

5. ライフサイクルコストの算出

5.1 建設コストの概算

3章において経済性照査の基本は、構造物のライフサイクルの全期間に対して、地震時および地震後の復旧コストと間接被害を含めたライフサイクルコストを最小化することとしている。ライフサイクルコストを算定するにあたり、初期コスト、メンテナンスコスト等の各コストの内訳を把握しておくことは重要と考えられる。その中でも、初期コストにあたる建設コストは、ライフサイクルコストを把握する上での基準となるものと考えられる。そこで、ある事例をもとに建設コストを具体的に試算し、その実情を概観することとした。

(1) 土木工事積算基準の概要

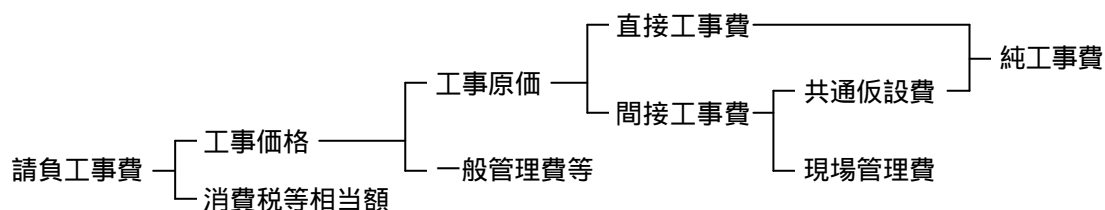
国土交通省では、直轄工事に関わる標準的な工事費の積算要領を含めた積算基準が公表されている。その他の建設工事についてもほぼ同様の積算体系になっていると考えられるため、ここでは、その積算要領（土木請負工事工事費積算要領）の一部抜粋を示す^{1),2)}。

（目的）

第1 この要領は、建設省直轄の土木工事を請負施工に付する場合における工事の設計書に計上すべき当該工事の工事費（以下「請負工事費」という。）の算定について必要な事項を定めることにより、請負工事の予定価格の算定を適正にすることを目的とする。

（請負工事費の構成）

第2 請負工事費の構成は、次のとおりとする。



（請負工事費の費目）

第3 請負工事費の費目は、次の各号に掲げるものとする。

一 直接工事費

直接工事費は、箇所又は工事種類により各工事部門を工種、種別、細別及び名称に区分し、それぞれの区分ごとに材料費、労務費及び直接経費の3要素について積算するものとする。

二 間接工事費

イ 間接工事費は、各工事部門共通の前号以外の工事費及び経費とし、共通仮設費及び現場管理費に分類するものとする。

ロ 共通仮設費は、次に掲げるものについて積算するものとする。

- (イ) 運搬費
- (ロ) 準備費
- (ハ) 事業損失防止施設費
- (ニ) 安全費
- (ホ) 役務費
- (ヘ) 技術管理費
- (ト) 営繕費

ハ 現場管理費は、工事施工にあたって、工事を管理するために必要な共通仮設費以外の経費とし、現場管理費を構成する各費目について積算するか、又は次の現場管理費率を用いて積算するものとする。

$$\text{現場管理費率} = \frac{\text{現場管理費}}{\text{純工事費}}$$

ただし、純工事費 = 直接工事費 + 共通仮設費

三 一般管理費等

一般管理費等は、工事施工にあたる企業の継続運営に必要な費用をいい、一般管理費及び付加利益からなり、次の一般管理費等を用いて積算するものとする。

$$\text{一般管理費等率} = \frac{\text{一般管理費等}}{\text{工事原価}}$$

四 消費税等相当額

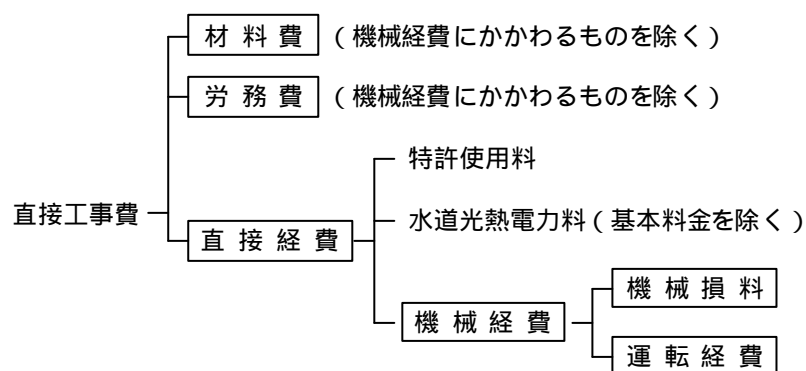
消費税等相当額は、消費税及び地方消費税相当分を積算するものとする。

(請負工事費積算基準)

第4 請負工事費の積算基準は、別に定めるものとする。

(2) 直接工事費の積算について³⁾

直接工事費は工事価格の主要部分を構成するものである。積算方法の詳細は(財)建設物価調査会「土木工事積算標準単価」³⁾等の図書に示されているが、ここでは、その概要について記述するにとどめる。



注：□ は、直接工事費のうち主要な部分である。

図 5.1-1 直接工事費の構成

直接工事費は、工事目的物を作るために直接必要とされる費用で、材料費、労務費及び直接経費に区分され積算される場合多い。直接工事費の要素構成は、図 5.1-1 のとおりである。以下に直接工事費を構成する材料費、労務費、機械経費についての概略を記述する。

(a) 材料費

材料費は、次のように算出する。

$$\text{材料費} = \overbrace{\text{設計（理論）数量} \times (1 + \text{損失等の割増率})}^A \times \overbrace{(\text{購入単価} + \text{運搬費})}^B = A \times B$$

A は所要数量と呼んでいる。また損失割増率は、一般に、工事实績等の調査により設定された標準的なものを使用している。B は材料単価と呼んでいる。材料単価は、原則として設計時点における持ち込みの市場価格を採用している。価格は購入場所、納入場所、購入数量、支払条件等の種々の条件によって異なるものであるから、その条件に応じた適正価格を定めなければならない。

(b) 労務費

労務費は、次のように算出する。

$$\text{労務費} = \text{所要人員} \times \text{労務単価} = (\text{設計作業量} \times \text{その作業の歩掛}) \times (\text{基本日額} + \text{割増し賃金})$$

所要人員は現場条件等を考慮して工事ごとに決定することが望ましい。しかし、工事ごとに所要人員を算定することは困難であるので、一般的には過去の工種別、作業別の実態調査等から求めた標準的な所要人員を用いている。

労務費は所要人員（歩掛）と労務単位の積で算出される。労務単価（賃金）は各職種に対して、標準的に支払われる賃金で、基本日額をいう。

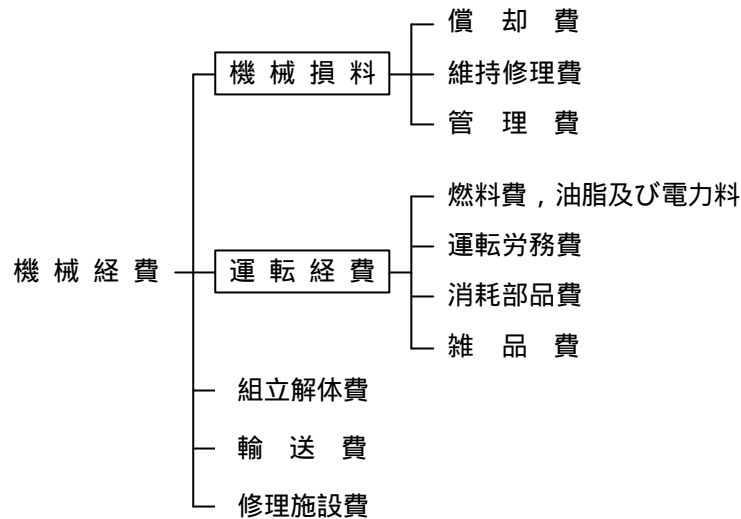
(c) 機械経費

直接経費のうち、機械経費は機械損料と運転経費に大別され、その構成は図 5.1-2 のとおりである。

機械損料（リース料も含めて）は、発注者が請負工事費の積算において、工事に機械類を使用する場合に計上する機械の使用料であって、通常 1 日当り、1 時間当りの金額で表示される。

$$\text{機械損料} = \text{運転 1 時間当り損料} \times \text{運転時間} + \text{供用 1 日当り損料} \times \text{供用日数}$$

運転経費とは、機械の運転に必要な経費であって、その構成は運転労務費、燃料費、油脂費及び電力料、消耗部品費、雑用費である。



注：□ は，主要な機械経費を構成している部分である．

図 5.1-2 機械経費の構成

(3) 道路橋の建設コストの事例

ライフサイクルコストの中で，初期コストにあたる建設コストは，ライフサイクルコスト全体額に占める割合も大きく，その他の各コストを把握する上での基準となるものと考えられる．したがって，ある特定の事例ではあるが，具体的に建設コストを試算し，その実情を概観することとした．その一例として，道路橋の事例を以下に示す．

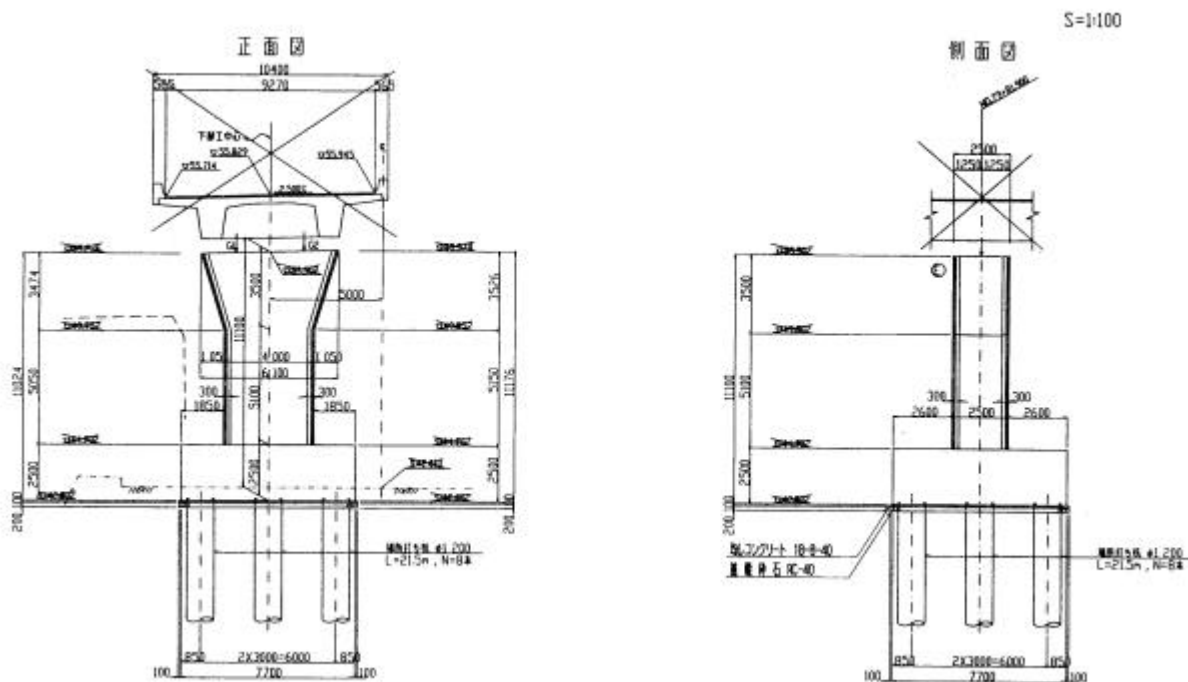


図 5.1-3 対象構造物（高架橋下部構造）

図 5.1-3 のような都市高速道路高架橋を対象とした．一般的な工事発注形態であれば，橋脚だけでなく，土工をはじめとする付帯工事と共に発注される．しかし，「新しいレベル 1 設計」による施工費への影響をより精度よく把握するために，高架橋下部構造のみを対象とした．積算範囲としては，図 5.1-4 に示す請負工事費のうち，消費税等相当額を抜いた工事価格を対象とした．すなわち，直接工事費のほか，共通仮設費と現場管理費に区別される間接工事費，一般管理費等が含まれる．

