

# 大都市における既設道路橋の地震防災上の重要度の評価手法

佐藤次郎<sup>1</sup>・篠崎之雄<sup>2</sup>・佐伯光昭<sup>3</sup>・磯山龍二<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京都建設局参事(東京都道路公社建設部長)(〒163-01 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

<sup>2</sup>正会員 東京都建設局 第五建設事務所工事課 係長

<sup>3</sup>正会員 工博 日本技術開発(株)地震防災部部长

<sup>4</sup>正会員 工博 日本技術開発(株)地震防災部次長

大都市の地域防災計画を策定する上で道路網の震後機能を維持することは、最も重要な課題である。中でも、道路橋は一旦被害を受けた場合の影響が大きく、その耐震性の確保は極めて重要である。一方、地震防災対策計画を合理的に策定するためには、対策の優先順位を定める必要がある。本研究は、既設橋の地震防災対策事業実施の優先順位を合理的に設定するため、橋の地震防災上の重要度の評価手法を実務的な観点から提案するものである。道路の路線・区間としての重要度と橋の被災時の影響度の2種類の因子の組み合わせにより、橋の防災上の重要度を新たに定義・分類した。この提案した手法を東京都の道路網に適用し、実用性のあることを示した。

**Key Words** : *criticality, priority, retrofitting, emergency response, road network, Tokyo Metropolitan Area*

## 1. ま え が き

わが国の大都市は臨海部の沖積低地に位置し、比較的川幅の広い河口部に発展したところが多い。このため、大都市には多くの橋が存在し、それらは過酷な使用環境のもとで本来果たすべき交通機能に加えてライフラインの占用空間として社会・経済活動にきわめて重要な役割を果たしている。そして、これらの橋は時代の変遷に伴って順次建設され、様々な年代の整備水準の異なるものが混在している状況にある。東京都を例にとればその建設時期は、関東大地震後の復興期、第二次大戦後の復興期、高度経済成長期の3つに大別される。

このような橋の重要性を踏まえて、過去数回にわたって全国的な道路橋の震災点検<sup>1)</sup>が実施されてきた。この結果等に基づき、国や地方自治体では防災業務計画や地域防災計画の中で橋の対策計画を位置付け、基本的には耐震性の低い橋に対して落橋等の致命的な崩壊の危険性への対応を主とした対策を施すという考え方に基づいて、落橋防止装置の設置や液状化対策などが施されてきた。

しかしながら、複雑かつ広範な街路網に多種多様な橋をかかえる大都市では、地震により橋が被害を受けた場合の地域社会、地域経済に与える影響が大きいことから、このような橋のみを単独にみて、かつ画一的な整備水準を求める計画論の適用はなじまない。災害時の都市を構

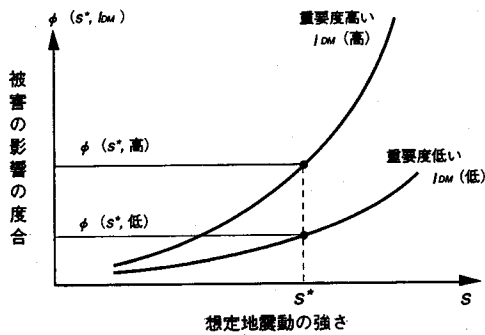
成する街路網の使われ方に主眼を置いて、道路の線、街路を構成する面としての特性を考慮した街路網における個々の橋の重要度を評価し、これに基づく優先順位を付し、計画的かつ段階的に対応していくことがより合理的である。

供用中の橋の耐震補強計画における重要度の概念はアメリカ合衆国に見られる<sup>2)~4)</sup>。これらは基本的に州内や州間を結ぶ高速道路の橋に対して提案されたものでBuckle<sup>4)</sup>に代表される考え方は、あくまで単一のあるいはマクロな高速道路網に対して適用されるものであり、わが国の大都市の街路の橋にそのまま用いるのは適切ではない。先に述べたわが国の大都市の橋の特性に根ざした新たな重要度の評価方法を導入する必要がある。

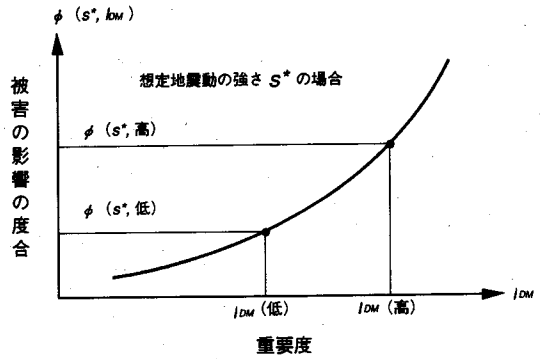
本研究ではこのような観点から、大都市における供用中の多数の橋の震前ならびに震後対策事業の対象となる橋の抽出と優先順位の設定に反映させるため、上述した重要度を新たに「橋の地震防災上の重要度」として定義し、その評価手法を実務的な観点から提案したものである。さらに、この手法を東京都建設局管理の橋に適用しその実用性を検証した。

## 2. 橋の耐震対策計画の考え方と重要度の意味

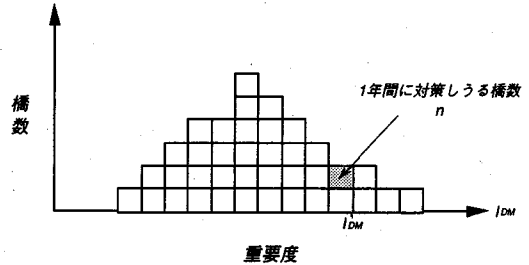
耐震対策計画を立案するためには、橋の重要度と耐震性の2つの要素を考慮する必要がある。一般には両者を



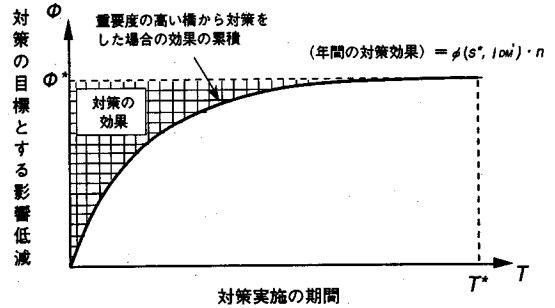
図一 想定地震動の強さ、重要度と被害影響の度合いの関係



(a) 重要度と影響の度合い



(b) 重要度の分布と年間に対策しうる橋数



(c) 目標年数に対する対策効果の累積

図二 想定地震動  $s^*$  の場合の重要度に基づく対策達成および効果の概念

勘案して対策の優先順位や対策のレベルを決めていくことになるが、この論文では重要度にしぼって、その意味や対策計画を立てる際の有用性を明らかにする。

今、ある橋  $i$  が被災した場合の影響の度合いを  $\phi_i$  とすると、 $\phi_i$  は地震動の強さ  $s$ 、橋の耐震性（ないしは耐震脆弱性） $v$  およびその橋の重要度  $I_{DM}$  によって決定される。すなわち、 $\phi_i(s, v, I_{DM})$  と表わされる。ただし、本論の以下では簡単のため、橋の耐震性  $v$  は一定と考え、 $\phi_i(s, I_{DM})$  と表記する（図一）。影響の度合い  $\phi_i$  は、その橋が被災することによる直接的な影響ばかりでなく、道路網あるいは様々な都市機能への影響の度合いをも含むものである。一般に影響の度合い  $\phi_i(s, I_{DM})$  は、地震動  $s$  が強いほど、その橋の重要度  $I_{DM}$  が高いほど大きい。

