

論文 セメントペーストの圧縮強度とドリル掘削粉の物性との相関に関する研究

田中 俊成*1・酒井 雄也*2

要旨：セメントペースト供試体から採取したドリル掘削粉のヘリウム真密度、粒度分布、空隙量と供試体の圧縮強度の関係を比較した。供試体の圧縮強度と掘削粉のヘリウム真密度には有意な相関が見られたが、その関係は水セメント比によって異なっていた。また、掘削粉の粒度分布は水セメント比や養生方法によって相違はなく、したがって供試体の圧縮強度とも有意な相関が見られなかった。一方、供試体の圧縮強度と掘削粉の空隙量には水セメント比や養生方法によらず高い相関が見られた。

キーワード：セメントペースト、ドリル掘削粉、圧縮強度、ヘリウム真密度、粒度分布、空隙量

1. はじめに

コンクリート構造物を構成するコンクリート（構造体コンクリート）の圧縮強度は、構造物の安全性を把握するために不可欠な材料情報であるため、竣工時や、構造物に変状が生じた場合、荷重作用条件を変更する場合などに検査が求められる¹⁾。構造体コンクリートの圧縮強度は JIS A 1107; 2012 や ISO 1920-11; 2013 に規定されるように、構造物より直径 7.5 から 10 cm のコア供試体を数本採取し、圧縮強度試験を行うことで測定される。しかし、コア供試体採取のためには、重さ十数キロのコアドリルの運搬や、足場の設置等の作業に大きな労力がかかる²⁾。さらに構造物に与える損傷も小さくない^{3,4)}。特に高強度コンクリートを使用した超高層建築物や歴史的な重要建造物の場合は、残存耐力や Authenticity（真正性）の保存の観点から検査において建築物への損傷を可能な限り抑えることが求められるため^{3,5)}、コア供試体を採取できない場合がある。このような背景から、損傷を抑えた圧縮強度の推定方法がいくつか検討されている。まず、非破壊試験として、反発硬度や超音波伝播時間に基づく構造体コンクリートの圧縮強度推定方法が検討されているが、これらの測定値はいずれも、表面含水率や、骨材や鉄筋との位置関係などの実験条件の影響を受けて変化することが知られており、その影響の補正は未だ困難である^{1),3),6)}。また、検査自体は非破壊であるものの、コンクリート表面に仕上げ材がある場合は、それを除去する必要があるため（NDIS 2426; 2014; JIS A 1155; 2012）、外装として仕上げ材を施した重要建造物の場合には検査を実施できない。一方で、微破壊試験としては、直径数 cm の小径コア供試体の圧縮強度に基づいた構造体コンクリートの圧縮強度推定方法が提案されているが、コア寸法が小さいが故に、供試体内での粗骨材配置に起因する測定強度のばらつきが大きいこと

や、検査対象とするコンクリートの強度が小さい場合にはそもそもコア採取が不可能といった問題がある^{4,7)}。

そこで本研究では、最小限の損傷での圧縮強度推定方法として、微小なドリルによるドリル掘削粉の分析に基づくアプローチが有効であるかを検討した。筆者らは過去に、損傷を最小限に抑制した中性化深さ測定手法として、直径 1 mm のドリル孔を用いた方法⁸⁾を検討している。強度推定用の掘削粉採取のために穿孔したドリル孔を使用し、中性化深さを測定することが可能な点も本手法の特徴と言える。コンクリートの圧縮強度は硬化したセメントペーストの強度や遷移帯厚さ、骨材種類などに影響を受けることが知られているが^{9,10)}、本研究ではまずはセメントペーストを対象供試体の強度に関連する情報がドリル掘削粉に残存しているかを検討した。セメントペースト供試体の圧縮強度試験を実施するとともに、同一条件で作製した供試体から、ドリルを使用してドリル掘削粉を採取した。掘削粉については、ヘリウム真密度（He 真密度）、粒度分布、空隙構造を分析項目とした。そして、掘削粉を分析することで得られる種々の情報と供試体圧縮強度の相関を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験手順

