

地震動強度の空間相関に基づく橋梁の被害分布を考慮した 道路ネットワークの確率論的接続性評価

名古屋 真路¹・石橋 寛樹²

¹学生会員 日本大学大学院 工学研究科土木工学専攻（〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定中河原1番地）
²正会員 日本大学助教 工学部土木工学科（〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定中河原1番地）

1. はじめに

地震動強度には空間的な相関があり、その相関を表す指標である相関距離は、構造物や道路閉塞の被害分布を決定づける重要なパラメータである¹⁾。相関距離は、過去の地震観測記録を用いた統計的手法により推定することができ、地震や観測地域によって異なることが確認されている²⁾。また、阿部ら³⁾は、地震動強度の空間相関に応じて、建物の被害分布が大きく異なることを明らかにし、将来の地震に対する防災対策を進める上で空間相関を適切に考慮することの重要性を示している。地震後の道路ネットワークを対象とする種々の研究が国内外で盛んに行われているが^{例えば4)}、地震動強度の空間相関と、道路構造物の被害分布およびそれに関わる道路ネットワークの接続性との関連性を検証した事例は少ない。

本研究では、橋梁を含む道路ネットワークを対象に、地震動強度の空間的ばらつきが道路ネットワークの接続性に及ぼす影響を評価する。具体的には、

日本海溝沿いの地震の発生を想定し、2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて、東北地方における地震動強度の空間相関を評価する。東北地方沿岸部に位置する道路ネットワークを対象に、完全相関、完全独立、および、2011年東北地方太平洋沖地震の観測データから推定される相関距離に基づく空間的ばらつきをそれぞれ仮定し、モンテカルロ法(MCS)により距離減衰式の地震内誤差にばらつきを与えることで、疑似PGV群として各橋梁位置における地動最大速度(PGV)を多数生成する。疑似PGV群と、橋梁の脆弱性評価により算出される fragility 曲線に基づく各橋梁の損傷の発生有無および通行可否判定を繰り返し行い、道路ネットワーク全体の接続性を評価・比較する。

