

4. まとめ

本研究では、粗骨材の粒径や p/g が上面振動締固め試験により得られたポーラスコンクリートの空隙形状に及ぼす影響を、X線CT法を用いて詳細に検討し、透水性状との関係を考察した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 本研究で用いたX線CT画像を用いた計測により、透水性状に関わるポーラスコンクリートの空隙率、空隙径および楕円率を計測できる。
- 2) p/g が同じだと、全体の空隙率が同じであっても、粗骨材の粒径が大きいくほど、空隙径の平均値の最大値が大きくなったが、その最小値はほぼ同じだった。また粗骨材の粒径が大きいくほど、粗骨材の形状の影響が大きくなり、楕円率が高く、そのばらつきや変動も大きくなった。そのため、粗骨材の粒径が大きくなった場合、透水係数はそれほど大きくなるが、流れの乱れが多くなるため、水頭差による透水係数の低下が顕著となった。
- 3) 粗骨材の粒径が同じでも、 p/g が大きくなると、全体の空隙率が減少するとともに、内部の空隙径の平均値の最大値や最小値が減少し、ばらつきも小さくなった。一方、 p/g が小さいと、粗骨材の形状の影響が大きくなり、楕円率が高く、またばらつきや変動も大きくなった。そのため、 p/g が小さくなると、透水係数が急激に大きくなった。一方で、流れの乱れも大きくなり、水頭差による透水係数の低下が大きくなった。

今後、連続性や複雑さなどを評価する試みを追加し、ポーラスコンクリート中の流体の流れに関する空隙特性を解明していきたい。

謝辞

本研究はJSPS科研費 JP16H04421の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書（2003）
- 2) 日本コンクリート工学協会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立に関する委員会報告書（2015）
- 3) 大友鉄平、大塚浩司、武田三弘：ポーラスコンクリートの三次元的空隙性状と植物の生長、セメント・コンクリート論文集、No. 59、pp. 577-584（2005）
- 4) 大谷順：地盤材料を対象としたX線CTの利用の高度化、地盤工学会誌、Vol. 57、No. 11、pp. 16-19、（2009）
- 5) 麓隆行、平井慎一、溝口達也、松本嶺：X線CT画像の3次元粒子計測による碎石の粒子形状の分析、コンクリート工学年次論文集、Vol. 34、No. 1、pp. 70-75(2012)
- 6) 麓隆行：X線CTを用いた3次元画像計測のポーラスコンクリート内部の物性評価への適用性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 36、No. 1、pp. 1672-1677(2014)
- 7) 麓隆行、柏木洗一：粗骨材粒子径が碎石粉を用いた舗装用透水性コンクリートの性状に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No. 62、pp. 269-276（2008）
- 8) 麓隆行：上面振動締固め試験によるポーラスコンクリート試験舗装の施工性評価に関する検討、建設用原材料、Vol. 23、No. 1、pp. 27-32(2015)
- 9) 出雲健司：充填シミュレーションの結果を使ったポーラスコンクリートの簡易配合設計法、第62回セメント技術大会講演要旨、pp. 114-115（2008）
- 10) 麓隆行：新しい機構のX線CTの開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用、土木学会論文集E2、Vol. 69、No. 2、pp. 182-191(2013)

(2017年6月29日受付 2017年8月9日受理)

比抵抗を用いた砕砂の研磨レベルの評価法

EVALUATION METHOD FOR GRINDING LEVEL OF CRUSHED SAND WITH RESISTIVITY

今井忠男*・木崎彰久**・青木裕哉***
by Tadao IMAI, Akihisa KIZAKI and Yuya AOKI

1. はじめに

コンクリート骨材として、現在でも天然砂が多く用いられているが、海浜の多くは採掘が禁止されており、採掘可能な陸砂などの天然砂を産する地域は少ないため、今後は砕砂への転換が期待されている。しかしながら、砕砂は流動性が悪く、コンクリートに配合したとき、スランプ値が低くなるため利用があまり進んでいない¹⁾。

砕砂を骨材として用いたときのコンクリートの流動性については、以前より多くの研究が行われてきているが²⁾、著者らは、粒子の流動性は、粒子の表面粗さと、粒子の比表面積に支配されると考えてきた³⁾。粒径が小さく、表面が粗いと比表面積が大きくなり、含水した場合、粒子間に保たれる結合水が多くなる。粒子間の結合水は、結合力として働き、粒子の流動性を低下させると考えられる。つまり、粒径の小さい細骨材の表面粗さが、フレッシュコン