まず、水セメント比（W/C）や養生条件を変えたセメントペースト供試体を作製した。作製した供試体の情報を表-1 に示す。本論文では、供試体名を P1-20A などと表記する（ハイフンの前の文字列は表-1 に示したシリーズ名を、続く数字とアルファベットは水セメント比と養生方法を表す）。使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、P1 シリーズで使用了ものは密度 3.15 g/cm³、比表面積 3480 cm²/g、P2 シリーズで使用了ものは密度 3.15 g/cm³、比表面積 3380 cm²/g である。

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻（学生会員）

*2 東京大学 生産技術研究所講師 工博（正会員）

表－1 供試体の情報

シリーズ名	W/C	単位量 (kg/m ³)					養生方法	用途 (本数)	掘削粉の 分析項目
		W	C	SP ^{※1}	増粘剤	消泡剤			
P1	20	389	1943	58	0	0.000	気中 (A) ^{※2} 封緘 (S) 水中 (W)	圧縮試験 (2本) 掘削粉採取 (1本)	He真密度 粒度分布
	30	487	1622	15	0	0.000			
	40	558	1394	0	0	0.000			
	50	613	1225	0	18	0.089			
	60	655	1092	0	19	0.095			
	70	689	984	0	20	0.100			
P2	30	487	1622	15	0	0.000	気中 (A) ^{※2} 水中 (W)	圧縮試験 (3本) 掘削粉採取 (3本)	空隙構造
	40	558	1394	0	0	0.000			
	50	603	1225	0	9	0.045			
	60	664	1092	0	10	0.048			
	70	689	984	0	20	0.100			

※1 ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤

※2 温度20℃ 平均湿度60%の室内に静置

供試体寸法は直径 5 cm、高さ 10 cm である。P1 シリーズでは各配合・養生条件ごとに供試体を 3 本作製し、2 本は圧縮強度試験用、1 本はドリル掘削粉採取用とした。28 日間所定の養生を行い、圧縮強度試験用の供試体 2 本は 20℃の室内で 28 日間乾燥させた。養生および乾燥期間中の室内の相対湿度 (RH) は 60±10%であった。乾燥過程の後、圧縮強度試験を行い、圧縮強度を 2 体の平均値として算出した。28 日間の乾燥過程は、供試体の含水状態が強度に影響を及ぼすこと¹¹⁾を考慮し、異なる条件で作製した供試体間の含水率の差を抑える目的で設けた。粉末採取用の供試体 1 本については養生終了時に、供試体の底面から 2 cm から 8 cm の範囲において、深さ 1 cm の穴を複数穿孔し、掘削粉を採取した。ドリルによる掘削作業、および掘削粉の採取は直径 1 mm 以下のドリルでも実施可能であったが、今回は作業時間短縮のため直径 4 mm のドリルを使用した。採取した掘削粉を使用して He 真密度と、粒度分布を測定した。次に、P2 シリーズでは各配合・養生ごとに供試体を 6 本作製し、3 本は圧縮強度試験用、3 本はドリル掘削粉採取用とした。28 日間所定の養生を行ったのち、圧縮強度試験用の 3 本は、真空飽水处理¹²⁾を行ったうえで圧縮強度試験を実施した。そして、圧縮強度を 3 体の平均値として算出した。真空飽水处理は P1 シリーズの乾燥過程と同様の目的で供試体間の含水率の差異を抑えるために行ったものだが、28 日乾燥よりも短期間で実施可能な真空飽水处理を選択した。粉末採取用の 3 本は、養生終了時に P1 シリーズと同様に粉末採取を行い、掘削粉を対象に空隙構造測定を実施した。

2.2 ドリル掘削粉の分析

(1) He 真密度測定

P1 シリーズで採取した掘削粉について、ヘリウムガス置換式の密度計を使用して、He 真密度の測定を行った。測定する試料の量は 1.0±0.05 g とした。測定は 1 試料につき 5 回行い、平均値を測定値とした。He 真密度測定では、原理上、試料表面に吸着した水も試料体積と

