第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

地震動強度の空間相関特性を考慮した 橋梁および道路を有する道路ネットワークの接続確率評価

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

地震による道路構造物の被害分布および道路ネットワークの接続確率（任意の地点間を移動できる確率）を事前に評価することは早期復旧の一助となる．地震被害の分布に関する研究として，阿部ら [1)]は，地震動強度の空間的な相関特性を考慮することで，想定される被害の地域的な偏りを表現している．また，地震後の道路ネットワークの接続確率に関する研究として，青木ら [2)]は，地震動と津波の被害を受ける橋梁の損傷が道路ネットワークに及ぼす影響を評価している．藤見ら [3)]は，SI 値と橋梁の損傷確率から，道路ネットワークの寸断による被害額の推定手法を提示している．道路ネットワークの接続確率を評価する既往研究の多くは，道路構造物として橋梁のみを扱っており，複数の異種構造物や地震動強度の空間相関を考慮している研究は少ない．

本研究では，対象地域における地震動強度の空間相関特性とそれに基づく地震動の分布予測，道路構造物として扱う橋梁および道路の脆弱性評価，さらには，道路ネットワークの接続確率評価を一貫して評価可能な手法を提案する．日本海溝沿いの巨大地震（以下，日本海溝地震）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相関距離を推定する．モンテカルロ法 (MCS)により，距離減衰式の地震内誤差に対して相関距離に基づいたばらつきを与えることで，各道路構造物位置における空間相関を考慮した地動最大速度 (PGV)を生成する．道路構造物の脆弱性評価手法として，橋梁は数値的手法，道路は統計的手法によりフラジリティ曲線を構築する．生成した PGV と橋梁および道路のフラジリティ曲線を用いて，各道路構造物の損傷発生の有無による接続

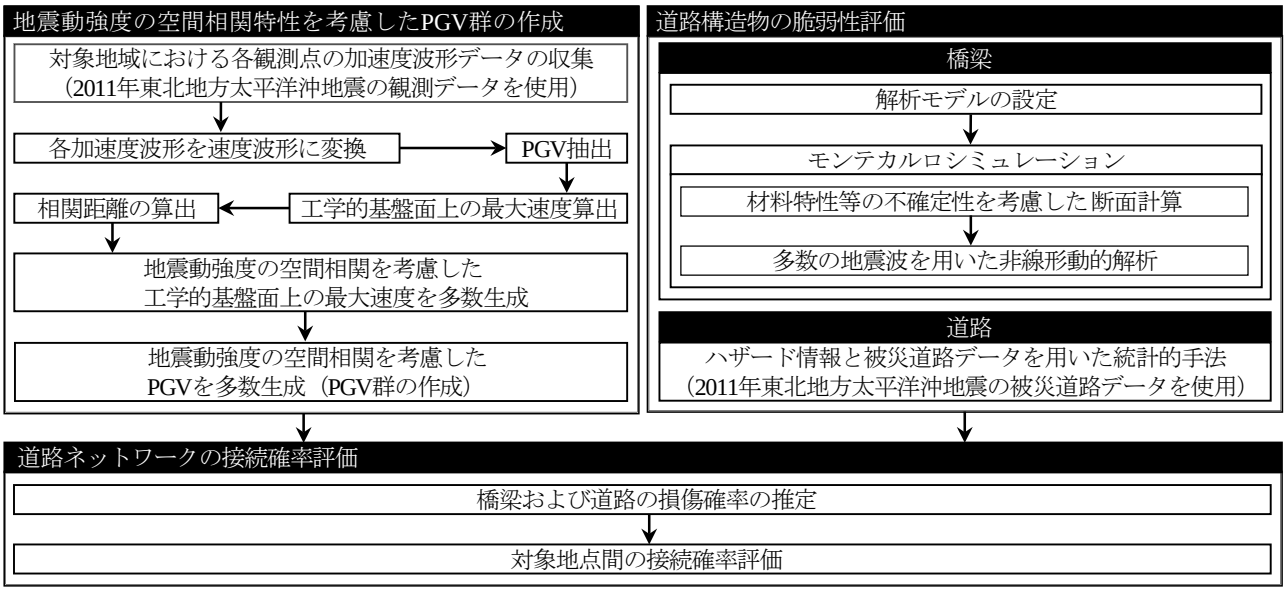


図-1　地震動強度の空間相関特性と橋梁および道路の損傷を考慮した道路ネットワークの接続確率評価

確率を評価する．また，完全相関および完全独立を仮定した場合の評価結果と比較することで，地震動強度の空間相関特性が道路ネットワークの接続確率に及ぼす影響を検証する．

