

橋梁の劣化損傷を考慮した災害時の 緊急輸送道路接続性に関する一考察

小川 福嗣¹・近田 康夫²

¹正会員 金沢大学 理工研究域 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: ogawa@se.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 金沢大学教授 環境デザイン学系 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: chikata@staff.kanazawa-u.ac.jp

地震等の災害発生直後から発生する緊急輸送を円滑に行うために各自治体が緊急輸送道路を指定している。橋梁長寿命化修繕計画では緊急輸送道路上の橋梁を優先的に補修等を行うとしているが、計画期間中において緊急輸送道路がネットワークとして適切に維持されるかについては十分に検討されていない。本研究では橋梁の劣化に伴う地震等の災害による破壊リスク増大を考慮した場合の緊急輸送道路ネットワークの切断リスクについて分析を行った。リスクを有する橋梁が比較的少数であっても、ネットワークの切断リスクが大きくなることが確認された。また、地域的な特徴からネットワークの切断リスクが偏在し、ネットワーク接続性を考慮した維持管理を行う必要性が示唆された。

Key Words: *urgent transportation road network, bridge management, risk management, preparation of life-extending repair plan*

1. はじめに

(1) 序論

a) 橋梁メンテナンスに対する取組み

高度経済成長期にかけて集中的に整備・建設された社会インフラの老朽化に伴い、大事故につながりかねない損傷の発見や通行規制等の橋梁数の増加がみられ適切な維持管理の実施が課題となっている。国土交通省では2013年を「社会資本メンテナンス元年」と位置づけインフラの老朽化対策を重点的に進め、以降戦略的・計画的にメンテナンスが実施できるよう各種取り組みが行われてきている¹⁾。

橋梁は河川管理施設や港湾など他の社会インフラに比べ、比較的早い時期に建設されており、いち早く老朽化に伴う各種課題に直面することが考えられ、早急なメンテナンスサイクルの確立が望まれており、定期点検に関する省令・告示の公布や道路メンテナンス会議の設立など保全に関する政策や取り組みが行われている。一方、これまでの蓄積データが不十分であることや管理の実務を担う職員・予算が限られていることから、十分な管理が行われているとはいえず、課題も残されている²⁾。

b) ネットワークの一部としての橋梁

今後急速に老朽化する橋梁を管理していくために、各管理者は橋梁長寿命化修繕計画を策定し、事後保全から計画的な点検・補修を行う予防保全への移行やメンテナンスサイクルの確立が図られてきた。計画では蓄

積された橋梁をいかに管理していくかに重点が置かれ、橋梁単位で損傷度、交通量や交差状況等を考慮した優先順位を設定し維持管理を行うとしていることが多い。しかし、橋梁は道路ネットワークを形成する一構成要素でもあり、橋梁の破壊は道路ネットワークの切断に直結する。そのため、橋梁の健全性維持に加えて、同一ネットワーク上にあるその他の橋梁の健全性やネットワーク位置づけを把握したうえで適切な維持管理方法を選択・実施していく必要がある。

災害発生時における緊急輸送を円滑に行うネットワークとして、緊急輸送道路が各自治体で指定されている。また、緊急輸送道路上の橋梁については、レベルⅡ地震動に対して損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行う性能が求められている。そのため、旧示方書に従い設計された等で既存不適格となっている場合は重点的に耐震補強が実施されるなど、災害時のネットワークが機能するよう対策が行われてきた。また、2011年に発生した東日本大震災における政府の支援物資輸送では、トラック輸送の割合が、食料については75%、飲料については58%を占めており³⁾、災害時において道路ネットワークが確保されていることは2次災害や復旧における重要な要素といえる。

c) 老朽化に伴うリスク評価の実施及び把握

現行の仕様を満足する健全な橋梁であっても、老朽化に伴う損傷等により耐災性が低下し大規模災害発生

時に致命的な損傷を生じることで、道路ネットワークの機能不全等の影響を与える可能性が高まる。このような事態を想定しリスクを把握しておくことは危機管理を行う上で必要な情報であるとともに、補修優先順位の在り方の維持管理方針決定の要因の一つとなると考えられる。

(2) 本研究の目的

以上を踏まえて、本研究では橋梁を道路ネットワークの一構成要素としてとらえ、橋梁の劣化損傷に伴う災害時における機能不全リスクの増大を考慮した道路ネットワークの接続性について分析を行う。

