

# コンクリート構造物の耐久性に及ぼす設計過程の影響

## EFFECT OF DESIGN PROCEDURE ON DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES

國島正彦\*・渡辺泰充\*\*

By Masahiko KUNISHIMA and Yasumitsu WATANABE

One of most importances to enhance durability of concrete structures is design details which strictly governs an easiness of concreting works such as pouring and compacting fresh concrete, as a result, which determines quality and performance of durability of structures. From this point of view factors on design detail have been discussed verifying by some experimental works focused on water penetration at the surface layer of members and a new format for design drawings concerned with concrete cover is proposed. Authors are certain that this paper could assist a spread of Proposed Recommendation on Durability Design for Concrete Structures published by JSCE Concrete Committee.

*Keywords: durability, concrete structure, design procedure, design details, drawings*

### 1. 序 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、耐荷力設計とともに耐久性設計を行う必要性について広く合意が得られつつある<sup>1)~4)</sup>。

耐久的なコンクリート構造物を実現するための重要な事項について、これまでに数多くの研究成果が報告されており、それらは土木学会コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>あるいは各企業体の仕様書<sup>6)</sup>の規定に生かされてきた。たとえば、材料に関する事項として、水セメント比の最大値や塩化物含有量の最大値、設計に関する事項として、ひびわれ幅の最大値やかぶりの最小値、施工に関する事項として、養生日数の最小値や沈下ひびわれに対する処置等が規定されている。ところが、コンクリート構造物の信頼性が向上しつつある状況とはいいがたく、本来耐久的であるコンクリートの信頼性を回復するためには、より積極的な対応が必要と考えられる。その対応の1つが、平成元年8月に刊行された土木学会コンクリート委員会耐久性設計小委員会（委員長：岡村 甫）の研究成

果であるコンクリート・ライブラリー第65号「コンクリート構造物の耐久設計指針（試案）<sup>7)</sup>」といえる。

コンクリート構造物の耐久性とは、凍結融解作用による部材表面の劣化および塩分等の外的作用あるいは内的要因による部材内部の補強鋼材の腐食に着目して論じられることが多い。外的要因が部材表面から内部へ伝播し、補強鋼材の腐食が誘発される機構を考慮すると、部材表面部付近に堅固で空隙の少ない密実なコンクリートを実現し、外的要因の伝播を制限することが構造物の耐久性を向上させると考えても大きな誤りではないであろう。構造物の部材表面部付近に密実なコンクリートを実現するには、実構造物の建設過程において、材料の選定から設計過程および施工過程に至るさまざまな要因が総合的に影響することを考慮する必要がある<sup>8)</sup>。

本論文は、耐久的なコンクリート構造物は部材表面部付近が密実なコンクリートであるという観点に立ち、それを実構造物で実現するために設計過程で着目しなければならない事項について論じた。

設計過程で、次工程の施工過程におけるフレッシュコンクリートの行き渡りと締固め作業の容易さに影響する設計詳細（構造細目）の「内容」と、設計過程の意図を施工過程に伝達する役割を担う設計図面の「書式」との両者を積極的に着目することの重要性を強調した。そし

\* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科  
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

\*\* 正会員 清水建設(株)土木本部技術第一部 PC グループ  
長 (〒108 港区三田 3-13-16)

て、部材表面部コンクリートの密実さに影響する設計詳細（構造細目）の「内容」に関する要因を整理し、その影響を実構造物をモデル化した供試体の実験結果より明らかにした。また、現在の一般的な設計図面の表示方法について検討し、耐久的なコンクリートを目指した設計過程の意図を施工過程により明確に伝達できると考えられる設計図面の「書式」を提案した。

## 2. 総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計

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と検査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、各地域のレポーミクストコンクリート工場あるいはまれに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者が購入して受け入れ、これを打ち込み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と耐久性が施工過程に著しく影響されるのは当然のことといえる。

現在の一般のコンクリート構造物の建設工事は、請負工事契約方式が採用されている。構造物の材料の選定、設計および施工方法に関して、土木学会コンクリート標準示方書や各企業体の土木工事共通仕様書が制定されており、それに基づいた標準的な工事費用を提示する標準積算基準も定められている。この一連の方式は、標準化できるという長所はあるが、各現場ごとの特徴を勘案して耐久的なコンクリートを目指した施工方法を工夫・実践しても、特別な関心を払わずに標準的な施工方法を採用しても、受領できる工事費用が一律の標準的な金額となりがちであるという欠点もある。すなわち、現場の技術者が、コンクリート構造物の信頼性を向上させるための積極的な対応を、場合場合に応じて行うことがやりにくいという短所もある。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」「入念な施工」を行うことを示方書や仕様書で規定しただけで、耐久的なコンクリート構造物を広く実現できると考えることには無理があろう。コンクリート構造物の信頼性を向上させるためには、材料の選定、設計から施工に至る過程のどこに着目し費用をかけるのが合理的かを「総合的」かつ「定量的」に検討できることが必要となる。

コンクリート構造物の部材表面部付近に密実なコンクリートを実現するには、実構造物の建設過程におけるさまざまな要因が複合して総合的に影響する。材料、設計および施工に関する各過程の実情を通観すれば、その内容にばらつきがあること、すなわち現在のわが国のコンクリート工学の技術水準から判断して、耐久的なコンクリートを実現するために、標準の場合（Bランクと称す

