

## 都市内緊急輸送路網における既設橋梁の耐震補強計画

The plan of antiseismic reinforcement for existing bridges, in city emergency transportation network

札幌市建設局土木部 工事二課 正員 相馬 英敏 (Hidetoshi Soma)  
 札幌市建設局土木部 工事二課 小泉 健治 (Kenji Koizumi)  
 (株)構研エンジニアリング ○正員 木村 和之 (Kazuyuki Kimura)  
 (株)構研エンジニアリング 岩倉 敦雄 (Atsuo Iwakura)  
 (株)構研エンジニアリング 阿部 昌平 (Shohei Abe)

## 1. はじめに

巨大災害に対する都市の脆弱性が露呈した兵庫県南部地震の後、既設構造物の耐震補強の必要性が強く認識されるようになり、各道路管理者は耐震性が低く緊急性の高い橋梁から順次補強を進めてきた。北海道の道路橋では、高速道路と国道の橋脚補強が順調に進捗しているが、自治体が管理する道路においては、未だ道半ばというのが実情と考えられる。

札幌市では平成10年10月に策定した新しい地域防災計画<sup>1)</sup>の中で、道路の災害対策として緊急輸送路を指定している。それに伴って橋梁の点検を行い、必要となる防災対策を促進することとしている。

これを受け建設局土木部では、平成13年度から緊急輸送路上の橋梁を対象とした耐震補強計画に着手しており、効率的な投資を行うための事業計画の立案と、市民に対する説明責任を果たすこと等を目的として、耐震補強に関する設計施工要領の作成と耐震補強の優先順位付けを行い、事業の全体計画を整備した<sup>2)</sup>。

補強優先順位の評価手法は、わかり易さを重視し、複雑な解析が伴うことを極力避けるべきと考えたが、同時に定量的な評価ができることも必要である。とくに路線の重要度は、路線単位で行政的判断によって決めていたため、災害発生直後の緊急救助活動などに与える影響を具体的に加味したものではなかった。

そこで、路線単位の重要度評価に基づいて定めた優先順位マトリクスに対し、定量評価の確立に向けた試みとして、サンプル地区に災害発生直後の区間重要度評価を適用し、その有効性の検討を行った。

## 2. 札幌市の道路ネットワークと緊急輸送路

自動車交通への依存度の高い札幌圏域では、道路ネットワークを都市内交通と広域交通の有機的な体系化を図れるよう、「2連携1環状1バイパス11放射道路」を交通の骨格として構成している。

札幌市地域防災計画<sup>1)</sup>による緊急輸送路の指定は、消防、医療、救援物資輸送等の活動を支援するために防災拠点と結節できるよう、多重性、代替性を考慮して選定されている(表-1)。この路線では道路の機能確保のため、交通障害物の除去や除雪が優先的に行わ

れることになっている。なお、「2連携1環状1バイパス11放射道路」はすべての路線が第1次もしくは第2次の緊急輸送路に指定されている。

表-1 緊急輸送路の種類と延長

種別	第1次緊急輸送路	第2次緊急輸送路
定義	<ul style="list-style-type: none"> <li>●広域的な輸送を行う道路。</li> <li>●緊急車両専用の路線。</li> <li>●一般車両は通行禁止。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●市役所、区役所、避難場所などの防災拠点を結ぶ道路。</li> <li>●第1次緊急輸送路の代替路線。</li> </ul>
指定道路	高速道路、一般国道、道道、市道	道道、市道
延長	253km	435km

## 3. 耐震補強事業計画のこれまでの経緯

## (1) 1次診断

札幌市が管理する道路橋の数は、平成12年4月1日現在1,131橋である。まず、全橋梁の中から橋長15m以上の橋梁を抽出し、その橋梁群に対して以下の評価項目による点数付けを行った。

橋梁の交差状況(鉄道、高速道路、河川etc.)、緊急輸送路、適用示方書、断層領域上(地域防災計画の想定断層)、平日交通量、バス路線、迂回路、DID区間。

この結果113橋が抽出され、そのうち単純桁形式の33橋には落橋防止装置を設置することで耐震対策を完了とし、残りの80橋を2次診断の対象とした。

## (2) 2次診断

2次診断に送られた80橋のうちJHへの委託分などを除いた対象橋梁は69橋(分離橋などを考慮すると全数は73橋)となった。ここでの構造検討は静的照査法の範囲内で行うこととし、耐震性能の確認手法は地震時保有水平耐力法によることとした。

