

論文

[1082] 構造細目とワーカビリティの異なる部材の耐久性能

正会員○國島 正彦 (東京大学工学部)

正会員 小沢 一雅 (東京大学工学部)

正会員 山中 克夫 (三井物産(株))

1. はじめに

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ている。構造物の劣化は、塩分、酸素および水等の外的要因が部材表面から浸透して、内部の補強鋼材が腐食することが大きな原因として挙げられる。堅硬で空隙の少ない密実なコンクリートを、優れた材料を使用し、適切な設計および入念な施工を行うことによって実現すれば、構造物の耐久性は向上することに間違いはないといえる。しかし、要求される耐久性能のレベルが異なり、設計詳細や施工方法の制限を受けられる場合もある多種多様なコンクリート構造物に対して、材料、設計および施工のレベルを、常に最善のものを一義的に要求することは非現実的であり、賢明な工学的判断とはいえないものと思われる。材料、設計および施工の各レベルが様々に組み合わせられた場合の構造物の耐久性能を総合的に評価することが必要なのである。水セメント比を10%小さくして耐久性能を向上させることと、設計で鉄筋のあきを大きくする構造細目や入念に締め固める施工方法によって耐久性能を向上させることとの関係を定量的に明らかにすることが重要であり、それをうまく設定できるかどうかコンクリート構造物の耐久性設計の鍵を握っているのである〔1〕。

本研究は、フレッシュコンクリートの型枠内への充填性および締め固め作業の容易さに影響する鋼材のあきや段数が異なる部材に、スランプが異なるコンクリートを打設した場合の部材表面部付近の密実さを比較検討し、それを指標として構造細目とワーカビリティの組み合わせが部材の耐久性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的としたものである。

2. 実験概要

2.1 耐久性能の試験方法〔2〕

コンクリート部材の耐久性能は、供試体を真空乾燥し、表面からの蒸発水量の多少を測定することによって、部材表面付近の密実さすなわち外的要因に対する抵抗性として定量的に判定した。

試験装置は、図-1に示すようであって、シリカゲルを十分に入れたデシケータ内に供試体を置き、真空ポンプによって容器内の気圧を10mmHgとし、12時間後の蒸発水量を供試体重量の経時変化を測定して求めた。真空乾燥したコンクリート中の水分の移動機構を推定する予備試験から得られた知見から、12時間程度の乾燥時間によって、供試体表

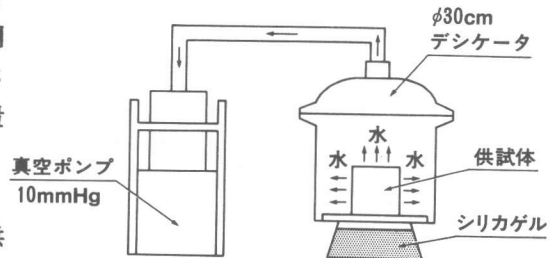


図-1 試験装置

面から6mm程度までの深さにある自由水が蒸発すると思われたので、この試験方法で、コンクリート部材表面付近の密実さを判定できると考えた。

## 2. 2 供試体および実験方法

実構造物を想定してモデル化した供試体の形状・寸法は、図-2に示すようであって、(鋼材の水平のあき) / (粗骨材の最大寸法)が2.9と、あきが大きくコンクリートの施工が容易な標準の設計レベルのもの(A供試体)と、この値が1.4で、施工が困難な劣った設計レベルのもの(B供試体)を作製した。両供試体とも、コンクリート標準示方書の規定(鋼材のあき) / (粗骨材の最大寸法)  $\geq 4/3$ を満足しているが、A供試体は、実験で用いた直径28mmの棒状バイブレーターを部材底面まで挿入できる空間を持つのに対し、B供試体は挿入できる空間を持たない設計とした。供試体には、鋼材の代用として直径18mmの塩化ビニルパイプを使用した。

