

論文 リング試験による自己収縮拘束特性の評価と損傷の 蛍光顕微鏡観察

久保ホベルト洋*1・五十嵐心一*2・川村満紀*3

要旨：高強度コンクリートの自己収縮の拘束特性を明らかにするためにリング試験方法を適用した。ごく若材齢から拘束力が作用した場合、シリカフェームコンクリートは大きなクリープひずみを生じ、これによって拘束応力は著しく緩和された。高強度コンクリートの蛍光顕微鏡観察を行ったところ、骨材粒子や未水和セメント粒子の周囲に明度の高い領域が観察され、特に、シリカフェームコンクリートのセメントマトリックス中では、微小な粒子の近傍における多孔質領域の存在が特徴的であった。シリカフェームコンクリートにおける大きな応力緩和は、マトリックス中に分散したそのような微小な多孔質領域の形成と関連するものと考えられる。

キーワード：リング試験, 自己収縮, 拘束応力, クリープ, 蛍光顕微鏡

1. 序論

低水結合材比のコンクリートでは材齢初期の活発な水和反応進行過程において、自己乾燥状態となり、その結果、著しく大きな自己収縮が生ずる。実際のコンクリート構造物においては、その収縮が拘束されることにより内部応力が発生する。この内部応力が若材齢のコンクリートの強度よりも大きくなると、ひびわれの発生や破壊に至ることになり、拘束応力を適切に評価し、その影響を明らかにすることの重要性が指摘されている¹⁾。

収縮を拘束することにより発生する応力を測定し、ひびわれ特性を評価するために、これまでいくつかの収縮拘束試験方法が用いられてきている¹⁾。それぞれの方法には一長一短があるが、収縮拘束試験は本質的にはコンクリートの引張試験であり、基本的な方法は棒状の試験体を使用した一軸引張型の収縮拘束試験である。一軸引張型の拘束の与え方についてもいくつかの方法が提案されているが、JCI 自己収縮研究委員会では鉄筋を使用した拘束試験方法を提案している¹⁾。

収縮拘束試験方法の一つであるリング試験方法は、断面の応力が一定にならないことや、実コン

クリートの実際の拘束状態との対応が明確でないなどの短所はあるものの、簡便な試験装置を用いる方法である。さらに、コンクリートが未だプラスチックな状態から均一な拘束を容易に与えられるという長所があり、収縮拘束試験としての有用性は高いと考えられる^{2,3)}。

本研究においては、リング試験では若材齢から拘束を与えられる点に着目し、高強度コンクリートの自己収縮拘束特性の解明にリング試験方法の適用を試みた。シリカフェームの混入や水結合材比の相違が拘束応力の発現特性に及ぼす影響を、クリープ機構と関連付けながら考察することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。使用した骨材は石川県手取川産の川砂利および川砂であり、粗骨材の最大寸法は 10mm である。使用したシリカフェームは市販の粉体品であり、その比表面積は 20.0 m²/g、SiO₂ 含有量は 90.8% である。水結合材比は 0.25 および 0.33 であり、

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 修(工) (正会員)

*2 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 博(工) (正会員)

*3 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

表-1 高強度コンクリートの配合

記号	W/B	水	セメント	シリカフェーム	細骨材	粗骨材	高性能減水剤(%wt.B)
PC	0.25	145	581	0	559	1086	1.7
SF	0.25	142	510	57	559	1086	2.6
PC	0.33	168	509	0	559	1086	1.3
SF	0.33	165	449	50	559	1086	2.0

シリカフェームの置換率は10%とした。ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用して、スランブ値が $10 \pm 2\text{cm}$ になるようにした。各コンクリートの配合は表-1 に示すとおりである。

2.2 強度試験

JSCE-F506 に従って直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体を作製した。打設後ただちに密封して、20℃の恒温室に静置した。材齢 24 時間にて脱型し、再び密封して 20℃の恒温室にて密封養生を継続した。所定材齢にて JIS A 1113 に従って割裂引張強度、静弾性係数を求めた。

2.3 リング試験

図-1 に示すように、内側が鋼製、外側がアルミニウム製の同心円状のリング間にコンクリートを打設しリング供試体(断面幅 50mm、高さ 50mm)を作製した。コンクリートは打設直後に密封し、打設後 12 時間にて、自己収縮試験の場合は内側および外側の両リングを、拘束収縮試験の場合は外側リングのみを取り外した。コンクリートリングの所定位置にひずみゲージを貼り付けた後、再び密封して 20℃における密封養生を継続した。拘束収縮試験においては、コンクリートリングに生