## 4. 補強優先順位の評価手法

## (1) 基本的な考え方

耐震性能を向上させるためには相応の対策費用を要するが、限りある財源を防災対策のみに集中投資することはできない。当然、すべての橋梁の補強完了まで

には長期間を要するであろうし、財政的な制約がある以上、避けられないことであり、その間被災リスクが残存することになる。したがって、どの橋梁から優先的に補強に着手するのがリスク対策の観点から適切なものか、定量的な分析結果による判断が必要とされる。

文献 3) では道路ネットワークの耐震性評価手法に関する研究を行っている。この中で、道路の耐震性評価は、道路構造物や沿道・占用施設の被害に関連した道路の区間の機能を評価する「道路の区間としての耐震性」と代替路の有無の観点から評価を行う「道路のネットワークとしての耐震性」の2つの観点により行う方法を示している。つまり、橋梁も道路を構成する一部分であるため、優先度を評価するにあたっては道路網の機能面から検討することが重要となる。

以上を参考とし、札幌市の耐震補強計画においては以下に示す3つの評価要素に基づいた優先順位の検討を行うこととした。

- a) 緊急輸送路のネットワーク性能に対する評価
- b) 橋梁の耐震性能に対する評価
- c) 投資効果も考慮した工事コストに関する評価

このうち、現時点では b) の耐震性能の評価が完了しているが、a), c) に関しては検討作業中である。

## (2) 緊急輸送路のネットワーク性能に対する評価

地震後における道路の性能評価法としては、ネットワーク信頼性解析など多くの研究があり、道路交通等に関する十分なデータと解析に費やす時間があれば、確固たる根拠に基づいた定量評価も可能と考えられる。また、前出の文献 3) についてもほぼ同様であるが、現時点ではデータが不十分でもあり不確実な要素が多すぎることから、今回の札幌市の事業計画に対して、それらを完全な形で適用することは困難と判断した。

そこで、文献 3) の手法をヒントにして、ある限られた地域の道路ネットワークに対する耐震性能の検討を行ってみた。

図-1 はその考え方をイメージで示したものである。区間重要度は地震発生直後の防災活動を想定して評価するため、地域防災計画で定められた災害時基幹病院を中心とした地域ごとの緊急輸送路網により検討する。

防災活動は消火、救助などであるが、ここでは災害発生地域の負傷者を基幹病院まで搬送する場合の緊急車両の動きを考える。

緊急車両は図-1 の消防署 O から出発し、中継点である T を経由して最終目的地の基幹病院 D へ向かうものとする。このルート上には X, Y, Z の3橋が存在し、X 橋の機能が確保されていれば、最短ルートで基幹病院 D に到達できる。仮に X 橋が通行不能となった場合、Y 橋、Z 橋の2橋を通過する迂回ルートを使用することとなり、時間損失が発生する。

同様に、中継点を移動させ、また他の橋梁が通行不能となる場合についても時間損失を算定することで、この地域における各橋梁の防災活動への影響度、つまり重要度が評価できるものとする。

なお、防災活動交通の発生量は、文献 3) を参考に、対象地域の人口に対する比率を 0.76% とし、算定され

た数値を緊急車両台数と考え、走行時間を乗じた「台時」を評価に用いた。

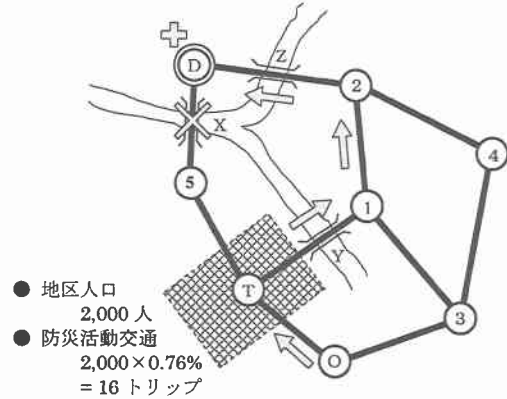


図-1 区間重要度評価のイメージ

## (3) 橋梁の耐震性能に対する評価

橋梁ごとの耐震性能は、2次診断の結果を用いて評価した。地震時の性能は現行示方書の要求性能および過去の地震被害に基づく損傷形態を考慮し、次の項目を対象とした。①十分な耐力をもっているか、②十分な変形性能を持つと同時に有害な残留変形を生じないか、③段落とし部の損傷が先行しないか、④断面のせん断耐力曲げ耐力比は十分であるか、等である。