クリート全体の流動性を支配していると、推察される³⁾。したがって、砕砂をコンクリート用骨材に用いるには、天然砂と同程度に、表面が研磨されている必要がある。

これまで著者らは、砕砂の研磨法について、研磨が進みにくい従来法に変わり、噴流を用いた研磨法について研究を行ってきた⁴⁾。その結果、噴流によって、砕砂を天然砂と同程度の流動性に研磨できることを明らかにしてきた。しかし、砕砂の流動性をスランプ値で評価するには時間がかかり、研磨作業中にリアルタイムで研磨レベルを評価することはできなかった。

これまでに、大島⁵⁾は、細骨材の表面水率と電気抵抗値(比抵抗)との関係を明らかにしている。そこで、著者らは、粒子の表面粗さは、表面水率と関係があると推定し、表面粗さを比抵抗で評価できると考えた。

表1 実験試料の物性値

試料名	粒径範囲(mm)	密度(g/cm ³)	岩種	産地
砕砂	0.075~2.0	2.65	硬質砂岩	神奈川県
天然砂	0.075~2.0	2.66	-	新潟県



写真1 試料砕砂の外観

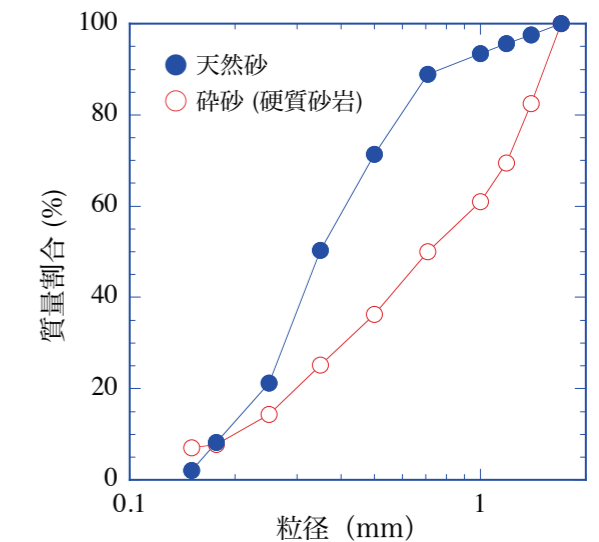


図1 試料の粒度分布

* 秋田大学 教授 国際資源学部 (〒010-0852 秋田市手形学園町1-1)、**秋田大学 准教授 国際資源学部、*** 元秋田大学 学生 工学資源学部

本研究では、砕砂の研磨レベルについて、スランプ試験をせずに、濡れた状態の砕砂の比抵抗を測定することで、短時間に研磨レベルを評価する手法について検討した。具体的には、研磨中の試料をサンプリングし、水分量を調整したのち、一定の容器に詰めて比抵抗を測定することで、比抵抗から研磨レベルを推定する手法について検討した。以下に詳細を報告する。

2. 実験方法

2.1 試料

本実験に用いた砕砂と天然砂の物性を表1に示す。砕砂の原石は神奈川県産の硬質砂岩で、密度が大きく、かつ極めて硬質である。写真1にこの砕砂工場で生産された、粒径0.075~2.0mmの砕砂を示す。この砕砂は、この状態で製品として出荷されている

