形態と同様のものであった。また地震動の揺れに起因する被害を受けた木造建築物は、旧耐震基準で設計された木造建築物と考えられ、耐震補強の重要性が改めて確認された。



写真 5-11 敷地等の崩壊に伴う基礎の被害



写真 5-12 敷地等の崩壊に伴う建物の被害

2) 地震応答解析による被害の検証

観測された強震記録を用い、2階建て木造住宅に対して、各階の壁量及び1、2階の床面積比をパラメータとして地震応答解析を行った。ここではK-NET古川で得られた観測記録を用いた解析結果について紹介する。

対象とした建物は、2階建て木造の「総2階」及び「部分2階」の2種類である。床面積比は1階：2階=1：0.7と仮定した。重い屋根を想定した条件とし、固定荷重及び積載荷重は、表5-1に示す値を用いた。これらの値は、品確法における性能表示制度の評価方法基準で、耐震等級2以上における必要壁量の根拠とされる値である。

表 5-1 各部の重量の想定 (床面積 1㎡当たり N)

重い屋根の場合

屋根の重量	G1	1300
各階の外壁の重量	G2	1200
各階の内壁の重量	G3	200
各階の床の重量	G4	600
床の積載の重量	P1	610

地震応答解析は、上記の2種類の建物についてそれぞれ各階の壁量をパラメータとして、建築基準法施行令第46条に規定する必要壁量に対して、木造部分の各階の壁量充足率(R1)が各階独立に0.6から1.6の間、0.2刻みで変化するように、各階の剛性、耐力を変動させた。ただし耐力壁以外の寄与を考慮し、耐力壁の耐力の50%が耐力壁以外の部分で負担されるものと仮定して、耐力壁による荷重変形関係を1.5倍して層の荷重変形関係とした。応答解析に用いた骨格曲線及び履歴性状は、構造用合板耐力壁の実験結果をトレースする形で拡張NCLモデル¹⁸⁾にモデル化したものである。図5-2に、各壁量充足率に対応す

る1階部分の骨格曲線の例を示す。

一方、大崎市で詳細調査を行った部分2階建木造住宅4棟の壁量充足率(表5-2)は、1階NS方向が0.47~0.85、1階EW方向が0.46~0.88と充足率が1.0以下、2階の壁量充足率はNS方向、EW方向ともに1.0以上であり、調査建物は倒壊を免れていた。なお構造仕様の不明な無開口壁は、倍率1相当の耐力壁として扱って存在壁量を計算した。

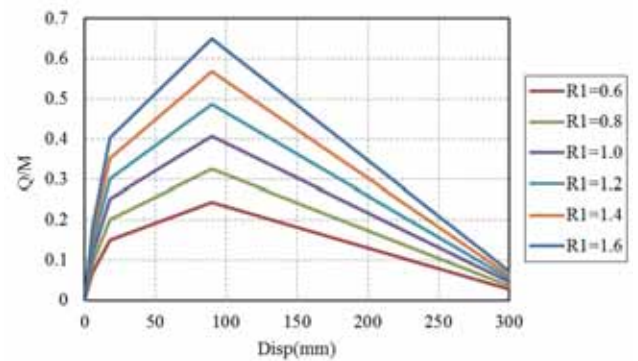


図 5-2 部分2階建木造住宅の1階部分の骨格曲線

表 5-2 詳細調査建築物の壁量充足率 (大崎市)

	床面積 (㎡)		壁量充足率			
	1F	2F	1F-NS	1F-EW	2F-NS	2F-EW
OS-1	90.9	52.2	0.50	0.68	1.41	1.41
OS-2	47.2	30.6	0.85	0.88	1.56	1.41
OS-3	77.8	60.5	0.74	0.80	1.29	1.51
OS-4	131.3	84.5	0.47	0.46	1.03	1.10