2. 地震動強度の空間相関特性を考慮したPGV群の作成

(1) 相関距離の推定

地震動強度の空間相関特性と橋梁および道路の損傷を考慮した道路ネットワークの接続確率評価手順を**図-1**に示す．対象とする地域で過去に発生した任意の地震における地震波形データを多数収集し，各観測点でのPGVを算出する．J-SHISの公表する表層30 mの平均S波速度，および，山口・翠川[4]の提案する地盤増幅率の推定手法を用いて，各観測点の工学的基盤面上（ここでは，平均S波速度が720 m/secの基盤面）の最大速度V'を求める．地理情報システム (GIS)を用いて，各観測点間の離隔距離を整理し，離隔距離毎の工学的基盤面上における最大速度V'の相関係数を算出する．得られる相関係数と離隔距離の関係を基に，式(1)に示される指数型の相関関数に適用することで，対象地域における地震動強度の相関距離bを推定する．

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

ここに，ρは相関係数，hは離隔距離である．

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の地震波形データに基づく地震動強度の相関距離の推定結果を**図-2**に示す．東北地方における工学的基盤面上の最大速度に関する相関距離は35.6 kmと推定された．

(2) 相関距離に基づくPGV群の生成

MCSに基づき，各道路構造物位置における工学的基盤面上の最大速度を生成する．道路構造物数をN，MCS試行回数をMとし，平均0，標準偏差σの独立した正規乱数による$N\times M$の行列$\boldsymbol{Z}$を作成する．各構造物位置および式(1)より，$N\times N$の相関行列$\boldsymbol{P}$を作成する．$\boldsymbol{P}$をコレスキー分解することで得られる三角行列$\boldsymbol{L}$と，行列$\boldsymbol{Z}$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．

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

ここに，M_wはモーメントマグニチュード，Dは震源深さ，Xは断層最短距離，e_{INTER}は地震間誤差である．道路については10 mメッシュの連なりとして表現し，各メッシュ位置に対するV'を評価する．

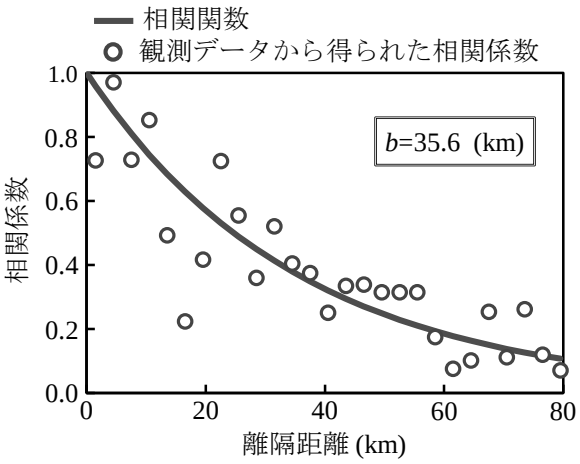


図-2 相関距離の推定結果

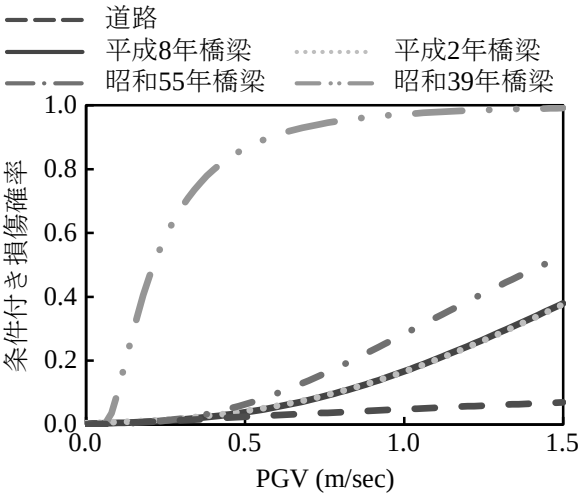


図-3 橋梁および道路のフラジリティ曲線

本研究では，片岡ら[5]による海溝型地震を対象とする距離減衰式を使用する．日本海溝地震の強震断層パラメータは，日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会[6]の公表値を用いる．

道路構造物間の地震動強度の空間相関特性を完全相関 (ρ=1)，完全独立 (ρ=0)，および2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録から推定された相関距離b=3.56 kmとする式(1)に従うと仮定し，距離減衰式により地震動強度の空間相関特性を考慮した工学的基盤面上の最大速度群を生成する．生成した各道路構造物位置の最大速度群に地盤増幅率[4]を乗じることで，各橋梁位置におけるPGV群を生成する．

