平成 23 年東北地方太平洋沖地震による 道路橋被害の統計分析

中尾 吉宏¹・片岡 正次郎²

¹ 非会員 国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室 主任研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

E-mail: nakao-y2qi@mlit.go.jp

² 正会員 国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室 室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

E-mail: kataoka-s92rc@mlit.go.jp

平成 23 年東北地方太平洋沖地震では、地震動及び地震後に発生した津波により、広い範囲で道路橋に多数の被害が発生した。道路橋被害の全体像を統計的に把握する取り組みとしては、橋長や径間数により被害が発生しやすくなること等に着目した分析結果がこれまでに報告されている。本報告では、被災橋梁の耐震設計に適用された技術基準や被災橋梁の平面形状等に更に着目し、道路橋被害の統計分析を行った結果を示す。検討の結果、平成 8 年以降の道路橋示方書が適用された道路橋は、被害が生じにくくなっていること、また、昭和 55 年道路橋示方書より古い技術基準が適用された道路橋は、優先的に進められてきた耐震補強や過去の地震被害発生後の更新・補強等により、被害が生じにくくなっていること等が統計的に示された。

Key Words: *the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, highway bridge, seismic design specification, earthquake ground motion*

1. はじめに

平成 23 年東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方の広い範囲で道路橋に多数の被害が発生した。これら道路橋の被害については、様々な調査がこれまで実施されてきており、地震動や津波による被害について知見が蓄積されている。

(公社)土木学会 地震工学委員会 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会(委員長:九州工業大学幸左賢二教授)は、国土交通省、NEXCO 東日本、岩手県、宮城県、福島県等により集計された橋梁被害データを取りまとめている¹⁾(以下、橋梁被害データとする)。

また、東北地方太平洋沖地震により生じた地震動については、国土交通省、気象庁、(国研)防災科学技術研究所などが設置した地震計により強震記録が多数得られており、これらの記録を基に、東北地方から関東・甲信越にわたる地域の最大加速度、最大速度、SI 値²⁾等の分布を 250m メッシュで推定した成果(以下、地震動強度の推定結果とする)が公表されている³⁾。

畑・片岡⁴⁾は、これらの成果に基づき、東北地方太平洋沖地震で生じた道路橋被害と地震動強度との関係を、橋長、径間数等に着目して統計分析することで、橋長が

長くなった場合や構造形式が連続桁である場合の橋梁の被災率が高いこと等を報告している。

本報告では、同報告⁴⁾で用いられた橋梁被害データと地震動強度の推定結果に加え、直轄国道の施設情報を記録した道路管理データベースシステム(MICHI)を活用し、東北地方太平洋沖地震で地震動により生じた道路橋被害と適用基準等の関係について統計分析した結果を示す。

2. 橋梁被害データ等の概要

(1) 橋梁被害データ¹⁾

本検討で用いた道路橋の被災度や橋長等に関する情報は、橋梁被害データに基づいている。橋梁被害データには、国土交通省、NEXCO 東日本、岩手県、宮城県、福島県が管理する約 5,600 の道路橋等についての、橋長等の構造情報や、東北地方太平洋沖地震による損傷原因等の情報が整理されている。また、表-1 の考えに基づく損傷ランク A~C の情報が整理されており、本検討では、道路橋の被災度と表現する。ここで、被災度 A~C の区分の考え方¹⁾は次の通りである。すなわち、被災度 A

表-1 損傷ランクの定義

損傷ランク	被害の程度
A	落橋および大被害
B	中被害
C	小被害
	被害無し

(落橋および大被害)は、落橋あるいは倒壊・半倒壊した場合、又は、耐荷力の低下に著しい影響のある損傷を生じており、落橋等致命的な被害の可能性がある場合に相当する。被災度 B(中被害)は、耐荷力の低下に影響のある損傷であり、余震、活荷重等による被害の進行がなければ、当面の利用は可能な場合に相当し、被災度 C(小被害及び被害無し)は、短期間には耐荷力の低下に影響のない場合や、耐荷力に関しては特に異常が認められない場合に相当する。

橋梁被害データに整理されている損傷原因は、「地震動」、「地震動及び津波」、「地震動及び液状化」、「津波」等に分類されている。ここでは、地震動により生じた道路橋被害を検討対象とするため、損傷原因が「地震動」と整理された道路橋のみを分析対象とする。

