

ライブ管理手法を用いた 震災時における道路ネットワークの安全性評価に関する一提案

A proposal on safety evaluation of road-network at earthquake disaster
based on Live Management methodology

福田厚*, 川本篤志**, 白木渡***, 伊藤則夫****, 保田敬一*****, 堂垣正博*****
Atsushi Fukuta, Atsushi kawamoto, Wataru Shiraki, Norio Itou, Keiichi Yasuda, Masahiro Dogaki

* 三菱 UFJ 不動産販売(株) 採用研修部 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町 2-13 神保町 MF ビル 3F)

** 博士(工学) (株)荒谷建設コンサルタント コンサルタント第 2 部メンテナンス技術課

(〒730-0847 広島市中区舟入南 4-14-15)

*** 工博 香川大学教授 危機管理研究センター (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

**** 博士(工学) (有)シー・エー・イー 代表取締役 (〒680-8064 鳥取市国府町分上 2-210)

***** 博士(工学) (株)ニュージェック 大阪本社 道路グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

***** 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 due to the performance-based design system, the countermeasures in an emergency when structures collapsed are required in addition ordinary maintenance service. The authors proposed new maintenance methodology named as the live management approach currently, to manage the maintenance of structures at the ultimate limit state as well as at the serviceability limit state. In this paper, based on this live management, the safety evaluation of road-networks for feasible routes from a fire station to two hospitals and one harbor in Akashi City which is a typical satellite town near Kobe City is examined immediately after earthquake using a simulation method. As the result, three safety road-network routes are selected as important routes at an emergency, and the effective emergency countermeasures are considered. The effectiveness of the live management approach is demonstrated by the example.

Key Words: live management approach, earthquake disaster countermeasures in emergence, urban highway network, live design database, business continuity plan

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, 業務継続計画

1. はじめに

わが国では、1950 年代に始まる高度経済成長期に社会基盤の整備が急速に進み、多くの道路網とその施設が建設された。その結果、現有の道路施設は、その総距離が約 65 万 km, 15m 以上の橋梁が 16 万橋にも達している。これらは、地域の市民生活や経済活動に欠かせないものとなっている。しかし、建設された道路施設は、材料劣化や疲労等により年々耐久性の低下が進行している。その結果、建設後 50 年を経過した橋梁が 10 年後に現在の約 4 倍、20 年後に 17 倍にも達し、健全な施設の運用が危惧されている。

さて、社会基盤施設を管理する技術者は、その使用性を担保するため、その補修、補強あるいは施設のリニュー

ールなどの日常管理を実施している。今日の財政状況を顧みると、スクラップ・アンド・ビルド的な従来の発想による維持管理は極めて困難になる。それゆえ、市民に安全な施設使用を長期にわたって保証するためにも、計画的かつ戦略的な維持管理、いわゆる、予防保全を含めた総合的な維持管理が求められている。

一方、社会基盤施設がおかれている環境を思えば、近年、地震、梅雨や台風シーズンの局地的な豪雨、土砂災害など、突発的な自然災害によって、社会基盤施設が甚大な被害を受け、多くの人命や莫大な資産が失われる事態が頻発している。また、今後 30 年以内に 50%以上の確率で東海、東南海、南海などの巨大地震の発生が予想されている。

このような災害に対し、被害を受ける可能性の高い自

治体では、人口が集中している都市部を中心に、災害発生時における緊急対応への計画が立案され、防災上の対応策が検討されている。しかし、これらの計画では、社会基盤施設が建設時の性能を保有しているとの前提条件のもとに、多くの場合、①緊急、②応急、③復旧・復興に対して、その管理対応が示されている。さらに、災害時に道路や橋梁などの社会基盤施設が被る状況が最悪となると思われる発生時期や時間帯にシナリオを設定し、これに対する緊急から復旧・復興までの対応が検討されている。ただし、最悪なただ一つの被災シナリオに対する①緊急から③復旧・復興までの対策が、それよりも小規模の災害に有効であるとは限らない。