2. 空間相関を考慮したPGV分布の生成

(1) 相関距離の推定

地震動強度の空間相関を考慮した道路ネットワー

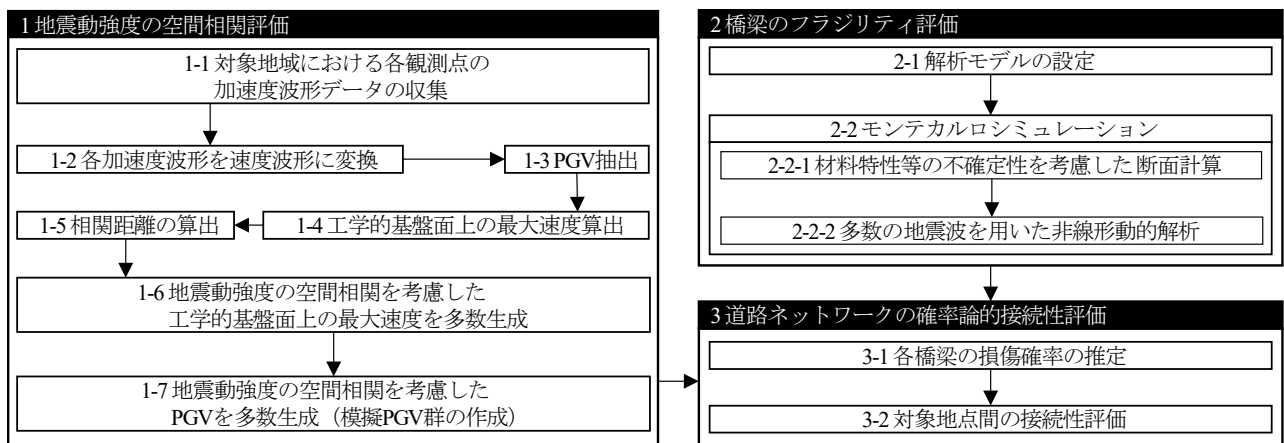


図-1 地震動強度の空間相関を考慮した道路ネットワークの確率論的接続性評価手順

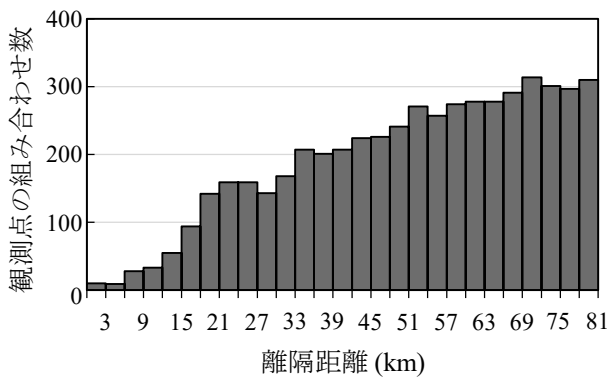


図-2 離隔距離と観測点の組み合わせ数の関係

クの確率論的接続性評価手順を図-1に示す。解析対象道路ネットワークが位置する地域を対象に、過去に観測された加速度波形データを多数収集する。各加速度波形データの基準線を補正した後、速度波形に変換することで得られる水平2方向成分を合成し、PGVを抽出する。J-SHIS⁵⁾の公開する表層30mの平均S波速度、および、山口・翠川⁶⁾による地盤増幅率の推定手法を用いて、各観測地点における工学的基盤面上（本研究では平均S波速度=720m/secの基盤面）の最大速度を算出する。地理情報システム (GIS) を用いて各観測点間の離隔距離を求め、離隔距離に対する工学的基盤面上の最大速度の相関係数を算出し、式(1)に示される指数型の相関関数を用いて相関距離を推定する。

$$\rho = \exp\left(-\frac{h}{b}\right) \quad (1)$$

ここに ρ は相関係数、 h は離隔距離、 b は相関距離であり、 $\rho=1/e(=0.368)$ となる離隔距離である。

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に東北地方で観測されたK-NET・KiK-netの観測データを用いて、離隔距離3km刻みで相関係数を算出することで地震動強度の相関距離を推定した。図-2に、離隔距離と観測点の組み合わせ数の関係を示す。また、相関関数および相関距離の推定結果を図-3に示す。本研究で使用した観測点数は相関距離を評価するには十分な数であり⁷⁾、2011年東北地方太平洋沖地震における東北地方で観測された地震動強度の相関距離は35.6kmと推定された。

(2) 相関距離に基づく模擬PGV群の生成

MCSに基づき、各橋梁位置の模擬PGV群を作成する。橋梁数 N 、MCS試行回数 M とし、平均値0、標準偏差 σ の独立した正規乱数による $N \times M$ の行列 \mathbf{Z} を作

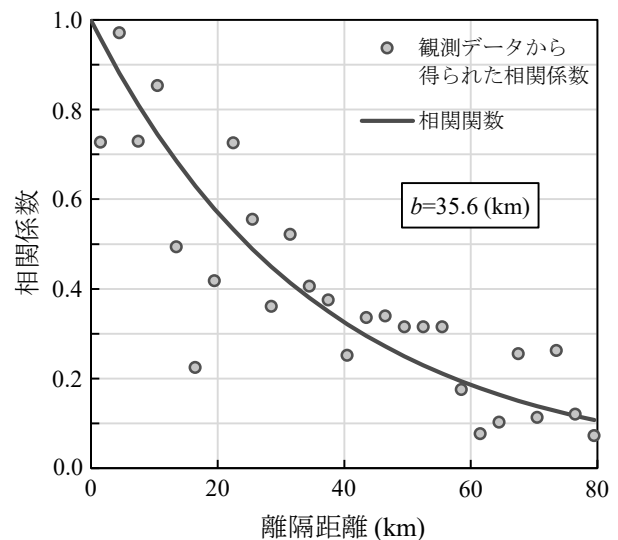


図-3 相関関数および相関距離の推定結果

成する。各橋梁間の離隔距離と式(1)より、 $N \times N$ の相関行列 \mathbf{P} を作成する。 \mathbf{P} をコレスキー分解することで得られる下三角行列 \mathbf{L} と生成した行列 \mathbf{Z} の積により、距離減衰式を表す次式における地震内誤差 e_{INTRA} を多数生成する。

$$\log V' = f(M_w, D, X) + e_{INTRA} + e_{INTER} \quad (2)$$

ここに、 V' は工学的基盤面上の最大速度、 M_w はモーメントマグニチュード、 D は震源深さ、 X は断層面最短距離、 e_{INTER} は地震間誤差である。

