

# 鉄筋コンクリート部材に発生する 材料不均一性の定量評価

石田 哲也<sup>1</sup>・加藤 智治<sup>2</sup>・二宮 宗<sup>3</sup>・前川 宏一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 東京大学助手 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

<sup>2</sup>工修 ドイツ証券会社 東京支店 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-12-1)

<sup>3</sup>東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

本研究では、コンクリート打設直後に発生する、RC構造物中に達成される材料品質の不均一さを定量化する事を目的としている。コンクリートの初期品質に影響を与える因子として、構造諸元、施工法、及び材料特性を取り上げ、各要因を系統立てて変化させた、実構造部材を想定した供試体を作製した。材料分離を示す巨視的な指標として空隙率を場所毎に測定し、統計処理を行うことで、各要因の影響度の定量評価と、場所毎に異なるコンクリートの初期品質を与える簡易手法を提案した。また、初期品質の相違による長期耐久性への影響を明らかにするために、場所毎に採取した供試体に促進中性化試験を施すとともに、本実験結果と土木学会により提案されている耐久設計指針との比較を試みた。

**Key Words:** segregation, durability, porosity, cover concrete, carbonation

## 1. はじめに

次世紀における持続的発展を続けていく上で、コンクリート構造物は、多様な要求性能を満足することが求められる。今後、わが国を取り巻く社会・経済状況が欲する良質な社会基盤施設を、安く社会に提供するためには、初期建設費のみならず、ライフサイクルコストの算定とその便益評価を適切に行う必要がある。一方で、今までに蓄積された社会資本を有効活用するにあたり、既に供用段階にある構造物に対しては、劣化の状況に応じた過不足の無い適切な維持補修を施すことが求められる。

以上の観点から、建設時の初期条件と、その後を受ける環境・荷重作用の下、新設構造物に対して性能の事前評価、また既存構造物に対しては、過去の履歴に依存する材料品質と構造物の状態を把握する事が重要となる。ここで、時間軸に沿って構造物の性能を評価する際に障害となるのは、コンクリート材料の特性、及び施工方法によっては、構造物の全ての領域において、打設前に設定される品質が必ずしも担保されないという点である。この

不確定性を解決する工学的策として、自己充填コンクリートを適用する事が、過去に提案されている<sup>1)</sup>。自己充填コンクリートは、施工時の不確定要因を排除し、かつ従来のコンクリートでは不可避な材料分離を発生させにくく、全ての部位において、ほぼ均質なコンクリートを達成する事が可能である。この事実は、実施工の後、構造物から採取されたコンクリート供試体と、標準養生を施した小型供試体の強度試験の結果、両者の変動係数がほぼ等しい結果を示すことから裏付けられている<sup>2)</sup>。

しかしながら、比較的高い水セメント比を有する普通コンクリートを用いて建造された多くの既設構造物を対象とした場合、または要求性能に応じて低品質なコンクリートを許容する場合には、構造物中に達成される材料の品質は部位毎に異なることが予想される。特にコンクリート構造物の耐久性能に影響を及ぼすのは、かぶりコンクリートの品質であり、同時に最も施工及び材料分離の影響を受ける。平成 12 年に改定された土木学会コンクリート標準示方書施工編においては、構造物中に達成されるコンクリートと小型供試体の品質の差異を、部分安全係

数を用いて評価する手法が導入された。ただし、種々の要因に影響を受ける構造中の材料品質が、どの程度変動するか不明な点が多く、現時点では、小型供試体との材料特性の差異を表現する材料係数は、おおよその範囲を示すに留まっている。従って、施工、部材断面寸法、配筋、及び使用材料によって相違する、構造物中で実際に達成される品質の初期値を、何らかの方法で定量化することが求められている。

コンクリート構造物は、型枠工、鉄筋施工、コンクリート打設、締固め、表面仕上げ、打ち継ぎ、養生といった多くの過程を経て供用段階に至る。各過程において、採用する施工方法、材料、構造諸元、及び人的要因が相互に関連して、構造物の性能を低下させる様々な初期欠陥が生じる可能性がある(図-1)。本研究では、主たる原因が人為的及び偶発的で、事前の確定論的な処理が困難なもの、また美観的欠陥の側面が強いものは対象から除外するものとした。すなわち、鉄筋のたわみ、型枠支保工の変形、またスペーサーの置忘れ等に起因する鉄筋かぶりの不足、締固め不足によるジャンカ、不適切な打継目処理によるコールドジョイント等である。これらの取り扱いに対しては、施工法及び施工に与える人的影響の定量化<sup>3)</sup>、統計処理による確率論的なアプローチ<sup>4),5)</sup>や、打継目の耐久性に与える影響<sup>6),7)</sup>、また各種非破壊試験法による構造物中の欠陥評価<sup>18),19)</sup>等の研究成果が現在までに示されている。

以上の前提から、本研究では第一段階として、供用開始までに発生する、コンクリート中に達成される材料品質の不均一性、すなわち材料分離の定量化に対象を限定した(図-1)。ここで取り扱う材料分離とは、構成物質(水、結合材及び骨材)が打設後、重力の作用のもと相互移動を行い、構成比率が変動することによって、コンクリート材料の品質が空間的に異なること、と定義する。この種の材料分離の解明を試みた研究の歴史は古く、微視的な現象に基づき定式化し、主としてブリージング現象の定量化を図ったもの<sup>8)</sup>、無筋コンクリートを対象にして空間的に分布するペースマトリックスの水セメント比を測定したもの<sup>9),10)</sup>、かぶりコンクリートの品質を強度や物質移動、中性化の観点から検討したもの<sup>11),12),13)</sup>、及び実構造物を想定した供試体を作製し、構造細目及びワーカビリティを変化させて、かぶりコンクリートの密実さを検討したもの<sup>14),15)</sup>等がある。しかしながら、現在までの研究において、対象を鉄筋コンクリート構造物に定め、種々の要因に影響される構造物中の初期品質の定量化と、その後の長期に渡る劣化現象の関連を体系的に示すまでには至っていない。従って、構造物の寸法、配筋、使用材料、施工法の各要因が様々に影響を及ぼしあう結果、空間的に不均一に分布するコンクリートの初期品質の定量化を試みることにした。さらに長期耐久性照査との関連も視

初期欠陥発生過程	初期欠陥	主な原因
型枠 鉄筋施工	鉄筋かぶり不足 初期ひび割れ	スペーサー置き忘れ等の人為的ミス 配筋違い、型枠支保工の変形、 不等沈下
打込み	沈下ひび割れ プラスチック収縮ひび割れ 材料分離(骨材の分離)	過剰なブリージング 初期乾燥、遅いブリージング 打込み高さ、コンクリート材料の性質
締固め	材料分離(水、骨材の分離) ジャンカ、気泡 チャンネルング、表面剥離	過度の締固め 締固め不足
打ち継ぎ	コールドジョイント	打ち継ぎ目処理不足
表面仕上げ	沈下ひび割れ	タッピング不足

図-1 建設過程に発生する初期欠陥

野に入れながら、構造物中に存在するコンクリート品質の初期値を与える手法の確立を目指す。

具体的には、実構造物を想定した供試体を作製し、大まかに分けて、設計・施工・材料の3つに起因する要因を系統立てて変化させ、構造物中に達成される品質の不均一性の定量評価を試みた。ここで、材料分離を評価するにあたっては巨視的な指標を用い、多変量解析を用いた統計手法によって、各種要因の相対影響度の定量化を行った。さらに、促進中性化試験及び土木学会耐久性設計指針で定められている耐久性指数<sup>3)</sup>と得られた実験結果を比較することで、材料分離を有する構造物の耐久性照査のケーススタディーを行った。

## 2. 材料分離測定試験

### (1) 概要

実際のコンクリート構造物を想定した供試体を作製し、各部位における材料品質の差異を測定する試験を行った。本研究では、構造物中の材料の品質に影響を与える要因として、大まかに分類して、構造諸元・施工法・材料特性の3者に着目した(図-2)。各種条件の与え方は、コンクリート標準示方書、既往の研究報告書、及び実際の構造物建設における代表的な設定方法に準拠している。

鉄筋コンクリート構造物は、柱、梁、スラブ、壁、ボックスカルバート等、様々な種類の構成要素から成るが、全ての形状について供試体を作製することは困難であるため、本研究では、典型的な構造部材として梁、及び柱供試体を作製した。多くのコンクリート構造物は、コンクリートの打込み方向に対して主鉄筋が垂直か、平行かのどちらかに分類でき、梁供試体が前者を、柱供試体が後者を代表していると考えられる。梁及び柱供試体に対して、構造

