

ISSN 1346-7328

国総研資料 第837号
平成 27 年 3 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.837

March 2015

鉄筋腐食発生限界濃度等が栈橋上部工のライフサイクルコスト に及ぼす影響に関する一考察

坂田 憲治・井山 繁・宮田 正史・佐藤 徹・竹信 正寛

A Study of the Effects of the Reinforcing Bar Corrosion Initiation Chloride
Ion Concentration in Concrete on Life-cycle Cost of Open-type Wharfs

Kenji SAKATA, Shigeru ITYAMA, Masafumi MIYATA, Toru SATO, Masahiro TAKENOBU

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

鉄筋腐食発生限界濃度等が栈橋上部工のライフサイクルコストに 及ぼす影響に関する一考察

坂田憲治¹⁾・井山 繁²⁾・宮田正史³⁾・佐藤 徹⁴⁾・竹信正寛¹⁾

要 旨

高度経済成長期に集中的に整備された社会資本の老朽化が進行するなか、限られた予算でこれら多くの社会資本を適切に維持するためには、施設のライフサイクルコスト（LCC）を踏まえた設計、維持管理を行うことが必要である。

港湾分野に目を向けると、主要な港湾施設である係留施設のなかでも特に栈橋の上部工は塩害による劣化が激しいため、維持管理手法に配慮することでLCCが大きく削減できるとされており、これまでも多くの研究が重ねられてきた。

一方で、これら既往の研究では、LCC算出の際にコストに大きく影響する鉄筋腐食発生濃度等の劣化に関するパラメータを特定の環境条件を想定して設定しているが、本来、これらは施設が設置される環境条件に応じて変化するものである。

本研究では、栈橋上部工のLCCの算出にあたり、様々な環境条件で活用できることを念頭に、劣化に関する複数の主要なパラメータに幅を持たせ、LCCの試算を行った。

また、実際の施設整備における維持管理手法の選択の際には、LCCに配慮が必要な上部工だけでなく、下部工を含む初期建設費用との総額を踏まえた検討がなされることが適当であることから、両者のコストを踏まえた検討を行ったものである。

キーワード：栈橋上部工，維持管理，ライフサイクルコスト，鉄筋腐食発生濃度，劣化，

-
- 1) 港湾研究部 主任研究官
 - 2) 港湾研究部 港湾施工システム・保全研究室 室長
 - 3) 港湾研究部 港湾施設研究室 室長
 - 4) 港湾研究部 港湾新技術研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5030 Fax：046-844-5073 e-mail: sakata-k92y2@mlit.go.jp

A Study of the Effects of the Reinforcing Bar Corrosion Initiation Chloride Ion Concentration in Concrete on Life-cycle Cost of Open-type Wharfs

Kenji SAKATA¹⁾
Shigeru IYAMA²⁾
Masafumi MIYATA³⁾
Toru SATO⁴⁾
Masahiro TAKENOBU¹⁾

Synopsis

As many structures which have been constructed are reaching the ends of their design service lives, it is necessary to do design, maintenance and repair based on life-cycle cost (LCC) of structures to maintain these structures properly on a limited budget.

In the harbor field, mooring facilities, especially open-type wharfs, are clearly deteriorating. Their LCC which includes maintenance and repair costs, can be reduced and many related research reports have been published.

In these research reports, concrete reinforcing bar corrosion initiation chloride ion concentration etc. which clearly effects the LCC of open-type wharfs, are set under specified environmental conditions. But, initially, these differ according to the environments in which the structures will be built.

The purpose of this study is to analyze the LCC of open-type wharfs by changing the values of several key corrosion related parameters. In the study, all construction cost are calculated, because LCC analysis including all construction costs is more appropriate in the actual field.

Key Words : open-type wharf, maintenance and repair, life-cycle cost, corrosion initiation chloride ion concentration of reinforcing bar in concrete, deterioration,

1) Senior Researcher, Port and Harbour Department, NILIM

2) Head of Port Construction Systems and Management Division, Port and Harbour Department, NILIM

3) Head of Port Facilities Division, Port and Harbour Department, NILIM

4) Research Coordinator for Advanced Port Technology, Port and Harbor Department, NILIM

目 次

1. はじめに	1
2. 港湾コンクリート構造物における劣化実態と維持管理	1
2.1 港湾コンクリート構造物の劣化実態	1
2.2 設計段階における維持管理の考慮	2
3. 栈橋上部工のライフサイクルコスト算出	5
3.1 ライフサイクルコスト	5
3.2 栈橋上部工のライフサイクルコストに関する既往研究	5
3.3 耐久性に関する照査	5
3.4 技術基準等における C_{lim} , C_0 , D_d の値について	6
4. 本研究におけるライフサイクルコストの試算	8
4.1 対象断面および条件	8
4.2 補修実施時期・補修工法の設定	11
4.3 初期費用及び維持管理費用の単価設定	11
4.4 維持管理レベルによる検討ケース	12
4.5 ライフサイクルコストの算定	12
4.6 本研究における C_{lim} , C_0 , D_d の設定	14
4.7 ライフサイクルコストの試算結果	14
5. まとめ	21
6. あとがき	21
謝辞	21
参考文献	21
付録1 ライフサイクルコスト試算結果の各年の推移	23

1 はじめに

多くの港湾施設が今後 20 年で建設後 50 年以上を経過する状況において、また厳しい財政状況の下で、ライフサイクルコスト（以下「LCC」という。）を踏まえながら維持管理を行うことが重要である。

港湾コンクリート構造物においては、塩害等による劣化が顕在化しており、特に栈橋上部工は、港湾コンクリート構造物の中で最も厳しい塩害環境下に位置するため、劣化が集中している。そのため、維持管理手法に配慮することでLCCが大きく削減できるとされ、これまでも多くの研究が重ねられてきた。

一方で、これら既往の研究では、LCC 算出の際に塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査結果を利用しているが、照査結果およびコストに大きく影響を与える鉄筋腐食発生限界濃度 (C_{lim})、コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (C_0) および塩化物イオンに対する設計拡散係数 (D_d) の値を特定の環境条件を想定して設定している。しかし、実際の現場においては、これらは施設が設置される環境条件に応じて変化するものである。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」等においても、鉄筋腐食発生限界濃度 (C_{lim}) 等は、構造部材が置かれた地点と同様の環境条件での実測データにより定めることが望ましいとされている。

したがって、本研究では、栈橋上部工のLCCの算出にあたり、様々な環境条件で活用できることを念頭に、鉄筋腐食発生限界濃度 (C_{lim})、コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (C_0) および塩化物イオンに対する設計拡散係数 (D_d) の値に幅を持たせ、LCCの試算を行った。

また、実際の施設整備における材料や維持管理手法の選択の際には、LCCに配慮が必要な上部工だけでなく、下部工を含む初期建設費用との総額を踏まえた検討がなされることが適当であることから、両者のコストを踏まえた検討を行ったものである。

2 港湾コンクリート構造物における劣化実態と維持管理

2.1 港湾コンクリート構造物の劣化実態

(1) 港湾コンクリート構造物の既存の劣化実態調査

文献²⁾において、運輸省港湾局が昭和59年度に実施した全国約500の係船岸の劣化実態調査結果がまとめられている。調査した約500の係船岸の内訳は、矢板式が309施設、栈橋が96施設、その他（セル式係船岸等）89施設であり、重力式は、使用されているコンクリートが海中部に位置し塩害による劣化が生じにくいと考えられ、また劣化の事例も従来みられないことから、対象としていない。調査の結果、栈橋とそれ以外の施設でコンクリートの劣化状況が大きく異なるとされている。栈橋以外の施設は、

図-1に示すようにひび割れが発生している施設がかなりみられるが、発生原因は力学的な要因によるものが大部分を占めると考えられ、図-2に示すように錆汁はほとんど溶出していない施設がほとんどであり、塩害を受けた施設が少ないものと考えられるとされている。一方、栈橋は、図-3に示すように、老朽化が進行している施設でひび割れがそれ以外の施設以上に生じており、多くのもので錆汁が認められ、塩害が生じているとされている。

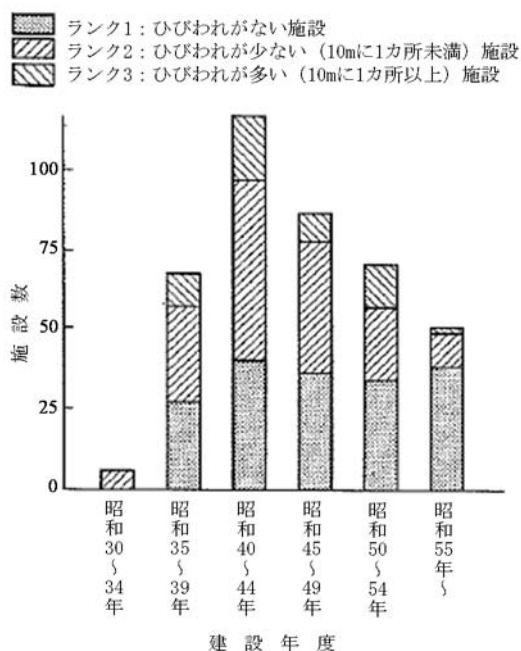


図-1 栈橋以外の施設のひび割れ発生状況²⁾

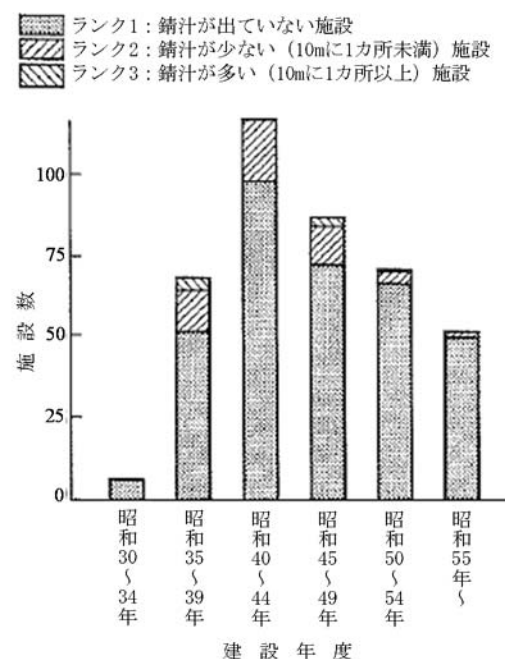


図-2 栈橋以外の施設の錆汁溶出状況²⁾

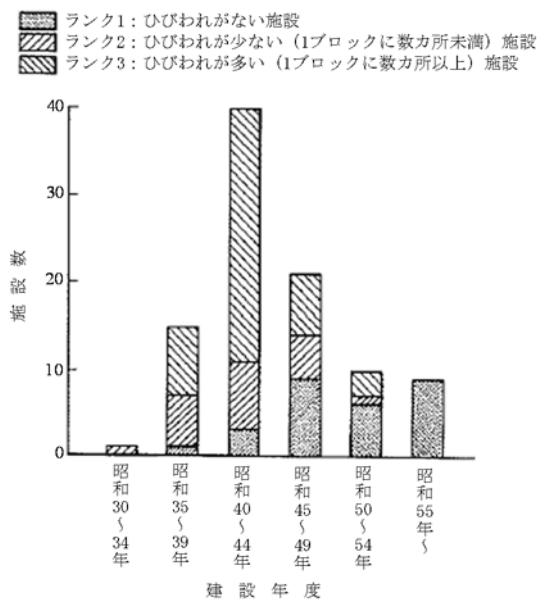


図-3 栈橋のひび割れ発生状況²⁾

表-1 栈橋の部材別劣化状況²⁾ (単位: 施設数)

劣化状況 部材数	無劣化 施設	劣化施設			
		鉄筋の腐食		コンクリート自体の劣化	外力による損傷
		塩害	明らかに かぶり不足		
梁	22	27	8	41	31
床版	45	6	16	32	4

注) 施設数は全体で95施設である。
劣化施設については、その原因が複数個ある場合には各々に計上されており、累計は95にならない。

(2) 栈橋上部工の既存の劣化実態調査

文献³⁾では、全国から抽出した、建設後10～48年経過した25施設の栈橋上部工における劣化実態調査を行っており、対象施設のほとんど全てにおいて、鉄筋腐食に伴う点錆、錆汁、剥離・剥落いずれかの塩害による劣化現象が確認されたとしている。

また、文献²⁾では、経過年数が平均16.1年の栈橋95施設に関して、表-1に示すように部材ごとに劣化状況は若干異なるとしており、梁が最も塩害を受けており、約3割の施設で梁に何らかの塩害が認められるとしている。

いずれの調査においても、建設後数十年の栈橋上部工において劣化現象が生じる可能性があることを示しており、つまりは、栈橋上部工は建設後数十年経過した場合、塩害による劣化に対する何らかの対策が必要となる可能性が生じると言える。なお、上記文献における対象施設のコンクリートの品質は、文献³⁾では設計に関する資料が失われていることが多かったため不明であ

るが、文献²⁾では、かぶりは平均7.5cm、水セメント比は平均52%、セメントは普通ポルトランドセメントが77.2%と最も多く用いられていた。

2.2 設計段階における維持管理の考慮

(1) コンクリート構造物の設計における維持管理の考慮

効率的・合理的な維持管理を実施するためには、設計の段階から適切な維持が行えるよう考慮することが重要であり、港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示第四条において、「技術基準対象施設の設計に当たっては、施工及び維持を適切に行えるよう、必要な措置を講ずるものとする」とされている。また、平成26年6月に「港湾の施設の技術上の基準・同解説(以下「技術基準」という。)」の部分改訂⁴⁾が行われ、同部分改訂においても、技術基準対象施設の設計にあたっては、維持管理を適切に考慮する旨が記載されたところである。

設計時に維持管理を考慮するにあたって、具体的に参考となるものとしては、土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕、2012年制定(以下「JSCE示方書」という。))」において、設計フローにおける維持管理の位置づけが記載されている。また、栈橋に関しては、栈橋の設計手法を示している文献⁶⁾において栈橋の設計フローが示されている。

JSCE示方書においては、コンクリート構造物の設計は、要求性能の設定、構造計画、構造詳細の設定、要求性能の照査という、それぞれの作業で構成され、図-4のような流れに沿って実施することとされている。

その中で、維持管理のレベル(図表中における維持管理区分)の設定は、図-4および表-2に示すように、構造形式や使用材料を決定する構造計画の段階において考慮することとされている。

