

橋梁の機能性評価と耐震補強への応用

Evaluation of bridge function and its application to earthquake retrofit

北見工業大学大学院	○学生会員	但木純(Jun Tadaki)
北見工業大学	フェロー	大島俊之(Toshiyuki Oshima)
北見工業大学	正会員	三上修一(Shuichi Mikami)
(独)北海道開発土木研究所	正会員	佐藤京(Takashi Satoh)
(財)北海道道路管理技術センター	正会員	竹田俊明(Toshiaki Takeda)

1. はじめに

世界有数の地震国である我国では、今日までに数多くの土木構造物が地震による被害を受けている。橋梁をはじめとする土木構造物が地震により被害を受けることは、被災者の救助や被災地への救援物資の輸送に大きな影響を及ぼし、その結果として二次的な被害を促す。また復旧までの間、都市間輸送においては遮断や迂回という場合も予想され、経済的にも大きなダメージを与える。特に北海道では道央圏から各地方中枢都市までの距離が長く、それら相互を結ぶ交通ネットワークも乏しいために、1つの交通規制が与える周囲への影響は、多大なものとなる。したがって、災害時における被害を最小限に抑え、交通ネットワークの早期復旧を実現してゆくためには、道路橋に対する的確な耐震補強業務が必要である^{1),2),3),4)}。

平成15年9月26日に発生した十勝沖地震の際、北海道では国道橋4橋が復旧までに数日間を要する被害を受けた。これら4橋はいずれも多径間長大橋梁であり、道路ネットワーク上、重要な役割を担う橋梁であったため沿道住民や地域間の物流に対する影響が大きかった。一方では、震災以前から変位制御装置の取り付け等の耐震対策が取られていたために、被害を抑制し、早期復旧を可能にしたことが報告されている^{5),6)}。これらの状況を踏まえて橋梁の耐震補強の事業計画においては、橋梁そのものの地震に対する抵抗力を評価するとともに、各々の橋梁が有する機能性や社会的(資産的)価値、被害を受けた場合の社会的影響度を考慮にいれ、耐震補強の優先順位を決定する必要がある。

本論文では、橋梁の機能性評価に加え、橋梁の重要度と迂回による損失を含めた耐震補強の優先順位決定手法を検討するとともに、それを実橋梁に適用し、各因子の影響度や妥当性を検討した結果を報告する。なお本論文で扱う『耐震性』とは、地震の衝撃によって起こる破壊に耐える性能という意味にとどまらず、震災時でもユーザーが十分な安全の下で使用できるための性能という広義な意味を含めたものとする。

2. 耐震補強優先順位の検討

2.1 耐震補強必要度レベル

耐震補強優先順位の決定にあたり、橋梁の機能性評価、橋梁の重要度係数、迂回路係数を決定因子とした耐震補

強必要度レベル: En を検討する。 En の算出式を式(1)に示す。

$$\text{耐震補強必要度レベル: } En = (1 + \gamma)(1 + \delta) \left(\frac{F_{I0} - F_I}{F_{I0}} \right) \quad (1)$$

γ : 橋梁の重要度係数

δ : 迂回路係数

F_I : 橋梁の機能性評価指数, F_{I0} : 100

式(1)より、耐震補強必要度レベルの数値が高い橋梁から耐震補強の対象とするものとする。以下に各係数の具体的な算出手法について述べる。

2.2 橋梁の重要度係数 γ

橋梁の重要度係数 γ は、橋梁自身の資産的価値を指標とするため、現在同じ機能の橋梁を建設した場合に要する再調達価格(建設費)を考慮した。橋梁の再調達価格は各部材の単価を合計したもので、橋梁の規模や部材の種類によって決まる値である。ここでは、北海道にある国道橋の再調達価格の合計をその橋梁数で除した値を平均再調達価格とし、各橋梁の再調達価格を平均再調達価格で除した値を橋梁の重要度係数 γ と定義する。橋梁の重要度係数 γ により、長大橋梁など資産的価値が高い橋梁の重要性を考慮することができる。つまり再調達価格が高い橋梁は、地震により被害を受けた場合、補修や補強の際にも高いコストが必要となるため、早期に耐震補強の対応をすべき橋梁として En の値に反映させることが可能である。

