

既設道路橋の耐震補強優先度評価に対する AHPの適用性の検討

大谷康史¹・日下部毅明²・村越潤³

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 独立行政法人土木研究所 橋梁構造チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

1995年の阪神・淡路大震災後、既設橋梁の耐震補強が順次進められているが、予算的な制約などにより、全ての既存橋梁の耐震補強を同時に行うことはできない。そのため、限られた予算の中での効率的・効果的な地震対策の推進が課題となっており、そのために客観的かつ定量的な補強優先度の評価手法が求められている。そこで、本研究では耐震補強優先度に関する指標を抽出し、階層的に整理された指標に対してAHP(階層分析法)を用いてそれぞれの指標に対して重み付けを行い、補強優先度に対する各指標の影響度を求めた。また、この指標および重みを用いて、大阪市の橋梁を対象としてケーススタディーを行い、AHPの適用性について検討した。

Key Words : *Analytic Hierarchy Process, Seismic Retrofitting of Bridge, Prioritization, Seismic Performance*

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災による土木構造物の被害発生を受けて、その後既設構造物の耐震補強工事が全国で進められてきており、新道路整備5箇年計画が終了する平成14年度末には、緊急輸送道路内の橋梁の耐震補強が概成する予定である。ただし、予算的な制約などから、緊急輸送道路に含まれない橋梁については、今後耐震補強を行う橋梁も残っている。東海地震、首都圏直下型地震等の切迫性が指摘される中、限られた予算の中での効率的・効果的な地震対策の推進が課題となっており、また公共事業においても一層のアカウントビリティーの向上が求められている状況の中、客観的かつ定量的な補強優先度の評価手法が求められている。このようなニーズに対して、土木学会の提言¹⁾等の中では補強優先度に関する基本的な考え方が示されているほか、各研究者により優先度評価手法の研究が行われて、一部の地方自治体では管理橋梁の優先順位付けも行われている。本文では、既設構造物の耐震補強小委員会補強優先度WGの中で整理された既設橋梁の補強優先度評価項目²⁾を基にして、各項目の評価点を設定し、各項目間の重み付けをAHP (Analytic Hierarchy Process: 階層化意志決定法) により検討した結果およびその結果を用いた大阪市の橋梁を対象としたケーススタディーについて述べる。

2. 補強優先順位付け

(1) 耐震補強優先度の評価手法の概要

本検討は、既設構造物の耐震補強小委員会補強優先度WGの中で整理された既設橋梁の補強優先度評価項目表(表-1)を基本とし、この項目に従って既設橋梁の補強優先度評価を試みようとするものである。土木学会第3次提言(2000)¹⁾では、「予算と時間の制約条件のもとで対象構造物を適切に選定するには、耐震補強に関連する要因を網羅的に抽出し、それらを可能な限り定量的に評価した上で、客観的判断を下すことが望ましい。」とある。最も客観的で定量的な指標は、金銭価値であり、提案されている項目を全て貨幣換算し、B/C等で評価することであると考えられる。しかし、現時点において実用化されている評価手法では、景観の変化などは「便益として計測可能であるが精度が高くない項目」であり、災害時の代替路確保などは、「便益として計測が困難な主観的非市場的価値である」との検討結果がある³⁾。そこで、本検討におけるケーススタディーでは、各項目について金銭価値に換算するのではなく、評価項目に沿った評価指標を設定し、評点を付けるものとした。また、それらの評価点は単純に合計するのではなく、各項目が持つ重要性が

表-1 耐震補強優先度の評価項目と評価指標

評価項目	評価の視点	評価指標
大分類/中分類/小分類		
路線・区間の重要性 (道路利用者の利便性・安全性向上)		-
平常時の利用		
交通容量	交通容量の大きい道路の保全	道路幅員
交通状況	車両の交通を確保	全車両交通量
	大型車の交通を確保	大型車交通量
	歩行者がよく利用する交通を確保	通行歩行者数
	公共交通の交通を確保	公共交通利用度合い
地震時の輸送機能		
沿道状況	ＤＤ地区、商業地区など、被災者の発生が高いと予測される場所への交通を確保	地域区分
	火災発生危険度が高い場所への交通を確保	火災延焼危険度
防災上の路線区分 (緊急輸送道路)	緊急輸送道路や確保隣接府県との交通の確保	防災上の路線区分
代替性	代替性が高い交通路や、あっても時間がかかる場合を優先	迂回路の有無
二次災害波及性		
橋下種別	橋下の鉄道の被害軽減	鉄道との橋下交差条件
	橋下の道路の被害軽減	道路との橋下交差条件
添架物件	添架物件への被害軽減	添架物件の有無
橋固有の価値		
良好な景観性	良好な景観の保全	景観に優れた橋梁
歴史的価値	歴史的橋梁の保全	建設年次が昭和初期以前の橋梁
構造的なぜい弱性 (構造物としての耐震性の向上)		
適用基準	適用道路種別による耐震性の向上	*
上部構造		
構造形式	桁形式による耐震性の評価	*
平面線形	平面線形による耐震性の評価	*
下部構造		
材料種別	材料種別による耐震性の評価	*
構造形式	橋脚形式による耐震性の評価	*
	鉄筋配置による耐震性の評価	*
	基礎形式による耐震性の評価	*
落橋防止構造	落橋防止構造による耐震性の評価	*
支保構造		
種類	支保種類による耐震性の評価	*
地盤条件		
地盤種別	地盤種別による耐震性の評価	*
液状化の可能性	液状化危険度による耐震性の評価	*
地震切迫性 (地震危険度の考慮)		
地震切迫度	大規模地震の危険性	地震時の想定震度
補強効率性 (事業の効率的性の向上)		
耐震補強工事の難易度		
耐震補強工事施工に伴う制約条件	耐震補強工事施工に伴う制約条件	補強工事時の周辺環境
耐震補強工事施工法の特殊性	耐震補強工事の難易度 (対策効果の信頼性)	耐震補強作業の難易度
復旧工事の難易度		
復旧工事施工に伴う制約条件	復旧工事施工に伴う制約条件	復旧工事時の周辺環境
復旧工事施工法の特殊性	復旧作業の難易度 (対策効果の信頼性)	復旧作業の難易度
ライフサイクルコスト		
耐震補強費用	耐震補強に要する費用が安い橋梁を優先させる	耐震補強費用
復旧費用	被災時の復旧費用の高い橋梁を優先させる	被災時の復旧費用 (橋梁)
橋梁の維持管理計画	橋梁の架け替え・耐震補強以外の補修・補強工事との同時施工による工費減が高い橋梁を優先させる	橋梁の供用年数

