

論文 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

劉 兆涛^{*1}・染谷 弘法^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨：コンクリート中に存在するセメントペーストは、材齢初期において骨材間のかみ合わせによる拘束力により空間軸をパラメータとした変形を生じるものと想定される。本研究では、骨材間に存在するセメントペーストの空間軸毎に異なる初期変形性状の解明を目的とし、局所的な自己収縮測定および局所的な強度実験を実施した。その結果、骨材間セメントペーストにおいて不均一な初期変形性状が発生し、細孔組織形成にも影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード：骨材, 局所的自己収縮, 細孔組織, 局所的強度特性

1. はじめに

近年、高強度コンクリートや高流動コンクリートが多用され、これに伴いコンクリートの致命的弱点とされるひび割れに関する研究や自己収縮および温度応力に関する研究が盛んに行われている。中でも凝結始発以降顕著に生じる自己収縮は、ひび割れの発生における主原因となっており、粗骨材量が多い場合においては、コンクリート中に存在する粗骨材全容積がコンクリート全容積に対して大部分を占めており、粗骨材同士のかみ合わせによるセメントペーストの自己収縮の拘束すなわち骨材の Bridging が形成されることになる。その拘束効果はセメントペーストに様には作用せず、結果としてセメントペースト位置により異なる初期変形性状を生じさせることになる。したがって、骨材近傍における、構造あるいは強度低下に影響を及ぼす要因には、遷移帯に加えて上述した細孔径分布を生じることとなり、強度特性に大きな影響を及ぼすこととなるのである。

自己収縮をはじめとする初期変形性状の既往の研究および実験報告においては、巨視的レベルでの実験が大多数を占めているのが現状である。しかしながら、実構造物の長期耐久性を考

慮する上で、コンクリート構造物内部に存在するセメントペースト位置における初期変形性状の現象把握は非常に重要であるが、その定量的評価においては微視的レベルにおける実験および解析手法が必要となる。

本研究では、骨材～セメントペースト～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、初期変形性状の定性的かつ定量的評価を目的として、局所的に異なる自己収縮ひずみ測定を実施した。そして、水銀圧入法による細孔組織測定により、細孔構造組織に及ぼすセメントペースト区間における局所的自己収縮による変形性状の影響評価を行なった。さらに、純引張試験により各区間における引張強度に及ぼす変形性状の影響評価を行なった。

2. ミクロ的自己収縮ひずみ現象の解明

2.1 局所的自己収縮ひずみ

(1) 局所的自己収縮ひずみ測定方法

測定には、W/C30%, 4cm×4cm×5cmの形状寸法をしたセメントペースト供試体を用い、使用セメントは普通ポルトランドセメント（混和材無添加品、比重：3.15g/cm³）とした。練り混

*1 中央大学 理工学部土木工学科コンクリート研究室 研究員 (正会員)

*2 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (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)

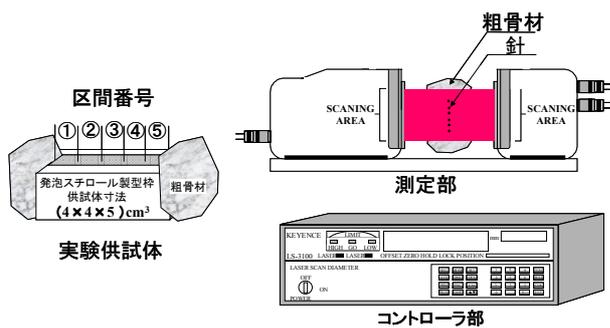


図-1 実験供試体およびマイクロ自己収縮測定装置

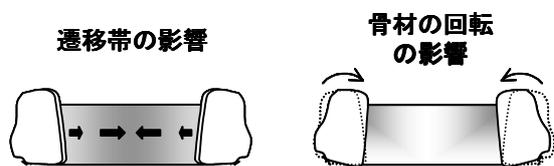


図-2 骨材界面区間の収縮に及ぼす影響

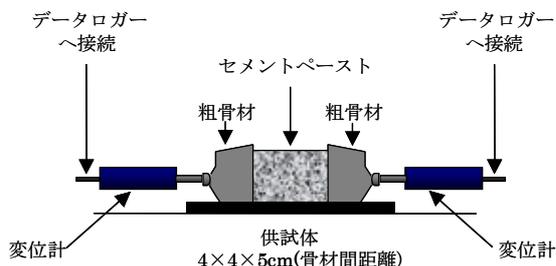


図-3 巨視的自己収縮測定装置

ぜはホバート型モルタルミキサを使用し、3分間中速（自転周期 120~130rpm、公転周期 37~38rpm）で行った。なお、普通セメントの凝結開始時間はビカー針装置による測定を行い、275分とした。