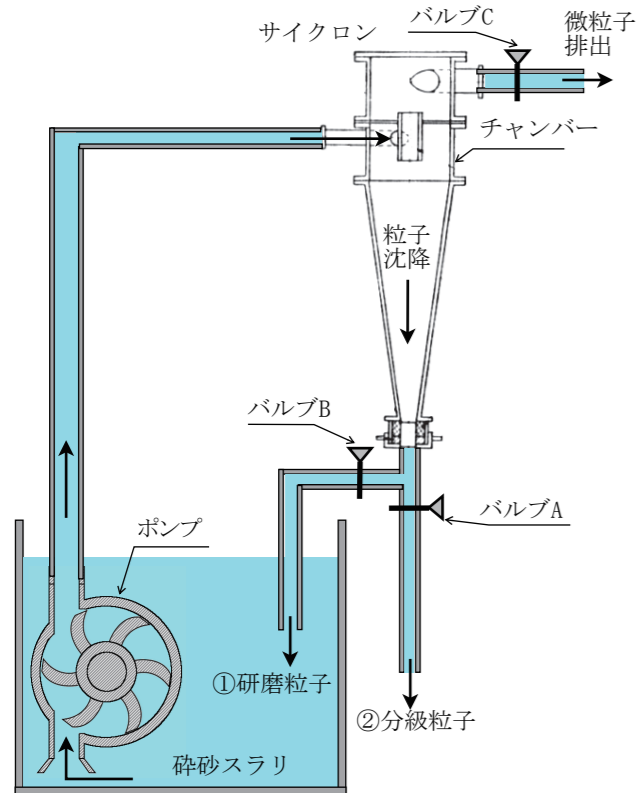


図2 サイクロン式の噴流研磨機⁶⁾

表2 噴流研磨実験の条件⁶⁾

水量 (L)	26.4
砕砂量 (kg)	11.2
スラリー濃度 (%)	12
砂サンプリング量 (mL)	約500

ものである。図1に砕砂と天然砂の粒度分布を示す。この砕砂は、天然砂に比較し平均粒径が大きく、細粒分が少ないことが特徴である。

2.2 サイクロンによる砕砂の噴流研磨法

図2に、従来のサイクロンを利用した砕砂の噴流研磨システムを示す。図中のバルブB、バルブAおよびCの操作によって、本装置は従来の分級機あるいは噴流研磨装置として機能させることができる。本システムの詳細については文献[6]を参照されたい。サイクロンを噴流研磨装置として使用する場合は、吹込み流速が、粒径0.1mm程度の砕砂が慣性衝突する速度以上になるよう、ポンプ流量を設定する必要がある。サイクロン内で慣性衝突し研磨された砕砂の粒子は、すべてサイクロン下部から排出されてタンクに戻り、再びサイクロン内に吹き込まれて研磨を繰り返すことができる。

室内実験においては、流送ポンプには流量200L/minの性能のものを用い、回転数によって任意に流速をコントロールした。本装置では、ポンプの流量が極めて低くなければ、戻りの流量でタンク内の攪拌が進み、タンク内のスラリー濃度は理論値とほぼ一致する。今回の室内実験の条件を表2に示した。スラリーの体積濃度は、12%になるように水と砕砂を配合し、一定の研磨回数ごとに500mL程度の砕砂を採取して、その流動性を調べた。本実験では、少ない試料量でかつ短時間に研磨を進めるため、水量の少ないタンク(26.4L)を使用した。なお、1回の研磨時間は、スラリー量(=タンク量/(1-濃度))をポンプ流量で割ると得られる。

2.3 砕砂の流動性評価法

(1)フローコーンを用いた砕砂のスランプ試験法

研磨回数ごとの砕砂の流動性を評価するため、写真2に示すフローコーン(JISA1109)を用いて、砕砂のスランプ試験を行った。本法は、砂の流動性を評価するための独自の方法で、試料の粒度分布を一定に調整し、粒子の形状および表面粗さのみが、流動性を支配する条件で行う試験である。詳細は文献[4]を参照されたい。砕砂は一定の粒度分布に調整したのち、ベントナイト泥水(ベントナイト/水質量比=6.5)と体積割合1:1で混合し、泥水で

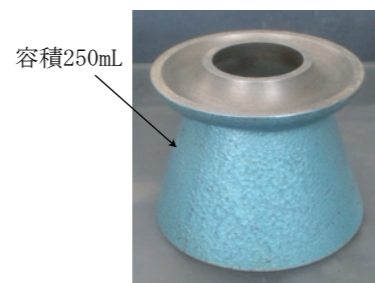


写真2 スランプ試験に用いたフローコーン

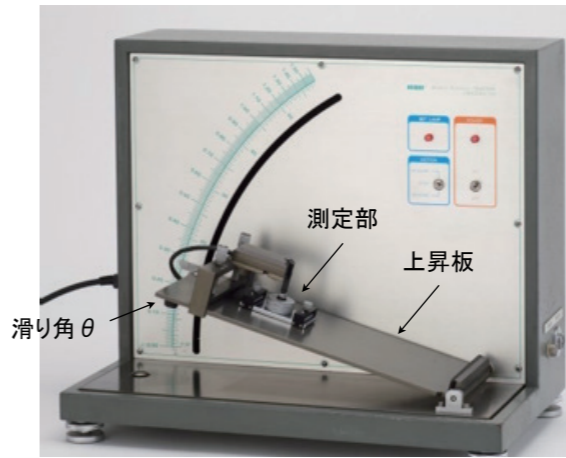


写真3 静摩擦係数測定器

表3 摩擦係数および比抵抗測定に用いた砕砂の粒度

試料番号	分級後の平均粒径 (mm)
(1)	0.075
(2)	0.163
(3)	0.213
(4)	0.300
(5)	0.425
(6)	0.605
(7)	0.855
(8)	1.095
(9)	1.290
(10)	1.550
(11)	1.850

