2011年東北地方太平洋沖地震により被災した 国道橋梁のフラジリティー特性

中村 晋1

¹正会員 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1) E-mail:s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp

ここでは東北地方太平洋沖地震によって被災した 960 の橋梁のうち津波の被害を除く 819 橋の被災デー タを使用し,被災の特徴とそれに及ぼす構造,地震動強さとの関係について検討を行った.被害を受けた 橋梁の被害形態に応じた数は橋台背面の段差,支承の破壊の順に多く,橋脚や橋台の被害が少ない。橋台 背面の被害は,橋梁形式による差異が少ない.支承の被災は鋼橋に多い.橋台背面の損傷確率は PGV が 30cm/s 前後で 30%以上の大きな値を示し、PGV の増加とともに増加していく傾向にあった。支承の被害は, 地震動の速度成分との相関が高いものの,加速度との関係性も有していることが分かる.

Key Words : times, italic, 10pt, one blank line below abstract, indent if key words exceed one line

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に より多くの社会基盤施設が被災した。高速道路や国道な どの道路網は,復旧などに重要な役割を担っている。落 橋が生じるような被害は生じていないが,補修や補強の ための交通規制などにより,復旧のみならず地域活動に 大きな影響を及ぼすことになる。被害の特徴を総合的か つ定量的に評価するために,被害のフラジリティー特性 を分析することが有用となる.さらに,得られたフラジ リティー特性は,地震への備え,さらに地震後の復旧対 応という観点で道路の被災想定を行うために利活用する ことができる.ここでは,国道の橋梁被害を対象とし, それを構成する部位に関するフラジリティー特性の評価 を行う.

岩手県,宮城県および福島県内に位置する国道のうち,東北地方太平洋沖地震により被災した橋梁は960橋 に及ぶ.ここでは、まず、津波による影響を含む橋梁の 被災状況について述べるが、津波以外の地震動により被 災した橋梁を検討の対象とした.次に、被災橋梁位置に おいて地震動強さを推定した.次に、被災した橋梁の構 造的な特徴を明らかにするため、被災部位、橋梁の形式、 設計基準の年代などについて分析する.最後に、被災数 の多い部位を対象として、フラジリティーの曲線の評価 を行う.

2. 国道の橋梁に関する被害概要

岩手県、宮城県及び福島県に位置する国道のうち被災 した橋960橋について、その位置を図-1に示す.そのう ち津波の被害を受けた橋梁は141橋あり、写真-1に示し た国道45号の歌津大橋のように橋脚が圧壊するなどの甚 大な被害が発生した.

ここでは 960 橋のうち津波による被害を除く 819 橋 を検討の対象とした.まず,橋梁の被災部位に応じた 被災件数の比較を図-2 に示す.図より,橋台背面の地 盤沈下による段差などの被災件数が最も多い.その一 例として,福島県の国道 6 号線に位置する鮫川橋で生 じた段差を写真-2 に示す.次いで,支承の被災が多く 発生している.支承の被害には BP 支承、ゴム支承、 鋳鉄支承といった種類によらず,いずれも被災してい る.鋳鉄支承の被災事例として,福島県の国道 4 号線 に位置する釈迦堂川橋の支承の破断事例を写真-3 に示 す.一方,橋脚や橋台の被災件数が 6 橋と少ないのも 特徴である.ここでは,橋台背面地盤と支承の被害に 着目して,構造的な特性や地震動強さとの関係につい て分析する.

3. 検討に用いた被災地点の強震動特性

フラジリティー特性の評価には、盛土の被災位置にお





図1. 岩手、宮城および福島県で被災した 960 橋 および無被災橋梁の位置

写真1.津波により被災した国道45号線の歌津橋



図 2. 被災橋梁の主要な被災 部位数の比較

400

写真2.橋台背面の段差、支承の被災事例

ける地震動強さが必要となる.それを評価する際,盛土 の被災地点における地盤の特性を考慮することが望まし い.しかし,被災地点における地盤情報は十分に把握で きていないために個別に評価することは困難である.こ こでは,被災地点の地震動強さに関する第一近似値とし て,被災地点の周辺を含む既往の強震観測記録より求め た地震動強さより,スプライン補間法による空間補間に より推定された値として求めた.盛土の変状に影響を及 ぼす様々な地震動の強度指標のうち,最大加速度PGA, 最大速度PGVを地震動強さとして用いた.

