

道路の連結信頼性の実用的な 評価方法の提案

原田 慎也¹・栄徳 洋平²・戸根 智弘³・三木 智⁴・若林 拓史⁵

¹非会員 株式会社福山コンサルタント（〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通16-21盛岡駅前通ビル）
E-mail: s.harada@fukuyamaconsul.co.jp

²正会員 株式会社福山コンサルタント（〒812-0842熊本県熊本市南千反畑町1番21号）
E-mail: eitoku@fukuyamaconsul.co.jp

³非会員 株式会社福山コンサルタント（〒730-0016広島県広島市中区鞆町5番1号）
E-mail: t.tone@fukuyamaconsul.co.jp

⁴非会員 株式会社福山コンサルタント（〒760-0023高松市寿町1-1-1 2）
E-mail: miki@fukuyamaconsul.co.jp

⁵正会員 名城大学都市情報学部（〒509-0261岐阜県可児市虹ヶ丘4-3-3）
E-mail: wakabaya@urban.meijo-u.ac.jp

東北太平洋沖地震及びそれに伴う津波発生により、東北地方、特に太平洋沿岸部の道路ネットワークのいたる箇所で通行止めが発生し、これに伴い多くの集落で孤立化が発生し救急救援活動に多大な支障をきたした。このため、以前にも増して道路のネットワーク信頼性の評価が重要となっている。本研究では、まず、防災上必要となる道路の信頼性評価の適用範囲を整理し、そこで求められるアウトプットを整理し、このアウトプットが評価可能となる連結信頼性の適用手法を提案した。さらに、岩手県及び高知市を対象に信頼性評価を行い、実務での適用可能性を考察する。

Key Words :reliability of network, connectivity, vulnerability, road of network

1. はじめに

平成23年3月に発生した東北太平洋沖地震及びそれに伴う津波発生により、東北地方、特に太平洋沿岸部の道路ネットワークのいたる箇所で通行止めが発生した。これに伴い、多くの集落で孤立化が発生し、救急救援活動に多大な支障を来たした。

地震発生前から、地震・津波発生時における道路寸断危険性や集落孤立化の可能性検討は実施されていたが、あくまで浸水危険箇所単体での評価がほとんどであり、ネットワーク、面的な評価・検討は進められていなかった。

今回の震災を受け、大規模災害時における道路ネットワーク信頼性の評価はより重要視されているが、国土交通省においても、「道路事業における防災機能の評価手法」の検討を早急に進めているところである。

現在検討の進められている評価手法は、防災面の目的に着目して、早期に啓開し、救助・救援、緊急物資の輸送、復旧活動を支える基幹経路となる広域的防災に資する道路ネットワークの評価を目的としたものであり、基

本的には「耐災害性」（評価する拠点間最短ネットワークが災害時に通行できるか否か）と「多重性」（評価する拠点間最短ネットワークが通行できない場合の代替路が存在するか、また代替路の迂回度がどの程度か）で評価する手法である。

しかしながら、この手法では拠点間の評価は可能であるが、拠点から各地域への連結信頼性を面的に評価し、孤立集落等の評価を実施することは困難な手法となっている。またネットワークの遮断要因として津波、老朽橋、事前通行規制区間等を設定しているが、災害時（遮断時）を想定した評価であり、遮断される確率等の評価までは実施されていない状況である。

土谷¹⁾らは、交通ネットワークの防災機能の評価手法を、SCGEモデル等を用いた経済評価モデル手法、各種指標からネットワークの信頼性を評価する方法、総合的な視点から要対策箇所を選定する手法に分類し、そのメリット・デメリットを評価し、実務的な防災機能評価手法の要件として、リンクとネットワークの両方を評価でき、現実なハザードに対応でき、また、評価手法の簡易性を求めている。

ネットワークの信頼性を評価する手法には、拠点間のアクセシビリティの低下を評価する手法²⁾、ネットワークのリダンダンシーを評価する方法³⁾、各リンクの被災率からネットワーク連結信頼性を評価する方法がある。

