

地震リスクと塩害劣化を考慮したRC橋脚の ライフサイクルコスト算定技術

小 原 孝 之 金 子 修^{*1}
金 刀 督 純^{*1} 三 島 徹 也

要 旨

著者らは、RC橋脚を対象としたライフサイクルコスト算定システムを構築した。耐用期間中に被るリスクとして「地震損傷」と「塩害劣化」を取り上げ、初期建設コストに加えて、維持管理・復旧コストを算定し、ライフサイクルコストを算定するものである。地震リスクは、与えられたパラメータと条件に従って、道路橋示方書耐震設計編の地震時保有水平耐力法を用いて算出する。地震応答値を算出し、損傷レベルに対応する復旧コストを算出し、得られた復旧コストと被災確率の関係から地震時復旧コストを算出する。塩害劣化リスクは、建設当初に実施する初期対策コストと耐用期間中に行う修復対策コストからなる。修復時期は1次元FEMによる塩化物イオン浸透解析により鉄筋位置の塩化物イオン濃度を評価し、耐用期間中に施す補修の回数から修復対策コストを算定する。本算定手法を用いて、耐用年数100年を想定した道路橋橋脚モデルに対してライフサイクルコストを試算し、評価検討を行った。

キーワード ライフサイクルコスト / 地震リスク / 塩害劣化 / RC橋脚

目 次

- | | |
|------------------------|--------------|
| 1. はじめに | 4. 検討事例による考察 |
| 2. ライフサイクルコスト算定システムの概要 | 5. 各パラメータの影響 |
| 3. ライフサイクルコストの算定方法 | 6. まとめ |

ESTIMATION METHOD FOR LIFE CYCLE COSTS OF RC PIES CONSIDERED EARTHQUAKE RISK AND CORROSION-DAMAGE DUE TO SALT ATTACK

Takayuki OBARA
Masayoshi KANETOH

Osamu KANEKO
Tetsuya MISHIMA

Synopsis:

Authors built the life cycle cost calculation system for RC bridge pier. "Earthquake damage" and "corrosion- damage due to salt attack " are taken up as a risk worn during durable, in addition to initial construction cost, maintenance management / restoration cost is calculated, and life cycle cost is calculated. An earthquake risk is computed using the parameter and conditions that were given by evaluating the earthquake-proof ability of RC bridge pier based on a earthquake design method edited by earthquake design part of highway bridge code. The restoration cost corresponding to a damage level is computed from the acquired earthquake response value, and earthquake risk is computed from the relation between the obtained restoration cost and disaster probability. A damage-from-salt-water risk consists of initial construction cost and restoration cost performed during durable. Restoration time is determined by evaluating the chloride ion concentration of a re-bar position by chloride ion osmosis analysis by 1-dimensional FEM. Restoration cost is calculated from the number of times of the repair, and a corrosion-damage due to salt attack risk is calculated. The trial calculation of life cycle cost was made to the highway bridge pier model supposing life 100 years using this calculation technique, and evaluation examination was performed.

* 1 株式会社トータル・インフォメーション・サービス

1. はじめに

近年、土木構造物のリニューアルの意識が高まり、新設構造物のライフサイクルコスト算定に対する関心が高まっている。それに伴い、性能照査型維持管理の精度向上を目的として、経年劣化や地震リスクの評価手法が求められている。そこで本研究では、経年劣化リスクと地震リスクを定量的に評価し、ライフサイクルコストを算定する手法を提案する。本算定技術は、RC 橋脚を対象として、構造物が耐用期間中に被るリスクに対する維持管理・復旧コストを算定し、ライフサイクルコストを評価するものである。得られた算定結果は、初期建設時点における最適仕様と維持管理対策の最適な工法と時期を評価するものである。

2. ライフサイクルコスト算定システムの概要

2.1 ライフサイクルコストと対象リスク

一般的にライフサイクルコストは初期建設コストと維持管理・復旧コスト、最終処分コストからなる(図-1)。ここで本検討では、構造物が供用期間中に被るリスクとして代表的な「地震災害による損傷」と「塩害による経年劣化」を取り上げ、初期建設コストとこれらのリスクをライフサイクルコストとしてとらえ、点検コストおよび最終処分コストは考慮しないものとする。検討対象は橋梁橋脚部に限定し、基礎およびフーチング、土留め等の仮設工は含まないものとする。