対策計画を立てる際には想定する地震を設定する。この場合の地震動の強さを  $s^*$  とすると、図一から重要度  $I_{DM}$  と影響の度合い  $\phi_i$  の関係は図二 (a) のようになる。各々の橋の重要度は 3、で述べる方法により評価されるが、ある都市における橋の重要度の頻度分布はたとえば図二 (b) のようになる。地震動強さの想定値  $s^*$  に対して、都市全体の影響の度合いは、たとえば、式 (1) で表され、耐震対策計画は、この値  $\phi$  と対策の目標値  $\phi^*$  の差 ( $\phi - \phi^*$ ) を可能なかぎり低減、ないしは理想的にはゼロにすることである。

$$\phi = \sum \phi_i(s^*, I_{DM}) \quad (1)$$

ここで ( $\phi - \phi^*$ ) をどのように低減させていくかが問題となる。ひとつは震前対策（予防対策）と震後対策（応急対策等）を適切に組み合わせることで目標を達成することである。両者は相互に補完する関係にあり、震前対策が遅れるようであれば、その分、震後対策を充実させていく。もう一つは、対策の優先順位を考慮して対策の効果を早期に高めていく考え方である。この考え方は震前対策、震後対策および両者の組み合わせにも適用しうるが、ここでは簡単のため震前対策を例にとって説明する。

対策計画の目標は先の ( $\phi - \phi^*$ ) をある目標年数  $T^*$

で達成することであるが、震前対策には膨大な費用と時間がかかるため、必然的に制約条件が付される。すなわち、図二 (b) に示すように 1 年間にある一定数の橋しか対策を施せない。もちろん、対策は、たとえ重要度が低くとも全ての橋に対して施す必要がある。このような制約条件をつけると、 $T^*$  年間の間に、毎年どの橋を選んで対策を進めていけば総合的にみて効果がより大きくなるかという問題になる。年間における対策の効果は、ある重要度  $I_{DM}$  の橋を年間  $n$  橋対策するとすると少なくとも  $n \cdot \phi(s^*, I_{DM})$  と表すことが出来る（図二 (b)、(c) 参照）。この時、地震の発生確率が  $T^*$  年間で一定という条件をつけると、被害の影響の度合いの大きい橋、すなわち重要度の高い橋から対策を施していくのがよい

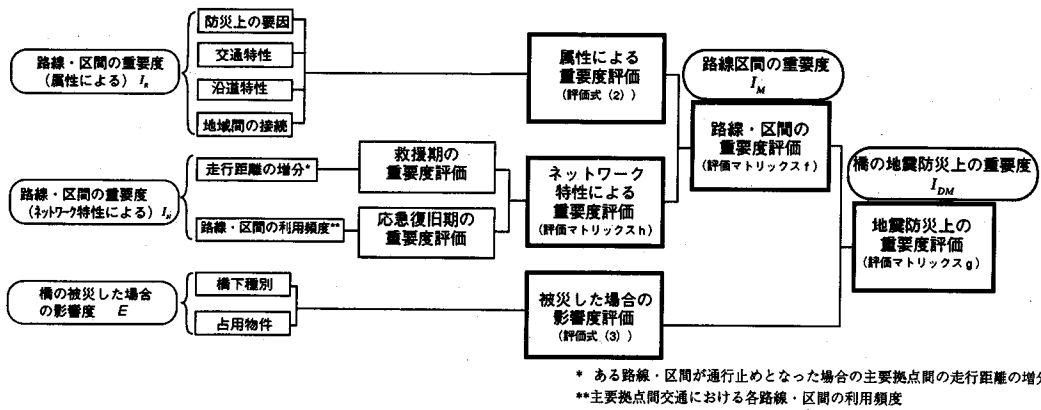


図-3 大都市における道路橋の地震防災上の重要度の評価・分類の手順

表-1 橋の地震防災上の重要度  $I_{DM}$  の評価マトリックス  $g$

|                |        | 路線・区間の重要度 $I_M$ |    |    |
|----------------|--------|-----------------|----|----|
|                |        | 最重要             | 重要 | 一般 |
| 被災した場合の影響度 $E$ | 極めて大きい | 橋の防災上の重要度 最重要   |    |    |
|                | 大きい    |                 | 重要 |    |
|                | 一般     |                 |    | 一般 |

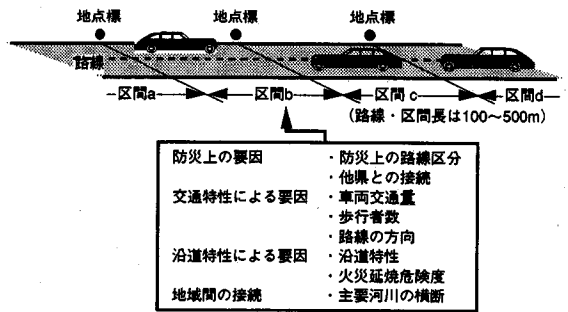


図-4 路線・区間と評価属性

ことは明らかである。たとえば、図-2 (a), (b) で重要度の高い方の橋から対策していくと、対策効果の年ごとの累積は図-2 (c) に示すようになる。どのように対策を進めていくかの方法の良否はこの累積曲線の補面積で評価することができ、重要度に応じた対策の実施が合理的であることが理解できよう。

### 3. 橋の重要度評価モデル

橋の地震防災上の重要度の評価に際して、2つの指標を考える。1つは、道路ネットワーク全体から橋梁の位置する路線・区間を見た場合の重要度であり、もう1つは橋が被災した場合の機能低下・周辺施設への被害波及・利用者の人命に与える影響などの大きさを総称した影響度である。以下では、橋の地震防災上の重要度を  $I_{DM}$ 、橋の位置する路線・区間の重要度を  $I_M$ 、橋が被災した場合の影響度を  $E$  とする。2つの指標のうち  $I_M$  は、防災上の要因・交通特性・沿道特性・河川の横断状況などの要因属性から評価した相対的な重要度  $I_R$  と交通の利用頻度などのネットワーク特性に基づく重要度  $I_N$  の2つの指標の組み合わせによって評価する。影響度  $E$  は対象となる橋の桁下の利用状況および添架してある占