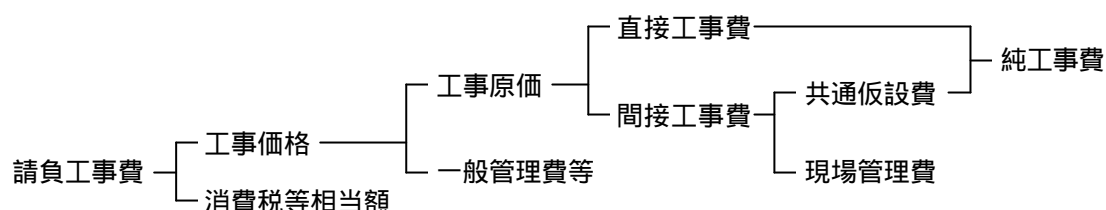


図 5.1-4 請負工事費の構成

共通仮設費については，直接工事費の 20%と仮定した．また，一般管理費および現場管理費の算出にあたっての経費率を以下のように設定した．

- ・ 現場管理費率： 純工事費の 30% （ただし，純工事費 = 直接工事費 + 共通仮設費）
- ・ 一般管理費率： 工事原価の 10%

なお，ここでの工事価格には，調査費・設計費は含めていない．

先の 5.1(2)で示した積算要領に従い，材料費，労務費，直接経費等を勘案した積算単価に基づいて道路高架橋の工事価格を積算した．最近では，このような積算単価に基づいた積算プログラムが普及し，実務でも多用されつつある．積算結果を表 5.1-1 に示す．また，工事価格の内訳は図 5.1-5 に示すとおりであり，直接工事費は工事価格の 60%程度，純工事費（= 直接工事費 + 共通仮設費）は同じく 70%程度となった．

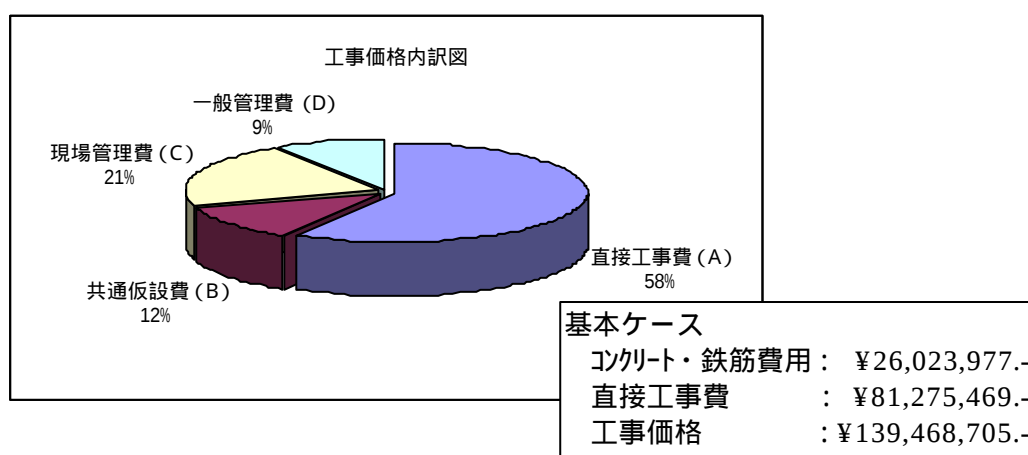


図 5.1-5 工事価格の内訳の例

表 5.1-1 高架橋の建設コストの積算例

工事費	規格	単位	数量	単価	金額
1	直接工事費 (A)	式	1.00		¥81,275,469
	橋梁下部	式	1.00	81,275,469	¥81,275,469
	a R/C橋脚工	式	1.00	28,391,484	¥28,391,484
	作業土工	橋脚6基分	1.00	2,158,520	¥2,158,520
	場所打杭工	(8+8+7+7)	30.00	852,873	¥25,586,190
	杭土処理		1.00	646,774	¥646,774
	b 橋脚躯体工		1.00	43,421,667	¥43,421,667
	基礎砕石工	厚0.2m ,C-30	m2	1,301	¥234,180
	均しコンクリート	18-8-40(高炉),10cm	m2	1,853	¥333,540
	コンクリート	24-8-40(高炉)	m3	712.00	¥11,365,656
		30-8-25(高炉)	m3	455.00	¥7,680,855
	鉄筋 SD345	D16 ~ 25	t	31.37	¥3,495,465
		D29 ~ 32	t	23.72	¥3,482,001
	埋設型枠	SEEDフォーム	m2	480.00	¥16,302,240
	足場		1.00	527,730	¥527,730
	c 土留め締切り工		1.00	9,462,318	¥9,462,318
	仮設鋼矢板	型, 型	1.00	4,457,908	¥4,457,908
	仮設鋼矢板賃料		1.00	3,370,727	¥3,370,727
	切梁 腹起し		1.00	32,763	¥32,763
	切梁 腹起し賃料		1.00	1,600,920	¥1,600,920
2	共通仮設費 (B)	直接工事費の20%	式	1.00	¥16,255,094
	a 運搬費	50km	式	1.00	
	b 安全費	ガードマンなど	式	1.00	
	c 共通仮設費,イメージ		式	1.00	
3	純工事費 (A+B)		式	1.00	¥97,530,563
4	現場管理費 C=(A+B) * α	α=30%	式	1.00	¥29,259,169
5	工事原価 (A+B+C)		式	1.00	¥126,789,732
6	一般管理費 D=(A+B+C) * β	β=10%	式	1.00	¥12,678,973
7	工事価格 A+B+C+D		式	1.00	¥139,468,705

次に、構造物建設における使用材料が多少変動した場合を想定して感度分析を行った。仮に、鉄筋やコンクリートの構造材料が±30%変動したとすると、工事価格とその内訳は図 5.1-6～7 のようになる。

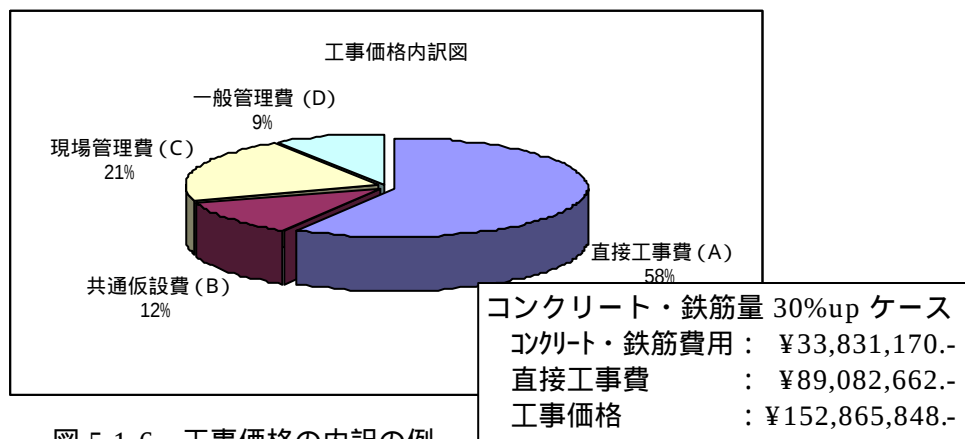


図 5.1-6 工事価格の内訳の例

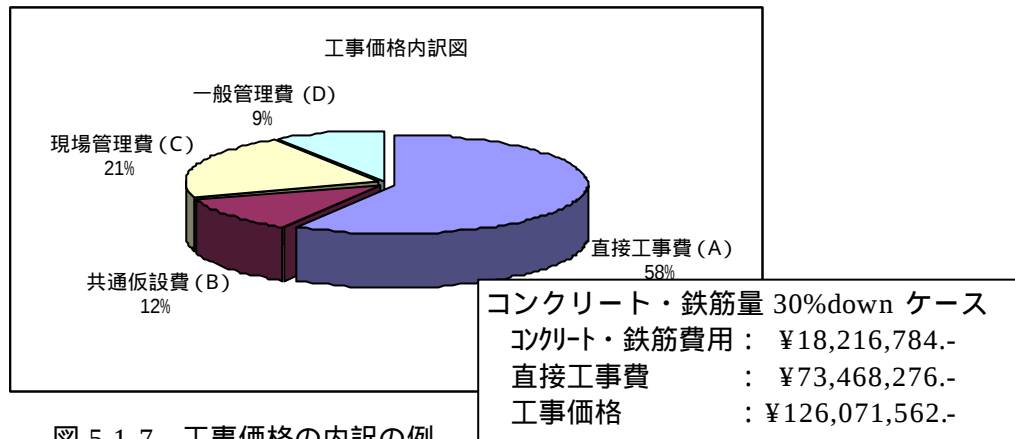


図 5.1-7 工事価格の内訳の例

共通仮設費を直接工事費の一律 20%と仮定したため、共通仮設費、現場管理費、一般管理費ともに、直接工事費に比例する形となるので、工事価格の内訳の割合は変化しない。また、鉄筋やコンクリートの構造材料の費用に着目すると、直接工事費および工事価格に占める割合は図 5.1-8 のようになる。

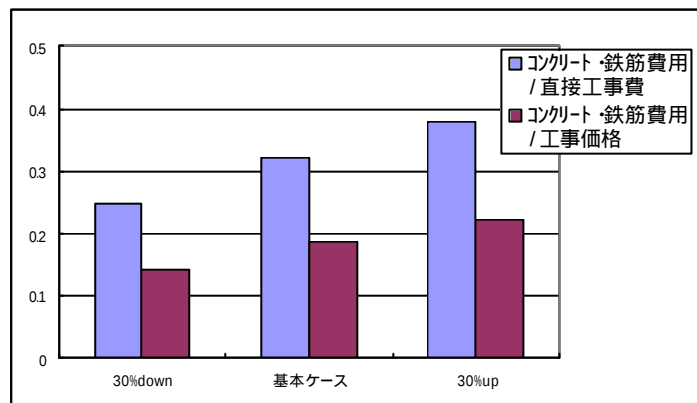


図 5.1-8 構造材料の費用が工事費に占める割合の例

すなわち、基本ケースに対しては、鉄筋やコンクリートの費用は直接工事費に対して 32%程度、工事価格に対して 19%程度となっている。コンクリートおよび鉄筋の±30%の増減に対して、直接工事費に対する変動量は、±7%程度、工事価格に対する変動量は±4%程度となっている。

また、直接工事費の内訳について、5.1(2)で示した積算要領に示された項目別に整理すると、図 5.1-9 のようになった。なお、直接経費としては機械経費のみを対象としたので、材料費、労務費、機械経費の3つについて整理した。

直接工事費のうち、材料費の占める割合が大きく約 43%となっている。図 5.1-8 において、基本ケースのコンクリート・鉄筋費用が直接工事費に対して 32%程度となっているが、これは材料費のうち、コンクリートおよび鉄筋の構造材料のみを対象としているからである。材料費としてはそれ以外にも型枠、足場、切梁等の仮設材料も含まれている。経験的には、材料費、労務費、機械経費の比率は、6：3：1 程度になることが多いようであるが、この事例では、場所打ちの基礎杭形式のため、機械経費の割合が多くなっているものと思われる。

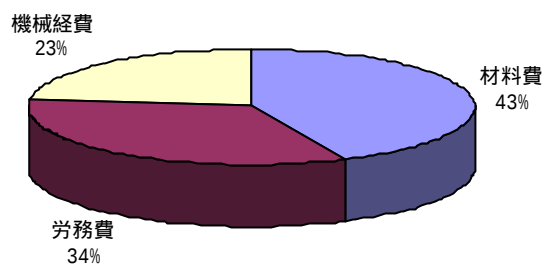


図 5.1-9 道路橋の直接工事費の内訳の例（基本ケースの場合）

(4) 鉄道橋の建設コストの事例

先述の道路橋の場合と同じ趣旨で、鉄道橋の場合の建設コストについて概観した。とくに、道路橋事例との比較のために、直接工事費に着目した検討を行った。

図 5.1-10 に示したような、鉄道高架橋に多用されているビームスラブ式高架橋に関して直接工事費を概算すると、その内訳は図 5.1-11 のようになる。道路橋とは内訳が多少異なっているが、これは構造形式の違いによるものと考えられる。直接工事費に対して、労務費の占める割合が大きく約 51%となり、約 35%が材料費となっている。

