

論文 粗骨材の拘束効果による局所的な細孔組織構造に関する研究

小野 貴史^{*1}・大下 英吉^{*2}

要旨：コンクリート内部の骨材がセメント硬化体の自己収縮に及ぼす拘束の影響を把握することを目的として、普通および高炉セメント B 種を使用したセメントペースト、モルタルを用いて粗骨材間の局所的な初期変形状、細孔径分布の測定を行った。その結果、骨材による拘束の影響は細孔径 $0.05 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ の粗大な空隙と密接な関係があり、細骨材による拘束の影響は含有率により大きく異なることが明らかとなった。また、普通と高炉セメントでは細孔組織構造およびその変遷が大きく異なり、高炉スラグ微粉末の水和生成物が材齢 7 日の時点まででは拘束によって生じる空隙を埋めていく効果が高いことが示唆された。

キーワード：細孔組織構造、拘束効果、自己収縮、モルタル、高炉セメント

1. はじめに

高強度コンクリートや高流動コンクリートで極初期材齢に顕著に生じる自己収縮は、コンクリート構造物の各種拘束条件下で初期応力や初期ひび割れを誘発する原因となる。そのため自己収縮に関する研究は近年多数の報告がなされているが¹⁾、その殆どがマクロ的挙動評価であり、初期欠陥の原因である微視的観点に立脚した骨材の影響を考慮に入れた自己収縮特性に関する研究は少なく、その性状も十分に把握されていない。

自己収縮の駆動力は、セメントの水和に伴い生成される内部空隙が自己乾燥することによって生じる間隙水の表面張力である¹⁾。したがって、コンクリート部材の表面や内部といった場所による違い、表面の乾燥条件等によって、内部空隙構造が異なるため任意位置における自己収縮挙動も異なってくる。

このような観点から、著者ら^{2),3)}は粗骨材の拘束の影響を解明するための基礎的研究として、コンクリートが粗骨材～セメントペースト～粗骨材からなるものとして捉え、粗骨材を拘束した状態での粗骨材間セメントペーストの局所的な初期変形状および細孔組織構造に関する実験を普通ポルトランドセメントを対象として行ってきた。その

結果、粗骨材の拘束の影響により粗骨材間セメントペーストの上述の性状は局所的に大きく異なることが明らかとなり、自己収縮特性について微視的観点に基づいた評価の重要性を指摘した。同時に細孔径分布の特定の細孔径領域に着目することで、局所的な細孔組織構造と初期変形状は密接に関わっていることも示唆された。このことはすなわち、時々刻々と変化する水和生成物の影響を加味し、粗骨材の拘束による局所的な細孔組織構造の分析を行えば、細孔組織構造から局所的な初期変形状や初期応力性状を定量的に算出可能であるものと推測される。そのためにはまず自己収縮が骨材等に拘束される影響に関して、セメントの種類により生成される水和物の違いや上述した材齢の経過に従い生成される水和物の影響と細孔径分布との関連性について詳細に評価していく必要がある。

そこで本研究では、既往の普通ポルトランドセメントに加えて、自己収縮が大きい高炉セメント B 種を使用したセメントペーストおよび細骨材含有率を変化させたモルタルを用いることで、変形の大さ、水和生成物の違いおよび細骨材が細孔組織構造に与える影響についての検討を行った。

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

セメントは普通ポルトランドセメント(以下 OPC と略す)および高炉セメント B 種(以下 BB と略す)を用いた。使用した粗骨材は微粒安山岩の碎石(寸法=40~60mm)および細骨材は、市原市万田野産(最大寸法=5mm, 比重 2.59)である。高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸系のものを使用した。

セメントペーストおよびモルタルは W/C=30% の一定である。モルタル中の細骨材含有率(体積比)は、0.2, 0.45 の 2 水準とした。以下、セメントペーストおよびモルタルについては OPC 使用のうち細骨材含有率 0(ペースト), 0.2, 0.45 のものをそれぞれ OPC(0), OPC(0.2), OPC(0.45)と表記する。同様に BB についても BB(0), BB(0.2), BB(0.45)と表記する。なお、ペーストと同程度の流動性を確保するためにモルタルのみ高性能 AE 減水剤を使用し、添加量をセメント重量に対して細骨材含有率 0.2 は 0.1%, 0.45 は 0.6%とした。

