

ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する

共同研究報告書（Ⅱ）

ーコンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討ー

平成12年12月

建設省土木研究所
材料施工部コンクリート研究室
構造橋梁部橋梁研究室
(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

Copyright © 2000 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ミニмумメンテナンスPC橋の開発に関する 共同研究報告書（Ⅱ）

ーコンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討ー

建設省土木研究所

材料施工部コンクリート研究室

構造橋梁部橋梁研究室

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

要 旨

本共同研究では、ミニмумメンテナンスPC橋の検討の一環として、塩害対策のアップグレードについてその必要性も含めた検討を行っている。近年、道路橋示方書が設計年数100年とする方向で検討されており、この場合に従来の道路橋の塩害対策指針(案)では対応できない範囲も生じる可能性がある。同塩害対策指針(案)の主たる塩害対策の一つは、海岸線からの距離に応じたかぶり厚の増加により、鋼材周辺に塩分を近づけないことであるが、設計年数を100年としたときの必要かぶりは従来よりもさらに大きくなる方向にある。ここでは、既存の飛来塩分量全国調査の結果に基づき、必要かぶりの試算を試みるとともに、その結果について実構造物の損傷事例に基づく検証を行った。また、その結果に基づき100年対応の塩害対策としての今後のかぶり規定のイメージを取りまとめた。

キーワード：塩害対策、かぶり、飛来塩分量、鉄筋腐食

ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究
担当者名簿

建設省土木研究所

材料施工部コンクリート研究室	室 長	河 野 広 隆
	主任研究員	渡 辺 博 志*2
	研 究 員	田 中 良 樹*2
構造橋梁部橋梁研究室		木 村 哲 士*3
	室 長	西 川 和 廣
	研 究 員	内 田 賢 一*1
	研 究 員	廣 松 新 *1
		伊 藤 公 彦*3
		続 石 孝 之*3

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究委員会	委員長	中 條 友 義
	委 員	石 井 和 夫*1
	委 員	呉 承 寧*2
	委 員	小 西 哲 司*1
	委 員	品 川 清 和*2
	委 員	高 野 茂 晴*1
	委 員	徳 光 卓 *2
	委 員	中 田 順 憲*1
	委 員	野 村 貞 広 (1999年6月まで)
	委 員	濱 田 譲 *2
	委 員	藤 田 学 *1
	委 員	渡 辺 浩 良*1

*1: LCCワーキンググループ

*2: 塩害対策ワーキンググループ

*3: 交流研究員として参加

(平成12年12月現在)

目 次

1. まえがき	1
2. かぶり規定の変遷と根拠	2
2.1 道路橋示方書のかぶり規定	2
2.2 コンクリート標準示方書のかぶり規定	3
2.3 標準示方書における海洋コンクリート構造物のかぶり規定	4
2.4 道路橋の塩害対策指針(案)のかぶり規定	4
2.5 鋼材の腐食防止としての最小かぶりの位置付け	6
3. 塩化物イオンの浸入に伴う鋼材腐食の概要	8
3.1 外部からの塩化物の浸入	8
3.2 新標準示方書における鋼材腐食に関する照査	8
3.3 ここでの検討課題	10
4. 表面塩化物イオン濃度 C_o	11
4.1 飛来塩分量 C_{air}	11
4.2 飛来塩分量と C_o の関係	16
5. みかけの拡散係数 D_c	17
6. 必要かぶりの試算	18
6.1 試算条件	18
6.2 試算結果	18
6.3 実構造物の塩害実態との比較	20
6.4 設計年数 100 年の試算結果	23
7. 飛来塩分量に基づくかぶり規定のイメージ	24
7.1 塩害対策の検討を必要とする地域	24
7.2 対策区分	24
7.3 鋼材のかぶり規定のイメージ	25
7.4 鋼材のかぶりの解説のイメージ	25
7.5 かぶり規定のイメージの補足	27
7.6 実測した飛来塩分量により設計する場合の留意点	27
8. 必要かぶりの安全率の考え方	29
8.1 飛来塩分量のばらつき	29
8.2 $C_o - C_{air}$ のばらつき	30
8.3 C_{corr} と C_{init} の取り方	30
8.4 必要かぶりの安全率	30
9. まとめ	31
10. あとがき	32
参考文献	33
参考資料 C_o , D_c の算出	35

1. まえがき

今日、社会資本整備の充実とともに、土木構造物のストックは膨大なものとなっている。道路橋の場合、その数は橋長 15m以上の橋だけでも既に約 13 万橋(うちコンクリート道路橋約 7.5 万橋)に及んでいる。これらの維持管理の負担を軽減するためには、既設構造物の適切な維持管理と今後の新設構造物の長寿命化に関する様々な技術開発や施策が必要である。しかし、これまでの設計では、初期建設費を最小にすることに主眼が置かれているため、長寿命化のための技術の導入が容易でなく、これに関する技術開発のインセンティブが得られ難い状況にある。

現在、道路橋示方書の次期改訂作業では、維持管理、耐久性を重視して、設計年数(100 年とする方向で検討中)を明確に示すとともに、この期間内でのライフサイクルコスト(以下、LCC)を最小にする LCC 最小化の概念を導入する方向で検討が行われている¹⁾。LCCとは、ある設計年数の間に要する初期建設費(I)、維持管理費(M)及び更新費(R)を合算したものである。LCC概念の導入は、新設橋に携わる関係者が維持管理費や更新費の意識を積極的に持つきっかけを与えること、LCCが長寿命化に関わる新技術の耐久性向上の効果を具体的に示す指標になることから、耐久性があり維持管理負担の小さい橋づくり、すなわちミニマムメンテナンス橋¹²⁾の促進に大きな効果があると考えられる。

コンクリート橋の主な劣化要因は、塩害、アルカリ骨材反応など、さまざまであるが、コンクリート橋のミニマムメンテナンス橋を検討する上で塩害の問題を避けるわけにはいかない。これは、現実には塩害による重大な劣化が見られる橋が少なからず存在し、今後も最も重大な劣化要因であり続けると予想できるためである。沿岸部の PC 橋がわずか 20~30 年程度で架け替えられた事例も見られており、しかもその維持管理に要した費用は初期建設費を上回る事例も見られている¹³⁾。また塩害は、損傷劣化の早期発見が容易でなく、かつ外部にひび割れが生じてからでは既に鋼材の腐食が著しく、補修を行ってもその効果が十分に発揮できない場合もある。

これらを踏まえて、本共同研究では、ミニマムメンテナンス PC 橋の検討の一環として、塩害対策のアップグレードについてその必要性も含めた検討を実施することとした。「道路橋の塩害対策指針(案)」(以下、塩害対策指針(案))が 1984 年に通達されて以降、沿岸部の新設橋の耐久性は改善されていると考えられるが、設計年数を 100 年とした場合に塩害対策指針(案)では対応できない可能性もあると考えられる。塩害対策指針(案)の主たる塩害対策の一つは、海岸線からの距離に応じたかぶり厚の増加により、鋼材周辺に塩分を近づけないことである。しかし、コンクリート中の塩分の浸透は特段の対策がなければ時間とともに進展することから、設計年数 100 年としたときの必要かぶりは従来よりもさらに大きくなる方向にある。ここでは、既存の全国の飛来塩分量データに基づき、最近編纂された平成 11 年版性能照査型コンクリート標準示方書施工編(以下、新標準示方書)も参考にしながら、必要かぶりの試算を試みるとともに、その結果について実構造物の損傷事例に基づく検証を行った。また、その結果に基づき 100 年対応の塩害対策としての今後のかぶり規定のイメージを取りまとめた。

2. かぶり規定の変遷と根拠

2. かぶり規定の変遷と根拠

ここでは、道路橋上部構造のかぶり規定に主眼をおく。

2.1 道路橋示方書のかぶり規定

表-2.1, 2.2 に現行道路橋示方書のかぶり規定と昭和 49 年版の土木学会コンクリート標準示方書(以下, 土木学会の鉄筋コンクリート標準示方書, コンクリート標準示方書を標準示方書という, また 49 年版の場合, 49 標準示方書という)の最小かぶりを示す。道路橋示方書の現行かぶり規定は, 昭和 53 年に通達された同コンクリート橋編(以下, 53 年版の場合, 53 道路橋示方書という)作成のときに当時の 49 標準示方書に基づいて決められたものが基本的に踏襲されている。53 道路橋示方書では橋梁という構造物の重要度から判断して表-2.2 の③の値が採用された²⁾。

表-2.1 道路橋示方書の最小かぶり(cm)

部材の種類	床版, 地覆, 高欄, 支間 10m 以下の 床版橋	け た	
		工場で製作され るプレキャスト 部材	左記以外のけた および支間が 10m をこえる床版橋
最小かぶり	3	2.5	3.5

表-2.2 49 標準示方書の最小かぶり(cm)

状 態	スラブ	はり	柱
① 風雨にさらされない場合	1.0	1.5	2.0
② 寸法が大きく重要な構造物, または, 風雨にさらされるもの	2.0	2.5	3.0
③ ばい煙, 酸, 油, 塩類等の有害な化学 作用を受けるおそれのある部分を有 効な保護層で保護しない場合	3.0	3.5	4.0

注) 丸付き番号は本文の説明の便宜上, 付加した。

昭和 53 年以前は, かぶりは標準示方書に基づいていたと考えられる。昭和 39 年に鉄筋コンクリート道路橋設計示方書が編纂された後も, この中にはまだかぶり規定が見られず, 当時の標準示方書に従う形となっていた。

なお, 昭和 43 年に通達されたプレストレストコンクリート道路橋示方書(PC 道路橋示方書)では, プレテンション桁の PC 鋼材のかぶりとして表-2.3 に示す値以上もしくは PC 鋼材直径の 2.5 倍以上とし, 一般の場合には 2.5cm 以上と記されていた。53 道路橋示方書では, 「プレキャスト PC 部材は, 他の部材に比較して, 工場で製作されるため, 品質管理がよく, コンクリートの品質も良好であることなどから, PC 鋼材の

かぶりの最小値を他の部材より小さい値とした」と記述されている。また、文献 2.1)では、道路橋示方書でプレキャスト部材のPC鋼材の最小かぶりは2.5cmとするとあるが、これを鉄筋にも適用してよい、と記述されている。PC道路橋示方書の根拠によれば、ここでいう鉄筋とは、PC部材における鉄筋をいうものと思われる。

表-2.3 PC道路橋示方書の最小かぶり

一 般 の 場 合	2.5cm
ばい煙、酸、油、塩類等の有害な化学作用を受けるおそれのある部分を有効な保護層で保護しない場合、または土と接する場合	3.5cm

2.2 コンクリート標準示方書のかぶり規定

ここでは、道路橋示方書の根拠となっている昭和53年以前の標準示方書のかぶり規定について述べる。

標準示方書のかぶり規定の主な変遷は文献2.2)にまとめられている。多少の表現の変化は見られるものの、前掲表-2.2に示した最小かぶりの値は昭和6年に標準示方書が制定されて以降、昭和61年の改訂まで変更されていない。

かぶりコンクリートは、昭和6年の最初の標準示方書(06標準示方書)制定のときから既に、表-2.2の①の値に対して鉄筋の付着確保、風雨及び湿気に対する鉄筋の防錆、火災に対する鉄筋の保護などのために必要であると記されている²³⁾。十分な付着強度の確保のための必要かぶりの計算は困難であるが、風雨、湿気、火災等に対して十分安全なかぶり厚をもたせれば、付着強度に対しても十分安全だとされている。また、火災に対しては、特に耐火構造とする場合のかぶりが別途記述されていたことから、比較的軽微な火災を想定していたであろうと考えられる。鉄筋の防錆に対しては、どう考慮したかの記述は見られない。文献2.4)では、06標準示方書のかぶり規定は各国の標準示方書その他を参考として定めたもので、規定されたかぶりは標準示方書にしたがって設計施工する鉄筋コンクリートに対して経験上十分安全なものである、と記されている。

06標準示方書制定当時あるいはそれ以前のかぶりについては、以下のような状況が見られた。

- 1) 大正3年の鉄筋混凝土橋梁設計心得(鉄道省)によれば、砂利の大きさより大きくすること、厚さ4インチ(10cm)以下の版では1/2インチ(1.3cm)以上、厚さ9インチ(23cm)以下の版では3/4インチ(1.9cm)以上、桁では1インチ(2.5cm)以上、柱または大きな桁では1.5インチ(3.8cm)以上と記されていた²⁵⁾。
- 2) 大正4～5年頃、土木学会誌においてコンクリート中における鉄筋の錆について討議されており、それらの文献の一部にかぶりの記述が見られる。文献2.6)では、種々の配合・暴露方法による試験の結果より、1:2:4(セメント:砂:砂利)以上のコンクリートの場合、完全な施工で、ひび割れがなければ1インチ(2.5cm)内外で十分であると述べられていた。ただし、これはかぶりの最小限度であって、工事設計上特に重要な箇所、施工困難な箇所、擦り減りあるいは衝動を受ける恐れのある箇所、常に乾湿の繰り返しのある箇所、酸類その他危害物と接触すべき箇所、または海中工事等の場合は、さらにその厚さを2倍あるいは3倍に増加するとともに、配合及び施工に注意し錯誤のないようにすることが最も重要であるとされていた。その後、大正10年の文献2.7)の末尾に、錆の発生を防止するには、調合密度をよくすること、かぶりの厚さを十分に

すること、亀裂などの入らないだけの設計にしなければならないと記されていた。なお、かぶり厚に関するドイツの現行(当時)規定では、床版では 1cm、腹桁の鉄筋及び柱に対しては 1.5cm、露天構造物では 2cm とされていることが付け加えられていた。

2.3 標準示方書における海洋コンクリート構造物のかぶり規定

06 標準示方書では、海水の作用を受ける場合の記述では、最小かぶりを 7.5cm、特に隅角部は 10cm とすることとされていたが、表-2.2 の③における塩分等の影響との仕分けが必ずしも明確でない。とにかく、煤煙、乾湿、塩分等の影響を受けるおそれがある部材については①の値に 2cm 加えた値とすることとされていたが、この 2cm という値の根拠は定かでない。その後、昭和 42 年の標準示方書改訂で、海水の作用を受ける場合の最小かぶりの値が表-2.4 に示すとおり変更された。その後、49 標準示方書では、海洋コンクリートの章が設けられ、その中にこれらの記述が移された。これらの解説によれば、海水に直接接する部分、潮の干満作用を受ける部分、厳しいすりへり作用は受けなが海水で常時洗われる部分、激しい潮風作用を受ける部分に対しては 7cm 程度としたものが大部分であり、施工後のコンクリートの状態は、ほぼ満足すべき状態であることが確かめられている、と記されていた。また、同表中の(b)に相当する部分としては、ケーソンや L 型ブロックなどの周壁の内側及び隔壁、あるいは裏込め材と接する面等であるとされている。調査結果によれば、この部分のかぶりを 5cm 程度としたものが大部分であり、施工管理が十分であれば構造物の供用後においてコンクリートのこの程度のかぶりで構造物に損傷を起こした例はない、と記されていた。なお、昭和 49 年の標準示方書の海洋コンクリートのかぶり規定の解説に、製造管理の良好な工場で入念に施工されたコンクリート工場製品については、最小かぶりの値を若干下回る値を用いてよいが、その限度については、部材の種類などによって異なるので責任技術者の判断により定めることにした、という記述が見られた。