注：本ケーススタディにおいて、構造的なぜい弱性 (*印) は、表-3に基づいて設定。

最終結果に反映されるように、各項目に応じた重要度を設定する必要がある。その手法として、直接数値化することが困難な項目でも、一対比較の判断を用いて数値化が可能なAHPを用いることとした。

(2) ケーススタディ対象の設定と指標の設定

今回のケーススタディでは、既存データを活用することを前提とし、評価対象を選定した。その結果、ケーススタディの対象として、既に実務において優先度評価を行い、これに従い耐震補強を進めている大阪市の橋梁を用いることとし、関連するデータを収集した。収集したデータを検討し、優先度評価項目に対応した評価指標を表-1に示すとおり設定した。評価点は構造的なぜい弱性を1項目として、全23項目に対して、0~3の4段階で設定することとし、収集データの種類の、既存の研究成果⁴⁾⁵⁾を参考にし、表-2のとおり設定した。なお、構造的なぜい弱性については各評価項目毎の設定は行わずに、

表-2 評価指標に対する評価点の設定

評価項目	評価指標	評価点			
		0	1	2	3
路線・区間の重要性 (道路利用者の利便性・安全性向上)					
平常時の利用					
交通容量	道路幅員	-	7m未満	7m以上	13m以上
交通状況	全車両交通量 (平日12h上下総合計値)	-	1000台未満	1000~10000台未満	10000台以上
	大型車交通量 (平日12h上下総合計値)	-	1300台未満	1300~4000台未満	4000台以上
	歩行者数 (1日)	-	1500人未満	1500~3000人未満	3000人以上
	公共交通利用度合い (バス路線)	路線あり	-	路線あり	-
地震時の輸送機能					
沿道状況	地域区分	田園・山岳・工業地区	住宅地区	商業地区	ＤＤ地区
	火災延焼危険度	-	該当しない	-	該当
防災上の路線区分 (緊急輸送道路)	緊急輸送道路の有無	該当無	1つ該当	2つ該当	3つ該当
代替性	迂回路の有無	-	有	-	有
二次災害波及性					
橋下種別	橋下鉄道種別	無	貨物線	-	旅客線
	橋下道路交通量	無	1000台未満	1000~10000台未満	10000台以上
添架物件	電気、水道、N.Y.T.ガス	無	単一添架	-	複数添架
橋固有の価値					
良好な景観性	大阪市の代表的な橋梁を対象	該当せず	-	該当	-
歴史的価値	建設年次が昭和初期(1934年)以前の橋梁	該当せず	昭和初期	特定	昭和以前
構造的なぜい弱性 (構造物としての耐震性の向上)	点数の算出は、表-3による	-	30点未満	30~120点未満	120点以上
地震切迫性 (地震危険度の考慮)					
地震切迫度	指定震度	震度5強以下	震度6弱	震度6強	震度7
補強効率性 (事業の効率的性の向上)					
耐震補強工事の難易度					
耐震補強工事施工に伴う制約条件	橋下条件：河川・鉄道：2点 道路：1点 その他：0点 周辺環境：住宅・商業・DID：1点 その他：0点	0点	1点	2点	3点
耐震補強工事施工法の特殊性	耐震補強工事の難易度	-	-	-	-
復旧工事の難易度					
復旧工事施工に伴う制約条件	橋下条件：河川・鉄道：2点 道路：1点 その他：0点 周辺環境：住宅・商業・DID：1点 その他：0点	0点	1点	2点	3点
復旧工事施工法の特殊性	復旧作業の難易度 ・最大支保長が15m以上 ・橋下が河川もしくは鉄道	-	該当無	1つ該当	2つ以上該当
ライフサイクルコスト					
耐震補強費用	耐震補強費用	-	概算1000万円以上	概算1000万円未満	概算500万円未満
復旧費用	被災時の復旧費用 (橋梁)	-	橋長が500m未満	橋長が500m以上	橋長が1000m以上
橋梁の維持管理計画	橋梁の供用年数	-	供用40年未満	供用40年以上	供用50年以上

注：評価点が高い方が、補強優先度が高い。-は、評価点の設定無し。

表-3 大阪市の耐震性評価表⁴⁾

評価項目	評価指標	評価点および分類				備考
(A) 地震外力						
① 適用示方書	5.0	大正13年以前	1.0	昭和44年以前	1.0	昭和45年以降
② 地盤種別	2.0	4種	1.5	3種	1.2	1種
③ 液状化の可能性	1.0	大	1.5	中	1.1	小
評価点 P A	①×②×③	(min)	1.0	1.0	1.0	24.0
(B) 上部構造						
④ 上部構造形式	2.0	ゲルバ(桁)	1.5	1種類の単純支持	1.0	その他
⑤ 平面線形	1.5	斜線・曲線	1.0	直線		
⑥ 上部構造材料	1.2	RC・PC	1.0	鋼		
⑦ 耐震筋配	1.2	6%以上	1.0	6%未満		
⑧ 落橋防止構造	2.0	無し	1.0	有り		
⑨ 桁長	1.5	35m以上	1.0	35m未満		
⑩ 桁幅員	1.0	A/S ≤ 1	1.0	A/S > 1		
評価点 P B	④×⑤×⑥×⑦×⑧×⑨×⑩	(min)	1.0	1.0	1.0	24.0
(C) 下部構造						
⑪ 下部構造形式	2.0	T形、L形、単柱	1.0	その他		
⑫ 下部構造材料	2.0	鋼鉄コンクリート	1.0	その他		
⑬ 基礎形式	2.0	基礎	1.5	1.5m以上10m未満	1.0	5m未満
⑭ 橋台のバランス	3.0	不均一	1.0	均一		
⑮ 鋼点検結果	2.0	強弱対策必要	1.0	その他		
⑯ 耐上部構造	3.0	耐上部構造	1.0	その他		
評価点 P C	⑪×⑫×⑬×⑭×⑮×⑯	(min)	1.0	1.0	1.0	216.0
評価点 (X)	P A × P B × P C	(min)	1.0	1.0	1.0	20156.0