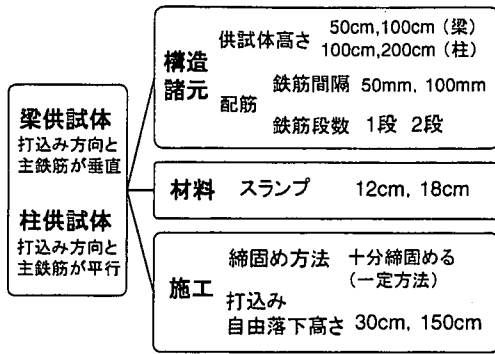


図-2 作製供試体とパラメータの種類

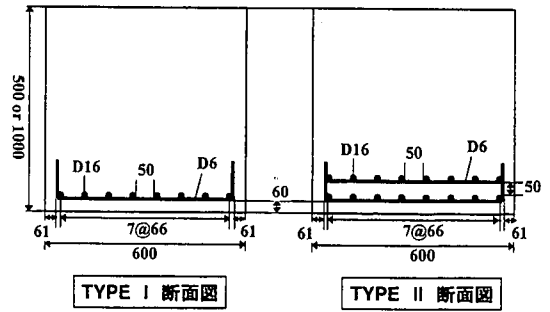


図-3 梁供試体構造諸元

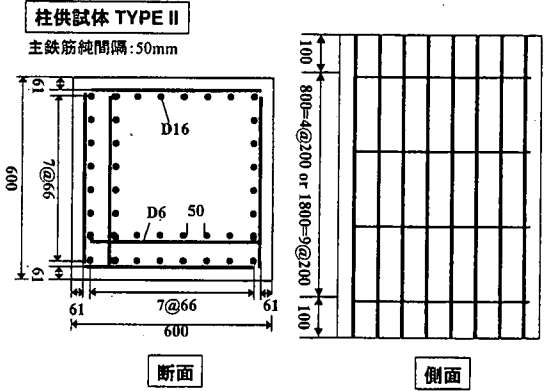
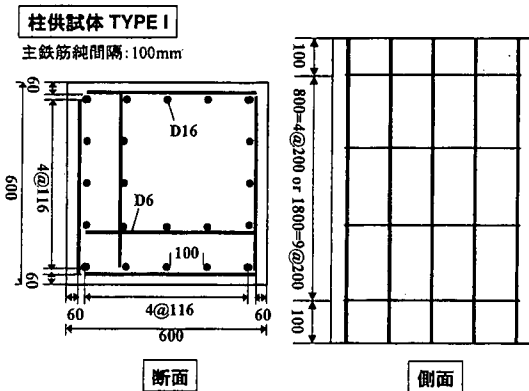


図-4 柱供試体構造諸元

細目・施工法・材料特性に関連する各種条件を系統立てて変化させ、巨視的な材料分離の指標となるコンクリートの空隙率の測定を行った。また長期耐久性に関連する一つの特性を調べるものとして、中性化促進試験を実施した。全ての組み合わせに対して場所毎に抜き取った供試体は総数 824 個である。これらの供試体に対し、後述する統計的手法を用いて材料分離に与える各種要因の相対影響度の定量化を行った。

## (2) 各種要因の設定

構造諸元に関して、構造物の寸法及び配筋方法をパラメータとして設定した(図-3, 図-4)。寸法に関しては、主として供試体高さ方向の影響を調べる因子として、以下の様に設定した。

梁: 60cm×60cm× 50cm, 60cm×60cm×100cm

柱: 60cm×60cm×100cm, 60cm×60cm×200cm

次に、配筋は鉄筋純間隔及び鉄筋段数を変化させるものとした。柱における鉛直軸方向鉄筋純間隔は、コンクリート標準示方書の最小値が 40mm であること、また実際の設計図面では一般に 100mm 前後と設定されることが多いことから、柱に対して 2 通り設定した。

梁: 50mm

柱: 50mm, 100mm

ここで梁の水平あきに関しては、コア採取個所の材料分離に与える影響が小さいと判断し、1 通りの設計とした。

鉄筋段数は以下の様に設定した。

梁: 1 段, 2 段 (鉄筋段純間隔は 50mm)

柱: 1 段, 2 段 (鉄筋段純間隔は鉄筋純間隔と同一) なお鉄筋かぶりは本研究では約 60mm で一定とした。

材料に関連する要因としては、スランプ値を変動させた。コンクリートは、JIS A 5308 に適合するレディーミストコンクリートを用いた。スランプ 12[cm]、呼び強度 24[N/mm<sup>2</sup>]、最大粗骨材寸法 20[mm]の普通コンクリート(表-1)、及び普通コンクリートをベースにしたスランプ 18[cm]の流動化コンクリートである。

次に、材料分離に影響を与える施工関連の要因を取り上げる。本研究では主として締固め方法とコンクリートの打込み自由落下高さに着目し、以下の様に設定した。

既往の材料分離を取り扱った研究において、締固め方法を様々に変化させているものがある<sup>15),16),19)</sup>が、本研究では、十分に締固めるという条件で固定するものとした。その理由としては、例えば締固め時間等を制御す

表-1 コンクリートの配合

呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
24	58.9	12.0	4.0	44.6	162	275	816	1056

ることで、締固め方法を変化させる方法も考えられるが、内部振動機の性能及び作業員の熟練度によって、同じ時間を費やしても投入されるエネルギーが異なることが予想されるためである。また他の実験パラメータが全て人為的影響を受けない事も勘案して、本研究では十分な締固め条件下における材料分離を対象とした。本実験における締固め方法を表-2 に示す。内部振動機を使用する際の間隔、及びコンクリート高さは、示方書及び既往の研究を参考にし、十分な締固めが保証される手法を用いた。将来的には任意の施工投入エネルギーに対して評価できるよう、評価関数を広げることが必要であると認識している。ただし自己充てんコンクリートの場合は、その評価は不要である。

打込み自由落下高さについては、標準示方書に「排出口と打ち込み面までの高さは、1.5m 以下を原則とする。」という規定が設けられていることから、梁供試体に対して30cmと150cmの2段階とした。柱は施工状況を考えて150cmのみとし、特に高さ2mの柱についてだけ、200cmとした。

### (3) 実験手順及び方法

前述の議論で各種条件を設定した供試体からコアを採取し、材料分離の程度を表現する指標として空隙率の測定、またその後の耐久性能を調べるものとして中性化促進試験を行った。手順は以下のとおりである。

1. 試験体打ち込み(スランブ、空気量測定、テストピース作製(φ10×20cm))。
2. 供試体3日間、1日2回の散水養生。
3. 打ち込み4日目に脱型。
4. 供試体毎に指定場所のコア抜き(φ10cm)。
5. 各コア抜き供試体およびテストピースを17日間水槽で水中養生。  
(空隙率測定供試体)
6. 水中養生後(打ち込みから3週間後)に各供試体を湿式コンクリートカッターで切断。
7. 切断した各テストピースについて気中重量、水中重量を測定。
8. 110℃乾燥炉に投入。
9. 翌日絶対乾燥重量測定。  
(促進中性化試験供試体)
10. 水中養生直後、梁・柱供試体の表面部に相当する、供試体の一円断面を除いて全面シールし、中性化

表-2 供試体の施工方法

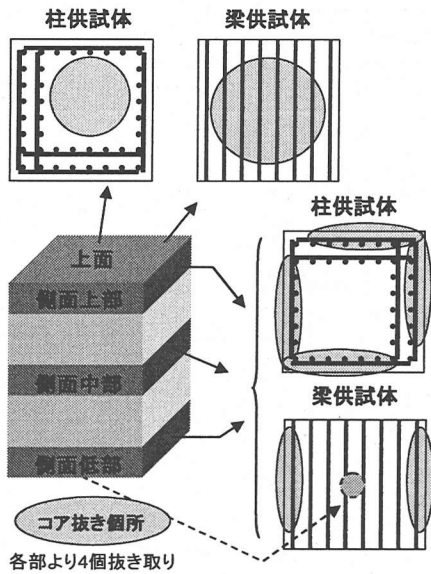
供試体高さ	締固め方法
50cm	高さ30cm、50cm <sup>1)</sup> において内部振動機使用
100cm	高さ30cm、60cm、100cm <sup>1)</sup> において内部振動機使用
200cm	高さ30cm、60cm、100cm、130cm、160cm、200cm <sup>1)</sup> において内部振動機使用