図5-3、5-4に、解析結果の一例を示す。K-NET古川EW方向及びNS方向の記録を入力した場合、壁量充足率が1.0より小さくなると急激に応答が増大する。特にK-NET古川EWでは、倒壊の危険性があると考えられる30cmを超える層間変位に達する解析結果となった。

実際の調査建築物は倒壊しておらず、応答解析結果とは差異

が生じている。この理由の一つの要因として、想定した解析モデルに比べ、調査建築物の構造性能が高いことが挙げられる。壁単体の荷重変形関係に雑壁の効果を考慮して建築物全体で1.5倍の耐力の割り増しを行っているが、仕上げ材の効果や立体効果など様々な要因により、調査建築物ではさらに高い耐力を有している可能性がある。

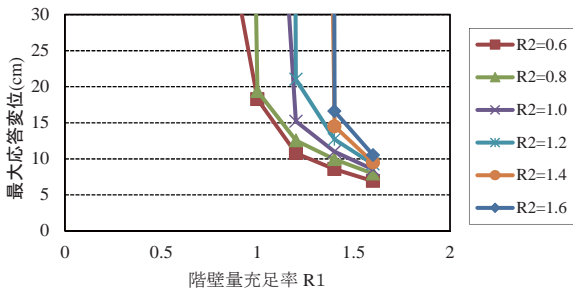


図5-3 K-NET 古川EW 部分2階建1階応答変位

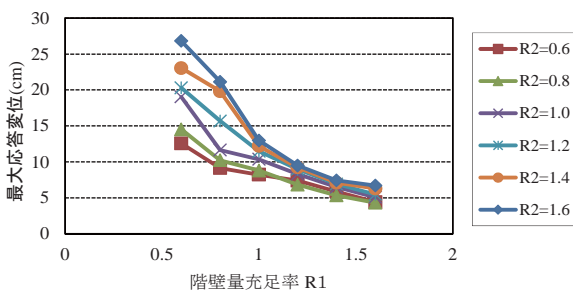


図5-4 K-NET 古川NS 部分2階建1階応答変位

VI 建築物の耐震化に向けた取り組み

ここでは、1981年の建築基準法改正から2006年の耐震改修促進法改正までの、建築物の耐震性の向上に向けた行政の取り組みをたどってみる。この期間の行政の対応等については、参考文献19、20（住宅の耐震化）および21（耐震改修促進法の改正）にまとめられている。また鉄筋コンクリート造に関する技術基準と地震被害については、参考文献22に詳しく述べられている。

1) 新耐震設計基準(1981年建築基準法改正)

1963年新潟地震や1968年十勝沖地震の被害を踏まえ、それまでの技術基準では構造安全性が十分に確保されない場合があるとの認識に立ち、建設省（現、国土交通省）は1972年より5ヶ年にわたる総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」を実施し、1977年3月に「新耐震設計法（案）」を作成した。その後発生した1978年宮城県沖地震がきっかけとなり、「新耐

震設計法（案）」を基として政令の耐震基準が抜本的に改正され、「新耐震設計基準」（現行耐震基準）が1981年6月に施行された。

新耐震設計基準では、二次設計の導入と地震力規定の全面的な見直しが行われた。許容応力度や保有水平耐力に基づいた、2段階の耐震目標が設定された。

①耐用年限中に数度は遭遇する程度の中地震に対しては、ほとんど損傷しない（建築物の機能を保持）

②耐用年限中に一度遭遇するかもしれない程度の大地震に対しては、倒壊・崩壊しない（建築物の架構に部分的なひび割れ等の損傷が生じて、崩壊からの人命を保護する）

また地震力の規定については、各階に生じるせん断力（層せん断力）を、建築物の実際の揺れに対応させ、建設される地盤の硬軟（地盤種別）や建物の周期特性（振動特性係数、層せん断力係数の高さ方向の分布）に応じた数値が設定された。

