

破壊エネルギーの局所化を考慮した骨材・セメントペースト・遷移帯の 3連力学モデルの構築に関する研究

研究代表者 研究員 大下 英吉 (中央大学理工学部)
共同研究者 研究員 檜山 和男 (中央大学理工学部)
共同研究者 客員研究員 石川 靖晃 (名城大学理工学部)
共同研究者 客員研究員 鈴木 修一 (東電設計株式会社)
共同研究者 準研究員 小野 貴史 (中央大学大学院理工学研究科博士前期課程)

1 はじめに

高強度コンクリートや高流動コンクリートのような水結合材比が小さく単位結合材料が多いコンクリートでは自己収縮が顕在化し、耐久性や初期欠陥においてはその影響が非常に重要な問題となってくる。そのため、高強度コンクリートなどの自己収縮特性に関する研究は近年多数の報告 [1] がされている。しかしながら、それらの研究報告の多くは、粗骨材も包含したコンクリート全体の平均的な挙動として捉えたものがほとんどであり、ミクロ的観点に立脚したコンクリートの自己収縮挙動とコンクリート内部の粗骨材のかみ合わせ効果、ブリーディングおよび Wall effect 等の関連性を考慮した報告例は少なく、その性状も十分に把握されていないのが現状である。

本研究は、上述の現象が初期欠陥の制御や耐久性を考慮する上で無視できない重要な問題であると位置付け、ミクロ的観点に立脚したコンクリートの自己収縮挙動を解明することを目的として、コンクリートが粗骨材～セメントペースト～粗骨材からなるコントロールボリューム (寸法は任意) により形成されているものと仮定し、粗骨材の拘束効果による局所的な変形状、応力性状および細孔組織構造に関する実験的アプローチを行っている。昨年度までの研究 [2] では、粗骨材を完全に拘束した際に生じるセメントペーストの局所的な初期変形状および初期応力性状の定性的かつ定量的な評価を実施し、ペーストは粗骨材からの距離により局所的に異なる変形状および応力性状を呈し、微視的観点に基づく初期変形状および初期応力性状を評価することの重要性を指摘した。

本年度は、上述の現象をより明らかにすることならびに極若材齢に部材レベルで発生する局所的な応力やひび割れ性状を定量的に評価する際に重要であるセメントペーストの局所的な細孔径分布の測定を実施した。そして、ペーストの細孔組織構造に及ぼす粗骨材の拘束の影響について考察を行うとともに、特定の細孔径分布に着目することで、昨年度までの研究における初期変形状と内部細孔構造と

の関連性について評価した。

2 実験概要

各種初期変形状あるいは初期応力性状を考慮した統一的な変形解析モデルあるいは細孔組織構造モデルの構築に際しては、セメントペースト内部の細孔組織構造を測定することにより、初期変形状および初期応力性状と細孔径分布との関連性を明らかにしなければならない。

2.1 実験供試体

測定には、普通ポルトランドセメント (混和剤無添加品、比重: 3.15g/cm^3)、水セメント比 30%、 $40\times 40\times 50\text{mm}$ の形状寸法をしたセメントペースト供試体を用いた。なお、本研究では自己収縮に及ぼす粗骨材による拘束の影響を解明するための研究と位置付けているため混和剤は用いていない。型枠には、図 1(a) に示すような両端に粗骨材を取り付けた型枠および図 1(b) に示すような粗骨材無しの 2 種類の型枠を使用した。これらは粗骨材を外的に完全に拘束しセメントペーストの自由な自己収縮を拘束 (以下、完全拘束と称す) するための型枠および粗骨材が無い無拘束状態 (以下、無拘束と称す) を再現するための型枠である。ここで、実際の低水セメント比コンクリート中のペーストがおかれている拘束条件は、本実験における完全拘束および無拘束の間に位置しているものと考えている。なお、粗骨材を完全に拘束する方法は、図 2 に示すような水平台および万力 (150M/M) 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。また、型枠にはセメントペーストに与える拘束が小さい発泡スチロールを使用し、水分の逸散を防ぐために全体にアルミテープを施した。実験環境は、 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、 $40\pm 5\text{R.H.}$ 、粗骨材は微粒安山岩の碎石 ($40\sim 60\text{mm}$)、凝結始発時間はピカー針装置による測定を行い 155 分である。

