

地震時の斜面崩壊に関わる道路構造物の損傷モード分析 とそれを踏まえた被害関数の構築

櫻井俊彰¹・庄司学²・中村友治³

¹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）

³正会員 博(工) 筑波大学大学院准教授 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）

²学生会員 筑波大学 工学システム学類（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1）

1. 序論

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震($M_{JM}=9.0$)では、津波によって構造物に甚大な被害が発生するとともに、斜面に関わる構造物の被害も数多く発生している。地震時における斜面災害の甚大さは既に着目されており、2008年に発生した四川大地震($M_w=7.9$)¹⁾や岩手・宮城内陸地震($M_{JM}=7.2$)²⁾においては、道路構造物に地すべりや落石などの地山の変状に伴う路盤の損傷や斜面の崩壊土砂の作用による損傷が生じ、道路閉塞による甚大な機能不全が発生した。

斜面崩壊に関しては、斜面の安定やすべり破壊に関する実験的及び解析的検討³⁾とともに既往の斜面災害の要因分析⁴⁾など、斜面の崩壊そのものに着目した検討は数多くなされている。また、一定レベル以上の地震動強さが作用した場合における斜面の損傷に随伴した道路構造物の損傷モードについては櫻井・庄司⁵⁾により明らかとされているが、このような道路構造物の被害率を表現する被害関数は明らかとなっていない。以上を踏まえ、本研究では、土木学会・地盤工学会・日本地震工学会・日本地すべり学会合同調査団により示された平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震災害調査報告書⁶⁾のデータを基に、斜面の損傷に関わる道路構造物の損傷モードを類型化し、地震動強さから被害率を予測する被害関数の構築を試みる。

2. 分析対象とするデータ

本研究では、文献6)に示されたデータを分析対象

とする。この中には、震源、余震分布などの地震情報や、地震動に伴う地表変状、地すべり及び土石流などの斜面変状に関するデータが示されている。加えて、道路、橋、ダム、トンネルなどの土木構造物の被災状況やそれらの被災写真がデータとしてまとめられている。本研究では、961箇所にとび土木構造物の被災箇所から、斜面の損傷に関わる道路構造物の合計531の被災データを抽出した。その際、文献6)の中の「測定場所の地名」、「緯度」、「経度」、「路線名」及び「被災状況」のデータを活用した。それらの中から「被災写真」が示されている196のデータに対して第3章から第4章に示す損傷モードの類型化を行った。第5章に示す被害関数の構築にあたっては、損傷モードの種別を問わず、531の全てのデータを適用した。

3. 損傷モードの分析方法

斜面の損傷に関わる道路構造物の損傷モードを図-1のように類型化した。図-1には、損傷モードごとに分類されたデータ数を括弧内に示す。大分類(分類I)として路面損傷と斜面損傷の2つに分類した。路面損傷では斜面には損傷が生じていないが、道路構造物が斜面に隣接しており、地震時における斜面の震動による作用を受けうる状況を考慮して、斜面に関わる損傷として取り上げた。斜面損傷では、斜面そのものの崩壊に加え、道路構造物の崩壊を加味した。さらに、路面損傷は亀裂、陥没、隆起、沈下の4つに細分類し(分類II)、その上で亀裂は縦亀裂、横亀裂及び縦亀裂と横亀裂の混合の3つに分類した(分類III)。また、斜面損傷は亀裂と地すべりの2つに分

類し(分類II), その上で, 地すべりは発生箇所による分類として山腹崩壊, 自然斜面・切土法面崩壊, 路面崩壊及び路肩崩壊の4つに分類した(分類III). また, 損傷メカニズムによる分類として, 千木良^{7), 8)}の研究知見を参考に, 深層崩壊, 地すべり, 表層崩壊及び崩落の4つに分類した(分類III).