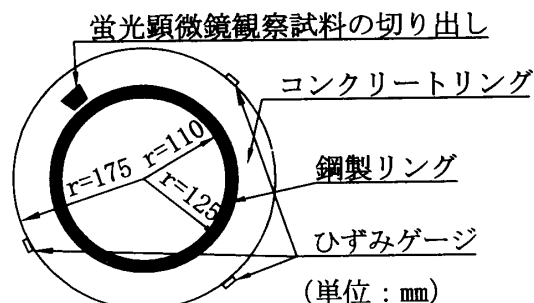


図-1 リング試験供試体図

ずる円周方向の引張応力を、鋼製リング内周面に貼り付けたひずみゲージのひずみの変化から、コンクリートリング断面内平均引張応力として計算により求めた⁴⁾。

2.4 蛍光顕微鏡観察

リング試験終了後の供試体から、鋼製リングに近接した部分より円周方向に平行な断面を蛍光顕微鏡によって観察できるように、厚さが約 10mm の薄板を切り出した。切り出された薄板をエタノールに 24 時間浸漬して水分との置換を行った後、蛍光染料を含有したエポキシ樹脂を含浸させた。エポキシ樹脂の硬化後、耐水研磨紙を用いて表面を注意深く研磨して、蛍光顕微鏡用試料とした。

