

◆ 特集：土木構造物の耐震補強技術 ◆

道路橋の耐震補強優先度の実用的設定法

日下部毅明* 中尾吉宏**

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、防災総点検結果に基づいて要対策箇所に対する防災対策が進められており、一定の進捗が見られるが、依然として要対策箇所は残されている。近年の我が国の経済的な停滞からコスト意識は一層厳しくなっており、防災事業といえども全数を一気に進めるということは不可能である。また、これからの公共事業実施の考え方としては、成果主義も導入されつつあり、防災対策事業についても、安全の確保・防災効果の観点等から対策箇所を厳選し、合理的な基準で優先順位を付けることにより、効率的な実施が必要になってくる。そこで本研究では、地震災害の発生可能性や個々の道路施設の防災上の重要性を考慮し、耐震補強事業の優先度を合理的に評価する手法を開発してきた。本研究はまだ完了していないが、現段階でも、ケーススタディーの範囲であれば数ある橋梁に対し耐震補強優先度を付するための考え方として参考になるので、これまでに提案している手法及び試算結果を示し、併せて今後の展望についても述べる。

2. 補強優先度を定める基本的な考え方

2.1 優先度を定める要素とその評価

本研究においては耐震補強の優先度を定める本質的な要素として3つを考えている。それは図-1に示すとおり、構造物自体の耐震性、構造物被災が緊急の救援活動を含め社会に及ぼす影響の大きさ（構造物の重要性）、およびそもそもの構造物が地震を受けるリスク（地震ハザード）である。これを厳密に評価し、優先度を定めようとするれば、個々の構造物毎にその耐震性、被害の影響、地震ハザードを定量的に評価した上で、損失を最小にするシナリオを立てることになる。

2.2 手法提案の視点

しかし、施設の管理者が膨大な施設それぞれに

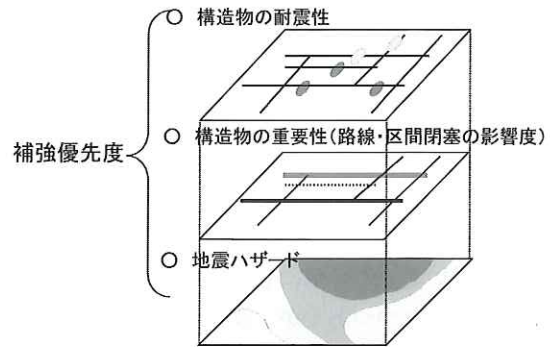


図-1 補強優先度を定める要素

ついてそのような詳細な検討を行うことは、検討に必要な情報の収集だけで膨大なコストを費やしてしまい、現実的ではない。そこで本研究では、まず3つの要素を考慮して優先度を設定することができる最も簡便な方法（以下、簡便法と略）を検討した。この簡便法は、防災総点検結果や交通センサス等の入手が容易な既存のデータで優先度付けが行える手法である。

一方、この簡便法は一定の妥当性を有する優先度を付けられるものではあるが、被災損失が最小となる最適解が得られることを保証するものではない。最適解を得るためには、構造物の耐震性、重要性、地震ハザードのそれぞれを適切に評価することが不可欠であり、更にそれらの評価を合理的に組み合わせて優先度を決定していくことが必要である。本稿では、最適解に近い優先度を決定するために重要な構造物の重要性の評価について、簡便法によっても適切な評価が得られるよう工夫をした点についても紹介している。

3. 簡便法

3.1 簡便法の提案

簡便法では、入手が容易なデータに基づいて、構造物の耐震性、重要性に点数を付ける。地震ハザードについては、既存の被害想定等に基づき、その地域で最も危険性の高い地震の地震動強さ（例えば計測震度）で点数を付ける。それぞれの点数について重み付け総合化を行い、算出された

点数の高いものが優先度も高いことになる。図-2に優先度評価に考慮する評価項目の階層図を示す。

階層図の提案にあたっては、国内外の優先度評価において考慮されている評価項目を整理することから着手し、それぞれの項目について相互関連などを調べるなどして重複を避けるとともに、評価が容易でないものについては代替項目を定めるなどして、106の項目を選定した。更に図-3のプロセスによって図-2に示した階層図にたどり着いた。