表一 材料・設計・施工のレベルと耐久性レベル

材 料	ラ ン ク		
	A	B	C
設 計	A	B	C
施 工	A	B	C
耐久性	優	標準	劣
工事費	高	標準	安

表二 材料・設計・施工レベルの組合せの例

耐久性 レベル B	組合せケース	1	2	3	4	A：優 B：標準 C：劣
	材 料	B	B	A	A	
設 計	B	C	C	B		
施 工	B	A	B	C		

る)、標準より優れている場合（Aランクと称する）および標準より劣る場合（Cランクと称する）の3段階におおよそは定性的に分類できると思われる。この場合、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できる。供用条件や環境条件によって構造物の要求される耐久性もさまざまであると考えられ、AランクからCランクまでおおよその分類ができる。構造物の要求する耐久性に応じて、それぞれの組合せの中から経済的なものを選択できることが望ましいのである（表一参照）。

構造物の要求する耐久性が標準の場合の、材料、設計および施工のレベルの組合せの例を、表二に示した。ケース1は、おのおのの仕様が標準的な場合である。ケース2およびケース3は、かぶりを大きくしたり、フレッシュコンクリートの行き渡りや締固め作業の容易さを考慮して補強鋼材の間隔を大きくする等の配慮をすると、コンクリート数量が増大して著しく不経済となる場合であり、スレンダーな断面を目指した橋梁上部構造が想定できる。この場合は、施工（ケース2）あるいは材料（ケース3）のレベルを優れたものとし、そこにコストをかけることによって要求する耐久性能を満足させることができる。ケース4は、フレッシュコンクリートを投入した後締固めや養生ができない場合であり、水中基礎や場所打ちコンクリート杭等が想定できる。この場合は、材料のレベルを向上させそこにコストをかけることになる。

ここで述べた総合評価に基づく耐久性に対する考え方を発展させ、さまざまな要因の影響の程度の定量的評価方法を、耐久指数、環境指数および耐久性ポイント等の概念を導入して体系化されたものが「コンクリート構造物の耐久設計指針（試案）」であり、以下に示す3つの要点が基本になっていると考えられる（図一参照）。

① コンクリート構造物の耐久性は、材料、設計およ

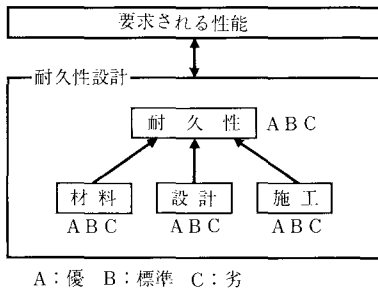


図-1 耐久性設計の概念

び施工の各レベルの総合的な組合せで達成される。

② あるレベルの耐久性が要求された場合、それを実現できる材料、設計および施工のレベルの組合せはいく種類もあり、経済性、技術者の便宜や好み等によって選択できる。

③ コンクリート構造物に要求する耐久性能と、コンクリート構造物が保有できると推定できる耐久性能とを分離して取り扱う。

### 3. 設計レベルが構造物の耐久性に及ぼす影響

#### (1) 設計レベルの設定

設計レベルの評価にあたっては、設計作業が終了した時点で第三者が行えることが必要であり、かつ、これを実際の施工に着手する前に行えることが肝要である。施工過程におけるコンクリートの行き渡りや締固め作業の容易さに着目すると、以下に示す事項によって設計レベルが設定できる。

① コンクリートの行き渡り、内部振動機の挿入の容易さに影響する「補強鋼材のあきや段数に関連する錯綜の程度」

② コンクリートのかぶり

③ フレッシュコンクリートのブリージング水や気泡の逃げ場所に影響する「部材側面の傾斜角やハンチ等の断面形状」

④ コンクリートの打ち込みや締固め作業が、現場の作業員が行いやすいかどうかに影響する、「1リフトのコンクリート高さ」、「1回のコンクリート打ち込み量」および「断面形状寸法」

本章は、設計過程が構造物の建設過程全体に占める位置づけについて論じ、上記の項目がコンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす程度を検証した事例を整理した。

#### (2) 設計と施工との関係

近年、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、作業の効率化を目指して設計と施工が分業化してきたといえる。その結果、設計実務に携わる

技術者が施工方法に関する理解が不十分なまま設計作業を担い、施工現場の技術者が設計の意図を十分理解せず、さらにレデーミクストコンクリートの普及によって材料特性への関心も低いままに工事が進められることがしばしば生じる<sup>9)</sup>。このような状態が一般的になると、現場における普通の標準的な努力だけでは、部材断面のあらゆる部位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構造物が相当の割合で設計されるおそれが生ずると考えられる。

工事がそれほど多くなかった時代は、コンクリート構造物の材料、設計および施工について総合的な深い造詣がある技術者を大部分の現場に供給し、一連の建設過程に責任ある地位で関与し監督させることができたと思われる。このような場合には、おのおのの構造物の設計から施工の過程で、場合場合にに応じた適切な判断と措置が容易となる。一方、最近の効率を追求し分業化した作業状況を考慮すれば、場合場合にに応じた適切な判断を広く一般に要求することは無理があると思われる。この状況の変化への対応が不十分であったことがコンクリート構造物の信頼性が低下してきた大きな原因の1つであると考えられる。

#### (3) 部材の断面形状および寸法の影響

##### a) 部材側面の傾斜角およびハンチ形状

鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリートを問わずコンクリート橋で広く採用され、各企業体で