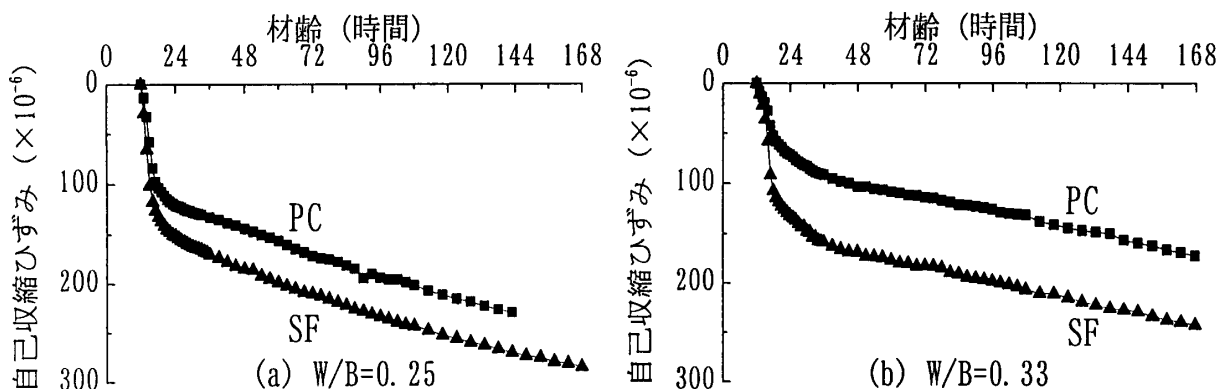


図-2 自己収縮ひずみの変化

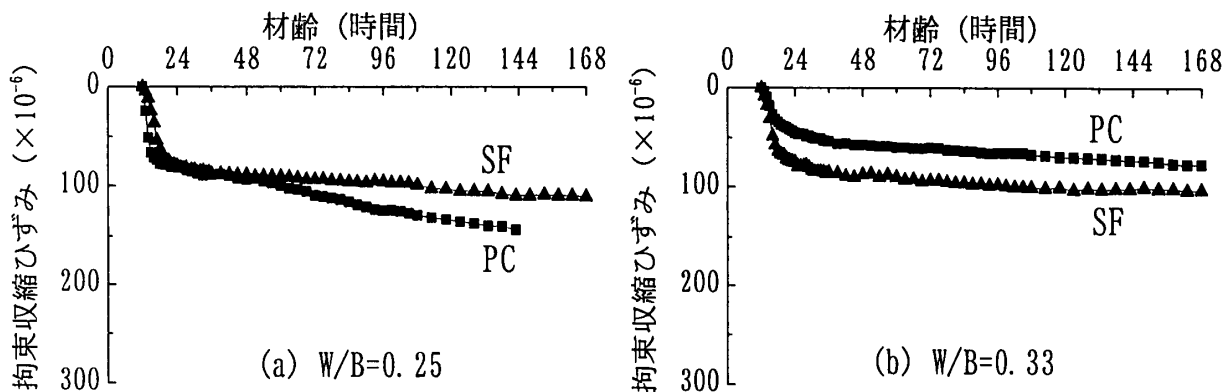


図-3 拘束収縮ひずみの変化

3. 結果および考察

3.1 自己収縮および拘束収縮ひずみの変化

図-2 は自己収縮ひずみの時間にともなう変化を示したものである。いずれの水セメントのコンクリートも材齢 12 時間から 24 時間の若材齢にて自己収縮ひずみは急激に増大するが、その後はほぼ一定の緩やかな割合で単調に増加している。水結合材比の低い方が大きな自己収縮を示し、またシリカフュームの混入により自己収縮ひずみは増大する。しかし、シリカフューム混入による自己収縮ひずみ増大の程度は水結合材比によって異なり、水結合材比 0.33 ではシリカフュームの有無によってかなり大きなひずみ差が認められるが、水結合材比 0.25 では両者間の差はあまり大きくない。

図-3 は鋼製リングにより拘束を受けたコンクリートの収縮ひずみの時間にともなう変化を示したものである。水結合材比 0.25 では、材齢 48 時間前後までシリカフューム混入の有無による拘束

収縮ひずみの差は認められない。しかし、それ以降シリカフューム無混入コンクリートの拘束収縮ひずみは緩やかに増大するのに対して、シリカフューム混入コンクリートには拘束収縮ひずみの変化がほとんど認められず、結果として自己収縮ひずみの結果(図-2(a))とは異なり、シリカフューム混入コンクリートの方が小さなひずみを示している。一方、水結合材比 0.33 では、時間にともなう拘束収縮ひずみ変化の傾向は自己収縮の場合と同様であるが、シリカフューム混入コンクリートが若干大きな拘束自己収縮ひずみを示し、また時間の進行にともなう変化も小さい。

3.2 拘束応力の発現特性の相違

図-4 は鋼製リングのひずみ変化から求めたコンクリートリングの円周方向の引張応力の時間にともなう変化を示したものである。水結合材比 0.25 においては、24 時間までシリカフューム混入の有無によって拘束応力に差は認められない。しかし、シリカフューム無混入コンクリート(PC)は

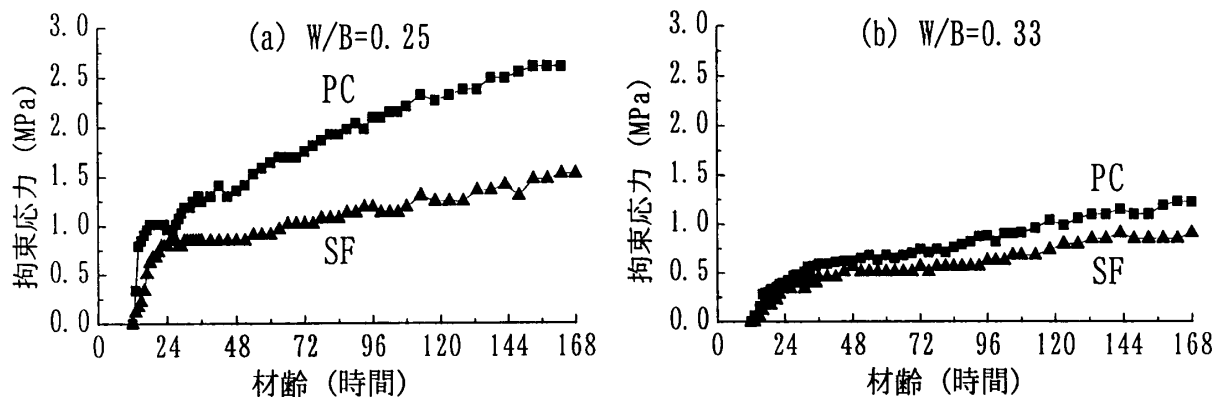


図-4 拘束応力の変化

その後も引張応力は一定割合で増加し続けるのに対して、シリカフェーム混入コンクリート(SF)のその後の拘束応力の増大は比較的小さく、材齢 7 日(168 時間)ではシリカフェームの有無による応力差はかなり大きくなっている。一方、水結合材比が 0.33 の場合は、その傾向が水結合材比 0.25 の場合と異なり、シリカフェーム混入コンクリートも無混入コンクリートもほぼ同じ拘束応力の発生傾向を示し、また、拘束応力の値も水結合材比 0.25 のコンクリートよりもかなり小さい。