道路は、日常生活及び経済活動を支える重要な社会基盤であると同時に、災害時の緊急活動・復旧活動を支援する役割があり、階層図では「平常時の輸送機能」と「地震時の輸送機能」を取り入

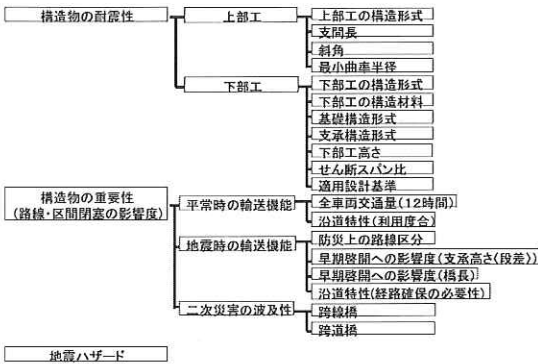


図-2 優先度評価の階層図

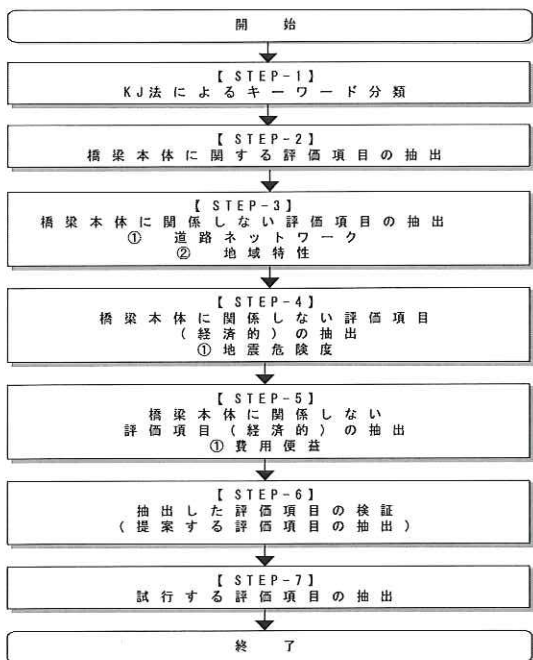


図-3 階層図作成のプロセス

れている。

階層図の評価項目に対し重みを決定し、総合的優先度を算定する手法としてはAHP (Analytic Hierarchy Process、階層化意志決定法)を用いた。このAHPとは、複数の計量化が難しい主観も入る評価基準に対し、最大公約数的な判断を見いだそうとする手法である。防災および耐震構造の専門家が参加して決定した重みの一例を表-1に示す。ここで、構造物の耐震性は、その下位に位置づけられた評価項目の点数を表-1の重みづけで総合化して評価されるものであるが、これらの重みについては耐震構造の専門家が判断したものを採用している。これは、構造物の耐震性については、当該分野の知見と経験を有する専門家が最も適切な重みを与えることができると考えたためである。

3.2 簡便法による試算

ここで提案した簡便法を用いるとどのような結果が得られるかを、ケーススタディーによって示したのが図-4である。重要幹線の地震による被害の可能性が大きいものがまず選ばれ、次いで重要幹線に次ぐ道路上の地震被害の可能性が大きいもの並びに重要幹線上の耐震性の低い橋梁が選ばれており、結果には一定の妥当性は有りそうである。