1) 各層5箇所(中心部及び四隅、振動間隔30cm程度に相当する)に対して、15秒間振動を与えた。

促進試験槽に投入する。

11. 7日間、促進中性化試験を行う。
12. 供試体を割裂し、破断面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を吹付ける。
13. デジタルプランニメーターにより中性化深さを測定。

供試体の打込み時には、打設されたコンクリートの基準値として、φ10×20[cm]の円筒供試体を作製した。この標準供試体の試験値をもって、コア抜き供試体における品質の標準からのばらつきを評価した。コアを抜く場所は、各供試体から、上面、側面上部、側面中部、側面低部においてコンクリートの物性が同一とみなすことが出来る箇所から4箇所ずつコア抜きした(図-5)。そのうち3体の供試体に関しては空隙率測定試験を行い、1体は中性化試験に用いた。ただし、梁供試体促進中性化試験においては、側面底部ではなく、底面最下部よりコア抜きを行った。空隙測定を行う供試体は、コンクリートカッターにより、表面から以下の深さごとに切断した。型枠表面から内部0-1cm、1-2cm、4-5cm、さらに鉄筋段数が2段の場合には9-10cmの部分も取り出した(図-6)。この切断方法を採用した理由は、既往の研究から、型枠表面付近のコンクリート(表面から2cm程度の部分)は、ブリージング水が集まりやすく結果として水セメント比、及びセメントペースト比が高くなることが示されていることによる<sup>11)</sup>。一方、表面から4cm以上内部のコンクリートは、所定の配合のコンクリートと同様の性質を有するとの報告がある<sup>12)</sup>。しかしながら、本実験で設定した条件のように、鉄筋が内部に複数本入っている場合には、鉄筋の影響により、内部のコンクリートの特性に影響を与える可能性がある。従って、鉄筋付近の内部のコンクリートについても切り出し、試験することにした。



ただし、梁供試体中性化試験においては、側面低部ではなく底面からコア抜きを行った(点線部)。

図-5 各供試体におけるコア抜き箇所

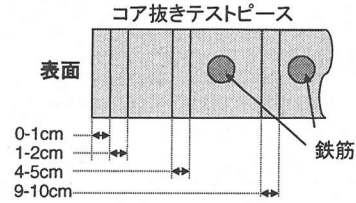


図-6 コア抜き試験体深さ方向の切断箇所

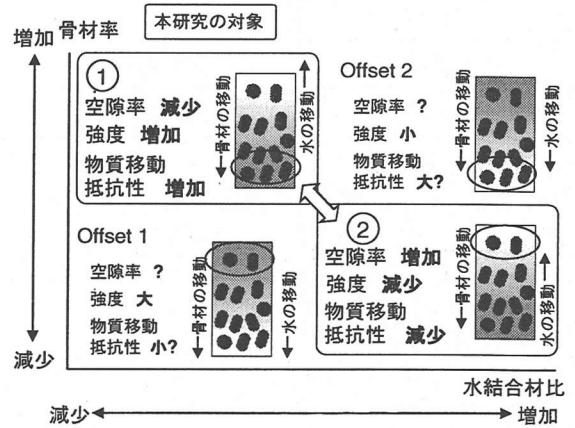


図-7 材料の構成比率と空隙率

試験体の空隙率 $\phi$ は、次式(1)を用いて求めた。

$$\phi = \frac{W_{wet}^a - W_{dry}^a}{W_{wet}^a - W_{wet}^w} \quad (1)$$

ここに、それぞれ供試体の、 $W_{wet}^a$ ；気中湿潤重量、 $W_{wet}^w$ ；水中重量、 $W_{dry}^a$ ；絶乾重量である。

促進中性化試験は、温度 25℃、相対湿度 55%、炭酸ガス濃度 15%の環境下で行った。中性化深さの測定にあたっては、コンクリート破断面をデジタルカメラにて撮影し、画像をデジタルプランナーにより平均中性化深さを求めた。

### 3. 空隙率による材料分離の定量評価

#### (1) 概要

前章で設定した条件に従い、空隙率を指標として、構造物中に達成される材料の不均一性を定量評価することを試みた。部材中に生ずる材料分離の程度は、実験シリーズにおける各影響因子が複雑に関連すると予想される。従って、一因子の材料分離に対する影響を、他の因子を一定に固定した実験結果の定量的データで判断しても、それはあくまで他の条件が不変であるという条件付きであり、定性的な議論に留まる。すなわち、各要素

を変化させた際の材料分離の特性は、各影響の線形形で表現出来ない。そこで、本研究では空隙率を目的変数、実験シリーズで変化させた設計・施工・材料に関するパラメータを説明変数とした多変量解析を行うこととした。

材料分離を多変量解析による重回帰分析で定量評価する際には、目的変数と説明変数の定義が必要である。ここでは、まず材料分離の程度を表す特性値として空隙率を採用した。空隙率は材料分離、すなわち所定の配合からの乖離を、常に正確に表現する値ではないが、基本的には全体に占めるペーストマトリックスの割合、及びペーストマトリックスの水結合材比に依存する変数であり、材料分離を評価する指標として利用可能と考えられる。コンクリート材料の構成比率と、実験によって得られる空隙率の関係を図-7に模式図として示した。予想される材料分離の形態の一つに、重力作用に起因する、水と骨材の鉛直方向の相互移動がある。この際、両者は比重の差により、反対方向に移動する。すなわち、水が上部に移動し骨材が沈降する場合、下部においては空隙率の低下が生じる(図-7中、①の部分)。このとき、強度及び物質移動抵抗性は増加するなど、材料の品質は向上する。一方、上部においては、ペーストマトリックスの比率、また水結合材比が増大することにより、空隙率は増加し、強度及び物質移動抵抗性は減少するため、コンクリート材料の品質は概して低下する(図-7中、

表-3 重回帰分析における説明変数

説明変数	性質
コア抜き場所	質的要因
表面からの距離	質的要因
供試体高さ	量的要因
スランブ値	量的要因
打込み高さ	量的要因
鉄筋間隔	量的要因
鉄筋段数	量的要因

②の部分). 以上の場合, 空隙率という単独の指標によって, 材料分離に伴うコンクリート材料の品質の変動を表現することができる。しかしながら, 骨材率と水結合材比が共に増加する場合, あるいは減少する場合は, 材料の品質変動を空隙率のみで評価することはできない。すなわち, 全体に占めるペーストマトリックスの体積割合の変動, 及び水結合材比増減の効果が打ち消しあうことによって, 供試体の空隙率は一定でも, 強度及び物質移動抵抗性は, 所定配合より低下することもあれば増大することもある(図-7中, Offset1及び2)。これに相当する実現象としては, 鉄筋間の骨材閉塞等により, 骨材の鉛直方向移動が妨げられるといった, 特殊な場合に限定されると考えられる。従って, 設定した実験条件下での材料分離の多くは, 図-7中の①及び②の形態に代表されると仮定し, また大量の供試体を取り扱う簡便性を鑑みて, 空隙率のみで材料分離の程度を評価することにした。

本章で行うデータ解析では, 以下の2点の仮定を設けた。

- ・ 打設時に採取した円筒供試体は, 所定配合の性能を有するコンクリートである。
- ・ コンクリートの空隙率はセメントペーストの空隙率とコンクリートの空気量の和とする。空気量は打設前の試験値を, パッチ全体の平均値として用いる。

(2) 多変量解析手法

材料分離の指標として, 測定された空隙率の絶対値をそのまま重回帰分析の目的変数とするのは不適切である。なぜなら, 本実験においては複数パッチのコンクリートを供試体に打設しており, 打設時のコンクリートの品質がシリーズによって若干変動するためである。従って, 空隙率の絶対値ではなく, 空隙率の所定配合時の空隙率からの差分の所定配合空隙率にたいする比率を用いて評価した。すなわち, 測定された各空隙率を $\mu_s$ , 円筒

表-4 質的要因とダミー変数の設定

説明変数	設定するダミー変数			
	場所 1	場所 2	場所 3	
コア抜き場所	上部	1	0	0
	側面上部	0	1	0
	側面中部	0	0	1
	側面低部	0	0	0
表面距離		距離 1	距離 2	距離 3
	0-1 cm	1	0	0
	1-2 cm	0	1	0
	4-5 cm	0	0	1
	9-10 cm	0	0	0