2.2 供試体の作成方法と実験環境

型枠には、図-1(a)に示すような粗骨材有りおよび図-1(b)に示すような粗骨材無しの 2 種類の発泡スチロール製の型枠にペースト或いはモルタルを上から打設し、水分の逸散を防ぐために全体にアルミテープを施し、40×40×50mm の形状寸法をした供試体を作製した。ここで、粗骨材付きの型枠が粗骨材間のペースト或いはモルタルを外的に完全に拘束する(以下、完全拘束と称す)ものであり、粗骨材無しが拘束の影響が無い状態(以下、無拘束と称す)を捉えるためのものである。実験環境は、雰囲気温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ である。なお、以下では議論を深めていくにあたりペースト或いはモルタルを長さ方向に 5 分割し、それぞれの領域を図-1(b)に示すように界面区間、中心付近区間、中心区間と呼ぶことにする。

2.3 実験項目

(1) 局所的ひずみ測定

図-2 に示すように供試体の中央部に極細針($\phi = 0.41\text{mm}$)を 10mm 間隔に設置し、 $0.1\mu\text{m}$ まで複数点の測定が可能なレーザー変位計により針の変位

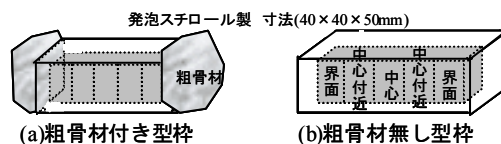


図-1 実験型枠

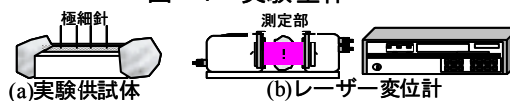


図-2 局所的ひずみ測定装置

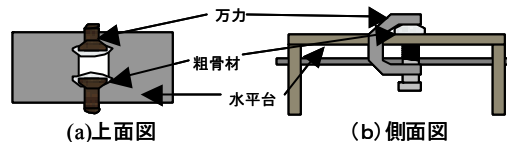


図-3 完全拘束用測定装置

量を測定した。粗骨材を完全に拘束する方法は、図-3 に示すような水平台および万力を使用し、万力により粗骨材と水平台とを完全に固定した^{2),3)}。変位の測定開始時刻は、自己収縮委員会報告書¹⁾に基づき凝結の始発時間とし、材齢 7 日まで測定を行った。なお、ひずみの測定は、OPC(0), OPC(0.2), BB(0), BB(0.2)を対象としている。

(2) 局所的細孔径分布の測定

前項と同様の供試体を所定の材齢 1 日、3 日および 7 日においてダイヤモンドカッターで 5 分割し、それぞれを約 3mm から 5mm 角に破碎した。次に D-dry 乾燥処理を施し、蒸発性水分を完全に取り除き試料を作成した³⁾。細孔径分布の測定には水銀圧入ポロシメータを使用した。

3. 局所的ひずみ履歴

図-4 は、完全拘束、無拘束における材齢 7 日までのひずみ履歴を示している。ここで、図中に示す記号●, ▲および■(完全拘束), ○, △および□(無拘束)はそれぞれ界面区間、中心付近区間および中心区間を示している。なお、図-4 の縦軸は、正が収縮、負が膨張を表している。

(1) 粗骨材の影響

全体的な特徴として、セメントの種類および細骨材の混入の有無に拘わらず、完全拘束と無拘束のひずみ履歴は異なる傾向を示している。無拘束では全区間において収縮であり区間ごとの差も小さい。一方、完全拘束では界面区間で膨張し、それ以外の区間では収縮であるが、無拘束と比較し