2.2 細孔径分布の測定

供試体は図 3 に示すようにダイヤモンドカッターで 5 分割し、各区間のセメントペーストを約 3mm 角に破碎して

試料とし、凍結乾燥機用のフラスコに試料を入れ液体窒素に浸けて凍らせる。次に、凍結乾燥機で約1日間乾燥させ蒸発性水分を完全に除去する。なお、粗骨材界面領域の試料の採取方法は全ての供試体において界面から1mm程度のところをダイヤモンドカッターで切断した。ここで、完全拘束では粗骨材の界面あるいは無拘束では40×40mmの面から中心方向に向かって界面区間、中心付近区間および中心区間としている。細孔空隙の測定には水銀圧入ポロシメータを用いて行い、材齢1日、3日および7日の試料に対して低圧過程および高圧過程における各々の細孔空隙径分布を求めた。ポロシメータの細孔半径測定範囲は、3.6nm～330 μ mである。

3 測定結果および考察

3.1 局所的細孔径分布

図4, 5は、材齢1日、3日および7日の時点での完全拘束および無拘束状態におけるセメントペースト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、それぞれ界面区間、中心付近区間および中心区間の細孔径分布である。また、図6は、完全拘束状態および無拘束状態におけるセメントペーストの局所的細孔空隙累積量分布の相違を示したものである。

まず、無拘束状態におけるセメントペーストの細孔径分布は、同一材齢では各区間毎にほとんど差異がないことに対して、完全拘束状態では粗骨材界面区間の性状は他の区間とは全く異なった傾向を示している。完全拘束状態における粗骨材界面区間では、どの材齢においても、0.1 μ m～1 μ m付近の細孔量が他の区間よりも大きく、逆に細孔量のピークである0.01 μ m～0.1 μ m付近の細孔量は最も小さくなっている。また、材齢の経過に伴い0.1 μ m～1 μ m付近の細孔量は減少していることに対して、それ以外の区間では、材齢の経過に対してほとんど変化していないことがわかる。これらの現象は、粗骨材界面区間とそれ以外の区間において、自由な自己収縮が粗骨材により拘束されることや粗骨材の界面の影響により水和過程や変形性状に差異を生じていることが原因であると考えられる。すなわち、粗骨材界面区間では粗骨材界面の影響により水セメント比がそれ以外の区間よりも大きくなっていること、自己収縮の拘束の影響が加味されること等により細孔組織は粗となり大きい径の細孔量は多くなる。一方、それ以外の区間では、水セメント比が30%であるために、セメント粒子の配置は非常に密な状態となっており、ピークとなる空隙径のオーダーよりも1桁以上大きい0.1 μ m～1 μ mの範囲の全細孔量に関してはほとんど変化していないものと考えら

