

被災地域における道路網信頼度の早期推定法

方 樹名¹・若林 拓史²

¹学生会員 名城大学大学院 都市情報学研究科 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘四丁目3-3)
E-mail:fangshuming999@126.com

²正会員 名城大学教授 都市情報学部 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘四丁目3-3)
E-mail:wakabaya@urban.meijo-u.ac.jp

交通網信頼性は、従来、平常時にも災害時にも交通を対象として、重要となっている。しかし、災害時における信頼性解析は、従来、連結信頼性に関する研究がなされてきたが、災害直後には利用できるデータが少ないので、被災地域における道路網のリンク信頼度の測定は困難である。災害直後の復旧と復興のために、道路網のリンク信頼度の推定は必要となる。リンク信頼度の推定に基づいて、被災地域における交通ネットワークの信頼性を向上できる。本研究では、1) 2008年四川大地震での交通に関する問題点を整理し、2)アクセシビリティ指標を提案するとともに被災地域における道路網連結信頼度の早期推定を提案し、3) 四川地方の綿陽市の災害時の交通ネットワークを対象として、道路網信頼度の早期推定を検証する。

Key Words : *traffic accessibility, link reliability, traffic network, 2008 Sichuan Earthquake*

1. 序論

四川大地震とは中国の中西部に位置する四川省アバ・チベット族チャン族自治州汶川(じちしゅうぶんせんけん)で現地時間2008年5月12日14時28分に発生した地震である。この地震は、四川盆地の北西端の北東から南西の方向に走る衝上断層が動いた結果として発生したとみられている。四川大地震は、直下型・逆断層型の地震であり、震源の深さは約19kmであり、M 8.0の巨大地震である。この断層は龍門山脈の下を走る龍門山断層と呼ばれる長さ約300kmの断層帯の一部とみられており、近年の内陸地震としては最大級といえる。四川大地震では、被災地内の交通が混乱して、災害の応急救援が遅れ、多くの死者・行方不明が出た。中国民政部の報告によると、現地時間2008年7月21日正午現在で、死者は6万9,197人、負傷者は37万4,176人に上り、1万8,222人が行方不明となっている。

地震災害から学ぶ教訓は、以下のようである。地震に見舞われた被災地に至る道路等の基本的交通施設の被害は極めて大きかったので、迅速な救援活動と救援物資の輸送が困難であった。この地震による影響地域は、21の高速道路と15の国道および省道、2,795の県道を含んでおり、これらの交通施設の被害は極めて大きく、破壊された道路の延長距離の合計は、200kmの高速道路と3,849kmの国道および省道と23,800kmの県道を含む約28,000kmで

あった。さらに、橋とトンネルの大部分が破損した。このため、早急に破壊された道路を復旧することが困難であった。その結果、地震直後に被災地へ救援物資を輸送すること、被災地から病院へ被災者を輸送することが非常に重要であるにもかかわらず、困難となった。また、震央周辺には山地と急斜面が多く存在し、高速道路と一般道路の使用のみでは、被災地へのルートは大きな迂回ルートとなった。したがって、被災地の道路網連結信頼度を早急に把握すること、高速道路と一般道路での交通を円滑に保つことが非常に重要であった。

地震直後に被災地の道路網連結信頼度を評価することは、有効な地震救援活動を行うための前提条件である。そして、この評価の結果は救援物資と被災者の輸送計画に影響を与え、交通手段とルートの選択にも影響を与える。

四川大地震の交通状況を考慮すると、今後予想される自然災害から、人的災害や物的災害、社会的災害を減災するため、良好な交通計画が必要である。このため、交通ネットワークの信頼性に関する試論を研究する。四川大地震の教訓に基づいて、災害が発生した実際の状況を参考にして、道路網連結信頼度の早期仮定のモデルを構築する。今後、可能性のある災害に対し、減災や緊急物資輸送を現状よりもさらに改善するためのモデルを構築することを考えている。早急に被災地の道路の損害状況と被災地への信頼度を把握し、災害時の交通問題による

