

# 論文 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

小野 貴史<sup>\*1</sup>・角田 洋<sup>\*2</sup>・大下 英吉<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究では、コンクリートの自己収縮に起因する素材レベルでの初期欠陥を詳細に評価することを目的として、粗骨材の Bridging 効果によるセメントペーストが局所的に異なる変形および初期応力性状を呈することに着目し、粗骨材間セメントペーストを完全に拘束した状態での局所的なひずみの測定実験を実施した。その結果、粗骨材界面区間において大きな膨張ひずみおよび引張応力が発生すること、拘束初期引張応力は中心区間に向かって弱くなり材齢とともに大きくなることが明らかとなった。

**キーワード**：局所的初期変形、局所的初期応力、Bridging 効果、自己収縮

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高強度化、高耐久化にともなって、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が普及している。この種のコンクリートにおいては、水和発熱による温度応力は勿論のことであるが、初期欠陥として自己収縮が非常に重要な問題となっており、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>においてもその影響が考慮されている。

従来、コンクリートの自己収縮は粗骨材も包含した部材レベルの巨視的なひずみとして考慮されているが、粗骨材間に存在するセメントペーストやモルタルの局所的な自己収縮に関しては議論されていない。勿論、セメントペーストやモルタル自体の自己収縮に関しては定量的に評価はなされているものの、コンクリート内に存在するセメントペーストやモルタルは粗骨材のかみ合わせ効果や Bridging 効果により自由な自己収縮が拘束され、局所的に異なる変形性状およびそれに起因する初期応力性状を示すことになるものと考えられる。したがって、セメントペーストやモルタル自体の性質はそのまゝの形でコンクリートには適用が困難と考えられる。

著者ら<sup>2)</sup>は粗骨材、遷移帯およびセメントペーストをコントロールボリュームとしたコンクリートに対して、セメントペーストの自由な自己収縮が粗骨材の Bridging 効果によって拘束された際に生じるセメントペーストの定性的かつ定量的な評価を行った。セメントペーストの初期変形性状は、粗骨材からの距離によって局所的に異なるという不均一なものとなり、粗骨材の拘束効果が空間軸に対してセメントペーストの自己収縮に大きな影響を及ぼすことが指摘されるとともに、粗骨材界面の遷移帯形成においても自己収縮の影響が大きく関与することも指摘された。しかしながら、このような不均一な初期変形性状が、時々刻々と組織を変遷するセメントペーストの初期応力性状にどのように関連するかについては未解明の状態であった。

そこで本研究では、粗骨材の Bridging 効果によるセメントペーストの局所的な初期応力性状の定性的かつ定量的評価を行うことを目的として、粗骨材を完全に拘束した状態におけるセメントペーストの局所的な変形性状および応力性状の測定実験を実施した。さらに、初期欠陥に関してのミクロ的観点からのアプローチの重要性を指摘した。

\*1 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

\*2 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

\*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

## 2. 既往の粗骨材間セメントペーストにおける初期変形状評価<sup>2)</sup>

著者らは、粗骨材～遷移帯～セメントペースト～遷移帯～粗骨材からなるコントロールボリュームによりコンクリートが形成されるものとして捉え、粗骨材が完全に拘束されている状態でのペーストの自己収縮による初期変形状および初期応力性状を明らかにすることで、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や細孔組織構造の構築を目的としている。ここでは、本研究の位置付けを明確にするために既往の研究概要を示す。

### 2.1 実験概要

測定には、W/C30%、40×40×50mmの形状寸法をしたセメントペースト供試体を用い、型枠には、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。区間の分割は、ペースト中央部に超極細針(φ=0.41mm)を10mm間隔で5分割し、粗骨材が水平に配列されている状態でレーザー変位計(1/10000mm)を用い凝結始発から材齢7日まで1時間間隔で測定を実施した。実験環境は、20±2℃、40±5R.H.、使用材料は、普通ポルトランドセメント(混和剤無添加品、比重:3.15g/cm<sup>3</sup>)、粗骨材は微粒安山岩の碎石(40~60mm)、凝結始発時間はビカー針装置による測定を行い155分である。