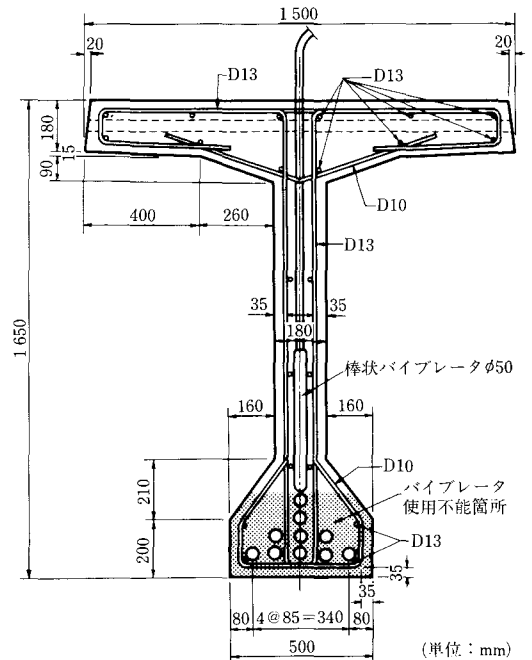


図-2 T形桁棒状バイブレート挿入図

標準設計図が整備されている断面形状の1つに、図一2に示すようなT形桁がある。現場で型わくを取り外した後、下フランジの傾斜したコンクリート表面に多数の気泡や大きな空隙が残ることは、経験ある技術者にとって常識といえる。また、部材横寸法が下側に向かって広がって変化する断面形状は、コンクリート打ち込みにあたって棒状パイプレータを挿入できない死角の空間ができるとともに、鋼材の組立状況やコンクリートの行き渡りの様子を打ち込み作業中に目視によって容易に確認できず、施工管理が行き届かないという欠点もある。塩害による内部の鋼材の腐食が顕在化したコンクリート橋劣化状況の報告<sup>10)</sup>によれば、この種の断面形状で劣化が著しいのは下フランジ付近が多いといわれている。したがって、この種の断面形状を有する設計詳細は、耐久的なコンクリート構造物を目指して部材表面付近に密実なコンクリートを実現するという観点からは、標準より劣ったCランクと評価すべきであろう。

傾斜した側面を有する部材には、フーチングの上面、箱桁の下床版とウェブ接合部のハンチあるいはコンクリートアーチ橋のアーチリブ等がある。これらの部分は、型わくの使用の有無、型わくの種類、コンクリートの打ち込み方法等、さまざまな施工方法が採用されているが、T形桁と同様の欠陥を生ずる可能性がある劣った設計レベルと評価すべきである。設計過程でハンチの寸法を小さくする検討をしたり、施工過程でCランクの設計レベルを補償するためのAランクの施工方法（透水型わくの使用等）を検討することが必要となる。

#### b) 施工性の劣る断面形状および寸法

コンクリート構造物の「良い」設計とは、初期建設費を低減できる経済的な設計とほぼ同義語とされてきたと思われる。コンクリートや補強鋼材の数量をできるだけ減少させることを念頭において、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設計作業が行われる。実際の施工過程での、型わく組立、コンクリートの打ち込み、締固め、表面仕上げ、養生等の作業を、現場作業員がどのような様態で実施するかについては比較的無関心であることが多いと考えられる。すなわち、生身の「ヒト」である作業員が、その能力を生かしつつ普通の努力をすれば耐久的なコンクリートが実現できる設計が望ましいにもかかわらず、施工性が劣ると思われる設計であっても「現場でなんとかしてくれる」という感覚となるのが一般的な傾向といえる。

部材の断面形状および寸法に関して、設計詳細が施工性を制限する事例には、以下に示すものがある。

#### ① 箱形断面の桁高

比較的支間の長い箱形断面コンクリート橋は、桁自重と材料数量を低減することを目的に、桁高を支点部で大

きく支間中央で小さくするのが一般的である。橋梁の規模によっては、支間中央の桁高を1.5 m程度まで小さくすることもある。この構造物を、場所打ちコンクリート工法で施工する場合、箱形の内空断面内で、型わく・支保工の組立解体、コンクリートの打ち込み・締固め・仕上げ・養生等の作業を行う必要が生じるが、その作業空間は、仮設材料を設置する空間を含めて、0.8~1.0 mしか存在しない。大部分の設計者が、気づかないあるいは気づかないふりをした結果は、現場作業員に中腰あるいは腹這いの姿勢という過酷な作業環境と労働条件を強制することになる。このような施工性の劣る設計詳細と普通の施工努力とを組み合わせた場合は、施工性が標準的な設計詳細の場合に比べてコンクリートの品質が低下するのみならず、作業員の安全性にも悪影響を及ぼすことになる。「しっかり、入念に、注意して施工せよ」と唱えるだけでは効果はない。

#### ② 中空断面の部材厚さ

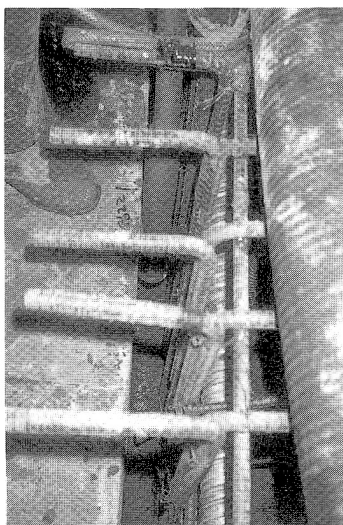
橋脚等の柱部材で、死荷重および材料数量を軽減するために中空断面が採用され、壁厚が60 cm程度に設計されることがある。この断面形状寸法の設計詳細が、構造物の施工方法を相当に制約していることを意識できる設計者は少ないと思われる。すなわち、壁厚60 cmの内空に鉄筋を配置し、1リフトのコンクリート打ち込み高さを4 m程度とすると、作業員が型わくの内部に入って打ち込み面を観察しながら締固め作業をすることは不可能となる。打ち込み面から相当離れた高所から棒状パイプレータを吊り降ろして締固め作業する場合と、壁厚1.0 m以上あるいは充実断面で作業員の作業空間が確保できる場合との、標準的な普通の施工努力に伴う「締固めの程度」の差異を認識して設計することが望ましい。この両者を、同程度の施工計画と積算方法で取り扱えば、コンクリートの密実さすなわち構造物の耐久性は異なることを考慮する必要がある。