さらに、各リンクの被災率からネットワークの連結信頼性を評価する方法には、ミニマルパス・カットによる信頼性評価方法やモンテカルロ法⁴⁾がある。

ミニマルパス・カットによる信頼度の算出においては、同一リンクを表す確率変数の重複を除去するためのブル演算が必要であり、実行は現実的には困難であり、このため、飯田ら⁵⁾による交点法の近似解法の提案や、中川ら⁶⁾による n 番目の最短経路探索によって得られる一部の限定ネットワークのミニマルパスのみを用いてノード間の信頼度の近似値を計算する方法、栄徳ら⁷⁾による限定ネットワークを拡張する方法等が提案されている。

本論文では、現実的なハザードを対象に、ハザードの影響による「孤立集落」「アクセス時間」等、一般的に理解しやすい評価指標を用いてネットワークの脆弱性を評価するとともに、実務で比較的容易に適用可能な手法を提案する。

2. 信頼性評価の考え方

(1) 道路ネットワーク評価での実務での適用範囲

道路ネットワークの信頼性評価の適用範囲としては、脆弱なリンクを強化するための評価手法だけでなく、事前の防災計画立案等にも適用していくことが求められる。

本論文では、東北地域を対象にした道路ネットワーク評価と、高知市を対象にした地域防災計画の立案を想定した評価を行い、実務での適用可能性を検証する。

a) 特定の地震を前提とした孤立集落等の分析による地域防災計画の立案

今後、東南海・南海地震等、甚大な被害が想定される地震発生が予測されている。

本稿における研究により、地震・津波発生時に孤立することが予想される地域を予め特定することで、事前の対策を効果的且つ効率的に実施できるものと考えられる。

孤立解消に向けた効果的な道路ネットワーク強化区間の特定や、道路整備時の孤立解消効果を詳細に把握できることで、事前の防災計画立案に寄与できるものと考えている。

b) 防災機能を踏まえた道路ネットワークの評価

現在国土交通省で検討を進めている「道路事業における防災機能の評価手法」によるアウトプットを、本研究においても評価可能である上、より詳細な拠点・エリアでの防災評価が可能となる。

(2) 実務に必要なアウトプット

実務への適用可能性を考えた場合に必要となるアウトプットは、以下のように整理できる。本手法では、これらのアウトプットでの評価を行うことが可能である。

a) 防災計画立案に向けた基礎情報

- ・地震等の災害発生時における孤立集落の特定
- ・被災地へのアクセス性（最短アクセスルート、距離、所要時間等）

b) 防災の観点から見た道路整備の必要性

- ・新設道路整備、道路防災機能強化に向けた要対策区間の特定
(孤立集落解消に向けた効率的な道路強化区間の特定等)

c) 防災対策の効果検証

- ・各メッシュ単位での高次医療施設アクセス時間及びアクセス確率から救急救命率、救急医療に関する社会的便益算出
- ・各メッシュ単位での孤立集落被災者数、アクセス時間及びアクセス確率から生存確率、孤立集落解消による社会的便益算出

(3) 評価方法の基本的考え方

a) 利用者経路選択の考え方

利用者は、最短時間経路から得られる情報から、経路を選択する。災害時に特定のリンクが被災した場合は、被災リンクを迂回する経路を選択する。

b) 大規模災害の発生の同時発生

地震や大規模豪雨等が発生し、被災や事前通行規制により、面的に通行遮断が多発している。従来の研究の大部分は、各リンクの通行確率は独立して発生しているか、重複しない経路を選択する方法となっている。

c) すべてのリンクの被災や通行規制の可能性

従来の実務では、特定のリンクだけが被災するとの考え方で、ネットワーク評価を実施していたが、従来被災しないとしていたリンクにおいても、被災確率を設定し、道路ネットワークの連絡性を評価することが求められている。

d) 性能保証の考え方

どのような大規模地震に対しても、道路として損傷することなく、強靱に強化しようとする大規模な費用増となる。既設の構造物の補強も含めて考えると現実的には対応できない。厳しい財政状況を踏まえると、効率的な資本投入にも配慮しなければならない。

このため、地震が発生したとしても、複数のネットワークで連結していることの整備水準(以下、サービス連結信頼度と呼ぶ)を定め、この水準での性能保証を確保していくことが求められる。

3. 評価方法

(1) 連結信頼性の定義

道路ネットワークの特定のノード間の連結信頼度 R の厳密解は、

$$R(\mathbf{r}) = E \left[1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} X_a \right) \right] \quad (1)$$

で与えられる。ここで P_s は、 s 番目のミニマルパスセット、

p はパス総数を表している。状態ベクトルの要素 X_a は、

機能しているとき $X_a = 1$ (連結)

