

地震被災を想定した道路ネットワークのライブ管理システムの構築

Construction of live management system for highway networks in a seismic disaster emergency

川本篤志*, 白木 渡**, 保田敬一***, 伊藤則夫****, 堂垣正博*****
 Atsushi Kawamoto, Wataru Shiraki, Keiichi Yasuda, Norio Ito, and Masahiro Dogaki

- * (株)荒谷建設コンサルタント 鳥取支社 技術部 (〒680-0874 鳥取市叶 148-3)
 ** 工博 香川大学教授 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)
 *** 博(工) (株)ニュージェック 東京本社 道路グループ (〒135-0007 東京都江東区新大橋 1-12-13)
 **** 博(工) (有)シー・エー・イー 代表取締役 (〒680-8064 鳥取市国府町分上 2-210)
 ***** 工博 関西大学教授 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

In the maintenance of infrastructures in the performance design system, the counter measures in a emergency when structures are collapsed are required in addition ordinary maintenance service. The authors proposed a new maintenance approach named the live management approach to manage the maintenance of structures at the ultimate limit state as well as at the service limit state. In this paper, using this live management approach, it is constructed a live management system for highway networks in a seismic disaster emergency at the central area of Tottori City. In construction of the system, removable routes on the highway-network to the destination for various supposed seismic disaster patterns are analyzed based on the reliability evaluation of highway network and their results are stored in the live design database system. Actual damages are immediately surveyed after the occurrence of earthquake, and the simulation results stored in the system are updated and the effective decision-making is immediately performed using this proposed live management system.

Key Words: live management approach, earthquake disaster countermeasures in an emergency, urban highway network, live design database

キーワード: ライブ管理手法, 緊急地震災害対策, 都市道路ネットワーク, ライブデザインデータベース.

1. はじめに

我が国では、近年、地震や梅雨・台風シーズンの局地的な豪雨、土砂災害などの突発的な自然災害イベント(以下、イベントと記述)の発生により、社会基盤施設が甚大な被害を受け多くの人命や莫大な財産が失われる事態が多発している。また、今後 30 年以内に 50%以上の高い確率で東海、東南海、南海等の巨大地震の発生が予想されており、被害を受ける可能性のある自治体では、人口が集中している都市部を対象として、災害発生時の緊急対応計画が立案され、防災対策の検討が進められている。

各自治体が検討している緊急対応計画は、多くの場合、緊急対応、応急対応及び復旧・復興の 3 つの段階で構成され、各段階にて対応すべき内容が時系列的に整理されている¹⁾。このうち、地震発生から 1 日以内に当たる緊急対応は、人命救助、二次災害の低減・防止活動を行う最も重要なフェーズである。地震発生直後、気象庁より

震源地、震源の深さ、地震の規模と各地の震度分布が発表される。この状況において、対象地域の道路ネットワークの信頼性評価が迅速に行われれば、初動対応も早くなり被害の軽減を図ることができる。

また、従来の計画においては、災害時の道路や橋梁等の社会基盤施設の被災状況が最悪となる発生時期や時間帯のシナリオを設定してこれに対する緊急対応が検討されている。しかし、1 つの最悪被災シナリオに対して緊急対応策を検討しておけば、それより規模の小さい災害時にも同様に効果的な対応ができる訳ではない。例えば、道路や橋梁等の社会基盤施設の被災状況が全体としてはさほど大きくなかったとしても、道路の被災箇所や落橋した橋の場所が想定したシナリオと異なれば、被災者の病院への搬送や緊急物資の輸送等の計画が大幅に狂い、緊急対応指令が遅れることから被害を増大してしまう場合もありうる。

これらの課題に対して、筆者等は、既存の社会基盤ストックの維持・管理にライブデザインの考え方^{2),3)}を導

入し、既存の社会基盤ストックの長期的な管理・運営とイベント発生時のソフト防災的な対応を融合させた新たな管理方法としてライブ管理^{2),3)}の手法を提案した。しかし、これまではライブ管理の概念ならびに手法の提案にとどまっており、具体的な事例による検証が不十分であった。

そこで、本研究では、設計及び維持管理上において想定される地震規模を超える大地震が都市部に発生した場合を考え、まず地震発生直後における道路ネットワークを対象とした信頼性評価をライブ管理手法に基づいて行う。次に、その結果を踏まえて緊急時における社会基盤施設のライブ管理の在り方を示し、最終的にはライブ管理手法の有効性を検証する。具体的には、地震発生直後の道路や橋梁の様々な被災パターンに対して、予めシミュレーションを実施して格納されたシミュレーションデータベースから、現在の被災パターン下で所定の目的地まで移動可能な経路を短時間のうちに検索・提示することにより、想定外の事態に対しても効果的な緊急災害対応（ライブ対応）が可能になることを示す。