表-2.4 標準示方書の海洋コンクリート構造物の最小かぶり(cm)

(a) 海水に直接接する部分、海水で洗われる部分、および激しい潮風を受ける部分	7
(b) 上記以外の部分	5

2.4 道路橋の塩害対策指針(案)のかぶり規定

昭和 59 年に塩害対策指針(案)が通達されるまでは、コンクリート道路橋の主桁のかぶりは沿岸部であっても標準示方書または道路橋示方書に従って 3.5cm とされていたと考えられる。昭和 50 年代後半に沖縄や日本海沿岸部などのコンクリート道路橋に塩害劣化が見られるようになったのを契機として、全国規模の実態調査が行われた。塩害対策指針(案)では、この調査結果に基づき、塩害対策を要する地域区分、対策区分が示され、それに応じた最小かぶりが示された。表-2.5、図-2.1 に塩害対策を必要とする地域、表-2.6 に対策区分、表-2.7 に塩害対策指針(案)における最小かぶりを示す。塩害対策指針(案)における基本的な対策は、かぶりの増加、ひび割れ発生の抑制、水セメント比の制限、鋼製スペーサを用いないなどの施工上の配慮を行うことなどである。それぞれの対策は塩害対策として重要であるが、特に塩害対策を必要とする地域を海岸線からの距離で明確にしたことと、それに応じたかぶりを規定したことがこの塩害対策指針(案)の大きな特徴である。同解説では、塩分量とかぶりの関係はまだ不明な点が多いとしながらも、それまでの実験結果や実態調

査結果に基づいて、外部からの塩分による鋼材の腐食を防止するための最小かぶりを設定したと記されている。

表-2.5 塩害対策を必要とする地域

地域区分	地 域
A	沖縄県
B	別表-1に示す地域のうち、海上部および海岸線から300mまでの部分
C	上記以外の地域のうち、海上部および海岸線から200mまでの部分

※別表-1 は省略。図-2.1 の斜線部。

表-2.6 対策区分

地域区分	地 域	海岸線からの距離	対策区分
A	沖縄県	海上部および海岸線から100mまで	I
		上記以外の範囲	II
B	表-2.5別表-1に示す地域	海上部および海岸線から100mまで	I
		100mをこえて200mまで	II
		200mをこえて300mまで	III
C	上記以外の地域	海上部	I
		海岸線をこえて100mまで	II
		100mをこえて200mまで	III

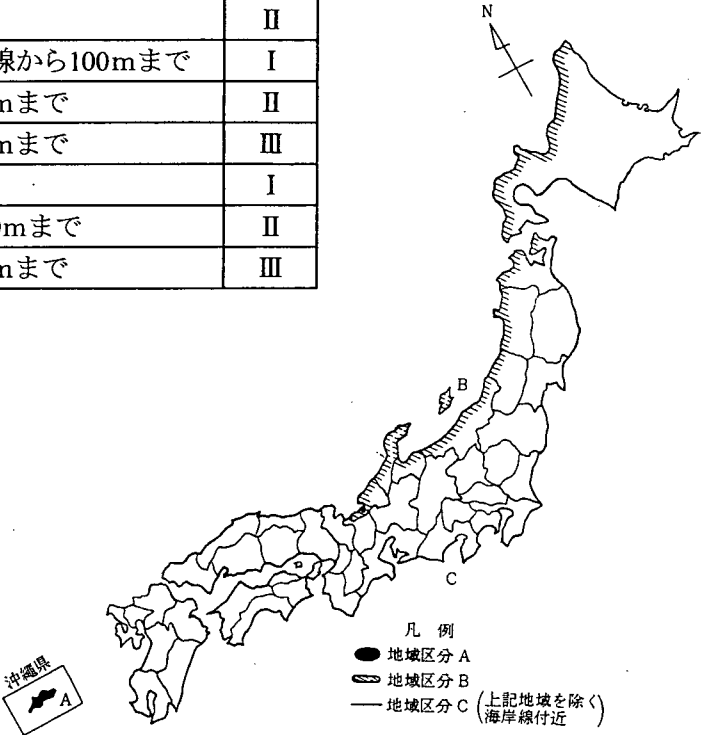


図-2.1 地域区分

表-2.7 塩害対策指針(案)の最小かぶり (c m)

対策区分	上 部 構 造			下 部 構 造	
	床版下面、地覆・高欄	け た		梁	柱
		プレテンション方式によるプレキャストPCげた	左記以外のけた		
I	5.0	5.0	7.0	7.0	7.0
II	4.0	3.5	5.0	5.0	5.0
III	3.0	2.5	3.5	3.5	4.0

2.5 鋼材の腐食防止としての最小かぶりの位置付け

(1) 設計者の裁量

昭和 15 年の標準示方書(以下、15 標準示方書)のかぶりに関する規定は 06 標準示方書とほとんど同じであるが、その解説には以下の記述が見られる。

「かぶりは設計者が自己の経験をもととして、用いる材料、構造物のうける気象作用、コンクリート表面に作用するコンクリートに有害な物質の影響、部材の寸法、構造物の重要さの程度、施工技術の良否、等から判断してこれを定めなければならない。従って、かぶりの標準を示すことは無理であるが設計者の便宜を考慮して、この条(第 107 条かぶりの一般標準を指す)はかぶりの最小限度を示したのである。

それで、かぶりはここに示した値以上で慎重にこれを定めなければならないのである。」

この解説に見られるように、本来の最小かぶりは設計者の裁量によるところが大きいものであったが、近年の道路橋示方書における最小かぶりの規定はかぶりを決定するための唯一のよりどころとなっているものと思われる。このことから、今後の道路橋示方書のかぶり規定としては、15 標準示方書の解説に記されているかぶりに考慮すべき点を包含した最小かぶり規定とするか、あるいは今日の性能規定化の動きと連動してある程度の設計者の裁量を復活させる必要があると考えられる。

なお、文献 2.4)においても、鉄筋の錆どめのために必要なかぶりは、次の a～f 等を考慮して決められるものであるので、一般的には、ただ大体の標準だけしか示すことができない、という旨の記述が見られる。

- a) 構造物の種類
- b) 鉄筋コンクリートが風雨、寒暑、ばい煙、塩分等の有害な作用を受けるか否か
- c) 部材の寸法及びその重要度
- d) 表面仕上げ
- e) 設計の際にコンクリートのひび割れの防止について特に注意を払うか否か
- f) 施工の良否

(2) 施工誤差

文献 2.4)では、十分なかぶりで鉄筋を保護するように設計がしてあっても、施工の際に鉄筋が移動するか、鉄筋があまり一箇所に集まっていてコンクリートが十分に行きわたらないとか、等のために鉄筋がさびた例が少なくないから、鉄筋配置の設計をするときにはこれらのことも十分に考えなければならない、と記されている。

標準示方書では、最小かぶりに加えて、実際には施工誤差、その他を考慮してかぶりをこれよりいくぶん大きくして設計するのが望ましい、とされていたので、最小かぶりには施工誤差は含まれていなかったものと考えられる。道路橋示方書のかぶり規定及びその解説に施工誤差を含むか否かについての記述は見られないが、その元となった標準示方書において、施工誤差が含まれていないこと、施工管理として、かぶりが小さくなる方の誤差を認めていないことから、道路橋示方書の最小かぶりに施工誤差がもともと含まれていなかったものと考えられる。実態としては配筋に施工誤差があるはずであり、山間部などでは最小かぶりの一部がこの施工誤差分に充当していたものと考えられる。

(3) 中性化の影響

中性化が進むとコンクリートのアルカリ性が失われるため、コンクリートの内部の鋼材の腐食環境が厳しい方向に移行する。しかし、従来の道路橋示方書のかぶり規定やその元となった 49 標準示方書あるいはそれ以前の標準示方書では中性化の影響について触れられていない。文献 2.8)では、コンクリートはいずれアルカリ性を失い(すなわち中性化し)、いつかまた腐食が発生することから、かぶり厚はその寿命の長短に関わるものであり、絶対永久に鋼材の腐食を防ぐというものではないのではないか、という旨が記されている。これに対して、文献 2.9)では、大気中の炭酸ガスや普通水中に含まれる微弱な酸類などでは、普通の建築物の寿命の範囲ではほとんど杞憂に過ぎない、という旨の記述が見られた。道路橋の損傷事例において中性化とされているものが見られるが、かぶり不足に伴うものが多く、中性化単独で道路橋の耐荷力に甚大な被害を及ぼしているものはこれまで見られない。

1990 年代以降、中性化したところまでは外部からの塩化物の浸透が早い傾向があるといった事例が見られるようになってきた。また、海砂等により打設時よりコンクリート内部に多量の塩化物を含む場合には、中性化したところとそうでないところの境界付近に塩化物が濃縮する傾向があるとの報告がある。後者については、塩化物総量規制の下で施工された場合に問題は生じない。前者については、本文の検討にも関わる場所であるが、現時点ではその影響はまだ必ずしも明確でないことから今後の課題と考えている。なお、P/C 部材のように水セメント比が比較的低い場合には、中性化の速度は極めて遅いことが知られており、この中性化の影響はほとんどないものと考えられる。

3. 塩化物イオンの浸入に伴う鋼材腐食の概要

3.1 外部からの塩化物の浸入

図-3.1 に塩化物イオンの浸入に伴う鋼材腐食の概念図を示す。セメントコンクリートの内部には、一般に微細な空隙やゲル水が存在して、外部からの塩化物イオンの浸入経路となり得る。コンクリート中の空隙等の占める割合はコンクリートの種類、配合や品質によって異なる。特に、大気中の塩化物が多く、場所によっては波しぶきが直接かかることもある海岸付近では、多量の塩化物が供給されるため、早期に鉄筋位置まで塩化物イオンが浸透して、鉄筋の腐食発生を促し、鋼材の断面欠損やその腐食膨張圧によるコンクリートのひび割れ、剥離などの損傷が早期に発生する事例が多く見られる。その劣化の程度は、まえがきで述べたとおりである。

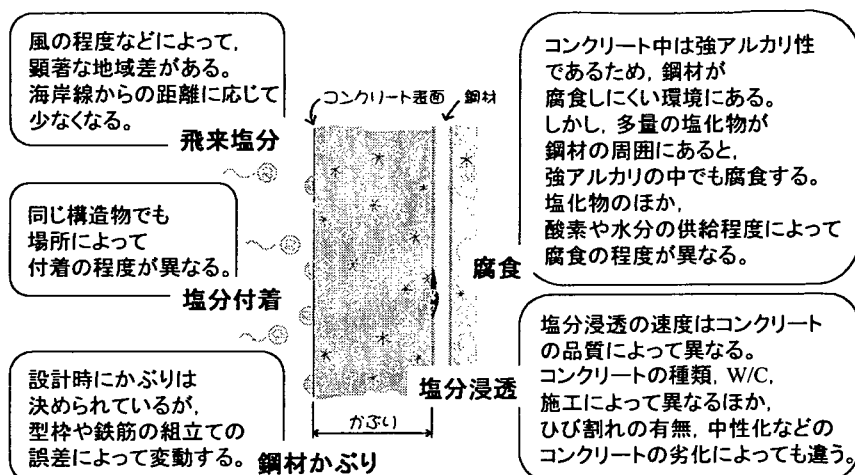


図-3.1 塩害劣化のイメージ

3.2 新標準示方書における鋼材腐食に関する照査^{3.1)}

新標準示方書では、コンクリート構造物の耐久性照査の一つとして、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査方法が示された。これは、耐用年数の間に、コンクリート中の鋼材位置における塩化物イオン濃度 C_d が鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} (一般に 1.2kg/m^3 としてよいとされている) 以下であることを確認するものである。 C_d は、コンクリート表面の塩化物イオン濃度が常時一定であると仮定して解いた一次元のフィックの拡散方程式の解(以下、フィック式)を基本とした次式で算定することとされている。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_o \left(1 - \text{erf} \frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \quad (3.1)$$

ここに、 c は設計かぶり(mm)、 t は耐用年数である。また、 γ_{cl} は C_d のばらつきを考慮した安全係数であり、一般に 1.3 としてよいとされている。環境外力に相当するコンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_o は表-3.1 のとおり与えられている。

表-3.1 コンクリート表面における塩化物イオン濃度 $C_o(\text{kg/m}^3)$

飛沫帯	海岸からの距離(km)				
	汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

海岸付近の高さ方向については、高さ 1m が汀線からの距離 25m に相当すると考えて C_o を求めてよい。

拡散係数 D_d は、コンクリートの配合設計からフィードバックされるものであり、新標準示方書では、水セメント比(以下、 W/C)の二次関数で表されている。

これまで、コンクリート道路橋のかぶり厚は、道路橋示方書または塩害対策指針(案)の最小かぶりの値によってほぼ画一的に与えられていたが、新標準示方書の照査によれば、コンクリートの工夫によってかぶり厚を設定するなど、設計の自由度が増えるとともに、新技術、新材料の普及に貢献するものと考えられる。今日、高性能AE減水剤の普及などにより多種多様なコンクリートが実用化される中で、これらを早期に効果的に活用するためには、こうした照査方法は極めて重要であると考えられる。

しかし、これらの照査式に従えば、一般的なコンクリートの場合、海岸線から 1km 以内は、設計年数 50 年でも従来の最小かぶりでは不足であるという結果となることが報告されている³²⁾。この原因はどこにあるだろうか。

(1) 基本式

フィック式は、コンクリート表面からの距離 x 、時間軸 t 、環境外力に相当する C_o 、コンクリートの品質等と関連する D_c といった、外部からの塩化物の浸入過程を表現する上での最低限の要素を含む、最もシンプルなものである。フィック式は、コンクリート中の塩化物イオンの浸透現象を必ずしも厳密に現わしているわけではないが、現段階では外部からの塩化物による鉄筋腐食の照査式としてフィック式が最も妥当であると思われる。

コンクリート中の塩化物イオンの浸透に関するモデルに関して様々な研究が見られる³³⁾。しかし、フィック式は試験結果の考察や実構造物の評価などの多くの場面で採用されてきたため、この式における C_o や D_c のデータが豊富である。さまざまなモデルが複雑になるに連れてパラメータも増え、その検証がより難しくなると考えられるが、それに耐える比較データはフィック式に比べて遥かに乏しい。各種のモデルが提案され混沌とする中で実務のために一つの式を提案された新標準示方書の意義は大きく、他のコンクリート構造物の基準類への影響は大きい。