飽和させた。砕砂はフローコーンに入れて固めたのちに型を抜き、崩れた砕砂の山の高さを計測した。フローコーンの高さとし崩れた砕砂の高さとの差をスランプ値Sとして、流動性の指標として用いた。

また、研磨後の粒子は顕微鏡で観察し、表面の粗さや形状について目視で評価した。

(2) 砕砂の摩擦係数の測定法

写真3に、静摩擦係数測定器を示す(新東科学社製、TYPE 10)。また、写真4に測定部の拡大図を示す。本測定器では、上昇板と平面圧子に、測定した

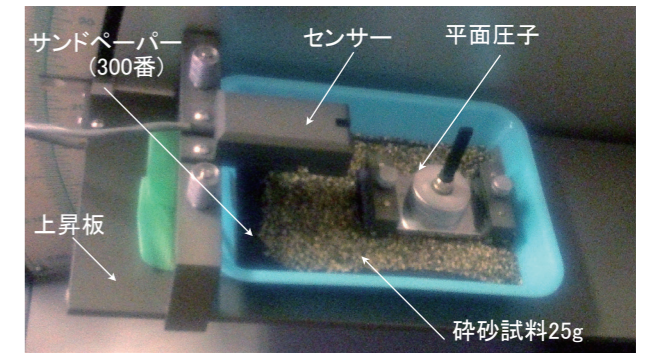


写真4 測定部の拡大図

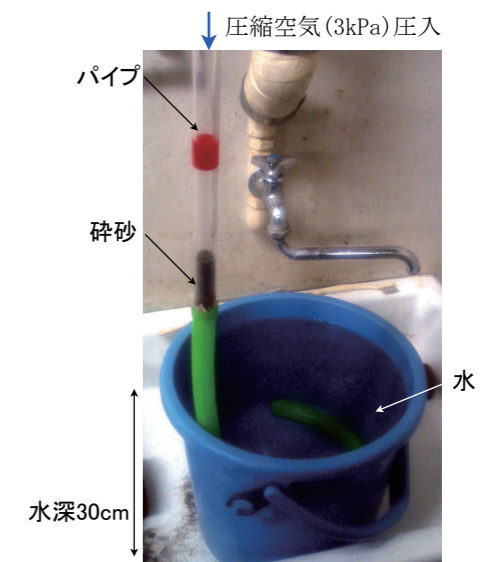


写真5 比抵抗測定用試料の水分調整法

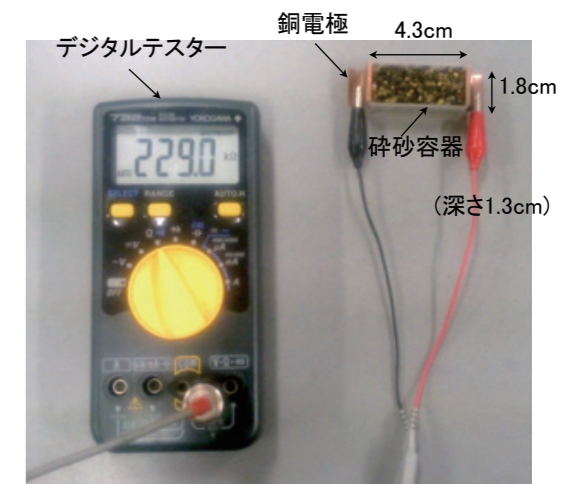


写真6 砕砂の比抵抗測定装置

い試験片をそれぞれ取り付け、試験片同士の摩擦係数を調べることができる。本実験では、上昇板の上に固定された容器に約25gの乾燥した試料を入れ、砕砂の薄層を作った。また、砕砂容器と平面圧子の底面には、それぞれ300番のサンドペーパーを取り付け、十分な摩擦抵抗を付加したので、この両者に挟まれた砕砂の薄層の摩擦係数を測定す