3. 道路構造物の脆弱性評価

(1) 橋梁のフラジリティ評価

材料特性や橋脚基部に作用する軸力のばらつき，耐力評価に関するモデル誤差，また，同一のPGVを有する地震波に対する地震応答のばらつきを考慮し

たMCSに基づく数値的解析手法により橋梁のフラジリティ曲線を構築する．各橋梁の架設年による耐震性能の違いを評価するため，平成8年，平成2年，昭和55年および昭和39年の耐震基準に準拠する4種のフラジリティ曲線を推定する．使用した地震動群は計523波であり，K-NET・KiK-netで公表されている，1996年8月から2019年2月の期間で，M_w5.5以上，かつ，最大加速度が1 m/sec^{2}以上の地震波形を対象に，各地震について最大3波選択することで作成した．各地震波のPGVを0.1 m/sec刻みで0.1~2.0 m/secとなるように振幅調整することで得られる入力地震波形群を用いて，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えるため，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，フラジリティ曲線を算出した．

(2) 道路のフラジリティ評価

2011 年東北地方太平洋沖地震における道路の被災データに基づく統計的フラジリティ評価を行う．道路データの被災度は，大被害（走行が不可能な状態）・中被害（道路車線の一部に走行の支障がある状態）・小被害（走行に支障のない状態）の 3 区分に分類されている．本研究では，地震後の交通機能低下を考慮し，大被害が生じた道路データを用いる．損傷確率は，0.1 m/sec 刻みで PGV に対する被災道路の総延長を同等の PGV が観測された道路の総延長で除することで算出した．PGV は産業総合技術研究の地震動マップ即時推定システム (QuiQuake)[7] の値を使用した．損傷確率と PGV の関係を基に，累積対数正規分布で近似することでフラジリティ曲線を算出した．本研究で得られた橋梁および道路のフラジリティ曲線を**図-3** に示す．

4. 道路ネットワークの接続確率評価

(1) 解析対象の道路ネットワーク

福島県南相馬市から相馬市までの沿岸地域に位置する道路ネットワークを対象に，日本海溝地震後の接続確率を評価する．道路ネットワークおよび想定する各ルートの経路構成を**図-4** 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確率と定義する．MCS の各試行に対して，PGV 群と**図-3** のフラジリティ曲線を基に各構造物位置の損傷確率を逐次算出し，閉区間 [0,1] の一様乱数と比較することで，道路構造物の損傷判定を行う．各経路で道路構造物が 1 つ以上損壊する場合，該当する経路を通行不能と判断する．これを 10 万回繰り返し，OD 間を接続する確率を算出することで，道路ネットワークの接続確率を評価する．

