

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 22 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760329

研究課題名（和文）コンクリートに収縮をもたらす骨材の空隙構造に関する基礎的研究

研究課題名（英文）A study of pore structure in aggregate which cause concrete shrinkage

研究代表者

吉田 亮 (YOSHIDA RYO)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：40548575

研究成果の概要（和文）：空隙構造の測定には、水銀圧入法およびガス吸着法を用いた。水銀圧入法では骨材の直径 10 nm 以上の空隙を、ガス吸着法では 10 nm 以下の空隙と比表面積を測定した。既往研究でも報告されているように、収縮が大きい骨材にはガス吸着で測定される微細で比表面積の大きな空隙が多く存在することが分かった。本研究では 10 nm 以上の比較的大きな空隙構造に大きな差異がないことを示した。これは骨材吸水率だけでは収縮の大きさを判断し難いことを裏付ける結果である。

研究成果の概要（英文）：Pore structure in aggregate was measured by Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) test and Gas adsorption test. In MIP test, pore structure which diameter is over 10 nm was detected. And in Gas adsorption test, pore structure which diameter is under 10 nm was detected. In this research, it was found that shrinkable aggregate contains a lot of small pore structure which is large surface area. And it was found that there is no difference in large pore structure which was detected by MIP test. This result indicated that it was difficult to identify aggregate is shrinkable or not by water adsorption test.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：インクボトル、コンクリート、セメント硬化体、収縮、空隙構造、骨材

1. 研究開始当初の背景

これまで、コンクリートの収縮に関して、骨材はセメントペーストの収縮を拘束し、骨材自身は収縮しないものとして扱われてきた。しかし近年、ある砂岩を使用した供用間もない高架橋に想定を超える非常に大きな

たわみが生じた問題の発生により、それまで汎用されてきた骨材に収縮を引き起こす可能性が指摘された。この問題を受け土木学会コンクリート標準示方書では、乾燥収縮ひずみとして 1000μ 以下であり、自己収縮ひずみが 100μ と 6 ヶ月以降の乾燥収縮ひずみと

自己収縮ひずみの和の 100μ を加えて、収縮ひずみが 1200μ 以下であることを基準として対処した。しかし、産地や採取時期の異なる数多くの骨材を使用したコンクリートに対して、乾燥収縮および自己収縮試験を半年の長期にわたって行わなければならない現状は大変難儀である。

このような社会背景のもと、産地や岩種の異なる骨材を用いたコンクリートの収縮を検討する研究が多く報告されており、学会において脚光を浴びている。本課題申請者も、分担者として「コンクリートの収縮ひずみに及ぼす骨材の影響に関する研究（基盤 C：梅原秀哲）」に携わっている。その研究では、使用する骨材種類によってコンクリートの収縮が大きく異なると報告している。申請者は、この結果を骨材自身の特性に基づいて詳述することに学術的な意義を見出し、独立した課題の実施が不可欠であることから、本課題の申請に至った。

コンクリートの収縮機構は、セメントペーストと骨材のそれぞれの微細な空隙を場とする水分の移動に起因するとされており、空隙構造の解明なくコンクリートの巨視的挙動の科学的な解明はないと言及しても過言ではない。

骨材の収縮や吸水特性については Nevi I や後藤らによって、多くの貴重なデータが得られている。しかし、それぞれの現象は個々に独立しており、骨材の吸水・乾燥現象、そして収縮に観察される時間依存性まで、追従して表現するに至っていない。収縮やクリープなど時間依存性を示す挙動の詳細な解明のため、そして既往の研究により個々に独立して蓄積された多くの貴重なデータを相互連携させ有効に活用するためにも、骨材自体の空隙構造の詳細な解明は非常に重要な課題である。

申請者はこれまでにセメントペーストの空隙構造の解明とその空隙構造を基にした水分の移動現象などを研究の対象としてきた。現在では、これまでに得たセメントペーストの空隙構造の概念と空隙構造を詳細に分析する技術を応用して、骨材自身の収縮現象、そして吸水現象等、水分の移動を表現する、骨材の空隙構造の実態解明に挑戦しており、追究すべき点が明確になった。本課題は、そこで得た Break through を詳細に検証し工学的解法として提案するために申請された。

2. 研究の目的

コンクリートに使用されている種々の骨材について、その空隙構造を精緻に分析することを目的とする。具体的には、骨材の吸水・乾燥現象を把握することで、液状水などの移動経路となる大きな空隙の連続性につ

いて検討する。そして収縮の駆動力を発生させる水分の貯留空間となる微小空隙との連結関係について、収縮の時間依存特性をもたらす幾何構造（インクボトル）の存在を検証する。