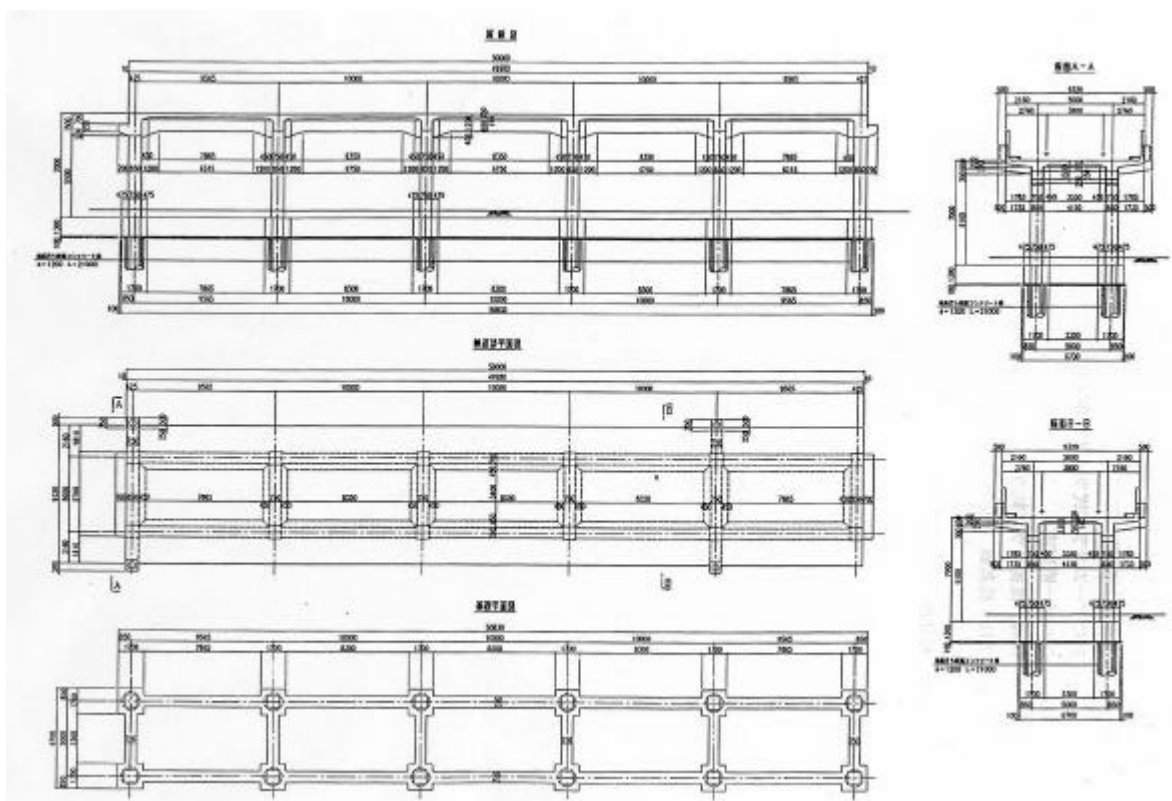


図 5.1-10 ビームスラブ式鉄道高架橋の一例

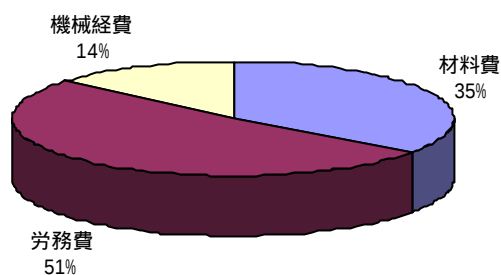


図 5.1-11 ビームスラブ式鉄道高架橋の直接工事費の内訳

仮に材料費が 10%少なくなったとすると、直接工事費全体としては、4%程度削減できる事が分かる。また、構造形式を変更できた場合には、機械経費、労務費とも削減する可能性も残されている。そこで、以下に示す条件で幾つかの試算を行った。

Case2 として、新材料として高流動コンクリートを用いることにする。従来のコンクリートに比べて高価であり、これを約 2 倍と仮定すると、打設人員の削減が図れる。しかし、工事費全体として、約 11%のコストアップとなる。

Case3 として、高流動コンクリートの高強度性を期待して、スパンを 20%延長することが可能になったとすると、直接工事費は約 5%のコスト増で収まる。

Case4 として、施工の合理化を図るために、システム型枠を適用しやすいアーチスラブ式橋脚構造に構造形式を変化させると、約 2.5%のコスト増にまで抑えることができる。

試算結果を図 5.1-12 に示す。

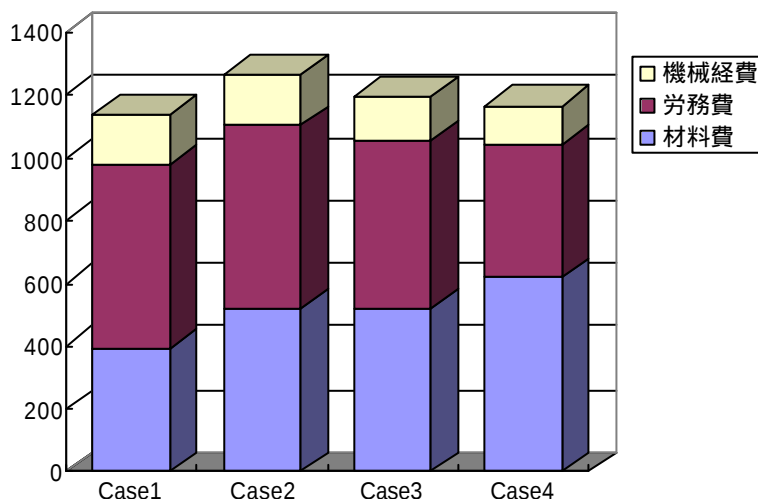


図 5.1-12 各ケースによる直接工事費の試算

(5) まとめ

ライフサイクルコストを評価するために、それを構成する各コストのバランス等を分析する必要がある。その際、基準となる数値は当然ながら建設コストであると考えられる。議論の現実性の観点から、一例ではあるが具体的数値を示すこととした。そこで、ある事例について建設コストを試算した結果、

以下のことが明らかになった。

- ・ 工事価格のうち、直接工事費の占める割合は約 60%であった。また、間接的な諸費用についても直接工事費を基準として比例的に算定される積算体系となっている。
- ・ 構造種別や構造形式にもよるが、材料費は、直接工事費のうち 40%前後の大きな数値となっている。工事価格と比べても 25%程度を占めることになる。
- ・ コンクリート、鉄筋等の構造材料の軽減にもかかわらず、建設コストの感度があまり高くないという結果となったが、施工の手間の影響が支配的であることと、その手間を適切に評価できる積算体系になっていないことがその理由と考えられる。
- ・ それでも、コンクリート、鉄筋等の構造材料の 30%の増減に対して、工事価格は 4%程度変動するので、工事価格の削減に確実に寄与することがわかる。また、異なる工法等が採用される場合には、さらに合理化される可能性も残されている。

なお、これらはあくまでも特定の事例についての結果であることに留意されたい。

参考文献（5.1）

- 1) 「土木請負工事工事費積算要領及び土木請負工事工事費積算基準の制定について」 昭和 42 年 7 月 20 日付け建設省官技発第 37 号建設事務次官通達
- 2) 「土木請負工事工事費積算要領等の一部改正について」 平成 14 年 3 月 18 日付け国官技第 350 号国土交通事務次官通達
- 3) (財)建設物価調査会 積算委員会編：「平成 14 年度版 土木工事積算標準単価」

5.2 メンテナンスコストの概算

(1) コンクリート構造物に対するメンテナンス計画の立案

わが国の一般的な自然環境下では，設計耐用期間に特別なメンテナンスを行わなくても，目視点検のもとで耐久性を確保することは，適切な材料設計，構造設計，施工計画の組み合わせで十分に可能である．しかし，飛来塩分が多い沿岸域や酸に直接曝される厳しい腐食性環境のもとでは，メンテナンスフリーで構造物の耐久性を確保しようとする，極めて高い初期建設コストや初期対策コストを負担しなければならない．他方，当初からメンテナンスを予定しておくことで初期建設コストを小さく抑え，メンテナンスコストとの合算で経済的な設計・計画が可能となる場合もある．この場合，メンテナンス計画をあらかじめ立案し，その条件のもとで寿命推定を行い，耐久性などの要求性能を満足することを，設計段階で照査することになる．

メンテナンス計画の立案にあたっては，2001 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕で規定されている 3 章「維持管理の基本」を適用することができる．維持管理編では，主として既設構造物のメンテナンスの一般が記述されているが，考え方は新設構造物にもそのまま適用することが可能である．3 章「維持管理の基本」では，

- 1) 構造物の管理区分を設定して維持管理計画を策定
- 2) 劣化予測に基づく寿命あるいは性能の評価，判定
- 3) 要求性能を明示，特に設計耐用期間を確定
- 4) 記録の保存

が基本事項として挙げられている．メンテナンスコストは，1 回の補修補強工事の費用に，設計耐用期間内に行われる補修補強工事の回数を乗じて求めることができる．1 回の補修補強工事の費用は，従来の新設構造物の施工費用の算定方法に準じて求めることができる．したがって，設計耐用期間中の補修あるいは補強工事の回数を算定することがコスト算定のポイントとなる．回数は同書第 2 部「維持管理標準」の劣化予測に基づいて算定することができる．対象が既存構造物の場合には，加えて点検・検査結果（メンテナンス計画の初期条件）に基づいて劣化予測が行われる．なお，補修補強工事が行われた後の余寿命の算定も同様である．寿命を推定，あるいは耐久性に関する限界状態の判定の基本事項として，推定される劣化機構（同書 4 章）を明確にすることが規定されている．同書には塩化物イオン，中性化，凍結融解などに対して，それぞれ鋼材腐食の限界状態に基づく寿命あるいは設計耐用期間における腐食限界状態の判定方法が規定されている．

現時点での鋼材腐食の限界状態の判定法や寿命推定法は，第一次近似解を与えるものと理解される．構造物の劣化や変状の全国調査結果が蓄積されつつあり，今後，精度の向上と適用範囲の拡大が大いに期待されるところである．

(2) 鋼構造物に対するメンテナンス計画の立案

鋼構造物において使用を開始した後に生ずる劣化現象としては，疲労，遅れ破壊および腐食が代表

的なものと言える。これらは設計段階から、それらの発生を想定された供用年数において生じないように設計をするとともに、それらが発生したとしても初期の段階において補修するという予防保全の概念にたった維持管理を行っていく必要がある。

疲労亀裂については車両の大型化による重量増、交通量の増加等が考えられている。この損傷に対してはあて板補強が実施されるとともに、設計時において応力集中を緩和する処置がとられている。現時点において疲労亀裂に対する予防保全的な対応は確立されていない。疲労亀裂は構造の部位やその形態によっては亀裂進行が早く耐荷性に問題が生じる場合も少なくないことから、設計時点において十分な対処を行っておくとともに、常に点検によりその早期発見に努めることが重要である。

腐食の進行は、鋼構造物の使用環境、構造物および部材の種類と形状、部位などに大きく左右される。腐食環境の厳しい海岸では、鋼構造の栈橋が 10 年未満で使用不可能になった事例も報告されている。ただし、腐食により耐荷力が減少したことが原因となる落橋事例は報告されていない。塗装された構造物では、塗膜が健全に保たれている間は、腐食は生じない。しかしながら、都市高速道路の土木構造物維持修繕予算に占める塗装塗替えに要する費用は全体の約 40 % にも達しており、効率的かつ効果的な塗装の維持管理が重要である。近年における塗料の防食技術の進歩により、一般に塗装塗り替え周期が 10 年以上と考えられるポリウレタン塗装およびフッ素塗装などの重防食塗装が開発され、塗装寿命は飛躍的に長期化している。また耐候性鋼材を用いて塗装を必要としない鋼構造物も積極的に採用される傾向にある。構造物の供用期間および使用環境と維持管理計画を立案した上で、適切な塗装設計を行うとともに、それぞれの設計条件に応じた維持管理計画を行う必要がある。

鋼構造物に生じた多くの損傷は、そのほとんどが定期的な近接目視点検の最中に報告されている。したがって、鋼構造物の維持管理においては、近接目視点検が非常に重要である。都市高速道路においては、急激な損傷の進行を未然にキャッチするために、月に一度街路から高架構造物の目視点検が行われている。さらに構造物の供用年数に応じて 4 ～ 8 年毎に必要なに応じて機器計測を併用した近接目視点検が実施されている。このような、点検活動により、これまで損傷の進行を未然に防止できたものと考えられる。しかしながら、例えば都市高速道路の土木構造物維持修繕予算に占める点検に要する費用は約 15 % にも達していることも事実であり、より効率的で効果的な点検計画の立案が必要とされる。

(3) 塩害環境下に建設される RC 橋脚の例

小原ら¹⁾は塩害環境下に建設される RC 橋脚を対象に、複数のメンテナンス計画を策定し(表 5.2-1)、それぞれに対して設計耐用期間に要するメンテナンスコストを算定した。海洋に面した飛沫帯近傍の、極めて厳しい塩害環境下では、塩害対策費用(初期対策コストおよびメンテナンスコスト)が総コストの半分近くを占め、このコストが耐震性能の設定水準によって影響されるコストを上回ること示している。使用材料と施工のスペックを高く設定することで耐震性能に対して余裕のある、一見して高コストに思える設計が、結局はメンテナンスコストを大幅に削減するために、ライフサイクルコストの有効な縮減が期待できる設計計画が可能であることを指摘している。一方、海岸線から内陸に入るに従って飛来塩分が大きく減少して塩害対策費用は低下し、総コストに占める割合は小さくなる。