被災者を減らすことや被災地の復旧が早速にできること
の目標を出すつもりである。

本論文の第2章においては、四川大地震の周辺道路の
問題点を述べる。第3章においては、アクセシビリティ
指標と四川大地震の被災地への応用可能性である。アク
セシビリティ指標に基づいて、被災地域における道路網
連結信頼度の早期推定モデルの構築について述べる。第
4章においては、実際の地震災害への適用例を述べる。

2. 四川大地震周辺道路の問題点

四川省被災地域における道路網連結信頼度の早期推定
のモデルを構築する前に、四川大地震における交通の問
題点を整理する。

四川大地震に見舞われた地域への交通システムには多
くの問題点があり、被災地の道路網連結信頼度はそれら
の問題によって大きな影響を受けた。被災地の交通シ
ステムについての問題点は道路の複雑な地理的条件と交通
管理を含む交通条件の2つの面に分割できる。

(1) 被災地道路に関する地理的の条件の問題点

地震に見舞われた地域の地理的条件は、山岳斜面の不
安定性や地質構造の激動のように非常に複雑である。そ
して、被災地の道路は、これらの地理的条件のために被
害は極めて大きかった。四川大地震による道路の損害タ
イプは、地滑りや山崩れ、路面崩壊、路面陥没、路面隆
起、路面の亀裂、法面崩壊、落石、橋の崩壊、トンネル
崩壊などを含んでいた。

(2) 交通管理の問題点

四川大地震の後で、交通管理の問題が多く顕在化した。
多くの人々が、歩道や路肩でテントを建て、多くの商
品や救援物資が路傍に沿って堆積された。また、乗り物
も路傍に沿って無秩序な状態で駐車された。そのうえ、
多くの被災者の家が破損したので、生活のための一時的
な場所を道路上に占有したので、交通圧力を単に増加さ
せるのではなく、一時的な場所の周りで交通衝突を一層
悪化させることになっていた。また、交通管理者たちは
地元居住者が重大な肉体的傷や精神的傷と資産の損失を
受けたと考えられていたので、交通違反の法施行は著し
く弱められた。その上、被災地の交通施設の一部が破損
したために交通管理者たちはもっと弱く法を施行してい
た。

3. 道路網連結信頼度の早期推定

一般的に連結信頼性で被災時のネットワークの弱さを
評価できるが、災害直後に早急に把握できない。被災時
での減災および緊急物資輸送機能の向上に有用な情報を
提供できるために、道路網連結信頼度の早期推定は重要
になる。

早急に被災地の道路の損害状況と被災地の道路網連結
信頼度を把握できれば、被災地の復旧が早速にできる。
しかし、第1章と第2章の述べたことから見て、四川大地
震における交通問題が多く存在した。これらの問題は被災
地の道路網連結信頼度の推定に影響を与える。その上、
遠回りになる道路と早速加わる交通量によって、交通シ
ステムの機能性の指標は非常に複雑である。交通網の損
害に従って、道路網連結信頼度を把握することが非常に
難しい。ここでは、損害程度によって、全体の被災地を
いくつかのサブ地域に分割し、先に被災地の各サブ地域
のアクセシビリティを計算して、その上、被災地の交通
網信頼度の推定問題を交通網の内部のサブ地域間の連
結性の問題に変わることができる。

被災地 Z は n つサブ地域に分割されて、
 $Z = \{Z_1 \cup Z_2 \cup \dots \cup Z_a \cup \dots \cup Z_n, a \in (1, n)\}$.

