

委員会報告 「コンクリート構造物の構造・耐久設計境界問題 研究委員会報告」

梅原秀哲*

<委員構成>

委員長	堺 孝司 (香川大学)	
幹事	梅原 秀哲 (名古屋工業大学)	
主査	大賀 宏行 (東京都立大学)	岡本 享久 (日本セメント(株))
	前川 宏一 (東京大学)	
委員	市之瀬敏勝 (名古屋工業大学)	遠藤 達巳 ((財)電力中央研究所)
	下村 匠 (長岡技術科学大学)	杉山 隆文 (群馬大学)
	田中 仁史 (豊橋技術科学大学)	棚野 博之 (建設省建築研究所)
	中村 光 (山梨大学)	西田 朗 (清水建設(株))
	野口 貴文 (東京大学)	信田 佳延 (鹿島建設(株))
	藤井 栄 (京都大学)	増井 直樹 (株大林組)
	松本 信之 ((財)鉄道総合技術研究所)	三島 徹也 (前田建設工業(株))
	宮川 豊章 (京都大学)	安田 登 (東京電力(株))
	吉岡 民夫 (オリエンタル建設(株))	山下 英俊 (株ハザマ)
旧委員	金森 洋史 (清水建設(株))	倉本 洋 (建設省建築研究所)

1. はじめに

コンクリート構造物の設計は、安全性や耐久性の確保を目的として行われる。このうち構造安全設計は、構造材料が所定の性能を有するという前提の下ではほぼ体系的に確立されている。しかし、コンクリートの耐久性については、膨大な研究が行われているにも拘わらず、設計全体の中での位置づけなどが明確にされてこなかったために、研究成果が設計レベルまで一般化されることが少なかったようである。本来、設計は、構造物に想定される耐用期間にわたって所定の性能が達成されることを確実にするための手段であり、この目的のためには、構造設計と耐久設計が合理的に統合された設計体系、すなわち性能評価型統合設計を確立することが必須である。現在、構造物の設計法がISOなどに見られるように、世界的に仕様規定型から性

能評価型に移行する気運にある。日本でも建築基準法や土木学会コンクリート標準示方書が性能評価型に移行する予定である。

本委員会は、このような背景の中で平成7年に設置され、コンクリート構造物の構造設計と耐久設計の統合に向けて、2年間調査研究活動を進めてきた。その内容は多岐にわたり、既往の設計法における境界問題の現状、およびコンクリートの耐久性に関する研究の現状について整理すると共に、構造設計と耐久設計を統合した設計の枠組みを提案し、それらに基づく設計例を示した。ここで提案した設計法の枠組みは、性能設計 (Performance-Based Design) の概念を、コンクリート構造物を対象に、多くの試行錯誤を繰り返しながら具現化したものである。

2. 構造・耐久設計の現状

*名古屋工業大学教授 大学院工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

2.1 既往の設計法における構造・耐久設計境界領域

一般に、構造物の安全性や使用性は主に構造諸元、寸法・形態と材料(コンクリート、鋼材)の力学的特性と配置に大きく依存する。構造諸元に関わる決定項目を、主として構造安全性と使用性の観点から設計することを、ここでは便宜上、構造設計と呼ぶことにする。構造設計はこれまで、材料の品質の経時変化は十分に小さく、施工による欠陥も許容範囲内にあるものとして行われてきた。

長期にわたって安全性と使用性(美観も含む)を維持するには、構成材料の変質がある範囲に留まっていることが必要である。材料の変質は素材が持つ特性のみならず、構造物中での位置や、ひび割れ・塑性化等の力学的損傷の程度、構造物の諸元や寸法、更には構造応答自体にも関連する。したがって、耐久設計を適切に行うには、付与する材料特性や素材の選定、ならびに構造諸元・寸法等を同時に考慮することが必要である。一方、安全性や使用性の設計も、材料特性の経時変化と無関係ではない。現段階では、クリープなどの時間依存性や水和発熱などは、陽に設計の中で考慮されている。これらからも明らかな通り、安全性・使用性を確保するとともに、長期耐久性も同時に確保するには、構造諸元や材料特性の設定段階で両者を考慮しなければならない。

構造設計と耐久設計が相互に関連する問題の代表格は、鉄筋腐食を限界状態に設定したひび割れ幅制御である。上部構造物の多くは、耐久性の観点から設定されたひび割れ幅の限界状態で事実上、主鉄筋量が決定されている。鉄筋量やかぶりといった構造設計要目と、コンクリートの品質や鉄筋特性(表面被覆を含む)といった材料特性の両者で、鉄筋の腐食は規定される。現状では、鉄筋の品質の経時変化を考慮しないで、構造挙動からひび割れ幅を算出し、それが限界値に至らないことで耐久性を確保しようとするものである。