して考慮されるため、試料の含水状態によって He 真密度の測定値が変化する¹³⁾。したがって、測定の再現性を担保するために He 真密度の測定時には試料の含水状態を何らかの基準に従って管理する必要がある。その際、調湿に伴う掘削粉の性質の物理的・化学的変化を可能な限り抑えられる湿度を選択することが好ましい。ドリル掘削粉には未水和セメント由来の成分と C-S-H などの水和生成物由来の成分が含まれていると考えられる。未水和セメントの水和進行は RH 30%を下回る環境下で著しく停滞すること¹⁴⁾が報告されており、一方で RH 11%の乾燥環境下では、C-S-H の層間水の一部が離脱し、C-S-H の微細構造が変化すること¹⁵⁾が報告されている。以上を考慮し、本測定においては掘削粉を RH 23%に調湿したデシケーター内に 14 日間静置した後、運搬のため直ちにガラス製密閉容器に移し、その 1 日後に He 真密度測定を行った。

(2) 掘削粉の粒度分布測定

レーザー回折式粒度分布測定装置を使用して粒度分布の測定を行った。測定範囲は 0.5 μm から 3000 μm である。対象とした試料は、P1 シリーズで採取した掘削粉のうち、P1-30A、P1-30W、P1-70A、P1-70W の 4 試料である。掘削粉は採取後直ちに密閉容器に入れ、測定まで保管した。

(3) 掘削粉の空隙分布測定

水銀圧入ポロシメトリー (MIP) を用いて、空隙分布測定を実施した。P2 シリーズで採取した掘削粉を採取後直ちに密閉容器に入れ、測定まで保管した。前処理として D-Dry 法で 24 時間以上試料を乾燥した後に測定を実施した。新居ら¹⁶⁾の方法に倣い、測定中の排気過程で粉末試料が機器に吸引されるのを防ぐために、複数の穴をあけたゼラチン製のカプセル (写真-1) に粉末試料を入れた状態で測定を行った。測定に使用した試料は約 0.5 ml であった。空隙径分布の測定範囲は約 8000 nm から 10 nm であり、同一条件の供試体 3 本から採取した掘削粉について、それぞれ測定を実施した。



