

高速道路の複数経路化による震災時 経済的損失軽減効果の算定枠組み構築

吉田 泰介¹・浅野 光行²

¹学生会員 早稲田大学創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-0072東京都新宿区大久保3-4-1）

E-mail:tai-yoshi@ruri.waseda.jp

²フェロー会員 工博 早稲田創造理工学部社会環境工学科教授（〒169-0072東京都新宿区大久保3-4-1）

E-mail : asanomi@waseda.jp

日本では毎年数多くの地震が発生しており、常に大規模地震の脅威にさらされている。大規模地震が発生すると、多くの人命や構造物が被害を受ける。とりわけ交通インフラの被害による物流の麻痺は経済的な損失につながり、その影響は様々な対象に及ぶ。このような損失は耐震性能の強化や道路の複数経路化などの道路整備によってある程度軽減できると考えられる。しかし、現在では整備の効果について経済的に定量化した値は算定されておらず、整備の効果が適切に把握されていない。そこで本研究では道路の複数経路化による道路ネットワークの防災性の経済的な評価を行うために、複数経路化前後でその経済的な損失額の期待値を算定するモデルを構築し、その挙動を確認するために簡単な試算を行った。

Key Words : 地震リスクマネジメント, 経済分析, 道路ネットワーク分析

1. 研究の背景・目的

日本は世界でも屈指の地震大国と呼ばれており、ある程度の周期を持って大規模な地震が発生してきた。その被害対象は人命から産業の生産要素、社会経済活動を支える構造物まで多岐にわたる。とりわけ、交通インフラ、特に人的交流、物流を支える高速道路の被害は、社会全体への影響が大きいと考えられる。そのため、道路の地震に対する防災性を検討する際には、構造物の損傷や崩壊などの直接的被害だけでなく、道路が寸断されてしまった場合の社会全体に与える影響についても考慮する必要があると考える。

地震によるこうした経済的損失を軽減させる対応策として、道路の耐震性能の強化や道路の複数経路化などが考えられる。道路の耐震性能を向上させることで、個々の道路の倒壊確率が低くなる。それにより、地震が発生しても道路ネットワークが変化しにくくなり、安定した交通を可能にする。これにより、社会全体に対する経済的損失を抑えられると考えられる。また、道路を複数経路化することで、地震発生時にも経路が確保される可能性が高くなり、一部の道路が寸断されてしまった場合の影響を小さく抑えられる。

地震が多く、その被害も大きいと考えられる日本では経済的損失を軽減する必要がある。そのため、道路の耐震補強や複数経路化などの道路整備を、今後の公的部門の厳しい財政制約の下、効果的に投資を行っていく必要がある。そのためには想定できる様々な地震リスクを定量化し把握していくことが必要になる。

しかし、これらの地震リスクは必ずしも定量化されてはいない。そこで、本研究では数多くある道路が抱える地震リスクの中でも経済的な被害を及ぼすものに着目し、そのリスクの軽減策として道路の複数経路化による効果を定量的に評価する。これにより、地震リスクの一部について評価手法を構築し、地震リスクの定量化の一助となることを目的とする。

2. 研究の位置付け

(1) 既存研究の整理

[土屋ら,2004]¹⁾, [小池ら,2005]²⁾によって道路ネットワークの寸断が及ぼす経済的損失をSCGEモデルによって定量化する手法を構築している研究が進められている。また、[Tanakaら,2000]³⁾では地震動と橋梁の被災度の関係

を統計的手法によって明らかにしている。地震の断層別の発生確率や地震動の距離減衰式などのリスクマネジメントの手法については[Chenら,2003]⁴⁾によってまとめている。

(2) 研究の位置付け

将来発生しうる地震に対するリスク評価を行うためには、地震の発生する確率と地震が発生した場合の被害の両方を定量化し、それら両方を考慮し損失期待額として表現していく必要がある。

本研究では既存研究で得られた知見を活用し、従来の地震リスクマネジメントの手法を高速道路に対して適用し、道路ネットワークの寸断による経済的損失を確率現象として評価する。

また、経済的損失は道路ネットワークが寸断している期間に応じて大きくなることを考え、道路の復旧期間が長期化する可能性が高い橋梁部分の倒壊に着目して評価を行う。橋梁の走行性能を評価するためには基礎、橋脚、橋台、上部好悪図、支承部に分けて考えることができる。本研究では橋脚部分の被災について算定手法を示し、他の部分については今後の課題とする。