2.3 迂回路係数 δ

迂回路係数 δ は、地震による被害で橋梁の通行が不能となり、別の安全なルートへ迂回した場合の損失を、走行経費を算出することで考慮した。迂回路係数 δ の算出式を式(2)に示す。

$$\text{迂回路係数} : \delta = \frac{C_d - C_u}{C_u} \quad (2)$$

C_d : 迂回路線の走行経費

C_u : 通常路線の走行経費

迂回路係数 δ により、迂回に距離を要する路線と交通量が大きく重要性が高い路線を統一して選定することができる。

3. 橋梁の機能性評価

3.1 機能性評価項目の確立

橋梁の機能性評価は、橋梁の3つの寿命(物理的寿命、経済的寿命、機能的寿命)のうち機能的寿命に着目し評価する。橋梁の機能的寿命とは、構造物が時代の変遷とともに要求される機能を果たすことができなくなることによる寿命で、この橋梁に要求される機能を現在どれほど備えているかを示したものが橋梁の機能性評価である⁷⁾。橋梁の機能性評価の階層と重み係数を図-1、橋梁の機能性評価指数の算出式を式(3)に示す。図-1より橋梁の機能性評価は、大きく5つの項目(レベル2)に分けられる。但し、ここでは耐震補強必要度レベルの決定因子として用いるために、耐震性と関連がある「構造安全性」「使用性」「維持管理性」の3項目を評価対象とする。したがって、「環境適合性」と「将来適応性」の項目については、評価しないものとし、対象とするすべての橋梁に点を与えて機能性評価を算出する。

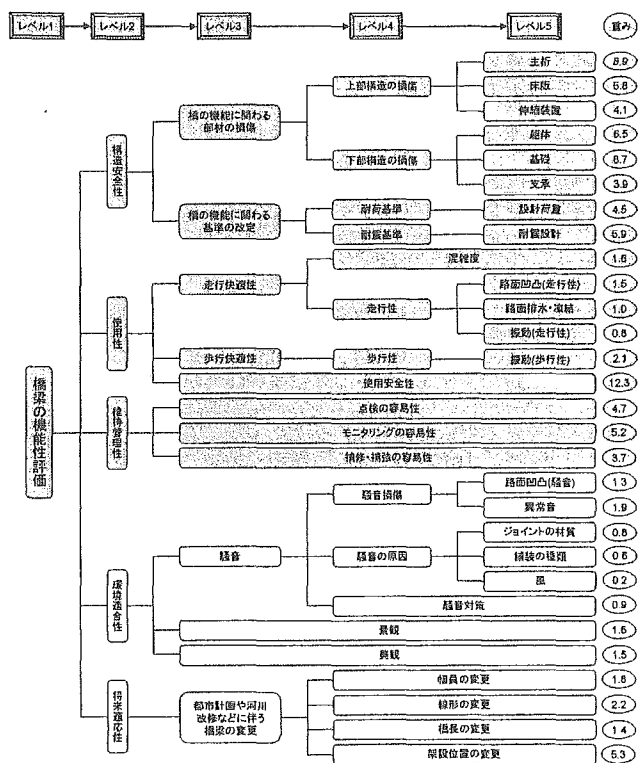


図-1 機能性評価の階層と重み係数

$$\text{橋梁の機能性評価指数} : F_t = \sum_{i=1}^{29} (I_i \times W_i) \quad (3)$$

I_i : 各項目の点数(1点満点)

W_i : 各項目の重み係数

3.2 構造安全性

「構造安全性」は橋梁の構造物としての安全性を評価

する項目で、部材の損傷により評価する「橋の機能に関わる部材の損傷」と、橋梁の設計基準から評価する「橋の機能に関わる基準の改定」の2つに分けられる。

(i) 橋の機能に関わる部材の損傷

橋の機能に関わる部材の損傷とは、対象部材に損傷があることによって安全に橋梁を通行できなくなる損傷のことを指し、物理的健全度のように損傷そのものを評価するのではなく、その損傷があるために起こる影響について評価する項目である。耐震性との係わりとしては、震災時に緊急輸送路線として使用される際に、その機能を十分に果たすことのできる健全度を備えているかを評価することである。評価は「橋梁点検要領(案)」⁸⁾に従い評価されている点検データを対象とし、損傷ランクにより配点する。