2) 1995年兵庫県南部地震の建築物被害を踏まえた補足規定

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、主として旧耐震基準に基づいて設計された建築物に多くの被害が生じた。一方、現行耐震基準に基づき設計された建築物については、一部の形式の建築物を除いて適切に倒壊等を防ぎ人命を守ったことから、水準面ではほぼ妥当であることが検証された。しかしながら地震被害を詳細に見ると、不適切な設計・施工や剛性・強度のアンバランスさ、および品質管理の不備などにより、大きな被害に至った例も確認された。そこで、耐震設計上注意すべきポイントとして、「現行規定への補足」および「余裕のある設計等」が示された²³⁾。各構造のポイントは以下ようになる。

a) 鉄筋コンクリート構造

「現行規定への補足」としては、ピロティ構造の崩壊等に影響を及ぼした、1)壁等の剛性評価、2)耐力壁の適切な配置、に関するもののほか、3)柱の主筋量低減の禁止、4)せん断補強筋の端部定着仕様、5)柱はり接合部の設計、6)コンクリート強度の確保、等の項目が取り上げられた。また、「余裕のある設計等」としては、1)塑性化後の層の挙動を踏まえた設計の推奨、2)FD柱使用の制限、3)柱中子筋配筋の推奨、4)主筋段落とし部への横補強筋配筋の推奨、5)はりヒンジ部分のせん断補強筋の推奨配筋、6)PCaコンクリート屋根板の設計への留意事項、等が示された。

b) 鉄骨構造

「現行規定への補足」としては、1)露出柱脚または埋め込み柱脚の推奨や柱脚の十分な耐力と変形能力の確保、2)接合部の適切

な詳細と十分な耐力確保、等の項目が取り上げられ、「余裕のある設計等」としては、埋め込み柱脚が望ましいこと、柱脚や接合部の設計は保有耐力接合が望ましいこと、等が示された。

c)木質構造

「現行規定への補足」としては、1)耐力壁の釣り合いよい配置、構成部材の確実な接合およびバランス良い配置、2)水平力により生じるせん断力や引き抜きに伴う引張力を有効に伝達するアンカーボルト、3)方づえの水平構面の適切なモデル化、4)継ぎ手・仕口の存在応力を伝達できる構造、5)腐朽防止のための対策、シロアリの進入防止処置や薬剤処理、等の項目が示された。また、「余裕のある設計等」としては、1)原則として鉄筋コンクリート造の布基礎が望ましいこと、2)通し柱には隣接して両方向に耐力壁を設けること、3)アンカーボルトに全体転倒による引き抜き力が生じないこと、および水平力による生じるせん断力や引き抜きに伴う引張力を有効に伝達すること、4)防腐・防蟻対策の効果の持続性のための適切な維持管理、等が示された。

3) 耐震改修促進法

3-1) 耐震改修促進法の成立

1995年兵庫県南部地震では6,400人を超える方が犠牲となり、約21万棟の家屋が全半壊した。阪神・淡路大震災の死者の大半は、住宅・建築物の倒壊等によるものであったことから、建築物の耐震性の確保が強く認識された。また、図6-1に示すように、現行耐震基準施行以後に設計された建築物の被害程度は比較的軽く、現行耐震基準は、概ね妥当なものと考えられた²⁴⁾。

この教訓をもとに1995年12月に「建築物の耐震改修の促進に関する法律（耐震改修促進法）」が施行され、現行耐震基準を満たさない建築物について積極的に耐震診断や耐震改修を促進することとなった²¹⁾。