機能停止しているとき $X_a = 0$ (非連結)

である。リンク信頼度 r_a は、

$$r_a = E[X_a] \quad (2)$$

で与えられる。 a はリンク番号である。

(2) 連結信頼性の算出の考え方

式(1)のミニマルパス・カットによるOD間の連結信頼度の算出に当たっては、①同一リンクを表す確率変数の重複を除去するためのブール演算が必要であり、実行には多大な計算コストが必要となるため、現実的には非常に困難であること、②現実的に想定できない大きな迂回やジグザグ経路まで対象にしている等の問題がある。

本研究では、OD間のサービス連結信頼度を確保するために、必要最小限の限定ネットワークを選定することを目的とし、限定ネットワークを順次拡張することで、これら従来の問題点を緩和し、大規模ネットワークでの適用を目標としている。最短経路となる1番目のパスを基準パス、 n 個のパスで構成される限定ネットワークに対して $n+1$ 番目を代替パスと呼ぶとき、最も連結信頼度の向上を図れる代替パスを選定し、限定ネットワークを拡張する。

また、橋梁等の老朽化や災害発生により交通遮断の可能性あるリンクを、通行遮断リンクとして設定する。

(3) アルゴリズム

a) 通行遮断リンクの特定

若林⁴⁾は、連結信頼度 R の値への寄与が大きい一部のミニマルパスを選定できるならば、非常に効率的に信頼度を計算できることを示している。若林が、全体ネットワークの中から信頼度の高いパスを選定しているのに対して、本研究では、 n 個のミニマルパスで構成される限

定ネットワーク上のすべての通行遮断リンクの中で、最も連結信頼度 R の向上に寄与する通行遮断リンクに対して、迂回路となる代替パスを選定する。つまり、式(2)で通行遮断リンクに $r_a = 1$ と置きブール演算を行い、

連結信頼度 R を求め、連結信頼度 R が最大となる通行遮断リンクを特定する。

b) 代替パスの選定方法

この通行遮断リンクに対する代替パスは、所要時間最短となるパスである。しかし、通行遮断リンクに並行リンクがある場合、通行遮断リンクに対して限定ネットワークの拡張ができないため、この通行遮断リンクと、並行する基準パスや代替パス上の最小のリンク信頼度となる通行遮断リンクも通行不可として、新たな代替パスを選定する。

c) Ferryパスの追加

限定ネットワークに代替パスが追加され、限定ネットワークが拡張されるが、この際、新たに限定ネットワーク上で、時間最短ではないもののパスが連続している場合があり、これをFerryパスと呼び、追加して連結信頼度を算出する。しかしながら、限定ネットワークにおいても、ジグザグ経路、大回りのミニマルパスは好ましくない。若林⁴⁾は、最短経路探索で選定した経路に微小な増分を与えることを繰り返すことで、ミニマルパスを選定する方法を提案している。本論文では、限定ネットワーク上の各リンクに対して、この手法を用いて、新たにFerryパスを選定する。ここで追加するFerryパスは、次の段階で追加される代替パスより所要時間の短いパスのみ対象とする。

d) 計算プロセス

本手法の全体プロセスを図1に示す。限定ネットワークを拡張するため、リンク数によるネットワークの規模による制約は少なく、大規模ネットワークにも対応可能となる。

- ① n 限定ネットワーク上の複数の通行遮断リンクを選定する。
- ② 複数の通行遮断リンクに対して、(1)により、連結信頼度が最大となる通行遮断リンクを選定する。
- ③ この通行遮断リンクに対して、並行する基準パスや代替パス上の最小のリンク信頼度となる通行遮断リンクも通行不可とし、最短経路探索により $n+1$ 番目代替パスを選定する。
- ④ $n+1$ 番目代替パスの所要時間と、 n 限定ネットワークで選定されていたFerryパスを比較し、代替パ

