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）

地震動と洪水のハザード強度の空間相関を考慮した道路橋ネットワークの接続性評価

松崎　裕[1]・Putri Syahidah FIRDAUS[2]・青木　康貴[3]・秋山　充良[4]

[1]正会員　博(工)　防衛大学校准教授　システム工学群建設環境工学科
（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20）
[2]非会員　修(工)　早稲田大学　大学院創造理工学研究科建設工学専攻
（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）
[3]学生会員　修(工)　早稲田大学　大学院創造理工学研究科建設工学専攻・日本学術振興会特別研究員DC
（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）
[4]正会員　博(工)　早稲田大学教授　創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

2020年7月の豪雨により球磨川が氾濫して，桁の流出，橋脚の転倒等の甚大な被害が発生し[1)]，当該地域における道路ネットワークの寸断が生じた．道路橋は地震災害においても道路ネットワーク内の弱部[2)]であり，道路橋の地震時損傷により道路ネットワークの機能低下が生じている．球磨川の氾濫のような大規模な洪水時には，耐震設計でも考慮されている水平力が作用するだけでなく，桁等に上揚力も作用し得るが，こうした地震動・洪水のマルチハザードの特性の相違を踏まえて，弱部となる複数の道路橋を含む道路ネットワークとしての機能の継続性を確保することが重要である．

ここで，道路ネットワークとしての最も重要な機能は，災害後であっても地点間の交通を担保することであり，それは道路ネットワークの接続性として評価される．個別の道路橋の安全性向上を検討する際には，損傷可能性の高い道路橋を優先して補強するとの判断もできるが，道路ネットワークを構成する道路橋群としての補強戦略を検討する上では，路線を構成する各道路橋が同時に被災し得ることを考慮する必要がある．すなわち，地震動や洪水のハザード強度の空間相関を考慮した，各道路橋位置でのハザード評価が重要となる．このうち，地震動のハザード強度として，工学的基盤における最大速度の空間相関についてはWang and Takada[3)]，構造物群のリスク評価については林ら[4)]の研究などの多数の既往文献があり，2地点間のユークリッド距離を用いて空間相関が定量化されている．一方で，洪水のハザード強度としての流量の空間的な相関については，洪水流が河川の流路に沿って流下するため，地点間のユークリッド距離ではなく，河川の流路に沿った距離で空間相関を考慮する必要がある．しかしながら，そうした空間相関を考慮した洪水ハザードの定量化および道路橋群から成る道路ネットワーク(以降では，道路橋ネットワーク)の接続性評価はなされていない．

そこで，本研究では，道路橋ネットワークを対象として，地震動と洪水のハザード強度である工学的基盤における最大速度，流量の空間相関を考慮して，起終点（Origin-Destination, OD）間の接続性評価を行う．

2. 地震動と洪水のハザードを受ける道路橋ネットワークの接続性評価手法

地震動と洪水のハザード強度の空間相関を考慮した道路橋ネットワークの接続性評価手法を**図-1**に示す．OD間の接続性は，OD間を結ぶルートが確保できない確率である途絶確率として評価される．

(1) 道路橋ネットワークのモデル化

地震動と洪水のマルチハザードを受ける道路ネットワークにおいて，着目するOD，道路橋，道路ネットワークの結節点をノード，道路をエッジとして，グラフ理論により，道路橋ネットワークを表現する．道路橋が地震動や洪水により損傷して通行できなく

