

東日本大震災による道路橋の被災と今後の研究

星 隈 順 一

東日本大震災から1年以上が経過したが、著者が所属する独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター（CAESAR）では、本震の発生直後より、国土交通省国土技術政策総合研究所と連携して、岩手県、宮城県、福島県、茨城県、千葉県の各県内の道路橋の被災調査を行うとともに、これに加え、道路管理者からの技術相談や資料提供等を通じて、道路橋の被害の把握及びその分析に努めてきたところである。また、この結果を踏まえつつ、平成24年2月には道路橋示方書の改定がなされたところである。本報では、地震動ならびに津波の影響による道路橋の被害経験から今後必要な研究とその展望について概説する。

キーワード：東日本大震災、道路橋、被害、耐震補強、津波の影響

1. はじめに

平成23年3月11日14時46分頃に、三陸沖を震源とするモーメントマグニチュード9.0の巨大地震が発生した。今回の地震では、太平洋沿岸を中心に高い津波を観測し、特に東北地方から関東地方の太平洋沿岸では激甚な被害が生じた。また、本震後も規模の大きな余震が頻発し、4月7日23時32分頃には、宮城県沖を震源とするマグニチュード7.1の地震が発生している。

本震の発生直後より、国土交通省国土技術政策総合研究所及び独立行政法人土木研究所では連携して、岩手県、宮城県、福島県、茨城県、千葉県の各県内の道路橋の被災調査を行った。これまでに直接調査できた橋の数は200橋以上に上るが、これに加え、道路管理者からの技術相談や資料提供等を通じて、道路橋の被害の把握に努めてきたところである。道路橋に生じた被害を大別すると、地震動による被害、津波の影響による被害、液状化の影響による被害の3つに分類される。個々の橋の被害状況については既報^{1)~5)}を参照いただきたいが、本報では、地震動ならびに津波の影響による道路橋の被害経験から今後必要な研究とその展望について概説することにしたい。

2. 地震動の影響による道路橋の被害の特徴と課題

東北地方太平洋沖地震では、様々な機関によって多

くの地点の地盤上における加速度記録が観測されている。各地点における地震動の特性は、震源からの距離や地盤条件に応じて、周期が0.5秒以下のような短期の振動成分が卓越しているもの、0.5~1.0秒付近の周期の振動成分が卓越しているもの、1.0秒以上のようにやや長い周期の振動成分が卓越しているもの等、様々な記録が観測されているが、橋のような構造物への影響が大きくなる1.0秒前後の周期帯での加速度応答スペクトルに着目すると、兵庫県南部地震において観測された加速度応答スペクトルと同等もしくはそれよりも低い値であった¹⁾。一方、今回の地震は複数の断層の破壊が連動して生じたことにより、主要動が連続して生じるような地震動が観測され、地震動の継続時間が過去の強震記録と比較しても長いという特徴が見られた⁶⁾。

このような特性の地震動に対して、道路橋の被害としては、これまでの大規模な地震における被害と概ね同様な形態の被害が多く生じた。すなわち、昭和55年よりも古い基準で設計され、過去の地震でも被害が生じている構造形式の橋で、耐震補強がなされていない橋に比較的大きな被害が生じた。このような分類に入る橋の被害例としては、鉄筋コンクリート橋脚の軸方向鉄筋段落し部の損傷、軸方向鉄筋量の少ない鉄筋コンクリート橋脚の損傷、鋼製支承本体の破損、支承取り付け部周辺の損傷等が挙げられる^{1)~5)}。いずれの被害形態も、昭和53年宮城県沖地震や平成7年兵庫県南部地震等でも確認されているものである。