(3) 既存の研究

a) 橋梁の補修や補強と道路ネットワークに関する研究

喜多・近田⁴⁾は橋梁を含む道路構造物の耐震補強についてゲーム理論を適用し、予算制約下において個々の橋梁及び橋梁群のそれぞれについて効用が最大となる最適な補強順位について検討を行っている。

古田ら⁵⁾は道路ネットワークに対して、地震などのクライシスに対する事前対策および事後対応を考慮し、現行の緊急輸送道路を重視した対策を行う場合と提案する重要路以外も含めた脆弱なリンクを対象に対策を行う場合についてネットワークの接続性・復旧性のレジリエンス性について評価を行い、緊急輸送道路以外のそのほかの路線に対する対策実施も考慮した場合の方がレジリエンス性が高まるとしている。

藤見ら⁶⁾は熊本都市圏を対象に地震による橋脚（橋梁）の破壊とそれに伴う交通ネットワークの寸断・遮断による影響を考慮し、補強によるネットワーク寸断被害が軽減されることによる便益と耐震補強費用を比較し、耐震補強実施の有効性について検討を行っている。

以上の研究は計画における最適な補強・補修の実施に重点が置かれており、補強等実施後の劣化に伴う損傷リスク増大による影響については十分検討されていない。

b) 経年劣化を考慮した維持管理計画に関する研究

橋梁の劣化を考慮した維持管理手法について検討を行った事例として、藤井ら⁷⁾、小幡⁸⁾がある。藤井らは道路網上にあるRC橋脚群について、経年に伴い性能が低下することを勘案した地震によるリスク評価を行ったうえで、LCC評価を指標として維持管理計画について検討を行い、地震リスクを意識せずに維持管理を行った場合、意識した場合に比べLCCにおける地震費用が大きく増加する結果が得られている。

小幡はネットワーク上の橋梁について、劣化に伴う余寿命や通行不能によるユーザーコスト等の指標算出し、包絡分析手法を適用してそれらを総合的な指標を

算出し解析を行っている。

c) 見える化による維持管理に関する研究

管理者によっては1000橋を超える橋梁を管理しており、管理橋梁数が多い場合位置情報（所在地）や点検結果の一覧を見ただけでは全容の把握が困難である。このような課題の改善方法として、岩城ら⁹⁾は実務者が地域特性や構造物の実態を理解できるように「見える化」に重点を置いたブリッジマネジメント支援ツールの作成を試みている。支援ツールを利用し点検結果や凍害等ハザードの情報をGIS上に表示することで、地域的・全体的な実態の把握が可能となっている。

(4) 本研究の位置付け

既往研究では橋梁の損傷に伴うリスク評価を貨幣等に換算し、補修優先順位設定や補修の妥当性を中心に検討が行われているが、リスク評価結果の全体像を可視化し把握するという点において不十分といえる。リスク全体の可視化は、維持管理における基本方針の決定において重要な要因であると考えられる。

本研究では橋梁をネットワーク上の構成要素ととらえ、ネットワークの接続性について分析を行い、それらを可視化することで、地域的・全体的な潜在リスクをわかりやすく伝え、把握することができる特徴である。

2. 橋梁の劣化を考慮した道路ネットワークの評価

(1) 解析条件

a) 使用データについて

橋梁の位置情報および実施した点検結果のデータは石川県および国土交通省金沢河川国道事務所のデータを、緊急輸送道路は国土交通省国土政策局「国土数値情報（緊急輸送道路）」を利用する。

各路線にある橋梁は緊急輸送道路に対してGISのバッファー機能を用いて判断した。なお、上下線の区別は行わず、上下線にそれぞれ橋梁がある場合も同一路線上に存在するとして扱った。

石川県及び国土交通省金沢河川国道事務所以外の市町村や高速道路会社が管理する緊急輸送道路上の橋梁については、国土数値情報の緊急輸送道路と河川データの交点に橋梁が存在すると仮想した。橋梁の点検結果は、石川県や国土交通省金沢河川国道事務所のデータをもとに保有する橋梁全体の健全度別の割合は維持するように、ランダムにサンプリングし仮想データを作成し利用した。