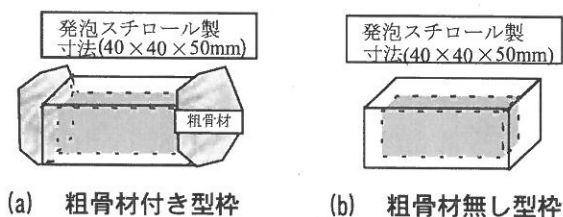


図1 実験型枠

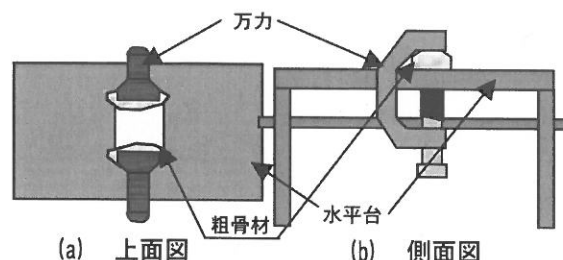


図2 完全拘束用測定装置

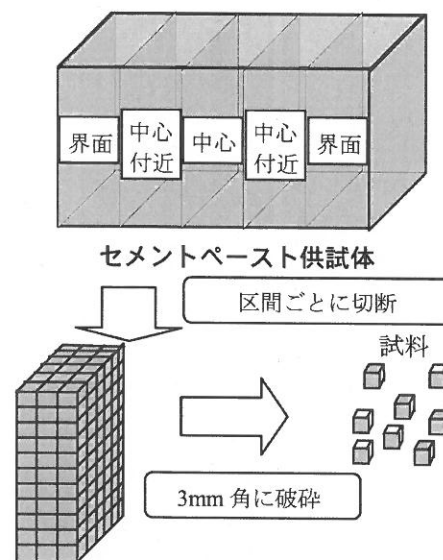


図3 細孔空隙径測定用試料

れる。したがって、粗骨材界面区間でこのような差異を生じることは、変形性状と初期応力性状が局所的に極めて異なっていることを意味している。

次に、図6の細孔空隙累積量分布に基づいて完全拘束状態と無拘束状態における細孔構造について比較すると、完全拘束状態は無拘束状態より各区間のばらつきが大きく、どの材齢においても粗骨材界面区間では小さな径を有する細孔が少なく中心区間に向かうに従ってそれらの細孔が多くなることわかる。また、材齢7日の時点では0.01 μ m以下の細孔量が完全拘束状態では無拘束状態と比較して少ないこともわかる。このことについては、後節で詳細に評