これは相対的に耐震性能に関連する初期建設コストが全体のコストの多くを占めることを意味する。

設計耐用期間中の塩害に対するメンテナンスコストは、劣化に対する予防として実施する、建設時点での初期対策コストと、耐用期間中に劣化を回復させるために行う修復対策コストからなる。塩害対策工法として、断面修復工法と表面保護工法が一般的に採用されている。これらの工法に対して、土木学会から指針類の発刊が予定されている。電気防食工法の場合、設計耐用期間に継続して通電するための費用（電気料金および電極の定期交換）がメンテナンスコストとして加算される。

メンテナンスコストの算定にあたり、断面修復工法では、表面から鉄筋の裏側 20mm の位置までのコンクリートを撤去するものとし、撤去した位置に施工される修復コンクリートの塩化物イオン濃度は 0kg/m^3 と仮定している。表面保護工はその遮塩性を等価な拡散係数に置き換え、塗装の厚さと耐用年数を考慮する方法を採用した。エポキシ塗装鉄筋を使用する場合も、塗膜の等価拡散係数に基づいた算定を行い、かぶりコンクリートの品質とかぶり厚さと連動させて部材の腐食発生時期が算定される。復旧時に使用するコンクリートの品質と費用の両者はライフサイクルコストに影響するが、ポリマー系材料は極めて高価であることから、この検討からは除外されている。ライフサイクルコストの算定には上記補修工法の実施回数を、設計耐用期間において算定する必要がある。ここでは、土木学会コンクリート標準示方書の塩化物イオン浸透計算の方法に従って算定を行っている。すなわち、腐食発生限界状態の照査を行い、設計耐用期間を腐食発生時間で除したものを補修回数としている。

断面寸法 $5\text{m} \times 2.2\text{m}$ 、かぶり 12cm、コンクリート強度 24N/mm^2 ($W/C=55\%$)、塩害環境に飛沫帯を想定（コンクリート表面における塩化物イオン濃度 $=13\text{kg/m}^3$ ）とした橋脚を基準ケース (No.1) としている。パラメータとしてかぶり、鉄筋比、塩害環境および初期塩害対策工の有無を取り上げ、それぞれ仕様を異ならせた、表 5.2-1 の 8 ケースを設定した。また、高強度材料を使用した場合として、自己充填型高強度高耐久コンクリート ($f_c' = 60\text{N/mm}^2$, $W/C=35\%$) と高強度鉄筋（主筋：USD685、帯鉄筋：USD785）を使用し、断面寸法を $3.5\text{m} \times 1.7\text{m}$ に縮小した No.6 を検討に加えた。全ての検討ケースにおいて耐震照査を満足するように諸元を設定し、崩壊を許容する場合の検討は対象外にしている。塩害劣化の算定において、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数は水セメント比から算出し、鉄筋発生限界塩分物イオン量は 1.2kg/m^3 とした。また、塩害初期対策として想定した表面保護工は有機系塗装とし、厚さ 1mm、塩化物イオンに対する拡散係数 $0.00183\text{cm}^2/\text{年}$ 、耐用年数 30 年とした試算である。保護塗装は耐用年数に達した時点で塗り直すものとし、塗り直しにかかる費用もメンテナンスコストとして計上し、最終的に以上のケースに対してライフサイクルコストを算定して、それぞれの相対比較を行ったものが図 5.2-1 である。塗装に関しては、鋼構造物のメンテナンスコスト算定法と同じである。

基準ケースのライフサイクルコストの内訳で、地震損傷復旧コストは 80 万円程度であり、橋脚の構築に要する初期建設コストの 2 割程度であった。塩害修復対策コストがライフサイクルコストに占める割合は大きく、全体の 6 割程度となり、最終的にライフサイクルコストは初期の 3 倍程度となる試算結果が出ている。塩害環境をパラメータとしたケースを比較すると、コンクリート表面における塩化物イオン濃度の減少に伴って補修回数が減少し、塩害修復対策コストが減少し、ライフサイクルコスト

に占めるメンテナンスコストの割合が異なる結果となっている。基準ケースと塩害初期対策として表面保護工を施したケースでのメンテナンスコストの遷移によれば、建設時点での費用がかさむが補修を回避することにより、最終的なメンテナンスコストは有利なものとなり、ライフサイクルコストにおいても有利となる結果がでている。ここで、高強度材料を用いて断面を縮小したものがライフサイクルコストの観点からは最も有利となり、かぶりを小さく設定したケースにおいて最も不利となった。

表 5.2-1 比較検討の対象とした耐震・耐久設計と維持管理計画の組み合わせ

No.	断面寸法		C (cm)	コンクリート の種類	f _c ' (N/mm ²)	W/C (%)	主鉄筋		帯鉄筋		塩害環境 C ₀ (kg/m ³)	塩害対策工法					
	高さ (m)	幅 (m)					材質	鉄筋比* (%)	材質	鉄筋比* (%)		初期 対策	修復 対策				
1	2.2	5.0	12	普通	24	55	SD295	0.48	SD295	0.16	13.0	なし	断面 修復 工				
2			8					0.47									
3			15					0.49									
4			12					0.61		0.19							
5								0.38		0.16							
6	1.7	3.5	SQC	60	35	USD685	0.91	USD785	0.27								
7	2.2	5.0	普通	24	55	SD295	0.48	SD295	0.16	4.5	表面						
8										9.0							
9										13.0							

C: かぶり, f_c' : コンクリート強度, W/C: 水セメント比, C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度

SQC: 自己充填型高強度高耐久コンクリート, 表面: 表面保護工, *: 橋軸方向の断面における仕様

No.	Pa/K _{hc} ・W				塩害 補修 回数	ライフサイクル コスト (百万円)	初期建設コスト		地震損傷 復旧コスト (百万円)	塩害修復 対策コスト (百万円)
	橋軸方向		橋軸直角方向				橋脚構築 (百万円)	塩害対策 (百万円)		
	タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅠ	タイプⅡ						
1	1.43	1.15	2.77	2.07	5	12.60	4.16	0.00	0.76	7.68
2	1.48	1.18	2.80	2.09	12	21.40	4.17		0.67	16.57
3	1.39	1.13	2.74	2.07	3	9.81	4.15		0.85	4.81
4	1.77	1.43	3.16	2.38	5	12.46	4.49		0.29	7.68
5	1.25	1.07	2.60	1.99	5	12.92	3.98		1.27	
6	1.52	1.14	2.84	1.95	2	7.05	4.33		0.39	2.32
7	1.43	1.15	2.77	2.07	2	7.43	4.16		0.76	2.51
8					4	10.74	4.16			5.82
9					0	10.68	4.16			5.76

耐久性能要件が厳しくない場合には、耐震性能の設定レベルでコストが確定する。一般環境下では、高強度材料の使用による軽量化と高耐震化や、断面寸法縮小・鋼材量低減に伴う施工経費の節約効果などは必ずしも大きくなく、既往の市販材料(市販単価)を用いた設計施工が有利となる。一方、厳しい塩害劣化環境でライフサイクルコストの上で有利な設計が異なるのは、上記の試算からも明らかな通り、材料高性能化が耐震性能の向上(軽量化と断面余裕)と耐久性能向上(寿命延長)の両者に貢献するからである。いわば材料施工への投資効果が耐震性と耐久性の両者にダブルで現れることに他ならない。図 5.2-2 に、上記コストに及ぼす設計諸元の感度をまとめた。

以上の算定は建設時点での標準価格を基準としたものである。メンテナンスに掛かる経費も実績の積み上げと改良、技術開発によって数年の内に大きく変化することは十分に期待できる。特に塩害劣化の根本的解決策である電気防食工法のコストパフォーマンスが近年、大幅に向上し、実績の蓄積で見積りの精度も向上している。

参考文献 (5.2)

- 1) 小原他, 橋脚のライフサイクルコスト算定に関する一考察, 日本コンクリート工学協会, 年次論文報告集, 2003
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説耐震設計編, 平成 14 年 3 月
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], 2002. 3

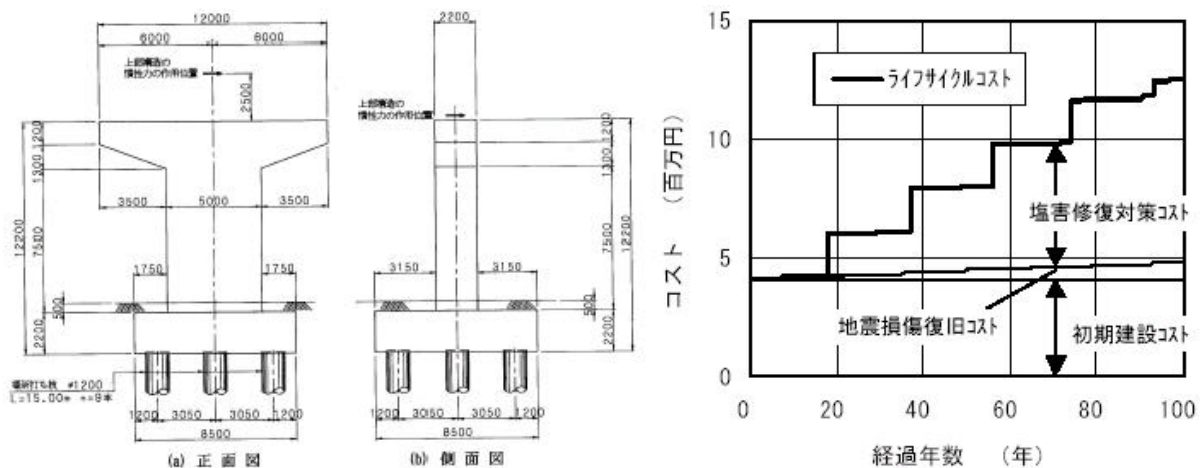


図 5.2-1 検討構造形式と標準設計に対する算定コストの経時変化¹⁾

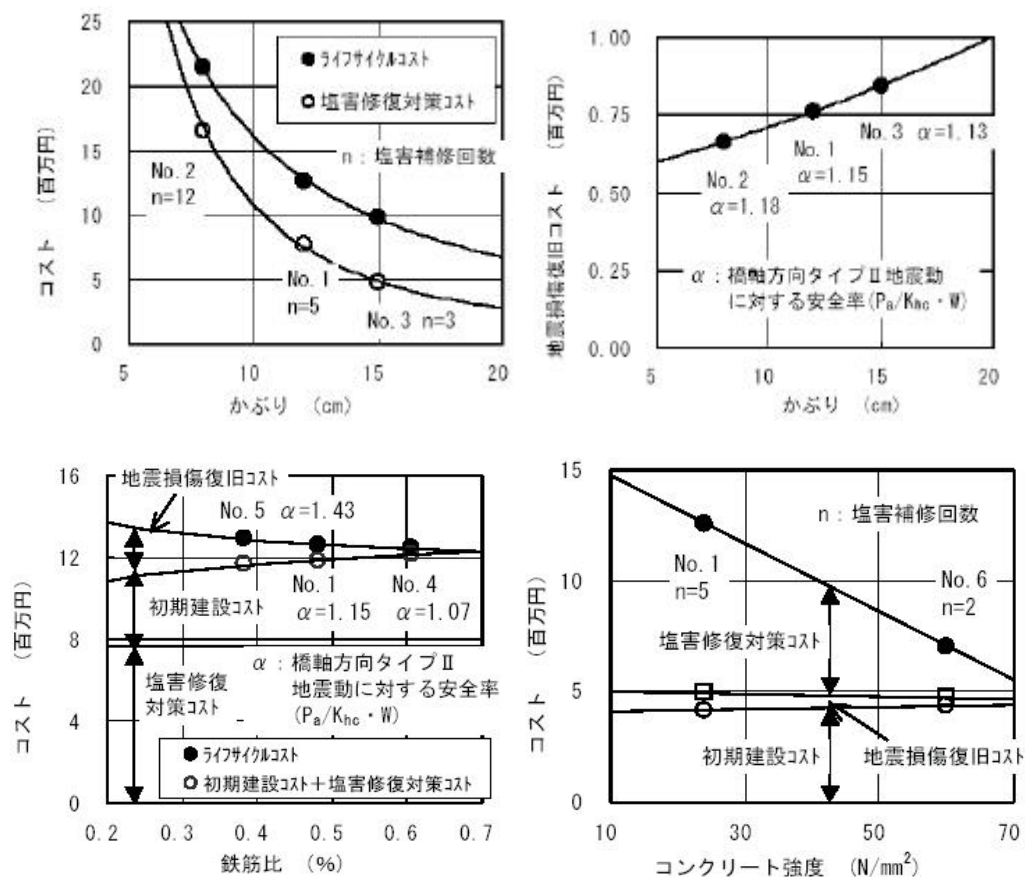


図 5.2-2 コストに及ぼす設計諸元の感度¹⁾

5.3 復旧コストの概算

(1) 概要

平成7年1月17日に阪神淡路地域をおそった兵庫県南部地震は、未曾有の被害を阪神淡路地域にもたらした。道路橋においても例外ではなく有史に残る被災が生じた。兵庫県南部地震での被災の特徴は、橋脚構造物の脆性的被災により落橋を生じたケースが多く見られたことである。特に、名神高速道路、中国自動車道、阪神高速道路3号神戸線、同5号湾岸線、さらに国道171号門戸高架橋、国道43号岩屋高架橋や国道2号浜手バイパスでは甚大な被害が生じた。