図-2 に示した自己収縮ひずみの変化と拘束応力の発生傾向(図-4)を比較すると、水結合材比の低減とシリカフェームの混入が、拘束応力と自己収縮ひずみ間の関係に及ぼす影響は異なることがわかる。すなわち、水結合材比の低減は自己収縮ひずみを増大させ、これが拘束されるときに発現する拘束応力も増大する。これに対して、シリカフェームの混入は自己収縮ひずみを増大させるが、拘束応力はそれに対応して増大することはなく、シリカフェーム混入コンクリートではシリカフェーム無混入のものに比べて、発生する拘束応力は低いかまたはほぼ同じである。このことより、従来から指摘されているように、自己収縮の拘束応力を把握して若材齢におけるコンクリートの破壊や内部における損傷の可能性を検討するためには、自己収縮ひずみ自体の大きさだけではなく、若材齢コンクリートの粘弾的な特性を考慮しなければならないことがわかる。

3.3 拘束試験におけるクリープ特性

拘束収縮試験において自由供試体と拘束供試体のひずみの差は、拘束力が供試体に生じさせた弾性ひずみとクリープひずみの和とみなすことができる。図-5 に本リング試験における両者のひずみの差を示す。水結合材比 0.25 においては、シリカフェーム無混入コンクリートでは材齢 24 時間以降ひずみ差は緩やかに増大するのに対して、シリカフェーム混入コンクリートのひずみ差は材齢の進行とともに著しく増大している。一方、水結合材比 0.33 では、シリカフェーム混入の有無にかかわらずひずみ差は材齢とともに増大しているが、水結合材比 0.25 の場合と同様に、シリカフェーム無混入がより低いひずみ差を示している。

図-6 は拘束により発生する引張応力の割裂引張強度に対する比の時間にもなう変化を示したものである。引張応力/引張強度比は水結合材比の小さい方が大きく、また、いずれの水結合材比においても、シリカフェームを混入した方が低い引張応力/引張強度比を示す。表-2 にそれぞれのコンクリートの静弾性係数を示す。シリカフェーム無混入コンクリートよりシリカフェーム混入コンクリートの方が低い弾性係数を示しているが、両者の差は大きくはない。

図-5 に示した自由供試体と拘束供試体のひずみの差を拘束応力により生じた弾性ひずみとクリープひずみの和と考えたとき、シリカフェーム混入の有無によって弾性係数に大きな差がないこと(表-2)、および 72 時間以後の応力/強度比がシリカフェームコンクリートはシリカフェーム無混

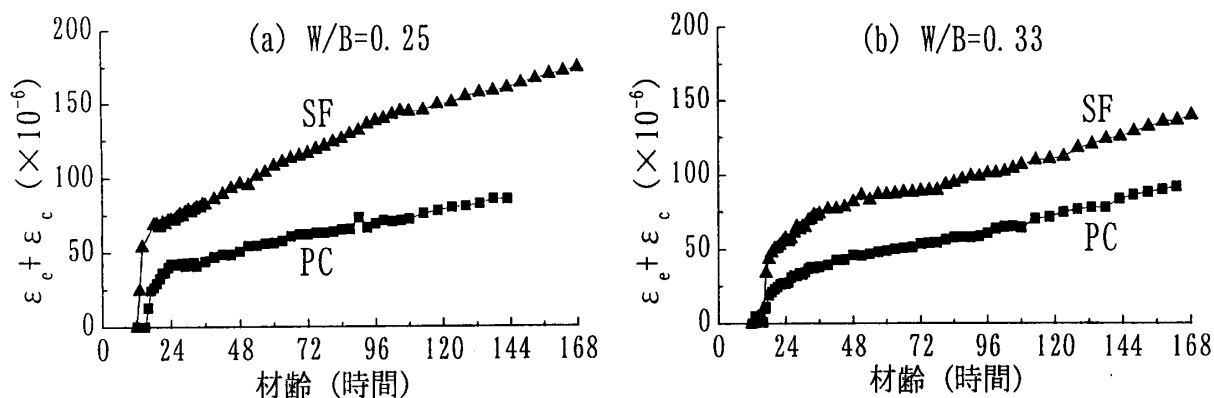


図-5 自己収縮ひずみと拘束収縮ひずみの差 (ϵ_e : 弾性ひずみ, ϵ_c : クリープひずみ)