ることができる。上昇板は、自動的に水平位置から勾配を大きくさせていき、平面圧力が滑り落ちる瞬間をセンサーが検知して停止する。このときの上昇版の角度(滑り角) θ を測定した。1つの試料につき、滑り角 θ を3回測定し、その平均値を用いた。また、砕砂の摩擦係数 μ は、この滑り角 θ を用いて $\mu = \tan \theta$ と表すことができる。

表3に示すように、砕砂試料は、試料番号(1)～(11)の11段階に細かく分級し、粒径ごとの摩擦係数を測定した。

(3) デジタルテスターを用いた砕砂の比抵抗の測定法

砕砂の比抵抗は、その含水状態に支配されるため、砕砂中の自由水を取り除き、毛細管力による結合水の状態にして測定した。写真5に、砕砂中の自由水の除去法を示す。摩擦係数の測定に用いた分級後の砕砂試料(表3)を湿潤させたのち、砕砂約15gをパイプ内(内径 ϕ 17mm)に投入し、パイプ端面に設置した網によって試料をパイプ内に固定した。次に、3kPaの圧縮空気を流入させ、砕砂中の自由水

を排出した。本実験では、パイプを水深30cmのバケツに挿入し、空気圧を約3kPaに調整した。空気を1分くらい流入させると、自由水の排出はほぼ止まった。

次に、結合水の状態にした砕砂試料は、写真6に示す装置で比抵抗を測定した。試料は、写真に示す小容器の中に満し、容器両端に設置した銅電極を用い、試料の全抵抗値をデジタルテスターで測定した。砕砂の比抵抗 $R(\Omega m)$ は、全抵抗値 $r(\Omega)$ 、容器の断面積 $A(m^2)$ および長さ $L(m)$ を用いて、次式で算定した。

$$R = r(A/L) \quad \dots (1)$$

また、本実験では自由水を取り除いたときの結合水状態での試料の含水比を測定し、これを含水比とした。

3. 実験結果および考察

3.1 砕砂の研磨回数とスランプ値との関係

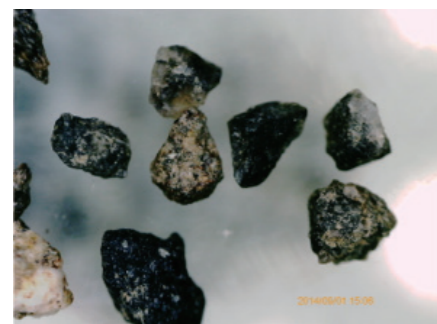
(1) 従来スランプ試験

写真7に噴流研磨による砕砂粒子の研磨の様子を示す。この写真の粒子は、粒径が1.00～2.00mmの範囲の比較的大きな粒子を示している。写真より、砕砂の初期状態では粒子表面の凹凸が激しく角ばっているが、研磨回数100回では表面が多少滑らかとなり、400回では天然砂以上に表面が研磨されて滑らかとなっていることがわかる。他の粒径の粒子も、研磨回数400回では天然砂と同程度に滑らかになっていることを確認した。

次に、これら研磨した砕砂を天然砂と同じ粒度分布に調整して、スランプ試験をした結果を写真8に示す。写真より、研磨前(初期)の砕砂は、あまり流動せず、コーン形状が多少崩れた程度であるが、研磨回数100回では、かなり流動性が良くなり、天然砂のスランプ値の70%に達していることがわかる。さらに、研磨回数400回では、天然砂と同程度の流動性(スランプ値 $S=4.5\text{cm}$)に達した。

(2) スランプ値による研磨の基準値

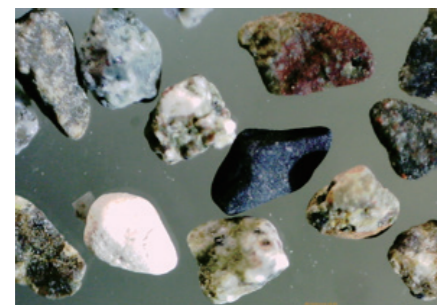
これらスランプ試験の結果を図3にまとめて示



砕砂初期 2mm



砕砂研磨100回 2mm



砕砂研磨400回 2mm



天然砂 2mm

写真7 砕砂の顕微鏡写真⁶⁾ (粒径: 1.00～2.00mm)



砕砂初期 (S=0.9cm)



天然砂 (S=4.8cm)



砕砂研磨100回 (S=3.4cm)