(2) コンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_o

C_o は、文献 3.4)において既に試案が示されていたものが引用されている。しかし、同文献では地域係数が示されていたが、新標準示方書では地域差は考慮されていない。これまでのコンクリート橋の塩害による損傷状況³⁴⁾から考えて、 C_o が海岸線から遠くなるのに応じて減衰させるのは適切であると考えられるが、塩害対策指針(案)のように何らかの地域差も考慮する必要があると考えられる。 C_o の値や距離減衰の程度の根拠は明確にされていない。これまでの飛来塩分量全国調査³⁵⁾などから、コンクリート橋の塩害による損傷状況に地域差が見られたのは、飛来塩分量の地域差と関係があると考えられる。

(3) みかけの拡散係数 D_c

D_c はコンクリートの種類、配合や品質によって異なることが知られている。

コンクリートの種類とは、普通セメントを用いたコンクリートのほか、高炉スラグやフライアッシュなどの混和材を混合したコンクリートなどである。高炉スラグやフライアッシュを混合したコンクリートは、その配合などによっては比較的高い塩分浸透抵抗性が得られる場合があるが、養生期間を長く取るなど、より慎重な施工管理が必要である。

配合で特に D_c に与える影響が大きいのが W/C である。 W/C が小さいほど空隙等が小さくできることから、適切な施工が出来る範囲で W/C を小さくするのが効果的であると考えられる。近年、高性能 A E 減水剤の普及と高流動コンクリートや高強度コンクリートの研究、実用化が進む中で、 W/C を低減した高耐久性コンクリートの実用化も進んでいると言える。なお、 W/C を低減し過ぎると、ポンプ圧送が困難になったり、温度ひび割れの抑制が困難になったり、単位セメント量の増加によりアルカリ骨材反応の発生の可能性が高くなるなど、注意すべき点もある。

コンクリートの品質は、施工の影響を大きく受ける。従来、プレキャスト製品が比較的耐久性が高いと考えられている理由は、P C 部材での低い W/C のコンクリートの使用、かぶりの適切な管理のほか、比較的良好なコンクリートの品質管理が挙げられる。

新標準示方書では、 D_c の推定式が W/C の関数で示されている。これは、既存の文献データの集積結果^{3.7)}に基づき提案されたものであるが、その元データは必ずしも明確にされていない。データは、多くの文献から集めたものであるため、さまざまなパラメータを包含するものであり、式の汎用性という意味では重要であるが、一方ではばらつきが大きく、二次式で示すほどの傾向は必ずしも見出せない。特に W/C が低い場合には D_c を大きめに評価しているかもしれない。

ちなみに、新標準示方書では、 D_c を試験により求めることが認められているが、その試験方法は必ずしも明確でない。 D_c を塩水浸漬試験で求める場合には、浸漬時間、乾湿繰り返しの有無、養生の方法・期間、 $Co \cdot D_c$ の算出方法などを明確に定める必要があると考えられる。

3.3 ここでの検討課題

4章以降では、フィック式による照査を基本として、 Co 、 D_c に関する根拠について、新標準示方書に示された以外のデータからも検討を行った上で、改めて必要かぶりの試算を試みた。また、この試算結果について、既存のコンクリート構造物の損傷状況と突合せることによりマクロ的な検証を行った。さらに、設計年数を100年とした場合の照査方法のイメージを示すとともに、そのときの安全率の考え方について整理した。

4. 表面塩化物イオン濃度 C_o

4.1 飛来塩分量 C_{air}

飛来塩分量については、全国 266 箇所 で 1984 年から 3 年間にわたって調査した結果がある^{4.1) 4.2)}。その結果から得られた地域別の飛来塩分量(調査期間中の平均値)と海岸線からの距離の関係を図-4.1 に示す。また、図-4.2 にそのときの地域区分を示す。飛来塩分量は地域によって異なり、塩害による劣化損傷が比較的多く発生している北海道、東北、北陸地方の日本海に面した地域及び沖縄県では、飛来塩分量が多い傾向にある。図中の関係式は次式によった。

$$C_{air} = C_1 x^b, \quad b = -0.6 \text{ (全国一律)} \quad (4.1)$$

ここに、 C_{air} : 飛来塩分量(mdd) $mdd = \text{mg/dm}^2/\text{day}$

C_1 : 1km 換算飛来塩分量(mdd)

x : 海岸線からの距離(km)

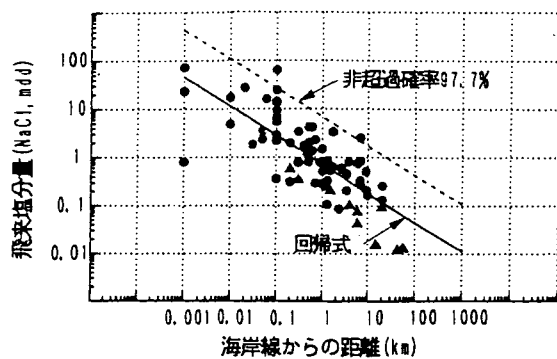
海上の測定地点は便宜上 0.001km のところにプロットしているが、回帰分析には用いていない。海上での測定結果は測定器の設置箇所や地形の取り合いの影響もあるため、ばらつきが大きい、いずれの地域においても非超過確率 97.7%の曲線を超えることはない。図中の実測値には、年変動の影響、海岸線の形状や地形の起伏などの地理的な影響、測定位置の高さの影響、測定誤差などが含まれているためばらつきが大きい、飛来塩分量のマクロ的な分布特性は式 4.1 による回帰式で定量的に把握できると考えられる。

"沖縄"での飛来塩分量のばらつきが他の地域に比べて大きいのは、台風の有無によって年平均値が異なるにもかかわらず、台風が通過した年のみ測定していた地点と台風が接近しなかった年に測定していた地点とが混在していることの影響が大きいと考えられる。

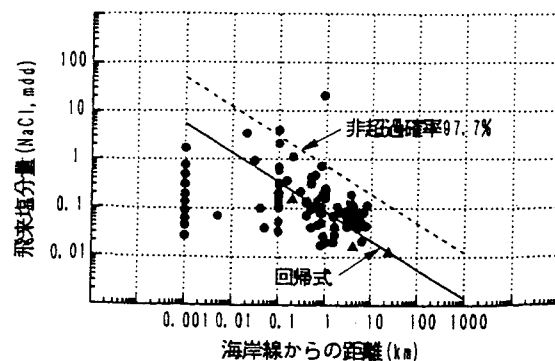
図-4.3(a)~(f)に日本海、太平洋の各沿岸部及び沖縄県について、それぞれ海岸線に近い地点での飛来塩分量の季節変動の例を示す。

日本海沿岸部では、冬期に飛来塩分量が卓越して多く、またその年平均は3年間を通してほぼ同程度の値となっている。これに対して、太平洋沿岸部では、飛来塩分量は夏期の方が冬期よりも多く、飛来塩分量の年平均値は台風の接近がある年とない年で差が見られる。特に沖縄では、台風が接近した年の年平均飛来塩分量は接近しなかった年よりも概ね2桁多く、その差は本州の太平洋に面した地域よりも大きい。

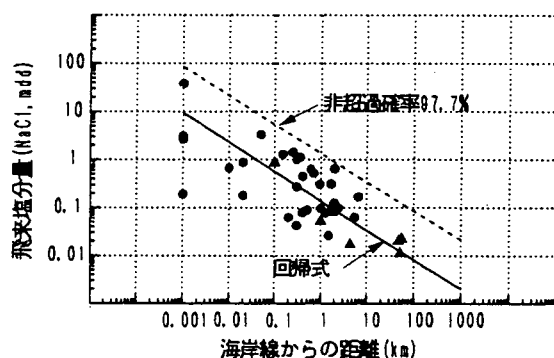
なお、係数 C_1 は、海風速や海風比率とある程度の相関性があることが確認されている。



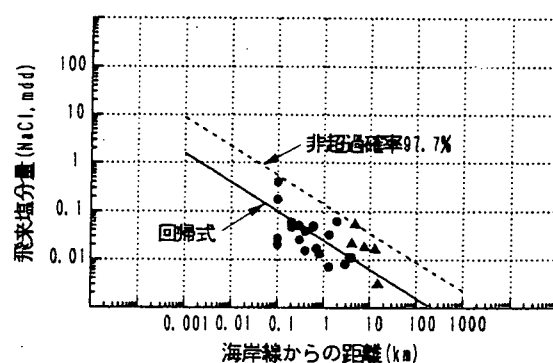
地域区分 1. 日本海 I



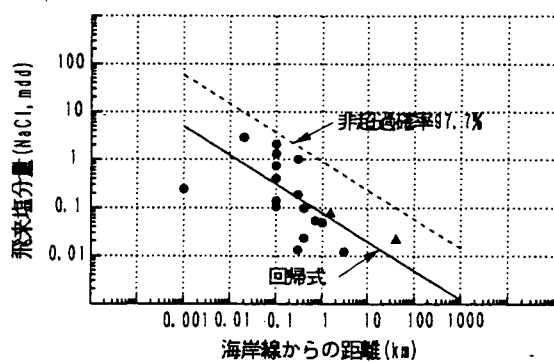
地域区分 5. 太平洋 III



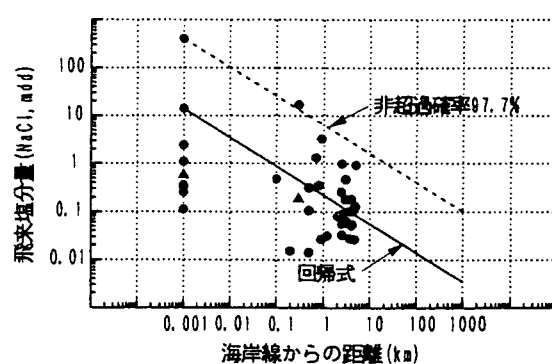
地域区分 2. 日本海 II



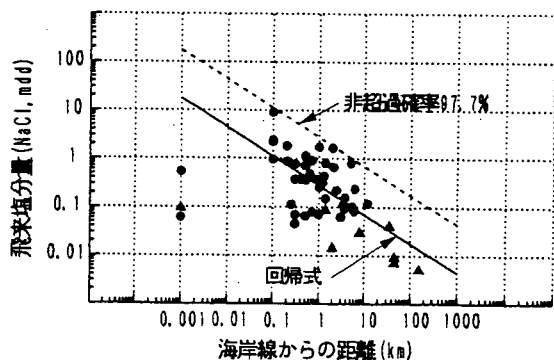
地域区分 6. 瀬戸内海



地域区分 3. 太平洋 I



地域区分 7. 沖縄



地域区分 4. 太平洋 II

凡 例

- : 全国266地点の飛来塩分量調査の結果
- ▲ : 耐候性鋼材の全国暴露試験での環境条件調査の結果

図4.1 地域区分ごとの飛来塩分量の分布 ^{4.3)}

(地域区分は図4.2による)

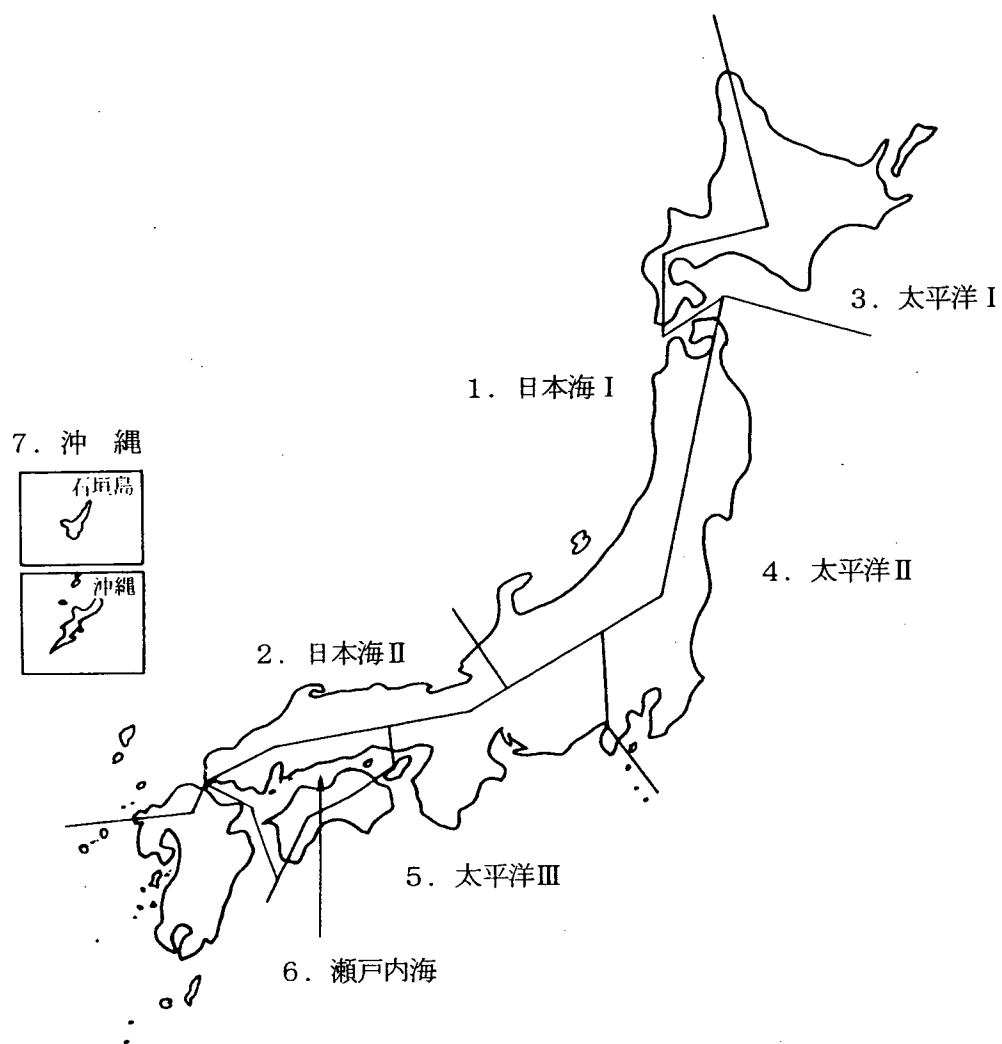
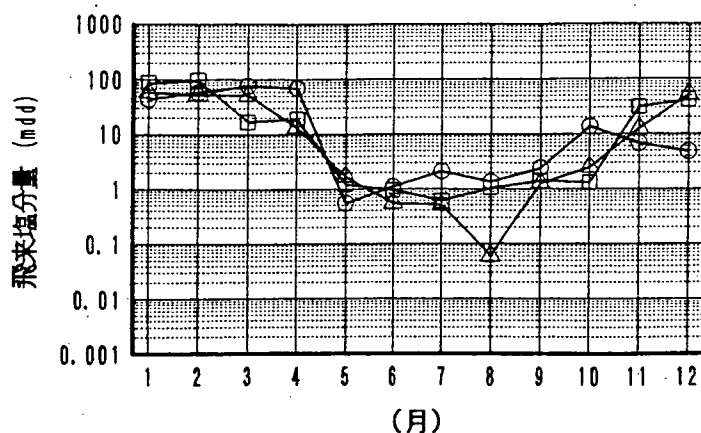