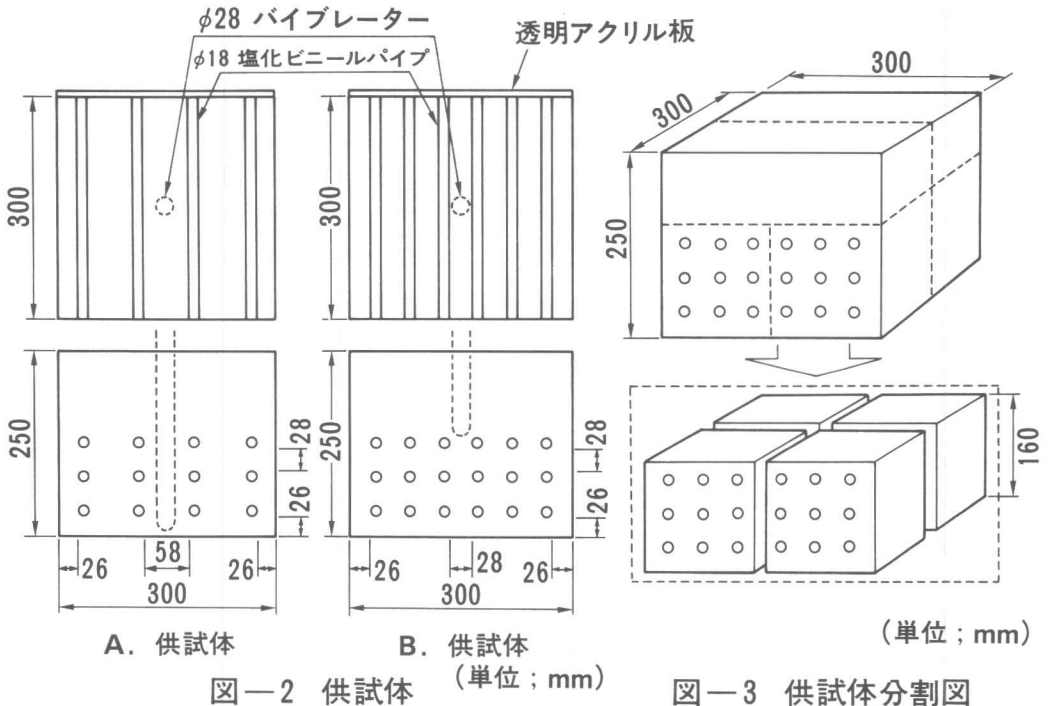


図-2 供試体

図-3 供試体分割図

コンクリート打設後、材令2日で脱型し、材令5日まで20°C水中養生した後、図-3に示すように、コンクリートカッターで供試体を切断した。供試体下部を、デシケータに収納できる寸法のほぼ同じ大きさの4つのブロックに分割し、底型枠およびパイプに沿った側型枠の表面以外を、エポキシ樹脂系塗料を用いてシールした後、再び水中養生した。材令7日にブロック表面の水を拭き取って重量を測定した後、12時間真空乾燥し、供試体重量の減少量(蒸発水量)を求めた。測定した4つのブロックの総蒸発水量を真空乾燥させた表面積(約1860cm<sup>2</sup>)で除した単位表面積当たりの蒸発水量を用いて、各供試体の耐久性能を定量的に比較検討した。

コンクリートの配合は、表-1に示すようであって、水セメント比を、40%、50%および70%、スランプを、8cm、12cmおよび18cmと変化させ、空気量は、4~5%とした。セメントは、普通ポルトランドセメント、細骨材は、富士川産の川砂、粗骨材は、砕石2005を使用した。

コンクリートの打設は、実際の現場における打設速度と連続性に近づけようとして、6~7リ

ットルのバケツを用いて連続して打ち込んだ。締固めは、図-2に示すように、供試体中央部1箇所に棒状バイブレーターを挿入し、1層で締固めた。パイプと直交する側面型枠に使用した透明アクリル板を通して目視によって観察できるコンクリートが充填されるまでの時間を測定し、この時間を、それぞれの供試体と材料が組み合わされた場合の、締固めの程度に関する施工レベルの標準とした。

表-1 コンクリートの配合

スランブの筋囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	補助 AE剤
8±1	4~5	40	42	162	405	731	1016	1.01	1.22
		50	44	162	324	796	1019	0.81	0.65
		70	49	168	240	912	958	0.60	0.24
12±1		50	44	170	340	781	993	0.85	0.78
18±1		40	42	182	455	692	964	1.14	1.82
		50	44	182	364	757	972	0.91	1.09
		70	49	190	271	872	913	0.68	0.27

### 3. 充填性と最適スランブ

現場経験の豊富な優れた技術者に、実際のコンクリート構造物を耐久性の優れた総合的に良いものとするための最適のスランブを質問した場合、必ずしも示方書で規定された標準値とは一致しないと思われる。あくまで8cmが良いとする立場、12cm程度が実用的とする立場、充填されなければ意味がないので柔らかいほうがよいとする立場等が考えられ、建築構造物では、スランブ18cm程度とするのが一般的であろう。

