

## 5.8 まとめ

本章では、東北地方太平洋沖地震における地震動による各種構造の建築物、地盤の液状化および非構造部材の被害調査結果とその分析結果を示した。その結果をまとめると、以下のようになる。

### (1) 鉄筋コンクリート造建築物

東北地方太平洋沖地震による RC 造建築物の被害形態を分類し、1995 年兵庫県南部地震による被害分類と比較した。部材レベルの被害としては兵庫県南部地震で報告されたものとはほぼ同じ被害が今回も発生したが、建築物の層レベルでの破壊は非常に少なく、特に現行耐震基準で設計された建築物でそのような被害は見られていない。今回確認された被害を技術基準の観点から見ると、その大部分に対しては、これまでの地震被害に基づく技術基準の見直し等により、対処されていると考えられる。

また、旧耐震基準で建設された被災 RC 造建築物 11 棟に対して詳細調査を実施し、確認された被害の概要及び傾向について考察した。短柱や耐力壁のせん断破壊のような重大な構造被害を受けた建築物もあれば、構造部材の損傷は比較的軽微であっても、非構造部材の被害やそれに伴う落下危険物の存在により、継続使用を見合わせたケースも確認された。既存建築物の地震時における機能維持のためには、耐震改修による構造安全性の確保だけでなく、非構造部材の損傷軽減の重要性が改めて示された。

併せて、詳細調査を実施した建築物の内の 3 棟に対して、静的漸増載荷解析および地震応答解析を実施した。短柱のせん断破壊により大きな被害を受けた建築物については、腰壁・垂れ壁に構造スリットを設けた場合についても解析を実施し、等価 1 自由度の応答が柱梁純フレーム構造物であれば十分靱性が期待できる層間変形角に収まることを確認した。原則として、耐震性が不十分な建築物に高い優先度を与えて耐震改修に取り組むべきであるが、工期、予算、耐用年数等の制約もあることから、一定以上の強度と靱性能が確認された純ラーメン建築物では、応急的に腰壁および垂れ壁に対する構造スリットを設ける工事を先行させ、短柱のせん断破壊を防止できれば地震被害の軽減に効果的であると考えられる。一方、偏心の大きな建築物について、耐力割増または偏心改善を行った建築物モデルを作成して地震応答解析を実施した結果、偏心改善モデルではねじれ挙動の改善が見られたものの、耐力割増モデルではそのような効果はあまり確認できなかった。限られた検討の範囲であるが、一般に偏心が大きな建築物に対しては、偏心の改善について検討することが推奨される。

### (2) 鉄骨造建築物

東北地方太平洋沖地震に対する茨城県内の学校体育館の被害の概要と被害形態等を示した。また、調査した体育館の被災度区分判定を行い、それに基づく分析結果を示すとともに、被害を軽減するための対策等を述べた。

旧耐震基準の学校体育館の構造被害を 6 種に分類した。鉛直ブレース材の座屈、破断と接合部の破断およびラチス柱の斜材の座屈等、大破に分類される棟数は 4 棟であり、調査棟数に対する大破の被害率としては 1 割弱であった。2004 年新潟県中越地震における、旧耐震基準の体育館の大破の割合は 3 割程度であり、大破の被害率は今回の方が小さい。

一方、現行耐震基準の体育館では、妻壁と S 造屋根接続部や RC 柱と S 造屋根支承部など、RC 造柱と S 造屋根接続部分で、コンクリートの剥落やボルトの抜け出し等の構造被害が比較的多く観察された。現行耐震基準の体育館では、旧耐震基準に比べて小破以上の被害率が少なく、大破と判定されたものもなかったが、このような被害を軽減するための対策が必要である。

調査の範囲では、旧耐震基準の設計で耐震改修された体育館は、震度 6 弱以上では 2 棟のみであったが、これらはいずれも、軽微及び無被害の被害ランクであった。

体育館の非構造部材の被害に関しては、旧耐震基準の体育館では、天井、照明の脱落、外壁の脱落等、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 棟程度あった。また、現行耐震基準の体育館では、広範囲に脱落した天井の被害も含め、比較的多くの体育館で破損や脱落の被害が観察された。天井被害に関しては、旧耐震基準と現行耐震基準による大きな被害の差はないが、被災度 IIw 以上の比較的程度の大きな被害の割合は、現行耐震基準の方がやや多くなっていた。

Is 値と被災度の関係については、Is 値が小さいほど、大きな構造被害ランクになる傾向は見られた。一方で、非構造部材の被害については、被害程度の大きな区分である IIIw と IVw の被害は、Is 値が 0.1~0.5 程度の範囲に分布し、Is 値が大きくても、非構造部材の被害が大きかった。

