東北地方太平洋沖地震における 道路構造物の地震動被害に関する被害率曲線

庄司 学1・中村 友治2

¹正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

²学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:s1220899@u.tsukuba.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震において発生した道路構造物の道路延長距離に対する被害件数を被害率と 定義した上で,これと計測震度の関係を分析した.さらに,被害区分の分類から路面盛土損傷,道路陥没 及び道路亀裂に焦点を当てて,それぞれ被害率の算出を行った.道路損傷全体を対象とした場合には,計 測震度5.7及び6.0において最も高く0.0219件/kmを示した.路面盛土損傷では計測震度5.9で0.0141件/km, 道路陥没では計測震度5.6で0.0063件/km,路面亀裂では計測震度6.1で0.0142件/kmがそれぞれ最大となっ た.これらの算出された被害率を基に各被害区分において,被害推計の要素技術である被害率曲線を構築 した.

Key Words : the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, ground excitation, road structure, instrumental seismic intensity, damage function

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 (*M*_W=9.0)では、津波によって道路構造物に甚大な被害が 発生するとともに、東日本の広域におよぶ強震動によっ てそれらに多数の被害が発生した.

過去の地震動により発生した道路構造物の被害につい ては、地震動強さとの関連性の観点から多くの研究がな されている.東北地方太平洋沖地震以前の研究としては, 大西ら¹⁾は1990年代に発生した1995年兵庫県南部地震を 含む合計4つの地震により被害を受けた高速道路の被災 度と加速度,速度および計測震度との関係を分析してい る. 山崎ら²は兵庫県南部地震の際に被害をうけた高速 道路橋を対象として地震動強さと被害程度の関係を明ら かにし, 被害関数を構築している. 山村ら³は1946年南 海地震から2003年十勝沖地震までの57年間における主要 な合計16の地震により被害を受けた一般道路橋を対象と して損傷度ごとに地表面最大速度による被害関数を構築 している.また、丸山ら⁴は2004年新潟県中越地震にお いて多発した高速道路盛土の被害を対象として、地震動 強さと被害率の関係を被災ランクごとに算出している. 震災以降では庄司らっにより道路構造物の被害形態を主 として地震動作用による被害の観点から分析されている. また, 庄司ら[®]はリモートセンシングを用いて津波作用 を受けた道路構造物の被害把握手法の提案を行っている. このように数多くの先行知見が得られているが, 今回の 地震のような震度5弱以上の領域が東北6県及び関東1都6 県におよぶ空間的に広範囲の地震動により道路構造物に 発生した被害に対して, 道路構造物の被害と地震動強さ との関係を定式化している研究は少ない. 道路構造物の 被害は復旧活動に甚大な影響を与えるため, 発生が蓋然 的に予期される巨大地震に対して防災施策立案の事前作 業となる道路構造物の被害推計が必要となる.

以上を踏まえて本研究では、東北地方太平洋沖地震に よる東北6県及び関東1都6県における地震動を主要因と すると考えられる道路構造物の被害データを参照し、そ れらにより被害率の算出を行い、算出した被害率を基に 被害推計の要素技術である被害率曲線を構築する.

2. 分析対象とするデータと分析方法

(1) 分析対象とするデータ

分析対象とする地震動が主要因と考えられる道路構造物の被害データは庄司ら⁵により522件が示されている.このデータは余震による道路損傷と津波作用による道路損



図-1 被害地点,道路網及び計測震度



図-2 道路延長距離と計測震度の関係

傷が除外されている.また、東日本高速道路株式会社で 公開されている361データの正確な被害地点は不明であ るため本研究では分析から除外し.161件の道路損傷を 対象として分析を行う.これらの被害データの主要な被 害分類としては、大分類として96件の路面盛土損傷が示 されており、この中の小分類として25件の道路陥没及び 25件の道路亀裂が示されている.図-1には、分析対象と する道路構造物の被害データをプロットしたものを示す. なお,これらの被害データが属する道路網データとして, 同様に文献5)に総延長29,655kmの道路網が示されている. 被害データにおいて東日本高速道路株式会社で公開され た被害を除外しているため,対象道路網(29,655km)から 東日本高速道路(2,891km)を除いた総延長26,764kmを対象 道路網として分析を行う.なお,被害データと同様に浸 水域内の道路網は対象外としてモデル化していない.