次いでは、前述した分担者として携わる課題と連携にさせ、骨材を内包するコンクリートとしてのふるまいについて、得られる骨材の空隙構造を基にした工学的な扱いについて解法を探る。

3. 研究の方法

申請課題の計画概要は、平成 22 年度に 1) 骨材の吸水特性の把握と 2) 収縮特性の検討を行い、種々の骨材における特性値のデータを拡充する。そして、吸水乾燥現象および収縮現象のどちらの現象とも整合する空隙構造の仮説をたてる。平成 23 年度には、申請者が提案した空隙構造分析技術や蓄積してきた know-how を駆使して、4) 空隙構造の仮説を検証する。また、分担者として携わる研究と相互連携を図り、骨材の影響がコンクリートの挙動に及ぼす影響について検討し、コンクリートの収縮の空隙構造を基にした工学的取扱いに関し次なる課題を見出す。

1) 空隙の連結関係を抽出するための骨材の吸水・乾燥特性の把握

100°C の炉で 24 時間の乾燥を行う従来の吸水試験では、骨材の吸水量とひずみの間に相関関係が確認できていない。そこで本申請課題では湿度調整した後に、吸水試験を行うことで、吸水現象にともなう質量増加と、収縮現象に寄与する質量増加を分離して抽出することを試みる。これまでは塩化リチウムなど試薬を用いて湿度調整を行っていたが、試験数が倍以上に増える本研究では、恒温恒湿槽を購入し実験を効率的に進める予定である。

また、従来の吸水試験の多くは、吸水過程のみを対象としてきたが、本申請課題では、乾燥過程も検討することによって、骨材の乾燥過程と吸水過程の差として表れる、水分逸散の時間依存性についても理解を深める。この検討によって、空隙の連結関係を示唆する実験結果を得る。

2) 空隙の連結関係がもたらす体積変化の時間依存性の把握

本項目では、湿度を調整した環境において、吸湿過程と乾燥過程における骨材の体積変化を捉える。骨材の体積変化はコンタクトゲージを使用し計測する。そのために後藤らの研究に示されるように、粒状の骨材をエポキシ樹脂で繋ぎ合せた供試体の形状を採用した。これは直径 5 cm の円柱程度の大きさで

も、岩石は亀裂を内包するため、収縮と湿度の関係を精緻に捉えられないことに対処した方策である。

本申請課題では、1)と同様に乾燥過程も加え、収縮現象の特徴とされる時間依存性のデータを取得し、骨材種毎に異なる時間依存性と空隙の連結関係の関係について詳細に検討する。

3) 骨材の吸水・乾燥・体積変化をもたらす空隙の幾何構造の仮説の推敲

1)として2)のそれぞれの結果を用いて、吸水・乾燥現象と収縮現象における液状水および水蒸気の移動が双方、矛盾なく成り立つような、空隙構造のイメージについて幾度もブラッシュアップを重ね、推敲された仮説を立てる。そして、空隙構造の仮説を検証するための手段・試験について熟考する。

4) 空隙構造の仮説の検証

3)で提案した空隙構造について検証する。ガス吸着法や水銀圧入法など、従来の空隙構造分析では、捉えられていない幾何構造を立証するため、測定前の試料調整、そして測定方法に工夫を凝らす必要がある。

申請者はセメントペーストの空隙の連続性と連結関係を定量的に抽出する独自の手法を提案しており、これまで蓄積してきた分析手法の技術とノウハウを駆使して、骨材の空隙構造の分析に挑む。具体的には、試料の寸法を変え粗大空隙を排除すること、試薬を用いて特定の構造を溶かすなど測定する試料を調整する方策と、インクボトル関係を抽出する独自の水銀圧入法を駆使して、想定する空隙構造の存在を確かめる。

5) コンクリートの収縮における骨材収縮の影響程度の把握

コンクリートの中では、骨材表面に遷移帯と称される厚さ50 μm 程度の粗大な空隙が形成され、この遷移帯を介してセメントペーストの空隙構造と骨材の空隙構造が繋がりコンクリート全体の空隙ネットワークとなる。コンクリート全体の空隙ネットワークを基にした収縮挙動の解明は、本申請課題の後の発展課題として考えている。本項目では、その前段として、申請者が分担者として携わる骨材種を変えたコンクリートの収縮挙動に関する研究の結果と、本申請課題で得る1)、2)の結果を照らし合わせ、骨材自身の挙動がコンクリート全体の挙動に及ぼす影響程度について検討する。

