

論文 フレッシュモルタルの空隙性状の測定方法に関する基礎的研究

坂井映二^{*1}・三上貴正^{*2}・高橋哲也^{*3}

要旨：本研究は、フレッシュコンクリートの空気量や気泡径分布に代表される空隙性状を、現場において打設された状態で測定する方法を開発するための基礎的段階として、フレッシュモルタルについて測定方法の検討を行ったものである。まず、十分な検討がなされていなかった、光ファイバーを用いた気泡センサを応用した測定システムを設計・試作し、その有効性の検証実験を行った。その結果、空隙の存在以外に、調合要因等によりセンサ出力は変動することが判明したが、変動を修正・排除する方法を検討することにより、調合に関わらない空隙性状の測定が可能であることを示した。

キーワード：フレッシュモルタル、空気量、気泡径分布、気泡センサ、光ファイバー

1. 序論

コンクリート施工において、所要の空気量・気泡の分布状態の確保と型枠への充填の確認を容易に行えるようにすることは、コンクリートの多様化・高性能化や施工の自動化・信頼性向上の観点から重要と考えられる。現場における打設後のフレッシュコンクリートの空気量測定方法に関して、光ファイバーを気泡センサとして用いた方法がAnsariによって提案されているが[1, 2]、測定結果に及ぼす空隙以外の調合要因等の影響が検討されておらず、また、センサ出力の較正方法に不備な点がある。そこで、本研究では、現場での打設モルタル・コンクリートの空気量や気泡径分布に代表される空隙性状の測定方法を開発するための基礎的段階として、上記の気泡センサを応用した測定システムを設計・試作し、セメントペースト・モルタルを実験対象として本システムによる空気量測定および気泡径分布測定の有効性に関して検討することとした。なお、本研究の一部については平成7年度日本建築学会大会において報告した。[3]

2. 空隙性状測定システムの概要

設計・試作したシステムの構成を図1に、外観を写真1に、また、センサ先端部断面図を図2に示す。光源部から発した光は、光ファイバーを伝搬し、図3の例のように、センサ先端部が接する媒体により異なる光量で、ファイ

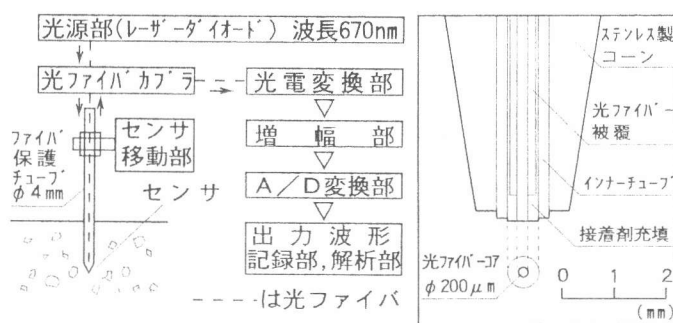


図1 空隙性状測定システムの構成 図2 センサ先端部断面図

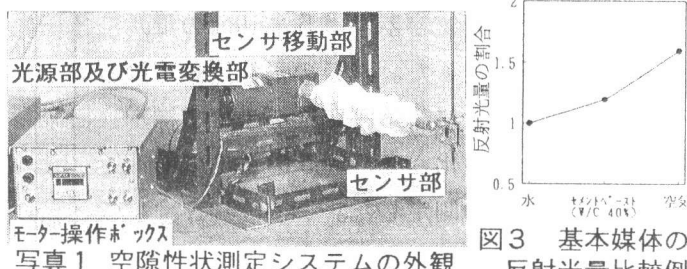


図3 基本媒体の反射光量比較例

写真1 空隙性状測定システムの外観

*1 東京工業大学助手 工学部建築学科、工修（正会員）

*2 東京工業大学助教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻、工博（正会員）

*3 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻

表1 試料の調合条件

使用セメント	普通ポルトランドセメント		
使用骨材	最大粒径1.2mmの山砂		
セメント砂比	1:2 (重量比)		
調合条件の組み合わせ	W/C (%)		
	3.0	4.0	5.0
混和剤	なし	○	△
起剤	AE剤	なし	なし
剤	起剤	○	△