#### (4) かぶりの影響

コンクリートのかぶり大きいと、内部の補強鋼材を防護被覆する部分が厚くなり、塩分浸透等の外的作用からの到達距離を大きくできる利点があるのは周知のことである。

近年、厳しい塩分環境に曝される構造物の最少かぶりは、7 cmと規定されるようになった<sup>11)</sup>。塩害対策でかぶりを大きくすると、上記の利点のほかに、これまで指摘されることが少なかったが、部材表面付近のコンクリートの締固め作業を容易にする効果もある。

著者らは、図一3に示すようなほぼ同様な断面形状のプレストレストコンクリート箱桁道路橋で、かぶりが、3.5 cmと7 cmの場合の施工に携わる機会を得た<sup>12)</sup>。それぞれの工事におけるコンクリート工事に関する施工方



写真一 棒状パイプレタの挿入状況

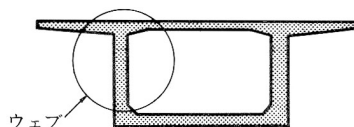
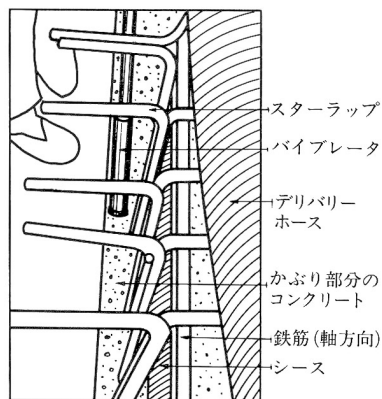


図-3 箱桁断面図



写真一 の説明図

法・施工管理体制や作業員の熟練度は大差がなかった。しかし、型わくを取り外した直後に発見できる部材外側表面の、何らかの補修を必要とする「施工不良」の発生の頻度は、かぶりが 3.5 cm の場合は 1 ブロック当たり 4~5 か所みられたものが、かぶり 7 cm では、ほとんど 0 に近いという経験をした。

かぶり 7 cm の場合は、写真一に示すように、外側型わくのせき板と外周鉄筋との間のかぶり部分に、直径 50~60 mm の棒状パイプレタを挿入して締め作業することができたので、これを作業員に指示し実践させることが大きな理由の 1 つであると考えられる。

(5) 鋼材のあきと段数の影響

コンクリート構造物に配置される補強鋼材や埋め込み金物は、フレッシュコンクリートが型わくの隅々にまで行き渡ることを阻害する要因の 1 つである。設計過程で決定される鋼材のあき寸法や段数等の設計詳細は、施工の容易さに著しく影響を及ぼし、設計詳細と施工の容易さとの関係は、粗骨材の最大寸法やフレッシュコンクリートのワーカビリティにも関係するものである。

現行のコンクリート標準示方書設計編<sup>13)</sup>に、鋼材のあきに関する条項が各所に規定されているが、以下に示すような設計実務者が疑問をもつ事項がある。

① 柱の鋼材の最小あき寸法をはりのそれより大きく規定することは、現在の大型化した構造物の実情を考慮すると合理的と思えない(柱に匹敵する大型ばりが多数存在する)。

② 鉄筋の継手部のあきの規定を、コンクリートの行き渡りが困難としながら一般部より緩和しているのは矛盾している。

③ 多段の鋼材が配置された場合に、あきの規定の照査を各段ごとに行うのか全体の鋼材で照査するのか明確でない。

④ プレストレストコンクリートで、緊張材相互のあきは規定されているが、鉄筋と緊張材のあきについて規定されていないのはなぜか。

⑤ 鉄筋を水平に束ねて配置することは禁止されているが、プレストレストコンクリートで、一般に鉄筋より直径の大きいシースの水平束ね配置が許されているのはなぜか。

示方書で規定されている最少かぶりより大きく設計したり、鋼材のあきや段数と施工性との関係を詳細に検討することは、設計担当者が耐久的なコンクリートを実現するために好ましいと考えても、会計検査や内部監査において設計費用を含めた初期建設費に関する経済性が重視されることが多い現状では困難といえよう。かぶりを数 cm 大きくするために、特別な理由書を作成し説明する手間をかけようとするには設計担当者は忙しすぎるし設計料も限られている。

かぶりを大きくすることの「良さ」を誰もが容易に定量的に評価できる設計システムが「コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)」であり、この指針(試案)の画期的なところといえよう。

#### 4. 設計レベルが異なる部材の耐久性能の評価

##### (1) 概 論

耐久なコンクリート構造物を実現するためには、材料、設計および施工を考慮した総合評価に基づく設計システムが必要であるという概念は、きわめて常識的なものであろう。

「いかにコンクリートの品質を吟味しても、型わくの隅々にぎっしりと詰めることができなければ元も子もない」というのは現場の常識といえる。これは、「同じコンクリート材料を使用しても、構造物の設計詳細と施工方法によって部材表面部コンクリートの密実さが異なることがある」と読みかえることもできる。