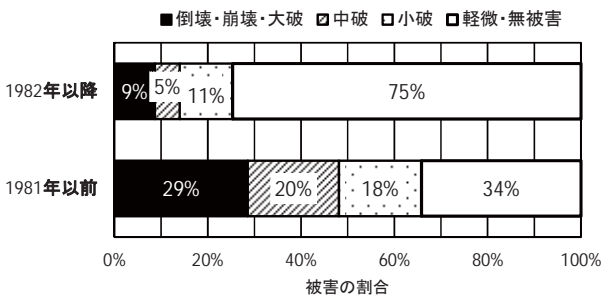


図6-1 推定建築年別建築物の被災度ランク²⁴⁾

3-2) 地震被害軽減を目指した政府戦略と耐震改修促進法の改正

2004年7月に示された、中央防災会議の「平成17年度の防災対策」の項目に、以下の内容等が示された²⁵⁾。

- i) 地域の防災拠点となる公共施設及び住宅等の耐震化
- ii) 地域や企業の防災力の向上

上記i)では、建築物の耐震化の促進させ、ii)では、地域住民や企業等の防災まちづくりや企業の業務継続計画の普及促進等、防災力向上を図ることである。

これを受けて、2005年3月の中央防災会議では、「地震防災戦略の策定」を行い、巨大地震（東海地震、東南海・南海地震）対策において、2005年からの10年間で、死者数及び経済被害額を半減することを目標に、建築物の耐震改修を推進し、住宅の耐震化率を90%とすることが定められた²⁶⁾。

2005年2月、住宅・建築物の耐震化の目標の設定及び目標の達成のための施策について検討を行うために、国土交通省に「住宅・建築物の地震防災推進会議」が設置され、同年6月に提言がまとめられた²⁷⁾。この提言を踏まえ、同年11月、耐震改修促進法が改正（2006年1月施行）された²¹⁾。本改正には、以下の項目が追加された。

- 1)国土交通大臣による基本方針の策定及び地方公共団体による耐震改修促進計画の策定
- 2)地方公共団体による耐震改修等の指導等の対象に、多数の者の円滑な避難に支障となるおそれがある建築物の追加
- 3)地方公共団体による耐震改修等の指示等の対象に、幼稚園、小中学校、老人ホーム等の追加及び建築物の規模要件の引き下げ
- 4)耐震改修支援センターによる債務保証、情報提供等の実施

VII 建築物の耐震化に関する現状と課題

1) 近年の建築物の耐震化率の動向

ここでは、現在建築物の耐震化がどの程度進んでいるか、いくつかの資料に基づいて要約する。

1-1) 防災拠点となる公共施設等の耐震化

防災拠点となる公共施設等の耐震化率については、消防庁で調査されており²⁸⁾、H22年度末で、75.7%となっている。ここで耐震化率の算定に用いる耐震性のある建築物には、以下の建築物が含まれる。

- ・現行耐震基準（昭和57年以降）による棟数（B）
- ・旧耐震基準（昭和56年以前）による建築であるが、耐震診

断により耐震性が確認されている棟数 (C)

・既に耐震改修が行われている棟数 (D)

一方、耐震性のないまたは不明の建築物は、耐震診断で耐震性がないと判定されたが、耐震改修が行われていない棟数および耐震診断を行っていない棟数が含まれる。

全棟数を A とすると、ここで示す建築物の耐震化率の算定は以下の式に基づいている。

$$\text{建築物の耐震化率} = (B + C + D) / A$$

防災拠点となる公共施設等の耐震化率の推移は、図 7-1 となる。H22 年度の集計には、岩手県、宮城県及び福島県並びにこれら 3 県内の市町村のデータは除かれている。年々、耐震性を有する建築物が増加している。H22 年度末における、耐震化率 75.7%の内訳は、表 7-1 となる。47.1%が、現行耐震基準で設計された建築物であり、耐震改修済みの棟数は 17.8%となる。まだ 24.3%の建築物には耐震性がない、あるいは未定となっており、これらの建築物への早急な対応が必要となる。

