

# 電気抵抗値による細骨材の吸水率決定方法に関する基礎的研究

上野 敦<sup>1</sup>・国府勝郎<sup>2</sup>・大賀宏行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京都立大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>2</sup>フェロー 工博 東京都立大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京都立大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

本研究は、細骨材の粒子形状や粒度分布および多孔性の程度などに影響されることなく、細骨材の表乾状態における吸水率を安定して決定することのできる新しい試験方法の開発を目的としたものである。この試験方法は、細骨材粒子の表面水の有無により、試験時に添加した粒状の電解質が溶解するか否かによって、試料の電気抵抗値が顕著に変化することに着目したものである。なお、この方法は、表乾状態の試料を調整することなく、吸水率を決定できる方法である。

この結果、細骨材の吸水率は、その物理的性質が様々に変化した場合や、スラグ細骨材のように金属成分が多く含有されている場合でも、含水率による電気抵抗値の相対的な変化から決定できることを述べている。

**Key Words:** saturated surface dry condition, absorption, electric resistance, electrolyte, fine aggregate

## 1. まえがき

天然骨材資源の枯渇対策や資源の有効利用などの理由から、コンクリート用細骨材として砕砂や各種のスラグ細骨材等の人工細骨材を使用する必要性が生じている。このような人工の細骨材は、一般に粒子の形が角張っているかまたは極端に球形に近いため、JIS A 1109 (細骨材の比重及び吸水率試験方法)<sup>1)</sup>に規定されているフローコーンによる方法 (以下、フローコーン法) では表面乾燥飽水状態 (以下、表乾状態) の判定が困難な場合があり、吸水率の測定値は測定者による個人誤差が大きいという問題が指摘されている。

細骨材の表乾状態を安定して判定することは、コンクリートの品質管理上非常に重要である。このため、遠心脱水の容易さ<sup>2)</sup>、減圧吸水させたときの吸水速度<sup>3)</sup>、高周波電場内での誘電分極の変化<sup>4)</sup>、乾燥速度および乾燥加速度<sup>5)</sup>、比誘電率の変化<sup>6)</sup>等、様々な指標に着目した細骨材の表乾状態判定方法が検討されている。しかし、未だ実用化されていないのが現状である。

本研究は、細骨材の粒子形状や粒度分布等の物理的な性質に影響されず、着目する指標が細骨材粒子

表面の水分の有無を直接的に判定でき、表乾状態における含水率 (吸水率) を安定して決定できる試験方法を提案したものである。この方法は、表面水の有無による細骨材の電気抵抗値の変化を顕著にするため、測定直前の試料に粒状の電解質を添加し、異なる含水率数点を一組とした電気抵抗値の測定値から、表乾状態における含水率 (吸水率) を決定するものである。

## 2. 試験方法の概念

一般に、細骨材の電気抵抗値は、含水状態によって変化する。細骨材粒子表面に表面水が存在していると電気抵抗値は非常に小さな値となり、表面水が存在していないと電気抵抗値は非常に大きな値となる。これは、通電の経路が細骨材粒子表面や粒子間に存在する水の部分であることを示している。また、電気抵抗値が非常に小さな値から非常に大きな値に変化する含水状態は、まさに表面水が失われた状態であり、この状態が表乾状態である。すなわち、電気抵抗値は、細骨材粒子表面の表面水の有無によって直接的にかつ表乾状態を境界として急激に変化する指標

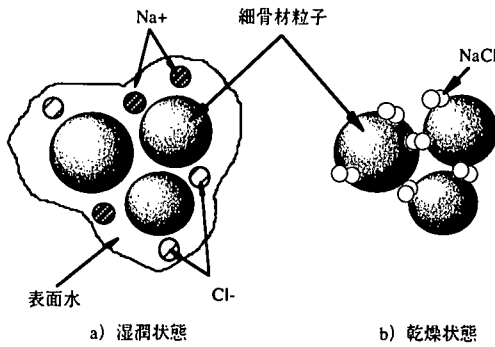


図-1 電解質添加の概念

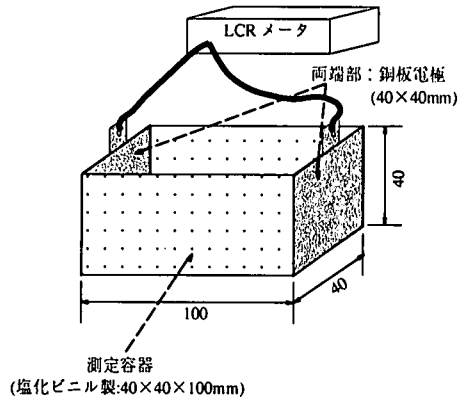


図-2 電気抵抗値測定装置

である。また、この細骨材の含水状態による電気抵抗値の変化は、水分に容易に溶解する粒状の電解質を添加するとより明確になると考えられる。すなわち、表面水が存在している状態(図-1a)では、添加した電解質が表面水に溶解するため電気抵抗値が無添加の場合より顕著に小さくなり、表面水が失われた状態(図-1b)では、電解質は溶解しないので電気抵抗値は無添加の場合と同等となるので、表面水の有無による電気抵抗値の変化が顕著に現れると考えられるのである。

以上の考えから、粒状の電解質を添加した条件下での含水率による電気抵抗値の変化に着目して細骨材の表乾状態を判定することとした。以下、この方法を電気抵抗値測定法という。