2. 地域防災計画の概要と課題

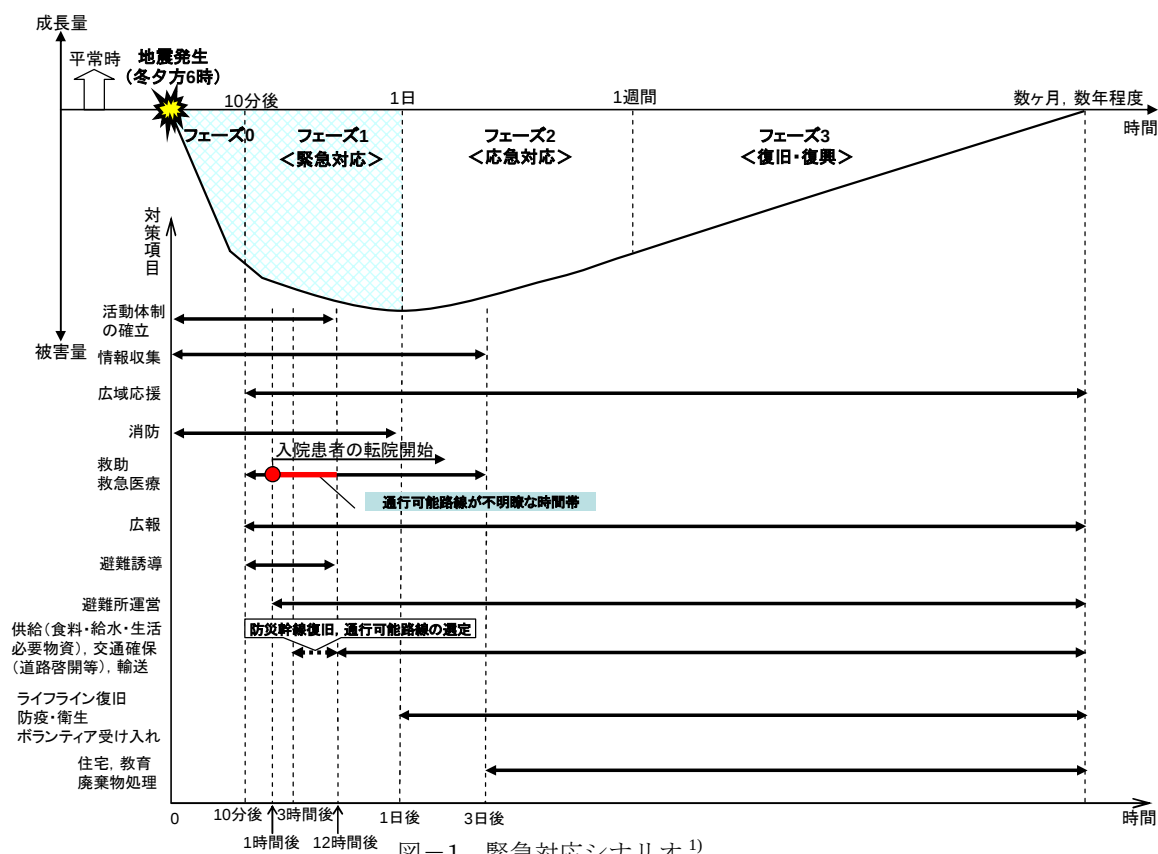
地域防災計画とは、「災害対策基本法」をもとに、地域における具体的な震災予防計画、危機管理計画などに関する事項を取りまとめたものである。その計画では、初動対応に不可欠な地震発生直後の道路施設の要求性能として、耐震設計を行うことを基本に個々の施設の被害最

小化を図り、道路ネットワークとしての交通機能を確保するという主としてハード対策を目指したものとなっている。

図-1 は、鳥取県において計画されている地域防災計画のうち、鳥取市に最も大きな被害をもたらすような地震のシナリオに対して緊急時の対応を時系列的に整理したものである。このシナリオは、各関係機関が対応する内容を個別に整理したものになってはいるが、各機関の垣根を超えた連携ならびに道路ネットワークの機能確保のための効果的な事前対応とイベント発生後の緊急対応との摺り合わせ、さらにはその情報の共有化など、ハード及びソフト対策を融合させた整理が十分とはいえない。

一方、道路管理者は、道路橋の耐震対策を実施し、道路ネットワークの耐震性確保に努めることが義務づけられている。しかし、この対策も予算の制限を受けつつ実施するものである限り最低限の耐震性確保に主眼をおいたものとならざるを得ない。そのため、実際にイベントが発生した時に、緊急輸送路が完全に確保できる保証はない。

従って、道路管理者は、今後地域防災計画と計画サイトの実際の整備状況とのギャップを認識した上で様々な被災パターンを想定する必要がある。そして、それぞれの被災パターンに対して減災対策ならびに事前教育などのハード及びソフト対策を実施して、いかなる事態にも即時に対応できるよう十分な準備をしておく必要がある。



3. ライブ管理の概念

災害は突然発生し、被災状況は時々刻々と変化する。道路管理者は、このような事態に対して、被害状況の迅速な把握、現況に即した的確な意思決定が求められる。このような現況に即した（ライブな）対応を可能とするのが、ライブ管理の考え方である。

筆者らが提案するライブ管理は、図-2の管理手順に示すように長期的な使用状態の確保を目的とした通常の維持管理、ライブデザイン（事前対応）及びライブデザイン（緊急～復旧・復興対応）の3つの管理パートで構成されている。これらの管理パートは、ライブデザインデータベース³⁾（以下、LDDDBと記述）で接合され、各管理段階で発生するデータを蓄積し、時宜においてそれを必要とする部署に伝達することにより、常時とイベント発生時の効果的な管理の実現を目指している。すなわち、ライブ管理は、様々な被災パターンに対して効果的な地域防災計画の実践を可能にする管理システムであると言える。3つの管理パート及びLDDDBの概要は以下のとおりである。

(1) LDDDB

LDDDBは、ライブ管理を構成する3つの管理パートにおいて必要となる1次データベース（DB1）～5次データベース（DB5）の5つのデータベースにより構成される。これらの各データベースは、以下に示す情報を格納したものである。

- ・DB1：通常の維持管理において整理されている橋梁台帳などの基本情報で構成される。
- ・DB2：点検データなどのモニタリングデータで構成される。

- ・DB3：通常の維持管理で実施されるアセットマネジメント（以下、AMと記述）において出力されるデータで構成される。
- ・DB4：当該管理区域の最適な管理シナリオに関する情報で構成される。
- ・DB5：当該管理区域で想定される様々な被災状況に対応してシミュレーションを実施し、得られた緊急対応シナリオを格納する。

(2) 通常の維持管理

この管理パートは、長期的な使用状態に耐えうる構造性能の保持を目指すものであり、現在の維持管理において取り組まれているAMの内容を実施していく。

(3) ライブデザイン（事前対応）

この管理パートでは以下の内容を実施する。

① 構造性能の評価

通常の維持管理では、DB1及びDB2として収集・蓄積されている情報を基に長期的な使用状態を確保するためのシナリオが設定され、維持管理が行われる。ここでは、通常の維持管理において設定、管理されるシナリオ上の構造物の劣化状態に対して、対象地域に想定内及び想定外の地震などイベントが発生した場合の構造性能の評価を行い、対象構造物の使用状態から限界状態までの性能を明らかにする。

② シミュレーションによる管理シナリオの作成

管理区域内に想定外のイベントが発生した場合に考えられる多くの被災パターンをシミュレーションにより求め、各被災状況下でとるべき対応の検討を行う。これらはイベント発生時の管理シナリオ（案）としてLDDDBのDB5に格納される。