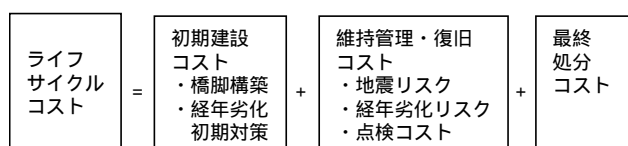


図-1 ライフサイクルコストの概念

2.2 算定フロー

本システムの算定フローを図-2に示す。

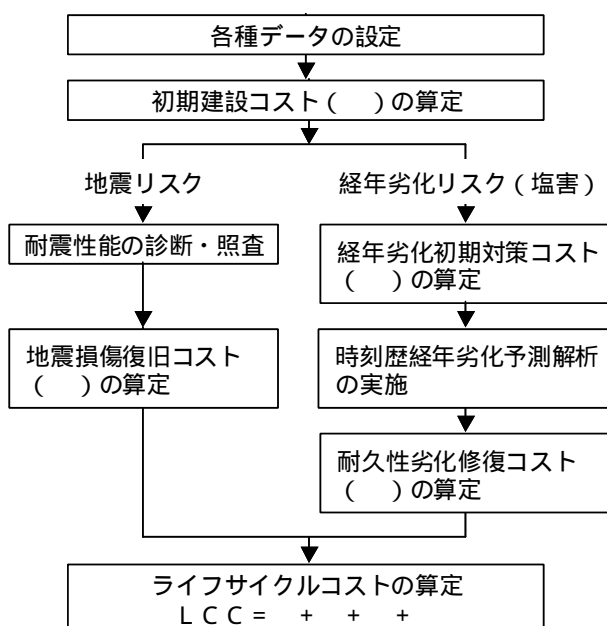


図-2 ライフサイクルコスト算定フロー

2.3 算定システムの概要

(1) システムの仕様

システムの仕様の一覧を以下に示す。

対象構造物 : RC 橋脚
対象リスク : 地震災害、塩害劣化
パラメータ : 断面形状および寸法
鉄筋の材質、鉄筋比
コンクリート強度
水セメント比、セメント種類
塩害対策工法の組み合わせ
塩害対策工法のメニュー :
電気防食、エポキシ塗装鉄筋、埋設型棒、
表面保護工、脱塩工法、断面修復工法

(2) 入力画面の構成

本システムは OS に windows が搭載されているパソコン上で動作するプログラムである。

入力画面の概要を図-3に示す。

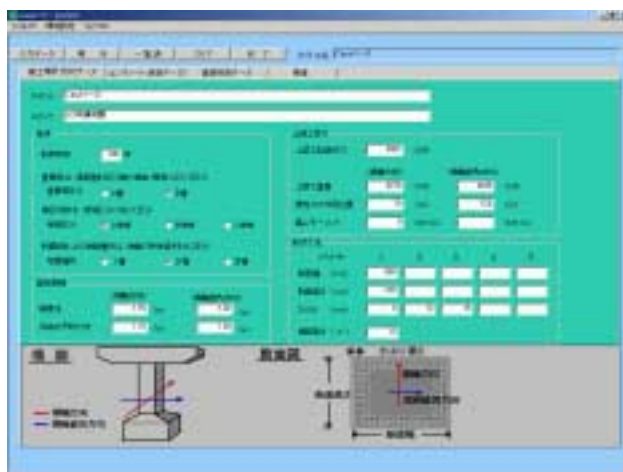


図-3 入力画面の概要

(3) 出力画面の構成

計算結果として、コスト算定結果、耐震照査結果、塩害劣化解析結果が得られ、一覧表およびグラフにより表示することができる。

出力画面の概要を図-4に示す。

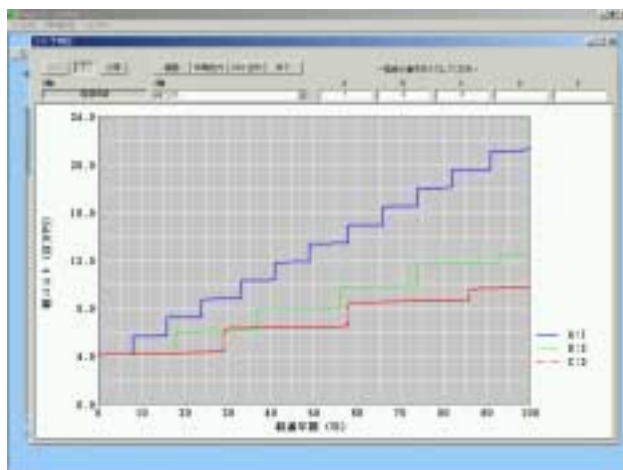


図-4 出力画面の概要

3. ライフサイクルコストの算定方法

3.1 初期建設費用の算定方法

図-5に示すように建設フローに基づいて必要工種を設定し、各工種に対して数量を積み上げ、施工単価を乗じることによってコストを算出する。本来であれば、物価の変動による金銭価値の評価等を考慮すべきであるが、将来の金銭価値の変動を予測することは困難であることから、ここでは扱わないものとする。コストの算定方法は地震リスクの算出および塩害劣化リスクの算出においても同様とする。

