

論文 高周波容量式水分計による細骨材の表乾判定に関する研究

岩瀬裕之^{*1}

要旨：従来より利用されてきた天然骨材の枯渇により、その代替物として砕砂、高炉スラグ細骨材が利用されはじめており、さらにコンクリート再生骨材やゴミ溶融スラグなどの利用も検討されている。本研究は、従来のフローコーンによる表乾判定方法に代わるものとして、高周波容量式水分計を用いた方法を開発し、これを種々の細骨材に適用してフローコーンによる方法や電気抵抗を利用した方法と比較検討した。その結果、高周波容量式水分計を用いて求めた吸水率は、フローコーンで求めた吸水率とは異なるが、電気抵抗によるものとほぼ一致した。

キーワード：表乾判定、誘電率、高周波容量、細骨材、砕砂、再生骨材、ゴミ溶融スラグ

1. はじめに

コンクリート用細骨材は、従来より使用されてきた天然砂の枯渇により、それに代わるものとして砕砂や高炉スラグ細骨材などが利用されている。また、今まで利用されなかった低品位の骨材の利用も検討されている。さらに、リサイクルの面からゴミ焼却灰を再溶融・急冷して砂状としたゴミ溶融スラグや、構造物としての役割が終わり解体されたコンクリートを破碎した再生骨材などの利用も検討されている。これらの骨材をコンクリートに使用する場合、物理的および化学的性質をあらかじめ把握しておく必要がある。その中の重要な性質として表乾状態における表乾密度があり、コンクリートの配合設計や表面水率の補正に影響を及ぼす。そのために、骨材の表乾判定が重要となっている。天然骨材の表乾判定には従来よりフローコーン法が適用されてきた。しかし、溶融スラグや再生骨材は天然骨材とは異なり、表面性状がガラス質状や多孔質状であるためフローコーン法は適用するのが困難であるか、相当の熟練が必要である。そのため、フローコーンに代わるものとして、細骨材に食塩を混入し表面水と食塩が接触することにより電気抵抗が急激に変化することを利用した電気抵抗法¹⁾、赤外線反射率

を利用した方法や形状を変更したフローコーンを適用しようとする研究²⁾ などがある。

本研究は、硬化したコンクリート、モルタルやALCなどの含水率の測定に用いられている高周波容量式水分計を用いて、細骨材の表乾判定方法を開発し、それを川砂、砕砂、再生砂、ゴミ溶融スラグ等の各種細骨材に適用し、既存のフローコーン法および電気抵抗法との比較を行ったものである。

2. 測定原理

写真－1に使用した高周波容量式水分計を示す。高周波容量式水分計は、誘電率（真空を1としたときの電気のためやすさ）が80と他の物



写真－1 高周波容量式水分計

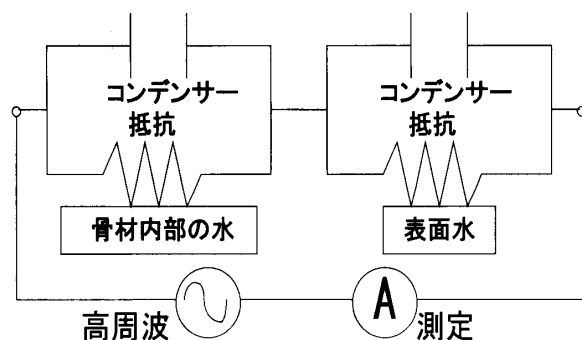
^{*1} 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博士（工学）（正会員）

質に比べて大きな値を示す水の性質を利用して、材料に水分を含むと見かけ上の誘電率が増加し、この増加分をあらかじめ各種材料で求めておいた換算式で換算して水分量として表示するものである。実際には、誘電率そのものを簡単に測定することはできないため、誘電率と比例の関係にある高周波容量を測定している。高周波容量と含水率は直線的な関係となる。

使用した高周波容量式水分計は長さ50mm幅5mmの電極2本が35mmの間隔で配置されており、測定には20MHzの高周波を用いている。この水分計に換算式が登録されていない材料に対しても、含水率と測定値との換算式を求められるように、換算前の数値（以後、表示値と呼ぶ）を表示することができる。表示値は、同じ測定条件ならば同じ値となるが、電極の大きさや間隔などの影響を受けるため、高周波容量の絶対値ではなく相対的な値である。表示値は0～2000の間で表示される

水分計の製造メーカーの情報によると、この測定器は「高周波容量を測定する回路自体が容量分だけを純粋に反映した数値として取り出すのは難しく、高周波抵抗分の多少の影響込みで測定値を表す」ものである。すなわち、測定試料は電気をためるコンデンサーと電気抵抗が並列に結合した電気回路モデルとすることができる。電気抵抗が変化すれば表示値はその影響を受け変動する。