4. 路面損傷と斜面損傷の特徴

被災地点と標高及び道路網の関係を図-2に示す. また, 図-2の道路網は文献9)を参考に, 斜面の損傷に関わる道路構造物が含まれる国道, 県道, 市道の道路網をGoogle Earthの情報を全ての地点で確認しながらモデル化したものである. 路面損傷では, 全140データの被災地点の中で宮城県栗原市が115データ, 宮城県大崎市に10データ及び岩手県奥州市に7データが分布している. 震源付近は奥羽山脈地帯であり, 標高20m~1080mの範囲において, 標高20m~200mで27データ, 標高200m~400mで63データ及び標高400m~600mで36データが分布している. 路線との関係においては, 国道398号線に33データ, 県道42号線に23データ及び県道249号線に14データが分布しており, 平均被災距離はそれぞれ2.03km, 1.01km及び1.24kmである.

斜面損傷では, 全56データの中で宮城県栗原市に33データ, 宮城県一関市に11データ及び岩手県奥州市に6データが分布している. 被災地点は標高20m~840mの範囲において, 標高20m~200mで7データ, 標高200m~400mで24データ及び標高400m~600mで19データが分布している. 路線との関係においては, 国道342号線に9データ, 県道42号線に8データ及び国道398号線に7データが分布しており, 平均被災距離はそれぞれ2.88km, 1.26km及び2.97kmである.

5. 被害関数の構築

強震観測点の地表最大速度(以下, PGV)を当該表層地盤の増幅度を考慮して工学的基盤面($V_s=600\text{m/s}$)まで引き戻し, 面的な空間補間をした後に再び増幅度を考慮して地表面に引き戻すことで, 250mメッシュごとの PGV の空間分布を図-3のように推定した. その際には, K-NET, KiK-net¹⁰⁾及びJMAの強震観測データに対して, 震源(東経140度52.8分, 北緯39度01.7分)¹¹⁾より100km以内に含まれる合計115の強震

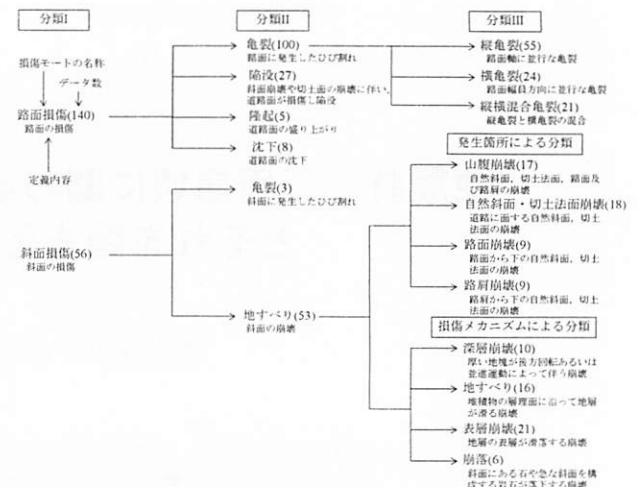


図-1 損傷モードの定義

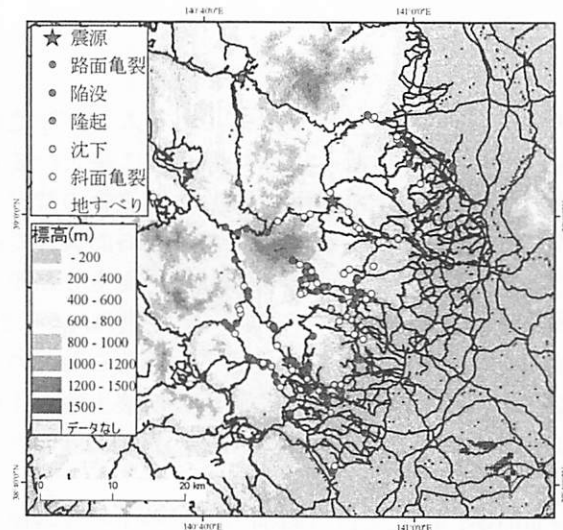


図-2 被災地点と標高及び道路網の関係

波形を抽出し, 各強震観測点における PGV を求めた. 求めた PGV を藤本・翠川¹²⁾による次式の地盤増幅度 ARV を用いて工学的基盤面における PGV_{600} を求めた.

