

900/

密実なコンクリート構造物を実現する  
設計・施工方法に関する研究

國 島 正 彦

## 論文の内容の要旨

論文題目 密実なコンクリート構造物を実現する  
設計・施工方法に関する研究

氏名 國島正彦

近年、コンクリート構造物の耐久性に対する疑問が呈されるようになり社会問題の一つとなっている。コンクリートの劣化について、凍結融解、中性化、塩害、アルカリ骨材反応等の個々の事象については、これまでに数多くの研究が報告されている。コンクリート構造物の耐久性設計体系を確立するためには、従来の安全性に重点をおいた狭い意味の設計と共に、コンクリート材料の品質や施工の良否をも考慮するのが合理的である。しかし、現在のところ、耐久性に関して体系的に規定された示方書は存在しない状況といえる。

本研究は、耐久性の優れたコンクリート構造物を社会に広く実現できるシステムを確立することを目的としたものである。実構造物において、外気からの環境条件の影響を直接に受ける部材表面付近に、空隙の少ない密実なコンクリートを実現して、内部の補強鋼材の腐食欠損の誘因を低減させることに着目して、材料、設計および施工の過程を総合的に取り扱ったコンクリート構造物の耐久性設計体系の枠組みとなる新しい基本概念を提案した。この基本概念の妥当性について実験的に検証すると共に、我が国のコンクリート構造物の建設の現状を分析して、密実なコンクリートを実現するために障害となる施工が困難な設計を施工が容易な設計とする具体的方法について論じた。さらに、耐久的なコンクリートを実現するために、現在の施工の過程を改善すべき方法について提案した。

これまでのコンクリート構造物に関連する示方書は、荷重作用に対する安全性を強く意識した設計体系であり、材料および施工に関して、耐久的なコンクリートのための必要最小限度の規定はされているが、広い意味での耐久性設計を確立しようとする意識は低いのが現状である。本研究は、コンクリート構造物の建設における、材料の選定、狭い意味の設計および施工の過程を総合的に評価した耐久性設計体系の第一歩となる枠組みを確立したものである。

以下に、各章の内容について概説する。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的および我が国のコンクリート構造物の建設の過程において、耐久的なコンクリートを実現するための問題点について論じた。

第2章では、総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計体系の枠組みを提案した。すなわち、材料、設計および施工について、標準の場合、標準より優れている場合

および標準より劣っている場合の3段階のレベルを設定し、コンクリート構造物に要求する耐久性能を満足させるために、各レベルの組み合わせをどのように定めるかが耐久性設計であるという新しい概念を提案した。この場合に重要となる、材料、設計および施工のそれぞれのレベルを設定する場合に影響する要因について、コンクリート部材表面部付近に密実なコンクリートを実現することに着目して論じた。

第3章では、新しい耐久性設計体系の基本概念である、部材の耐久性能レベルは、材料、設計および施工のレベルの総合的な組み合わせで達成され、その組み合わせ方法は幾種類も可能であるという柔軟な考え方の妥当性を実験的に検証した。鉄筋コンクリート橋梁部材の一部をモデル化した標準より劣る設計レベルに、施工および材料の各レベルを組み合わせた供試体を製作し、部材表面部の赤インク水の浸透深さを測定することによって、それぞれの組み合わせに対する密実さを定量的に評価した。

第4章では、設計の過程について、密実なコンクリートを実現するための問題点と解決策について論じた。すなわち、現在の我が国のコンクリート構造物において、標準的な材料と施工方法とを組み合わせた場合には、密実なコンクリートを実現することが困難と考えられる、施工のやりにくい標準より劣る設計事例について整理して論じた。施工の過程において、コンクリートの行き渡りを向上させ締め固め作業が容易となる部材断面形状、鋼材のあき、かぶりおよび最小鋼材量等の構造細目について実構造物での検証にもとづき、施工のし易い標準の設計方法を提案すると共に、設計の意図を施工の過程に確実に伝達するための、新しい設計図の表示方法について提案した。

第5章では、施工の過程について、密実なコンクリートを実現するための問題点と解決策について論じた。すなわち、示方書の規定の意図がどのようなものであれ、現在の我が国の施工の実態は、大部分は標準の施工レベルであるとの認識のもとに、この状態と材料および設計の各レベルとを組み合わせた場合に、標準の耐久性能レベルを維持するために必要な事項を提案すると共に、標準より優れたコンクリートの締め固めに関する施工方法について論じた。

現場条件によって異なる、適切なフレッシュコンクリートに仕様の選定および打ち込み・締め固め方法を、積算価格に反映しつつ柔軟に採用できる特記仕様書の書式を提案した。標準より優れたコンクリート部材表面部の締め固め方法として、沈下ひびわれを修復するとともに、コンクリート表面に沈下ひびわれが顕在化しない場合であっても、打ち込み表面の沈下によって生ずる内部の潜在的欠陥の程度を小さくできる表面締め固めバイブレータを開発し、その実際の構造物における効果と既往の研究成果の意義について論じた。

第6章では、土木学会コンクリート標準示方書設計編・施工編における耐久性設計の現状および本研究の位置づけと意義について論じた。現行の示方書では、安全性あるいは耐荷力については重視しているが、耐久性に関して体系的な規定とはなっていないと考えられ、材料、設計および施工に関して耐久性を意識した個々の規定はあるが、耐久的なコンクリート構造物を念頭において、材料、設計および施工を総合的良否を定量的評価しようとする姿勢ではない実情を示した。コンクリート構造物の耐久性設計体系は、限界状態設計法に基づく狭い意味の設計体系と同様に、環境条件等の作用と耐久性能である抵抗とを定量的に評価する方向とすべきことを提案し、今後解決しなければならない問題点について論じた。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果についてまとめている。

コンクリートが、将来にわたって社会基盤施設の建設材料として重要な役割を担ってゆくためには、コンクリート構造物の信頼性を一層向上させる必要があり、これまでの安全性を強く意識した狭い意味の設計体系に加えて、耐久性設計体系を確立することが大切であることは論をまたない。本研究は、これまでに様々な分野で行われてきた、耐久的なコンクリートを目指した研究および材料・設計・施工に関する技術開発を、総合的かつ体系的に取り扱うことのできる耐久性設計体系の枠組みを構築できた点で、その意義が深いと思われる。コンクリート構造物に要求する耐久性能レベル、材料、設計、施工のそれぞれのレベルをどのように設定し定量的な評価システムとするかが、この耐久性設計体系のカギを握っているといえるが、我が国のコンクリート工学の研究・技術水準を考慮すれば、今後、比較的短期間のうちに、世界に先駆けてコンクリート構造物の耐久性設計法が確立されるものと期待されるのである。

# 目 次

	ページ
第1章 序論	1
第2章 総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計	3
2.1 概論	3
2.2 総合評価に基づく耐久性設計	5
2.3 設計・施工・材料レベルの設定	7
2.3.1 設計レベルの設定	7
2.3.2 施工レベルの設定	9
2.3.3 材料レベルの設定	10
2.4 構造物に要求すべき耐久性能	10
2.5 総合評価に基づく耐久性設計の特長	11
第3章 設計レベルが異なるコンクリート部材の耐久性の評価	12
3.1 概論	12
3.2 実験概要	12
3.2.1 供試体および使用材料	12
3.2.2 実験方法	13
3.3 実験結果および考察	15
3.3.1 実験結果	15
3.3.2 材料・設計・施工のレベルと耐久性能との関係	16
第4章 密実なコンクリート構造物を実現する設計方法に対する提案	18
4.1 概論	18
4.2 部材の断面形状寸法に対する提案	20
4.2.1 T桁およびI桁の断面形状	20
4.2.2 箱形状の断面形状	22
4.2.3 施工の困難な断面寸法	22
4.2.4 部材表面積に対する留意点	24
4.3 構造細目に対する提案	26
4.3.1 かぶり	26
4.3.2 鋼材のあき	29
4.3.3 最小鋼材量	34
4.4 設計図の表示方法に対する提案	37

	ページ
第5章 密実なコンクリート構造物を実現する施工方法に対する提案	41
5.1 概論	41
5.2 フレッシュコンクリートの仕様の選定方法に対する提案	42
5.3 打ち込みおよび締固め方法に対する提案	48
5.4 沈下ひびわれを防止する表面締固めバイブレータの開発	52
5.4.1 開発の動機	52
5.4.2 沈下ひびわれに関する既往の研究	55
5.4.3 表面締固めバイブレータの仕様と特長	56
第6章 コンクリート構造物の耐久性設計の現状と将来の展望	58
6.1 概論	58
6.2 コンクリート標準示方書設計編の現状	58
6.3 コンクリート標準示方書施工編の現状	61
6.4 コンクリート構造物の耐久性設計の理念	64
第7章 結論	67
謝辞	69
参考文献	70
資料	73

## 第1章 序 論

近年、コンクリート構造物の耐久性や耐用年数について、マスコミに大々的に取り上げられたことを契機の一つとして、数多くの問題提起がなされている。コンクリート構造物に、「官・学・民」それぞれの立場から携わる「玄人」を自任する土木技術者としては、いわば「素人」からの素朴ながら根本的な「このコンクリート構造物はいつまで持つのか？ 耐久性の優れた丈夫なコンクリート構造物はできるのか？」という設問に答える責任があると考えられる。

コンクリート構造物の劣化状況とその原因については、これまでに数多くの調査研究報告がなされている。コンクリートの中性化、ひびわれ、塩害などが誘因となって、鉄筋およびPC鋼材などの補強鋼材の腐食による、かぶりコンクリートの剥落、補強鋼材の断面減少が生じて、部材の終局耐力が低下するとともに、防水性能などの機能や美観が損なわれていると判断せざるを得ないコンクリート構造物の存在が指摘されている。

これらの調査研究報告を通観すると、コンクリート構造物が劣化したと判断されているもののうち、圧縮力を分担するコンクリート部分の耐力が低下しているという指摘がなされているものは極めて少ない。すなわち、引張りに弱いコンクリートを補強するために合理的と考えて配置された鋼材が腐食欠損して、その結果、複合構造としてのコンクリート部材が所要の耐力を期待出来なくなっているという現象が大部分といえるのである。

そして、補強鋼材が腐食欠損してくる原因として推定されているものは、以下の2種類に大別できる。

(1) アルカリ骨材反応等に代表される、コンクリート材料そのもの原因によって発生したひびわれ、骨材中の多量の塩分量、海塩粒子の飛来突入等が誘因となって補強鋼材の腐食が生じている場合。

(2) コンクリートのかぶりが確保されていないこと、打継目や施工継目の処理が十分にされていないこと、コンクリート部材表面付近に鋼製スペーサーや金属の破片あるいは豆板やジャンカ等の欠陥が存在していること等の、いわゆる「施工不良」が誘因となって補強鋼材の腐食が生じている場合。

一方、建設材料としてのコンクリートの特徴は、工場で厳重な品質管理のもとに大量生産される鋼材やプラスチック材料とは異なり、各地域におけるレデーミクストコンクリート工場または現場のバッチャープラントで製造されたフレッシュコンクリートを施工業者が使用して打設、養生するところにある。したがって、出来上がったコンクリート構造物の品質や耐久性に施工の過程が著しく影響するのは当然のことといえる。

本研究は、著者が、過去約15年間にわたって、「民」の立場で携わってきた、主としてプレストレストコンクリート橋梁構造物の設計から施工の過程において直面した様々な問題の総合的解決方法を整理したものである。すなわち、「耐久性の優れた良いコンクリート構

造物」を実現するために、コンクリート建造物の建設の過程における、材料、設計および施工の過程を総合的に取り扱う方法を提案した。また、耐久性の優れた良いコンクリート建造物を建設するためには、良質な材料そのものを選定することが重要であるが、本研究では、通常のレデーミクストコンクリート材料を使用した場合に、密実なコンクリートを実現するための設計および施工方法について詳細に検討した。そして、フレッシュコンクリートの行き渡りや締固め作業が困難であり、標準の施工方法と組み合わせた場合には「施工不良」を誘発する虞れの大きい設計を施工が容易な設計とする方法を提案し、現在の標準的な施工方法では、見落とされがちであった部材表面部にも、密実なコンクリートを実現するための優れた施工方法についても提案した。

現在、一般のコンクリート建造物の建設工事は、請負工事契約方式がとられており、建造物の設計および施工方法は、土木学会コンクリート標準示方書、建設省あるいは日本道路公団等の各企業体で定めた土木工事共通仕様書や特記仕様書に規定されるものであり、それをもとに標準的な工事費用が標準積算基準で定められている。したがって、本研究で提案した設計および施工方法を広く普及させるために、現行の示方書や仕様書の規定の内容との関係を明らかにすることを試みた。その結果、近年のコンクリート工事における、レデーミクストコンクリートの普及、コンクリートポンプ車の普及、構造解析や施工管理におけるコンピュータの発達、責任施工制度の確立、熟練労働者の不足等の状況のもとで「耐久性の優れた良いコンクリート建造物」を実現するためには、設計および施工方法に関する示方書や仕様書の規定が不十分であったり不明確な部分があることを明らかにした。

本研究は、「耐久性の優れた良いコンクリート建造物」を目指して、環境の影響を真っ先にうける部材表面付近で、良く締め固められた密実なコンクリートを実現して補強鋼材の腐食欠損の誘因を低減させることに着目し、材料、設計および施工の過程を総合的に取り扱ったコンクリート建造物の耐久性設計法の枠組みを提案し、さらに、密実なコンクリートを実現するための施工が容易な設計方法およびコンクリート材料特性の欠点が顕在化するのを低減させる優れた施工方法について提案したものである。



## 第2章 総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計

### 2.1 概論

コンクリート構造物の耐久性や健全性に対する疑問が呈されるようになり、耐荷力設計と共に耐久性設計を行うことの必要性が指摘されている。しかしながら、コンクリート構造物の耐久性設計法は、確立しているとは言いがたい状況である。コンクリートの耐久性に関連する研究は数多く報告されているが、それぞれの研究成果を、コンクリート構造物の耐久性という観点から総合的に取り扱う概念を確立しようとする試みは殆どなされてこなかったといえる。コンクリート構造物の大型化、大量建設、急速施工という時代の要請に効率的に対応するためには、それぞれの構造物についての材料の選定、設計、積算、施工、品質管理、維持管理という作業が別々の技術者によってなされる分業化が進まざるを得ない状況にあること、コンクリート構造物が永久構造物であるべきであるという信念と使命感に裏打ちされてきたことなどがその理由であろう。耐久性設計とは、設計耐用期間に劣化外力をうけて、劣化状態をその間に許容されるレベル以下におさめることを目標とし、それに応じた材料、設計、施工、維持管理の仕様を経済性を考慮して総合的に規定することであると一般に定義される。耐久性設計の基本となるのは設計耐用年数であり、耐用年数には、物理的、経済的、機能的および社会的なものがあるとされ、極めて広い視点からの検討が必要である。現時点では、補強鋼材の腐食等による劣化や疲労の影響などによって、構造物の使用性や耐荷力が一定の基準を満足できなくなるまでの期間と位置づけられる物理的耐用年数の算定方法すら確立していないのである。

耐久性の優れたコンクリート構造物を実現するために重要な事項については、これまでに数多くの研究成果が報告されており、大部分の事項は示方書や仕様書に規定されている。例えば、単位水量を小さくすること、水セメント比を小さくすること、AEコンクリートの使用、かぶりを大きくすること、入念な締固めと養生の重要性、水切りや排水装置への配慮、防水層の設置、コンクリート打設中に配筋がずれないように配慮すること、型枠の継目から水が漏れないように配慮すること、コンクリート打設後に急激な乾燥や温度低下にさらさないように養生すること、アルカリ骨材反応への配慮、フレッシュコンクリートの行き渡りを考慮した構造細目、供用中の定期的点検等の事項が挙げられるが、それぞれの事項については特別に目新しいものはない。しかし、使用目的、重要性、環境条件等の異なる様々な種類のコンクリート構造物に、これらの事項を総て適用しようとする考え方は工学的に適切とはいえない。これまでに建設されたコンクリート構造物の大部分は健全にその使命を果たしてきていること、同様の種類と環境条件の構造物であっても設計・施工の担当者が異なることによって劣化の程度に相当の差異が生じていること、同じ構造物でも部位によって劣化の程

度に相当の差異が生じていること等の調査報告からもこのことは明らかであろう。

コンクリート構造物の耐久性設計は、材料、設計、施工、使用条件、環境条件、維持管理等の全体の過程を総合的に取り扱える概念が必要であることは論を待たない。しかし、多種多様なそれぞれのコンクリート構造物に携わる技術者の責任の範囲と興味は、発注者、コンサルタント、請負建設業者、維持管理者、学識経験者等の所属機関によって異なり、また同じ所属機関であってもその立場と役割によって重要視する事項も異なるものである。これらの異なった立場の技術者にとって、それぞれのコンクリート構造物の品質や保有する耐久性について共通して認識できる評価方法の枠組みを確立することが、「耐久性の優れた良いコンクリート構造物」を目指した耐久性設計の設計体系を確立するための第一歩であり本章の目的である。

## 2. 2 総合評価に基づく耐久性設計

建設材料としてのコンクリートの特徴は、工場で厳重な品質管理のもとに大量生産される鋼材やプラスチック材料とは異なり、各地域におけるレデーミクストコンクリート工場または現場のバッチャープラントで製造されたフレッシュコンクリートを施工業者が使用して打設・養生するところにある。したがって、出来上がったコンクリート構造物の品質や耐久性に施工の過程が著しく影響するのは当然のことといえる。現時点においては、良いコンクリートを目指して費用をかけて施工方法を工夫しても、標準的な施工方法としても、コンクリート構造物の工事で受領できる工事費用は標準的な一律の金額であることが多い。このような状況で、「優秀な作業員を教育し」「厳重な品質管理の下で」施工を「入念に」行いさえすれば、耐久性の優れたコンクリート構造物を実現できると考えることには無理があり、コンクリート構造物の信頼性を高めるためには、材料、施工および狭い意味の設計のどの過程でどのような注意を払い、どこに費用をかけるのが良いかを総合的に検討する方法を確立する必要がある。

コンクリート構造物の耐久性に影響する劣化外力には数多くの種類があるが、一般的には外的要因が部材表面から内部へ伝播して劣化を引き起こすと考えることができる。したがって、部材表面において堅固で空隙の少ない密実なコンクリートを実現して、外的要因が部材表面から内部へ伝播するのを制限することは、補強鋼材の腐食を制限することにつながり構造物の耐久性を向上させることになると考えることに大きな誤りはないであろう。

そこで、それぞれのコンクリート構造物について、部材表面付近において密実なコンクリートが容易に実現できるか、あるいは外的要因を制限することができるかという観点から、材料、設計および施工のレベルを3段階に区分してランク付けし、それを総合したものをコンクリート構造物の保有する品質あるいは耐久性能の基本として総合的に評価することを考案した。すなわち、材料、設計および施工のレベルが標準的なものをBランクとし、耐久性能の観点から標準よりも技術的に優れている場合をAランク、劣っている場合をCランクと位置づけ、構造物の要求する耐久性能に応じて、これらの組み合わせの中から経済的なものを選択できるようにするのである。当然のことながら、材料、設計および施工それぞれ単独のコストは、Aランクが最も高く、Cランクが最も低くなる。Bランクのコストは、現在の標準積算基準を想定している。