また、補間に用いた地震観測記録として、まず、E-NEXCOの高速道路網における61箇所のICで観測された 強震記録を用いた.さらに、防災科学研究所が構築した 強震ネットワーク(K-NET)、基盤強震観測網(KiK-net)で 観測された記録のうち、東北6県と、新潟県、群馬県、 栃木県、茨城県にて観測された369地点で得られた記録 を用いた.あわせて,国土交通省より公開されている87 箇所の施設で観測された記録を用いた.図-3にそれらの 観測点配置および空間補間により得られた東北6県と隣 接県のPGA, PGVの空間分布を示す.

橋台背面地盤の段差と支承(沓座の被害含む)の被害が 生じた橋梁で推定された PGA と PGV の関係を図4に示 す.両被害とも比較的小さな PGA, PGV より生じてい る.橋台背面地盤の段差の被害は地震動の等価周期(=2 π PGV/PGA)が 0.1 秒と短周期の揺れに対しても生じてい ることが分かる.

4. 橋梁の部位に応じた被災と地震動強さ,構造 的な特徴との関係

ここでは,橋台背面地盤の段差と支承(沓座の被害含



図4.被災した橋梁位置における PGA と PGV の関係

む)の被害と,地震動強さPGAおよびPGV,橋梁の種類, 橋長との関係,さらに準拠基準と被災件数の関係につい て検討を行う.

(1) 橋台背面の被害の分析

まず,橋台背面の被災と橋梁の準拠基準との関係を 表-1に示す。橋台背面に対する設計上の配慮は,1964年 道路橋下部構造設計指針(日本道路協会 Japan Road Association)にて初めて規定された.規定は,構造細目 として示され,十分に締め固めることを要求として示し た上で,多少の沈下はやむを得ないことも合わせて示さ れた.さらに,背面盛土の施工直後に舗装する場合には 表 1. 橋台背面の段差の生じた被災橋梁に関する設計 に用いた規準発行年と被災橋梁数の関係

Revised yea	Number of damaged bridge	
Before	69	
1964	(1964-1974)	88
(1975)	(1975-1989)	55
(1990)	(1990-1993)	7
1994	(1994-1995)	7
1996	(1996-2011)	31

踏掛版を橋台背面に設け,沈下による走行性や車両によ る橋台への作用を緩和するように留意することが示され た.1975年道路協示方書の下部構造編でも,構造細目と して規定され,排水に関する留意事項は加わったものの, 基本的な考え方は1964年指針と同じである.1990年, 1994年の示方書改訂では,設計事項に規定されているが, 内容は1975年版と同じである.地震による影響に対する 配慮は,1995年兵庫県南部地震後の1996年示方書の改訂 にて初めて示された.地震の振動や液状化による沈下が 生じる可能性があるため,盛土の施工のみならず,踏掛 版の設置が望ましいと規定された.被災した橋梁はその 準拠基準が1994年以前の古いものが多いが、最近の準拠





60

50

40

図5.橋台背面の段差被害の生じた橋梁位置の PGA と PGV の関係

Number of

damaged bridge

2

10

20

11

15

1

7

年と被災橋梁数の関係

1956

1964

1972

1980

1983

1993

Revised year of standard

Before 1955

(1956-1963)

(1964 - 1963)

(1972 - 1977)

(1972 - 1979)

(1980 - 1982)

(1993-)

図 6.構造材料に応じた橋梁数と橋梁位置の PGV の関係

PC RC

Steel

90-100

100-110



図7.構造材料に応じた支承に被災の生じた橋梁の橋長と PGA、PGVの関係

基準による橋梁も含まれている。作用地震動の強さには 準拠基準年代による差は認められなかった。

次に橋台背面の被害について地震動強さと構造的な特 性との関係について示す。最初に、被災位置における PGAとPGVの関係を図 - 6に示す。PGA、PGVともにかなり 小さな地震動にて被害が現れており、PGVの増加ととも に被災件数が多くなっていることが分かる。このことを 踏まえ、次に橋台背面の被災位置における地震動強さの うち、PGVと橋種に応じた被災件数との関係について図-7に示す。被害が生じた橋梁の形式は支承と異なり、PC, RC形式の橋梁が鋼橋に比べて少し多い程度であり、橋種 との明確な関係は認められない。また、被害はPGVが 30cm/sから70cm/sに至る広い範囲で多く生じている.