表-3に示す大阪市の設定した耐震性評価表による評価結果を用いることとした。評価指標、評価点の設定等においては、以下のように判断した。

- ・地震切迫度については、大阪市程度の範囲では巨大地震が起きた場合一律に影響がおよぶものとし、評価は大阪市内で想定される上町断層系による地震の想定震度で評価するものとした。
- ・良好な景観性については、景観だけでなく、構造的に優れた橋梁等も選定理由に挙げられているが、大阪市のHPで紹介されている大阪土木技術協会が選定した大阪市の代表的な橋梁57橋に該当するかどうかで評価することとした。

表-5 大分類評価項目に対するAHP実施結果

問1	左側の項目	右側の項目	左側が非常に重要	(左側がかなり重要)	左側が重要	(左側がやや重要)	同じ程度	(右側がやや重要)	右側が重要	(右側がかなり重要)	右側が非常に重要
A	路線・区間の重要度 路線・区間の重要度と、構造的な脆弱性は共に重要であるが、同じ程度ではなく、前提条件によって異なるという結論で、左側が重要、右側が重要な両論併記となった。	B 構造的な脆弱性	a		○	d, f, h i	b, c		○	e, g	
A	路線・区間の重要度	C 地震切迫性 地震切迫性には、今回の対象が都市部の限定範囲で、差が出にくく、相対的に重要性が低くなるとし、左側が非常に重要と左側が重要な間との結論。	f, h, i	●	a, b, d e				c, g		
A	路線・区間の重要度	D 復旧効率性 理想論でいえば、路線・区間の重要度の方が重要だが、現実の予算確保などを考えると、費用である復旧効率性も重要となる。理想論なら、左側が非常に重要、実際の補強を予算面を含めて考えると同じ程度ということで、両論併記となった。	a, d		○	c, e, g i	f				
B	構造的な脆弱性	C 地震切迫性 地震切迫性には、今回の対象が都市部の限定範囲で、差が出にくく、相対的に重要性が低くなるとし、左側が重要との結論。	e, f		●	b, h	d, g		a, c i		
B	構造的な脆弱性	D 復旧効率性 構造的な脆弱性の方が重要であるという意見で、一致。	g		●	a, b, c d, e, h	i		f		
C	地震切迫性	D 復旧効率性 地震切迫性には、今回の対象が都市部の限定範囲で、差が出にくく、相対的に重要性が低くなるとし、右側が重要との結論。	a, g			b, c, d i			●	e, h	f

表-4 評価点毎の対象橋梁数

評価点	0	1	2	3
A 路線・区間の重要度				
A1 平常時の利用				
A11 交通容量	-	6	29	65
A12 交通状況				
A121 全車両交通量	-	31	5	64
A122 大型車交通量	-	34	5	61
A123 歩行者数	-	42	12	46
A124 公共交通利用度合	39	-	61	-
A2 地震時の輸送機能				
A21 沿道状況				
A211 地域区分	46	18	36	0
A212 火災延焼危険度	-	84	-	16
A22 防災上の路線区分	30	24	38	8
A23 代替性	-	89	-	11
A3 二次災害波及性				
A31 橋下種別				
A311 鉄道交差	94	4	-	2
A312 道路交差	78	10	0	12
A32 添架物件	80	12	-	8
A4 橋固有の価値				
A41 良好な景観性	80	-	20	-
A42 歴史的価値	91	7	2	0
B 構造的な脆弱性	-	48	34	18
C 地震切迫性	2	6	59	33
D 復旧効率性				
D1 耐震補強工事の難易度				
D11 耐震補強工事施工に伴う制約条件	9	18	41	32
D12 耐震補強工事施工工法の特異性	-	61	29	10
D2 復旧工事の難易度				
D21 復旧工事施工に伴う制約条件	9	18	41	32
D22 復旧工事施工工法の特異性	-	4	41	55
D3 ライフサイクルコスト				
D31 耐震補強費用	-	27	15	58
D32 復旧費用	-	39	30	31
D33 橋梁の維持管理計画	-	75	9	16

注：-は、評価点の設定がないことを示す。

・補強工事、復旧工事の制約条件は、工事に伴う交通規制期間や、対外協議の困難さを考慮すべきと考えたが、データ入手しづらいことから、ここでは桁下条件と周辺環境で評価することとした。

・復旧費用については、金額の評価が困難なことから、橋長のみで評価することにした。

ケーススタディー対象として、大阪市が優先度評価を行っている橋梁の中から、100橋を選定し、評価点付けを行った。その結果を表-4に示す。

(3) AHPによる各項目の重みの設定

AHPは意志決定法の一つであり、(2)で設定した補強優先度に関する23項目の評価を持つ100の橋梁の補強優先順位の意志決定のために用いる。意

志決定法には幾つかの方法があるが、本ケーススタディーでAHPを採用した理由を以下に示す。

- ・複数の要素があっても、判断は一対比較により行うので実施が容易。
- ・優先度が階層構造に整理されており、AHPを適用しやすい。
- ・「地震時の輸送機能」と「橋固有の価値」などの比較など、金銭評価が難しい項目でも、それなりの評価が可能である。

表-1はすでに階層化されているので、これに従い13組の各階層構造を構成する評価項目の重みを付けるためにAHPを実施した。本ケーススタディーにおけるAHPの実施条件は以下の通りである。

