

論文 橋脚のライフサイクルコスト算定に関する一考察

小原 孝之^{*1}・金子 修^{*2}・金刀 督純^{*3}・三島 徹也^{*4}

要旨：本研究では，R C 橋脚のライフサイクルコストの算定手法について検討した。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・復旧コストを算定するシステムを構築し，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，橋脚

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を精度よく行うために，経年劣化や地震リスクの評価を行う算定手法が求められている。そこで，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，R C 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・復旧コストを算定することによって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な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の概念と算定方法

2.1 ライフサイクルコストと対象リスク

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）。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，検討対象は橋脚部に限定する。ここで，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し，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。

2.2 算定フロー

本算定のフローを図 - 2 に示す。

2.3 地震リスクの算定方法

与えられたパラメータと条件を用いて，道路橋示方書耐震設計編¹⁾の地震時保有水平耐力法に基づいて R C 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

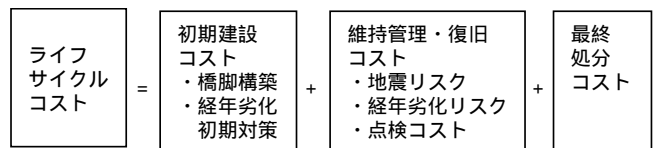


図 - 1 ライフサイクルコストの概念

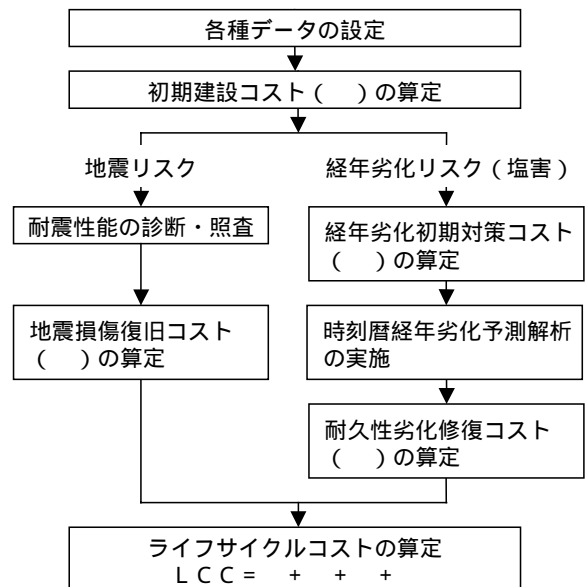


図 - 2 算定フロー

*1 前田建設工業（株） 技術研究所 施工技術（土木）グループ 工修（正会員）

*2 （株）トータル・インフォメーション・サービス

*3 （株）トータル・インフォメーション・サービス 代表取締役社長（正会員）

*4 前田建設工業（株） 技術研究所 施工技術（土木）グループ副部長 工博（正会員）

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 - 1、表 - 2 に示す。

図 - 3 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 - 1 に示すものと一致するように設定する。また、復旧コスト