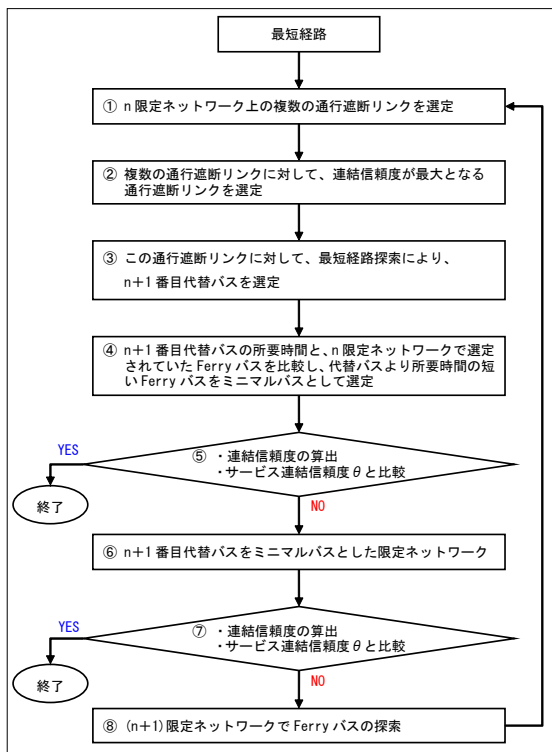


図1 連結信頼性算出フロー

スより所要時間の短いFerryパスをミニマルパスとして選定する。Ferryパスを追加した n 限定ネットワークでの連結信頼度を算出し、サービス連結信頼度 θ を上回る場合は、計算を終了する。

- ⑤ サービス連結確率 θ を下回る場合は、 $n+1$ 番目代替バスをミニマルパスとした限定ネットワークの連結信頼度を算出し、④と同様の判定を行う。
- ⑥ $(n+1)$ 限定ネットワークで、Ferryパスを探索し、①へ戻る。

(4) 評価指標

a) 孤立集落の評価

拠点間のサービス連結信頼度(例0.9)と定め、この信頼度が確保されるまで経路探索を行い、選定された複数のバスの所要時間等を計測する。この際、探索可能なパスは、所要時間が基準パスに対して1.5倍未満等の制約条件を用いる。この結果、サービス連結信頼度で到達できないゾーンが存在し、これを「孤立集落」として定義する。

b) 連結強度の評価

限定ネットワークで代替バスを拡張するごとに、OD間の連結信頼度は向上する。この向上した連結信頼度の増加した割合を連結信頼度寄与率と呼び、各パスの所要時間に連結信頼度寄与率を乗じた値を合計し、連結強度として定義する。

4. 岩手県をモデルケースとした検討

(1) 検討の概要

東北太平洋沖地震による道路ネットワーク寸断をひとつのモデルケースに、大規模ネットワークでの評価を試行する。

- ・評価プログラム・システム構築～メッシュ単位での連結信頼度評価までを実施
- ・考慮したネットワーク遮断条件は、「津波」、「落石・崩壊等の道路災害」の2つ

(2) 検討の目的

実際に発生した災害(地震)によるネットワーク遮断を踏まえた設定とすることで、算定される連結信頼度が実感に合うものかを検証する。

本検討は、評価プログラム・システム構築からメッシュ単位での面的連結信頼度評価までの一連の流れを構築し、今後の検討課題の抽出・整理を行うことを目的としたものである。

(3) 検討の考え方

特定のハザードの発生を前提とした評価とする。しかし、地震の発生確率(震源位置、規模(マグニチュード)等)までは本検討においては考慮していない。

地震発生時に想定される道路遮断要因をピックアップし、それぞれの要因に対して、遮断確率を設定する。また、連結拠点を設定し、拠点到達確率を面的(メッシュ毎)に評価する。

(4) 各リンクの遮断確率の設定

a) 津波による浸水・道路寸断

3.11津波浸水エリア実績より寸断リンクを抽出し、地震・津波発生時は実際に寸断されたリンク全てが遮断されると仮定した。

b) 道路災害危険箇所

道路災害危険箇所として「防災点検要対策箇所」を遮断リンクとして設定・抽出し、地震発生時の遮断確率を付与(今回のモデルケースでは20%と仮定)した。

(5) 検討対象とした連結拠点

本検討では、県総合計画における県都90分圏構想を視野に、岩手県内各地(各メッシュ)から県都盛岡市までの連結信頼度を評価した。

(6) 詳細設定条件

- ① サービス連結信頼度 θ : 0.9
- ② 迂回路設定 : 基準パスより所要時間が1.5倍以上のパスは対象外

- ③ネットワークリンク数：17,898
- ④メッシュ：3次メッシュ(1km)・4,946メッシュ

(7) 検討結果

a) 面的評価

連結信頼度に関する面的評価結果を図2及び図3に示す。連結信頼度90%未満のエリア居住人口が、岩手県全体の8%にあたる約106千人となった。特に津波浸水による遮断の影響を受ける沿岸部(宮古市・釜石市)や、道路網密度が低い中山間部で連結信頼度の低いエリアが散在している。