表-1 各評価項目の重み

評価項目(上位)	評価項目(中位)		評価項目(下位)				
	重み		重み	重み			
構造物の耐震性	0.631	上部工	上部工諸元(形式)	0.386	上部工の構造形式	0.386	
			支間長	0.017			
		上部工諸元(寸法)	0.122	斜角	0.052		
		最小曲率半径	0.053				
	下部工	0.033	下部工諸元(形式)	下部工の構造形式	0.016		
				下部工の構造材料	0.004		
		0.016	下部工諸元(寸法)	基礎構造形式	0.004		
				支承構造形式	0.009		
		0.074	下部工の適用基準	下部工高さ	0.004		
				せん断スパン比	0.012		
構造物の重要性 (路線・区間 閉塞の影響度)	0.200	平常時の輸送機能	全車両交通量 (12時間)	0.032	0.014		
			沿道特性(利用度合)	0.018			
			防災上の路線区分	0.040			
	0.080	地震時の輸送機能	早期啓開への影響度 (支承高さ<段差>)	0.008			
			早期啓開への影響度 (橋長)	0.008			
			沿道特性 (経路確保の必要性)	0.024			
			跨線橋	0.047			
0.088	二次被害の波及性	跨道橋	0.041				
地震ハザード	0.169						

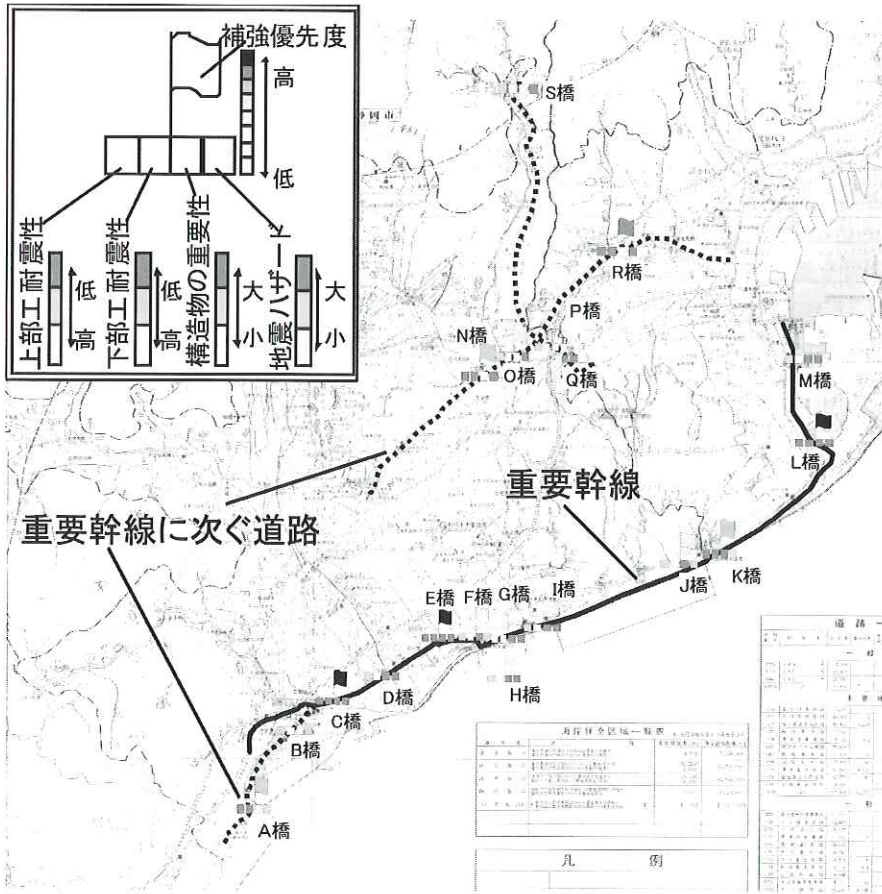


図-4 優先度評価結果

3.3 簡便法の問題点

しかしながら、本手法は様々な要素に対し様々な立場の専門家等が何を重視しているかを総合化する過程においてのみ合理的といえるAHPを適用したに過ぎない。構造物の耐震性の評価については、耐震構造の専門家の判断を採用しているため、実際の構造物の耐震性と一定の相関がある評価がなされていると期待できるが、それ以外の項目の評価については、専門家の主観を総合化した結果であり、それ以上の根拠に基づく評価ができるわけではない。例えば、平常時と地震時の輸送機能が社会経済に及ぼす影響の大きさを相対的に比較するなどして、それぞれの評価項目の重みを提案したわけではない。さらには、耐震性、重要性、地震ハザードの間での重み付けについては多くの専門家の感覚的な合意点ではあっても、例えば人的損失・経済損失を低く抑える観点でどの程度最適な優先度付けができていないかはわからない。