用物件の状況の2つの要因から評価する。

最終的に、橋の地震防災上の重要度  $I_{DM}$  は、表-1 に示すように指標  $I_M$  と  $E$  を、それぞれ3段階に区分した評価マトリックス  $g$  から決定する。

図-3 に橋の地震防災上の重要度  $I_{DM}$  の評価のフローチャートを示す。

#### (1) 路線・区間ごとの重要度 $I_M$ の評価

路線・区間の総合的な重要度評価のために、各種の属性から評価した重要度  $I_R$  と交通ネットワーク特性に基づく重要度  $I_N$  の両面から評価する。

##### 属性に基づく路線・区間の重要度 $I_R$

図-4 に示すように対象とする路線に100~500 mの間隔で地点標を設け、これらの地点標間に防災上の路線区分・交通特性に関する要因・沿道特性に関する要因および河川の横断状況等の要因属性を付与する。これらの属性  $j$  を評点  $X_j$  で表わすとともに、それらの各属性に対して重み係数  $W_j$  を乗じたものの総和を求め、その大小により重要度の評価を行う。従って、ある路線・区間の重要度の点数は式(2)で表わされる。

$$I_R = \sum_{j=1}^n W_j \cdot X_j \quad (2)$$

ここに、

$I_R$ : 対象とする路線・区間の重要度の点数

$W_j$ : 属性  $j$  の重み係数

$X_j$ : 属性  $j$  に対する評点

この  $I_R$  の値が大きいほど重要度は高いものとし、すべての対象区間の評点のヒストグラムから相対的な重要度を最重要、重要、一般に区分する。

図-4 に示した4つの要因についての評価の考え方は次のとおりである。

防災上の要因としては、災害対策基本法に従って各自治体が定めた防災上の路線区分と他県との接続状況を考える。東京都を例にとると<sup>5)</sup>まず、路線区分では住民および道路通行者の避難や救援活動に使用される避難道路の評点を最も高くし、緊急輸送路ネットワーク、緊急啓閉路線等をこれに次ぐ重要な路線とする。また、他県と接続している路線・区間や港湾地域の防災埠頭と連結する路線についても援助活動に重要な機能を果たすため、評点を高くすることが考えられる。

交通特性による要因としては、車輛交通量、歩行者数および路線の方向を考慮する。車輛交通量は、大都市の交通特性を端的に表わす平日12時間の上下線合計の大型車輛数とする。格子状の道路網と異なり、東京都のような放射状線と環状線で構成された道路網では、放射状線の間移動には環状線を経由せざるを得ない。このため、路線の方向については、放射状線よりも環状線の評点を高く設定する。

沿道特性に関する要因としては、土地利用状況と火災延焼危険度を考慮する。土地利用では、地震時の被害の影響が大きい繁華街やオフィス街などの評点を高くする。火災延焼危険度については、地域防災計画の一環として別途実施されている地域危険度の評価に用いられる火災危険度<sup>6)</sup>をもとに、評点を設定する。

河川の横断は、防災上の路線区分と並ぶ最も重要性の高い要因である。都市域において、主要な河川に架かる橋の破損は地域の分断を引き起こし、避難・救援・復旧活動にも支障をきたす。このような状況判断と既往の研究成果<sup>7)</sup>を踏えて、川幅50m以上の河川を横断する路線・区間をきわめて重要な区間として評点を与える。

#### 路線・区間のネットワーク特性に基づく重要度 $I_N$

ネットワーク特性に基づく重要度は、発災直後、救援期(震後概ね2~3日後程度)、応急復旧期(震後1週間程度)などの段階で評価すべきであろう。また、その際に考慮すべき要因は、比較的マクロな道路網を対象とした道路の利用状況、移動方向・量、交通の特徴等が考えられる。

まず、震後の段階のうち発災直後については、大都市の道路密度が高いため、橋の被害のみで孤立地区が現れることは考えにくい。さらに、避難行動が主で個々の移

表-2 ネットワーク特性に基づく重要度  $I_N$  の評価マトリックス  $h$

|                     |     | 応急復旧期—路線・区間の利用頻度       |    |     |
|---------------------|-----|------------------------|----|-----|
|                     |     | 大きい                    | 中位 | 小さい |
| 救援期—<br>走行距離の<br>増分 | 大きい | ネットワーク特性に基づく重要度<br>最重要 |    |     |
|                     | 中位  |                        | 重要 |     |
|                     | 小さい |                        |    | 一般  |

動のトリップ長が短いため、ネットワークとして道路の機能を評価することは適切ではない。したがって、本論文ではネットワーク特性に基づく重要度の評価は、救援期と応急復旧期を対象とする。

各段階における評価の尺度としては、救援期には任意の交通が所定の時間内に達成できること(確実性)が重要であるため、各路線・区間が任意の最短交通の走行時間に寄与する貢献度を評価するのが望ましい。しかしながら、各地点間の交通の許容所要時間を設定することが難しいため、本研究では着目する路線・区間が利用できないとした場合の各主要拠点間の走行距離の増分(主要拠点間の増分の総和)を求め、この相対的な比較によって重要度を3段階に評価する。一方、応急復旧期においては上記の確実性に加えて、大量の物資の輸送が行えること(確実性+大量性)が重要であるから、主要拠点間交通における各路線・区間の利用頻度を評価する。ただし、各地点間の震後の交通量を把握することが困難なため、主要拠点間において単位の交通を仮定し、これらが最短経路を通過する場合の各路線・区間の通過回数(利用頻度)をカウントし、その利用頻度の相対比較によって重要度を3段階に評価する。より具体的には、どの路線区間も被災していない健全なネットワークについて、全ての主要拠点間に単位の交通を割りあて(最短経路)、その交通の束の太い路線・区間がより重要と考える。

上記の2つの評価手法に従って、各路線・区間の重要度を評価し、最終的に表-2に示す評価マトリックス  $h$  からネットワーク特性に基づく重要度  $I_N$  を決定する。

#### 路線・区間の重要度 $I_M$

路線・区間の属性から求めた重要度  $I_R$  とネットワーク特性から得られた重要度  $I_N$  を、表-3の評価マトリックス  $f$  に当てはめ、路線・区間の総合的重要度  $I_M$  を判定する。結果は、最重要、重要、一般の3段階に区分するが、表-3(1つの例)の場合には、 $I_M$ 、 $I_R$  の各々の最重要に重きをおいた評価としている。

表—3 路線・区間の重要度  $I_M$  の評価マトリックス  $f$

|                 |     | ネットワーク特性に基づく重要度 $I_M$ |    |    |
|-----------------|-----|-----------------------|----|----|
|                 |     | 最重要                   | 重要 | 一般 |
| 属性に基づく重要度 $I_R$ | 最重要 | 橋の地震防災上の重要度<br>最重要    |    |    |
|                 | 重要  |                       | 重要 |    |
|                 | 一般  |                       |    | 一般 |