(2) 支障の被害分析

まず、図-6に支承の被災と被災した橋梁の準拠基準 との関係を示す。ここで、支承部の設計は、1956年鋼道

路橋設計示方書にて細目規定が設けられ、1964年の改訂 で、新たな使用鋼材や鋳鉄が追加された. さらに、1972 年に道路橋耐震設計指針が発行され、支承に要求される 耐震機能として地震時に落橋を生じさせないことが明確 に示されたともに、設計地震力をはじめとする構造細目 が規定された。1978年宮城県沖地震の際には1964年以前 の指針による橋梁の支承部が被災していた。1980年の道 路橋示方書の改訂では宮城県沖地震の調査結果をもとに 改訂を行った. 被災した橋梁の準拠基準として1980年代 以前のものが多く、特に1956年、1980年の基準により構 築された橋梁の被害が多かった.

次に、支承が被災した橋梁位置における地震動強さと 橋種,橋長さといった構造的な特性との関係を図-3,4 に示す。これより支承の被災地点においては鋼橋が最も 被災件数が多いことが分かる。これは鋼橋が軽量であり, 阿武隈川や北上川などの川幅の広い河川が東北地域に多 く存在するためと考えられる。また、橋長100m以上の

表3.橋台背面の段差被害が生じた橋梁について,PGA、PGV の地震動強さ区間に応じた平均地震動強さと被災、 無被災橋梁数の関係



a) PGA

b)PGV

-					
Average	Number	Number	Average	Number	Number
PGA	of	of non-	PGV	of	of non
(Gal)	damage	damage	(Gal)	damage	damage
150.6	0	77	8.1	0	8
275.7	7	70	16.2	16	116
357.0	60	173	24.8	36	67
448.3	66	86	35.1	71	128
536.2	67	58	45.6	49	123
662.6	52	40	54.3	99	83
754.2	26	22	63.4	41	37
860.6	24	30	74.8	27	16
947.0	17	18	85.4	8	12
1063.4	6	5	(94.9)	5	1
1153.3	10	3	(105.6)	2	1

図8.橋台背面の段差被害の生じた橋梁について、 地震動強さ区間に応じた平均地震動強さと 被災確率の関係

表 4. 支承	の被害が生	Eじた橋梁	について	,PGA、	PGV
の地震重	強さ区間	に応じた平	立均地震動	動強さど	:被災、
無被災橋	梁数の関	係			

a) PGA

b)PGV



Number Number Number Number Average Average of of non-PGV(G of of no PGA damage damage damage damage al) (Gal) 69.1 0 2 8.1 0 8 77 16.4 116 146.1 2 7 25.1 7 271.2 3 70 67 18 128 363.4 19 173 35 23 44.4 19 123 450.9 86 15 54.5 20 532.9 58 83 654.1 11 40 63.8 10 37 749.7 22 76.4 4 3 16 4 30 83.4 2 12 841 953.7 3 18

図9.支承の被害が生じた橋梁について、地震動強さ 区間に応じた平均地震動強さと被災確率の関係

橋梁においては橋長が長くなるにつれて小さなPGAに対 する被災件数が多くなる傾向が認められる。これは橋長 さが長くなるにつれ、支承への作用慣性力が増加するた めと考えられる.

5. 被災部位ごとの損傷確率

まず、橋台背面の段差被害に関する損傷確率とPGAお

よびPGVとの関係を図-9に示す。ここで,損傷確率は, ある地震動強さ区間における被災した橋梁と損傷した橋 梁と無被災橋梁との比率と定義した.さらに,地震動強 さはそれら橋梁地点における地震動強さの平均値とした. 表-3に地震動強さ区間毎の,平均地震動強さ,被災橋梁 数,無被災橋梁数を示す.PGAについては,損傷確率が 300Galから600Galにかけて増加しているが,それ以上の PGAに対して損傷確率は一定となっている.一方,PGVに ついて,PGVの増加量に応じてとはいえないものの, 20cm/sから70cm/sの広い区間で損傷確率が増加している. このような地震動強さの広い範囲での関係と,地盤の沈 下が被害原因であることを踏まえると,橋台背面の段差 被害は,地震動の速度成分との相関性を有していると考 えられる.