橋梁点検について、平成26年の橋梁定期点検要領の策定以前は、平成16年3月に策定の橋梁定期点検要領

表-1 対策区分の判定区分

判定区分	判定の内容	換算評価
A	損傷は認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。	5
B	状況に応じて補修を行う必要がある。	4
C1	予防保全の観点から、速やかに補修棟を行う必要がある。	3
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修棟を行う必要がある。	3
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。	2
E2	その他、緊急対応の必要がある。	2
M	維持工事で対応する必要がある。	4
S1	詳細調査の必要がある。	4
S2	追跡調査の必要がある。	4

表-2 橋梁健全度の定義

健全度	損傷状況
5	劣化損傷が認められない
4	些細な劣化損傷のみで、点検記録を継続する
3	経度の劣化損傷があり、計画的に維持管理補修する
2	重度の劣化損傷があり、早急な補修対策が必要
1	甚大な損傷で安全確保に支障をきたす(通行止め)

(案)があるが、統一基準は存在せず各管理者ごとに独自の記録・評価を行っている。管理者の異なる点検結果データを利用するにあたり、5段階評価に統一した。また、橋梁単位での健全度評価は明確な基準がないことやデータそのものが存在しない場合も多いことから、橋梁を構成する主要な部材と考えられる主桁の点検結果(健全度評価)を橋梁の初期健全度として用いた。

河川国道事務所は平成16年の橋梁定期点検要領(案)および平成26年橋梁定期点検要領に従い記録されている。橋梁定期点検要領(平成26年)では、構造上の部材区分あるいは部位毎、損傷種類ごとの対策区分について、表-1のような判定区分とするとしている。なお、平成16年の橋梁定期点検要領(案)においてはC1, C2及びS1, S2はそれぞれCとSという判定区分となっており、新たな定期点検要領では評価が細分化されている。これらの判定区分を同表右欄に示すように読み替えた。なお、国レベルで管理する橋梁は社会的重要度が高いこと、また健全度1は確認された場合は早急に補修等の実施されるため、健全度1(最低評価値)の読替えはないとした。

石川県は、石川県橋梁長寿命化修繕計画(2009)において橋梁健全度の定義は表-2のようにしている。部材についても5段階で評価しており、おおむね表-2の判断区分に習った評価基準となっている。

b) 橋梁データの特性

使用した橋梁データの特性を示す。

橋梁数は1567橋であり、初期健全度の分布を表-3に示す。全橋梁数の45%が健全度5、95%以上が健全度3以上となっている。図-1に橋梁の建設年の分布を示す。

表-3 初期健全度の分布

健全度	橋梁数
1	2
2	61
3	309
4	487
5	708

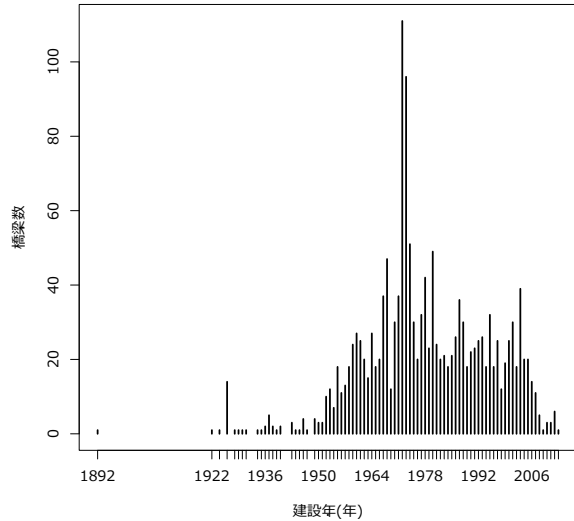


図-1 建設年の分布

全国的な傾向と同じく、1970年ごろに建設のピークを迎えており、今後それらの橋梁が建設後50年を迎え、維持・補修等も多くなってくると考えられる。

経過年数ごとの健全度の平均値の推移を図-2に示す。経過年数は分析時点から建設年までの期間ではなく、建設年から最新の点検実施年までの年数として扱う。なお、利用しているデータの点検実施日は2011年から2013年の短期間に集中しており、経過年数と建設年の分布に大きな違いは見られない。経過年数が35年頃までは一定の劣化傾向がみられるが、それ以後は回復傾向やばらつきが大きくなっており補修等が実施されることによりばらつきが大きくなっているものと考えられる。

c) 石川県の緊急輸送道路網

石川県の急輸送道路網と市町村役場の位置を図-3に示す。石川県は南北に長く、県の中央から南側にかけて中核市の金沢市をはじめとした市街地が広がっており、県の人口の半数以上を占めている。このことから、中心部は比較的的道路網が発達し冗長性を有している。一方、北部地域は人口が少なく、隣接県もないことから