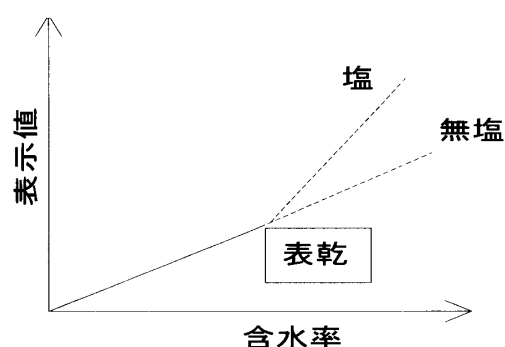
さらに、表面水が存在する試料の場合、骨材内部の水分と表面水とを分けて考えれば、図一



図一 試料中水分の電気回路モデル

ー1に示すようにコンデンサーと抵抗が並列に結合したものが2つ直列につながった平面層状二層構造の系と考えることができる³⁾。ここで、イオン化物質を加えるなどして骨材に存在する水分の抵抗値を低下させれば、抵抗を低下させない場合場合よりも大きな表示値となる。

高周波容量式水分計で細骨材の含水率を測定するに際し、イオン化物質（本研究では食塩とした）を混入させる。表乾状態よりも含水率が低い場合、骨材内部の水と食塩は接触しないため、骨材内部の水はイオン化しない。しかし、表乾状態より高い含水率の場合、骨材外部にある表面水と食塩が接触することにより表面水がイオン化し抵抗が低下することで見かけ上表示値が大きくなる。すなわち、図一2に示すモデルのように、含水率と表示値との直線関係が、表乾状態を境に直線が折れ曲がり、傾きが変化すると考えた。また、この折れ曲がり点の含水率を吸水率とすることができると考えた。



図一2 含水率と表示値の関係モデル

3. 実験概要

以下に示す目的で、種々の含水状態にある細骨材の含水率を、高周波容量式水分計を使用して測定し、含水率と表示値の関係を求めた。

1) 測定原理で示したような折れ曲がり点を実際に現れるかを検証する。

2) 食塩を混入してから時間と表示値の関係を求め、食塩が骨材内部の水分におよぼす影響を明らかにする。

3) 種々の骨材に適用して折れ曲がり点の含水率を求め、フローコーン法や電気抵抗法で判定

した表乾状態での吸水率との比較を行う。

4) 測定感度を高めるために電極の大きさや間隔の影響について検討する

3.1 測定原理の検証

測定するに際し食塩を混入した場合と混入しない場合で、含水率と表示値の関係を求め、食塩を混入した場合に折れ曲がり点が現れるかを検証した。

使用した細骨材は、長良川中流産の川砂を用いた。F.M.は2.68である。

炉乾燥させて絶乾状態にした細骨材と、所定の含水率にするための水を2リットルのペットボトル容器に入れ、その容器を卓上用ボールミルで10分間回転させて攪拌した。ペットボトルは角形であるため、円盤をペットボトルに取り付け回転するようにした。回転数は1分間に約100回とした。その後、24時間以上静置した。細骨材の量は、攪拌性能を考慮しペットボトルの体積で半分程度になるようにした。長良川中流産の川砂の場合は1.5kgとした。

静置したペットボトルに、試料300g当たり食塩5gを入れ、再度10分間回転させて攪拌した。食塩の量は、電気抵抗法に準拠している。

攪拌させた試料を、寸法が横57x縦133x深さ40mmの容器に3層に分けて詰めた。各層をモルタル試験用突き棒で15回ずつ突き固めた。突き固めた試料の表面を容器の高さと一致するようにならし、その上に料理用ラップをかけ、水分計をのせて表示値を読んだ。1本のペットボト

ルで3回測定し平均した。他の試料の場合、ペットボトルに入れる試料の量によっては測定が2回の場合もある。食塩を混入していない試料も、測定前に同じように10分間回転させ攪拌して測定を行った。

各含水率における3回の測定値は食塩の混入の有無にかかわらず平均値から最大±6%以内のばらつきであった。

図-3に食塩を混入して測定した場合と混入させない場合の含水率と表示値の関係を示す。

食塩を混入させない場合、含水率が0%から1.5%までに増加する間に表示値は約80増加したが、含水率が1.5%以上ではほとんど増加していない。

食塩を混入させた場合は、含水率が0%から1.5%まで増加するまでに表示値が直線的に約300増加した。含水率が1.5%を超えると増加の割合が大きくなり、含水率が1.5%から3.0%まで増加する間に表示値は約1000増加した。

