

論文 種々の拘束度下にある A S R 劣化コンクリートの膨張圧と膨張量

鍵本 広之^{*1}・安田 幸弘^{*2}・木下 茂^{*3}・川村 満紀^{*4}

要旨：A S R 劣化構造物の拘束度と損傷の関係に対する理解を深めるため、拘束度を変化させ一軸方向に拘束したコンクリート供試体に発生する膨張圧、および長辺、短辺方向の膨張量を測定した。膨張圧、膨張量が定常状態に達したのち、供試体に作用する荷重を解放し、その後の膨張量を測定した。コンクリートの A S R 膨張を拘束する鋼棒と供試体断面積の比 (A_s/A_c) が約 3 % 以上で膨張圧の増大割合は劇的に減少すること、および拘束方向に対して直角方向の膨張が拘束によって助長されることが明らかになった。また構造物から採取したコアの残存膨張量で将来の A S R 膨張を予測する際注意を要することが明らかとなった。

キーワード：A S R, 膨張, 乾燥・湿潤繰り返し, ひずみ, 表面ひび割れ, 内部拘束応力

1. はじめに

A S R 劣化した鉄筋コンクリート構造物においては、コンクリートの膨張は鉄筋および外荷重によって拘束されているが、A S R 膨張を拘束する程度と発生する膨張圧との間の関係は不明である。A S R 劣化鉄筋コンクリートにおいては、鉄筋量が大きいほど A S R 膨張によって生じる鉄筋のひずみは小さいと考えられているが、これは非常に限られた実験データにもとづいたものであり、一連の実験によって確認されたものではない。また、拘束下における A S R 劣化コンクリートの膨張圧や膨張挙動についてのデータも少なく^{1~5)}、拘束解放後の膨張挙動についてはほとんど知られていない。また、拘束方向に対して直角方向の膨張が拘束によって影響を受けるか否かも明らかではない。

筆者らは、乾湿繰り返し過程におかれたコンクリート円柱内部のひずみおよび相対湿度の測定を通した一連の研究から、乾燥過程における初期ひび割れは、表層部分においては徐々に湿度が低下し A S R が発生しなくなるが、高湿度状態に保たれた中央近傍は A S R 膨張が継続するために発生する表層部分における引張応力に起因することを明らかにした⁶⁾。また、再飽和過程では、既存ひび割れを通して水分が浸入し表面部より湿度が急激に回復するが、一旦乾燥した表層部は膨張しないか、またはその膨張量が小さくなる。一方、中央部分の A S R 膨張は活発に進行し表面近傍に引張応力が発生するために表面ひび割れが活発に進行することを示した⁷⁾。このような表面ひび割れ発生過程の解明においても拘束度と膨張圧の関係を知ることが重要となる⁸⁾。

本研究は、A S R 劣化構造物の拘束度と損傷の関係に対する理解をさらに深めるために、種々の拘束度下にあるコンクリート供試体 (100×100×400mm) に発生する膨

張圧の特徴、拘束下および拘束解放後の供試体の拘束方向、およびそれと直角方向の膨張挙動を明らかにしようとするものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した細骨材および粗骨材はアルカリ反応性を有する川砂、川砂利である。これらの反応性骨材の物性および溶解シリカ量 (Sc) およびアルカリ濃度減少量 (Rc) を表 - 1 に示す。またセメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm³, 等価 Na₂O 量 0.52%) を使用した。

2.2 コンクリートの配合と供試体

コンクリート中のアルカリ量が膨張量および膨張圧におよぼす影響を明らかにするために NaOH 試薬 (純度 97%) を添加し、単位アルカリ量 3.6, 5.4, 6.0, 6.6, 7.2, 9.0 および 9.6 kg/m³ のコンクリートに調整し、拘束実験および自由膨張量試験用の角柱供試体 (100×100×400mm)、圧縮強度試験および静弾性係数試験用の円柱供試体 (φ 100×200 mm) を作製した。表 - 2 にコンクリートの配合を示す。

表 - 1 骨材物性

粗骨材	常願寺川産 川砂利 (Gmax 20 mm) 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.66%, Rc 91 mmol/L, Sc 253 mmol/L, モルタルバー膨張率 0.34 % (26 週)
細骨材	常願寺川産 川砂 表乾密度 2.61g/cm ³ , 吸水率 1.94%, FM 2.81 Rc 61 mmol/L, Sc 190 mmol/L, モルタルバー膨張率 0.38 % (26 週)

表 - 2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
20	55	45	175	318	833	1,030

*1 電源開発(株) 火力発電部(正会員)

*2 開発設計コンサルタント 技術センター (正会員)

*3 株式会社 シーテック

*4 金沢大学名誉教授 (名誉会員)