構造計画段階で構造形式や使用材料を決定することによって、初期建設費用だけでなく、将来の維持管理に要する費用もほぼ決定することとなるため、今後の維持管理作業を踏まえながら、適切に維持管理のレベルを設定して構造計画に反映することが重要となる。また、構造計画で決定した構造形式や使用部材を構造詳細の設定段階等で変更することは非常に困難なことであるため、変更が生じないように十分にこの段階で検討することが重要となる。

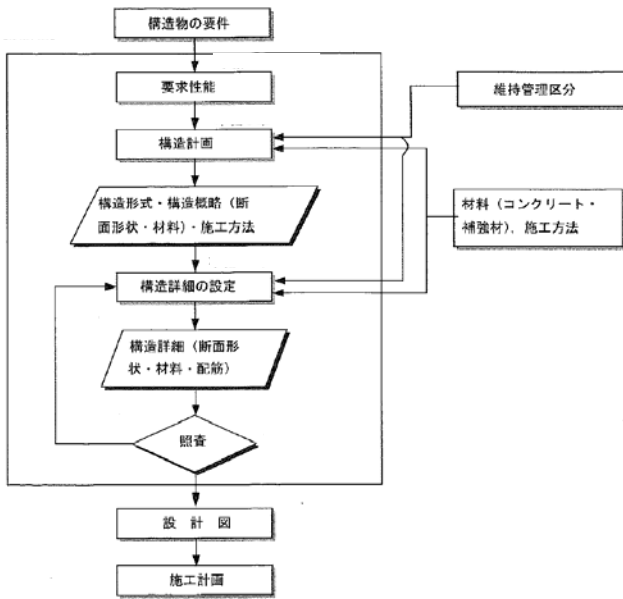


図-4 コンクリート構造物の設計の流れ⁵⁾

表-2 設計の構成項目⁵⁾より作成

構成項目	概要
要求性能の設定	施工中および設計耐用期間内において、構造物の使用目的に適合するために要求されるすべての性能を設定する。
構造計画	要求性能を満たすように、構造特性、材料、施工方法、維持管理区分、経済性等を考慮して構造形式等の設定などを行う。
構造詳細の設定	構造計画で設定された構造形式に対して、部材寸法、配筋、使用材料等の性能の照査で必要とされる情報の設定を行う。
要求性能の照査	設計耐用期間を通じて、構造物が耐久性、安全性、使用性、復旧性、環境性等に関して要求された性能を満足することを照査する。

(2) 栈橋の設計における維持管理の考慮

海上部に建設される栈橋のような構造物は、海水の影響を受け、鋼材の腐食といった劣化が生じやすい。そのため、維持管理のレベルを適切に定め、維持管理費用の最小化により一層努める必要がある。劣化の程度によっては、大規模な補修などの対策を実施せざるをえず、莫大な費用を要することもあり得る。

文献⁶⁾においては、図-5に示すように、維持管理方針について十分に検討を行った上で、それを与条件としてとりまとめておく必要があるとしている。ここでの維持管理方針とは、施設の重要度や代替性、想定される利用条件、維持管理に充てられる予算、維持管理の実施体制などを踏まえて、当該栈橋を予防保全型

の維持管理を行っていくのか、事後保全型の維持管理を行っていくのかといった維持管理に対する基本的な考え方を整理したものであり、これを施設の構成部材ごとに維持管理レベルとして表現していくことが望ましいとしている。

上記の維持管理レベルは、レベルⅠ、レベルⅡおよびレベルⅢの三段階があり、表-3のように定義されている⁷⁾。維持管理レベルⅠの部材を用いた場合、供用期間中に要求性能が満たされなくなる状態に至らないため、対策工を実施する必要はないが、維持管理レベルⅡの部材を用いた場合、供用期間中に要求性能が満たされなくなる状態に至らないように対策工を実施する必要がある。

ただ、設計フローにおける維持管理の位置づけについて述べてきたが、実際にLCCを踏まえて維持管理方針を検討しようとした場合には、困難が生じる。

現在、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査結果を利用してLCCを算出する場合、いずれの文献においても配筋の情報を踏まえた上で実施しており、つまりは、細部設計時の情報が必要となっている。一方、維持管理方針の検討は、これまで述べてきたとおり、細部設計よりも上流側になる構造計画段階あるいは与条件として実施することとされている。

したがって、LCCの算出が構造計画段階あるいは与条件として実施可能となるような手法を今後構築することが必要であると考えられる。ただし、今回の目的は様々な環境条件で活用できることを念頭にLCCの試算を行うことであるため、当該については別の機会に検討することとしたい。

表-3 維持管理レベルの定義⁷⁾

分類	損傷劣化に対する考え方
維持管理レベルⅠ (事前対策型)	高い水準の損傷劣化対策を行うことにより、供用期間中に要求性能が満たされなくなる状態に至らない範囲に損傷劣化を留める。
維持管理レベルⅡ (予防保全型)	損傷劣化が軽微な段階で、小規模な対策を頻繁に行うことにより、供用期間中に要求性能が満たされなくなる状態に至らないように性能の低下を予防する。
維持管理レベルⅢ (事後保全型)	要求性能が満たされる範囲内で、損傷劣化に起因する性能低下をある程度許容し、供用期間中に1~2回程度の大規模な対策を行うことにより、損傷劣化に事後的に対処する。

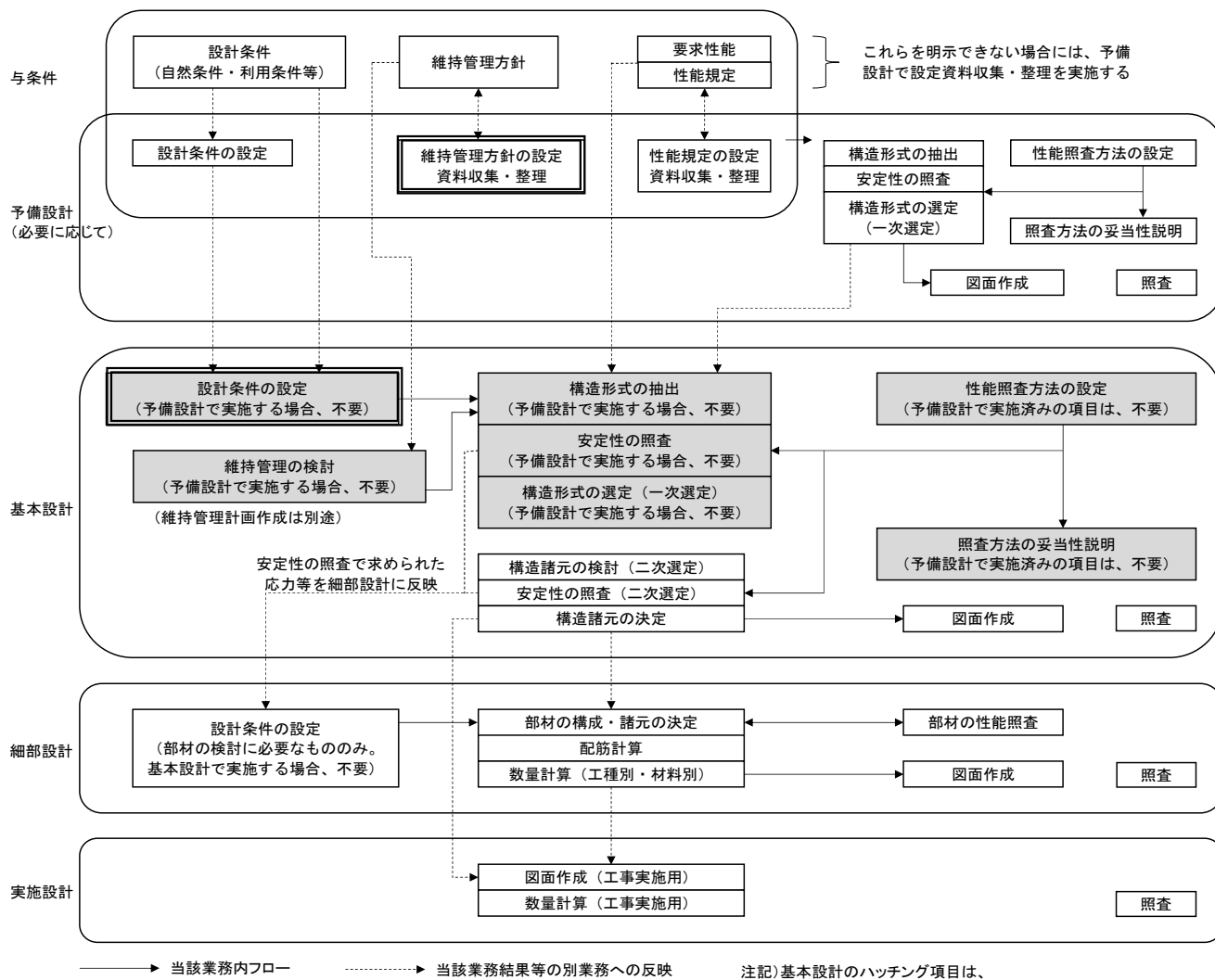


図-5 栈橋の設計フロー⁶⁾

3 栈橋上部工のライフサイクルコスト算出

3.1 ライフサイクルコスト

構造物のLCCは、構造物の計画、設計、建設、運用、維持管理、解体、撤去等のライフサイクルの各段階での費用の総額であり、 $LCC = \text{初期費用} + \text{運用} \cdot \text{維持管理費用} + \text{解体} \cdot \text{撤去費用}$ で示される⁷⁾。維持管理費用を試算するにあたっては、多くの文献において3.3で後述する耐久性に関する照査結果をもとに試算している。

また、社会的割引率に関しては、これまで様々議論がなされており、文献⁸⁾においては、構造物のLCCの維持管理費用を検討する場合は、社会的割引率を適用しないことが妥当としている。その理由としては、構造物のLCCの維持管理費用を検討する場合は、一般的な社会的割引率を適用する場合と異なり、連続的に発生する事象に対しての比較評価ではなく、現時点と将来の1時点という離散した2つの時点間事象の比較評価であり、現時点から将来のその時点までの社会的割引率が累積して適用されることから、LCCの結果が現場の担当者の感覚と著しく乖離すること、また、一般的な社会的割引率は第一義的に便益を想定して議論がされており、費用に関してはそれに準じると考えられ、費用に特定された議論が十分ではない中、構造物のLCCでは便益は含まれず費用のみが対象とされている等があげられている。本研究においても、これに習い、社会的割引率を適用しないこととした。

3.2 栈橋上部工のライフサイクルコストに関する既往研究

これまで、栈橋上部工を対象とし、LCCを試算した文献は複数ある。例えば、文献⁹⁾では、性能照査の事例を紹介した上で、エポキシ樹脂塗装鉄筋等の耐久性を確保するような材料を用いた場合のLCCの試算結果の一例を紹介している。また、文献¹⁰⁾では、エポキシ樹脂塗装鉄筋や埋設型枠等を用いた場合の維持管理シナリオについてLCCを指標とした比較を行っている。いずれの文献においても、鉄筋腐食発生限界濃度 (C_{lim})、コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (C_0) および塩化物イオンに対する設計拡散係数 (D_d) を表-4に示すように、技術基準等で示されている値で設定している。

しかし、実際の現場においては、技術基準上の値と必ずしも一致するわけではなく、また、技術基準等においても、そもそも各値は、栈橋を設置する地点と同様の環境条件での実測データにより定めることが望ましいとされている。なお、技術基準上の具体的な値には3.4で示すこととする。

表-4 既往文献における C_{lim} , C_0 , D_d の値

	C_{lim} (kg/m ³)	C_0 (kg/m ³)	D_d (cm ² /y)	引用文献
文献 ⁹⁾	1.2	表-7 (床版 9.0 梁 13.0)	(式10) による値	JSCE 示方書 2007年制定
文献 ¹⁰⁾	2.0	(式9) による値	(式3) による値	技術基準

3.3 耐久性に関する照査

(1) 鋼材腐食に対する照査

一般的な耐久性に関する照査は、JSCE 示方書や技術基準に記載されているように、中性化および塩害による鋼材腐食、凍害あるいは化学的浸食によるコンクリートの劣化により構造物の性能が損なわれないことを照査しなければならない。しかし、栈橋上部工に関しては、特別な場合を除き、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査のみを行えばよいとされている⁶⁾。

(2) 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査

塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査は、技術基準では、一般に(式1)により行うことができる。なお、鋼材に腐食が生じて、コンクリートに腐食に伴うひび割れが発生するまでは、構造物の性能が損なわれていないと考えてよいが、鋼材の腐食発生から腐食ひび割れ発生までの期間を精度よく予測することが現状では困難なことから、鋼材の発錆を照査対象の限界状態としている。

$$\gamma_i \cdot \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad (\text{式1})$$

ここに、 γ_i : 構造物係数、一般に1.0~1.1としてよく、本研究においては1.0とする、

C_{lim} : 鉄筋腐食発生限界濃度 (kg/m³)、

C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 (kg/m³)、

鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計用値 C_d は、(式2)により求めることができ、塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d は、(式3)により求めることができる。(式3)中の塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k は、実際に使用するコンクリートが分かっている場合には、そのコンクリートから作製した試験体による実験により定め、そうでない場合には(式4)で定めることができる。

$$C_d = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1c}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right) \quad (\text{式 2})$$

ここに、 C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3),
 c : かぶりの設計値 (mm),
 D_d : 塩化物イオンに対する設計拡散係数 (cm^2/y),
 t : 設計供用期間,
 erf : 誤差関数.

$$D_d = \gamma_c D_k + \left(\frac{w}{l} \right) \left(\frac{w}{w_a} \right)^2 D_0 \quad (\text{式 3})$$

ここに、 γ_c : コンクリートの材料係数、一般に、通常の使用時の限界状態の照査においては1.0としてよい、
 D_k : 塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (cm^2/y),
 w : ひび割れ幅 (mm),
 w_a : ひび割れ幅の限界値 (mm),
 w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔の比 ($w/l=3(\sigma_s/E_s+\varepsilon'_{csd})$), σ_s : 鉄筋応力の増加量 (N/mm^2), E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm^2), ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値,
 D_0 : 塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れ幅の影響に関する定数。一般に $200\text{cm}^2/\text{y}$ としてよい、

$$D_k = \gamma_p \alpha D_p \quad (\text{式 4})$$

ここに、 γ_p : D_p の精度に関する安全係数、1.0としてよい、
 α : 換算係数。普通ポルトランドセメントを使用する場合は0.65、高炉セメントやシリカフォームを使用する場合は一般に1.0としてよい、
 D_p : コンクリートの拡散係数の予測値 (cm^2/y), 普通ポルトランドセメントを使用する場合は、(式5)で定めることができる。

$$\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (\text{式 5})$$

ここに、 W/C : 水セメント比。

普通鉄筋ではなく、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる場合には、鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計用値 C_d は、(式2)ではなく、(式6)により求めることとなる¹²⁾。また同様に、埋設型枠を用いる場合には、鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計用値 C_d は、(式2)ではなく、(式7)により求めることとなる⁹⁾。

$$C_d = \gamma_{cl} C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c}{\sqrt{D_d}} + \frac{C_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right) \right) \quad (\text{式 6})$$