表 - 1 想定地震動の種別と発生頻度の関係

地震の種別		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

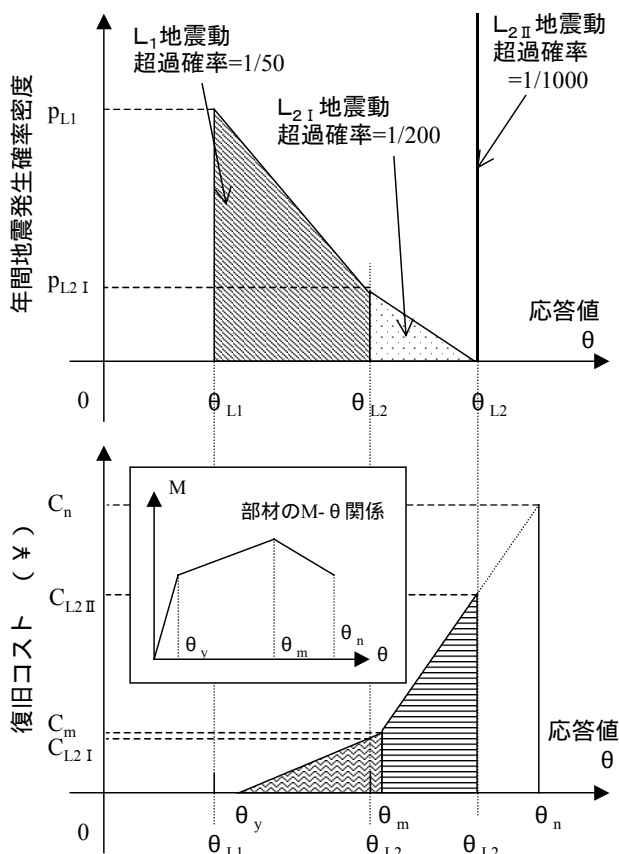


図 - 3 地震リスクの評価

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 =

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

2.4 塩害劣化リスクの算定方法

(1) 塩害劣化リスク

塩害劣化リスクに対するコストは、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、鉄筋位置の塩化物イオン濃度を評価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。

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

$$x = 0 \text{ において, } u = C_0$$

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

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

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)

(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/m^3 とする。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ものとする。

2.5 コストの算定方法

図 - 4 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るべきであるが、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。

3. 検討事例による考察

3.1 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 $5\text{m} \times 2.2\text{m}$ 、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 $=13\text{kg/m}^3$ ）としたものを基準ケース (No.1) とした。検討モデルの概要を図 - 5 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 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。検討ケースの一覧を表 - 3 に示す。なお、全てにおいて耐震照査を満足するように仕様を設定し、崩壊を許容しないものとした。

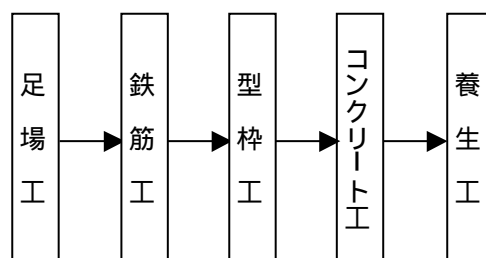


図 - 4 初期建設（橋脚構築）のフロー

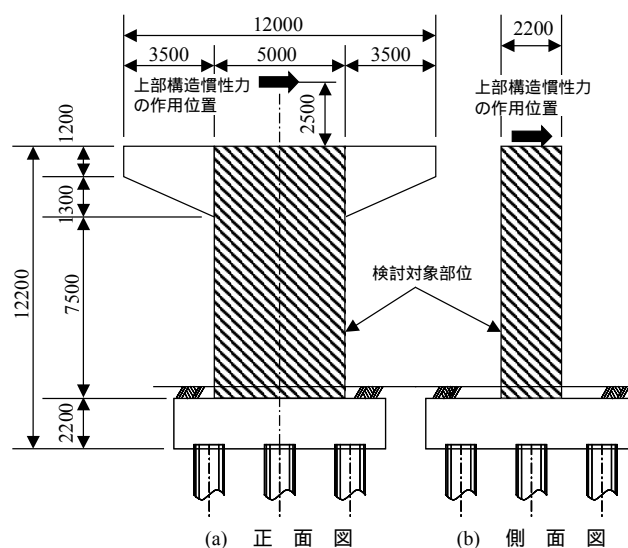


図 - 5 検討モデルの概要（No.1 基準ケース）

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								0.61					
5								0.38					
6	1.7	3.5		SQC	60	35	USD685	0.91	USD785	0.27			
7	2.2	5.0	12	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

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、鉄筋発生限界塩分物イオン量は 1.2kg/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 $0.00183\text{cm}^2/\text{年}$ 、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。

3.2 コスト算定結果

算定結果を表 - 6、表 - 7 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。

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

3.3 基準ケース(No.1)のコストの分析

No.1 のコスト遷移を図 - 6 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 - 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

3.4 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 - 7 に、コストとかぶりの関係を図 - 8 に示す。かぶりが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 - 9 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。

3.5 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 - 10 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、鉄筋量が多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。