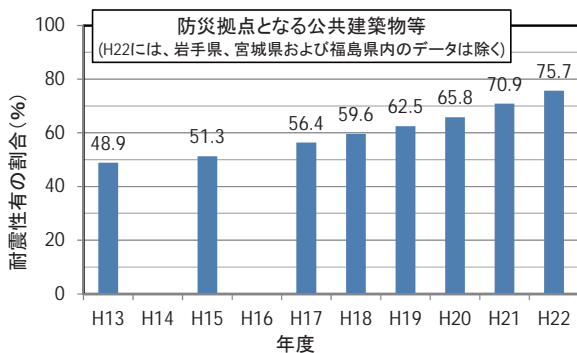


図 7-1 防災拠点となる公共施設等の耐震化率の推移²⁸⁾

表 7-1 防災拠点となる公共施設等の耐震化率内訳²⁸⁾

設計時期	耐震改修等の実施の有無	棟数	比率 (%)	耐震性の有無
S57年以降の建築物 (新耐震基準)	—	84,620	47.1	耐震性有 (75.7%)
	耐震性満足	19,378	10.8	
S56年以前の建築物 (旧耐震基準)	改修済み	31,862	17.8	耐震性無または 不明 (24.3%)
	改修未定	25,195	14.0	
	耐震診断未実施	18,436	10.3	

ただし、岩手県、宮城県および福島県内のデータは除く

図 7-2 には、防災拠点となる公共施設等における、施設毎の耐震化率を示している。施設による差があり、文教施設、消防施設などは耐震化が進んでいる。一方、庁舎、公民館、体育館等の施設の耐震化は進んでいない事が分かる。

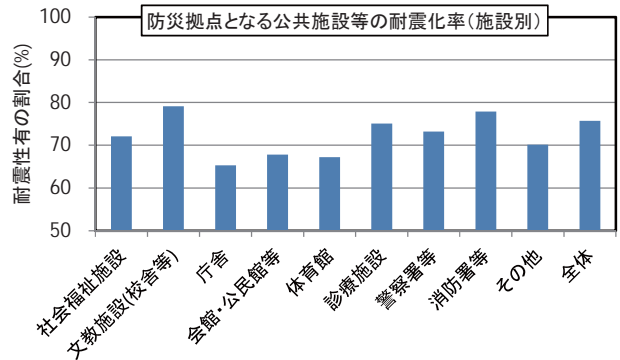


図 7-2 防災拠点となる公共施設等の施設別耐震化率²⁸⁾

1-2) 住宅の耐震化

表 7-2 に、住宅および多数の者が利用する建築物 (特定建築物：学校、病院、百貨店等の多数が利用する一定規模以上の建築物) の、5 年毎の建築物の耐震化率の推移 (目標) を示す²⁹⁾。住宅等の耐震化の状況については、国土交通省で 5 年毎にまとめられており、2008 年時点の耐震化率は、住宅が約 79%、特定建築物が約 80%となっている。耐震改修促進法に基づく国の基本方針において、2003 年の 75%から 2015 年までに少なくとも 9 割とする目標が定められており、さらに、政府の「新成長戦略(2010.6.18 の閣議決定)」及び「住生活基本計画(2011.3.15 の閣議決定)」においては、住宅の耐震化率を 2020 年までに 95%とする新たな目標も定められた。

表 7-2 住宅や特定建築物の耐震化率の推移と目標²⁹⁾

年度	2003	2008	2015(目標)	2020(目標)
住宅	75%	79%	90%以上	95%
多数が利用 する建築物	75%	80%	90%以上	—

2) 地震被害を踏まえた建築物の耐震化

2011 年東北地方太平洋沖地震における建築物の構造被害の特徴を踏まえ、構造被害の軽減対策、設計上の留意点を示す。

a) 鉄筋コンクリート構造

大破と判定された建築物では、明らかに軸変形が分かるような短柱のせん断破壊や耐震壁のせん断破壊の発生が大きな被害につながった。いずれも、せん断補強筋に関する規定が強化される前の 1971 年以前の旧耐震基準で設計された建築物で、柱に十分なせん断耐力が確保されていない上に、腰壁、垂壁の存在

により柱が短柱化してせん断破壊に至ったものである。これらの被害に対しては、例えば、腰壁、垂壁と柱の間にスリットを設けるなどの簡易的な耐震改修でも、ある程度の効果を期待できると考えられる。