3. モデルの概要

本研究で構築したモデルは大きく分けて2種類のモデルによって構築されている。道路ネットワーク寸断確率算定モデルでは、対象とする道路ネットワークが地震によって寸断される確率を算定する。経済的損失算定モデルでは、対象とする道路ネットワークが地震によって寸断された場合の移動抵抗の増大による経済的損失額を算定する。そして算定された道路ネットワークの寸断確率と寸断状態毎の経済的損失額を乗じることで期待損失額を算定する。図-1にモデルの概要を示す。

4. 道路ネットワーク寸断確率算定モデル

(1) モデルで活用する基礎的な公式

a) 地震発生頻度・マグニチュード関係式

断層によって地震が発生する頻度とマグニチュードの関係を表した式としてGutenberg-Richter則を用いる。以下に式を示す。

$$\log(N > m) = a - bm \quad (1)$$

N はマグニチュード m よりも大きい地震が1年で発生する回数を示す。 a および b は断層毎に設定される定数である。

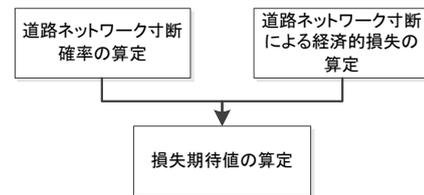


図-1 モデルの概要

表-2 材料別パラメータ

	RC		鋼製	
	μ	σ	μ	σ
>A	6.69	0.69	8.1	1.61

b) 距離減衰式

構造物に直接影響を与える地震動の強さを表す方法として本研究ではPGA(Peak Ground Accerlation)を用いる。PGAは震源におけるマグニチュード、震源からの距離、断層の形態などによって表現される以下のBoore et alモデルを活用する。

$$\ln Y = f_1(M_w, r_{jb}) + f_2(V_{S30}) \quad (2a)$$

$$f_1(M_w, r_{jb}) = c_1 + c_2(M_w - 6) + c_3(M_w - 6)^2 + c_4 \ln R \quad (2b)$$

$$f_2(V_{S30}) = c_6 \ln(V_{S30}/c_7) \quad (2c)$$

$$R = \sqrt{r_{jb}^2 + c_5^2} \quad (2d)$$

ただし、 Y はPGAの水平要素の平均、 M は震源におけるマグニチュード、 r は断層から対象位置までの距離、 c は定数、 V_{S30} は地表30mまでの平均S波速度である。

c) 橋脚倒壊確率算定式

本研究において個々の道路の寸断確率は、道路の橋梁部分の橋脚の倒壊を意味する。なお、橋脚の倒壊として日本道路協会が定める被災度A以上を重大な被害として本研究では扱うこととする。震度Iで橋脚が被災した時に、被災度A以上になる確率は以下のように算定することができる。

$$P(I) = \Phi\left(\frac{I - \mu}{\sigma}\right) \quad (3)$$

なお、式中の平均 μ と標準偏差 σ はRC橋脚と鋼製橋脚によって分けることができ、表-2のような値となる[田中ら,2000]⁹⁾。

震度Iは以下の式でPGAに変換することができる。

$$PGA = 10^{-0.23+0.51I} \quad (4)$$

(2) 算定の流れ

道路ネットワークの寸断が交通に与える影響を評価するため、道路ネットワークを構成する各道路リンクが通行止めになる確率を明らかにする。道路リンク内に存在する橋脚が一か所以上被災度Aになると当該リンクは通行できなくなるため、リンク内に存在する橋脚の一か所以上が被災度A以上になる確率をリンクの寸断確率とすることができる。

以下ではリンク内に存在する橋脚が一か所以上被災度A以上になる確率を算定する流れを示す。

Gutenberg-Richter則を用いて断層*i*においてマグニチュード*m*以上の地震が発生する年間頻度*N_i(m)*を算定する。これを以下のように計算することでマグニチュード*m*から*m+dm*の地震が発生する頻度に変換することができる。

$$n_i(m) = N_i(m) - N_i(m + dm) \quad (5)$$

断層*i*から橋脚*j*までの距離を*r_{ij}*とした時、断層*i*で発生したマグニチュード*m*の地震による橋脚*j*での地震動強さをBooreの距離減衰式を用いることで表現することができる。到達するPGAを*L(r_{ij}, m)*として、橋脚倒壊確率算定式に代入すると断層*i*によって橋脚*j*が倒壊する確率は以下ようになる。

$$G_{ijk} = 1 - \prod_m (1 - n_i(m)P(L(r_{ij}, m), k)) \quad (6)$$

なお、*k*は橋脚*j*の材料、*P*は橋脚倒壊確率算定式を示す。さらに以下のように計算することでリンク内の橋脚すべての倒壊確率を算定できる。

$$G_{ijk} = 1 - \prod_i \prod_j \prod_m (1 - n_i(m)P(L(r_{ij}, m), k)) \quad (7)$$