このように、公共施設の通常の管理と防災計画上の公共施設の状態はリンクしておらず、いざという時、期待された構造性能を発揮することができず、不測の事態が発生する危険性を秘めている。そこで、筆者らは、既存の社会基盤施設における維持管理の進め方にライブデザインの考え方の適用を試みた。その持続可能な管理・運営と災害発生時のソフトな防災対応を融合させた新たな管理方法、すなわち、ライブ管理手法を提案し、その適用の可能性を種々検討してきた^{1)~3)}。

ここでは、既往の研究^{1)~3)}をさらに進め、設計時および維持管理計画時に想定し得なかった自然災害、とくに地震が都市域に発生した場合を想定し、

- ①地震発生後の橋梁、土工などを含む道路施設を対象に、ライブ管理手法に基づいた道路ネットワークの安全性評価
- ②①の結果を踏まえた緊急時における社会基盤施設のライブ管理のあり方
- ③事例研究によるライブ管理の有効性の検証

について明らかにする。具体的には、明石市をプロトモデルに、ある目的地までに移動可能な路線を道路ネットワーク上にリストアップし、道路ネットワークの安全性を評価する。つぎに、この結果をライブ管理システムの中核を担うデータベースに、地震発生直後の最適経路抽出のための基礎データとして格納する。さらに、事前のシミュレーションで得られた優先度の高い選択経路をも

とに道路ネットワークの構成リンクを分析し、事前対応による防災力向上とともに道路管理者間の垣根を越えた道路ネットワーク管理の必要性を示し、ライブ管理機能の有効性を検証する。

2. 地域防災計画上の道路ネットワークの位置付け

地域防災計画とは、「災害対策基本法」に基づいて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わる事項を取りまとめたものである。本研究で対象とする明石市は、神戸市の西に位置し、兵庫県南部地震では、人的被害（死者 26 名、負傷者 1,884 名）の他、住宅から公共施設に至るまで多くの被害を被った。そのため、防災に対する意識が高く、地震ならびに風水害による被害の想定のもと、明石市防災マップを作成するとともに、図-1 に示す体系に沿って、企業および行政の事業継続計画（Business Continuity Plan : BCP）に着目した地域防災計画を策定している。このうち、本研究で注目している初動対応や消防・救急の事業継続活動に必要な不可欠な地震発生直後の道路ネットワークの機能性の確保と評価については、「災害に強い都市基盤の整備」で括られており、どちらかといえば、都市基盤の要求性能の確保のための耐震対策を実施し、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機能を確保するという、主として従前から行われているハードな対策にウエートを置いている。

このような対策も予算の制約を受けながら実施される以上、最低限の耐震性確保に主眼をおいたものにならざるを得ない。それゆえ、実際に災害が発生した時に、緊急輸送路が完全に確保できている保証はない。

したがって、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、さまざまな被災パターンを想定しておく必要がある。そして、それぞれの被災パターンに対し、減災対策や事前教育などのハードとソフトの両面の対策を施し、いかなる事態にも即応できる十分な体制が欠かせない。

