

4. まとめ

2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によって未曾有の被害を受けた鋼構造施設に対して、その被災状況、被災原因および被災のメカニズム等を検討し、供用している鋼構造施設が今回のような大地震が再び発生した時に被災後に要求される一定の性能を保っているためにはどのような課題があり、今後どのように取り組むかを示唆する目的で当委員会を進めてきた。本報告書は、地震動の特性、津波の特徴、被災した鋼構造施設の構造的な特性や応急復旧の考え方などを既存の資料や現在進められている他の関連委員会の検討状況や知見などを可能な範囲で集約し、各委員が精力的に分析を行った結果である。各章の要旨と本委員会の提言は以下である。

4.1. 地震動および津波

今回の地震動の特徴は、3成分合成加速度 $1,000\text{cm/s}^2$ を越えた観測点は18地点に及んでいるが、これら観測加速度は $0.1\sim 0.5$ 秒程度の短周期領域が卓越する地震動である。これらの地震動の疑似速度応答スペクトルを、1995年兵庫県南部地震のJR鷹取の記録と比較すると、JR鷹取のピークに相当する $1\sim 2$ 秒の周期帯域での応答値はJR鷹取の $1/4$ 程度である。最大加速度の大きさにもかかわらず、地震による被害が比較的甚大とならなかったのは短周期領域が卓越し、その他の周期領域では極端に大きな応答加速度とはなっていないという特徴が一因と考えられる。また、震源地から離れた関東地方においても、震度4以上の継続時間が2分以上となる地震動が観測されているが、このように、継続時間が非常に長い地震動であったことも、今回の地震動の特徴の一つである。

津波については、東北地方の太平洋沿岸の広範囲な地域で高い津波が観測され、気象庁の潮位観測所においては宮古で 8.5m 以上、大船渡では 8.0m 以上、相馬では 9.3m 以上の津波高さが観測されている。津波の高さは、東北地方から離れるにしたがって低くなるが、北海道でも 5m 強、関東地方でも 10m 近くに達していると示されている。このように今回発生した津波は、リアス式海岸のような複雑な地形を持つ三陸地方のみでなく、仙台湾周辺や福島沿岸、さらに茨城県や千葉県にも大きな浸水域をもたらす結果となった。

4.2 被害とその要因、復旧および対策

4.2.1. 道路施設

国道や都県、市町村道に架かる道路橋の被害の分布は、東北地方から関東地方の1都14県に及んでいる。福島県では、福島第一原子力発電所の事故による立ち入り禁止区域が設定されたことから、被害橋りょうの調査を十分に行えなかったが宮城県、福島県、茨城県の順で損傷割合が高い結果となった。東日本高速道路の被害は、関東から東北地方を縦断する東北道や常磐道など広範囲に及んでいる。また、首都高速道路の被害は、荒川湾岸橋や大黒ジャンクション連結路などで鋼部材等に損傷が発生した。

地震動による被災部位は、国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所、社団法人日本橋梁建設協会、東日本高速道路株式会社および首都高速道路株式会社の資料等によると支承と伸縮装置が多く、上部構造の損傷は比較的少なかった。津波による被災は、東日本高速道路や首都高速道路にはなく、国道や県、市町村道に架かる道路橋の多くが流失するなどの被災を受けた。

被災分析の結果、橋りょうの竣工年と損傷の関係は、耐震性能の向上を目的とした基準改定の効果が1980年代以降の損傷割合が少ない結果となっている。橋りょう形式と損傷の関係は、単純桁形式よりも連続桁形式、アーチやラーメン形式よりもトラス形式の損傷が多い結果となっている。道路橋において被災割合の高かった支承であるが、鋼製の多くは現行の耐震基準に準拠していないことから上査などが破損する事例も多く見られた。当該部分の損傷メカニズムであるが、東北道・新滑川橋の損傷分析によると、レベル1を大幅に超えた短周期成分によって桁が回転移動し、レベル2の耐力を保有しないサイドブロックが破損したとしている。また、今回の支承損傷において注視すべき問題は、積層ゴム支承の破