ここに、 C_{ep} : エポキシ樹脂塗膜の厚さ、

D_{epd} : エポキシ樹脂内の塩化物イオンに対する設計拡散係数、

γ_{cl} : C_d のばらつきを考慮した安全係数、1.0とする、

$$C_d = \gamma_{cl} C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c}{\sqrt{D_d}} + \frac{C_F}{\sqrt{D_{Fd}}} \right) \right) \right) \quad (\text{式 7})$$

ここに、 C_F : 埋設型枠の厚さ、

D_{Fd} : 埋設型枠内の塩化物イオンに対する設計拡散係数、

3.4 技術基準等における C_{lim} , C_0 , D_d の値について

(1) 鉄筋腐食発生限界濃度 C_{lim}

鉄筋腐食発生限界濃度 C_{lim} は、諸条件によって異なることが実情であり、コンクリートの飽水率やかぶり、温度、鉄筋界面の状態によって値がばらつくと考えられている。これらの影響を検討するには、各因子を変化させて評価する必要があるが、現在、そこまでの検討は行われていない。

技術基準では、類似構造物等の状況を勘案して適切に設定するとされており、また、一般的な海洋環境にある港湾の施設で表-5に示すかぶりが確保されている場合には一般に $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ とすることができるかとされている。

これは、文献¹³⁾におけるコンクリート試験体 ($\phi 150 \times 300\text{mm}$ の円柱)の内部に鉄筋 ($\phi 9\text{mm}$ 丸鋼)をかぶり20, 40および70mmで埋設させ、干満帯を再現した暴露施設において15年間の暴露試験を行った結果の下限値 $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ に基づいている (図-6)。

また、JSCE示方書では、類似の構造物の実測結果や試験結果を参考に定めるとよいとされ、それらによらない場合には、 W/C の範囲が0.30~0.55においては、普通ポルトランドセメントを用いた場合には(式8)を用いて定めてよいとされている。 C_{lim} に及ぼす水セメントの影響は、図-7の実験結果が文献¹⁴⁾に示されており、JSCE示方書の設計用限界値はさらに安全側になるように設定されたものである。

$$C_{lim} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad (\text{式 8})$$

表-5 かぶりの標準値¹¹⁾

環境区分	かぶり (mm)	摘要
特に厳しい腐食性環境	70	海水に直接接する部分、 海水で洗われる部分、 厳しい潮風をうける部分
一般の環境	50	上記以外の部分

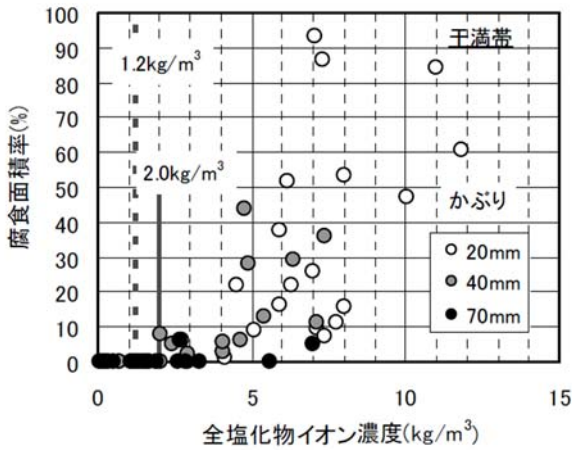


図-6 鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係¹³⁾

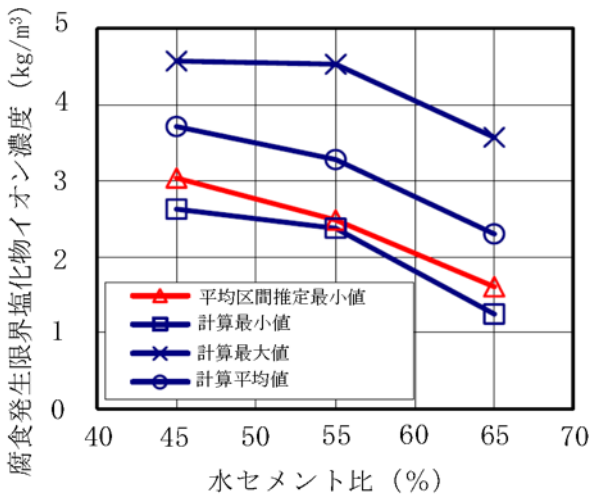


図-7 水セメント比と C_{lim} の関係¹⁹⁾

(2) コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0

コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 も同様に諸条件によってばらつきがあるのが実情であり、コンクリートが位置する環境によって異なるとされており、また時間やコンクリート材料（特にセメント材料）によって異なるとされている。

技術基準では、構造部材が置かれた地点と同様の環境条件での実測データにより定めることが望ましいとされ、栈橋上部工で海水面 (H.W.L) との部材下面の距離 (x) が 0~2.0m 程度の場合には、(式 9) に基づいて定めることもできるとされている。ただし、 6.0kg/m^3 を下回らないものとする。

$$C_0 = -6.0x + 15.1 \quad (\text{式 } 9)$$

これは、文献¹³⁾の実測データ（計 18 港の栈橋上部工からの計 175 点のデータ）に基づいている。 C_0 の度数分布を H.W.L から距離別にまとめており、表-6 のような正規分布に従うとし

表-6 C_0 の度数分布¹³⁾

	H.W.L からの距離				
	0m 以下	0~0.5m	0.5~1m	1~1.5m	1.5~2m
平均値 μ	16.21	13.37	11.05	6.28	4.86
標準偏 差 σ	5.12	5.05	5.41	4.62	4.08

表-7 コンクリート表面塩化物イオン濃度⁵⁾

	飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
		汀線付近	0.1	0.25	0.5	1
飛来塩分が多い地域 北海道、東北、北陸、沖縄	13	9	4.5	3	2	1.5
飛来塩分が少ない地域 関東、東海、近畿、中国、四国、九州		4.5	2.5	2	1.5	1

ている。また、その上で、実測データの近似直線 ($y = -6.0x + 15.1$) は、累積確率 $Pr=0.5$ の場合の値とほぼ一致しており、近似直線を用いて平均的な C_0 を算出することが可能としている。技術基準は、当該直線を引用している。

また、JSCE 示方書では、対象地域の飛来塩分量に応じて設定するものとし、過去の類似の構造物の実績や実測データによらない場合、表-7 により求めてよいとされている。これは、飛来塩分量の全国調査データ（全 266 地点で 1984 年 12 月から 3 ヶ月にわたって実施）等を参考に設定されている¹⁴⁾。

(3) 塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d

塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d の影響要因としては、材料、暴露環境や時間などが考えられる。

技術基準では、3.3 で前述したとおり、(式 3) により求めることができる。これは、2002 年制定の JSCE 示方書における (式 10) に基づいている。ただし、塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k に関しては、文献¹³⁾における暴露試験および実構造物の試験結果に基づき、(式 4) とした。

$$D_d = \gamma_c D_k + \left(\frac{w}{l}\right) \left(\frac{w}{w_a}\right)^2 D_0 \quad (\text{式 } 10)$$

ここに、 γ_c : コンクリートの材料係数、一般に、1.0 としてよい、
 D_k : 塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (cm^2/y)、
 (式 11) により求められる、
 w : ひび割れ幅 (mm)、
 w_a : ひび割れ幅の限界値 (mm)、
 w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔の比 ($w/l=3(\sigma_{se}/E_s+\epsilon'_{csd})$)、
 σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量 (N/mm^2)、 E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm^2)、 ϵ'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値、
 D_0 : 塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れ幅の影響に関する定数。一般に $200\text{cm}^2/\text{y}$ としてよい、

$$D_k = \gamma_p D_p \quad (\text{式 } 11)$$

ここに、 γ_p : D_p の精度に関する安全係数、一般に $1.0 \sim 1.3$ としてよい、
 D_p : コンクリートの拡散係数の予測値 (cm^2/y)、普通ポルトランドセメントを使用する場合、(式 12) により求めてよい、

$$\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (\text{式 } 12)$$

ここに、 W/C : 水セメント比。

また、JSCE 示方書では、(式 10) ~ (式 12) を (式 13) ~ (式 14) に改訂されている。これは、例えば (w/w_a)² に関しては、元々ひび割れの開口を対して制限を加えるために導入されていたが、実際には使用性の照査の段階でひび割れの開口は限界値以下に抑えられていることから、制限をかける必要がないと改めて整理され、1.0 として取り扱うこととし、削除された¹⁴⁾。また、 D_k に関しては、これまで水セメント比の二次関数で定式化していたが、計算の簡便さを考慮して一次関数として定式化された¹⁴⁾。

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \lambda \cdot \left(\frac{w}{l}\right) \cdot D_0 \quad (\text{式 } 13)$$

ここに、 γ_c : コンクリートの材料係数、一般に 1.0 としてよい、
 D_k : 塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (cm^2/y)、普通ポルトランドセメントを使用する場合、(式 14) により求めてよい、
 λ : ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数、一般に 1.5 としてよい、
 w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔の比 ($w/l = (\sigma_{se}/E_s + \epsilon'_{csd})$)、
 σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量 (N/mm^2)、 E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm^2)、 ϵ'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値、
 D_0 : 塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れ幅の影響に関する定数。一般に $400\text{cm}^2/\text{年}$ としてよい。

$$\log_{10} D_k = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (\text{式 } 14)$$

ここに、 W/C : 水セメント比。ただし、水セメント 0.30 以上、 0.55 以下とする。

4 本研究におけるライフサイクルコストの試算

4.1 対象断面および条件

(1) 対象断面

設計の対象とする栈橋上部工の平面形状および栈橋全体の標準断面図は、文献¹⁵⁾の上巻第2編第2章の平面形状 (図-8) および標準断面図 (図-9) を引用した。

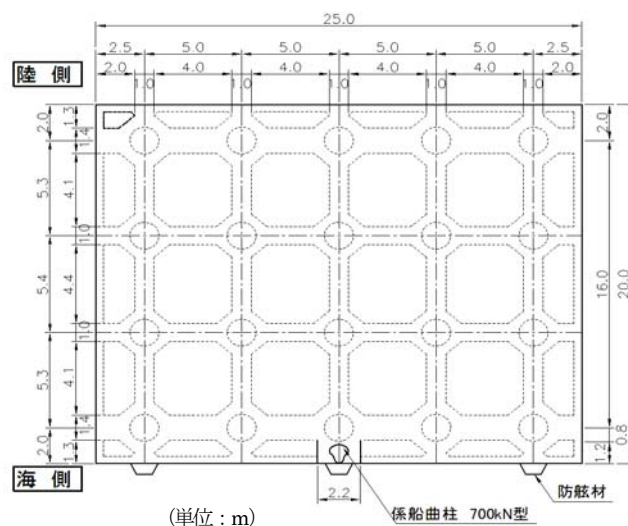


図-8 栈橋上部工の平面形状

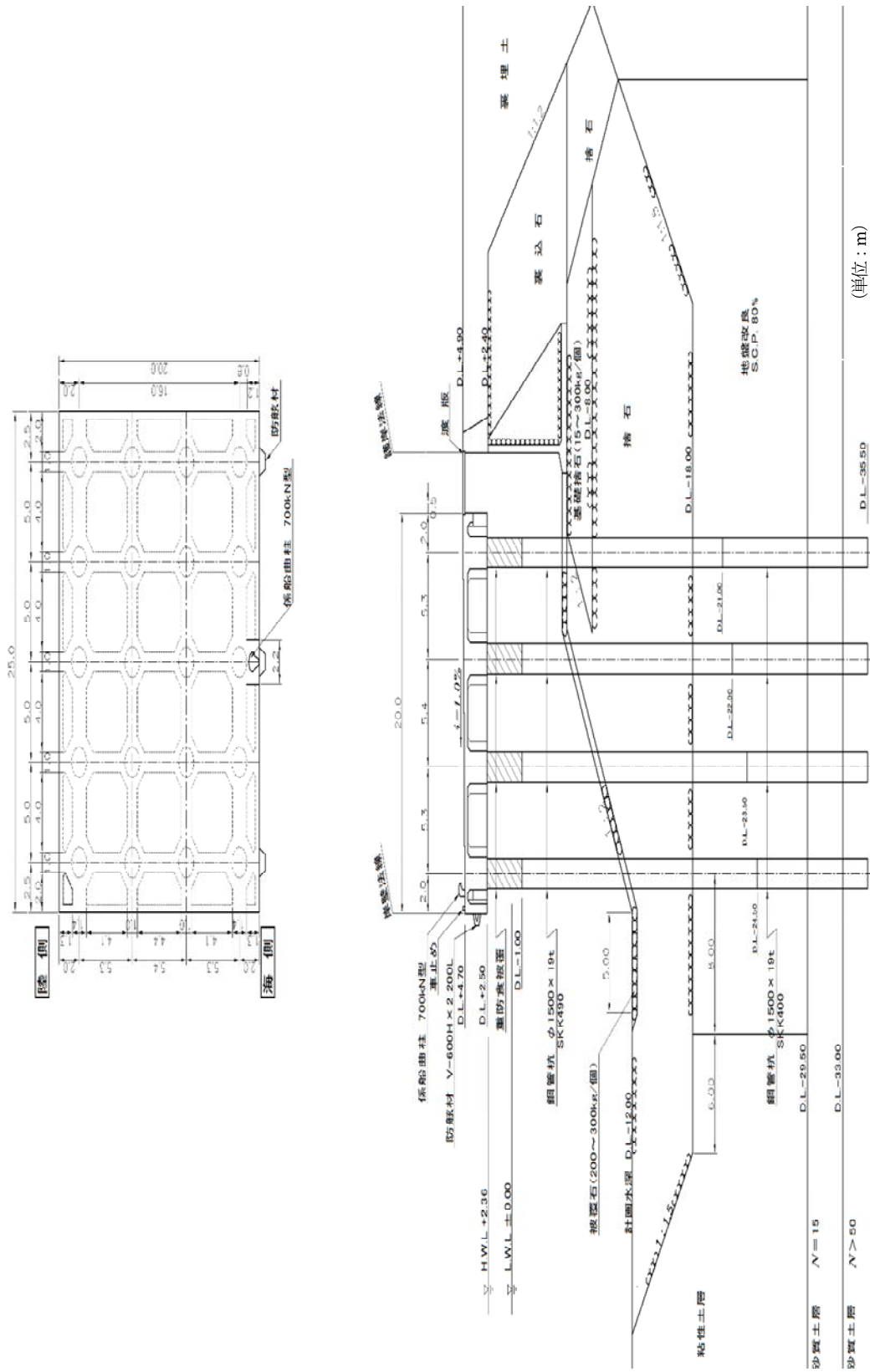


図-9 栈橋の標準断面図

(2) 設計条件

設計条件に関しても、(1)と同様に文献¹⁵⁾の上巻第2編第2章を準用した。

a) 構造条件

構造形式：鋼直杭式横栈橋

計画水深：DL -12.0m

栈橋天端高：DL +4.7m

バース延長（1ブロックの長さ）：25m

エプロン幅：20m

b) 自然条件

朔望平均満潮位（H.W.L.）：DL +2.36m

平均潮位：DL +1.30m

朔望平均干潮位（L.W.L.）：DL +0.00m

有義波高 $H_{1/3}$ ：1.0m

最高波高 H_{max} ：1.8m

c) 材料条件

イ) コンクリート

設計基準強度 $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$

設計圧縮強度 $f_{cd}=30/1.0=30.0\text{N/mm}^2$

ヤング係数 $E_c=28\text{kN/mm}^2$

ロ) 鉄筋

設計引張降伏強度 $f_{yd}=345\text{N/mm}^2$

ヤング係数 $E_s=200\text{kN/mm}^2$

d) 荷重条件

イ) 固定荷重

無筋コンクリート 22.6kN/m³

鉄筋コンクリート 24.0kN/m³

舗装コンクリート 24.0kN/m³

ロ) 上載荷重

永続時 20.0kN/m²

地震時 10.0kN/m²

ハ) 移動荷重

①トラック荷重(T-250)