このモデルの中の距離について説明するために2つのパ
ラメタを定義する：

$d_{ij}(t)$: 災害が発生した後の時間 t に被災地でのノード i と
ノード j の間の最小の空間距離。

d_{ij} : 災害が発生する前に被災地でのノード i とノード j の
間の最小の空間距離。

(1) 道路損害を評価する要素

被災地にあるそれらの道路の状況が非常に複雑である
ので、サブ地域 Z_a とサブ地域 Z_b の間の事実上の距離につ
いての計算するのは非常に困難である。サブ地域 Z_a とサ
ブ地域 Z_b の間の事実上の距離を計算するために、それら
の道路の損害を表す指標 $k_{ij}(t)$ を定義する。指標 $k_{ij}(t)$ は三
つの要素を含んでいる：損害割合 $p_{ij}(t)$ 、損害タイプ $f_{ij}(t)$ 、
及び損害の規模 $s_{ij}(t)$ 。

損害割合 $p_{ij}(t)$: 時間 t に損害道路の距離に対するノード i
とノード j の間の距離の割合。

損害タイプ $f_{ij}(t)$: 損害タイプの係数は一般に表1のよう
に示す。ノード i とノード j の間に多くの損害タイプがあ
るので、損害タイプの係数は下記の数式(1)のように定
義されて、 l はノード i とノード j の間の損害場所の数を
表して、 $form(l)$ は l 番目の損害場所の損害タイプを表し
て、 $length(l)$ は l 番目の損害場所のマイル数（損害の延
長）である。

$$f_{ij}(t) = \frac{\sum_l form(l) * length(l)}{\sum_l length(l)} \quad (1)$$

表-1 損害タイプの係数の数値.

| 損害タイプ | 数値 | 損害タイプ | 数値 |
|-------|-----|----------|-----|
| 地滑り | 0.5 | 路面の陥没と奇形 | 0.4 |
| 山崩れ | 0.5 | 法面の崩壊 | 0.3 |
| 落石 | 1.0 | 地面の隆起 | 0.2 |
| 路面の亀裂 | 0.3 | トンネルの崩壊 | 1.0 |
| 土石流 | 0.5 | 軽微な橋梁の損害 | 0.3 |
| 地震湖 | 1.0 | 重大な橋梁の損害 | 0.6 |
| 洪水 | 1.0 | 橋梁の崩壊 | 1.0 |

損害の規模 $s_{ij}(t)$: 損害の規模に関する要素が多くあっても、被災地の真ん中の場所から損害の場所までの距離は主な要因である。損害の規模は下記の数式(2)のように定義されて、 $disC(l)$ は被災地の真ん中の場所から l 番目の損害場所までの距離を表して、 $CriticalD$ は被災地の真ん中の場所からの臨界の距離を表す。災害のタイプや災害の規模を m として使用して、 l 番目の損害場所の損害の規模を修正できる。

$$s_{ij}(t) = \frac{\sum_l m * \frac{length(l)}{disC(l)}}{\sum_l length(l)}, \quad (2)$$

$$disC(l) \leq CriticalD$$

道路損害の要素とする $k_{ij}(t)$ が下記の数式(3)と定義できる。ノード i とノード j の間に損害がない時、 $k_{ij}(t)$ の値は1であるが、ノード i とノード j の間に損害があれば、 $k_{ij}(t) > 1$ になる。そして、 $k_{ij}(t)$ と $d_{ij}(t)$ の関係は下記の数式(4)のように示す。

$$k_{ij}(t) = \frac{s_{ij}(t)}{(1 - p_{ij}(t)) * (1 - f_{ij}(t))} \quad (3)$$

$$d_{ij}(t) = k_{ij}(t) * d_{ij} \quad (4)$$

被災地での道路状況が非常に複雑であることから、サブ地域の間の実際の距離を計算することが非常に難しいので、災害直後の実際の観測値に基づいて、 $k_{ij}(t)$ を用いて、 $d_{ij}(t)$ を仮想的に表現することとした。

(2) アクセシビリティ指標の提案

ノード i へのアクセシビリティが低い場合、周辺地域からノード i への連結信頼度は比較的小さくなる。したがって、アクセシビリティは被災地域の交通ネットワークの信頼度を把握するために重要になる。

$i \in Z_a, j \in Z_b$ であれば、災害直後の時間 t にノード i のアクセシビリティは下記の数式(5)と定義される。 $w_{ij}(t)$ は時間 t にノード i からノード j までの交通量の重さの