本章は、この現場の常識の妥当性を実験によって定性的に実証することを試みた。

近年の道路橋および鉄道橋における一般的な構造形式である、鉄筋コンクリートT桁橋ウェブ下縁付近の部材断面形状を想定してモデル化し、ほぼ原寸大の供試体を製作した。供試体の種類は、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作業が困難なCランクの劣った設計レベルの場合と、これより施工が容易と思われる鉄筋配置のBランクの標準的な設計レベルの場合の2種類とした。材料と施工のさまざまなレベルを組み合わせさせて供試体を製作し、部材表面部の密実さの程度を赤インク水の浸透深さを測定することによって比較検討し、部材の耐久性能の相違を評価する目安を得ることを目的とした。

##### (2) 実験概要<sup>4)</sup>

###### a) 供試体および使用材料

供試体の形状寸法は、図-4に示すようであり設計レベルがBランクのB供試体と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おける鋼材のあきに関する規定と注意事項をすべて満足しており、直径45mmの棒状パイプレタを部材底面まで挿入できる鋼材配置のものである。

C供試体は、コンクリート標準示方書の規定をほとんど満足しているが、棒状パイプレタの挿入空間に関する注意事項だけは満足できず、これを部材底面まで挿入

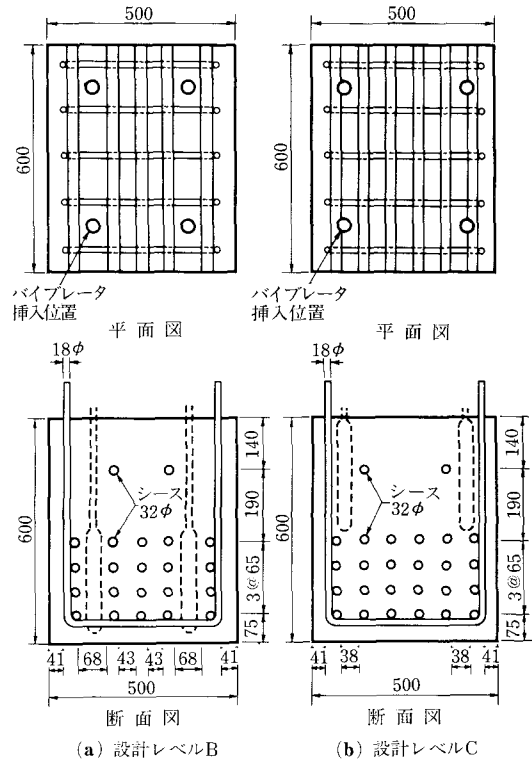


図-4 供試体 (単位: mm)

できない実構造物で数多くの事例があるものである。

主鉄筋に直径32mmの鉄筋が配置されていることを想定し、外径32mmのスパイラルシース内に潰れ止めとして直径25mmの鋼棒を挿入して配置した。また、直径19mm程度のスターラップが配置されていることを想定して、直径18mmの塩化ビニルパイプを加工組立して配置した。

コンクリート打ち込み直後に潰れ止め鋼棒を撤去し、硬化した後に、スパイラルシースを引き抜いて撤去した。

コンクリートの配合を、表-3に示す。レデーミクストコンクリートの標準品である、普通300 8 25 Nと、普通300 12 25 N、および流動性と材料分離抵抗性が大きく締固めが不要で、設計詳細や施工のレベルの影響を受けることがほとんどないと思われる、流動化剤と増粘剤を使用して試作したハイパフォーマンスコンクリー

表-3 実験に使用したコンクリートの配合

材料のレベル	呼び強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	粗骨材の最大寸法 (cm)	スランプリング量 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg)						流動化剤 (cc)	増粘剤 (kg)	実測スランプ値 (cm)
					水 W	セメント C	フライアッシュ F.A.	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 (cc)			
B	300	25	8	4	141	304		726	1171	760			8~10
A	300	25	12	4	150	323		732	1126	808			13~14
特A	300	25		4	175	280	70	770	936	875	2450	1.1	フロー 540×540

ト<sup>15)~17)</sup>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分であり、供試体に打ち込む直前に実験室でスランプ等を測定した。

部材内でのコンクリートの行き渡りやすさに着目して材料レベルを分類することとし、スランプ8cmをBランク、スランプ12cmをAランク、試作したハイパフォーマンスコンクリートを特Aランクと仮に設定した。

b) 実験方法

供試体へコンクリートを打ち込むにあたっては、実構造物でのコンクリートポンプ施工の打ち込み速度と連続性を再現しようとした。すなわち、容量20lのバケツを20個準備し、これに10l程度フレッシュコンクリートを分配した後、供試体高さの2/3程度まで一斉に順次投入した。締固めは、図-4に示す4か所に、直径45mmの棒状バイブレータを挿入して締固めた。C供試体は、供試体高さの1/2程度までしか、棒状バイブレータを挿入することができない。

施工レベルは、1か所の棒状バイブレータの振動作業時間で分類することとした。1か所当たり5秒間をBランク、20秒間をAランク、全く締固め作業を行わない場合をCランクと設定した。