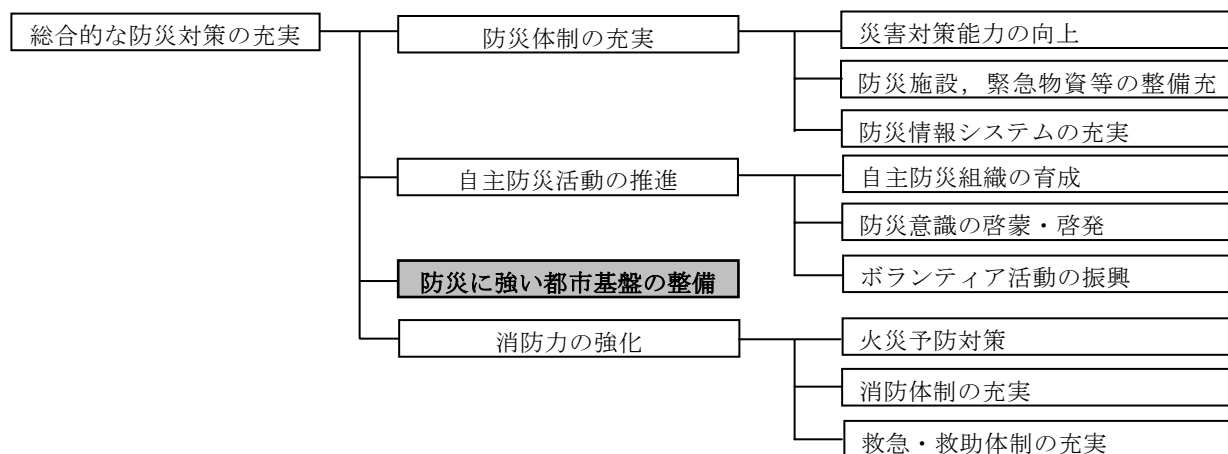


図-1 地域防災計画の体系⁴⁾

3. ライブ管理の概念

災害は一般に突然に生じ、被災状況は時々刻々と変化する。道路管理者には、このような事態に対し、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。現況に即した対応（ライブな対応）を可能にしようとするのが、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、①長期的な使用状態の確保を目的とした通常の維持管理、②ライブデザイン（事前対応）、③ライブデザイン（緊急～復旧・復興対応）の3つの管理パートからなる。これらの管理パートは、ライブ管理データベース²⁾（以下、LMDBと称する）を介して関連づけら

れ、各管理段階で発生するデータをその都度蓄積し、適宜、それを必要とする部署に伝達することによって、常時と非常時の効果的な管理を実現しようとするものである。すなわち、ライブ管理は、さまざまな被災パターンに対応した、効果的な地域防災計画の実践を可能にする管理理念である。

4. 道路ネットワークの安全性評価

地震発生直後、直ちに適切な初動対応が可能なことは、被害の軽減を図る上で重要なことである。そのためには、被害状況が迅速に把握できるモニタリング体制の整備や、得られた情報を最大限有効に利用するための仕組みが必