(ii) 橋の機能に関わる基準の改定

橋の機能に関わる基準の改定とは、車両の大型化などに伴い安全性の向上を目的とした示方書等の設計基準の改定を指し、改定以前の基準に従って設計された橋梁の安全性を評価する項目である。ここでは「設計荷重」と「耐震設計」の2つの項目から評価する。

・「設計荷重」

設計荷重は現在に至るまで、貨物輸送の増大への対応と床版構造の耐久性向上を目的として数回の改定がなされている。改定以前に設計された橋梁のうち、現在までに主桁、床版・床組の補強が行われていない橋梁については、機能性に欠いているものとして評価する。

・「耐震設計」

設計水平震度は、規模の大きい地震が起こる可能性の高い地域(地域区分:A)を基準としており、地域別補正係数によりA~Cの地域区分に対応した設計水平震度が定められている⁹⁾。「設計荷重」と同様に、基準を満たさない橋梁のうち補強が行われていない橋梁を、機能性に欠いているものと評価する。

3.3 使用性

使用性では、歩行者やドライバーが橋梁を利用する際の快適性や安全性に重点を置き機能性を評価する。ここでは、「使用安全性」の重み係数が12.3と各項目のうちで最も大きく、機能性評価に大きく影響する。「使用安全性」の具体的な評価内容は図-2に示す5項目から構成されている。

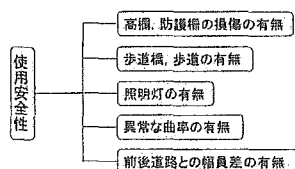


図-2 使用安全性の構成

3.4 維持管理性

各種維持管理業務を遂行する上での容易性を評価する。具体的には、点検、モニタリング、補修・補強の3つに分けられ、点検路の有無や交差物件の種類、構造形式により評価される。特に地震による被害を受ける確率が高い地域にある橋梁においては、今後、モニタリング技術

の進展が期待されている¹⁰⁾。図-3に「モニタリングの容易性」の構成を示す。

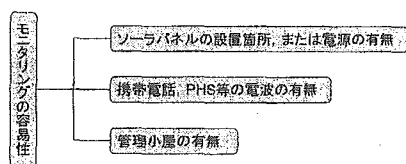


図-3 モニタリングの容易性の構成

4. 実橋梁における耐震補強優先順位の決定

4.1 機能性の向上と耐震補強

耐震補強必要度レベル En の値により決定した優先順位に従い事業を計画する上で、各々の橋梁にどのような補強(改良)を施すかが重要な課題である。震災直後から復旧までの間、橋梁に要求されるあらゆる機能を想定すると、機能性の向上を含めた耐震補強を計画する必要がある。したがって、落橋や下部構造の破壊に対する機能が十分に備わっている橋梁についても、使用性や維持管理性といった観点からの機能性の向上がなされるべきである。以下に実橋梁で優先順位を算出した結果を基に検討する。

4.2 耐震補強必要度レベル En の算出

実橋梁を対象に耐震補強必要度レベル En を算出し、事業の優先順位を決定する。ここで対象とする橋梁は、北海道網走管内と十勝管内の国道橋の中から、橋長や構造形式、架設環境などを考慮し各管内から4橋ずつ、計8橋を選定した。A～H橋の諸元データを表-1に示す。

表-1 選定橋梁の諸元データ

橋梁	支庁	架設年	上部材料	橋長	交差	環境	構造形式	歩道	地域区分
A	網走	1958	コンクリート	12	河川	山間	RC T桁	有	C
B	網走	1968	鋼	384	河川	田園	トラス橋	有	C
C	網走	1970	鋼	23	河川	海沿い	I桁(合成)	無	C
D	網走	1986	鋼	33	鉄道	田園	I桁(合成)	有	C
E	十勝	1957	コンクリート	263	河川	市街地	ボスデンPC桁	有	A
F	十勝	1969	鋼	72	河川	市街地	鋼合成桁	無	A
G	十勝	1970	鋼	166	鉄道	市街地	連続鋼合成桁	有	A
H	十勝	1972	コンクリート	554	河川	田園	ボスデンPC桁	無	A

選定した8橋の重要度係数 γ 、迂回路係数 δ 、橋梁の機能性評価指数 F_i を式(1)の En の算定式に代入し、8橋の耐震補強優先順位を求めた。 F_i と En の結果を表-2に示す。