材令1日で側面型わく、材令2日で底面型わくを脱枠し、材令5日まで実験室内で湿潤養生した後、図-5に

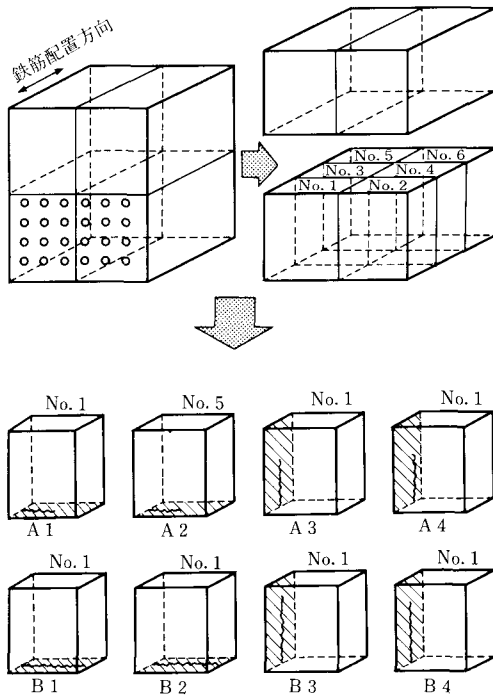


図-5 供試体分割方法の一例 (No.1, No.5)

示すように12ブロックに分割した。分割した供試体を、110°C 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、所要の位置で供試体を割裂し、部材断面表面部の赤インク浸透深さを、表面部に沿って5mm間隔で15~20cmの区間を測定した。

この赤インク浸透深さを測定結果から、材料、設計および施工のレベルを変えて組み合わせた場合の、部材表面部の密実さの程度を比較検討しようとした。

実験1から実験4までの4シリーズを行い、各シリーズで、B、C供試体を各1個合計2個製作した。実験1~実験3の各シリーズは、それぞれ、同じアジテータトラックからのレデーミクストコンクリートを使用したので、各シリーズごとには材料レベルを同様にできたと評価した。

(3) 実験結果

各供試体の赤インク水の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た表面性状を整理すると、表-4に示すようである。

実験1では、Cランクの設計にBランクの材料と施工を組み合わせると、底面の一部にジャンカが発生し、材料、設計および施工がすべてBランクの場合に比べて、赤インク水の浸透深さの平均値が2倍以上大きくなるとともに、図-6に示すように個々の測定結果のばらつき(標準偏差)も著しく大きくなった。

実験2では、Cランクの設計を補償することを目指し

表-4 赤インク水の浸透深さ測定結果

実験	1		2		3		4		
材料	B	B	B	B	A	A	特A	B	
設計	B	C	B	C	B	C	C	C	
施工	B	B	B	A	B	B	C	B	
平均浸透深さ (mm)	底面	3.8 (1.0)	10.3 (2.7)	5.6 (1.0)	7.6 (1.4)	4.2 (1.0)	3.7 (0.9)	3.8 (1.0)	29.8 (7.8)
	側面	5.4 (1.0)	5.9 (1.1)	5.3 (1.0)	7.5 (1.4)	4.1 (1.0)	5.2 (1.3)	3.8 (1.0)	9.7 (2.6)
標準偏差 (mm)	底面	3.5	9.3	5.0	6.9	3.4	3.3	3.6	18.7
	側面	4.9	5.3	4.8	6.8	3.8	4.2	2.6	6.7
底面の表面性状	良	不良	良	良	良	良	不良	不良	
耐久性	B	C	B	B'	B	B	B'	C	

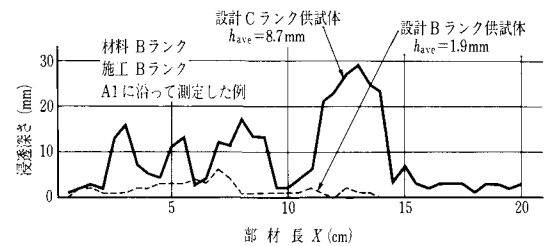


図-6 着色水の浸透深さ測定結果の一例 (実験1)

て、締固め時間を長くした施工レベルのAランクとBランクの材料を組み合わせた。両者の表面性状に差異は認められなかったが、C供試体の赤インク水浸透深さが1.4倍程度大きく、ばらつきも実験1よりは小さくなったが、B供試体に比べて幾分か大きくなった。

実験3では、Cランクの設計を補償することを目指して、Bランクの材料よりスランプを4cm程度大きくした材料レベルのAランクとBランクの施工を組み合わせた。この場合は、両者の表面性状および赤インク水浸透深さが、ほぼ同様となった。

実験4では、Cランクの設計とCランクの施工を補償することを目指して、特Aランクの材料（試作したハイパフォーマンスコンクリート）を組み合わせた。特Aランクの材料を使用すると、部材表面部の行き渡りは良好となったが、気泡が幾分残留することによる凹凸が一部分に生じた。しかし、赤インク水浸透深さとそのばらつきは、材料、設計および施工がすべてBランクの場合に比べても小さくなった。

実験4と実験1は、Bランクの施工レベルとするために、同様な締固め作業時間として供試体を作成した。ただし、実験1は、実構造物の締固め作業の経験がある人間が行い、実験4は、現場経験のない人間が行っている。その結果、同様な材料、設計および施工レベルを組み合わせたにもかかわらず、赤インク水浸透深さが、実験4の場合が実験1に比べて相当に大きくなった。これは、締固め作業の優劣が、単に締固め時間の大小以外の微妙なこつや熟練の程度等の要因にも影響されることを示唆していると思われたが本実験の範囲内では十分な検討ができなかった。

#### (4) 材料、設計および施工のレベルと耐久性との関係

材料、設計および施工の各レベルを組み合わせた供試体を作成し、赤インク水浸透深さの測定結果を比較検討した本実験の範囲内で以下に示すことがいえると思われる。

① 要求される一定の耐久性レベルを達成できる、材料、設計および施工レベルの組合せはいく種類もあり得る。

② 施工のしにくい劣った設計レベルの部材では、優れた施工レベルを組み合わせないと、材料レベルが同様であっても、標準の設計レベルの部材に比べて耐久性レベルが相当に低下することがある。