なお、本研究では、純粋な自己収縮に及ぼす粗骨材による拘束の影響に関する基礎的研究と位置付けているため、使用材料にペーストを用いた。

図-2はセメントペーストの局所的自己収縮ひずみ履歴を示したものであり、図中に示す記号○、△および□は、それぞれ粗骨材界面(図-1の1,5区間)、中心付近(図-1の2,4区間)、中心区間(図-1の3区間)の局所的収縮ひずみ、●は供試体全体の自己収縮ひずみである。

セメントペーストには不均一な収縮ひずみ分布を生じており、この現象はペーストの自由な自己収縮が粗骨材の自重による凹凸を有した底

面の摩擦によって拘束されるためである。また、水銀圧入式ポロシメータを使用し、各区間の細孔組織性状について調べたところ、粗骨材界面区間から中心区間に向かうにしたがい組織が緻密になる傾向を示し、細孔組織が異なることが明らかとなるとともに、図-3に示すように、粗骨材界面区間で最も引張強度が小さく中心区間に向かうにつれ大きくなる傾向を示した。

上述した現象は、粗骨材間セメントペーストの不均一な初期変形状により、ペースト各所において局所的に異なる応力を発生することを示唆している。したがって、統一的力学モデルを構築する上で初期変形および初期応力等の初期性状をより明確にすることが重要である。

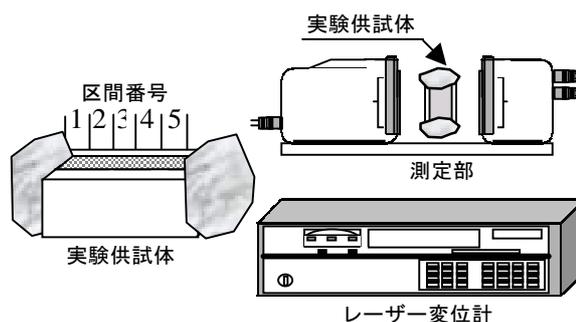


図-1 実験供試体および実験装置

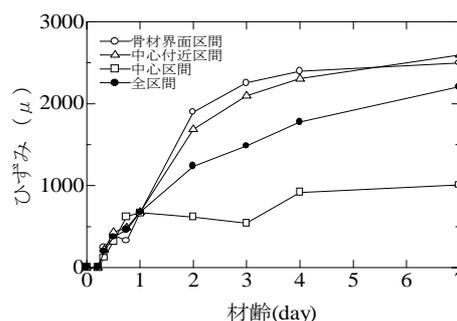


図-2 各区間の局所的自己収縮ひずみ履歴

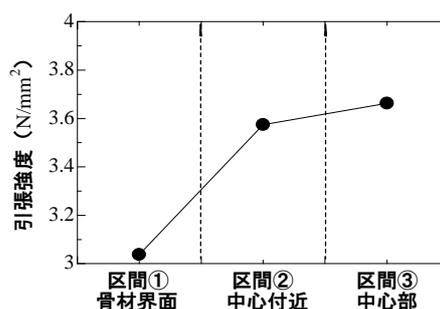
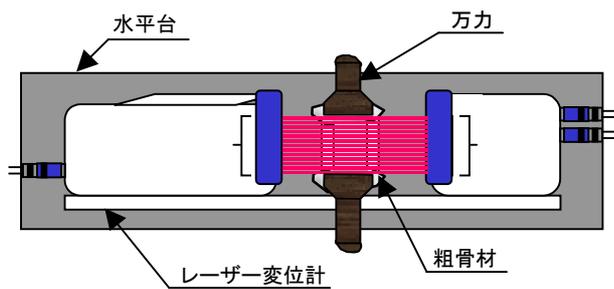
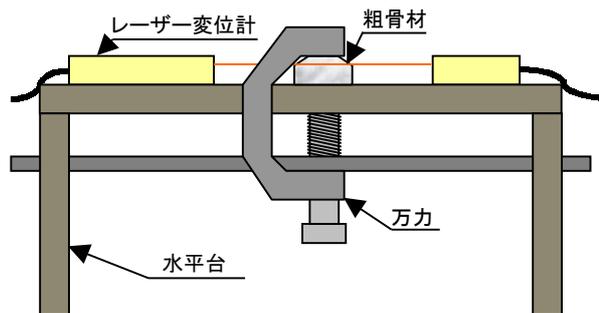