(2) 地震動強さの推定及びそれに曝露される道路網

地震動強さの指標としては計測震度Uを用いる. Uの 空間分布の算出に当たっては, K-NET, KiK-net⁷の573観 測点,気象庁⁸の43観測点,国土技術政策総合研究所 ⁹(以下,国総研)の364観測点により得られた強震観測波 形ならびに青森県, 岩手県, 宮城県, 山形県, 福島県, 茨城県, 栃木県, 群馬県, 埼玉県, 千葉県, 神奈川県, 新潟県、山梨県および長野県の計14都道府県の地方公共 団体物が観測し気象庁に提供した134観測点により得られ た強震観測波形と震源データに基づき、地盤増幅度考慮 して工学的基盤面においてSimple Kriging法による空間補 間を適用し、250mメッシュ単位で推定した. Simple Kriging法に適用するトレンド成分には司・翠川¹⁰の距離 減衰式の形式を用いている. なお, その際には末冨・福 島11,産業技術総合研究所12,櫻井ら13及び水野14の手法 を参考にした.分析においては、図-1に示すように東北 6県及び関東1都6県の推定された計測震度分布データを 0.1刻みで使用した.計測震度の範囲は最小値2.5、最大 値が宮城県栗原市一帯で6.7である.図-2には、対象とす る道路網に対する曝露された計測震度毎の延長距離(以 降,道路延長距離)を示す.これより、計測震度区間4.8 での頻度が最も高くその道路延長距離は1,415kmとなっ ている. 震度階級ごとの道路延長距離を求めると, 震度 4で9,002km, 震度5弱で5,922km, 震度5強で5,775km, 震 度6弱で3,943km及び震度6強で893kmとなっている.

(3) 被害の計量化の指標

任意の計測震度に対して道路構造物に発生した被害件数*X*を,その道路延長距離*L*[km]で除した値を被害率*R*[件/km]として次式のように定義した.

$$R = \frac{X}{L} \tag{1}$$

この被害率の算出に当たり,各区間の道路延長が総延長の0.5%未満である場合にはその区間の被害率の精度が低くなると考えられるため分析から除外する.



3. 道路損傷と地震動強さの関係

161件全ての道路構造物の被害形態を考慮した場合の 被害率の算出を行う.図-3(a)には、計測震度0.1毎の道 路構造物の被害件数Xのヒストグラムを示す.被害件数 Xは計測震度3.5~6.1の範囲で発生しており、計測震度 5.7において最大値18件を示し、次に計測震度5.5におい て15件となった.図-3(b)には、図-2及び図-3(a)を基に式 (1)を用いて算出した被害率Rを計測震度0.1毎に示す.計 測震度4.0以下の範囲では最大0.0018[件/km]と低い被害率 を示し、計測震度4.0~5.6の範囲では被害率が0.0142[件 /km]まで上昇する.計測震度5.7及び6.0において被害率は 最大値である0.0219[件/km]を示した.

次に、大分類が路面盛土損傷の被害区分の被害データ に限定し、計測震度に対する道路構造物の被害率Rを算 出する.図-4(a)i)には、計測震度0.1毎の道路構造物の被 害件数Xのヒストグラムを示す.被害件数Xは計測震度 3.5~6.1の範囲で発生しており、計測震度5.5において最 大値12件を示し、次に計測震度5.6において10件となった. 図-4(a)ii)には、図-2及び図-4(a)i)を基に式(1)を用いて算出 した被害率Rを計測震度0.1毎に示す.計測震度5.0以下の 範囲では0.0013~0.0048件/kmを示し、計測震度5.0以上で は被害率が線形的に上昇して計測震度5.9において最大 値0.0141[件/km]まで上昇した.

小分類が道路陥没の被害区分の被害データに限定し, 計測震度に対する道路構造物の被害率Rを算出する.図-4(b)i)には,計測震度0.1毎の道路構造物の被害件数Xのヒ ストグラムを示す.被害件数Xは計測震度3.5~6.1の範囲 で発生しており,計測震度5.6において最大値6件を示し, 次に計測震度5.9において3件となった.図-4(b)ii)には, 図-2及び図-4(b)i)を基に式(1)を用いて算出した被害率Rを 計測震度0.1毎に示す.計測震度5.4以下の範囲では最大 0.0021件/kmと低い被害率を示し,計測震度5.6で被害率 は最大値0.0063件/kmまで上昇する.

次に、小分類が道路亀裂の被害区分の被害データに限定し、計測震度に対する道路構造物の被害率Rを算出する.図-4(c)i)には、計測震度0.1毎の道路構造物の被害件数Xのヒストグラムを示す.被害件数Xは計測震度3.7~6.1の範囲で発生しており、計測震度4.6において最大値3件を示した.図-4(c)i)には、図-2及び図-4(c)i)を基に式(1)を用いて算出した被害率Rを計測震度0.1毎に示す.計測 震度5.6以下の範囲では最大0.0024件/kmと低い被害率を示した.計測震度5.6から被害率が上昇する傾向を示し計測震度6.1で最大値0.0142件/kmまで上昇する.

4. 被害率曲線の構築

本研究では、計測震度*IJ*が大きくなった場合には被害率が頭打ちするという考え方のもとで、被害率曲線を標準正規分布の確率密度関数Φ(*x*)を用いて下記の式(2)のように標準被害率曲線をモデル化した.

$$R(IJ) = C\Phi((IJ - \mu)/\sigma)$$
(2)

ここで、 C, μ, σ は回帰で得られる定数であり、次の目的 関数を最小化することで求める.

$$\epsilon = \sum \left(\hat{R} - R(IJ) \right)^2 w \tag{3}$$

Rは実被害データから求められる被害率であり、wは道路延長である.即ち、道路延長による重み付き最小二乗法によって回帰定数を決定した.準ニュートン法による非線形最小二乗法を解法に用いた.これにより求めた被害率曲線を図-3(b)、図-4(a)ii)、図-4(b)ii)、に合わせて示す.

5. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震による東北6県及 び関東1都6県における地震動を主要因とすると考えられ る道路構造物の被害データを参照し、それらにより被害 率の算出を行い、算出した被害率を基に被害推計の要素 技術である被害率曲線を構築した.今後これらの被害率 を精査し、4章で求めた被害率曲線の精度をさらに高め る予定である.

謝辞:本研究は、筑波大学プロジェクト「巨大地震によ る複合災害の統合的リスクマネジメント」(研究代表 者:八木勇治准教授,研究分担者:庄司学)の助成を得 て実施されました.更に、本研究は、文部科学省・都市 防災プロジェクト「都市災害における災害対応能力の向 上方策に関する調査・研究」(研究代表者,京都大学・ 林春男教授)の一部助成を得て実施され、特に、「被災 者ニーズを踏まえたライフライン被害・復旧情報の体系 化」研究グループ(研究代表者,岐阜大学・能島暢呂教 授)のメンバーの方々からは貴重な御助言等を多々頂戴 しました.本研究においては筑波大学の高橋和慎氏に貴 重なデータを頂き、地震動強さの推定においては元筑波 大学の水野陽介氏にご協力頂きました.ここに記して謝 意を表します.

参考文献

- 大西淳一,山崎文雄,田山聡,福田直三:高速道路 における地震被害と地震動強さの関係,土木学会地 震工学研究発表会講演論文集,第 24 巻, pp.1289-1292, 1997.
- 2) 山崎文雄,大西淳一,田山聡,高野辰雄:高速道路 構造物に対する地震被害推定式の提案,第10回日本 地震工学シンポジウム論文集, pp.3491-3496, 1998.
- 山村猛,三神厚,辻原治,澤田勉:道路橋の地震被 害率関数の一作成法,土木学会地震工学論文集,第 29巻,pp.674-679,2007.
- 丸山喜久,山崎文雄,用害比呂之,土屋良之:新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係,土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.208-216, 2008.
- 5) 庄司学,高橋和慎,中村友治,桜井俊彰:2011 年東 北地方太平洋沖地震において地震動が主要因と考え られる道路構造物の被害―東北 6 県及び関東 1 都 6 県に敷設された国道及び県道の被害―,土木学会論 文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp.I_1186-I 1193, 2012.
- 6) 庄司学,高橋和慎,中村友治:2011 年東北地方太平 洋沖地震において津波作用を受けた橋梁構造物の被 害把握,日本地震工学会論文集,第12巻,第6号 (特集号),pp.104-119,2012.
- 7) 防災科学技術研究所:強震ネットワーク K-NET, Ki K-net, http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/, http://wwwold.

k-net.bosai.go.jp/k-net/,2012.9.10 閲覧.

- 気象庁:強震波形(平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋 沖地震), http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin /110311_tohoku-chiho-taiheiyouoki/index.html, 2012.9.10 閲覧. http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/11 0311_tohokuchiho-taiheiyouoki/index2.html, 2012.9.10 閲 覧.
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所:最新地震リン ク,http://www.nilim.go.jp/japanese/database/nwdb/html/ newearthquake.htm, 2012.9.10 閲覧.
- 10) 司宏俊, 翠川三郎:断層タイプ及び地盤条件を考慮 した最大加速度・最大速度の距離減衰式,日本建築 学会構造系論文集,第 523 号, pp.63-70, 1999.
- 末富岩雄,福島康宏:2011 年東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災)における地震動分布の推定,土木 学会第66回年次学術講演会,I-475, pp.949-950, 2011.
- 12) 産業技術総合研究所: QuakeMap, http://qq.ghz.geogrid. org/QuakeMap/, 2012.12.1 閲覧.
- 13) 櫻井俊彰, 庄司学, 高橋和慎, 中村友治: 2011 年東 北地方太平洋沖地震における斜面に関わる道路構造物 の被害分析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4(地震工学論文集第 31-b 巻), pp.I_1315-I 1325, 2012.
- 14) 水野陽介:東北地方太平洋沖地震で被害を受けたラ イフラインの被害率に関する信頼性評価,筑波大学 理工学群工学システム学類卒業論文,2013.

DEVELOPMENT OF DAMAFE FUNCTIONS FOR ROAD STRUCTURES DUE TO GROUND EXCITATIONS IN THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTUQUAKE

Gaku SHOJI and Tomoharu NAKAMURA

We assess the damaged road infrastructures due to ground excitations in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake. 161 damaged road structures are clarified into three types: 96 damage data of damaged surfaces and embankments, 25 damage data of subsidences and 25 damage data of cracks. For 161 data, we clarified damage ratio defined by the number of damaged road structures divided by total road lengths, by relating the damage ratio with the corresponding instrumental seismic intensities from estimating the associated ground motion spatial distributions. Maximum value of damage ratio of 161 damaged road structures is 0.0219 point/km with instrumental seismic intensity of 5.7 and 6.0. Finally, we develop the damage functions based on calculated damage ratios.