②トレーラー荷重(465kN/台)

③フォークリフト荷重(613kN/台)

④クレーン荷重(19,600kN/台シャトルブーム型)

なお、クレーン荷重については、荷役機械の大型化を想定し、導入事例をもとに 19,600kN/台シャトルブーム型としている。

e) 配筋

床版および梁の配筋状態については、図-10および図-11とし、表-8に示す鉄筋を使用することとした。

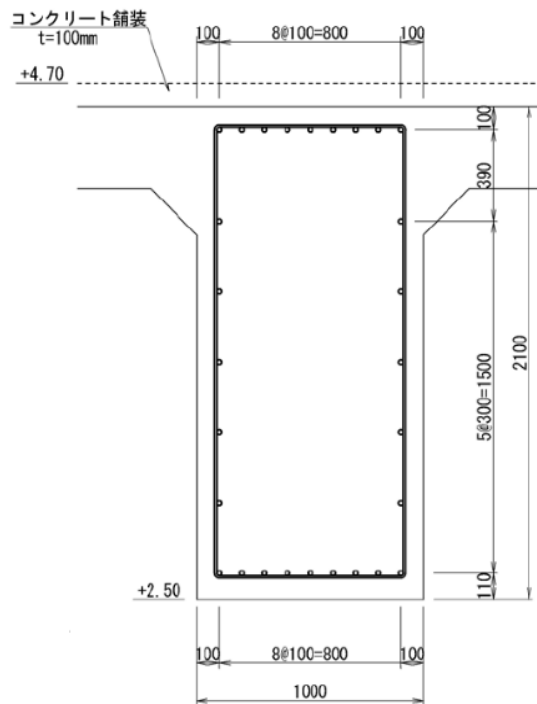


図-10 梁の配筋状態

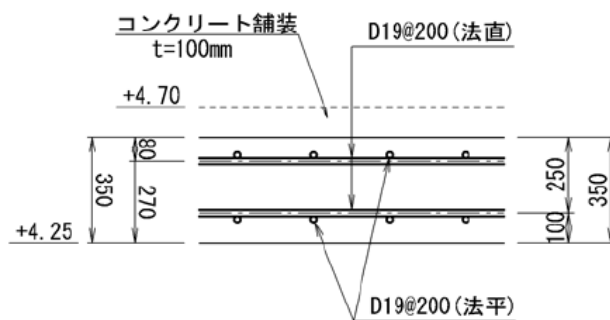


図-11 床版の配筋状態

表-8 鉄筋の径・間隔

		径 (mm)	間隔 (mm)	
床版	上側	法直	D19	200
		法平	D19	200
	下側	法直	D19	200
		法平	D19	200
梁	上側	D25	100	
	下側	D19	100	

4.2 補修実施時期・補修工法の設定

文献¹⁶⁾において、港湾の施設技術基準対象施設の維持に当たっては、当該施設の損傷、劣化その他の変状についての定期及び臨時の点検及び診断並びにその結果に基づく当該施設全体の維持に係る総合的な評価を適切に行った上で、必要な維持工事等を適切に行うものとするとしている。したがって、実際に補修などの対策の実施の要否を判定する際には、施設の変状および劣化の状態に関する評価とともに、対策に対する現場的・行政的判断からの評価を実施した上で実施することとなる。

一方、設計段階においては、対策の実施時期および工法については、劣化・変状の進行予測に基づいて計画することとなる⁹⁾。したがって、本研究においては、3.3で前述した(式1)～(式7)を用いて、梁の下面鉄筋および床板の下面鉄筋における耐久性を照査し、文献¹⁷⁾に示す部材の劣化状況に応じた補修工法と適用範囲を準用し、表-9に示す断面修復工法で補修することとした。文献¹⁷⁾では、補修実績のヒアリング等をもとに部材の劣化状況に応じた補修工法と適用範囲を示しており、鉄筋腐食が開始した部材の割合が30%を超えた場合の補修工法事例として、断面修復工法が示されている。

梁の照査は、文献¹⁵⁾にない、図-12に示す梁のA～Dの支点両側(8カ所)とa～c(3カ所)の11ヶ所において行い、また、床板の照査は図-13に示す床板の形状のうち、最も面積の割合が支配的なS1について行った。

補修後の再補修時期は初回補修時期と同様に設定した。

表-9 梁および床板の総面積に対する適用範囲

主な工法	適用工法	規格	適応範囲 (%)
断面修復工法	断面修復(大)	はつり深さ100mm程度	20
	断面修復(小)	はつり深さ50mm程度	30
	表面被覆		50

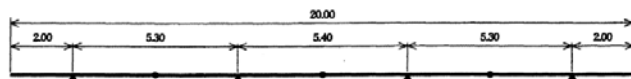


図-12 梁の照査箇所

4.3 初期費用及び維持管理費用の単価設定

構造物のLCCを算出するにあたって、使用材料等の単価が必要になるが、各単価は現場環境や実施時期等によって異なる。したがって、各環境に応じた単価を積算する必要があるが、本研究においては、積算基準類で算出すると共に、積算基準類に記載がない単価は業者ヒアリングおよび文献¹⁰⁾の単価を引用することとし、表-10および次ページの表-11に示すとおりとした。なお、当該単価は、本研究を実施するために算出した単価であり、実際の栈橋上部工の設計等において必ずしも適用できるわけではないことに留意いただきたい。

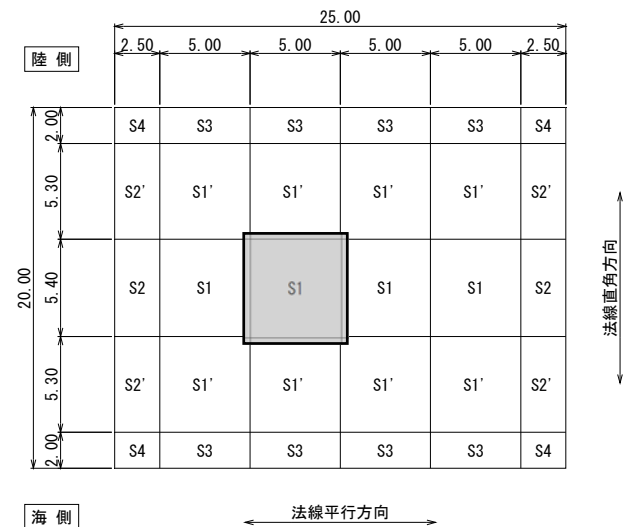


図-13 床板の照査箇所

表-10 本試算における初期費用の単価

	工種	規格	単位	単価
上部工	コンクリート	W/C = 50%	/m ³	14,128
		W/C = 45%		15,097
		W/C = 40%		16,627
	型枠	木製	/m ²	17,521
	鉄筋	普通	/kg	240
		エポキシ樹脂塗装		304
	埋設型枠	超高強度繊維補強コンクリート	/m ²	50,693
	表面被覆		/m ²	9,240
下部工	鋼管杭	材料	/kg	136
		海上運搬・打設	/本	1,046,918

4.4 維持管理レベルによる検討ケース

維持管理レベルⅠおよび維持管理レベルⅡに想定した部材を選定し、表-12に示す6ケースを設定した。ケースⅡ-1では普通鉄筋、水セメント比50%のコンクリートを用い、ケースⅡ-2、ケースⅡ-3では、鉄筋の種類はケースⅡ-1と同様とし、水セメント比を45%、40%に変化させた。また、ケースⅠ-1~ケースⅡ-4は、水セメント比はケースⅡ-1と同様に50%とし、使用部材を変化させた。ケースⅠ-1では、鉄筋を普通鉄筋ではなくエポキシ樹脂塗装鉄筋とし、ケースⅠ-2、ケースⅡ-4では埋設型枠、表面被覆工を施すこととした。なお、セメントはいずれのケースにおいても、普通ポルトランドセメントを使用することとした。また、使用材料の変更に伴う各材料の諸元を表-13に示す。また、各ケースにおける初期費用に関する数量および維持管理費用に関する数量を次ページの表-14および表-15に示す。

4.5 ライフサイクルコストの算定

3.1に示したように $LCC = \text{初期費用} + \text{運用} \cdot \text{維持管理費用} + \text{解体} \cdot \text{撤去費用}$ で示されるが⁷⁾、運用費用はLCCに占める割合が非常に小さく¹⁰⁾、また解体・撤去費用は算出が困難なため、本研究においては対象外とし、初期費用(直接工事費)と維持管理費用(補修工事費)の合計費用を対象とした。また、設計時の参考としやすいように、初期費用については、上部工と下部工を併せた栈橋全体としての初期建設費用を算出することとした。栈橋全体の初期費用は、表-10に示す単価と表-14を用いて算出することとした。また、上部工の維持管理費用については、4.2で補修時期を設定し、表-11に示す単価と表-15に示す補修面積を用いて算出することとした。

表-11 本試算における維持管理費用の単価

工種	規格	単位	単価
断面修復(大)	はつり深さ 100mm程度	/m ²	139,500
断面修復(小)	はつり深さ 50mm程度	/m ²	109,800
表面被覆		/m ²	17,700

表-13 各材料の諸元

項目	数値	参考文献
エポキシ樹脂塗装厚	0.22mm	文献 ¹²⁾
埋設型枠	厚さ 25mm	文献 ⁹⁾
寸法	目地間隔 1000mm	文献 ⁹⁾
ひび割れ幅の限界値	普通 上面: 0.0050c 下面: 0.0035c	文献 ¹¹⁾
	エポキシ樹脂塗装 上面: 0.0050c × 1.1 下面: 0.0035c × 1.1	文献 ¹²⁾
エポキシ樹脂塗内の拡散係数	$D_{exd} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{y)}$	文献 ¹²⁾
埋設型枠内の拡散係数	$D_{exi} = 0.0019 \text{ (cm}^2/\text{y)}$	文献 ¹⁰⁾

表-15 維持管理費用に関する数量

(1ブロック延長25mあたり)

工種	規格	単位	数量
断面修復(大)	はつり深さ 100mm程度	/m ²	220.2
断面修復(小)	はつり深さ 50mm程度	/m ²	330.3
表面被覆		/m ²	550.5

表-12 検討ケース

	対策工	維持管理 レベル	概要
ケースⅡ-1	水セメント比 50%	Ⅱ	維持管理上の限界値に達した時点で補修を行う。 コンクリートの水セメント比を変更することにより、補修の時期を遅らせることができる。
ケースⅡ-2	水セメント比 45%	Ⅱ	
ケースⅡ-3	水セメント比 40%	Ⅱ	
ケースⅠ-1	エポキシ樹脂塗装鉄筋	Ⅰ	床版及び梁の鉄筋にエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用。基本的に設計供用期間中に塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食を生じさせない。
ケースⅠ-2	埋設型枠	Ⅰ	床版及び梁に高強度耐久パネルによる埋設型枠で被覆。設計供用期間中に塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食を生じさせない。
ケースⅡ-4	表面被覆	Ⅱ	床版及び梁に表面被覆を行う。 表面被覆の耐用期間中（15年と仮定する）はコンクリートへの塩化物イオンの侵入は生じないものとする。

表-14 初期建設費用に関する数量（1ブロック延長 25m あたり）

工種	規格	単位	ケース	ケース	ケース	ケース	ケース	ケース	
			Ⅱ-1	Ⅱ-2	Ⅱ-3	Ⅰ-1	Ⅰ-2	Ⅱ-4	
上部工	コンクリート	水セメント比 50%	m ³	625	-	-	625	597	625
		水セメント比 45%		-	625	-	-	-	-
		水セメント比 40%		-	-	625	-	-	-
	型枠	木製	m ²	1,101	1,101	1,101	1,101	1,101	1,101
	鉄筋	普通	kg	44,284	44,284	44,284	-	44,284	44,284
		エポキシ樹脂塗装		-	-	-	45,170	-	-
	埋設型枠	超高強度繊維補強コンクリート	m ²	-	-	-	-	1,101	-
表面被覆		m ²	-	-	-	-	-	1,101	
下部工	鋼管杭	材料	kg	511,285	511,285	511,285	511,285	511,285	511,285
		海上運搬・打設	本	20	20	20	20	20	20

4.6 本研究における C_{lim} , C_0 , D_d の設定

本研究では、鉄筋腐食発生限界濃度 (C_{lim})、コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (C_0) および塩化物イオンに対する設計拡散係数 (D_d) を以下のように設定することとした。なお、各値は、技術基準において相関関係が示されていないため、各々独立して設定できることとした。

まず C_{lim} は、図-6 では下限値 2.0kg/m^3 とし、値がばらついており、また、文献¹⁸⁾では、 C_{lim} のばらつきを平均値 2.03kg/m^3 、変動係数 0.375 の正規分布に仮定している。本研究においては、文献¹⁸⁾を準用し、 2.03kg/m^3 (平均値)、 1.27kg/m^3 (平均値-標準偏差 $\times 1$)、 2.79kg/m^3 (平均値+標準偏差 $\times 1$) の3値を設定することとした。