(2) 橋の被災した場合の影響度  $E$

落橋もしくは下部工に大規模な変状を生じるなどの被害を受けた場合の波及効果の大小により、その影響の程度を評価する。考慮する要因は桁下の利用状況（橋下種別）、橋に添架されている占用物件の種類、数、その重要性などである。

橋下種別では被害波及の大きさから、橋下が鉄道・道路の場合に着目する。橋下の鉄道は、複線の旅客線、単線の旅客線、貨物線の順番で影響度の評点が高くなるようにする。一方、橋下種別が道路の場合、被災した場合の影響度は道路の交通量によって評価すべきであるが、ここでは前述した路線・区間の重要度を代替的に用いて評点を設定する。

占用（添架）物件については、水道・電気・電気通信・ガス等の種類別の評価は行わず、各々の幹線について複数添架・単数添架など占用状況の違いによる評点付けを行った。

上記の2つの要因の評点を、個々の橋ごとに決定し、それらの評点に対して重みの係数を乗じたものの総和により影響の大小を表わす。したがって、ある橋の影響度の点数  $E$  は次式で表わされる。

$$E = \sum_{k=1}^m \delta_k \cdot Y_k \quad (3)$$

ここに、

$E$ : 対象とする橋の被災した場合の影響度の点数

$\delta_k$ : 要因  $k$  の重みの係数

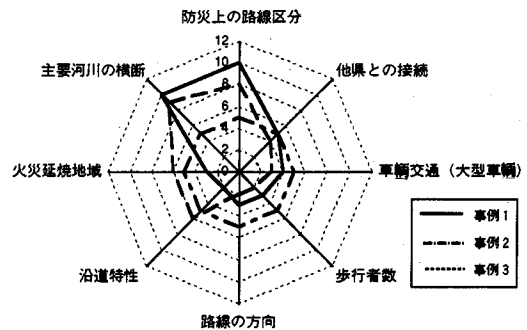
$Y_k$ : 要因  $k$  の評点

この点数  $E$  が大きいほど、橋の被災した場合の影響が大きいことを意味する。対象橋梁のすべての影響度点数のヒストグラムから、影響の程度を極めて大きい、大きい、一般の3段階に区分する。

ここで提案した重要度の評価モデルを適用する場合、路線・区間の重要度  $I_M$  および橋の被災した場合の影響度  $E$  の算出に必要な各種要因の評点と重みの係数の値によって評価の結果が大きく変わる。このため、こ

表—4 事例解析で用いた要因の評点・重みの一覧表（路線・区間の重要度  $I_R$ ）

| 要因      |                     | 評点 $X_i$                              | 重み $W_j$ (事例) |    |    |   |  |
|---------|---------------------|---------------------------------------|---------------|----|----|---|--|
|         |                     |                                       | 1             | 2  | 3  |   |  |
| 防災上の要因  | 防災上の路線区分            | 避難道路                                  | 3             | 10 | 5  | 8 |  |
|         |                     | 緊急輸送路                                 | 3             |    |    |   |  |
|         |                     | 緊急啓閉路線                                | 2             |    |    |   |  |
|         |                     | その他                                   | 1             |    |    |   |  |
| 他県との接続  | 埼玉・千葉<br>神奈川・山梨     | 2                                     | 5             | 5  | 4  |   |  |
|         |                     |                                       |               |    |    |   |  |
| 交通特性    | 車輛交通量 (大型車輛)        | 4,000台以上                              | 3             | 4  | 5  | 3 |  |
|         |                     | 1,300台以上4,000台未満                      | 2             |    |    |   |  |
|         |                     | 1,300人未満                              | 1             |    |    |   |  |
|         | 歩行者数                | 3,000人以上                              | 3             | 3  | 5  | 2 |  |
|         |                     | 1,500人以上3,000人未満                      | 2             |    |    |   |  |
|         |                     | 1,500人未満                              | 1             |    |    |   |  |
|         | 路線の方向               | 主要な環状線<br>主要な放射状線<br>その他              | 3<br>1<br>0   | 3  | 5  | 2 |  |
|         |                     |                                       |               |    |    |   |  |
|         |                     |                                       |               |    |    |   |  |
| 沿道特性    | 沿道特性                | 商店・オフィス街・繁華街<br>低層・中高層<br>田圃・山岳・河川・堤防 | 3<br>2<br>1   | 2  | 5  | 6 |  |
|         |                     |                                       |               |    |    |   |  |
|         |                     |                                       |               |    |    |   |  |
|         | 火災延焼危険度             | ランク5<br>ランク3, 4<br>ランク1, 2            | 3<br>2<br>1   | 3  | 5  | 6 |  |
|         |                     |                                       |               |    |    |   |  |
|         |                     |                                       |               |    |    |   |  |
| 主要河川の横断 | 主要河川を横断する区間<br>上記以外 | 3<br>0                                | 10            | 5  | 9  |   |  |
|         |                     |                                       |               |    |    |   |  |
| 合計      |                     |                                       | 40            | 40 | 40 |   |  |



図—5 各事例で用いた重み ( $W_i$ ) のレーダーチャート

これらの係数、評点の値に複数のパターンを用意し、それぞれのケースについて、 $I_M$  と  $E$  を算出し、防災上の重要度の分類を試みる。耐震保全対策の計画策定にあたっては、日常管理を担当している熟練技術者の判断に委ねて、最も妥当と判断されるケースの値を採用する。

4. 適用例

提案した手法の有効性を検討するために、東京都建設局の管理する橋梁のうち、23区および多摩地区に位置する約1,000橋を対象として事例解析を行った。

(1) 属性に基づく路線・区間の重要度  $I_R$  の評価

事例解析で用いた属性の評点と重み係数の値を表—4に示す（各々式(2)の  $X_i$ ,  $W_j$ ）。

この中で、道路の防災上の路線区分は、前述の趣旨に

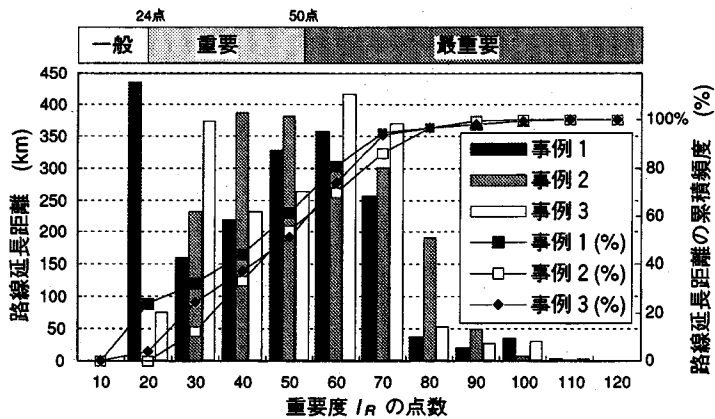


図-6 属性に基づく路線・区間の重要度  $I_R$  の点数分布

従って避難道路・緊急輸送路ネットワーク・緊急啓開路線の3種類とし<sup>5)</sup>、各路線・区間の評点を決定した。他県との接続については、関東一円に大きな被害をもたらす大規模地震を想定したために、他県と接続する各路線・区間の評点を一律とした。東京湾の防災埠頭と連結する路線についても、この例では考慮しなかった。