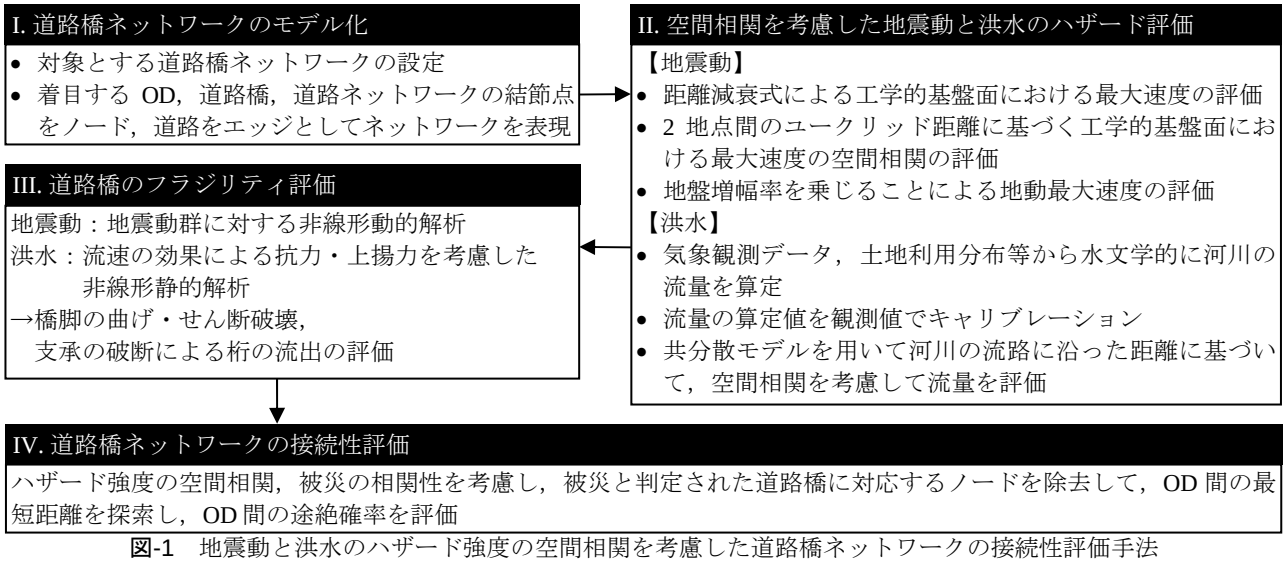


図-1　地震動と洪水のハザード強度の空間相関を考慮した道路橋ネットワークの接続性評価手法

表-1　道路橋の通行不可の判定条件

部材	損傷形態	通行不可の条件
支承	取付ボルトのせん断破断	橋軸方向の最大水平力が終局耐力以上
	ピンの引張破断	橋軸直角方向の最大水平力が終局耐力以上
	取付ボルトの引張破断	鉛直上向きの最大作用力が終局耐力以上
橋脚	曲げ破壊	最大応答水平変位が終局変位以上
	せん断破壊	最大作用せん断力がせん断耐力以上

なる場合には，当該橋に対応したノードを除去することにより，当該橋の損傷が道路橋ネットワークに及ぼす影響を評価する．

(2) ハザード強度の空間相関を考慮した地震動と洪水のハザード評価

地震動のハザード評価においては，震源断層のモーメントマグニチュード，対象道路橋地点の断層最短距離に基づいて，司・翠川[5]の距離減衰式により工学的基盤における最大速度を評価する．得られた工学的盤における最大速度についてWang & Takada[3]の評価式を用いて空間相関を評価する．そして，各道路橋地点のAVS30に基づく表層地盤における地盤増幅率[6]を乗じることで，各道路橋に作用する地震動の地動最大速度を評価する．

洪水のハザード評価においては，SWAT[7]に基づいて気象観測データ，土地利用分布等から水文学的に河川の流量を算定し，観測された流量とのキャリブレーションを行う．そして，共分散モデル[8]を用いて，流路に沿った距離に基づいて空間相関を考慮した各道路橋地点における流量を評価する．

(3) 道路橋のフラジリティ評価

地震動および洪水のハザードを受ける道路橋のフラジリティ評価では，通行可能性の観点から，**表-1**の判定条件により，条件付損傷確率を算定する．地震動に対するフラジリティ評価では，道路橋の架設地点と同一の地盤種別[9]の地盤で観測された地震動群について所要の地動最大速度になるように調整して，Takeda型モデル[10]による非線形動的解析を橋軸方向に行って評価する．洪水に対するフラジリティ評価では，橋脚および桁への作用力について，それぞれ文献11)および文献12)に基づいて流速から評価する．