5. 経済的損失算定モデル

(1) モデルの概要

本研究では経済モデルとして空間的応用一般均衡分析(SCGE)モデルを用いて、地震による交易の変化によって発生する損失額の算定を行った。

SCGEモデルとは応用一般均衡分析(CGE)モデルを空間的に拡張した経済モデルである。応用一般均衡分析とは各市場において需要と供給が一致した状態(均衡状態)を表現したモデルである。空間的に拡張とは、地域という概念を取り入れたものであり、地域間の取引を考慮して、各地域の各市場が均衡状態にある系を表現したモデルである。

SCGEモデルでは以下のように社会経済を表現する。各地域には代表的な家計と複数の産業が存在しており、それぞれの地域があるまとまりを持った社会経済体系を

成している。モデルでは各市場で需要と供給が一致するように組まれている。地域間の取引が行われるときに、財の価格に輸送費用が発生し生産地価格に上乗せされて消費される。

SCGEモデルでは図-3のように社会経済を表現する。

(2) 各主体の行動モデル

a) モデルで扱う変数

表-4にSCGEモデルで扱う変数を示す。

b) 家計の行動モデル

家計は所得制約条件下で効用が最大になるように行動する。

$$V^s = \text{Max}_{f_i^s} U^s(f_1^s, \dots, f_i^s) \quad (8a)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i \in I} PF_i^s f_i^s = w^s L^s + r^s K^s \quad (8b)$$

c) 産業の行動モデル

産業は以下の2つの仮定に従って行動する。

産業は費用が最少になるように中間財の投入および付加価値の投入を行い生産する。

$$X_j^s = \min \left(\frac{VA_j^s(l_j^s, k_j^s)}{a_{0j}^s}, \frac{x_{1j}^s}{a_{1j}^s}, \frac{x_{2j}^s}{a_{2j}^s}, \dots, \frac{x_{lj}^s}{a_{lj}^s} \right) \quad (9)$$

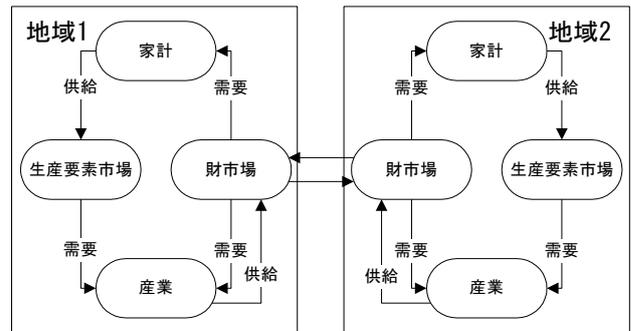


図-3 SCGEモデルの概略

表-4 SCGEモデルで扱う変数

係数	名称	意味
β_i	財消費シェア係数	家計の消費額に占める財の消費財消費額の比率
α	代替弾力性	消費財に関する代替弾力性
a_i	投入係数 (輸送マージンを除く)	産業の生産額に占める財 <i>i</i> の中間財投入額 (輸送マージンを除く)費用の比率
as_i	付加価値比率	産業の生産額に占める産業 <i>i</i> の付加価値額の比率
a_i	分配パラメータ (労働)	産業の付加価値額に占める産業の労働投入額の比率 (資本投入比率は1- α となる)
ϕ	付加価値投入 代替弾力性	付加価値生産における労働・資本投入に関する代替弾力性
η_j	付加価値投入 効率パラメータ	産業の労働・資本投入の効率性を表現する係数
L	家計の労働保有量	家計が所有する労働の量
K	家計の資本保有量	家計が所有する資本の量
t	輸送マージン率	財を需要するために必要となる輸送マージン率 (Ice-berg)型輸送マージンの仮定
X	生産量	財の生産量
x_i	中間財の合成財投入量	産業が投入する中間財の量
VA	付加価値投入量	産業が投入する付加価値の量
l	労働投入量	産業が投入する労働の量
k	資本投入量	産業が投入する資本の量
f	消費財消費量	家計が消費する財の消費量
P	財価格	産業 <i>i</i> において生産される財・サービスの価格(生産者価格)
w	賃金率	労働の価格
r	資本レント	資本の価格
U	効用	家計の効用