供試体から測定される所定配合の空隙率を $\mu$ とすれば,

$$Z = \frac{(\mu_s - A) - (\mu - A)}{(\mu - A)} = \frac{\mu_s - \mu}{\mu - A} \quad (2)$$

となる空隙率差分率 $Z$ をもって材料分離の程度を判断し, 重回帰分析の目的変数とする。ここで,  $A$  は打設時に測定されるコンクリートの空気量である。

本解析における説明変数は, 陽な形で量を与えない質的性質を有するものと, 実験条件をそのまま定量データとして使用可能な量的変数の両者が混在する。ここでは, コア抜き場所, 及び表面からの距離を質的変数として, また供試体高さ, スランブ値, 打込み高さ, 鉄筋間隔, 及び鉄筋段数を量的変数として取り扱った(表-3)。多変量解析として, 重回帰分析と数量化1類を利用する際, 質的変数に関してダミー変数を設定することにより, 全て定量的データとして重回帰分析を行うことが可能となる(表-4)。表中の説明変数とダミー変数の関係は, 例えば上部からのコア抜き供試体を示す場合, 場所1のダミー変数は1, その他のダミー変数は0の値を取る。表面からの距離についても同様である。ここで, 本研究における重回帰分析においては, 各説明変数は相互に独立する事象とみなすことが可能なため, 多重共線性は考慮しない。

以降行う重回帰分析方法は, 最小二乗法に基づくものとし, 有意な説明変数の選択に際しては変数増減法, すなわちF値が2以上の変数を採用することにした。ここで一般にF値は(偏回帰係数)/(偏回帰係数の標準誤差)の二乗として求められる。また回帰式の有効性を示す指標として次式で表される修正済み決定係数 $R_a$ を用いて判断した。

表-5 梁供試体全体の重回帰分析結果

変数名	偏回帰係数	F 値	P 値	標準誤差	精度	
場所 2	24.30	60.88	0.0000	3.114	決定係数	0.6116
場所 1	23.02	54.63	0.0000	3.114	修正済	
場所 3	16.30	27.39	0.0000	3.114	決定係数	0.5776
距離 1	15.07	7.094	0.0089	5.656	重相関係数	0.7820
鉄筋段数	5.741	5.273	0.0235	2.500		
打込み高さ	0.03542	3.303	0.0718	0.01949		
スランプ値	0.7727	2.202	0.1406	0.5207		
定数項	-38.21	21.16	0.0000	8.308		

表-6 柱供試体全体の回帰分析結果

変数名	偏回帰係数	F 値	P 値	標準誤差	精度	
場所 2	19.51	78.52	0.0000	3.088	決定係数	0.6547
距離 1	20.07	44.93	0.0000	2.993	修正済	
場所 1	19.39	39.43	0.0000	3.087	決定係数	0.6280
場所 3	13.52	37.23	0.0000	2.216	重相関係数	0.8091
スランプ値	0.6926	3.999	0.0477	0.3465		
供試体高さ	-0.06406	2.347	0.1280	0.04181		
鉄筋間隔	0.4880	2.096	0.1501	0.3370		
定数項	-18.20	3.065	0.0824	10.39		

$$R_s = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} (1-R^2) \quad (3)$$

ここに、 $n$ ; サンプル数、 $p$ ; 説明変数の数、 $R$ ; 重相関係数である。

### (3) 重回帰分析の結果

#### a) 梁供試体全体の解析結果

以上の方法を用いて、供試体別に重回帰分析を行った。回帰結果を表-5 に示す。初めに梁供試体に関して議論を進める。修正済み決定係数は 0.5776 であり、供試体全体の空隙率変動の約 58% は、説明変数によって説明できることを示している。目的変数に与える説明変数の影響度を示す F 値を見ると、各要因ごとに以下の通りまとめられる。

##### ・表面距離

試験体の表面からの距離を示す本変数に関して、距離 1 の F 値のみが選択され、他のダミー変数は排除されている。すなわち表面からの距離が 0-1cm の箇所における材料の品質が最も所定の配合から乖離していること、一方、内部の空隙率変化には有意な変化が無いと言う事を意味している。

##### ・コア抜き場所

ダミー変数である場所 1, 2 の F 値が相対的に大きく、また場所 3 の F 値は半分程度の値を示した。これは供試体上面と側面上部における空隙率変化は他の場所に比べて大きく、これらの場所ではブリージング水の浮上

及び骨材の沈下によってペースト率、水セメント比が大きくなっているためと考えられる。また側面上部が上面よりも、数% F 値が大きく算定された理由は、型枠側面に沿って移動するブリージング水の成分が卓越するためであると推察される。一方、側面上部と中部を比較した際、側面中部においては、材料分離の程度が小さいことが示されている。すなわち、側面中部の表面付近では空隙変動が大きいのが、同時に骨材の沈下の影響によりペースト率が低下し、型枠表面付近のブリージング水の影響を打ち消す方向で働き始めていることを表していると思われる。以上より巨視的に見れば、ブリージング水が型枠表面を通じて上昇し、供試体中部においては骨材が下方向に沈下する影響も現れるという現象を、従来の研究<sup>9),10)</sup>通り、本解析は示している。

##### ・鉄筋段数

表面距離、コア抜き場所に次いで影響度の大きな要因が、鉄筋段数である。その偏回帰係数が正であることから、骨材の移動にとって鉄筋が障害となることで、空隙率が增大することを示唆している。

##### ・スランプ値、打込み高さ

両者の F 値は 2-3 程度であり、他の因子と比較して回帰式に与える影響は大きくない。ただし、それぞれの偏回帰係数の符号から、スランプが大きく、打込み高さが増すことにより、材料不均一性が高まる事を示している。ここで、粗い議論を許容するとすれば、偏回帰係数の比較から、打込み高さが 100cm 高くなることと、スランプが 5cm 大きくなる事は材料分離に対して同程度の影響を

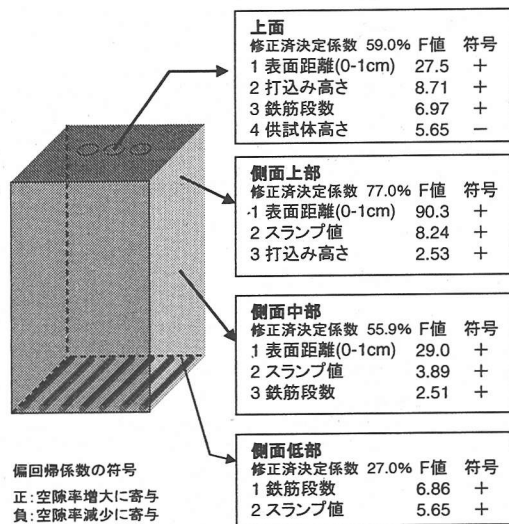


図-8 場所毎の回帰分析結果(梁供試体)

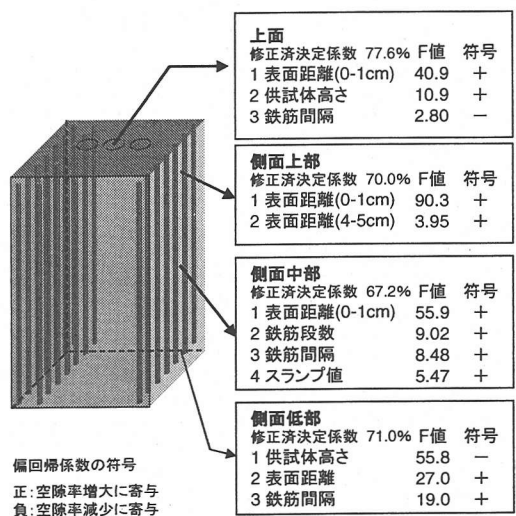


図-9 場所毎の回帰分析結果(柱供試体)

与えるということになる。

以上、実験回帰式により得られた結果は、過去から指摘されている材料分離に関する傾向を示すに留まり、特に新たな定性的知見は無い。しかしながら、材料分離に与える各種要因の相対的な影響度を定量的に示すことに成功した。

#### b) 柱供試体全体の解析結果

次に、柱供試体に対する重回帰分析の結果を考察する。結果は表-6に示す。本解析によって得られた修正済決定係数は、0.6280である。前小節同様、説明変数毎に議論をまとめる。