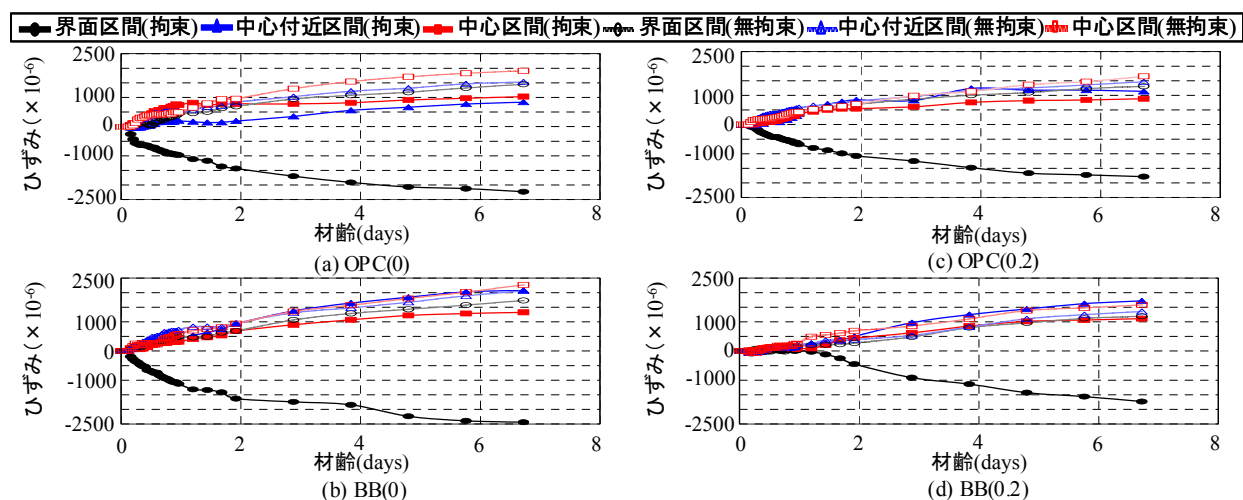


図-4 局所的ひずみ履歴

て区間ごとの差は大きくなっている。これらの性状は、自由な自己収縮が粗骨材により拘束されることが主な原因であると考えられる。特に、粗骨材界面区間の膨張ひずみに関しては、2.3 節の図-2 で示すように粗骨材から粗骨材までの距離が一定であるため、ペーストに生じるひずみの積分値はゼロである。そのため、粗骨材界面区間においても自己収縮は生じているもののより自己収縮が卓越する中心付近、中心区間のセメントペーストが、界面領域のセメントペーストを引張ることとなり、集中的に大きな膨張ひずみを生じているものと考えられる。

(2) 細骨材の影響

OPC(0.2)と OPC(0)および BB(0.2)と BB(0)を比較すると、区間ごとのひずみ量で差はあるものの、OPC(0.2)における完全拘束の中心付近区間を除いていずれのセメントの種類においてもモルタルの方が小さい。このことは、従来から指摘されている細骨材の混入により自己収縮の駆動力であるセメントペースト領域が少なくなることに加えて、細骨材群がセメントペーストの収縮を拘束するというミクロ的挙動の影響が付加されることによるものと推測される。

(3) セメントの種類による比較

同図(a), (b)に示す OPC(0)と BB(0)を区間毎に材齢 7 日のひずみ量の絶対値で比較した場合、完全拘束、無拘束ともに BB(0)が OPC(0)より大きい。BB(0.2)と OPC(0.2)では、材齢 1 日の時点におけるひずみ量は BB(0.2)で小さいが、その後ひずみが

急激に生じることにより材齢 7 日時点での差異はない。このことは、OPC と BB の材齢に伴う水和生成物が異なることにより自己収縮の駆動力となる緻密な細孔空隙に差異を生じることが原因であると考えられる。

また、材齢 7 日での細骨材が混入されることによるひずみ減少量は、OPC(0)から OPC(0.2)における各区間の平均値を比較すると、無拘束では 155μ 、完全拘束では 98μ であるのに対し、BB では無拘束で 646μ 、完全拘束で 428μ と大きい。このことは、BB と OPC では細骨材による拘束の影響を受け持つ細孔組織構造が異なるものと推察されるため、5 章で高炉スラグの水和生成物と絡めて再考することとする。

4. 局所的細孔径分布

4.1 セメントペースト

図-5 は、材齢 1 日、3 日および 7 日の時点における OPC(0)、BB(0)の細孔径分布を示している。ここで、図中に示す記号—, —, — および— は、それぞれ完全拘束における界面、中心付近、中心区間および無拘束の細孔径分布である。なお、無拘束に関しては、各材齢において区間ごとに差異が非常に小さいため全区間の平均値とした。図-5 に示す細孔径分布の一般性状は、図-6 のように示され、その代表的領域に以下では着目した議論をする。着目する領域は同図に示すように細孔径分布で特徴が大きく異なる細孔径 $0.05 \mu\text{m}$ 以上、細孔量がピークとなる細孔径 $0.02 \mu\text{m} \sim 0.09 \mu\text{m}$ (材