産業は付加価値1単位生産するときの費用を最小にするように労働と資本と投入する。

$$\min_{l_j^s, k_j^s} (w^s l_j^s + r^s k_j^s) \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } VA_j^s(l_j^s, k_j^s) = 1 \quad (10b)$$

d) 市場の均衡条件

SCGEモデルでは産業の生産関数が規模に関して収穫一定と仮定しており、生産量は以下ようになる。

$$X_i^r = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} (1+t^{rs}) x_{ij}^{rs} + \sum_{s \in S} (1+t^{rs}) f_i^{rs} \quad (11)$$

生産要素市場の均衡状態が成立するためには以下の式が成立する必要がある。

$$\sum_{j \in J} X_j^s D_{lj}^s(w^s, r^s) = L^s \quad (12a)$$

$$\sum_{j \in J} X_j^s D_{kj}^s(w^s, r^s) = K^s \quad (12b)$$

e) 便益の定義

便益を以下のように定式化する。

$$EV^s = (w_a^s L^s + r_a^s K^s + NX^s) \left(\frac{U_b^s - U_a^s}{U_a^s} \right) \quad (13)$$

f) マークアップ率の設定

[小池ら,2006]⁹⁾に従い、輸送費用率のマークアップ率を次のように決定する。道路ネットワークの寸断による影響を交通への影響として所要時間の増大が考えられる。そのため、輸送費用率の増大は所要時間の増大に起因する交通抵抗の増大として表現する。輸送費用率のマークアップ率は以下ようになる。

$$t^{ij} = \frac{C_1^{ij} - C_0^{ij}}{C_0^{ij}} \times \beta \quad (14a)$$

$$C_0^{ij} = v \times T_0^{ij} + d_0^{ij} \quad (14b)$$

$$C_1^{ij} = v \times T_1^{ij} + d_1^{ij} \quad (14c)$$

なお、 t はマークアップ率の増加分、 β は財価格に占める輸送費用率の割合、 v は時間価値、 T は所要時間、 d は所要費用、0 および1 は災害前後を表すサフィックスである。

6. 損失期待値の算定

各道路ネットワーク状態の年間発生確率と当該ネットワーク状態における経済的損失を乗じ、すべての道路ネットワーク状態におけるこれらの値を統合することで損失期待値を算定する。



図-5 試算対象

(google maps より作成)

表-6 Boore et al モデルで活用するパラメータ

c1U	-0.242
c1S	-0.313
c1R	-0.117
c2	0.527
c3	0
c4	-0.778
c5	5.57
c6	-0.371
c7	1396

7. シミュレーションの実施

(1) 試算対象およびインプットデータ

a) 試算対象

東西の交通を支える中央道、東名および、開通予定である新東名の有無を比較することで本研究で構築したモデルの挙動を確認する。対象とする断層は対象とする高速道路付近の主要断層とする。具体的には図-5に示した通りである。また、橋脚は高速道路の橋梁部分に50m間隔に設置されており、中央道、東名、新東名の全延長の内2割は橋梁であると仮定した。仮定のもと算出した橋脚の本数は中央道1095本、東名1036本、新東名935本となった。橋脚の位置は高速道路に等間隔にあるとした。

b) 道路ネットワーク寸断確率算定モデルのインプットデータ

各断層に対するGutenberg-Richter則における係数 a, b を入力することができなかったため、以下のように仮定した。なお、日本では b は0.9から1.0の値を取るとされている。