また、今回被害が見られた庁舎建築物を含む防災拠点となる公共施設に対する耐震改修が住宅等に比べて遅れていることもあり、災害時にこそ機能を維持すべき庁舎建築物への早急な対策が望まれる。

また、小破や中破と判定された建築物でも、非構造壁（コンクリートブロック造壁）の破壊、外装材（ガラス）の落下、方立て壁のせん断破壊などの非構造部材の被害により、庁舎の使用を見合わせているケースも見られた。構造躯体みならず、非構造部材の耐震性の確保も必要となる。

b)鉄骨構造

旧耐震基準の体育館で大破と判断された被害は、鉛直ブレース材の座屈、破断と接合部の破断、及びラチス柱の斜材の座屈である。これらの被害は、ブレース部材や柱部材の耐力不足や接合部の保有耐力接合が行われていないことが、主な原因と考えられる。今回の調査の範囲では、ブレースの補強による耐震改修が行われていた体育館では、全て無被害であったことから、旧耐震基準の体育館については、早急に適切な耐震改修を行うことが必要である。

現行耐震基準の体育館では、RC柱・妻壁とS造屋根の接続部で、コンクリートの剥落やボルトの抜け出し・変形の被害が見られた。茨城県内の現行耐震基準の体育館のほとんどがRC造屋根のみS造の構造形式であることから、RC柱の保有水平耐力を算定し、その力が屋根に伝達するように設計する方法^{30),31)}や略算的にベースシャー係数0.55のAi分布で屋根部分に作用する設計用地震力を決定し、それによって屋根部分や接続部を設計する方法³¹⁾等が示されているので、それらを参照し、この部位の地震被害を軽減する必要がある。

一部の体育館では、天井が広範囲に脱落したものがある。特に、比較的規模の大きな高校の体育館で、広範囲での脱落等が見られ、構造躯体の地震時の揺れ等の影響を検討する必要がある。

現行耐震基準で設計された建築物については、被害程度が比較的小さかったことから、今回の地震動の範囲では、層レベルでの倒壊や崩壊は免れている。今回の地震動の多くは、短い周期域の応答加速度が卓越する特性を有しており、1995年兵庫県南部地震の地震動のように、建築物が破壊に至るような周期帯

のパワーが大きいはなかったことが考えられる。現在、次の巨大地震（東海地震、東南海・南海地震）の発生や首都直下地震の発生が危惧されており、これらの地震により、建築物の破壊に影響を及ぼすような周期域を多く含んだ地震動が発生する可能性もあり、安心する訳にはいかない。

1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震では、旧耐震基準の建築物に大きい被害が見られたことにより、建築物の耐震改修が必要であることが地震のたびに、認識させられる。防災拠点となる公共施設の建築物についても、年々耐震化率が増加しており、学校などの文教施設や消防施設などは耐震化が進んでいる。一方、庁舎、公民館、体育館等の施設の耐震化はやや遅れており、事業継続性の観点からも、地震後に機能を発揮する必要がある行政防災拠点の耐震化も急務である。

構造躯体が小破や中破と判定された建築物でも、非構造壁の破壊、外装材の落下等非構造部材の被害も多く、建築物の使用を見合わせているケースも見られた。地震後における機能を維持するためにも、構造躯体の耐震性能の確保のみならず、非構造部材の損傷を制御できるような設計及び工法を取り入れることも重要である。

VIII まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震の地震動による建築物（鉄筋コンクリート構造、鉄骨構造、木質構造）の被害の特徴についてまとめた。被害程度が大きい建築物は、1981年以前の耐震基準（旧耐震基準）で設計された建物であり、1995年兵庫県南部地震の場合と同様に、耐震改修の必要性が確認された。

防災拠点となる公共施設の建築物の中でも、庁舎建築物の耐震改修がやや遅れており、地震後の防災拠点としての役割を担えない状況にある。予算を抑えた適切な耐震改修工法により、庁舎建築物等の機能維持を図る必要がある。