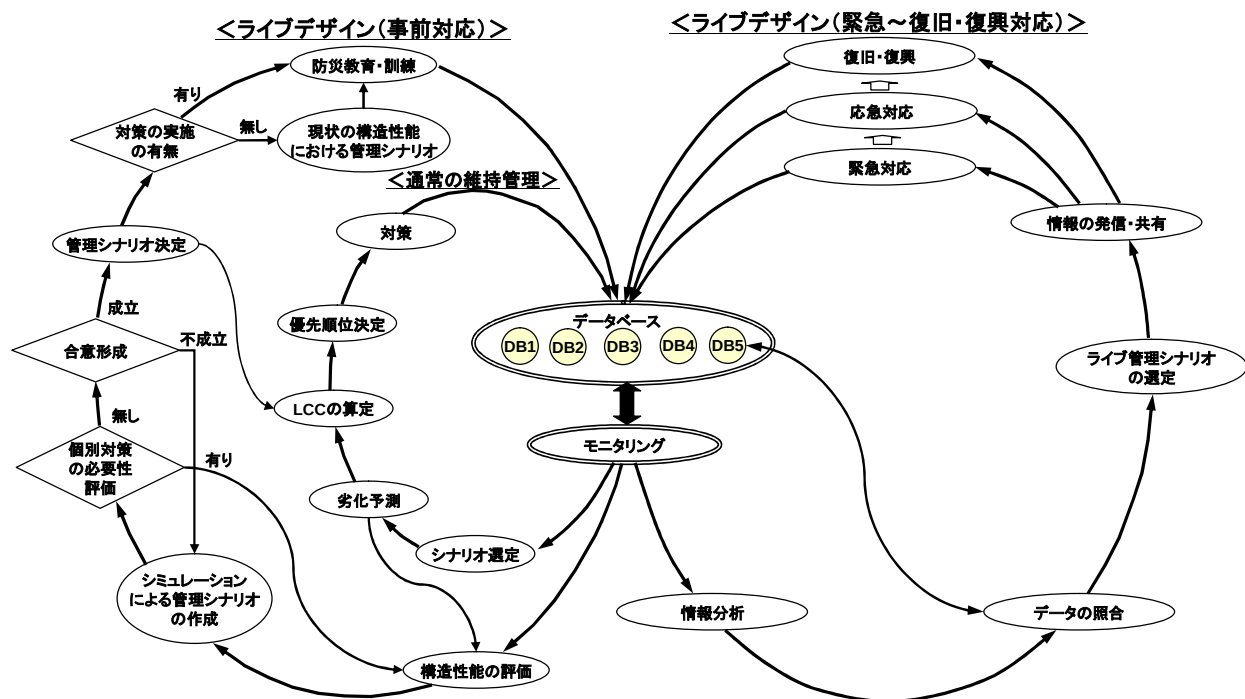


図-2 ライブ管理の手順

なお、ここに示す想定外のイベントとは、設計及び管理上考えられていなかった荷重状態が発生した場合に起こる被災状況を示すものである。

③ 個別対策の必要性

シミュレーションにより得られた管理シナリオ（案）をもとに判断した場合、現状での構造性能では、道路ネットワークの冗長性が確保できないなど管理上問題と判断された場合、個別対策が必要と判断され、①に戻り、補修・補強などの対策を考慮して構造性能の再評価および管理シナリオ(案)の再検討が実施される。このように、このパートは、管理目標を満足する管理シナリオ（案）を求めていく過程の重要なルーチンと位置づけられる。

④ 合意形成

設定された管理シナリオが管理者及びユーザーの双方が受け入れられるものであるかを判断する。管理シナリオが双方に受け入れられる場合には次の段階に入り、そうでない場合には②に戻り最適な管理シナリオを再選定する。

⑤ 管理シナリオの決定

選定された最適な管理シナリオを長期的な使用を確保する通常の維持管理パートに反映させる。他の管理施設と一緒にライフサイクルコスト (LCC)