次に C_0 は、文献¹³⁾の表-6 の正規分布を準用することとした。H.W.L から 0.14m の距離に位置する梁の下面鉄筋については、 13.37kg/m^3 (平均値)、 8.32kg/m^3 (平均値-標準偏差 $\times 1$)、 18.42kg/m^3 (平均値+標準偏差 $\times 1$) の3値を、H.W.L から 1.89m の距離に位置する床版の下面鉄筋については、 4.86kg/m^3 (平均値)、 0.78kg/m^3 (平均値-標準偏差 $\times 1$)、 8.94kg/m^3 (平均値+標準偏差 $\times 1$) の3値を設定することとした。

さらに、 D_d は、(式3) から求められる値を基準値とし、基準値 $\times 75\%$ 、基準値、基準値 $\times 125\%$ の3値を設定することとした。

上記設定値を踏まえ、表-16 のように、既往研究等で用いられる環境である Pattern 0 から C_{lim} のみを変化させたケースを Pattern C_{lim-1} および Pattern C_{lim-2} とし、 C_0 のみを変化させたケースを Pattern C_{0-1} および Pattern C_{0-2} とし、 D_d のみを変化させたケースを Pattern D_d-1 および Pattern D_d-2 とし、 C_{lim} , C_0 および D_d 全てを変化させたケースを Pattern All-1 および Pattern All-2 とし、LCC 試算を実施した。

表-16 C_{lim} , C_0 , D_d の設定パターン

	C_{lim} (kg/m^3)	C_0 (kg/m^3)		D_d (cm^2/y)
		梁	床版	
Pattern 0	2.03	13.37	4.86	(式3) 値
Pattern C_{lim-1}	1.27	13.37	4.86	(式3) 値
Pattern C_{lim-2}	2.79	13.37	4.86	(式3) 値
Pattern C_{0-1}	2.03	18.42	8.94	(式3) 値
Pattern C_{0-2}	2.03	8.32	0.78	(式3) 値
Pattern D_d-1	2.03	13.37	4.86	(式3) $\times 125\%$
Pattern D_d-2	2.03	13.37	4.86	(式3) $\times 75\%$
Pattern All-1	1.27	18.42	8.94	(式3) $\times 125\%$
Pattern All-2	2.79	8.32	0.78	(式3) $\times 75\%$

※ ハッチング箇所の値は各パラメータの平均値または基準値を表す。

3つのパラメータを全て変化された Pattern All-1 および Pattern All-2 は、塩害が厳しい環境条件および塩害が穏やかな環境条件を想定して設定している。Pattern C_{lim-1} ~ Pattern D_d-2 は、各パラメータの劣化予測への影響を把握するために設定している。

4.7 ライフサイクルコストの試算結果

(1) 鉄筋位置における塩化物イオン濃度

(式1) ~ (式7) を用いて算出した Pattern 0 ~ Pattern All-2 の鉄筋位置における塩化物イオン濃度の経年変化を図-14 ~ 図-22 に示す。鉄筋位置における塩化物イオン濃度が鉄筋腐食発生限界濃度を超過する時期は、図-14 ~ 図-22 を通じて、ケース II-1 が最も早く、次いでケース II-3、ケース II-4 の順となっている。また、ケース I-1 およびケース I-2 では、100 年経過しても鉄筋位置における塩化物イオン濃度が鉄筋腐食発生限界濃度を超過することはほとんどないことがわかる。

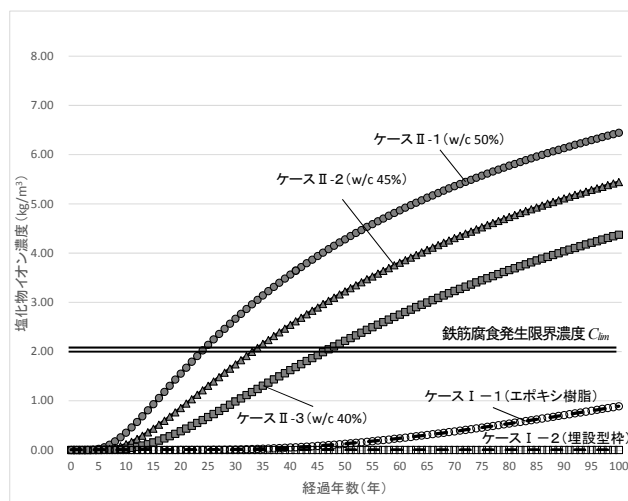


図-14 塩化物イオン濃度の経年変化 (Pattern 0)

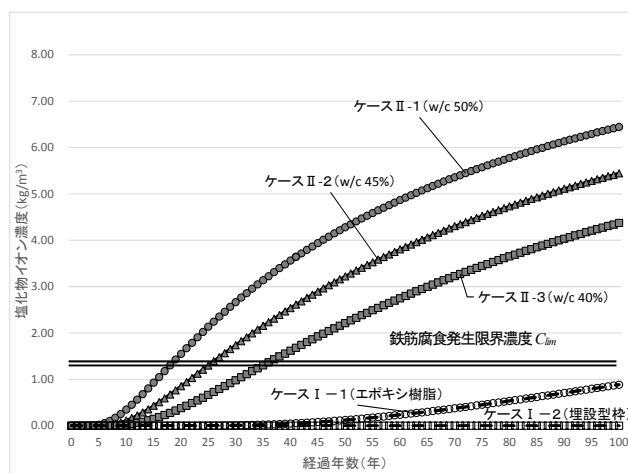


図-15 塩化物イオン濃度の経年変化 (Pattern C_{lim-1})

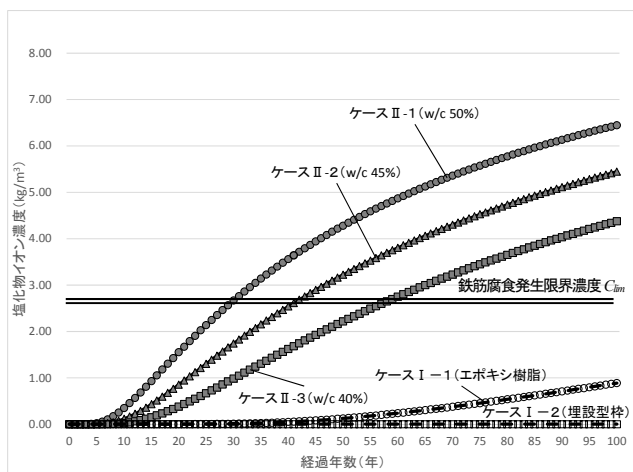


図-16 塩化物イオン濃度の経年変化 (Pattern C_{lim-2})

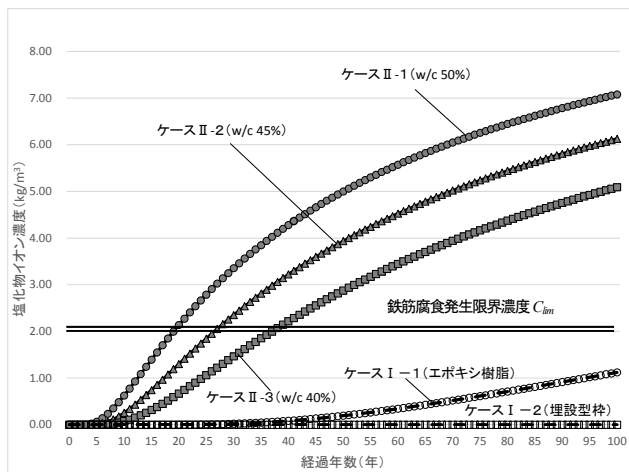


図-19 塩化物イオン濃度の経年変化 (Pattern $D_{\sigma-1}$)

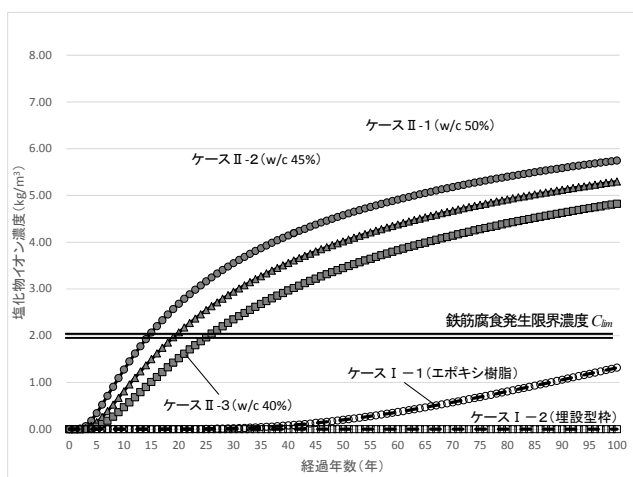


図-17 塩化物イオン濃度の経年変化 (Pattern $C_{\sigma-1}$)

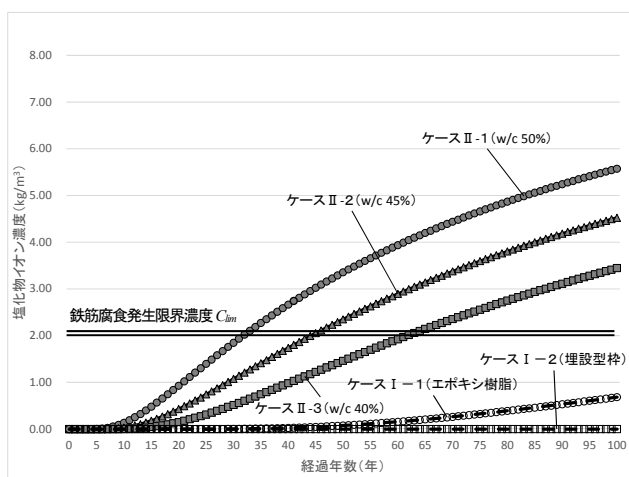


図-20 塩化物イオン濃度の経年変化 (Pattern $D_{\sigma-2}$)

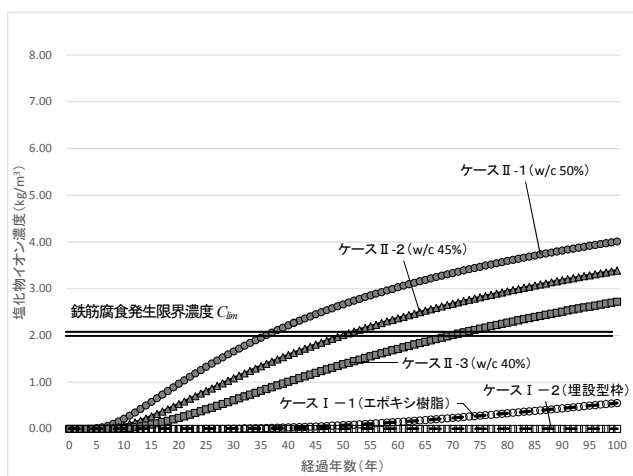


図-18 塩化物イオン濃度の経年変化 (Pattern $C_{\sigma-2}$)

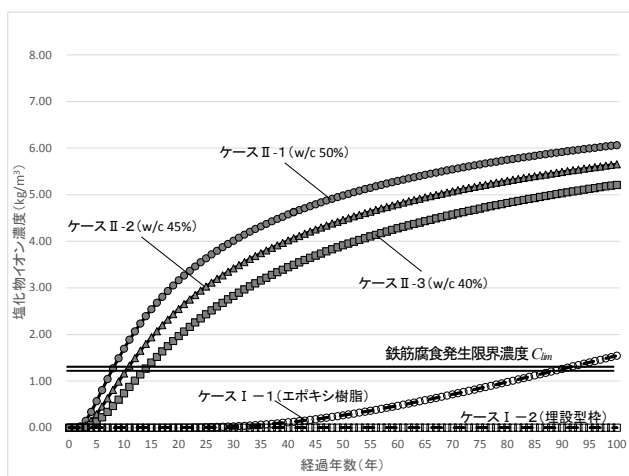


図-21 塩化物イオン濃度の経年変化 (Pattern All-1)

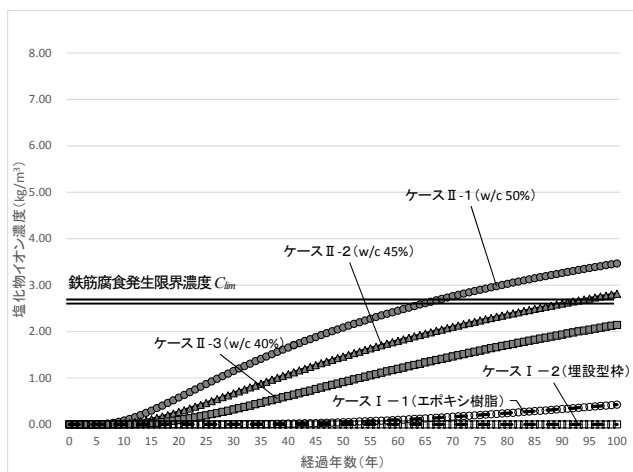


図-22 塩化物イオン濃度の経年変化 (Pattern All-2)

(2) LCC 試算結果

図-23 は、 C_{lim} 、 C_0 、 D_d の検討条件を Pattern 0 (C_{lim} : 2.03 kg/m³, C_0 : 梁 13.37 kg/m³, 床版 4.86 kg/m³, D_d : (式3) 値 cm²/y) とした場合の LCC 算定期間 50 年, 75 年および 100 年における試算結果である。なお, LCC 試算結果の各年推移は付録 1 に示す。図-23 は, ケース II-1 の初期建設費用 (136,981 千円=上部工 38,749 千円+下部工 98,232 千円) を 1 とし, それに対する比で表している。初期建設費用に関し, ケース II-2~ケース II-4 の費用は計算したところ, 図-24 に示すように, それぞれ 1.00, 1.01, 1.02 および 1.26 となり, 建設当初は, 維持管理レベル II であるケース II-1~ケース II-3 の方が, 維持管理レベル I であるケース I-1 およびケース I-2 より費用が安く抑えられている。

しかし, LCC 算定期間 50 年で考えた場合, 図-23 に示すように, ケース I-1 およびケース I-2 の LCC の方がケース II-1~ケース II-3 より逆に安くなるのがわかる。この傾向は LCC 算定期間が長くなればなるほど顕著にあらわれ, LCC 算定期間 100 年とした場合, ケース II-1~ケース II-4 の LCC は, それぞれ 3.24, 2.12, 2.13, 1.02, 1.26, 1.93 となるのがわかる。ケース II-1 においては, 維持管理費用が初期建設費用の倍以上かかり, ケース I-1 およびケース I-2 に比べ, 大きく増加している。