(2) 実験方法

実験環境は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $40 \pm 5\% \text{R.H.}$ で行った。型枠の拘束を防ぐためセメントペーストを発泡スチロール製の型枠に打設し、仕上げ面は打設直後に水分の逸散を防ぐためにアルミ箔によりシールした。実測自己収縮ひずみの測定には、骨材間各所の変形挙動を詳細に評価する必要がある。本実験では、図-1に示すように骨材間セメントペースト内部において骨材表面から

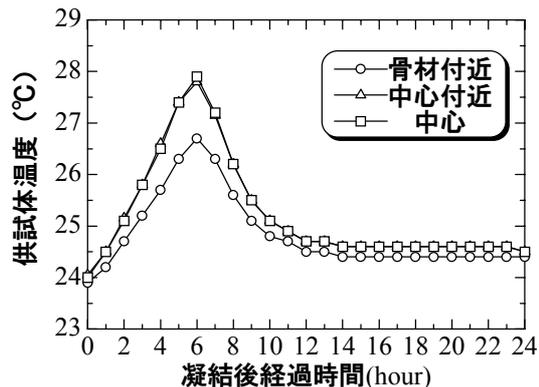


図-4 セメントペースト各区分における温度履歴

1cm 間隔に配置された針である標点を計 6 点設定し、各標点区間（①~⑤の区間）の変化量により、骨材が水平方向に配列されている状態での局所的な自己収縮測定を実施した。測定には、同図に示す複数点の変位測定を可能とするレーザー変位計を用いた。測定に際しては、骨材近傍区間である区間①および⑤においては、図-2に示すような不均一なセメントペーストの自己収縮による骨材の回転や界面の付着性状の違いにより、両区間において不均一な変形状となることが想定される。したがって、これらの区間における自己収縮ひずみは、図-3に示すような高性能変位計を用いることにより測定されたセメントペーストの巨視的な自己収縮ひずみから、中心部・中心付近部である②、③、④区間の各変位量を差し引くことにより測定を行なった。なお、自己収縮ひずみは、実測ひずみに対して供試体に埋設された熱電対によって計測された温度による補正を行なうことにより算出することとした。

(3) 温度履歴

セメントペースト供試体内部の各区分における凝結開始以降 24 時間まで 1 時間ごとに測定した温度履歴を図-4に示す。温度履歴を表わす各記号においては、○は骨材付近である①、⑤区間の平均値、△は中心付近部である②、④区間の平均値、そして□は中心部である③区間の供試体内部温度変化を示している。

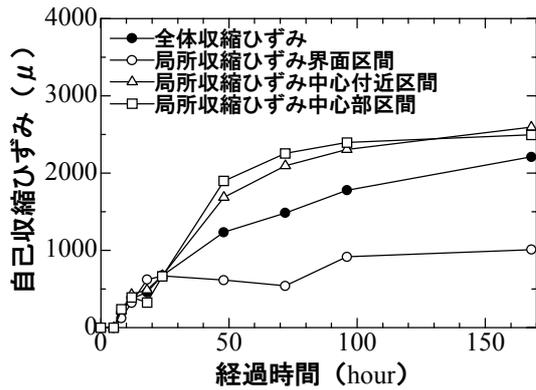


図-5 各区間の局所的自己収縮ひずみ履歴

同図に示すように、骨材間セメントペースト全区間において水和過程初期段階の急激な温度上昇を示し、中心区間・中心付近区間の温度上昇量は約 4℃となっている。これに対し、骨材界面区間における温度上昇量は約 1.5℃であり、このような温度上昇履歴の相違は、セメントペースト内部ほどセメント組織が緻密になることに起因するが、変形性状に及ぼす影響は無視し得るものと考えられる。