$$\text{Log}_{10} ARV = 2.367 - 0.852 \text{Log}_{10} AVS30 \quad (1)$$

$$PGV_{600} = PGV / ARV \quad (2)$$

ここで, $AVS30$ は深度30mまでの地盤の平均S波速度である. $AVS30$ のデータは松岡ら¹³⁾の微地形区分より得られる250mメッシュのデータを用いた. 式(2)より得られた PGV_{600} から, Simple Kriging法による空間補間により各メッシュにおける PGV_{600} を推定した. Simple Kriging法に適用するトレンド成分には次式の司・翠川¹⁴⁾の距離減衰式を用いた.

$$\text{Log}_{10} PGV_{600} = c_1 - \text{Log}_{10}(R + c_2) + c_3 R \quad (3)$$

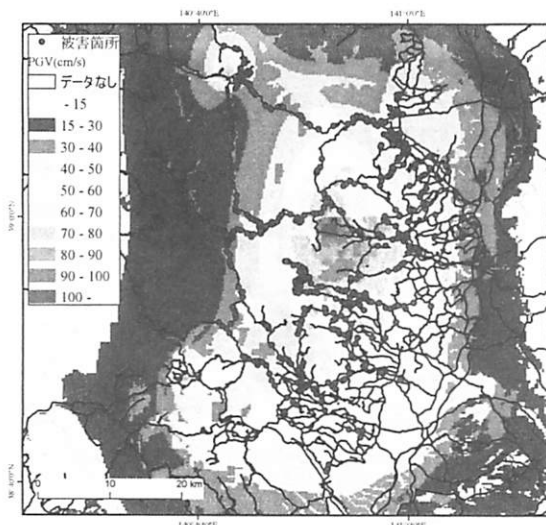


図-3 空間補完された地表最大速度分布

ここで、 R は断層最短距離、 c_1 , c_2 , c_3 は回帰定数である。また、計算対象点と強震観測点の PGV の間の共分散 γ のモデルとしては次式に示す指数型モデルを用いた。

$$\gamma = \text{Var}[X^2] \exp^{(-h/a)} \quad (4)$$

ここで、 $\text{Var}[X^2]$ は全観測点における $X=PGV_{600}$ の分散であり、 h は計算対象点と強震観測点間の距離、 a は相関距離をそれぞれ示している。末富ら¹⁵⁾の研究事例では、 PGV の空間分布(以下、 PGV 分布)の収束が見られる数値を相関距離の最適値として用いており、本研究ではその方法を参考に相関距離20km, 30km, 40km及び50kmに変化させて PGV 分布の変動を検討し、収束が見られる相関距離 a を40kmと設定した。

以上より、合計531のデータに対して路面損傷と斜面損傷の損傷モードの区別をせず、対象とする道路網を最大傾斜角10度以上の領域に図-4のように絞り込んだ。これは、文献16)に基づき最大傾斜角が10度未満では斜面の損傷が発生しないと仮定したためである。さらに、図-3のように被害の発生が見られる $PGV=15\text{cm/s}$ 以上の領域内の国道、県道、市道を対象とした。以上より、 $PGV=15\text{cm/s} \sim 120\text{cm/s}$ の領域で1cm/sごとに斜面の損傷に関する道路構造物の被害率 X/L を求めた。ここで、被害率 X/L は道路長さ $L[\text{km}]$ あたりの被害箇所数 X と定義する。被害関数 $R(x)$ は丸山ら¹⁷⁾の手法に倣い、地震動強さ x を PGV 、被害率を X/L と定めた上で、対数正規分布関数の形状により次式のようにモデル化した。

$$R(x) = C\Phi\{(\ln x - \lambda)/\zeta\} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \sum \{X(x)/L(x) - R(x)\}^2 L(x) \quad (6)$$