ここでは、阪神高速道路3号神戸線における復旧実績に基づく復旧コストをレビューし、構造物の被災度と復旧コストとの関連性について検討を行う。なお、このように実績ベースでの復旧コスト算定は、兵庫県南部地震における大規模な復旧実績に蓄積によるところが大きい。

また、本検討結果に基づき大規模なコストが要すると考える部位については、あらかじめ低コストな復旧方法を開発することにより、ライフサイクルコストを縮減することも可能である。

(2) 被災道路橋の復旧プロセス

道路橋の復旧過程は、主に3つの段階から構成される。図5.3-1に震災復旧の流れを示す。震災復旧の第一段階では、地震直後に道路橋の被災状況の概略を把握し、二次災害の危険性を判断し周辺地域への被害の拡大を防止する処置つまり通行止め等の供用停止などの緊急処置が行われる。兵庫県南部地震時では被害の程度の大きさから、被災橋脚の緊急補強や桁の落下を防止する緊急支保工の設置などの対策が採られた。震災復旧の第二段階では橋梁構造物船体の被災状況を調査して、本復旧の方針を定めるとともに、本復旧完了までの輸送確保の緊急性、応急復旧の難易度などに基づいて、応急復旧の優先順位および復旧水準を定め適切な後方で応急復旧が行われる。震災復旧の第三段階では、応急復旧により緊急輸送機能が確保されている段階であるため、本復旧のための詳細調査および本復旧工事が行われる。被災が大きい場合には、応急復旧を行わず本復旧が直接行われる場合がある。兵庫県南部地震における道路橋の復旧は、この場合にあたる。

兵庫県南部地震における道路橋の復旧コストの算出にあたっては、二次災害防止対策に係るコストおよび本復旧に係るコストを考慮した。

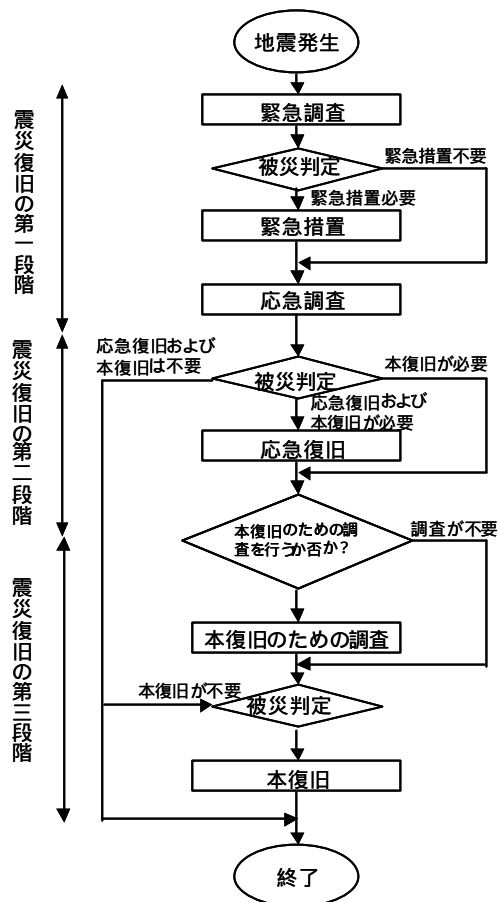


図 5.3-1 震災復旧の流れ¹⁾

(3) 道路橋の復旧方法と復旧費

a) 道路橋の二次災害防止対策

地震直後には道路橋の被災状況の概略を把握し，2次災害の危険性を判断し周辺地域への被害の拡大を防止する処置つまり通行止め等の供用停止などの緊急処置が行われる。さらに，応急調査終了後に，地震によって重大な損傷を受け耐荷力の減少が著しいと判断される場合，または余震等の影響によって被害が拡大され周辺への二次災害が懸念される場合は，応急対策が実施される。

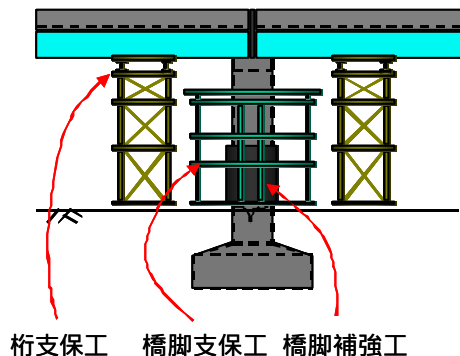


図 5.3-2 道路橋橋脚の二次災害防止対策工



(1)As および A 橋脚



(2)B 橋脚

写真 5.3-1 道路橋橋脚の二次災害防災対策例

兵庫県南部地震の復旧においては、道路橋の橋脚に甚大な被災を受けている場合は、本復旧までの応急対策として橋脚基部損傷部への鋼板巻立て補強（損傷部への樹脂注入，主鉄筋補強，鋼板型枠によるコンクリート充填等の補助広報も含む），および橋脚梁部に対する支保工，桁部に対する支保工等が行われた．兵庫県南部地震直後多大な被災を受けた都市高速道路で行われた応急対策事例を図 5.3-2 および写真 5.3-1 に示す．倒壊または使用不可能（被災調査で被災度 A s，A と被災判定されたもの）と判断された構造物は撤去し，再構築とした．しかし，詳細な調査・検討を行った結果，部材取替えなどにより復旧可能なものは部分的な取替えに留め，補強・補修で対処している．また，外観調査で被災度 B 以下のランクに判定された橋脚で，傾斜の著しいものについても，撤去再構築するものとした．その他の橋脚については補修後，補強を行っている．

b) RC 橋脚の再構築

橋脚再構築の前に損傷橋脚の撤去を実施する必要がある．そのため既設橋脚を地盤面まで撤去する必要がある．兵庫県南部地震での都市高速道路高架橋の撤去にあたっては，撤去時の騒音振動を極力低減させるため，ワイヤーソーイングによるコンクリートブロックの切断が行われた．切断されたコンクリートブロックの取り降しについては，上部構造を撤去した場合についてはトラッククレーンによる撤去が可能であるが，橋脚構造物に比較して建設コストが高い上部構造物については存置することが望ましいため，テルハクレーン工法，超大型ジャッキ工法，自走式台車工法などが採用された．写真 5.3-2 に，ワイヤーソーイング工法により切断されたコンクリートブロックをテルハクレーン工法により取り降ろしている状況を示す．



(1)桁上に設置されたテルハクレーンによる
ブロック取り降し状況



(2)ワイヤーソーイング工法により切
り出された橋脚ブロック

写真 5.3-2 RC 橋脚の撤去状況

橋脚撤去の後に、再構築が行われる。再構築においては、既設フーチングへ新設主鉄筋を穿孔定着、既設主鉄筋との接合などの工種が存在するものの基本的に新規の橋脚施工とほぼ同様である。なお、都市高速道路の復旧においては、施工工期の短縮のため鋼製梁を採用している。写真 5.3-3 に、橋脚の再構築における配筋状況および鋼製梁の架設状況を示す。



(1)配筋状況

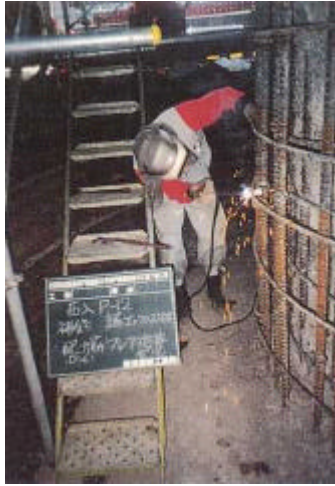


(2)鋼製梁架設状況

写真 5.3-3 RC 橋脚の再構築状況

c) 橋脚補強

既設橋脚の復旧（補強）においては、鋼板型枠コンクリート巻き立て工法が採用された。まず、損傷部においては、損傷部コンクリートを健全部まで取り出し、座屈主鉄筋を取り替えた後、鋼板型枠コンクリート巻き立て補強工を実施する。写真 5.3-4 に、橋脚補強工の状況を示す。



(1)既設主鉄筋との接合



(2)鋼板型枠の設置

図 5.3-4 橋脚補強状況

d) 上部構造の復旧

鋼桁の損傷は主に桁端部に多く見られた。桁部の損傷程度が大きく範囲が広い場合は、床版コンクリート撤去し主桁損傷部を切断撤去し、新規部材を接合させた。写真 5.3-5 に、上部構造補強工の状況を示す。桁部の損傷程度が小さい場合は加熱矯正などを行って補修を行っている。また、ほぼ全ての桁に対して桁位置の移動修正を行った。移動量の大きな桁に対しては、ベントを利用したジャッキアップ、桁の横取り作業、ジャッキダウンといった大掛かりな作業が必要であった。



(1)主桁損傷部切断状況



(2)損傷部取替え状況

写真 5.3-5 上部構造補修状況

e) 基礎構造の復旧

既設基礎構造物は被災していても、既設上部構造や橋脚を支持していることから、水平方向荷重に対する補強対策が主体となり、主に増し杭補強により復旧が行われている。写真 5.3-6 に、基礎構造補強工の状況を示す。なお、基礎の被災が軽微な場合は、耐久性の確保の観点からひび割れ部に対し注入工による補修を行っている。



(1)場所打ち杭施工状況



(2)増し杭完了状況

写真 5.3-6 基礎補強状況

(4) 道路橋の復旧コスト

a) 概説

ここでは、兵庫県南部地震で被災した場所打ち杭基礎、鉄筋コンクリートT型単柱橋脚（橋脚高が10-15m）、鋼I桁橋（道路幅員4車線）、およびRC床版からなる都市高架橋の復旧に要した復旧費について整理した。なお、整理にあたっては原則として3号神戸線復旧に係る全25工区の積算結果を元に算出を行っているものの、最終的に積算エキスパートによるレビュー結果も反映させた。したがって、以下のデータは各工区の単純算術平均ではなく、エキスパートのバイアスが反映されていることに注意されたい。なお復旧コストについては新設時の各構造部位の建設コスト（現在価値）により基準化を行っている。したがって、橋梁の復旧という観点からは橋梁全体の建設コストに対する各構造部位の建設コストが占める割合も考慮する必要がある。検討対象とした高架橋の場合、構造部位毎の初期建設コストは概ね表 5.3-1 のようになる。

表 5.3-1 道路橋の構造部位毎の新設コスト

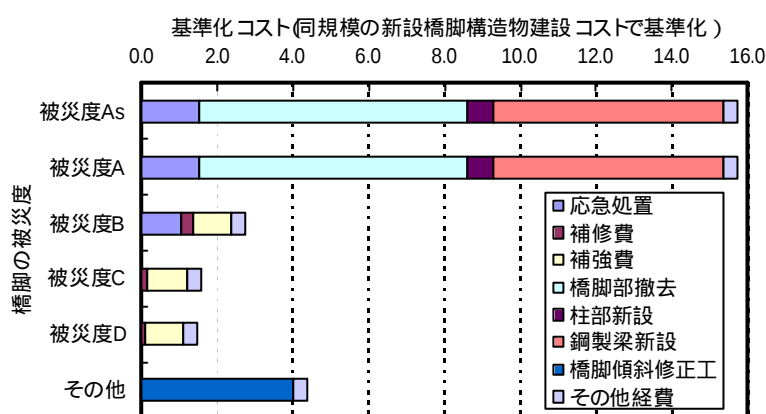
構造部位	コスト比率
基礎	20 - 25 %程度
RC 橋脚	5 - 7 %程度
上部構造	65 - 75 %程度

b) 橋脚の復旧コスト

RC 橋脚の平均基準化復旧コストを図 5.3-7 に示す。被災度が As および A に着目した場合、被災度の差による復旧コストの差は見られない。これは、被災度が As および A ランクに判定された場合は、撤去再構築されたためである。約新設の約 1.5 倍のコストを 2 次災害対策（鋼板型枠にコンクリートを充填する簡易な橋脚補強、梁支保工、および橋桁支保工）に費やしている。さらに、RC 橋脚の撤去に新設の約 8 倍のコストを要している。これは、橋脚の撤去において、都市高速道路直下の国道の交通への影響を最小限にするためや、近隣住民への騒音・振動の低減するために、ワイヤーソーイング工法を