自己収縮ひずみ算出の際における温度補正においては、セメントペーストの線膨張係数として一般的である $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の一定値を採用し、これらのセメントペースト各位置の温度履歴を適用させることにより、区間ごとの自己収縮ひずみにおける温度補正を実施することとした。

2.2 セメントペーストの局所変形状

(1) 局所的自己収縮ひずみの算出方法

骨材間セメントペーストの各区間における自己収縮ひずみ増分は、実測ひずみ、温度ひずみから以下のように表わすことができる。

$$\Delta \varepsilon^{as}(x/l_0) = (\varepsilon_t^{II}(x/l_0) - \varepsilon_{t-1}^{II}(x/l_0)) - \alpha(T_t(x/l_0) - T_{t-1}(x/l_0)) \quad (1)$$

ここで、 x は骨材からの距離、 l_0 は骨材間距離、 ε^{as} は自己収縮ひずみ、 ε^{II} は実測ひずみ、 α は線膨張係数、 T は供試体温度そして t は材齢に対応するステップである。

そして、式(1)を変形し、本研究における局所的な自己収縮ひずみは、

$$\varepsilon^{as}(x/l_0) = \sum \left\{ \varepsilon_t^{II}(x/l_0) - \varepsilon_{t-1}^{II}(x/l_0) - \alpha(T_t(x/l_0) - T_{t-1}(x/l_0)) \right\} \quad (2)$$

で表わすことができる。

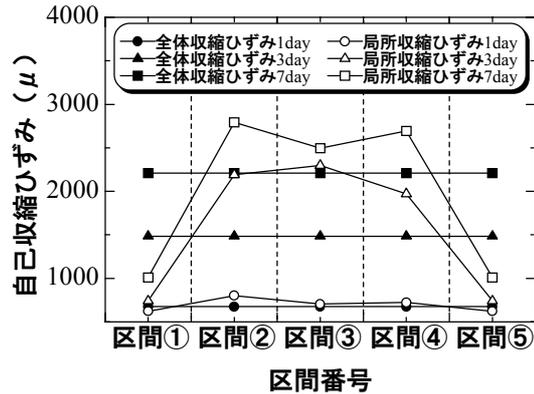


図-6 自己収縮ひずみ分布

以上より、式(2)を用いることにより骨材間セメントペーストの初期材齢において生じる、ミクロ的な変形挙動評価を実施した。

(2) 局所的自己収縮ひずみによる変形状

骨材間セメントペーストの区間における自己収縮ひずみ履歴は、図-5に示すとおりである。図中に示す記号○、△および□は、それぞれ①、②、③区間の局所的自己収縮ひずみ、●はセメントペーストの供試体全体の自己収縮ひずみである。同図から、セメントペースト中心部区間③および中心付近区間②、④は、全体の自己収縮ひずみに比べて大きな自己収縮ひずみを生じており、骨材界面区間①、⑤では、全体の自己収縮ひずみに対し小さな値を示していることが確認できる。これらの値は、自己収縮委員会報告書¹⁾等に報告される自己収縮ひずみに比べ大きい値となっており、供試体形状寸法の違いにより間隙水の移動や絶対体積の体積変化の影響などが異なることによるものと考えられる²⁾。

図-6は骨材間セメントペーストの全区間における自己収縮ひずみ分布を示したものである。同図に示すように、骨材間領域内部各所において、不均一な自己収縮ひずみ分布を生じている。すなわち、材齢1日では、ほぼ均一な自己収縮ひずみ分布となっているが、それ以降の材齢においては供試体中心部近傍において自己収縮ひずみの局所化が生じている。材齢3日における自己収縮ひずみでは、骨材界面区間①、⑤ではほとんど自己収縮ひずみの変化が生じて