この内、④の指標は兵庫県南部地震における鉄筋コンクリート橋脚の損傷程度とせん断耐力余裕度には相関が認められる、という研究結果(阿部ほか 1999, 幸左ほか 1998)に基づくものである。耐震補強をする際にも、せん断耐力曲げ耐力比が小さく、せん断耐力余裕度の低い構造物を優先するのが望ましいとしている。

耐震性能指標値の算定は、大きな評価の幅を与えることによって多数の橋梁群の中から補強すべき候補を抽出しやすくなるよう、上記4つの項目を用いた算術積によることとした。

### a) 保有水平耐力比 ( $I_1$ )

- ・慣性力と保有水平耐力の比率を算定する。  
(各橋脚の橋軸方向、直角方向、タイプ I・タイプ II 地震動に対して算定)
- ・算定の結果、所要の耐力をもつ(比率が1以上)の場合は、保有水平耐力比は1とする。
- ・橋梁単位の保有水平耐力比を、慣性力作用方向別、地震動タイプ別に算定する(4種類の指標値)。この際、橋梁群の中での相対的な順位が明瞭につくよう、各々の指標値は2乗し、全橋梁分の算術和を橋脚基数で除し、橋梁単位の保有水平耐力比とする。

$$I_1 = \left( I_{P1}^2 + I_{P2}^2 + \dots + I_{Pn}^2 \right) / n \quad (1)$$

- ・ひとつの橋梁で4つの指標値が得られるため、橋梁の代表値は安全側の評価を考え、最小値を採用する。

### b) 残留変位比 ( $I_2$ )

- ・残留変位量と許容変位量の比率を算定する。  
(各橋脚の橋軸方向、直角方向、タイプ I・タイプ

II 地震動に対して算定)

- 他の項目の評価と傾向を合わせるため、比率は逆数にして用いる（1以上がOK判定）。
- 所要の残留変位量である(比率が1以上)場合は、残留変位比は1とする。
- 以下の算定手法は、保有水平耐力比に準じ、橋梁の代表値として最小値を採用する。

c) 段落とし損傷先行型 (I<sub>3</sub>)

- 段落としの損傷が先行するケースは、損傷形態に関する係数として、0.8を乗ずる。

d) せん断曲げ耐力比 (I<sub>4</sub>)

- 基部および段落とし断面におけるせん断耐力とその断面が曲げ降伏に至るときの水平力(水平耐力)の比率を算定する。
- 算定の結果、せん断耐力に余裕のある(比率が1以上)場合は、せん断曲げ耐力比は1とする。
- 以下の算定手法は、保有水平耐力比に準じ、橋梁の代表値として最小値を採用する。

e) 耐震性指標

上記4項目の評価値に基づき、耐震性指標を算定する。耐震性指標の算定式は、数ケースの試算結果から式(2)を採用した。これは耐力と残留変位の指標を重視しつつも、損傷形態の影響も反映させる考えによるものである。

$$I_S = I_1 \times I_2 \times I_3^2 \times I_4^4 \quad (2)$$

5. 補強優先順位の評価結果

(1) 路線重要度について

緊急輸送路のネットワーク性能に対する評価が未完であるため、在来型の分類による路線重要度を用いた優先順位の結果について説明する。

補強対象橋梁の優先順位は既往の研究(佐藤ほか1995)を参考に、図-2に示すマトリクス上で整理した。これは横軸に路線の重要度を、縦軸に橋梁の耐震性能を表しており、路線重要度の高いものと耐震性能の低いものもランクが高くなるように組まれている。

		路線重要度				
		高い ←				→ 低い
		5	4	3	2	1
耐震性能	低い ↑	5	上位			
	↑	4				
	↓	3				
	高い ↓	2				
		1				下位