### 3. 実験方法

#### (1) 試験概要

試験の主な流れは次のとおりである。

- ① 試料に粒状の電解質を添加する効果を確認する。
- ② 安定して電気抵抗値を測定できる試験条件を決定する。
- ③ 種々の物理的性質および化学成分の細骨材に対する適用性を検討する。
- ④ 試験結果の妥当性を検証する。

#### (2) 試験装置

細骨材の電気抵抗値は、図-2に示す試作装置を用いて測定した。電極間の電圧を1.0V一定とし、直流電流を作用させ、実務的に安定したときの電極間の電気抵抗値を測定した。安定に要する時間は、試料の含水率などにより変化するが約10秒程度であった。なお、抵抗値の測定は各測定試料に対して1回ずつ

行った。本試験では電気抵抗値測定にはLCRメータを使用した。この装置は、インダクタンス、静電容量および電気抵抗値等の様々な電気的特性を計測できる装置である。本試験の範囲では直流電流のもとにおける電気抵抗値を測定するのみであるので、市販のテスター等で測定することも可能である。

#### (3) 試験に使用した細骨材

試験に使用した細骨材は、骨材粒子の多孔性の程度およびスラグ細骨材の金属成分等に着目し、表-1に示す12種類とした。各細骨材は、比較的密実な天然砂(記号:A)、比較的多孔質の天然砂(BおよびC)、密実な砕砂(CS)、破碎時強度が56.1、40.5および24.4N/mm<sup>2</sup>の強度レベル3水準のコンクリートから製造した再生細骨材(R1, R2, R3)および人工軽量細骨材(ALS)である。また、試料粒子中の金属成分による電気抵抗値への影響を検討するため、各種スラグ細骨材(高炉スラグ細骨材:BFS, フェロニッケルスラグ細骨材:FNS, 電気炉スラグ細骨材:EFS, 銅スラグ細骨材:CUS)についても試験を行った。各スラグ細骨材の化学成分は表-2に示すとおりである。

#### (4) 電気抵抗値の測定方法

細骨材に添加する電解質は、粒状のNaCl特級試薬とし、NaCl添加の効果を確認するための検討<sup>7)</sup>およびNaCl添加量、NaCl添加後の静置時間および試作測定容器内への充てん方法に関する基礎検討を行った<sup>8)</sup>。

##### a) 基礎検討に使用した試料

基礎的検討に用いた試料は、天然砂Aを24時間吸水させた後、市販のヘアードライヤーで種々の含水率に調整したものおよび天日乾燥で一定の含水率2.0%に調整し密封容器内に保存したものを使用した。

表-1 使用細骨材の粒度分布

記号	試料粒子 多孔性の程度	通過質量百分率(%)							F.M.
		10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	
A	密実	100	99	91	77	61	30	3	2.38
B	普通	100	100	91	78	53	23	5	2.51
C	多孔質	100	95	62	40	21	10	4	3.70
CS	密実	100	93	64	43	26	14	5	3.54
R1	多孔質	100	100	83	59	35	16	7	3.00
R2	多孔質	100	100	83	59	33	15	6	3.04
R3	多孔質	100	100	82	63	34	12	4	3.05
ALS	多孔質	100	99	89	55	21	8	4	3.25
BFS	普通	100	100	100	89	44	16	7	2.44
FNS	密実	100	100	100	96	70	42	19	1.73
EFS	密実	100	100	89	68	42	21	5	2.74
CUS	密実	100	100	100	86	31	13	6	2.64

表-2 各スラグ細骨材の化学成分

記号	化学成分(%)						
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	SO <sub>3</sub>
BFS	41.6	34.3	4.5	0.5	15.3	1.1	0.16
FNS	4.6	53.8	28.8	8.8	2.2	0.1	-
EFS	18.6	14.8	5.6	31	9.6	-	-
CUS	1.9	33.2	-	50.9	-	0.8	0.2

測定時の試料の含水率は、JIS A 1125 (骨材の含水率試験方法及び含水率に基づく表面水率の試験方法)<sup>9)</sup>に従って、約500gの試料の105℃の恒温乾燥炉による乾燥前後の試料質量によって求めた。以下の検討に関しても同じ方法で含水率を測定した。

**b)NaCl添加の効果に関する検討**

粒状のNaClを添加することの効果を検討するため、種々の含水率の天然砂Aについて、NaClの添加率を試料質量の0～3%の範囲で4水準に変化させて電気抵抗値を測定した。試料にNaClを添加し、これをビニル袋中で手によって1分間振とう攪拌し、3分間静置後に測定容器内に試料を3層に分け充てんした。各層はモルタル供試体成形用突き棒(突固め面: 35×35mm, 質量: 1kg)で15回突き固め、容器上縁まで充てんした。この際、測定中に含水状態が変化することを防止するために、測定容器を塩化ビニリデンフィルムで包み、安定した電気抵抗値が得られるようにした。

**c)NaCl添加量に関する検討**

試料に対するNaCl添加量の適正值を検討するため、含水率を2.0%とした試料Aに、試料質量に対してNaCl添加率を0～3.3%の範囲で7水準変化させ添加し、電気抵抗値を測定した。試料とNaClはビニル袋中で1分間振とう攪拌し、5分間静置後に測定容器に3層に分けて各層をモルタル供試体成形用突き棒で15回突き固めて充てんした。