##### ・表面距離、コア抜き場所

梁の場合と同様に、表面距離及びコア抜き場所に関する要因が材料分離に与える影響は大きい。また各説明変数の相対的な寄与度から判断して、梁と同様に、骨材が下方方向に沈下し、ブリージング水は型枠表面を伝わって上昇するという現象が生じていることを示唆している。梁供試体との明確な差異として、最も表層の部位における空隙率が高く、コア抜き場所を表す変数のF値、及び偏回帰係数は、梁供試体の結果よりも小さい値を示している。この結果は、型枠近傍の鉄筋の存在によって、骨材の水平方向の移動が緩慢になり、ペース率が上昇している現象を表していると判断される。

##### ・供試体高さ

定量的データの中でF値が最も大きい。これは他の定量的データに比べて供試体高さが空隙率変化に最も大きな影響を与える事を意味する。また、偏回帰係数が負ということは、供試体が高くなればなるほど、空隙率変化が小さくなる、すなわち材料分離が起きにくくなることを意味する。この結果は、底部において供試体高さが増

加するほど圧密作用を受け、空隙率が低下する現象に起因するものと考えられる。この点に関しては、次節におけるコア抜き場所ごとの重回帰分析で考察を行う。

##### ・鉄筋間隔

直感的には、鉄筋間隔が狭いと骨材の閉塞が生じ、かぶり部のペース率が上昇することで空隙率が增大すると予想される。しかしながら得られた結果から、本説明変数の偏回帰係数は正となり、鉄筋間隔が増大するほど空隙率が増加するという傾向を示した。その理由は、以下の様に解釈される。柱供試体の測定点においては、鉛直方向に配置された鉄筋は、骨材の水平方向の移動に対してのみ障害となる。この移動自体は、例えば打込み時に生じる鉛直方向の骨材移動と比較し、準静的に進行するものであるため、本実験で対象となる鉄筋間の骨材閉塞は発生しにくいものと考えられる。また、本設定条件における、最大粗骨材寸法と比較し鉄筋間隔が十分大きい範囲では、骨材水平移動が緩慢になることによるペース率の増加よりも、むしろ間隔が広がったことで型枠表面に向かって移動するブリージング水の移動面積が広がる影響の方が卓越するため、結果として偏回帰係数が正になったものと考えられる。

柱についても、梁同様、定量的に、材料分離の現象を適切に表現した回帰式が得られた。

#### c) 供試体部位毎の分析

以上より、供試体毎の重回帰分析によって、材料分離の挙動を表現する回帰式が得られた。しかしながら、それぞれの供試体について、コア抜き場所を区別せず重回帰分析を行うことは、場所毎の各説明変数の材料分離に対する影響度が同一とは考えられないことから、厳密な取り扱いとはいえない。例えば、梁供試体におい



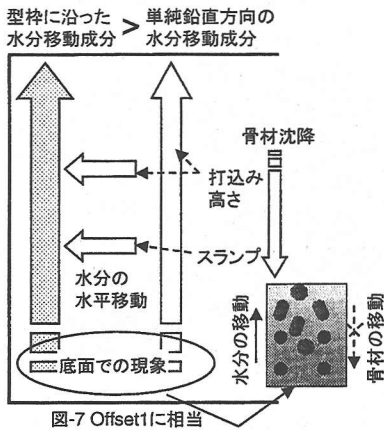


図-10 梁供試体における材料分離の模式図

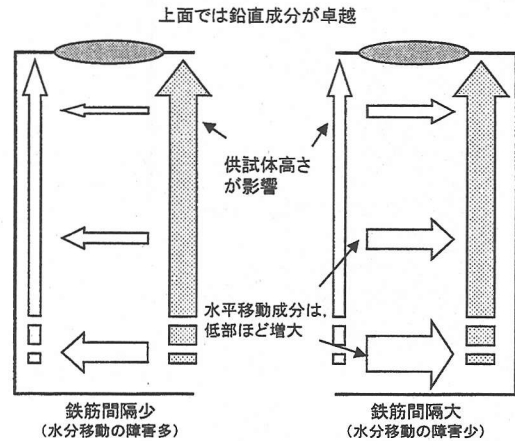


図-11 柱供試体における材料分離の模式図

て、鉄筋配置されている底面と、まったく鉄筋の配置されていない他の部分とで、鉄筋段数の影響は異なると予想される。また供試体高さの影響は、上部においては材料分離を促進させる一方で、低部では圧密作用によって空隙率は減少させる。そこで、この節では、さらに梁・柱供試体における各コア抜き場所毎の重回帰分析を行い、場所毎の材料分離挙動と影響因子に関して詳細に見ていくことにする。

供試体上面、側面上部、側面中部、及び側面底部から採取した試験体毎に区分し、個々に統計処理を行った結果を図-8(梁供試体)、及び図-9(柱供試体)に示す。図中には、各分析から得られた修正済決定係数、影響度の高い説明変数とF値、及びその偏回帰係数の符号を示している。ここで、符号が正の場合、空隙率の増大に影響を及ぼす変数、負の場合は空隙率を減少させるパラメータであることを意味する。

始めに、梁供試体に関して考察を行う。側面底部に関しては、修正済決定係数は0.27と、有意な回帰式は得られなかった。その理由としては、前述の図-7で示した通り、水平方向に配置された鉄筋の存在による、鉄筋間の骨材閉塞に起因するペーストマトリックスの減少と、水の鉛直移動によってもたらされる水結合材比増大の両者の効果が打ち消しあい、空隙率のみでは側面底部の材料分離現象を評価できなかったものと推察される。他の3箇所に関しては、決定係数の値から現象を分析することが出来ると考えられる。従って、供試体上面、側面上部及び側面中部に関して議論を進める。

全ての箇所において、型枠表面から0.1cmの範囲にあるコンクリートの空隙率変動が最も大きいという結果を得た。表面からの距離に関する他のパラメータが、変数選択から排除されていることより、表層におけるコンクリートの品質が、特に配合から乖離していることを示して

いる。また、部位毎に表面距離(0-1cm)の影響の度合いを見てみると、側面上部のF値は、上面及び側面中部の3倍強の値を示している。この結果は、供試体上面付近において比較すると、型枠表面に近い部位に、ブリージング水がより集まっている結果であると推測される。すなわち、ブリージング水は水平方向に移動し、その後型枠表面を伝わって上昇するものと、そのまま鉛直上昇するといった形態を取るものと考えられるが、分析結果より、型枠表面を伝わる成分が卓越している事を明確に示している。

また、供試体上部においては、打込み高さの影響が大きく、打込み高さが高い条件下ほど、材料分離の程度は大きくなる。材料に関する説明変数であるスランプ値の影響は、主として側面上部及び中部で見られ、ブリージング水の水平方向の移動に影響を及ぼすことを示した。鉄筋段数に関しては、上面及び中部において影響因子として抽出され、側面中部では排除された。その原因を本実験のみで推察することは困難であるが、下部に配置された鉄筋の存在により発生する材料分離が、上部にまで影響を及ぼすことを示唆している。また、上面における供試体高さの偏回帰係数の符号は負になった。この結果は、供試体高さが増加するに従い、上面の空隙率は逆に減少することを示している。上面でのブリージング水の発生は、供試体が高くなるにつれ、中間層における水の上昇と骨材の沈下現象の相互作用によって緩衝されることも考えられる。しかしながら、本実験で得られた様な空隙率が低下するという現象をもたらすか否かは、明確に結論付けられない。この点に関しては、本実験データのみでは、適当な結果が得られなかった。以上の場所毎の重回帰分析で得られた結果を、柱全体の分析結果ともあわせ、図-10に模式図として示す。

続いて、柱供試体に関して考察を行う。ここでの重回

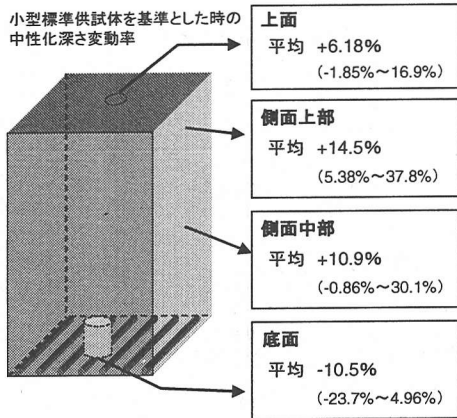


図-12 場所毎の中性化深さ変動率(梁供試体)