また, 維持管理レベル II の部材ケース同士を比較したところ, ケース II-3 が最も安くなるのがわかり, 水セメント比が低いほど LCC は安くなるのがわかる。また, ケース II-4 の表面被覆に関しては, 15 年毎に対策を実施する必要があるため, 補修費用が定期的に必要となり, 高い結果となった。

さらに, 維持管理レベル I の部材ケース同士を比較したところ, いずれの LCC 算定期間においても, ケース I-2 よりもケース I-1 のエポキシ樹脂塗装鉄筋が安い結果となった。

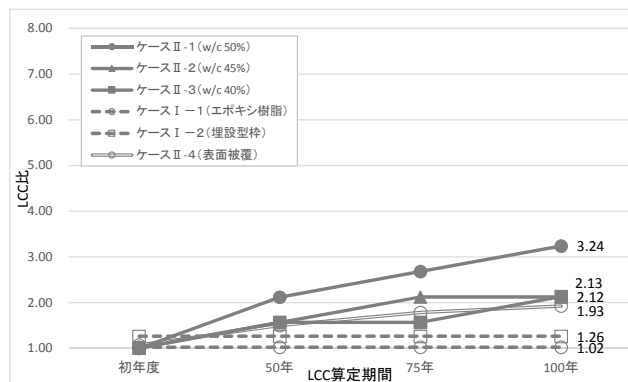


図-23 LCC 試算結果 (Pattern 0)

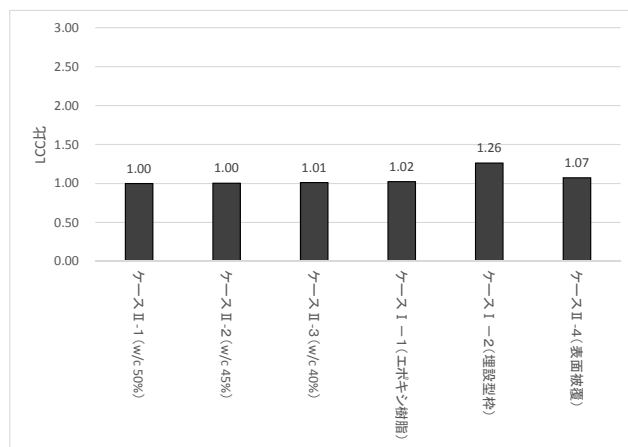


図-24 初期建設費用の試算結果

(3) 鉄筋腐食発生限界濃度 C_{lim} の LCC への影響

3つのパラメータのうち、 C_{lim} を 2.03 kg/m^3 から 1.27 kg/m^3 または 2.79 kg/m^3 に変化させ、 C_{lim} の LCC への影響を評価した。

図-25 は、 C_{lim} 、 C_0 、 D_d の検討条件を Pattern C_{lim-1} (C_{lim} : 1.27 kg/m^3 、 C_0 : 梁 13.37 kg/m^3 、床版 4.86 kg/m^3 、 D_d : (式3) 値 cm^2/y) とした場合の LCC の試算結果である。まず、図-25 内の各ケースを比較してみると、図-23 と同様に、LCC 算定期間 50 年、75 年および 100 年のいずれにおいても、ケース I-1 およびケース I-2 がケース II-1~ケース II-3 よりも安くなっていることがわかる。

次に、 C_{lim} を変化させたことに伴う LCC の変化率についてみる。表-17 は、Pattern C_{lim-1} の LCC を Pattern 0 の LCC で除算した値である。ケース II-1~ケース II-3 において、変化が生じていた。一方、ケース I-1 およびケース I-2 については、 C_{lim} を変化させても LCC に変化は生じなかった。これらの要因は、 C_{lim} を変化させることによって、維持管理レベル II の部材ケースは補修回数に変動が生じる可能性があるのに対し、維持管理レベル I の部材ケースは補修を実施する必要がないため、変化が生じなかったためである。

図-26 は、 C_{lim} 、 C_0 、 D_d の検討条件を Pattern C_{lim-2} (C_{lim} : 2.79 kg/m^3 、 C_0 : 梁 13.37 kg/m^3 、床版 4.86 kg/m^3 、 D_d : (式3) 値 cm^2/y) とした場合の LCC の試算結果である。図-26 内の各ケースを比較してみると、LCC 算定期間 75 年および 100 年において、ケース I-1 およびケース I-2 がケース II-1~ケース II-3 よりも安くなるという結果はこれまでと同様であり、LCC 算定期間 50 年においては、ケース II-3 はケース I-1 およびケース I-2 より安い結果となった。

Pattern 0 と比較したところ、表-18 に示すとおり、ケース II-1 に関しては、LCC 算定期間 50 年、75 年および 100 年いずれの期間においても 20%程度は安くなる結果となり、ケース II-2 およびケース II-3 についても LCC 算定期間によって安くなる結果となった。

表-17 LCC の変化率 (Pattern $C_{lim-1} \div$ Pattern 0)

	初年度	50年	75年	100年
ケース II-1 (w/c 50%)	1.00	1.00	1.21	1.17
ケース II-2 (w/c 45%)	1.00	1.36	1.26	1.53
ケース II-3 (w/c 40%)	1.00	1.00	1.36	1.00
ケース I-1 (エポキシ樹脂)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース I-2 (埋設型枠)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース II-4 (表面被覆)	1.00	1.00	1.00	1.00

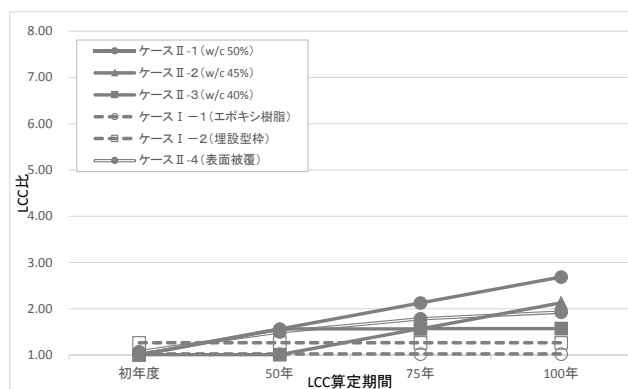


図-26 LCC 試算結果 (Pattern C_{lim-2})

表-18 LCC の変化率 (Pattern $C_{lim-2} \div$ Pattern 0)

	初年度	50年	75年	100年
ケース II-1 (w/c 50%)	1.00	0.74	0.79	0.83
ケース II-2 (w/c 45%)	1.00	1.00	0.74	1.00
ケース II-3 (w/c 40%)	1.00	0.64	1.00	0.74
ケース I-1 (エポキシ樹脂)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース I-2 (埋設型枠)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース II-4 (表面被覆)	1.00	1.00	1.00	1.00

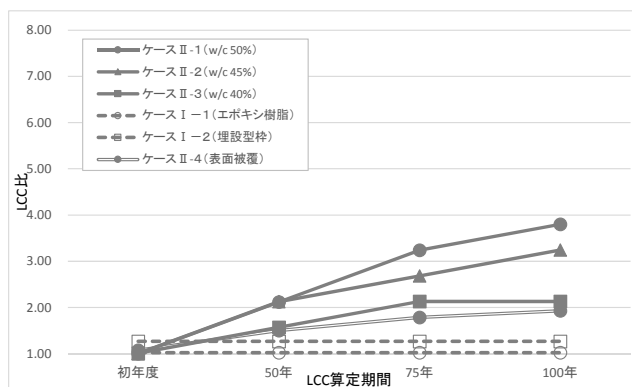


図-25 LCC 試算結果 (Pattern C_{lim-1})

(4) コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 の LCC への影響

3つのパラメータのうち、 C_0 を[梁 13.37 kg/m³, 床版 4.86 kg/m³] から[梁 18.42 kg/m³, 床版 8.94 kg/m³] または[梁 8.32 kg/m³, 床版 0.78 kg/m³]に変化させ、 C_0 の LCC への影響を評価した。

図-27 は、 C_{lim} , C_0 , D_d の検討条件を Pattern C_0-1 (C_{lim} :2.03kg/m³, C_0 : 梁 18.42 kg/m³, 床版 8.94 kg/m³, D_d : (式3) 値 cm²/y) とした場合の LCC の試算結果である。図-27 内の各ケースを比較してみると、ケース I-1 およびケース I-2 はいずれの LCC 算定期間においても、ケース II-1~ケース II-3 よりも安くなる結果はこれまで同様である。Pattern 0 と比較したところ、LCC 算定期間 75 年および 100 年において、表-19 に示すとおり、ケース II-1~ケース II-3 の LCC が 20%以上高い結果となった。

図-28 は、 C_{lim} , C_0 , D_d の検討条件を Pattern C_0-2 (C_{lim} :2.03kg/m³, C_0 : 梁 8.32 kg/m³, 床版 0.78 kg/m³, D_d : (式3) 値 cm²/y) とした場合の LCC の試算結果である。図-28 内の各ケースを比較してみると、LCC 算定期間 75 年および 100 年において、これまで同様、ケース I-1 およびケース I-2 がケース II-1~ケース II-3 よりも安くなる結果となった。Pattern 0 と比較したところ、LCC 算定期間 50 年および 100 年において、表-20 に示すとおり、ケース II-1~ケース II-3 は 20%以上安く抑えられる結果となった。

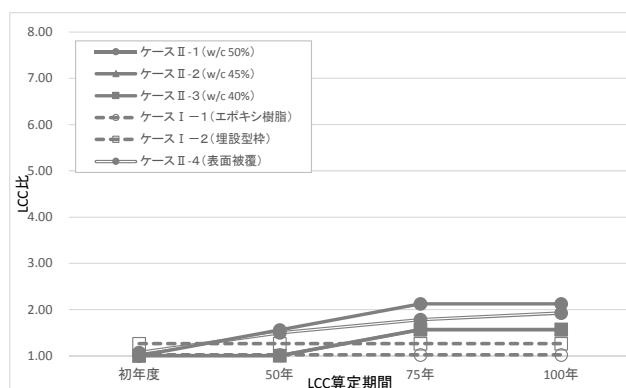


図-28 試算結果 (Pattern C_0-2)

表-20 LCC の変化率 (Pattern C_0-2 ÷ Pattern 0)

	初年度	50年	75年	100年
ケース II-1 (w/c 50%)	1.00	0.74	0.79	0.65
ケース II-2 (w/c 45%)	1.00	0.64	0.74	0.74
ケース II-3 (w/c 40%)	1.00	0.64	1.00	0.74
ケース I-1 (エポキシ樹脂)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース I-2 (埋設型枠)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース II-4 (表面被覆)	1.00	1.00	1.00	1.00

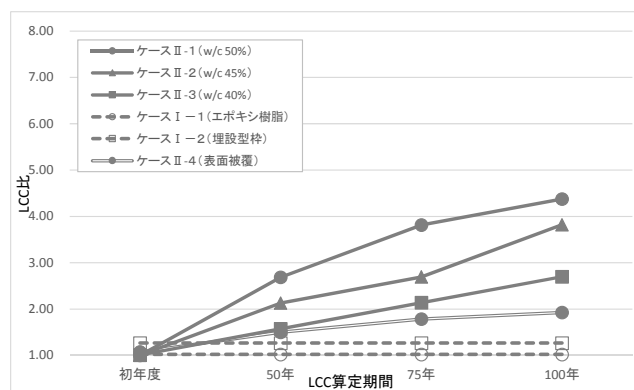


図-27 LCC 試算結果 (Pattern C_0-1)

表-19 LCC の変化率 (Pattern C_0-1 ÷ Pattern 0)

	初年度	50年	75年	100年
ケース II-1 (w/c 50%)	1.00	1.26	1.42	1.35
ケース II-2 (w/c 45%)	1.00	1.36	1.26	1.79
ケース II-3 (w/c 40%)	1.00	1.00	1.36	1.26
ケース I-1 (エポキシ樹脂)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース I-2 (埋設型枠)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース II-4 (表面被覆)	1.00	1.00	1.00	1.00

(5) 塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d の LCC への影響
 3つのパラメータのうち、 D_d を(式3) 値から(式3) 値×125%
 または(式3) 値×75%に変化させ、 D_d の LCC への影響を評価
 した。

図-29 は、 C_{lim} 、 C_0 、 D_d の検討条件を Pattern D_d-1 (C_{lim} : 2.03
 kg/m^3 、 C_0 : 梁 13.37 kg/m^3 、床版 4.86 kg/m^3 、 D_d : (式3) 値×125%
 cm^2/y) とした場合の LCC の試算結果である。Pattern0 と比較し
 たところ、表-21 に示すとおり、LCC 算定期間 100 年において
 ケース II-1~ケース II-2 の LCC が 20%程度高い結果となった。

図-30 は、 C_{lim} 、 C_0 、 D_d の検討条件を Pattern D_d-2 (C_{lim} : 2.03
 kg/m^3 、 C_0 : 梁 13.37 kg/m^3 、床版 4.86 kg/m^3 、 D_d : (式3) 値×75%
 cm^2/y) とした場合の LCC の試算結果である。Pattern0 と比較し
 たところ、表-22 に示すとおり、ケース II-1~ケース II-3 は 10%
 以上安く抑えられる結果となった。

図-29 および図-30 において、LCC 算定期間 75 年および
 100 年で、ケース I-1 およびケース I-2 がケース II-1~ケース
 II-3 よりも安くなる結果はこれまで同様である。

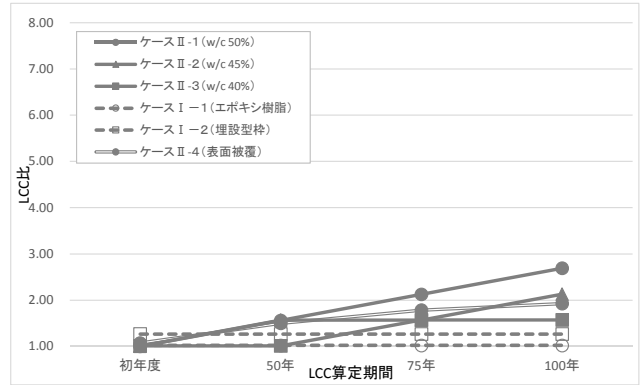


図-30 LCC 試算結果 (Pattern D_d-2)

表-22 LCC の変化率 (Pattern D_d-2 ÷ Pattern 0)