$$a : 3.254$$

$$b : -0.95$$

[Booreら,1997]⁹⁾に従い、Boore et alモデルの距離減衰式に用いる係数を表-6のように設定した。

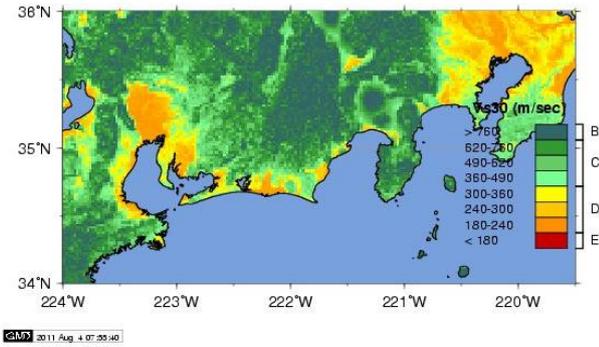


図-7 地点別Vs30⁷⁾

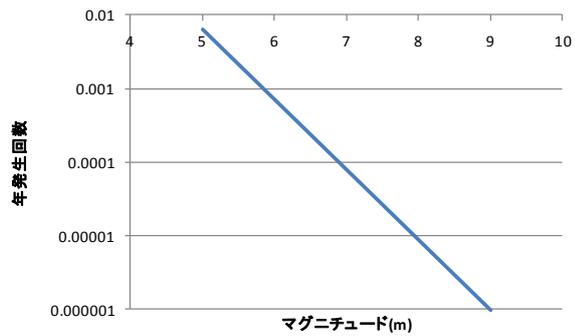


図-8 地震発生頻度とマグニチュードの関係

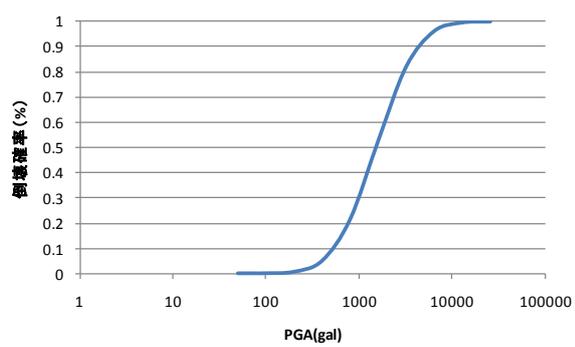


図-9 地震動強さと倒壊確率の関係

また、試算対象周辺のVs30は図-7から概ね400(m/s²)程度であることから全地点において400(m/s²)と仮定した。

c) 経済的損失算定モデルのインプットデータ

モデルで扱う社会会計データとして平成17年度9地域間産業連関表を用いた。

また、各種パラメータについては基準均衡データを用いてキャリブレーションを行った。合成財消費の財選択の代替弾力性と地域選択の代替弾力性は[小池ら,2006]⁹⁾に従い0.8を採用した。

財価格に占める輸送費用の割合βは正確に把握はされていないため、本研究では10%を基本として仮定した。輸送費用率のマークアップ率を設定するための交通抵抗

の変化を道路延長と走行速度をそれぞれ設定し、それぞれの所要時間を算定した。なお、それぞれの検討区間における延長は中央道278.0km、東名260.7km、新東名245.0kmとなっている。また、走行速度をそれぞれ100km/hとした。ただし、新東名は車線数が多いことを考慮し120km/hと設定した。本試算では計算の簡便化のため、道路渋滞や混雑などの影響を考慮せず、交通経路は最短経路が選択されるとした。

(2) 道路ネットワークの寸断確率の算定

Gutenberg-Richter則によって各断層における地震発生確率を規模別に算定する。本試算ではデータセットの都合上パラメータが全て等しい値を取っているため地震発生確率は全断層で同じ値となる。計算結果は図-8に示す。

各橋脚位置における地震動強さを計測するために、19の断層と設定した3066本の橋脚までの距離を計測しBoore et alモデルの距離減衰式を適用する。計算結果については紙幅の都合上省略する。

それぞれの地震動における各橋脚の倒壊確率を算定するために、上記で得られたデータを、橋脚倒壊確率算定式を適用する。詳細な計算結果については紙幅の都合上省略するが、地震動強さと倒壊確率の関係は図-9のよう

うに得られた。19の断層の規模別地震発生確率と地震動強さによって算出された各橋梁の倒壊確率を統合した結果、中央道は年4.18%、東名は年3.91%、新東名は3.65%の確率で寸断するという結果になった。

(3) 経済的損失の算定

最短経路が新東名の場合を基準状態として、東名が最短経路になってしまった場合は一日当たり全国で21億の損失が発生する結果になった。また、東名も寸断され中央道が最短経路となった場合は44億の損失が発生する結果になった。

(4) 期待損失の算定

新東名整備の有無別に期待損失を算定した。算定の結果、新東名が開通することにより年間約21億の損失軽減が期待できるという結果になった。また、軽減率としては約92%の軽減が見込めるという結果になった。算定結果を表-8に示す。

表-8 期待損失算定結果

道路ネットワーク状態	経済的損失(億円)	道路ネットワーク状態発生確率(%)		期待損失(億円)	
		新東名整備後	新東名未開通	新東名整備後	新東名未整備
新東名・東名・中央道	0	88.7%	0.0%	0.0	0.0
新東名・東名	0	3.9%	0.0%	0.0	0.0
新東名・中央道	0	3.6%	0.0%	0.0	0.0
東名・中央道	-21	3.4%	92.1%	-0.7	-19.3
新東名	0	0.2%	0.0%	0.0	0.0
東名	-21	0.1%	4.0%	0.0	-0.8
中央道	-44	0.1%	3.7%	-0.1	-1.6
合計				-0.8	-21.8