写真-1 粉末試料と測定用ステム

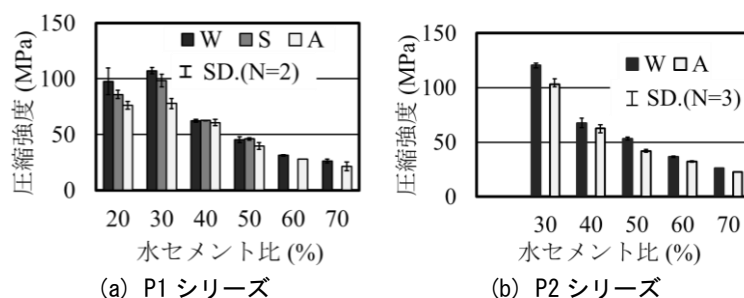


図-1 供試体の圧縮強度測定結果

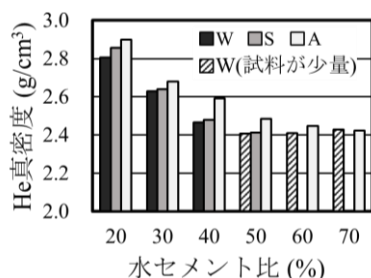


図-2 掘削粉（P1）のHe真密度測定結果

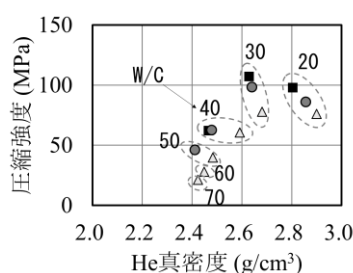


図-3 掘削粉のHe真密度と供試体の圧縮強度の相関（P1）

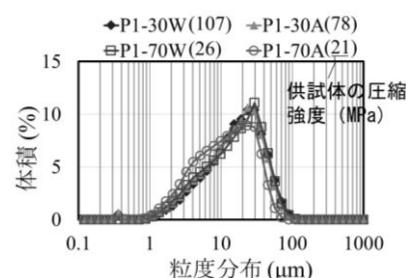


図-4 掘削粉（P2）の粒度分布測定結果

3. 実験結果と考察

3.1 供試体の圧縮強度試験結果

図-1(a)と(b)にP1シリーズとP2シリーズの圧縮強度試験の結果を示す。図-1を含め以降のグラフ中のエラーバーは複数の測定の標準偏差を示す（図中では標準偏差をSDと略記した）。両シリーズに共通して、W/Cが同一であるとき、水中養生（W）のケースにおいて最も圧縮強度が高く、続いて封緘養生（S）、気中養生（A）の順であった。また、W/Cが大きいほど圧縮強度が小さい傾向が確認されたが、P1シリーズのW/C 20%のケースに関してはこの限りではなかった。このケースでは、打込み時に目視観察した流動性が極めて低く、他のW/Cのケースと比較して充填の程度が低かった可能性が考えられる。

3.2 ドリル掘削粉の分析結果と供試体圧縮強度の相関

(1) 掘削粉のHe真密度

図-2に掘削粉のHe真密度の測定結果を示す。斜線で示したP1-50W、P1-60W、P1-70Wについては、測定に用いた試料の量が0.88 g、0.85 g、0.70 gであり1.0±0.05 gの基準を満たさなかったため、以降の考察からは除外した。同じW/Cのケースでは気中養生（A）のケースにおいて最もHe真密度が高く、続いて封緘養生（S）、水中養生（W）の順となり、また、同じ養生方法のケースでは、W/Cが大きいほどHe真密度が小さくなるという結果となった。He真密度は掘削粉中に含まれる未水和セメント由来の粉末と水和生成物由来の粉末の構成割合によって変化すると考えられる。未水和セメントの

密度は、今回使用した硬化前のセメントと同程度とすると3.15 g/cm³であり、一方、代表的な水和生成物であるC-S-HのHe真密度は、1.6から2.3 g/cm³であるという報告がある¹⁷⁾。W/Cが同じ場合には、水中養生（W）>封緘養生（S）>気中養生（A）の順に水和の促進効果があるために、相対的に低密度なC-S-Hなどの水和生成物が掘削粉中に占める割合もこの順に多くなり、He真密度は気中養生（A）>封緘養生（S）>水中養生（W）という大小関係になったものと考えられる。また、養生方法が同じ場合には、W/Cが高いほどセメントに対する自由水の量が多くなり、水和が進行しやすいため、相対的に低密度なC-S-Hなどの水和生成物が掘削粉中に占める割合も多くなりHe真密度が小さくなったものと考えられる。図-3に掘削粉のHe真密度と供試体の圧縮強度（平均値）の関係を示す。図中の楕円は同じW/Cの点を囲んだものであり、その傍にW/Cを示した。同じW/Cの点同士を比べると、掘削粉のHe真密度と供試体の圧縮強度には負の相関が見られるが、その関係はW/Cごとに異なる位置にプロットされており、W/Cが低いほど、右上に遷移している。この傾向について、以下の説明が考えられる。セメント系材料の圧縮強度は、水和生成物の析出可能な空間（総空隙量と水和生成物の合計体積）に対する水和生成物の体積割合（ゲルスペース比）と強い正の相関があると報告されている¹⁸⁾。まず、同一W/Cで異なる養生方法の場合については、配合が同一であるため水和生成物の析出可能な空間には相違がないが、水和の促進効果が高い養生方法ほど、水和生成物がより多