	レベル		
材 料	A	B	C
設 計	A	B	C
施 工	A	B	C
構造物の要求する 耐久性能	A	B	C

図-2.1 各仕様の区分の例

構造物の要求する耐久性能レベルがBランクの場合における材料、設計および施工のレベルの組み合わせの例を、図-2.2に示した。ケース1は、各仕様が標準的な場合である。ケース2およびケース3は、構造物によっては、設計の過程で、かぶりや鉄筋間隔を大きくとると著しく不経済となる場合である。その場合は、施工（ケース2）あるいは材料（ケース3）にコストをかけることによって要求する性能を満足させるのである。ケース4は、構造物の設置位置によって、フレッシュコンクリートを投入した後、締固めも養生も出来ない場合である。その場合は、材料にコストをかけることによって要求する性能を満足させるのである。

コンクリート構造物に要求する耐久性能を満足させるために、材料、設計および施工の各レベルの組み合わせをどのように定めるかが耐久性設計であるとするのが著者の提案である。

この場合に重要なことは、要求する耐久性能レベルをどのように設定するか、および材料、設計、施工のそれぞれのレベルをどのように設定するかであって、その設定がうまくできるかどうか、この耐久性設計法のカギを握っているといえる。

### 個々の仕様

ケース	1	2	3	4
材 料	B	B	A	A
設 計	B	C	C	B
施 工	B	A	B	C

構造物の要求する耐久性能レベルB

図-2.2 個々の仕様の組み合わせの例

## 2. 3 設計・施工・材料レベルの設定

ここで提案した耐久性設計法を確立するために、材料、設計、施工のそれぞれのレベルを設定する。以下に示す設定方法は、各種のコンクリート構造物について、部材表面付近に密実なコンクリートが容易に実現できて外的要因を制限できるかどうかという観点から、設計、施工および材料のレベルを3段階に区分してランク付けて整理したものである。

### 2. 3. 1 設計レベルの設定 (表-2. 1 参照)

設計レベルの評価は、設計の過程および設計作業が終了した時点での設計成果品を照査することによって施工に着手する前に行うこととする。ここでの設計レベルは、コンクリート構造物の部材表面の密実さが容易に実現できるかどうか、したがって、コンクリートの行き渡りや締固め作業が容易であるかどうかに着目して評価されるものである。

着目する主たる要点は以下に示す事項である。

- (1) コンクリートの行き渡り、内部振動機の挿入のしやすさに関する「補強鋼材の錯綜の程度」と「アキおよびかぶり」等の構造細目
- (2) フレッシュコンクリートのブリージングや気泡の逃げ場所に関する「部材側面の傾斜角」
- (3) コンクリートの打設および締固め作業のしやすさに関する「1リフトのコンクリート高さ」や「1回のコンクリート打設量」および「部材幅等の断面形状」

以下に示すいずれかの条件に合致するものを、設計レベルにおいて標準よりも劣るCランクと想定する。

- (1) 補強鋼材がアキやかぶり等についての標準示方書や共通仕様書の規定最小値を満足しているが、コンクリート打設位置からの水平投影面で全体的に眺めると所定のアキやかぶりが不足している部分がある。
- (2) 部材側面の傾斜角が90度より小さい部分がある。
- (3) コンクリート打設時の自由落下高さが1.5mを越え、内部振動機のフレキシブルホースを挿入する深さが3.0m以上であって締固め作業が困難となる。また、吊り下げた内部振動機の振動部先端を部材表面から20cm程度以内に接近させて締固め作業ができない部分があり、コンクリートの行き渡りが不確実になる可能性が高い。

実際の構造物としては、場所打ちコンクリート杭、地下連続地中壁、T桁橋、傾斜したウェブを有する箱桁橋、桁高の大きな箱桁橋、アーチリブ、大型の中空橋脚、高さの大きい壁状構造物、水中基礎構造物、合成構造の充填コンクリート部、LNGタンク底盤、トンネル

やシールドの二次巻きコンクリート等が挙げられる。

設計におけるBランクは、一般の標準的な設計レベルであって、実際の構造物としては、床版橋、中空床版橋、桁高の小さい矩形桁、ラーメン高架橋、直立した橋台や橋脚、直立したマッシブな擁壁、カルバート、地下鉄構造物、フーチング、開水路、下フランジのないT形はり（2主版桁）等が挙げられる。

設計におけるAランクは、以下に示す条件をすべて満足している場合とする。

- (1) 構造細目に関するBランクの条件を満足すると共に、内部振動機を挿入できるアキが60～80cm間隔に、コンクリート打設位置からの水平投影面上に存在する。
- (2) 部材側面の傾斜角が90度以上である。
- (3) コンクリート打設時の自由落下高さが0.5m程度以下であり、内部振動機のフレキシブルホースを特に大きく手繰ることなく作業位置を移動できる。また、吊り下げた内部振動機の振動部先端を、あらゆる部材表面付近に配置して締固め作業をすることができる。

実際の構造物の、床版、断面の大きな柱、小型のフーチング等は、Aランクの設計と評価できると考えられる。

ここで示した設計のレベルを区分するための方法の特長は、設計図面において部材の断面形状と補強鋼材の配置状況とを照査するだけで、様々な種類の構造物に携わる一般の技術者が容易に判定できることである。

コンクリート標準示方書、各企業体の共通仕様書、標準積算基準に規定される条項は、材料、設計、施工ともに標準のBランクを想定していると思われる。しかし、標準的な設計と見なされている図-2.3および図-2.4に示した構造物は、ここで区分した方法によればCランクの設計と評価され、構造物の要求する耐久性能レベルがBランクであれば、材料あるいは施工のAランクとの組み合わせで実現できるといえる。

一方、設計のレベルがAランクであれば、Bランクの材料とCランクの施工を組み合わせ、Bランクの耐久性能レベルを実現できるとは現在の技術水準では考えられない。設計レベルの区分は、標準的な材料と施工努力とを組み合わせることによってBランクの耐久性能レベルが実現できるものを総てBランクとし、それ以外の施工が困難な設計レベルをCランクとして2段階に区分しておくことが適切と思われる。したがって、ここでAランクの設計と区分した条件は、いわばBランクの上と位置づけることとする。

## 2. 3. 2 施工レベルの設定 (表-2. 2参照)

施工レベルがコンクリート構造物の耐久性に与える影響が大きいことは多くの文献で指摘されており、技術者とともに作業員の能力と質と職業倫理の向上を目指すことが重要であるという議論が行われてきた。標準示方書や共通仕様書の施工に関する条項には「入念な施工が必要である」「注意しなければならない」という言い回しで現場における施工レベルを高めるような指示が数多くある。しかし、技術者や作業員のレベルが今後向上するとは考えにくい。優れた技術者や作業員が全く存在しなくなることはないと思われるが、これまでの労務事情の経緯から推察すれば、大部分の現場で直接工事に携わる技術者や労働者の質が今後向上することは期待できないと考えた方が自然である。現場技術者と作業員に関するこのような状況を、「人間」に関する施工レベルの標準すなわちBランクと考える。全体的には、このような状況の現場が大部分であるからである。標準示方書や共通仕様書が要求する施工管理項目や規準をこなすことはできるが、そこにおける施工状況が技術雑誌等に掲載されて報告されることは殆どない構造物の場合である。

一方、特に重要な工事にあたって、発注者からの暗黙の指名や依頼あるいは企業内での選抜や推薦によって現場に派遣される優秀な現場技術者も少なからず存在する。現場技術者に関するこのような状況を、「人間」に関する施工レベルのAランクとする。このような発注者側および施工者側の現場技術者は、コンクリート主任技士や技術士等の資格を有する場合が多く、工事全体を統括して把握することができ、品質管理手法に精通して、自主的な施工管理ができるものである。その施工状況が技術雑誌等に報告されることが多く、また、有識者によって構成された技術委員会等の援助が行われるのもこのクラスの工事のことが多い。

「人間」に関する施工レベルのCランクとは、施工の過程を統括して把握できる知識のある技術者がいない場合であり、それぞれの作業がそれぞれの分担者の都合で進められ、標準示方書や共通仕様書で要求する品質管理項目や規準を十分に理解できない状況の場合である。

施工レベルの評価には、さらに、型枠工、鉄筋工およびコンクリート工に関する、機械、器具、付属物および施工方法を考慮する必要がある。

施工レベルのBランクは、大部分の施工現場の標準的なものであり、標準示方書や共通仕様書に規定されている事項にしたがって普通の努力をする施工方法であり、実際に必要な工事費用が標準積算基準による積算金額と大差がないものである。

良いコンクリート構造物の実現を目標に、機械、器具、施工方法に新しい知識と技術を採用した施工方法はAランクとなる。暑中および寒中コンクリートあるいはコンクリートの運搬が困難な条件等を克服する施工方法もAランクと考える。これらは技術雑誌等に工事報告が掲載されることが多く、実際に必要な工事費用は、標準積算基準より大きい傾向となろう。

Aランクの施工の事例には、以下に示すものがある。

(1) 型枠工に関して、布張り穴あき型枠(テキスタイル工法)、塩害対策用セパレーター・コーン、ツバ付きセパレーター、コーンの後埋めに接着材+無収縮モルタルやプレキャストコン等を使用する。

(2) 鉄筋工に関して、樹脂被覆結束線、高強度モルタルスペーサ等を使用する。結束線を内側に折り畳む作業方法を実施する。

(3) コンクリート工に関して、練り混ぜ水へ氷を使用する。数種類の型枠・内部振動機を使用する。表面締固め用バイブレーターを使用する。湛水養生、給熱養生、パイプクーリング、表面凝結遅延剤による打ち継ぎ目処理等を行う。

### 2. 3. 3 材料レベルの設定 (表-2. 3参照)

コンクリートの材料レベルにおけるBランクとは、一般の土木構造物に使用されてきた、スランプ8~12cm程度のプラスチックなJISレデーミクストコンクリートの標準品を想定する。Cランクは、スランプ18~21cm程度の柔練りなJISレデーミクストコンクリートの標準品程度を考える。Aランクは、膨張コンクリート、特殊水中コンクリート、樹脂含浸コンクリート、防食塗装、防食パネル等を想定する。流動性が良く材料分離を生じない締固め不要で乾燥収縮や水和熱の小さい、いかなる場所にも流し込むだけでよいものができれば、それはいわばAランクの上に相当するものである。

鉄筋およびPC鋼材等の鋼材は、品質証明がないものやJIS規格以外の製品はCランクである。樹脂塗装鉄筋、グラスファイバー製補強材、ステンレス鋼材等の鋼材はAランクの材料と考えられる。

### 2. 4. 構造物に要求すべき耐久性能

コンクリート構造物に要求すべき耐久性能は、構造物の種別のほかに、作用する荷重条件や環境条件によっても異なるといえる。例えば、潮風や波浪等を受ける塩害の虞れのある腐食性環境、凍結融解の繰り返される環境にある構造物には、耐久性能としてAランクを要求する必要があるのに対し、外装材で防護された環境にある構造物にはCランク、一般の環境にある構造物にはBランクを要求することになる。

輪荷重が直接作用する道路橋床版と鉄道橋床版とでは、要求すべき耐久性能のレベルは異なるといえる。また、記念碑の役割を持つ構造物には、一般の環境にあっても耐久性能としてAランクを要求する必要がある。各種の構造物に要求すべき耐久性能のレベルを、環境条件および荷重の性質に着目して区分した一例は、表-2. 4に示すようである。

本研究では、構造物に要求すべき耐久性能については取り扱うことができなかったが、こ



れを適切に設定することは今後の重要な課題である。

## 2. 5 総合評価に基づく耐久性設計の特長

総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計体系をとると、耐久性の優れたコンクリート構造物を計画する場合に、どこに着目して費用を投入するかを柔軟に考えることができる利点がある。

コンクリート構造物の耐久性を検討する場合に、鋼材の腐食やコンクリートの中性化等の個々の要因だけを取り扱うだけでは不十分である。本章では、コンクリート構造物の部材表面において堅固で空隙の少ない密実なコンクリートを実現することに着目して、設計、施工、材料を総合的に評価した耐久性設計体系の枠組みと方向を提案した。すなわち、耐久性の低下が顕在化した構造物は、材料の品質や施工の欠陥が原因とされることが多いものであるが、設計が劣っていたことが影響した可能性があることを見過ごしてはならないと考えるのである。設計、施工、材料を総合的に組み合わせることによって、耐久性の優れた良いコンクリート構造物を実現するという概念を確立することが合理的であり重要である。

本研究の範囲では、耐久性設計の定性的な基本概念を提案したものであるが、各分野の研究成果によって、鋼材の腐食、コンクリートの中性化等の個々の要因と耐久性能との関係は定量化されつつあるので、これらの成果を、本章で提案した基本概念をもとに総合することにより、コンクリート構造物の耐久性能の定量的総合評価も可能となると考えられるのである。

## 第3章 設計レベルが異なるコンクリート部材の耐久性能の評価

### 3.1 概論

コンクリート構造物の部材表面において堅固で空隙の少ない密実なコンクリートを実現することに着目して、材料、設計、施工を総合的に評価した耐久性能設計の設計体系を発展させる第一歩として、この提案した設計哲学の妥当性を少なくとも定性的に、できることなら定量的に実証することを試みた。

新しい耐久性能設計の考え方には、3つの要点がある。第一の要点は、部材の耐久性能のレベルが、材料、設計、施工のレベルの総合的な組み合わせによって達成されるという極めて当然なことである。第二の要点は、ある一定のレベルの耐久性能が要求された場合、それを実現できる材料、設計、施工のレベルの組み合わせ方法は幾種類もあり、経済性、発注者の好み等により、その中のどれを選択するかを決定できるという、これまで殆ど指摘されてこなかった柔軟な考え方である。第三の要点は、構造物が保有する耐久性能と、環境条件、荷重および構造特性に影響される劣化外力を考慮した構造物に要求する耐久性能とを分離して取り扱うという考え方である。

本章では、第一の要点と第二の要点について、実験的に確かめることを目的とした。すなわち、最近のコンクリート道路橋および鉄道橋で一般的な構造形式である鉄筋コンクリートT桁のウェブ下縁付近の部材を選定して、モデル化した供試体を製作した。この部分は、鉄筋が錯綜して配置され、コンクリートの行き渡りや締固め等の施工が困難となることが多い箇所である。第二章において区分した設計レベルが、標準のBランクの供試体と標準より劣るCランクの供試体を準備して、これと施工および材料の様々なレベルとを組み合わせることで製作した。この供試体について、部材表面部のコンクリートの密実さの程度を比較検討することにより、部材の耐久性能の相異を定量的に評価する目安を得ようとしたものである。

### 3.2 実験概要

#### 3.2.1 供試体および使用材料

供試体の形状寸法は、写真-3.1、3.2及び図-3.1、3.2に示すようであり、設計レベルが標準のBランクであるB供試体と標準より劣るCランクのC供試体の2種類である。

B供試体は、コンクリート標準示方書に規定された鋼材のあきに関する構造細目を、すべて満足しているとともに、部材底面まで直径45mmの棒状パイプレーターを挿入できる空間を保有している鋼材配置のものである。

C供試体は、実際の構造物での設計例が多い場合であり、コンクリート標準示方書に規定された鋼材のあきに関する構造細目を必ずしもすべて満足しておらず、棒状バイブレーターを部材底面まで挿入できない部分のある鋼材配置のものである。

供試体の寸法は、鉄筋コンクリートT桁橋あるいは箱桁橋の実構造物のウェブ下縁付近をモデル化するために実構造物の一部の標準的寸法の値を選定している。

鉄筋は、D32が配置されていることを想定して外径32mmのシースを使用し、潰れ止めにシース内に直径25mmの鉄筋を挿入してコンクリートを打設した。コンクリートの打ち込み終了後、鉄筋は撤去し、コンクリートが硬化した後にシースも引き抜いて撤去した。

コンクリートは、表-3.1に示すようなレデーミクストコンクリート標準品300-8-25、標準品300-12-25および実験室で練り混ぜたものを使用した。

レデーミクストコンクリートの運搬時間は約60分を要した。実験室に到着した後、供試体に打ち込む直前にスランプを測定した。

部材表面部に密実なコンクリートを実現するために重要な役割をはたす、材料としてのフレッシュコンクリートの部材内での行き渡り易さや締固め易さの程度を比較検討するために、コンシステンシーの相異としてスランプの値に着目して材料のレベルを区分した。この実験では、スランプ8cmの場合を標準のBランク、スランプ12cmの場合を標準より優れたAランクとして取り扱うことにした。

実験室で練り混ぜたコンクリートは、締固めや養生が不要であって、施工や設計のレベルの影響をうけることがない理想的なハイパフォーマンスコンクリートを想定している。設計や施工のレベルが劣っていても、耐久性能の優れた構造物を実現できる極めて優れた特Aランクと位置づけられる材料を目指して、流動化剤と増粘剤を併用して試作したものである。

### 3.2.2 実験方法

コンクリートを供試体に打設するにあたっては、施工の過程を実構造物に近付けることを目標として、実際の現場におけるコンクリートポンプを使用した施工状況の打設速度と連続性を近似することを試みた。すなわち、容量20ℓのパケツを20ヶ準備して、これにフレッシュコンクリートを10ℓ程度ずつ分配しておき、供試体型枠高さの2/3程度まで順次に連続的に投入して打設した。コンクリートの締固めは、図-3.1に示すような縦横それぞれ40cm間隔の4箇所位置に、直径45mmの棒状バイブレーターを挿入して行った。標準より劣ったCランクの設計レベルであるC供試体は、図-3.2に示すように、棒状バイブレーターの振動部分を部材底面まで挿入できない鋼材配置であるので、型枠高さの1/2程度までしか振動部分を挿入できない。

施工レベルは、棒状バイブレーターの1箇所あたりでの振動作業時間によって区分した。一箇所あたり5秒間の締固め作業を行った場合を、標準の施工レベルであるBランクとした。

これより入念な作業として、一箇所あたり20秒間の場合を優れた施工レベルであるAランク、全く締固め作業を行わなかった場合を、標準より劣る施工レベルであるCランクと仮定した。

供試体は、材令1日に側面型枠、材令2日に底面型枠を脱枠した後、材令5日まで実験室内で湿潤養生を行った後、12ブロックに分割した。分割した供試体は、110℃恒温槽で3日間乾燥させた後、直ちに赤インクで着色した水中に湿潤させた。赤インク水中に3日間湿潤させた後、供試体を適当な位置で割裂した断面を観察することによって、部材表面部における赤インク水の浸透深さを測定した。赤インク水の浸透深さは、部材表面部に沿って、5mm間隔に測定した。その浸透深さの測定結果を各供試体について比較検討することによって、コンクリートの密実さの程度、すなわち、材料、設計、施工の各レベルを組み合わせることで達成される、構造物の部材の耐久性能を評価することを試みた。