断面寸法が小さく鋼材の配置が錯綜した部材をスランブ8cmとしたり、柔らかいのが好ましいからといって、道路橋の床版をスランブ18cmとすることは、耐久性のすぐれた密実なコンクリート構造物を実現するためには不適當であることは直観的には理解できるが、コンクリートの材料特性、構造細目および締固め方法等を総合的に如何に考えるべきなのかは明確になっていないと思われる。

水セメント比を50%一定とし、スランブを、8、12および18cmと変化させて標準の施工レベルとした場合の蒸発水量は、図-4に示すようであって、シリンダーおよびあきの大きいブロック供試体では、スランブが変化しても、ほぼ同様であったが、あきの小さいブロック供試体では、スランブ12cmの場合に比較して、8cm(硬)と18cm(柔)の蒸発水量が著しく大きいという興味ある結果が得られた。

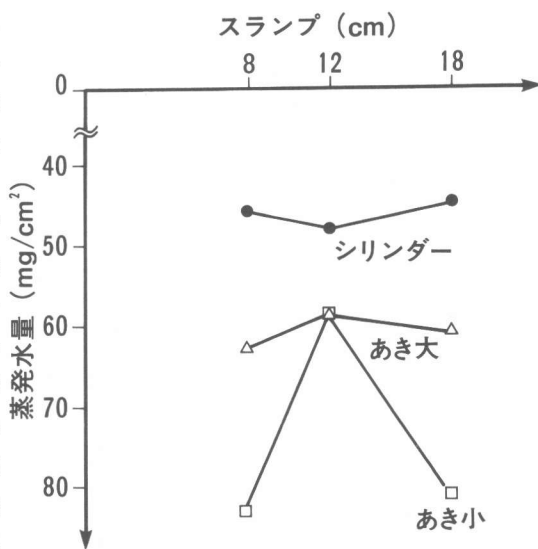


図-4 スランブと蒸発水量との関係

フレッシュコンクリートのスランプと変形性および材料分離抵抗性との関係は、図-5に示すように、スランプが大きくなれば、変形性は増加するが材料分離抵抗性は減少する。しかし、スランプの小さい範囲では変形性が、大きい範囲では材料分離抵抗性が支配的になると考えられ、両者の複合効果と締固めの程度との組み合わせが充填性に影響することになる。図-4の実験結果から、スランプが小さく変形性が小さい場合は、よほど入念に締固めないで、コンクリート中の比較的大きなエントラップトエアの影響で密実さが低下し、スランプが大きくて材料分離抵抗性が小さい場合は、毛細管空隙が増加する影響で密実さが低下すると推測できる。スランプ12cmの場合を過剰に締固めた場合は、密実さが低下することも考えられる。一定のスランプのコンクリートであっても、その変形性および材料分離抵抗性は、部材の形状・寸法や鋼材のあき等の構造細目によっても影響され、標準の締固め程度を前提とした最適なスランプは異なると思われる。このことは、多種多様な構造物に携わる技術者が、最適と推奨するスランプの値が相違することからも理解できよう。