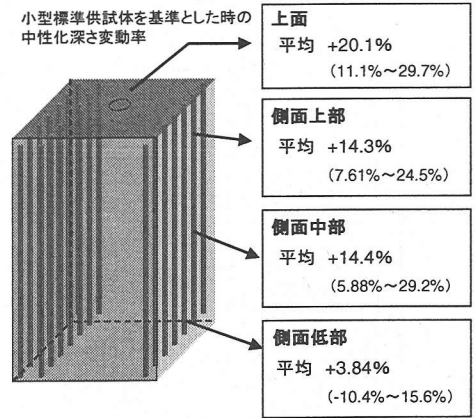


図-13 場所毎の中性化深さ変動率(柱供試体)

帰分析では、全ての部位において、修正済決定係数 0.67-0.78 と、相関性の高い回帰式が得られた。上面、側面上部及び側面中部において、梁同様、表面距離 (0-1cm) に関する説明変数が、最も空隙率差分に影響を及ぼすパラメータとなった。また、場所に関しても梁供試体同様、側面上部における F 値が相対的に高い値を示しており、単純に鉛直方向に上昇するブリージング水と共に、水平方向の移動の後、型枠を伝わって上昇する成分の寄与が大きいことも認められた。

側面底部においては、供試体高さが最も F 値の大きい変数となっている。すなわち、符号が負ということから、供試体高さが高くなるほど底部においては圧密作用が顕著になり、空隙率を低減する作用として働いている。一方、供試体上面においては、供試体高さが大きくなるに従い、下部に存在するブリージング水の総量が増加するため、空隙率が増大する傾向にある。また、側面上部を除く全ての領域において、鉄筋間隔が材料分離に影響を及ぼす要因として抽出されている。その符号は底面及び側面中部において正であり、上面において負を示す。ここで得られた結果は次の様に解釈される。圧密作用を受ける供試体底部、及び側面中部においては、型枠方向に向かう水平方向の水分移動が生ずる。鉄筋間隔が大きい、すなわち水平方向の水分移動に対して障害となる垂直主鉄筋が少ない場合には、かぶり部分の空隙率は増大する。底面及び側面中部における、鉄筋間隔の F 値を比較すると、低部は大きな値を示しているが、圧密作用により底面における水平方向の移動成分が、より多い事を間接的に示していると考えられる。一方、上面においては、鉄筋間隔の符号は負となっているが、これは鉄筋が減少することによって、垂直方向の水分移動が減少するためと推測される。

以上の議論は、準静的に生じる水平方向の骨材及び水の移動という条件、及び本実験の設定条件である鉄

筋最小あきが 50mm という範囲に限定されるものである。打込み時に生じる鉛直方向の動的な骨材移動、また骨材閉塞が容易に生じる様な条件下での材料分離の傾向と鉄筋間隔の関係は、別途議論する必要があると認識している。図-11 に、柱供試体に生じる材料分離を模式図として示す。

本節での解析結果より、梁・柱供試体それぞれに関して、材料分離の現象と各要因の相対影響度に関する定量的な知見と、各場所で変動する空隙率を表現する回帰式が得られた。

#### 4. 促進中性化試験

##### (1) 概要

今までの議論では、空隙率を指標として、構造部材中に達成される品質変動の定量化を試みた。本章では、より直接、構造物の耐久性能を測る例として、構造体から抜き取ったコア抜き供試体に促進中性化試験を施し、各部位で異なると予想される中性化進行の度合いを定量化する。

##### (2) 実験結果

コア抜き供試体の促進中性化試験結果は、各バッチ毎採取した  $\phi 10 \times 20$  [cm] の小型円筒供試体を基準とした際の、中性化深さ変動率として整理を行った。図-12、及び図-13 に、梁及び柱供試体の実験結果を示す。図中には、場所毎の平均値、及び構造細目・施工・材料の要因により変化する中性化深さの変動範囲が示されている。梁・柱供試体共に、底面及び側面低部においては圧密の影響を受け、中性化速度は小型供試体とほぼ同等、あるいは低下する傾向が示されている。しかしながら、他の部位においては、設定条件によって変動

表-7 中性化促進試験の重回帰分析結果

梁供試体 修正済決定係数：0.7499			柱供試体 修正済決定係数：0.6547		
変数	偏回帰係数	F 値	変数	偏回帰係数	F 値
場所 2	25.35	67.53	場所 2	21.45	27.43
場所 1	18.18	34.73	場所 3	17.80	19.27
場所 3	16.94	28.82	場所 1	21.21	18.31
スランプ値	3.082	27.94	スランプ値	3.006	12.10
定数項	-51.06	59.28	定数項	-25.92	2.423

幅があるものの、設計配合を有するコンクリートに比べて、最大で 30%ほど中性化速度が早まる結果が得られた。この事は、実構造物の中性化現象が小型供試体と比較して速やかに生じるため、設計段階において実構造物中のコンクリートの品質低下を表現する必要があり、その安全余裕として 1.3 程度の数値を見込む必要があることを示唆している。

本試験条件で進行した中性化深さは、全ての供試体において、表面から 1cm 程度の範囲に留まっている。従って、特に所定配合からの乖離が激しい部分での比較であるため、中長期間での中性化深さは、小型供試体と構造物の差異は縮まる可能性がある。しかしながら、鉄筋純かぶりが十分に確保されていない構造物の場合、表層部分の品質は低下しているため、配合から推定される速度以上に中性化が進行することが予想される。

ここでは、耐久性能に関わる現象として促進中性化試験のみを行った。耐久性を損なう他の要因である塩化物イオンの進入、及び内部の鋼材腐食等の現象は別途検討する必要があるが、材料内部の物質移動が主要因であるこれらの現象も、同様の傾向が見られると予想される。

以上から、構造物中に達成される材料品質の不均一性により、中性化現象が大きく影響されることが明らかになった。次小節以降、各影響要因の詳細な分析を行う。

### (3) 中性化速度に与える要因分析

促進中性化試験で得られた実験結果を用いて、重回帰分析を行うことにより、各要因の影響度の定量化を行う。回帰分析結果を表-7 に示す。重回帰分析方法と、有効説明変数の選択方法は、前章と全く同一である。梁及び柱供試体毎の分析結果に対する修正済み決定係数は、0.8009、0.6547 となった。柱・梁供試体ともに、場所及びスランプ値に関する説明変数が選択され、これらの要因の影響が大きいことが分かる。偏回帰係数の大小で比較すると、梁・柱供試体ともに、側面上部、上面、側面中部の順に中性化深さの変動率が增大することになる。なお前述の測定空隙率による分析においても、全く同じ傾向で標準配合との乖離が生じており、空隙率

による材料分離評価試験、及び促進中性化試験の両者の実験結果は矛盾しないものとなった。例えば、梁供試体においては、所定配合を有する標準供試体と比較し、側面上部で 25%、上面で 18%、中部において 17%、中性化深さが増大するという結果が得られた。同時に、スランプ値の大小が大きく影響を及ぼす結果となっている。偏回帰係数の値は、スランプが 1cm 増えることで、中性化速度は 3%増加するということを意味している。

## 5. 重回帰分析を用いた耐久性指数の算定

### (1) 概要

コンクリート構造物の耐久性を明示的に考慮した体系的な設計手法の先駆けとして、1989 年に土木学会より「コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)」が、また 1995 年には、それを改定した「コンクリート構造物の耐久設計指針(案)」が出版されている。ここでは、耐久性に影響を及ぼす要因を、設計・材料・施工の各分野別に細かく分類して、各々を定量的に評価した耐久性ポイントの総合点として耐久性指数  $T_p$  を算定し、構造物の耐久性能を総合的かつ定量的に把握することを目指している。耐久性指数  $T_p$  が、環境条件及び要求されるメンテナンスフリーの期間を考慮して求められる環境指数  $S_p$  以上であることを確認することで、コンクリート構造物の耐久性照査に代えるというものである。一方、本論文で議論した重回帰分析も同様に、構造細目・材料・施工の要因を変化させた実験供試体の実測値をもとに、各々の影響を定量評価するに至った。そこで、本章では、耐久設計指針で設定されている算定評価式と、本実験結果から得られる重回帰式の両者を比較検討する。

第 3 章で導出した重回帰式は、空隙率差分率を各影響因子の線形和として表現するものであるため、耐久性指数と直接比較することはできない。そこで空隙率差分率から、供試体毎の配合を簡易的に算定し、得られた等価な水セメント比に対して重回帰分析を行う。これにより、各々の影響因子がもたらす、打設後の水セメント比の増減分が定量評価される。一方、耐久設計指針で算