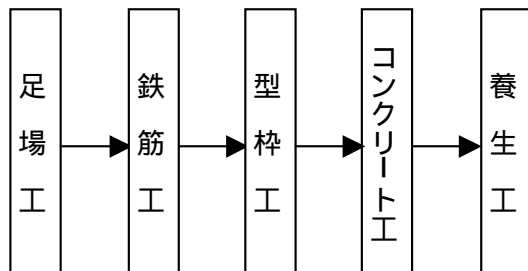


図-5 初期建設（橋脚構築）のフロー

3.2 地震リスクの算定方法

与えられたパラメータと条件から道路橋示方書耐震設計編¹⁾の地震時保有水平耐力法により RC 橋脚の耐震性能を評価する。得られた地震応答値から損傷レベルに対応する復旧コストを算出し、得られた復旧コストと被災確率の関係から地震時復旧コストを算出する。地震損傷復旧コストを算出する際の想定地震動の発生頻度と、被災した場合の損傷区分と復旧レベルを表-2に示す。図-6に示すように、年間地震発生確率密度と応答値を関連付け、それぞれの地震動に対応する位置における超過確率が表-2に示すものと一致するように設定する。ここで、L2 地震動タイプ（内陸直下型）より大きな応答値を得る地震動については、その実測データが乏しく、地震動の強度と発生確率を定義することが難しいことから、L2 地震動タイプ を起こりえる最大の地震動と定義し、その地震動が 1000 年に 1 度起こると仮定するものとする。

また、復旧コストと応答値の関係は表-2の復旧レベルに従うものとし、復旧工事に要する費用を設定するものとする。地震損傷復旧コストの年間期待値は年間地震発生確率密度と復旧コストの積を応答値に対して積分することによって得られる。得られた年間期待値に耐用年数を乗じることによって地震リスクが算定される。

地震損傷復旧コストの 年間期待値 =

$$\int_{\theta_y}^{\theta_{L2}} C(\theta) \cdot p(\theta) d\theta + p(\theta_{L2}) \cdot C(\theta_{L2}) \quad [1]$$

ここに、

- θ : 応答部材角(rad)
- θ_y : 降伏時の部材角(rad)
- θ_m : 最大モーメント時の部材角(rad)
- θ_n : 終局部材角(rad)
- θ_{L1} : L1 地震動に対する応答部材角(rad)
- θ_{L2} : L2(Type : 海洋プレート型)地震動に対する応答部材角(rad)
- θ_{L2} : L2(Type : 内陸直下型)地震動に対する応答部材角(rad)

答部材角(rad)

$C(\theta)$: 応答部材角 θ (rad) という損傷があった場合にその復旧にかかる費用

$p(\theta)$: 応答部材角 θ (rad) に対応する地震動が発生する年間地震発生確率密度

表-1 想定地震動の種類と発生頻度の関係

地震の種類別		超過確率
L 1 地震動		50年に1度
L 2 地震動タイプ	プレート境界型	200年に1度
L 2 地震動タイプ	内陸直下型	1000年に1度

表-2 損傷区分と復旧レベル

損傷区分	グラフ上の位置	復旧レベル
レベル1	y点 降伏	無補修
レベル2	m点 最大	ひび割れ注入
レベル3	n点 終局	橋梁仮受、ひび割れ注入 断面修復、鉄筋補修

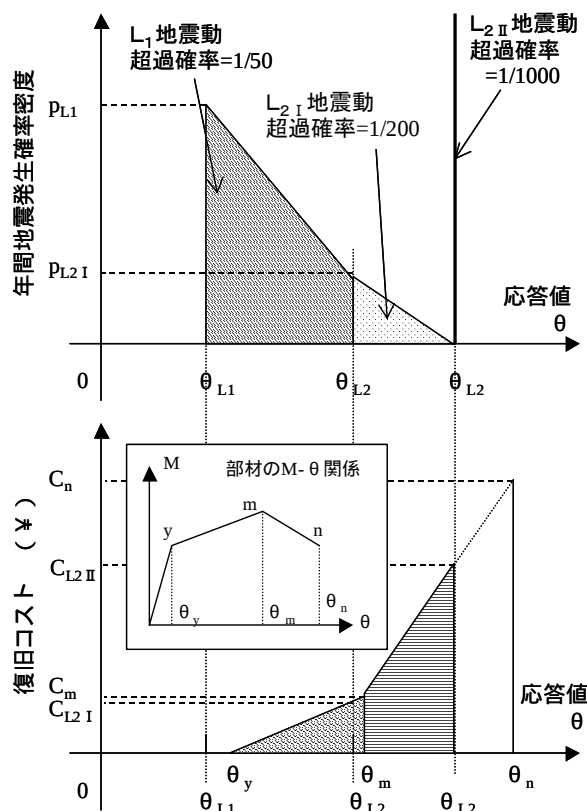
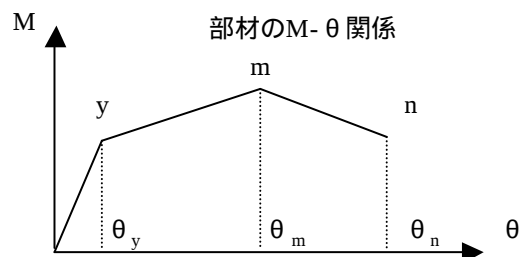