値を表して、 $w_{ij}(t)$ は下記の数式(6)と定義されて、

$v_{Z_a, Z_b}(t)$ は時間 t にサブ地域 Z_a とサブ地域 Z_b までの交通

量を表す。同じな地域に属すそれらのノードから別の地域の同じな目標のノードまでの交通量が同時に等しいという仮定がある。

$$A_i(t) = \frac{\sum_{i \in Z_a, j \notin Z_a} w_{ij}(t) * d_{ij}}{\sum_{i \in Z_a, j \notin Z_a} w_{ij}(t) * d_{ij}} \quad (5)$$

$$w_{ij}(t) = \frac{v_{Z_a, Z_b}(t)}{\sum_{P \subset Z, P \neq Z_a} v_{Z_a, P_b}(t)} \quad (6)$$

上記に基づいて、同じなサブ地域 Z_a に属すすべてのノードのための交通のアクセシビリティの平均値は下記の数式(7)として計算されて、 n_{Z_a} はサブ地域 Z_a のノードの

数を表して、 $D_{Z_a}(t)$ はサブ地域 Z_a の交通のアクセシビリティを表す。

(3) 道路網連結信頼度の早期推定

式(5)によって、災害後、被災地域におけるノード i のアクセシビリティ指標 $A_i(t)$ が計算されている。災害後のリンク信頼度を計算するための情報が極めて少ないので、リンク信頼度の推定にアクセシビリティ指標 $A_i(t)$ を利用することを考える。アクセシビリティの算定値に基づいて、ノード i とノード j の間のリンク a のアクセシビリティ係数 $LA(a)$ を式(7)のように仮定する。

$$LA_a(t) = (A_i(t) + A_j(t)) / 2 \quad (7)$$

道路の損害を表す指標 $k_{ij}(t)$ とアクセシビリティ指標とともに、リンク a の信頼度 r_a は式(8)のように仮定する。

$$r_a = A_a(t) * k_a(t) \quad (8)$$

災害後、リアル・タイム的なデータを把握するのは困難であるので、二次災害のための道路損害を考慮に入れない。そこで、リンク a の信頼度 r_a は式(9)に変更できる。

$$r_a = A_a(0) * k_a(0) \quad (9)$$

ここには、 $A_a(0)$ は災害直後のリンク a のアクセシビリティ指標、 $k_a(0)$ は災害直後のリンク a の道路損害指標。

4. 道路網連結信頼度の早期推定の検証

四川省の綿陽市は甚大の被害を受けた「重災区」であるので、交通基礎施設や主要な交通ネットワークは深刻

な被害を受けた。本章では、綿陽市の交通ネットワークを例として、実際に交通システムの信頼度を早期推定する。

(1) 綿陽市の主要交通ネットワークおよび交通被害

綿陽市は成都市に次ぐ四川省第2の都市である。綿陽市街は成都市から93キロメートルの距離にある。綿陽市は市区都心部（綿陽市街）・1 県級市（江油市）・5 県（平武県、安県、三台县、塩亭県、梓潼県）・1 自治県（北川県）を管轄下に置く。綿陽市の主要交通ネットワークは図3のように示す。この道路網に13 リンクがある。リンク1、リンク2、リンク9 およびリンク12 は県道である。リンク3 は省道S105 に属する。リンク4、リンク5、リンク10 およびリンク13 はS205 に属する。リンク6 およびリンク8 は省道S302 に属する。リンク7 は国道G108 に属する。リンク11 は省道S101 に属する。

四川大震災が発生した後、綿陽市の道路、橋梁などの交通のインフラは深刻な損傷を受けた。特に北川県、平武県、安県、江油市などの4 県市の受けた被害は激甚なので、交通と通信などはすべて中断した。道路の緊急復旧活動を行っても、2008年5月28日まで、共に路床や路面が5308.3キロメートルにわたる損壊を被り、損傷した橋梁は1415基であって、経済損失は約127億元に達した（その中の国道と省道には、路床や路面が373.2キロメートルの損壊、78基の損なった橋梁があって、経済損害が31.4億元に達した）。