2.2 耐久(性)設計の現状

土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では、構造物の耐久性および耐久性設計に関する記述が随所に見られるが、現段階では、耐久性設計が設計全体のフレームの中に体系的に取り込まれた形式とはなっていない。施工編¹⁾では、構造物の耐久性を確保するための使用材料、配合、施工方法の仕様に関する規定が数多く見られる。また、定量的な規定よりもむしろ「できるだけ…しなければならぬ。」「十分に…しなければならぬ。」など、常に最良の技術の投入を求める記述の多いことが特徴である。

設計編¹⁾では、限界状態設計法によって体系化されている。耐久性設計の観点からは、使用限界状態における、ひび割れ幅の検討が興味深い。先ずコンクリート内部の鋼材の腐食に対する構造物の環境条件を区分し、環境条件とかぶり厚さから、許容ひび割れ幅を設定する。次に、構造物の形状、配筋、材料特性、作用荷重から、供用中の構造物に生じるひび割れ幅を算定し、許容ひび割れ幅との間で照査を行う。この方法は簡便ではあるが、構造物中の鋼材の腐食に関する諸要因を合理的に考慮することができる。その他、耐久性に関連する事項として、構造細目において、鋼材腐食の観点からかぶりの最小値が、コンクリートの打込みの観点から鉄筋のあきに関する仕様が規定されている。

このように、土木学会コンクリート標準示方書では、耐久性設計に関しては、耐久性を実現するための仕様の規定、部分的な事項の照査が示されているだけであり、安全性と同レベルの設計が行える形式になっていない。そこで、コンクリート構造物の耐久性を体系的に設計する枠組みを早急に呈示すべく、土木学会コンクリート委員会に耐久性設計小委員会が設置され、1989年にコンクリート構造物の耐久設計指針(試案)²⁾が作成された。耐久性設計に関してはそれまで前例がなかったことから、新しい手法が採用されている。1995年には改訂が行われ、耐久設計指針(案)³⁾が刊行された。

いずれも基本的には、構造設計の方法に準拠している。すなわち、先ず構造設計における断面力に相当する環境指数を、構造物の環境条件とメンテナンスフリーの期間により決定する。次に耐力に相当する耐久指数を構造物の材料、設計（構造細目）、施工に関する事項より算定し、照査を行う方法が採られている。この方法の特徴は、構造物の耐久性を耐久性ポイントという一元的なインデックスにより表し、その総和をとる方法により定量化したことである。本指針（試案および案）は、新設構造物の耐久性照査であるため、安全性照査（構造設計）と並列して行うことができる。しかしながら、耐久設計の確立が急務であったので、構造設計と耐久設計を統合して設計体系を組み直すところまでは、目標とされなかった。

3. 耐久性に関する研究の現状

コンクリートの耐久性に影響を及ぼす要因として、塩害、中性化、アルカリ骨材反応、乾燥収縮、凍害などがある。委員会ではこれらの現象が、コンクリート部材の構造特性に及ぼす影響についての研究の現状について調査を行ったが、ここでは特に塩害を中心に述べる。

塩害と構造設計との統合は、塩化物イオンの浸透の結果発生する鉄筋腐食によって、鉄筋の力学的特性およびコンクリートとの付着特性などが低下して、構造耐力が低減する全過程を合理的に評価することによってなされる。これを時系列で表したのが、図-1である。

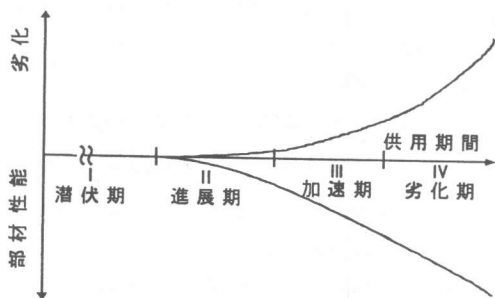


図-1 塩害と構造耐力の低下

各時期は、それぞれ次のように説明される。

①潜伏期 (Δt_1)

コンクリート中への外部塩化物イオンの侵入、および鉄筋近傍における腐食発生限界量までの塩化物イオンの蓄積段階

②進展期 (Δt_2)