	初年度	50年	75年	100年
ケース II-1 (w/c 50%)	1.00	0.74	0.79	0.83
ケース II-2 (w/c 45%)	1.00	1.00	0.74	1.00
ケース II-3 (w/c 40%)	1.00	0.64	1.00	0.74
ケース I-1 (エポキシ樹脂)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース I-2 (埋設型枠)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース II-4 (表面被覆)	1.00	1.00	1.00	1.00

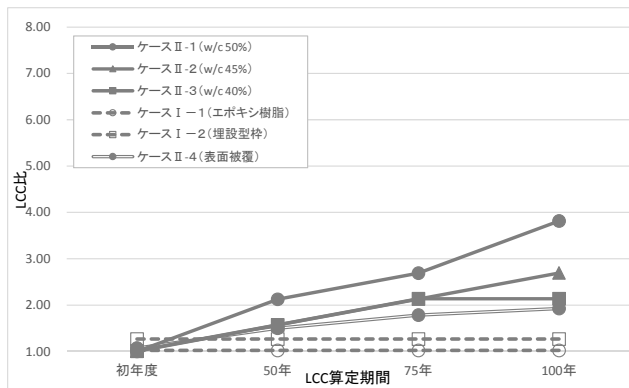


図-29 LCC 試算結果 (Pattern D_d-1)

表-21 LCC の変化率 (Pattern D_d-1 ÷ Pattern 0)

	初年度	50年	75年	100年
ケース II-1 (w/c 50%)	1.00	1.00	1.00	1.17
ケース II-2 (w/c 45%)	1.00	1.00	1.00	1.26
ケース II-3 (w/c 40%)	1.00	1.00	1.36	1.00
ケース I-1 (エポキシ樹脂)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース I-2 (埋設型枠)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケース II-4 (表面被覆)	1.00	1.00	1.00	1.00

(6) C_{lim} , C_0 , D_d のLCCへの影響

3つのパラメータ全てを変化させて塩害が厳しい環境と穏やかな環境を想定した条件下におけるLCCの試算を実施した。

図-31は、 C_{lim} , C_0 , D_d の検討条件をPattern All-1 (C_{lim} : 1.27 kg/m³, C_0 : 梁 18.42 kg/m³, 床版 8.94 kg/m³, D_d : (式3) 値×125% cm²/y) とし、厳しい塩害環境条件とした場合のLCCを試算した結果である。LCC算定期間100年において、ケースII-1は初期費用の7倍以上となり、ケースI-1およびケースI-2のLCCと比較し非常に高い結果となった。同様に、ケースII-2およびケースII-3も高い結果となった。このことは、維持管理費用のLCCに占める割合がかなり大きいことを示している。

図-32は C_{lim} , C_0 , D_d の検討条件をPattern All-2 (C_{lim} : 2.79 kg/m³, C_0 : 梁 8.32 kg/m³, 床版 0.78 kg/m³, D_d : (式3) 値×75%cm²/y) とし、塩害の穏やかな環境条件とした場合のLCCを試算した結果である。これまでのLCCの試算とは異なり、LCC算定期間50年、75年および100年いずれにおいても、ケースII-3が最も安い結果となった。また、LCC算定期間50年においては、次いでケースII-2、ケースII-1が安い結果となった。Pattern 0と比較したところ、表-24に示すとおり、ケースII-1~ケースII-3のLCCが25%以上安い結果となった。

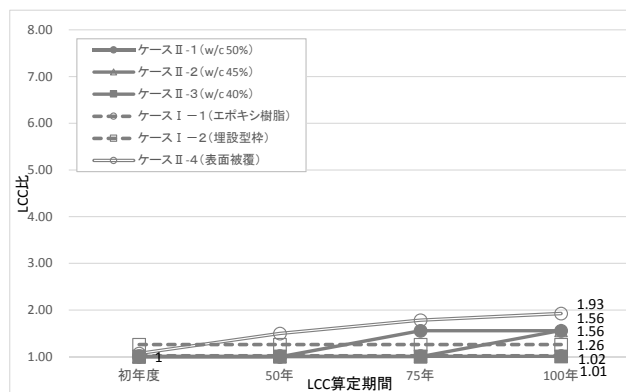


図-32 LCC 試算結果 (Pattern All-2)

表-24 LCC の変化率 (Pattern All-2 ÷ Pattern 0)

	初年度	50年	75年	100年
ケースII-1 (w/c 50%)	1.00	0.47	0.58	0.48
ケースII-2 (w/c 45%)	1.00	0.64	0.47	0.74
ケースII-3 (w/c 40%)	1.00	0.64	0.64	0.47
ケースI-1 (エポキシ樹脂)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケースI-2 (埋設型枠)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケースII-4 (表面被覆)	1.00	1.00	1.00	1.00

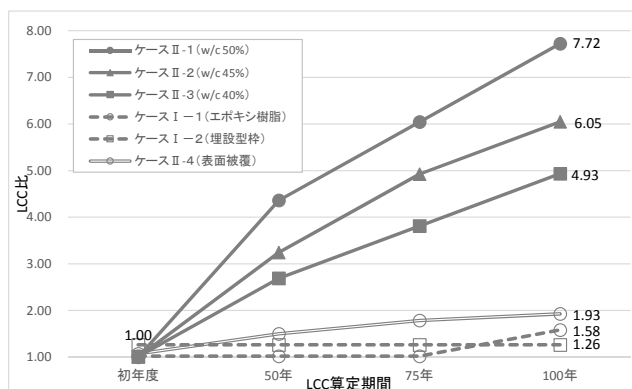


図-31 LCC 試算結果 (Pattern All-1)

表-23 LCC の変化率 (Pattern All-1 ÷ Pattern 0)

	初年度	50年	75年	100年
ケースII-1 (w/c 50%)	1.00	2.06	2.25	2.38
ケースII-2 (w/c 45%)	1.00	2.07	2.32	2.85
ケースII-3 (w/c 40%)	1.00	1.71	2.43	2.31
ケースI-1 (エポキシ樹脂)	1.00	1.00	1.00	1.55
ケースI-2 (埋設型枠)	1.00	1.00	1.00	1.00
ケースII-4 (表面被覆)	1.00	1.00	1.00	1.00

5 まとめ

様々な環境条件で活用できることを念頭に、3つのパラメータ (C_0 , D_d , C_{lim}) を設定した上で、下部工の初期建設費用も含めた LCC を試算した。

その結果、環境条件によっては、維持管理費用の LCC に占める割合がかなり大きい場合があることがわかった。

また、ケース I-1 であるエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたケースが LCC 最小となる場合が多いが、塩害が穏やかな環境条件においては普通鉄筋を用いたケースでもコンクリートの水セメント比を低くすれば LCC が最小となる場合もあることがわかった。

したがって、施設の重要性が高い、または維持管理によって施設が使用できなくなる可能性をできるだけ排除したいといった場合には、エポキシ樹脂塗装鉄筋等の耐久性を向上させる方策を用いることが良い場合が多いと思われるが、一方で周辺に代替の港湾施設がある、または設計供用期間後は使用頻度が大きく低下する可能性が高い場合などは、初期建設費用が安い普通鉄筋を選択する方が良い場合がある。

栈橋を設置する環境条件を可能な限り踏まえて LCC を算出し、施設の特性を考慮した上で維持管理手法を適切に選択することが必要である。

なお、エポキシ樹脂塗装鉄筋は運搬中あるいは施工中に損傷し、打設前に補修する必要がある場合があり、また、水セメント比40%や45%のコンクリートは施工段階で各作業のワーカビリティが低下することが懸念される。本試算結果は LCC の一試算結果を示しているものであり、エポキシ樹脂塗装鉄筋等を推奨しているものではないことに留意願いたい。

6 あとがき

2章で述べたように、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査を利用した LCC の算出が、構造計画段階あるいは与条件として実施可能となるような手法を今後構築することが必要であると考えられる。そのためには、栈橋上部工の詳細設計の違いによる LCC への影響等を把握・整理していく必要があり、今後の課題である。

また、今回、特に言及しなかったが、(式2)においては3つのパラメータ(鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} 、コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 および塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d) 以外に、かぶりもパラメータの1つとなっている。すなわち、かぶりも塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に影響する因子の1つである。したがって、設計時にかぶりの厚さを適切に設定すると共に、施工時においても設計どおりにかぶりの厚さが確保されているかを、非破壊検査等を通じて確認することが構造物の劣化を生じさせないためにも重要である。施工

不良に起因する構造物の劣化等を生じさせないため、適切に施工することも重要である。

(2015年2月16日受付)

謝辞

本研究にあたって、国土技術政策総合研究所港湾研究部や港湾空港技術研究所 LCM 支援センターの方々をはじめ、多くの方々にご助言を頂いた。末尾ながらここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省:維持管理等に関する現状把握, 第1回「港湾施設の維持管理等に関する検討会」, 資料2-1, 2012, pp11.
- 2) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 栈橋コンクリート上部工劣化実態概略調査報告, 港湾技術研究所報告, No.617, 1988, pp.1-29.
- 3) 小牟禮建一, 濱田秀則, 横田弘, 山路徹: RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所資料, Vol.41, No.4, 2002, pp.7-15.
- 4) 「港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007年版)」の部分改訂について, http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk5_000017.html.
- 5) 社団法人土木学会:コンクリート標準示方書[設計編] 2012 制定, 2013.
- 6) 岩波光保, 加藤絵万, 川端雄一郎: 維持管理を考慮した栈橋の設計手法の提案, 港湾空港技術研究所資料, No.1268, 2013.
- 7) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, 財団法人沿岸技術研究センター, 2007.
- 8) 高橋宏直: 維持補修計画での社会的割引率の設定と補修工事の最適実施時期に関する研究, 建設マネジメント研究論文集, Vol.14, 2007, pp.23-33.
- 9) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[栈橋上部工編], 土木学会コンクリートライブラリーNo.116, 2005, pp.92-115.
- 10) 野上周嗣, 加藤絵万, 川端雄一郎, 佐藤徹: 栈橋上部工の維持管理シナリオに関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1296, 2014.
- 11) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2007, pp.481-491.
- 12) 社団法人土木学会: エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針 [改訂版], 土木学会コンクリートライブラリーNo.112, 2003, pp.10-16.

- 13) 山路徹：海洋に位置するコンクリート構造物の耐久性能照査手法に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1232，2011，pp.114-117.
- 14) 社団法人土木学会：2007年版コンクリート標準示方書改訂資料 2008.
- 15) 財団法人沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集(平成19年改訂版)，2007，pp.2-1-2-103.
- 16) 港湾の施設の技術上の基準を定める省令
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H19/H19F16001000015.html>.
- 17) 加藤絵万，岩波光保，横田弘：栈橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究，港湾空港技術研究所資料，Vol.48，No.2，2009.
- 18) 秋山充良，伊藤佑香，鈴木基行：塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究，土木学会論文集E，Vol.62，No.2，2006，pp.385-401.
- 19) 社団法人土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料 基本原則編・設計編・施工編，2013.

付録1 ライフサイクルコスト試算結果の各年の推移

ケースII-1～ケースII-4のLCC試算結果を1年ごとにプロットした。

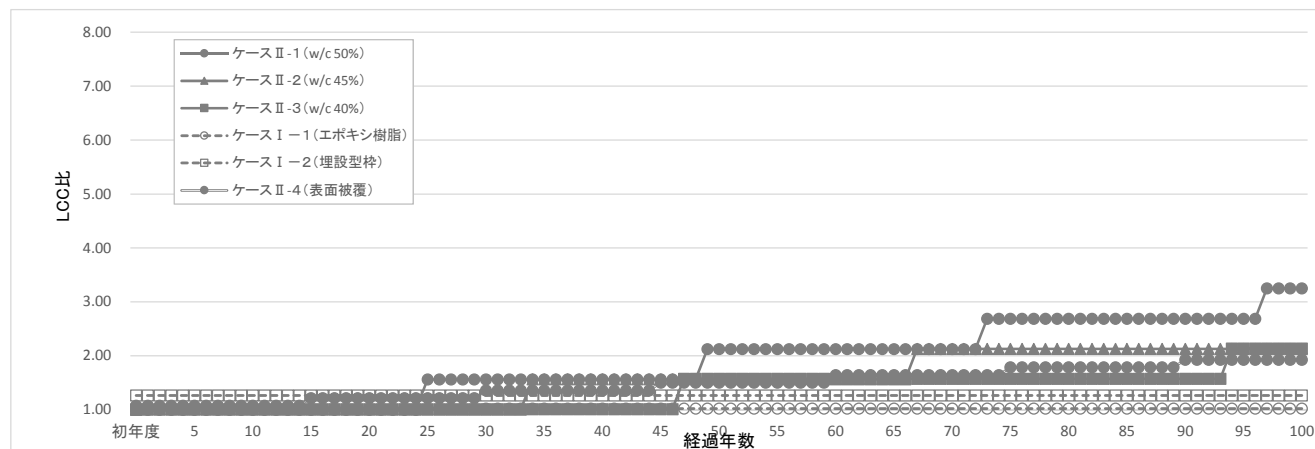


図-A-1 試算結果 (Pattern 0)

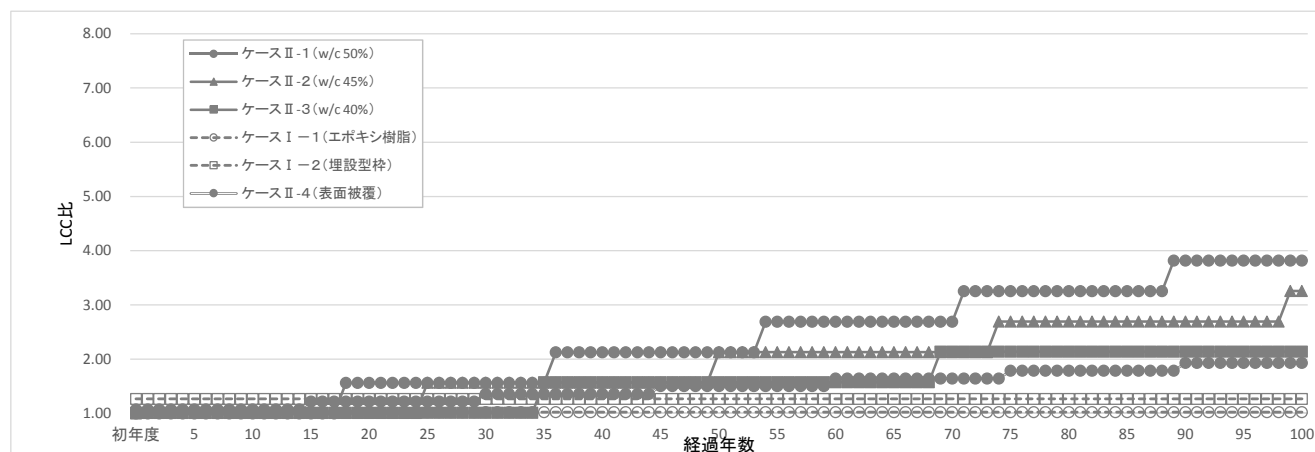


図-A-2 試算結果 (Pattern C_{lim-1})