図-6 地震リスクの評価

3.3 塩害劣化リスクの算定方法

(1) 塩害劣化リスク

塩害劣化に要する費用は、建設当初に劣化に対する予防として実施する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の両者からなる。

(2) 塩化物イオン浸透解析

塩害による経年劣化リスクの評価は、式〔2〕の支配方程式に基づく塩化物イオン浸透解析を1次元の有限要素法により行い、式〔3〕により鉄筋位置の塩化物イオン濃度を判定することにより行う。塩化物イオンの拡散係数 D_d は土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕²⁾ に基づいてコンクリートの水セメント比から算出するものとする。式〔3〕の判定基準を満たさない場合は何らかの修復対策を行い、回復させるものとする。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (\text{拡散方程式}) \quad [2]$$

$$x = 0 \text{ において, } u = C_0$$

$$C_d \geq C_{lim} \quad (\text{判定基準}) \quad [3]$$

$$C_{lim} = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

ここに、

- u : 塩化物イオン濃度 (kg/m³)
- t : 時間 (s)
- x : 表面からの距離 (cm)
- D_d : 塩化物イオンの拡散係数 (cm²/s)
- C_d : 鉄筋位置の塩化物イオン濃度 (kg/m³)
- C_{lim} : 発錆限界塩化物イオン濃度 (kg/m³)
- C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

(3) 塩害対策工法の取り扱い

本検討では塩害対策工法として断面修復工法と表面保護工法を扱う。断面修復工法において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/m³ とする。表面保護工は式〔4〕によりその遮塩性を等価な拡散係数に置き換え、塗装の厚さとして考慮するものとする。

$$D_d = q/C \times t \quad [4]$$

ここに、

- D_d : 塩化物イオンの拡散係数 (m²/s)
- q : 遮塩性試験から得られる時間あたりの塩化物イオン透過量 (kg/m²/s)
- C : 遮塩性試験の塩水中塩分量 (kg/m³)
- t : 保護膜の厚さ (m)

表面保護工には耐用年数を設定し、耐用年数に達した場合には塗り直すものとし、その費用を計上するものとする。

4. 検討事例による考察

4.1 検討モデルの概要

検討モデルは耐用年数を 100 年とする道路橋の一本脚柱とし、断面寸法 5m × 2.2m、かぶり 12cm、コンクリー

ト強度 $f'_c = 24 \text{ N/mm}^2$ (水セメント比: 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 $C_0 = 13 \text{ kg/m}^3$) としたものを基準ケース (No.1) とした。検討モデルの概要を図-7に示す。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 7 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 3.5m × 1.7m に縮小した No.6 を検討に加え、全 8 ケースを設定した。検討ケースの一覧を表-3に示す。なお、全てのケースにおいて耐震照査を満足するように仕様を設定し、供用中に発生するすべての地震動に対して橋脚部材は終局にいたることがなく、構造の崩壊は起こらないものとした。

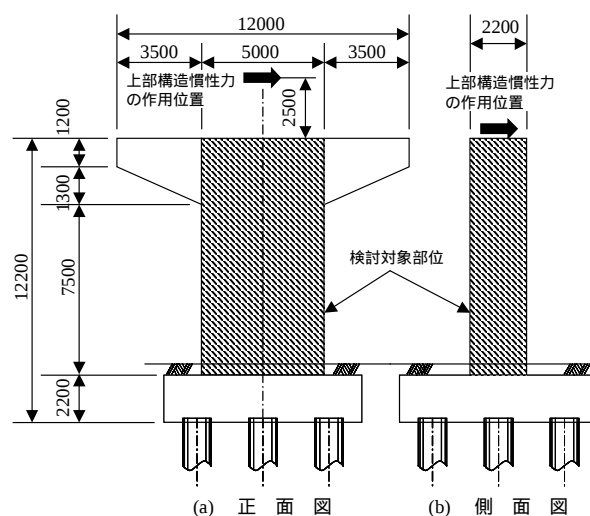


図-7 検討モデルの概要 (No.1 基準ケース)

塩害劣化リスクの算定において、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、鉄筋発錆限界塩化物イオン量は 1.2 kg/m^3 とした。また、No.9 は塩害初期対策として表面保護工を用いているが、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 $0.00183 \text{ cm}^2/\text{year}$ 、耐用年数 30 年とした。塗装は耐用年数に達した時点で塗り直すものとし、塗り直しの費用は塩害修復対策費用に計上した。費用を求める際の各工種における単価は表-4、表-5に示す値を設定した。

4.2 コスト算定結果

算定結果を表-6に示す。同表には耐震照査の結果として地震時保有耐力 (P_a) を等価水平震度 (K_{hc}) と等価重量 (W) の積で除した値 ($P_a/K_{hc} \cdot W$) も示した。ライフサイクルコストは高強度材料を用いて断面を縮小した No.6 において最も有利となり、かぶりを小さく設定した No.2 において最も不利となった。