4. 研究成果

本研究課題では、1)骨材の空隙構造の把握と2)収縮特性の検討を行い、種々の骨材にお

ける特性値のデータを拡充すること。そして、骨材の収縮現象について空隙構造を基に検討した。以下に本課題において得られた研究成果を示す。

1) 骨材空隙構造の把握

空隙構造の測定には、水銀圧入法およびガス吸着法を用いた。水銀圧入法では骨材の直径10 nm以上の空隙を、ガス吸着法では10 nm以下の空隙と比表面積を測定した。既往研究でも報告されているように、収縮が大きい骨材にはガス吸着で測定される微細で比表面積の大きな空隙が多く存在することが分かった。本研究では10 nm以上の比較的大きな空隙構造に大きな差異がないことを示した。これは骨材吸水率だけでは収縮の大きさを判断し難いことを裏付ける結果である。

2) 骨材収縮特性の把握

骨材の収縮量と空隙構造の間には相関関係が確認された。既往の研究において報告されているように比表面積の大きな微細空隙との相関が高いことが確認された。この骨材の収縮量とその骨材を用いたコンクリート供試体の収縮量には高い相関が得られた。またR.H.60%一定の乾燥環境であれば、骨材の水分率とコンクリートの収縮にも相関関係があることがわかった。しかし、実環境におけるコンクリートの乾燥収縮を予測するためには、骨材の空隙構造を考慮するだけでは不十分であり、セメントペーストにおける遷移帯や毛細管空隙、そしてゲル空隙など、R.H.10~100%の変化に対応した各種空隙ネットワークにおける水分移動を考慮する必要があることがわかった。

3) 人工軽量骨材などインクボトル空隙を内包する粗骨材の空隙構造

本研究では水銀漸次繰返し圧入法および吸水率の試験値を用いて、石灰岩や砂岩など天然骨材および人工骨材における空隙構造について検討した。

水銀圧入法によって測定する40 nm以上の空隙径範囲において、天然骨材ではインクボトル関係の不在、そして人工骨材におけるインクボトル関係の存在を明らかにした。

人工軽量骨材の表層、内部および骨格構造内部における空隙構造について検討を行った。表層のしきい空隙径は2000 nm程度であり、この表層の構造は表層近傍の割れ目のような大空間からの水分逸散を抑制する機能を持つと考えられる。また、内部の連続空隙のしきい空隙径は1000 nmであり、連続空隙と内部の粗大空隙とのインクボトル関係も示された。吸水では不飽和である、これらのインクボトル空隙量を合わせると40 nm以上

の空隙のうち9割を超える空隙量を有すると示された。

2種類の砂岩を比較したところ、40 nm 以上の空隙では大きな差異は確認できなかった。しかし、吸水率および水銀圧入法の試験結果の差として得られる40 nm 以下の空隙量に関して比較すると、収縮を大きくすると言われる砂岩では、通常の砂岩における3倍程度の空隙量が確認できた。

4) 人工軽量骨材などインクボトル空隙を内包する粗骨材を用いたコンクリートの収縮性状

本項では、24時間、48時間および煮沸吸水量と水銀漸次繰返し圧入法によって粗骨材のインクボトル空隙量と直径40nm以下の空隙量を把握し、粗骨材の空隙構造がコンクリートの体積収縮変化に与える影響について考察を行った。本研究により得られた知見は以下の通りである。

水銀漸次繰返し法によって得られたインクボトル空隙量と吸水量測定によって得られた48時間吸水量と煮沸吸水量との差は良く対応する。この結果、粗骨材中のインクボトル空隙は48時間程度の静水圧吸水では飽和せず、煮沸吸水による圧力下において粗大空隙内の空気と液状水の置換が起こり飽和すると考えられる。

コンクリートの自己収縮は、使用した粗骨材がインクボトル空隙を有する場合、粗骨材からセメントペーストへの水分供給による自己収縮低減効果により小さくなる傾向が見られた。

コンクリートの乾燥収縮は、使用した粗骨材中の直径40nm以下の空隙量に影響を受けるが、インクボトル空隙の有無などの複合的な作用を考慮する必要がある。

本研究では、粗骨材の空隙構造を直径40nmを閾値として大きく2つに分けて検討を行った。乾湿による粗骨材自体およびコンクリートの体積変化はその空隙構造と密接に関係していると考えられる。今後は粗骨材の空隙構造を対象として直径40nm以下の空隙構造や空隙の連続性についてさらに詳細な実験と分析を行い、空隙構造と乾湿による体積変化との関係を明らかにする必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 石黒憲司, 小幡雄一郎, 梅原秀哲, 吉田亮, コンクリートの収縮試験方法とそれに及ぼす粗骨材の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 社団