(4) 道路橋ネットワークの接続性評価

道路橋ネットワークの接続性評価においては，空間相関を考慮した地震動および洪水のハザード強度に加えて，それらのハザードによる被害の相関も考慮する必要がある．本研究では，各道路橋の被害が完全相関の場合と独立の場合を考慮し，モンテカルロ法により，0-1の一様乱数を発生させ，ハザード強度に対応した条件付損傷確率よりも乱数が小さい場合は当該道路橋を通行できないものと判定[13]する．そして，通行できない道路橋に対応したノードを除去した道路ネットワークに対して，Dijkstra法[14]によりOD間の最短ルートの探索を行うことで，OD間の途絶確率として接続性を評価する．

3. 球磨川流域を対象とした接続性の評価例

(1) 対象とした道路橋ネットワーク

2020年の洪水で多くの橋梁が被災した球磨川流域

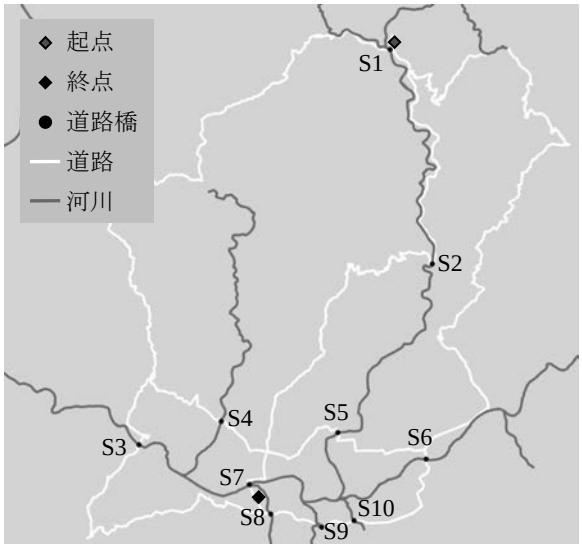


図-2　対象とした道路橋ネットワーク
（球磨川流域の人吉盆地）

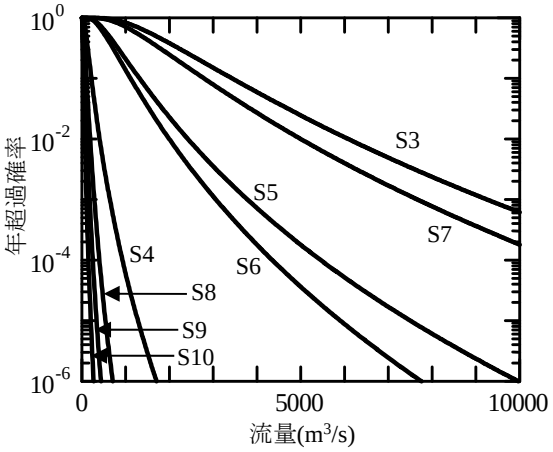
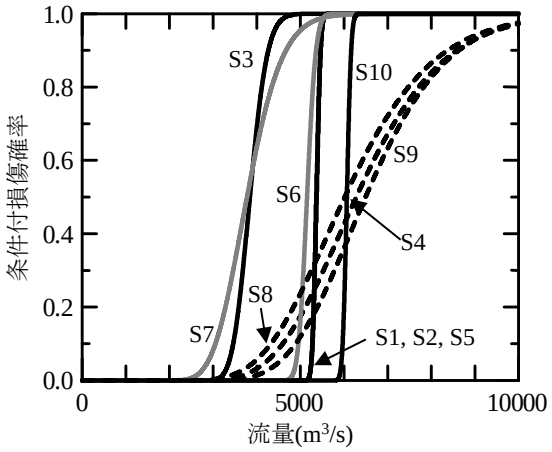
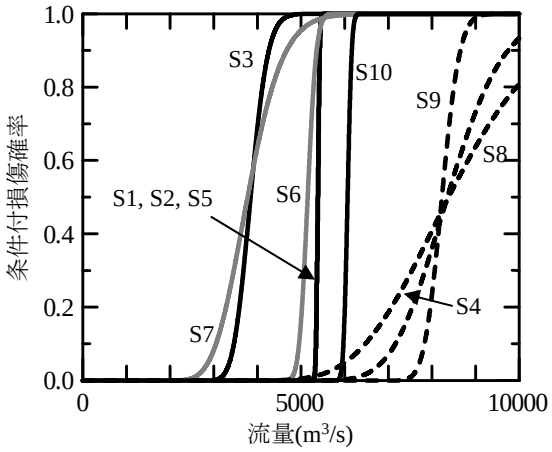