図-4.2 飛来塩分量の地域区分⁴³⁾

(図-4.1 の地域区分)



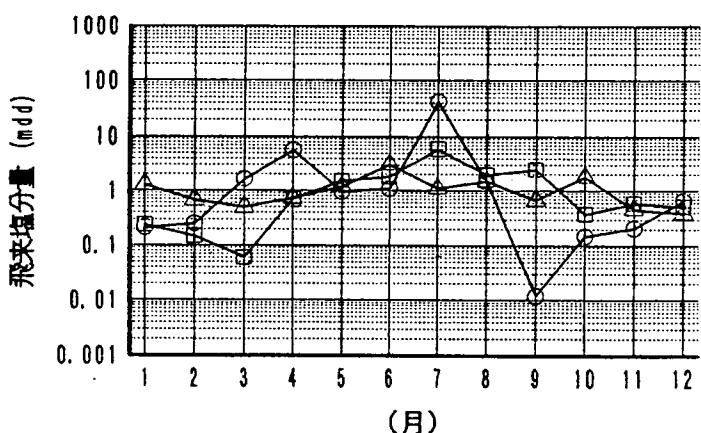
(a) 小岩川陸橋

山形県西田川郡熱海町、海岸線からの距離0 m

1年目
○
2年目
□
3年目
△

(単位;mdd)

	1年目	2年目	3年目
平均値	23.43	24.97	20.75
標準偏差	28.49	32.81	24.04
最大値	77.11	96.47	59.02
最小値	0.55	0.61	0.06



(b) 小田原出張所

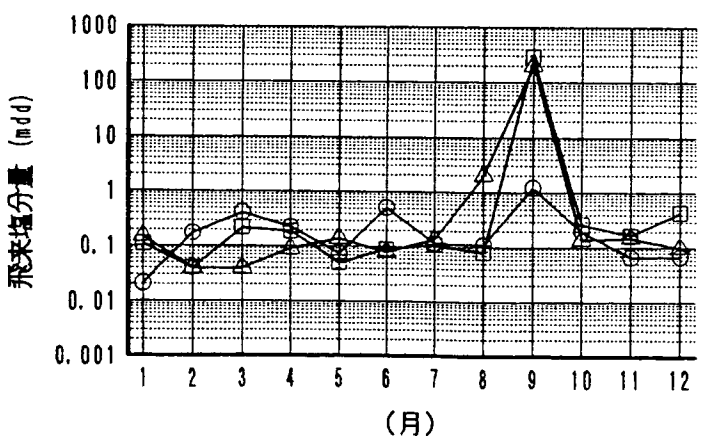
神奈川県小田原市、海岸線からの距離100 m

1年目
○
2年目
□
3年目
△

昭和60年7月1日 台風6号
静岡県田子の浦に上陸
(1年目)

(単位;mdd)

	1年目	2年目	3年目
平均値	4.54	1.37	1.12
標準偏差	11.44	1.59	0.73
最大値	42.18	5.99	3.09
最小値	0.01	0.06	0.39



(c) 潮上橋

沖縄県国頭郡東村、海岸線からの距離0 m

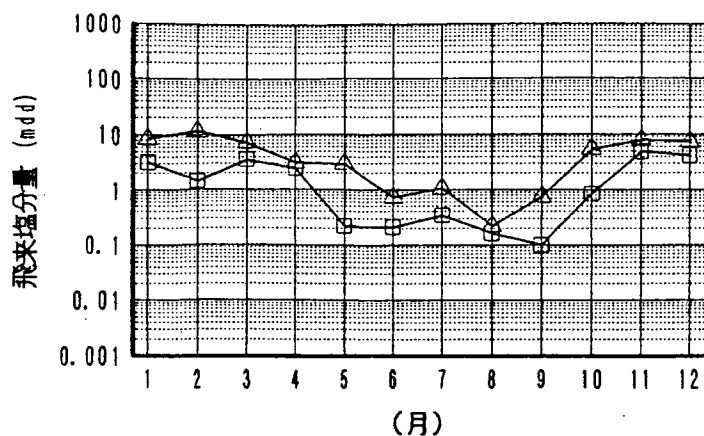
1年目
○
2年目
□
3年目
△

昭和61年8月26日 台風13号
沖縄本島通過 (2年目)
昭和62年8月30日 台風12号
沖縄西海上通過 (3年目)

(単位;mdd)

	1年目	2年目	3年目
平均値	0.27	24.17	17.36
標準偏差	0.33	79.63	56.64
最大値	1.24	288.27	205.19
最小値	0.02	0.04	0.04

図-4.3 飛来塩分量の季節変動 (その1)



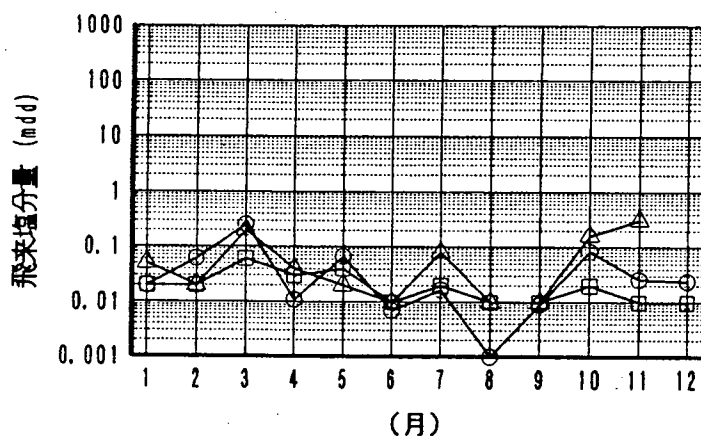
1年目
○
2年目
□
3年目
△

(単位;mdd)

	1年目	2年目	3年目
平均値	—	1.81	4.73
標準偏差	—	1.70	3.60
最大値	—	4.92	11.50
最小値	—	0.10	0.22

(d) 長江川橋

鳥取県気高郡気高町、海岸線からの距離50m



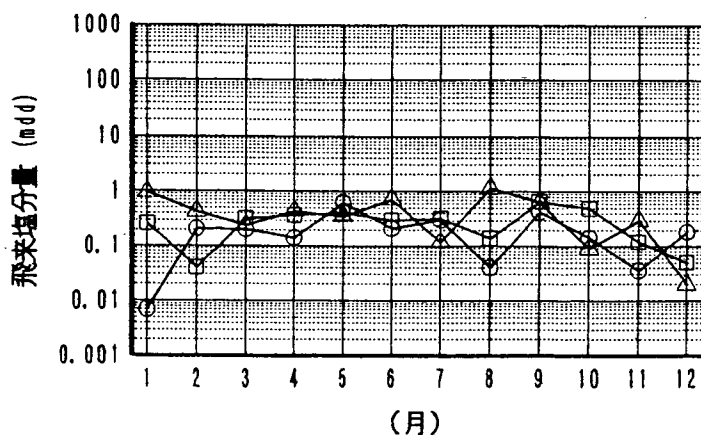
1年目
○
2年目
□
3年目
△

(単位;mdd)

	1年目	2年目	3年目
平均値	0.05	0.02	0.08
標準偏差	0.07	0.01	0.09
最大値	0.25	0.06	0.31
最小値	0.00	0.01	0.01

(e) 蒼社橋

愛知県今治市、海岸線からの距離300m



1年目
○
2年目
□
3年目
△

(単位;mdd)

	1年目	2年目	3年目
平均値	0.21	0.29	0.45
標準偏差	0.17	0.18	0.34
最大値	0.63	0.66	1.15
最小値	0.01	0.04	0.02

(f) 吉良川橋

高知県室戸市、海岸線からの距離100m

図4.3 飛来塩分量の季節変動 (その2)

4.2 飛来塩分量と C_o の関係

上記の飛来塩分量の測定とともに、コンクリートブロック(W/C=39, 58%)の暴露試験を実施していた。この暴露ブロックの塩化物イオン量の測定結果から得られた C_o と飛来塩分量(平均値)の関係を図-4.4 に示す。ばらつきは大きいですが、両者の間に相関関係が見られる。このことから、 C_o は次式のとおり C_{air} の関数で表わすこととした。

$$C_o = 1.2 \cdot C_{air}^{0.4} \quad (4.2)$$

なお、文献 4.1) では、 C_o の算出は正規確率紙による方法^{4.4)}(実際はパソコン上での回帰)によっていたが、最近の暴露試験調査等の結果^{4.5)}から、塩化物が十分に浸透していない場合に必ずしも適切な C_o が得られないことが判明した。このことから、 C_o の算出方法を改善するとともに(巻末参考資料)、2年以上にわたって暴露したブロックのデータを用いることとした。

参考として、図-4.5 に、前掲の飛来塩分量測定結果(図-4.1 地域区分 1. 日本海 I の平均)と式 4.2 の関係式から算出した日本海 I (現行の塩害対策地域 B)における C_o を、海岸線からの距離との関係で示す。図中には比較のため、新標準示方書に示されている C_o も示した。飛来塩分量の多い地域である日本海 I でも、 C_o は新標準示方書の値よりも小さい。

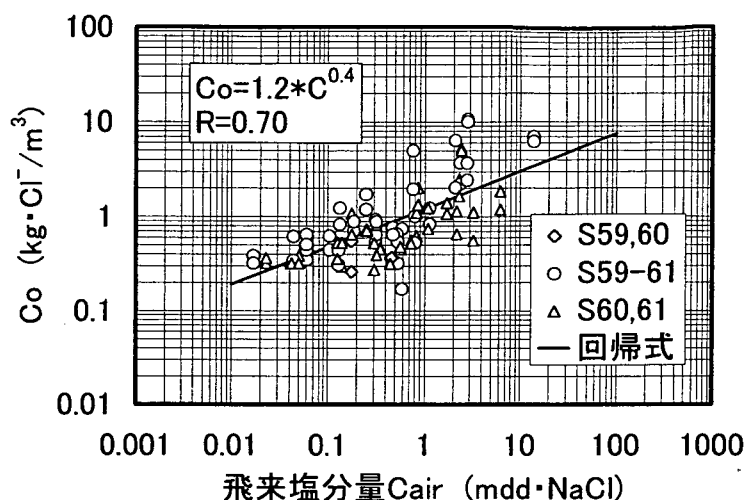


図-4.4 C_o と飛来塩分量の関係

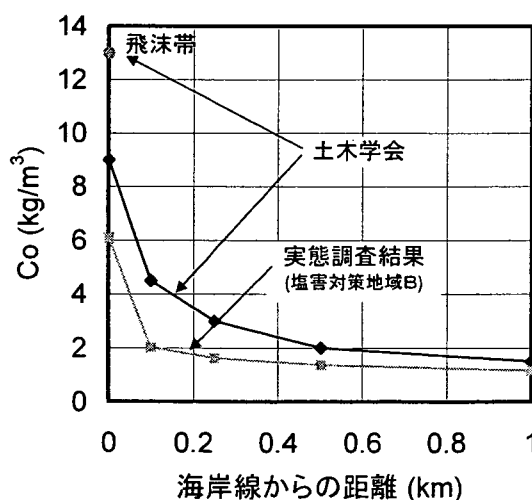


図-4.5 地域区分 1 における飛来塩分量から求めた C_o と新標準示方書における C_o の比較

5. みかけの拡散係数 D_c

図-5.1 に、早強セメントを用いた室内塩水浸漬試験及び日本海沿岸部における屋外暴露試験の結果から得られた D_c を示す。図中、新標準示方書における普通セメントを用いたコンクリートの D_c と W/C の関係式も示した。

試験の結果、室内と屋外の結果に差があるものの、いずれも $\log D_c$ と W/C の間に直線関係が見られた。土木学会式では、 $\log D_c$ と W/C の関係を二次回帰式で表されており、 W/C が約 40% 以下は W/C が小さくなっても D_c はほとんど下がらないものとなっていた。もともと土木学会式の算出に用いたデータには W/C が 40% 以下のものが少なく、この範囲のデータは必ずしも十分とは言えず、 W/C が 40~60% の範囲では直線で回帰しても支障ないと考えられる。ここで示したように W/C との関係に着目した試験結果のみでみれば、 W/C 低減の効果を見直す余地があると考えられる。

実構造物の暴露環境に類似している屋外暴露試験結果について D_c の値をみると、 W/C が 50% 以上の場合に土木学会式と試験結果に大差はないが、 W/C が小さい場合には試験結果の方が土木学会式よりも小さい傾向が見られた。

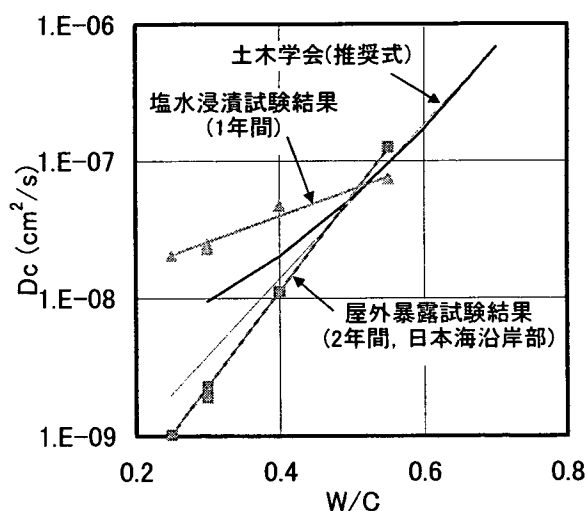


図-5.1 D_c と W/C の関係

6. 必要かぶりの試算

6.1 試算条件

4章, 5章に基づき, 以下の条件の下で必要かぶりの試算を行った。

①拡散の基本式は新標準示方書に基づき, 次式のとおりとした。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \quad (6.1)$$

x : 表面からの距離(cm)

t : 時間(sec)

$\operatorname{erf}(\quad)$: 誤差関数

② C_0 は C_{air} の関数とした。(式 4.2)

③ C_{air} は図-4.2 に示した地域区分ごとに与えた。 C_1 は, 日本海沿岸部, 関東以北の太平洋沿岸部は平均値, その他の太平洋, 沖縄, 瀬戸内海の各沿岸部は, 台風の影響を考慮して, ここでは平均値に $\sigma/2$ を加えたものとした。

④鋼材腐食発生限度濃度は 0.9kg/m^3 とした。これは一般に言われる鋼材腐食発生限度濃度 1.2kg/m^3 から初期塩化物イオン量の上限值 0.3kg/m^3 を減じた値である。