実験は、実験1から実験4までの4シリーズを行い、各シリーズ毎に2個の供試体を製作した。実験1から実験3までは、レデーミクストコンクリートを使用したもので、各シリーズごとの2個の供試体は、全く同様なレベルの材料を使用したといえる。しかし、各シリーズ毎には、レデーミクストコンクリートの発注の仕様が同様であっても、実験室に到着して使用したコンクリートは、全く同様とはいえないが、ここで区分した材料レベルとしては同じランクの材料として取り扱うこととした。

### 3. 3 実験結果および考察

#### 3. 3. 1 実験結果

各供試体の底面および側面についての赤インク水浸透深さの測定結果、および供試体底面を目視によって観察して判断した表面性状の程度を整理すると、表-3. 2に示すようである。

実験1のB供試体およびC供試体の赤インク水の浸透深さの測定結果は、図-3. 3～3. 4に示すようであり、部材底面の赤インク水の浸透深さは、標準より劣るCランクの設計に標準の施工方法と材料とを組み合わせた場合は、すべてを標準のBランクとした供試体に比較して、約2. 7倍大きくなった。

硬化したコンクリート底面の表面性状は、写真-3. 3に示すようであり、C供試体ではコンクリートが十分に行き渡っていない部分が一部に認められた。

部材側面の赤インク水の浸透深さは、両者で大差はなかった。

実験2で、標準より劣るCランクの設計に、締め固め時間を大きくした施工レベルが標準より優れたAランクを組み合わせた場合の、硬化したコンクリート底面の表面性状は、写真-3. 4に示すようであり、目視によってはB供試体とC供試体との差異は認められなかった。しかし、部材底面の赤インク水の浸透深さは、図-3. 5～3. 6に示すように、実験1の場合におけるCランクの設計と標準のBランクの施工方法を組み合わせた場合とすべてが標準の場合との差異よりは小さくなったが、Cランクの設計にAランクの施工方法を組み合わせた場合でも、すべてが標準の場合より部材底面の赤インク水の浸透深さは、約1. 4倍と依然として大きくなった。

実験2では、部材表面付近のコンクリートの密実さの程度を向上させるために、優れた施工方法として内部振動機で相当に長時間締め固めたものである。その結果、目視によって観察できる部材底面の表面性状は同様となっても、外気的环境条件が部材内部に浸透することに対する抵抗の程度は、依然として設計のレベルによって異なることが示され、したがって、施工のレベルを優れたものとしても、設計のレベルが劣っていることを補償するのに限界があることを示唆していると考えられる。

実験3において、材料の仕様を、フレッシュコンクリートの流動性と締固め作業のしやすさを考慮した施工の容易さを向上させるために、スランプの仕様を12cmと大きくした場合を、Bランクの設計とCランクの設計に、それぞれBランクの施工とを組み合わせた。その結果、部材底面および側面の赤インク水の浸透深さも部材の表面性状も、両者に大差は認められずほぼ同様となったのである。

実験3の赤インク水の浸透深さの測定結果を、実験1および実験2における、すべてが標準の場合と比較すると、平均浸透深さは、ほぼ同様であり、部材表面に沿って測定したデータの変動係数が幾分小さくなっている。したがって、部材表面部の密実さの程度は、ほぼ同

様であるか幾分向上していると考えられる。

実験4において、Cランクの設計レベルの2個の供試体に、理想的なハイパフォーマンスコンクリートを目指して配合した、いわば特Aランクの材料と、標準のBランクの材料であるスランプの仕様が8 cmのレデ-ミクストコンクリートを、標準の施工方法と組み合わせて打設した。その結果、特Aランクの材料を使用した場合は、部材の一部の表面性状は、残留した気泡による不良部分が認められたが、赤インク水の浸透深さは、平均浸深さも変動係数も、すべて標準の場合と比較して小さくなった。また、実験4において、Cランクの設計に標準の材料と施工方法を組み合わせた場合の、赤インク水の浸透深さの測定結果は、実験1の場合に比較して、更に大きくなった。実験4では、コンクリートの締固め時間は、実験1と同様となるように管理したが、実験1とは異なり、コンクリートの締固め作業の経験が全くない作業員が行ったので、その影響が現れたものと考えられる。したがって、締固め作業の優劣は、締固め作業時間以外の要因にも大きく影響されることが示唆された。

### 3. 3. 2 材料・設計・施工のレベルと部材の耐久性能との関係

部材の耐久性能のレベルが、材料、設計、施工のレベルの総合的な組み合わせによって達成されることを、部材表面部のコンクリートの密実さの程度を赤インク水の浸透深さ測定結果を比較検討することで定性的かつ定量的に評価することを試みた実験をおこなった。

設計レベルが、標準のBランクと標準より劣るCランクの2種類の供試体を製作して、これと、材料の、Bランク、Aランク、特Aランク、施工の、Aランク、Bランク、Cランクとを組み合わせた実験結果の範囲内で、以下のことがいえるものと考えられる。

(1) 要求される一定の耐久性能のレベルを達成する方法は、材料、設計、施工のレベルの組み合わせ方法によって、幾種類もあり得る。

(2) 設計レベルがCランクの部材は、標準の材料レベル(スランプの仕様8 cm)と標準の施工レベルとを組み合わせると、設計、材料、施工のすべてが標準のレベルの場合に比較して、部材表面部の密実さに着目した耐久性能が著しく低下する場合がある。

(3) 設計レベルがCランクの部材は、標準の材料レベルと標準より優れたAランクの施工レベル(入念な締固め作業)とを組み合わせても、設計、材料、施工がすべて標準の場合と同様な耐久性能のレベルとするには限界がある場合がある。

(4) 標準より優れた施工レベルとするために、棒状バイブレーターの挿入時間を長くする入念な締固め作業は効果があるが、締固め作業の優劣は、締固め時間以外の要因も大きく影響される。

(5) 一般の土木構造物に使用されている標準のスランプの仕様8~12 cmは、材料のレベルとして同一の取り扱いえない可能性がある。設計レベルの相異によっては、スランプ8 cmより12 cmのコンクリートが、優れた材料レベルとなり得る。

(6) 部材の耐久性能を向上させるために、材料のレベルが及ぼす影響は著しく大きい。理想的なハイパフォーマンスコンクリートである特Aランクの材料は、設計および施工のレベルが標準より劣るCランクの場合であっても、これを補って、部材の耐久性能を標準のBランク以上に向上させる可能性があることが示唆された。

(7) 部材の耐久性能を評価するために、赤インク水の浸透深さを測定する実験方法は、定性的な比較検討のためには有効である。しかし、現時点では、この測定結果を、部材の耐久性能のレベルを定量的に比較検討するために解析する方法に発展させることはできなかった。

## 第4章 密実なコンクリート構造物を実現する設計方法に対する提案

### 4.1 概論

コンクリート構造物の建設が決定されて詳細設計が行われる場合、大部分の場合は以下に示す過程で行われる。

(1) 設計条件の決定

材料の設計用値、荷重、安全係数、許容応力度

(2) 構造物の断面寸法の決定

(3) 構造解析

断面力の算定

(4) 断面の照査・補強鋼材の配置方法（主として補強量、本数）の決定

終局限界状態に対する検討

使用限界状態に対する検討

疲労限界状態に対する検討

(5) 構造細目（配置形状、あき、重なり具合）の決定

(6) 設計図の作成

(7) 設計計算書のとりまとめ

現在のところ、これらのコンクリート構造物の設計作業の過程において、設計実務に携わる技術者が、フレッシュコンクリートの仕様および施工方法を考慮して、その設計図面にしたがって、現場において標準の努力をすれば、部材断面のあらゆる箇所にコンクリートが行き渡り締め固められた密実なコンクリートが得られるかどうかの検討を行うことは殆どなされていないといえる。

現在の大部分のコンクリート構造物の設計計算書および設計図面に表示されているフレッシュコンクリートの性質に関連する仕様は設計基準強度のみであり、施工において重要なワーカビリティに影響するスランプや粗骨材の最大寸法が表示されることは殆どない。

このような事態であっても、それほど遠くない過去において、コンクリート技術者がコンクリート構造物の設計および施工の両面に深い造詣があり、この一連の作業に同一の技術者が携わることができた場合には、それぞれの構造物の設計・施工の各段階で適切な判断と実行が適宜なされてきものたと思われる。

しかし、近年のコンクリート構造物の大型化、複雑化、大量建設の趨勢に伴い、設計と施工とが全く分業化してしまった場合、すなわち、設計に携わる技術者が、どのような方法でコンクリートが施工されるのかを十分に理解できない状態で設計作業を進め、施工に携わる技術者が、設計者がどのような意図で設計図面を書き表したかを十分に理解できないという状態が一般的となると、施工のやりにくい、標準の施工努力だけでは、構造物の部材断面の



隅々にまでコンクリートを行き渡らせ締固めることが困難なコンクリート構造物が数多く建設されてきたと考えられる。

このような状況が、「施工不良」として取り扱われるコンクリート構造物の部分的欠陥の大きな原因の一つであり、コンクリートそのものの耐久性に対する不信感を引き起こしてきたと考えられる。

したがって、実際の設計作業にあたって参照される示方書や仕様書に、設計の過程においてフレッシュコンクリートの仕様と施工方法を考慮しなければならないとする原則を明記することは重要である。すなわち、施工を容易とするための具体的な設計方法、設計の時点で施工性について必ず確認しておかなければならない事項、施工を担当する技術者に伝達しておかなければならない事項および伝達方法などを示すことが、全体のコンクリート構造物のレベルを向上させるために必要である。

本章は、これまでに著者が設計から施工への過程で携わってきた、主としてコンクリート橋梁に関連する構造物において直面した、施工が困難なCランクの設計レベルの事例を整理した。そして、これを施工が容易なBランクの設計レベルとして密実なコンクリートを実現するために、設計に関する示方書や仕様書に規定するのが良いと思われる事項を提案した。

## 4. 2 部材の断面形状寸法に対する提案

我が国のコンクリート構造物における、部材の断面形状寸法を決定する方法の一般的原則は、構造力学的な合理性の追及と、コンクリートの自重が大きいという欠点が鋼構造との経済比較において基礎構造物を含めた全体の工事費が増加として計画の時点で顕著に不利にならないようにするために、コンクリート材料の数量を最小化することに主眼が置かれてきたと思われる。即ち、構造物の耐久性がコンクリートの施工性の優劣にかなり影響されているという知見は比較的最近に得られたものであり、この要因を設計の過程において具体的に反映させる試みは、道路協会のコンクリート橋塩害対策指針において若干触れられているが、コンクリート構造物全体の設計について体系的に取り扱われてはいない状態といえる。また、美観や景観などに対する配慮も、特別に重要視された構造物については検討されることがあっても、一般のコンクリート構造物の設計において、美観や景観について検討するための基本的考え方や手法が示されていない。したがって、通常のコンクリート構造物の断面形状寸法を決定する場合は、過去の実例や標準設計図集が参照されることが多い。

コンクリートは、プラスチックな性状のフレッシュコンクリートを、いかなる形状にも成型できるという利点があるが、実際の構造物においては、図-4. 1に示すような、長方形、箱形、I形、T形、円形、円環の6種類の基本的な断面形状、あるいはこれらの組み合わせ（小判形、台形等）に分類できる。

それぞれの断面形状を構成する辺（面）の形状は、型枠を製作し組み立てるという施工上の経済性と容易さを考慮して、平面あるいは円曲面とされるのが一般的である。さらに、これらの断面形状に対して配置される補強鋼材、即ち鉄筋やPC鋼材の加工、組み立ての容易さや施工精度、コンクリート打設中の固定の確実さなどは、それぞれの断面形状に関係があると考えられる。

また、コンクリートが打設される過程は、重力の方向に対して順次に下側から上側へと行われるものであるので、図-4. 1に示した断面形状の内、上方から下方へコンクリートが投入されるのが一般的なものは、長方形、T形、I形、箱形断面であり、紙面と直角方向にコンクリートが投入されるのが一般的なものは、円形、円環、長方形である。

本章では、これまでに著者が直接に携わってきて様々な知見が得られた、コンクリート橋上部工のはり部材の断面形状のうち、T桁、I桁、箱桁について論じる。

### 4. 2. 1 T桁およびI桁の断面形状

我が国におけるコンクリート橋において、T形およびI形の断面形状は、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリートともに広く一般的に採用されており、建設省、日本道路公団、首都高速道路公団、鉄道（JR、私鉄）などの企業体においては、標準設計図が、

それぞれの支間や幅員に応じて整備されている。

支間が40m程度のプレストレストコンクリート単純T桁道路橋の代表的な断面形状は、図-4.2に示すようであり、傾斜した平面（隅角部、ハンチ）を含む上フランジ、ウェブ、下フランジで構成されている。

このような断面形状のコンクリート構造物を、締固めに相当の注意を払ってコンクリートを打設し、型枠を取り外した直後に目視によって硬化したコンクリート表面について密実でない部分の有無を調査すると一定の傾向が認められるのである。

ここで密実でないと判断したのは、以下に示す事項に合致し、なんらかの補修作業を行った場合とした。

- (1) コンクリート表面の気泡が他の部分に比べて著しく多い。
- (2) コンクリート表面に大きな空隙が残っている。
- (3) コンクリート表面をテストハンマーで打撃すると容易に欠け落ちる。

これらの事項について該当する部分は、写真-4.1、図-4.3に示すような、下フランジ部分に集中しており、特に、下フランジの上側のハンチの部分については、コンクリートの締固め方法を様々に変化させても、密実でないと判断できる部分を皆無にすることはできなかった。

これと同様の断面形状のコンクリート桁は、全国各地で数多く製作されてきているが、著者が知る限りにおいては、どこの工事でも同様の問題に悩まされており、この部分の補修は当然の事という感覚を現場技術者は持っていると考えられた。

一方、コンクリート橋の塩害による内部の鋼材の腐食が顕在化した劣化状況調査報告書によれば、この種の断面形状のコンクリート橋で劣化が著しく認められる部分は、やはり、下フランジ付近が圧倒的に多いのである。

これらの事実から、現在は一般的に採用されている、図-4.2に示したタイプのT形断面の下フランジの断面形状は、密実なコンクリートを実現するためには、以下に示すような「施工不良」の原因となる可能性があるので好ましくないと言えるのである。

- (1) コンクリートの締固めに最も有効である棒状バイブレーターを直接挿入出来ない空間部分があるので、十分な締固めが困難である。(図-4.4参照)
- (2) コンクリート中のブリージング水及びエントラップトエアが断面の途中で滞留する型枠面があるので、ここが、比較的疎な表面とならざるを得ない。(図-4.5参照)
- (3) 一旦型枠を組み立てた後は、コンクリート打設直前及び打設中に、型枠面付近の異常（鋼材のかぶりが少なくなっている、異物が付着残存している等）を、目視によって容易に検査できないので施工管理が行き届かない。

現在のPC単純桁の標準設計におけるT形およびI形断面形状は、構造力学の観点からは、断面耐力に不必要なコンクリート部分を軽量化を目指してそぎおとし、断面の下縁付近に主

引張鋼材を配置して有効高さを大きくすることにより補強鋼材量を出来るだけ減じるという目的には、極めて合理的に適っているものである。しかし、コンクリート構造物の施工性の観点からは好ましくない断面形状といえるものであり、この種のPC構造物で劣化が顕在化してきているのである。したがって、伝統と実績がある標準設計といえども、構造物の耐久性を考慮した密実なコンクリートが容易に実現できる新しい標準設計を作成することに早急に着手する必要があると思われる。

#### 4. 2. 2 箱桁の断面形状

コンクリート橋において、箱形の断面形状は、その断面の構造力学的な合理性と施工性の良さおよび経済性の観点から、中小橋から長大橋の分野まで広く使用されており、我が国の最大支間のコンクリート橋の断面形状も箱形である。

代表的なコンクリート橋箱形断面形状は、図-4. 6に示すようであり、上床版、ウェブ、下床版から構成される。

支間が60mから85m程度の、このような断面形状のコンクリート橋において、コンクリートを打設し、型枠を取り外した直後に、目視によって認めることのできる、密実でない判断できる部分は、写真-4. 2及び図-4. 7に示すように、下床版内側のハンチ部付近集中して現れるものである。

この現象は、T桁の事例で指摘したように、コンクリート中のブリージング水及びエントラップトエアが滞留する型枠面が存在することが主たる原因であると思われる。さらに、箱形断面の場合は、このハンチに隣接する下床版の水平部分には、型枠を設置しないのが一般的であるので、フレッシュコンクリートが打設中にハンチの面に沿って移動しやすいことの影響をうけて、この部分に空隙が生じやすいともいえる。

したがって、この種の箱形顔面の下床版のハンチの形状は、現在のところ、はっきりした理由もなく比較的大きく定められていることがおおいが、構造解析においてははっきりした利点が認められるとき以外は、できるだけ小さくするのが「施工不良」の可能性を低減して密実なコンクリートを実現する方法の一つと思われるのである。

#### 4. 2. 3 施工の困難な断面寸法

これまでのコンクリート構造物の設計における良い設計とは、初期建設費を小さくできるという意味での経済的な設計であり、コンクリートや補強鋼材等の材料の数量をできるだけ減少させることを念頭においてなされてきたといえる。即ち、断面寸法をできるだけ小さく、桁高を小さく、部材厚さを薄くという方向に注意を傾けてきたといえる。

したがって、実際の施工の過程についての型枠の組み立て、コンクリートの打設、締固め、表面均し、仕上げ、養生などを、現場における作業員が、普通の努力をすることによって良

いコンクリート構造物が実現できるかということには、殆ど関心を持たずに設計が進められていることが多い。施工が困難であると思われても、「現場でなんとかしてくれる」という感覚が一般の設計実務者の常識であろう。

しかし、以下に示す事例のように、設計の内容が、良いコンクリートの施工の実現を制限してしまう場合がある。

### (1) 箱形断面の桁高

コンクリート橋において、箱形断面の桁高は、桁自重を低減させるために、支点部では大きく支間中央ではこれを小さくするのが一般的である。

図-4. 8に示す道路橋の例では、構造力学的な安全度の照査により支間中央の桁高を1.5mとされている。

この断面の構造物を、現場において場所打ちコンクリート工法によって施工しようとする、箱形断面の内部において、型枠組み立て、コンクリート打設、締固め、表面均し、仕上げ、養生などの作業が必要となり、その空間は、材料の占める部分を含めて、わずか80cmから100cmしか存在しない。実際の作業は、作業員が中腰あるいは腹ばいになって行わなければならないことになり、非常に過酷な条件での作業を施工の過程に強いることになる。

著者が実際に直面した施工にあたっては、コンクリートを打設するにあたり、全断面を一度に施工することは、人間の作業範囲を越えていると判断して、下床版とウェブを上方が開放された作業環境で行い、次に、上床版を施工することにした。狭い空間でのコンクリート打設、締固め、表面仕上げ等の業は避けて、型枠の組み立て及び取り外し作業だけとしたのである。この場合でも、作業員には相当に厳しい非人間的な作業環境での労働を強いる結果となった。