く析出し、ゲルススペース比が大きくなるために圧縮強度が大きくなる。一方で、水和の進行に伴い、相対的に密度の軽い水和生成物の割合が増えるために He 真密度は小さくなったものと考えられる。これにより、供試体の圧縮強度と掘削粉の He 真密度は負の相関関係を示したものと推察される。次に、W/C により異なる曲線関係となった理由については、W/C が低いほど硬化後の総空隙量が小さく、したがってゲルススペース比が大きくなるために圧縮強度は大きくなる一方で、掘削粉の He 真密度は、固相部分の密度を測定しており、空隙量に関する情報は含まれていないためだと考えられる。以上より、掘削粉の He 真密度と供試体の圧縮強度には負の相関があるものの、その関係は W/C によって異なり、その違いを定量的に評価するためには、空隙量などの他の指標を考慮する必要があることが明らかとなった。

(2) 掘削粉の粒度分布

図-4 に掘削粉の粒度分布測定結果を示す。図中の凡例に続く () 内に示した数字は、同一条件で作製した供試体の圧縮強度の平均値である。粒度分布分析の対象とした供試体と同一条件の供試体の圧縮強度は 21 MPa から 107 MPa と最大で 5 倍程度の差があったものの、掘削粉の粒度分布形状には大きな違いは見られなかった。したがって、供試体の圧縮強度と、掘削粉の粒度分布には相関はないものと考えられる。

(3) 掘削粉の空隙分布測定

粉末試料を MIP により分析する場合には、試料同士の間隙も空隙として測定されてしまう¹⁹⁾。この隙間は、試料を MIP 測定用のカプセルに詰める際の締め具合など人為的な要因によって変化する可能性がある。したがって、供試体の圧縮強度との相関を検討する際には、試料間隙を含む範囲の空隙のデータは除外する必要がある。掘削粉同士の間隙として存在し得る最小のものは、図-5 に示したように、互いに接する 3 つの最小粒子 (半径 r^* とする) に囲まれた隙間である。水銀がこの隙間にちょうど圧入される際の圧力を p^* とする。円筒形の細孔を仮定する Washburn の式²⁰⁾を採用した水銀圧入法では、この圧力 p^* は、空隙半径 r が次式を満足するような細孔に対する圧入圧力に相当する。

$$r = 2\sigma \cos\theta / p^* \quad (1)$$

式(1)で σ は水銀の表面張力、 θ は水銀の接触角である。ここで、水銀が図-5 の隙間に圧入されるときは、圧力 p^* と隙間を囲む三円の半径 r^* の関係は、隙間の周長に沿って働く水銀の表面張力と隙間の全面積に働く圧力の釣り合いの条件により、次式で表現される。