**d)NaCl添加後の静置時間に関する検討**

試料に粒状のNaClを添加した後の溶解時間による

電気抵抗値への影響について検討するため、含水率を2.0%とした試料Aに、試料質量に対して2.5%のNaClを添加し、1分間振とう攪拌後の静置時間を0～12分の範囲で7水準に変化させ電気抵抗値を測定した。測定容器内への充てん方法は、c)と同じである。  
e)測定容器内の試料の充てん状態に関する検討

試料の電気抵抗値は、測定容器内の試料の充てん状態によって変化すると考えられるので、容器内の充てん体積および充てん方法を変化させて電気抵抗値を測定した。含水率を2.0%とした試料Aに、試料質量に対して2.5%のNaClを添加し、1分間振とう攪拌後に5分間静置し、モルタル供試体成形用突き棒を使用して、充てん状態を①1層充てん突固め無し、②1層充てん15回突固め、③2層充てん各層15回突固め、④3層充てん各層15回突固め、⑤4層充てん各層15回突固め、⑥薄層で突固めながら充てん質量が変化しなくなるまで充てんした状態の6水準に変化させて試験した。また、充てん体積に関する検討では、④の3層充てん15回突固めの試験時に、各層を充てんすることに電気抵抗値を測定した。

**(5) 表乾状態の判定方法**

**a)電気抵抗値測定法による判定**

各細骨材を24時間吸水させた後、市販のヘアードライヤーで徐々に乾燥させていく過程で、6～7水準の含水率における電気抵抗値を測定した。3.(4)で行った試験結果から、湿潤試料の質量に対して1.5%程度のNaClを添加し、ビニル袋中で1分間振とう攪拌し、3分間静置後に、試料を3層に分けて各層をモルタル供試体成形用突き棒を使用して15回突き固めて容器上縁まで充てんすることとした。なお、測定は各試料の各含水状態に対して1回ずつ行った。

各試料に関して、異なる含水率における電気抵抗値の変化の一組のデータ群から、表乾状態における

含水率, すなわち細骨材の吸水率を決定した。吸水率の決定方法については考察において述べる。

**b) フローコーンによる判定**

従来のJIS A 1109およびALSについてはJIS A 1134 (構造用軽量細骨材の比重及び吸水率試験方法)<sup>10)</sup>に規定されているフローコーンによる方法で各細骨材の表乾状態を判定し, 吸水率を測定した。吸水率試験は同時に2回行い, これらの平均値をフローコーン法による吸水率とした。

**c) 吸水紙による表面水有無の検証**

細骨材粒子表面の水分の有無を調査するため, 吸水性が高く容易に破損しない紙 (JIS P 3801の1種) を用いて, 試料の含水率と吸水紙の質量増加の関係について検討した。種々の含水状態に調整した試料 (A, CS, BFS, FNS, EFS) 200gと吸水紙を気密容器中で攪拌し, 3分間静置後に吸水紙のみを取り出して質量を測定し, 質量の増分を吸水量として整理した。測定は各試料の各含水状態に対して1回ずつ行った。

**(6) 電気抵抗値測定法の試験値の妥当性の検証**

電気抵抗値測定法によって求めた吸水率の値の妥当性を確認するため, 種々の含水率における電気抵抗値を測定する際に, 測定容器に試料を充てんしたときの単位容積質量を測定し, 試料の粒子間空隙体積に対する表面水体積の割合である飽和度を求め, 飽和度による電気抵抗値の変化を検討した。ただし, この検討は, 試料 A, B, C, CS, R1, R2, R3, ALS および CUS に関して行った。

**4. 結果および考察**

**(1) 電気抵抗値測定に関する基礎検討**

**a) NaCl 添加の有無および添加量**

NaClの添加率を0~3%の範囲で変化させたときの含水率と電気抵抗値の関係を図-3に示す。含水率0%ではNaClの添加の有無および添加率に関わらず, 試料の電気抵抗値は約13MΩで同等となっている。NaClを添加した場合の電気抵抗値は, 含水率の増加によって急激に低下し, 無添加の場合に比べて約1/10程度となっている。また, NaClを添加した場合, 添加率の違いによる影響はほとんど認められない。すなわち, NaClの添加は, 含水率による電気抵抗値の変化を顕著にする効果がある。

含水率2.0%の試料に関するNaCl添加率と電気抵抗値との関係を図-4に示す。一定の含水率の下では, NaClを添加することで試料の電気抵抗値は急激に低下し, 添加率が1%程度以上であればほぼ一定となる