水と酸素の供給下における継続的な腐食の進行段階

③加速期 (Δt_3)

軸方向のひび割れ発生以降の急速な腐食段階

④劣化期 (Δt_4)

腐食減量が増大し、部材としての耐荷力に影響を及ぼす段階

時系列に従って潜伏期から劣化期までを連続して予測できるモデルの研究は少なく、各段階を分離して予測する手法が採られている。潜伏期のモデル化は、JCI「反応モデル解析研究委員会」の報告書⁴⁾などに詳細に記述されており、進展期のモデル化についての研究と比較して多くの研究が行われている。潜伏期を予測する塩化物イオンの浸透のモデル化および進展期以降を予測する鉄筋の腐食速度のモデル化は、実際の現象を物理化学および電気化学における理論式に基づくことになる。しかし、これらの複雑な現象をモデル化するために、いくつかの仮定が必要となるのが現状である。特に、縦ひび割れの影響を定量化するための研究は少ない。また、実現象で比較的影響度の大きいと思われる要因が考慮されるが、その定量化については、実験式から求められる場合が多い。JCI「コンクリート構造物の補修工法研究委員会」において、塩化物イオンの浸透と鉄筋の腐食、そしてひび割れの発生までのモデル化が試みられている⁵⁾。また、土木学会「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」の中でも、塩化物イオンの浸透から鉄筋の腐食までの最近の研究成果が整理されている⁶⁾。いずれにせよ、今後の研究から得られる成果が、無理なく取り込めるようなモデルの構築が必要である。

4. 構造・耐久統合設計の枠組み

性能規定は、構造物が保有すべき性能を規定するものであり、例えば、施工性、使用性、安全性（耐震を含む）、耐久性、などが考えられる。ここで重要なことは、それぞれが要求性能として容易に設定できることである。しかし、必ずしも性能を直接表現するものでなくても、それらを適当に分類あるいはブレークダウンして要求性能とすることもできる。

例えば、現行の土木学会コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕¹⁾では、地震後の供用性に着目して、地震後にも機能は健全で、補修をしないで使用可能（耐震性能1）、地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない（耐震性能2）、構造物全体系が崩壊しない（耐震性能3）を要求性能として選択できるものとしている。耐久性についても同様に考えることが可能である。すなわち、耐久性上の観点から、供用開始時の状態を維持する（耐久性能1）、ある程度の劣化は許容するが、補修をしないで使用可能（耐久性能2）、著しい劣化が発生するが耐荷力は低下しない（耐久性能3）などとして扱うことも可能である。使用性についても全く同様に考えることができるが、この場合、安全・耐震性能と異なるのは、たわみやあるいはひび割れ幅などに対して直接制限値を設定できることである。もっとも、耐震性においても、直接残留変形に制限を設けて所要の性能を確保する考え方もある。

何れにしても、性能規定では、構造物の設計上必要となる性能が漏れなく適切な形で与えられていればよいが、ここで重要なことは、それらが性能照査技術とリンクしていることである。特に、限界状態を設定する場合には、要求性能に対応し得る限界状態であることが必須である。