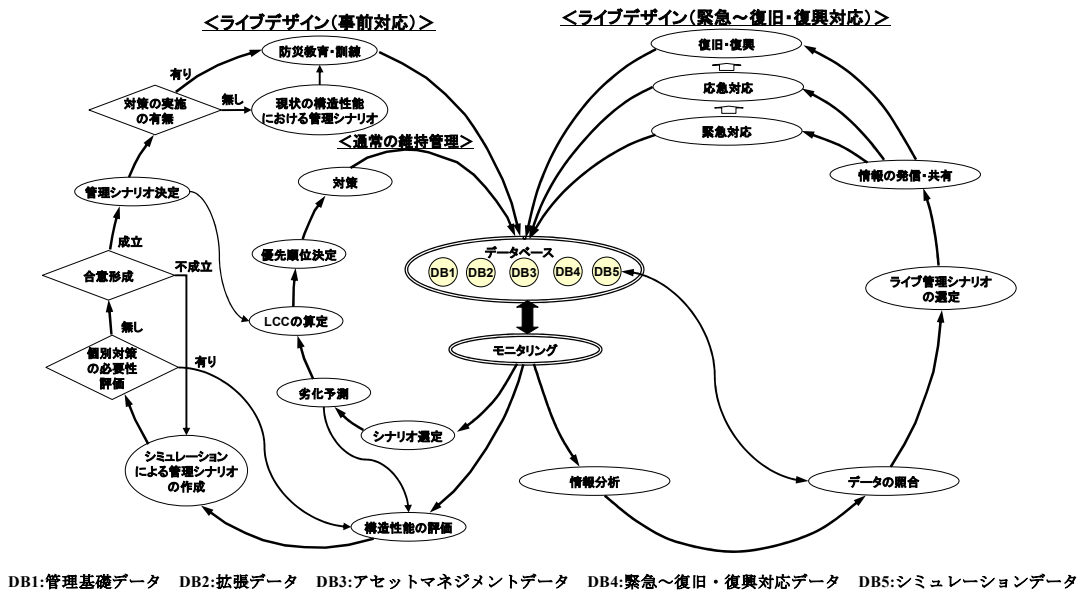


図-2 ライブ管理の手順³⁾

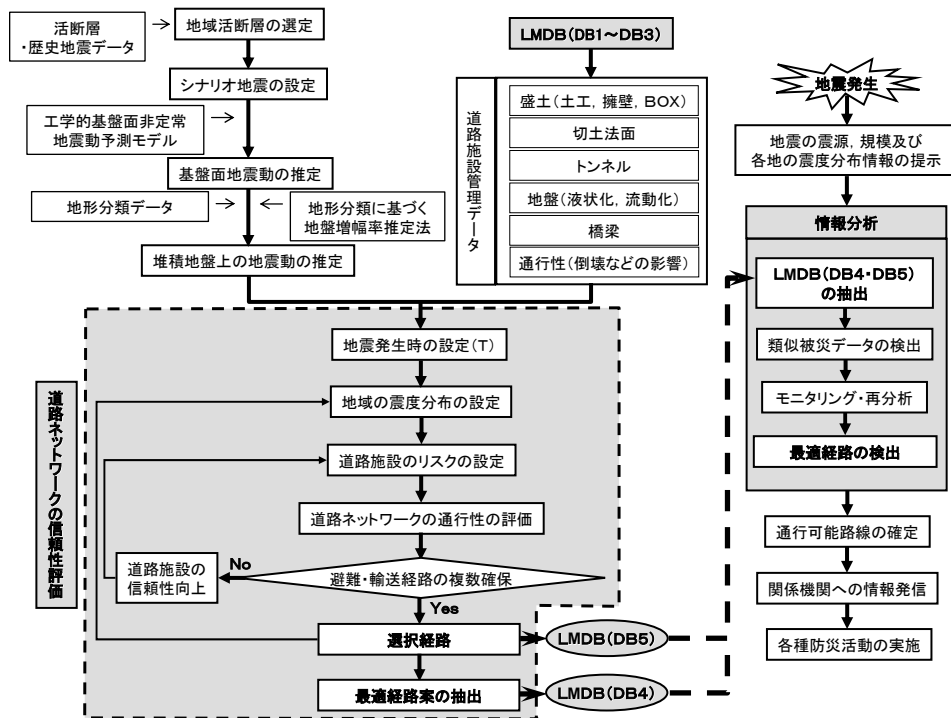


図-3 道路ネットワークの信頼性評価システム³⁾

要である。ここでは、道路ネットワークの安全性評価のための、ライブ管理に組み込まれ、突発的な地震発生によって想定されるさまざまな被災パターンを備えた道路ネットワークの信頼性評価システム（図-3）を考案した。本システムの解析フローは、つぎのとおりである。

- ① シミュレーションによって、道路ネットワークの被災パターンを事前に多数整えておき、被災パターンごとに最も短時間で輸送可能な最適経路を抽出するとともに、所要時間を予測する。
- ② 解析結果の最適経路は、その経路を使用する場合の対応シナリオとともに LMDB(DB5)に格納され、地震発生直後の緊急対応の基礎データとされる。
- ③ 地震発生直後には、モニタリング情報のもとに、被災状況や、気象庁などの発表震度分布情報からの計測震度とその被害を関連づけた指標（フラジリティ評価）から想定道路ネットワーク上の被害に類似したライブ管理シナリオを LMDB の中から抽出する。
- ④ 時々刻々のモニタリング情報によって、被害状況が明らかにされるので、より現状に適したライブ管理シナリオを LMDB の中から抽出する。

本システムでは、被災時の緊急性より最短時間での対応に着目し、最適経路の算定に最短経路問題の一手法であるダイクストラ法⁵⁾を適用する。ネットワークの最短経路は、つぎのように選定される。

- ① 始点と接続されている節点(1次節点)との距離を求める。
- ② 1次節点に接続しているすべての2次節点と始点との最短距離を求め、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、手順②を繰り返し、始点と終点の最小距離を求める。また、終点から1つ前通過した節点を逆に辿って、最短経路が決定される。

本解析では、ノード間の距離として、ノード間の実距離に道路施設管理データベースに格納されているデータからの推定道路施設リスクを考慮した見かけの距離を用いる。すなわち、道路ネットワークにおけるノード*i*と*j*との間のリスクを考慮した見かけの距離 L'_{ij} は、