採用したためである。したがって、都市内高速道路と全く建設環境条件の異なる地域では、これら、2次災害防止コストおよび撤去コストはより小さいものになると考えられる。さらに鋼製梁の建設には新設の約6倍のコストが必要とされた。鋼製梁の採用は、復旧期間を短縮するために採用されたものである。したがって、復旧期間に生じる社会影響のコストと比較次第では、RC構造を採用し復旧コストを低減することは可能と思われる。

被災度B, C, Dに着目した場合、被災度Bに対して行った二次災害防止対策コストによる差が支配的な差となっている。橋脚補修工については被災度によりその差が若干認められるが、その差は比較的小さい。兵庫県南部地震前後に耐震基準で考慮すべき地震力が変化したために必要となった補強コストが、補修コストに比較して大きいためである。その他として、橋脚傾斜修正工のコストも算出した。橋脚傾斜の修正にあたっては、被災度、現地条件などを考慮して、その適用性を十分に検討する必要があるが、一般に、被災度が大きく橋脚基部に塑性ヒンジが形成されている場合は容易に傾斜を修正することが可能であるが、塑性ヒンジが十分に形成されていない場合は、損傷部の鉄筋を切断するなど強制的にヒンジ化させなければ、傾斜修正が困難であることがわかっている。以上のように、橋脚の復旧コストに関しては、復旧方法として撤去再構築が必要か否かで大きく変化することがわかる。また、一方で被災度B, C, Dの復旧コストの差は小さいことがわかる。



凡 例	内 容
応急処置費	2次災害防止対策で次の対策工からなる 被災度As、A橋脚 桁支保工、梁支保工、橋脚補強工 被災度B橋脚 梁支保工、橋脚簡易補強工
補修費	座屈鉄筋の補修、剥離コンクリートの補修からなる
補強費	橋脚断面増厚、増主鉄筋、鋼板巻立補強費からなる
橋脚部撤去費	振動・騒音低減工法による橋脚の撤去工
柱部新設	ワイヤーソーによる切断、桁残置下の柱部撤去、廃棄等
鋼製梁新設	柱部の再構築費
その他経費	工期短縮のため鋼製梁を使用(急速施工) 仮設備等経費

兵庫県南部地震による阪神高速道路3号神戸線の復旧方法に基づくグラフは復旧費を同規模の新設橋脚構造物建設コストで基準化した。

図 5.3-7 橋脚の復旧コスト

以上のように、橋脚の復旧コストに関しては、復旧方法として撤去再構築が必要か否かで大きく変化することがわかる。なお、被災度がB, C, Dであっても残留変位が大きいものは、撤去再構築が行われている。これは、支承などによる路面高さの調整が不可能になるためである。

c) 上部構造の復旧コスト

上部構造の基準化復旧コストの平均を図 5.3-8 に示す。橋脚の復旧コストと同様に、上部構造においても被災度 As および A の被災を受けた上部構造は撤去再構築を行うという復旧方針を設けている。このように撤去再構築を行った場合、復旧コストが大幅に増加していることがわかる。上部構造の建設コストが橋梁全体に占める割合は高いため、撤去再構築を行った場合でも基準化コストは 1.6 前後であるが、その絶対額は橋脚のそれに比較してはるかに大きい。

被災度 As および A の上部構造はそのほとんどが、被災による橋脚の沈下によるものが多い。また被災度 B, C, D の上部構造の被災程度は、桁端部での損傷が多い。被災度 B, C, D の復旧コストに着目した場合、被災度 B では上部構造の補修費に加えて桁位置の調整のコストが無視できないことがわかる。ただ、桁位置修正については、被災度 C であっても被災度 B と同等の桁位置修正コストが必要となった事例もあった。

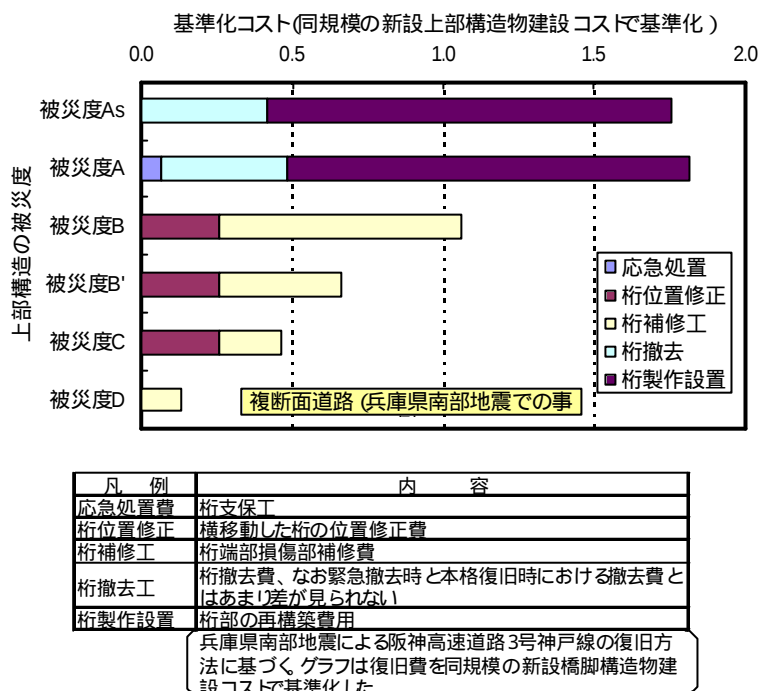


図 5.3-8 上部構造の復旧コスト

d) 基礎構造の復旧コスト

基礎構造の基準化復旧コストの平均を図 5.3-9 に示す。基礎の復旧コストは、被災した既設杭基礎の残留耐荷力により大きく異なる。

被災度 b1 は、護岸直近で水平方向に約 1m 程度移動した基礎の復旧コストを示している。ここでは、既設杭基礎の水平方向の残留耐荷力を無視して補強を行っており、新設杭基礎の建設コストに比較して約 1.2 倍のコストが必要となった。これは、高コストの主因は桁下という狭隘空間での施工となるためである。

被災度 b2 は、護岸から約 100m 程度以内の基礎の復旧事例であり、既設杭基礎の水平方向残留耐

荷力がある程度残存しているとして復旧した場合のコストを示している。概ね新設杭基礎の約5倍のコストが必要となっている。

被災度cは、杭体にひび割れ損傷が生じたもので、樹脂注入等による補修が必要とされる場合の復旧コストを示している。新設杭基礎の約30%程度のコストが必要となっている。

参考文献(5.3)

- 1) 足立幸郎ら：兵庫県南部地震で被災を受けた都市高速道路橋の復旧費に関する検討，土木学会第27回地震工学研究発表会論文集（投稿予定）

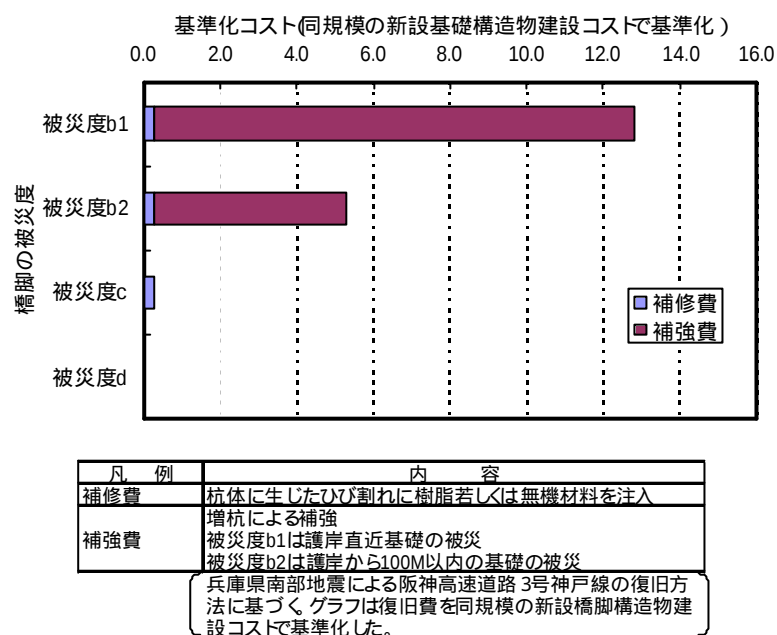


図 5.3-9 基礎構造の復旧コスト

5.4 間接経済被害の考え方

(1) 耐震施策の便益と経済被害

地震災害における被害と耐震設計の便益は厳密には異なる．被害軽減額の期待値をもって新たな設計基準を導入したことの便益とすることはある一定の前提条件のもとで正当化されるべきであることに注意が必要である．

生起する地震のタイプを $i \in \mathbf{I} = \{0, \dots, I\}$ で表し，経済社会の状態も同様にラベル付けされるものとする．代表的住民の間接効用関数を単純化して所得 Y_i と環境 Q_i の関数として $V(Y_i, Q_i)$ で表す．地震の生起確率についての期待値をとる操作を $E_{i \in \mathbf{I}}(\cdot)$ で表し，さらに，新たな耐震設計の導入が行なわれない場合(以下では施策無と呼ぶ)と行なわれた場合(以下では施策有と呼ぶ)をそれぞれ a と b で区別するものとする．不確実性下の便益に関する代表的な定義として，補償的偏差(Compensating Variation : CV の概念に従えば，新たな耐震設計の便益(上田(1997)を参照)は次のようになる．

$$\text{Non-contingent CV:} \quad E_{i \in \mathbf{I}}(V(Y_i^a, Q_i^a)) = E_{i \in \mathbf{I}}(V(Y_i^b - \text{NCCV}, Q_i^b)) \quad (5.4-1)$$

$$\text{State-contingent CV:} \quad V(Y_i^a, Q_i^a) = V(Y_i^b - CV^i, Q_i^b) \quad \text{for all } i \in \mathbf{I} = \{0, \dots, I\} \quad (5.4-2)$$

$$\text{Expected CV:} \quad \text{ECV} = E_{i \in \mathbf{I}}(CV^i) \quad (5.4-3)$$

$$\begin{aligned} \text{Fair Bet CV:} \quad \text{FBCV} &= \max_{cv^j \text{ for all } i \in \mathbf{I}} E_{i \in \mathbf{I}}(cv^j) \\ \text{s.t. } E_{i \in \mathbf{I}}(V(Y_i^a, Q_i^a)) &= E_{i \in \mathbf{I}}(V(Y_i^b - cv^j, Q_i^b)) \end{aligned} \quad (5.4-4)$$

これに対して被害額は一般には施策無での平常時($i = 0$)と地震時($i \neq 0$)を比較するものであり，次のように表される．

$$V(Y_0^a - D^i, Q_0^a) = V(Y_i^a, Q_i^a) \quad \text{for all } i \in \mathbf{I} = \{1, \dots, I\} \quad (5.4-5)$$

被害軽減額をもって便益とする考え方は，まず，全ての被害が既に金銭換算されているとして，間接効用関数が所得のみの関数として表されているとする．

$$V(Y, Q) = V(Y) \quad (5.4-6)$$

従って，施策無での被害額は

$$V(Y_0^a - D^i) = V(Y_i^a) \quad (5.4-7)$$

施策有での被害額は

$$V(Y_i^b) = V(Y_0^b - D^i) = V(Y_0^a - D^i) \quad (5.4-8)$$

このとき，次の差額をもって被害軽減額としている．

$$RD^i = D^i - D^i \quad (5.4-9)$$

State-contingent CV の定義と比較すると，

$$V(Y_i^a) = V(Y_0^a - D^i) = V(Y_i^b - CV_i) = V(Y_0^a - D^i - CV_i) \quad (5.4-10)$$

従って，

$$CV^i = D^i - D'^i \quad (5.4-11)$$

このとき、被害軽減額と State-contingent CV による施策の便益は一致する。以上から、被害軽減額を施策の便益とすることは、施策の一般的な定義と比較すればきわめて限定的な場合にのみ妥当であることが分かる。

State-contingent CV の期待値である ECV は一般には NCCV や Fair Bet CV とは一致しない。特に、NCCV には災害が起こる前において住民が持っている不安感の減少が含まれているが、ECV にはそれが含まれていないため、それを用いると便益は過少評価される危険性がある。