③ 一般土木構造物における標準的な仕様である「スランプ8~12cm」のコンクリートを用いた部材の耐久性は、標準の施工レベルを想定すると、設計レベルの優劣によって相当に差異が生じる。したがって、このスランプの範囲を同様の材料レベルとして取り扱えない可能

性が大きい。場合によってはスランプが12cmと大きい場合が優れた材料レベルとなることがあり得る。

④ 設計および施工レベルが劣っていても、流動性と材料分離抵抗性が大きい特Aランクの材料（ハイパフォーマンスコンクリート）を組み合わせることによって、標準以上の耐久性を実現できる可能性が示唆された。このような材料を開発・実用化できれば、一般の構造物を広く耐久的なコンクリートとするための有力な方策となり得るものと考えられる。

## 5. 設計図面がコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響

### (1) 設計図面の役割と重要性

施工の目的は、「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」とされることが多い。施工に着手する時点で準備される設計図書には、設計計算書、設計図面、工事共通仕様書、特記仕様書、工事内訳書等があるが、設計の意図を現場施工に携わる技術者や作業員（世話役・職人）に直接伝えられる唯一の手段は設計図面である。したがって、設計図面にどのような事項をどのような書式で記述するかは、構造物の施工過程に大きな影響を及ぼすと考えられるが、これまであまり注目されてこなかったといえる。土木製図基準<sup>18)</sup>において「コンクリート構造物は、鋼構造物の工場製作の場合と異なり、現場での施工が多いことを考えておかなければならない」という注意喚起があるが、それに対応する具体的方策は必ずしも明確になっていないと思われる。

現在の一般的なコンクリート構造物の構造図および詳細図の書式とその運用には、以下に示すような問題点があると考えられる。

① 設計図面が複雑になることを避けるために、切断面に現われているものを省略して表示することが慣例となっている。断面の補強鋼材の配置方法を数枚の設計図面に分けて表示すると、すべての補強鋼材が配置された場合の物理的な整合性とコンクリートの行き渡りと締固め作業に関する施工性を、設計図面を照査しただけでは判断することが困難となる。

② 耐久的なコンクリートの実現に重要な「施工のやりにくさの程度」ということを、大部分の設計技術者や施工技術者が事前に本気で照査しない習慣となっている。

③ 現場における鉄筋やPC鋼材等の配置にあたって、その物理的な整合性あるいは施工性の問題に直面した場合、補強鋼材の形状寸法の変更が安易に行われる傾向がある。

④ 設計の意図を伝達するために、設計図面にいかなる事項をいかなる方法で表示するかという基本的ルール



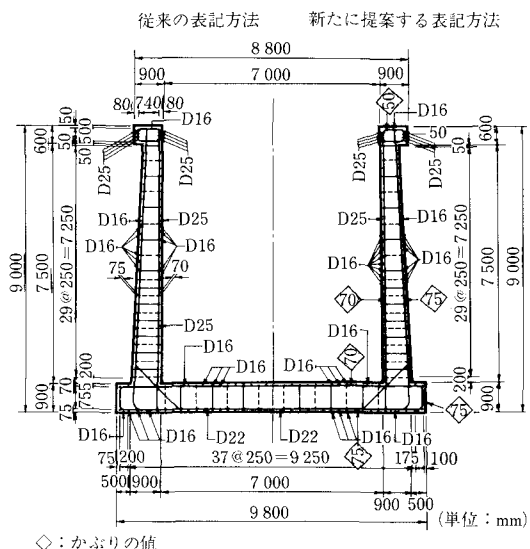


図-7 新しいかぶりの表示方法

の合意が十分にされていない。

⑤ コンクリート構造物の耐久性に重要なかぶりの値が明瞭に配筋図に表示されることが少ない。たとえば、図-7に示す配筋図の従来の表記方法において、上部はりの部材外縁と鉄筋との距離を寸法引き出し線で表示した80mmという値が、 $G_2$ （主鉄筋）と $G_3$ （スターラップ）のどちらの鉄筋についてのかぶりであるか、また鉄筋の中心までの距離か、外縁までの距離かということについて明文化された約束がない。また、鉄筋加工図を作成した場合、建築構造物（外縁～外縁の距離）と土木構造物（中心間距離）とで約束が違ふことは明確にすべきであろう。

(2) 設計図面の表示方法に関する提案

近年、わが国でも取り入れられつつある限界状態設計法によるコンクリート構造物の設計体系の利点の1つに、それが許容応力度設計法に比べて、設計の意図を明確に表現・伝達できることが挙げられる。使用限界、終局限界、疲労限界の各限界状態の安全度を独立して照査するため、それらを許容応力度に包含して取り扱う許容応力度設計法より設計者の意図を施工過程に伝達しやすいのである。必要鉄筋量を満足すれば、鉄筋の直径や中心間隔あるいはかぶりの値を変更しても、許容応力度設計法は、見掛け上は構造物の性能に影響を及ぼさない設計体系といえる。しかし、限界状態設計法は、鉄筋の直径や中心間隔あるいはかぶりの値は、設計過程において各限界状態および構造物の環境条件を考慮して設計者が意図をもって定めたものなので、施工の便宜だけでこれを変更すれば設計で想定した構造物の性能に影響することになる。

いかなる設計法であっても、設計の意図を正確かつ円滑に施工過程に伝達し、施工のしやすさに着目した設計レベルを誰もが容易に照査できるようになれば、耐久的なコンクリート構造物を広く実現するために有効であると思われる。このような観点から、設計図面の表示方法について以下に示す事項を提案したい。