図-2 に、構造・耐久統合設計の枠組みを示し、その内容を以下に述べることにする。なお、ここでは必要最小限の項目についてのみ記述していることに注意されたい。

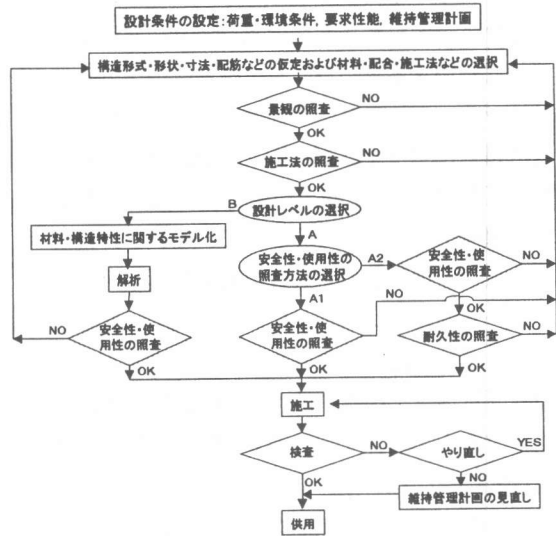


図-2 構造・耐久統合設計法の全体フロー

1. 総則

2. 要求性能と荷重環境作用

2. 1 一般

(1) 施工性、使用性、安全性、耐久性、美観・景観、

(2) 環境負荷、社会・文化・経済性

2. 2 施工性

2. 3 使用性

(1) 使用者の五感を満足する性能（乗り心地、震動、景観・美観、見た目の不安、臭気）、水密性、気密性、遮音性

2. 4 安全性

2. 5 美観・景観

2. 6 環境負荷

2. 7 社会・文化・経済的観点からの要件

3. 性能照査・検査

3. 1 一般

(1) 材料・構造特性および荷重・環境作用を考慮して構造物の挙動を定量的に評価し、その結果をもとに要求性能の照査を行うことを原則とする。

・ 構造物の挙動を定量的に評価するために、構造モデル、材料モデル、物質移動モデル

など、必要なモデルを適切に定めなければならない。

- ・塩化物イオン、酸素、水分、二酸化炭素のコンクリート中への浸透およびそれによって発生する化学反応などについては、適切なモデルを用いてよい。
- ・凍結融解作用および化学的作用によるコンクリートの劣化（ひび割れor分解）および欠損（スケーリングor脱落）については適切なモデルを用いてよい。

- (2) 適当な性能試験あるいは検査により要求性能が判定できる場合には、それらをもって設計要件の照査に代えることができる。
- (3) 構造物の挙動を経時的に追跡評価することが困難な場合には、要求性能に対応する限界状態を適切に設定し、材料、部材あるいは構造が、それぞれの限界状態に到達しないことをもって、性能の照査とすることができる。
- (4) 照査や検査の信頼性などを考慮して、性能照査には適当な安全余裕度を見込むものとする。

3. 2 施工性の照査

3. 3 使用性の照査

- (1) 使用性の照査は、供用期間中に構造物に作用する常時荷重・環境作用と主たる変動荷重・環境作用を考慮した定量的な評価に基づいてなされねばならない。
- (2) (1)の方法が困難な場合には、材料、部材あるいは構造物に対して適当な限界状態を設定し、使用性能の照査を行ってよい。
- (3) 環境作用に対する構造物の挙動の定量的な評価が困難な場合、環境作用の影響を考慮するために新たに要求性能として耐久性能を設定し、これらに対して照査を行ってよい。耐久性能としては、供用開始時の状態を維持する耐久性能1、あるいは機能を損なわない程度の劣化は許容するが、構造物としての補強を必要とし

ない耐久性能2を設定することができる。この場合、使用性に関する力学的評価には、必要に応じて適当な安全係数を考慮するものとする。

- (4) 各耐久性能の照査では、考慮すべき環境作用に対応して適当な耐久指標を設定してよい。
- (5) 各耐久指標の算定には、コンクリートに力学的に発生するひび割れの影響および異なる環境因子による複合効果を適切に考慮しなければならない。
- (6) 塩化物イオンの蓄積および中性化の進行、鋼材の腐食、およびコンクリートのひび割れ発生・進展などの評価は、適当な方法によってよい。
- (7) 凍結融解作用および化学的作用によるコンクリートの劣化あるいは損傷の程度は適当な方法によってこれを評価してよい。
- (8) コンクリートの透水量の評価には適当な透水モデルを用いてよい。

3. 4 安全性

- (1) 安全性の照査は、供用期間中に構造物に作用する常時荷重・環境作用と主たる変動荷重・環境作用を考慮した定量的な評価に基づいてなされねばならない。
- (2) (1)の方法が困難な場合には、材料、部材あるいは構造物に対して適当な限界状態を設定し、安全性の照査を行ってよい。
- (3) 材料、部材あるいは構造物の限界状態指標値の算定には地震作用および環境作用の影響を適切に考慮しなければならない。
- (4) 地震作用に対する安全性の照査では、耐震性能として、地震後にも機能は健全で、補修をしないで使用可能な耐震性能1、地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない耐震性能2、および地震によって構造物全体系が崩壊しない耐震性能3を設定することができる。
- (5) 各耐震性能の照査は、それぞれ適当な地震動に対して行うものとする。

(6)(3)において環境作用の影響を力学的挙動と連成して評価することができない場合、耐久性能として新たに、大規模な補修あるいは補強を前提とする耐久性能3を設定することができる。この場合、力学的挙動における安全性の評価には、必要に応じて適当な安全係数を考慮するものとする。