本研究では、日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会⁸⁾が公表している、日本海溝沿いの地震に関する強震断層パラメータを使用する。橋梁地点間の地震動強度の空間相関を、完全相関 ($\rho=1$)、完全独立 ($\rho=0$)、および、図-3に示される2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録より得られた、相関距離 $b=35.6$ kmとする式(1)に従うとそれぞれ仮定し、片岡ら⁹⁾の距離減衰式を用いることで、地震動強度の空間相関を考慮した工学的基盤面上の模擬最大速度群を生成する。各橋梁位置の模擬最大速度群に地盤増幅率⁶⁾を乗じることで、空間相関を考慮した模擬PGV群を生成する。

3. 橋梁のフラジリティ評価

石橋ら¹⁰⁾を参考に、MCSにより材料特性や軸力のばらつき、部材耐力の評価に伴うモデル誤差を考慮した断面計算を行い、橋脚の水平荷重-水平変位関係を多数算出する。本研究では、平成8年道路橋示

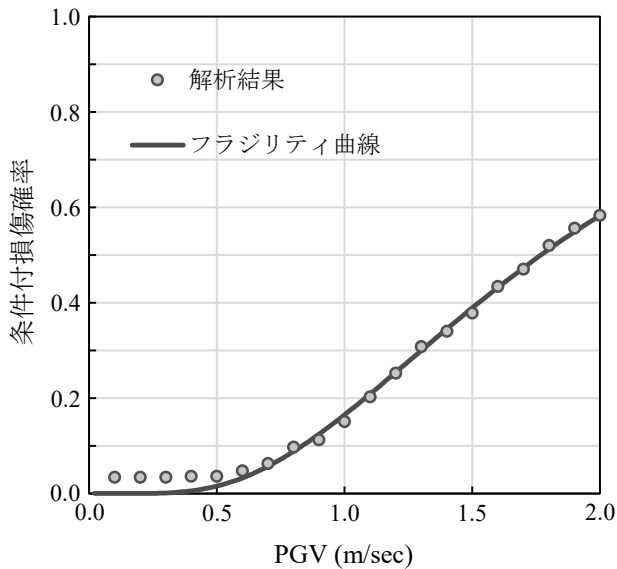


図-4 フラジリティ曲線

方書に準拠する，橋脚高さ6mのRC橋脚を想定し，フラジリティ評価を行った．使用した地震動群は計523波であり，K-NET・KiK-netより，1996年8月から2019年2月の期間で最大加速度が 0.1m/sec^2 以上， $M_w 5.5$ 以上の地震を対象に，各地震につき最大3波選択することで作成した．各地震波のPGVを 0.1m/sec 刻みで $0.1\sim 2.0\text{m/sec}$ となるように振幅調整し，1質点系非線形ばねモデルによる非線形動的解析を逐次実施した．橋梁の損傷に伴う道路閉塞を考慮するため，損傷度として終局限界を想定し，曲げ破壊，せん断破壊，および残留変位に関する照査をそれぞれ行うことで損傷判定を行った．各PGVに対する損傷確率を基に累積対数正規分布で近似することで，図-4に示されるフラジリティ曲線を算出した．

4. 道路ネットワークの確率論的接続性評価

(1) 解析対象の道路ネットワーク

日本海溝沿いの地震の発生を想定し，東北地方沿岸部に位置する福島県南相馬市から相馬市までの道路ネットワークを対象に，地震動強度の空間相関が道路ネットワークの接続性に及ぼす影響を評価する．解析対象の道路ネットワークおよび想定する各道路の経路構成を図-5および表-1にそれぞれ示す．MCSにより得られる，表-1に示される経路が1つ以上存在する確率の平均値を道路ネットワークの接続性として定義する．MCSの各試行に対して，模擬PGV群とフラジリティ曲線を基に各橋梁の損傷確率を逐次算出し，閉区間 $[0,1]$ の一樣乱数と比較することで橋梁地点での道路閉塞を判定する．各経路上で橋梁が