交通特性の大型車輦交通量と歩行者数に関する評点は、東京都建設局が所有する平日12時間の上下線合計のデータ<sup>8)</sup>をもとに決定した。沿道特性に係わる要因については、各路線・区間の上下線の沿道状況を東京都道路構成調査<sup>9)</sup>から抜き出し、表-4に示す3つに区分した。火災延焼危険度は、東京都地域危険度<sup>5)</sup>に示された5段階のランクを3つに区分して評点を与えた。河川による隣接地域間の接続性については、川幅50m以上の河川に架かる橋をきわめて重要な路線・区間とし、江戸川、旧江戸川、中川、新中川、旧中川、荒川、新河岸川、隅田川、多摩川(羽村取水堰、羽村大橋より下流)、浅川(八王子荻原橋より下流)を対象とした。

表-4に示すように、事例解析は重み係数を変化させた3つの事例に関して行った。各事例の重み係数の採用に際しては、道路管理に携わる専門技術者の意見を反映させているが、特に事例2では全ての要因の重みを一律とし、事例3では都市部の路線機能に着目するために沿道特性や火災延焼危険度の重み係数を高く設定した。各事例の要因ごとの重み係数を、図-5のレーダーチャートに示す。

以上の条件を用いた解析で得られた結果を図-6、7に示す。図-6は、評価式(2)から各路線・区間の重要度の点数を求め、重要度の点数ごとの路線延長距離(m)と路線延長距離の累積比率(%)を示したものである。前述のように、本方法では重み係数の与え方によってこの分布は変化するために絶対的な評価は困難である。そこで、この評価のために新たに開発した道路地図

情報システム(図-7~9など)に重要度点数の分布状況を表示し、環状線と放射状線の点数が相対的に高くなること、区部に点数の高い路線が集中して現われること、さらには専門家の目から見て点数分布のバランスがよいことを確認して、事例1の重み係数が他の事例に比べて妥当と判断した。なお、図-6を用いて重要度を3つに区分する際には、緊急輸送路ネットワークに指定されている路線、特に環状七号線全線が「最重要」の路線となるように設定し、「一般」の路線の上限値は図-6のヒストグラムの谷で設定した。図-7は、3つに区分された重要度を対象路線全てについて図示した結果である(事例1)。これから、評点、重みの設定で意図した通り、区部の主要路線、および多摩地区の骨格をなす路線が最重要ないしは重要路線として抽出されていることがわかる。

## (2) ネットワーク特性に基づく重要度 $I_R$ の評価

ネットワーク解析では、(1)で用いた全路線・区間を対象とし、約700のノードからなるネットワークを用いた。これらのノードの中から各区庁舎の所在地、都が指定する陸上・海上・航空・水上輸送基地、道路の都県境界など主要な112地点(主要拠点)を選定し、これらを交通の起終点(OD点)とした。

救援期を対象としたネットワーク解析では、着目した路線・区間が使用できないときの全OD点間の走行距離の増分の総和を求めた。応急復旧期については、すべてのOD点間で最短経路を通過する単位の交通量を仮定して対象路線・区間の通過回数の総和を求めた。救援期、応急復旧期各々の点数に基づき、表-2に示すように重要度を大・中・小に区分した。これらの区分は、先の属性によるものと同様、点数の分布から主観的に決定したものである。

救援期においては、最短経路としての各路線・区間の

路線評価区分：総合評価

Aランク：— Bランク：— Cランク：—

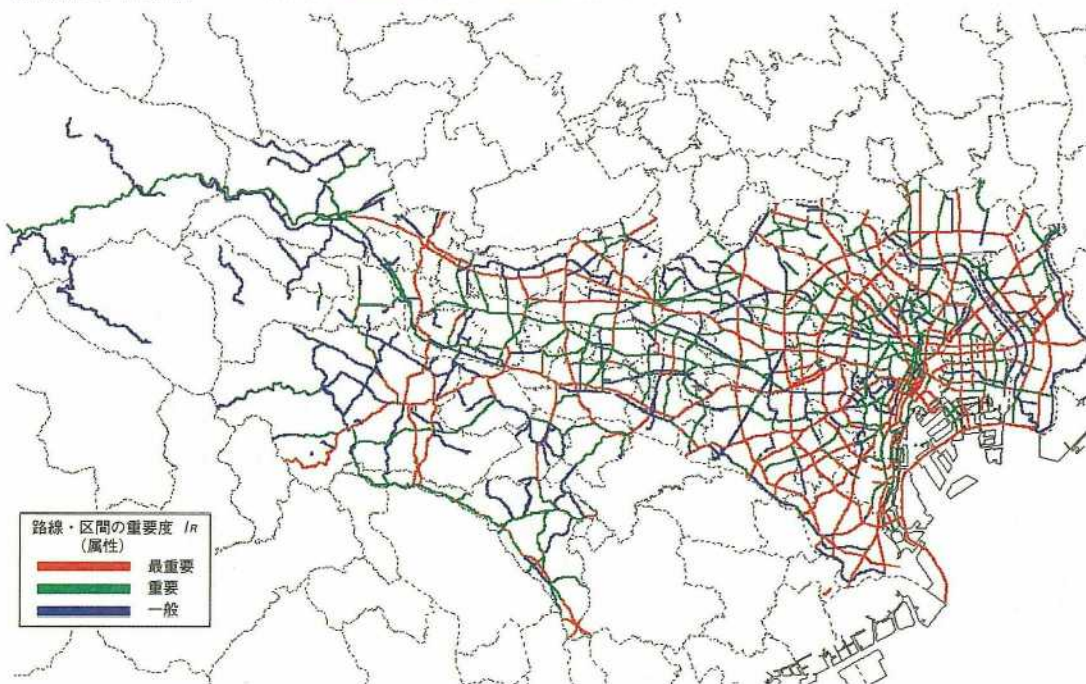


図-7 属性に基づく路線・区間の重要度  $I_R$  の評価結果 (事例1)