表示値の増加の割合が大きくなる点を折れ曲がり点とした。食塩を混入させた場合、図-2に示した含水率と表示値の関係のように含水率が1.5%付近で折れ曲がり点が現れ、測定原理と一致した。

しかし、折れ曲がり点より低い含水率では、食塩を加えた場合と加えない場合の直線は、図-2に示した測定原理のように一致していない。混入した食塩が骨材内部の水に何らかの影響を与えていると考えられる。

3.2 食塩を混入してからの時間の影響

3.1に示したように、折れ曲がり点より低い含水率において、食塩が骨材内部の水に影響をおよぼし、食塩を混入していない場合に比べて幾分か大きな表示値を示している。食塩が骨材内部の水を浸透圧により骨材外部へと浸出させ、その結果表示値が大きくなることが考えられる。また、食塩が骨材内部へ侵入し骨材内部の水をイオン化し抵抗を低下させることにより表示値が大きくなることが考えられる。

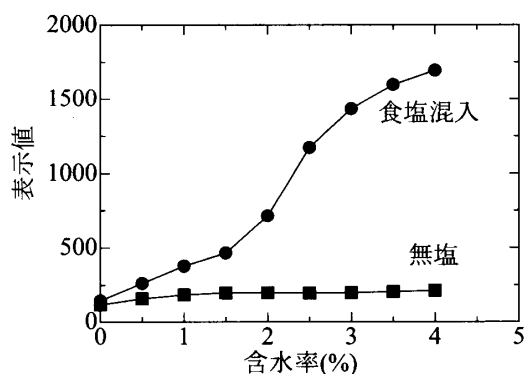
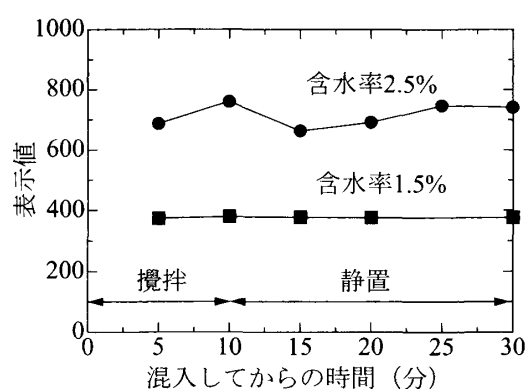


図-3 食塩混入の有無による表示値への影響

本節では、食塩を混入してからの時間経過が表示値におよぼす影響について検討した。

含水率は、折れ曲がり点付近の含水率の1.5%および折れ曲がり点より高い含水率の2.5%について行った。食塩を混入し水と接触させてから攪拌を5分間行った後に測定した場合、10分間攪拌を行った後の場合、10分間攪拌を行った後に5分、10分、20分間静置し測定した場合の表示値の変化を計測した。食塩を混入してからの経過時間と表示値の関係を図－4に示す。



図－4 食塩混入後の表示値の変化

含水率が1.5%の場合、経過時間に関わらず表示値はほとんど一定であった。2.5%の場合、変動はあるが時間とともに表示値が増加する傾向は現れていない。食塩を混入してからの時間の影響は、混入後5分から30分の間にはどちらの含水率においても無いと考えられる。折れ曲がり点より低い含水率で、食塩を混入した場合と混入しない場合の表示値に差が現れる原因は、この実験からは不明でありさらに検討が必要である。

3.3 各種骨材への適用

高周波容量式水分計による方法を各種骨材に適用し、折れ曲がり点が現れる点の含水率を求めた。以下、この測定方法を高周波法と呼ぶ。また、フローコーンによる方法および電気抵抗による方法でも表乾状態を判定し吸水率を求めた。

試料は3.1で用いた方法と同じく2リットルのペットボトルに絶乾試料と所定の含水率にするための水を入れ、10分間回転させて攪拌した後24時間以上静置した。

静置した試料に、高周波法および電気抵抗法を適用するものには食塩を混入して10分間回転させ攪拌した。3.1で用いた容器を使用し高周波容量式水分計で表示値を求めた後、同じ試料を用いて電気抵抗を測定した。電気抵抗は寸法が横40x縦100x深さ40mmの容器に3層15回で突き固めた。電極には40x40mmの銅板を用いてデジタルテスターにより電気抵抗を測定した。

フローコーンによる方法を適用するものは食塩を混入せずに10分間回転させ攪拌した。含水率の高い試料より低い試料の順に試験を行い、初めてスランプした試料を表乾状態と判定し、その時の含水率を吸水率とした。