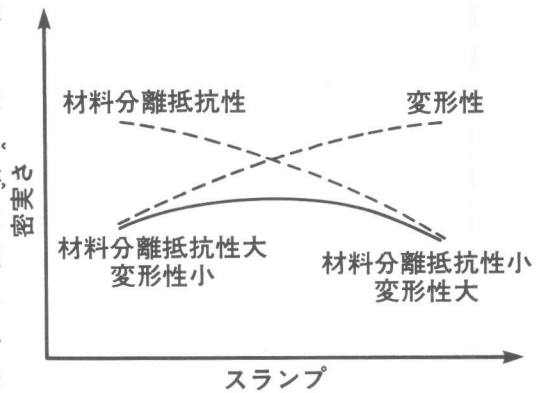


図-5 変形性と材料分離抵抗性

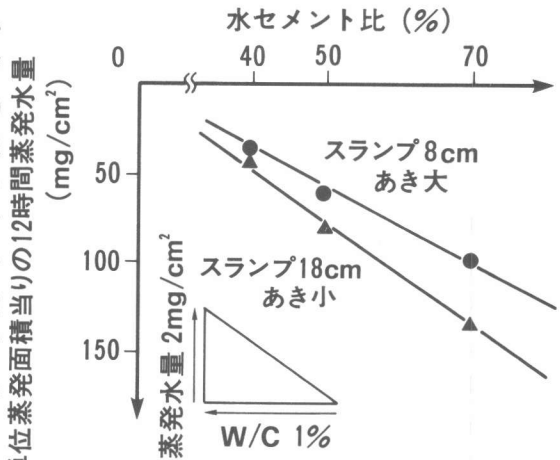


図-6 水セメント比と蒸発水量との関係

#### 4. 水セメント比と構造細目の相互関係

水セメント比を変化させた場合の、スランプが8cmで鋼材あきが大きいA供試体およびスランプ18cmで鋼材あきが小さいB供試体の、12時間蒸発水量は、図-6に示すようであり、水セメント比と蒸発水量とは、ほぼ線形関係にあり、水セメント比が1%大きくなれば、蒸発水量は、 $0.002\text{g}/\text{cm}^2$ 程度大きくなるという結果が得られた。

材料特性と設計詳細（構造細目）や施工方法（締固めの程度）を組み合わせることで耐久性能を総合的に評価するために、ここで得られた水セメント比と蒸発水量との関係を用いることとした。土木学会耐久設計指針（試案）においては、総合的な耐久性能を定量的に表現するために、耐久性ポイントの概念を導入し、1ポイントは、水セメント比の1%の変化に相当し、耐久性ポイントが大きいほど耐久性能が優れているとしている。本研究では、様々な要因の相互関係を、水セメント比と蒸発水量との関係を基準として実験結果を整理した。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すれば、鋼材のあきの小さいB供試体がA供試体に比較して、耐久性ポイントは小さいとしても大きな誤りではないと思われる。指針では、鋼材のあきと段数を

変数とした、式(1)に示すような耐久性ポイント： $T_p$ の算定式を提案している。

$$T_p = 15 \left( 1 - \sqrt{2 D_{30} / D_{31}} \right) \quad \text{式(1)}$$

$D_{30}$ ：鋼材の段数  $D_{31}$ ：鋼材の最小水平あき／粗骨材の最大寸法  
但し  $-25 \leq T_p \leq 15$

式(1)は、鋼材の段数が多くなり、あきが小さくなるほど密実なコンクリートを実現することは困難となるという常識を定式化し、この要因が単独で影響する程度の上下限を工学的判断によって定めたものである。

A供試体とB供試体の構造細目から算定される耐久性ポイントの相違は、1.3ポイント程度であって、式(1)と水セメント比の耐久性能の及ばず影響との相互関係が妥当であれば、蒸発水量に、 $0.026\text{g}/\text{cm}^2$ 程度の相違が生ずることが予想される。

水セメント比が50%の場合に、材料特性および施工方法(締固め)のレベルが同様で、構造細目の要因だけが異なる供試体の蒸発水量と、式(1)によって算定される耐久性ポイントの差との関係は、図-7に示すようであって、水セメント比と蒸発水量との関係から求められた、1ポイントが、 $0.002\text{g}/\text{cm}^2$ に相当するという勾配に、ほぼ一致した。すなわち、式(1)による、あきと段数の耐久性能に及ばず影響と水セメント比の耐久性能に及ばず影響の相互関係は、ほぼ妥当であり、設計レベルの相違によって、水セメント比が、1.3%も大きくなるのと同様な悪影響を与える可能性が示唆されたのである。