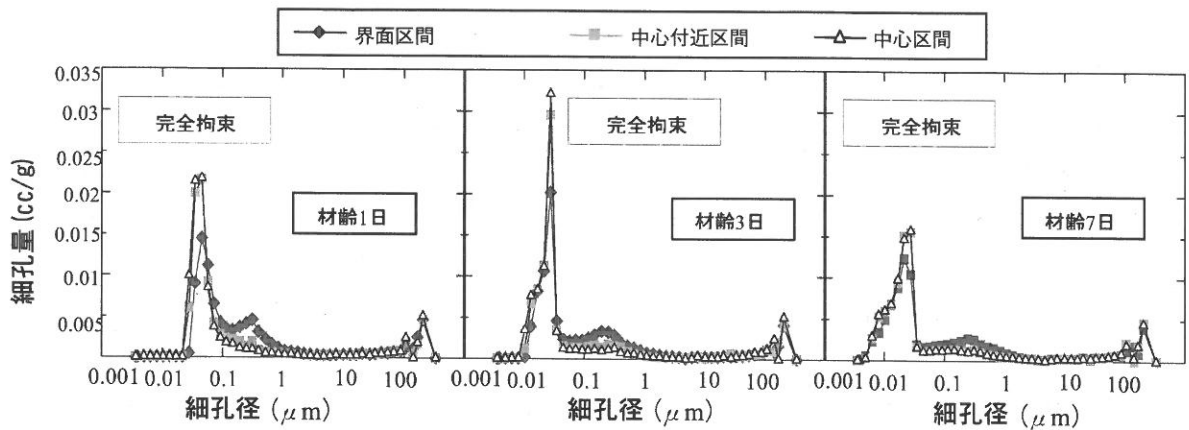


図4 完全拘束状態におけるセメントペーストの局部的細孔径分布

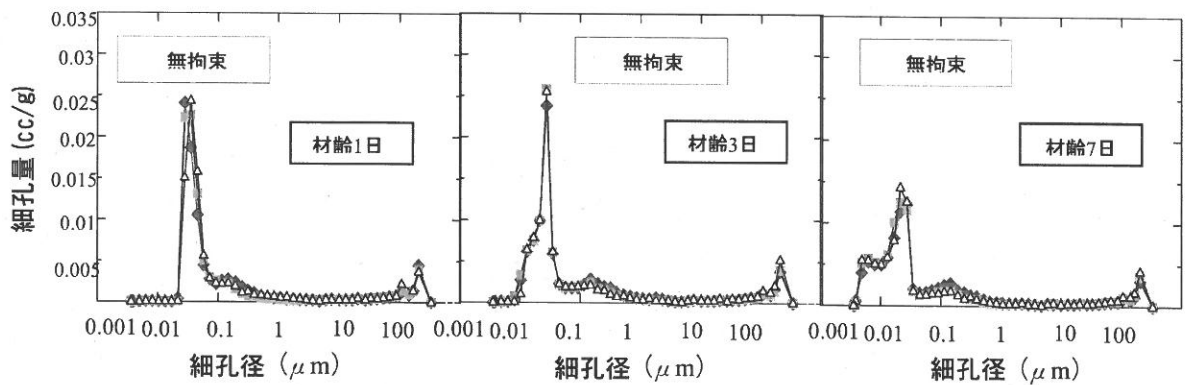


図5 無拘束状態におけるセメントペーストの局部的細孔径分布

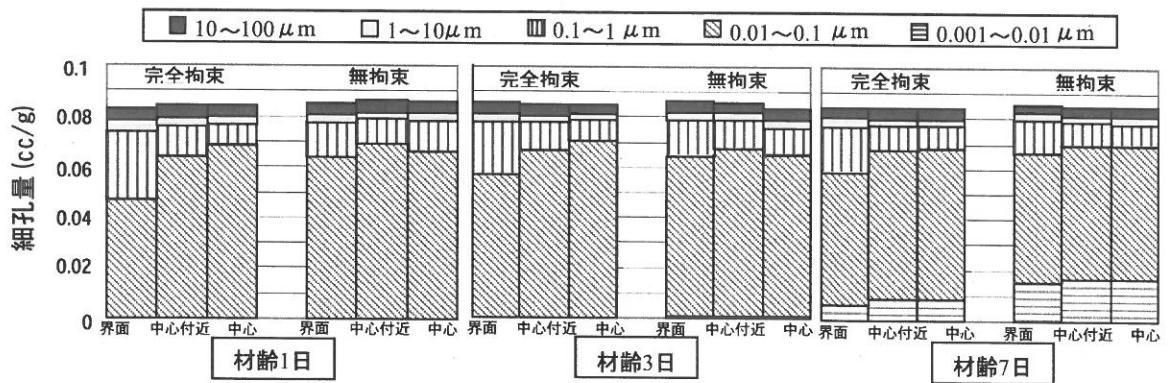


図6 拘束の有無によるセメントペーストの局部的細孔空隙累積量分布

価するが、前節の図2に示すような粗骨材の拘束の影響が主な原因であると考えられる。また、図4～6より当然のことではあるが、細孔量がピークとなる径は材齢の経過とともにより小さい径にシフトしており、毛細管張力説により自己収縮が生じるとするならば、上述の各区間の性状から判断してもこの変化が自己収縮に関与している可能性は高い。

3.2 極若材齢における細孔組織構造

図6に示す細孔空隙累積量分布より、本研究で対象とした細孔径範囲 $0.0036\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ における総細孔量は、完全拘束状態、無拘束状態および材齢に拘わらずほぼ等しいことがわかる。このことは、粗骨材による拘束の有無により各径に対する細孔量の割合は変化しているが、低水セメント比でありかつ水分の逸散が無い環境下における極若材齢のセメントペーストの細孔構造は、通常とは異なる性