- ・AHPの回答者は学識経験者、道路管理者、建設業者など、橋梁に関係する土木分野の有識者9名とした。
- ・AHPの評価区分数は、今回のAHP実施対象者のAHPに対する経験等を踏まえ、5区分とした。
- ・複数の回答者によるAHP結果は、最終的に1つの意見に集約する必要がある。集約方法には、AHP用の平均値を求める手法もあるが、本ケーススタディーでは、各自の意見を持ち寄り、それぞれの判断を意見交換し、議論して最終的な結果を得ることとした。これは、各設問の意図や背景を各回答者間で十分共有するためである。
- ・AHPの実施にあたり、前提条件として1つの大都市圏レベルの既設橋梁を対象として、道路管理者の立場で補強優先度を決定するものとした。

回答結果の一部として、大分類評価項目に対するAHP結果を表-5に示す。表-5には、アンケート回答者の当初の回答をa~iとして記載し、議論の概要を左側に記載している。最終的な結論は●あるいは○で記載している。●は回答者全員で合意した見解であり、○は議論の結果、意見が1つに集約できず両論並記となったものである。また、議論の

表-6 AHPの一対比較実施結果

問	左側の項目	右側の項目	比較結果								
			左側が非常に重要	左側が重要	左側がやや重要	同じ程度	右側がやや重要	右側が重要	右側が非常に重要		
問1	A 路線・区間の重要度	B 構造的なぜい弱性	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5
問2	A1 平常時の利用	A2 地震時の輸送機能									
問3	A11 交通容量	A12 交通状況									
問4	A121 全車両交通量	A122 大型車交通量									
問5	A21 沿道状況	A22 防災上の路線区分									
問6	A31 橋下種別	A32 添架物件									
問7	A311 鉄道交差	A312 道路交差									
問8	A41 良好な景観性	A42 歴史的価値									
問9	D1 耐震補強工事の難易度	D2 復旧工事の難易度									
問10	D11 耐震補強工事施工に伴う制約条件	D12 耐震補強工事施工施工法の特長									
問11	D21 復旧工事施工に伴う制約条件	D22 復旧工事施工施工法の特長									
問12	D31 耐震補強費用	D32 復旧費用									
問13	D31 耐震補強費用	D32 復旧費用									

表-7 設問毎の整合度

問	整合度	備考
問1	0.084	AとB：左側が重要、AとD：左側が非常に重要な場合
	0.162	AとB：右側が重要、AとD：左側が非常に重要な場合
	0.148	AとB：左側が重要、AとD：同じ程度の場合
	0.068	AとB：右側が重要、AとD：同じ程度の場合
問2	0.063	
問3	0.000	
問4	0.051	
問5	0.000	
問6	0.000	
問7	0.000	
問8	0.000	
問9	0.000	
問10	0.068	
問11	0.000	
問12	0.000	
問13	0.068	D31とD32：左側が重要な場合
	0.000	D31とD32：同じ程度の場合

注：整合度の目安は、0.1以下が妥当⁷⁾

結果、アンケート区分の中間が適当であるとの結論が得られた項目が発生したため、最終結論には、当初の5区分に「かなり重要」と「やや重要」を加え、全体で9区分とした。全設問に対する結論を表-6に示す。結果の主要点を以下に記す。

- ・地震の切迫性については都市部を対象としているので、地震発生時の揺れの大きさのみの差になるため、両方の差が生じる場合に比べて重要性は低い。
- ・30組の一対比較の内、表-6に示している3組の結果が一つに集約できず、2つの意見の並記という結果となった。

以上より、今後の重みの算出にあたっては、3組の意見の両論を組み合わせて、8ケースの算出が必要となる。しかし、AHP法は複数の項目の重みを一対比較の結果を総合して決定するため、各設問の回答に矛盾が生じる可能性がある。矛盾の危険性を

表-8 各項目の重み係数算出結果

項目	重み係数	ケース			
		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
A 路線・区間の重要度	W _A	0.539	0.539	0.226	0.226
A1 平常時の利用	W _{A1}	0.149	0.149	0.063	0.063
A11 交通容量	W _{A11}	0.037	0.037	0.016	0.016
A12 交通状況	W _{A12}	0.112	0.112	0.047	0.047
A121 全車両交通量	W _{A121}	0.043	0.043	0.018	0.018
A122 大型車交通量	W _{A122}	0.025	0.025	0.010	0.010
A123 歩行者数	W _{A123}	0.011	0.011	0.005	0.005
A124 公共交通利用度合	W _{A124}	0.033	0.033	0.014	0.014
A2 地震時の輸送機能	W _{A2}	0.080	0.080	0.033	0.033
A21 沿道状況	W _{A21}	0.016	0.016	0.006	0.006
A211 地域区分	W _{A211}	0.008	0.008	0.003	0.003
A212 火災延焼危険度	W _{A212}	0.008	0.008	0.003	0.003
A22 防災上の路線区分	W _{A22}	0.048	0.048	0.020	0.020
A23 代替性	W _{A23}	0.016	0.016	0.007	0.007
A3 二次災害波及性	W _{A3}	0.272	0.272	0.114	0.114
A31 橋下種別	W _{A31}	0.204	0.204	0.085	0.085
A311 鉄道交差	W _{A311}	0.153	0.153	0.064	0.064
A312 道路交差	W _{A312}	0.051	0.051	0.021	0.021
A32 添架物件	W _{A32}	0.068	0.068	0.029	0.029
A4 橋固有の価値	W _{A4}	0.038	0.038	0.016	0.016
A41 良好な景観性	W _{A41}	0.008	0.008	0.003	0.003
A42 歴史的価値	W _{A42}	0.030	0.030	0.013	0.013
B 構造的なぜい弱性	W _B	0.254	0.254	0.478	0.477
C 地震切迫性	W _C	0.079	0.079	0.086	0.086
D 復旧効率性	W _D	0.128	0.128	0.210	0.211
D1 耐震補強工事の難易度	W _{D1}	0.017	0.017	0.028	0.028
D11 耐震補強工事施工に伴う制約条件	W _{D11}	0.013	0.013	0.021	0.021
D12 耐震補強工事施工施工法の特長	W _{D12}	0.004	0.004	0.007	0.007
D2 復旧工事の難易度	W _{D2}	0.036	0.036	0.059	0.059
D21 復旧工事施工に伴う制約条件	W _{D21}	0.027	0.027	0.044	0.044
D22 復旧工事施工施工法の特長	W _{D22}	0.009	0.009	0.015	0.015
D3 ライフサイクルコスト	W _{D3}	0.075	0.075	0.123	0.124
D31 耐震補強費用	W _{D31}	0.021	0.015	0.034	0.025
D32 復旧費用	W _{D32}	0.010	0.015	0.017	0.025
D33 橋梁の維持管理計画	W _{D33}	0.044	0.045	0.072	0.074
合計		1.000	1.000	1.000	1.000