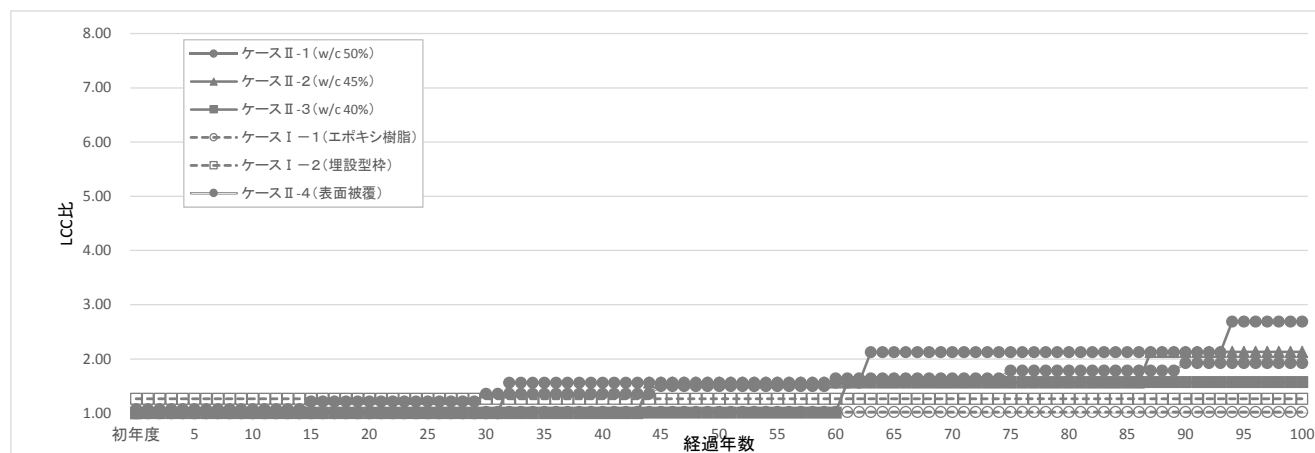


図-A-3 試算結果 (Pattern C_{lim-2})

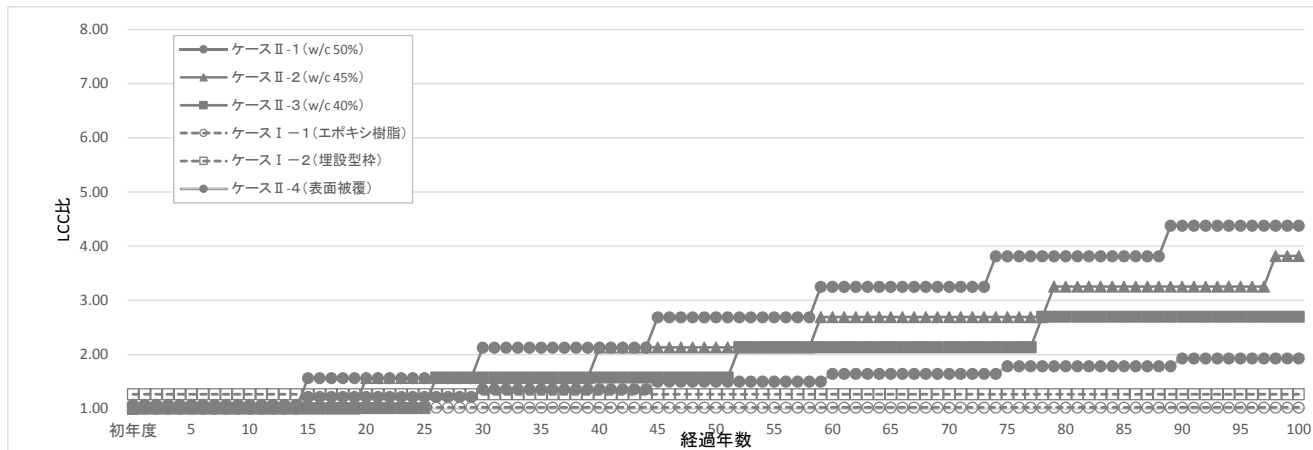


図-A-4 試算結果 (Pattern C1-1)

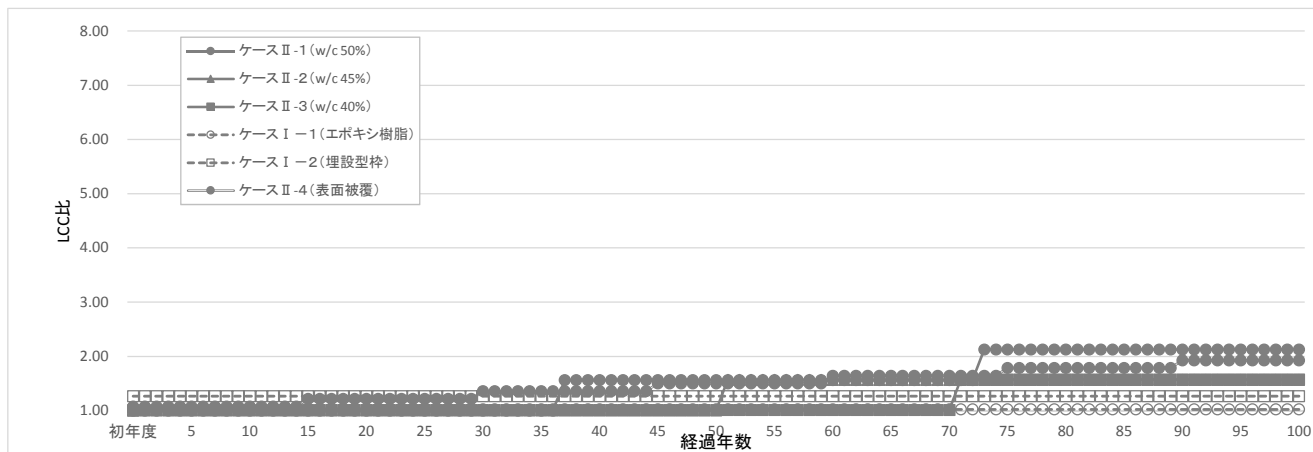


図-A-5 試算結果 (Pattern C1-2)

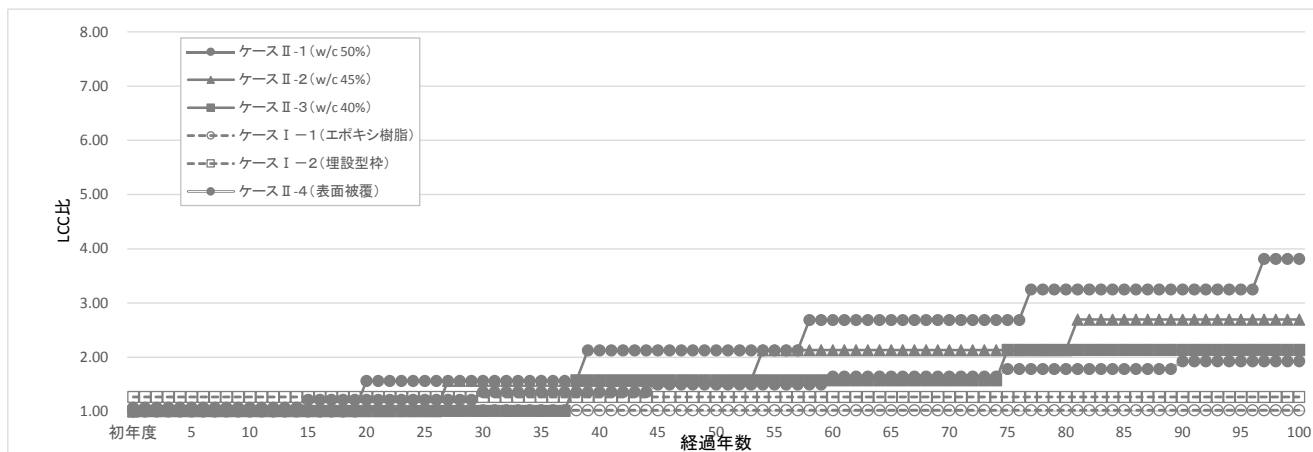


図-A-6 試算結果 (Pattern D1-1)

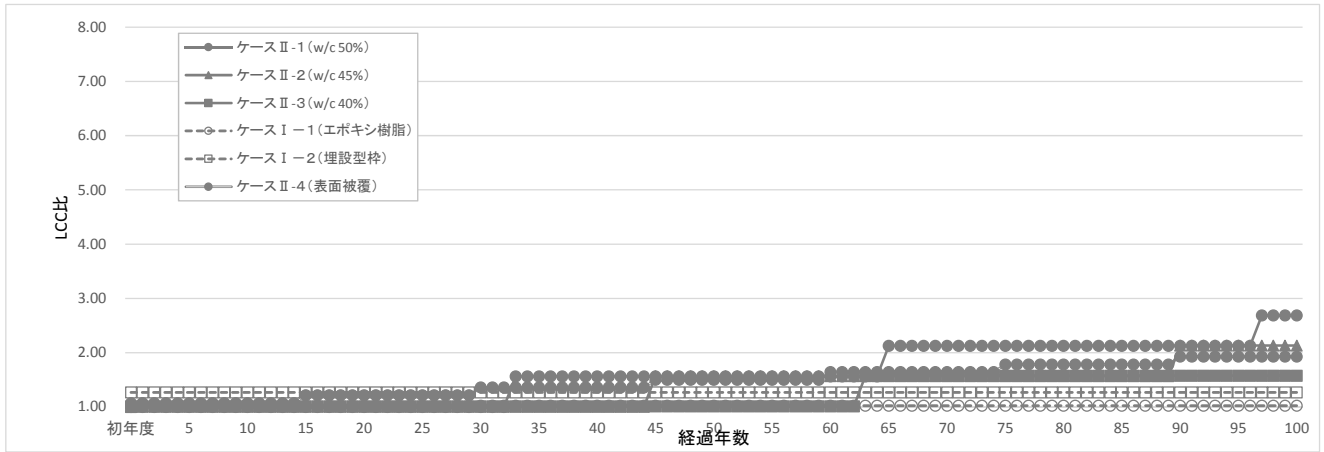


図-A-7 試算結果 (Pattern D1-2)

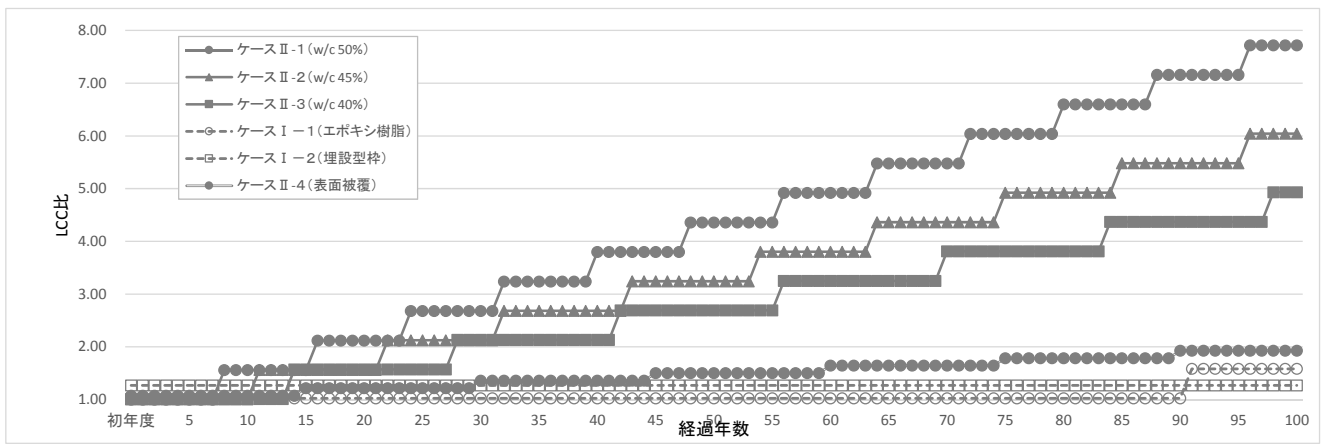


図-A-8 試算結果 (Pattern All-1)

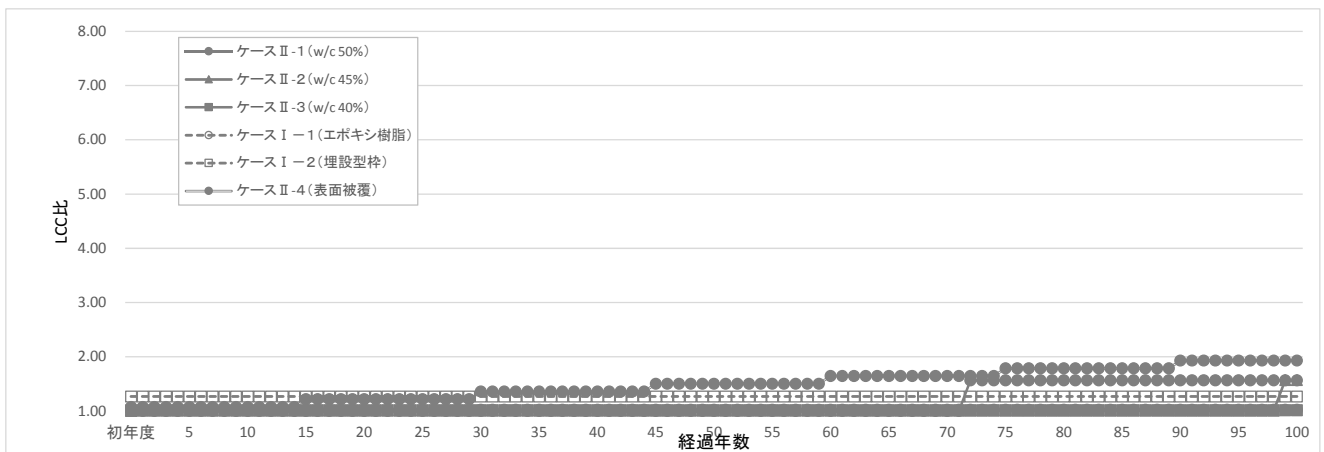


図-A-9 試算結果 (Pattern All-2)

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 837 March 2015

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018