以上の観点から、新たな耐震設計の導入という施策の便益と被害額あるいは被害軽減額は一般には同一視すべきではない。一致するとみる場合には上記のような仮定が暗黙のうちに置かれていることに注意が必要であり、また、実際の計測事例を蓄積することなしには、工学的近似の妥当性についても判断できない。しかし、実際に行われている便益推定は、これらが一致すること近似として妥当性であることを前提に行われている場合が多数ある。特に、刊行されている多くの費用便益分析の指針ではそのようになっている。

(2) 直接被害と間接被害の仕分け

直接被害として施設の復旧コストを計上する考え方は、被災した状態においては必ず施設を平常時の機能に復帰させるという行動が必ず実施され、そのための工事費の支出が必ず行われることが前提になっていると言える。復旧工事費の支出によってはカバーされない経済被害額を間接被害額とここでは呼ぶものとする。

先に示した定式化に従えば、 $i=0$ を平常時とし、 $i=1$ を被災時を代表する状態として、災害時の所得が次のように表されると解釈できる。

$$Y_1^b = Y_0^b - I_1^b - K_1^b \quad (5.4-12)$$

ここで、 I_1^b は復旧工事費の支出額であり、 K_1^b はそれ以外の所得の損失である。

間接被害は所得の変化として捉えられるものだけでなく、環境変化によるものも含まれる。ただし、復旧が瞬時に行なわれるような場合は、環境 Q の変化は無視できるが、復旧過程で施設が未だに機能しない場合にはその分だけ次のように環境水準が低下すると見なすことになる。

$$Q_1^b = Q_0^b - H_1^b \quad (5.4-13)$$

ここで、 H_1^b は環境水準の低下分を表す。間接被害額はこの環境変化も含んだ CV 等を計算することで算出される。

(3) 実証的な推定方法

既に刊行されている各種の費用便益分析の指針には、間接経済被害額の推定方法が解説されている。その中で、対象となる被害に応じて、大きくは、人的被害の推定、民間資産の被害推定である。社会基

盤施設自体の破損による間接被害推定は、新規整備による便益推定の手法を援用することが可能である。

ここでは、道路橋が破損して旅行所要時間が増大してしまった場合の経済損失の算定例を簡単に紹介する。旅行の目的地を j ，出発地 i とする 1 日当り交通量を X_{ij} とする。平常時の交通量をラベル a ，被災時を b とする。これらの交通の一部は当該道路橋を通過するため、破損により通行が困難になると直接的に所要時間が増大する。しかし、関係する道路網全体で考えると、それぞれの自動車が経路を変更することで他の道路の交通量が変化して混雑等が生じるため、当該道路橋をもともと通過しなかった交通も含めて全ての交通について所要時間が (i, j) のペア毎に $t_{ij}^a \rightarrow t_{ij}^b$ と変化する。また、走行距離が変化したり、有料道路を使用することで追加的に生じる金銭費用を Δm_{ij} とし、さらに、一般に時間価値(value of time)と呼ばれる単位時間が有する経済価値を w とする。この時間価値は、所要時間が一単位増加することを回避するために支払っても良いと思う金額であり、また、ある条件のもとでは賃金率に一致する。最後に、復旧するまでの通行困難な日数を d とする。以上のもとで、被災による交通の不便がもたらす経済被害額は、次式で算定すること(道路投資の評価に関する指針検討委員会(1999)を参照)ができる。

$$D = \frac{1}{2} \sum_{(i,j)} (X_{ij}^a + X_{ij}^b) \{ -\Delta m_{ij} - w \times (t_{ij}^b - t_{ij}^a) \} \times d \quad (5.4-14)$$

ペア (i, j) を 1 つとして、例示的な設定数値では、示した式に従って被害額を算定してみると次のようになる。

表 5.4-1 道路橋被災時の間接被害額算定の例題

	1 日当り交通量	所要時間	金銭費用	時間価値	復旧日数
平常時	1 万 5 千台	25 分	250 円	50 円/分	60 日
被災時	1 万台	35 分	300 円		

$$D = \frac{1}{2} \times (15,000 + 10,000) \times \{ -(300 - 250) - 50 \times (35 - 25) \} \times 60 = -412,500,000$$

= -4.125 億円

所要時間の変化と金銭費用の変化は、道路交通のネットワーク均衡分析によって算出される。ネットワーク均衡分析については土木計画学研究委員会(1999)に詳細がある。また、分析システムは多数開発されており、既に市販されている。

本報告書では、レベル 2 設計によって人的被害に対する保障がされているとして、経済性照査に人的被害を含めないこととしている。ここでは参考として、もし人的被害を含めて考える場合について触れておく。現段階では人的被害額の推定には交通事故によるものを参照することができる。典型的な軽症、重症および死亡についての社会的被害額が既往の指針等で設定されている。例えば、道路投資の評価指針(道路投資評価に関する指針検討委員会(1999))では、表 5.4-2 のような値が設定されてる。それに対して、先進諸外国では、人命の価値について表 5.4-3 のような値が設定されており、比較してみると、わが国のそれが著しく低いことがわかる。この点については、設定数値の見直しを求める声があり、現

在，各所で検討が行われている．ここでいう人命の価値は統計的生命の価値(statistical value of life)と呼ばれるものであり，ある一定の死亡確率の変化に対する受取意思額(willingness to accept)あるいはそれを回避ための支払意思額(willingness to pay)である．固有名詞の付いた特定の個人を対象としてその人命を貨幣換算したものでないことに注意が必要である．

表 5.4-2 日本の道路投資評価における人的被害の設定値（単位：千円）

	死亡	重傷 (後遺傷 害)	軽傷 (傷害)
人身損失額	31,533	9,374	644
物的損失額	392	392	392
事業主体の損失額	1,046	242	57
各種 公 的 機 関 等 の 損 失			
救急搬送費	40	40	40
警察の自己処理 費用	142	142	142
裁判費用	360	31	31
訴訟進行費用	116	10	10
検察費用	26	25	25
矯正費用	258	0	0
保険運営費	213	213	213
被害者の救済	214	6	6
社会福祉（身障 者）	0	70	0
救急医療体制整 備費	17	17	17
小計	1,386	554	484
合計	34,357	10,562	1,577

表 5.4-3 日本の道路投資評価における人的被害の設定値（単位：千円）

	死亡	重傷 (後遺障害)	軽傷 (傷害)
総務庁資料	31,533	9,374	644
(社)日本損害保険協会 (H7年度)	29,430	10,390	630
ドイツ EWS (1997年版)	116,800	5,110	511
イギリス (COBA 1995)	231,000	2,406	196
アメリカ ¹⁾ (1990)	87,800 (275,000)	7,360 (7,125)	- (2,625)
オーストラリア ²⁾ (1992)	55,810	8,400	880
ニュージーランド	240,000		

1) 「National Highway Traffic Safety Administration」資料，()内は文献「The full costs and benefit of transportation」(1997)

2) オーストラリア輸送・通信局資料（総務庁資料より）

民間資産の破損については、治水経済調査要綱において、水害による場合の被害額の標準的な算定方法が解説されている。民間資産の価値を推定する方法は、取得または調達原価、再調達価格、そして収益還元による方法が主なものである。民間資産については、再販売市場が形成されている場合は、そこでの時価に基いて資産価値を推定することも可能である。理想的な状態では、収益還元によって推定された価値と市場での時価によるものは一致する。

社会基盤施設の破損がもたらす経済被害は、新規整備による便益を推定する際の手法を援用することが可能である。例えば、道路施設の破損によってサービス水準が低下する(交通所要時間が増加する)場合の社会的な時間損失は、時間が短縮した場合の計算法に時間が増加した場合の数値を入力することで算出できる。ただし、社会基盤施設の多くは、ネットワークを形成しているため、部分的な破損がネットワーク全体に対してどのようなサービス水準の変化をもたらすのかを慎重に推定する必要がある。既に、ネットワークの信頼性解析には多数の研究蓄積があるので、それらを最大限に活用するべきである。

5.5 リスクを考慮した設計・修繕/更新と経済評価

(1) 評価の時間的視野

地震災害は言うまでもなくリスク事象である。そして、社会基盤施設の将来における劣化も確率過程に従うリスク事象であり、長期にわたって供用される施設の経済的価値は、両者を共に確率過程として明示した形式で評価しなければならない。

リスクの存在下での社会基盤施設の価値は一般化した形式として、次のような確率制御問題(小林・上田(2002)、上田(2002))で表される。

期間の設定

プロジェクトライフ(建設期間と供用期間を合わせた期間)を離散化して、 $n \in \{0, \dots, N\}$ の期間に分割する。各期は $t \in \{0, \dots, n\Delta t, \dots, N\Delta t\} = \{0, \dots, n\Delta t, \dots, T\}$ で表される。

確率過程

状態 $X(t) \in X$ は次のような確率密度分布に従うとする。

$$\Pr(x(n+1)|x(n), u(n), n; \Delta t) = p_x(x(n+1)|x(n), u(n), n; \Delta t) \quad (5.5-1)$$

状態 $X(t) \in X$ も離散化して、次のように表す。

$$x_{j^*}(n+1) \in \{x_0(n+1), \dots, x_j(n+1), \dots\} \in \mathbf{R}^{J+1} \quad (5.5-2)$$

確率密度関数も状態 x_j から x_{j^*} への推移として、次のようにあらわす。

$$\Pr(x_{j^*}(n+1)|x_j(n), u(n); \Delta t) = p_x(x_{j^*}(n+1)|x_j(n), u(n), n; \Delta t) \quad (5.5-3)$$

行動

各期における行動を状態に依存して決定されるものであるとするため、次のようなベクトルとして表現する。

$$u(n) = \{u_0(n), \dots, u_j(n), \dots\} \in \mathbf{R}^{J+1} \quad (5.5-4)$$

各期に実施できる行動は状態にも依存しているため、次の条件で表す。

$$g(u_j(n), x_j(n), n) \geq 0 \quad \text{for all } n \in \{0, \dots, N-1\} \text{ and } j \in \{0, \dots, J\} \quad (5.5-5)$$

社会的便益の流列

各期における社会的純便益は、状態と行動の関数として表されとする。

$$p(u_j(n), x_j(n), n) \quad (5.5-6)$$

終末残存価値

プロジェクトの終了時には、状態 $X(N) \in X$ に依存した次の終末残存価値を持つ。

$$h(x_j(N), N) \quad (5.5-7)$$

終了時の状態には制約があるとして、次の条件で表す。

$$k(x_j(N), N) \geq 0 \quad \text{for all } j \in \{0, \dots, J\} \quad (5.5-8)$$

以上の設定に基いて次のような確率制御問題を定式化する．

【確率制御問題】

$$V(x(0),0) = \max_{\{u_j(n)\}_{j=0}^J, n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{j=0}^J \sum_{j'=0}^J p_x(x_j(n) | x_{j'}(n-1), u_{j'}(n-1), n-1; \Delta t) p(u_j(n), x_j(n), n) \Delta t \right. \\ \left. + \sum_{j=0}^J \sum_{j'=0}^J p_x(x_j(N) | x_{j'}(N-1), u_{j'}(N-1), N-1; \Delta t) h(x_j(N), N) \right\} \quad (5.5-9a)$$

s.t.

$$g(u_j(n), x_j(n), n) \geq 0 \quad \text{for all } n \in \{0, \dots, N-1\} \text{ and } j \in \{0, \dots, J\} \quad (5.5-9b)$$

$$k(x_j(N), N) \geq 0 \quad \text{for all } j \in \{0, \dots, J\} \quad (5.5-9c)$$

$$x(0) = \bar{x}(0); \text{given} \quad (5.5-9d)$$

このタイプの数理計画問題は，次のようなベルマン方程式(Bellman's Equation)を用いた解法で解くことができる．

$$V(x_j(n), n) = \max_{u_j(n)} p(u_j(n), x_j(n), n) \Delta t + \sum_{j'=0}^J p_x(x_{j'}(n+1) | u_j(n), x_j(n), n, \Delta t) V(x_{j'}(n+1), n+1) \quad (5.5-10a)$$

$$\text{s.t. } g(u_j(n), x_j(n), n) \geq 0 \text{ for all } j \in \{0, \dots, J\} \quad (5.5-10b)$$

この方程式を次の終末残存価値から出発して， $n = N-1$ から $n=1$ まで後ろ向きの解法で解いていく．

$$V(x_j(N), N) = h(x_j(N-1)) \quad (5.5-11)$$

ベルマン方程式の解は，既に実現している状態 $x_j(n)$ を所与としているため， $u_j^*(n) = M(x_j(n), n)$ というような $x_j(n)$ の関数として表される．これが状態と行動を関係付けるルール $M: X(t) \in X \mapsto u(t) \in U$ に他ならない．