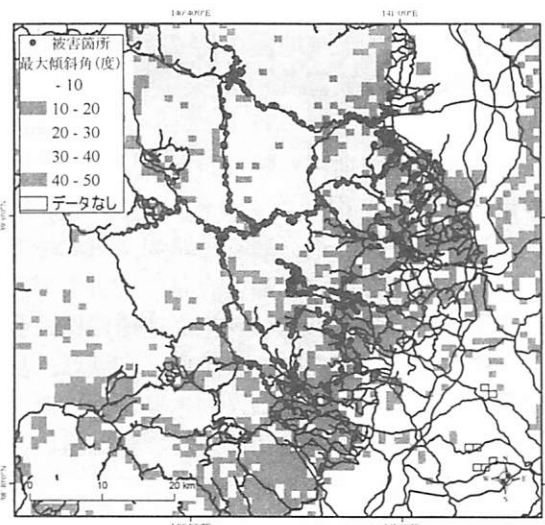


図-4 被災地点と最大傾斜角の関係

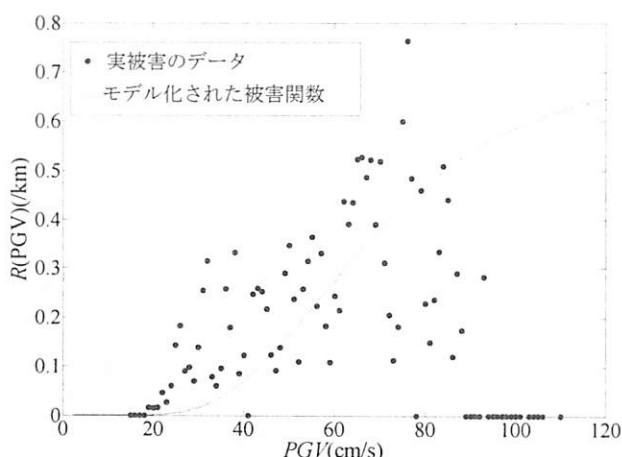


図-5 実被害のデータとモデル化された被害関数

表-1 回帰定数

C	μ	σ	λ	ζ	制約条件
0.694	72.2	30.1	4.20	0.400	$\lambda \geq 4.20$ $0.3 \leq \zeta \leq 0.4$

ここで、 C , μ , σ , λ , ζ は回帰定数であり、式(6)に示す ε は道路長さ $L(x)$ による重み付きの実被害データに基づく被害率 $X(x)/L(x)$ とモデル化された被害率 $R(x)$ の誤差の二乗である。また、被害関数の立ち上がりを実被害と整合させるために、回帰定数は表-1に示すような制約条件を設けた。図-5には、斜面の損傷に関わる道路構造物の実被害データに基づく被害率のデータ、及びそれらのデータ群をモデル化した被害関数を示している。図-5より、実被害データに関しては $PGV=19\text{cm/s} \sim 93\text{cm/s}$ の範囲で被災が生じており、被害率は最大で0.762箇所/kmを示す。モデル化された被害関数については、 $\mu=72.2\text{cm/s}$, $\sigma=30.1\text{cm/s}$ を示し、最大で0.694箇所/kmの被害を表現している。

6. 東北地方太平洋沖地震の際の斜面に関わる道路構造物の被害

東北地方太平洋沖地震の際の斜面に関わる道路構造物の損傷箇所を、図-6のように計213データ抽出した。その際には、国土交通省道路局、東北地方整備局、関東地方整備局、各都道府県の被害情報、東日本高速道路株式会社、及び首都高速道路株式会社の被害情報を基に、青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、山梨県、及び静岡県の高速度道路、国道、県道の計517データの損傷を分析対象とし、第5章で示した検証方法を基に精査を行った。都道府県別には、岩手県に65データ、宮城県に42データ、山形県に3データ、福島県に92データ、茨城県に5データ、栃木県に3データ、群馬県に1データ、及び千葉県に2データとなった。