桁高が2.2m程度と大きければ、内部の空間が、標準的な人間の背の高さの1.7m程度は確保できるので、全断面を同時にコンクリートを打設する施工方法をも、工程や経済性を考慮して検討できる選択の可能性を、桁高が小さい設計によって制限されたといえるのである。

したがって、現場における作業員が通常の実力を発揮すれば良いコンクリートを実現することが可能となることを設計の時点で考慮しておくべきであり、まず、作業員の作業空間を確保できているかどうかを確認することは重要である。

この観点から、一般の施工方法による箱形断面の標準的な最小桁高は、2.2m程度は必要であると考えられる。そして、桁高が2.0mより小さく設計された場合は、施工が困難であるという認識の下で、特別な施工方法及び積算方法の考慮をすべきと思われる。

### (2) 中空断面の部材厚さ

橋脚などの柱部材において、地震荷重による曲げモーメントが支配的な場合は、断面性能を大きく低減することなく基礎構造へ作用する死荷重を軽減するために、中空断面が採用されることが多い。

その一例は、図-4.9に示すようであり、壁厚は60cmに設計されている。この構造物が、設計が終了した時点で、すでにコンクリートの施工方法について制限がなされていることを、設計者が意識しているかどうかは極めて疑わしい。即ち、60cmの部材厚の空間に、鉄筋を配置すれば、コンクリートの打設にあたって、作業員が型枠の内部に入ってコンクリートの打設面を至近距離から観察しながら締固め作業をすることは不可能であり、密実なコンクリートを実現するために好ましい施工方法ができない設計となっていることを意識していないのではないかと思われるのである。

さらに、工程を短縮するためにコンクリートの一回の打設高さを、4~5mとして設計されれば、作業員がコンクリート打設面から相当に離れた高所から棒状バイブレーターを吊り降ろして作業することになり、「十分な締固め」は困難となることが容易に予想されるのである。(図-4.10参照)

したがって、設計で壁厚を選定する場合に、現場における作業員の作業空間を60cm程度は確保することを考慮して1m程度の断面寸法を決めておくことが、標準的な施工努力によって密実なコンクリート構造物を実現するために重要であるといえるのである。また、作業員が内部に入って作業ができない断面寸法に設計された場合は、コンクリートの一回の打設高さを制限して標準の施工方法と積算とするか、打設高さを大きくした施工計画の場合は、コンクリートの投入方法や締固め方法について、標準の場合と異なる特別な施工方法と、それに伴う積算方法を考慮すべきなのである。

#### 4.2.4 部材表面積に対する留意点

コンクリート構造物の耐久性は、塩分を含む潮風などが部材表面から内部へ浸透し、コンクリート中に埋め込まれた補強鋼材が腐食することによって低下する。したがって、耐久性を向上させるためには部材表面部のコンクリートの品質を向上させて外気の浸透に対する抵抗性を増大させると共に、表面部分の面積をできるだけ減少させる断面形状を選定することも有力な対策といえる。

日本道路公団北陸自動車道外波高架橋における中空床版橋の断面形状は、写真-4.3および図-4.11に示すようであり、一般的な断面形状に比較して外気にさらされる部材表面積を低減させているものである。

特に厳しい環境条件におけるコンクリート構造物では、外気にさらされる部材表面積を低減させる断面形状を選定することの重要性は、道路橋の塩害対策指針(案)・同解説におい

て既に指摘されているものであり、T桁やI桁の設計においても、図-4.12に示すように下フランジを省略するような断面形状を選定する配慮が必要といえる。

## 4. 3 構造細目に対する提案

### 4. 3. 1 かぶり

かぶりについて、コンクリート標準示方書設計編〔解説〕には、以下の「」内に示す規定がある。

「鉄筋をコンクリートで十分に包むことは、鉄筋が十分な付着強度を発揮するため、鉄筋が錆びるのを防ぐため、火災に対して鉄筋を防護するため等に必要である。したがって、かぶりは設計者が経験をもとにして、・・・、構造物の環境条件、・・・・・・、施工誤差、構造物の重要度等から判断して、これを定める必要がある。

・・・・それぞれの部材ごとに設計上許容できると思われる範囲内で、最小のかぶりを定めた。したがって、この値を用いて構造物を設計した場合には、コンクリート材料の選択および施工には特に注意し、かぶりコンクリートは、欠陥の無いものとする必要があると同時に、完成後は定期的な点検を行うのがよい。」

これらの規定は、設計に携わる技術者は、コンクリート構造物の設計、施工、維持管理等の全般にわたっての知識や経験に裏づけられた造詣があることが前提になっている表現方法であり、設計と施工が分業化した現状のもとでは適切に運用されない可能性が大きいと思われる。

近年、数多くの問題提起がなされてきた、コンクリート構造物の塩害による耐久性の低下が顕在化したことは、このような状況の弊害の一つの事例であると考えられる。

このため、コンクリート構造物の耐久性を向上させる観点から、鋼材を被覆しているかぶり部分のコンクリートの役割として、潮風などにさらされて、表面から浸透して内部の補強鋼材を腐食を発生させる、塩素イオン、酸素、水等の外気を遮蔽する機能が重視されようになった。したがって、かぶり部分のコンクリートは、できるだけ空隙の少ない密実な品質であるとともに、かぶりを大きくすることが防食上有利となることが明らかになり、道路橋の塩害対策指針（案）・同解説や昭和61年に改訂されたコンクリート標準示方書において、環境条件の厳しさ及び各部材の種類について、それぞれ最小かぶりの値が、これまでより大きく規定されるようになっている。

しかし、かぶり部分に空隙の少ない密実なコンクリートを実現するための施工方法を考慮してかぶりの値を設定するという観点からは殆ど記述されていない。

著者は、プレストレストコンクリート道路橋において、支間、桁高、断面形状等が、ほぼ同様な構造物について、主桁断面の外周面のかぶりが、図-4.13に示すような、これまで一般的であった3.5cmの場合と、塩害対策を考慮した7.0cmと大きくした場合についての設計および施工に携わった。



コンクリート工事に関する施工管理体制と実践方法、作業員の熟練度等には大差がなかったにもかかわらず、施工中において、型枠を取り外した直後に発見することのできた外側のコンクリート表面の補修を必要とする「施工不良」の発生の頻度は、最小かぶりが7.0 cmの構造物の場合が圧倒的に少なかった。

この理由は、両者のコンクリートの締固め方法について、著者が現場において、異なった作業方法を指示し実践させたことによると考えられる。すなわち、かぶりが7.0 cmの構造物の場合は、写真-4.4および図-4.14に示すように、型枠のせき板と最も外側に配置された鉄筋との間のかぶりコンクリートの部分に、現在のところ一般的に使用されている高性能棒状バイブレーターの直径が50 mmから60 mmの振動部分が、直接に挿入できる施工条件が得られたのである。そこで、作業員にとっては、それまでに殆ど経験したことがなかった締固め方法であるが、箱形断面のウェブ外面のかぶりコンクリート部分に、40～50 cm程度の間隔に、必ず棒状バイブレーターを挿入して締固めるように指示して、コンクリート打設中は作業員を常に監視して習慣となるまで実践させた。

それまでの大部分のプレストレストコンクリート道路橋の場合では、設計において、主桁の外面のかぶりは、示方書で規定されている最小かぶりの3.5 cmとされていたため、写真-4.5および図-4.15に示すように、かぶりコンクリートの部分に、棒状バイブレーターを挿入して直接に締固めることはできなかった。

もちろん、振動部分の直径が30 mmから40 mmと小さい細径の棒状バイブレーターは存在する。しかし、スランプが8 cmから12 cm程度のプラスチックなコンクリートをコンクリートポンプ車によって打設する一般的な土木工事においては、その締固め性能は、直径が50 mmから60 mmのものに比較して圧倒的に劣るのが現状である。したがって、鉄筋やシース等が著しく錯綜していることを事前に察知して細径の棒状バイブレーターの必要性を認識できるよほどコンクリートの締固めにこだわる有能な技術者が現場を担当しない限り、汎用性の大きい50 mmから60 mmの直径の棒状バイブレーターのみが使用されるものである。

海岸線付近に建設される厳しい環境条件にさらされるコンクリート構造物では、コンクリート中の塩分量測定調査結果から、かぶりが7 cm程度以上の内部で塩分含有量が急激に小さくなっていることが明らかとなり、鋼材の腐食を遅らせるためにかぶりを大きくすることが規定されている。しかし、一般のコンクリート構造物の実際の設計作業においては、建設時の経済性の追及に主眼がおかれるために、設計技術者の判断によって示方書で規定された最小かぶりより大きく設計することは、公共構造物が会計検査の対象となることもあって、理由を説明する相当の手間と時間が必要となる。

しかし、コンクリートのかぶりを大きくすることは、外気から補強鋼材までの距離を大きくする利点があると同時に、構造物の耐久性に重要な補強鋼材の防護の役目を持つかぶりコンクリートを、通常の施工努力によって空隙の少ない密実なコンクリートとするために有効

と考えられる。したがって、設計の段階で構造物の種類を考慮して、一般には部材の外気に接する部分のかぶりを、この観点から大きくしておくことは、締固め作業という施工の過程を容易として、コンクリート構造物全体の耐久性を向上させる有効な方策と考えられる。

#### 4. 3. 2 鋼材のあき

コンクリート構造物において、フレッシュコンクリートが鉄筋の周囲及び型枠のすみずみにまでゆきわたることと、設計の時点で鋼材のあき寸法を適切に定めることおよび粗骨材の最大寸法やスランプを適切に定めることが密接な関係があることに異論はないと思われる。

しかし、現行のコンクリート標準示方書設計編における、鋼材のあきに関する規定には、不明確な部分が少なからず存在する。

鋼材のあきに関してコンクリート標準示方書設計編には、以下の「」内に示すような規定がある。

##### 「10. 3 鉄筋のあき

(1) はりにおける軸方向鉄筋の水平あきは、2 cm以上、粗骨材の最大寸法の4/3倍以上、鉄筋の直径以上としなければならない。また、コンクリート締固めに用いる内部振動機を挿入するために、水平のあきを適切に確保しなければならない。

2段以上に軸方向鉄筋を配置する場合には、一般にその鉛直あきは2 cm以上、鉄筋直径以上とする。」

[解説]において、「この規定は、コンクリートを引張鉄筋の周囲に十分にゆきわたらせるために必要な最小寸法を示したものである。したがって、設計にあたっては、工事現場における施工の程度を考慮して、適宜この値よりも大きい値とするのがよい。・・・なお、コンクリートを十分に締固めるには、内部振動機が、挿入できるように鉄筋の水平あきを確保しておく必要がある」と書かれている。

「(2) 柱における軸方向鉄筋のあきは、4 cm以上、粗骨材の最大寸法の4/3倍以上、鉄筋直径の1.5倍以上としなければならない。」

[解説]において、「柱の軸方向鉄筋のあきも、はりと同じ趣旨で定めたものであるが、柱においてはコンクリートの打ち込みが比較的難しいので、はりの場合より幾分大きくした」と書かれている。

「(3) 直径32 mm以下の異形鉄筋を用いる場合で、複雑な鉄筋の配置により、十分な締固めが行えない場合は、はり、スラブ等の水平の軸方向鉄筋は2本ずつ上下に束ね、柱、壁等の鉛直方向鉄筋は、2本または3本ずつ束ねて、これを配置してもよい。」

##### 「10. 6 鉄筋の継ぎ手

###### 10. 6. 1 一般

(4) 継ぎ手部と隣接する鉄筋とのあきまたは継ぎ手部相互のあきは、粗骨材の最大寸法以上とする。」

[解説]において、「継ぎ手部は、継ぎ手部以外の部分より鋼材断面積が増すので、あまり

大きなあきを要求すると、鉄筋間隔が広がって設計が困難となることを考慮して、10.3の規定より若干ゆるめた規定とした、ただし、継ぎ手部は、一般に、コンクリートが回りにくいので、可能な限り鉄筋間のあきをとっておくことが望ましい」と書かれている。

## 「11章 プレストレストコンクリート

### 11.8 構造細目

#### 11.8.1 緊張材

##### (1) あき

(i) ポストテンション方式の場合の緊張材のあきは、次の①～④によるものとする。

①シースの水平および鉛直方向のあきは、粗骨材の最大寸法の4/3倍以上としなければならない。

②内部振動機を挿入する部分の各シースあるいは各シースグループの水平方向あきは、6cm以上で、かつ内部振動機を挿入するための必要な間隔を確保しなければならない。

③やむを得ない場合には、小型シースを水平方向に2列、シースの鉛直方向に2段まで接触して配置してもよい。

④各シースあるいはシースグループの鉛直方向のあきは、シースの鉛直寸法以上とするのがよい。」

[解説]には、「(i) シースのあきは、一般に次のことを考えて定めなければならない。コンクリートが十分にシースを包み、断面全体にゆきわたって、緊張材とコンクリートとが十分に付着のある状態となる必要がある。したがって、本項①、②に示すような配置とし、多数のシースな接触配置は、なるべく避けるのがよい。

部材厚が制限され、内部振動機の挿入間隔を設けるため等により、やむを得ずシースを接触配置する場合には小型シースを用い、特別な検討をした場合にかぎり、本項③に示すように水平方向2列、鉛直方向2段までの接触配置したシースグループを用いることができる。ここに、小型シースとは、直径が70mm程度以下のものをいう。また、特別な検討とは、応力度計算の断面諸元、シース曲上げ点の間隔、コンクリートの打込み方法、コンクリートの品質についての検討をいう。」と書かれている。

コンクリート構造物の設計実務に携わる技術者は、これらの規定をよりどころにして、あきに関する鋼材の配置を行うのである。しかし、これらの規定には、以下に示すような問題点がある。

(1) 柱の鋼材の最小あき寸法を、はりの場合より大きく規定することは合理的といえないことがある。すなわち、近年のコンクリート構造物の大型化、高鉄筋比の趨勢を考慮すれば、柱のコンクリートの打ち込みが、はりよりも難しいとは一般的に言うことができないと考え

られる。柱は、一般に地震荷重に抵抗するので鉄筋量が大きく、一回のコンクリートの打ち上がり高さが大いといえる。しかし、最近では、桁高が4～5 mを越えるはり部材が珍しくなくなった状況では、むしろ、はり部材の場合が、コンクリートの打ち込みが困難ともいえる。

したがって、示方書における「あき」に関する最小値を規定する条文と解説は、現状の構造物の設計と施工の様態に合わなくなっている虞れがある。はりの鉄筋の最小あきは、土木構造物で一般的に用いられる断面寸法に標準的なコンクリート材料を使用する場合は、コンクリートのゆきわたりを重視して、柱と同様に4 cm以上とするのが合理的である。

(2) 継ぎ手部は、コンクリートのゆきわたりが困難としながら、あきの規定を緩和するのは、論理的に矛盾している。

たとえば、D25の鉄筋を重ね継ぎ手とすれば、直径の約30倍の75 cmにも及ぶ区間は、コンクリートがゆきわたりにくくなる。〔解説〕で、あきを大きくすることを勧めているが、設計実務では、経済的な設計を追及するものであるから、当然のことながら、コンクリート断面を小さくする方向を選択する。したがって、部材の寸法を決定する場合は、示方書に示されたあきの規定の最小値を採用せざるを得ないものであり、コンクリートが行き渡りにくい鋼材配置の設計となることが多いと考えられる。

(3) 鋼材が多段に配置される場合に、あきの規定は、各段ごとに適用するのか、それとも、配置された鋼材の全体に適用するのかが明確でない。一定のレベルに達した設計技術者であれば、常識的に工学的判断すべきことであると思われるが、以下に示すような構造物の事例が少なからずある。

たとえば、図-4.16に示すような、傾斜したウェブの下縁に1段ごとにずらして配置された鉄筋のあきは、各段ごとに隣接するものどうしは最小あきの規定を満足しているが、コンクリートの行き渡りはきわめて困難であると思われる。したがって、この部分のコンクリートは、他の部分に比較して密実でなく強度が小さくなる可能性がある。この種の構造物のコンクリートのひび割れ図を観察すると、この傾斜したウェブ直下付近に、間隔が小さいひびわれが数多く発生している。(資料-4.1参照)

(4) プレストレストコンクリートにおいて、緊張材相互のあきの規定はあるが、鉄筋と緊張材とのあきについて規定されていない。

現在のプレストレストコンクリートの設計図面では、鉄筋と緊張材とを別々の図面で表示するのが慣例となっている。したがって、現場で両者を組み立てた場合に、この両者のあいだのあきが最小あきを満足しないことが、しばしば生じる可能性がある。したがって、緊張材と鉄筋とのあきについての規定を明確にするとともに、両者の相互関係が明瞭に判読できる設計図面の表示方法とする必要がある。

(5) プレストレストコンクリートの場合のシース直径は、一般に鉄筋のそれより大きいにもかかわらず、これを水平に束ねてもよいとするのは合理的といえない。

コンクリートのゆきわたりを良くするために、この規定に従って単純P C箱桁鉄道橋を設計した場合の標準断面は、図-4. 17に示すようである。現場においてスランプ8 cmの、粗骨材の最大寸法20 mmのコンクリートを標準的な努力ははらって打設した結果は、写真-4. 6に示すようであって、直径70 mmのシースを2列に束ねて配置した直下にコンクリートが十分に行き渡らない部分が発生した。

この失敗例は、シースの配置方法を変更して、図-4.18、4.19に示すように分散させ、かつ、コンクリートのスランプを10-12 cmとして、締固め作業を熱心に行うように指導して施工することにより解消できた。しかし、水平束ねシースが「施工不良」を発生させる可能性があることが示された事例である。

以上に示した鋼材のあきに関する事項を通観して、次のことがいえるものと思われる。

密実なコンクリート構造物を実現するためには、鋼材（シースを含む）のあきの設計方法は重要である。また、鋼材のあきの間をコンクリートがゆきわたる過程は、コンクリートの粗骨材の最大寸法とワーカビリティ特にスランプの値が大きく影響する。

しかし、現行のコンクリート標準示方書のあきに関する規定には、最近のコンクリート構造物の大型化、高鉄筋比化の趨勢が十分に考慮されていない部分がある。したがって、コンクリートの行き渡りや締固めの施工が困難なCランクの設計レベルの構造物が設計されることが多くなると思われる。これを、標準的なBランクの材料とBランクの施工とを組み合わせる標準的な構造物の耐久性能を実現できるBランクの設計レベルとするために、以下に示す事項を示方書あるいは仕様書に規定することを提案する。

(1) はり部材および柱部材にかかわらず、一回にコンクリートが打設される部分は、すべての鋼材が配置された状態の平面投影図における鋼材（シース含む）の水平あきは、粗骨材の最大寸法の4/3以上とするのを原則とする。この規定を適用することが設計上極めて不経済であることが明らかな場合は、一部の水平あきを、粗骨材の最大寸法まで小さくしてもよい。ただし、この場合は、連続した2箇所以上のあきをこの値としてはならない。