断である。損傷したゴム支承は、平成8年の基準に基づいて設計された地震時水平力分散ゴム支承（タイプB支承）であったにもかかわらず大規模に損傷した事例である。現行耐震基準に適合した支承が設置されていた橋りょうの近傍の応答スペクトル値は、タイプII地震動を超える周期帯も若干あるものの現行基準の規定を大幅に超えるものではなかった。原因として、関連する桁の重量が本事例のように大きく異なり、かつ2橋が一体となって振動し、支承変形性能が小さい側のゴム支承に過大な変形が生じたこと、およびせん断変形後の安定性が不足していたことが推定される。

次に震央から数百キロメートル離れた都内で被災し、数日間通行規制された首都高速湾岸線における損傷については、被災橋りょう周辺で発災時に測定された応答スペクトルによると損傷の大きかった部位にレベル1以上の加速度が作用したため、荷重を支える部材に設計時に設定した以上の力が作用し、損傷したものと推定している。

支承部に設置されている垂直補剛材であるが、これまでの地震発生による被害分析結果でも言われていた1段よりも2段以上で構成される方がリダンダンシー機能に優れていることが今回の損傷分析においても明らかとなった。さらに、我が国特有の落橋防止システムは、損傷が少なく落橋防止装置が有効に機能したことがうかがえる結果となった。

被災した道路橋の応急復旧は、被災した箇所が限定的であったり、損傷した箇所等を補強することで再使用が可能と判断された場合は、仮設の支保工等を設置して仮支えし、部材の追加や交換などによって供用性能を確保することで仮開放し、その後恒久的な対策を行う方法を多くの箇所で選択している。また、津波によって流失した橋りょうの多くは、被災住民の避難や緊急物資輸送に必要となる交通機能の確保のために仮橋を早期に架設し、その後、復興に合わせるように恒久的な工法を架設位置や橋りょう形式、構造などを検討して決定する方法が一般的に選択され、行われている。

4.2.2. 鉄道施設

東北新幹線の主な被害の箇所数と被害地点は、3月11日の本震では、大宮からいわて沼宮内までの約500kmに渡り、地上設備全体で約1,200箇所の被害を受け、そのうち、土木構造物の主な被害としては、高架橋柱等の損傷約100箇所、橋桁のずれ2箇所、橋桁の支点部損傷約30箇所であった。また、その後発生した余震によって新たに地上設備全体で約550箇所の被害を受けている。

次に在来線の主な被害の箇所数は、3月11日本震における土木構造物の損傷としては、橋りょう・高架橋の損傷約120箇所、乗換こ線橋等停車場設備の損傷約20箇所、乗降場変状約220箇所、盛土・切取等土工設備の変状約170箇所等で合計約580箇所が被害を受けた。また東北新幹線と同様に、4月7日の余震においては、土木構造物では、橋りょう・高架橋の損傷約30箇所、乗降場変状約40箇所、盛土・切取等土工設備の変状2箇所等合計約70箇所に被害を受けている。

現地調査で復旧状況を確認した東北新幹線・花京院架道橋（上り一番線桁）のピン支承の損傷では、被災した橋りょうの近傍の地震計による応答スペクトルによると当該橋りょうに設計水平震度以上の力が作用したことによって固定支承ピンの切欠部が破断・抜出し、上杓と下杓が200mm程度右側に移動した。固定側支承右側は、下支承のズレ止めが損傷し、上杓とピンが右側に移動したため、スラブ軌道に変状が生じる結果となった。同様な被災要因で、東北新幹線・富久山橋りょう、東北新幹線・八反田川橋りょう（保守基地線上下）、東北貨物線線路橋PC桁用受桁、気仙沼線・北上川橋りょう、鹿島線・県道第一宮中架道橋において支承および支承部の桁に損傷が発生した。

東北新幹線、在来線とも応急復旧、恒久復旧は、担当技術者の現地等における判断で行われ、アンカーボルトの交換、移動制限装置の追加や変形した部材の熱矯正による補修などによって供用を開始している。