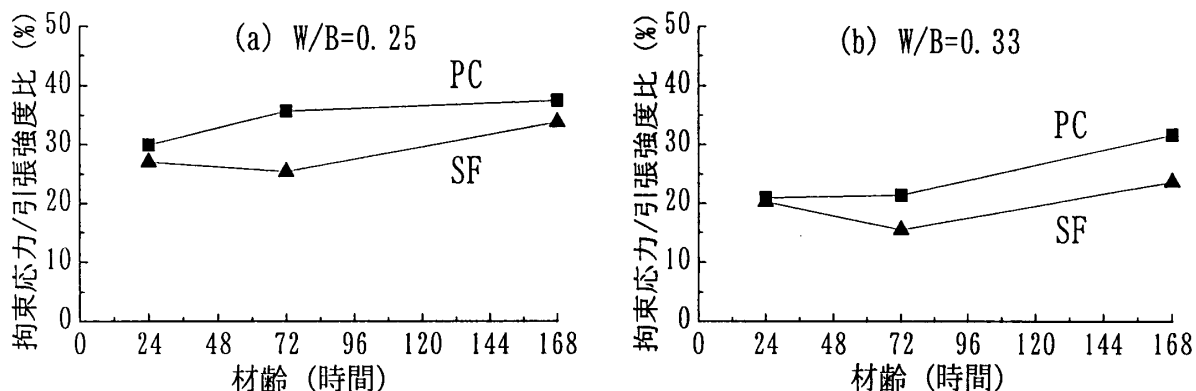


図-6 引張応力/引張強度比の変化

入コンクリートより低いことを考慮すると(図-6), 図-5に見られるシリカフューム混入コンクリートの大きなひずみの差は, クリープひずみの増大によりもたらされたものと考えられる。すなわち, このように非常に若い材齢で応力を受けた場合は, シリカフュームコンクリートの方がより大きな引張クリープひずみを示すことがわかる⁵⁾。一般に高強度コンクリートのクリープひずみは小さく, またシリカフューム混入コンクリートの方がより小さなクリープひずみを生ずるようであるが⁶⁾, 本実験のように若材齢で載荷される場合には, シリカフュームコンクリートの方が大きなクリープひずみを生ずることはすでに報告されている⁷⁾。

3.4 コンクリートの蛍光顕微鏡観察

写真-1にリング試験終了後のシリカフューム混入および無混入コンクリートの蛍光顕微鏡像を示す。シリカフューム混入の有無, および水結合

表-2 弾性係数の変化(GPa)

	W/B	材齢(日)		
		1	3	7
PC	0.25	21.9	31.0	34.0
SF	0.25	20.2	29.6	31.2
PC	0.33	16.6	27.2	29.9
SF	0.33	16.7	23.5	27.4

材比にかかわらず写真-1(a)に示すように骨材粒子表面に沿うようにして明度の高い領域が観察された。さらに, シリカフューム混入コンクリートにおいては, 大きな骨材粒子の周囲だけでなく, マトリックス中に分散する小さい骨材粒子や未水和セメント粒子の周囲にも蛍光度の高い領域が分布しているのが特徴的であり(写真1-(b)), 一部はひびわれのように観察された。しかし, シリカフューム無混入の場合には, そのようなマトリックス中に分散する蛍光領域や微細ひびわれはほとんど