表-2 選定橋梁の F_i と En

支庁	網走				帯広			
橋梁	A	B	C	D	E	F	G	H
F_i	83.47	64.80	61.94	84.66	67.54	73.74	77.03	60.57
En	2.91	2.13	4.50	1.15	3.54	3.06	1.37	5.40

表-2より En の値は、1.15～5.40の範囲で算出された。したがって、耐震補強の優先順位はH橋、C橋、E橋、F橋、A橋、B橋、G橋、D橋の順と判定される。

4.3 機能性の検討

En が上位4橋の機能性評価について、項目ごとの点数をまとめた結果を図-4に示す。図-4について、「上部構造」は「主桁」「床版」「伸縮装置」の平均の点数、「下部構造」は「躯体」「基礎」「支承」の平均の点数、「走行快適性」は「混雑度」「路面凹凸(走行性)」「路面排水」「振

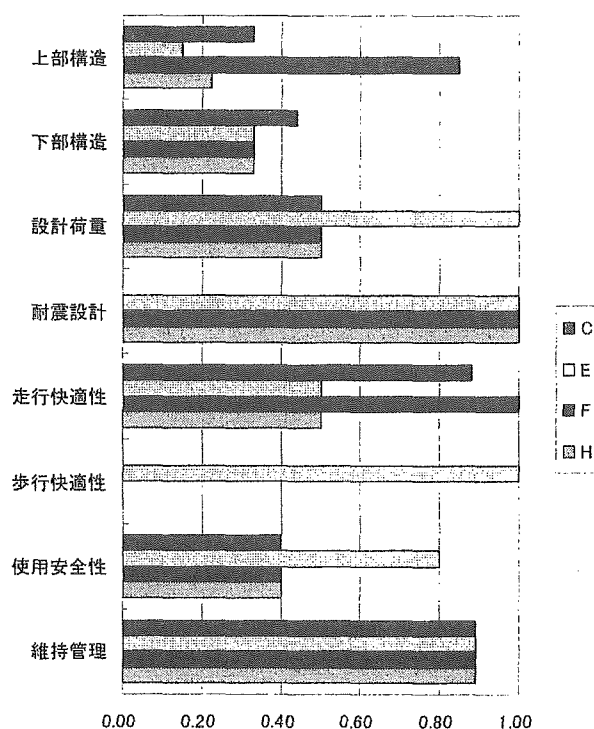


図-4 機能性の項目ごとの評価

動(走行性)」の平均の点数、「維持管理」は「点検の容易性」「モニタリングの容易性」「補修・補強の容易性」の平均の点数を表している。

まず En の値が5.40と最も大きいH橋について見ると、「上部構造」「下部構造」の点数が共に低いため、構造系に重点を置いた機能回復の対策が必要と判断される。これはE橋についても同様のことが言える。また歩道橋や歩道が架設されていないため、「歩行快適性」の点数が0となっている。これはC橋、F橋についても同様であり状況に応じて歩道橋の架設、もしくは歩道の添架といった対策が必要である。「使用安全性」については、C橋、F橋、H橋が共に低い評価であるため、安全性の向上に重点を置いた改良対策が必要である。「耐震設計」については、 $En=4.50$ のC橋の設計水平震度が基準値を満たしていないため、対応する部材の補強対策が必要である。