4.3 基準ケース (No.1) のコストの分析

No.1 のコスト遷移を図-8に示す。地震損傷復旧コストは 80 万円程度であり、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 割程度であり、ライフサイクルコストは初期建設コストの 3 倍程度となった。

表-3 検討ケースの一覧

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	S Q C	60	35	USD685	0.91	USD785	0.27	4.5				
7	2.2	5.0	12	普通	24	55	SD295	0.48	SD295	0.16	9.0			
8											13.0	表面		
9														

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
 S Q C : 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

表-4 各工種の単価

工 種	単 価	工 種	単 価
コンクリート工 24N/mm ²	17,500円 / m ³	鉄筋工 SD295	90,000円 / ton
コンクリート工 60N/mm ²	32,500円 / m ³	鉄筋工 高強度	125,000円 / ton
型枠工	3,000円 / m ²	足場工	2,000円 / 掛m ²
養生工	500円 / m ³		

表-5 塩害対策工の単価

工 種		かぶり	単 価
断面修復	普 通 コンクリート	8cm	10,388円 / m ²
		12cm	12,180円 / m ²
		15cm	13,497円 / m ²
	S Q C	12cm	14,345円 / m ²
表面保護工			10,000円 / m ²

表-6 ライフサイクルコスト算定結果（想定耐用年数 100 年）の一覧

No.	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)	LCCに占める 地震損傷 復旧コスト の割合	LCCに占める 塩害初期・ 修復対策コスト の割合
			橋脚構築 (百万円)	塩害対策 (百万円)				
1	5	12.60	4.16	0.00	0.76	7.68	6.0%	60.9%
2	12	21.40	4.17		0.67	16.57	3.1%	77.4%
3	3	9.81	4.15		0.85	4.81	8.6%	49.1%
4	5	12.46	4.49		0.29	7.68	2.3%	61.6%
5	5	12.92	3.98		1.27		9.8%	59.4%
6	2	7.05	4.33		0.39	2.32	5.5%	33.0%
7	2	7.43	4.16		0.76	2.51	10.2%	33.8%
8	4	10.74	4.16	5.82		7.1%	54.2%	
9	3	10.68	4.16	1.44		4.32	7.1%	53.9%

表-7 地震損傷復旧コストの算定結果の一覧

No.	Pa / K _{hc} ・ W				橋軸方向 変形性能と応答値					復旧コストの内訳				地震 損傷 復旧コスト (百万円)
	橋軸方向		橋軸直角方向		θ _y (%)	θ _m (%)	θ _n (%)	θ _{L2} (%)	θ _{L2} (%)	C _m (千円)	C _n (千円)	C _{L2} (千円)	C _{L2} (千円)	
	タイ°	タイ°	タイ°	タイ°										
1	1.43	1.15	2.77	2.07	0.34	0.84	1.99	0.49	1.52	347	4,946	103	3,077	0.76
2	1.48	1.18	2.80	2.09	0.34	0.84	1.97	0.46	1.41	347	4,894	85	2,625	0.67
3	1.39	1.13	2.74	2.07	0.34	0.84	2.00	0.51	1.62	347	4,983	119	3,446	0.85
4	1.77	1.43	3.16	2.38	0.36	0.86	1.94	0.40	1.14	355	5,025	34	1,550	0.29
5	1.25	1.07	2.60	1.99	0.32	0.83	1.97	0.58	1.92	349	4,911	175	4,697	1.27
6	1.52	1.14	2.84	1.95	1.08	1.48	2.82	0.96	2.31	201	4,729	0	3,016	0.39
7	1.43	1.15	2.77	2.07	0.34	0.84	1.99	0.49	1.52	347	4,946	103	3,077	0.76
8														
9														