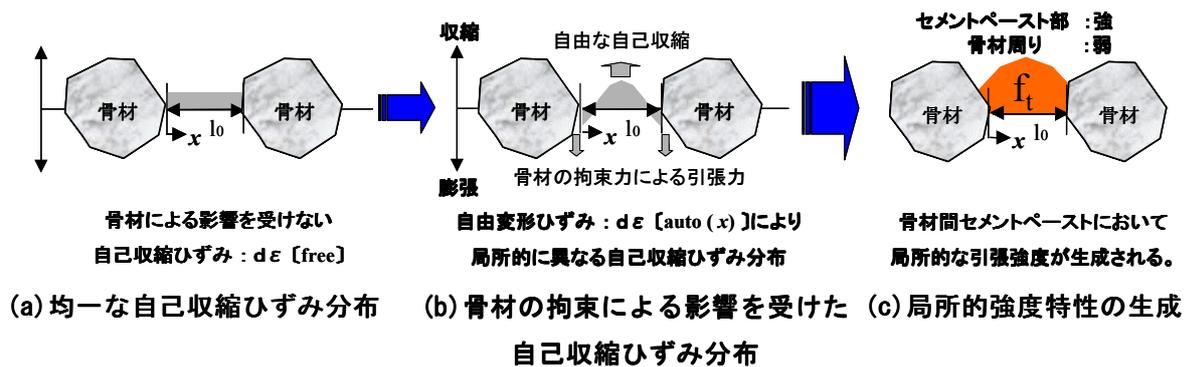


図-7 初期変形状により形成される局所的強度生成メカニズム

いないことに対して、中心付近区間②，④および中心部区間③では約 2000μ という大きな収縮ひずみを生じている。この現象は、骨材界面の遷移帯の影響および骨材による拘束効果が骨材近傍のセメントペーストに対して大きな影響を及ぼすことによるものである。このようなひずみ分布の傾向は、材齢7日においても顕著に生じているが、材齢3日における自己収縮ひずみ分布との差異は、中心付近区間②，④に比べて中心部区間③の値が僅かながら小さな値となっていることである。これには、骨材による拘束効果と骨材間距離すなわちセメントペーストのボリュームとの関連性が大きく関与しているものと考えられる。

(3) 初期変形により生じる局所的強度特性

(2)に示したように、セメントペーストの局所的に異なる自己収縮ひずみにより不均一な初期変形状を生じるわけである。ここでは、初期変形状に起因する初期応力性状の概要および次章から論じる強度特性の概要に関しての簡単な説明を行なっておくことにする。

いま、図-7に示すような骨材間セメントペーストにおける l_0 区間を考えることにする。粗骨材からの距離 x 点に発生する自己収縮応力を $d\sigma_0(x)$ とし、同図(a)に示すような自由な初期変形である全体的自己収縮ひずみ増分を $d\varepsilon_{free}$ として定義する。まず、骨材近傍からの距離ごとに生じる局所的自己収縮ひずみは、図-6に示すような全体収縮ひずみを基準とする変形状: $d\varepsilon_{auto}(x) - d\varepsilon_{free}$ を考えると、同図(b)に示す

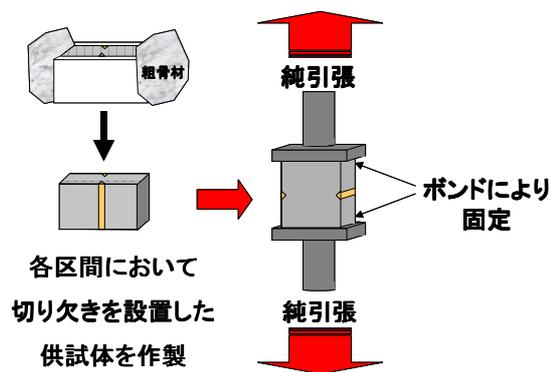


図-8 純引張強度試験概要

ように骨材近傍区間においては骨材からの拘束効果に起因する引張変形、中心部区間および中心部近傍区間においては収縮に伴う圧縮変形状を生じることとなる。この現象に伴い、全体的な自己収縮を基準とした局所的変形状から生じる各区分の自己収縮応力: $d\sigma_0(x)$ は、骨材近傍では引張応力、中心部および中心部近傍では圧縮応力性状を呈することとなり、局所的に異なる初期変形および初期応力性状によって、結果として同図(c)に示すような不均一な引張強度を生じることと考えられる。すなわち初期変形に起因する細孔組織を形成し、位置により異なる強度特性を誘発するものと考えられる。