(2) コンクリートの締固めに内部振動機を使用する場合は、すべての鋼材が配置された状態の平面投影図において、これを挿入するための60 mmのあきを、縦横いずれの方向にも50 cm以下の間隔で設けるのを標準とする。この規定を適用することが出来ない場合は、材料の仕様の選定あるいはコンクリートの施工方法について特別の検討をする必要がある。

この提案は、フレッシュコンクリートが型枠に投入され、ゆきわたる過程は、まず重力方向即ち鉛直方向に移動すること、および内部振動機の振動部分がフレキシブルホースの先端

の剛な円筒状であり、これを作業員が鉛直方向に挿入することを考慮すれば、当然のことといえる。

一方、現在のコンクリート構造物の建設の過程においては、設計の意図を施工に伝える唯一の方法は、設計図面である。最近では、標準的な設計図面に、一般図、構造図、配筋図、P C鋼材配置図、鉄筋加工図、P C鋼材形状図と共に、施工に携わる技術者が設計の意図を理解しやすいように、断面の鉄筋やP C鋼材の標準配置図が添付されるようになった。(図-4.20 参照) この標準配置図によって、かぶりの値や鉄筋の錯綜の程度について、直感的に理解できるかなりの情報と注意喚起とを施工に過程に伝えられる。しかし、断面投影図だけではコンクリートのゆきわたりの優劣を判断するには不十分であり平面的な状態がさらに重要である。したがって、ここでは平面投影図を作成することを提案した。設計作業には、設計費用が伴うことは当然のことであり、すべての鋼材を考慮した平面投影図を、人力で作成することは、これまでの通常の設計作業量を大幅に増加させることになることが懸念される。しかし、近年のマイクロコンピュータのディスプレイ機能と図化装置の発達を利用すれば、断面の形状と鋼材の配置に関する数値情報から図面化することは、計算機の得意とする分野であり、それほど設計費用を増加させることなく優れた施工性を有する設計が可能となると考えられる。

### 4. 3. 3 最小鋼材量

現行のコンクリート標準示方書において、部材の最小鋼材量についての構造細目の規定は、様々な章で取り扱われているが、その目的は、以下に示す二つのものに大別できる。

(1) 荷重によって部材に発生する種々の断面力によるコンクリートのひび割れを制御し、ひび割れ発生が急激な部材断面の破壊に至らないような程度のじん性を保有させること。

(2) 構造物の施工中に生ずる温度変化や乾燥収縮等によって発生するひび割れを有害でない程度に制御すること。

(1)を主たる目的とした規定では、部材のコンクリート断面積に対する鉄筋断面積（鉄筋比）、あるいは、鉄筋量の絶対値が示されると共に、鉄筋の直径、配置間隔（部材寸法に対する比率及び絶対値）の最小値が示されている。

(2)を主たる目的で定められている規定では、鉄筋の間隔、鉄筋の直径、配置する鉄筋の単位部材長さ当たりの鉄筋断面積について示されていることが多い。コンクリートの乾燥収縮と温度勾配とによるひびわれ制御を考慮して定められているが、それぞれの場合についての統一的な考え方は明確になっていないといえる。また、プレストレストコンクリートとディープビームに関しては、コンクリート断面積に対する鉄筋の断面積（鉄筋比）として最小鋼材量が規定されているが、その他の場合は、鉄筋比という考え方による最小鋼材量の規定方法とはなっていない。

コンクリート構造物の耐久性を向上させ密実なコンクリート構造物を実現するための設計方法に着目する場合、施工中の乾燥収縮や温度勾配などによるひびわれを制御するための最小鋼材量は重要である。すなわち、設計荷重が作用する前の施工中に発生するひびわれは、コンクリートそのものが空隙が少なく密実であっても、この種のひびわれの幅が著しく大きくなった場合は、それが内部の補強鋼材の腐食の誘因となって、コンクリート構造物全体の耐久性に悪影響を与えることになるからである。

実際の設計実務における様々な構造物について、いかなる実務担当者が携わる場合であっても、鋼材の配置を具体的かつ標準的に決定できるためには、以下に示す事項が明確に規定されている必要がある。

(1) 最小鋼材量を検討する断面の位置と配置する範囲

(2) 最小鋼材量の値；コンクリート断面積に対する割合（鉄筋比）と絶対値の大きい方の値

(3) 使用できる鉄筋の最小直径；絶対値と主引張鉄筋等に対する比率の大きい方の値

(4) 配置する最小間隔；絶対値と部材寸法に対する比率の小さいほうの値

現行のコンクリート標準示方書設計編において、これらの事項が明確に示されているのは、ディープビームの構造細目の規定のみといえる。

最小鋼材量の値を、主鉄筋量に対する比率で規定している場合が多いのであるが、コンク



リートの乾燥収縮や温度勾配によって発生するひびわれは、コンクリートの仕様が一定で、標準的な施工方法であれば、部材の厚さ、幅、高さなどの断面形状に影響されるものである。そして、断面形状寸法は、構造力学的な検討とともに、美観上の理由によっても決定されるものであるから、主引張鉄筋量が異なっている同一コンクリート断面のコンクリート構造物は数多くある。このような場合に最小鋼材量を主鉄筋に対する比率で規定すると、構造物のひび割れ性状は、それぞれ、大幅に異なることになる。

この一例が、図-4.21に示す、道路橋の連続合成桁を支持する、部材厚さ1.7m、幅18.5mの小判型の充実断面の橋脚におけるひび割れの発生状況である。

この工事では、ほぼ同じ高さと同断面形状寸法の3基の橋脚が同時期に建設された。施工方法は、1リフトを3m程度とした。その結果、図-4.21に示すように、水平打ち継ぎ面より上部の新コンクリートに、打ち継ぎ面と直角にひび割れが発生した。そして、極めて特徴的なことは、設計上、固定支承が設置されるため、他の2基の可動支承が設置される橋脚に比べて、主鉄筋量が大きい固定橋脚に発生したひび割れは、幅が、0.2~0.25mm程度であったのに比べ、可動橋脚に発生したひび割れは、幅が、0.3~0.35mmと大きくなったのである。

この原因について検討すると、橋脚に配置される横方向鉄筋の量が、主鉄筋に対する比率で決定されており、可動橋脚では、コンクリート断面積に対する鉄筋比で、0.05%程度(D13ctc300)に対し、固定橋脚では、0.18%程度(D22ctc250)と約3倍も多く配置されていたことが判明した。

最小鋼材量に対する配慮が不足していたために、コンクリートにひびわれ幅の大きなひびわれが発生したもう一つの例は、図-4.22に示すようである。杭基礎のフーチングを拡幅して、プレストレスによって軸方向の補強を行ったのであるが、構造解析によって算定される方向のみの補強に気をとられてしまい、それと直角方向の鉄筋の配置、即ち最小鋼材量の鉄筋を配置することをしなかったため、図-4.22に示すような、幅が0.5mmを越える大きなひびわれが発生したのである。引き続き同じ構造物を施工したので、2基目からは、コンクリートのあらゆる断面に、コンクリート断面積に、0.15%以上の鉄筋を配置することによって、ひびわれ幅を、0.1~0.2mm程度に制御できたのである。

この種の鉄筋コンクリート壁状構造物を鉛直方向に打ち継いでゆく場合に、新コンクリートの水平打ち継ぎ面からの垂直方向のひびわれは、しばしば発生するものである。ここで示した、小判形橋脚のひびわれ発生状況は、中空矩形橋脚、重力式橋台、擁壁、水路、カルバート、貯水槽等の構造物で起こるものであり、現場の施工技術者は、この問題で常に悩まされているのが現状である。

改訂されたコンクリート標準示方書施工編のマスコンクリートの章における、温度ひびわれ制御についての規定では、ひびわれ制御鉄筋の配置については、相当量の鉄筋を必要とす

るという理由で積極的に推奨されていない。

原子力発電所、液化天然ガス地下タンク等の大断面の重要構造物の場合では、マスコンクリートの温度ひびわれにたいして事前の丁寧な検討と施工計画の立案を行うものである。しかし、部材厚さが2 m程度の一般のコンクリート構造物においては、コンクリートの単位セメント量をある程度は制限して標準的な施工方法とすれば、温度ひびわれや乾燥収縮によるひびわれを有害でない程度に制御できるような方策を設計の時点で行えるようにしておくことが実用的である。この程度の部材厚さの一般の鉄筋コンクリート構造物の場合は、所要のひびわれ制御鉄筋を配置しても、著者の実構造物における経験の範囲では、それほど不経済とならないと考えられる。

そこで、標準的な施工方法による施工中のコンクリートの乾燥収縮や温度勾配によるひびわれを制御するために、最小鋼材量を、以下に示すように示方書で規定することを提案する。

- (1) 部材には、コンクリート断面積の0.15%以上の付着のある鋼材を表面付近に配置するのを原則とする。
- (2) 配置する鋼材に異形鉄筋を用いる場合は、その直径は13 mm以上を原則とする。
- (3) 配置する間隔は、部材の最小厚さの2倍以下で、30 cm以下とするのを原則とする。特に、コンクリートの打ち継ぎ面付近では、この間隔を15 cm以下とするものとする。

現時点では、図-4.21に示すような、部材厚さが2 m程度で、乾燥収縮と温度勾配との両者の影響がきつ抗しているようなコンクリート構造物のひびわれ発生のメカニズムについて、必ずしも解析的に解明されているとは言いがたい。したがって、ここで提案した値より小さい最小鋼材量であっても、構造物の耐久性に悪影響を与えるようなひびわれが発生していない構造物も存在していると考えられる。しかし、現時点においては一般のコンクリート構造物に対するこの種のひびわれによる悪影響を低減させるためには、ここで提案した最小鋼材量を、設計の時点で配置するように規定しておくことが効果的であると考えられる。

#### 4. 4 設計図の表示方法に対する提案

現在の我が国におけるコンクリート構造物の現場では、施工とは、「設計図書どおりの構造物を、工期内に、安全に、経済的に完成させる」との認識があると思われる。このような状況での設計図の役割は、設計計算書、特記仕様書、工事内訳書等の設計図書の中でも、工事に携わる発注者側および施工者側の現場技術者、職長、職人等から最も参照される重要なものである。

設計図とは、設計の過程で、設計計算を行なって安全度の照査を行い、構造細目を検討して鉄筋やP C鋼材等の補強鋼材の配置を決定する等の作業を行った設計者の意図を、現場の施工に携わる技術者や作業員に直接伝えることのできる唯一の手段であるといえる。したがって、耐久性の優れた良いコンクリート構造物を実現するためにも設計図の役割は極めて重要である。

しかし、重要な役割を担う設計図に、どのような事項を、どのような様式と記載方法で示すことが、設計の意図を施工の過程へ十分に伝え、設計の時点で想定したコンクリート構造物を実現できるかという、エンジニアリングよりもマネジメントに関する事項については、これまで殆ど研究されていない。

耐久性の優れた良いコンクリート構造物を実現するためには、設計技術者ばかりでなく施工技術者にも責任があることは当然ある。しかし、現在の我が国の分業化した建設業界の体制での大部分のコンクリート工事においては、施工に着手する前に施工を担当する技術者が、設計に誤りがないか、あるいは施工の困難なCランクの設計レベルではないかということ、設計計算書や設計図について入念に照査することは殆どないと思われる。

したがって、構造物の断面形状寸法や補強鋼材の配置方法については、たとえ設計図の表示に問題点や不合理があっても、施工現場においては、「設計図どおりにやる」ということが原則になる。設計図面通りに型枠を製作・加工・組み立てし、設計図面通りの寸法に鉄筋を加工し、設計図面に示された位置と寸法に組み立てようとすることになる。

しかし、現在のところ、著者の知る限りにおいては、設計図に示された数字の寸法どおりに鉄筋やP C鋼材を組み立てることのできたコンクリート構造物は殆どない。

その原因の一つは、人間の行う作業であるから、施工誤差を伴うことが避けられないことによるものがあるが、もう一方で、設計図において実際の施工が不可能なことが表示されていることによるものが極めて多いのである。すなわち、近年のコンクリート構造物の大型化、複雑化および材料の高強度化、鋼構造物との競合による自重低減指向等によって、部材は、よりスレンダーとなり、薄い部材に多くの補強鋼材が配置される傾向にある。そのような状況で、鋼材の型枠内での納まり具合や、加工した形状の鉄筋の組み立て順序等について十分な検討を行わずに作成された設計図では、以下に示すような理由で設計図どおりに施工することが不可能となる。（例えば図-4. 23、写真-4. 7参照）

(1) 設計図に表示された寸法によれば、同一の空間的位置に2種類以上の補強鋼材を同時に配置することを要求しているため、物理的に不可能となる場合。

(2) 設計図に表示されたそれぞれの鉄筋の加工形状によれば、組み立ての作業順序の制限を受けて、所定の位置に全部の鉄筋を配置することが、極めて困難となる場合

(3) 設計図に表示された全ての鋼材を配置すると、所定のあきが確保できなくなり、コンクリート打設時におけるコンクリートのゆきわたりが不可能となる部分が生じる場合

このような施工不可能な設計図が作成されて現場に引き渡されると、施工を担当する技術者が、施工が容易な鋼材の加工形状に変更し、それが設計者の意図とは異なった細部構造となる場合も生じることになる。このような状況が起こる原因としては、以下に示す事項が挙げられる。

(1) 設計者が施工の過程についての知識がない。あるいは、施工のことを知らなくても設計作業を行うことができる。施工が容易となることを考慮した構造細目の詳細な検討をすると、現行の設計作業に対して支払われる費用の範囲内では収支バランスがとれなくなる。

(2) 構造物の部材のある断面についての補強鋼材の配置方法について、数枚の設計図によって表示するのが一般的であるので、すべての補強鋼材が配置された状態についての施工性についての検討を行うことが困難である。

(3) 設計図において、設計で意図したそれぞれの事項について、どのような方法で表示するのかという基本的考え方やルールが明確でない。

従来のコンクリート構造物の設計図には、構造物の機能、使用性、終局耐力、耐久性等を許容応力度設計法で総合的に照査された結果が表示されているといえる。しかし、一般の鉄筋コンクリート構造物の場合、施工の段階で設計図から読み取ることのできる事項は、構造物の断面形状寸法、鉄筋の直径、配置間隔、加工形状、鉄筋の配置位置、最も外側に配置された鉄筋の中心から部材外縁までの距離等についての、それぞれの数字で示された値であり、実際には太さのある補強鋼材も一本の線で表示されたものにすぎないものである。

したがって、これまでの設計図の表示方法では、施工にあたって設計者の意図を設計図から明確に汲みとって理解することは困難なことと考えられる。

このたび改訂されたコンクリート標準示方書設計編の設計体系は、使用、終局、疲労の各限界状態について安全度の照査を独立して行えるため、それぞれの設計者が設計の過程において構造物のどのような限界状態について検討しているのかは、許容応力度に対する照査をしていた場合に比べて非常に分かりやすくなったといえる。すなわち許容応力度設計法では、設計計算の過程で設計実務者の意図が明らかとなるには、極論すれば、所要の補強鋼材量の値のみであり、これに、定着や付着に関する構造細目の規定が追加されているといえる。一定の範囲であれば、太い鉄筋を広い間隔で配置しても、細い鉄筋を密に配置しても、構造物

の性能には影響しないような設計体系である。許容応力度の値の意味も、それが総合的な安全度を考慮されているため、設計者には極めて理解しづらいものである。したがって、設計の意図と設計図に示された鉄筋の直径や配置間隔等の数字とを関連づけようとしても、一般には、その根拠が不明であったものと思われる。

しかし、このたび限界状態設計法を取り入れて改訂されたコンクリート標準示方書設計編によれば、これらの問題点は以下に示すように大幅に改善され、設計者が意図をもって定めることが可能となったといえる。

(1) 使用限界状態に対する検討は、ひびわれ幅を制限することによって行い、鋼材の直径や中心間隔およびかぶりの値を用いて構造物の発生ひびわれ幅を算定する。したがって、設計図に示されたこれらの寸法は設計の意図そのものである。施工の便宜上これを変更することは、構造物の安全度を变化させることになることは容易に理解できる。

(2) 終局限界状態および疲労限界状態に対する検討において、強度に関する照査式から鋼材量が決定される。そして、使用、終局、疲労の、どの限界状態から構造物の鋼材量が決定されているのか、逆に言えば、設計された構造物は、どの限界状態に対して最も厳しいかということが設計者は明解に認識できる。

(3) 構造物の耐久性に密接に関係がある鋼材の腐食に対する環境条件を区分し、これに応じてかぶりの最小値を变化させることができる。

(4) 鉄筋の基本定着長は、コンクリートの付着強度と鉄筋の直径のみならず、その鉄筋が配置されている場所および鉄筋と直交する横方向鉄筋の中心間隔の影響も考慮して算定することができる。

限界状態設計法では、設計図に示された鋼材配置の関する寸法は、設計の意図が明確に反映されたものであり、これまでの許容応力度設計法の場合より、これらの寸法が持つ意味は重要になったといえる。したがって、設計図どおりの施工が物理的に不可能であったり、コンクリートの行き渡りや締固めが困難なために、施工の過程で変更されるような設計図を作成することの、構造物の安全性に対する悪影響の程度は大きくなる。

これらの状況を考慮すれば、コンクリート構造物の設計体系を変更したことに伴って、設計図の表示方法についても見直す必要があると考えられる。

このような観点から、以下に示すような設計図の表示方法を提案する。

(1) 鋼材配置図におけるかぶりの表示方法を、図-4.24に示すように統一する。すなわち、寸法線を用いた寸法の表示は鉄筋間隔のみとして、かぶりの値は一切書かないこととする。そして、かぶりは、コンクリート面から直角の引き出し線と矢印と「かぶりの値」を楕円で囲んで表示する。したがって、表示した数字は文字通り「かぶりの値」であり、施工の過程で一目で設計図から判読できる。

(2) コンクリートの行き渡りと締固めに関して、施工の容易なBランクの設計レベルが、

施工の困難なCランクの設計レベルかが判定できる、図-4.25に示すような、すべての鋼材を配置した場合の鋼材のあきと施工性との関係を検討できる、標準断面についての平面投影図および標準断面図を設計図集に添付する。

(3)設計図には、主要な設計条件と共に、コンクリートの設計基準強度、設計の過程で想定した粗骨材の最大寸法およびスランプの値を必ず表示する。また、設計の時点で、コンクリートの打設リフト割り、内部振動機の直径等の施工方法の前提があれば、それを必ず表示しておく。

(2)および(3)の事項を設計の過程に要求することは、設計に要する費用が現在より増大する可能性がある。しかし、コンクリート構造物の設計図は、材料数量の算定の根拠となる重要な資料であると共に、その設計図の内容の優劣が施工性に大きな影響を与え、耐久性の優れた良いコンクリート構造物を標準の施工努力によって広く実現するために極めて重要な役割を担っているものである。したがって、構造物の建設から供用期間中にわたる、計画、設計、施工、点検、補修等の全体費用を考慮すれば、設計の時点での費用が幾分増加しても、慎重かつ丁寧な作業をしておくことが総合的には経済的になると考えられるのである。