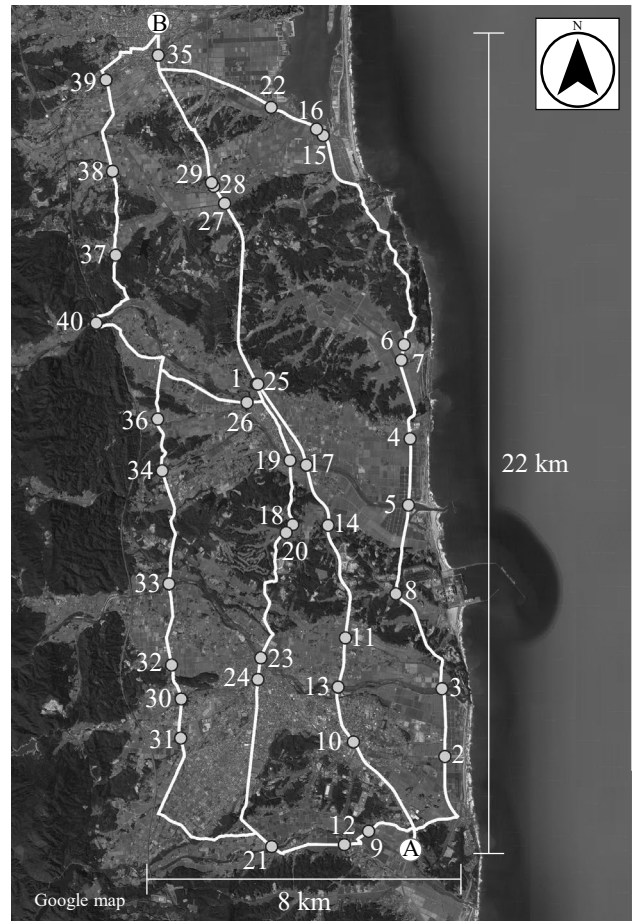


図-5 解析対象の道路ネットワーク

表-1 想定する各道路の経路構成

経路番号	経路 (ルート上に存在する橋梁番号)
i	A→2→3→8→5→4→7→6→15→16 →22→35→B
ii	A→10→13→11→14→17→25→27 →28→29→35→B
iii	A→10→13→11→14→17→25→1→26 →40→37→38→39→B
iv	A→9→12→21→24→23→20→18→19 →1→27→28→29→35→B
v	A→9→12→21→24→23→20→18→19 →26→40→37→38→39→B
vi	A→9→12→21→31→30→32→33→34 →36→26→1→27→28→29→35→B
vii	A→9→12→21→31→30→32→33→34 →36→40→37→38→39→B

1つ以上損壊する場合，該当する経路は通行不能と判断する．なお，本研究では，道路ネットワークに介在する橋梁は全て同一と仮定し，各橋梁に対して図-4に示されるフラジリティ曲線を適用する．