⑤新標準示方書に見られる係数 γ_i , γ_{cl} , γ_c は 1.0 とした。

⑥設計年数: 50 年, 100 年

⑦ D_c は屋外暴露試験結果による W/C の関数とした。

ただし, 比較のため, 土木学会式で $W/C=40\%$ の場合についても計算した。

⑧ W/C : 30, 40, 55%

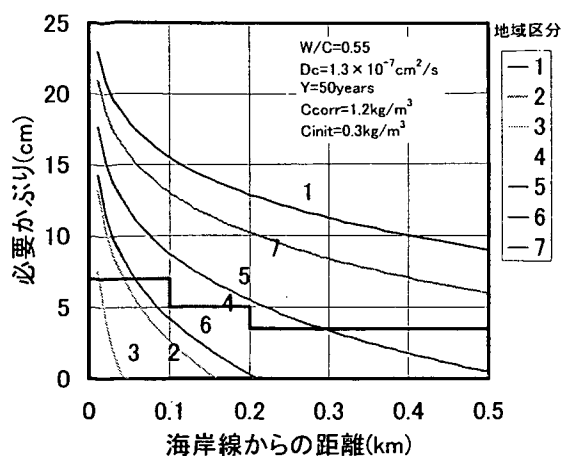
6.2 試算結果

図-6.1(a)~(f), 図-6.2(a)~(b)に試算結果を示す。設計年数 50 年とした場合の試算結果より, 以下のことがいえる。

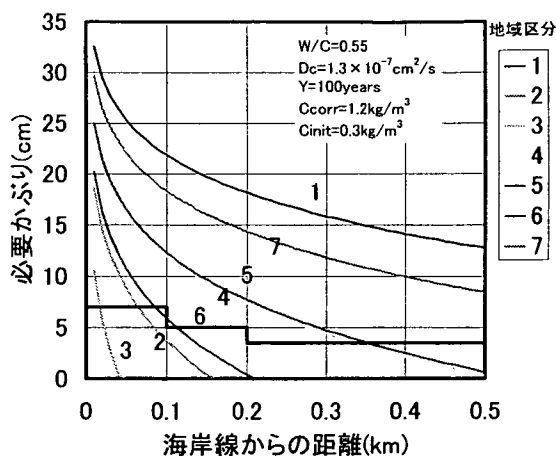
(1) $W/C=40\%$ の結果を見ると, 塩害対策指針(案)以前の最小かぶり 3.5cm では, 地域区分 1(日本海沿岸部)及び地域区分 7(沖縄)の海岸線から 200m の範囲で必要かぶりが不足していたが, 塩害対策指針(案)の最小かぶりでは概ね適切な必要かぶりが得られていた。

(2) $W/C=55\%$ の結果を見ると, どの地域においても塩害対策指針(案)の最小かぶりでは十分でなかった。塩害対策指針(案)では, 上部構造の W/C を 50%以下とすることとした点は妥当な選択であったと考えられる。

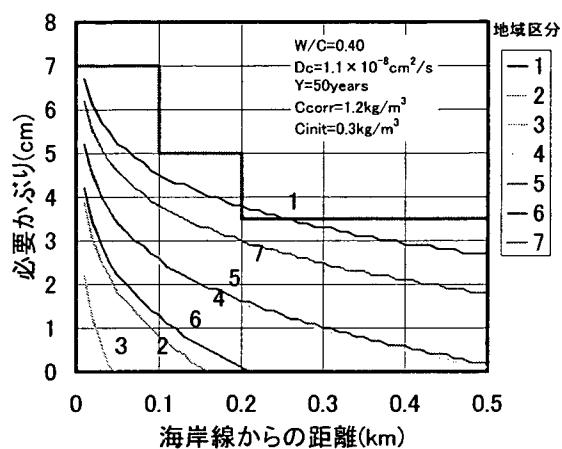
(3) コンクリートの W/C を 30%に低減して適切に施工できる場合には, 最小かぶりが 3.5cm でも十分である。



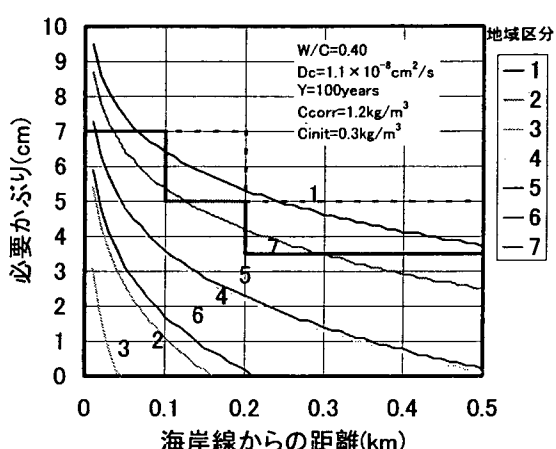
(a) 設計年数 50 年, W/C=55%



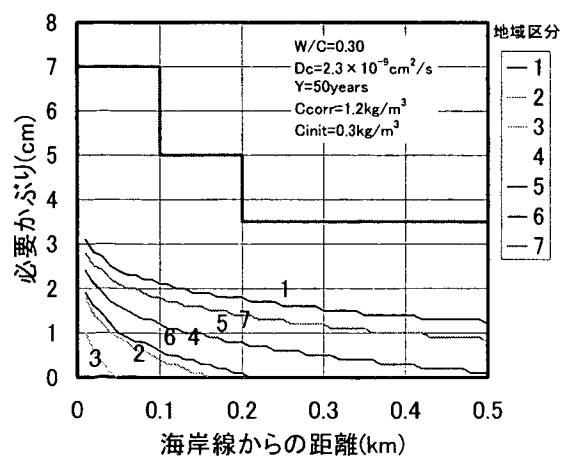
(d) 設計年数 100 年, W/C=55%



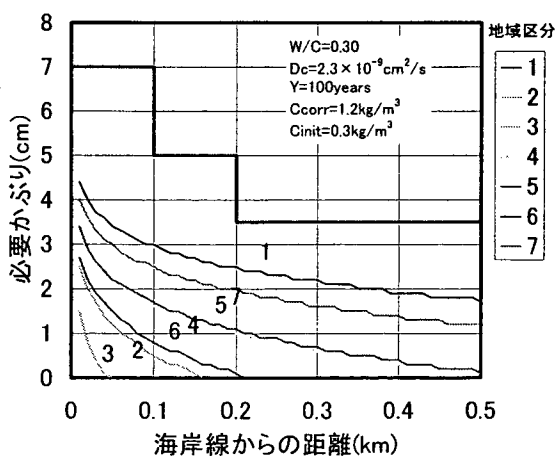
(b) 設計年数 50 年, W/C=40%



(e) 設計年数 100 年, W/C=40%

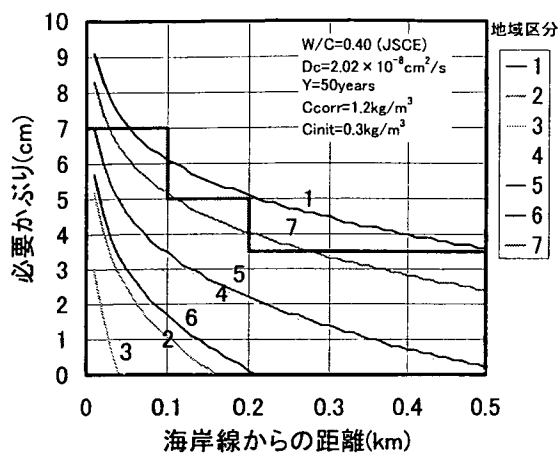


(c) 設計年数 50 年, W/C=30%

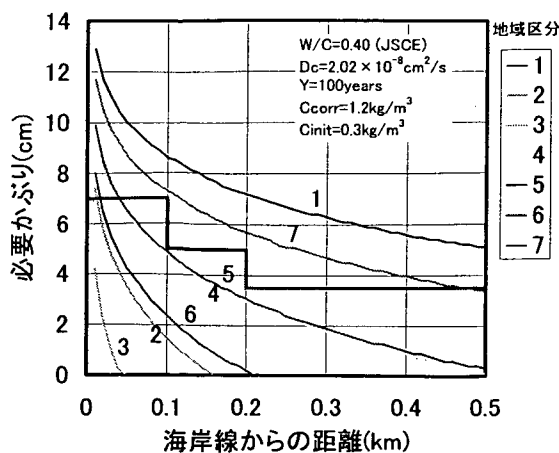


(f) 設計年数 100 年, W/C=30%

図-6.1 必要かぶり試算結果 (D_c は屋外暴露試験結果による)

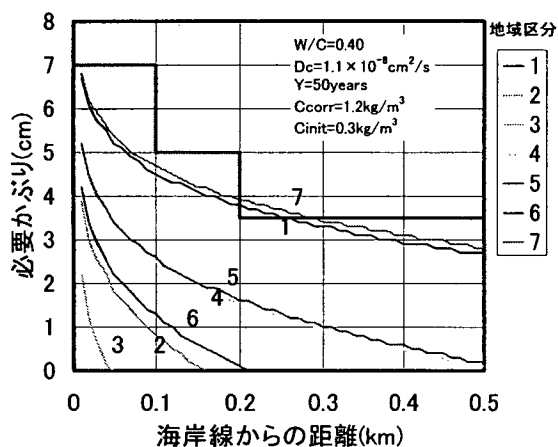


(a) 設計年数 50 年, W/C=40%

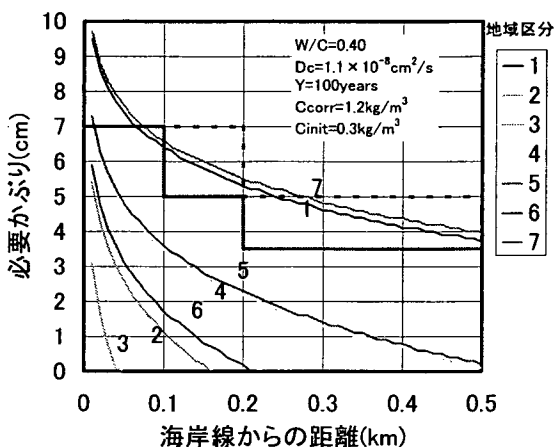


(b) 設計年数 100 年, W/C=40%

図-6.2 必要かぶり試算結果 (Dc は土木学会式による)



(a) 設計年数 50 年, W/C=40%



(b) 設計年数 100 年, W/C=40%

図-6.3 必要かぶり試算結果 (沖縄の Cair を平均値+1σ とした場合)

(4) W/C が 40% でも、海岸線から約 300m を超える地域では最小かぶりが 3.5cm でも十分である。

参考として、Cair に関して、太平洋、瀬戸内海の場合に平均値+σ/2、沖縄の場合に平均値+1σ、それ以外の地域は平均値とした場合の計算結果を図-6.3 に示す。沖縄を平均値+1σ とした場合の必要かぶりは日本海沿岸部での結果よりもやや大きい、概ね大差ない結果であった。

6.3 実構造物の塩害実態との比較

塩害対策指針(案)の塩害対策地域の根拠になったコンクリート橋の塩害による損傷状況調査(1982 年)⁶⁾では、海岸線から 500m 以内の道路橋 920 橋の目視調査により以下の結果が得られた。なお、この調査結果では、プレテンション PC 桁をポストテンション PC 桁・鉄筋コンクリート桁と分けてデータ整理されている。

(1) コンクリート橋の塩害による損傷は海岸付近の橋梁に限られる。地域別には、北海道・東北地方の日本海側、北陸地方(塩害対策指針(案)の地域区分 B)及び沖縄地方(同 A)に多く見られた。

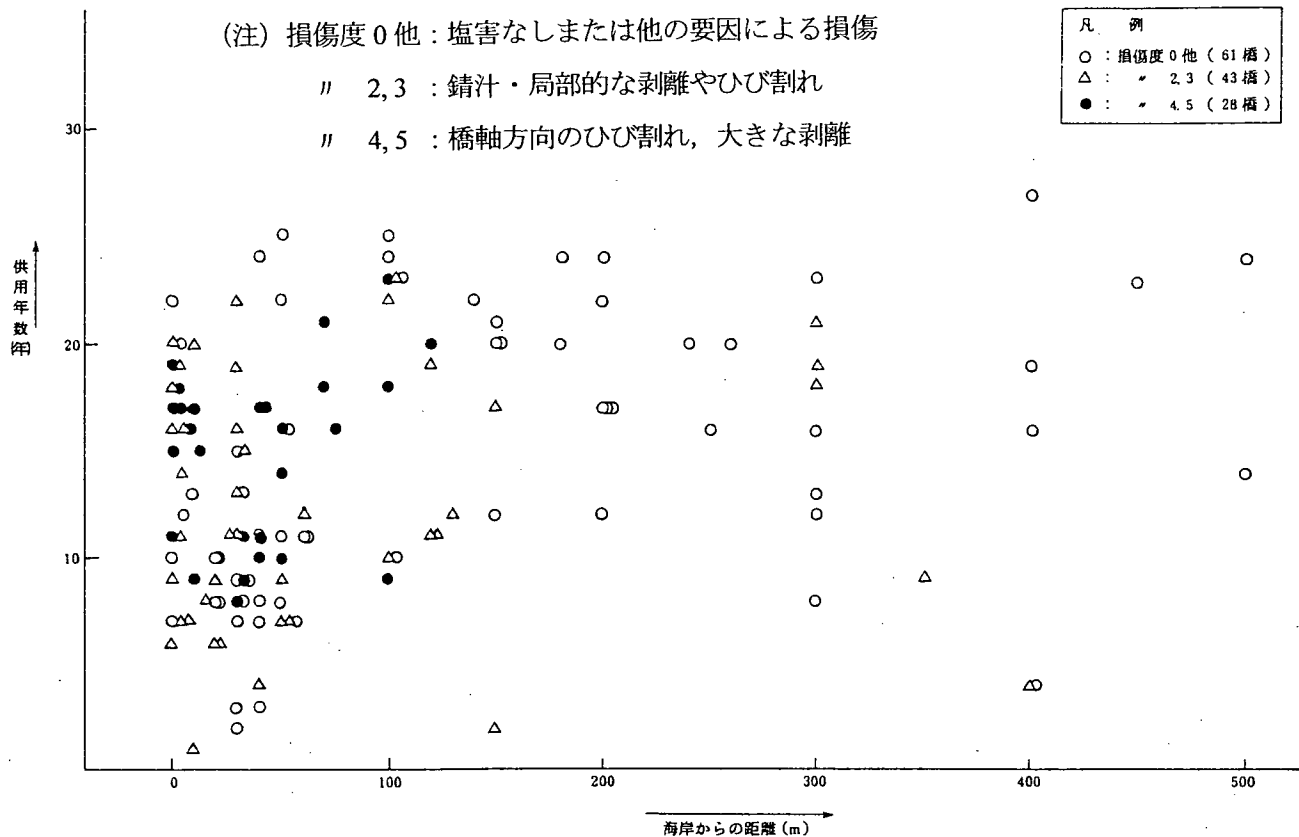


図-6.4 地域区分 A, Bにおける塩害状況 (プレテンション桁を除く)