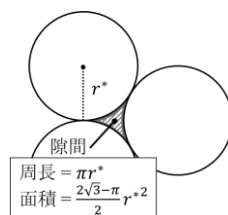


図-5 半径 r^* の三円で囲まれた隙間

$$p^* = \frac{2\pi\sigma\cos\theta}{(2\sqrt{3}-\pi)r^*} \quad (2)$$

式(1)に式(2)を代入することで、水銀が図-5 の隙間に圧入される際の圧力を、水銀圧入法で測定される空隙直径 D に換算すると以下ようになる。

$$D = 2r = \frac{2(2\sqrt{3}-\pi)r^*}{\pi} \cong 0.21r^* \quad (3)$$

ここで、図-4 で確認されたように、掘削粉の粒度分布形状には、セメントペーストの W/C や養生方法によって大きな違いは見られなかった。さらに全 4 ケースにおいて、粒子直径が $2.5\ \mu\text{m}$ 以下の粒子の質量割合は 10% 未満 (P1-30W, P1-30A, P1-70W, P1-70A の順に、5.7%, 6.7%, 6.5%, 9.2%) であったため、本研究では、W/C や養生方法によらず掘削粉粒子の最小直径を $2.5\ \mu\text{m}$ であるとして以降の検討を進めた。最小粒子半径 r^* を $1.25\ \mu\text{m}$ ($= 2.5\ \mu\text{m} / 2$) とし、式(3)に代入すると、 $r \cong 0.257\ \mu\text{m}$ となる。したがって、MIP 測定で圧入空隙半径が $0.257\ \mu\text{m}$ 未満になったとき、粉体粒子間隙は存在し得る最小のもの (図-5) までは満たされると考えることができる。以上の考察に基づいて、本研究では水銀圧入法で測定された空隙径分布の中で、 $0.25\ \mu\text{m}$ ($= 250\ \text{nm}$) 以下の範囲には、粒子間隙が含まれないものとした。掘削粉の空隙構造分析結果の例を図-6 に示す。MIP で計測される掘削粉の累積空隙径分布は数千 nm 付近から急激に増えていることが分かる。測定された空隙分布のうち、数千 nm から $250\ \text{nm}$ の範囲の空隙には粒子間隙が含まれていると考えられ、次の検討では、この範囲のデータを除外した。

図-7 に MIP で測定した掘削粉の $10\ \text{nm}$ から $250\ \text{nm}$ の空隙量を示す。ここで、空隙量は $10\ \text{nm}$ から $250\ \text{nm}$ の空隙の体積を試料体積で除して算出した値であり、試料体積からは、 $250\ \text{nm}$ 以上の空隙を除外している。空隙量は、同一条件の供試体 3 体から採取した掘削粉の平均値としている。図-7 より、 $10\ \text{nm}$ から $250\ \text{nm}$ の空隙量は、養生方法が同じ場合には W/C が低いほど、また、

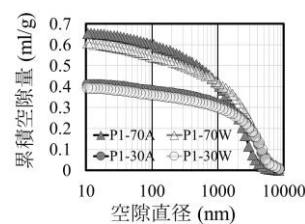


図-6 掘削粉 (P1) の MIP 測定結果の例

W/C が同じ場合には気中養生 (A) と比較して水中養生 (W) の方が少ないという結果となった。セメント系材料の硬化体の空隙構造は、W/C が低いほど、また、養生により水和を促進するほど緻密になることが数 mm 程度の試料を対象に MIP を実施した研究で確認されている^{21), 22)}。それに対し本研究では、粒径がおよそ 1 μm から 100 μm の掘削粉 (図-4) を対象に MIP を実施しているが、W/C の違いによる空隙量の差および、養生方法による空隙量の差について、数 mm 程度の試料を用いた既往の知見^{21), 22)}と同様の結果が得られた。一般的に、粒径が小さな試料ほど、水銀の入り口となる細孔が相対的に多く表面に現れるため、閉空隙やインクボトル空隙による空隙径の過小評価を抑制できることが知られているものの¹⁹⁾、試料間の隙間を測定値に含んでしまうことを理由として、粉末試料は空隙構造測定には適さないとされている¹⁹⁾。しかし、今回の結果から、粉末試料を対象とした測定であっても、試料間の隙間を含む空隙範囲を除外することで、元の供試体に関連する空隙情報を評価できるものと考えられる。図-8 に、掘削粉を対象に測定した 10 nm から 250 nm の空隙量と供試体の圧縮強度の比較を示す。W/C や養生方法によらず、両者には強い相関関係が見られた。近似式は、圧縮強度が空隙量に対し逆減していくことを考慮し、空隙量の逆数を指数部分に持つ指数関数を採用しており、その決定係数 R^2 は 0.95 であった。

ここまでの議論では、粒子間の隙間を含む空隙を除外するために空隙量として考慮する空隙直径の上限を式 (1) から式 (3) によって算出し、250 nm としていたのであった。図-9 には、空隙量として考慮する空隙直径の下限を 10 nm に固定したままで、空隙直径の上限 (D_{UP}) を 10 nm から 5000 nm の範囲で様々に変えた場合の、掘削粉の空隙量と供試体圧縮強度の決定係数 R^2 の変化を示した。決定係数 R^2 算出のための近似式は図-8 と同様に空隙量の逆数を指数部分に持つ指数関数とした。決定係数は D_{UP} の増加とともに上に凸の変化をしている。決定係数が低くなる要因としては、 D_{UP} が小さい時には、空隙量に考慮される空隙が少ないことで測定誤差の影響が大きくなること、また、 D_{UP} が大きい時には、掘削粉の空隙量に考慮される粒子間の隙間の影響が大きくなることが考えられる。図-9 によれば D_{UP} が 50 nm から 3000 nm であるとき、掘削粉の空隙量と供試体の圧縮強度は、決定係数 R^2 がおおむね 0.8 以上の高い相関を示し、式 (1) から式 (3) により計算された 250 nm 前後では決定係数 R^2 が 0.95 程度の特により高い相関を有している。