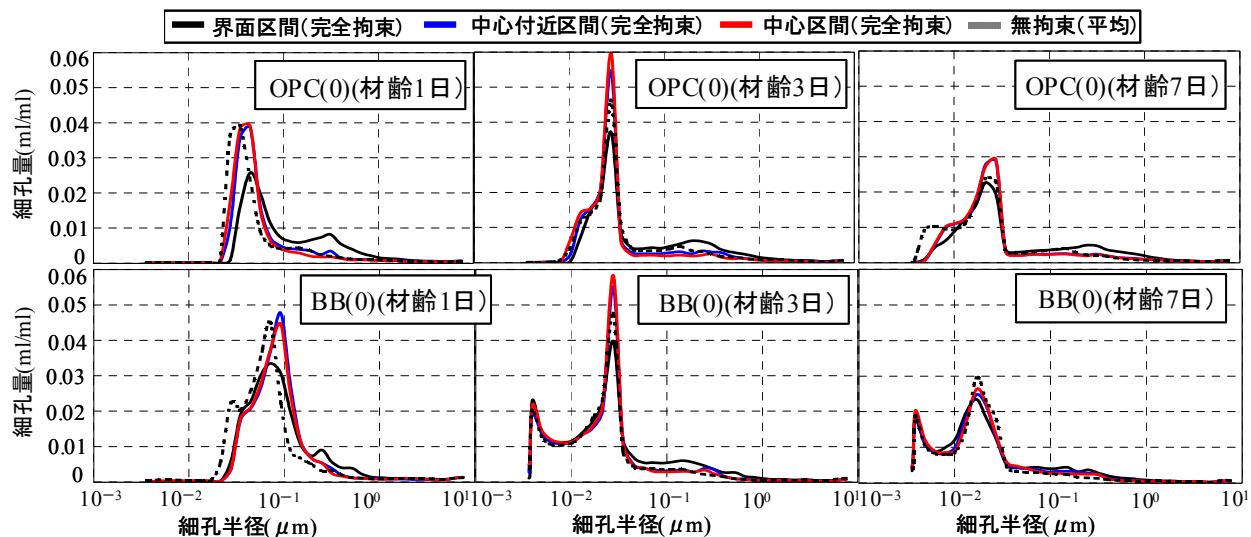


図-5 局所的細孔径分布(OPC(0), BB(0))

材齢 1 日の BB 使用のペーストは $0.05 \mu\text{m}$ 以上にピークがあるため $0.09 \mu\text{m}$ までの範囲としている(付近および $0.01 \mu\text{m}$ 以下の細孔径領域であり、それぞれを領域 A, B および C と表記する。

(1) OPC(0)

材齢 3 日までは領域 A, B で差異が大きいことがわかる。また、他の区間と比較して、粗骨材界面区間では領域 A, B で差が大きく、領域 A では細孔量が多く、逆に領域 B では細孔量が少なくなっている。材齢 7 日においては領域 A, B での区間毎の細孔量の差異に加えて領域 C で完全拘束の各区間の細孔量が無拘束より少なくなっている。これらの性状は、粗骨材界面区間では、3 章のひずみ履歴より自己収縮の拘束を集中的に受け持つことにより膨張領域となるため、領域 A の細孔量が大きくなると考えられる。同様に 3 章のひずみ履歴から粗骨材の拘束による区間毎のひずみ量の差異が、領域 B, C での細孔量の差として現れているものと考えられる。

(2) BB(0)

BB(0)に対して材齢および区間ごとの比較を OPC(0)での性状を加味した上で議論する。

領域 B の細孔量がピークとなる細孔径が BB(0)では、 $0.07 \mu\text{m} \sim 0.10 \mu\text{m}$ の間に点在しているのに対して、OPC(0)では、 $0.02 \mu\text{m} \sim 0.05 \mu\text{m}$ の間にある。また、各材齢の細孔径分布は OPC(0)と比較して細孔径分布の細孔径範囲が若干広く、総細孔量も材齢 1 日では、BB(0)は $0.217\text{ml/ml} \sim 0.225\text{ml/ml}$