算出単価 橋梁仮受工 : 400 万円/式, ひび割れシール工 : 1,000 円/m, ひび割れ注入工 : 500 円/l, 撤去工 : 3 万円/m³

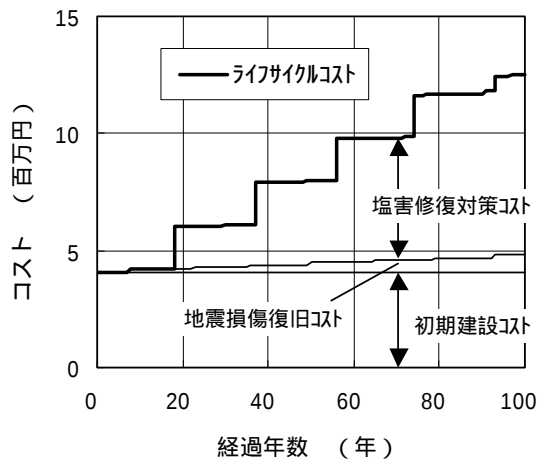


図-8 コストの遷移

5. 各パラメータの影響

以降では、各パラメータがライフサイクルコストにおよぼす影響について考察する。

5.1 基部モーメントと部材角の関係

各ケースの基部モーメントと部材角の関係の計算結果を図-9に示す。これによると、かぶりをパラメータとした No.1~3 においては大きな差は見られないが、鉄筋比を小さく設定した No.5 は最大耐力が小さく、基準ケースである No.1 の 0.85 倍程度の曲げ耐力となった。また、鉄筋比を大きく設定した No.4 は No.1 の 1.2 倍程度の曲げ耐力となった。断面形状の等しい No.1~5 においては変形性能に差が見られず、降伏変位、終局変位はほぼ同等となった。一方、高強度材料を用いて断面を縮小した No.6 においては、曲げ耐力が最も高く、No.1 の 1.4 倍程度の曲げ耐力となった。変形性能においては、断面を縮小したことにより弾性域の勾配が小さく、降伏変位が No.1 の 3 倍程度となり、終局変位も大きく、No.1 の 1.3 倍程度となった。

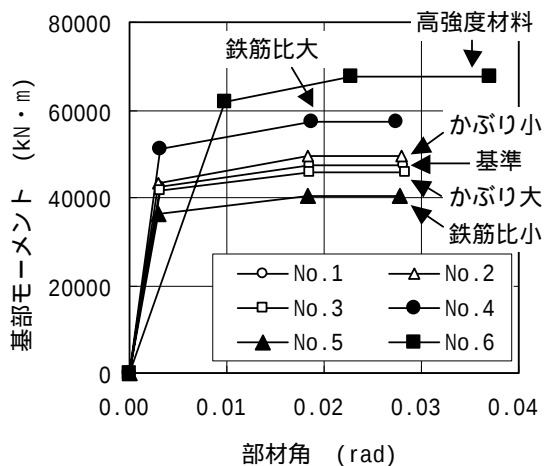


図-9 基部モーメントと部材角の関係

5.2 かぶりの影響

かぶりをパラメータとした No.1~3 の鉄筋位置の塩化物イオン濃度の履歴を図-10に、コストとかぶりの関係を図-11に示す。かぶり小さいほど補修回数が多く、塩害修復対策コストが増加し、ライフサイクルコストも

増大している。かぶりと地震損傷復旧コストの関係を図-12に示す。鉄筋量は等価であるためかぶりが小さいほど曲げ耐力が大きく、結果として耐震性能が向上し、地震リスクが減少している。