表-9 各ケースにおける最大・最小評価値

ケース	項目	最大値	最小値	合計
ケース1	路線・区間の重要度	1.576	0.140	2.959
	構造的なぜい弱性	0.762	0.254	0.482
ケース2	路線・区間の重要度	1.576	0.140	2.959
	構造的なぜい弱性	0.762	0.254	0.482
ケース3	路線・区間の重要度	0.661	0.059	2.983
	構造的なぜい弱性	1.434	0.258	0.682
ケース4	路線・区間の重要度	0.661	0.059	2.983
	構造的なぜい弱性	1.431	0.258	0.682

排除するのが整合度であり、設問毎の整合度が0.1以下であることが、各設問の回答が妥当な結論であることを示している⁶⁾。表-7に設問毎の整合度を示す。この結果より、両論並記が2つ生じた問1の組み合わせの4つの中で、表-7で網掛けをしている2つについては、整合度が悪くなることが明らかとなり、矛盾が生じている考えと判断されるため、検討対象から外すこととした。よって、重みは以下の4ケースについて検討することとした。

- ・ケース1：AとBではAが重要、AとDではAが非常に重要、D31とD32ではD31が重要、の組み合わせ。
- ・ケース2：AとBではAが重要、AとDではAが非常に重要、D31とD32では同じ程度

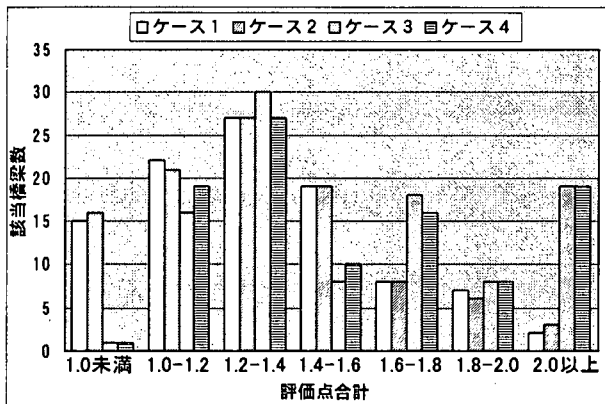


図-1 対象橋梁の評価点分布

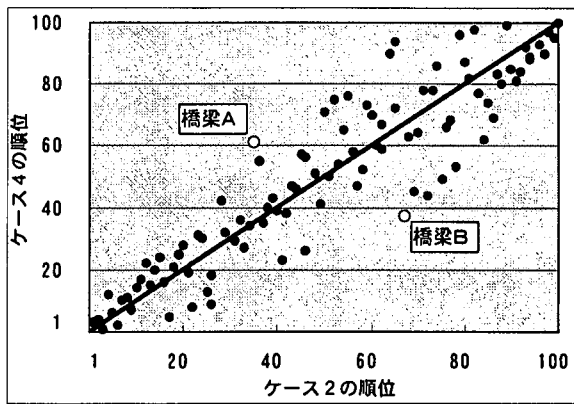


図-3 ケース2とケース4の順位の関係

表-10 評価点の統計値

評価項目		路線・区間の重要度	構造的なぜい弱性	地震切迫性	復旧効率性	合計
ケース1	最大値	1.003	0.762	0.237	0.376	2.191
	最小値	0.177	0.254	0.000	0.107	0.725
	平均値	0.482	0.432	0.176	0.237	1.327
	標準偏差	0.184	0.193	0.051	0.062	0.311
ケース2	最大値	1.003	0.762	0.237	0.376	2.179
	最小値	0.177	0.254	0.000	0.112	0.713
	平均値	0.482	0.432	0.176	0.234	1.324
	標準偏差	0.184	0.193	0.051	0.059	0.314
ケース3	最大値	0.419	1.434	0.258	0.616	2.463
	最小値	0.075	0.478	0.000	0.177	0.954
	平均値	0.202	0.813	0.192	0.388	1.595
	標準偏差	0.077	0.363	0.056	0.100	0.411
ケース4	最大値	0.419	1.437	0.258	0.619	2.457
	最小値	0.075	0.477	0.000	0.186	0.936
	平均値	0.202	0.812	0.192	0.386	1.592
	標準偏差	0.077	0.363	0.056	0.096	0.416

表-11 優先度の傾向が異なる橋梁の比較

項目	橋梁A	橋梁B
A 路線・区間の重要度		
A1 平常時の利用		
A11 交通容量	3	2
A12 交通状況		
A121 全車両交通量	3	3
A122 大型車交通量	3	3
A123 歩行者数	3	3
A124 公共交通利用度合	2	0
A2 地震時の輸送機能		
A21 沿道状況		
A211 地域区分	0	2
A212 火災延焼危険度	1	1
A22 防災上の路線区分	3	1
A23 代替性	1	1
A3 二次災害波及性		
A31 橋下種別		
A311 鉄道交差	0	0
A312 道路交差	0	0
A32 添架物件	3	0
A4 橋固有の価値		
A41 良好な景観性	0	0
A42 歴史的価値	0	0
B 構造的なぜい弱性	1	2
C 地震切迫性	2	3
D 復旧効率性		
D1 耐震補強工事の難易度		
D11 耐震補強工事施工に伴う制約条件	2	1
D12 耐震補強工事施工工法の特異性	1	2
D2 復旧工事の難易度		
D21 復旧工事施工に伴う制約条件	2	1
D22 復旧工事施工工法の特異性	3	2
D3 ライフサイクルコスト		
D31 耐震補強費用	3	1
D32 復旧費用	1	2
D33 橋梁の維持管理計画	1	1
ケース1	34	49
ケース2	35	49
ケース3	60	42
ケース4	61	41