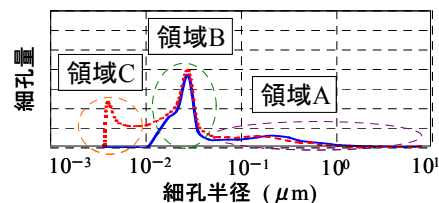


図-6 細孔径分布の一般性状

に対し OPC(0)は $0.139\text{ml/ml} \sim 0.146\text{ml/ml}$ 、材齢 3 日では、BB(0)は $0.219\text{ml/ml} \sim 0.240\text{ml/ml}$ に対し OPC(0)は $0.146 \sim 0.151\text{ml/ml}$ 、材齢 7 日では、BB(0)は $0.178\text{ml/ml} \sim 0.195\text{ml/ml}$ 対し OPC(0)は $0.147\text{ml/ml} \sim 0.155\text{ml/ml}$ といずれの材齢についても BB(0)が多い。また、材齢 7 日では、完全拘束においては、各区間に差異は小さく、さらに、無拘束とも差異が小さい。前述した OPC(0)では、完全拘束における各区間および無拘束と完全拘束に差異があったわけであるが、OPC(0)と BB(0)というセメントの種類による細孔径分布の性状に関しては、5 章で詳細に議論することとする。

4.2 モルタル

図-7 は、OPC(0.2), BB(0.2), OPC(0.45)および BB(0.45)における細孔径分布を示している。なお、図中に示す記号、材齢および着目する細孔領域は 4.1 と同様である。以下では各細骨材含有率に対して材齢および区間ごとの性状をセメントペーストの結果と比較して考察を行う。

細骨材含有率 0.2 については OPC(0.2)および BB(0.2)ともに拘束の有無および区間ごとの差異は小さくなっている。この傾向は、OPC(0.45)および BB(0.45)でも確認され、さらに差異は小さくなって

いる。また、細骨材含有率 0.45 については、領域 A の細孔量は材齢が経過するに従い多くなる。これらの性状は、粗骨材による拘束以外に細骨材とペースト界面のランジションゾーン自体の増加および細骨材による拘束の影響が大きく働いているものと考えられる。すなわち、粗骨材の拘束効果により生じる区間ごとの差異は小さくなるが、細骨材含有率の増加によるランジションゾーンの増加ならびに拘束効果が大きくなり、領域 A の空隙が増加したものと考えられる。

5. 細孔組織構造の変化に関する一考察

4 章の結果から、骨材の拘束により細孔量が増大し OPC, BB および区間ごとの差異を顕著に表している細孔径は、 $0.05\mu\text{m}$ 以上(領域 A)であることが示唆された。本章では、細孔構造に及ぼす骨材による拘束の影響および高炉スラグ微粉末の水和生成物の影響をより詳細に調べるために、領域 A の内、細孔径 $0.05\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ (細孔径 $3\mu\text{m}$ 以上の細孔量は殆どないため $3\mu\text{m}$ までとしている)の完全

拘束における累積量を図-8 に示す。ここで、材齢 1 日に関しては、細孔径 $0.05\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ の範囲で領域 B も含まれてしまうため除外した。

5.1 セメントペースト

セメントペーストに関しては、細孔量は界面区間で最も大きく、中心付近、中心区間に向かうに従い小さくなっている。このことは、粗骨材による外的な拘束力が原因であると考えられる。ただし、拘束力によって生じる空隙を新たな水和生成物が埋めていくため材齢 7 日では、この間の累積細孔量が区間毎に減少傾向にある。特に BB(0)では、3 章の 3 項で述べたように、自己収縮ひずみの絶対値は OPC(0)よりも大きいにも拘わらず、BB(0)では界面区間での材齢に伴う減少量が大きい。このことは、高炉スラグ微粉末の水和生成物が関与しているものと考えられ 5.3 で詳述する。