## 第5章 密実なコンクリート構造物を実現する施工方法に対する提案

### 5.1 概論

耐久性の優れた良いコンクリート構造物を実現するためには、注意深い設計を行い良質な材料を選定しても、施工の過程に欠陥があれば、それまでの技術的努力は水泡に帰すことは論を待たない。建設材料としてのコンクリートは、鋼材やプラスチック材料のように、現場で使用する前に工場で大量生産された材料の品質を確認したり、仮組み立てを行って部材間の取り合いを確認をすることができないので、施工の過程が著しく影響するのは当然のこととなる。コンクリートは安価で耐久性の優れた建設材料であり、原材料が国内で調達できる優れた利点を持っているので、今後も構造物の主材料としての役割を担ってゆくと思われるので、施工の過程での「施工不良」を低減する方策を確立することは極めて重要である。

劣化が顕在化したコンクリート構造物の調査報告では、原因の大きな部分は、「施工不良」に起因する欠陥によるとされることが多い。かぶりが不足していること、コンクリートの空隙が多く密実さが不足していること、コンクリートに不測のひびわれが多数発生していること等が欠陥とされている。これらの欠陥は、施工中の、コンクリートの配合、打ち込み、締固め、養生が不適當であること、鋼材の組み立て・配置方法や型枠あるいは支保工の取り外し方法が不適當であることなどに起因していると考えられている。

これらの「施工不良」を低減し取り除く目的に対するアプローチとして、各方面から以下に示す様々な事項が指摘されてきたと考えられる。。

- (1) 施工を考慮した設計をする。
- (2) 構造物の形状寸法や施工方法を考慮したコンクリートの仕様を選定する。
- (3) 工事費用や工期を適切に選定する。
- (4) 職員や作業員の知識や能力の向上のために教育する。
- (5) 軽量で高性能な締固め機械器具を開発する。
- (6) 品質管理や検査を厳重に行う。
- (7) 作業打ち合わせや指示を徹底させる。

これらのそれぞれの事項には、特別に目新しいものはなく、コンクリート構造物に携わる技術者であれば漠然とした認識は持っていることといえる。ところが、これらの事項を施工の過程へ具体的に取り入れる方法については明確な思想がないのが現在の最大の問題と考えられる。すなわち、これらの総ての事項をあらゆる構造物に適用する考え方は工学的に適切とは言えず現実的にも不可能といえるので、総合的なアプローチの方法が必要となる。

この問題を解決できるのが、本研究の第2章で提案した総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計の提案である。コンクリート構造物の材料、設計、施工の各仕様を、A、

B, Cの3ランクのレベルに区分して、これを総合的に組み合わせて要求する構造物の耐久性能を実現するという概念を導入すれば、それぞれの構造物に対して上記の事項をどのように適用するかという具体的検討が可能となる。

施工レベルを3ランクに区分して整理すると、表-2.2に示すようであり、人、材料、機械器具および方法に関する事項に分類できる。

本章は、現在の大部分の施工体制の実状は、標準のBランクの施工レベルであるとの前提にたち、これと材料および設計レベルとを組み合わせた場合の問題点およびBランクの施工レベルを維持するための必要な事項について論じた。また、Aランクの施工レベルを実現する具体的方策の一例を提案した。

なお、以下に示す理由で、現在の大部分の施工体制の実状は、標準のBランクの施工レベルであり、当分の間はこの状況が続き、将来の「人」に関する事項は、むしろCランクの施工レベルとなる虞れがあると考えられる。

(1) レデーミクストコンクリートの使用の普及とコンクリートポンプ車による打設方法は、今後とも続くものと考えられる。

(2) 現場でフレッシュコンクリートを取り扱う作業員の質と能力が、今後の教育によって高まることは期待できない。

(3) 現場を担当する技術者や作業員が、普通の標準的な努力をすれば、要求する耐久性能の構造物が実現できるようにするべきである。現時点で「普通の標準的な努力」の内容を、明確に定義するのは困難であるが、技術者として知り守らなければならないことや作業方法の標準を、示方書や規準あるいは施工マニュアル等に具体的に分かりやすく示すことで今後対処できる。

(4) 耐久性の優れた良いコンクリート構造物の実現には、計画、設計、施工、点検、補修という構造物のライフタイムの全体の経済性を考慮することが大切である。費用と効果・影響度の関係は、できるだけ早い時点で対策を講じるのが得策であり、施工における欠陥を減少させるために、施工に関する規定や品質保証規準を厳しくすることだけを検討することは、全体的に不経済になる虞れがある。

(6) 現在の示方書や規準に示された施工に関する規定は、「入念に」「十分に」「注意しなければならない」などの、精神規定が示されるにことが多い。このような規定が効力を発揮するためには、コンクリート構造物の一連の建設の過程を統括的に把握できる有能な技術者が存在する必要がある。近年の、設計と施工に関する細部の作業の分業化の趨勢を考慮すると、施工に関する有能な技術者が育成される状況は今後も望めない。



## 5. 2 フレッシュコンクリートの仕様の選定方法に対する提案

近年、大部分のコンクリート構造物の施工では、レデーミクストコンクリートとコンクリートポンプ車が使用されている。したがって、一般的な施工の場合、レデーミクストコンクリート工場で製造されたフレッシュコンクリートが構造物へ打設されるまでに、大別して3つの過程に区分できる。すなわち、アジテータ車による工場から工事位置に設置されたコンクリートポンプ車のホッパーに投入される過程、コンクリートポンプ車の配管中で圧送される過程、および型枠内を流動して締固められる過程がある。これらの3つの過程において、コンクリート材料の仕様と施工の容易さとの関係で現場において問題とされる事項は、コンクリートのスランプといえる。

コンクリート材料そのものの性質に着目して空隙の少ない密実なコンクリートを実現するためには、単位水量の少ないコンクリートの配合とするのが原則である。したがって、コンクリート標準示方書施工編における条文には、「単位水量は、作業ができる範囲内で、できるだけすくなくなるよう、・・・」解説には、「コンクリートのスランプは、作業に適する範囲内でできるだけ小さくしなければならない。・・・」と規定されている。

現在のコンクリート標準示方書施工編では、スランプに関する条文の規定で、「打込み時のスランプは、一般の場合、5～12 cm、断面の大きい場合は3～10 cm、また無筋コンクリートの場合は3～8 cmを大体の標準とする」とあるが、現在のコンクリート工事の一般の施工体制を考慮すると、以下に示すような問題点がある。

(1) レデーミクストコンクリート工場から現場までの運搬に用いる、一般のアジテータ車の場合、スランプが8 cmより小さい場合は、アジテータ車のシュートからコンクリートポンプ車のホッパーへスムーズに排出できない場合がある。したがって、スランプの下限値として示された、3～5 cmの場合は、標準的な方法では円滑な施工が困難となる。

(2) 現在の土木構造物の特記仕様書で規定されるコンクリートのスランプの値は8 cmの場合が多い。JISレデーミクストコンクリートを使用すると、現場への受け入れおよびフレッシュコンクリートの品質試験を行う場所は、荷降ろし地点すなわちコンクリートポンプ車への投入直前となる。したがって、コンクリートポンプ車による圧送中のスランプ低下および型枠内の流動と締固めの容易さを考慮してスランプの仕様を、場合場合によって定めることが困難となる。示方書の解説で、運搬中のスランプロスを考えて配合を定めることが示されているが、一般の土木構造物のコンクリートのスランプの規定は一義的に規定されているのが実状である。

例えば、比較的温暖な時期に、図-5.1に示すような長距離配管によってコンクリートを打設するような場合でも、コンクリートのスランプの仕様は8 cmとされることが多い。

施工技術者が、コンクリート打設中に予想される様々な不測の事態を考慮して、8 cmよ

り大きいスランプとすることを発注者側と協議しても、大部分の場合は、発注前の現場説明書にこの値が示されているため、これを承知で、すなわちこの値で施工可能として入札し受注したはずだ、という理由で拒否されることが多い。したがって、ルールに従ってこれを実現するためには、相当の時間と労力を費やして説明資料を作成して承諾を得ることが必要となるので、殆どの現場では、黙って勝手にやることになる。

現在の施工体制を前提として、上記の3つの作業に適するコンクリートのスランプの値を選定する具体的方法を示方書や仕様書に示すことが重要である。

(3) 単位水量とスランプとの関係は、近年の各種の混和剤が技術開発され実用化された状況では、これまでのように、スランプが小さければ単位水量も小さいと単純にはいえないことを、示方書の条文で明確に示す必要がある。

高性能減水剤を使用すれば、スランプ8cmのコンクリートより単位水量の小さいスランプ12cmのコンクリートは、コンクリート材料の価格を大きくすれば製造可能である。

あらゆる場合にスランプの小さいコンクリートが良いコンクリートだと言う固定した常識が、特に発注者側の技術者にあることは、我が国全体のコンクリート構造物をより良いものにするために、非常に大きな弊害となっていると思われる。これは、工事費の低減の要請に対して、通常のAE混和剤を使用した範囲では、同じ設計基準強度のレデーミクストコンクリートの積算価格がスランプが小さい方が低いことも影響していると考えられる。

しかし、近年のコンクリート構造物の信頼性についての問題が呈されている状況を考慮すれば、公共性の高いコンクリート構造物の品質を高めるためには、初期建設段階においてコンクリート材料に費用をかけて柔軟に対処することを検討する必要もある。これらを、実際のコンクリート構造物に広く適用するためには、各企業体の仕様書と積算標準とを同時に改訂しなければならないのであるが、現在の会計検査の体制が存在する状況では、各企業体が独自にこれを始めることは、極めて困難である。まず、基本的な技術的問題について参照される土木学会のコンクリート標準示方書で、これらの方法が具体的に規定される必要がある。

(4) コンクリート構造物におけるスランプの仕様は、コンクリートポンプ車による圧送性との関係で考慮されることが多いが、運搬中のスランプロスおよび部材内部へのコンクリートの行き渡りと締固め性能をも考慮されなければならない。

しかし、特記仕様書で規定されるスランプの仕様が、そのままレデーミクストコンクリートの発注の仕様となることが一般的であるので、打ち込み時のスランプでなく荷降ろし地点でのスランプの仕様となることが多い。コンクリートポンプ車による圧送中のスランプロスの影響や打設位置でのコンクリートのコンシステンシーと行き渡りや締固め程度の影響を考慮すれば不都合な場合が生じることは容易に考えられる。

スランプの仕様の選定には、現場と構造物の条件に対して柔軟に対応しなければならないことを明確にコンクリート標準示方書施工編においては示すことが重要と考えられる。

現在の土木構造物における一般のコンクリート工事では、コンクリートの仕様を決定する直接の担当者は、その工事の特記仕様書の作成者であるといえる。すなわち、ある工事に使用されるコンクリートの仕様は特記仕様書によって示されるといえる。

特記仕様書で示されるコンクリート工事に関する標準的な内容は、表-5.1 に示すようであり、以下に示す事項のみが規定されることが多い。

(1) コンクリートは、レデーミクストコンクリートを使用するものとする。

(2) レデーミクストコンクリートの配合の諸元として、規格（標準品か特注品；一般には標準品とされる）、種類（普通か軽量；一般には普通）、呼び強度（設計基準強度とされる）

スランプ（8 cmとされることが多い）、粗骨材の最大寸法（40 mm、25 mm、20 mm）、セメントの種類（普通、早強、高炉）、水セメント比の最大値等が規定される。また、場合によっては、混和剤の種類（添加剤を使用する場合は塩分を含まないものを使用すること）についての注記が追記されることもある。

我が国における工事契約の慣例として、特記仕様書に記載される事項は、それぞれの工事の個別の施工条件を考慮して、共通仕様書に示された規定を補完したり適切な運用ができることを目的として規定されるものである。しかし、現在のところ、大部分の特記仕様書におけるコンクリート工事に関する規定の内容は、コンクリート材料の品質に関する事項について、これを最大公約数的に規定しているに過ぎない状況であり、工事位置の施工条件、コンクリートの打設方法、コンクリート工の容易さからみた構造物の特徴などについての配慮は、あまりなされていない場合が多いと考えられる。したがって、特記仕様書に規定されたコンクリートの仕様を厳密に順守していたのでは、標準のBランクの施工レベルと工事費用をもってしては施工が困難な場合が少なからず生じていると考えられる。そのような状況の下で、工事を工期内に遂行しなければならないのであれば、コンクリートの品質に関して、いいかげんな方法やごまかした方法で施工されることになる。そして、現場を担当する技術者や作業員の仕様書にたいする敬意が低下して、コンクリートの品質を良いものにしようとする熱意がなくなってくる虞れがある。

したがって、全国各地の多数の工事現場において良いコンクリート構造物を実現するためには、特記仕様書に示すコンクリートに関する規定をいかなるものとするかは極めて重要であると考えられる。

そこで、特記仕様書には、コンクリートの仕様の決定および工事費の積算にあたって想定したコンクリートの施工方法を記載しておくことを提案するものである。

この提案は、数多くの現場を担当する実務者にとって、それぞれの工事について最も適切な方法を事前に決定することを要求しているものではない。その時点では、はっきりしなかったり不明な事項が残されたまま特記仕様書を作成せざるを得ない状況がしばしば生じることは当然のことである。しかし、現状の最大の欠陥は、そのような不備のある可能性がある特記仕様書が、極めて大きな権威をもって運用されていることなのである。特記仕様書で一旦

規定された事項を、現場の条件を考慮して十分な技術的検討に基づいても、これを変更しようとするのは著しく困難であるという状況を変えることが必要と考えるのである。

したがって、特記仕様書には、想定したコンクリートの施工方法の記述と共に、実際の施工にあたり現場条件の制限により、コンクリートの施工方法やコンクリートの仕様を変更するための協議をすること及び変更した場合は設計変更の対象とすることを明記しておくことが必要となる。

この提案は、現在の一般的な公共土木工事の特記仕様書の内容の慣例からは著しく外れるものといえる。しかし、総合的に良いコンクリート構造物を実現するためには、コンクリートの品質の仕様を、構造物の施行条件によって決定することは、コンクリート技術者にとっては常識である。業界や学界から注目をあつめるような特別な構造物は、優秀な技術者と学識経験者によって構成される技術検討委員会によって、これらの検討と意志決定が公の過程でなされてきたのである。そして、コンクリート構造物の劣化や耐久性が問題とされてきたものは、このような慎重な技術的検討がなされたものではなく、ごく一般的な人知れず建設された構造物が大部分であるという事実を認識する必要がある。

全体のコンクリート構造物を現在の施工体制を生かしつつ良いものとするためには、現場を担当する発注者側と施工者側の技術者にとって、仕様書を順守する熱意と、コンクリートの施工にたいする技術的工夫をしやすいシステムを作ることが必要である。

そこで、標準的なコンクリート工事の特記仕様書には、以下に示すような事項を規定しておくことを提案する。

(1) コンクリートはレデーミクストコンクリートを使用するものとする。

(2) コンクリートの施工は以下に示す方法によることを前提とする。現場条件等によってこの方法によりがたい場合は監督員と協議するものとする。コンクリートの施工方法及びそれに伴うコンクリート材料の使用の変更は設計変更の対象とする。

(i) コンクリートの運搬

- ・コンクリートの運搬は、ピストン式コンクリートポンプ車による。最大圧送管長さは、実長(150)m、水平換算長(400)mとする。
- ・圧送管の最大高低差は、上り(25)m 下り(0)mとする。

(ii) コンクリートの打設・締固め

- ・コンクリートポンプ車によるコンクリートの打設回数は、(25)回とする。
- ・締固めは、一回の打設あたり、直径(60)mmの内部振動機(あるいは型枠振動機)を(5)台使用するのを標準とする。

(iii) コンクリートの養生・表面仕上げ

- ・養生は、(湿潤)養生を、(2)日間行うものとする。
- ・打ち上がり表面は、(金)こてにより仕上げ、(被膜養生剤を散布)するものとする。

(3) レデーミクストコンクリートの配合諸元は次表のとおりとする。

この表で、以下の事項について規定する。

規格 種類 呼び強度 スランプ 粗骨材の最大寸法 セメントの種類  
水セメント比の最大値 単位水量の最大値

(注) 一般のAE減水剤以外の高性能減水剤や流動化剤を使用する場合は、監督員と協議して承諾を得なければならない。これらの混和剤を使用した場合は、設計変更の対象とする。

ここで提案した事項の内容には斬新なものはない。しかし、一般的なコンクリート構造物の工事の特記仕様書の影響が大きいことを考慮すれば、全体のコンクリート構造物をより良くできる有効な方策と考えられる。

### 5.3 打ち込みおよび締固め方法に対する提案

空隙の少ない密実なコンクリートを実現するために、フレッシュコンクリートの打ち込みおよび締固め作業は重要である。

現在のところ、これらの作業について施工を担当する技術者及び作業員の間には存在する、以下に示す暗黙の了解事項があると思われる。

(1) コンクリートの打設を開始したら、作業をできるだけ短い時間で終了させるよう努力する。コンクリート打設作業は、天候の悪化、アジテータ車の道路の渋滞による遅延、機械器具の故障、停電等の不測の要因に直面する可能性にさらされている。また、作業員一人当たりの出来高を向上させるために、短時間に作業を終了させることのできる現場の技術者は優秀である。

(2) 出来るだけ少ない作業員数、出来るだけ少ない台数の内部振動機や高圧水洗浄機等の機械器具によって、大量のコンクリートを施工するのが、コンクリート工事において儲けるコツの一つである。

この傾向は、示方書における、コンクリートの打ち込みや締固めを入念に行うように定めた規定とは矛盾するものである。

しかし、現在のコンクリート工事では、コンクリート工に関する表 5.2, 5.3 に示すような標準積算基準が存在する。したがって、工事を請負う建設会社は利潤を追及するため、一般には、標準積算基準に示された労務歩掛かり及び小機材費用を越えない範囲での企業努力を行うものである。

一回のコンクリートの打ち込みおよび締固めに要する作業員の人数や内部振動機の台数等の実際の数量は、一回のコンクリートの打設数量、部材の断面形状などによって異なるものであり、これを一義的に定めることは困難といえる。しかし、コンクリート標準示方書で示された、「1台の内部振動機で締固められるコンクリートの容積は、・・・、2人で扱う大型のもので1時間に30m<sup>3</sup>程度である。」という解説文や、しばしば実施される労務歩掛かり調査をもとに標準的な数量が定められ、これに基づいて標準の工事費用が積算されている実状がある。そして、この積算の歩掛かりは、ここ十数年にわたって一般には低減されてきた傾向にある。

現場において、実際のコンクリート工に関する施工計画を立案する場合にも、標準積算基準を意識した金銭的な収支を考慮するのは当然のことである。したがって、標準の場合より複雑な断面形状、錯綜した鋼材の配置等の施工が困難な場合は、コンクリートの施工についての知識と良い品質に対する情熱を持つ有能な技術者が現場に存在しないと、示方書や仕様書で想定している入念な施工は望めないと考えられる。

コンクリート構造物の信頼性が低下してきたことに対する方策を検討する場合には、材料

や施工方法等の技術的問題と共に、知識のある有能な技術者や作業員が相対的に少ないこと、およびコンクリート工事の標準積算基準の費用が不十分であった場合もあるという状況を考慮する必要があると思われる。