津波による被災については、東日本旅客鉄道株式会社が運営する太平洋沿岸を走る7線区に被害が発生した。津波による被災を集計した結果は、延長約325km、線路約1680箇所となる。

これまで台風等の洪水で流失した橋りょうで行われたように今回の被災においても、鋼桁が流出した橋りょうのうち、八戸線・大浜川橋りょうは、流出した鋼桁を補修して再利用し、復旧している。

4.2.3. 港湾施設

地震や津波による港湾施設の被災は、係留施設の場合は、津波によるものがほとんどであり、地震動による被害は、観測された地震動の規模や継続時間の割には顕著ではなかった。これは、地震波の周波数特性や地盤条件に起因するものと考えられる。一部で、地震動による被害が生じた係留施設も存在したが総じて、現行の港湾施設の耐震設計法が妥当であることが実証された。防波堤については、今回の震災で、港内静穏度確保のための第一線防波堤が八戸港、久慈港、宮古港、相馬港などで津波による被害を受けただけでなく、津波防波堤として整備された釜石港や大船渡港の湾口防波堤でも甚大な被害が発生した。釜石港湾口防波堤の場合は、南堤の22 函のケーソンのうち、開口部側から10 函はほとんど移動していなかったが、それよりも陸側のケーソンについては水没していた。北堤の44 函については、一部で原形をとどめていたが、ほとんどのケーソンが移動あるいは水没していた。また、開口部潜堤を構成するケーソンについても、ほとんどがマウンドから港内側に転落していた。これらのケーソンの移動の原因としては、津波により港内外に発生した巨大な水頭差（約9.5m）によるものに加えて、ケーソン目地部やマウンド中に作用した速い流れによってマウンドが洗掘を受けたことなどによるものと推定している。

栈橋については、鋼管杭式栈橋では岩手県の7 栈橋が被災、鋼矢板式栈橋では被災した事例の中から液状化現象による被災が顕著であった福島県相馬港と液状化現象が少なく被害も軽微にとどまった宮城県仙台塩釜港を代表事例として紹介した。

4.2.4. 電力施設

今回の地震による電力施設における被災は、東北電力と東京電力管内において発生した。東北電力管内の通信設備では、津波による影響で、通信ケーブルが支持物の配電柱とともに倒壊・流出するなどの面的な被害が発生した。また、東京電力管内の通信設備では、福島県浜通り地域で、津波による支持物の倒壊・流出により通信ケーブルの断線が1 箇所発生した。また、無線中継所の鉄塔では、1 基でごく軽微な被害が報告されている。以上に示すように、地震動による被災はほとんどなく、津波による被災がほとんどであった。

電力施設の復旧としては、送電鉄塔被害に対しては、余震等による被害進展によって送電に支承をきたす恐れがあるもの、および公衆の安全確保が懸念されるもの等を対象に、速やかに仮支線設置や部材補強を実施し、鉄塔や鉄柱による仮ルートを構築している。鉄塔の恒久的な復旧となる建て替えにあたっては、倒壊した鉄塔の基礎の状況（破損程度、変位等）を調査し、被災前の状態での使用が可能な基礎については対策せず使用し、工事期間の短縮による早期の送電機能回復を図っている。

4.3. 今後の課題

4.3.1. 道路施設

道路橋の被害としては、耐震補強されていない古いRC 橋脚や伸縮装置、支承などに地震動による損傷、液状化による土工部との段差のほか、津波による被害が数多くまた広い範囲で見られた。耐震補強などの対策が進んでいる高速道路や国道でもいくつもの被害があった。今回の広範囲にわたる長い継続時間の地震動による道路施設の被害として、岩手県南部から茨城県にわたる地域では短周期の強い加速度による被害、首都圏においても地震動による被害などが生じたことが特徴としてあげられるが、被害状況はそれらの構造特性と地盤条件などから様々であった。

今回の地震による被災の特徴として従来の地震動以外に津波による被害が顕著であったことから、施設設計に関すること以外にこれまで触れることの少なかった施設計画についても言及した。