○:セメントペースト △:モルタル

表2 測定条件

センサ移動速度	1.0mm/sec
測定時間	30sec
測定距離	30mm
測定深さ	20mm
サンプリング周波数	200Hz

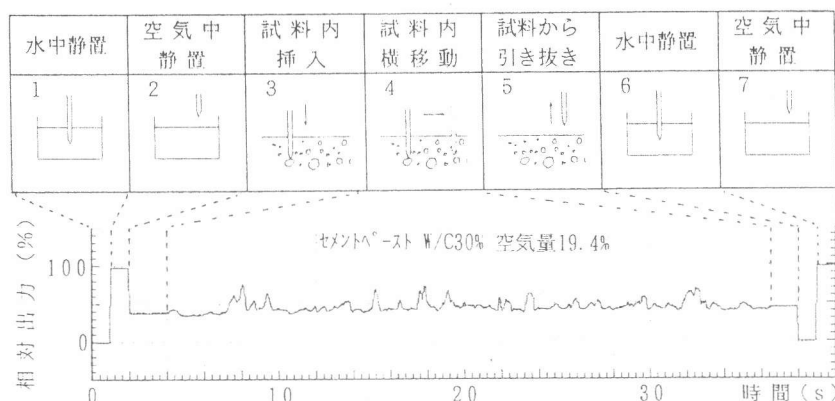


図4 測定手順および出力波形例

バー内部に反射する。本システムは、センサを一定速度でモルタル中を移動させることにより、センサ先端部が接する気泡の大きさと間隔の影響を受けた反射光量を測定するものである。

3. 空隙性状測定システムの基本的有効性の検証実験

3.1 実験概要

空隙・調合等の要因がセンサ出力に及ぼす影響の傾向をとらえ、測定方法としての基本的有効性を検討するため、表1に示す調合条件の試料に関し、表2の測定条件で測定を行った。空気量は混和剤量・混練時間の調節により0~20%の範囲で変化させた。また、気泡径分布も混和剤の種類により変化させた。本システムによる測定は、図4に示す手順で、1試料につき各5回行った。センサの出力値は、水中での出力値を0%、空気中での出力値を100%とする相対出力(%)で表した。図4の出力波形例の山の部分では、センサ先端が気泡に接しているものと考えられる。試料の空気量は、確認・比較のために本システムによる測定実験の直前に重量法により測定した。測定容器はφ5×10cmのモルタル用円柱型枠とした。試料の気泡径分布に関しても、センサによる測定後そのまま標準養生条件で十分硬化させ、図5のように断面画像解析法により測定した。