4.4 各係数の耐震補強必要度レベル En への影響

各係数の En への影響度を検討するにあたり、 En が上位3橋と下位2橋の橋を対象に調べた。5橋の各係数と En のランキングを図-5に示す。

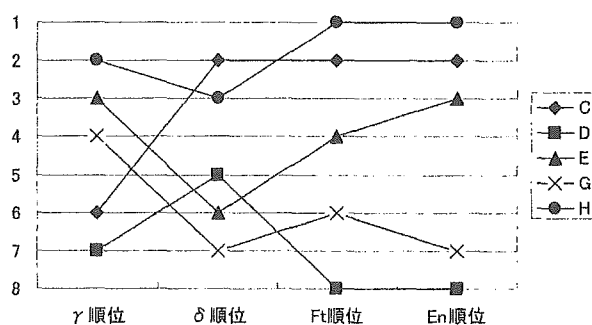


図-5 各係数と En のランキング

図-5 について、縦軸は順位を表し、 γ 、 δ は値の大きい順位、 F_i は指数の低い順位、つまり各係数の順位は耐震補強の優先度が高い順位を表している。 En が 1 位の H 橋は、 γ 、 δ が共に上位であり、 F_i も最も低いことが En に影響したと判定される。次に C 橋については、 γ の順位が下位ではあるが、その他の係数が上位にランキングしているため、 En が上位になったと判定される。また D 橋については δ の順位、G 橋については γ の順位が中位にあがっているが、その他の係数が下位にランキングされていることにより、 En が下がり耐震補強の必要性が低い結果となったと判定される。したがって、 En は関係するひとつの因子の状態によって決定する値ではなく、すべての決定因子の状態が影響して決定する値であることがいえる。

5. 結論

本論文では、橋梁の保持する社会的(資産的)価値、通行規制による迂回によって生じる損失を考慮した橋梁の重要性についての評価手法を述べるとともに、橋梁の機能性向上を視野に入れた耐震補強順位を決定するために、耐震補強必要度レベル En を提案した。また実橋梁で耐震補強優先順位を算出し、妥当性を検討した。以上より、得られた結果を以下に要約する。

- 1) 橋梁の再調達価格を橋梁の重要度係数 γ で表すことにより、橋長、構造形式、使用材料による橋梁資産の違いを係数として考慮することができた。
- 2) 迂回により発生する損失を考慮することで、災害時に確保すべき橋梁を、迂回の距離と交通量から係数として表すことができた。
- 3) 橋梁が保持する安全性能、使用性能などを総合的に評価し、点数化することにより、橋梁の機能性評価を算出することができる。また項目別の算出結果より、橋梁全体の機能性低下に影響を及ぼしている原因を明確にし、改善計画の参考とすることができる。
- 4) 耐震補強必要度レベルを用いることで、橋梁の重要性、必要性など幅広い観点から、機能性向上を含めた耐震補強の優先順位を決定することができる。

今後の課題として、橋梁の機能性評価を求める際に、現状では不足するデータが多いことから、今後は橋梁点検の際の点検項目として確立し、データを蓄積してゆく必要がある。また橋梁の機能性評価の項目については、地域によって橋梁に要求される性能は異なることが考えられる。したがって、その影響度を考慮し、評価項目の妥当性を検討して行くことが必要である。

また、耐震補強必要度レベルを用いて実際の業務計画を立案するためには、データから順位算出までの流れをシステム化することが必須であり、今後の重要な課題と考えている。

謝辞

本研究をおこなうにあたり(株)フジエンジニアリング(本学客員教授)秋本正信氏にたくさんの助言を頂きました。記して感謝の意を表します。本研究は平成 16 年度日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号: 15560401 代表者: 大島俊之)の補助を受けて行われました。

参考文献

- 1) 池田憲二, 杉本博之, 國松博一, 川神雅秀, 吉澤努: 既設道路橋の耐震補強優先度評価手法と優先度評価支援システムの構築に関する検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 60 号, pp10-13, 2004
- 2) 杉本博之, 後藤晃, 首藤諭, 渡辺忠明, 田村亨: 北海道の橋梁のユーザーコストと BMS に関する一試みとその利用について, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp347-357, 2001
- 3) 西川和廣: 道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp1-10, 1994
- 4) 土木学会: 社会資本のアセットマネジメント導入に向けて, 土木学会誌特集, Vol.89, pp9-47, 2004
- 5) 池田憲二: 道路関係施設の被害, 北海道開発土木研究所月報, 平成 15 年十勝沖地震被害調査報告, pp23-26, 2003
- 6) 宗廣一徳, 高橋尚人, 浅野基樹: 道路交通への影響, 北海道開発土木研究所月報, 平成 15 年十勝沖地震被害調査報告, pp41-51, 2003
- 7) 三上修一, 大島俊之, 山崎智之, 長谷川孝治, 佐藤誠: 橋梁機能性を考慮した健全度評価方法の検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 1-140, pp279-280, 2004
- 8) 建設省土木研究所: 橋梁点検要領(案), 土木研究所資料, 第 2651 号, 1988
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002
- 10) 坪田豊, 宮森保紀, 大島俊之: 地震防災ネットワークとしての札内清柳大橋のモニタリングについて, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 1-444, pp885-886, 2004