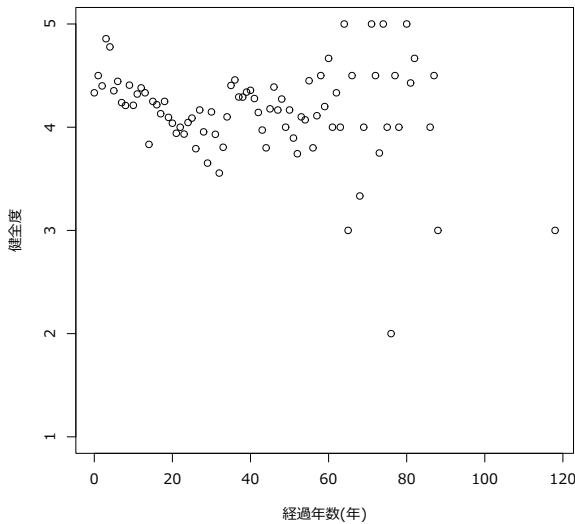


図-2 健全度の推移

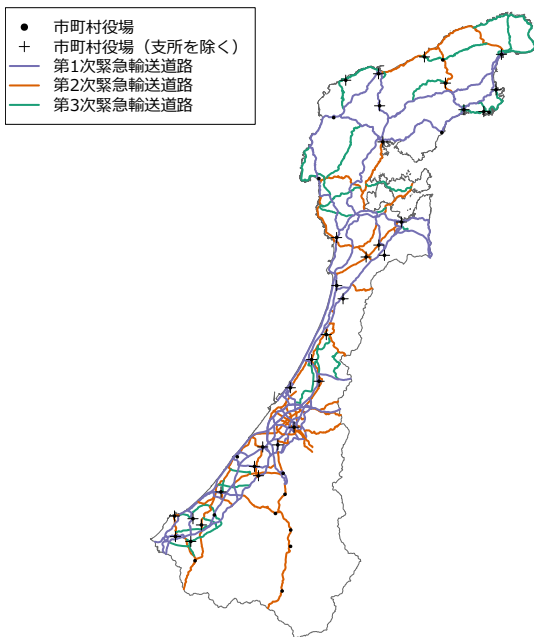


図-3 緊急輸送道路網

比較的的道路網が貧弱となっている。

d) シミュレーション条件

シミュレーションの条件について述べる。橋梁は式(1)に従い劣化が進行すると仮定する。

$$y = 5 - ax^2 \quad (1)$$

ここで x は経過年数, a は劣化係数である。劣化係数 a は 0.00164 とした。建設後 35 年で健全度 3, 50 年で健全度が 1 となる劣化曲線であり, 図-2 の 35 年頃までデータにたいする劣化曲線の傾きと同程度である。ま

た, 橋梁は個々の構成や環境条件により劣化傾向が異なることが考えられ, 便宜的に劣化係数 a は平均 0.00164, 標準偏差 0.0005 の正規分布に従うとした。大竹ら¹⁰⁾や小池・長井¹¹⁾の研究では, 橋梁の劣化は適用示方書や橋長の区別に一定の傾向がみられている。しかし, 地域や管理状況によって劣化状況が異なることが想定されることから本研究ではランダムに劣化速度にばらつきを与えた。各橋梁は健全度 2 以下となった場合に補修が実施され健全度が 5 に戻るものとし, 補修における予算の制約や平準化については考慮しない。