(2) 地震動強度の推定結果³⁾

道路橋に作用した地震動強度に関する情報としては、地震動強度の推定結果を用いた。地震動強度の推定結果は、東北地方太平洋沖地震で観測された多数の強震記録に基づき、強震観測が行われていない地点の地震動強度を地点毎に異なる地盤の増幅特性を考慮しながら補間して求めたものであり、地表面における地震動強度が250mメッシュで推定されている。本検討では、この様に求められた地震動強度の推定結果を各々の道路橋の位置と関連付け、道路橋に作用したと考えられる地震動強度として用いた。地震動強度の推定結果は、SI値や最大加速度等の様々な地震動の指標値で整理されているが、ここでは、SI値を用いて道路橋被害と地震動強度の関係を検討している。SI値は、固有周期0.1~2.5秒の速度応答スペクトル(減衰定数0.20)を積分して求められる。一般的な道路橋の固有周期は0.5~1秒程度であるのに対し、高橋脚の橋や免震支承を採用した橋は固有周期が1秒を越える。また、下部構造の剛性が高い橋等では固有周期が0.5秒を下回る。SI値は、こうした固有周期の道路橋に地震動が及ぼす影響を考慮できる指標であること、また、構造物の被害との相関が比較的高いとされていることから、ここではSI値を用いることとした。

(3) MICHI

直轄国道の道路施設については、施設に関する情報の一元化及び共有化により道路管理の効率化及び高度化を

図ることを目的として、道路施設の諸元、図面、写真等のデータが全国的に統一した仕様でMICHIに整理されている。本検討では、道路橋の耐震設計に適用された技術基準や、道路橋の平面形状等に着目した道路橋被害の考察をするため、MICHIに登録された情報を活用している。

3. 道路橋被害の分析

橋梁被害データ¹⁾等に基づき、東北地方太平洋沖地震による道路橋被害と以下の関係について考察する。

- (1) 道路橋への適用基準
- (2) 橋長
- (3) 平面形状(直橋 or 斜橋・曲線橋)
- (4) 特殊橋か否か

(1)では、橋長や平面形状等によらない道路橋全般を対象として道路橋被害と適用基準の関係を考察する。

(2)及び(3)では、橋長や平面形状の違いにも更に着目して道路橋被害の特徴を分析する。(4)では、特殊橋とそれ以外の橋の被害の特徴を分析する。

(1) 道路橋被害と適用基準の関係

橋梁被害データに含まれる道路橋のうち、MICHIに適用基準の情報が整理されている直轄国道の道路橋を対象として、道路橋被害と適用基準の関係を考察する。考察にあたり、道路橋への適用基準は以下の1)から4)に分類する。

- 1) 平成7年兵庫県南部地震のように発生頻度が極めて低いマグニチュード7級の内陸直下型地震による地震動を考慮することとなった平成8年道路橋示方書以降の基準^{5), 6), 7)}(以下、「H8道示以降」とする)
- 2) レベル1地震動を上回る大きな地震力が作用しても倒壊に至るような致命的な損傷が生じないことを照査する地震時保有水平耐力の照査法が導入された平成2年道路橋示方書⁸⁾(以下、「H2道示」とする)
- 3) 鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能の照査法が加えられるとともに、下部構造編において、コンクリートの許容せん断応力度の低減と帯鉄筋量の増加に関する改定が行われた昭和55年道路橋示方書⁹⁾(以下、「S55道示」とする)
- 4) 3)よりも古い昭和46年道路橋耐震設計指針・同解説以前の基準^{10), 11), 12), 13)}(以下、「S46道示以前」とする)

図-1に、SI値20(cm/s)以上の地震動が作用した橋梁数を適用基準ごとに整理した結果を示す。また、被災度B

以上の損傷が生じた道路橋の被災率と適用基準の関係を図-2に示す。

図-2 から、被災度 A の損傷が、H2 道示及び S46 道示以前の道路橋には生じている。地震動強度の推定結果によれば、これらの損傷は、SI 値 60~80(cm/s)の地震動により生じている。図-1 から、SI 値 60(cm/s)以上の地震動が作用した橋梁数は、H8 道示以降と H2 道示の橋ではほぼ同じであるが、H8 道示以降の道路橋に被災度 A の損傷は生じていない。また、図-3(a)及び(b)には、全橋及び被災度 B 以上の損傷が生じた道路橋について、橋に作用した地震動強度の構成を適用基準ごとに示している。同図(b)から、H2 道示及び S46 道示以前の道路橋は、SI 値 40(cm/s)を下回る地震動によって被災度 B の損傷が生じているのに対し、H8 道示以降の道路橋に被災度 B の損傷をもたらしたのは SI 値 40(cm/s)を超える地震動となっている。また、図-3(b)から、被災度 B 以上の大半を発生させたのは、SI 値 40(cm/s)以上の地震動であることが分かる。図-3(a)によれば、SI 値 40 (cm/s)以上の地震動は、