法人日本コンクリート工学協会, Vol. 35, 2013, 査読有り

<http://data.jci-net.or.jp/search.shtml>

- ② Ryo Yoshida, Toshiharu Kishi, Properties of Pore Structure measured by Step-by-step Mercury Intrusion Porosimetry test, 2nd International conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composite, pp. 259 - 266, 2012, 査読有り

http://www.rilem.org/gene/main.php?base=500218&id_publication=413

- ③ 吉田亮, 小幡雄一郎, 齊藤和秀, 梅原秀哲, インクボトル関係を内包する人工骨材および天然骨材の空隙構造に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 社団法人日本コンクリート工学協会, Vol. 32, pp. 107-112, 2010, 査読有り

<http://data.jci-net.or.jp/search.shtml>

- ④ 小幡雄一郎, 吉田亮, 矢野智也, 梅原秀哲, 粗骨材の吸水量および空隙構造に基づいたコンクリートの体積収縮変化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 社団法人日本コンクリート工学協会, Vol. 32, pp. 371-376, 2010, 査読有り

<http://data.jci-net.or.jp/search.shtml>

[学会発表] (計12件)

- ① 石黒憲司, 小幡雄一郎, 吉田亮, 梅原秀哲, コンクリートの自己収縮ひずみ・乾燥収縮ひずみの測定方法に関する研究, 平成24年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 社団法人土木学会, pp. 381-382, 2013
- ② 太田健司, 齊藤和秀, 吉田亮, 牧宗一郎, 梅原秀哲, 石灰石微粉末の置換率が異なるモルタル供試体の乾燥収縮および強度発現に関する研究, 第66回セメント技術大会, 社団法人セメント協会, pp. 296-298, 2012.5
- ③ Ryo Yoshida, Toshiharu Kishi, Properties of Pore Structure measured by Step-by-step Mercury Intrusion Porosimetry test, 2nd International conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composite, pp. 259 - 266, 2012

- ④ 太田健司, 齊藤和秀, 吉田亮, 牧宗一郎, 梅原秀哲, 石灰石微粉末の添加が乾燥環境下におけるコンクリートの物性に及ぼす影響, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 社団法人土木学会, pp. 419-420, 2012. 3
- ⑤ 太田健司, 齊藤和秀, 吉田亮, 牧宗一郎, 梅原秀哲, 石灰石微粉末によるコンクリート強度および透気の乾燥抵抗性向上効果に関する研究, 中部セメントコンクリート工学論文集, 中部セメントコンクリート研究会, 第 24 号, pp. 1-4, 2011. 11
- ⑥ 小幡雄一郎, 石黒憲司, 吉田亮, 梅原秀哲, 異なる湿度環境下における粗骨材ヤング係数およびコンクリート体積変化に関する一考察, 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集, 公益社団法人土木学会, V-443, 2011. 9 太田健司, 吉田亮, 齊藤和秀, 牧宗一郎, 石灰石微粉末を添加したコンクリートの乾燥収縮および透気に関する研究, 第 65 回セメント技術大会, 社団法人セメント協会, pp. 218-219, 2011. 5
- ⑦ 石黒憲司, 小幡雄一郎, 吉田亮, 梅原秀哲, 粗骨材中のインクボトル空隙の有無が乾湿による体積変化挙動に与える影響についての一考察, 平成 22 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 社団法人土木学会, pp. 475-476, 2011. 3
- ⑧ 太田健司, 鵜飼貴史, 神田ゆかり, 吉田亮, 梅原秀哲, 化学組成の異なる石灰石微粉末を使用したコンクリートの乾燥収縮に関する研究, 平成 22 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 社団法人土木学会, pp. 523-524, 2011. 3
- ⑨ 鵜飼貴史, 齊藤和秀, 吉田亮, 梅原秀哲, 粗骨材の寸法および種類がセメント硬化体の乾燥収縮に及ぼす影響に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, 社団法人土木学会, V-154, 2010
- ⑩ 小幡雄一郎, 上田仁, 吉田亮, 梅原秀哲, 粗骨材における含水率と体積変化との関係に関する一考察, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, 社団法人土木学会, V-286, 2010
- ⑪ 吉田亮, 小幡雄一郎, 齊藤和秀, 梅原秀哲, インクボトル関係を内包する人工骨材および天然骨材の空隙構造に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 社団法人日本コンクリート工学協会, Vol. 32, pp. 107-112, 2010
- ⑫ 小幡雄一郎, 吉田亮, 矢野智也, 梅原秀哲, 粗骨材の吸水量および空隙構造に基づいたコンクリートの体積収縮変化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 社団法人日本コンクリート工学協会, Vol. 32, pp. 371-376, 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 亮 (YOSHIDA RYO)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：40548575