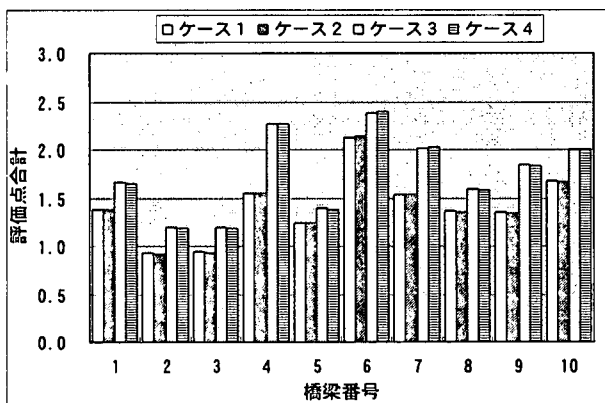


図-2 各橋梁ごとのケース毎の評価点の違い

重要、の組み合わせ。

- ・ケース3：AとBではBが重要、AとDでは同じ程度重要、D31とD32ではD31が重要、の組み合わせ。
- ・ケース4：AとBではBが重要、AとDでは同じ程度重要、D31とD32では同じ程度重要、の組み合わせ。

以上の4ケースについて計算した重みを表-8に示す。表-2、表-3において設定した評点と表-8の重みより求まる、各ケースの理論上の最大値と最小値を表-9に示す。評価点3や0を設定してい

ない項目があるため、端数が生じている。

表-8に示す重み係数を用いて100橋の評価点を算出した結果を図-1および表-10に示す。ケースごとの差については、大分類における違いであり、関係する重みが多い「AとBではAが重要、AとDではAが非常に重要」と「AとBではBが重要、AとDでは同じ程度重要」の違いが支配的になり、小分類における違いであるD31とD32の違いについてはわずかな差にしかならなかった。そのため、図-1に示すようにケース1とケース2およびケース3とケース4で全体の評価点分布の傾向が似通っている。また、個別の橋梁として検討してもこの傾向は現れている。データの1部を図-2に示すが、ケ

		重要性					
		大 ←				→ 小	
			5	4	3	2	1
耐震性 ↑ 悪い ↓ 良い	5	I	I	II	II	IV	
	4	I	II	II	III	IV	
	3	I	II	II	IV	IV	
	2	II	II	III	IV	IV	
	1	II	II	IV	IV	IV	

図-4 大阪市の補強優先度判定マトリックス⁴⁾

表-12 大阪市の補強優先度に対する該当橋梁

大阪市の補強優先度		I	II	III	IV
該当橋梁数		15	31	7	47
ケース2 の評価	最大値	2.179	2.001	1.579	1.722
	最小値	1.354	1.135	1.212	0.713
	平均値	1.763	1.456	1.346	1.094
	標準偏差	0.237	0.208	0.131	0.189
ケース4 の評価	最大値	2.443	2.457	2.009	2.318
	最小値	1.583	1.145	1.225	0.936
	平均値	2.105	1.745	1.574	1.330
	標準偏差	0.292	0.382	0.315	0.257

ケース1と2、ケース3と4のそれぞれの中の差はほとんど無く、両者の間の違いが顕著である。そこで、問1における整合度が高いケース2とケース4をそれぞれの代表とし、その順位を比較した結果を図-3に示す。図-3で直線より上にある橋梁は、重要性を重視したケース2の方が順位が高く、直線より下の橋梁は、耐震性を重視したケース4の方が順位が高いことを示している。図-3に示す、それぞれの特徴的な橋梁について、表-11に示す。

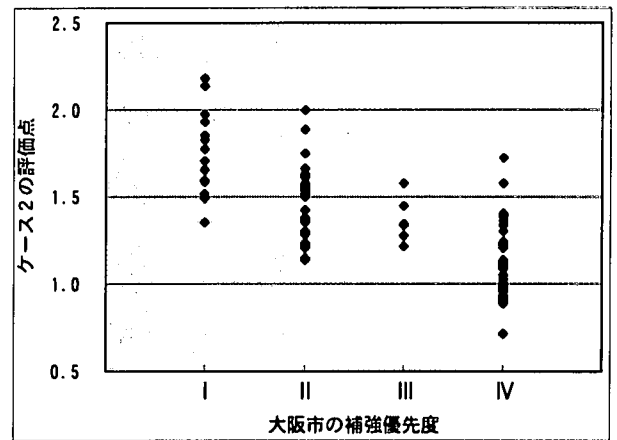
橋梁Aは防災上の重要な路線に属する橋梁であり、添加物件も多く、重要性の高い橋梁であるが、比較的耐震性は高いため、ケース1・2において優先順位が高い。一方、橋梁Bは重要性に関する評価は低いものの、耐震性が低く、地震の切迫性も高いため、ケース3・4において優先順位が高い。このような橋梁は、被害が発生する可能性が高い橋梁であることが分かる。このように、重視する項目の違いにより、ある程度の順位の変動が生じることが明らかとなった。

3. 補強優先度についての比較

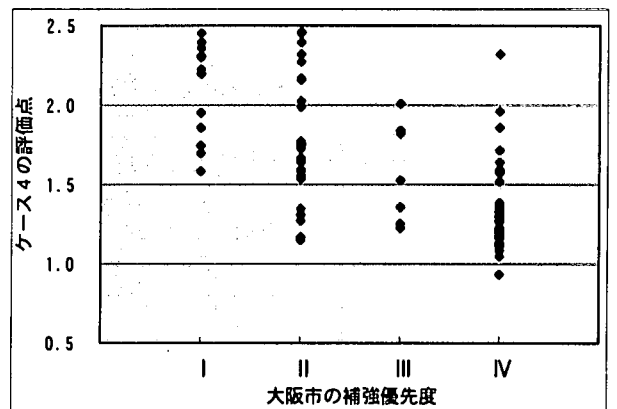
ここでは、大阪市における補強優先度の検討結果と本ケーススタディー結果の比較を行い、補強優先度に対する考え方について検討する。なお、2に示したように、基本的な傾向が似ているため、ここではケース2とケース4の結果を用いることとする。