謝辞

現地の方も含め、多くの方に被害に関する情報を頂き、円滑な被害調査を行うことが出来ました。感謝を申し上げます。今回の地震被害を教訓として、建築物被害の低減に貢献出来るよう努力いたします。

参考文献と参照ウェブサイト

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、建築研究所：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報)(東日本大震災)、国土技術政策総合研究所資料 No.636、建築研究資料 No.132、2011.5
- 2) National Institute for Land and Infrastructure Management and Building Research Institute: Summary of the Field Survey and Research on "The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake" (the Great East Japan Earthquake), September, 2011, BRI Web, <http://www.kenken.go.jp/>
- 3) 気象庁：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」について(第 15 報)、2011.3
- 4) Historic World Earthquakes, Earthquake Hazards Program, U.S. Geological Survey (USGS), <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php>
- 5) 気象庁気象研究所：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定 -近地強震波形を用いた解析、2011.4
- 6) 防災科学技術研究所、強震ネットワーク K-NET <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 7) 鹿嶋俊英：公共建物における強震観測、建築防災、No.352、pp.9-14、2007.5
- 8) 建築研究所強震観測、<http://smo.kenken.go.jp/>
- 9) 鹿嶋俊英他：強震観測記録から推定した建物の振動特性の特徴、日本建築学会技術報告集、No.22、pp.163-166、2005.12
- 10) 日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、pp.23-24、2011.7
- 11) 例えば、日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、pp.402-438、2011.7
- 12) (財)日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針、2002.8
- 13) 平成 7 年阪神・淡路大震災 建築震災調査委員会報告書―集大成版―、1996.3
- 14) 平成 16 年新潟県中越地震建築物被害調査、国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所、pp.305-353、2006.10
- 15) 長谷川隆 他：新潟県中越地震における鉄骨造体育館被害調査 その 1 構造被害の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.569-570、2005.9
- 16) 西田和生 他：新潟県中越地震における鉄骨造体育館被害調査 その 2 非構造部材の被害状況の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.571-572、2005.9
- 17) (財)日本建築防災協会：2011 年改訂版 既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説、2011.9
- 18) 松永裕樹他：木質構造物の復元力特性のモデル化と動的解析への適用、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.201-204、2007.2
- 19) 国土交通省 Web、住宅・建築物の耐震化について、<http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/index.html>
- 20) 国土交通課(大塚路子)：住宅耐震化の現状と課題、調査と情報、国立国会図書館 ISSUE BRIEF No.568、2007.3
- 21) 改正・建築物の耐震改修の促進に関する法律・同施行例等の解説、ぎょうせい、2006.2
- 22) 福山洋：技術基準と地震被害、日本建築学会大会 RC 構造 PD 資料、日本建築学会、pp.50-60、2011.8
- 23) 建設省住宅局建築指導課監修、建設省建築研究所編集、日本建築センター発行、「阪神・淡路大震災における建築物の被害状況を踏まえた 建築物耐震基準・設計の解説」、1995.10
- 24) 建築震災調査委員会：平成 7 年阪神・淡路大震災 建築震災調査委員会中間報告、pp.76-78、1995.8
- 25) 内閣府・防災情報、2004.7 <http://www.bousai.go.jp/chubou/11/index.html>
- 26) 内閣府・防災情報、2005.3 <http://www.bousai.go.jp/chubou/12/index.html>
- 27) 国土交通省、住宅・建築物の地震防災推進会議、2005.6 http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/07/070610_.html
- 28) 消防庁：防災拠点となる公共施設等の耐震化推進状況調査結果、2011.12 http://www.fdma.go.jp/neuter/houdou_01/houdou23nen.html
- 29) 国土交通省：耐震化の進捗について、2011.1 http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo08_hh_000036.html
- 30) 学校施設の耐震補強マニュアル S 造屋内運動場編(2003 年改訂版)、文部科学省、2008.9
- 31) 実務者のための既存鉄骨造体育館等の耐震改修の手引きと事例、(財)日本建築防災協会、(社)建築研究振興協会、2005.7