支承、落橋防止システム、伸縮装置については、

- ・高架橋において振動特性の異なる上部構造が隣り合うジョイントでは、橋軸方向、橋軸直角方向に大きな相対変位が生じる可能性がある。特に、地震時に大きな変位が生じるハイピアン高架橋などでは相対変位の影響を直接受け、設計に際しては動的解析による地震時の挙動把握が必要である。

- ・さらに、伸縮装置や支承の遊間の設定は温度変化による伸縮量で設定されるが、それぞれの遊間を適正に整合させたいうで他に衝突する可能性のある桁端部などの離隔についても検討することが必要である。

また、支承まわりの補強については、リダンダンシー確保の点からも既存の橋りょうにおいても補強リブを設けることや支承まわりの構造を含めた耐震性能向上策を図ることが必要である。

今回の被災において大きな損傷として捉えられた事象にトラス橋やアーチ橋などで二次部材やガセットプレートなどの損傷がいくつか見られた。そこで、これらの対策としては、

- ・橋の立体的な挙動および力の流れを把握して、接合部に対する構造詳細を検討する必要がある。
- ・対傾構および横構造設計に際しては、動的解析による地震時の挙動把握が必要である。

今回の被災状況調査において明らかとなったことに、維持管理の不備があげられる。被災した橋りょうでは、損傷した部材の腐食が損傷を助長している。この腐食の原因として、排水型の伸縮装置からの漏水や土砂の堆積である例が報告されている。桁端部の維持管理不足による腐食や断面欠損は、支承や落橋防止システムの機能を失わされることだけでなく、地震時に耐力不足の主原因ともなることから十分注意すべきことである。

4.3.2. 鉄道施設

現行の「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」に基づいて設計された鋼鉄道橋に関しては、損傷がほとんど報告されていないことから、既設の鋼鉄道橋の損傷に対する対策の考え方の一例について示した。

鉄道施設においては、列車走行性の観点から特に支承部の移動制限の扱いが重要であり、特に、既設の鋼鉄道橋の耐震性の向上には、支承部の挙動を明らかにすることが不可欠である。そこで、支承部の補強を検討する際は、支承部の耐力や変形性能を精度よく評価し、鋼桁や下部工との耐力のバランスを考慮した上で必要に応じて補強していくことが重要であると考えられる。

次に、今回多くの鉄道施設を流失させた津波に対しては、津波に対して抵抗する構造の採用、もしくは、津波に対して抵抗が少ない構造の採用などが考えられる。また、今回と同様に、万が一、鋼桁が津波に流された場合を想定して、流された鋼桁が再利用しやすいような対応を取っておくことも重要と考えられる。ここでは、二つの課題に対する対策や考え方を挙げているが、構造物のみを対象とするのではなく、鉄道システム全体として被害を極力少なくする減災という考え方に立って対策を進めることが望ましいことを述べた。これは、鉄道施設に限ることだけでなく道路施設、港湾施設、電力施設にも共通する対応策である。

4.3.3. 港湾施設

港湾施設の被災としては、地震動による液状化発生を原因とした被災もあったが他の施設と同様に津波による被災が多くを占めていた。

これまで港湾施設の耐津波設計では、近代で最大の津波、すなわち、100年に1回程度発生する程度の津波を対象としていたために、今回の津波のように1,000年に1回程度発生する巨大津波が来襲した場合には、構造物の破壊や流出に至る被害が発生することになる。今後は、このような巨大津波から人命や資産を確実に守るために、防波堤や防潮堤などの防災施設をどのように整備するかが重要となる。そこで、津波による被災を少なくするために1,000年に1回程度発生する巨大津波に対しては、減災を目的とした海岸保全施設等のハード対策がまず必要であり、施設整備に加えて、防災教育、ハザードマップの整備、避難通路・避難場所の確保、津波警報等の適切な発令などのソフト対策も行っていくこととなる。また、施設整備にあたっては、「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」2011年9月28日の示す「設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していくことが必要である」を基本とすることとしている。