質を示すものと判断し以下のような提案を行った。

図7(a)に示すように拘束の有無に拘わらず材齢1日の時点でセメントペーストの骨格と空隙構造の配置はある程度形成されていると考えられる。本実験のような環境下および低水セメント比の場合、極若材齢のセメントペーストは、骨格同士の連結も脆弱なため空隙の収縮に伴う応力場の形成により、図7(b)に示すような空隙の周囲にマイクロクラックや剥離が生じるものと考えられる。これらは、水銀圧入試験により新たな空隙と評価されることとなり、水和の進行に伴う組織の緻密化以外に大小あらゆる空隙の周りに細孔が生成されるため本実験の範囲におけるトータルとしての細孔量はほとんど変化しないものと考えられる。以上のことから、極若材齢の組織の緻密度の指標となる細孔径は、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の細孔径に着目することであると考える。次節では、細孔空隙累積量分布を用いて変形性状に最も影響を及ぼす細孔空隙径の同定およびそれらの関連性について考察を行うこととする。

3.3 細孔空隙径と初期変形性状との関連性

3.2節の細孔空隙分布の考察から、毛細管張力理論に立脚した自己収縮特性と関連性のある細孔径は $0.1\mu\text{m}$ 以下であることが予想された。そこで、 $0.0036\mu\text{m}$ から $0.12\mu\text{m}$ の細孔径範囲に着目し、その範囲を5分割することで新たに図8に示す局所的細孔空隙累積量分布を作成した。ここでは、自己収縮特性と毛細管空隙との関連性を明らかにすることを目的としているため、既往の研究で得られた図9に示す完全拘束状態および無拘束状態の局所的ひずみ分布[2]を用いて議論していくこととする。ここで、図9に示す縦軸は、正が収縮、負が膨張を表している。なお、完全拘束状態の界面区間は遷移帯を含んだひずみである。また、ひずみ測定に用いた供試体、型枠および実験環境は本実験と同じであり、局所的な変位の測定に関しては、図10に示すように供試体に超極細針($\phi=0.41\text{mm}$)を用いて均等に5区間に分け、 $0.1\mu\text{m}$ まで測定可能なレーザー変位計により測定を実施したものである。なお、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た。ここで、図9において材齢1日の時点では完全拘束状態においても変形量が大きいのは、セメントペーストが遷移過程にあり粗骨材による拘束力が中心付近、中心区間に及ぼす影響は小さくなるため無拘束に近い収縮量を示すからである。また、材齢1日の時点で粗骨材界面区間の膨張量が中心付近、中心区間の収縮量より大きくなるのは、粗骨材による拘束および中心付近、中心区間の自己収縮の影響を局所的に受けるからである。