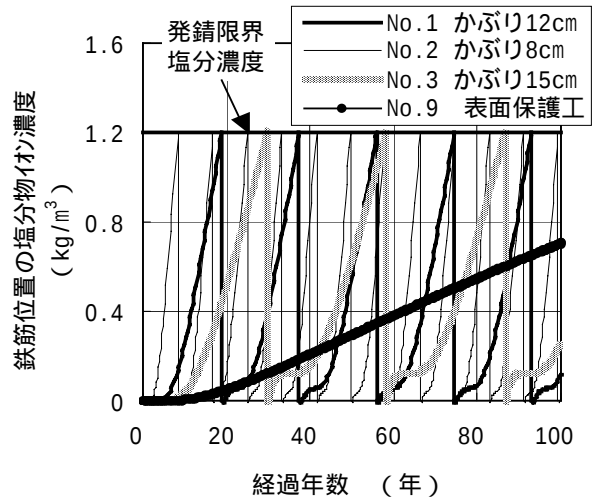


図-10 鉄筋位置の塩化物イオン濃度の遷移

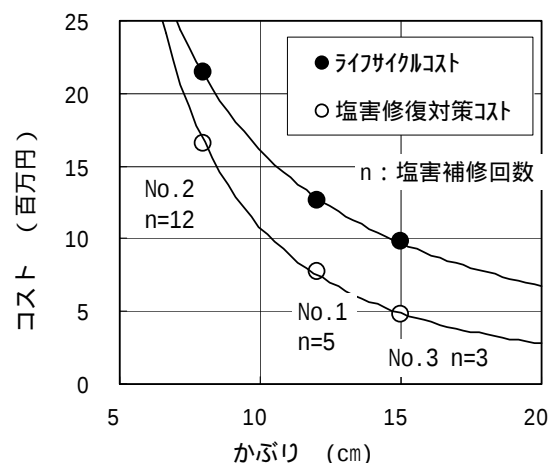


図-11 かぶりとコストの関係

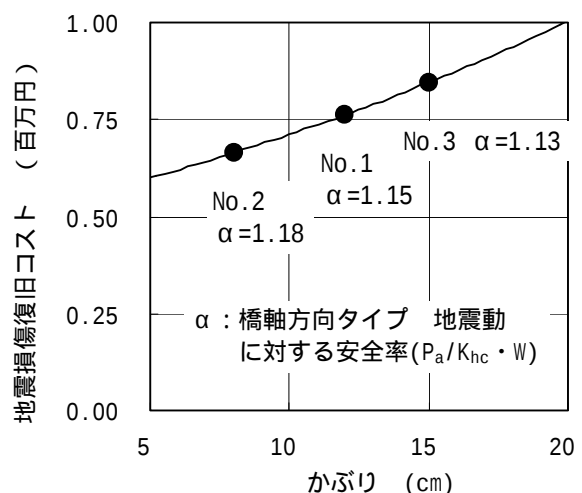


図-12 かぶりと地震損傷復旧コストの関係

5.3 鉄筋比の影響

鉄筋比をパラメータとした No.1, No.4 および No.5 に関する橋軸方向の軸方向鉄筋比とコストの関係を図-13 に示す。鉄筋比の大きい No.4 は鉄筋量の増加により初期建設コストが最も高いが、鉄筋量が大きいことにより耐震性能が向上し、地震損傷復旧コストが最も小さく、ライフサイクルコストは最も有利となっている。

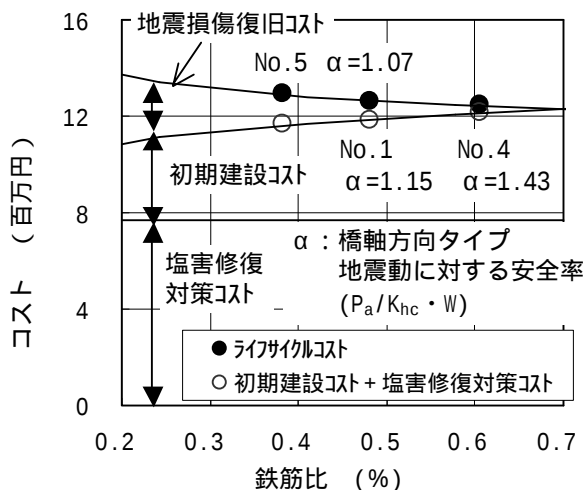


図-13 鉄筋比とコストの関係

5.4 材料強度の影響

No.1 と高強度材料を使用し、断面寸法を縮小したケース No.6 のコンクリート強度とコストの比較を図-14 に示す。高強度材料は単価が高いにもかかわらず両者の初期建設コストには大きな差が見られない。これは、高強度性を生かすことにより断面寸法の縮小が可能となり、材料単価の影響が相殺されたことによる。一方、塩害修復対策コストとライフサイクルコストにおいては大きな差が生じている。両ケースの間では補修回数が大きく異なり、No.1 では5回で No.6 では2回となっている。これは、No.6 に用いているコンクリートが高強度コンクリートであり水セメント比が低い(W/C=35%)ことから、塩化物イオンの拡散係数が低く(No.1=1.323cm²/year, No.6=0.633cm²/year)、耐久的であることによるものである。飛沫帯を想定した本ケースのような場合においては、耐久的な材料を用いて補修回数を減らすことがライフサイクルコストの縮減につながることを示している。

5.5 塩害環境の影響

塩害環境をパラメータとした No.1, No.7 と No.8 の鉄筋位置の塩化物イオン濃度の履歴を図-15 に、コストの比較を図-16 に示す。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、ライフサイクルコストと塩害劣化リスクの比率が異なっている。この結果は、劣化環境の違いによってライフサイクルコストに占める劣化補修コストの割合が異なることを示している。劣化環境の違いによってライフサイクルコストを構成する各要素の比率が異なることを示している。

5.6 塩害対策工法の効果

No.1 と塩害初期対策として表面保護工を施した No.9 の鉄筋位置の塩化物イオン濃度の履歴を図-17 に塩害対

策コストの遷移を図-18に示す。これによると No.9 は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塩害対策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っている。