5.2 モルタル

区間ごとの細孔量に関しては、材齢 7 日では OPC(0.2)を除いて界面区間で少なく、中心付近、中心区間に向かうに従い増加するというセメントペ

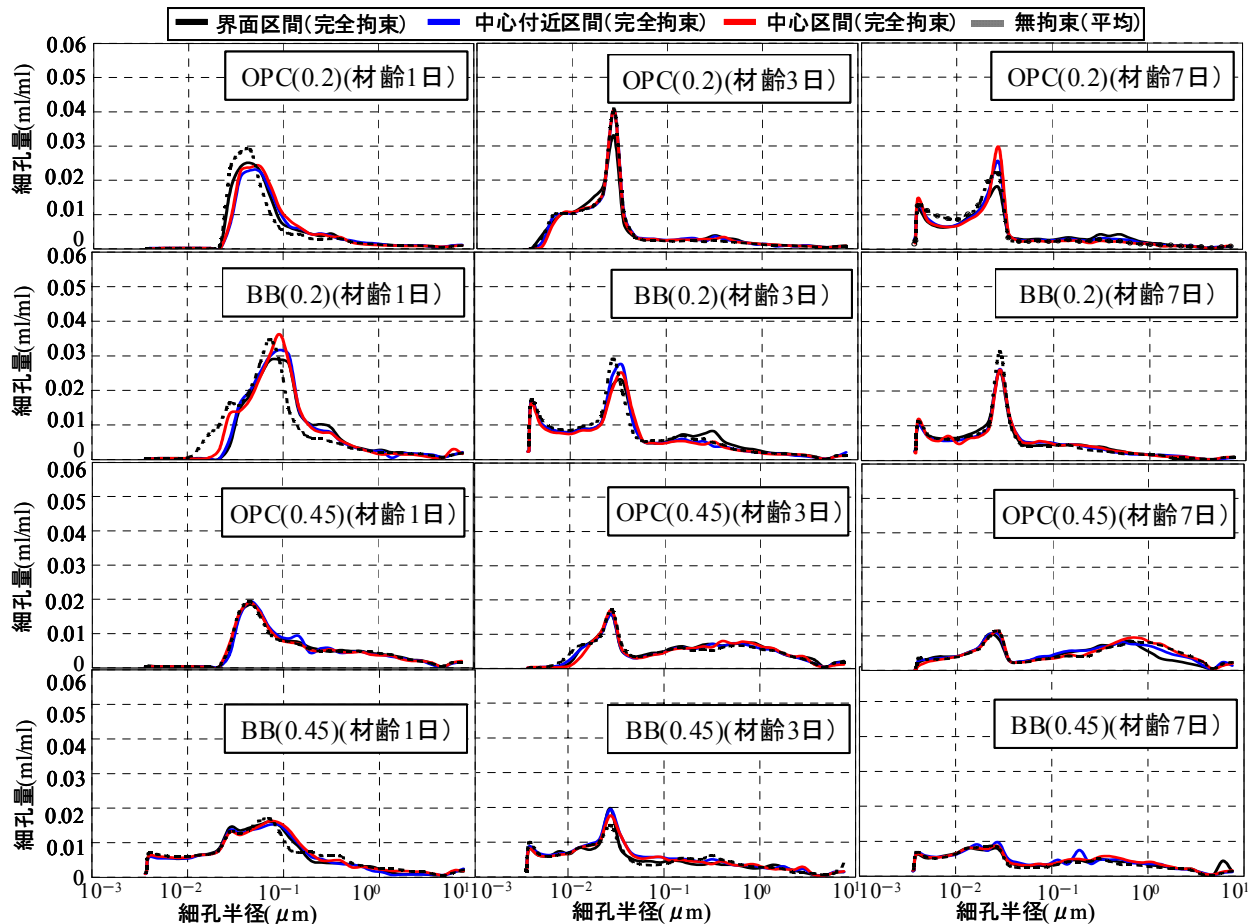
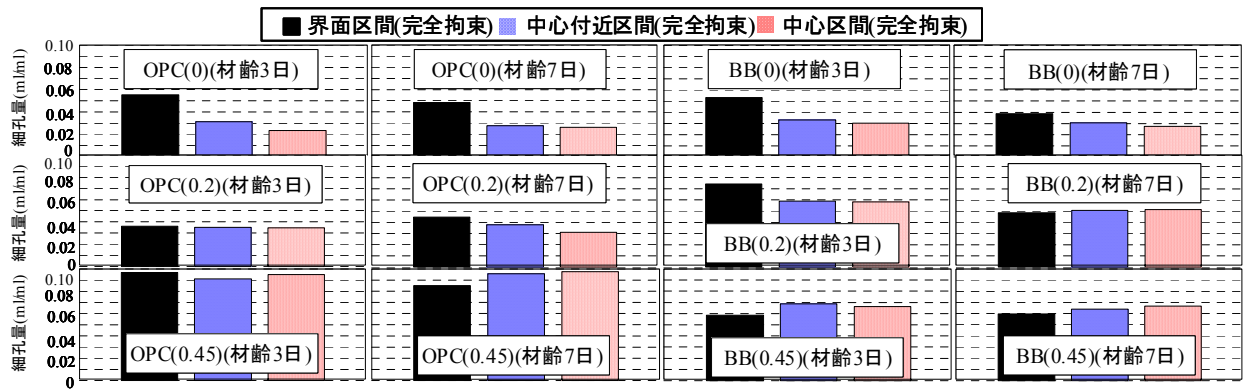