図-2 補強優先順位マトリクス

したがって、図-2の左上に位置するものは被害規模が大きくかつ影響も大きな、リスクの高い橋梁群である。それとは逆に右下の橋梁群は、保有する耐震性能が高く、路線重要度も低いため、相対的なリスク値は低いと判断できる。路線重要度は次のとおりである。

重要度5：1次緊急輸送路

重要度4：こ線橋（JR幹線のみ）

重要度3：2連携1環状1バイパス11放射道路

重要度2：その他の2次緊急輸送路

重要度1：緊急輸送路以外の代替性の高いルート

(2) 耐震性指標について

対象橋を準拠示方書ごとに分類したのが表-2である。昭和47年の耐震設計指針までの橋が56%を占めている。

表-2 対象橋梁の準拠示方書別分類

準拠示方書 (耐震設計編)	橋梁数				比率 (%)
	(橋)	5	10	15	
S.31	2				2.7
S.39	18				24.7
S.47	21				28.8
S.55	19				26.0
H.2	10				13.7
H.7 (復旧仕様)	3				4.1
合計	73				100.0

前出 4.(3)で説明した手法に基づいて算出された結果が図-3である。グループ分類は、準拠示方書によるものであり、Aグループが S.31, S.39, Bグループが S.47, Cグループが S.55, Dグループが H.2, Eグループが H.7 (復旧仕様) となっている。

H.2以後は概ねまとまりが見られるが、それ以前ではばらつきが顕著である。理由のひとつとして、保有水平耐力照査が挙げられる。

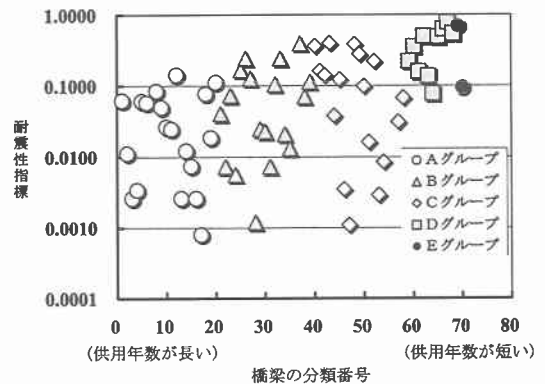


図-3 耐震性指標

(3) 補強優先順位マトリクスへの展開

耐震性能指標値の順序によって、橋梁の耐震性能を5段階に分類した結果を図-4に示す。

		路線重要度					橋梁数
		5	4	3	2	1	
耐震性能	5	2	1	3	8	1	← 15
	4	2	0	2	10	1	← 15
	3	1	3	3	7	1	← 15
	2	2	2	3	6	1	← 14
	1	1	5	4	2	1	← 13
		↑	↑	↑	↑	↑	全橋梁数
橋梁数		8	11	15	33	5	72

図-4 補強優先順位マトリクスへの展開

この図から路線重要度2のランクに橋梁が集中していることがわかるが、同一路線であっても人口集中地域と山間部という地域性、および影響度に当然差があるとと思われる橋梁が混在していることに難点がある。

したがって次項では、一つのサンプル地区を取り出して区間重要度の検討を行い、図-4 のマトリクス上の評価結果との比較を行ってみる。

## 6. サンプル地区における区間重要度の検討

### (1) 検討方法

検討方法は、前出 4.(2)で説明したように、被害発生直後の防災活動に着目して行う。サンプル地区は図-5 に示すとおり、札幌市の副都心周辺に設定した。この地区は災害時基幹病院のカバーエリアも比較的広く、検討する上で橋梁数も十分と考えたためである。



図-5 緊急輸送道路網とサンプル地区の位置

ネットワークモデルを図-6 に示す。ノード構成は出発点となる消防署が 4 箇所、最終目的地である災害時基幹病院が 1 箇所、防災活動対象の中継地点が 30 箇所である。このネットワークモデルには 12 の橋梁が含まれている。中継地点のノードは条丁目番号で一つのまとまりを作り、そのノードに推定死傷者数を与えた。