砕砂研磨400回 (S=4.5cm)

写真8 砕砂のスランプ試験結果

す。図より、研磨回数100回までにスランプ値は急増し、研磨効率は2.3cm/100回と極めて良いことがわかる。その後、研磨回数が増加するとスランプ値は緩やかな増加傾向に変わり、100～200回では、研磨効率は0.5cm/100回に激減する。このような研磨効率の変化から、本研磨法では、最初の100回程度の効率が良く、それ以上の研磨はコストに見合わないと思われる。さらに、研磨回数100回で、本試料は天然砂の70%程度の流動性を示し、現状の砕砂製品(初期値)の20%と比較し、十分に実用的と考えられることから、本研究では、この値を研磨の基準値に設定した。

(3) スランプ試験の問題点

このようなスランプ値で、砕砂の流動性を評価するには、研磨中の砕砂をサンプリングしたのち、数時間乾燥させ、粒度分布を調整して泥水に浸し、スランプ試験を行わなければならない。この方法では結果を得るまでに、およそ1日の時間を要するため、研磨レベルをリアルタイムに評価することはできない。

3.2 研磨による砕砂の摩擦係数の変化

噴流研磨した砕砂の摩擦係数と粒径の関係を図4に示す。図より、砕砂粒子は粒径が小さいと摩擦係数が大きく、粒径が大きくなるに従い、摩擦係数が小さくなる傾向にあることがわかる。顕微鏡での観察によると、研磨後の粒子は、粒径の大き

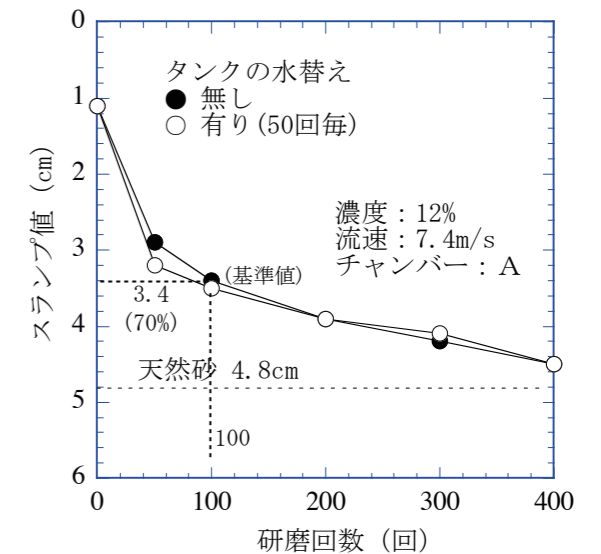


図3 研磨実験における砕砂のスランプ値と研磨回数との関係⁶⁾

いものは良く研磨され表面が滑らかとなっているが、粒径が小さくなるに従い、研磨は進まないことがわかっている⁵⁾。この現象は天然砂においても同様である。これら観察結果と図4の傾向は調和的である。また、砕砂のスランプ値ごとの傾向を比較すると、粒径0.3mm以上においては、砕砂のスランプ値が大きいと、摩擦係数が小さい傾向にあることがわかる。とくに、研磨前(初期、従来製品)の砕砂粒子では、粒径0.6mm以上で摩擦係数はほと