綿陽市内の98.6キロメートルの国道G108には、山体の地滑りのために路床や路面の3.2キロメートルの損壊があった。綿陽市内の124.2キロメートルの省道S101には、路床や路面の18.8キロメートルの損壊と1基の橋梁の損壊があった。綿陽市内の167.8キロメートルの省道S105には、路床や路面の120.7キロメートルの破壊と42基の橋梁の損害があった。綿陽市内の315.9キロメートルの省道S205には、路床や路面の152.7キロメートルの破損と17基の橋梁の損害があった。綿陽市内の187.9キロメートルの省道S302には、路床や路面の77.8キロメートルの破損と18基の橋梁の損害があった。特に、激甚な被災を受けた平武県へ到達できる道路は省道S205だけであって代替路線はほとんどなかったため、支援物資の一時的不足や被災地以外の品薄状況にも影響して、平武県への救援活動はあまり進まなかった。したがって、本章で、綿陽市街から平武県庁までのノード間信頼度の早期推定を検討する。

(2) 綿陽市の交通ネットワークのリンク信頼度の推定

式(9)から、被災地域の交通ネットワークのリンク信頼度は、道路損害指標およびアクセシビリティ指標かに推定される。

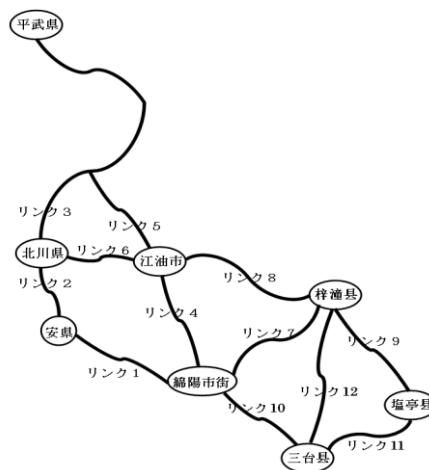


図-1 綿陽市の主要交通ネットワーク

綿陽市交通運輸局の統計データによって、式(1)、(2)、(3)で計算した綿陽市の主要交通ネットワークの各リンクの道路損害指標値は表-2のように示される。

綿陽市交通運輸局の統計データによって、式(5)、(6)で計算した綿陽市の主要交通ネットワークの各リンクのアクセシビリティ指標値は表-3のように示される。

表-2と表-3の結果に基づいて、式(9)で計算した綿陽市の主要交通ネットワークの各リンクの信頼度は表-4のように示される。

表-2 災害後の綿陽市の交通ネットワークの各リンクの道路損害指標値

| リンク名 | 道路損害指標値 | リンク名 | 道路損害指標値 |
|------|---------|-------|---------|
| リンク1 | 0.8500 | リンク8 | 1.0000 |
| リンク2 | 0.7000 | リンク9 | 1.0000 |
| リンク3 | 0.7146 | リンク10 | 1.0000 |
| リンク4 | 1.0000 | リンク11 | 1.0000 |
| リンク5 | 0.8354 | リンク12 | 0.8500 |
| リンク6 | 0.7625 | リンク13 | 0.7851 |
| リンク7 | 1.0000 | | |

表-3 災害後の綿陽市の交通ネットワークの各リンクのアクセシビリティ指標値

| リンク名 | アクセシビリティ指標値 | リンク名 | アクセシビリティ指標値 |
|------|-------------|-------|-------------|
| リンク1 | 0.7575 | リンク8 | 0.5680 |
| リンク2 | 0.4810 | リンク9 | 0.4765 |
| リンク3 | 0.3902 | リンク10 | 0.6350 |
| リンク4 | 0.7670 | リンク11 | 0.3935 |
| リンク5 | 0.5167 | リンク12 | 0.4360 |
| リンク6 | 0.4905 | リンク13 | 0.3422 |
| リンク7 | 0.7180 | | |