(7)耐久性能3に対する照査は、環境作用によって発生する劣化状態を適切に評価してこれを行わなければならない。

5. 照査指標の提案

ここでは、3章で述べた塩害について照査指標の提案を行う。これまでの研究報告などを参考に、塩害に関して想定される限界状態を、以下の3つに分類した。

- ①鉄筋表面の塩分量が腐食発生量以下（限界状態Ⅰ）
- ②腐食ひび割れの発生（限界状態Ⅱ）
- ③腐食ひび割れ幅が許容値以下（限界状態Ⅲ）

所定の要求性能に対して、耐用年数期間内上の限界状態に達しないことを確かめることによって、照査は完了する。

5.1 限界状態Ⅰ

限界状態Ⅰに対しては、以下の照査を行うことにする。

$$t \leq \Delta t_1 \quad (1)$$

ここで、 t ：耐用年数、 Δt_1 ：潜伏期間

図-3に、潜伏期間 Δt_1 の算定に最低限必要と思われる項目およびその計算過程のフローを示した。

モデルは、塩化物イオンの拡散および移流による移動を支配する方程式と質量保存則を合せた次の方程式を用いる場合が考えられる⁷⁾。

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\text{div}[D_a \cdot \nabla(C_f)] + C_f J_w \quad (2)$$

ここで、 C_t ：全塩分量 (kg/m^3)、 C_f ：塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D_a ：見かけの拡散係

数 (cm^2/s)、 u ：移流速度ベクトル (cm/s)、 J_w ：水分流速ベクトル ($1/\text{s}$)

全塩分量、固定塩分量および塩化物イオン濃度（自由塩分量）との関係を考慮して式(2)を、数値解析することになる。また、見かけの拡散係数、 D_a は、コンクリート中の細孔構造の変化と不均一性、温度、湿度などに影響を受けると考えられる。

移流による塩化物イオンの移動については、主に乾燥後に湿潤状態に変わるときの吸水による移動を考慮するためのものであるが、著しく乾燥期間が長期になる場合以外は、吸水による移動は極表面層部に限られると考えられるので、その場合は式(2)中の移流の項は除外しても良いと思われる。また、ひび割れが存在する場合には、その中の液相の移動に伴って塩化物イオンも移動すると考えられる。しかし、ひび割れ中の移流速度についての研究は極めて少ない。

境界条件の設定では、海中部のコンクリートの場合、表面塩分量を一定とするのが一般的である。また、乾湿の繰り返し、降雨による洗い流しさらに炭酸化などの影響を受ける陸上構造

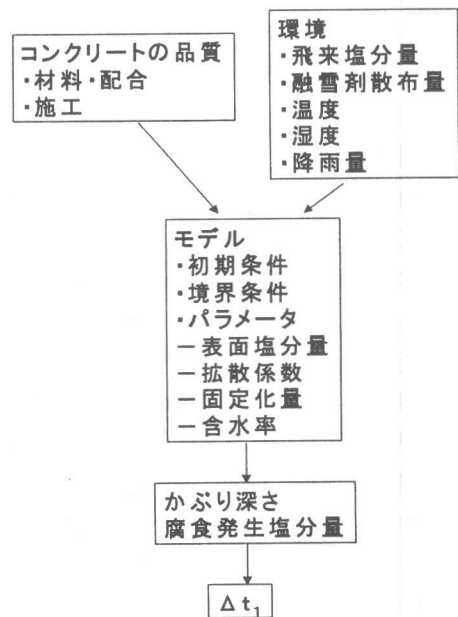


図-3 Δt_1 の計算フロー

物については、境界条件は極めて複雑になる。暴露実験から求められた表層部における塩分量の経時変化を参考にする場合には、境界条件は次式のように設定することもできる。

$$C_t = C_s \{x = 0, t \geq 0\} \quad (3)$$

ただし、 $C_s = C_0 \{1 - \exp(-\beta t)\}$ 、 β 、 C_0 は環境条件を考慮して、実験から同定される係数である。

陸上部のコンクリート構造物においては、飛来塩分量の経時的な計測データが必要不可欠になる。しかし、飛来塩分量をそのまま表面塩分量と仮定して、境界条件を設定することはできないと思われる。また、融雪剤を散布する寒冷地の橋梁では、融雪剤の散布量や塩水の流路を明らかにして、塩分の浸透が問題となる部材箇所を特定する必要がある。