ネットワークについては, 国土数値情報(緊急輸送道路)の始点, 終点及び交点をノード, 各ノードを結ぶ緊急輸送道路をリンクと定義する。路線の健全度は当該路線に存在する橋梁のうち最低健全度の値であるとし, 路線に一橋でも健全度 2.5 以下の橋梁がある場合には, 当該路線は災害時における切断リスクを有するとする(以降, これらの路線を途絶路線, 途絶路線となる期間を途絶期間という)。設定閾値である健全度 2.5 については, 特別な意味はないが, 表-1, 表-2 に示すように健全度 2 ではすでに重要な損傷を生じている状態, 健全度 3 は計画的に補修等する必要があることからその期間中に対災性を伴う劣化が進行すると考えられ, その中間値に設定した。

シミュレーション期間は 50 年間とし解析を行った。

(2) 解析結果

各路線にある橋梁数を図-4 に示す。路線上の橋梁数については jenkins の自然分類に基づき 5 つに分類した。北部地域は各路線が長いことや海岸線に沿って道路があることから 1 路線にある橋梁数が多い傾向にある。路線毎でみると約 8 割の路線が橋梁数 3 以下となっているが, 14 橋以上の橋梁が存在する路線も確認できる。

図-5 は路線上の橋梁数と途絶期間の関係を示す。図中の黒丸は路線上の橋梁数毎の平均途絶期間を表している。路線上に一橋以上健全度 2.5 以下の橋梁があると, その路線は途絶路線となり, 橋梁数が増加すると各橋梁の劣化時期が異なることにより途絶期間も長くなる傾向にある。また, 路線上の橋梁数が 10 以上となると計算年数の半分以上が途絶期間となる傾向が確認された。

個々の橋梁の劣化速度をランダムに与えてシミュレーションしていることから, 100 回の繰り返し計算を行い路線毎の平均途絶期間を算出し, 途絶期間の平均が 25 年以上となった路線を図-6 に示す。北部地域において途絶路線が多いことが確認できる。これは, 図-4 に示したように 1 路線が長いことや海岸線に沿って道路があるため橋梁数が多い傾向にあり, 健全度が 2.5 を下回