の算定を行い、優先順位に応じて対策を実施する。

⑥ 防災教育・訓練

管理者及びユーザーが防災・減災対策を共通の課題として認識できるように、防災教育・訓練段階を通して災害発生時の対応を共に学習しておく。

(4) ライブデザイン（緊急～復旧・復興対応）

この管理パートでは以下の内容を実施していく。

① 情報の分析

モニタリングによって得られた被災情報を分析し、対応の決定に必要な情報が整っているかを精査する。不足している場合には再度、モニタリングを実施する。

② データの照合

事前対応において検討した様々な被災パターンと実際の被災状況との照合作業を行う。被災状況が適合するシナリオをライブ管理シナリオとして抽出する。

③ 情報の発信・共有

ライブ管理シナリオに従い、使用可能な路線や救急施設の受入れ可能情報等、避難および救援活動の各段階において必要な情報を発信する。

④ 緊急～復旧・復興対応

ライブ管理シナリオを基本に緊急～復旧・復興に至る段階毎に適切な対応を実施し、その結果を

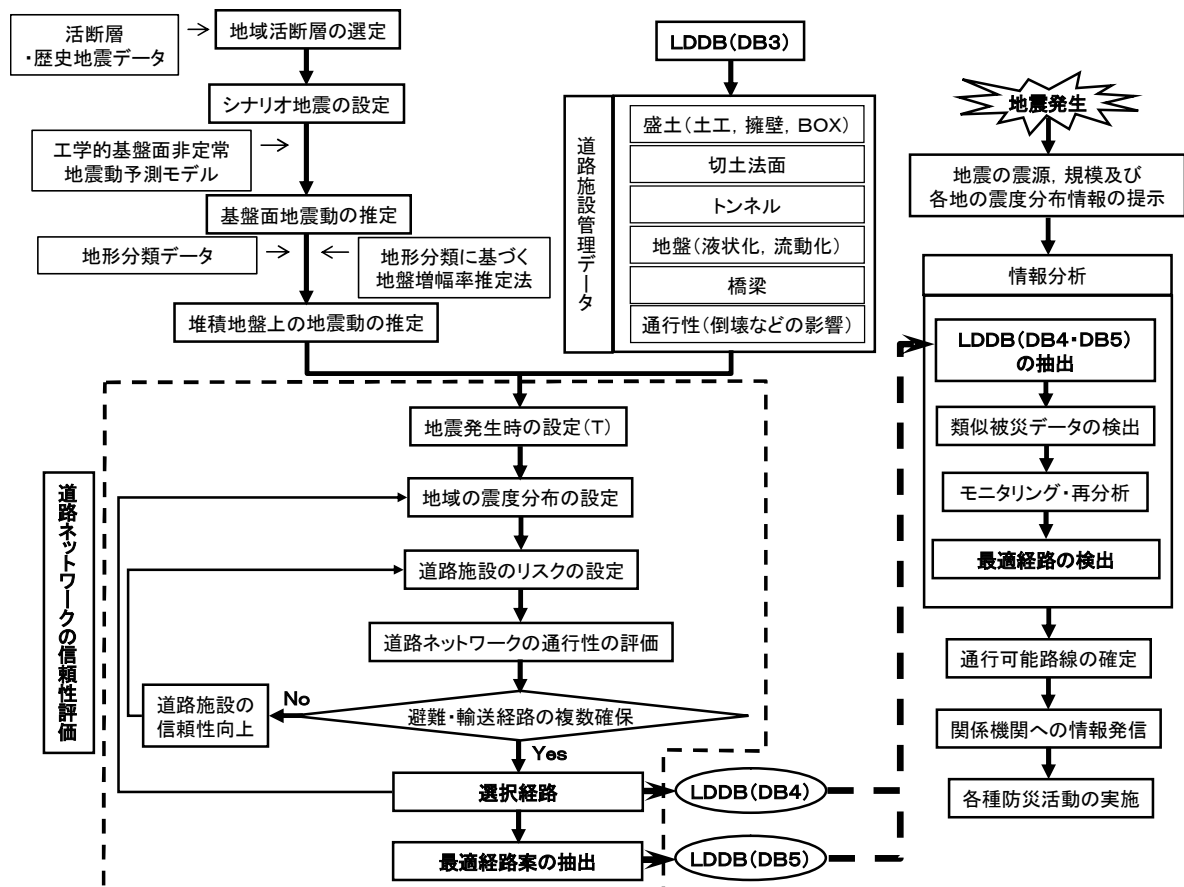


図-3 道路ネットワークの信頼性評価システム

LDDDB に格納する。

本論文では前記の管理手順のうち、(3)ライブデザイン（事前対応）の②シミュレーションによる管理シナリオの作成、および(4)ライブデザイン（緊急～復旧・復興対応）の②データの照合のパートについて検討する。

4. 道路ネットワークの信頼性評価システムの構築

4.1 道路ネットワークの信頼性評価の考え方

1 章のまえがきでも述べたように、地震発生直後において直ちに適切な初動対応を実行することは被害の軽減を図るために重要である。そのためには被害状況を迅速に把握するためのモニタリングシステムの整備を行うとともに、得られた情報を最大限有効に利用するためのシステム作りが必要となる。

本章では、突発的な地震発生により想定される様々な被災パターンを考慮した道路ネットワークの信頼性の評価を行い、その結果をもとに 3 章で示したライブ管理手法を用いて、緊急時の効率的な対応を実現させるためのシステム構築について示す。ここで実施するシステム構築のための解析フローを図-3 に示す。

このシステムでは、シミュレーションにより道路ネットワークの被災パターンを多数設定し、被災パターンごとに最も短時間で輸送が行える最適経路を抽出するとともに、所要時間の予測を行う。そして、こうして得られた最適経路はその経路を使用する場合の対応シナリオとともに図-2 に示す LDDDB の DB5 に格納し、地震発生直後の緊急対応のための基礎データとする。

そして、地震発生直後には、実際の情報すなわちモニタリングで得られる被災状況および気象庁等から発表される各地の震度分布情報をもとに、計測震度とその被害を関連付けた指標（フラジリティー評価）から想定した道路ネットワーク上の被害に類似するライブ管理シナリオを LDDDB より抽出する。

さらに、モニタリングにより新しい情報が得られ、被害状況が明らかになるごとに、より現況に適合したライブ管理シナリオを LDDDB より抽出する。

4.2 ダイクストラ法による選択経路の検討

本システムにおける最適経路の算定には、最短経路問題によく用いられている手法であるダイクストラ法⁴⁾を用いる。ダイクストラ法によるネットワークの最短経路の選定は以下の手順で行われる。

- ① 始点と接続している節点(1 次節点)の始点との距離を求める。
- ② 1 次節点に接続するすべての 2 次節点と始点との最小距離を求め、このとき通過した 1 次節点を記憶する。
- ③ 終点に至るまで②を繰り返して始点・終点間の最小距離が求まる。また、終点から 1 つ前に通過した節点を逆にたどることで最短経路が求まる。

本解析ではノード間距離としてノード間の実距離に道路施設管理データに格納されているデータより推定した道路施設リスクを付加した見かけの距離を用いる。道路ネットワーク（リンク）の見かけの距離 L'_{ij} は、式(1)より求まる。

$$L'_{ij} = L_{ij} \cdot \left\{ 1 + R^m_{ij} + R^{cs}_{ij} + R^u_{ij} + R^{gr}_{ij} + R^{br}_{ij} + R^{pa}_{ij} \right\} \quad (1)$$

ここに、 L'_{ij} はノード i および j の間のリスクを考慮した見かけの距離(km) , L_{ij} はノード i, j 間の距離(km) , R^m_{ij} , R^{cs}_{ij} , R^u_{ij} , R^{gr}_{ij} , R^{br}_{ij} , R^{pa}_{ij} はリスク係数でそれぞれ盛土損傷のリスク（土工、擁壁、BOX）、切土法面損傷のリスク、トンネル損傷のリスク、地盤のリスク（液状化、流動化）、橋梁損傷のリスク及び通行性（沿線建築物の倒壊、放置車両等の影響等）を表している。これらのリスク係数は 0.0 以上の値で、当該リンクが全く被害を被っていないとき 0.0、通行不能になるほどの損傷を受けたときには無限大になるものとする。

本解析では、地震時に発生する損傷が長期の通行不能状態をもたらす橋梁被害と、どのような地域であっても地震発生直後に生じる通行障害に着目した検討を行うこととし、その他のリスクは通行に支障ない状態（0.0）にあるものとした。また、対象地域に想定した地震が発生したとしても、実際上はその想定した震度に相当する被害が一様に発生するのではなく、局部的に被害が集中す

表-1 橋梁損傷マトリックス⁵⁾

	As ～D	As ～B	As ～A	As
5 弱	1.000	0.013	0.003	0.000
5 強	1.000	0.037	0.007	0.000
6 弱	1.000	0.082	0.019	0.000
6 強	1.000	0.322	0.190	0.102

表-2 橋脚の被災度区分⁶⁾

被災度 区分	定 義
As	・ 倒壊したもの ・ 損傷変形が著しく大きなもの
A	・ 亀裂、座屈、鉄筋の破断等の損傷または変形が大きいもの
B	・ 鋼材の座屈や部材の変形が部分的に見られるもの ・ 鉄筋の一部の破断やはらみ出しおよび部分的な被りコンクリートの剥離や亀裂が見られるもの
C	・ 鋼材の座屈や部材の変形が軽微なもの ・ ひび割れの発生や局部的な被りコンクリートの剥離が見られるもの
D	・ 損傷がない、あっても耐荷力に影響のないきわめて軽微なもの