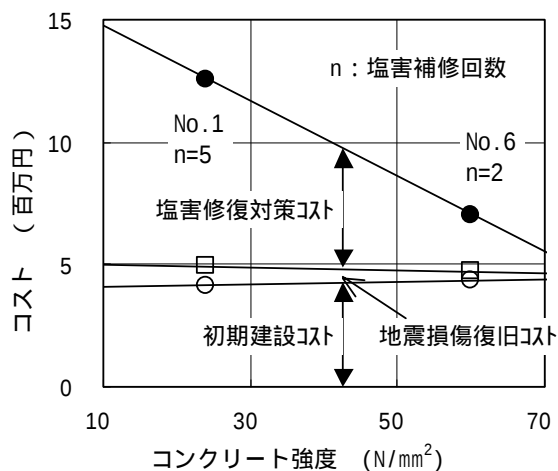


図-14 材料強度とコストの関係

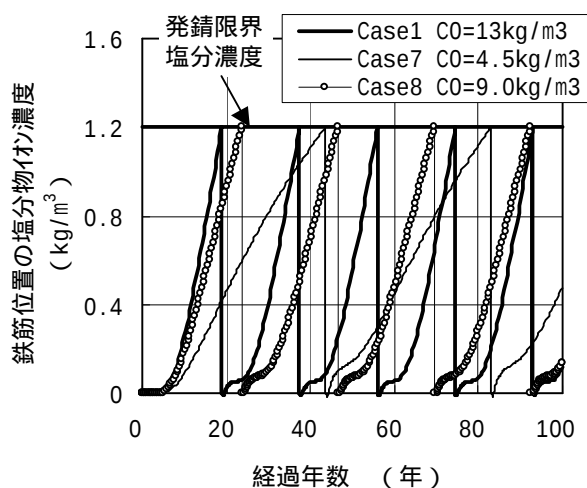


図-15 鉄筋位置の塩化物イオン濃度の履歴

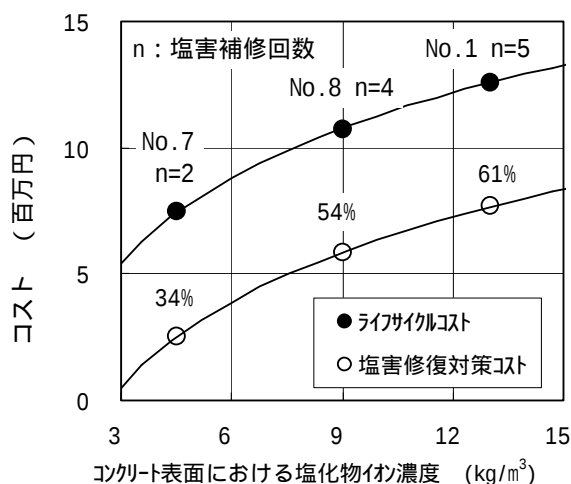


図-16 塩害環境とコストの関係

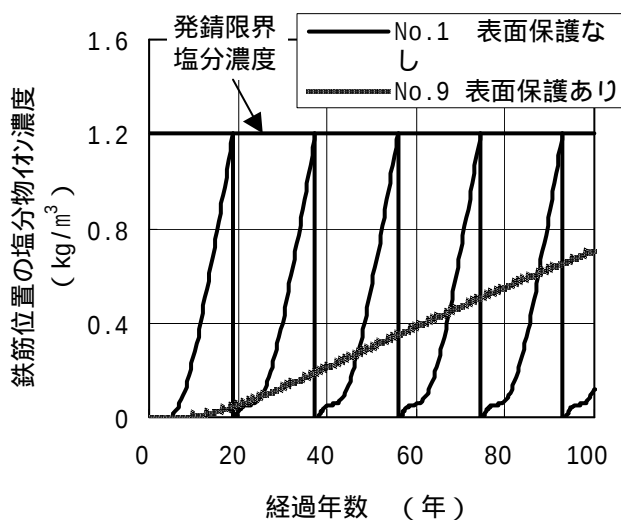


図-17 鉄筋位置の塩化物イオン濃度の履歴

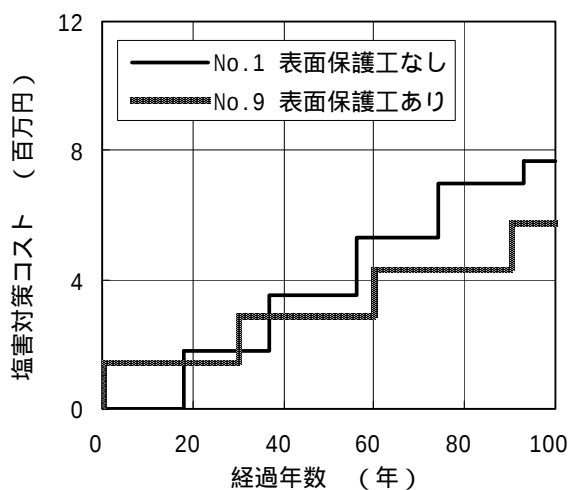


図-18 塩害対策コストの遷移

6. まとめ

RC 橋脚のライフサイクルコストを地震リスクと塩害劣化リスクを考慮した算定手法により検討した。本検討で得られた範囲内での結論を以下に示す。

- (1) 塩害環境に飛沫帯を想定した試算例においてはライフサイクルコストに占める塩害修復対策コストの割合が大きくなり、一般的な橋脚を模擬した基本ケースの検討においては全体の 60%程度を占める結果となった。そのため、耐久性上有利となる高強度コンクリートの使用やかぶりを大きく設定した場合においてライフサイクルコストの算定結果が有利となった。
- (2) 地震に対する安全率を高く設定することは初期建設コストにおいては不利となるが、地震損傷復旧コストにおいて有利となり、初期建設費用と地震損傷復旧コストを加えた地震リスクによるライフサイクルコストにおいては地震安全率が高いほど有利となる結果が得られた。
- (3) 塩害環境によって塩化物イオンの浸透速度が異なるため補修回数および塩害修復対策コストが異なり、ライフサイクルコストに占める塩害修復対策コストの割合が異なる結果となった。
- (4) 塩害初期対策として表面保護工を施すことは初期建設費用においては不利となるが、補修回数を減らすことができるため、ライフサイクルコストにおいて有利な結果となった。

参考文献

- 1) (社) 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
- 2) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002.3