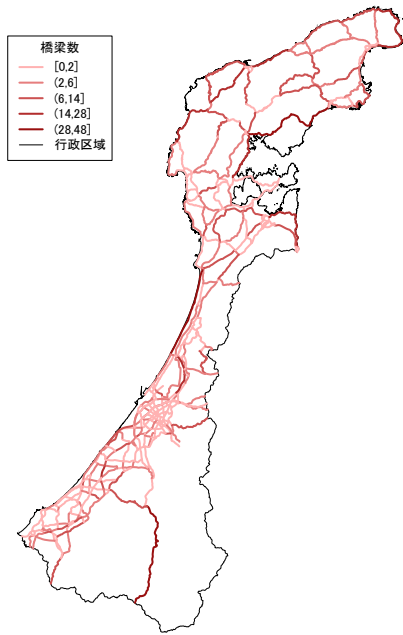


図-4 路線上の橋梁数

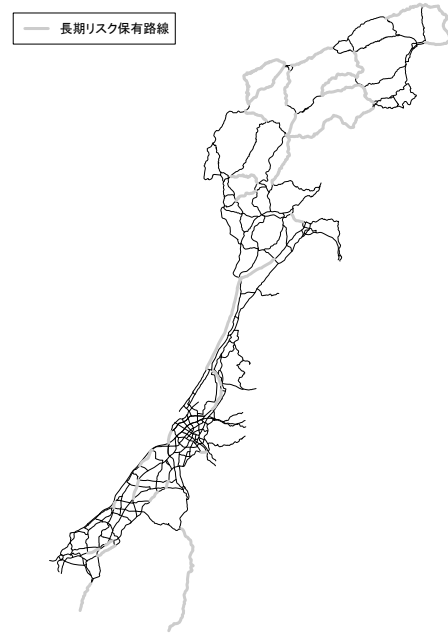


図-6 長期途絶路線

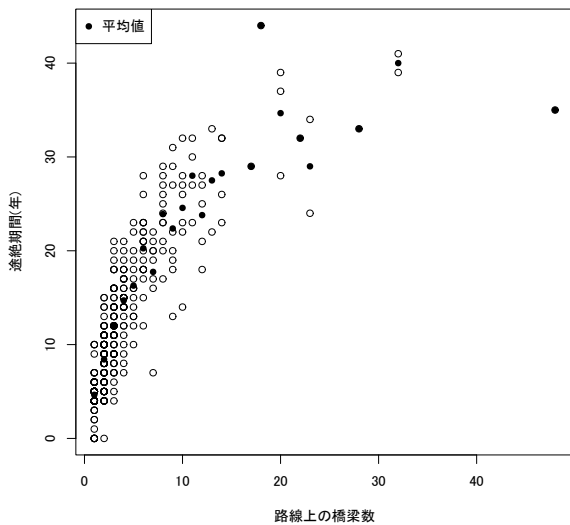


図-5 路線上の橋梁数と路線の途絶期間

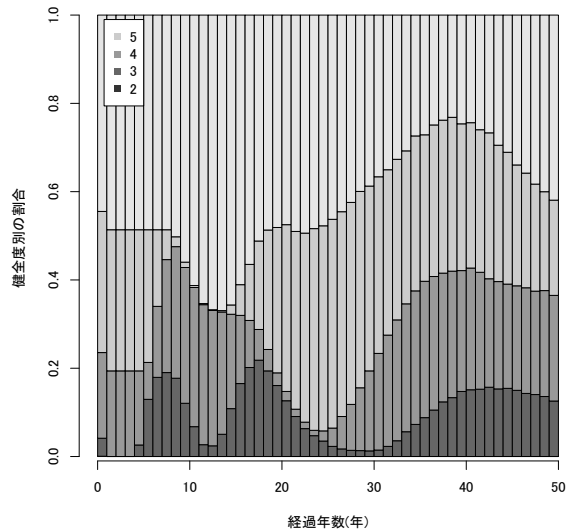


図-7 橋梁健全度の推移

る橋梁の補修を行ったとしても、路線上のそのほかの橋梁が補修時期を迎えることで、途絶期間が長い傾向にあると考えられる。図-5では路線上の橋梁数の増加に対して途絶期間の長さが次第に緩やかになっているが、今回のシミュレーションの条件では各橋梁の劣化時期が集中していることが影響しており、劣化のばらつきを大きくし、補修時期のばらつきが大きくなると途絶期間が長くなる傾向が確認された。

図-3の市町村役場位置と重ねて確認すると北部の一

部市町村役場へつながる第一次緊急輸送道路が複数あるにもかかわらずそれらすべてが長期途絶路線となる地域が確認された。市町村役場は災害時には災害対策活動の拠点施設となる重要な施設であり、庁舎へ通ずるすべての緊急輸送道路が切断されることは防災対策上避ける必要があり、重点的に維持管理を行う等の対策が必要と考えられる。

シミュレーション期間中の橋梁および路線の健全度の割合の推移を図-7、図-8に示す。なお、劣化曲線(シ

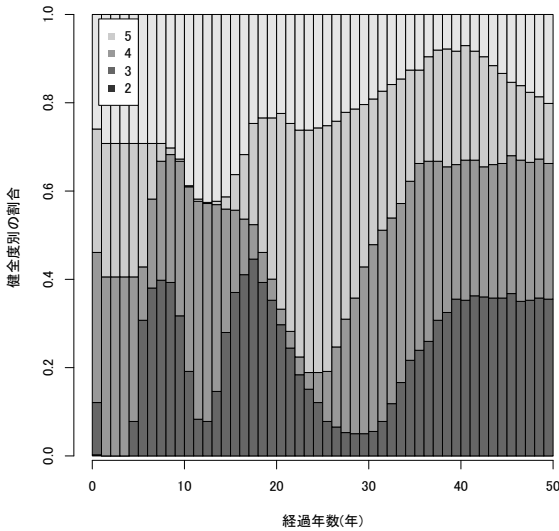


図-8 路線健全度の推移

シミュレーション)に基づき得られる健全度は実数であるが、経過年別に橋梁の健全度の分布をわかりやすく示すために健全度は小数点以下を四捨五入し1~5の離散値に換算している。シミュレーション開始後8, 18, 40年頃に健全度2となる橋梁及び路線の増加が確認された。これらは計算開始時の初期健全度が3, 4, 5であった橋梁がそれぞれ一斉に補修時期を迎えることにより、橋梁および路線の健全度の低下していることが確認された。また、橋梁単位でみると健全度2の橋梁数は最大でも全橋梁20%程度であるが、路線単位でみると40%近くの路線が健全度2となっており、健全度2の橋梁数の増加に伴うネットワーク切断のリスクが比例して大きくなることが確認された。これらの時期は災害時における切断リスクを有する路線を多数管理することとなり、橋梁の保全を行っていくとともに、ネットワークのリスク管理を行い災害時のネットワークが確保できる補修計画を立てる必要があるといえる。