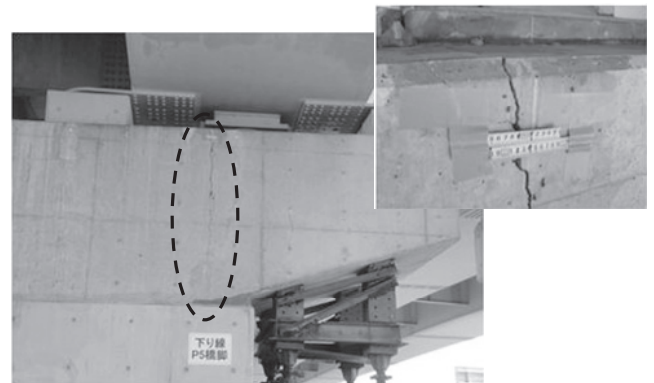
その一方で、古い基準で設計された橋でも耐震補強

されていた橋では、橋の機能回復が速やかにできたかどうかという耐震性能の観点からは、損傷は限定的なものであった。道路橋では、過去の震災経験を踏まえ⁷⁾、兵庫県南部地震のような地震動に対しても落橋や倒壊等の被害を防止できるようにすることを目的として、まずは鉄筋コンクリート橋脚躯体における軸方向鉄筋段落し部の補強や桁端部における上部構造の落橋防止対策等の耐震補強対策が優先的に進められてきたところである。今回の地震は、道路橋に対してこのような耐震補強が本格的に実施され始めた以降の地震の中でも最も大きいクラスの地震であり、耐震補強効果を検証しておくことが重要である。

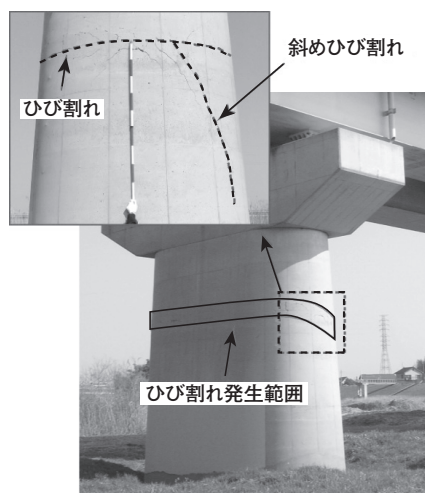
写真—1は、茨城県水戸市を流れる河川に架かる隣接した2橋の地震後の状況を比較して示したものである。写真—1(a)に示す橋は2連の3径間連続鋼箱桁橋で、下部構造は昭和46年道路橋耐震設計指針が適用されて設計されている。本橋では、鉄筋コンクリート橋脚に対する耐震補強等はされていなかったが、今回の地震により、鉄筋コンクリート橋脚の軸方向鉄筋の段落し部において斜め方向のせん断ひびわれが生じる被害が生じた。この損傷は、兵庫県南部地震で橋脚の倒壊に至った段落し部での破壊形態における初期の損傷状態であり、余震によりさらに損傷が進展した場合の状況を想定すれば、決して軽視してはならない被害であることから、この橋では全面通行止めの措置がなされた。一方、写真—1(b)は、写真—1(a)の橋から約400m上流側にほぼ平行して架かる3径間連続鋼箱桁橋と4径間連続鋼箱桁橋から構成される橋における固定支承を有する鉄筋コンクリート橋脚の状況を示したものである。この橋脚では、RC巻立て工法により耐震補強がなされており、地震による損傷

は生じていない。写真—1の2橋は、上部構造の幅員や橋脚の寸法等に違いはあるが、構造形式は概ね同様であり、振動特性も近似していると推測され、さらに、距離的にも非常に近接しており、橋が架かっている向きもほぼ同じであることから、両橋は同等の地震動の影響を受けたものと考えられる。そのような2橋を、地震後に橋としての機能の回復が速やかに行えたかどうかという耐震性能の観点から比較してみると、その違いは明白であり、橋脚に対して実施していた耐震補強が橋の耐震性能を向上させたことを示す一つの事例と言えよう。

ただし、従来からの弱点であった段落し部を耐震補強していた橋脚において、その補強部位とは別の部位に損傷が生じた事例もあった^{1), 8), 9)}。写真—2は、福島県郡山市に架かる2径間連続鋼箱桁橋の中間固定橋脚の被害状況を示したものである。本橋では、耐震補強として橋脚躯体部がRC巻立て工法により耐震補強されるとともに、支承部には変位制限構造が設置された構造となっている。本橋脚では、支承部には損傷はなかったが、頂部から両側に張り出している横梁に



写真—2 鉄筋コンクリート橋脚の横梁付け根部に生じた損傷



(a) 耐震補強されなかった橋脚の損傷



(b) 耐震補強されていた橋脚の状況

写真—1 鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強が橋の耐震性能の向上に与えた効果（茨城県水戸市）

において、天端上面から下方に向かって縦方向のひびわれ（幅約10mm）が生じた。このような横梁のひびわれは、支承を通じて伝達される活荷重の作用に対して影響のある損傷であることから、機能回復を速やかに行うことができるかどうかという耐震性能の観点からは、注意すべき損傷である。