3.2 実験結果および考察

(1) 空気量とセンサ出力との関係の考察

a) 出力波形の空気量による変化: 図6にセメントペースト、モルタルに関しての気泡

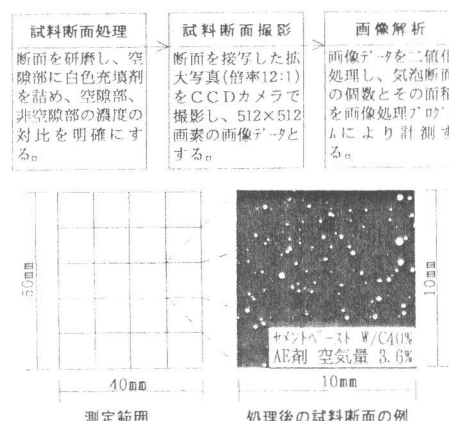


図5 断面画像解析法の概要

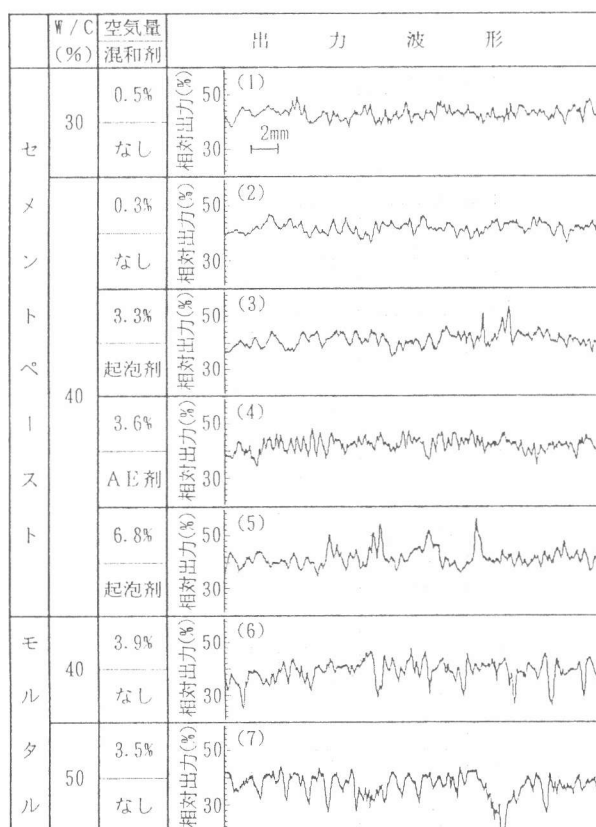


図6 出力波形の例

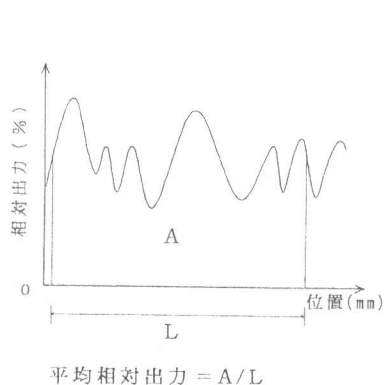


図7 平均相対出力

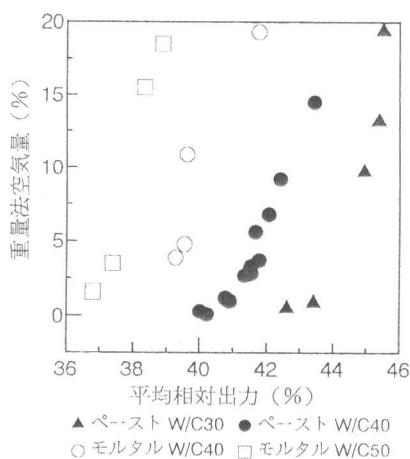


図8 空気量と平均相対出力の関係

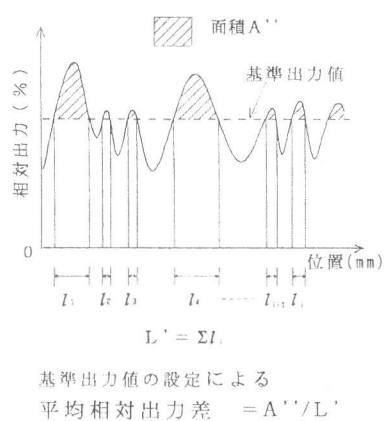


図9 平均相対出力差

センサの出力の例を示す。W/C40%のセメントペーストの例(2)～(5)を見ると、空気量が多くなるにつれ出力波形の山の高さが高くなることがわかる。また、起泡剤を用いた(3)に比べAE剤を用いた(4)は波形が細かく揃っており、混和剤の違いによっても出力波形に若干の違いがみられる。

しかし、空気量が0.5%, 0.3%であり気泡の少ないセメントペースト(1), (2)であっても、位置による出力値の変動が見られ、気泡以外の要因による出力の変動もあることがわかる。また、(2)よりW/Cの低い(1)は(2)に比べ出力が全体的に高く、モルタル(6), (7)では、同程度の空気量のセメントペースト(3), (4)に比べ出力の低い谷の区間が多くみられ、調合要因が出力に影響を及ぼすことが推察される。

b) 平均相対出力と空気量の関係：相対出力の単位区間あたりの積分値を平均相対出力(図7参照)として求め、重量法空気量との関係を図8に示す。図から、平均相対出力と空気量はペースト、モルタルごとに、またW/Cごとに分かれて、ほぼ比例関係にあることがわかる。したがって、既知の調合の場合には、平均相対出力により空気量を推定することが基本的に可能であるといえる。

c) 基準出力値の設定による平均相対出力差と空気量の関係：調合に関わらない空気量の推定のため、図9のように、基準出力値より高い出力波形の部分と基準出力値との差(相対出力差と呼ぶ)の平均値(平均相対出力差と呼ぶ)をとることを試みる。基準出力値は、各出力波形に対する調合要因の影響を反映する量とみなしたものであり、また、どの程度の出力値が適切かを検討するため、各出力波形の25%点, 50%点, 75%点の3水準を設定した。平均相対出力差と空気量との関係を図10に示す。図より、各基準値でペ