例えば、コンクリート橋梁に関する工事において著者が実践してきた、密実なコンクリートを目指した打ち込みおよび締固め方法は、以下に示すようである。

(1) 中空矩形橋脚の場合(図-5.2参照)

一回当たりのコンクリート打設量は、約 $55\text{ m}^3$ で打ち上がり高さ $5\text{ m}$ である。

このような矩形の中空断面で一回の打設高さが大きい場合は、コンクリートの投入位置の移動に伴い棒状バイブレーターを水平に移動することは、鉄筋やセパレータが障害となり、その都度、一旦上まで引き上げねばならず、作業員に重労働を強いることになる。そこで、それを避けるために、断面の各位置を締固めるバイブレーターを固定して、必要に応じてスイッチをいれて使用することにした。

このよな施工方法で、内部振動機を12台、型枠バイブレーターを20台使用し、作業員は、8人配置した。

(2) 張り出し分割施工される一室箱形断面PC桁の場合(図-5.3参照) 一回当たりのコンクリートの打設量は、 $30\text{ m}^3 \times 2$ 箇所(張り出し施工の各ブロック)であり、作業員16名を配置し、内部振動機を6台 $\times$ 2箇所=12台使用した。

(3) プレキャスト単純T形PC桁の場合(図-5.4参照)

一回当たりのコンクリートの打設量は、主桁1本当たり $36\text{ m}^3$ であり、作業員8名を配置し、内部振動機を4台、型枠振動機を4台、特製の表面締固めバイブレーターを1台使用した。

(4) 充実矩形海岸擁壁の場合(図-5.5参照)

一回のコンクリートの打設量は、 $150\text{ m}^3$ に対し、作業員6名、内部振動機を2台使用した。

これらの事例に要したコンクリート工に関する費用と標準積算基準の費用を整理すると、表-5.4に示すようであり、現行の標準積算基準の工事費用が、すべて不足しているという訳ではないが、コンクリートの打ち込みおよび締固めが困難な構造物の場合では、現行の積算価格が大幅に不足することがある。ただし、施工に関しては、金銭的な手当さえすれば、直ちに現状より密実なコンクリートが実現できるとは限らないところに問題の難しさがある。

示方書や仕様書には、コンクリートの打ち込み・締固めについての様々な規定が示されている。しかし、密実なコンクリート構造物を実現するために一般的な模範とできる打ち込みおよび締固めに関する具体的な作業方法についての記述は極めて少ない。たとえば、図-5.6に示すような、全国各地で建設されているありふれた構造形式の、PC単純T桁について、「実践的」で適切なコンクリートの打ち込み方法(どこから、どのような順序で、何層で等)

・締固め方法（どのような器具を、何台、どこに、どのくらいの時間）は、施工業者相互でも同一施工業者内の各現場間でも必ずしも標準化されておらず、それぞれの現場の技術者が異なった施工方法を採用しているのが現状である。

部材高さが3 m程度で桁長が5 0 m程度のP C箱桁を、著者が現場経験の浅い時代に工事指揮をして、部材側面にコールドジョインを生じさせた失敗例は、写真-5. 1. に示すようである。示方書の条項と参考書から得た知識をもとに、一層を1 m程度ずつ3層で打設した結果、型枠を取り外した後に桁の側面に、各層間の施工打ち継ぎ目がコールドジョイントとなった。示方書で規定された原則どおりに、1層のコンクリートの打設高さを大きくすることを避けたことによる失敗例に対して、示方書は、一般的な原則を示したものであるから、「十分なコンクリートの知識をもった技術者」が適切に判断して運用するべきであるという反論があると思われる。しかし、今日の大量生産される数多くの全国のコンクリート工事現場に「十分な知識をもった技術者」は望めないのであるから、打ち込みおよび締固めの施工に関する標準示方書の規定を、具体的な内容とすることが重要であり、「標準の技術者」が標準示方書からだけで具体的方法を理解できることを目指すべきである。

耐久性の優れた良いコンクリート構造物を実現するために、部材表面付近のコンクリートを空隙の少ない密実なコンクリートとするという観点から、打ち込みおよび締固めの施工方法に対して、以下に示す事項を提案する。

(1) 部材にはフレッシュコンクリートが流動して行き渡り空間と締固め作業を行うための内部振動機を挿入できる空間があることが必要であり、この空間は、設計の過程で決定される部材の断面形状寸法と鋼材の配置方法に著しく影響されるものである。施工に着手した時点で、この空間について着目して施工の容易さを判定し、施工が困難なCランクの設計レベルの構造物の場合は、鋼材の配置を変更することを監督者や設計者と協議することのできる施工を担当する技術者の存在は、Aランクの施工レベルである。一般的な標準のBランクの施工レベルでは、コンクリートの打設直前に「おかしい、やりにくい、変だ、」と感じても、そのまま施工してしまうものである。したがって、施工の困難なCランクの設計レベルと標準のBランクの材料を組み合わせ、Bランクの耐久性能を要求する場合は、「人」に関してAランクの施工レベルとする必要がある。あるいは、「人」に関してBランクの施工レベルであっても、Cランクの設計レベルであることが容易に判定でき、Aランクの仮設材料、機械、施工手順等を採用できるシステムが必要である。

(2) 外気環境に接する部材表面付近のかぶりコンクリート部分を締固めることが重要である。したがって、環境条件が厳しくてかぶりを大きくした場合は、かぶり部分に内部振動機を直接挿入して締固める作業標準とする。

(3) すべての部材表面付近を締固める作業は、一回に打設するコンクリートのリフト高さが大きく部材厚さが小さい場合は、相当の労力を要するものである。すなわち、図-5.

7)に示すように、型枠には、型枠締め付け材が一定の間隔で配置されているので、棒状パ



イブレーターのフレキシブルホースを一旦上面まで引き上げないと次の打設箇所に横移動できない。この場合、各打設箇所をそれぞれ分担して締固める棒状バイブレーターを配置して、横移動作業を減少させることが必要となり、多数の機械器具台数が必要となる。

施工の困難なCランクの設計レベルの構造物では、標準的な積算基準で算出した費用より大きいコンクリート工事費用を考慮する必要がある。

## 5. 4 沈下ひびわれを防止する表面締固めバイブレーターの開発

### 5. 4. 1 開発の動機

現場におけるコンクリート構造物の施工の過程において、設計計算において、あらかじめ予測していたのと異なった種類のひびわれが、しばしば発生するものである。

この種のひびわれの発生が顕在化するのには、コンクリートを打設した直後から数日後あるいは数週間後の間であることが多い。その原因については、これまでの数多くの調査研究報告で分類されている。すなわち、沈下ひびわれ、セメントの水和熱に起因する温度ひびわれ、およびコンクリートの乾燥収縮に起因する収縮ひびわれが大部分であり、最近では、アルカリ骨材反応によるひびわれも報告されている。

ひびわれが発生する箇所を大別すると、柱部材、壁状部材、梁部材などの側面で、型枠を取り外してから発見できる場合と、スラブ部材や梁部材などの表面仕上げを行った打ち上がり面で、養生中あるいは養生を終了して直ちに発見できる場合の2種類がある。

これらのひびわれが実際のコンクリート構造物に発生した事例は、写真-5.2, 5.3 および図-5.8 に示すようである。これらの事例を観察すると、ひびわれが発生している箇所に、以下に示す傾向があることが認められる。

(1) ひびわれは、支承の箱抜き部(図-5.8参照)、型枠締め付け材のコーン取り付け部(写真-5.3参照)など、部材のコンクリート断面が欠損している箇所から発生していること。

(2) ひびわれは、部材表面付近において、目視によっても、部分的にコンクリートの行き渡りや締固めが不足して、密実なコンクリートとは言いがたいと認定できる箇所から発生していること。(写真-5.3参照)

この種のひびわれの発生のメカニズムは、コンクリート打設後に生ずる、温度応力や収縮応力などの内部応力あるいは内部ひずみが、その材令におけるコンクリートの引張強度あるいは引張伸び能力より大きくなった場合に、ひびわれが発生すると考えられる。したがって、コンクリート構造物の部材の一部に、他の部分よりも密実でない箇所があれば、その部分のコンクリートの強度は他の部分より小さいといえるので、その部分が、ひびわれ発生の起点となると容易に考えることができる。

しかし、実構造物におけるコンクリートの密実さの程度とひびわれとの関係については、それが「施工不良」の非難に通じる可能性があるために、公に報告されることは少ないといえる。

これまでに著者が現場において携わってきたコンクリート構造物の施工の過程で、プレストレストコンクリート単純T桁道路橋の上フランジ仕上げ表面において、コンクリートの密

実さが影響して発生したと考えられる、乾燥収縮や温度応力と相まった沈下ひびわれの問題に直面した。

#### (1) 工事概要および施工概要

本橋は、群馬県の桐生市付近を流れる渡良瀬川を横断する、支間40mの9径間PC単純T桁道路橋である。全体の構造概要は、図-5.9の一般図に示すようであり、このうちの上部工5径間が、昭和58年度に施工された。

上部工の構造形式、断面形状、鉄筋・PC鋼材の配置方法、PC定着工法などは、図-5.10に示すようであり、いわゆる建設省の標準設計タイプの一般的なPC橋梁である。

施工にあたっては、架橋位置付近に、写真-5.4,5.5に示すような主桁製作ヤードを設け、ここで、1ヶ月間に約8本の割合で合計40本のプレストレストコンクリートの桁を製作した。

主桁のコンクリートは、表-5.5に示すような仕様と配合のレデーミクストコンクリートを使用した。

コンクリートの施工にあたっては、現場までトラックアジテータによって運搬し、コンクリートバケットによって打設した。コンクリートの締固めは、直径60mmの高周波棒状バイブレーターを使用し、T桁上フランジの表面仕上げは、木ゴテで荒仕上げを行った後、15～30分経過した後金ゴテで仕上げ、さらに、柔らかいハケを使用してハケ引きを行った。養生は、T桁上フランジ表面に、市販のポリウレタン製の養生マットを敷きならべ、これに適宜散水して、コンクリート打設後、約2日間にわたって湿潤養生を行った。

コンクリートの施工状況は、写真-5.6に示すようであり、この主のコンクリート構造物の標準的な施工方法であったと思われる。

#### (2) T桁上フランジ表面のひびわれ発生状況と原因

主桁の製作を開始して、最初の5本の主桁について各々の施工段階で検査していると、コンクリートの養生を終了して型枠を取り外した時点で、T桁上フランジの表面および上フランジ側面の一部に、写真-5.7および図-5.11に示すような、T桁の上フランジ表面に鉄筋に沿ったひびわれが認められた。

この種のひびわれが発生する原因としては、それまでの施工報告や参考資料を参照すると、コンクリートの乾燥収縮による収縮応力、セメントの水和熱に起因する温度応力およびコンクリートの凝結硬化にともなう沈下ひびわれなどの要因が複合したものと考えることができた。ひびわれの発生状況からは、それが、直ちに構造物の使用性や安全性を損ない、品質の低下につながるとは考えられなかった。しかし、これを防止することを発注者から要求されたのである。

ひびわれは、図5.11に示すように、幅1m、延長40m主桁の上フランジ全面に発生

しているわけではなく、ごく部分的なものであった。そこで、施工方法のバラツキに起因しているのではないかという仮説をたてて、施工手順についての見直しを行った。

また、ひびわれの発生した桁を、入念に観察すると、写真-5.8に示すように、上フランジの表面の表層5 cmから10 cm程度の範囲のコンクリートの色調が、他の部分と異なっている箇所があることを発見した。

そこで、上フランジ表面付近のコンクリートの品質にばらつき、すなわち、十分に締固められた部分と、幾分締固めが不十分であって密実でないコンクリートの部分が混在していたのではないかと考えたのである。

コンクリートの施工方法について、とくに上フランジ表面付近の作業に着目した施工順序は、図-5.12に示すとうりである。

図-5.12に示すように、上フランジ表面の打ち止まり部分のコンクリートは、バケツから投入されて山になったコンクリートを、スコップやコテで所定の高さに敷き広げられることが多くなる。したがって、棒状バイブレーターによって締固め作業をおこなっていても、上フランジ表面の広い面積の中には、棒状バイブレーターだけを用いた場合は、表面部において、締固めが十分に行われない箇所が一部に生じる可能性があるとの結論を得たのである。

施工のレベルのばらつきが、ひびわれ発生の有無によって顕在化したと考えたのである。そこで、部材表面部付近のコンクリートの密実さを均一とできるような、優れたAランクの施工方法を検討した。

その結果、優れたAランクの施工方法を実現できる「機械」として、表面締固めバイブレーターを開発考案するに至ったのである。

#### 5. 4. 2 沈下ひびわれに関する既往の研究

鉄筋コンクリートあるいはプレストレスコンクリート構造物の床版や屋根スラブなどの表面仕上げ面積の大きなスラブ部材について、コンクリート打設後、比較的早期に、その表面に発生するひびわれに、現場の技術者は始終悩まされている。

施工の過程の順序を考慮すれば、フレッシュコンクリートに発生する初期ひびわれ、特にコンクリート打ち込み表面の沈下によって生ずる沈下ひびわれが、まず問題となる。沈下ひびわれは、その発生を発見した時点でタンピングを行えば、ほぼ完全に修復できると考えられていたため、あまり重要視されていなかったといえる。

しかし、コンクリート表面に沈下ひびわれが顕在化しない場合であっても、ひびわれが発生する危険性をもつ潜在的欠陥のある部分が存在する可能性があることが考えられる。そして、施工のレベルによって潜在的欠陥の程度は影響され、各部分のひびわれが発生する危険性も異なると考えられる。その結果、乾燥収縮および温度応力の影響を更に加えて受けた場合に、潜在的欠陥の程度の大きい部分からひびわれが発生し、潜在的欠陥が顕在化すると考えられる。プレストレストコンクリートT桁の上フランジ表面に、ひびわれが部分的に発生した事例は、このことを証明していると考えられる。

潜在的欠陥の程度は、表面部付近のコンクリートの締固めの程度と関係があると考えられる。そして、タンピングは、一種の締固め作業である。したがって、沈下ひびわれが顕在化していない場合であっても、タンピングを行うことは、この潜在的欠陥の程度を小さくする効果を期待できると推論できる。

沈下ひびわれは、コンクリート構造物、とくにスラブ部材の耐久性に大きな影響を及ぼす要因であることは論をまたない。しかし、沈下ひびわれの原因と発生状況に関する因果関係に関連する諸現象を定量的に解明しようとする試みは極めて少ない。僅かに、小沢によって、顕在化した沈下ひびわれ性状とともに潜在的欠陥の影響も定量的に取り扱うという独創的な研究がなされているにすぎない。

小沢は、沈下ひびわれの程度および潜在的欠陥の程度を、曲げ強度試験によって定量的に数値化して評価することが可能であることを示した。ひびわれの発生した供試体の曲げ強度をひびわれを発生させない供試体の曲げ強度で除した曲げ強度比によって沈下ひびわれの評価を行うのが適当であり、これが、ほぼひびわれ深さを定量化していることを確認している。この方法により、ひびわれがコンクリート表面に顕在化しない場合であっても、潜在的欠陥の存在によるひびわれが発生する危険性の程度を定量化することに成功している。すなわち、ひびわれがコンクリート表面に顕在化しない場合であっても、図- 5.13 に示すように、曲げ強度が約1割低下する場合があることが認められ、フレッシュコンクリートの沈下によるコンクリート内部に生じた残留引張応力が硬化後も存在していると考えられることを示した。さらに、コンクリート打設2時間後に行ったタンピングによって、発生した沈下ひびわれが

ほぼ完全に修復されるとともに、沈下ひびわれがコンクリート表面に顕在化しない場合であっても、内部の残留引張応力が解消されることを確認し、現場におけるタンピングの重要性と効果の程度を実験的に実証している。

#### 5. 4. 3 表面締固めバイブレーターの仕様と特徴

プレストレストコンクリートT桁の上フランジ表面に部分的に発生したひびわれを防止するためには、表面部のコンクリートの沈下による内部の潜在的欠陥を修復できる施工方法とするのが効果があると考えられた。

そこで、写真— 5. 9 に示すような、金網（エキスパンドメタル）と小型の左官用バイブレーターを組み合わせた、表面締固め用バイブレーターを考案して製作した。通常の木コテで表面を仕上げた後、30分程度経過してからこれを使用して表面を再度締固めてから金コテによる均し作業をおこなった。その結果、上フランジ表面に部分的な発生していたひびわれをほとんど防止することができた。

この表面締固め用バイブレーターを、図— 5.14 および写真— 5. 10 に示すような箱形断面のプレストレストコンクリート箱桁の上スラブ表面に使用した場合でも、明らかに表面ひびわれの発生を大幅に低減させる効果が得られた。

この表面締固め用バイブレーターの特長を整理すると、以下に示すようである。

(1) 締固め作業により潜在的欠陥を取り除いた密実なコンクリートとすることは、スラブ部材の表面部では、構造物の耐久性を向上させるために重要である。これまで、比較的無関心であったスラブ部材表面部の締固め作業を、優れたAランクの施工方法とすることが、この「機械」を使用することにより容易に実現できる。

(2) すなわち、金コテで強い力を加て仕上げ作業をおこなわなくても タンピングをしたのと同様に、内部の潜在的欠陥を修復できるの効果を得ることができる。

(3) 相当に遅い時期に表面均しを行っても、表面締固め用バイブレーターを用いることにより、平滑なこて仕上げに必要なモルタルを容易に表面部に浮き上がらせることができる。

(4) 表面締固め用バイブレーターを使用した箇所は、金網の格子状の跡ができる。したがって、コンクリート表面部が一様に締固められたかどうかを、目視によって容易に観察できるので、フレッシュコンクリートの施工の過程で締固めの程度を容易に確認することができる。

コンクリートの打ち上がり表面部付近の締固めを行うことは、床版のようなスラブ部材とともに、図— 5.15 に示すような、周囲に鉄筋が配置された、柱あるいは壁部材の水平打ち継ぎ面でも重要である。

コンクリート構造物の耐久性に着目した損傷事例の調査報告の示されているように、この主の構造物の水平打ち継ぎ目付近は、損傷が顕在化する起点となっていることが多いもので

ある。したがって、コンクリートの締固めにあたって、特に、外気にさらされる部材外周に沿った仕上げ表面部付近を、スコップ等でフレッシュコンクリートを配った後に、通常の棒状バイブレーターで必ず締固めるようにすることは、これまで、あまり重要視されていなかったと思われるが、構造物の耐久性を向上させるためには重要である。

コンクリート硬化後の比較的早期に発生したひびわれは、材令の経過とともに、そのひびわれ幅が大きくなり、道路橋のコンクリート床版の場合では、そのひびわれと繰り返し荷重の影響で、床版の抜け落ちが生ずるなどの、耐久性を低下させる要因となるという研究報告もある。したがって、部材の仕上げ表面部では、出来るだけひびわれを発生させないことは勿論、潜在的欠陥が残留しないような施工方法が、優れたAランクの施工方法の必要条件の一つといえる。