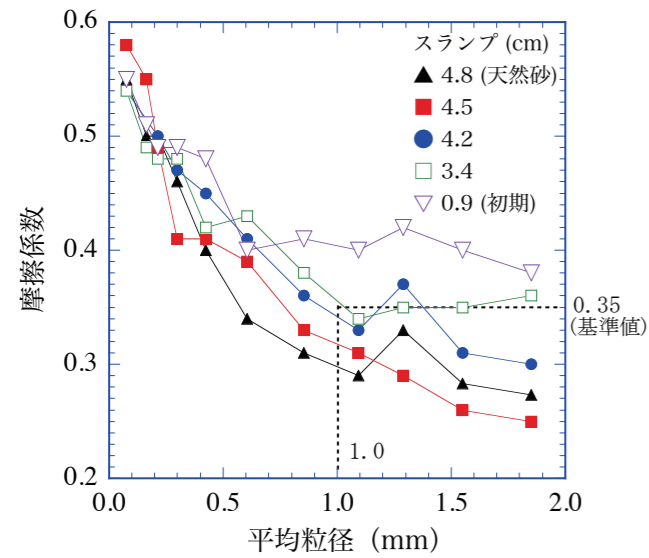


図4 砕砂の摩擦係数と平均粒径との関係

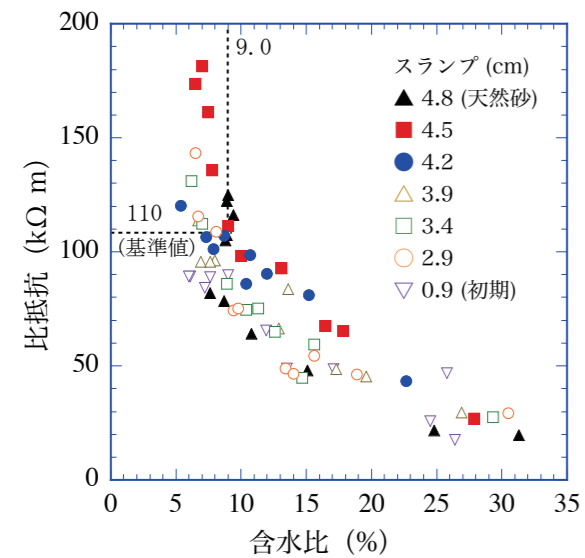


図6 砕砂の含水比と比抵抗との関係

んど低下しておらず、従来法では、ほとんど研磨されていないことがわかる。なお、粒径1.3mm以上では、スランプ値4.5cmの試料に対し、スランプ値4.8cmの天然砂の方が、摩擦係数が少し大きくなり、研磨レベルが低い傾向になっている。この理由は、天然砂は粒径ごとに堆積環境が異なることが一因と考えられる。

ここで、スランプ値3.4cm(天然砂の70%、研磨100回)の結果を、研磨の基準値とすると、最も良く研磨されている粒径は1.0mm以上で、その粒子の摩擦係数は、約0.35程度であることがわかる。よって、研磨した砕砂試料のうち、粒径1.0mm以上の摩擦係数が0.35以下なら、その砕砂は研磨の基準に達していると考えられる。