(2) 設計と補修・更新

上記の確率制御問題において，行動 $u(t) \in U$ には，第一に，初期段階で行うものとして構造物の仕様の選択，すなわち，設計が含まれ，第二に，供用後の各時期において選択的に実施すべき補修・更新が含まれる．

状態変数 $X(t) \in X$ は確率過程に従う変数であり，この中には，第一には，施設を取り巻く外的環境が含まれる．地震外力とその発生に関する確率モデルはこの変数とその確率過程の表現方法に含まれることは言うまでもない．第二には，供用に伴って進行する構造物の劣化度が含まれる．劣化状態と発生する地震外力の組み合わせにより，そのもとでの施設のサービス水準が決定され，そして，それに応じて社会的便益 $p(u_j(n), x_j(n), n)$ が決定される．構造物の破損した場合の社会的損失額あるいは耐震施策の便益はこの変化として表される．

設計段階において，施設の経済価値を最大化するという観点からどのような仕様を選択するかという問題が検討される．設計問題は確率制御問題において供用時点 $t = t'$ での状態 $x(t)$ を選択することであると解釈できる．そこでは，原則論としては，建設および供用後の補修・更新が最適に実施されること

が前提になる．

いわゆるライフサイクルコストの基準は，上記のような確率制御問題の目的関数を費用と呼ばれる項目だけによって構成した上でのその最小化問題に書き換えようとするものである．しかし，経済計算の原則から見れば，費用側だけを強調することは取り上げる項目を恣意的にしてしまう危険性があり，また，多くの場合において，構造物の仕様が便益側にも大きな支配的要因であることへの注意を妨げる結果となってしまう．従って，ライフサイクルコストという狭い概念(上田(2001)を参照)に拘泥することなく，まずは，上記のようなフレームで社会基盤施設の経済価値を考えてみるべきである．

典型的な構造物の種類別に上記の確率制御問題のモデルを適用して，構造物の種類と地震外力の代表的な確率過程に応じて標準的な解をまずは導出しておくことが必要である．それらをテンプレートとして，個別構造物の設計において活用することが現実的であろう．それらの典型的/代表的な事例から，設計変数と経済価値の関係を簡便な計算式等で表現して，適用事例の蓄積を進めながら実際の設計業務へ反映させるべきである．

(3) 特定の確率過程を想定した簡便な評価方法

確率制御問題を厳密に解くことは必ずしも容易ではない．しかし，災害を様々な確率過程として表現し，かつ，構造物の特性を明示的に取り入れて最適な補修・更新戦略を導出して蓄積していくべきである．そのような精緻な成果が蓄積されるまでの簡便な評価方法としていくつかの簡便な評価方法を考えておくことも必要である．

構造物を評価する時間視野を $t \in [0, T]$ とし，各時点 t で構造物が平常時においてもたらす便益と費やす費用をそれぞれ $b_o(t), c_o(t)$ とする．災害時におけるそれらを $b_d(t), c_d(t)$ とする．さらに社会的割引率を r とする．ある微小な時間区間 $[t, t+dt]$ の間に災害が到着して構造物が破損する確率をハザードモデルで表現すると次のようになる．

$$m dt = \frac{f(t)dt}{1-\Phi(t)} \quad (5.5-12)$$

ただし， $\Phi(t)$ は時点 t までに破損する確率であり， $f(t)$ はその確率密度関数である．微分方程式を解いて次の関係式が得られる．

$$1-\Phi(t) = \exp(-mt) \quad (5.5-13)$$

時点 t において破損が生じるとすると，その際の純現在価値は次のようになる．

$$v(t) = \int_0^t (b_o(s) - c_o(s)) \exp(-rs) ds + \int_t^T (b_d(s) - c_d(s)) \exp(-rs) ds \quad (5.5-14)$$

純現在価値を破損確率についての期待値として定義すると次のようになる．

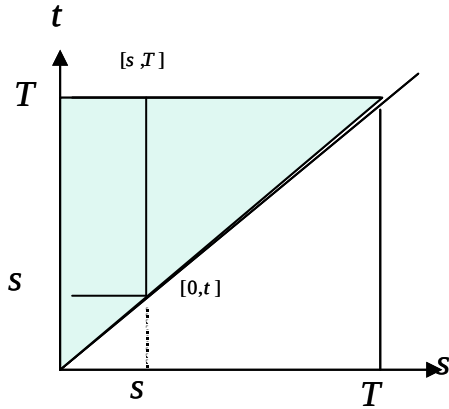
$$E(v(t)) = \int_0^T m \exp(-mt) \left\{ \int_0^t (b_o(s) - c_o(s)) \exp(-rs) ds + \int_t^T (b_d(s) - c_d(s)) \exp(-rs) ds \right\} dt \quad (5.5-15)$$

図 5.5-1 のように， s, t の積分順序を交換して(例えば，横松・小林(1997)を参照)次式を得る．

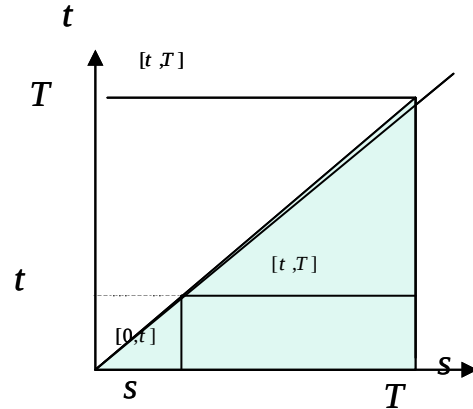
$$\begin{aligned}
& \int_0^T m \exp(-mt) \int_0^t (b_o(s) - c_o(s)) \exp(-rs) ds dt \\
&= \int_0^T \int_s^T (b_o(s) - c_o(s)) \exp(-rs) m \exp(-mt) dt ds \\
&= \int_0^T (b_o(s) - c_o(s)) \exp(-rs) \left\{ \int_s^T m \exp(-mt) dt \right\} ds \\
&= \int_0^T (b_o(s) - c_o(s)) \exp(-rs) \{-\exp(-mT) + \exp(-ms)\} ds \\
&= \int_0^T (b_o(s) - c_o(s)) \exp\{-(r+m)s\} ds - \exp(-mT) \int_0^T (b_o(s) - c_o(s)) \exp(-rs) ds
\end{aligned} \tag{5.5-16}$$

$$\begin{aligned}
& \int_0^T m \exp(-mt) \int_t^T (b_d(s) - c_d(s)) \exp(-rs) ds dt \\
&= \int_0^T \int_0^s (b_d(s) - c_d(s)) \exp(-rs) m \exp(-mt) dt ds \\
&= \int_0^T (b_d(s) - c_d(s)) \exp(-rs) \{1 - \exp(-ms)\} ds \\
&= \int_0^T (b_d(s) - c_d(s)) \exp(-rs) \{1 - \exp(-ms)\} ds \\
&= -\int_0^T (b_d(s) - c_d(s)) \exp\{-(r+m)s\} ds + \int_0^T (b_d(s) - c_d(s)) \exp(-rs) ds
\end{aligned} \tag{5.5-17}$$

$$\begin{aligned}
E(v(t)) &= \int_0^T (b_o(s) - c_o(s)) \exp\{-(r+m)s\} ds - \exp(-mT) \int_0^T (b_o(s) - c_o(s)) \exp(-rs) ds \\
&\quad - \int_0^T (b_d(s) - c_d(s)) \exp\{-(r+m)s\} ds + \int_0^T (b_d(s) - c_d(s)) \exp(-rs) ds
\end{aligned} \tag{5.5-18}$$



(a)第1項



(b)第2項

図 5.5-1 積分順序の交換

さらに単純化した場合には，時間視野を無限，すなわち， $t \in [0, \infty]$ として，しかも，災害時には構造物は完全に機能なくなるとすれば， $b_d(s) - c_d(s) = 0$ とおける．この場合には，式(5.5-18)は次のように簡略化される．

$$E(v(t)) = \int_0^\infty (b_o(s) - c_o(s)) \exp\{-(r+m)s\} ds \tag{5.5-19}$$

一方，破損を全く考慮しない場合の純現在価値は次のようになる．

$$E(v(t)) = \int_0^\infty (b_o(s) - c_o(s)) \exp(-rs) ds \tag{5.5-20}$$

両者を比較すると，平常時の純現在価値を計算する際の社会的割引率 r を $r+m$ に置き換えたものになっている．従って無限微小時間当りに破損する確率 m を割引率に加えることで災害による破損を考慮した評価式が得られることになる．レベル 1 設計が破損確率を変化させる場合には，式(5.5-19)を異なる破損確率について計算してそれをもって破損確率を軽減したことの便益とすることができる．

破損した時には，必ず修復費用 k を支出して災害によって破損した後には直ちに補修を行って平常時と同じ機能を回復できるようにするというマネジメントルールが採用されている場合を考える．その場合は， $b_o(s)-c_o(s)=b_d(s)-c_d(s)$ において，再び時間視野を無限とすると，式(5.5-15)を次のように書き換えることができる．

$$\begin{aligned}
 E(v(t)) &= \int_0^\infty m \exp(-mt) [\{ \int_0^\infty (b_o(s)-c_o(s)) \exp(-rs) ds - k \exp(-rt) \}] dt \\
 &= \int_0^\infty (b_o(s)-c_o(s)) \exp(-rs) ds - k \int_0^\infty m \exp(-mt) \exp(-rt) dt \\
 &= \int_0^\infty (b_o(s)-c_o(s)) \exp(-rs) ds - mk \int_0^\infty \exp\{-(r+m)t\} dt \\
 &= \int_0^\infty (b_o(s)-c_o(s)) \exp(-rs) ds - \frac{mk}{r+m}
 \end{aligned} \tag{5.5-21}$$

ここで，第 1 項の積分は破損を考慮しない場合の純現在価値である．第 2 項は破損が生じた際に支出される補修費用の期待値であり，社会割引率 r と無限微小時間当りに破損する確率 m を用いて表されている．レベル 1 の設計が破損時の補修費用 k を軽減させる場合は，異なる補修費用の期待値を計算してその差をもって便益とすることができる．当然ながら，同時に破損確率も軽減できる場合はその値も変化させて補修費用の期待値の変化額を算出することができる．

なお，式(5.5-21)において $b_o(s), c_o(s)$ が平均的に一定であれば，第 1 項の積分は $(b_o - c_o)/r$ となり，係数 $1/r$ を乗じることで一年当りの平均便益/費用からプロジェクトライフ全体にわたる便益/費用に変換することができる．3.3 のライフサイクルコストの定義における係数 g_{TD} も同様の役割を果たす係数であり，期間が 50 年程度と十分に長く，割引率 r が 4% 以上で小さくない場合には，ここで言う係数 $1/r$ で近似することができる．

式(5.5-21)のようなマネジメントルールが採用されている場合は，複数タイプの地震外力による破損 ($i=1, \dots, I$) について，それぞれ独立に補修費用の期待値を算出することができる．レベル 1 での設計が複数タイプの地震外力について無限微小時間当りの破損確率 (m_i) と補修費用 (k_i) を同時に変化させる場合は，タイプ別の補修費用の期待値について次式のような総和をとり，その変化額をもって便益とすることができる．

$$\sum_i \frac{m_i k_i}{r + m_i} \tag{5.5-22}$$

謝辞

本稿(5.4～5.5)をまとめるにあたって，横松宗太(鳥取大学)氏に貴重な意見を頂いた．ここに記して感謝する．ただし，本稿については執筆者のみが責を負っている．

参考文献 (5.4～5.5)

- 1) 上田孝行(1997),(招待論文)防災投資の便益評価, 土木計画学研究論文集 No.14, pp17-34
- 2) 道路投資の評価に関する指針検討委員会(1999), 道路投資の評価に関する指針(案), 日本総合研究所
- 3) 土木計画学研究委員会(1999), 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 土木学会
- 4) 上田孝行(2001), 社会基盤施設のライフサイクル評価手法, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.63, pp.121-135, 東京工業大学土木工学科
- 5) 小林潔司, 上田孝行(2002), インフラストラクチャマネジメント研究の課題と展望, 土木学会論文集 (投稿中)
- 6) 上田孝行(2002), 代表的な維持更新戦略とその費用便益分析における意義, ARSC2002 度年次大会 (2002/11/30-12/01 岡山大学)
- 7) 横松宗太, 小林潔司(1997), 防災投資による物的被害リスクの軽減便益, 土木学会論文集, No.576/IV-37, pp.1-8, 1997.110