また、耐震補強を目的として橋脚や橋台に制震装置等を取り付ける事例が増えてきているが、今回の地震では、写真-3に示すように、このような制震装置を取り付けた下部構造側の部位に損傷が生じた事例があった。いくら優れた制震装置を装着しても、制震装置から伝わってくる力とその受け手となる取り付け部位の抵抗力のバランスが適切でないと、制震設計の前提が崩れることにもなりかねないため、制震装置や取



写真-3 制震装置を取り付けた下部構造側の部位に生じた損傷

り付け部の設計では、受け手となる部位への取り付けの施工性にも注意しつつ、制震装置の動的特性を適切に把握した上で慎重に行う必要がある。

一方、今回の地震では、道路橋の構造本体に生じた損傷よりも、橋台背面土の沈下に伴う段差が多数の橋で生じたことも大きな特徴であった^{1),10)}。写真-4は、橋台背面土の沈下によって生じた段差の例を示したものである。ここに示すように、踏掛版がなく車道部に段差が生じた事例、車道部には踏掛版があるが路肩部で沈下が生じた事例、踏掛版は設置されていたが盛りこぼし橋台の背面土沈下に伴い段差が生じた事例等が確認されている。このような橋台背面土の沈下によって生じる段差は、新しい被害形態ではないものの、段差を復旧し一般交通開放までに4日以上を要した事例もあった。橋梁の構造本体側の耐震補強等が進むにつれ、橋台背面アプローチ部に生じる段差が地震直後における交通機能確保の支障となる直接の要因となってきたとも言える。したがって、橋と背面側の盛土等との路面の連続性を確保できるように、基礎地盤の安定性、橋台背面土工部の安定性、排水性等に配慮して設計、施工するとともに、橋に要求される性能に応じて踏掛版の設置等の対策を実施していくことが重要になってくると考えられる。

なお、ここでは詳述することは割愛するが、地震動の影響によるその他の重要な被害の特徴として、兵庫



(a) 踏掛版がなく車道部に段差が生じた事例



(b) 車道部には踏掛版があるが路肩部で沈下が生じた事例



(c) 踏掛版は設置されていたが盛りこぼし橋台の背面土沈下に伴い段差が生じた事例

写真-4 橋台背面の沈下により生じた段差の状況

県南部地震以降多く使用されるようになったゴム支承に破断が生じた事例があったこと¹⁾も挙げられる。

3. 津波の影響による道路橋の被害の特徴と課題

今回の地震では、東北地方から関東地方にかけての太平洋沿岸部の広い範囲において大きな津波の影響を受けたが、その沿岸地域に架かっていた道路橋も津波により上部構造が流出する等の被害が生じた。今回のような極めて大きな津波からの作用に対して、できる限り早期に橋の機能回復を図るという観点から、橋の設計をどう考えるかが重要な課題である。

今回の津波による被災経験を踏まえ、地域における津波に対する防災計画の策定が進められてきているが、そもそも、津波の影響を受ける可能性がある地域における道路計画は、その地域の防災計画と一体となって検討される必要がある。道路は地震後において避難路としての役割、救援活動や復旧活動のための緊急輸送路としての役割等、路線によってそれぞれの役割があり、地域内の個別の路線に求められる性能は、その地域の防災計画等に基づいて設定されることが基本であると考えられ、その路線上にある道路橋の設計においても、このようにして設定される当該路線に求められる性能に応じて、適切な構造計画を検討する必要がある。

今回の津波による道路橋の被災を見ると、津波の高さが上部構造の高さにまで達していない場合には、津波による上部構造の流出等の致命的な被害は確認されていないことから、橋の架橋地点において考慮する津波高さに応じて桁下空間を確保することは、構造計画上の基本的な考え方となる。その上で、路線に求められる性能に応じて、仮に津波が上部構造の高さにまで達するような状況に対しても、津波の影響をできる限

り抑制できるような合理的な構造計画となるように配慮しておくことが重要になると考えられる。今回の地震において、津波の高さが上部構造の高さを超えたと考えられる橋の被災に着目すると、写真—5のように上部構造が流出した橋がある一方で、写真—6のように流出しなかった橋もある。さらに、上部構造が流出した橋の中には、上部構造が裏返しになったものと裏返しにはならなかったものがある。このような被災状況の違いは、津波の影響を受ける橋の挙動とそのメカニズムを解明していく上で重要な着眼点になるが、橋が津波の影響を受ける時のメカニズムを踏まえ、今回の津波により流出した橋と流出しなかった橋の多数のデータからその構造的特徴の違いを分析すること等を通じて、津波の影響を受けにくくするための合理的な構造計画上の工夫の方法はないか、研究を進めているところである。さらに、非常に大きな津波の作用等によって橋桁が流出してしまうような万一の状況にも備え、例えば複数径間の渡河橋で、近接した場所に応急的な迂回路を確保することが難しい条件のような場合には、既存の応急復旧橋等を速やかに架設できるように予め下部構造位置を構造計画しておくという考え方もあろう。