る箇所が発生すると考えられる。このような地域内の震度のばらつきを定量的に評価することは困難であるため、本解析では、鳥取県の地域防災計画において、図-3 に示す地域活断層の選定から堆積地盤上の地震動の推定を行って設定されている震度6強の予想震度が、対象地域に一律に分布するものとして解析を行うこととした。

本研究で提案しているライブ管理では、既存構造物の管理状態を踏まえた構造性能により構造物の状態を指標化し、その指標を基に管理することを考えている。しかしながら、構造物の時間的に変化する劣化と構造性能の関係については、現在、様々な研究が行われており、現段階ではまだ劣化解析をもとにした構造性能を定量的に評価することは困難であると考え、本解析では、橋梁被害によるリスク係数 R^{br}_{ij} として、能島等⁵⁾による兵庫県南部地震の橋脚被災データをもとにした表-1 に示す橋

梁の脆弱性評価を利用して求めることとした。ここでいう $As \sim D$ は表-2 に示す橋脚の被災度区分⁶⁾である。地震発生直後に発生する余震に対しても支障なく安全に救急活動に使用できる橋梁としては被災度C及びDにとどまっている必要があると考え、地域防災計画で設定される予想震度6強に対して表-1の着色部の確率、33.2%で通行不能になるものとしてリスク係数 R^{br}_{ij} を無限大とする。そして、それ以外の場合には通行に支障がないものとして $R^{br}_{ij}=0.0$ とする。

また、通行性リスク R^{pa}_{ij} については、兵庫県南部地震時の神戸市役所からの物資輸送の配送所要時間⁷⁾を参考に決定した。すなわちリンクごとに被害の発生確率を50%として被害なしの $R^{pa}_{ij}=0.0$ 、または被害ありの $R^{pa}_{ij}=3.0$ のいずれかをとりものとする。

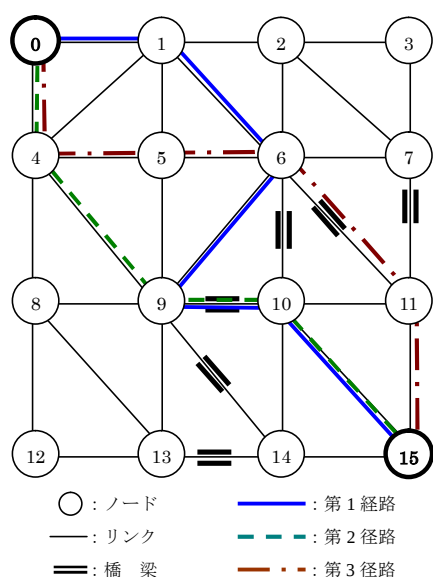


図-4 道路ネットワークの簡易モデル

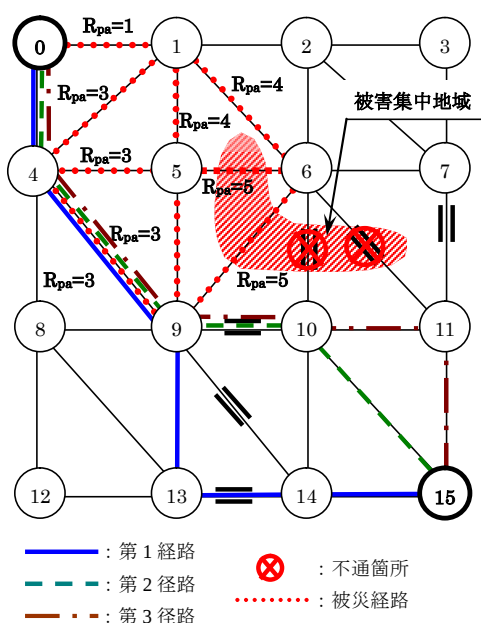


図-5 道路ネットワーク (被災後)

表-3 事前検討データ

経路	距離 (km)	標準移動時間 (min)	予測移動時間 (min)	ルート
			最小～最大 (平均)	
1	9	21.6	21.6～21.6 (21.6)	15-10-9-6-1-0
2	9	21.6	21.6～21.6 (21.6)	15-10-9-4-0
3	9	21.6	21.6～21.6 (21.6)	15-11-6-5-4-1-0
4	8	19.2	19.2～26.4 (23.7)	15-11-6-9-4-0
5	10	24	24.0～24.0 (24)	15-11-6-5-4-0
:	:	:	:	:

表-4 通行可能経路検索一覧

経路	距離 (km)	標準移動時間 (min)	予測移動時間 (min)	ルート
			最小～最大 (平均)	
1	8	19.2	26.4～48 (34.7)	15-14-13-9-4-0
2	9	21.6	28.8～28.8 (28.8)	15-10-9-4-0
3	9	21.6	28.8～36 (34.2)	15-11-10-9-4-0
4	10	24.0	31.2～45.6 (34.8)	15-14-10-9-4-0
5	11	26.4	33.6～33.6 (33.6)	15-14-9-4-0
:	:	:	:	:

4.3. 道路ネットワークの信頼性評価システムの解析例

解析例として図-4 に示すような簡単な道路ネットワークモデルを考える。本モデルは、○印がノード、数字がノード番号、実線がリンクおよび二重線が橋梁設置箇所を示しており、16 ノード 33 リンク、うち 6 リンク上に橋梁が点在する構成となっている。

ノード0からノード15への移動可能な経路を求めるものとして、4.2 で示した方法で道路ネットワークの被災パターンをシミュレーションにより発生させた。検討可能なかぎり多くのパターンを得るためのシミュレーション回数として、ここでは300回とした。なお、想定震度は震度6強としている。

シミュレーションの結果47の経路が抽出できた。各経路の見掛けの移動距離を市街地平均移動速度 25km/h で除してこれを予測移動時間とする。経路は同一であっても被災分布が異なるので予測移動時間にはばらつきが生じる。平均予測移動時間が短い経路を信頼性が高い経路と考え、移動平均時間の短い順に列挙すると表-3 のとおりである。

次に、この道路ネットワーク上に実際に地震が発生した状態を考える。道路ネットワークのモニタリング情報が随時収集・更新され、図-5 に示すように、リンク⑥-⑩上の橋梁およびリンク⑥-⑪上の橋梁がともに被災し通行不能であるという被災状況が明らかになったものとする。この情報を用いて事前に検討した経路を直ちに更新することで、移動時間の予測精度の向上を図ることができる。