まず、完全拘束状態に着目すると粗骨材界面区間で 0.12

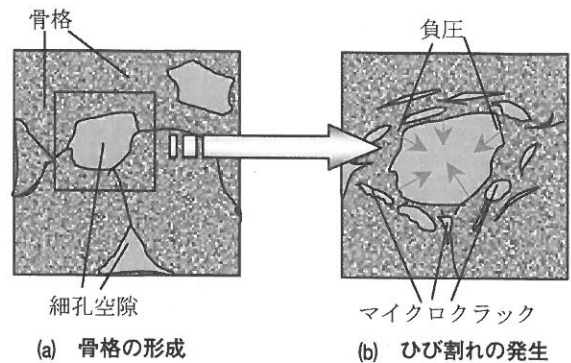


図7 セメントペーストの骨格と空隙構造

μm 以下の総細孔量が少なく中心区間に向かうに従い大きくなっており、この傾向は、自己収縮ひずみ分布における粗骨材界面区間で膨張、中心付近区間および中心区間で収縮となる現象に対応しているものと考えられる。したがって、 $0.0036\mu\text{m} \sim 0.12\mu\text{m}$ を5つに分けた範囲の内、上述の傾向が最も顕著である細孔径範囲が粗骨材による拘束の影響を最も受けているものと考えた。ここで、粗骨材界面のブリーディングの影響に関しては2.1節で示したように供試体を水平台に対して平行に設置していること、2.2節の粗骨材界面における供試体の切断方法、ならびに無拘束状態と比較して完全拘束状態における中心付近、中心区間の細孔空隙累積量分布に差異を生じていることから判断し、ブリーディングの影響よりも粗骨材による拘束の影響がこの範囲の細孔径については支配的であると考えた。そこで、完全拘束状態におけるそれぞれの材齢について見てみると、材齢1日においては $0.0165\mu\text{m} \sim 0.070\mu\text{m}$ の範囲、材齢3日および7日においては $0.0130\mu\text{m} \sim 0.035\mu\text{m}$ の範囲の細孔径である。したがって、材齢1日から3日に至る過程では、拘束を受ける細孔径範囲はより小さな細孔径範囲にシフトしていることに対して、材齢3日から7日に至る過程では、拘束を受ける細孔径範囲に変化がないことがわかる。このことは、同時に自己収縮が顕著に生じる径の範囲も示していることと考えられ、本実験においては細孔径が $0.0130\mu\text{m} \sim 0.070\mu\text{m}$ の範囲の毛細管空隙が自己収縮を支配的に生じさせる径であると推測され、 $0.050\mu\text{m}$ 以下の小さい空隙が収縮に関与しているとの報告[1]とも一致している。

また、材齢の経過と共に自己収縮を支配的に生じさせる径が変化することも予想される。自己収縮が最も顕著に生じる凝結始発から材齢7日までを考えると、材齢3日目までは $0.0130\mu\text{m} \sim 0.070\mu\text{m}$ 、材齢3日以降では $0.0130\mu\text{m} \sim 0.035\mu\text{m}$ の小さな毛細管空隙になるものと考えられる。一方、無拘束状態においても完全拘束状態とほぼ同様の細