すなわち、これを現場で活用するにあたり以下の課題が考慮されなければならないと言える。

- ①簡便法の答えは本当に最適か、あるいは最適解に十分に近いものか
- ②この順番で耐震補強していった場合にいつの段階で、どれだけ防災効果が発揮されるのか
- ③その地域で考えるべき地震は複数あるはずだが、それをどのように評価するか

以上の課題に答えるための検討について、以下述べる。

4. より合理性が保証された手段の検討

4.1 重要性評価

4.1.1 検討手法の概要

ここでは、簡便法において提案した階層図の中で、構造物の重要性の評価結果をより合理的にするために、道路が通行できなくなった際の影響を定量的に評価するケーススタディを多数実施し、

このような被災影響度の評価にあたって考慮することが不可欠な評価項目を抽出した。また、ケーススタディの結果に基づき、抽出した評価項目ごとの点数を総合化する際に考慮すべき重みを決定することを試みた。ある区間が被災して通行できなくなった場合に道路ネットワーク機能に及ぼす影響はネットワーク解析で評価した。すなわち、道路ネットワーク上で交通量や迂回距離等が異なる区間を切断した場合のネットワーク解析を多数実施し、総走行費用の増加と総走行時間の延長に伴って生じる損失額を被災影響度として評価した。

4.1.2 実在のネットワークに対する検討

解析対象としたのは我が国の特定の県内における主要県道以上の道路ネットワークである。解析においては平常時の交通（輸送機能）が道路区間の被災により被る影響度に着目した。ネットワーク解析の結果から、被災影響度と比較的高い相関が認められたのは、切断区間の交通量、第一迂回路の長さ（切断区間長に対する比）、第一迂回路の混雑度（迂回路の交通容量に対する交通量の比）であった（以下、これらをまとめて「3諸量」とする）。

4.1.3 理想化したネットワークに対する検討

また、本研究ではネットワーク形状が異なる場合の被災影響度についても一般的な結果が得られることを期待して、上述の実ネットワークモデルに加え、図-5のような理想化したネットワークモデルも対象とした検討を行った。ここで、実モデルと理想モデルでは全体で発生・集中する交通量が異なることにより損失額が大小する影響や、上述の3諸量の大きさがネットワーク毎に異なる影響を取り除くため、損失額及び3諸量のそれぞれについて、ネットワーク毎の最大値で規準化して検討をすることとした。

損失額と3諸量の関係を回帰分析した結果を図-6に示す。同図の縦軸は、回帰分析の結果に基づいて3諸量から区間閉塞の被災影響度を評価した結

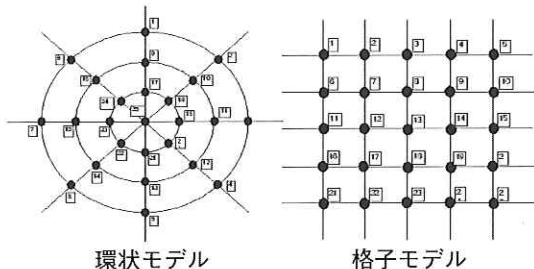


図-5 理想モデル

果（総合評価値）を示している。図-6には、検討対象とした実モデルと理想モデルの解析結果をまとめて示しているが、規準化した損失額と総合評価値には一定の相関が認められることから、規準化した損失額と3諸量にも一定の相関があることが考えられる。

4.1.4 重み付け

以上の検討から、切断区間の交通量、第一迂回路の長さ及び混雑度をそれぞれ評価し、回帰分析結果に基づく重み付けで総合化を施せば、平常時の輸送機能の観点からの道路の防災上の重要性を概ね評価できることが確認された。これらの評価項目の階層図への反映にあたっては、第一迂回路の長さや混雑度が道路の代替性（リダンダンシー性）を表す評価項目であることから、代替性を評価する下位項目として位置付けている。