図-3 各区間における局所的引張強度



(a) 上面図



(b) 側面図

図-4 完全拘束用測定装置

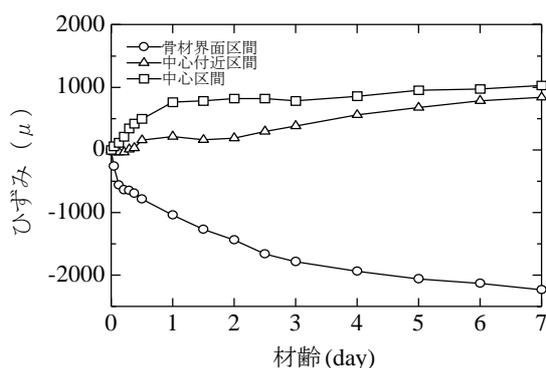


図-5 完全拘束下における局所的ひずみ

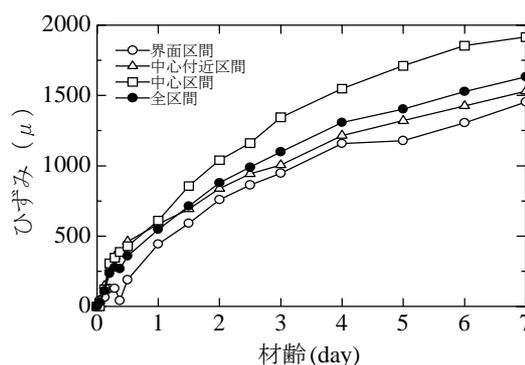


図-6 無拘束下における局所的ひずみ

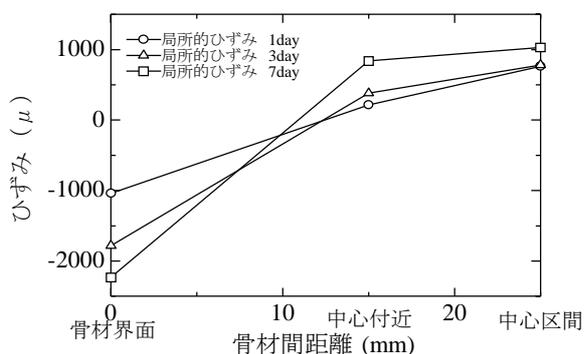


図-7 完全拘束下におけるひずみ分布

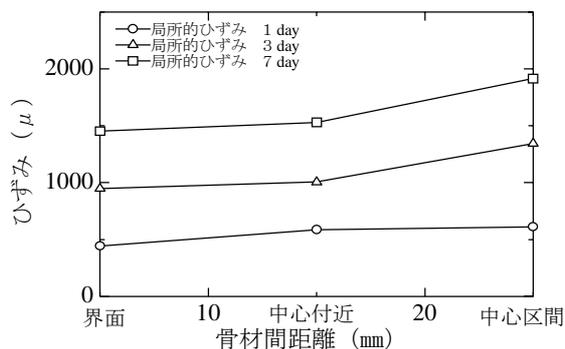


図-8 無拘束下におけるひずみ分布

### 3. セメントペーストの初期変形性状と初期応力性状

局所的に異なる初期応力，変形性状を詳細に評価するために，完全拘束変形性状測定試験および弾性変形測定試験により実施した。ここで，完全拘束変形性状測定試験とは，粗骨材を外的に完全に拘束した状態で局所的に異なるセメントペーストの変形性状を測定する試験である。また，弾性変形測定試験とは，各材齢において上述の拘束を無くした際に各区間で生じる回復性の変形を測定する試験であり，そのひずみを用いて局所的な初期応力を算出することとする。