5.2 限界状態ⅡおよびⅢ

限界状態ⅡおよびⅢに対しては、以下の照査を行うことになる。

$$t \leq \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \quad (4)$$

ここで、 t ：耐用年数、 Δt_1 ：潜伏期間、 Δt_2 ：進展期間、 Δt_3 ：加速期間

機能に関する限界状態の設定に従って、進展期および加速期の期間が決定される。例えば、機能上腐食ひび割れの発生が限界状態と考えられる場合には、ひび割れ発生以降の腐食に相当する加速期は、除外される（限界状態Ⅱ）。一方、腐食ひび割れの発生は許容されるが、機能上ひび割れ幅に対して限界状態が設定される場合には、そのひび割れ幅に対応する腐食量に達するまでの加速期が考慮される（限界状態Ⅲ）。

(1) 進展期の算定

塩害が問題となるコンクリート構造物に発生する鉄筋の腐食は、カソードにおける溶存酸素の還元量によって、その腐食速度は支配される場合が多いと考えられる。つまり、進展期は酸素の拡散および鉄筋表面部への到達量による律速過程であると仮定できる。酸素の拡散が小さくなる飽和状態または海中部のコンクリートで

は、腐食の進行は極めて小さい。しかし、降雨や湿気などの影響を受ける陸上構造物の場合で、コンクリート中の飽和度が60～80%の程度の時は、酸素の拡散が大きいために、腐食の進行は極めて早いと考えられる^{8), 9)}。図-4に進展期の算定までの計算フローを示した。

腐食速度、 VW_{corr} が算定されると、腐食ひび割れが発生するときの腐食量(W_{cr})を、厚肉円筒型の弾性解析や鉄筋及び腐食生成物を弾性体としてコンクリートを弾塑性体としたFEM解析などから予め算定することによって¹⁰⁾、進展期は次のように計算できる。

$$\Delta t_2 = \frac{W_{cr}}{VW_{corr}} \quad (5)$$

一方、塩化物イオンの拡散が支配する潜伏期と比較して、進展期は極めて短期間であると考えられる。したがって、ひび割れ発生時期を推定する場合、進展期を除外して、潜伏期だけを用いることも考えられる。環境条件、コンクリートの品質、配筋や鉄筋の特性に関わらず、 Δ

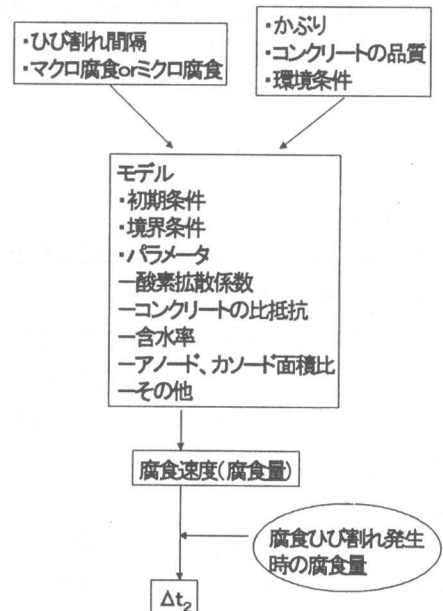


図-4 Δt_2 の計算フロー

$t_2 = 0$ 年とすることは、安全側の評価にもなる。また、ひび割れの発生には、単に鉄筋の腐食量だけでなく、乾燥収縮などの環境条件や死活重や活荷重などによる応力状態にも少なからず影響を受けると考えられる。しかし、これらのことを考慮した研究は見当たらない。

かぶりコンクリートが剥離することによって、鉄筋は大気中に曝され、その結果腐食の速度は著しく増加すると考えられることから、かぶりコンクリートの剥離が限界状態の一つになる場合がある。かぶりコンクリートの剥離は、かぶりおよび鉄筋径のある組み合わせで決まる場合も考えられる¹¹⁾。

(2) 加速期の算定

加速期は、腐食ひび割れが発生した後の腐食速度の増加と、それに伴う腐食量の増加に関連する。腐食量とひび割れ幅の関係は、かぶりおよび鉄筋の種類と、その径が一定ならば、概ね線形関係で表せる¹²⁾。ただし、ひび割れ後の腐食速度に関する研究は、極端に少ない。いずれにせよ、腐食ひび割れの発生後の腐食速度、 VW_{cr} 、およびひび割れ幅の規制値に従って決定される腐食量、 W_{corr} との関係から、加速期は次のように計算できる。

$$\Delta t_3 = \frac{W_{corr}}{VW_{cr}} \quad (6)$$

6. 設計例

耐久設計と構造設計の時系列に従った連続的な統合を図るための最初のステップとして、ここでは、現状の照査技術を踏まえて、要求性能から定められた限界状態を満足することを照査する手法について、塩害環境下における RC 橋脚の例を示すこととする。