いずれにしても、まずは津波の影響を受ける橋の挙



写真—6 津波が上部構造位置を超えたと想定されるが上部構造は流出しなかった橋



(a) 上下裏返しになったポストテンPC桁



(b) 裏返しにならなかったプレテンPC桁

写真—5 津波により上部構造が流出した橋の被災状況

動や抵抗特性の解明が必要であり、上部構造が流出したメカニズムだけでなく、流出しなかったメカニズムにも着目し、津波に対して合理的な橋の構造計画ができるように、今後も研究を進めていきたいと考えている。

4. おわりに

本報では、地震動ならびに津波の影響による道路橋の被害経験から今後必要な研究とその展望について概説した。過去の震災経験を踏まえ、緊急輸送路となる重要な路線から順次実施してきた耐震補強は、橋としての機能を早期に回復することを可能にした一つの要因になったと言える。したがって、耐震補強が求められる構造条件の橋でまだ耐震補強が実施されていない橋に対しては、その構造特性や地震時に弱点となる部位の特性に応じた適切な耐震補強対策を着実に推進していくことが重要である。

その一方で、地震後に速やかに交通機能を確保できるかという観点からは、橋台背面アプローチ部の段差対策や津波の影響を受ける地区に構築される橋の構造計画の考え方等、今回の震災経験を踏まえた新たな研究課題にも取り組んでいく必要がある。東海、東南海、南海地震等の巨大地震の発生も逼迫している状況にあり、今回の震災経験を今後の合理的な耐震対策として具体的な形で生かしていけるよう、被災の生じなかった事例も含めてよく検証しながら研究を進めていきたいと考えているところである。

謝 辞

本稿で例示した道路橋の被災調査及び情報収集にあたり、国土交通省東北地方整備局道路部、岩手県、茨城県をはじめとする関係機関には、災害対応でご多忙の中にもかかわらず、多大なるご協力をいただきました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

JICMA

【参考文献】

- 1) 国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震，土木施設災害調査速報，国総研資料第 646 号・土研資料第 4202 号，2011 年 7 月
- 2) 星隈順一，玉越隆史：東北地方太平洋沖地震による道路橋の被災状況調査速報，橋梁と基礎，Vol.45，pp.32-35，2011 年 6 月
- 3) 星隈順一，玉越隆史，堺淳一：東日本大震災における道路橋の被災状況，プレストレストコンクリート，Vol.53，No.4，pp.15-16，2011 年 7-8 月
- 4) 星隈順一，玉越隆史，堺淳一：東北地方太平洋沖地震による道路橋の被災状況の概要，コンクリート工学，Vol.49，No.8，2011 年 8 月
- 5) 玉越隆史，星隈順一，横井芳輝：地震・津波による橋梁等道路構造物の被害，土木技術資料，Vol.53，No.8，pp.12-15，2011 年 8 月
- 6) 坂柳皓文，星隈順一，堺淳一：非線形スペクトル解析による東北地方太平洋沖地震の地震動の特性に関する一検討，第 14 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，pp.243-250，2011 年 7 月
- 7) 運上茂樹，星隈順一，堺淳一，植田健介：過去の大規模地震における落橋事例とその分析，土研資料第 4158 号，2009 年 12 月
- 8) 星隈順一，張広鋒：東北地方太平洋沖地震における耐震補強がなされていた道路橋の概況について，日本地震工学会大会—2011 梗概集，pp.4-5，2011 年 11 月
- 9) 星隈順一，張広鋒，堺淳一：橋梁の耐震性の向上に向けて—東北地方太平洋沖地震における耐震補強された橋の挙動—，土木技術資料，Vol.54，No.1，pp.8-11，2012 年 1 月
- 10) 小山田桂夫，前田隆：東日本大震災に伴う橋梁被災状況について，第 29 回日本道路会議，2011 年 11 月

【筆者紹介】

星隈 順一（ほしくま じゅんいち）
 (独)土木研究所
 構造物メンテナンス研究センター
 上席研究員