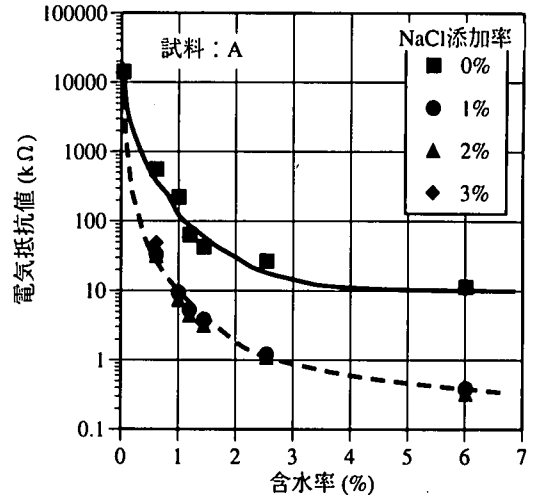


図-3 NaCl 添加の効果

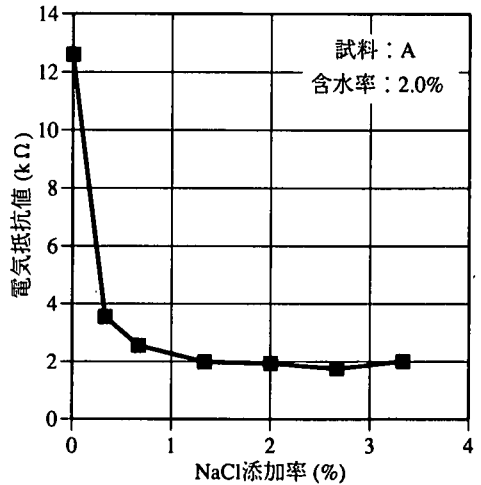


図-4 NaCl 添加率と電気抵抗値の関係

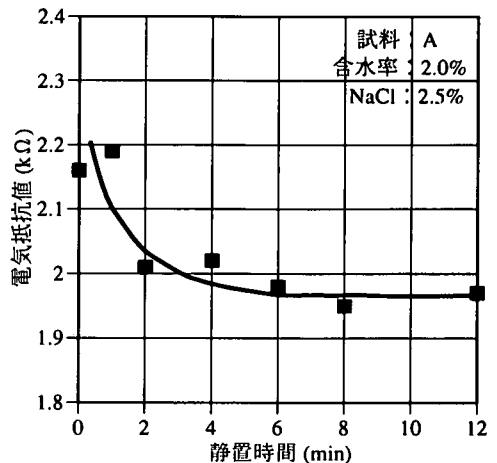


図-5 静置時間と電気抵抗値の関係

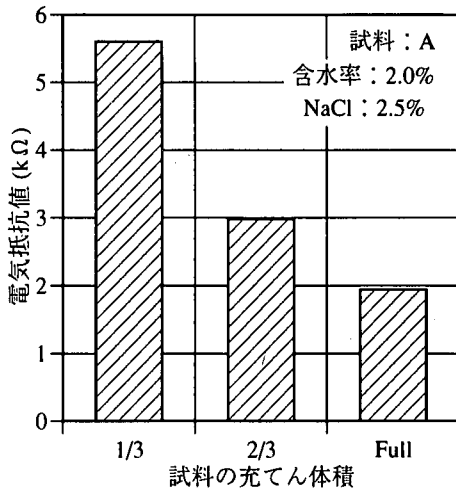


図-6 試料の充てん体積と電気抵抗値の関係

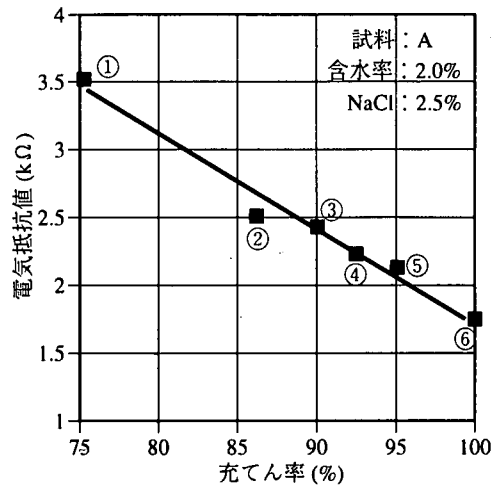


図-7 充てん率と電気抵抗値の関係

ことがわかる。これらの結果は、粒子の表面水がごく微量で、NaClの溶解が飽和状態となるためと考えられる。

#### b) NaCl 添加後の静置時間に関する検討

NaClを添加して振とう攪拌した後の静置時間による電気抵抗値の変化を図-5に示す。添加後の静置時間が3分程度以上であれば電気抵抗値が安定することがわかる。これは、粒状のNaClが微量の表面水に溶解する時間が3分間程度であり、これ以上長く静置しても飽和して安定状態となっているものと推察される。

#### c) 測定容器内の試料の充てん状態による影響

測定容器内の試料の充てん体積による電気抵抗値の変化を図-6に示す。一定締固め条件下で容器内の試料体積が増加すれば電気抵抗値は低下することがわかる。これは、充てん体積が多くなるにつれ通電経路が増加するためである。

測定容器内の試料の充てん率による電気抵抗値の変化を図-7に示す。ここで、充てん率は薄層で締固めを行い、最大に充てんしたときの単位容積質量(1.62g/cm<sup>3</sup>)を100%として表した。また、図中の①~⑥は、3. (4) e)で述べた各締固め状態に対応している。容器内の試料の充てん率が高くなれば電気抵抗値は小さくなることがわかる。これは、細骨材粒子表面に付着している表面水量が一定であれば、試料の充てん率が大きくなるにしたがって粒子間空隙が減少し、表面水により粒子間空隙が飽和され、通電経路が増加するためと考えられる。