路線評価区分：ネットワーク

Aランク：— Bランク：— Cランク：—

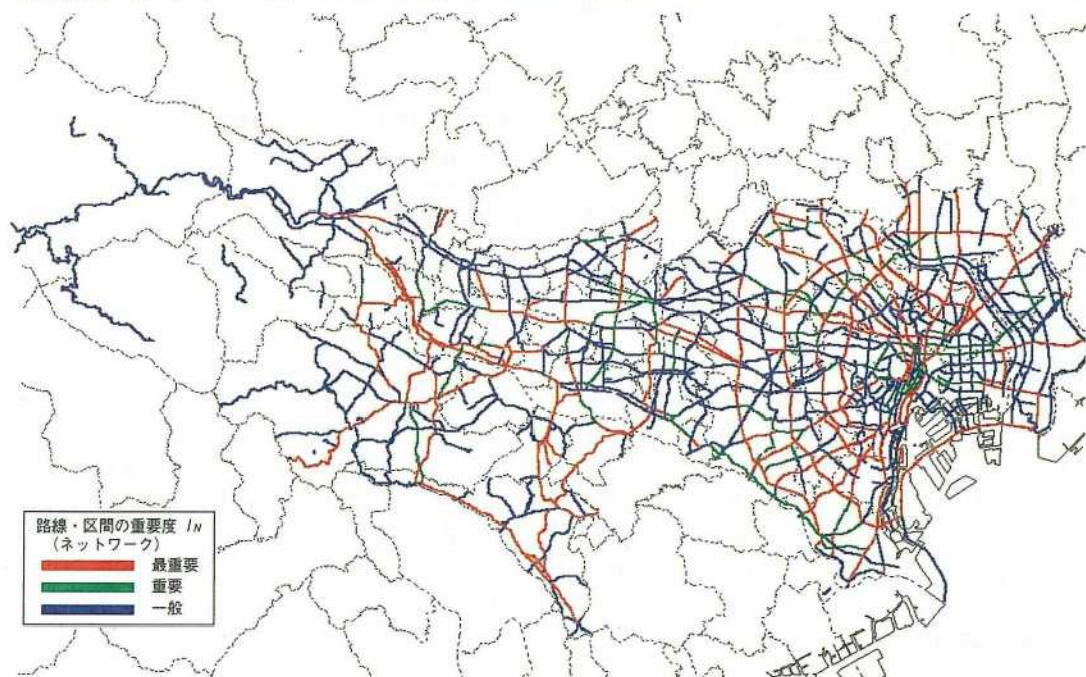


図-8 ネットワーク特性に基づく路線・区間の重要度  $I_N$  の評価結果

路線評価区分：路線・区間重要度 Aランク：—●— Bランク：—●— Cランク：—●—

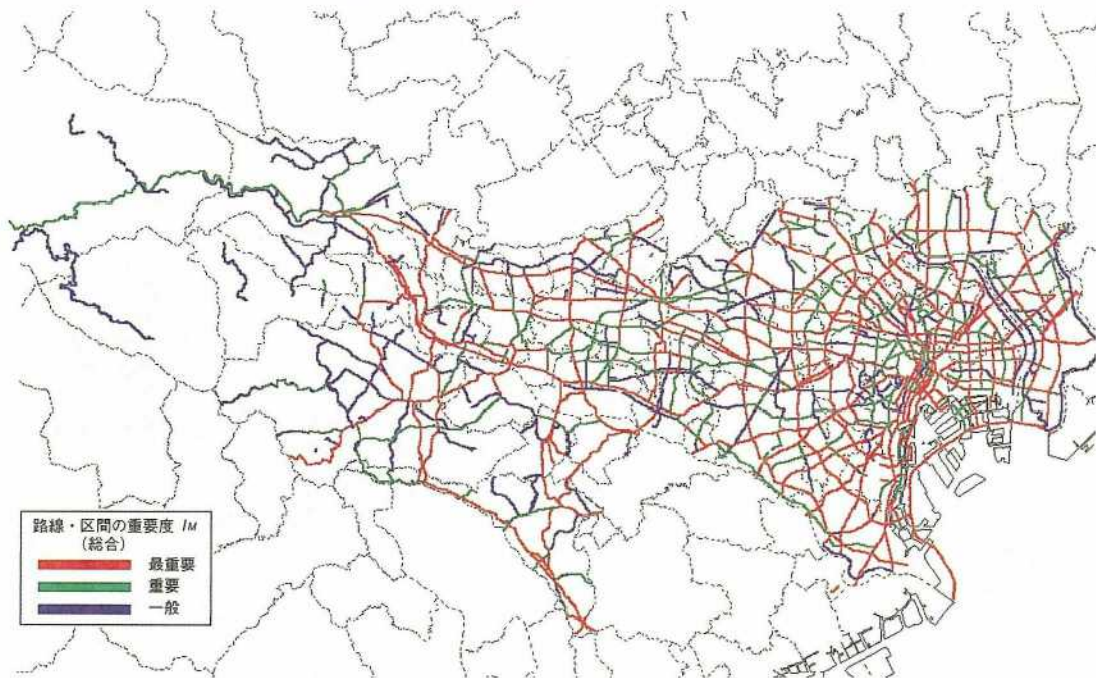


図-9 路線・区間の重要度  $I_M$  の評価結果 (図-7の  $I_R$  と図-8の  $I_N$  の結果を表-3の評価マトリックス  $f$  で評価)

表-5 事例解析で用いた影響度  $E$  の要因の評点と重みの一覧表

| 要 因              |      | 評 点<br>$Y_k$  | 重み $\delta_k$ (事例) |    |   |    |
|------------------|------|---------------|--------------------|----|---|----|
|                  |      |               | a                  | b  | c |    |
| 橋下種別             | 鉄 道  | 旅客線 (複線線)     | 3                  | 10 | 7 | 10 |
|                  |      | 旅客線 (単線または複線) | 2                  |    |   |    |
|                  |      | 貨物線           | 1                  |    |   |    |
|                  | 道 路  | 路線・区間の重要度は最重要 | 3                  | 5  | 7 | 3  |
|                  |      | 路線・区間の重要度は重要  | 2                  |    |   |    |
|                  |      | その他           | 1                  |    |   |    |
| 主要な占用<br>(添架) 物件 | 複数添架 | 3             | 6                  | 7  | 8 |    |
|                  | 単一添架 | 2             |                    |    |   |    |
|                  | 無    | 1             |                    |    |   |    |

貢献度が評価されるため、主要な環状線や放射状線の増分が大きく、応急復旧期においては、最短経路として利用頻度の高い一部の放射状線の増分が大きくなった。

以上の結果を評価マトリックス  $h$  (表-2) により総合評価し、ネットワーク特性に基づく重要度  $I_N$  を図示したものが図-8である。神奈川県に近い地域と千葉に近い一部を除いて、環状線と主要な放射状線の重要度は相対的に高く、概ね現実に近い妥当な結果と考えられる。

### (3) 路線区間の重要度 $I_M$ の評価

属性に基づく重要度  $I_R$  (事例1) とネットワーク特性に基づく重要度  $I_N$  を、評価マトリックス  $f$  (表-3) に当てはめて路線・区間の重要度  $I_M$  を評価した。結果を図-9に示すが、属性のみの結果 (図-7) と比べ、重