(1) 大阪市の補強優先度

大阪市では、各橋梁について重要性を5段階、耐震性を5段階で評価し、図-4のマトリックスによ



(a) ケース2との比較



(b) ケース4との比較

図-5 大阪市の優先度評価結果と本ケーススタディーによる評価結果との比較

り、補強優先度を4つのランクに分けている。このマトリックス作成にあたっては、重要性と耐震性の重みを2:1程度と考え、作成している⁷⁾。なお、各ランク内での優先順位付けは行われていない。今回ケーススタディー対象とした100橋の各ランク毎の該当橋梁数は表-12に示すとおりである。

(2) 補強優先度の比較

大阪市の補強優先度は、ランク分けまでなので、各ランク毎の本ケーススタディーにおける評価点を図-5(a) (ケース2) および (b) (ケース4) に示す。それぞれの最大値等の指標は表-12に示している。平均値については、優先度のランクが下がるほど低くなっており、全体的な傾向としては大阪市の評価と本ケーススタディー結果は合っている。ただし、図に示されているように、大阪市の各優先度内での分布を見るとばらつきがあり、ケース2よりも、ケース4の方がその傾向が大きい。そのばらつきのために、個々の橋梁の優先順位では、逆転が発生する場合も見られる。

AHPの適用性を検討するために、重みについての比較を行う。まず、重要性と耐震性についてであるが、本ケーススタディーでは、重要性と耐震性を

表-13 大阪市の補強優先度における重要性の判定

	避難路	緊急輸送路	主要幹線道路	跨線橋	主要道路を跨ぐ跨道橋	迂回路確保困難	応急復旧が困難	拠点(市道2級以上)				火災危険区域又は人口密度	主要ライフライン	合計
								市役所府警・府庁	消防署	病院	区役所			
ケース1(地震直後)	5	2	1	旅客(主要)3 旅客(0-1)2 貨物1	2	-	1	2	2	2	-	-	-	20
ケース2(応急復旧時)	-	5	3	旅客(主要)3 旅客(0-1)2 貨物1	2	2	1	1	-	-	1	-	2	20
総合評価 ケース1+ケース2	5	7	4	6	4	2	2	3	2	2	1	-	2	40

評価点 20以上:重要度5 評価点16~19:重要度4 評価点12~15:重要度3 評価点:3~11:重要度2 評価点2以下:重要度1

表-14 優先度評価項目の重みの比較

	大阪市における重み係数	本ケーススタディーにおける重み係数	
		ケース2	ケース4
避難路指定	0.125		
緊急輸送路	0.175	0.064 (0.048)	0.038 (0.020)
主要幹線道路	0.100		
跨線橋	0.150	0.206 (0.153)	0.122 (0.064)
跨道橋	0.100	0.068 (0.051)	0.040 (0.021)
迂回路確保困難	0.050	0.021 (0.016)	0.013 (0.007)
応急復旧が困難	0.050	0.048 (0.036)	0.113 (0.059)
拠点との関係	0.200	- (-)	- (-)
主要ライフライン	0.050	0.091 (0.068)	0.055 (0.029)
地震切迫性	-	0.106 (0.079)	0.165 (0.086)
平常時の利用	-	0.201 (0.149)	0.120 (0.063)
沿道状況	-	0.021 (0.016)	0.011 (0.006)
景観性等	-	0.051 (0.038)	0.031 (0.016)
応急復旧以外の効率性	-	0.123 (0.092)	0.292 (0.152)
合計	1.000	1.000 (0.746)	1.000 (0.523)
構造的なぜい弱性		(0.254)	(0.477)
総計		(1.000)	(1.000)

注:本ケーススタディーにの重みの()外は、構造的なぜい弱性を考慮しない場合の100分率。
()内は、構造的なぜい弱性を考慮した場合の100分率。

一体化しているのに対し、大阪市では別に評価し、マトリックスによる総合化を行っているため、直接は比較できない。しかし、本ケーススタディーの重みは、表-3に示したとおりであり、大分類で重要性に該当する「路線・区間の重要性」と耐震性に該当する「構造的なぜい弱性」の比率は、ケース2で0.539:0.254(0.680:0.320)、ケース4で0.226:0.477(0.321:0.679)である。一方、大阪市は先に述べた重要性と耐震性の重みの考え方が2:1(0.667:0.333)であることから、ケース2とほぼ同じ重み付けと考えられる。本ケーススタディーにおける切迫性とライフサイクルコスト(補強費用を除く)については、大阪市の優先度評価の段階までには入っていないため、次項の詳細比較は重要性評価の項目について行う。

(3) 重要性評価項目の考え方について

大阪市の補強優先度における重要性の評価法を表-13に示す⁷⁾。地震直後と応急復旧時の2つの時期を対象とし、各時期に対応して点数付けを行い、それぞれ20点、合計40点満点で評価を行い、その評価点を基に5段階で重要度を評価している。本ケーススタディーでの重みと大阪市の重みを比較した結果を、表-14に示す。幾つかの項目は重複しているが、