① 構造図および詳細図（配筋図）における「かぶりの表示方法」を、図-7に示すように、文字どおり「かぶりの値」が一目で誰もが判読できるように表示する。寸法線を用いた表示は鉄筋間隔のみとし、これを用いてかぶりの値は一切書かないこととする。

② 設計レベルを検討できるように、「すべての鋼材」を配置した場合の平面投影図および標準断面図を設計図面に添付する。

③ 設計図面で表示する設計条件一覧表に、コンクリートの設計基準強度とともに粗骨材の最大寸法、スランプ、最小かぶりの値を必ず表示する。

④ 一般構造図に、コンクリートの打ち込みリフト割り（打継目の位置）を表示する。

この提案は、設計者に施工過程に関する知識と判断を要求することなので設計費用が増大する可能性もある。しかし、設計成果の書式は、設計レベルの内容を評価するために重要な役割を担っているものである。近年のコンピュータ技術の発達を応用できる分野であり、材料、設計および施工を総合的に評価する耐久性設計の基礎資料が設計図面である。したがって、設計過程の費用が幾分増加しても、ここで丁寧な作業をすることが耐久的なコンクリート構造物を実現するのに効果的であり、結局は経済的になると考えられるのである。

6. 結 論

コンクリート構造物の耐久性に設計過程が及ぼす影響を、設計詳細の「内容」と設計図面の「書式」の両者に着目して論じた。

本研究の範囲内で以下に示すことがいえるものと考えられる。

(1) 要求される耐久性レベルを実現できる材料、設計および施工の各レベルの組合せはいく種類もある。同じコンクリート材料を使用しても、構造物の設計詳細と施工方法によって、部材表面部コンクリートの密実さが異なることがある。

(2) 設計レベルが相違した場合に標準の材料・施工レベルが組み合わせられると、部材表面の密実さに相当の差異が生じることがある。一般の土木構造物で標準的な仕様とされるスランプ8~12cmの範囲を同様の材料レベルとして取り扱うことには不適當である。場合によっては、スランプが12cmと大きい場合が優れた材料レ

ベルとなる可能性がある。

(3) 設計および施工レベルが劣っていても、ハイパフォーマンスコンクリートを組み合わせることによって標準以上の耐久性を実現できる可能性がある。

(4) 設計の意図を、正確かつ円滑に施工過程に伝達するために、5. に示すような設計図面の書式を提案する。

本論文は、筆頭著者が、昭和63年10月付けで、東京大学より工学博士を授与された学位論文の一部である。

本研究を進めるにあたり、東京大学工学部 岡村 甫教授に懇切丁寧なご助言とご指導を賜りましたことを厚く御礼申し上げます。また、有益な討論とご示唆を頂いた、東京大学工学部 前川宏一助教授、小沢一雅助手、実験にご協力頂いた、山中克夫氏（現・三井物産）を始め東京大学工学部土木工学科コンクリート実験室の皆様 に心より感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) 國島正彦・岡村 甫：総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計，コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集，1988年4月。
- 2) 國島正彦・小沢一雅・山中克夫：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，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.188～189，1988年10月。
- 3) Kunishima, M. and Okamura, H. *et al.* : Comprehensive Evaluation of Concrete Structures Durability, International Symposium Re-Evaluation of Concrete Structures, DABI, 1988. 6.
- 4) Kunishima, M. and Okamura, H. : Durability Design for Concrete Structures, IABSE Symposium, pp.505～510, Portugal, 1989. 9.
- 5) 昭和61年制定コンクリート標準示方書施工編，土木学会，昭和61年10月。
- 6) たとえば，土木工事共通仕様書，建設省関東地方建設局，平成元年5月，土木工事共通仕様書，日本道路公団，平成元年11月，土木工事共通仕様書，石川県，昭和63年11月。
- 7) 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，平成元年8月。
- 8) Newman, K. : Labcrete, Realcrete, and Hypocrete Where We can Expect the Next Major Durability Problems, Katharine and Bryant Mather International Conference, ACI SP-100-64, Vol. 2.
- 9) 秋元泰輔・國島正彦・渡辺泰充：疑問に答えるコンクリート工事のノウハウ，近代図書，昭和63年3月。
- 10) たとえば，御子柴光春：コンクリート構造物の耐久性と設計，コンクリート講習会テキスト，（社）セメント協会，昭和59年8月。
- 11) 道路橋の塩害対策指針（案）・同解説，（社）日本道路協会，昭和59年2月。
- 12) 武藤和宏・長沢正孝・川岸真一・國島正彦：海水飛沫を受けるPC高架橋の施工—深谷橋—，コンクリート工学，Vol. 27, No. 8, pp.24～32, 1987年8月。
- 13) 昭和61年制定コンクリート標準示方書設計編，土木学会，昭和61年10月。
- 14) 國島正彦：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，東京大学工学部土木工学科博士論文，昭和63年10月。
- 15) 岡村 甫：信頼されるコンクリートへの途，コンクリート工学，1987年1月号。
- 16) 岡村 甫・國島正彦・前川宏一・小沢一雅：「締固め不要」のコンクリート—ハイパフォーマンスコンクリートへの挑戦—，土木施工，1989年10月。
- 17) Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M. and Okamura, H. : High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, The 2nd East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, pp.445～450, Thailand, 1989. 1.
- 18) 土木製図基準・平成元年改訂版，土木学会，平成元年3月。

(1990. 4. 17・受付)