一般に、電気抵抗値は、電極間の距離に比例し、通電経路の断面積に反比例する。本実験における測定では、試料の含水率による電気抵抗値の相対的な変

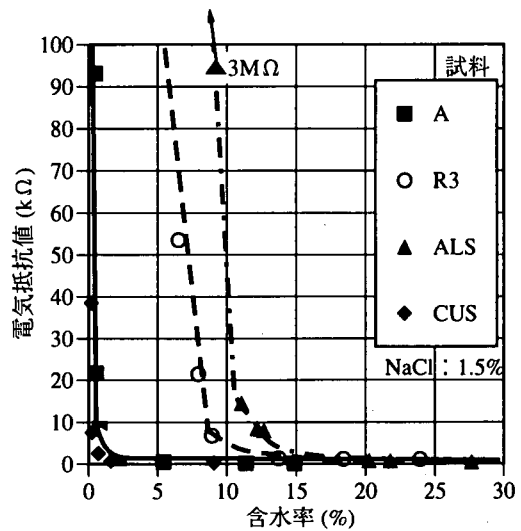


図-8 含水率と電気抵抗値の関係

化を測定するため、一定の締固め条件で、一定断面となるように試料を充てんすればよいと考えられる。したがって、以降の検討では、試料を3層に分けて容器上縁まで詰めて断面を一定とし、各層は突き棒で15回突き固めることとした。

#### d) 測定方法のまとめ

以上の基礎検討の結果、含水状態による細骨材の電気抵抗値を安定して測定するため、湿潤状態の試料質量に対して1.5%程度のNaClを添加し、ビニル袋等の気密容器中で1分間振とう攪拌後、約3分程度静置し、測定容器内に試料を3層に分けて詰め、各層をモルタル供試体成形用突き棒で15回突き固めて容器上縁まで充てんすることとした。

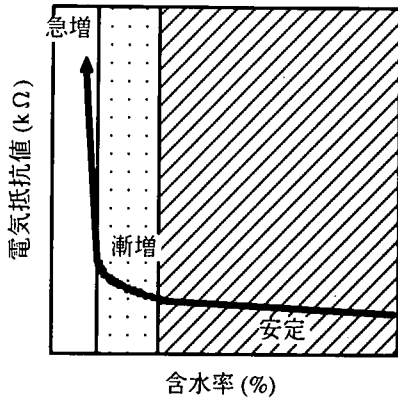


図-9 含水率と電気抵抗値の関係の模式図

表-3 各試験方法による吸水率測定結果

方法	吸水率(%)											
	A	B	C	CS	R1	R2	R3	ALS	BFS	FNS	EFS	CUS
コーン	0.94	3.18	5.63	1.62	8.93	9.27	9.53	12.66	2.01	0.44	0.63	0.83
抵抗	1.07	3.21	6.81	1.52	8.87	9.55	10.07	15.12	2.13	0.60	0.79	0.98
紙	1.24	-	-	1.58	-	-	-	-	1.99	0.45	0.57	-

(2) 含水状態による電気抵抗値の変化

細骨材の含水率による電気抵抗値の変化の代表例として、試料A, R3, CUSおよびALSの結果を図-8に示す。本実験の範囲では、試料の石質（密実さおよび金属成分含有の有無）、粒子形状および粒度分布に関わらず、含水率が大きな範囲では電気抵抗値は小さく安定しており、乾燥が進行し含水率があるレベルまで小さくなると、急激に電気抵抗値が増大することがわかる。また、この電気抵抗値が急激に増大する含水率レベルが試料ごとに異なっていることがわかる。測定容器内の表面水量は、試料の含水率や容器内の実積率などで若干変化するが、基礎検討の結果から、NaCl溶液の濃度差による電気抵抗値への影響は無視できると思われる。

含水率と電気抵抗値の関係を模式的に表すと図-9のように区分される。表面水が十分に存在する範囲では、含水率が低下しても電気抵抗値はほとんど変化せず安定している（安定領域）。この安定領域よりも含水率が低下すると、含水率の低下に伴って、通電経路が徐々に減少し電気抵抗値が漸増する（漸増領域）。漸増領域からさらに含水率が低下すると、通電経路の分断および消滅のため電気抵抗値が増大すると考えられる（急増領域）。

(3) 吸水率の決定方法

表乾状態とは、粒子内部の空隙は水で飽和され、粒子表面に表面水が存在しない状態である。また、既往

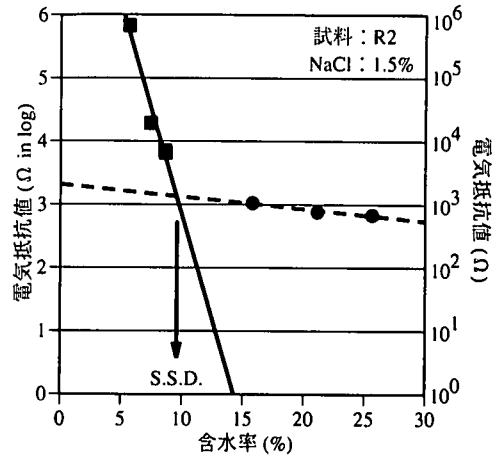


図-10 吸水率の決定

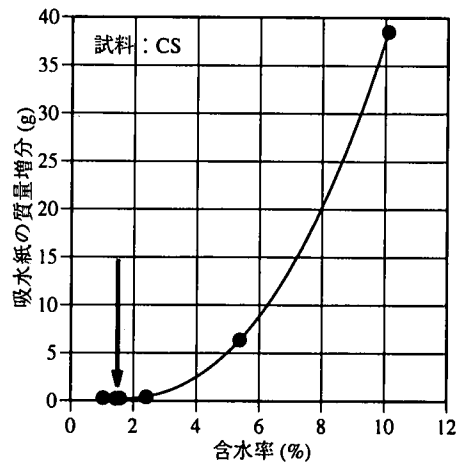


図-11 表面水有無の調査

の検討<sup>11)</sup>では、粒子間の接触水と粒子表面の吸着水の存在が指摘されている。これらのことから、表乾状態は、粒子間空隙および粒子表面の水分が限りなく減少し、通電経路としての水分の連続性が失われた状態と考えられるので、漸増領域内における低含水率側とすることが適当であると思われる。この表乾状態の含水率（吸水率）を決定するため、図-10に示すように、電気抵抗値を常用対数で表示し、データを高含水率域と低含水率域の2組に分け、それぞれを最小自乗法で直線近似し、2直線の交点を表乾状態とすることとした。