### 3.1 完全拘束による局所の変形性状評価

#### (1) 完全拘束変形性状測定

実験環境および実験供試体は 2. と同様である。完全拘束ひずみの測定は，図-4 に示す試験装置により実施し，粗骨材により完全に拘束（以下，完全拘束と称す）された若材齢セメントペーストの局所的に異なる変形性状を定性的かつ定量的に捉えることとした。粗骨材を完全拘束する方法は，万力(150M/M)により粗骨材と水平台とを完全に固定し，万力による偏心荷重を防ぐため2つの粗骨材の上下表面をダイヤモンドカッターで同じ高さでかつ水平台に対して平

行に切断した。なお、セメントペーストの変形状に及ぼす拘束の影響度合を評価するために、粗骨材が無い状態(以下、無拘束と称す)での局所的な変形ひずみの測定も実施した。

## (2) 局所の変形状

図-5, 6は完全拘束下, 無拘束下におけるセメントペーストのひずみ履歴を示している。なお, 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局所の変形ひずみ, ●は無拘束下でのセメントペーストの供試体全体の自己収縮ひずみであり, 収縮が正, 膨張を負としている。また, 図-7, 8はそれぞれ材齢1日, 3日および7日におけるひずみ分布を示している。

まず, 図-5, 6において完全拘束下と無拘束下では, ひずみ履歴が全く異なっている。このことは, 無拘束下ではセメントペーストに応力が発生しないと考えると, 完全拘束下では局所的に異なる応力が生じていることとなり, その詳細については3.2で議論する。

次に, 無拘束下での局所的自己収縮について図-6, 8を基に評価する。各区間での変形状は収縮を示し, 材齢に伴う変形挙動はほぼ同一であるが, その値は粗骨材界面で小さく中心区間に向かうにしたがい大きくなる傾向にあり, 無拘束下でも場所毎にひずみ量の僅かな違いを生じている。これは, 中心部において水和反応が活発となり, 界面近傍に比べて組織が緻密化されることによるものである。なお, 完全拘束下での変形状は, 上述した局所的に異なる水和進行過程だけでなく粗骨材による拘束効果および wall effect 等の影響を同時に受けるため, 無拘束下とは全く異なる初期性状を生じるものと考えられる。

上述の性状を加味することにより, 完全拘束下での局所の変形状を無拘束下の変形状に対比して詳述する。材齢1日の時点までにおいては, 界面区間では完全拘束下で膨張, 無拘束下では収縮と全く逆の傾向が確認できる。このような粗骨材界面領域の挙動は, その領域のセ

メントペースト自体も自己収縮を生じるものの, より卓越する中心部の自己収縮が粗骨材に反力として界面領域のセメントペーストを引張ることによるものである。中心付近区間では完全拘束下での収縮ひずみ量が無拘束下と比較すると約  $250\mu$  小さくなっているが, 中心区間では完全拘束下, 無拘束下に関わらず収縮ひずみ量にほとんど差異は見られない。また, 材齢1日までの各区間でのひずみ増分率は, これ以降の材齢と比較して大きくなっている。材齢1日までの完全拘束下におけるこれらの現象は, 上述した粗骨材等の影響およびセメントペーストが極めて若材齢であるため僅かな毛細管張力でも変形量は大きくなり, 拘束効果も小さくなるものと考えられる。

材齢1日以降については, 完全拘束下では無拘束下と比較して各区間でのひずみ量の変化率が時間の経過にしたがい小さくなる。粗骨材界面区間では, 材齢1日と同様に完全拘束下では膨張, 無拘束下で収縮となっている。また, 中心付近区間では材齢2日までの変化量はほとんど無く, 材齢2日以降は収縮傾向に転じている。一方, 中心区間では材齢2日までの変化量は収縮傾向を示し, 材齢2日以降はほとんど変化していない。材齢1日以降の完全拘束下におけるこれらの現象は, 水和進行過程にともなう自己収縮が局所的に異なることおよび粗骨材とセメントペーストの付着に起因した拘束効果が, 材齢とともに組織が緻密になることで大きくなるためと考えられる。これらの現象についての詳細は, 3.2の応力性状と併せて議論することとする。