どの適用基準の橋についても、概ね同様の割合に作用しているが、図-2 から、H8 道示以降の道路橋に被災度 B 以上の損傷が生じた割合は最も小さい。

また、図-2 から、S46 道示以前の道路橋の被災率は、S55 道示及び H2 道示の橋より小さくなっていることが分かる。S46 道示以前の道路橋が被災度 B 以上の損傷を受けた割合が、H2 道示及び S55 道示の道路橋と比べ大きくならなかったのは、Kawashima¹⁴⁾が指摘するように、1978 年宮城県沖地震の被災により耐震性が低い橋梁の更新・補強が進められたこと、また、近年においても「緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プログラム（平成 17 年度～19 年度）」等により耐震補強が進められてきたためだと考えられる。同プログラムでは、S55 年道示より古い基準を適用した緊急輸送道路の橋梁のうち特に優先的に補強する必要のある橋梁を対象とした耐震補強が行われ、直轄国道の道路橋は目標とした補強が概ね全橋で完了する等の成果を得ている。また、S46 年道示以前の橋の被災率が S55 道示及び H2 道示の橋と比べ限定的なものとなったことには、S46 道示以前の橋に SI 値 60(cm/s)以上の地震動が作用した割合が S55 道示及び H2 道示の橋と比べ小さかったことも寄与していると考えら

図-1 SI 値 20(cm/s)以上の地震動が作用した橋梁数

図-2 適用基準と被災度

(a) 全橋

(b) 被災度B以上の道路橋

図-3 道路橋に作用した地震動強度 (SI 値)

れる。

以上から、適用基準が異なる道路橋が地震動に曝された環境は厳密には同じものではないが、H8 年以降の基準改定や、S46 道示以前の道路橋に対する耐震補強等により、道路橋の耐震性の向上が図られてきていることが統計的に認められる。

(2) 道路橋被害と橋長の関係

畑・片岡⁴⁾は、道路橋の被災度と橋長、径間数の関係を分析した上で、橋長の大きな橋梁は被災度 A 及び B の損傷の発生率が大きくなることを報告するとともに、その原因は、橋長が長くなると径間数が増え、損傷箇所となり得る支承部や橋脚などが多数含まれるためとしている。ここでは、橋長の大きな橋の被災率が大きくなる傾向について、適用基準による差異を検討する。このため、橋梁被害データに含まれる道路橋のうち、MICHI に適用基準の情報が整理されている直轄国道の道路橋を検討対象としている。

直轄国道の道路橋のうち、被災度 B 以上の損傷が生じた橋の割合を、適用基準毎に橋長に応じて整理した結果を図-4 に示す。同図(a)には橋長によらない全橋の整理結果を、同図(b)には、橋長 50m 以上の道路橋の整理結果を示している。なお、橋長が 50m 以上になると、大半が複数径間の橋となる⁴⁾ことが報告されている。図-5 に示したように、本検討で対象とした直轄国道の道路橋では、橋長 50m 未満の橋に複数径間の橋が占める割合は 7%であるのに対し、橋長 50m 以上の橋に占める割合は 98%に達する。

図-4 から、全橋に比べ、橋長 50m 以上の橋に被災度 B 以上の損傷が生じる割合は適用基準によらず大きい。この理由としては、複数径間の橋では、損傷が生じ得る支承部や橋脚などが多数含まれるようになる⁴⁾ことに加え、地盤条件の変化等により局所的に強い地震動が作用する可能性が高くなること、また、単径間の橋に比べ複雑な振動特性を示す場合があることが考えられる。

(3) 道路橋被害と平面形状の関係

直轄国道の道路橋については、平面形状として、直橋、斜橋、曲線橋等の情報が MICHI に整理されている。ここでは、橋梁被害データに含まれる道路橋のうち、MICHI に適用基準の情報が整理されている直轄国道の道路橋を対象として、道路橋の被災度と平面形状の関係について検討した結果を示す。なお、道路橋は、全長にわたり直橋と斜橋、曲線橋が混合する形で構成されている場合もあるため、これらは検討対象から外し、斜橋・曲線橋のみで構成された道路橋と、直橋のみで構成された道路橋に着目する。

斜橋・曲線橋と直橋に被災度 B 以上の損傷が生じた

割合を、それぞれ、適用基準ごとに整理した結果を図-6(a)及び(b)に示す。図-6(b)から、S55 道示以降の直橋の数は限定されており、同図(a)に整理した斜橋・曲線橋との有意な差異を検討するのは困難である。

次に、斜橋・曲線橋及び直橋に被災度 B 以上の損傷をもたらした地震動強度の累積頻度を図-7 に示す。同図(a)及び(b)には、それぞれ、S46 道示以前及び S55 道示以降の道路橋の整理結果を示している。同図から、適用基準によらず、斜橋・曲線橋で被災度 B 以上の損傷が増加し始める地震動強度は、直橋に比べて小さい。また、斜橋・曲線橋及び直橋の何れについても、被災度 B 以上の損傷が生じ始める地震動強度は、S46 道示以前に比べ、S55 道示以降の橋で大きくなっており、基準改定に