図-9に41年目の路線健全度の分布を示す。南北につながる緊急輸送道路網すべてが途絶路線となることを赤色の破線で表示している。北部地域で多くの道路網が途絶していることが確認できる。ネットワークが複線化されている等により代替路線が確保されている場合であっても、両方のネットワークの途絶リスクが同時に高まることにより、災害時におけるネットワークが確保されず孤立地域等を生じる可能性が高くなるといえる。緊急輸送道路を優先的に補修するだけでなく、ネットワークの接続性を確保できる補修計画とする必要があるといえる。

図-10は橋梁数が同一の路線について、平均健全度の

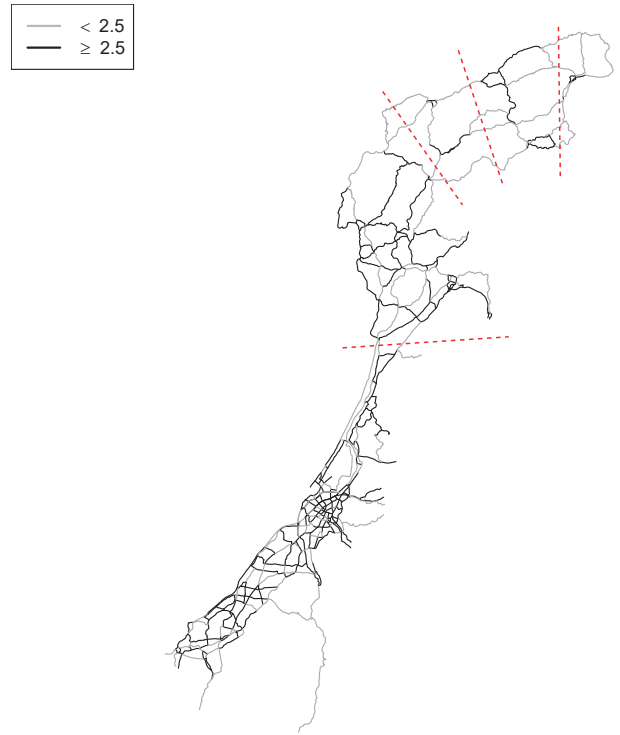


図-9 41年目ネットワーク評価

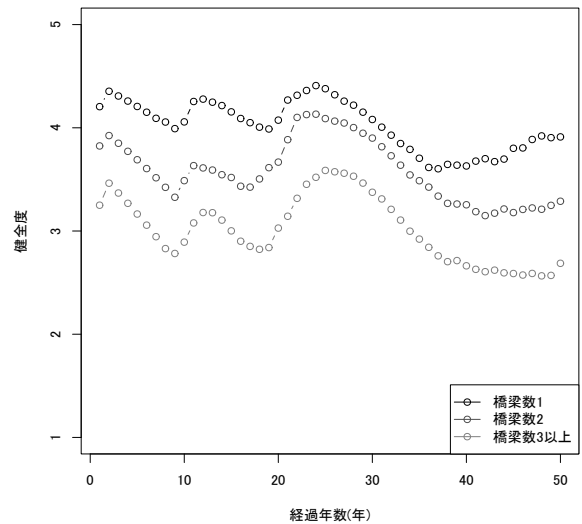


図-10 路線ごとの平均健全度の推移

推移を示したものである。路線上の橋梁数が増加するにしたがい、路線の健全度も低下する傾向にあり、路線上の橋梁数が3以上の場合、35年以降は健全度が3を下回る結果となった。橋梁数が多い路線はリスクを常に有する傾向にある路線となり、重点的に管理するもしくは橋梁数が少ないなど管理が容易な代替路線を中心に維持管理し、災害時においてもネットワークが確保される計画とする必要があるといえる。