### (3) 木造建築物

木造建築物の被害の概要調査、並びに被災木造建築物の詳細調査、壁量の検討、地震応答解析の結果を行った。その結果をまとめると以下となる。

地震動による被害は、宮城県大崎市、福島県須賀川市、栃木県那須郡那須町、茨城県常陸太田市、那珂市などで多く確認された。宮城県栗原市では、震度 7 を記録したにもかかわらず、過去に震度 7 を記録した地震での被害と比べて大きくなかった。造成宅地の地盤変状による被害では、宮城県仙台市、栃木県矢板市などで大きく、被害棟数もそれなりに多かった。屋根瓦の被害などは、地震が頻繁に発生する宮城県よりも、むしろ福島県、茨城県の方が多いという印象がある。そのほか、宮城県大崎市では、2 階の残留変形が 1 階よりも大きい希有な被害例が複数確認された。

低湿地や水田を埋め立てたなどの宅地では、地盤変状が発生していなくても地震動が増幅した可能性があることが、宮城県栗原市、大崎市、栃木県那須町、茨城県常陸太田市、那珂市、常総市、龍ヶ崎市などで看取された。

被災した建築物の壁量等と被害状況を比較したが、今回の調査対象物件は一部を除いていずれも残留変形が小さく、壁量充足率や偏心率と残留変形の相関関係は明確ではなかった。また、地震応答解析を行った結果、JMA 古川三ヶ日および K-NET 古川の入力に対して、木造住宅の壁量充足率が 1.0 より小さくなると急激に応答が増大し、1/10 rad を超えるものが見られた。一方、K-NET 石巻、K-NET 大宮の入力に対して、壁量充足率が 0.6 程度でも、最大応答変位が 1/10 rad を超えていない。地震応答解析結果と詳細調査による被害状況を比較すると、宮城県石巻市、茨城県那珂市、常陸太田市の被害状況は解析結果と概ね一致するが、古川市の被害状況は解析結果よりも被害が小さい。

### (4) 免震建築物

一般的な事務所建築（東北～関東）および戸建て住宅（宮城県）の免震建築物の調査の範囲では構造躯体の損傷は見られず、震度 6 弱を超える大地震に対しても、免震構造として十分な性能を発揮したものと考えられる。

観測記録を整理した範囲では、免震層下部の最大加速度は、福島県の建築物で最も大きく、続いて、宮城県、茨城県の順となり、東京都や神奈川県では小さかった。観測記録から計算した免震層の変位については、宮城県では円形に近い形状を、福島県では東西方向で特に大きくなる形状を描いた。免震層の原点からの最大変位は、福島県の建築物で最も大きく、24.5cm であった。地震時の免震層の変位軌跡を確認できるよう、罫書き式変位計が設置されたものが多数あり、それらの多くで 20cm 程度

の変位が確認できた。40cm 程度の大きな変位が記録されたものもあった。罫書き式変位計の設置は、免震層の応答性状を直接確認できるだけでなく、解析の妥当性の検証にも利用することが可能であり、非常に有効である。

免震と非免震の境界部分で、エキスパンションジョイントやその周辺のカバーが地震時の免震層の水平変形に追従できず、破損や脱落を生じたものがあった。表面に亀裂が発生した鉛ダンパーや表面の塗装の剥がれ・鋼材部分の残留変形は生じた鋼材ダンパーが確認された。これらの被害を防止するために必要な性能確認の手法や損傷等の早期発見のための維持管理の考え方が提案されており、参考にできる。

地震時室内挙動について居住者・利用者へのアンケート調査を実施したところ、非免震での室内被害は、業務の遂行に支障を来たすものとなったのに対し、免震では、家具の転倒等が無かったことなど室内被害が明らかに軽減されたことから、地震直後から業務を継続して行うことが可能であったことが確認された。

#### (5) 地盤の液状化

東北地方太平洋沖地震における東京湾岸部の液状化地盤の性状を把握するために、ケーススタディ的な分析を試みた。

今回の地震における東京湾岸部の地震波形記録は、過去の液状化地盤上のそれに比べて、継続時間が非常に長く、液状化発生の前後で、波形の様相が大きく異なる。

今回の地震における千葉港および夢の島の液状化に関する地震動の等価繰り返し回数は 20-60 程度であり、1987 年千葉県東方沖地震におけるその 2 倍程度、1995 年兵庫県南部地震における神戸市ポートアイランドの値の 4~6 倍程度であった。また解析で得られた地震のマグニチュードと液状化に関する地震動の等価繰り返し回数との関係は、既往の提案（外挿を含む）と整合しているように見えるが、今後、さらに多面的な検討が必要である。

液状化による噴水・噴砂の発生および沈静化の状況を把握する上で、防犯カメラの記録映像は貴重かつ有用な資料であることが確認できた。

#### (6) 非構造部材

非構造部材の被害では、比較的古い構法によるものが多く被害を受けているのが確認された。また、比較的高所に設置された非構造部材の破損・落下も確認された。屋内運動場の天井とガラスについては速報に引き続いて更に分析を行った。天井については、システム天井の被害程度が構造骨組の被災度に従って大きくなる傾向が見られ、構造体や、天井の吊り元である屋根の水平ブレースあるいは支承部に目立った損傷が確認された場合に、いずれの天井でも被害程度が大きくなる傾向が見られた。ガラスについては旧耐震基準の屋内運動場の方が現行耐震基準によるものよりも被害程度が大きくなることを確認した。