3.6 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 - 11 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。これは、高強度コンクリートが水セメント比が低く耐久적であり、塩害補修回数が減少したことによる。

3.7 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 のコストの比較を図 - 12 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。

3.8 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 の塩害対策コストの遷移を図 - 13 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。

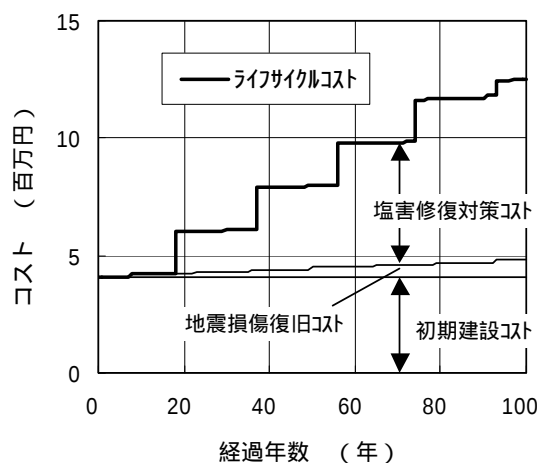


図 - 6 コストの遷移

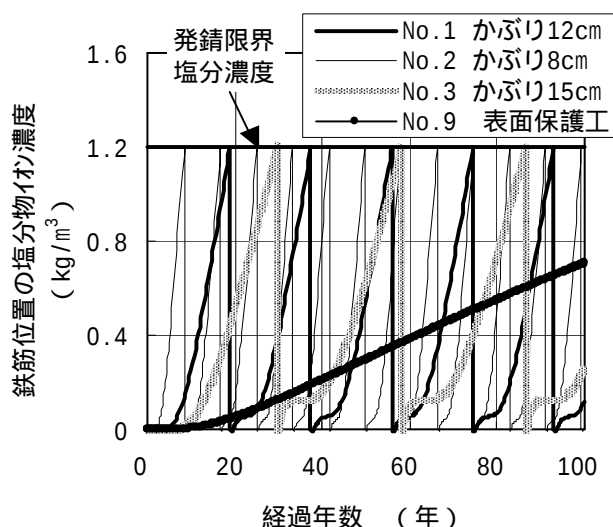


図 - 7 鉄筋位置の塩化物イオン濃度の遷移

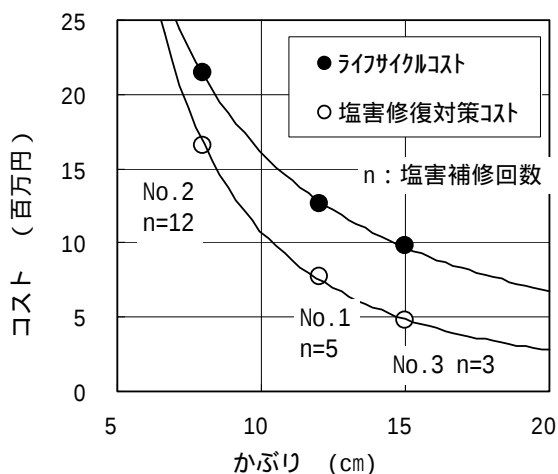


図 - 8 かぶりとコストの関係

4. まとめ

R C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により検討した。

- (1) 塩害環境に飛沫帯を想定したため、塩害修復対策コストが支配的であり、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では不利となるが、地震損傷復旧コストにおいて有利となった。
- (3) 塩害環境によって補修回数、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った。
- (4) 塩害初期対策として表面保護工を施すことは補修回数を減らすことができ、ライフサイクルコストにおいて有利な結果となった。