なお、局所的初期応力の解明においてはさらなる定量的かつ定性的評価が必要であり、今後の課題としたい。

3. 強度特性に及ぼす

局所的初期変形状への影響評価

骨材間セメントペースト内部各所の初期変形

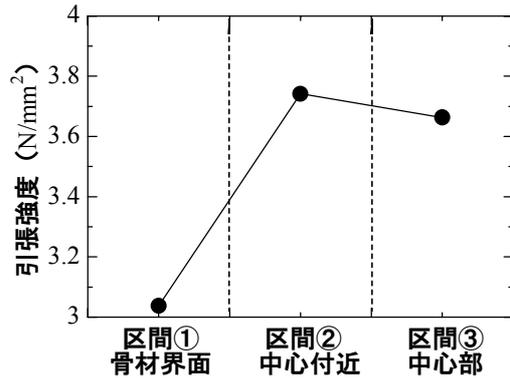


図-9 各区間における局所的引張強度

性状が、強度特性や細孔構造組織形成に及ぼす影響は非常に大きなものと考えられる。そこで本章では、引張治具を用いた純引張強度試験および水銀圧入式ポロシメータを用いた内部組織各所における細孔組織分布測定することとした。

3.1 純引張試験による引張強度

純引張試験においては、図-8に示すようにセメントペーストと治具を強力接着剤により固定し、セメントペースト各区間に切り欠きを設置した試験体を用いた。なお、強度算出においては各区間において3体の試験を実施し、それらの平均値による結果とした。

3.2 各区間における引張強度測定結果

骨材間セメントペーストの各区間における引張強度を図-9に示す。骨材界面区間①および中心部区間②、③において強度の違いを生じており、中心部において約1.2倍程度大きな引張強度を生じていることを確認することができる。また、中心部区間③に比べて、中心付近区間②の方が僅かながら大きな引張強度を生じている。これは、骨材近傍における遷移帯形成における低水セメント比ということから考えるとセメントペーストの初期変形性状或いは初期応力性状が骨材間の距離を変数としたセメントペーストの細孔組織構造の形成に大きな影響を及ぼしたことによるものと考えられる。

3.3 骨材間セメントペーストにおける細孔分布測定結果

水銀圧入式ポロシメータを用いることにより、

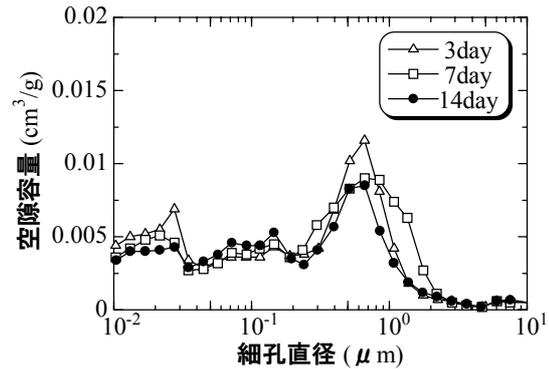


図-10 骨材界面における細孔組織分布

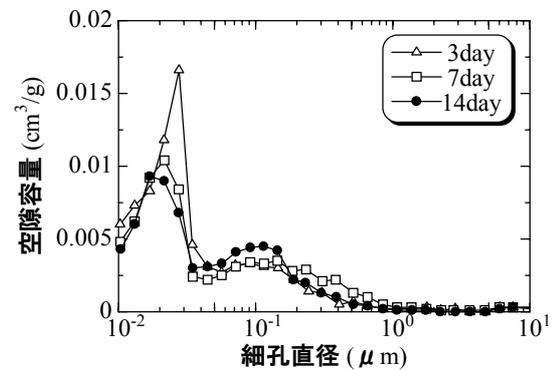


図-11 中心付近における細孔組織分布

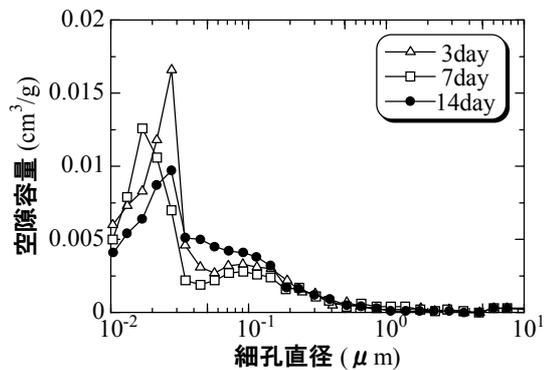


図-12 中心部区間における細孔組織分布

自己収縮と同様条件の骨材間セメントペーストにおいて、内部各所の空隙容量～細孔直径関係および全細孔容積を測定することとし、材齢3, 7, 14日における評価を実施した。