7. 結論

本研究では、土木学会・地盤工学会・日本地震工学会・日本地すべり学会合同調査団により示された平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震災害調査報告書のデータを基に、斜面の損傷に関わる道路構造物の損傷モードを類型化し、地震動強さから被害率を予測する被害関数の構築を試みた。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(A)「豪雨・地震による斜面災害の高精度予測システムの開発」(研究代表者：山田恭央・筑波大学教授)の助成を得て実施されました。松島亘志・筑波大学准教授をはじめ、上記研究グループの皆様方からは貴重なご助言を頂きました。

参考文献

- 1) United States Geological Survey(USGS) : <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan/>, 2010.8.12参照。
- 2) 土木学会・地盤工学会・日本地震工学会・日本地すべり学会合同調査団：岩手・宮城内陸地震速報会 報告, <http://www.jsce.or.jp/report/50/news3.shtml>, 2008年。
- 3) 例えば、鶴飼恵三, 若井明彦, 尾上篤生, 樋口邦弘：地震時の斜面崩壊に関する数値解析的検討, 第40回地盤工学研究発表会, No.1148/E-06, pp.2291-2292, 2005.7。
- 4) 例えば、國生剛治, 石澤友浩, 長谷祐樹, 山本祐美加：2008年岩手・宮城内陸地震における斜面崩壊の要因分析, 第44回地盤工学研究発表会, No.717/No.C-09, pp.1433-1434, 2009年。

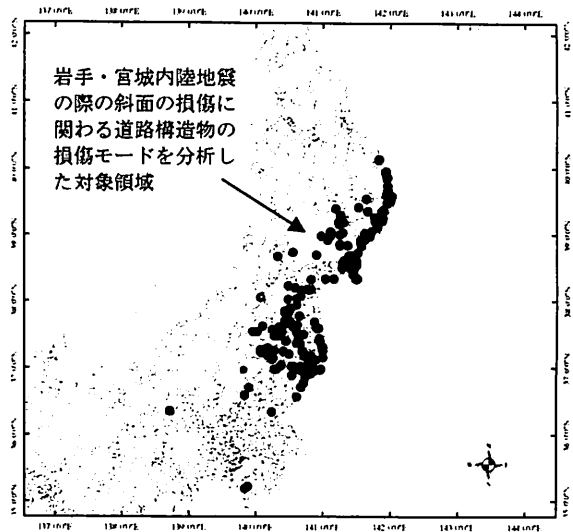


図-6 東日本大震災における斜面に関わる道路被害

- 5) 櫻井俊彰, 庄司学：地震時の斜面崩壊に伴う道路構造物の損傷モード解析, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2949-2956, 2010年。
- 6) 平成20年岩手・宮城内陸地震4学協会東北合同調査委員会：平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震災害調査報告書(CD-ROM), 2009.6。
- 7) 千木良雅弘：2004年新潟県中越地震による斜面災害の地質・地形的特徴, 応用地質, 第46巻, 第3号, pp.115-124, 2005年。
- 8) 千木良雅弘：地すべり・崩壊の発生場所予測—地質と地形からみた技術の現状と今後の展開, 土木学会論文集C, Vol.62, No.4, pp.722-735, 2006.10。
- 9) 国土交通省国土計画局：国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>。
- 10) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク K-NET, KiK-net : <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>, <http://www.wold.k-net.bosai.go.jp/k-net/>。
- 11) 気象庁： http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/db_map/indexemg.html, 2011.7.12参照。
- 12) 藤本一雄, 翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 第6巻, 第1号, pp.11-22, 2006年。
- 13) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均S波速度分布の推定, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.239-251, 2005年。
- 14) 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年。
- 15) 末富岩雄, 石田栄介, 磯山龍二：空間補間による地震動分布推定の高精度化のための一検討, 土木学会地震工学論文集, 第28巻, 第191号, pp.1-8, 2005年。
- 16) 石出貴大, 山崎文雄：ALOS/AVNIR-2 画像を用いた2008年岩手・宮城内陸地震における斜面崩壊の検出, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第3号, pp.12-24, 2010年。
- 17) 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年。