表4 災害後の綿陽市の交通ネットワークの各リンクの信頼度

| リンク名 | 信頼度 | リンク名 | 信頼度 |
|------|---------|-------|---------|
| リンク1 | 0.64388 | リンク8 | 0.56800 |
| リンク2 | 0.33670 | リンク9 | 0.47650 |
| リンク3 | 0.22600 | リンク10 | 0.63500 |
| リンク4 | 0.76700 | リンク11 | 0.39350 |
| リンク5 | 0.48093 | リンク12 | 0.37060 |
| リンク6 | 0.49050 | リンク13 | 0.26865 |
| リンク7 | 0.71800 | | |

四川省交通運輸庁の発表した情報によって、リンク13、リンク2 およびリンク3 は激甚な被害を被った。式(9)で計算した仮定のリンク信頼度は実際の被害の情報と一致することを確認した。

5. 終わりに

災害直後に被災地の交通ネットワークの信頼性向上は非常に重要である。災害時においては道路網信頼度の計算が困難であるので、厳密値を代替するために交通のアクセシビリティについて計算する方法を構築した。災害復旧の実際の交通要求を反映するために、災害直後の破損している道路についての距離の損害割合、損害タイプの係数および損害規模を含む多くの要素を考えた。上記の要素に基づいて交通のアクセシビリティを考察した。被災地内の異なるサブ地域内の交通のアクセシビリティが築き上げられた後で、被災地内のリンクのアクセシビリティ指標を定義して、議論できるようにした。実際の災害時の道路損害についてのデータは膨大で入手が困難

であり、早期推定のデータも不安定であるかもしれないので、本論文の道路網信頼度の早期推定のモデルは理論モデルだけである。将来、時系列的なデータに基づく本モデルのシミュレーションに関して研究すべきであり、より多くの要素を考慮すべきと考えている。

参考文献

- 1) 「四川地震震災復興再建基本計画」, http://www.gov.cn/zwgk/2008-06/09/content_1010710.htm [7 May 2012]
- 2) 「5・12 汶川地震」, <http://baike.baidu.com/view/1587399.htm> [30 April 2012]
- 3) Fang, S.M. and Wakabayashi, H.: ANALYSIS OF TYPICAL SEISMIC DAMAGES OF HIGHWAYS IN 2008 SICHUAN EARTHQUAKE, *Proceeding of Infrastructure Planning and Management, JSCE, No.42*, pp.53-58, 2010.
- 4) 「5・12 大地震綿陽市災害後再建交通計画」, <http://zsb.my.gov.cn/image20090724/141871.doc> [30 April 2012]
- 5) Yang, Z.X., Liu, S.Q. and Su, C.J.: Traffic Accessibility Analysis at the Heavy Disaster Area of Wenchuan Earthquake, *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, Vol.18, pp.1166-1172, 2009.
- 6) 四川省交通庁公路企画勘察設計研究院: “5.12”汶川特大地震四川灾区国省幹線公路檢測評估技術總結[R]. 成都: 四川省交通庁, 2008.
- 7) 唐永建, 庄衛林, 吉随旺: “5.12”汶川大地震四川灾区公路応急調査与搶通[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- 8) 吉随旺, 唐永建, 胡德貴, 汪軍, 陶双江: 四川省汶川地震灾区幹線公路典型震害特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, Vol.28 No.6, 1250-1260.

(2012. 8. 3 受付)

A FAST PRESUMING METHOD OF LINK RELIABILITY OF TRAFFIC NETWORK IN A DISASTER AREA

Shuming FANG and Hiroshi WAKABAYASHI

It is important to keep the highly reliable traffic network for abnormal and normal periods. However it is very difficult to estimate the link reliability and the road network reliability after serious disasters. For the recovery activities immediately after a disaster and in the future, a fast presuming method the link reliability of a road network is needed. Based on the fast presumption of link reliability, the reliability of the traffic network in a disaster area can be improved. There are three contents in our research: the first content is the arrangement of traffic problems on the earthquake-hit areas of 2008 Sichuan Earthquake; the second one is the new fast presumption about the link reliability for disaster recovery which combines the index of traffic accessibility; the last one is that the fast presumption on link reliability of traffic network is verified for the traffic network of Mianyang city immediately after 2008 Sichuan Earthquake in China.