以上の結果は、微小なドリル掘削粉にも、セメントペースト供試体の強度に対して支配的な空隙の情報が残存していることを示す。ただし、一般的に使用される数

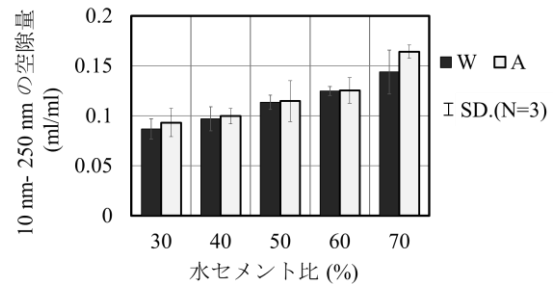


図-7 掘削粉 (P1) の 10 nm から 250 nm の空隙量

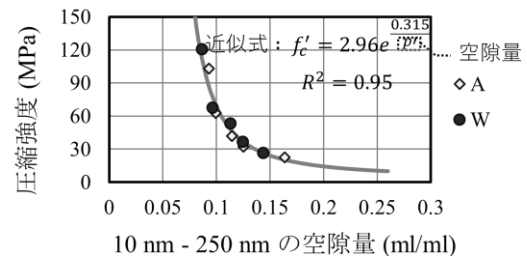


図-8 掘削粉の 10 nm から 250 nm の空隙量と供試体の圧縮強度の相関

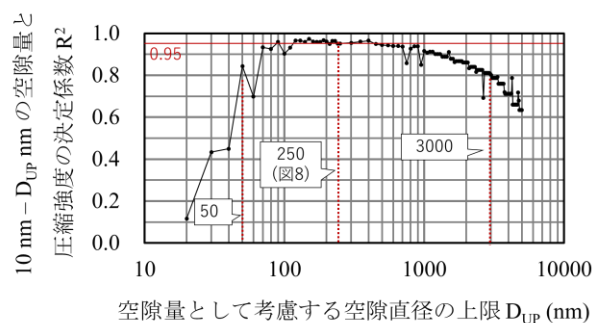


図-9 空隙量として考慮する空隙直径の上限 D_{UP} を変えたときの決定係数の変化

mm 片の試料の場合とは異なり、粉体試料であるがゆえに生じる粒子間の隙間の影響を排除するために、空隙量として考慮する空隙直径の範囲を限定することが必要だと言える。

4. まとめ

本研究ではセメントペースト供試体の圧縮強度とドリル掘削粉の物性との関係を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 供試体の強度とドリル掘削粉の He 真密度には、負の相関が見られたが、その関係は W/C によって異なっていた。
- (2) 供試体から採取したドリル掘削粉の粒度分布は、供試体の W/C や養生方法によらず同様であった。
- (3) 供試体の強度と掘削粉の空隙量には W/C や養生条件によらず高い相関が見られた。

今後、材齢などの条件を変えたセメントペーストでも

供試体強度と掘削粉の空隙量との間に強い相関が再現されるか確認するとともに、モルタルやコンクリートの圧縮強度を、掘削粉あるいはドリル孔から得られる情報をもとに推定する方法についても検討することで、最小限の損傷で圧縮強度の評価が可能になると考えられる。