8. まとめ

(1) 研究のまとめ

本研究では既存の地震リスクマネジメントに関する知見から、道路ネットワークの代替性と経済的損失額を統合的に評価し、損失を確率現象として定量化する手法を構築した。試算に際して各モデル内で用いたパラメータの多くを仮定のままにしてしまっているため、最終的に得られた損失期待額は実際とは異なる値となってしまう可能性がある。今後は各モデルの理論的整合性を高めると共に、パラメータの設定方法について検討していく必要があると感じる。また、現状での利用においては各モデルにおいて感度分析を行い、適切なパラメータを検討する必要がある。

(2) 研究の課題

a) 道路ネットワーク寸断確率算定モデルの課題

試算に際してはGutenberg-Richter則で用いる係数aとbを各断層について明らかにする必要がある。また、本研究で構築したモデルは、橋梁に対する地震リスクの複数経路化による軽減効果を明らかにした。しかし、実際には様々な地震リスクが存在し、またそれらに対して様々な軽減対策が存在する。地震リスクを完全に定量化するためには考えられる要素を全て取り込む必要があり、これらの定量化も必要である。

b) 経済的損失算定モデルの課題

本研究では財価格に占める輸送費用の割合を10%と仮定して与えている。この設定によって最終的な値が大きく変わることが[小池ら,2006]によって明らかになっていることを考えると、適切な設定方法が必要であると言える。マークアップ率の算定に用いた各道路ネットワーク状態における東西間移動の所要時間は混雑や渋滞を考慮していないことも課題である。

参考文献・資料

- 1) 土屋哲, 多々納裕一: SCGEモデルを用いた基幹交通網に関する地震リスクのパブリックマネジメント, 社会技術論文集 Vol2.1, 228-237, 2004年10月
- 2) 小池淳司, 上田孝行: 大規模地震による経済的被害の空間的把握: 空間的応用一般均衡モデルによる計量厚生分析, 防災の経済分析, 勁草書房 2005年6月10日
- 3) Tanaka S., Kameda H., Nojima N., Ohnishi S.: EVALUATION OF SEISMIC FRAGILITY FOR HIGHWAY TRANSPORTATION SYSTEMS, Proc. 12th World Conf. on Earthquake Engineering (12WCCEE200)
- 4) Wai-Fah Chen, Charles Scawthorn: EARTHQUAKE ENGINEERING HANDBOOK, CRC Press, 2003
- 5) 小池淳司, 右近崇: 新潟県中越地震における磐越道・上信越道のリダンダンシー効果, 高速道路と自動車, 第49巻, 第7号, 2006年7月
- 6) Boore, D.M., Joyner, W.B., Fumal, T.E.: Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work, Seismol. Res. Lett., 68, 128-153, 1997年
- 7) USGS, Global Vs30 Map Server, <http://earthquake.usgs.gov/hazards/apps/vs30/> 2011年8月5日アクセス
- 8) 土屋哲, 吉田隆史, 多々納裕一, 畑山満則: 道路ネットワーク寸断による経済的影響を分析する SCGE-UEモデルの開発, 第41回土木計画学研究発表、講演集 2010年6月
- 9) 土屋哲, 多々納裕一, 岡田憲夫: 新潟県中越地震による経済被害の計量化, 京都大学防災研究所年報 第48号B 平成17年
- 10) 中村孝明, 宇賀田健: 地震リスクマネジメント, 技報堂出版株式会社, 2009年1月30日

(2011.?? 受付)

DEVELOPMENT OF SEISMIC ECONOMIC LOSS MITIGATION EFFECT CALCULATION SCHEME FOCUSING ON HIGHWAY NETWORK REDUNDANCY

Taisuke YOSHIDA, Mitsuyuki ASANO

Japan is very seismically active, and is always under the threat of large-scale earthquake. Once large-scale earthquake occurs many human and constructions gets damaged. Especially, the damage of the transportation infrastructure leads to economic loss that has impact to various entities. These loss can be mitigated by reinforcing the structure or enriching the redundancy of the transportation network. This paper focused on transportation network redundancy, and generated a model that calculates the expected economic loss. The model is confirmed with simple trial calculation.