図-3　洪水ハザード曲線



(a) 震度法により設計された橋梁 A



(b) H29 道路橋示方書に準拠した橋梁 B

図-4　洪水に対するフラジリティ曲線

の人吉盆地を対象として，**図-2**のように，球磨川の本流・支流に架かる10橋の仮想の道路橋から成る道路橋ネットワークを設定して接続性の評価例を示す．10橋の地盤条件はいずれもII種地盤[9]であり，震度法により設計された橋梁Aと，H29道路橋示方書に準じて試設計された橋梁Bについて，地点に関わらず同一諸元として想定した．なお，**図-2**の東方にはモーメントマグニチュード6.6の地震が想定されている人吉盆地南縁断層があり，断層面からの最短距離はS6, 9, 10において3km程度，S2, 3では10km程度である．また，S4, 8, 9では，河川の勾配が1%超と他の地点よりも急となっている．

(2) ハザード評価

代表地点での洪水ハザード曲線を**図-3**に示す．地震動については，断層面からの距離を踏まえて，S1, 3で特に地震危険度が低いが，洪水については，支流が合流して流量が増加することを反映して，本流の下流側に位置するS3, 7で洪水危険度が高い．

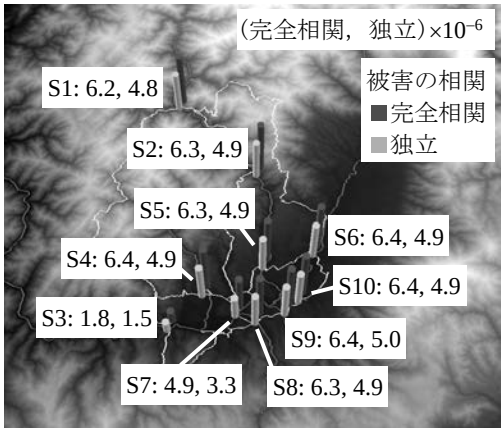
(3) フラジリティ評価

洪水に対するフラジリティ曲線を**図-4**に示す．河川勾配が急なS4, 8等では流速が大きく，橋脚が損傷するため，橋脚の耐震性の向上が洪水に対する損傷可能性の低減に寄与している．一方で，S3, 7や支流でも河川勾配が緩やかなS10では，橋脚の耐震性の相違に依存せず，支承の取付ボルトが引張力によって破断して桁が流出する損傷モードが生起している．

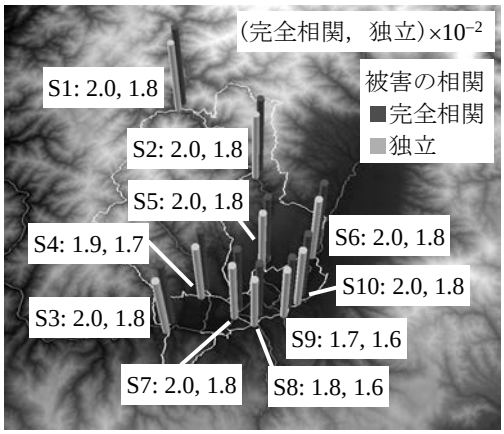
(4) OD間の接続性評価

道路橋ネットワーク内におけるどの道路橋を優先して補強すべきかの検討として，着目地点の1橋梁のみを橋梁Bに性能向上させ，それ以外の道路橋は橋梁Aのままとした場合における地震動および洪水に対する途絶確率の評価結果を**図-5**に示す．