このようにして定めた各細骨材の吸水率を表-3に示す。電気抵抗値測定法による吸水率は、フローコーン法による吸水率よりも試料CおよびALSでは大きな値を示しているが、他の試料では、両者はほぼ近似した値となっている。

#### (4) 電気抵抗値測定法による吸水率の妥当性

細骨材の電気抵抗値は、粒子表面の表面水の有無によって変化するため、表面水の有無を調べるために吸水紙による試験を行った。試料の含水率と吸水紙の質量増分の関係の代表例として砕砂CSの結果を図-11に示す。吸水紙の質量がほとんど変化しなくなる含水率で試料粒子表面の表面水は概ね失われているものと考えて吸水率を算出した(図中矢印、表-3)。しかし、吸水紙法では吸水紙の質量が変化しなくなる含水率を決定しにくく、表乾状態の判定が曖昧であるため、概略の値は示しているが決定的ではない。このため、以下の方法で間接的に測定結果を検証することとした。

細骨材試料を電気抵抗値測定容器に充てんし、通電させる場合、通電経路は粒子の表面水である。通電性状が良好な状態では、表面水の連続性が確保されていると考えられる。この連続性を表す指標として、粒子間空隙の表面水による飽和度に着目した。すなわち、測定容器内に充てんした試料の実体積および含水率、電気抵抗値測定法で決定した吸水率から、容器内の粒子間空隙体積および表面水体積を計算し、電気抵抗値測定法によって決定した吸水率の妥当性を検証することとした。

##### a) 表乾密度の試験方法

測定容器内に充てんした試料の実積率を計算し、粒子間空隙体積および表面水体積を計算する際に試料の表乾密度の値が必要となる。このためJIS A 1111(細骨材の表面水率試験方法)<sup>12)</sup>と類似のピクノメータによる方法で表乾密度測定試験を行った。従来のJISに規定される表乾密度の測定では、試料を表乾状態に調整したものを直接使用して密度試験を行っているが、以下のような方法で試験を行えば、表乾状態の試料を作製することなく密度を決定することができる。なお、以下の計算に用いる吸水率Qは、電気抵抗値測定法によって定めた値である。

①確実に表乾状態よりも湿潤である試料を2.0kg程度準備し、含水率が変化しないように保管する。

②湿潤試料の含水率(q)をJIS A 1125に準拠して恒温乾燥炉を用いて測定する。

③ピクノメータに水を満たした状態の質量( $m_2$ )を0.1gまで量る。

④湿潤試料を約500g採り、その質量( $m_1$ )を0.1gまで量り、これをピクノメータに入れ、水を加えて空気を追い出し、この質量( $m_3$ :容器、試料、水の合計質量)を0.1gまで量る。

⑤湿潤試料で置き換えられた水の質量( $m_4$ )(g)は、式(1)で計算できる。

$$m_4 = m_2 + m_1 - m_3 \quad (1)$$

ここで、湿潤試料の質量は、表乾状態の試料の質量と表面水の質量から成るので、表乾状態の試料で置き換えられた水の質量( $m_5$ )(g)は、式(2)で計算できる。

$$m_5 = m_2 + m_s - m_3 \quad (2)$$

ここに、 $m_s$ :質量 $m_1$ (g)中の表乾状態の試料の質量(g)

また、質量 $m_5$ (g)は、含水率(q)および吸水率(Q)から式(3)によって計算できる。

$$m_s = \frac{(1+Q) \cdot m_1}{1+q} \quad (3)$$

したがって、式(2)は、式(4)ようになる。

$$m_5 = m_2 + \frac{(1+Q) \cdot m_1}{1+q} - m_3 \quad (4)$$

ゆえに、質量 $m_1$ の湿潤試料の表乾状態における見掛けの体積は、式(5)で計算できる。

$$V_s = \frac{m_5}{\rho_w} = \frac{(1+q) \cdot (m_2 - m_3) + (1+Q) \cdot m_1}{\rho_w \cdot (1+q)} \quad (5)$$

ここに、 $V_s$ :質量 $m_1$ の湿潤試料の表乾状態における見掛けの体積( $\text{cm}^3$ )、q:含水率、Q:吸水率、 $\rho_w$ :水の密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

⑥試料の表乾密度および絶乾密度は、式(6)および式(7)で計算し、小数点以下2桁で丸める。

$$d_s = \frac{\rho_w \cdot (1+Q) \cdot m_1}{(1+Q) \cdot m_1 - (1+q) \cdot (m_3 - m_2)} \quad (6)$$

$$d_D = \frac{d_s}{(1+Q)} \quad (7)$$

ここに、 $d_s$ ：表乾密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $d_p$ ：絶乾密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### b)飽和度