このようにしてLDDBから平均予測移動時間を短い順

にリストアップすると表-4 のようになる。このとき一緒にLDDBからこの経路を使用する際のライブ管理シナリオを取り出し現況を考慮した(ライブな)意思決定を行うことで、直ちに効果的な緊急時対応が可能となる。

この結果を踏まえ、以下において実際の都市の道路ネットワークにて数値計算を実施する。

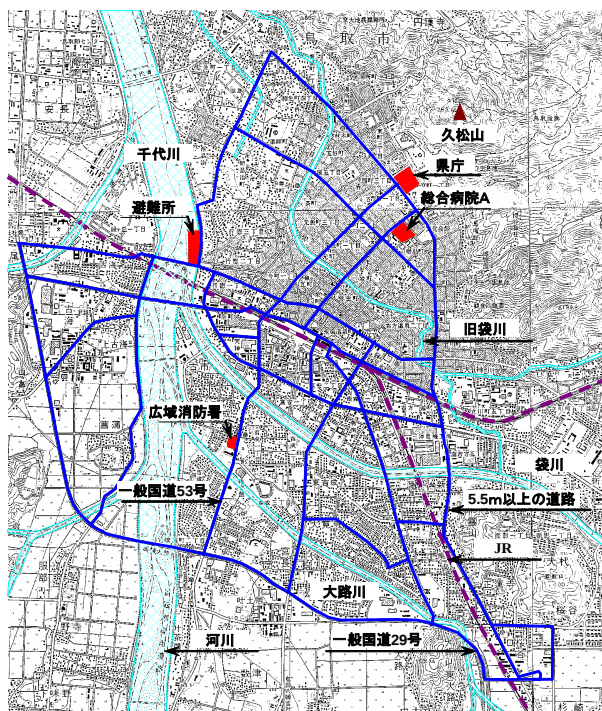
5. 鳥取市における道路ネットワークのライブ管理システムの構築

5.1 対象地域の概要

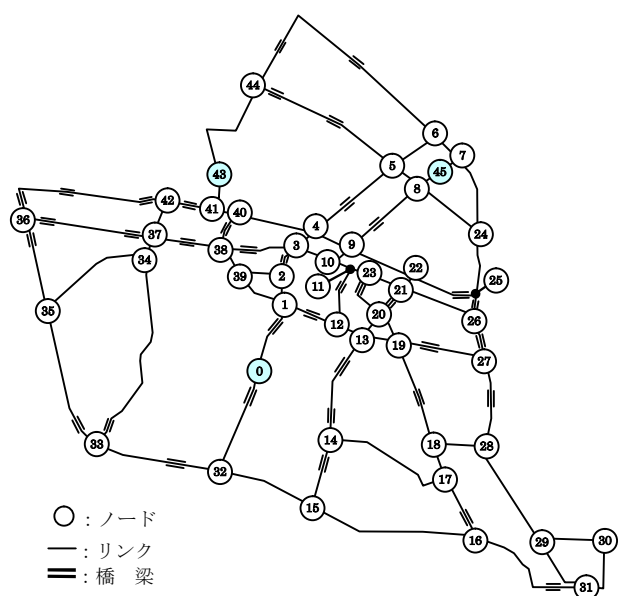
図-6 (a) に示すように、鳥取市の中心市街地は、かつて鳥取城があった久松山を中心として一級河川千代川およびその支流である大路川とに囲まれた地域に位置している。鳥取市は城下町として栄えた町であり、久松山を取り囲むように流れる旧袋川は、防衛線としての役割を担っていたことが伺える。

以前の中心市街地はJR線の北側の久松山までの範囲であったが、次第に南側に広がり、今ではJR線が市街地を2分する状態になっている。JR線踏切による交通渋滞が問題となり、これを解消すべくJR線を高架構造とする工事が実施され、すでに30年が経過している。主要幹線道路としては、東西に伸びる一般国道9号、南北に伸びる国道29号および国道53号が骨格をなし、これらにアクセスするように久松山麓にある県庁から県道が放射状に伸びる道路網を形成している。

また、当該箇所の地質状態は、千代川河口の三角州であるとともに砂丘に閉塞された巨大な後背低地であることから軟弱な沖積層が30m 程度堆積し、その下部に安定



(a) 鳥取市中心市街地道路網



(b) 道路ネットワークモデル

図-6 鳥取市中心市街地の道路ネットワークモデル

表－5 救急移送経路（事前検討）

広域消防署から総合病院 A（ノード 0--45），					総合病院 A から避難所（ノード 45--43）				
経路	距離 (km)	移動時間(min)		ルート	経路	距離 (km)	移動時間(min)		ルート
		標準	予想 平均				標準	予想 平均	
1	3.5	8.4	8.4	45-8-9-22-21-23-11-12-1-0	1	2.5	6.0	8.2	43-41-40-4-3-10-9-8-45
2	3.6	8.6	8.6	45-7-6-5-4-3-38-39-1-0	2	2.9	7.0	9.5	43-41-40-38-39-2-3-4-5-8-45
3	2.4	5.8	10.9	45-8-9-10-3-2-1-0	3	2.7	6.5	9.7	43-41-40-38-3-4-5-8-45
：	：	：	：	：	：	：	：	：	：

した洪積層が存在する地質構造となっている。

鳥取市では昭和 18 年 9 月 10 日の鳥取地震で大きな被害を被っている。鳥取地震は、鳥取市付近の地下 10km を震源とするマグニチュード 7.2 の直下型地震で、倒壊家屋 7500 戸余、死者 1000 人余、火災発生箇所 16 箇所にもおよび、現在の中心市街地のほぼ全域に及ぶ範囲に甚大な被害をもたらした。

5.2 鳥取市を対象とした事前シミュレーション

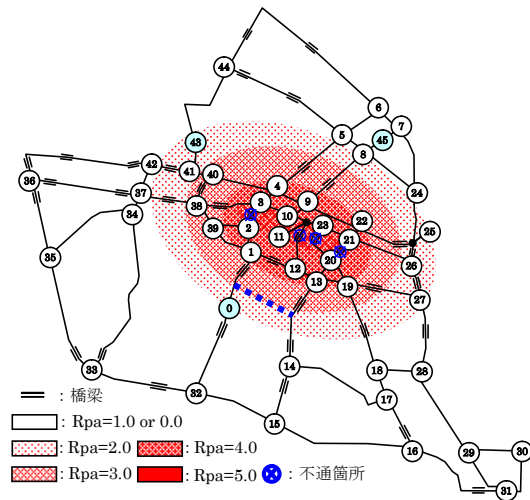
ここでは、2 章に示した鳥取市の地域防災計画の緊急対応シナリオ（図－1 参照）のうち、フェーズ 0 からフェーズ 1 において医療機関が対応する以下の①～③の行動に着目し、災害時緊急対応に関するライブ管理システムの構築について検討する。