4.1.5 防災拠点

更に、本研究では、図-5に示した理想的なネットワークモデルに防災拠点を仮定し、閉塞区間を種々の位置に仮定したネットワーク解析を施すことにより、道路の区間閉塞が地震時の輸送機能（緊急活動に係る交通）に及ぼす影響度を評価した。その結果、地震時の輸送機能には、防災拠点へ向かう交通が区間閉塞に伴って迂回する距離（防災拠点へのアクセス性）が大きな影響を及ぼすことが認められた。そこで、地震時の輸送機能の観点から道路の防災上の重要性を評価する場合に考慮する評価項目として、防災拠点へのアクセス性を考慮することとした。

4.2 新しい階層の提案

4.2.1 新しい階層の考え方

既に述べたとおり、簡便法において課題とされ

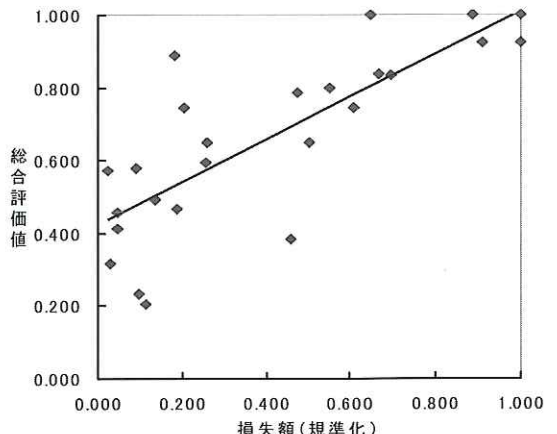


図-6 損失額と3諸量の関係

た評価結果の妥当性を高めるための検討を実施し、道路が被災した場合に平常時と地震時の輸送機能が受ける影響の大きさを評価するための評価項目を提案するとともに、項目毎の評価を総合化する際の重みを提案した。さらに定量評価が困難な評価項目であっても、道路の重要性評価に考慮することが不可欠な場合が想定される評価項目もあり、防災担当者が状況に応じた評価を設定することもできるため、そのような評価項目についても、道路の防災上の重要性評価に考慮すべき項目として階層図に整理した。提案は図-1に示した3つの本質的要素を基本としながらもやや異なった要素も加わっている。提案した階層図を図-7に示す。この階層図では、構造物の耐震性および地震ハザードを評価するための下位項目を取り除いている。これは、例えば構造物の耐震性については、耐震補強が本当に必要な構造物を厳選して抽出するという観点から、点数評価を行う簡便法の採用を避け、地震応答解析等の科学的な手法を採用して評価する方針を選んだためである。

4.3 階層の重み付け

このように階層図を準備して総合的に評価する手法を用いる限り、重み付けが必要になる。図-7において大項目に位置づけたネットワークの重要性の下位にある中項目以下の網掛けした項目の重み付けはネットワーク解析に基づく検討結果を用

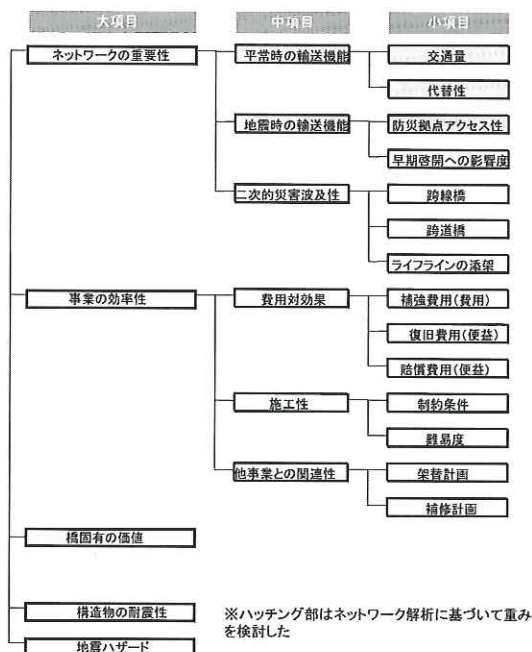


図-7 新しい階層図

いる。また、落橋の可能性、構造的脆弱性、地震ハザードについては、別途研究中の定量的な評価手法を用いて評価する。事業の効率性、橋固有の価値は、現場において実施段階で考慮される可能性がある項目であり、これを階層に入れる事は是非自体が今後検討されるべきであるが、階層図に入れる場合には、下位の項目の点数評価を総合化する際の重みを科学的根拠に基づいて設定することは難しいので、AHPを用いることになる。