図-7 局所的細孔径分布(OPC(0.2), OPC(0.45), BB(0.2), BB(0.45))



図－8 細孔径 $0.05\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ における累積細孔量

ーストとは逆の挙動になっている。この性状は、細骨材含有率が 0.45 において顕著であることから考えると、粗骨材による拘束の影響ではなく、セメントペーストを取り巻く細骨材による拘束の影響によるものと推測される。すなわち、自己収縮駆動力が活発な中心、中心付近区間で細骨材による拘束の影響を大きく受け、その効果は含有率が上がると急速に大きくなることを意味している。

また、OPC(0.45)の方が BB(0.45)より材齢 3 日および 7 日の全区間で 1.3～1.7 倍程度多くなっていることがわかる。この差は、BB 中に約 45%含まれる高炉スラグ微粉末の材齢に伴う水和生成物の影響が極めて大きいものと考えられる。

5.3 高炉スラグ微粉末の水和生成物

骨材界面区間は、骨材界面の影響により打設後初期から $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結晶が多い領域であるので、潜在水硬性である高炉スラグ微粉末の反応は骨材界面領域で活発になると推測される。これらのことから、粗骨材の拘束の影響により新たに生成された空隙は、高炉スラグ微粉末の水和生成物であるアルミネート系水和物⁴⁾により埋められる効果が OPC より高いものと推察され 5.1, 2 のような結果になったと考えられる。

また、3 章の(3)項で述べた OPC よりも BB が材齢 7 日の時点で細骨材の混入によるひずみの減少量が大きいことに関しては、田中ら⁵⁾の報告にある材齢 1 日程度から確認されている未水和スラグとセメント水和物の間にある微小な凹凸を有する水和物層と結晶化の進んだ緻密な水和物層が関与しているものと推測される。すなわち、上述の未水和スラグとセメント水和物の間にある水和物層は、

通常の OPC での細孔組織構造にはない拘束に対する抵抗力が弱い領域を含んでいるものと推察され、その領域では細骨材の拘束により剥離などに伴う空隙を生じることとなり、細骨材混入によるひずみの減少量は大きくなったと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1)骨材および細骨材の拘束の影響は、局所的に細孔径 $0.05\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ の粗大な空隙と密接な関係があることが明らかとなった。
- (2)細骨材による拘束の影響は、細骨材含有率によって大きく異なり、含有率が増加すると急速に拘束力が大きくなることが示唆された。
- (3)BB では、骨材の拘束により新たに生じる空隙を高炉スラグ微粉末の水和生成物が埋めていく効果が高いことが示唆された。

参考文献

- 1) 自己収縮研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，2002
- 2) 小野貴史，角田洋，大下英吉：粗骨材の Bridging 効果による局所的に異なるセメントペーストの初期応力性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.599-604，2003
- 3) 小野貴史，大下英吉：粗骨材の拘束効果による局所的に異なるセメントペーストの細孔組織構造に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.591-597，2004
- 4) 花田光雄，伊藤貞敏：メリライト(ガラス質)の水和反応，セメント技術年報 23，pp.72-75，1969
- 5) 田中弘文，戸谷陽一，斉藤豊：ガラス状高炉スラグおよび合成スラグの水和，セメント技術年報 35，pp.53-56，1981.12