謝辞

本研究は住友電工グループ社会貢献基金の支援を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Ali-Benyahia, K. Z. M. et al.: Improvement of Nondestructive Assessment of On-Site Concrete Strength: Influence of The Selection Process of Cores Location on The Assessment Quality for Single and Combined NDT Techniques, Construction and Building Materials, Vol.195, pp.613-622, 2019
- 2) Masi, A., Nigro, D. and Vona, M.: Effect of Core Drilling and Subsequent Restoration on RC Column Strength, Proceedings of 15th world conference on earthquake, 2012
- 3) 渡辺悟士, 陣内浩, 黒岩秀介, 並木哲: 論文 反発度法による高強度コンクリートの圧縮強度の推定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1199-1204, 2006
- 4) 若林信太郎, 谷川恭雄, 中込昭, 佐原晴也, 寺田健一: 小径コアによる構造体コンクリート強度の推定方法に関する研究 (その1 小径コア供試体の圧縮試験結果), 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.1-8, 2002.5
- 5) 日本コンクリート工学協会: 建築・土木分野における歴史的建造物の診断・修復研究委員会建築・土木分野における歴史的建造物の診断・修復研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 2007
- 6) Khan, M. I.: Evaluation of Non-Destructive Testing of High Strength Concrete Incorporating Supplementary Cementitious Composites, Resources, Conservation and Recycling, Vol.61, pp.125-129, Apr.2012
- 7) Tuncan, M., Arioz, O., Ramyar, K. and Karasu, B.: Assessing Concrete Strength by Means of Small Diameter Cores, Construction and Building Materials, Vol.22, No.5, pp.981-988, May2008
- 8) 田中俊成, 酒井雄也: 極細ファイバースコープによる中性化深さ測定に関する検討, 生産研究, Vol.71, No.1, pp. 111-114, 2019.1
- 9) Turan, O. and Cecen, C.: Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of Concretes with Different Strengths, Cement and Concrete Research, Vol.27, No.2, pp.165-170, Feb.1997
- 10) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移体厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, Vol.4, No.2, pp.1-8, 1993.7
- 11) Cook, D. J. and Haque, M. N. : Strength Reduction and Length Changes in Concrete and Mortar on Water and Methanol Sorption, Cement and Concrete Research, Vol.4, No.5, pp.735-744, Sep.1974
- 12) コンクリート委員会・規準関連小委員会: 土木学会規準「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G 571-2003)」の制定, 土木学会論文集, Vol.2004, No.767, pp.1-9, 2004.8
- 13) Jennings, H. M.: Refinements to Colloid Model of C-S-H in Cement : CM-II, Vol.38, pp.275-289, Mar.2008
- 14) Powers, T. C.: A Discussion of Cement Hydration in Relation to The Curing of Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.27, pp.178-188, Dec.1947
- 15) Feldman, R. F.: Density and Porosity Studies of Hydrated Portland Cement, Cement Technology, Vol.3, No.1, pp.5-14, Jan.1972
- 16) 新居篤, 小林弘道: 電子写真現像剤用キャリア及び該キャリアを用いた電子写真現像剤, JP5464645B2, 2001
- 17) 須田裕哉, 佐伯竜彦, 斎藤豪: 温度・湿度の変化が C-S-H の組成および密度に及ぼす影響, Cement Science and Concrete, Vol.67, No.1, pp.157-164, Feb.2013
- 18) Powers, T. C.: Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, American Ceramic Society, Vol.41, No.1, pp.1-6, Jan.1958
- 19) 吉野利幸, 鎌田英治, 桂修: 空隙指標で表したコンクリート強度式の提案とその検証, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.2, pp.65-72, Jul.1996
- 20) Washburn, E. W.: Note on A Method of Determining The Distribution of Pore Sizes in A Porous Material, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol.7, No.4, pp.115-116, Apr.1921
- 21) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: 養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価, 土木学会論文集, No.718, pp.59-68, Nov.2002
- 22) Cook, R. A. and Hover, K. C.: Mercury Porosimetry of Hardened Cement Pastes, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.6, pp.933-943, Jun.1999