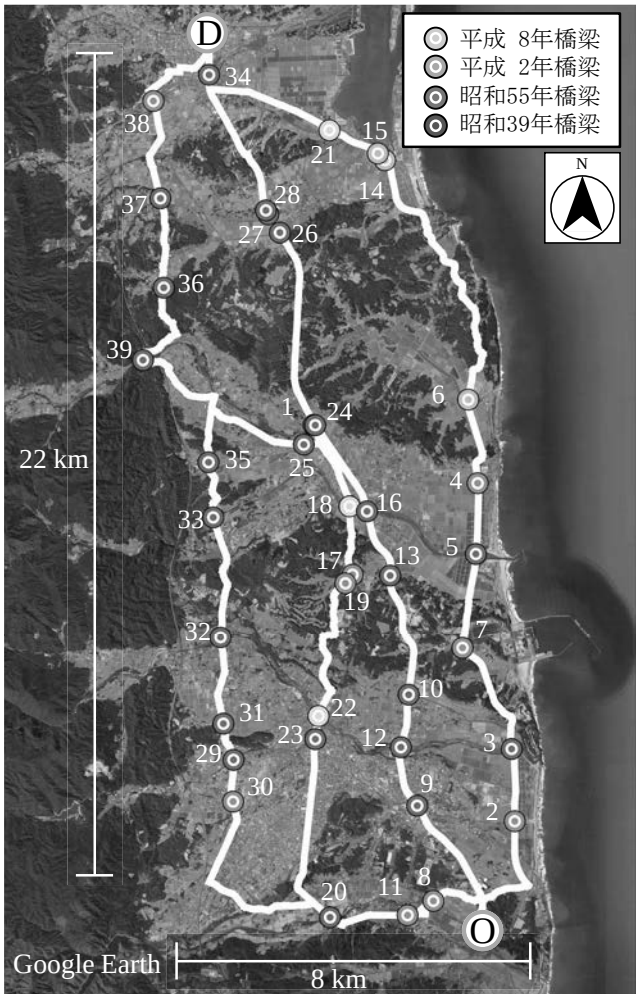


図-4 解析対象の道路ネットワーク

表-1 各ルートの経路構成

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

(2) 道路ネットワーク内の地点間における接続確率評価結果

各道路構造物の損傷確率および道路ネットワークの接続確率評価結果を**図-5** および**図-6** にそれぞれ示す．橋梁に比べて，道路の損傷確率が小さいことが確認できる．また，海岸線に近く，耐震基準が古い橋梁ほど損傷確率が高くなる傾向があり，これらの橋梁が OD 間の接続確率を大きく決定付けることが明らかになった．地震動強度の空間相関特性の影響として，完全相関の場合，道路構造物が局所的な空間分布で被災する傾向が大きく，OD 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，構造物が空間的にランダムに被災するため，各経路の道路閉塞が同時に発生する可能性が高くなる．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過大あるいは過小評価するおそれがあり，地震動強度の空間相関特性を適切に考慮することで，道路ネットワークの接続確率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特性を考慮した，橋梁および道路から構成される道路ネットワークの接続確率評価手法を提案した．日本海溝地震の発生を前提に，東北地方沿岸部の道路ネットワークを対象に提案手法を適用した結果，道路に比べて橋梁の損傷確率が高いことから，橋梁の損傷が地震後の道路ネットワークの接続確率を決定付ける要因であることが明らかになった．また，道路ネットワークの接続確率を精緻に評価するためには，地震動強度の空間相関特性を適切に考慮する必要があることが示された．

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．

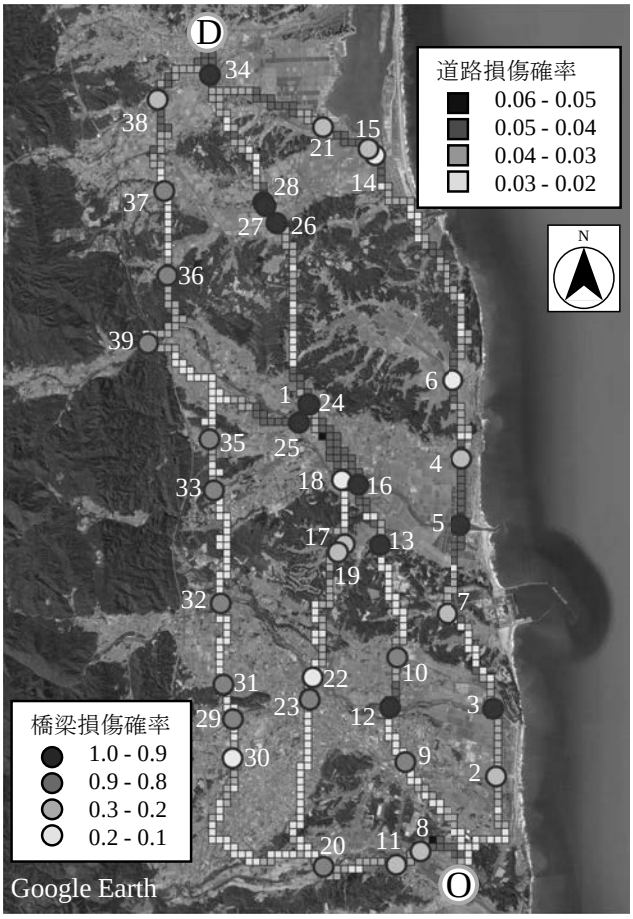


図-5 各道路構造物の損傷確率

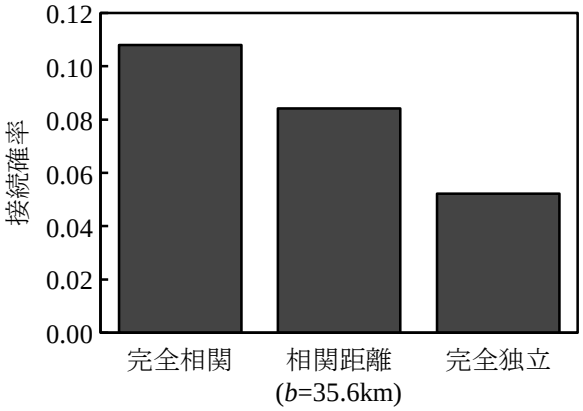


図-6 道路ネットワークの接続確率

参考文献

1) 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バ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.
2) 青木康貴，布施柚起，石橋寛樹，秋山充良，越村俊一：地震動と津波を受ける橋梁の損傷が道路ネットワークの接続性に及ぼす影響の確率論的評価手法，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.78，No.4（地震工学論文集第41巻），pp.I_127-I_137，2022.
3) 藤見俊夫，松田泰治，溝上章志，清田玲央：フラジリティカーブに基づく道路ネットワークの地震被害評価，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_1044-I_1051，2012.
4) 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.
5) 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.
6) 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（2023年3月4日閲覧）
7) 産業総合技術研究：地震動マップ即時推定システム（QuiQuake），https://gbank.gsj.jp/QuakeMap/20110311.html（2023年3月10日閲覧）