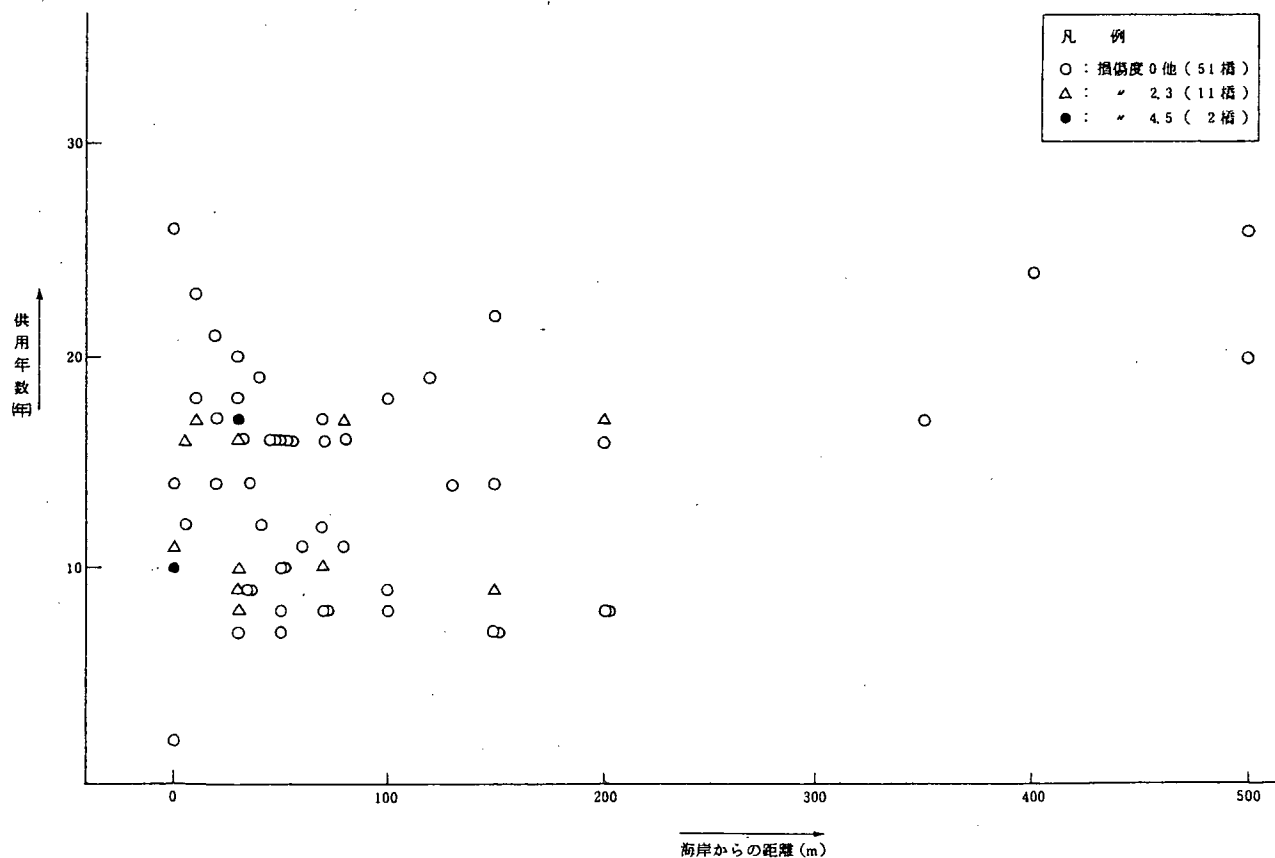


図-6.5 地域区分 A, Bにおける塩害状況 (プレテンション桁)

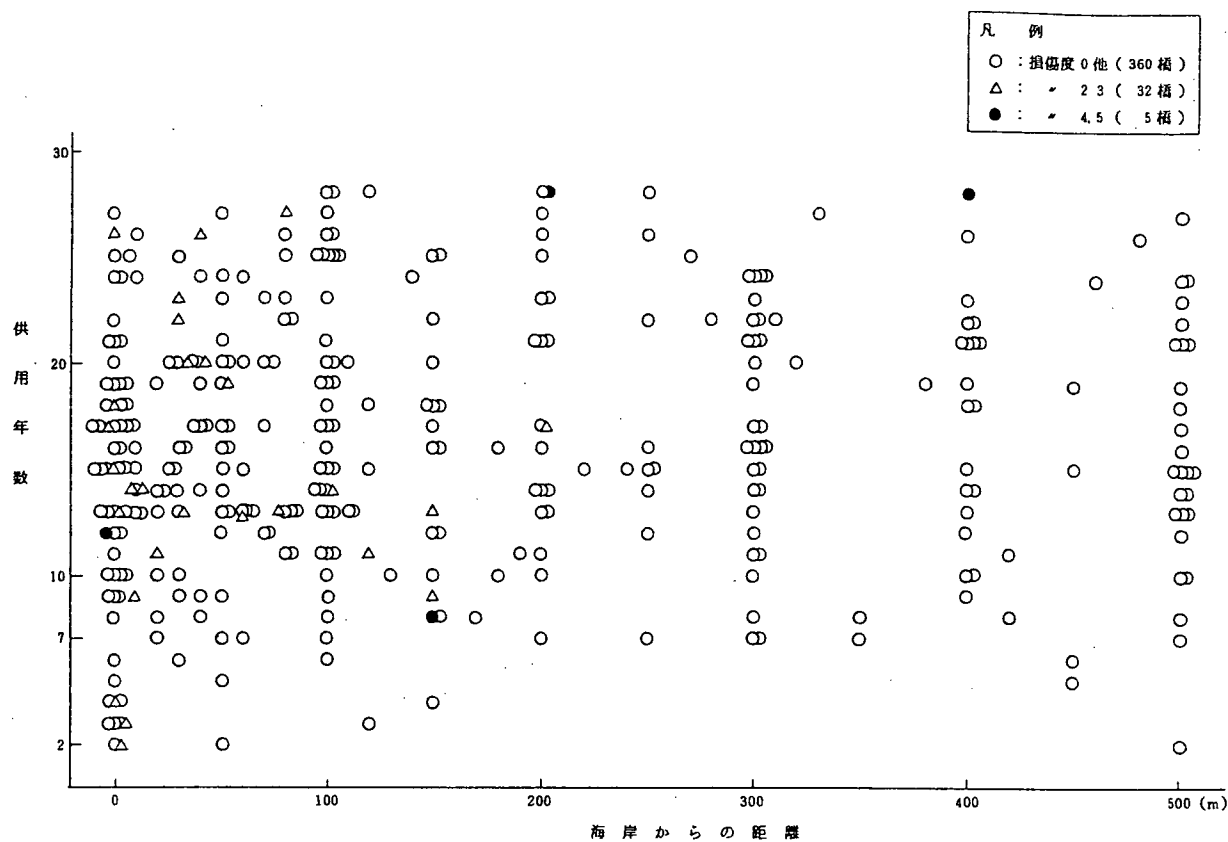


図-6.6 地域区分Cにおける塩害状況 (プレテンション桁を除く)

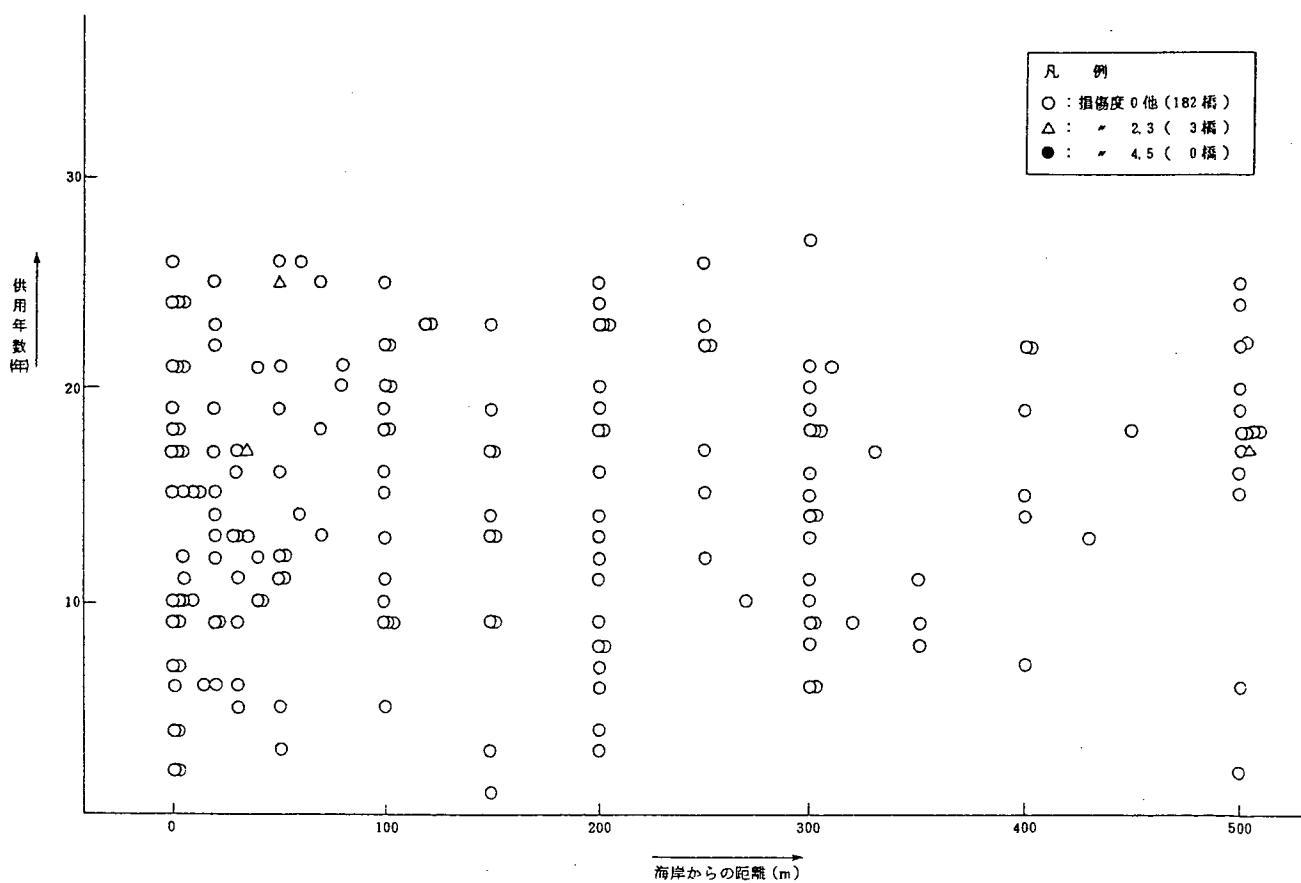


図-6.7 地域区分Cにおける塩害状況 (プレテンション桁)

(2) 海岸線から 100m 以内の飛沫帯に損傷を受けた橋梁が集中していた。海岸線から 300m～500m の範囲でも損傷している事例が数橋見られた。そのうち、プレテンション P C 桁では軽微な損傷が 1 橋、それ以外の桁では同 3 橋であった(図-6.4～6.7)。

(3) プレテンション P C 桁は他の橋梁に比べて損傷が少ない(図-6.4～6.7)。

なお、個々の橋梁のコンクリートの W/C は明確でないが、一般には、プレテンション P C 桁の W/C は 35～40%程度であり、ポストテンション P C 桁(W/C=40～45%程度)や鉄筋コンクリート桁(R C 桁, W/C=55～60%程度)よりも塩分浸透抵抗性の高いコンクリートが採用される場合が多い。

これらの結果を踏まえて、前節の設計年数 50 年での試算結果と再度比較してみる。

①海岸線から数 100m の範囲では、地域区分 1,7 での必要かぶりが他の地域に比べて著しく大きい、塩害対策指針(案)以前の道路橋の最小かぶりは 3.5cm であった。実際、地域区分 1,7 に相当する塩害対策指針(案)の地域区分 A, B では、他の地域に比べて著しい損傷事例が多く見られた。

②W/C が 40%の場合、海岸線から 300m を超える範囲での必要かぶりが従来の道路橋示方書の最小かぶり 3.5cm 以下であった。この範囲ではプレテンション P C 桁の損傷事例も少なかった。

③W/C が 55%の場合、地域区分 1,7 では、海岸線から 300m を超える範囲でも必要かぶりが 3.5cm を超えている。損傷状況調査の対象橋梁が供用後 30 年程度までのものがほとんどであったためか、その範囲での損傷事例は数橋程度であった。

以上①～③を見ると、前節の設計年数 50 年での試算結果はマクロ的にみれば実際の損傷事例と符合するところが多いと考えられる。これより、個々のデータのばらつきは小さくはないが、これまでの研究成果や各種の調査結果を勘案すれば、現時点では、必要かぶりの計算にはここで示したパラメータの設定を用いるのがよいと考えられる。特に環境外力である C_o はここでの試算の前提としたもので概ね妥当であると考えられる。

6.4 設計年数 100 年の試算結果

以上の結果を踏まえて、ここでの試算方法を用いて設計年数 100 年の場合の必要かぶりを計算した。

設計年数 50 年では塩害対策指針(案)の最小かぶりは概ね妥当であったが、設計年数を 100 年とするには、かぶり増の必要な地域を広げる必要があるとともに、海岸線から数 10m の範囲では必要かぶりを塩害対策指針(案)よりもさらに大きくするか、何らかの耐久性向上策が必要になると考えられる。具体的には、W/C を 40%とした場合、地域区分 1(日本海 I)では、海岸線から 500m の範囲までかぶり増が必要となる(従来は同 200m まで)。また、地域区分 1 で海岸線から 60～70m までの範囲、地域区分 7(沖縄)で同 30～40m までの範囲、その他の地域で同 10m までの範囲では、従来の最小かぶり 7cm でも十分でない、さらにかぶり増とするか、塗装鉄筋、塗装 P C 等の併用などの対策を施す必要がある。また、設計年数を 100 年とする場合、沿岸部でコンクリート橋とする場合には、比較的 W/C が低く、かつ曲げひび割れの発生が生じない P C 部材(あるいは W/C=40%程度のコンクリートを用いた部材)とするのが望ましいと考えられる。

7. 飛来塩分量に基づくかぶり規定のイメージ

ここでは、上記の検討結果のうち、設計年数 100 年とした場合の試算結果をもとに、性能照査型塩害対策指針のイメージを整理することによって、基準化における問題点を整理する。