定される耐久性指数は基本的には無次元量であるが、後述する適当な変換を用いることで、各影響因子が変化した際の、水セメント比の変動相当分が求められる。以上の取り扱いによって、両者の比較が水セメント比という同一の指標で可能となる。

## (2) 測定空隙率を用いた水セメント比の簡易算定手法

実験で得た供試体測定値は、比重と空隙率である。著者らは、この両者を用いて、配合上の未知数である単位体積あたりの空気量、セメント量、水量、及び骨材量の算定を当初試みた。しかしながら、配合算定値に与える比重増減の感度が非常に大きく(比重が±0.01変動することによる算定水セメント比は25%~45%の変動、実験値における比重測定誤差は約1gに相当する。)、測定された比重と空隙率の両者から配合を推定する方法は困難であると判断し、空隙率のみを用いて配合を算定する簡易手法を用いることとした。

実験で得られた空隙率 $\phi$ は、次式(3)で表現される。

$$\phi = A + \frac{\rho_g \cdot P_w}{1 + p_w} G + \phi_{cp} (W + C) \quad (3)$$

ここで、 $A$ ；空気量[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]、 $G$ ；骨材体積[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]、 $W$ ；水体積、 $C$ ；セメント体積[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]、 $\rho_g$ ；骨材の表乾密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $p_w$ ；骨材の吸水率、 $\phi_{cp}$ ；セメントペーストの空隙率である。式(3)右辺第2項は、絶乾に伴い排出される骨材からの水分を示している。また、セメントペーストの空隙率は、熱力学連成解析手法<sup>20)</sup>により、実験条件と全く同一の供試体形状・寸法、及び環境条件を与え算出することにした。解析に用いた要素形状、及び結果を図-14に示す。解析結果を用いて、水セメント比の増減に伴い変化するセメントペースト単位体積あたりの空隙率に関して、以下の関数を用いることとした。

$$\phi_{cp} = a + b \ln \left( \frac{\rho_w \cdot W}{\rho_c \cdot C} \right) \quad (4)$$

$$a = 0.6128, b = 0.3042$$

ここで、 $\rho_c$ ；セメントの密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho_w$ ；水の密度[kg/m<sup>3</sup>]である。最後に、水、セメント、骨材及び空気量の体積和に要求される関係から

$$A + G + W + C = 1.0 \quad (5)$$

が得られる。

以上から、 $A$ 、 $G$ 、 $W$ 、 $C$ に関する関係式が2つ導出された。しかし、これでは未知数が4個であるため、解が不定となる。ここで、空気量体積 $A$ 及び骨材体積 $G$ を既知として与え、所定配合から変動しないという仮定を設けることとした。この処置は、構造物中に達成されるコンクリートの空気量及び骨材量が、構造細目・材料・施工の影響を受けることなしに均一であるということ仮定するも

セメントペースト 単位体積あたりの空隙率

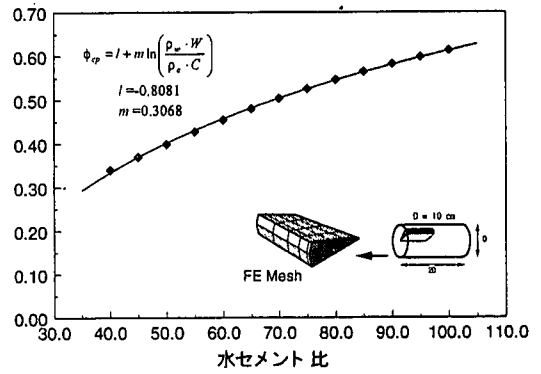


図-14 熱力学連成システム<sup>20)</sup>によるペーストマトリックスの空隙率評価式

のである。例えば、骨材の分離が甚だしく、ペースト量の変動が大きい場合といった際には、本算定手法は正しい解を与えない。本来ならば、硬化したコンクリートの水セメント比及び骨材率を、化学的手法等を用いて直接測定するといった手段が適切ではあるが、本研究では第一次近似として、最も変動幅の大きいと予想される水とセメントの分離を考慮することで、水セメント比を簡易的に算定することにした。この仮定によれば、式(3)よりセメントペースト単位体積あたりの空隙率が、水セメント比の算定に支配的な要因となる。このとき、算定精度は、図-14の空隙率評価式に依存することとなるが、種々の実験を通した過去の検証<sup>20)</sup>から鑑みても、該当条件下における水セメント比と空隙率の関係は、十分な精度を有すると考えられる。

実験に用いたシリンダー標準供試体の測定空隙率を例に、算定手法の妥当性を確かめた(表-8)。示されるとおり、±2%程度の精度で、水セメント比が算定されている。

## (3) 耐久性指数の算定

前小節での手法をもとに算定された、供試体場所毎の水セメント比に対して、新たに重回帰分析を行うと、一般に以下の式で表される重回帰式が得られる。

$$W/C = \sum_{i=1}^n a_i X_i, \quad \frac{\partial (W/C)}{\partial X_i} = a_i \quad (6)$$

ここで、 $X_i$ ；説明変数、 $a_i$ ；偏回帰係数である。式の通り、偏回帰係数の意味するところは、各要因単位量あたり得水セメント比の増減分である。耐久設計指針<sup>3)</sup>における耐久性指数 $T_p$ との関連を直接比較するため、以下の式に従って重回帰分析における偏回帰係数に相当する値を求める。

表-8 小型標準供試体の水セメント比の算定

実験シリーズ	1	2	3	4	5	6	7
平均空隙率	0.1848	0.1843	0.1837	0.1655	0.1652	0.1689	0.1734
空気量	5.7%	5.8%	5.5%	3.0%	4.2%	3.6%	4.2%
算定水セメント比	0.584	0.570	0.585	0.611	0.598	0.601	0.593
算定誤差	-0.005	-0.019	-0.004	0.022	0.009	0.012	0.004

表-9 実験より得られた影響因子単位変化量あたりの水セメント比の変動分

	供試体高さ	打込み高さ	スランブ値	鉄筋間隔	鉄筋段数
	50, 100, 200	30, 150	12, 18	5, 10	1, 2
単位	cm	cm	cm	cm	段
梁上面	-0.216	0.0633	-	-	2.69
梁側面上部	-	0.0783	2.45	-	-
梁側面中部	-	-	2.23	-	10.1
柱上面	0.0597	-	-	-0.540	-
柱側面上部	-	-	-	-	-
柱側面中部	-	-	0.696	1.21	8.47
柱側面下部	-0.165	-	-	1.49	-

表-10 耐久設計指針による影響因子単位変化量あたりの水セメント比の変動分

	供試体高さ	打込み高さ	スランブ値	鉄筋間隔	鉄筋段数
	50, 100, 200	30, 150	12, 18	5, 10	1, 2
単位	cm	cm	cm	cm	段
梁上面	0.006~0.009	0.02	-0.17~-0.15	-	3.51
梁側面上部	0.006~0.009	0.02	-0.17~-0.15	-	3.51
梁側面中部	0.006~0.009	0.02	-0.17~-0.15	-	3.51
柱上面	0.012~0.018	0.02	-0.27~-0.17	-0.85~-1.2	1.76~3.51
柱側面上部	0.012~0.018	0.02	-0.27~-0.17	-0.85~-1.2	1.76~3.51
柱側面中部	0.012~0.018	0.02	-0.27~-0.17	-0.85~-1.2	1.76~3.51
柱側面下部	0.012~0.018	0.02	-0.27~-0.17	-0.85~-1.2	1.76~3.51

$$\frac{\partial(w/c)}{\partial x_i} = \frac{\partial T_p}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial(w/c)}{\partial T_p} \quad (7)$$

この両者から、技術者の感覚で設定された指数  $T_p$  と、本実験の測定結果を定量的に比較検証した。

土木学会耐久設計指針<sup>3)</sup>の中で示されている耐久指数に関連するうち、本実験シリーズで変動させた要因に関連する項目は以下のものが列挙される。

・材料・構造細目に関連するもの<sup>3)</sup>

充てん性(流動性)

$$2(E_{10} - 10) + E_{11}(1 - E_{10}/30) \\ E_{11} = (10 - 8/A_{21}) + (5 - F_{32}^2) + A_{22} \quad (8)$$

ここで、 $E_{10}$ :スランブ[cm]、 $E_{11}$ :コンクリートの充てん性に及ぼす部材の形状・寸法の影響を考慮する係数、 $A_{21}$ :部材の最小横寸法[m]、 $F_{32}$ :コンクリートの打込み1リフトの高さ[m]、 $A_{22}$ :高さ方向の断面寸法の変化を考慮する定