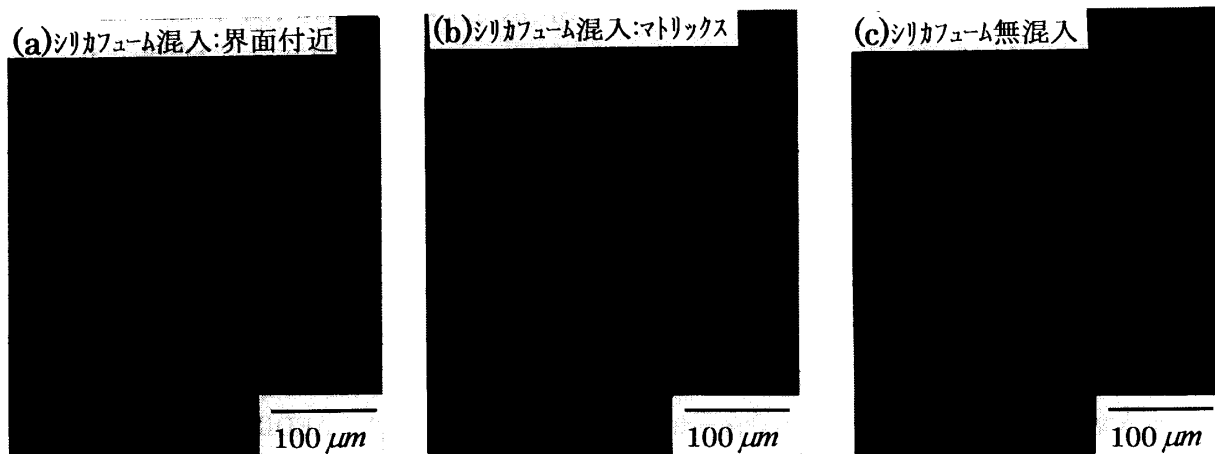


写真-1 リングコンクリート供試体の蛍光顕微鏡像 (W/B=0.25)

ど観察されなかった(写真1-(c))。

蛍光顕微鏡像では、多孔質な領域に多量の蛍光染料含有樹脂が侵入するためにその領域の明度が増大するので、本観察結果はそのような骨材粒子の周囲には多孔質な領域が形成されていたことを示す。一般にコンクリート中の骨材粒子周囲近傍の多孔質領域としては、遷移帯の存在が挙げられる。しかし、写真-1においては非常に低い水結合材比のシリカフューム混入高強度コンクリート中の骨材粒子の周囲を観察しているので、そのような骨材周囲の多孔質領域の存在は遷移帯の形成によるものとは考えにくい。一方、収縮性のセメントマトリックス中の骨材粒子の周囲には引張応力が発生し、これによりひびわれを生じることが指摘されている⁸⁾。しかし、本研究においては特徴的なひびわれなどは観察されなかったことから、骨材粒子の表面に沿う多孔質領域の形成のメカニズムについてはさらに検討を要する。一方、マトリックス中に分布する蛍光度の高い領域の形成のメカニズムも明らかではないが、それがシリカフューム混入系において特徴的であり、これがセメントマトリックスの欠陥として機能するならば、シリカフューム混入コンクリートのクリープひずみは増大すると考えられる。

4. 結論

高強度コンクリートの自己収縮拘束応力の発現特性を検討するために、リング試験を適用した。本研究にて得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 自己収縮ひずみは水結合材比の低減およびシリカフュームの混入により増大する。しかし、それらが拘束される場合、自己収縮ひずみの大きいもののほど大きな拘束応力を発現するとは限らない。
- (2) 自己収縮の拘束のように、凝結過程のごく若い材齢から引張荷重の載荷を受ける場合、シリカフューム混入コンクリートは無混入コンクリートに比べて大きな引張クリープひずみを示す。
- (3) 低水結合材比のコンクリート中の骨材-セメントマトリックス界面領域には bulk セメントマ

トリックスに比べて多孔質な領域が存在していた。

- (4) シリカフュームコンクリートが大きなクリープひずみを示すのは、セメントペーストマトリックス中に分布した微細な多孔質領域の存在と関係すると考えられる。

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) Grzybowski, M. and Shah, S.P.: Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, ACI Materials Journal, Vol.87, No.2, pp.138-148, 1990
- 3) 吉田智則, 城安市, 志沢三郎, 北山大八: 各種セメントペーストの自己収縮にもとづく内部応力に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.669-674, 1994
- 4) Swamy, R.N., Bandyopadhyay, A.K. and Stavrides, H.: The ring method of measuring restrained shrinkage in mortar and concrete, Cement, Concrete and Aggregate, Vol.1, No.1, pp.13-20, 1979
- 5) Kovler, K., Igarashi, S. and Bentur, A.: Tensile creep behavior of high strength concretes at early ages, Materials and Structures, Vol.32, pp.383-387, 1999
- 6) deLarrard, F. and Acker, P.: Creep in high and very high performance concrete, High Performance Concrete (ed. Malier, Y.), E&FN SPON, London, pp.115-126, 1992
- 7) Bissonnette, B. and Pigeon, M.: Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.5, pp.1075-1085, 1995
- 8) Dela, B.F. and Stang, H.: Crack formation around aggregate in high-shrinkage cement paste, Fracture Mechanics of Concrete Structures (eds. H. Mihashi, K. Rokugo), Proc. of FRAMCOS-3, AEDIFICATIO, Freiburg, Vol.1, pp.233-242, 1998