【要求性能】

供用開始 100 年経過しても、設計段階における所要の安全性を確保できる範囲内で、機能の著しい低下が起きないこと。

ここでは、簡略化のために、供用期間中の地震などによる損傷は無いものとする。

【限界状態】

耐用年数 100 年後の腐食ひび割れ幅は 0.8mm 以下（参考：補修の実施判定の基準値）で、機能上の問題無し。なお、耐用年数期間内に、補修を実施することを許容する。この際、補修の効果を期待するために、鉄筋表面の塩分量が腐食発生の限界値に達する前に補修を行なうこととする。

【設計】

対象地域は、道路橋の塩害対策指針（案）の対策区分 I に相当し、最小かぶり 7.0cm で、水セメント比 55% 以下である。普通ポルトランドセメントを使用して、スランプは 8cm とする。呼び強度は 27MPa とする。

施工に関しては、道路橋の塩害対策指針（案）に従うものとする。材料に含まれる初期塩分量はゼロで、モルタルスペーサを使用し、補助鋼材はかぶり外とする。かぶりの施工誤差を 1.0cm とし、主筋は D32 を用いる。

【照査—解析条件】

環境に関する要因

気温変動は、年間最高気温 25℃、最低気温 2℃で、湿度変動は、年間湿度平均 65% とする。飛来塩分量は 8 mg/cm²/年（対象部位での推定値）で、年間降雨量は 1200mm である。

微気候

対象部位は厳しい海側で北東向き（特に日照時間の長短による影響は無し）で、雨水の排水経路の心配はない。ただし風向き次第では降雨を直接激しく受ける。

コンクリートの材料・配合、施工

普通ポルトランドセメントを単味で使用し、単位セメント量は 320kg/m³、水セメント比を 55% とする。鋼製型枠を使用し、養生日数は 3 日以上とする。打継目は下地処理およびポリマーセメントモルタルの塗布などを行うことにより、塩分浸透経路にならないようにする。締固めは良好で、有害なブリーディング量を生じない。温度ひび割れや沈下ひび割れは発生しないものとする。

補修工法

電気化学的脱塩処理および表面被覆材の塗布の組み合わせとする。

【照査-解析ツール】

潜伏期のモデル

式(2)を使用する。ただし、1次元浸透解析として、吸水による塩分の移動は表層部に限られるので、 $J_w=0$ としてよい。初期条件は $C=0\text{ kg/m}^3$ 、 $t=0$ 、 $x>0$ かつ $x=0$ で、境界条件は式(3)を使用してよい。ただし、環境条件を考慮して、 C_s および β を適切に決定すること。拡散係数の経時的および位置的变化については、環境条件に応じたコンクリート中の相対含水率変化、温度変化およびコンクリートの品質および施工条件を考慮すること。塩化物イオンの固定化については、配合・材料および環境を考慮すること。

補修後

初期条件を変えて($C=0.3\text{ kg/m}^3$ 、 $t=0$ 、 $x>0$ かつ $x=0$)、同様に浸透解析を実施する。

腐食発生のinput条件

腐食発生塩分量を 1.2 kg/m^3 、かぶりを 60 mm とする。

進展期のモデル

式(5)を使用する。ひび割れ発生腐食量は 50 mg/cm^2 、腐食速度は $20\text{ }\mu\text{ m/年}$ ($15.7\text{ mg/cm}^2/\text{年}$)としてよい。(腐食は酸素拡散による律速とする)。

加速期のモデル

式(6)を使用する。腐食速度(腐食ひび割れ後)を $50\text{ }\mu\text{ m/年}$ ($39.3\text{ mg/cm}^2/\text{年}$)としてよい。ひび割れ幅を $w_{cr}=0.8\text{ mm}$ 、鉄筋腐食量を $W_{corr.}=80w_{cr}+10=74\text{ mg/cm}^2$ とする。

【照査結果】

ここでは、仮想照査の結果を示すこととする。 $\Delta t_1=15\text{ 年}$ (供用後15年経過後に鉄筋表面の塩分量が腐食発生塩分量に達した)

↓
補修として脱塩処理工法を実施、その後エポキシ系の被覆材でコンクリート表面を塗布

↓
鉄筋表面の塩分量を、 0.3 kg/m^3 に減少、さらに塗膜によって塩分の浸透及び酸素の供給が絶たれる。この時、脱塩で排除できなかった塩分の再拡散を考慮して解析し、85年経過(100-15=85)しても鉄筋表面の塩分量は腐食発生量を超えないことを確認する。