### 5. 施工レベルが耐久性能に与える影響

施工レベル(締固め程度)と耐久性能との関係を明らかにする目的で、棒状バイブレーターの能力と締固め時間とを変化させた場合の蒸発水量を測定した結果を整理すると、図

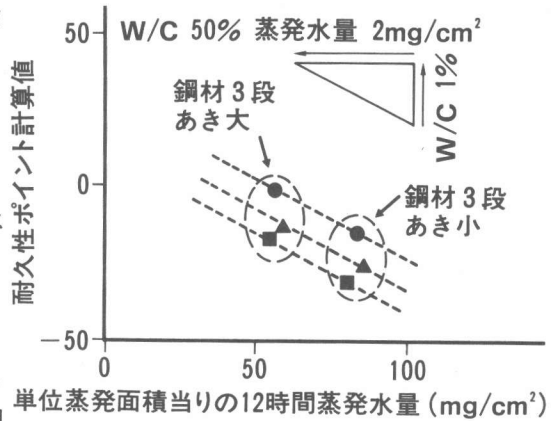


図-7 設計レベルと耐久性ポイントとの関係

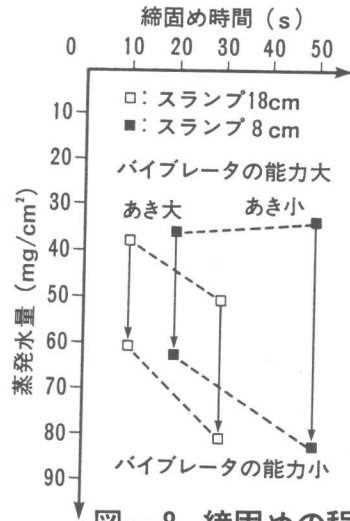


図-8 締固めの程度の影響

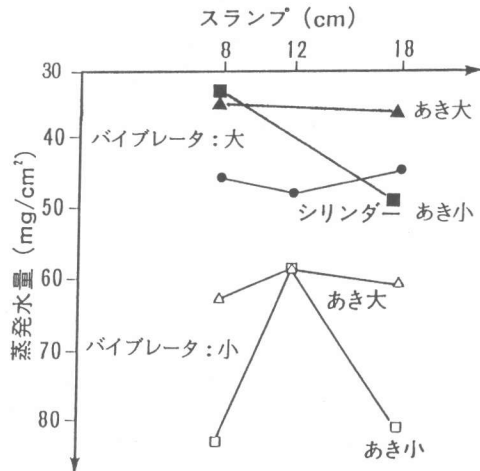


図-9 スランブと蒸発水量との関係

—8および図—9に示すようである。締固め程度を向上させた場合は、スランプおよび鋼材のあきの大小によらず、標準の締固め程度の場合より部材表面部付近の密実さが向上した。その程度は、鋼材のあきが小さくスランプが小さいほど顕著となると共に、あきが小さい場合は、スランプ18cmの柔らかいコンクリートの締固めの程度を向上させると、かえって密実さが低下するという結果が得られた。あきの小さい部材は、硬いコンクリートを、あきが大きい場合より入念に締固めて打ち込むことは効果があるが、スランプ18cmの柔らかいコンクリートの場合は逆効果になるのである。本実験の範囲内では、蒸発水量が、 $0.025\sim 0.050\text{g}/\text{cm}^2$ 程度変化しているの、締固めの程度によって、部材表面部付近では、水セメント比が10数%から25%程度異なるのと同様の影響が生じることが示唆された。

構造物の設計図面があれば、式(1)によって誰もが実際の施工に着手する以前に、設計レベルに関する耐久性ポイントが算定できるが、様々な要因が影響する締固め方法を明確に定式化することは困難である。しかし、締固めの程度の耐久性能に与える影響は著しいので、指針においては、工事を担当する現場技術者の経験や資格に基づいた能力にポイントをつけて、間接的に締固めの程度を定量的に評価していると思われる。

## 7. 結論

本研究は、スランプ、鋼材のあきおよび締固めの程度等の要因を変化させ、供試体を真空乾燥した場合の蒸発水量から部材表面部付近の密実さを判定し、材料、設計詳細および施工方法が耐久性能に及ぼす影響の相互関係を定量的に明らかにしたものである。本実験の結果から以下のことがいえるものと思われる。

- (1) 密実なコンクリートを実現するために、最も適切なスランプの範囲がある。その範囲は、構造細目や施工方法によって異なると思われる。
- (2) 鋼材のあきと段数の構造細目が、フレッシュコンクリートの行き渡りや締固め作業が容易でないように設計された場合は、部材表面部付近のコンクリートの水セメント比が、10数%大きくなった場合と同様の密実さの低下に相当する影響があることが示唆された。
- (3) 締固めの程度の相違によって、部材表面部付近の密実さは、水セメント比が10数%から25%程度変化するのと同様の影響を受ける。

〔謝辞〕本研究を遂行するにあたり東京大学工学部岡村甫教授に有益な御助言と御示唆を賜りましたことを厚く御礼申し上げます。また、東京大学学部4年の、奥本 現氏、小塚 清氏には、精力的に御協力頂きましたことを心より感謝致します。本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(総合A63302044)を受けて行ったものです。

## 参考文献：

- (1) 國島, 岡村：総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計, JCI 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, 1985年4月
- (2) 山中, 小沢, 國島：コンクリート構造物の耐久性の定量的評価, JCI年次論文報告集, 1989年
- (3) 國島, 小沢, 山中：設計レベルが異なるコンクリート部材の耐久性能, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, 1988年10月