b) 拠点間評価

沿岸地域に位置する大槌町～盛岡市間を例に、連結確率を考慮した平均所要時間算出を行った結果を表1に示す。最短経路における所要時間(141分)に対し、その1.17倍にあたる所要時間(166分)となった。

(8) 今後の実務への適用と検討課題

本検討において、実際に発生した地震による道路ネットワークへの影響を検討した結果、実際に孤立が多く発生した沿岸部、特に宮古市～釜石間での孤立状況を連結信頼度を用いて再現できた。道路整備による孤立解消から見た効果予測や、孤立解消に向けた効率的な道路整備方針の提案等、実務への汎用性は高いと考えている。

今後の検討課題として、本検討では「津波」、「道路災害危険箇所」の2つの事象のみによる遮断を前提としたが、老朽橋等の他の事象についても追加する必要がある。また、「道路災害危険箇所」について一律80%の信頼度を付与したが、「地震」という災害事象に対して、地域別や時系列(発災直後・3日後・1週間後等)でも被害確率は異なるため、確率の与え方について詳細に検討する必要がある。

5. 高知市でのネットワーク評価

(1) 評価の目的

高知県高知市周辺では、南海トラフの巨大地震による津波により、図4に示す範囲において浸水被害が予想されている。

ここでは、現況道路網が浸水被害によりリンク信頼度が低下するとしたケースにおいて、広域災害支援拠点として位置付けられている高知大学附属病院への連結信頼度の評価を行い、孤立集落に対する検討課題を整理する。

(2) 評価条件の設定

本検討では、道路網が遮断する要因を、震災(浸水)直後で水位が引いた状態における道路の破損状態によるものとした。

空間的な分析単位は、3次メッシュ(1km×1km)であり、対象道路網は一般県道以上とした。また、人口は、国勢調査H17メッシュデータを用いる。

リンク数は、3,600リンクであり、その内、通行遮断リンクは、83リンクとなっている。浸水深が0.5m以下

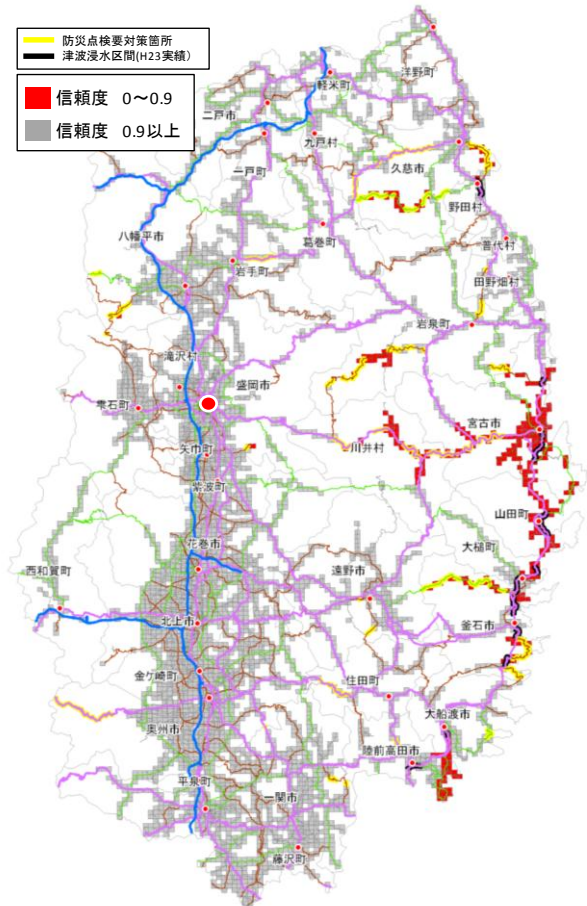


図2 連結信頼度別エリア居住人口

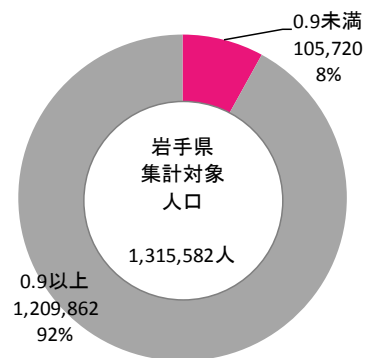


図3 連結信頼度別エリア居住人口

表1 拠点間所要時間算出結果(大槌町～盛岡市)