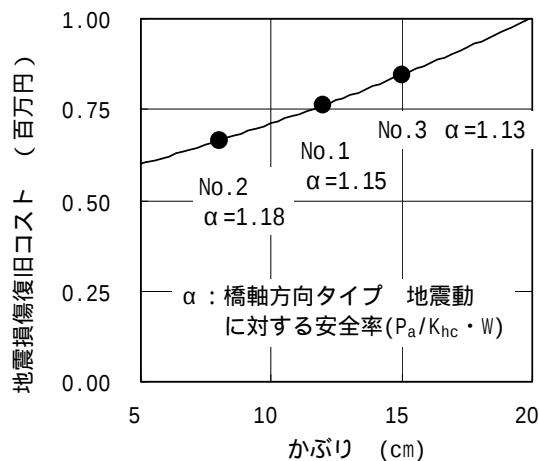


図-9 かぶりと地震損傷復旧コストの関係

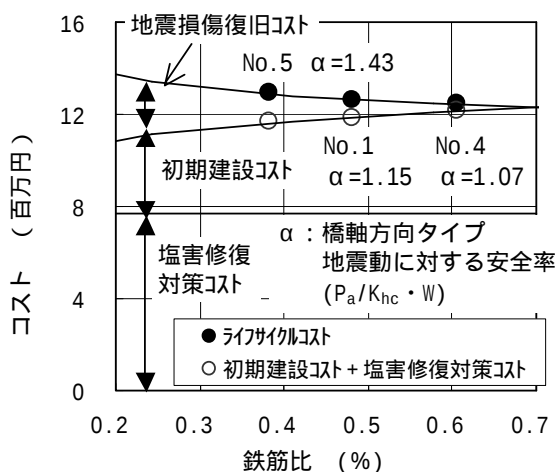


図-10 鉄筋比とコストの関係

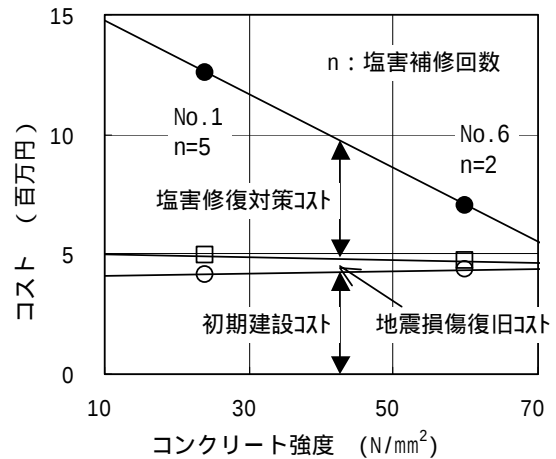


図-11 材料強度とコストの関係

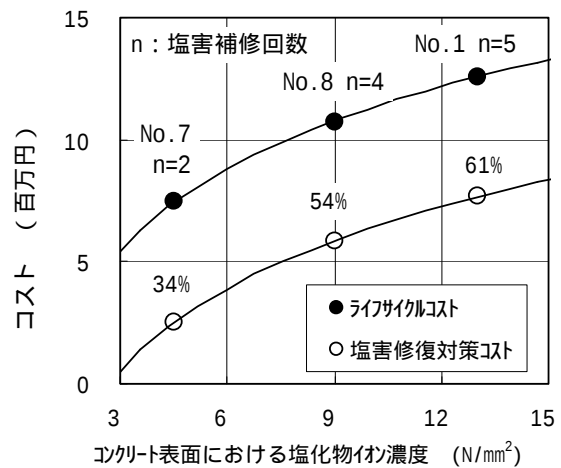


図-12 塩害環境とコストの関係

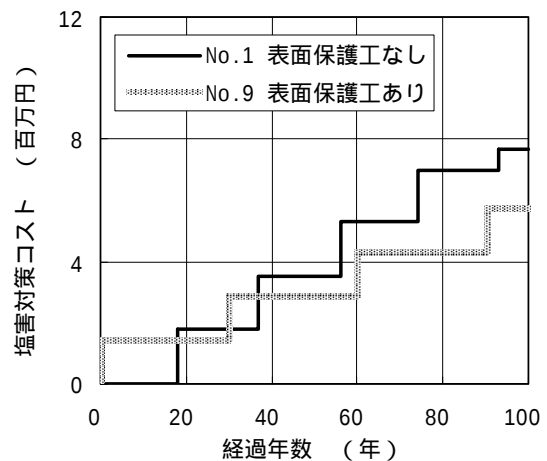


図-13 塩害対策コストの遷移

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