対象とした骨材は天然骨材、砕砂、再生骨材、ゴミ熔融スラグとした。

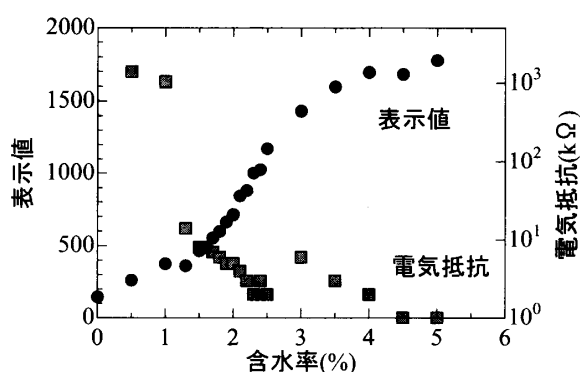
天然骨材として長良川中流産(F.M. 2.67)および下流産(F.M. 1.64)の砂を対象とした。砕砂は、岐阜県内で生コンクリート用に使用されているもの(岐阜県産砕砂と呼ぶ、F.M. 2.76:母岩種不明)、園芸用花崗岩砕砂(F.M. 2.89)、石灰岩砕砂(F.M. 3.19)を対象とした。天然骨材などは粒度ごとに構成する鉱物が異なることが考えられる。しかし、石灰岩砕砂は構成する鉱物が1種類であることから、構成する鉱物個々の吸水率の影響を受けることなく粒度分布の影響を検討しやすいと考え、石灰岩砕砂を1.2mmふるいで分け、1.2mmより粗いもの(石灰岩大と呼ぶ、F.M. 3.91)、細かいもの(石灰岩小と呼ぶ、F.M. 1.73)も対象とした。再生細骨材は、粉碎したコンクリートをすりもみ作用で付着モルタルを除去し、さらに0.6mmふるい上で水洗いし微粒分を除去したもの(再生細骨材Aと呼ぶ、F.M. 3.86)と、コンクリート塊をジョークラッシャーで粉碎しただけのもの(再生細骨材Bと呼ぶ、F.M. 2.82, 0.15mm以下の微粒分を10%含む)を対象と

した。再生細骨材の原コンクリートの種類は不明である。ゴミ熔融スラグは、岐阜県内で入手可能なもののうちシャフト式で処理され製造されたものを対象とした。

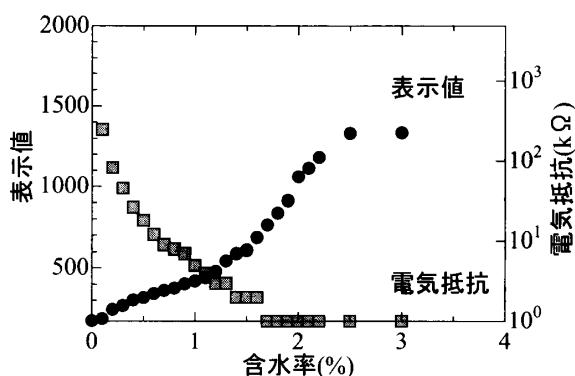
図－５～７に、高周波法で求めた表示値と含水率の関係および電気抵抗法で求めた電気抵抗と含水率との関係を一部示す。電気抵抗は対数値で示している²⁾。

高周波法では最小自乗法で求めた回帰直線の傾きが大きく変化する点を折れ曲がり点とした。ゴミ熔融スラグを除いた他の細骨材で、表示値と含水率の関係において明確な折れ曲がり点が現れた。

電気抵抗法で測定した場合、高含水率と低含水率の各領域において電気抵抗の変化の割合が著しく異なり明確に表乾状態と判定することが



図－５ 含水率と表示値及び電気抵抗の関係
(長良川中流)



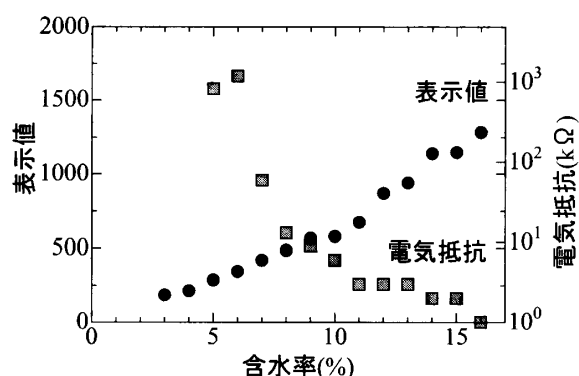
図－６ 含水率と表示値及び電気抵抗の関係
(岐阜県産砕石)