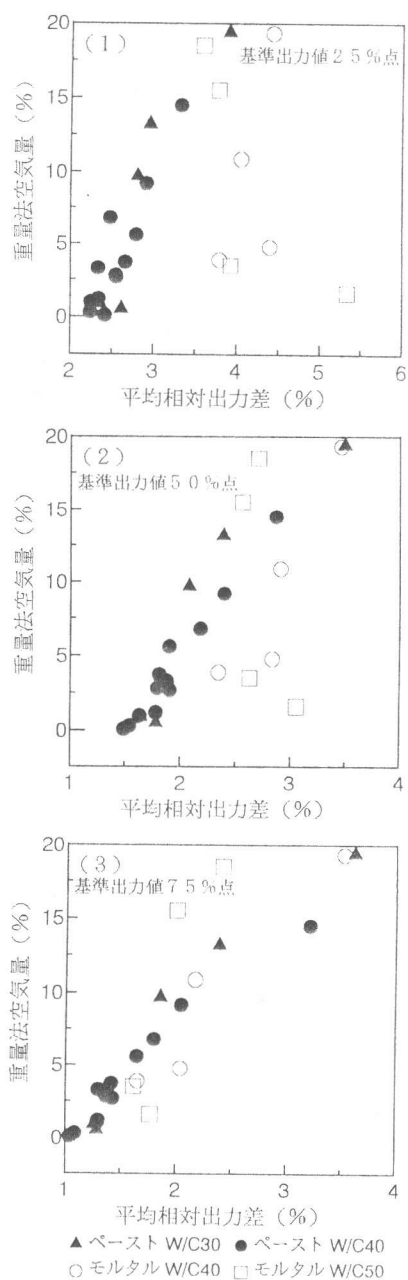


図10 空気量と平均相対出力差の関係

ーストでは平均相対出力差は重量法空気量とほぼ比例関係にあり、図8に比べペースト同士の差異は小さくなっている。一方、a)で述べたように出力の低い区間のあるモルタルは、低い基準出力値25%点では、ペーストから大きく離れているが、50%点、75%点と高くなるにつれペーストとモルタルの差異は小さくなっている。以上のことから、ある程度高い%点を基準出力値とする平均相対出力差は、W/Cが40%前後で砂の少ない調合であれば調査に関わらない空気量の推定に有効であると思われる。

(2) 気泡径分布とセンサ出力との関係の考察

a) 断面画像解析法による気泡径分布の比較：図11に、空気量および使用混和剤の異なる試料の、断面画像解析法による気泡径分布の比較の例を示す。図より、分布の違いを明瞭に確認でき、分布より求めた空隙量は、図内の表に示すように、重量法による各々の空気量に十分近い値となっており、本システムによる気泡径分布の測定の検討のための基準試料として有効といえる。

b) 相対出力のヒストグラムの比較：図12(1)に、相対出力のヒストグラムの例を示す。分布の違いは明瞭ではなく、気泡径分布との関係を見いだす事は困難である。

c) 相対出力差のヒストグラムの比較：図12(2)に、相対出力差のヒストグラムの例を示す。基準出力値は、3.2(1)で設定した3水準のうち、最も有効であった75%点を一例としてとっている。この縦軸に、図9(3)の対応より求めた空気量を乗じたものが図12(3)であり、これは、画像解析法による気泡径の分布(図11)とよく対応することが分かる。以上のことから、基準出力値を75%点程度に設定することによりセンサ出力値から気泡径分布の傾向を推定することが可能であると考えられる。