## 3.2 局所的初期応力性状評価

拘束状態下でのセメントペーストのひずみには自己収縮の他に, 弾性成分や粘性成分を含む。また, 3.1(2)で指摘したように各材齢におけるセメントペーストの内部細孔組織は, 拘束および無拘束下において随時変化していくため, 完全拘束下でのひずみと無拘束下でのひずみの差が応力に直接関与する有効ひずみとなるわけで

表-1 ヤング係数<sup>3)</sup>

| 材齢 (day) | ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|----------|----------------------------|
| 0.33     | 3.2                        |
| 0.50     | 8.1                        |
| 0.75     | 11.7                       |
| 1.00     | 14.4                       |
| 2.00     | 17.8                       |
| 3.00     | 19.2                       |
| 5.00     | 21.1                       |
| 7.00     | 21.7                       |

はない。すなわち、組織変遷も考慮した有効ひずみを算出する必要性があり、これは粗骨材の拘束による弾性ひずみと等しい。したがって、本研究では、各材齢において拘束状態から拘束を除荷したときの収縮量を測定することで有効ひずみを算出することとした。

### (1) 弾性変形測定

試験方法は、所定の材齢までは完全拘束変形状測定試験と同じ手順であるが、所定の材齢である、材齢1日、3日および6日に万力を取り外し、拘束を無くした直後に生じるセメントペーストの回復した変位量（有効ひずみ）を測定した。なお、変位量は、拘束除荷直前の各区間長から拘束除荷直後の各区間長を差し引くことで求めた。

### (2) 局所的初期応力算出方法

初期応力は、局所的弾性変形測定試験から求めた有効ひずみと、普通セメントペーストのヤング係数から以下の式で求めた。

$$\Delta\sigma_t(x/l_0) = \alpha E_t \times \Delta\varepsilon_t(x/l_0) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma_t$ は各材齢における応力増分、 $\Delta\varepsilon_t$ は有効ひずみ増分、 $x$ は粗骨材からの距離、 $l_0$ は粗骨材間距離、 $E_t$ はヤング係数であり表-1に示す浜中らの実験<sup>3)</sup>を参照した。なお、右辺の係数 $\alpha$ は、組織構造に関する低減係数であり、セメントペーストの自己収縮、すなわち毛細管張力に起因する応力は静的な外力に対する弾性

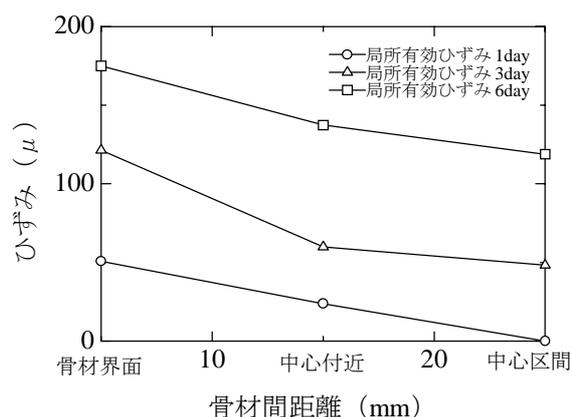


図-9 有効ひずみ分布

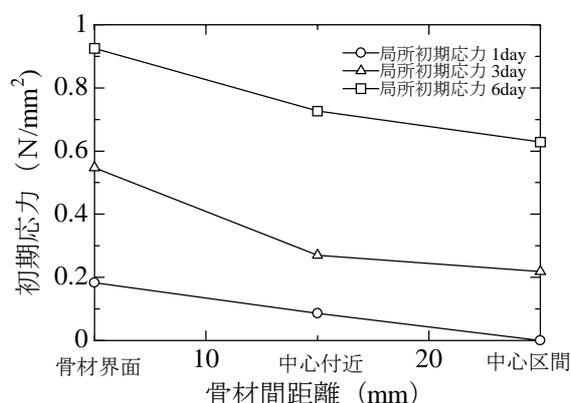


図-10 初期応力分布

係数の1/3から1/4になるとの報告<sup>4)</sup>から判断し1/4と定めた。

### (3) セメントペーストの局所的初期応力性状

ここでは、3.1で議論した時々刻々と変遷する初期変形状と初期応力性状との関連性をより明確にすることを目的として、局所的な初期応力性状について評価する。

図-9、10は粗骨材間セメントペーストの材齢1日、3日および6日の各区間での有効ひずみ分布ならびに初期応力分布を示している。

図-10より、粗骨材界面で最も大きな引張応力が生じ、中心区間に向かうにしたがってその値は小さくなる。さらに、この性状は材齢とともに増大する傾向を示している。以下では、このような応力性状を図-9に示す有効ひずみ分布と図-7に示す完全拘束下におけるひずみ分布に対応させて議論する。