3.3 砕砂の摩擦係数と比抵抗の関係

はじめに、結合水状態の試料の含水比と摩擦係

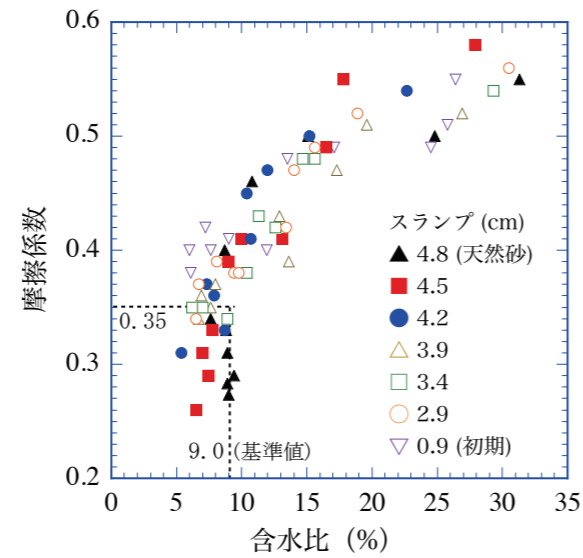


図5 砕砂の含水比と摩擦係数との関係

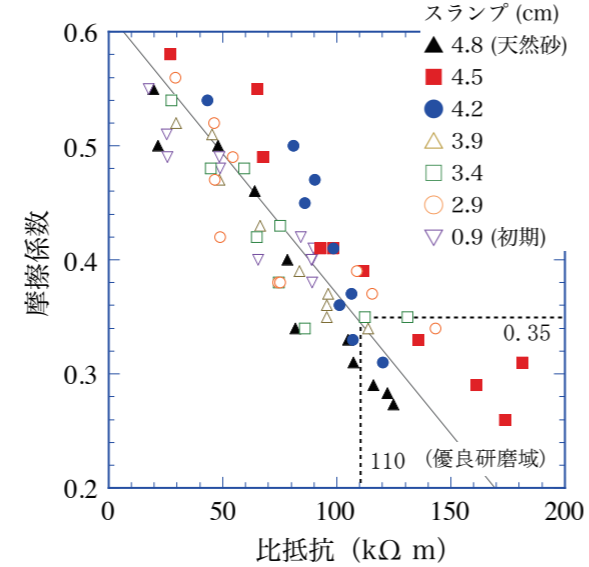


図7 砕砂の比抵抗と摩擦係数との関係

表7 比抵抗による流動性評価の基準値

測定試料粒径 (mm)	比抵抗 (kΩ m)	流動性 (天然砂割合%)
1.0 以上	110 以上	70 以上

数との関係を図5に示した。図より、研磨の基準となる摩擦係数0.35以上では、摩擦係数と含水比はおおよそ比例の関係を示しており、粒子表面の凹凸は摩擦係数と粒子間の結合水を増加させることがわかった。また、摩擦係数0.35以下では、含水比はあまり変化せず、表面形状にあまり差がないことが推察される。以上の結果より、含水比による研磨の基準は9%以下と考えられる。

次に、含水比と比抵抗との関係を図6に示した。図より、摩擦係数の傾向と同様、含水比9%以上では、比抵抗と含水比は比例関係にあり、粒子表面の凹凸は粒子間の結合水を増加させ、それによって比抵抗が低下することがわかった。また、含水比9%以下で、十分に研磨された粒子の含水比は、あまり変化しないが、比抵抗は急激に高くなることから、比抵抗による研磨の基準は、110kΩm以上と考えられる。

次に、図7に研磨した砕砂の結合水状態での比抵抗と乾燥状態での摩擦係数との関係を示す。図より、砕砂の比抵抗と摩擦係数は比例しており、結合水状態の比抵抗によって、乾燥時の摩擦係数が推定できることがわかった。

表7に、比抵抗による研磨の基準値についてまとめた。噴流研磨法では、研磨した砕砂のうち、粒径1.0mm以上の砕砂の比抵抗をサンプリングし、結合水状態にして比抵抗を測定したとき、その比抵抗が110kΩm以上ならば、およそ天然砂の70%以上に研磨されていると推定できる。なお、この基準では、天然砂の流動性も評価できることから、他の研磨法にも応用が可能と推察される。

以上の議論から、本手法を用いて、砕砂の比抵抗をその場で測定することで、研磨のレベルをリアルタイムで評価することが可能となった。

4. まとめ

本研究では、砕砂の研磨レベルについて、スランプ試験をせずに、結合水状態の砕砂の比抵抗を測定することで、短時間に研磨レベルを評価する手法を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本研磨法では、砕砂の流動性レベルの基準を、天然砂の70%程度に設定することが合理的である。

- (2) 研磨の進んだ砕砂では、粒径が大きくなるに従い摩擦係数が小さくなり、研磨の進んでいない砕砂では、粒径0.6mm以上で摩擦係数は低下せず、約0.4で一定となる。
- (3) 乾燥した粒子の摩擦係数と結合水状態の比抵抗の関係は直線的で負の相関がある。
- (4) 噴流研磨法の場合、天然砂比70%程度の研磨レベルの評価には、粒径1.0mm以上の粒子の、摩擦係数が0.35以下あるいは比抵抗が110kΩm以上の指標が有効である。

謝辞

本研究において、砕砂の噴流研磨につきましては、(株)氣工社様のご協力を得ましたことをここに記し、感謝を申し上げます。

引用文献

- 1) 今井忠男、平澤祐介、杉本文男(2010)：砕石による骨材の必要な粒度特性とその一貫的な生産法、建設用原材料、Vol. 18、No. 1、pp. 9-16.
- 2) 田澤栄一、米倉亜州夫、西岡直樹、石田雅彦(1989)：細骨材の粒形の相違がコンクリートの諸性質に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、11(1)、pp. 35-40.
- 3) 今井忠男、板垣和貴、木崎彰久(2016)：玉割砕石を骨材に用いたフレッシュコンクリートの流動性、砂利時報、Vol. 63、No. 3、pp. 18-25.
- 4) 今井忠男、木崎彰久、杉本文男(2015)：噴流を利用した砕砂の研磨法、建設用原材料、Vol. 30、No. 1、pp. 6-12.
- 5) 大島正寛(2015)：細骨材の電気抵抗値を指標とした表面水率の簡易的管理についての研究、第42回全国砕石技術大会資料、pp. 17-20.
- 6) 今井忠男、木崎彰久、小埜貴規、小溝芳春、齋藤祐好、杉本文男(2016)：サイクロン式分級機を用いた砕砂の噴流研磨法の実用性、建設用原材料、Vol. 24、No. 1、pp. 14-20.

(2017年6月30日受付 2017年8月23日受理)