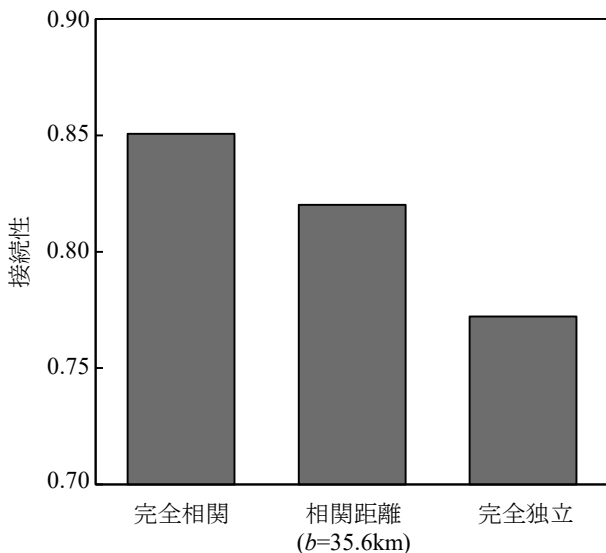


図-6 道路ネットワークの接続性評価結果

(2) 道路ネットワークの接続性評価結果

完全相関・完全独立・相関距離に基づく空間的ばらつきをそれぞれ想定し、道路ネットワークの接続性を評価・比較する。道路ネットワークの接続性評価結果を図-6に示す。各橋梁位置における地震動強度の空間相関が完全相関、完全独立、および相関距離に基づく相関を有する場合、接続性はそれぞれ0.85、0.77および0.82となった。完全相関の場合、解析対象地域内における橋梁の被害分布が局所的に生じる傾向が強くなり、2地点間を結ぶ経路が1つ以上存在するケースが多くなる。一方で、完全独立の場合、橋梁被害がランダムに発生する傾向が強くなり、結果として各経路の道路閉塞が同時に発生する可能性が高くなる。すなわち、完全相関あるいは完全独立を仮定した場合、道路ネットワークの接続性を過大あるいは過小に評価するおそれがある。空間相関を適切に考慮することで、道路ネットワークの接続性を精緻に評価できることが示された。

5. 結論

地震動強度の空間相関を考慮した道路ネットワークの確率論的接続性評価手法を提案した。日本海沿いで発生が懸念されている地震を対象に、地震内誤差として地震動強度の空間相関を反映可能な距離減衰式と、橋梁のフラジリティ曲線を用いることで、東北地方沿岸部に位置する橋梁の被害分布をMCSに基づいて逐次求めた。経路上に損壊した橋梁が1つ以上存在する場合に道路閉塞が生じると仮定し、地震後における道路ネットワークの接続性を算出した。過去の地震観測記録に基づいて推定される地震動強

度の空間相関を考慮することで、道路ネットワークの接続性の過大および過小評価を抑えられることが示された。今後は、解析対象とする道路ネットワークの規模や、対象地域による空間相関の影響の差異を検証していく。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費21K14235の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Sokolov, V. and Wenzel, F.: Influence of ground-motion correlation on probabilistic assessments of seismic hazard and loss: sensitivity analysis, *Bull. Earthq. Eng.*, Vol.9, pp.1339-1360, 2011.
- 2) Wang, M. and Takada, T.: Macrospatial correlation model of seismic ground motions, *Earthq. Spectra*, Vol.21, No.4, pp.1137-1156, 2005.
- 3) 阿部雄太, 山本治貴, 中村雅紀, 秋山伸一, 井上哲也: 地震動強さの距離減衰式にみられるパラツキの空間相関が巨大地震の被害予測に与える影響, 日本地震工学会論文集, Vol.17, No.2, pp.74-87, 2017.
- 4) Ishibashi, H., Akiyama, M., Frangopol, D.M., Koshimura, S., Kojima, T. and Nanami, K.: Framework for estimating the risk and resilience of road networks with bridges and embankments under both seismic and tsunami hazards, *Struct. Infrastruct. Eng.*, Vol.17, No.4, pp.494-514, 2021.
- 5) 防災科学技術研究所: J-SHIS, <https://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2022年3月4日閲覧)
- 6) 山口亮・翠川三郎: 地盤の平均S波速度を用いた地盤増幅率の推定手法の改良, 日本地震工学会論文集, Vol.11, No.3, pp.85-101, 2011.
- 7) 河野哲也, 永田茂, 小島清嗣, 北野哲司, 河合亜紀: 名古屋地域における地震動強度の距離相関特性と地震動分布推定への応用, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.25, pp.129-132, 1999.
- 8) 内閣府 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会: https://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaiko_chishima/model/index.html (2022年3月4日閲覧)
- 9) 片岡正次郎・佐藤智美・松本俊輔・日部毅明: 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集A, Vol.62, No.4, pp.740-757, 2006.
- 10) 石橋寛樹, 小島貴之, 秋山充良, 越村俊一: 強震動と津波ハザードの連続性を考慮した橋梁・盛土構造物の信頼性評価法の提案と南海トラフ地震を想定したケーススタディ, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.1, pp.41-60, 2020.