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

である。ここに、 L_{ij} はノード*i*, *j*間の実距離(km), R^m_{ij} , R^{cs}_{ij} , R^{tu}_{ij} , R^{sr}_{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, 通行性のリスク(沿線建築物の倒壊, 放置車両等の影響など)を表している。これらのリスク係数は0.0以上の値で、当該リンクがまったく被害を被っていないときには0.0, 通行不能になるような損傷を受けたときには無限大とする。

本解析では、地震時の損傷が長期の通行不能状態をも

表-1 橋梁損傷マトリックス⁶⁾

損傷レベル 震度	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

As:倒壊, A:損傷が大, B:部分的な損傷, C:軽微な損傷, D:損傷なし

たらず橋梁被害と、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て検討する。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規模の地震が起こったとしても、実際はその震度に対応した被害が一樣に起こるのではなく、被害が局所的になることも考えられる。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難しいため、ここでは明石市のハザードマップを参考に、対象地域に震度6弱の地震が一樣に起こるとした。

本提案のライブ管理では、既存構造物の管理状態を踏まえた構造成能評価によって構造物の状態を指標化し、その指標のもとに構造物の性能を管理することを考えた。しかし、構造物の経年劣化と構造成能の関係は、現在、さまざまな研究機関で検討されている途上にある。現時点では、劣化損傷解析のもとに構造成能を定量的に正しく評価するまでに至っていない。ここでは、橋梁被害によるリスク係数 R^{br}_{ij} を、能島ら⁶⁾の兵庫県南部地震の橋脚被災データをもとにした表-1に示す橋梁のフラジリティ評価を利用し求める。ここに、As~Dは橋脚の被災度区分⁷⁾である。地震発生後の余震に対し、支障なく安全に救急活動ができる橋梁の損傷レベルとして、軽微な損傷レベルを定義している被災度C, Dとした。その結果、予測震度6弱で損傷度B以上の被害を示すAs~Bの損傷発生確率が8.2%で通行不能になるとし、リスク係数 R^{br}_{ij} を無限大とした。それ以外の場合は、通行に支障がないとみなし、 $R^{br}_{ij}=0.0$ とした。

また、通行性リスク R^{pa}_{ij} 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⁸⁾をもとに、対象地域の交通量を勘案して設定した。すなわち、リンクごとに被害の発生確率を50%とし、被害ありの場合で24時間交通量が1万台を超える路線では $R^{pa}_{ij}=3.0$, 24時間交通量が1万台以下の路線では $R^{pa}_{ij}=1.5$, 被害なしの場合には $R^{pa}_{ij}=0.0$ とした。

5. 道路ネットワークにおけるライブ管理とその活用例

道路ネットワークにおけるライブ管理の実例として、明石市中心市街地をモデルにした。本モデルに対する検討結果から、ライブ管理の有効性を示す。また、事前検討結果の活用方法について、災害時の観点から、維持管理の必要性について述べる。

5.1 明石市中心市街地モデルの概要

明石市の中心市街地には、高架構造で整備されている JR、山陽電鉄、および、一般国道 2 号が東西にほぼ平行に走っている。また、一般国道 28 号がフェリー乗り場を起点に東に伸び、一般国道 2 号と交差している。その他の道路は、一般国道 2 号および 28 号から南北にアクセスできるように整備されている。図 - 4 は、明石市中心市街地の道路網のうち、道路幅員が 5.5m 以上の道路を抽出した道路ネットワーク図である。

5.2 解析シナリオの設定と解析内容

本解析では、地震発生直後の医療機関の緊急対応を取り扱った。すなわち、①対象地域内の被災者への対応、②病院の機能喪失に伴う入院患者の後方医療機関への搬送対応のうち、医療機関の危機的な状態②に対するシナリオを考える。そこで、消防施設（ノード 8）から病院 A（ノード 15）、病院 B（ノード 26）への移動、さらに、病院 A（ノード 15）、病院 B（ノード 26）から漁港（ノード 35）、ヘリポート（ノード 48）への移動に関わる最適経路を検討する。また、本活動が確実に実行するために必要な道路ネットワークの安全性の確保に対し、災害時の視点から維持管理の必要性を検討する。