3. おわりに

本論文では、橋梁の劣化損傷に伴う災害時の道路ネットワーク接続性について、石川県の緊急輸送道路網を対象に分析を行った。得られた成果は以下のとおりである。

ネットワークの接続性を可視化することにより、全体的・地域的な特徴を把握できた。具体的には、石川県北部は隣接県がないこと、人口が少なく道路網が発達していないこと、海岸線に沿って緊急輸送道路が建設されており多数の橋梁があることから、橋梁の破壊に伴うネットワーク切断リスクが高いことが分かった。

劣化に伴い健全度の低い橋梁の増加に比例し、健全度の低い路線も増加することが分かった。最大で約20%の橋梁が同時にリスクを有する(健全度2となる)期間があるが、路線単位で見ると同時期に最大で40%の路線が切断リスクを有する結果となり、橋梁単位での重要性や健全性のみならず、ネットワーク接続性を考慮した維持管理を行う必要があることが示唆された。

なお、本研究においては道路ネットワーク上の橋梁という視点からネットワーク評価を行ったが、今後の課題として、山間部の道路では斜面崩壊やトンネルの破壊、市街地では建物倒壊による道路閉鎖が考えられ、実務上においてはそれらを適切に評価を行った上で、ネットワークの評価が必要となると考えられる。GISを用いることで各種ハザード情報等を重ね合わせることは容易であり、橋梁の破壊を考慮した道路ネットワークの接続性という一指標を提示できたと考える。

本研究により得られた結果は、一部の仮想データや条件に基づき変換を行ったデータを用いたシミュレーション結果であることを言添える。

謝辞： 本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：NEDO)による。また、国

土交通省金沢河川国道事務所および石川県には橋梁点検結果等に関するデータの提供を受けた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP： 老朽化対策の取組み, <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>, 2011.
- 2) 美濃智広, 森川英典：自治体道路橋梁維持管理体制の現状と課題, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol. 71, No. 3, pp. 182-189, 2015.
- 3) 国土交通省総合政策局物流政策課：東日本大震災と物流における対応, <http://www.bousai.go.jp/oukyu/higashihon/3/pdf/kokudokoutu1.pdf>, 2011.
- 4) 喜多敏春, 近田康夫：道路ネットワークを考慮した道路構造物耐震補強の優先順位設定におけるゲーム理論の適用, 構造工学論文集 A, Vol. 59A, pp. 244-251, 2013.
- 5) 古田均, 中津功一朗, 高橋亨輔, 石橋健, 香川圭明：地域レジリエンスを考慮した道路網の信頼性解析に基づく地震対策の評価, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 70, No. 2, pp. I.73-I.80, 2014.
- 6) 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交通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, pp. I.1044-I.1051, 2012.
- 7) 藤井久矢, 田中新也, 古田均, 堂垣正博：地震リスクを加味した劣化損傷下にある道路橋梁群の維持管理, 材料, Vol. 61, No. 2, pp. 133-140, 2012.
- 8) 小幡卓司：橋梁の損傷度・余寿命および UC と再建設費用を考慮した BMS 構築に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 488-501, 2008.
- 9) 岩城一郎, 子田康弘, 石川雅美, 小山田桂夫：東北地方におけるブリッジマネジメント支援ツールの構築, コンクリート工学論文集, Vol. 24, No. 3, pp. 75-87, 2013.
- 10) 大竹雄, 流石堯, 本城勇介, 村上茂之, 小林孝一：統計的手法を用いた橋梁点検データベースに基づく橋梁健全度評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No. 2, pp. I.813-I.824, 2011.
- 11) 小池真登, 長井宏平：新潟県市町村における橋梁点検データを用いた経年劣化傾向分析, コンクリート工学論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 1339-1344, 2015.

(2016. 7. 20 受付)

A STUDY ON THE DISRUPTION RISK OF URGENT TRANSPORTATION NETWORK DESTRUCTION BY BRIDGE DETERIORATION IN DISASTER

Fukutsugu OGAWA and Yasuo CHIKATA

Every municipalities designate urgent transportation routes as go on smoothly rescue and transport relief supplies in preparation for disaster. On preparation of life-extending repair plan, the bridges on urgent transportation route evaluated one of the important factors, but it is not examined that the urgent transportation network is active or not in times of disaster.

This study aims to examine the ability to maintain urgent transportation network under the increase of bridge destruction risk associated with bridge deterioration, and furthermore visualize the result. These analytical processes in this study indicate that the disruption risk of network with few damaged bridge is increasing.