要路線のネットワーク的な特性が補強され、全体としての重要度のバランスがより妥当なものになっていることがわかる。

### (4) 橋の被災した場合の影響度 $E$ の評価

事例解析で用いた要因とその評点、各要因の重み係数を表-5に示す (各々式 (3) の  $Y_k, \delta_k$ )。評点は、影響度の大きい要因の属性から順に3, 2, 1点を与えた。重みについては、専門家の意見を参考にa, b, cの3つのケースを設定した。事例aとcで、橋下種別が道路のときの重みを鉄道のそれよりも小さくしたのは、東京都の道路立体交差には必ず側道があり、万一落橋した場合でも側道による緊急輸送機能がある程度確保されると考えたことによる。

以上のような条件で影響度を計算した結果を図-10, 11に示す。図-10は、橋の被災した場合の影響度の点数を評価式 (3) から求め、点数ごとの橋架数とその累積頻度を図示したものである。この計算では、橋下の道路の重要度として、前述の路線・区間の重要度  $I_M$  (事例1) を用いた。事例a, b, cでは、影響度の点数の高い方で違いがでてくるが、頻度分布および累積曲線から、事例aが最もバランスがよいことがわかる。事例aをとりあげ対象とする橋梁の影響度の点数を道路地図情報システム上で比較検討した結果から、図-10に示すよう



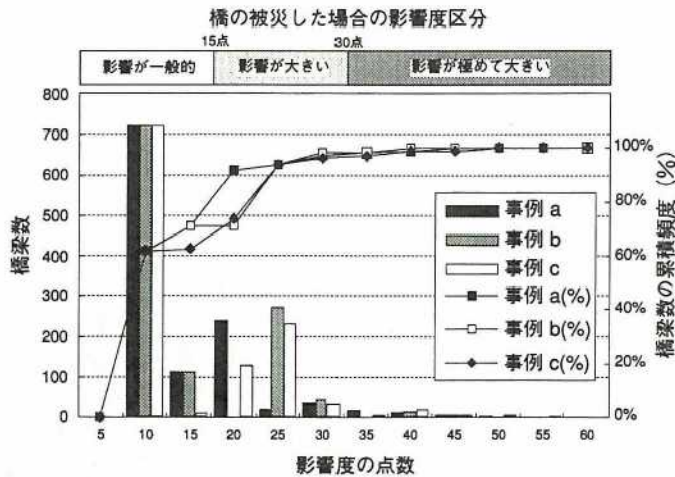


図-10 橋の被災した場合の影響度の点数分布

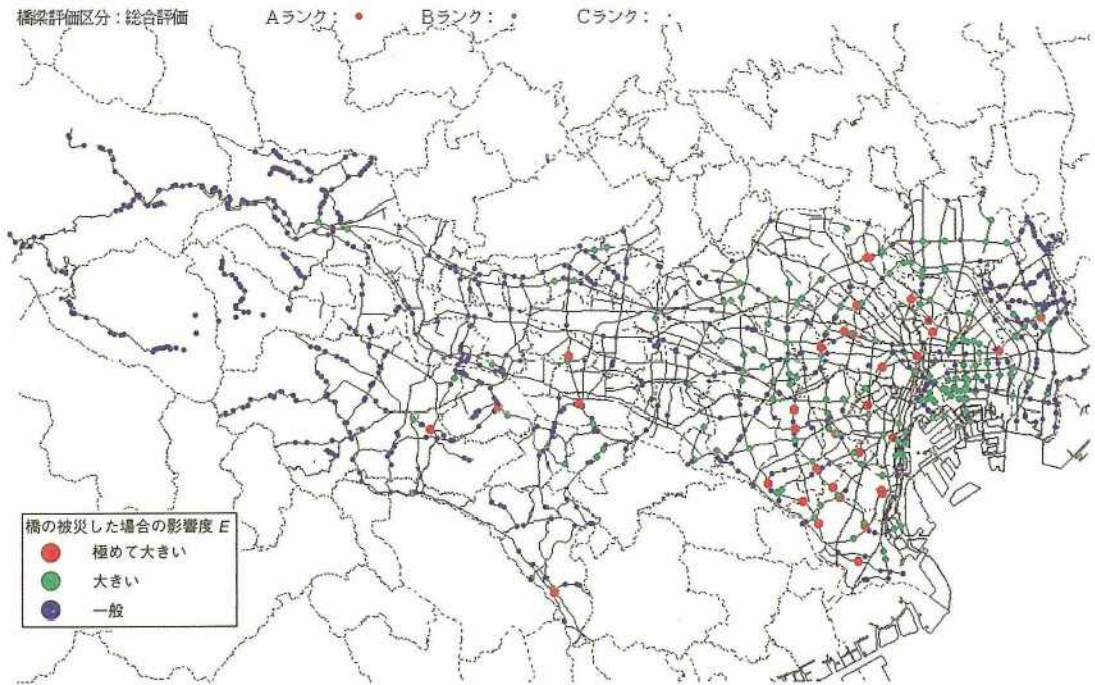


図-11 橋の被災した場合の影響度 E の評価結果 (事例 a)

に影響度を3つに区分した。図-11に事例 a の場合の全橋梁の影響度を区分した結果を示す。影響度が“極めて大きい”と区分された橋は大部分鉄道(旅客複線以上)をわたる橋である。環状線、放射状線では主要な道路をわたる陸橋が、都心部および下町地区では重要な添架物件を持つ橋が影響度が“大きい”と区分されている。

(5) 橋の地震防災上の重要度  $I_{DM}$  の評価

路線・区間ごとの重要度  $I_M$  と橋の被災した場合の影

響度 E を評価マトリックス  $g$  (表-1) に当てはめて得られた、橋の地震防災上の重要度  $I_{DM}$  を図-12に示す。また、表-6には  $I_{DM}$  の3段階に該当する橋の数を示す。これらの結果から、以下のような傾向を読み取ることができる。

- ・23区部では「最重要」、「重要」の橋の占める割合が高いのに対して多摩地区では「一般」に分類される橋が多い。
- ・区部の環状線の陸橋あるいは環状線と交差する陸橋が