	距離(km)	所要時間(分)	連結確率	寄与率
最短経路	111.8	141.4	0.000	0.000
迂回路-1	114.9	148.8	0.041	0.041
迂回路-2	114.8	150.0	0.410	0.369
迂回路-3	115.6	151.1	0.410	0.000
迂回路-4	130.2	176.2	0.469	0.059
迂回路-5	130.2	177.3	1.000	0.531
平均	123.9	166.0	—	—

については、道路種別に係らずリンク信頼度は低下しないものとした。高速道路については、高台に整備されているとの前提から浸水深の大きさに係らずリンク信頼度を1.0とした。また、これ以外のリンク信頼度は、表2に示す道路種別別浸水深別に任意に設定する。迂回路設定については、基準パスより所要時間が1.5倍以上のパスは対象外とする。

(3) 評価結果

図5は各メッシュ毎の連結信頼度をランク別に示している。

浸水深が大きな土佐湾沿岸部では、連結信頼度ランクの低い地域が多く散在しており、表3に示すようにランクAの人口は、高知市の人口の約1割となっている。

また、人口集積地である高知駅付近においても浸水域となっているため、連結信頼度ランクが中程度（ランクC）である。一方、高知市西部では、高知自動車道が整備されているため、連結信頼度の高い地域が広がっており、高速道路が災害時の支援・復旧活動に寄与することが確認できる。

(4) 今後の検討課題

今回の検討では、孤立集落を確率を持って連結信頼度ランク別に定量的に評価することができた。

今後の検討課題としては、震災（浸水）後、時間経過とともにある程度道路が復旧された状態、すなわちリンク信頼度が向上した設定において連結信頼度の評価を行うとともに、時系列的に比較することで、依然、孤立集落として残存する箇所がどの地域かを明確にすることができ、これらへの対策検討が可能となる。

さらに、災害支援拠点を複数設けることで孤立集落が減るという検討ができることから、災害支援拠点の選定作業に活用できると考える。

6. おわりに

本研究では、実務で適用可能な道路の信頼性評価手法を提案し、岩手県及び高知市に適用し、実務での適用可能性を検証した。

従来、道路の信頼性評価では、計算コストの問題より大規模ネットワークでの適用が困難であった。本研究で提案した手法では、十分実務で適用可能な大規模ネットワークでも面的に評価できることが確認できた。

また、災害時には孤立集落の対策が極めて重要であるが、本手法では、サービス連結信頼度に到達しない孤立集落の選定が可能となっている。この結果、新設道路の整備による孤立集落解消効果を、図面上で視覚的に表現でき、説明性の高い評価が可能となっている。

さらに、災害発生時の支援対策や、災害支援拠点の選定にも応用展開可能である。

しかしながら、各リンクの信頼度の設定方法や、サービス連結信頼度の設定方法等は、ハザードの設定方法にも影響され、今後検討すべき項目である。

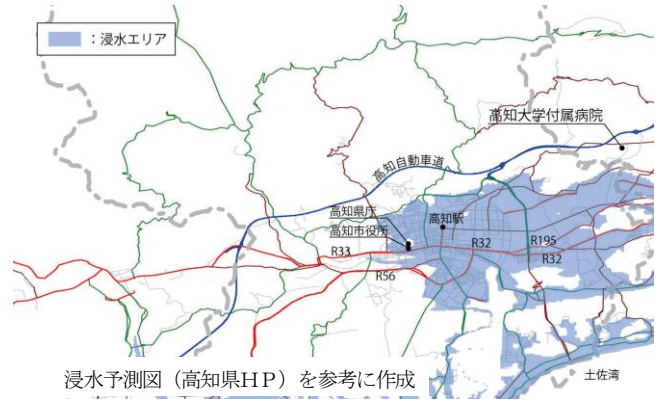


図4 高知市周辺の道路網と浸水エリア

表2 道路種別別浸水深別リンク信頼度

道路種別	浸水深 (m)					通行遮断リンク
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-5.0	5.0-		
高速道路	1.0 (1)	1.0 (0)	1.0 (0)	1.0 (0)		(1)
一般国道	1.0 (3)	0.9 (1)	0.8 (23)	0.1 (0)		(27)
主要地方道	1.0 (7)	0.9 (1)	0.7 (21)	0.1 (6)		(35)
一般県道	1.0 (3)	0.9 (0)	0.6 (16)	0.1 (1)		(20)
合計	— (14)	— (2)	— (60)	— (7)		(83)