次に、支承の被害に関する損傷確率とPGAおよびPGVとの関係を図-10に示す。ここで、損傷確率および地震動 強さの定義は、橋台背面の段差被害と同じである.表-4 に地震動強さ区間毎の、平均地震動強さ、被災橋梁数、 無被災橋梁数を示す.損傷確率はPGAが700Gal以上、PGV が70cm/s以上で、低下している.それらの値より小さな 強さとして、まずPGAは300Galから500GalにかけてPGAと ともに損傷確率が増加する傾向を有している.一方、 PGVは、20cm/sから70cm/sまでの広い範囲で、PGVとともに 損傷確率が増加する傾向を有している.これより、支承 の被害は、地震動の速度成分との相関が高いものの、加 速度との関係性も有していることが分かる.

6. まとめ

ここでは東北地方太平洋沖地震によって被災した 960 の 橋梁のうち津波の被害を除く 819 橋の被災データを使用し, 被災の特徴とそれに及ぼす構造, 地震動強さとの関係に ついて検討を行った。

被害を受けた橋梁の被害形態に応じた数は橋台背面の 段差,支承の破壊の順に多く,橋脚や橋台の被害が少な い。

橋台背面の被害は,橋梁形式による差異が少ない.また, 被災した橋梁は準拠基準 1980 年代以前の古い基準により 構築された橋梁のみならず,最近の基準による橋梁も含ま れていた。橋台背面の損傷確率は PGV が 30cm/s 前後で 30%以上の大きな値を示し、PGV の増加とともに増加して いく傾向にあった。

支承の被災は鋼橋に多く、橋長100m以上の橋梁におい て橋長が長くなるにつれて小さなPGAに対する被災件数が 多い傾向が認められる。また、1980年代以前の古い基準によ り構築された橋梁の被災件数が多かった。支承の被害は、地 震動の速度成分との相関が高いものの、加速度との関係性 も有していることが分かる.

謝辞:この報告では、防災科学研究所の K-NET および KiK-NET で観察された地震記録を使用しました。さら に、東日本道路株式会社のインターチェンジ、および国 土交通省の施設で観察された地震記録も使用しました。 高速道路盛土の被災データは、東日本道路株式会社の東 北支社により提供されたものです。これらデータの提供 に感謝の意を表します。また、この研究の一部は、文部 科学省の私立大学戦略的研究基礎補助事業 2012-2015(S1203003;福島県発の災害に強く自立共生が可能な住 環境の創成に関する研究)の費用を用いて実施したもので す。あわせて、感謝の意を表します.

参考文献

 東日本大震災に関する東北支部学術合同調査委員会 (2013):平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震災害調査 報告書~地震・地震動および社会基盤施設の被害~

FORMATTING JAPANESE MANUSCRIPT FOR JOURNALS OF JSCE

Susumu NAKAMURA

Based on the damage data of 819 bridges except the damage caused by tsunami among 960 bridges due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, the analysis in this report was carried out to make clear the relationship between the damage features and the structural characteristics, and the intensity of earthquake ground motion. The records obtained at 369 points observed in 6 prefectures in Tohoku region with the surrounding 4 prefectures of Niigata Prefecture, Gumma Prefecture, Tochigi Prefecture and Ibaraki Prefecture were used to estimate the intensity of earthquake ground motion such as the peak ground acceleration (PGA) and the peak ground velocity PGV by Spline interpolation method.

As a number according to the damaged element of bridge, most damaged element is level differences behind abutments. Subsequently, there is much collapse of shoe. Moreover, damage about failure of a bridge pier or abutments is few. The damage behind abutments has few differences according to bridge type. Failure of shoe has occurred in a steel bridge mostly. It is found that the damage probability of level difference behind abutments becomes more than 30% around 30 cm/s of PGV, and that the damage of shoe has the high correlation with the component of velocity of an earthquake ground motion, but that it also has relationship with acceleration.