材齢1日に着目すると粗骨材界面区間では約1000 $\mu$ の膨張ひずみを生じていることに対して、

有効ひずみは全く逆の収縮を示し、その値は約  $50\mu$  である。中心付近区間では約  $250\mu$  の収縮ひずみを生じており、有効ひずみは同じ収縮であり値は約  $25\mu$  である。中心区間では約  $800\mu$  の収縮ひずみを生じていることに対して、有効ひずみはほとんど生じていない。このように、有効ひずみが各区間でのひずみ量と比較して 10 オーダー以上小さいのは、粗骨材により拘束された際に収縮できなくなるひずみ量には、弾性ひずみのみならずクリープにともなう粘弾性および粘塑性ひずみが含まれているからである。さらに、3.1(2)で説明したように、材齢 1 日までは、セメントペーストの硬化体としての組織が遷移過程であるため、自己収縮による変形量は大きくなるが、粘性成分が多く含まれることにより回復性の有効ひずみは小さくなる。したがって、初期応力に関しては、粗骨材界面区間では約  $0.2\text{N/mm}^2$ 、中心付近区間では約  $0.1\text{N/mm}^2$ 、中心区間では生じていない結果となる。

次に、材齢 3 日以降に着目すると、図-7 に示すように各区間でのひずみの増分割合は小さくなり、図-9 に示すように有効ひずみは材齢とともに大きくなる。このことは、完全拘束下では収縮できないひずみ量が大きくなることと、セメントペーストの組織の緻密化にともない毛細管張力が大きくなることにより、それらが駆動力となることから弾性ひずみが大きくなるものと考えられる。なお、図-9、10 に示した各区間での有効ひずみと初期応力には、拘束の除荷後から測定するまでの時間のファクターが少なからず入っている。したがって、僅かながらクリープによるひずみが含まれることや各区間で異なる弾性係数を用いてないため若干大きな値になるものと考えられる。

以上のように、粗骨材の Bridging 効果により自由な自己収縮が拘束されると、微視的にセメントペーストは不均一な変形或いは応力状態となり、それらは無視することができない重要な問題であるわけである。したがって、一般にコ

ンクリートの自己収縮は粗骨材も包含した部材レベルの巨視的なひずみとして考慮されているが、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、微視的観点に基づく初期変形性状や初期応力性状をセメントペーストやモルタルに導入することが重要となる。

#### 4. まとめ

本研究では、粗骨材間セメントペーストを完全拘束した状態下における変形性状および応力性状についての実験的評価を行った。

その結果を以下にまとめる。

- (1) 粗骨材を完全拘束したセメントペーストの自己収縮による変形性状は、粗骨材界面区間では膨張ひずみ、中心区間に向かうにしたがい収縮ひずみになることが確認された。
- (2) 粗骨材とセメントペーストの付着に起因した拘束応力は、粗骨材界面区間で最も大きく中心区間に向かうにしたがい小さくなった。また、材齢とともに各区間で拘束初期応力が增大することが確認された。
- (3) 以上の結果から高強度コンクリートや高流動コンクリートに対しては、微視的観点に基づくセメントペーストの初期変形性状や初期応力性状を評価することが重要となる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，規準編，2002
- 2) 劉兆濤，染谷弘法，大下英吉：セメントペーストの細孔組織に及ぼす初期変形性状の影響に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，Vol.24,2002
- 3) 大下英吉，浜中隆：若材齢時のセメント系材料の自己収縮存在下におけるクリープ特性に関する研究，土木学会論文集，第 641 号，V-46, pp. 53-66,2000.2
- 4) 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