↓
塗膜の劣化を20年とする。つまり補修後20年経過して、再び塩分が浸透し始める。

↓
初期条件・境界条件を考慮した塩分浸透解析を実施する。 $\Delta t_1=12\text{ 年後}$ 、つまり、供用開始後47年(15+20+12=47)経過して、鉄筋表面の塩分量が腐食発生量に達する。

↓
前回と同様な補修を実施する。

↓
塗膜の劣化を20年とする。(供用開始後:47+20=67年)

↓
塩分浸透解析を実施する。 $\Delta t_1=12\text{ 年後}$ に鉄筋表面で腐食発生塩分量に到達する。(つまり供用開始後67+12=79年後)

↓
前回と同様な補修を実施する。(ただし塗膜の種類を変更)

↓
塗膜の劣化を10年とする。(供用開始後79+10=89年後)

↓
塩分浸透解析を実施する。 $\Delta t_1=7\text{ 年後}$ に鉄筋表面で腐食発生塩分量に到達する。

↓
腐食ひび割れ発生までの期間 Δt_2 を解析する。 $\Delta t_2=3\text{ 年}$ (供用開始後99年=89+7+3=99)後にひび割れが発生する。

↓
限界状態は腐食ひび割れ幅=0.8mm(解析により $\Delta t_3=2\text{ 年}$ が得られる:供用開始後101年、

99+2=101年)であるので、耐用年数(100年)期間内には、限界状態に達しないことになる。

次に、主鉄筋が所定の腐食量(74mg/cm³)にある場合の引張強度および剛性の低下を考慮して、当該橋脚に対する安全照査を適切なモデルを用いて実施し、要求性能を満足することを確認する。

7. まとめ

本研究委員会では、現行の構造・耐久設計とそれらを支える技術の現状を明らかにするとともに、コンクリート構造物の設計のあるべき姿の観点から新しい統合設計の枠組みを構築した。ここで提案した設計の枠組みの特徴をまとめると以下の通りである。

- (1)基本的な設計概念は「性能評価」である。
- (2)構造物の挙動をあるがままに把握することを最終的なゴールとする。
- (3)将来開発される技術が無理なく設計に組み込むこと、すなわち技術の発展レベルに応じた合理的な設計を可能にする。
- (4)安全性と耐久性が合理的に組み込まれていること、すなわち統合設計である。

構造物の設計を要求される性能に基づいて行なおうとする概念は、必ずしも新しい考え方ではなく、基本的にこれが設計の原点であったはずである。ところが、技術の未成熟と効率性の要請から見なし規定に基づく仕様設計が拡大してきた経緯がある。このことは特に耐久性に関する設計で多く見られる。構造設計における限界状態設計法は基本的に性能設計である。しかし、これらのほとんどは全体の枠組みが必ずしも明確ではないこと、構造細目に見られるように仕様設計が混在することなど、統一的な性能設計となっていない。このような設計の形態が、問題の所在と目指すべき将来の方向を見えなくしてきたきらいがある。したがって、設計の原点である「性能評価」を今一度明確に認識することの意味は大きい。

参考文献

- 1)平成8年制定コンクリート標準示方書、土木学会、1996.3
- 2)コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)、コンクリートライブラリー第65号、土木学会、1989.8
- 3)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第82号、土木学会、1995.11
- 4)セメントコンクリートの反応性モデル解析の現状と今後の展望、日本コンクリート工学協会、反応モデル解析研究委員会報告書(I)、1996
- 5)補修工法の性能評価のための解析的手法、日本コンクリート工学協会、コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(Ⅲ)、1996
- 6)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、土木学会コンクリート技術シリーズ26、1997
- 7)Saetta,V.A., Scotta,V.R. and Vitaliani,V.R.: Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete, ACI Materials Journal, V.90, No.5, pp.441-451, 1993.
- 8)宮川豊章、松村卓郎、小林和夫、藤井 学:鋼材腐食からみたコンクリート中での酸素透過性の検討、土木学会論文集、第408号/V-11、pp.111~120、1989.
- 9)関 博他:コンクリート構造の寿命予測に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp.569~574、1990
- 10)補修工法の性能評価のための解析的手法、日本コンクリート工学協会、コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(Ⅲ)、1996.
- 11)松島 学他:鉄筋の腐食膨張によるひび割れモード、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.727~732、1993
- 12)武若耕治、松本 進:コンクリート中の鉄筋がRC部材の力学的性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.6、pp.177~180、1984