4. 調合要因による出力変動の検討

4.1 実験概要

3章で示した通り、モルタル中の気泡の存在以外にも、W/CやS/C(砂セメント比)等の調合要因によっても、センサ出力が変動する。そこで本章ではW/Cを40%~60%、S/Cを3水準とした、より幅広い調合条件(表3)のフレッシュセメントペースト・モルタルを対象とし、本システムによる空気量測定の有効性についてさらに検討を加える。

より進んだ検討に際し、測定機器側による変動の大きな原因であるレーザーダイオードからの出射光の変動の

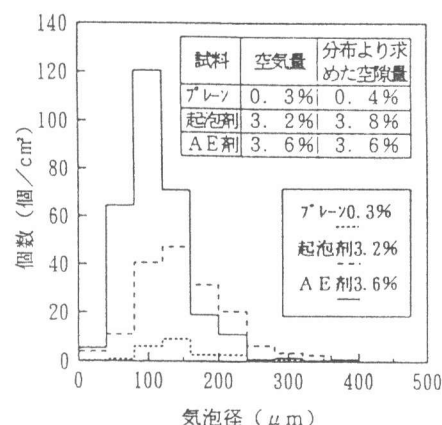


図11 試料の気泡径分布の例

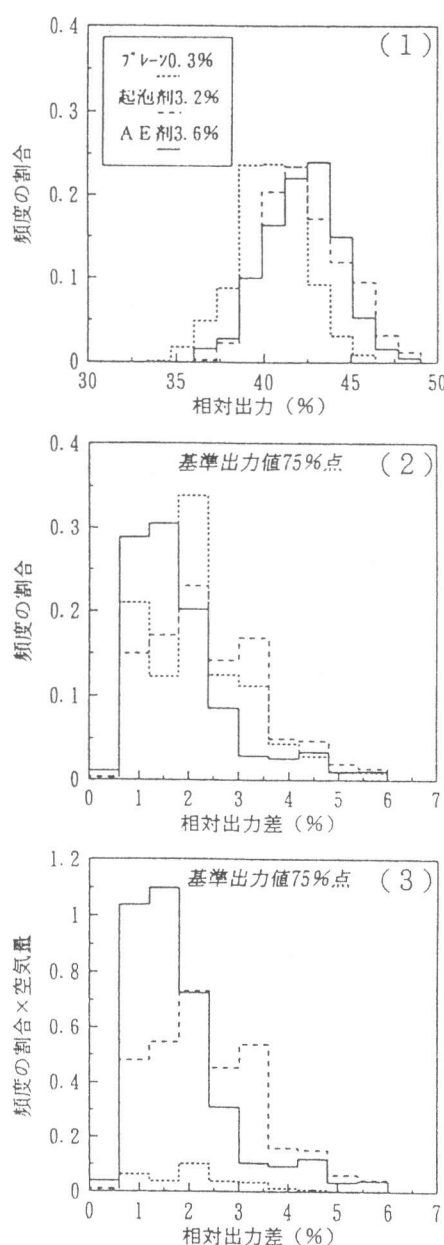


図12 センサ出力のヒストグラムの例

影響を排除するため、本章では図13のようにシステムに改良を加え、出射光量も測定して反射光量を補正することで出力波形の安定性を向上させた。

測定条件についても、より平均的な測定値が得られるように測定距離を3章の2倍の60mmとした。また、測定深さは、測定容器の都合上15mmとした。他の測定条件は3章と同じである。

測定回数は1試料につき各3回とした。本システムによる測定実験の直前に、確認・比較のために、試料の空気量を重量法によっても測定した。試料の測定容器は、直径5cm、長さ20cmの半円柱状容器とした。

4.2 実験結果および考察

(1) 出力波形の比較

出力波形の例を図14に示す。S/C=1のM50同士では空気量の多い(2)の方が(1)よりも波形の山は高い。(3)はS/C=3で砂の多い調合T50であり、空気量は少ないが波形の山の高さは、空気量の多い(2)と同程度であり、山の間隔は(2)より広い。波形の例からも、相対出力の絶対値のみでは調合に関わらず空気量の推定を行うことは困難と考えられる。