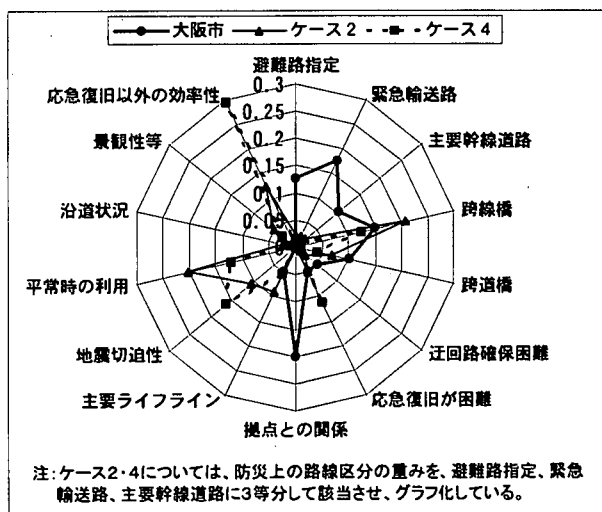


図-6 評価項目の重みの比較

異なる項目も多い。表-14をレーダーチャートで表現したのが図-6である。

特徴的な項目として大阪市には拠点との関係があり、本ケーススタディーには、地震の切迫性、平常時の利用があるというのが差異である。

表-13より、大阪市の評価点を見ると、地震直後は人命が最優先との考えで避難路を最も重要と評価し、緊急時に市民への司令塔となる各種拠点に属する道路に属する道路の重要度を高くしている。また、応急復旧時には、市外からの物資を搬入し得る道路を確保することに重きをおき、緊急輸送路、主要幹線道路の重要度を高く評価している。このことから、地震直後においては、被災した人命の救助を、応急復旧時には被災した人の生活の安定を第一に考え、評価点を設定しているものと考えられる。

一方、本ケーススタディーにおいては、大阪市のように地震発生直後の視点だけではなく、地震発生前の平常時の利用、地震の切迫性、人命とは直接の関係が薄い歴史的価値や景観性までもが項目として含まれている。これは、評価項目の選定方法として、最初に道路橋の補強優先度に関すると考えられる指標を可能な限り広範囲に抽出し、そこで出てきた多くの意見をKJ法⁸⁾を用いて意見集約する方法を用いたためであると考えられる。そのため、大阪市内で評価の高い緊急輸送道路、幹線系道路について、本

ケーススタディー結果では低くなっているのは、これと関係の深い平常時の利用の重みに、評価が分かれているためと考える。歴史的価値は、表-3に示されているように、AHPの結果では他の評価項目である交差条件などに比べてかなり低い評価になっており、人命等に直接関係しない項目であり、AHPの結果は妥当な評価を与えていると考える。ただし、他の条件が全く同一であるという条件下においては、歴史的価値を有する橋梁を優先度が高いと判断することは十分考えられる。

なお、大阪市では各優先度ランク内の橋梁の耐震補強工事の実施段階において、補強費用や架け替え計画、また周辺の条件等を考慮しているために、ライフサイクルコストの概念は優先度評価までの段階には含まれていない。実際の補強順序までを考えれば、大阪市と本ケーススタディーの結果に大きな違いはないと考える。

4. おわりに

本報告では、橋梁の補強優先度の評価項目を基に、各項目に評価点を設定すると共に、AHP法を用いて各項目の重み付けを行った。また、その結果を用いて、大阪市の100の橋梁を対象に補強優先順位付けのケーススタディーを行い、実務に用いられている大阪市の補強優先度評価との比較を行い、AHPの適用性について検討を行った。

AHPの結果については、評価が集約できない項目があり、そのため複数のケースで検討を進めることとなった。その結果、どの項目を重視するかにより、優先順位にある程度の差が生じることが明らかとなった。しかし、本ケーススタディーにおいては、重要性和耐震性のどちらをより重要視するかが、優先順位に差が生じた理由であり、一概にどちらが優れている手法であると言うべきものではない。実際の適用にあたっては、どちらのケースも考えられるため、AHPの評価として意見が集約できなかったと考えられる。

また、大阪市の優先度評価を行った結果、重要性和耐震性の重みについては、AHP結果の重要性を重視した結果と大枠は一致する結果となった。ただし、細かな項目での重みでは差異が生じており、また項目自体にも違いはある。しかし、それはどのような評価項目を重視するかの方の立場の違いであり、それにより優先順位が変わることは自然であると考えられる。本ケーススタディーは、先述のように、1つの都市レベルの既設橋梁を対象として、管理者の立場で補強優先度を決定するという限定した条件で行ったものである。今回のケーススタディー結果は、重

視する項目の違いを踏まえれば、それぞれの結果は概ね妥当であると考えている。しかし、AHPによる結果が経験等を基にする結果とかなり違う結果をだすこともあり、そのような場合は、評価項目構成、評価点の設定、AHPの重み付けを再検討するのが標準的なプロセスである。本検討を基に、具体的に大阪市と限定し、再度AHPを実施することにより、より対象の状況を反映した結果が得られると考える。これは、各地域の特徴を反映させるためにも有効であり、AHPを利用した本手法は、実務で優先順位を決定するプロセスに有効であると考えられる。そのため、最初のAHPによる優先度評価について、特徴的な幾つかのパターンの評価区分と重みを提示し、それを実施し、必要に応じて修正を行った優先度評価を実施することが有効であると考えられる。

謝辞：本研究は、既設構造物の耐震補強小委員会補強優先度WGで整理された既設橋梁の補強優先度評価項目を基にし、行ったものである。WGメンバーには、AHPによるケーススタディーの方法について貴重なご意見をいただくとともに、AHPの回答者として参加していただいた。また、大阪市建設局土木部橋梁課には、優先度評価の考え方に関するヒアリングにご協力いただくとともに、貴重な資料を提供いただいた。関係各位に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)土木学会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説，2000.6
- 2) (社)土木学会：既設構造物の耐震補強に関する研究報告，2002.11
- 3) 道路投資の評価に関する指針検討委員会：道路投資の評価に関する指針（案）1998.6
- 4) 佐藤次郎，篠崎之雄，佐伯光昭，磯山龍二：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，土木学会論文集，No.513，I-31，pp.213-223，1995.4
- 5) 永松義敬，大塚久哲，松田泰治，豊永臣悟：緊急輸送道路網における耐震安全性評価手法の開発，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.3407-3412，1998.11
- 6) 刀根薫，真鍋龍太郎：AHP事例集-階層化意思決定法-，1990.7
- 7) Kenji Shimoda, Shigeo Takei, Tadaaki Maruyama, Kozo Nishimori and Yukio Mitsugi : Seismic Retrofitting for Bridges in Osaka City, 17th U.S.-Japan BRIDGE ENGINEERING WORKSHOP, pp.5.13-5.26,2001.11
- 8) 川喜田次郎：発想法-創造性開発のために-，1967.6