図-4 橋長・適用基準に応じた被災度

図-5 複数径間の橋が占める割合 (直轄国道の道路橋)

図-6 適用基準に応じた被災度

図-7 直橋及び斜橋・曲線橋に被災度 B 以上の損傷を生じさせた地震動強度 (SI 値)

よる耐震性向上が認められる。

(4) 特殊橋の被害

橋梁被害データに基づき、被災度 B 以上の損傷が生じた道路橋の割合と橋に作用した地震動強度の関係を、全橋及び特殊橋で整理した結果を図-8 に示す。図は、橋梁被害データに含まれる直轄国道以外の道路橋も含んだものとなっている。また、特殊橋としては、アーチ橋、ランガー橋、ローゼ橋、トラス橋、斜張橋、吊橋、エクストラード橋等が含まれている。同図から、特殊橋の事例数が限定されており統計的な傾向と言い切れることは必ずしもできないが、検討対象とした事例によれば、特殊橋は全橋の整理結果に比べ、SI 値 75~100(cm/s)の地震動により被災度 B 以上の損傷が生じた割合が大きい。特殊橋には強い地震動の作用により複雑な挙動を示すものもあり、一定の損傷を受けるケースが生じたものと思われる。

4. まとめ

橋梁被害データ¹⁾、地震動強度の推定結果³⁾及び MICHI²⁾に基づき、東北地方太平洋沖地震で生じた道路橋被害の統計分析を行った。

図-8 特殊橋及び全橋の被災度と地震動強度

その結果, H8 道示以降の道路橋は, その他の適用基準の道路橋に比べ, 高い耐震性が確保されていること, また, S46 道示以前の道路橋は, S55 道示及び H2 道示の道路橋との相対比較から耐震性が改善されていることが認められ, これまでの基準改定や耐震補強等の効果が現れていることが示された. S55 道示以降の道路橋については, S46 道示以前の道路橋との相対比較から, 斜橋・曲線橋及び直橋ともに被災が生じ始める地震動強度が大きくなっていることが認められた. これも, S55 年以降の基準改定の効果の一面と推察される.

今後も, この様な分析を平成 28 年熊本地震等に対して進めることで, 耐震基準の改定や耐震補強による道路橋の耐震性の改善効果を明らかにするとともに, 緊急活動を支える道路ネットワークとしての耐性の向上効果等にも着目した分析を行うことで, 道路橋の耐震補強等の今後の進め方について検討していくことが重要だと考えられる.

謝辞: 本検討では, (公社)土木学会 地震工学委員会 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会によりまとめられた橋梁被害データを活用させて頂いた. ここに記して関係者の皆様に感謝申し上げる.

参考文献

- 1) (公社)土木学会 地震工学委員会 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会: 最終報告書, 土木学会,

- 2015.
 - 2) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, *Proceedings of the 3rd WCEE*, pp. 94-115, 1965.
 - 3) 国土技術政策総合研究所: 東北地方太平洋沖地震の地震動分布 (ver 3.0) の算出手順, <http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/index.htm> (2017 年 1 月 27 日閲覧)
 - 4) 畑明仁, 片岡正次郎: 2011 年東北地方太平洋沖地震による橋梁被害のマクロ分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4 (地震工学論文集第 35 巻), pp. I_676-I_690, 2016.5.
 - 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.
 - 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
 - 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
 - 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1990.
 - 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1980.
 - 10) 日本道路協会: 道路橋耐震設計指針・同解説, 1972.
 - 11) 日本道路協会: 鋼道路橋設計示方書解説, 1956.
 - 12) 日本道路技術協会: 鋼道路橋設計示方書案解説, 1940.
 - 13) 内務省土木局: 道路構造に関する細則案, 1926.
 - 14) Kawashima, K.: Damage of bridges due to the 2011 Great East Japan Earthquake, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 319-339, 2012.
- (2016. 11. 4 受付, 2017. 1. 27 修正, 2017. 2. 18 受理)

STATISTICAL STUDY ON DAMAGE TO HIGHWAY BRIDGES DUE TO THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Yoshihiro NAKAO and Shojiro KATAOKA

In the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, strong ground motions and tsunami caused damage to a large number of highway bridges in broad area. The existing study showed that the longer bridges or continuous girder type of bridges tend to have larger damage ratio. In this study, damage to highway bridges is statistically studied focusing on difference in damage-ratio and degree due to design codes, plane shapes, etc. The result statistically showed that the bridges designed in accordance with the post-1990 design codes tend to have less damage and that damage to the bridges designed in accordance with pre-1980 design codes has been reduced by seismic retrofit.