7.1 塩害対策の検討を必要とする地域

表-7.1 に、塩害対策の検討を必要とする地域を示す。塩害対策を検討すべき地域は、性能照査型といえども、従来の塩害対策指針(案)と同様に、地域と海岸線からの距離で示す地域区分を示す必要があると考えられる。コンクリート構造物の塩害対策を考える上での「沿岸部」の距離的イメージについて、発注者、設計者、施工者間で共通認識を持つことが大切である。これについては、塩害対策指針(案)の果たした役割は大きく、これを踏襲すべきであろう。ただし、地域区分 B では、設計年数を 100 年としたことから、従来よりもより内陸まで対策の範囲を広げる必要がある。地域区分 A は、塩分環境としては、地域区分 B と同等かやや下回る程度であるが、亜熱帯気候であるために鋼材の腐食環境としては他の地域よりも厳しいと考えられるので、塩害対策指針(案)と同様、海岸線からの距離に関係なく、沖縄県全域とした。一方、地域区分 C においては、従来より外部からの塩化物の影響が及ぶ範囲が小さかったが、設計年数 100 年としても差が見られなかったため、海岸線からの距離は塩害対策指針(案)と同様に 200m までとした。前述の試算では、塩分環境を 7 つの地域に分類しており、それぞれ塩分環境のレベルは異なっていたが、ここでは、安全側に見て、地域区分 C は地域区分 2~6 のうちの上限值を採用するのがよいと考えた。

表-7.1 塩害対策の検討を必要とする地域

地域区分	地 域
A	沖縄県
B	別表-1 に示す地域のうち、海上部および海岸線から 1km までの部分
C	上記以外の地域のうち、海上部および海岸線から 200m までの部分

※別表-1 は省略。現行の塩害対策指針(案)と同じ。本文の図-2.1 の斜線部をいう。

7.2 対策区分

塩害対策指針(案)では、主な塩害対策として、コンクリートのかぶり厚の増加を示していたが、設計年数 100 年とした場合には、必要かぶりが極端に大きくなっていくことから、今後は、新暮坪橋^{7.9)}に見られるような、コンクリートかぶりだけでなく、塗装 P C 鋼材や防食シース等を併用し、P C 鋼材の防食に関してフェイルセーフを考えたスーパー塩害対策(仮称)が必要であると考えられる。従来の塩害対策指針(案)と異なり、対策区分の項では、従来のかぶり増で対応できる地域と、スーパー塩害対策を推奨する地域の境界を示すのがよいと考えた。スーパー塩害対策の定義はまだ十分に議論されたものではないが、少なくとも設計年数 100 年としたときに従来のかぶり増による対応だけでは十分でない地域があることを示すものである。

表-7.2 にスーパー塩害対策を推奨する地域の目安を示す。これらの海岸線からの距離の値は、図-6.1(e)に

示した設計年数 100 年, W/C が 40%の結果より, 必要かぶりが 6.5~7cm を超える範囲とした。なお, このような地域においては, 比較的耐久性が高いと考えられる P C 橋を採用することを前提に W/C を 40%とした場合の値を用いた。

表-7.2 スーパー塩害対策を推奨する地域 (目安)

対策区分	地 域	海岸線からの距離
A	沖縄県	海上部および海岸線から 100m まで
B	別表-1 に示す地域	海上部および海岸線から 100m まで
C	上記以外の地域	海上部および海岸線から 20m まで

※別表-1 は省略。現行の塩害対策指針(案)と同じ。本文の図-2.1 の斜線部をいう。

7.3 鋼材のかぶり規定のイメージ

(1) 鋼材のかぶりは, 次の①~④について所要の性能を満たすものとする。

- ①鋼材の腐食を防止する。
- ②所要の付着強度を確保する。
- ③火災時においても鋼材の機械的性質を確保する。
- ④所要の施工ができる。

(2) 塩害対策地域においては, 特に鋼材の腐食防止について, 架橋地点の飛来塩分量, コンクリートの品質, 設計年数等を考慮して, 所要のかぶりを検討しなければならない。

(3) 鉄筋のかぶりは鉄筋の直径以上としなければならない。

7.4 鋼材のかぶりの解説のイメージ

上記 7.3(2)の解説として, 以下の内容が必要である。

(1) 必要かぶりは以下の条件により算出してよい。

①必要かぶり計算の基本式は次式による。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) < C_{\text{corr}} - C_{\text{init}} \quad (7.1)$$

D_c : コンクリートのみかけの拡散係数

C_0 : 表面塩化物イオン量

x : 表面からの距離

t : 時間

$\operatorname{erf}(\quad)$: 誤差関数 (以下の近似式を用いてよい)

$$1 - \operatorname{erf}(y) = 1 / (1 + 0.278393 y + 0.230389 y^2 + 0.000972 y^3 + 0.078108 y^4)^4$$

② C_0 は次式によって算出してよい。

$$C_0 = 1.2 \cdot C_{\text{air}}^{0.4} \quad (7.2)$$

C_{air} : 架橋地点における飛来塩分量($\text{mdd} \cdot \text{NaCl}$) $\text{mdd} = \text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$

ただし, 波しぶきが直接かかる可能性がある箇所については $C_0 = 13 \text{kg}/\text{m}^3$ とする。

③ C_{air} は次式によって与えてよい。

$$C_{air} = C_1 \cdot d^{-0.6} \quad (7.3)$$

ここに、 C_1 : 1km 換算飛来塩分量(mdd・NaCl)

ただし、 C_1 は表-7.3 のとおりとする。

d : 海岸線からの距離(km)

ただし、海上や海岸線上で 0km の場合は 0.001km とする。

表-7.3 C_1

地域区分	C_1
A	0.62 (1.0)
B	0.92
C	0.34

C_{air} は表-7.1 に示した地域区分ごとに与えた。 C_1 は、日本海沿岸部は平均値、関東以西の太平洋沿岸部、瀬戸内海沿岸部及び沖縄では、台風の影響を考慮して、ここでは平均値に $\sigma/2$ を加えた値とした。(地域区分 A(沖縄)について、台風の頻度が高いことを考慮して平均値に 1σ を加えた値とする場合には、 C_1 は 1.0 を用いる。)

④鋼材腐食発生限度濃度 C_{corr} は 1.2kg/m^3 としてよい。

⑤ C_{init} は初期塩化物イオン量の上限值 0.3kg/m^3 としてよい。工場などで、確実に初期塩化物イオン量を 0.3kg/m^3 よりも小さくできることが確実な場合には、それに応じて減じることができるものとする。

⑥設計年数：一般には 100 年とする。

⑦ D_c は W/C の関数とする。当面は、新標準示方書の式を用いてもよい。

なお、設計年数 100 年の道路橋の設計において、コンクリートの W/C を 40%程度とした場合には、表-7.4 の値を用いてもよい。

表-7.4 一般的な P C 桁の最小かぶり

対策区分	海岸線からの距離	最小かぶり (cm)
A	海上部および海岸線から 100m まで	(10)
	同 100m を超えて 200m まで	7
	上記以外の範囲	5
B	海上部および海岸線から 100m まで	(10)
	同 100m を超えて 300m まで	7
	同 300m を超えて 500m まで	5
	同 500m を超えて 1km まで	3.5
C	海上部および海岸線から 20m まで	(10)
	同 20m を超えて 50m まで	7
	同 50m を超えて 100m まで	5
	同 100m を超えて 200m まで	3.5

()内数値は、スーパー塩害対策を推奨する地域であるが、普通コンクリートのかぶりのみで対策する場合の参考値を示したものである。

7.5 かぶり規定のイメージの補足

(1) 表-7.1 に示した塩害対策の検討を必要とする地域のうち地域区分B、Cの範囲は、図-7.1(a)、(b)に示す設計年数 100 年の結果のうち、必要かぶりが 3.5cm を超える範囲とした。これらの D_c は $W/C=40\%$ 程度を想定したものであるが、暴露試験結果が適切であれば $D_c=2.02 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ は $W/C=44\%$ 程度に相当する。下部構造の場合、 W/C はもっと高い値を取るが、これまでの損傷実態では上部構造に比べて損傷が少ないことから、ここでは、上部構造を主体にして考えることとした。なお、地域区分B、Cは、式 7.3、表-7.3 によれば飛来塩分量が概ね 0.9mdd を超える範囲に相当する。

(2) 表-7.2 に示したスーパー塩害対策を推奨する地域の目安は、図-7.1(a)のうち必要かぶりが 6.5~7cm を超える範囲とした。沿岸部において、 $W/C=40\%$ のコンクリートでも必要かぶりがこの程度を超える場合には、スーパー塩害対策を検討の視野に入れる必要があると考えられる。なお、この地域の目安は、式 7.3、表-7.3 によれば飛来塩分量が概ね 3.6~3.9mdd を超える範囲に相当する。

(3) 海岸線上や海上部は $d=0 \text{ km}$ であるが、これを式 7.3 に適用すると C_{air} は 0 mdd となるので、このような場合は $d=0.001 \text{ km}$ とすることとした。 $d=1 \text{ m}$ 程度は海岸線と同等と見なせるものと考えられる。

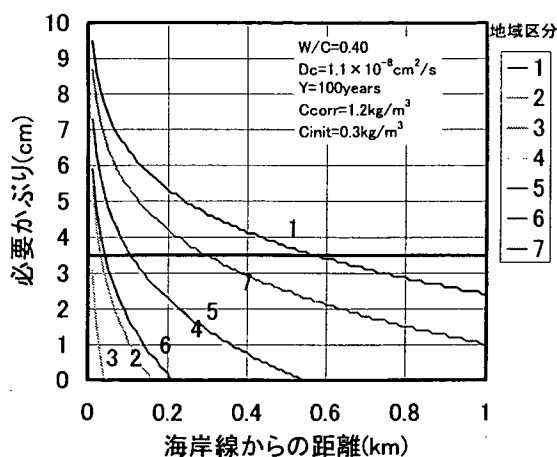
(4) d の最小値を決めたため、式 7.2 による C_o は最大でも 6 kg/m^3 程度となる。しかし、実構造物において波しぶきが直接かかる部位では C_o が $10 \sim 13 \text{ kg/m}^3$ 程度である事例が少なからず見られることから、標準示方書の飛沫帯の $C_o=13 \text{ kg/m}^3$ が妥当であると考え、ここでは 7.4 の②の但し書きを加えた。

(5) 表-7.4 は、ここでの必要かぶりの計算方法に基づいた場合の計算結果の一例を示したものである。工場製品などで、ある程度の実績のあるコンクリートを使用する場合には、実務的にこのような表を用意しておくのがよいと考えられる。表中の値は地域や工場などの実情に応じて別途検討が必要である。

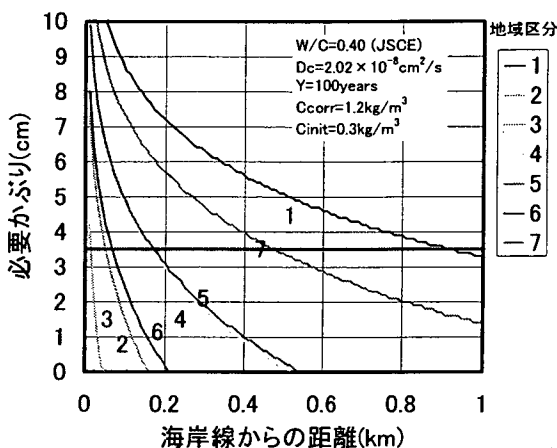
7.6 実測した飛来塩分量により設計する場合の留意点

(1) 飛来塩分量の測定方法

沿岸部において飛来塩分量を測定する場合には、文献 4.3)に示す「土研法」により測定する必要がある。JIS Z 2381 に示されているいわゆる「ガーゼ法」は飛来塩分量が比較的少ない場合には支障ないが、海岸線



(a) $D_c=1.1 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ の場合



(b) $D_c=2.02 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ の場合

図-7.1 必要かぶり試算結果
(設計年数 100 年)

上などで特に飛来塩分量が多い場合には過少評価するおそれがある。

飛来塩分量の測定期間は、飛来塩分量が季節変動することから、最低でも1年間とする必要がある。

文献 4.1),4.2)に示されるように、同じ海岸線であっても測定器を取り付ける位置によって飛来塩分量を過少評価する場合が想定されるので、測定機器の取り付け位置は周囲の状況をよく考えて慎重に選定する必要がある。

(2) 判定に際しての留意点

飛来塩分量を測定して必要かぶりを算定する際、海岸線からの距離、気象条件の相違による地域特性、季節変動、年変動等を十分把握しておくとともに、その周辺の既存の調査結果等との比較などによって慎重に検討する必要がある。

ここでの検討に用いた飛来塩分量(図-4.1)の多くは海に向かって開けた平野部で測定されたものである。沿岸部ではあるが高さ数10mの絶壁の上やそれよりも内陸であるなど、明らかに飛来塩分量が小さいであろうと考えられる場合には、飛来塩分量を実際に測定してそれが少ないことを確認した上で、必要かぶりを小さくしてもよいと考えられる。なお、海岸線であっても橋脚が高く、上部構造の位置が比較的高い場合には飛来塩分量が少なからうと思われても、背後に急峻な山が迫っている等、周囲の地形などの影響によっては一般的な値と変わらない場合があるので、単に構造物の高さだけにとらわれないように注意する必要がある。

8. 必要かぶりの安全率の考え方

8.1 飛来塩分量のばらつき

図-4.1 に示した飛来塩分量データのばらつきの要因は次のものが含まれる。

①飛来塩分量の測定誤差

測定器の取り付けの位置と向き、試料採取時の誤差、塩分濃度分析時の誤差等を含む。

②地形・標高の影響

飛来塩分量全国調査の測定箇所は比較的海に向かって開けた地点が選定されたが、厳密に言えば、多少の起伏は避けられないと考えられる。また、標高の影響もあると思われるが、これまでの調査結果ではその影響は明確でない。このため、これらの地形・標高の影響は無視してデータ整理を行っている。

③飛来塩分量の年変動

日本海沿岸部では、毎年の季節風がほぼ定期的に吹いているため、測定年の違いによって平均値が桁違いに大きく変わることはない。一方、台風の影響が考えられる関東以西の太平洋沿岸部や沖縄などでは、台風が襲来した年とそれ以外の年で1～2桁の差が見られる。

飛来塩分量にはこのようなさまざまなばらつきが含まれているが、地域別に見ればやはり平均値に差が見られており、それらの差は、風のデータやコンクリート橋の損傷状況とある程度の相関性が見られていることから、全く無視し得るものではないと考えられる。飛来塩分量の特性値として、これらのデータの平均値をとるか、ある程度のばらつき等を考慮するかは意見の分かれるところである。

仮に、図-4.1 の $m+2\sigma$ (m : 平均値, σ : 標準偏差)の値を特性値とした場合、飛来塩分量の実測値の上限に相当するが、これによって必要かぶりを試算すれば、設計年数50年の場合であってもおよそ現実的でない必要かぶりとなり、これまで塩害による損傷が全く見られなかった範囲でもかぶり増が必要という結果になってしまう。