表面水による粒子間空隙の飽和度は、表面水体積を粒子間空隙体積で除して求めた。

含水率の異なる試料の電気抵抗値を測定する際に、測定容器に充てんした試料の単位体積質量を測定し、式(8)により実積率を算出する。

$$G = \frac{(1+Q) \cdot T}{(1+q) \cdot d_s} \quad (8)$$

ここに、 $G$ ：容器に充てんした試料の実積率、 $T$ ：容器に充てんした試料の単位容積質量( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

次に、容器体積と実積率から細骨材粒子間の空隙体積を式(9)により計算する。

$$V_v = \frac{(1+q) \cdot d_s - (1+Q) \cdot T}{(1+q) \cdot d_s} \cdot V_c \quad (9)$$

ここに、 $V_v$ ：粒子間空隙体積( $\text{cm}^3$ )、 $V_c$ ：測定容器体積( $\text{cm}^3$ )

容器に充てんした試料の表面水体積は、測定容器内に充てんされた試料の質量からその試料の表乾状態における質量( $q$ および $Q$ から計算)を差し引き、これを水の密度で除して式(10)により計算する。

$$V_H = \frac{(q-Q) \cdot T \cdot V_c}{(1+q) \cdot \rho_w} \quad (10)$$

ここに、 $V_H$ ：表面水体積( $\text{cm}^3$ )

式(9)および(10)から、粒子間空隙の表面水による飽和度は、式(11)により計算される。

$$H = \frac{V_H}{V_v} = \frac{(q-Q) \cdot T \cdot d_s}{((1+q) \cdot d_s - (1+Q) \cdot T) \cdot \rho_w} \quad (11)$$

ここに、 $H$ ：飽和度

### c)粒子間空隙の飽和度と電気抵抗値

本試験における種々の含水率の試料の電気抵抗値

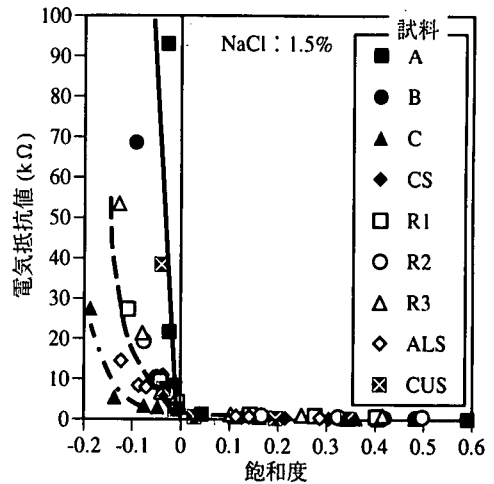


図-12 飽和度と電気抵抗値の関係

の支配要因は、NaClが溶解された表面水の有無であるが、図-6および図-7に示した一定含水率の試料による結果を考慮すると、測定容器中の試料の粒子間に存在する電解質溶液の連続性に着目する必要がある。この連続性を表す指標として粒子間空隙の表面水による飽和度を用いると、試料の電気抵抗値は図-12のように整理することができる。この図から、実務的な測定精度の条件下で、表面水量が0と判断される含水率より大きい範囲の試料の電気抵抗値は、相対的に変化は非常に小さく、いずれの試料も電気抵抗値は、飽和度0を境にして顕著な変化を示していることがわかる。もし、吸水率が過小に評価されていれば+側から、過大に評価されているならば-側から電気抵抗値が増加することとなる。図-12の結果は、いずれの試料の場合でも、電気抵抗値が飽和度0(表乾状態)を境界として急増することを示しており、電気抵抗値測定法により決定した吸水率が妥当な値であることを示している。このように、粒状のNaClを添加した細骨材の電気抵抗値は、表乾状態近傍で顕著に変化する指標であることが示され、表乾状態を判定する実用的な方法であるといえる。

本来、表乾状態の判定は、粒子表面の表面水の有無を判定することであるが、工学的に必要なことは、表乾状態における含水率、すなわち吸水率および表乾密度と絶乾密度を得ることである。この目的のためには、この研究で提案している電気抵抗値測定法によって、種々の含水率における電気抵抗値の変化から吸水率を決定し、式(6)および(7)によって表乾密度および絶乾密度を計算すればよい。

### (5) 細骨材粒子の空隙特性

前節において、細骨材の電気抵抗値は表乾状態よ



りも含水率が低下すると急増することが示された。表面水が存在しない範囲における試料の電気抵抗値は、その構成物質や多孔材料では粒子空隙中の含有水分量や粒子中の空隙の連続性にも影響を受けることは明らかである。図-12における飽和度0以下のデータ数は少ないため、定性的ではあるが、吸水率が小さく、粒子空隙が独立していると考えられる試料(試料A, B, CSおよびCUS)ほど、電気抵抗値の変化は急激である(図中:実線)。一方、吸水率が大きく、粒子空隙の連続性が推察される試料(試料C, R1, R2, R3およびALS)の飽和度0以下における電気抵抗値の変化は緩やかである(図中:破線および一点鎖線)。このように、細骨材の含水率による電気抵抗値の変化は、表乾状態より小さな含水率において、骨材粒子の空隙構造の相違を示唆している。