5.3 道路ネットワークの安全性評価の活用

本解析では、数多くの経路を抽出するため、シミュレーションの回数を 300 回とした。表 - 2 に各検討ケースのシミュレーションによって得られた抽出経路の数を示す。これらの抽出経路は、ライブ管理システムの LDDDB（DB4）に格納される。地震発生直後には、LDDDB（DB4）の中から事前に検討したデータが抽出され、実被害情報をもとに選択経路の移動時間がリアルタイムに分析され、最適な移動経路と対応シナリオが抽出される。

また、本シミュレーションでは、同一経路でも移動時間にばらつきがあり、多くの被災状態をシミュレーションしている。このうち、ここでは予想移動平均時間が短い経路が移動時間のばらつきが小さく、移動路線上重要な路線と考え、上位 3 経路を表 - 3 のように得た。

表 - 3 の上位 3 経路の移動経路では、いずれも橋梁が存在するリンクを含んでおり、緊急時対応に橋梁の被災状況が通行の可否を左右する重要な要素となる。そこで、以下に橋梁が存在するリンクを抽出するとともにその事前対応について整理する。

- ①消防署からの緊急出動に影響：8-1, 2-1, 8-6
 - … 緊急時の初動対応上、最も重要で、ハード対策を最優先に構造的向上を図る必要がある。
- ②南北の移動に影響：24-23, 28-27, 27-40
 - … JR と山陽電鉄に交差し、明石市中心市街地と北

表 - 2 各検討経路による抽出経路数

検討ケース	移動経路	抽出数	移動経路	抽出数
1	8~15	6 経路	15~35	45 経路
2	8~15	6 経路	15~48	99 経路
3	8~26	46 経路	26~35	28 経路
4	8~26	46 経路	26~48	15 経路

表 - 3 各移動経路における選択経路

移動経路	優先度	距離 (km)	移動時間(min)		通過ノード
			標準	予想平均	
8 15	1	1.1	3.3	5.2	15-16-4-5-6-8
	2	0.9	2.8	5.3	15-14-5-6-8
	3	1.3	3.8	5.8	15-16-4-3-2-1-8
15 35	1	2.2	6.6	7.8	35-34-33-32-31-22-21-23-19-20-16-15
	2	2.0	5.9	8.1	35-34-36-32-31-22-21-23-19-20-16-15
	3	1.8	5.4	8.2	35-34-36-32-31-22-21-20-16-15
15 48	1	3.3	10.0	10.4	48-47-44-43-41-38-31-30-29-28-23-21-20-16-15
	2	3.4	10.3	10.8	48-47-45-44-43-41-38-39-40-28-29-30-21-23-24-18-17-16-15
	3	3.1	9.9	10.8	48-47-44-43-41-38-39-29-30-21-20-2-3-4-16-15
8 26	1	2.6	7.8	9.6	26-25-27-40-39-29-30-21-20-2-1-8
	2	3.3	10.0	10.7	26-25-27-40-28-23-21-20-16-15-14-5-6-8
	3	3.0	8.9	10.9	26-25-24-23-19-20-16-15-14-5-6-8
26 35	1	2.8	8.3	8.5	35-34-36-32-31-22-2-20-19-23-24-25-26
	2	2.3	6.8	8.7	35-34-36-32-31-30-29-39-40-28-27-25-26
	3	2.5	7.6	8.8	35-34-33-32-31-38-39-29-28-27-25-26
26 48	1	2.9	8.8	14	48-47-45-44-43-41-38-39-40-28-27-25-26
	2	3.3	10.0	14.3	48-47-44-43-41-38-31-22-21-23-24-25-26
	3	3.1	9.4	14.6	48-47-45-46-39-40-28-27-25-26