- ①当該地域の総合病院が被災し、入院患者の処置が困難となり、後方医療機関への空送を行う。
- ②市内の救急隊は、広域消防署より各総合病院に救急車を移動させる。
- ③救急隊は入院患者を引き取りヘリコプターの離陸が可能な避難箇所及びヘリポートまで移送する。

図－6(a)から明らかなように、総合病院Aは家屋密集地に位置するため近くでヘリコプターの離着陸を行うことはできない。従って、緊急時においては西に直線距離で2kmほど離れた避難所まで患者を移送する必要がある。このとき使用可能な道路ネットワークモデルを図－6(b)に示す。図において、○印はノード、数字はノード番号、実線はリンク（5.5m以上の道路）および二重線は橋梁設

置箇所を示している。このうち、図－6（b）で幅員5.5 m以上の道路のみを対象としているのは、兵庫県南部地震において幅員が6.0m以下の道路がほとんど通行できなかったという実績に基づいたものである。救急車の移動経路は、広域消防署（ノード0）から総合病院A（ノード45）、総合病院A（ノード45）から避難所（ノード43）に至る通行可能な経路とする。

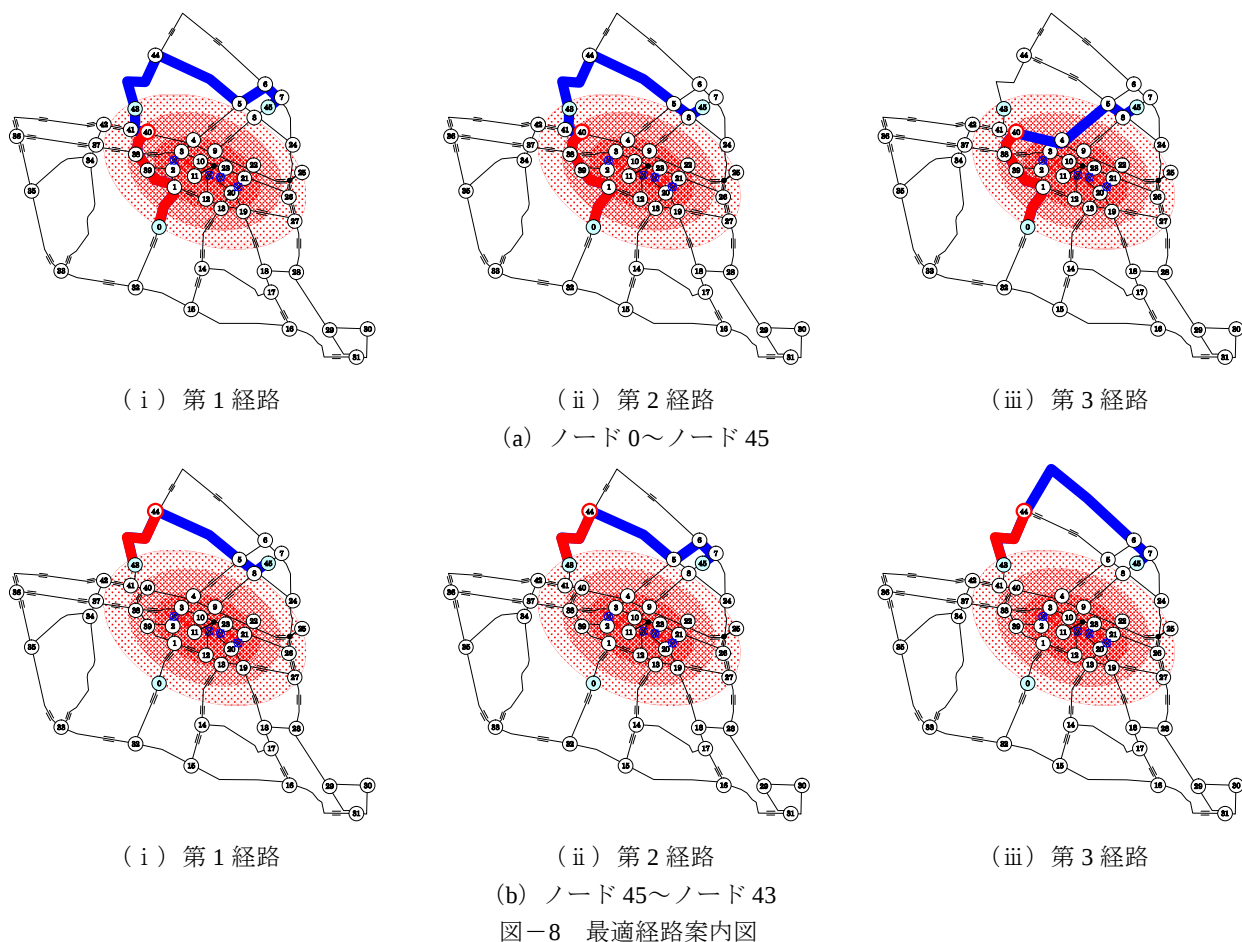
解析に際しては、まず図－6（b）に示す道路ネットワークモデル上に予想震度 6 強が発生した場合の被災パターンを生成し、次にノード 0 からノード 45 及びノード 45 からノード 43 への最適経路をシミュレーション回数



図－7 第1次被災情報図

表－6 災害時通行可能経路

広域消防署から総合病院 A（ノード 0--45），					総合病院 A から避難所（ノード 45--43）				
経路	距離 (km)	移動時間(min)		ルート	経路	距離 (km)	移動時間(min)		ルート
		標準	予想 平均				標準	予想 平均	
1	4.9	11.8	25.2	45-7-6-5-44-43-41-40-38-39-1-0	1	2.8	6.7	12.0	43-44-5-8-45
2	4.5	10.8	25.7	45-8-5-44-43-41-40-38-39-1-0	2	3.2	7.7	13.0	43-44-5-6-7-45
3	3.3	7.9	27.6	45-8-5-4-40-38-39-1-0	3	3.6	8.6	14.0	43-44-6-7-45
：	：	：	：	：	：	：	：	：	：