仮に、図-4.1 の m の値を特性値とした場合、地域区分1など台風の影響のないところでは今回の試算結果のとおり概ね妥当な結果が得られたが、台風の来た年と来なかった年で平均値が2桁違う沖縄(地域区分7)では、飛来塩分量の特性値として過少評価してしまう結果となる。このことから、台風の影響のある地域では、ある程度のばらつきを考慮するのが妥当であると考えられる。ここでの試算では、 $m+\sigma/2$ とした。ちなみに、地域区分7で $m+\sigma$ とした場合は、概ね地域区分1で m とした場合よりも飛来塩分量がやや大きい値となる(図-7.3)。50年や100年といった長期間での飛来塩分量に着目すれば、毎年、定期的に多量の飛来塩分量が測定される日本海の地域区分1の方が、台風が通過した年に多量の飛来塩分量が測定される地域区分7よりも、飛来塩分量(総飛来塩分量あるいは設計年数中の平均飛来塩分量)は多い傾向にあると考えられる。このことから、沖縄の場合、 $m+\sigma/2$ から $m+\sigma$ の範囲が概ね妥当であると考えているので、ここでは、 $m+\sigma/2$ を特性値とした。なお、表-7.3 では、地域区分Aの C_1 として $m+\sigma$ とした場合についても括弧書きで併記した。

8.2 Co-Cair のばらつき

試算に用いた結果は、屋外に 2～3 年暴露した結果であり、塩化物イオン量の浸透量は比較的少ないが、Co と Cair の相関を見ることのできるこれだけの数のデータは他にはないと考えられる。比較的ばらつきが大きい塩分関係のデータにおいて、この程度の相関性が得られているのは良い方であると考えている。この式のばらつきを考慮するとした場合に、一般には安全側の線ということになるだろうが、必要かぶりの値の妥当性を見た上で、全体としてのばらつきの考慮の必要性和その程度をみるのが良いと考え、ここではとりあえずそのばらつきを考慮しないこととした。

8.3 Ccorr と Cinit の取り方

鋼材腐食発生限界塩化物イオン量 Ccorr は、国内では一般に $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ と考えられている^{8.1)}。これらは試験結果^{8.2)8.3)}から得られたものであるが、これまでの既設構造物の調査結果等^{8.4)8.5)}を見ると Ccorr はやはり $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ が妥当であり、 1.2 kg/m^3 以下では腐食の例はほとんど見られず、 2.5 kg/m^3 を超える場合には鋼材が既に腐食している場合が多い傾向にある。Ccorr は、厳密にはコンクリート中の塩化物イオン濃度の影響だけでなく、腐食に要する酸素の供給量に関わるかぶり厚や、乾湿繰り返し程度などによって異なることが知られている。 $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ の範囲はこれらのかぶり等の影響によって差が見られるものと思われるが現時点では明確でない。

コンクリートの製造時に混入する初期塩化物イオン量 Cinit は、今日、塩化物総量規制により 0.3 kg/m^3 以下に管理されているのでこの値を用いることとした。しかし、地域によっては Cinit の実績値が平均的に 0.1 kg/m^3 程度であったり、工場での管理により確実に 0.1 kg/m^3 程度以下に抑えられる場合がある。この場合には、適宜、Cinit の値を修正できるようにするのがよいと考えられる。

8.4 必要かぶりの安全率

以上のように、図-6.1 の試算結果は、便宜上、線で示しているが、実際はさまざまなばらつきを含む、ある程度の幅のあるものである。一度の発生で橋が終局に至る活荷重による曲げ破壊などに対しては、極値統計で扱うような設計年数中の最大値の分布をみる必要があると考えられるが、環境外力である Co(あるいは Cair)をこれと同様に扱ったのでは極めて過大な要求になってしまうことが今回の検討から分かった。この試算の中では、Co、Dc は概ね平均的な値を用いており、安全を見ているとすれば、Ccorr を下限値で見ているところと Cinit を 0.3 kg/m^3 としているところである。このほか、設計かぶりには、施工時におけるかぶりの誤差を勘案する必要がある。

ちなみに、新標準示方書では鋼材位置の塩化物イオン濃度のばらつきを考慮した安全係数 γ_{cl} (一般に 1.3) が示されているが、この根拠は現時点では明確にされていない。将来、より適切なかぶり算定方法が出てきたときに見直しの余地を残すためにはこのような係数についてもきちんと根拠付けが必要であると考えられるので、ここでの試算では 1.0 とした。なお、Ccorr から $C_{init}=0.3 \text{ kg/m}^3$ を差し引いて試算した結果は、 $C_{init}=0$ として $\gamma_d=1.3$ とした場合と概ね同程度の結果となることが分かる。

9. まとめ

- (1) 飛来塩分量全国調査の結果に基づき、必要かぶりの試算を行うとともに、実構造物の損傷状況調査結果と比較した結果、新標準示方書で示される C_o の値を軽減するのが現実的であるとともに、地域差を考慮する必要があることが分かった。
- (2) この試算方法を用いて設計年数 100 年とした場合の必要かぶりを試算した結果、塩害対策としてかぶり増で対応すべき範囲(海岸線からの距離)をより大きくする必要があるという結果となった。また、特に海岸線から数 10m の範囲では、従来のかぶり 7cm でも不足する結果となった。
- (3) 今回の試算方法に基づき、設計年数を 100 年とした場合の塩害対策地域におけるかぶり規定のイメージを示した。
- (4) 本試算における各パラメータのばらつきを整理するとともに、必要かぶりの安全率の考え方を整理した。

10. あとがき

コンクリート構造物の実態調査では、かぶり不足による損傷が少なくない。塩害対策指針(案)の適用橋梁ですらかぶり不足によるコンクリートの剥離などが見られ、道路橋示方書の最小かぶりすら得られていないようなかぶり不足の事例も見られた¹³⁾。本検討より、塩害対策指針(案)の設計年数を50年と考えた場合に、最小かぶりの設定が概ね妥当であることが分かったが、この施工管理に関しては必ずしも徹底できていなかったことから、今後は、コンクリートの単位水量検査や、非破壊検査機器によるかぶりの計測の導入も念頭に入れた施工管理のあり方を検討する必要がある。

新標準示方書の耐久性照査は、国際的にみても革新的なものであると考えられ、各照査の根拠の明確化は技術開発の促進にも貢献するところが少なくないと考えられる。本検討結果等を踏まえた上で、このような耐久性照査法を他の個別の構造物基準類にも早急に反映していくことが望まれる。

参考文献

[1章]

- 1.1) 西川和廣：橋の性能と耐久性,第一回鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム資料集,, 土木学会鋼構造委員会 構造物の維持管理研究小委員会,1999,7
- 1.2) 西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案, 橋梁と基礎, Vol.31, No8, 1997
- 1.3) コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究, 第 53 回建設省技術研究会指定課題, 2000.11

[2章]

- 2.1) 道路橋示方書コンクリート橋の詳説, 橋梁と基礎, p.63, 1979.4
- 2.2) 田村浩一, 近藤時夫：コンクリートの歴史<Ⅰ設計編 Ⅱ材料・施工編>, 最新コンクリート技術選書別巻, 山海堂, p.91, 1984.7
- 2.3) 鉄筋コンクリート標準示方書解説, 土木学会誌, 別冊 p.47, 1931.10
- 2.4) 吉田徳次郎：鉄筋コンクリート設計方法, 養賢堂, pp561-567, 1954
- 2.5) 前記 2.2)と同じ。p.212
- 2.6) 茂庭忠次郎：混凝土中に於ける鉄筋の錆, 土木学会誌, 1-3, p.1-22, 1915.6
- 2.7) 坂田時和：鉄筋混凝土に就いて, 土木学会誌, 7-1, p1-38, 1921.2
- 2.8) 殿谷良作：混凝土中に於ける鉄筋の錆, 土木学会誌, 2-1, p.25-30, 1916.2
- 2.9) 茂庭忠次郎：混凝土中に於ける鉄筋の錆, 土木学会誌, 2-3, p.31-47, 1916.6

[3章]

- 3.1) 平成 11 年版コンクリート標準示方書施工編－耐久性照査型－, 土木学会, 2000.1
- 3.2) 平成 11 年版コンクリート標準示方書施工編－耐久性照査型－改訂資料, コンクリートライブラリー99, 土木学会, 2000.1
- 3.3) 例えば, 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向, コンクリート技術シリーズ 26, 土木学会, 1997.12
- 3.4) コンクリート構造物の耐久設計指針(案), コンクリートライブラリー82, 土木学会, 1995.11
- 3.5) 池田道政：塩害によるコンクリート橋の損傷状況調査結果, 道路, 日本道路協会, 1984.2
- 3.6) 西川和廣, 田中良樹：飛来塩分量全国調査(Ⅳ)－飛来塩分量の分布特性と風の関係－, 土木研究所資料第 3175 号, 1993.3
- 3.7) 武若耕司：海洋環境下のコンクリートの含有塩分に関する既往調査結果の整理と分析, 第 43 回土木学会年次学術講演会概要集Ⅴ, pp.36-37, 1988

[4 章]

4.1) 前記 3.6 と同じ

4.2) 西川和廣, 田中良樹: 飛来塩分量の分布特性, 土木技術資料, 36-8, pp.54-59, 1994.8

4.3) 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XX)―無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領(改訂案)―, 建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (社)日本橋梁建設協会, 1993.3

4.4) 永野宏雄: 塩分汚染コンクリート構造物の診断手法の提案, 大成建設技術研究所報, 第 18 号, pp.69-73, 1986.3

4.5) 田中良樹, 渡辺博志, 藤田学: 高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性に関する研究, 第 23 回日本道路会議一般論文集(B), 日本道路協会, pp.338-339, 1999

[6 章]

6.1) 前記 3.5 と同じ

[7 章]

7.1) 木村恒夫, 高橋智巳, 仁科一義, 染谷保司: 暮坪橋(一括押し出し工法)の施工及び暴露試験計画, プレストレストコンクリート技術協会第 8 回シンポジウム論文集, pp.677-682, 1998.10

[8 章]

8.1) 大即信明ほか: 塩害(I), コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 技報堂, p.33, 1986.5

8.2) 宮川豊章: Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学博士論文, 1985.2

8.3) 大即信明, 横井聡之, 下沢治: モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響, 土木学会論文集, 第 360 号, pp.111-118, 1985.8

8.4) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志, 木村哲士: ポストテンション P C 桁の塩害劣化と耐荷力, コンクリート工学年次論文集, 22-3, pp.781-786, 2000

8.5) 木村哲士, 河野広隆, 田中良樹: 塩害を受けた P C 鋼材の腐食性状と伸び性能, 第 55 回土木学会年次学術講演会概要集 V, pp.724-725, 2000

[引用した基準類]

鉄筋コンクリート標準示方書, (社)土木学会, 1931

コンクリート標準示方書解説, (社)土木学会, 1940, 1949, 1956, 1967, 1974

プレストレストコンクリート道路橋示方書解説, (社)日本道路協会, 1968

道路橋示方書・同解説, III コンクリート橋編, (社)日本道路協会, 1978, 1990, 1994, 1996

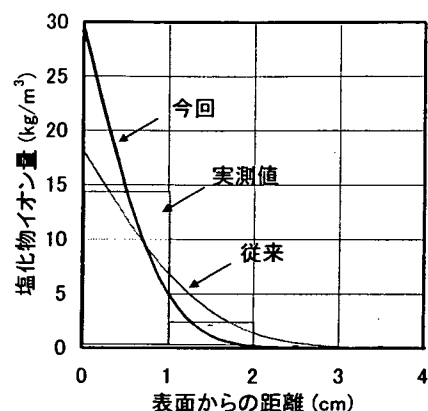
道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, (社)日本道路協会, 1984

参考資料 Co, Dc の算出

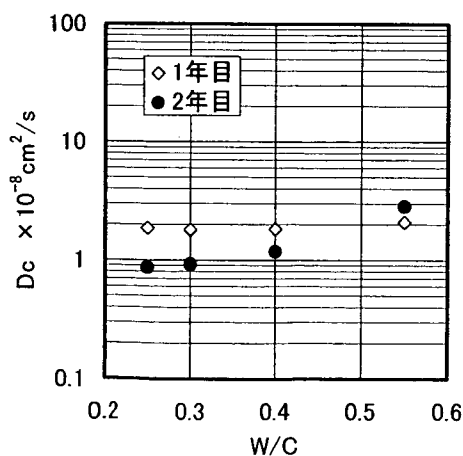
文献 1)のコンクリートブロック中の塩化物イオン量の分布から得られる表面塩化物イオン量 C_o 及びみかけの拡散係数 D_c は、正規確率紙による方法²⁾を用いて算出したものである。しかし、コンクリートの W/C が低い場合や暴露期間が短い場合には、コンクリート中への塩化物の浸透深さが浅く、 C_o 、 D_c を適切に算出するために必要なデータが得られない場合がある(できれば3個以上のデータがほしい)。

2個のデータの場合、正規確率紙による方法でも不可能ではないが、本文の図-4.4の C_o 及び図-5.1の D_c は、暴露試験で得られた2個の実測値(1スライス幅の範囲での平均値)と式6.1の各スライス幅ごとの平均値ができるだけ一致するときの C_o 及び D_c を用いた。付図-1は、室内試験における例であるが、従来の方法よりも適切なあてはめができていると考えられる。この例では深さ2~3cmの塩化物イオン量がほとんど0であったので、深さ2cmのところで既にほとんど0となるはずであるが、従来の方法では0になっていなかった。データ数が少ない場合に C_o のばらつきの範囲はどうしても大きい傾向にあるが、 C_o 、 D_c ともに従来の方法よりは適切な評価ができるものと考えられる。

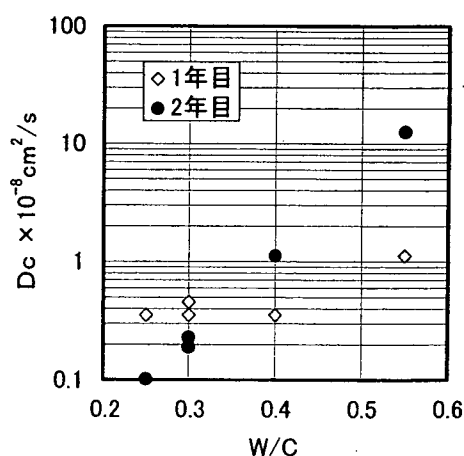
本文図-4.4では、塩化物の浸透量が比較的多い暴露期間2年以上のデータに限定して、2個のデータにより C_o と C_{air} の相関をみたものである。これにより得られた回帰式は、結果的には文献 1)の結果と大きな差は見られなかった。屋外暴露試験結果(2年目)の D_c は付図-2,3に示すように、従来の方法によった場合よりも W/C の影響が顕著に見られた。



付図-1 室内, 13w, W/C=40%の例



付図-2 従来の方法による D_c



付図-3 今回の方法による D_c