() は通行遮断リンク本数を示す

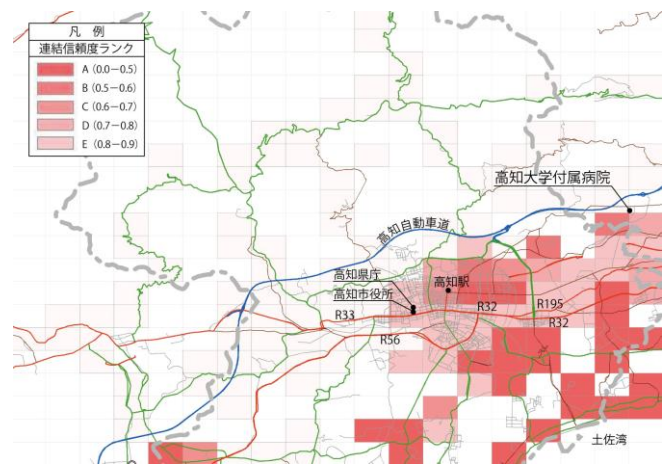


図5 浸水直後の連結信頼度ランク分布図

表3 連結信頼度ランク別人口（高知市）

連結信頼度ランク	人口(人)	構成比	累計構成比	メッシュ数
A	29,735	10.6%	10.6%	21
B	8,223	2.9%	13.5%	3
C	11,782	4.2%	17.7%	4
D	13,648	4.9%	22.6%	4
E	56,247	20.1%	42.7%	11
以外	160,213	57.3%	100.0%	77
合計	279,848	100.0%	—	120

注) 人口はメッシュカバー人口

また、クリティカルリンクの選定方法については、従来、被災状況を考慮せずに、ネットワークの脆弱性より評価する手法が多い。本手法では、メッシュ単位での人口数やそのゾーンでの被災状況を反映することが可能であり、今後検討すべき課題となる。

参考文献

- 1) 土谷和之, 鈴木啓史, 馬渡真吾:実務的な防災機能評価手法に必要とされる要件の提案, 土木計画学研究・講演集 Vol.45,2012
- 2) 相沢圭俊, 金子雄一郎: 都市間交通ネットワークの脆弱性評価指標の比較検討, 土木計画学研究・講演集 Vol.45,2012
- 3) 原田剛志, 倉内文孝, 高木朗義: 道路ネットワークの接続脆弱性評価に基づくリダンダンシーの経済価値の計量化手法の検討, 土木計画学研究・講演集

Vol.45,2012

- 4) 若林拓史:「道路網の信頼性解析に関する基礎的研究」, 学位論文, 1989.12
- 5) 飯田恭敬, 若林拓史, 吉木務:ミニマルパス・カットを用いた道路網信頼度の近似計算法, 交通工学,Vol.23,No.4,pp.3-13,1988.
- 6) 中川真治, 若林拓史, 飯田恭敬:n 番目最短経路探索を用いた簡便な道路網信頼性解析法とその交通管理運用策への適用, 土木計画学研究・論文集,No.13,pp.861-868,1996.
- 7) 栄徳洋平, 横井裕治, 溝上章志: 連結強度による道路ネットワーク評価方法の提案, 第 28 回交通工学研究発表会論文報告集, 169 頁~172 頁

(2012.8.3 受付)

PRACTICAL EVALUATION ABOUT THE CONNECTION RELIABILITY OF ROAD

Shinya HARADA, Yohei EITOKU, Tomohiro TONE ,
Satoshi MIKI and Hiroshi WAKABAYASHI

The evaluation about the reliability of a road is important in Japan. In this paper, the practical valuation method was proposed about the connection reliability of a road. And, it evaluated by using this technique for Iwate Prefecture and Kochi.