300 回にて抽出する。そして、移動可能経路の信頼性を予測移動平均時間で評価し、短いものから順に示す。その結果の内上位3位までを示すと表-5のようになる。

道路ネットワークの被災パターンごとにこのような解析を行うことにより、多くの移送経路が抽出される。こうして求めた移送経路に対して緊急時に起こりうる問題点を洗い出し、事前対応を検討しておくことにより、被害の軽減を図ることができる。検討しておくべき問題点としては、例えば、移送経路が集中するノードの規制方法や他機関による緊急活動との調整や情報の交換・共有を行うためのシステム整備などが考えられる。

解析で抽出された全経路は、それらを活用する際の緊急対応シナリオと共に LDDDB に格納しておく。

次に、実際の地震が発生した場合の緊急対応について考える。地震によって生じた被災パターンが図-7 のようであったとする。このパターンは広域消防署と総合病院 A の間に被害が集中した状態を想定しており、想定状況としては非常に厳しいものである。しかし、5.1 節で述べたようにこの付近にかなり老朽化が進んだ JR 線高架橋が存在するため、このような被災パターンの想定は必要である。

判明した被災パターンをもとに解析結果を更新し、LDDDB からライブ管理シナリオを取り出すと表-6 のよ

うになる。この更新された移送経路を道路ネットワーク上に示すと図-8 のようになる。

こうして抽出された経路をよく見ると、ノード0からノード45およびノード45からノード43の最適経路の上位3経路において単一の経路(0-1-39-38-40, 44-43)が選択されている。これらの区間は多くの経路で共通して使用され、交通が集中するリンクであって、この区間を円滑に通行できるか否かは全体の移動時間に及ぼす影響が大きい。従って、このような区間が道路ネットワークの管理上重要なリンク区間となる。そして、重複経路の端部のノード(40, 44)が交通制御を必要とする重要なノードとして位置付けられる。

しかし、逆の見方をすると、選択経路に重複路線が多く含まれるということは、これらの重複路線が被災して通行不能な状態になれば道路ネットワーク上の選択肢が制限されることになる。つまり、この道路ネットワークは脆弱さを有していることになり、地震発生に対して大きなリスクを有していることとなる。そのため、道路ネットワークの選択肢を増やす対策、例えば、図-7 の破線で示すようにノード0からノード13に移動できる新規路線の設置、あるいは現道改良などのハード対策により選択肢の増加を図るなどの処置が対策として考えられる。

また、図-8(a)の経路も非常に大きく迂回するもので

あるが、市街地の両端にある広域消防署から総合病院 A への移動は被害の状況によっては困難になることも予想される。

この問題は、巨大地震の発生に対するハード対策の限界状態を示すものであり、この場合は孤立した総合病院 A における自衛手段等のソフト対策の検討が必要となる。この状態で考えられる自衛手段としては、総合病院 A または近隣の行政機関内に移送用車輛を常駐させる。あるいは、民間のバス・タクシー会社等に緊急時の移送を委託できるよう事前協議を行うなどのソフト対策が考えられる。

このように、本研究で提案しているライブ管理の考え方をもとに、想定外の事態に対する既存の社会基盤施設のハードな危機管理、並びに緊急事態における避難や救急救命などのソフト対策をシミュレーションにより事前学習し、その結果を基に訓練を実施しておけば災害時における効果的な緊急災害対応（ライブ対応）が可能になる。今後、30 年間に 50% 以上の高い確率で巨大地震の発生が予想されている状況において、本研究で提案しているライブ管理システムを構築しておくことにより、人的並びに物的被害の飛躍的な軽減が期待できる。

6. おわりに

筆者等は、これまで通常の管理とイベント発生時の緊急～復旧・復興対応に係わる管理との連携の必要性について研究を進め、その有効な管理方法としてライブ管理を提案し、その概念について整理を行ってきた。その成果をもとに、本研究では、設計及び維持管理上では想定外にあたる事態、すなわち大地震が都市部に発生した場合を考え、ライブ管理の考え方に基づく地震発生直後における都市部の道路ネットワークの信頼性評価を行った。そして、緊急時における社会基盤施設のライブ管理の在り方について述べた。

具体的には、緊急時における道路ネットワークの信頼性評価方法を提案し、簡単なモデルを用いて道路ネットワークのライブ管理システムを構築した。そして、さらにこの方法を鳥取市中心街地の道路ネットワークのライブ管理システム構築に適用し、地震発生直後の緊急対応の在り方について検討した。その結果、この方法によりさまざまな被災パターンを想定し、それらのパターンに

応じた有効な対応を事前に準備してライブ管理システムとして構築しておけば、被害軽減につながることを示した。

しかし、本研究では、緊急時における 1 つの対策事例について、提案したライブ管理手法の有効性を示したものであり、災害時における緊急対応をより効果的に実践するためには、まだ残された課題が多い。例えば、複数機関の対策シナリオの同時検討、得られた最適経路に対して移動経路の重複およびノード集中の分散化、最適経路の優先順位付け、ネットワークの制御方法の検討、さらに、実際の被災状況と事前学習データとの検索方法と事前学習データ外の状況下に対する対応方法等である。これらについては、今後の研究課題と考え、さらに研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 鳥取県地震防災調査研究報告書、鳥取県、平成 17 年 3 月、<http://www.pref.tottori.lg.jp/dd.aspx?menuid=31569>.
- 2) 川本篤志・白木渡・保田敬一・伊藤則夫・堂垣正博：社会基盤施設の維持管理におけるライブデザインの考え方、安全問題研究論文集、土木学会、Vol.1, pp. 73-78, 2006.11.
- 3) 川本篤志・白木渡・保田敬一・伊藤則夫・堂垣正博：社会資本維持管理におけるライブデザインデータベース (LDDDB) 構築の試み、第 6 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR2007)論文集、Vol.6, pp. 197-202, 2007.6.
- 4) 奥村晴彦：C 言語による最新アルゴリズム事典、科学技術評論社、平成 3 年 2 月。
- 5) 能島暢呂・杉戸真太・福岡淳也：想定地震による被災道路網の性能評価、文部省科学研究費特定領域研究「都市地下地震」第 4 回都市地下地震災害総合シンポジウム、1999.10、http://www.cive.gifu-u.ac.jp/~nojima/pdf/1999_tokuteisymposium.pdf.
- 6) 道路震災対策便覧（震災復旧編）、社団法人 日本道路協会、pp.90, 平成 14 年 4 月。
- 7) 道路震災対策便覧（震前対策編）平成 18 年度改訂版、社団法人 日本道路協会、pp45～46, 平成 18 年 9 月。

(2007 年 9 月 18 日受付)