銅スラグ細骨材(CUS)の場合、金属成分はガラス質内に固溶されており、その組織は比較的緻密であることから、急激に電気抵抗値が増大している。一方、人工軽量細骨材(ALS)の電気抵抗値の変化は、多量の空隙を内包する骨材粒子であるにも関わらず、中程度の増加傾向を示している。一般に、人工軽量細骨材粒子を微粉砕して求めた真の密度と見掛けの密度とから計算される空隙率は約35%程度であり、不飽和空隙の存在等により、24時間吸水における吸水率は約20%程度となる<sup>13)</sup>。したがって、人工軽量細骨材において飽和度0以下の電気抵抗値の変化割合が比較的大きく得られたことは、不飽和の空隙が存在しているためと推察される。

## 5. まとめ

本研究は、産業副産物を含む、各種の細骨材をコンクリート用細骨材として使用する際に問題となっている表乾状態の判定、すなわち吸水率を特定するための試験方法として、試料に粒状のNaClを添加した状態での含水率による電気抵抗値の相対的な変化に着目した方法に関して検討し、試験方法の根拠と測定値の妥当性について述べたものである。

本研究により次のことが明らかとなった。

- (1) 細骨材の電気抵抗値を測定する際に、測定試料に少量の粒状のNaClを添加することにより、細骨材の含水状態による電気抵抗値の変化がより明確となる。
- (2) 細骨材の電気抵抗値を安定して測定するためには、一定の充てん方法で一定の測定容器に試料を充てんする必要がある。
- (3) 試料粒子の多孔性の程度、粒度分布、金属成分

の含有量などが変化しても、細骨材の電気抵抗値は、粒子表面に表面水が存在しなくなると急激に増大する。

(4) 種々の含水率における細骨材の電気抵抗値を対数表示し、これと含水率との関係を2直線で近似したときの交点の含水状態は、試料が表乾状態となったときの含水率と考えてよく、この値を試料の吸水率とすることができる。

(5) 細骨材の種類に関わらず、細骨材粒子間空隙の表面水による飽和度が0以下(表乾状態より含水率が小)となると、試料の電気抵抗値が急増し、一般にこの変化が著しいものほど吸水率が小さい傾向が認められる。したがって、電気抵抗値測定法は、細骨材粒子の空隙特性も反映したものであることがわかった。

今後、電気抵抗値による吸水率決定法の再現性および個人誤差の程度に関する検討を行う必要がある。

謝辞:この研究の一部は、学術振興会未来開拓型研究プロジェクト96R07601(代表者:長滝重義)の一環で行ったものであることを記し、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) JIS A 1109:細骨材の比重及び吸水率試験方法, 日本規格協会, 1993.
- 2) たとえば, 吉兼 亨, 中島佳郎:遠心脱水による細骨材の表面乾燥飽水状態について, 土木学会論文集, 第396号/V-9, pp.151-158, Aug./1988.
- 3) たとえば, 松村仁夫, 黒井登起雄, 宮澤伸吾:細骨材の比重・吸水率測定における減圧吸水法の適用, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.196-197, Sep./1996.
- 4) たとえば, 鈴木一雄, 伊藤康司:細骨材の簡易表乾決定法に関する一検討, セメント・コンクリート論文集, No.48, pp.164-167, Dec./1994.
- 5) たとえば, 佐藤嘉昭, 永松静也, 竹田吉昭:コンクリート用細骨材の表乾状態の判定法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.214-219, Dec./1992.
- 6) 川村政史, 笠井芳夫:新しい土の見掛けの表乾状態判定方法の提案—乾燥加速度法, シリカゲル散布法, 比誘電率法, pF法の比較—, コンクリート工学論文集, vol.7, pp.167-177, Jul./1996.
- 7) 上野 敦, 田窪直人, 国府勝郎:各種スラグ細骨材に対する電気抵抗値測定法の適用性, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.222-223, Sep./1997.
- 8) 上野 敦, 永田 亘, 国府勝郎:細骨材の表乾状態判定方法に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文報告集, vol.18, No.1, pp.423-428, Jun./1996.
- 9) JIS A 1125:骨材の含水率試験方法及び含水率に基づく表面水率の試験方法, 日本規格協会, 1993.

- 10) JIS A 1134: 構造用軽量細骨材の比重及び吸水率試験方法, 日本規格協会, 1995.
- 11) 辻 幸和, 二羽淳一郎, 伊東靖郎, 岡村 甫: 遠心力を利用した細骨材の保有水試験方法, 土木学会論文集, 第 384 号 /V-7, pp.103-109, Aug./1987.
- 12) JIS A 1111: 細骨材の表面水率試験方法, 日本規格協会, 1993.
- 13) 人工軽量骨材(ALA)協会: ALA および ALACON, p.12, Aug./1980.

(1998.3.16 受付)

## A FUNDAMENTAL STUDY ON NEW TEST METHOD FOR ABSORPTION OF FINE AGGREGATE BY ELECTRIC RESISTANCE

Atsushi UENO, Katsuro KOKUBU and Hiroyuki OHGA

This paper describes a basic study on the development of a new test method for determining absorption of fine aggregate. The new method is based on an idea that electric resistance of sand depends on its moisture content. The electric resistance of sand is directly and radically changed by surface water on its particles. It is more obvious when an electrolyte is added to sand.

The validity of the electric resistance test results were confirmed by a saturation of interparticle voids of sample. It is also shown that electric resistance is a valid index for judging the state of saturated surface-dry of fine aggregate.