大項目間の関連づけはAHPを用いることも考えられるが、今後の課題にも触れるように最適投資の観点から手法を限定せず検討して行く事になる。

4.4 試算結果

新しい提案手法については、構造物の耐震性、地震ハザードの評価手法に関する検討が終わっていない事から、ここでは、構造物の重要性のみを考慮した場合の試算結果を示す。構造物の重要性を評価するための評価項目としては、ネットワークの重要性を考慮することとし、現場によって評価が大きく異なることが考えられる事業の効率性と橋固有の価値は評価対象から除外した。

試算結果の一例を図-8に示す。同図では、道路の区間が被災した場合の損失額をネットワーク解析に基づいて算定した結果を、道路区間の線種で示している。また、道路区間上に位置する構造物がプロットで示されており、階層図に基づいて優先度を決定した試算結果がプロットの形状等で表現されている。図-8から、ネットワーク解析により損失額が大きいと評価された道路区間に位置する構造物については、優先度も概ね高く評価されている。また、矢印マークを付した跨線橋・跨道橋については、道路の同一区間内のその他の橋梁よりも高い優先度が評価されている。以上から、階層図に基づいた簡便な優先度の評価であっても、科学的なネットワーク解析に基づいた評価を大局的に捉えた結果が得られていることが認められる。

5. 今後の課題

以上、簡便法を最初に示し、さらにより合理性が保証された評価手法の検討について現段階での成果を示した。残念ながら現段階では実務の場で最終的にどのような手段で優先度を決定して行くかを提案する段階まで到達していない。今後の方針もまだ検討に応じて流動的に見直す必要も出てくると考えている。現段階で今後手法を提案する



図-8 試算結果

上での留意点を列挙する。

(1) 階層に基づく総合評価手法とB/Cに基づく手法の関係づけ

現在国総研では地震ハザードと構造物の脆弱性とを考慮して人的・経済的損失を算定し、補修費(C)と損失低減額(B)を求める手法を開発中である。論理的に明快なのはB/Cを求める手法であるが計算には費用と時間を要する。以上を踏まえ、手法の一本化、あるいはスクリーニングに今回提案した手法を用いるなど、関係づけが必要となる。

(2) メリットの検証

これまで、結果の科学的妥当性に基づいた方法を提示しようとしてきた。最適解の定義すら不明である以上、提案した手法が最適であることを説明できない。むしろ提案手法に従って検討すれば、現在の方法に比べてどのような観点から、どれだけのメリットが発揮されるのかを検証し、それが満足できる水準であれば目的を達成したと見ること一つのアプローチである。もう一つのアプローチは説明されるメリットから、最適解を評価する上での基軸となる観点を定義した上で、その観点において十分に最適解に近い結果を得られる方法論を研究の最終成果とする事である。

(3) 評価プロセスの決定

今回提示した階層から、どのようなプロセスで優先順位を付けるか、現段階ではAHPを基本と

しているが、地震リスクと構造物脆弱性については単純なスクリーニングの基準とし、重要度だけで優先順位を決めて行く手段もある。(2)の検討と合わせ今後の課題である。更に現場において評価結果を事情に応じて見直す作業が必要になってくる場合があり、現在の階層にはこれが組み込まれているが、それを分離し、現場の事情による順番の変更について指針を示す選択肢も考えられる。

目標が明示されそれに向けた効果的な達成シナリオの実施、および目標の達成水準を具体的に説明できる防災事業への転換に資する研究成果となるよう、以上の課題を解決してゆきたいと考える。

日下部毅明*



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター地震防災研
究室長
Takeaki KUSAKABE

中尾吉宏**



国土交通省国土技術政策
総合研究所企画部研究評
価・推進課課長補佐(前
地震防災研究室研究官)
Yoshihiro NAKAO