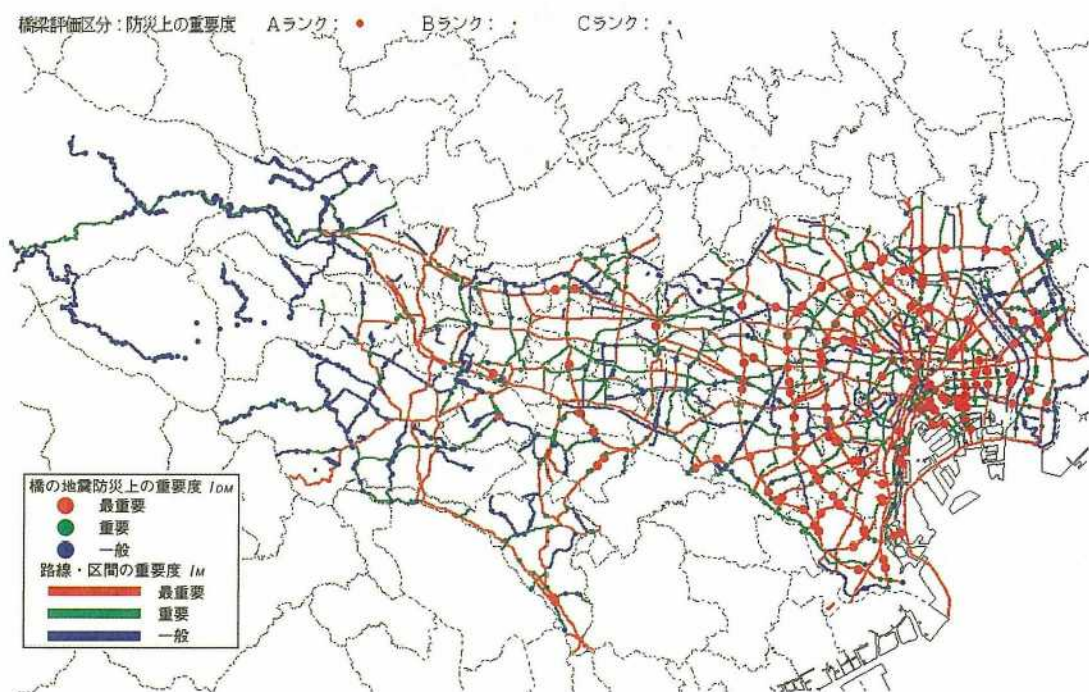


図-12 橋の地震防災上の重要度  $I_{DM}$  の評価結果 (図-9 の  $I_M$  と図-11 の  $E$  の結果を表-1 の評価マトリックス  $g$  で評価)

表-6 橋の地震防災上の重要度  $I_{DM}$  の区分結果  
( ( ) 内は対象橋梁数に対する比率%)

| 地 域                  | 23区部       | 多摩地区       | 合 計        |
|----------------------|------------|------------|------------|
| 橋の地震防災上の重要度 $I_{DM}$ |            |            |            |
| 最重要                  | 137 (13.4) | 10 (1.0)   | 147 (14.3) |
| 重要                   | 199 (19.4) | 64 (6.2)   | 263 (25.7) |
| 一般                   | 175 (17.1) | 440 (42.9) | 615 (60.0) |

大部分最重要と区分される。

- ・多摩地区で「最重要」と区分される橋は影響度の大きい橋およびこれに加えて多摩の道路ネットワークの基幹となる路線の橋である。

## 5. あとがき

本研究は、既設道路橋の合理的な耐震保全対策事業の実施計画策定を念頭において、橋の地震防災上の重要度の概念と有効性を示すとともに、その評価手法を新たに提案したものである。論文の内容を以下に要約する。

(1) 既設の橋の耐震対策計画を立案する上で、重要度の概念が有効であることを示した。耐震補強対策(震前対策)を例にとれば、年間に対策しうる橋の数が限ら

れるという制約条件のもとで、重要度に応じて優先順位を定め対策を実施していくことで高い効果が得られる。

(2) 道路の特性を表す各種要因やネットワーク特性から評価した路線・区間の重要度  $I_M$  と、橋の被害ともなう影響度  $E$  とを組合わせた評価によって、橋の地震防災上の重要度  $I_{DM}$  を決定する方法を提案した。路線・区間の重要度  $I_M$  については、路線・区間の属性に基づく重要度  $I_R$  と道路のネットワーク特性に基づく重要度  $I_N$  の組合わせによって評価し、橋の被災した場合の影響度  $E$  については対象となる橋下の利用状況と供給施設の添架状況を要因として評価する方法を示した。

(3) 上記の方法を適用するため、独自の地理情報システムである「道路地図情報システム」を新たに開発した。この方法、システムを東京都建設局管理の1000を越える橋に適用した結果、橋の防災上の重要度をシステムティックに評価しうることが確認できた。

この手法は、橋以外の道路施設、例えばトンネル、擁壁、盛土、斜面等にも適用することが可能であり、道路網全体を対象にした耐震保全対策事業の実施計画策定に反映することができる。今後、関連するデータベースの整備を図るとともに、各評点や重みにより客観性を持たせるなど、より信頼度の高いシステムとして整備することが必要である。

この研究を実施するにあたり貴重な御指導、御助言を

いただいた東京大学生産技術研究所 片山恒雄教授をはじめとする関係各位に対し、深く感謝の意を表する次第である。最後に本研究を進めるにあたり、終始協力いただいた梶谷孝男、吉澤光雄、伊藤勇治郎(東京都建設局)、野中昌明、井出孝(日本技術開発(株))、永田茂(現鹿島建設(株))の各氏に心からの謝意を表す。なお、図1-7~9等の道路地図情報システムの作成にあたっては、一部国土数値情報を使用したことを付記しておく。

#### 参考文献

- 1) 建設省都市局・道路局：所管施設の地震に対する安全性等に関する点検，1991年5月。
- 2) Applied Technology Council : Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges, ATC-6-2, Palo Alto, California, Aug., 1983.
- 3) A. Longinow, E. Bergman and J.D. Cooper : Bridge

- Retrofitting Selection of Critical Bridges in a Road Network, The Current State of the Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, *Proc. of the Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, Aug., 1977.
- 4) Buckle, I.G. : Screening Procedures for the Retrofit of Bridges, *Proc. of the 3rd U.S. Conference Sponsored by the Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering of the ASCE*, Aug., 1991.
  - 5) 東京都防災会議：東京都地域防災計画震災編（平成4年修正），1992年10月。
  - 6) 東京都都市計画局：あなたのまちの地域危険度，1993年。
  - 7) 腰塚武志，大木 豊：橋の相対的密度に関する考察，第17回日本都市計画学会学術研究発表論文集，1982年。
  - 8) 東京都建設局内部資料：交通量調査報告書に基づいたデータベース。
  - 9) 東京都建設局：道路構成調査，1992年3月。
- (1994.3.24 受付)

## IMPORTANCE FACTOR EVALUATION OF EXISTING ROAD BRIDGES FOR A SEISMIC DISASTER MITIGATION PLAN

Jiro SATO, Yukio SINOZAKI, Mitsuaki SAEKI and Ryoji ISOYAMA

An importance factor evaluation procedure is presented for existing road bridges in a metropolitan area in order to establish their disaster mitigation plan against earthquakes. Priority for retrofitting bridges and for emergency response after an earthquake occurrence can be decided according to the importance factor of the bridge as a vital transportation link.

Importance or criticality in relation to a road network is evaluated in terms of the importance of the route the bridge located in the road network as well as the direct effects when the bridge is destroyed. The importance of the route is evaluated by considering daily traffic, regional land use along the route, results of network analyses including traffic demand, route assignment, trip time or distance calculations. The direct effect of the bridge failure in relationship to utilities must be evaluated and the use of an underpass should also be considered.

This procedure has been applied to the road network and bridges in the Tokyo Metropolitan area and its usefulness has been examined.