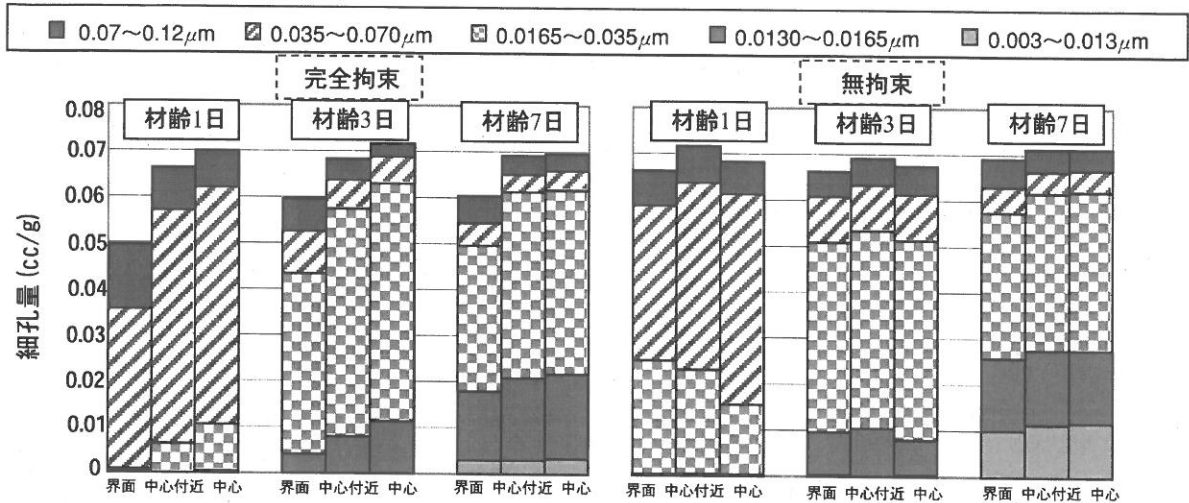


図8 0.12 μm 以下の細孔径に着目した細孔空隙累積量分布

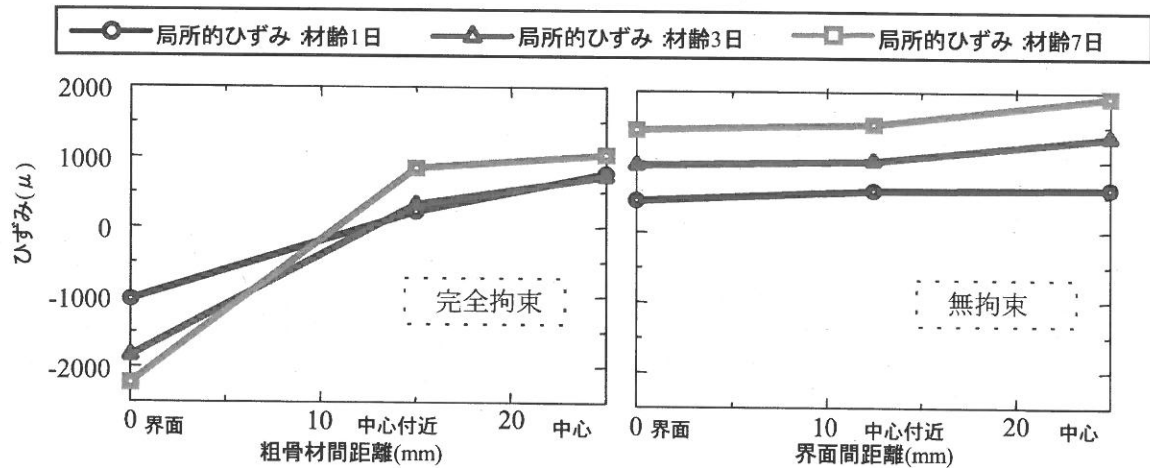


図9 完全拘束状態および無拘束状態における局所定ひずみ分布

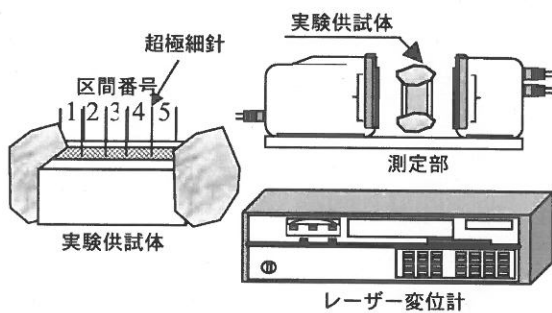


図10 実験供試体および実験装置

孔空隙が自己収縮に関与しているとするならば、区間ごとの細孔量の変化はほとんどなく局所的ひずみ分布の性状と良く一致していることがわかる。以上のことから、完全拘束状態および無拘束状態における局所的な細孔径分布と自己収縮ひずみは密接な関係があることがわかる。しかしながら、前節で述べたように材齢の経過に伴う細孔径の遷移

がそのままマクロ的に見た自己収縮に結び付くとは考えられないため、今後細孔径分布から自己収縮ひずみを算出する方法について解明する必要がある。

4 まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 粗骨材の拘束効果によりセメントペーストの自由な自己収縮が拘束されると、細孔構造は粗骨材界面区間で粗となり中心区間に向かうに従い密となった。
- (2) 低水セメント比、極若材齢かつ水分の逸散が無いセメントペーストの細孔構造は、材齢の経過と共に細孔径のピークはより小さい径にシフトするが、本実験の細孔径の範囲における総細孔量の変化はほとんどなかった。このことから、自己収縮に伴いマイクロクラックが生成されていることが示唆された。

- (3) 完全拘束状態の細孔空隙分布から局所的な自己収縮ひずみと細孔構造は関連していることが明らかとなった。さらにこれらの経時変化から特定の毛細管空隙が自己収縮に関連していることが推測された。

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