まず，地震動ハザードの場合を参照すると，S3の道路橋を補強することで，OD間の途絶確率が最も低減している．これは，断層から離れたルートである起点－S1－S3－終点において，S1の地震危険度が最も低く，S3の道路橋の性能向上がOD間の着実なルート確保につながるためである．地震ハザードが



(a) 地震ハザードの場合



(b) 洪水ハザードの場合

図-5 着目地点の道路橋のみを橋梁 A から橋梁 B へと耐震性を向上させた場合の OD 間の途絶確率

最も厳しく，耐震安全性の最も低いS6の道路橋ではなく，地震ハザードの小さいS3の道路橋の性能向上を図ることがルートとしての確実な接続性の確保につながることを示している．

次に，洪水ハザード下での接続性について考察する．フラジリティ評価の結果で述べたように，道路橋を橋梁Aから橋梁Bに性能向上を図ることによる効果は，比較的に急流で，ハザード強度の大きい領域で橋脚の損傷が支配的となるS4, 8, 9の道路橋にのみ現れる．このことに対応して，道路橋の性能向上がOD間における途絶確率のわずかな低減に寄与しているのも，S4, 8, 9の道路橋の性能向上を図った場合であることが確認される．

4. まとめ

本研究では，地震動と洪水のハザード強度の空間相関を考慮した道路橋ネットワークの接続性評価手法を提案し，球磨川流域に対して適用した．提案手法を用いることで，地震動と洪水のハザードによって生じる損傷モードの相違，そしてOD間における通行可能なルートの確保の観点を踏まえて接続性を評価することで，性能向上を優先すべき道路橋の同定が可能になる．

参考文献

1) 岡田太賀雄，白戸真大：掘込河道を渡河する橋の流失可能性評価のケーススタディと流失対策に関する考察，構造工学論文集，Vol. 69A，pp. 168-179，2023.
2) Gidaris, I., Padgett, J. E., Barbosa, A. R., Chen, S., Cox, D., Webb, B. and Cerato, A.: Multiple-hazard fragility and restoration models of highway bridges for regional risk and resilience assessment in the United States: State-of-the-art review, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 143, No. 3, 04016188, 2017.
3) Wang, M. and Takada, T.: Macrospatial correlation model of seismic ground motions, *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. 4, pp. 1137–1156, 2005.
4) 林孝幸，福島誠一郎，矢代晴実：地震動強度の空間的な相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響，日本建築学会構造系論文集，No. 600，pp. 203-210，2006.
5) 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，No. 523，pp. 63-70，1999.
6) 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，Vol. 6，No. 1，pp. 11-22，2006.
7) Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R.: Soil & water assessment tool theoretical documentation version 2009, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, 2011.
8) Ver Hoef, J. M. and Peterson, E. E.: A moving average approach for spatial statistical models of stream networks, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 105, No. 489, pp. 6–18, 2010.
9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説　V 耐震設計編，丸善出版，2017.
10) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 96, No. 12, pp. 2557-2573, 1970.
11) AASHTO: Standard specifications for highway bridges, 2002.
12) Kerenyi, K., Sofu, T. and Guo, J.: Hydrodynamic forces on inundated bridge decks, Federal Highway Administration, FHWA-HRT-09-028, 2009.
13) Chen, M., Mangalathu, S. and Jeon, J.-S.: Bridge fragilities to network gragilities in seismic senarios: An integrated approach, *Engineering Structures*, Vol. 237, 112212, 2021.
14) Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp. 269-271, 1959.