(2) 平均相対出力差と空気量の関係

得られた出力波形から、前章において重量法空気量との相関が最も認められた、基準出力値を75%点とする平均相対出力差を算出した。図15に、重量法空気量と平均相対出力差の関係を示す。図から、調合条件によるばらつきが認められ、空気量との対応がよいとはいえない。特に、S/Cが異なる場合、対応が大きく乱れる傾向にある。

(3) 波形の形状的特徴と空気量の関係

そこで、本節(1)項で述べたように平均相対出力差が同等でも空気量が多い場合とS/Cが大きい

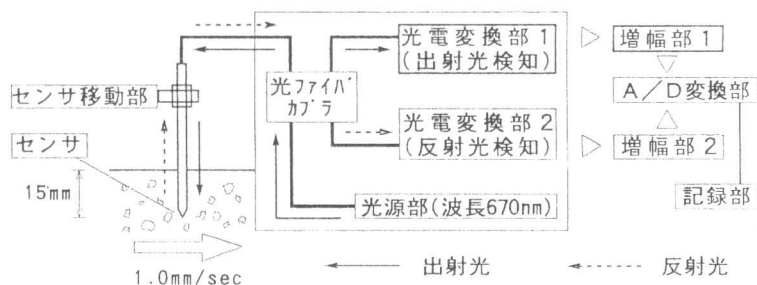


図13 空隙性状測定システムの改良された構成

表3 試料の調合条件

セメント		普通ポルトランドセメント		
骨材		2.5mm以下の山砂		
混和剤		A E 剤，気泡剤		
調合条件の 組み合わせ (試料名)		W/C (%)		
		4 0	5 0	6 0
S/C (体積比)	0	P40	P50	P60
	1	M40	M50	M60
	3	-	T50	T60