表面締固め用バイブレーターの使用は、施工のレベルを優れたAランクとしたことを、施工の過程で容易に評価して確認できる手段と考えられる。

## 第6章 コンクリート構造物の耐久性設計の現状と将来の展望

### 6.1 概論

社会基盤施設である公共構造物あるいは建築構造物等の個人財産のいずれの場合であれ、コンクリート構造物が建設されて実現するまでには、設計および施工という作業がともなうものである。そして、設計作業および施工作業が世の中で広く一般に行われるためには、設計方法および施工方法が、ある程度は標準化されている状況が必要となる。その標準化された方法を、公知の事実あるいは共通の約束として文書に示したものが示方書あるいは仕様書といえよう。

土木構造物のコンクリート構造物の設計方法および施工方法に関する基本文書は、土木学会制定コンクリート標準示方書設計編および施工編であると考えられる。そこで、コンクリート構造物の耐久性設計の現状を明らかにするために、コンクリート標準示方書の内容について検討した。示方書の内容を検討するにあたっては、本研究の第2章で提案したように、コンクリート構造物の耐久性が、部材表面部付近のコンクリートの密実さの程度に密接に関係しているという認識、コンクリート構造物の耐久性能は、材料、設計、施工のレベルを組み合わせることによって実現され、要求される耐久性能のレベルを実現できる組み合わせは、幾種類もあるという概念を根底において示方書を通覧した。

### 6.2 コンクリート標準示方書設計編の現状

「コンクリート構造物の耐久性」および「コンクリート構造物の耐久性設計」という用語は、「耐久性」あるいは「コンクリートの耐久性」という用語に比較して、最近になって用いられてきたものといえる。本節では、「耐久性」の用語を検討する第一歩として、狭い意味の「設計」についての理念と現状を検討した

「コンクリート構造物の設計」の目的は、コンクリート構造物の安全性を最も重視してきたといえる。安全性以外にも、経済性、使用性、機能、耐久性、環境への適合等を留意しなければならないとされているが、限界状態設計法にもとづいた昭和61年制定コンクリート標準示方書設計編の構成は、主として安全性と使用性について照査する、いわば安全性設計あるいは耐荷力設計と呼んでも差し支えないものといえる。コンクリート構造物の安全性とは、「構造物の利用者と第三者の人命および財産が、供用期間中に損なわれないこと」と定義したい。すなわち、コンクリート構造物が崩壊して利用者が墜落したり挟まれて下敷きになったり、構造物が倒壊したり、剥離した構造物の破片による飛来落下災害が生じるとがなないようにすることであろう。使用性を満足するとは、通行する車両がパンクしたり、利用者の衣服が傷ついたり、利用者が転んだりぶつかったりしたり、振動による不安感を覚えたり



気分が悪くなったりすることがないようにすることであろう。土木学会コンクリート標準示方書設計編による限界状態設計法による安全性の照査式は、式-6.1に示すようであり、限界状態として、終局限界状態、疲労限界状態、使用限界状態を考慮して、それぞれの限界状態に対して最も適切な方法で、安全性および使用性の照査を行うものである。

[抵抗] 
$$\frac{R(f_{ck}/\gamma_m)/\gamma_b}{\gamma_a \cdot S(\gamma_f \cdot F_k)} \geq \gamma_i$$
 式-6.1

[作用]

式-6.1の基本概念には、以下に示すような特徴がある。

- (1) 荷重作用に関する事項とコンクリート構造物あるいは部材の抵抗に関する事項を別々に取り扱うことができる。
- (2) コンクリート構造物の設計において考えられる最大個数の5個の安全係数を用いている。
- (3) 荷重作用に対応するコンクリート構造物の挙動が、線形でも非線形でも広く適用できる。

実際の設計作業の過程を想定して、式-6.1の記号を用語に翻訳すると、式-6.2に示すように書き直すことができる。

(材料特性を特定)                      (算定式)                      (算定式、構造細目)

[抵抗]                                      《形、鋼材量をきめる》                      《形、鋼材配置をきめる》

材料強度                      →                      断面(部材)強度                      →                      構造物強度

= 安全係数

荷重                                      →                      断面力                                      →                      応力度(振幅、回数)

[作用]                                      《形、部材、剛性をきめる》                                      式-6.2

(荷重特性を特定)                      (構造解析手法、算定式)                      (算定式)

分子は抵抗、分母は作用に関する事項である。そして、数値によって定量化されてきたた抽象的な設計の過程および設計者の意図は、設計計算書および設計図という成果物によって

具体的な部材あるいは構造物の実体として表現される。この成果物によって、コンクリート構造物の建設に携わるあらゆる部門の技術者が、構造物の着工までに一定の社会通念の範囲で合意された安全性について照査したり保証したりすることができるシステムが完成しているといえる。

式-6.2で示した設計の過程がシステムとして機能するために、以下に示す事項が満たされる必要がある。

- (1) 材料（抵抗）および荷重（作用）の性質が特定されている。
- (2) 定量的取り扱いのための構造解析手法および算定式が定式化されている。
- (3) 「形をきめる」という作業が、抵抗側でも作用側でも実行できる。
- (4) 要求される抵抗（部材強度）を満足する形、鋼材量、鋼材配置の組み合わせは、幾種類も算定できる。
- (5) 複数の荷重作用を組み合わせ、それぞれの限界状態に応じた最も厳しい条件を特定できる。

現行のコンクリート標準示方書設計編の大部分の条文および解説は、式-6.2に示した、安全性と使用性の限界状態を照査することに関するものといえる。

安全性と使用性に関すること以外の事項が「耐久性」に関することであるとみなして、それに相当する事項を示方書の全編から抽出することを試みた。

その結果、コンクリート標準示方書設計編では、「耐久性」に関しては、以下に示すような極めて限られた事項のみしか規定されていないのが現状であると思われた。

- (1) 環境条件の区分と、かぶりの最小値および許容ひびわれ幅
- (2) 用心鉄筋、面取り、排水装置、防水装置、部材の表面保護
- (3) 最小鋼材量
- (4) コンクリートの行き渡りを考慮したあき

設計作業だけによってコンクリート構造物を安全性、使用性および耐久性を満足させて建設することができないのは当然のことであり、コンクリート標準示方書設計編では、現場において常に適切な施工が行われていることを「設計の前提」としているのである。

### 6.3 コンクリート標準示方書施工編の現状

コンクリート標準示方書施工編は、「適用の範囲」として、「コンクリート構造物の施工についての一般の標準を示す」とされている。設計編では、第2章「設計の基本」として、「設計の目的」、「設計耐用期間」、「設計の前提」、「設計の原則」、「安全係数と修正係数」、「設計計算書」に関する事項が規定されているが、施工編では、「施工の基本」に関する事項は明瞭には規定されていない。「一般」として、「コンクリートの施工に関する十分な知識を有する技術者を現場におくことを原則とする。」のを前提とし、「工事開始前に施工計画書を作成しなければならない。」ことを規定している。

設計の前提とされている「適切な施工」とは、コンクリート標準示方書施工編に従って施工されることをいうとされている。したがって、コンクリート標準示方書施工編において規定される条項は、主として「安全性」と「使用性」に関することであり、「耐久性」に関することも、一部には規定されていると考えられる。

コンクリート標準示方書施工編の全編を通覧すると、条文および解説を、以下に示す2分野に分類できる。

- (1) 強度を保証することに関すること。
- (2) 耐久性に関すること。

コンクリート標準示方書施工編は、施工についての一般の標準を示すものであるとされているが、条文および解説の書き方は、以下に示すような内容の差異があることが認められた。

- (1) 最低基準 (MINIMUM REQUIREMENT)を規定している条項。
- (2) 標準 (STANDARD)を示している条項
- (3) より良い方法を紹介 (BETTER RECOMMENDATION)している条項
- (4) 品質低下をもたらす場合に対する注意喚起と禁止事項に対する精神規定
- (5) 現在の技術レベルおよび社会状況に対する説明と紹介

本節では、施工編における「耐久性」に関連すると思われる条項に着目して整理した。

施工編で取り扱われている範囲は、コンクリート構造物の直接材料に関する事項と、狭い意味での施工に関する事項に分類できる。さらに、狭い意味での施工に関する事項は、以下に示す5種類の分野に区分できる。

- (1) 人 (MAN)に関すること。
- (2) 仮設材料 (TEMPORARY MATERIALS)に関すること。
- (3) 機械器具 (MACHINE)に関すること。
- (4) 方法 (METHOD)に関すること。
- (5) 工事金額 (MONEY)に関すること。

この(1)から(5)までの分類方法で施工編を見直すと、人、機械器具、仮設材料および工事金額に関する条項が少なく、直接材料と方法に関する条項が多いことが認められた。

人に関する用語としては、以下に示すものがある。

十分な知識をもつ技術者、コンクリート技士、コンクリート主任技士、ガス圧接工、責任技術者、ノズルマン、製造管理士。

仮設材料に関する用語としては、以下に示すものがある。

目地材、「止水板」、JISおよびJAS規格材料、「型枠締め付け材」、ボルト、棒鋼、剥離材。機械器具に関する用語としては、以下に示すものがある。

セメントサイロ、混和材サイロ、倉庫、ミキサ、アジテータ車、内部振動機、木こて、「金こて」、バケット、コンクリートポンプ、シュート、プレーサ、ベルトコンベヤ、スリップフォーム、移動支保工、定規、底板付振動機、検測ピン、引張装置、双針式標準ゲージ、ダイナモメータ。

工事金額に関する用語としては、以下に示すものがある。

小形振動機および大形振動機の締め固め能力、工事記録の作成、プレストレストコンクリート施工管理記録の作成。

これらの用語で、耐久性と関連づけて記述されていると明確に判断できるものは、「」を付けてある。

直接材料に関する用語で、強度を保証すること以外で耐久性に関連すると考えられるものは、以下に示すようである。

耐久性、耐凍害性、アルカリ骨材反応、耐火性、水密性、乾燥による体積変化、塩化物含有量、化学的侵食抵抗性、鉄筋の腐食、防水性、保水性、亜鉛メッキ鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋、W/Cの最小値、融氷剤、単位セメント量の最小値、空気量の最小値。

方法に関する用語で、耐久性に関連すると考えられるものは、以下に示すようである。

コンクリート製あるいはモルタル製スペーサーの使用、不良部分のパッチング、温度あるいは乾燥収縮による有害なひびわれの補修、耐凍害性試験、養生期間、コンクリート表面の保護、接合部定着部の保護、排水処理、コンクリート中の塩化物の許容限度、促進養生、湿潤養生、グラウトの配合（W/Cの最小値、ブリージング率、膨張率）。

このような用語に代表されるように、現行のコンクリート標準示方書施工編では、おのこの条項において耐久性に関する事項は取り扱われている。しかし、耐久性と施工および材料との関係を体系的に規定するには至っていないのが現状といえる。

本研究の第2章で提案したような、コンクリート構造物の耐久性能のレベルを3段階に区分するという手法で、コンクリート標準示方書施工編の各章が、どこの耐久性能レベルを意識して目指しているかという観点で通覧すると、以下に示すように分類できる。

(1) 標準のBランクの耐久性能レベルを目指すのに必要な材料および施工のBランクに関

する事項を規定している部分

1) 1章から14章までの、一般のコンクリートの施工に関する章

2) プレストレストコンクリート

(2) 標準より劣るCランクの耐久性能となることを防止してBランクとするために必要な材料および施工のAランクに関する事項を規定している部分

1) マスコンクリート

2) 寒中コンクリート

3) 暑中コンクリート

4) 水中コンクリート

5) プレパックドコンクリート

6) 軽量コンクリート

(3) 標準より優れたAランクの耐久性能を目指すのに必要な、材料および施工のAランクに関する事項を規定している部分

1) 水密コンクリート

2) 海洋コンクリート

(4) 標準より劣るCランクの耐久性能を前提としているが、一定のレベルを保証するのに必要な、材料および施工のBランクあるいは一定のCランクに関する事項を規定している部分

1) 吹付けコンクリート

(5) 標準より優れたAランクの耐久性能を前提とし、これを保証するために必要な材料および施工のAランクに関する事項を規定している部分

1) 工場製品

現行のコンクリート標準示方書施工編を、本研究で提案した手法でおおよその分類することはできるが、各章の内容は、強度を保証することに関する事項と耐久性に関する事項とが混然と規定されているのが現状である。材料および施工についての規定を、体系的なコンクリート構造物の耐久性設計の枠組みのなかで、どのように構築するかは今後の課題といえる。

## 6. 4 コンクリート構造物の耐久性設計の理念

「コンクリート構造物の耐久性が優れている」ということの具体的内容について、現時点では、共通の認識は得られていないと思われる。また、「コンクリート構造物の耐久性設計とはいかにあるべきか」ということについても同様といえる。

本節は、本研究の第2章で提案した、材料、狭い意味の設計、施工のレベルを組み合わせ、要求されるコンクリート構造物の耐久性能を実現するという概念を念頭において、コンクリート構造物の耐久性設計体系を確立するために解明すべき将来の技術的問題点を、主観的かつ概念的に整理して提案した。

「コンクリート構造物の耐久性がある」ということは、「供用期間中は、構造物に対する直接の費用を必要としないで使用できる」と定義したい。すなわち、供用期間中は、メンテナンスフリーであること、耐荷力を保有していることが保証されること、外観が美しくみずぼらしい状態とならないこと等が目標となると考えられる。したがって、「コンクリート構造物の耐久性が低下する」とは、安全性が低下すること、強度が低下すること、表面が汚くなること、手触りが悪くなること、剥落が生ずること等が想定できる。強度が低下することは、コンクリートの品質が変化することとひびわれが発生すること、鋼材が断面欠損すること、材質変化すること等が含まれ、耐久性設計で取り扱うべき最初の事項であろう。

コンクリート構造物の供用期間中には、これを点検し維持保守をすることが必要であるという概念が、最近では一般的に受け入れられている。維持保守の内容は、「清掃」、「交換」、「修理」、「補修」、「補強」、「修復」、「取り壊し」、「新規建設」等の様々なレベルがある。したがって、コンクリート構造物の耐久性設計とは、これらの維持保守を行うことを前提に、構造物を建設する時点で、いかに維持保守の内容を考慮するかという考え方もできる。

コンクリート構造物は、供用期間中に点検、維持保守が必要であるということは、一般的には正しいと思われる。しかし、点検することはともかく、すべてのコンクリート構造物を供用期間中の維持保守を前提に計画、設計、施工して建設するのは、現時点のコンクリート工学の技術水準を十分に反映した方法とはいえないと考えられる。すなわち、供用期間中は、維持保守が全く不要なメンテナンスフリーである耐久性能レベルがAランクの構造物を実現することは、技術的に可能である。また、経済性や社会的要請によって、これより耐久性能レベルが小さい構造物が必要な場合にも十分に対応できると考えられる。したがって、耐久性設計も、安全性に重点をおいた安全性（耐荷力）設計体系と同様な理念で取り扱うことを目指すことができると思われる。

耐久性設計の基本である耐久性を定量的に表現するためには、式-6. 3が基本式といえ

る。

$$\frac{\begin{array}{c} \text{[抵抗]} \\ R \end{array}}{\begin{array}{c} \text{[作用]} \\ S \end{array}} \geq r \quad \text{式-6.3}$$

- R ; 耐久性能 : R = R (材料、設計、施工)
- S ; 劣化外力 : S = S (荷重、環境条件、構造特性)
- r ; 耐久指数

式-6.3は、安全性設計の基本式である、式-6.1と同様の書式である。すなわち、コンクリート構造物の耐久性設計を、構造物の耐久性能と劣化外力とを抵抗側と作用側とに分離して取り扱うことを提案しているものである。

式-6.3を、実際の設計作業を想定して用語を用いて書き直すと、式-6.4に示すようになる。

(材料特性を特定) (算定式、評価方法) (算定式、構造細目)

[抵抗] 《材料、設計、施工の組合わせ》《防護工、構造特性》  
《基準部材に対する値》

材料性能 → 断面(部材)耐久性能 → 構造物耐久性能

劣化外力 → 劣化作用力(断面力) → 劣化分布(応力度)  
(生成総量、浸透深さ) (濃度分布)

≥ 耐久指数

式-6.4

[作用] 《基準部材をきめる》  
《基準の耐久性能保有》

(劣化外力を特定) (劣化解析手法、算定式) (算定式)

式-6.4が、耐久性設計体系の枠組みであるというのが、著者の提案である。これを、

実用的な設計体系とするためには、解決しなければならない以下に示す問題点がある。

(1) 検討すべき種々の耐久性限界状態を想定する必要がある。たとえば、清掃限界、修理限界、取り替え(交換)限界、取り壊し限界等が考えられる。耐久性設計には、設計耐用年数が重要であり、物理的耐用年数、機能的耐用年数、経済的耐用年数、社会的耐用年数等が提案されているが、これらの耐用年数は、各限界状態の耐久指数のレベルを決定するのに影響すると思われるが、耐久性設計体系そのものとは区別して考えるべきものである。

(2) 劣化外力の種類は、水分、塩分、温度、熱作用、紫外線、化学作用、波浪、流水等数多くの種類があり、それぞれについての個別の研究がなされている。設計体系に取り入れるためには、これらの劣化外力を、安全性設計における、物体力、慣性力、強制変位および集中荷重等分布荷重等のような、標準化されたものとして取り扱う試みが必要である。

(3) 劣化外力から劣化作用力を算出するための、劣化解析手法および指標となる劣化作用力の種類を標準化する必要がある。すなわち、安全性設計における、弾性解析手法、曲げモーメント、せん断力、軸力に相当する指標を特定する必要がある。

(4) 安全性設計では、抵抗側と作用側の設計作業を同時に行うことができるのは、「形をきめる」という作業が独立して同時に行えるためである。耐久性設計では、安全性設計における、高次不静定構造物の構造解析のように、劣化作用力と断面(部材)耐久性能とが密接な関係にあるといえる。そこで、これを独立して扱うために、基準部材という概念を導入することを提案したい。すなわち、劣化作用力は、種々の劣化外力の組み合わせが基準部材に作用した場合について算定するものとし、断面(部材)耐久性能は、種々の材料、設計、施工の組み合わせについて、基準部材との差異について定量的に評価するという概念が必要である。

(5) 劣化作用力と劣化分布(応力度)を明確に区別して取り扱う必要がある。たとえば、塩分総量と塩分濃度分布とは異なる取り扱いが必要であろう。

(6) 有害なひびわれとは、いかなるものかを定義する必要がある。

(7) 安全性設計における設計計算書および設計図に相当する、耐久性設計の成果品のイメージを確立する必要がある。

本研究の第2章で提案した、総合評価に基づく耐久性設計の提案は、式-6.4における、抵抗側の、断面(部材)耐久性能を定量的に算定する方法の第一歩といえる。

耐久性設計体系を、式-6.4のように取り扱うことによって、各分野の研究の成果を取り入れることが容易となるとともに、耐久性にかんする個別の研究成果の位置づけも明瞭となると考えられる。