このような考え方に基づいた具体的な事例として、鋼矢板式岸壁の複合災害メカニズムの解明、鋼部

材の損傷検出技術の開発、損傷が生じた鋼構造物の残存性能評価、港湾構造物の耐震設計手法の検証について詳細に示した。

4.3.4. 電力施設

地震による送電鉄塔の被害の要因として考えられるものは、鉄塔の振動周期が異なることによって張力バランスが崩れることによる倒壊、大規模な地すべりによる倒壊などが考えられるが、今回の地震においても同様に、強風によって倒壊した例はあるものの、地震被害の例はほとんどなかった。

電力施設における対策としては、特に沿岸部の送電鉄塔については津波およびそれに伴う洗掘を避けて、その立地条件をよく検討することが挙げられる。また、今回の被災が鉄塔本体でなく周辺の地盤等の影響も多かったことから、既存の鉄塔の補修・補強としては、上部工よりも支持地盤や下部工の補修・補強に着目すべきとした。

最後に、これも電力施設に限ったことではないが、被災地域の衛星写真・空中写真による被災状況の把握は今回のような広範囲にわたる大震災で現地近づけない場合には非常に効果的であることがわかった。今後はこれらの活用の具体的な方策の検討が必要である。

4.4. おわりに

以上が、本報告書において地震動、道路施設、鉄道施設、港湾施設、電力施設の被災状況、復旧対策そして今後に向けた課題の記述に対するそれぞれのまとめである。

本委員会は、震災発生後、約10ヶ月という限られた時間の中で、現地調査、各種資料に基づく鋼構造物の被災分析を行った。その結果、以下に示す5つの課題解決が重要であるとの結論に至った。

①地震動による被害は、設計基準類の整備により、少なくなっており、現行の耐震設計が有効であることがわかった。ただし、損傷の有無、大小は地震動の特性によるところも大きいことから、今後も要求された耐震性能を構造物が精度よく発揮できるように、設計法、品質確保の方法、劣化予測の方法などに対するたゆまぬ改善を続けて行く必要がある。

②設計では想定していない壊れ方をした部材・部位が存在した。例えば、支承のセットボルト、ゴム支承などである。設計で想定しない外力が作用したことも一因と考えられるが、破壊メカニズムの詳細な分析を進め、必要があれば破壊メカニズムに対応した設計法の見直しを行う必要がある。

③今回の地震では、首都圏でも継続時間の長い地震動が観測された。このような地震動が今後も発生すると考えられており、継続時間の長い地震動に対する検討を行っていく必要がある。

④津波によっても鋼構造物は大きな被害を受けた。今後は、津波のレベルに応じた適切な性能を維持・発揮できるように、津波と構造物の応答の関係などを解明していく必要がある。また、津波に対しての適切な性能とは何であるかの議論を深める必要がある。

⑤地震によって被災した状況の調査や復旧状況等から、近い将来に発生すると予測されている大地震に備えて、防災・減災の考え方を整理し、対象構造物を適切に判断し、全ての種々な施設が連携をとって機能するような対応方法を早期に確立すべきであり、我々技術者もその一翼を担うべきである。

すでに述べたように、今回の調査対象となった鋼構造物においては、阪神・淡路大震災後に鋼構造委員会に設置された「鋼構造震災調査特別小委員会」が耐震設計、施工上の課題や既設構造物を対象とした補修・補強などの対策について提言をした結果が反映されたことから、地震動による直接的な被害は少なかったと思われる。しかしながら、新たな課題として大きな津波を受けた時の種々な施設の抱える問題点や維持管理が行き届いていない現状も明らかとなった。今後は、本調査委員会が取りまとめた結果を活かし、これらが悲惨な被害を最小限に止める効果的な対策実施に活かされることを望む次第である。

最後に本調査を実施にあたり、下記の機関にご協力をいただいたことに対し、ここに改めて深謝いたします。

- ・国土交通省道路局国道・防災課
- ・国土交通省東北地方整備局

- 国土交通省国土技術政策総合研究所
- 独立行政法人土木研究所
- 東日本高速道路株式会社
- 首都高速道路株式会社
- 社団法人日本橋梁建設協会
- 東日本旅客鉄道株式会社
- 独立行政法人港湾空港技術研究所
- 東北電力株式会社
- 東京電力株式会社