骨材間セメントペースト各所における細孔分布測定関係を図-10, 図-11および図-12に示す。各図は、骨材界面区間①および⑤,

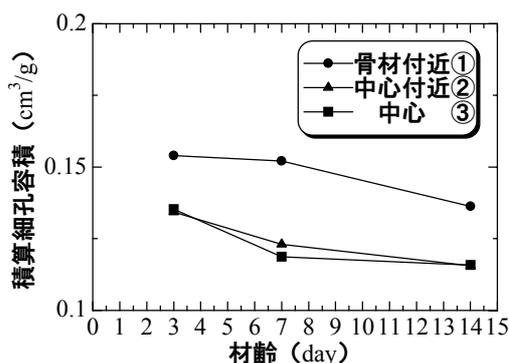


図-13 積算細孔容積～材齢関係

中心付近区間②および④，そして中心部区間③における細孔組織分布を示したものである。

空隙容量が最大となる細孔直径は，骨材界面区間，中心付近区間および中心部区間ではそれぞれ $0.663 \mu\text{m}$ ， $0.0018 \mu\text{m}$ および $0.003 \mu\text{m}$ であり，骨材界面区間では中心区間および中心付近区間に比べて大きな細孔直径となる。これは，3.2 に示したように初期変形性状の影響によるものであり，骨材による自己収縮の拘束効果により細孔組織が粗になるものと考えられる。一方，中心付近区間および中心部区間においては骨材による拘束力が殆ど無く，細孔組織が緻密であるわけである。以上のように，セメントペーストの初期変形性状は細孔組織形成に大きな影響を及ぼすことが確認されたわけであり，また強度にも大きな影響を及ぼすことも確認された。そこで，以下においてはセメントペーストの初期変形性状により生じる局所的強度特性と細孔組織構造との関連性を論じることとする。

図-13に，各骨材間セメントペースト位置における積算細孔容積～材齢関係を示す。図中の記号●は骨材界面区間，▲は中心付近区間および■は中心部区間を各材齢ごとに示したものである。同図からセメント組織が緻密な領域である中心部区間および中心付近区間においては全体に占める細孔容積は小さくなり，これに対して骨材界面区間における全細孔容積は大きな値を示している。このことはすなわち，細孔組織性状が直接局所的な強度特性に影響を及ぼしていることを表わしている。

そして，同図に示す全細孔容積と図-9に示す局所的な引張強度との関係を以下に示す。

$$\frac{f_t(\text{骨材区間})}{f_t(\text{中心区間})} = \frac{\text{全細孔容積(骨材区間)}}{\text{全細孔容積(中心区間)}} \quad (4)$$

式(4)は，細孔容積量が多い骨材界面区間においては，骨材の影響により低い強度を生じることとなり，また細孔容積量が少ない中心区間においてはセメントペースト組織が緻密なものとなり，初期変形に起因し，結果として高い強度を有する結果を示している。すなわち，不均一な初期変形が生じるに伴い，それに起因する細孔構造組織に影響を及ぼすこととなり，結果として局所的に異なる強度特性を生じることになるのである。

4. まとめ

本研究では，骨材間セメントペーストの材齢初期に形成されるセメントペーストの局所的初期変形評価を実施し，初期変形性状に起因する局所的な強度特性および細孔組織性状を評価した。その結果を以下にまとめる。

- (1)骨材間セメントペースト各所に生じる自己収縮ひずみは，その存在位置ごとに異なり，結果として不均一な初期変形分布を生じている。
- (2)純引張試験および水銀圧入法を用いた区間ごとの全細孔容積測定試験を実施した結果，骨材間セメントペースト各所で異なる細孔組織性状および強度特性を形成していることが確認された。
- (3)骨材間に存在するセメントペーストの自己収縮は，特に骨材周りの細孔構造組織や強度特性に大きな影響を及ぼす。

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，1996
- 2)宮沢伸吾，自己収縮および乾燥収縮によるコンクリートの自己応力に関する研究，学位論文 1992.11