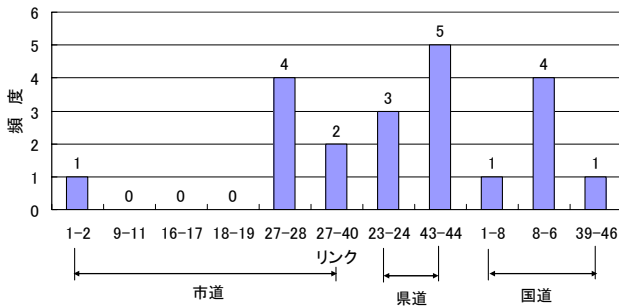


図-5 橋梁が存在するリンクの使用頻度
部の市街地を結ぶ重要なリンクで、最低でも2リンク（リダンダンシーの向上）の経路を確保できる対応が必要である。

③ヘリポート，東方移動に影響：46-39，44-43

…ヘリポートおよび東方への重要な移動経路であるため、ハード対策が必要である。また、通行不能の状態を想定し、海上移送の手段も検討を要する。

また、これらのリンクの使用頻度と管理区分を整理すれば、図-5を得る。この図から明らかなように、国道、県道、市道を問わず、それらを跨った移動が選択されている。このことは、前述の事前対応のように、管理区分の枠を超えた道路ネットワークの安全性確保と、管理者相互の情報交換、連携強化の必要性を示唆している。これは、本提案のライブデザインの考え方に基づくライブ管理によって、管理域を越えて、さまざまな災害を予想したシミュレーションにより対応策を事前に考え、データの集中管理と共有で、想定外の災害が起こった場合でも、迅速な人命救助、その他の必要とされる対応がライブ（すなわち、ライブ対応）に行えることを示している。

6. おわりに

本研究では、設計時および維持管理計画時に想定外であった事態、すなわち、大規模な災害が都市域に発生した場合を考え、ライブ管理の考え方に基づいて、地震発生直後の都市域における道路ネットワークの信頼性を評

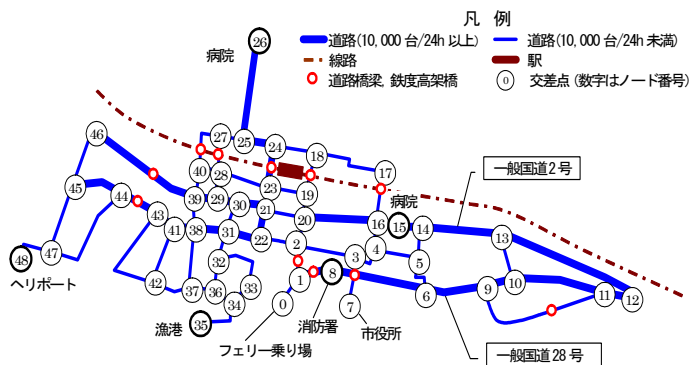


図-4 道路ネットワーク図

価した。そして、緊急時における社会基盤施設のライブ管理のあ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の方法を示し、これを明石市中心街地の道路ネットワークに適用し、地震発生直後の緊急対応のあり方を検討した。その結果、本法によって、多くの被災パターンおよび事前対応策を LMDB 内に格納し、実際の災害時には、LMDM より類似被災データを抽出することにより、迅速で効率的な対応（ライブ対応）が可能となることを示した。

本研究では、緊急時における一対策事例によって提案したライブ管理手法の有効性を示した。災害時における緊急対応を効果的に実践するには、①複数機関の対策シナリオの同時検討、②得られた最適経路に対する移動経路の重複およびノード集中の分散化、③最適経路の優先順位づけとネットワークの制御方法の検討、④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などの課題の検討が必要である。これらについては、今後の研究課題とし、さらに研究を進めていく予定である。

参考文献

- 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.
- 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.
- 川本篤志・白木渡・保田敬一・伊藤則夫・堂垣正博：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，構造工学論文集，土木学会，Vol.54A，pp.152-161，2008.3.
- 明石市防災会議：明石市防災計画，第1編，総則，第1章 目的等，P.2，平成18年.
- 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.
- 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.a-jp/~nojima/pd-f/1999_tokuteisympo.pdf.
- 日本道路協会編：道路震災対策便覧（震災復旧編），P.90，平成14年4月.
- 日本道路協会編：道路震災対策便覧（震前対策編）平成18年度改訂版，pp.45-46，平成18年9月.

(2008年8月22日受付)