走行時間には道路の容量が大きな影響を与えるが、詳細なデータが不足していることから次のような仮定のもとで検討することとした。

- 緊急車両の走行速度は道路の車線数に比例する。  
(1 車線：10，2 車線：20，3 車線：25 km/h)
- バックグラウンド交通は無視する。

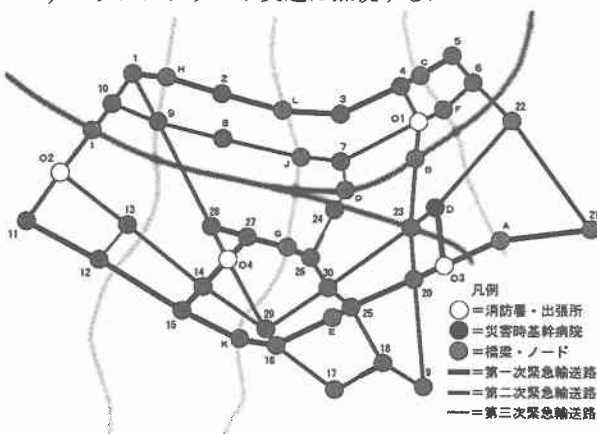


図-6 ネットワークモデル

これらの条件のもと、全ノードに対して橋梁健全時のルートと走行台時、および橋梁が通行不可能となった場合の迂回路と走行台時を求めた。

### (2) 検討結果

対象橋梁が通行不可能となった場合、どれだけの緊

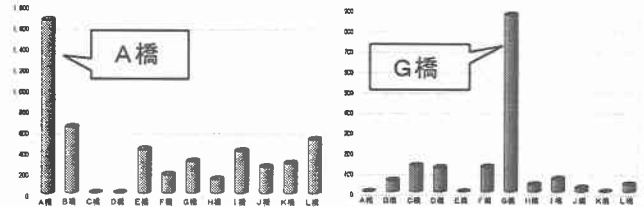


図-7 各橋梁が通行不可能となった場合の増加台時と迂回路となった場合の増加台数

急車輛が遠回りしなければならないのかを示したのが図-7 の左であり、圧倒的にA橋の与える影響が大きく、逆にC橋、D橋は影響を与えていない。同じく図-7 の右は各橋梁が迂回路として利用された場合の通過台数を示したものである。これによるとG橋の迂回路としての機能が突出しており、それ自身が通行不能による影響だけでは、重要度を評価できないともいえる。

なお、5.で行った優先順位マトリクスからサンプル地区内の橋梁を抽出して示したのが図-8 である。A橋、G橋は路線重要度では下位のランク2であるが、緊急輸送路網としての重要度は他の橋梁より高いと考えられるため、本来の重要度は今回試行したような手法により評価すべきである。

		路線重要度				
		5	4	3	2	1
耐震性能	5			K		
	4			H, K	(G) F	
	3		D	C, E, L	(A)	
	2		I		J	
	1		B			

図-8 サンプル地区の橋梁の優先順位マトリクス

### 7. おわりに

札幌市では、限られた財源の効率的な投資による耐震補強を進めるため、これまでの優先度評価手法から道路網の耐震性を定量的に分析して総合評価を行う方法を検討し、その一部をここに紹介させて頂いた。

このような評価手法は、橋梁の耐震構造、交通計画、財務・会計など多分野の技術とノウハウが必要である。同時に、地震前の対策だけではなく発生後の対応策との組み合わせにより、災害を最小限とするような地震防災への取組みも重要である。今後は地震リスクマネジメントの見地から、耐震性能の評価、補強水準、対策法の選択等を検討していくことも必要と考えられるため、地震防災への効率的な投資を検討するしくみを構築していくことにも取り組まなければならない。

### 参考文献

- 札幌市防災会議：札幌市地域防災計画，1998.10.10
- 相馬英敏，小泉健治，木村和之，岩倉敦雄，阿部昌平：札幌市における既設橋梁の耐震補強計画，既設構造物の耐震補強に関するシンポジウム 論文集，pp.15-22, 2002.11.
- 建設省土木研究所 耐震技術研究センター防災技術課：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究 (その 1) ネットワーク耐震性指標の提案とその計算方法の開発，土木研究所資料 第 3589 号，1998.9