数である。

充てん性(材料分離抵抗性)<sup>3)</sup>

$$5 - E_{12}(E_{10})^2 \quad (9)$$

ここで、 $E_{12}$ :材料分離抵抗性を考慮する係数である。

・施工に関するもの<sup>3)</sup>

打込み

$$2(1.5 - F_{33}) \quad (10)$$

ここで、 $F_{33}$ :コンクリートの自由落下高さ[m]である。

・構造細目に関するもの<sup>3)</sup>

補強材の段数およびあき

$$15(1 - \sqrt{2A_{50}/A_{51}}) \quad (11)$$

ここで、 $A_{50}$ :補強材の段数、 $A_{51}$ :補強材の水平あき/粗骨材の最大寸法である。

式(7)を用いる場合、水セメント比の変動による耐久性

指数  $T_p$  の感度を求める必要があるが、これは以下の堅硬性を示す指標から導出できる。

$$55 - E_2 \quad (12)$$

ここで、 $E_2$ ；水セメント比(%)であり、

$$\frac{\partial(W/C)}{\partial T_p} = -1.0 \quad (13)$$

となる。

重回帰分析及び耐久設計指針による算定結果を表 9、表 10 にまとめる。全体的に概観すると、両者の数値の次数はほぼ一致しており、極めて注目に値する。すなわち、実証データの殆ど揃っていない 1980 年後半において、耐久性試案及び指針の策定に加わった技術者の経験と工学センスに専ら依存して決定された耐久性指数の妥当性が、ほぼ定量的に示される結果となった。

ただし、耐久性指数<sup>3)</sup>では構造物高さ方向の影響因子の変化を表現していないが、本重回帰分析は、構造物の各場所で支配的な要素が変化の様子を表現可能であり、かつ各要素の相互依存性を完全に考慮したものとなっている。また、影響要因のうち、両者の符合が逆となり、定性的な傾向も一致していないものも見られる。例えばスランブ値に関しては、耐久性指針において本供試体の構造細目を適用した場合、スランブが増加することによる流動性の増大が材料分離抵抗性の減少に勝ることにより、その符号は負、すなわち分離は抑えられるという結果になる。一方、本実験結果においては、スランブ値が大きくなることで、水平方向の水分移動が卓越し、材料分離を引き起こす因子として明確に抽出された。また鉄筋間隔に関しては、実験において設定した鉄筋間隔及び骨材寸法では、鉄筋間隔が増加するほど、第 3 章の議論と同様、材料分離は増加するという傾向になった。この点に関しては条件を多様に変化させた実験を行い、現象をより詳細に観察する必要がある。

以上の比較から、本重回帰分析の応用例と、耐久性指数の妥当性を示すことができた。本研究で示した方法論によって、構造部位毎に異なり、各因子の相互依存を有する材料分離の傾向を明確に示す形で、既存の耐久設計の精度向上にも適用可能であることを示した。ただし前述の通り、用いた簡易算定手法は、最も変動の大きいと考えられる水とセメントの分離のみを考慮したものである。今後、骨材の分離と、それによってもたらされるセメントペースト体積変動を含めた配合推定を行うことで、耐久設計算定式の精度をより高めていく検討が必要不可欠であると認識している。

## 6. まとめ

本研究では、実構造物中に達成されるコンクリート材料品質の空間的不均一性の定量化を目的とし、構造諸元、施工法、及び材料を系統立てて変化させた梁・柱供試体を作製した。コンクリート材料の品質を表す一指標として、場所毎に空隙率を測定し、統計的な処理を行うことで、構造体内部で生じる材料分離の機構の解明と、各要因の相対影響度を定量化することが出来た。また、促進中性化試験から、理想配合を有するコンクリートと比較し、部位により 30% 程度中性化進行速度が速まり、一般の生コンクリートを用いる場合、十分な締固めを行ったとしても、小型供試体と構造物の品質の差異を表現する安全余裕は、1.3 程度の数値を見込まざるを得ないことが判明した。さらに、提案した簡易配合推定法と統計処理により、耐久設計指針の比較が可能になった。大枠では、両者から算定される指数の次数は同一となり、設定される耐久性照査式の妥当性が示されるとともに、本研究の方法論を用いることで、既存の耐久設計の精度向上に貢献できることが明らかになった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、有意義な御示唆を頂いた岡村甫教授(高知工科大学)及び國島正彦教授(東京大学)に深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1991.
- 2) 岡村甫 編: 自己充填ハイパフォーマンスコンクリート -黎明期から実用化へ向けた挑戦の記録-, 社会システム研究所, 1999.
- 3) 土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針(案), コンクリートライブラリー, 第 82 号, 1995.
- 4) 和泉意登志, 嵩英雄, 友澤史紀, 福士勲: 鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計による耐久性向上技術の提案, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.185-188, 1984.
- 5) 伊藤正義, 井野智, 杉野目章, 植松武是: 最近の建築現場における鉄筋コンクリート工事の施工精度に関する調査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.1277-1282, 1994.
- 6) 浜田秀則, 原茂雅光, 大即信明: コンクリートの各種打継目の耐海水性に関する材令 10 年試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.339-344.
- 7) 氏家勲, 菊池一義, 佐藤良一, 長瀬重義: 新旧コンクリートの打継目の透気性状に影響を及ぼす要因に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.747-752, 1995.

- 8) Powers, T. C.: The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons Inc., 1968.
- 9) 神田衛, 吉田八郎: コンクリート打込み後の柱断面における水セメント比の分布性状, セメント・コンクリート, No.342, pp.27-32, 1975.
- 10) 神田衛, 吉田八郎: コンクリート打込み後の部材断面における水セメント比の分布性状, セメント・コンクリート, No.357, pp.38-43, 1976.
- 11) 笠井芳夫, 長野基司, 佐藤孝一, 菅一雅: 表層部コンクリートの品質判定に関する研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.11, No.1, pp.177-182, 1989.
- 12) 川村満紀, 鳥居和之, 笹谷輝彦: コンクリート表層部の性質に及ぼす養生の影響, 第44回土木学会年次学術講演会概要集第5部, pp.646-647, 1989.
- 13) 鄭載東, 平井和喜, 三橋博三: 有孔型枠を用いたモルタル表層部の微細構造変化と中性化遅延効果, コンクリート工学論文集, 第1巻第1号, pp.75-83, 1990.
- 14) 曾根真理, 國島正彦: 部材表面部コンクリートの密実さに及ぼす影響要因, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.377-382, 1990.
- 15) 國島正彦, 小澤一雅, 山中克夫: 構造細目とワーカビリティの異なる部材の耐久性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.493-498, 1989.
- 16) 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, 東京大学博士論文, 1988.
- 17) 立松和彦, 石原誠一郎: 透水性型枠によるコンクリートの細孔構造の変化と耐久性の向上, コンクリート工学論文集, 第8巻第1号, 1997.
- 18) 実施コンクリート構造物の評価手法に関する検討 WG: 実施コンクリート構造物の評価手法に関する検討, コンクリートライブラリ 68, pp.57-64, 1991.
- 19) 尼崎省二, 葛目和宏, 宮川豊章: 各種非破壊試験法によるコンクリート部材の欠陥評価の適用性に関する基礎的検討, コンクリート工学論文集, 第5巻第1号, pp.15-22, 1994.
- 20) Maekawa, K., Chaube, R.P. and Kishi, T.: Modelling of concrete performance, E&FN SPON, 1999.

(2000.3.16 受付)

## QUANTITATIVE EVALUATION OF NON-UNIFORM QUALITY OF CONCRETE IN RC MEMBERS

Tetsuya ISHIDA, Tomoharu KATO, Sou NINOMIYA and Koichi MAEKAWA,

The objective of this study is to evaluate non-uniform quality of materials achieved in RC structures. In order to quantify the influences of structural size, reinforcement arrangement, slump value, and construction methods on the segregation, RC column and beam were made. As a material parameter showing the segregation, porosity of core specimens picked up from structures were measured. By using multiple regression analysis, the authors proposed a simple method that can evaluate the influence of each factor on the segregation and can give the non-uniform quality of materials achieved in RC structures. For applying the obtained test results to the evaluation of long-term durability performance, accelerated carbonation test and comparison the test results with durability index proposed by JSCE were also examined. From these studies, it was shown that the proposed method can be used for the quantitative evaluation of material qualities in RC structures and durability performances.