できる場合と、含水率の増加に伴って徐々に電気抵抗が低下し明確に表乾状態と判定できない場合があった。このため、電気抵抗が10kΩ以下の領域で、抵抗値の減少の割合が2kΩ以下になる点を表乾状態と判定した。表－１には、各種細骨材において、高周波法で求めた折れ曲がり点が現れる含水率、フローコーン法および電気抵抗法で求めた吸水率を示す。

表－１ 各種方法で得られた吸水率

種 類	吸水率(%)		
	高周波容量法	フローコーン法	電気抵抗法
長良川中流	1.6	2.2	1.5
長良川下流	2.0	2.0	1.8
岐阜県産砕砂	1.2	1.2	1.0
花崗岩砕砂	1.0	1.1	1.0
石灰岩砕砂	0.7	1.0	0.7
石灰岩大	0.7	1.3	0.8
石灰岩小	0.6	0.6	0.8
再生細骨材A	4.0	4.9	3.9
再生細骨材B	11.0	判定不能	10.0
ゴミ熔融スラグ	0.9*	0.3	0.6

*：電極形状を変更して測定



図－７ 含水率と表示値及び電気抵抗の関係
(再生細骨材B)

フローコーン法の場合、再生骨材Bは測定した2%以上の含水率ではスランプせず判定不能であった。また、ゴミ熔融スラグは、締め固め程度の少しの差でスランプする含水率が異なったため、実験を繰り返しスランプする頻度の高い含水率を吸水率とした。

石灰石の場合、フローコーン法では粒度分布の違いにより吸水率は異なり粒径が細かいものの割合が大きなものほど小さな吸水率となった。高周波法と電気抵抗法では、粒度分布に関わらずほぼ同じ値となり、また高周波法と電気抵抗法とは同じ値となっている。

他の細骨材でも、フローコーン法で求めた吸水率と高周波法および電気抵抗法で求めた吸水率とは一致しない場合が多い。しかし、高周波法と電気抵抗法での吸水率は同じ値となることが多い。どちらの方法も交流（高周波）または直流を用いて電気抵抗等の変化を観察する方法であるため値は一致すると考えられる。

高周波法で求めた折れ曲がり点は、細骨材における表乾判定の一つの指標となると考えられる。また、含水率と表示値の関係をあらかじめ求めておけば、細骨材の水分管理にも用いることができると考えられる。

3.4 電極形状の影響

ゴミ熔融スラグでは、明確な折れ曲がり点が現れなかった。電気抵抗法で求めた吸水率が0.6%であり、全体的に少ない水分量を測定することになり、測定器の感度が低く折れ曲がり点が現れなかったと考えられる。測定器の感度を上げるために、縦120x横30mmのアルミ板をそれぞれの電極に取り付けた。電極の最小間隔は3mmとした。この改良した電極と従来の電極を用いて求めた含水率と表示値の関係を図-8に示す。従来型の電極では明確に現れなかった折れ曲がり点が、改良型の電極では現れた。さらに電極を改良することにより正確な測定が行うことができると考えられる。

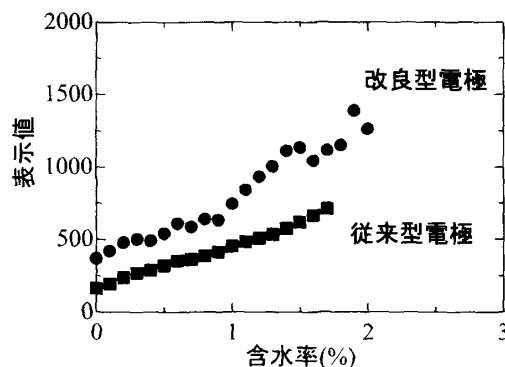


図-8 含水率と表示値の関係
(ゴミ熔融スラグ)

4. まとめ

高周波容量式水分計を用いた細骨材の表乾判定方法を開発し、これを種々の細骨材に適用し、以下の結果を得た。

実験したすべての骨材において、含水率と水分計の表示値との関係に明確な折れ曲がり点が現れた。この点が現れるときの含水率は、フローコーン法による吸水率とは異なるが、電気抵抗法で求めた吸水率とはほぼ一致している。この折れ曲がり点は表乾判定の指標となると考えられる。

また、含水率と表示値の関係をあらかじめ求めておけば、細骨材の水分管理にも利用できると思われる。

参考文献

- 1) 土木学会：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針，コンクリートライブラリー110，pp.53-64，2003.3
- 2) 竹内ほか：細骨材の表乾判定試験方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.77-82，2003.6
- 3) 花井哲也：不均質構造と誘電率，吉岡書店，pp.191-203，2000.1

謝辞：実験に協力してくれた岐阜高専卒研究生に感謝いたします。