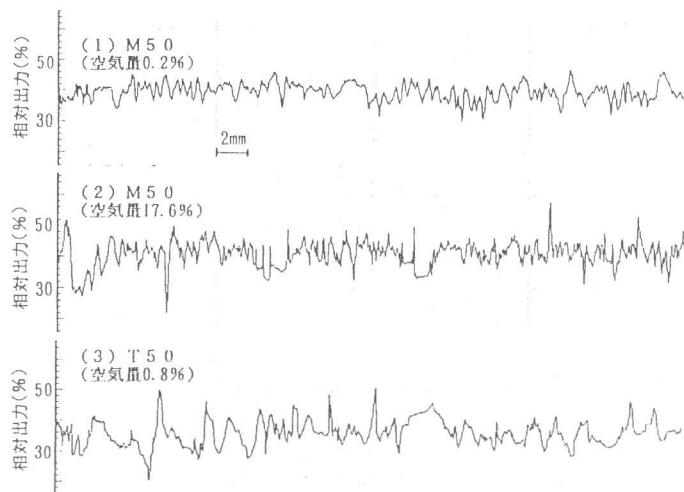


図14 出力波形の例

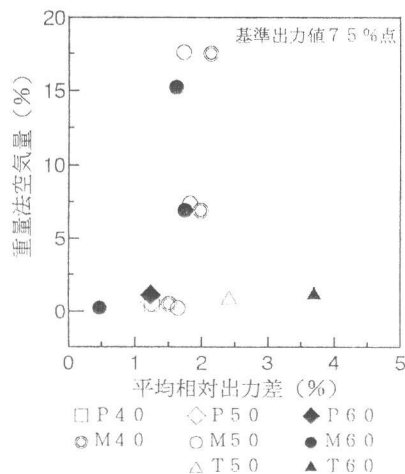


図15 空気量と平均相対出力差の関係

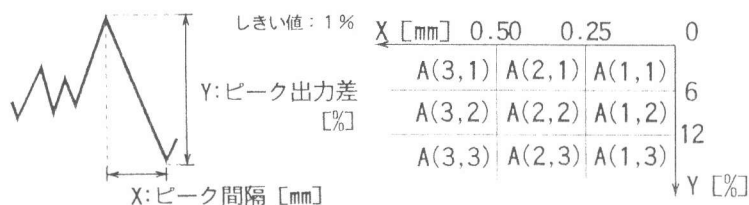


図16 ピーク検出法の概略図とゾーニング

い場合とでは、出力波形の形状的特徴が異なることから、図16に示すピーク検出法により求められるピーク間隔とピーク出力差の2変量により、波形の特徴を表わすこととした。図17に、2変量ヒストグラムの例を示す。考察の結果、ピーク出力差がある程度大きくピーク間隔の小さい区間の度数が空気量と良い対応を示し、中でも区間A(1,2)の度数が空気量と最も良い対応を示した。このことは、本節(1)項で述べた波形の形状的特徴と良く対応する。図18に、重量法空気量と区間A(1,2)の度数の関係を示す。図18の対応は、図15の対応より良好で、センサ出力により調合条件に関わらず空気量のみを推定できる可能性がうかがえる。

5. 結論

光ファイバー気泡検知センサを応用した空隙性状測定システムを設計・試作し、本システムによるフレッシュセメントペースト・モルタルの空気量および気泡径分布の測定実験を行い、以下の知見を得た。

1) 気泡の存在以外にも、W/Cや骨材の存在等の調合要因により、センサ出力は変動する。2) 調合要因による変動を適正に修正することにより、調合にかかわらず空気量の測定が可能である。3) 気泡径の分布の傾向が、推定可能である。4) 出力波形の形状的特徴をとらえることで調合に関わらず空気量の測定が可能である。

今後は、出力波形の形状的特徴をとらえるピーク検出法により気泡径分布の測定の検討を行いたいと考えている。また、空気量、気泡径分布の測定ともに精度的には不十分であり、測定条件のさらなる検討等が必要と考えている。

参考文献

- [1] Ansari, F. :Rapid In-Place Air Content Determination in Fresh Concrete, Concrete International, Vol.13, No.1, Jan. 1991
- [2] 内田美生：コンクリート中の空気量測定法に関する最近の研究、コンクリート工学、Vol. 31、No.6、PP.62～66、1993.6
- [3] 坂井映二，三上貴正：フレッシュモルタルの空隙性状の測定方法に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、PP.449-450、1995.8

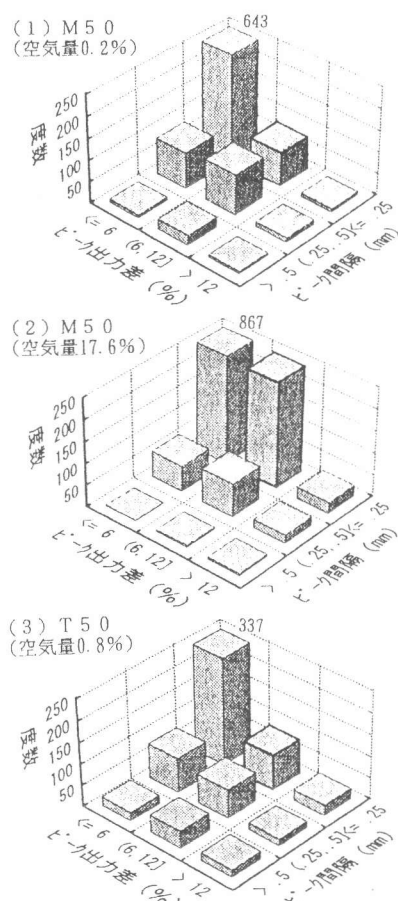


図17 ピーク間隔とピーク出力差の2変量ヒストグラムの例

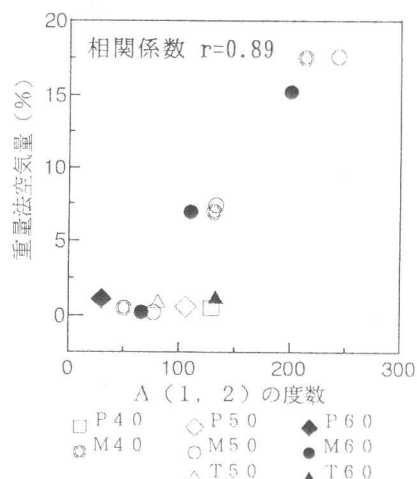


図18 空気量とA(1,2)の度数の関係