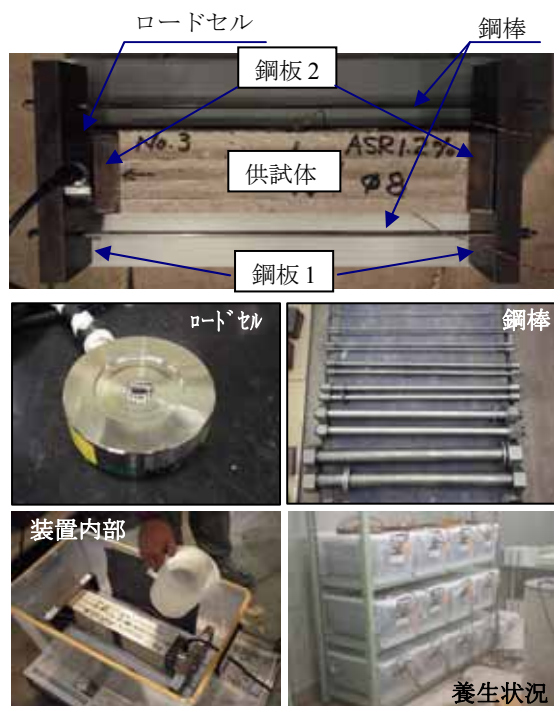


図 - 1 拘束試験装置とその構成，養生状況

2.3 拘束試験装置と養生環境，試験ケース

実験に使用した拘束試験装置は，2本の鋼棒で供試体を拘束し，発生する荷重をロードセルで計測するものである。鋼棒は厚さ32mmの鋼板1（100×270×32mm）に固定し，鋼板1と供試体の間は球座を介して鋼板2（100×100×32mm）とロードセル（CLG-50KNB，容量50KN）を配置した構成となっている。なお鋼棒，鋼板の材質はSS400で，鋼棒は直径3, 6, 8, 14, 31, 44mmの6種類のものを使用して拘束度を変化させた。またφ14mm鋼棒の引張強さ，ヤング係数は試験によりそれぞれ708N/mm²，224kN/mm²であることを確認した。本論文では，拘束度をAs/Ac（As：2本の鋼棒の断面積，Ac：コンクリートの断面積）で表示する。供試体はコンクリート打設後1日目に微小圧力（0.2N/mm²程度以下）の下で装置に固定した。その後直ちに拘束試験装置全体を底部が水で満たされ，供試体が水に触れないように底あげ加工した大きな容器に収容し，蓋をして密閉した後，温度40℃，相対湿度>95%の環境下で長期間にわたり養生した（図-1）。実施した実験は単位アルカリ量7ケース，拘束度6ケースの計42ケースである。

2.4 膨張圧，膨張量の測定

2.4.1 自由膨張量，圧縮強度，静弾性係数の測定

それぞれの拘束供試体と同配合の供試体（φ100×200mm，100×100×400mm）各3本を40℃，相対湿度>95%の雰囲気中で養生し自由膨張量，圧縮強度，静弾性係数を計測した。膨張量は，所定材齢において養生槽から供試体を取り出し約24時間，20℃の部屋に存置した後長さ計測を行った。圧縮強度，静弾性係数試験は材齢7，28，

91，182日で実施した。

2.4.2 膨張圧の測定

拘束試験装置に装着したロードセルにより1日1回の頻度で40℃，相対湿度>95%の環境下で材齢182日まで膨張圧力を計測した。

2.4.3 拘束下および拘束解放後における膨張量の測定

拘束試験装置に供試体を固定した直後および膨張圧測定終了時（材齢182日）に拘束方向（以下，長辺方向）およびそれに直角の方向（以下，短辺方向）に設置した測定ピン間の長さ（長辺方向100mm，短辺方向50mm）をコンタクトゲージによって測定し，固定直後と膨張圧測定終了時の測定値の差を拘束中の膨張量とした。

また，拘束解放後においては，拘束解放直後の瞬間回復ひずみおよびその後の時間にともなう供試体の長さ変化を測定した。

3. 結果と考察

3.1 自由膨張量と圧縮強度，静弾性係数

図-2はコンクリートの膨張量-時間曲線を示す。全体として，コンクリートの膨張は材齢28日頃から始まり材齢約140日まで継続するが，それ以降定常状態に達した。この結果から，本反応性骨材を使用したコンクリートでは，単位アルカリ量5.4kg/m³以上において0.1%以上の膨張が発生することがわかる。

各コンクリートの圧縮強度（実線），静弾性係数（破線）を図-3に示す。圧縮強度は材齢28日まで増加するものの，自由膨張量曲線にも表れているようにASR膨張が

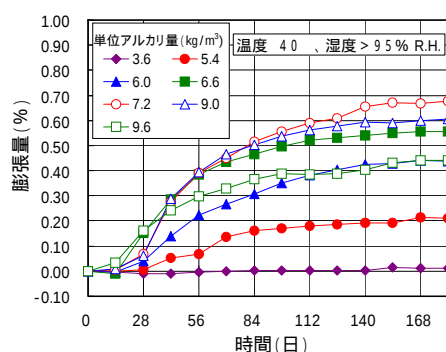


図 - 2 コンクリートの自由膨張量曲線

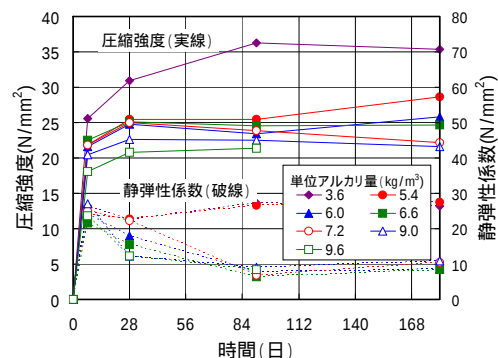


図 - 3 コンクリートの圧縮強度，静弾性係数

急速に進展する材齢 28 日以降停滞する。この傾向は静弾性係数の変化にも現れ、添加したアルカリ量の増加に伴い顕著となる。

3.2 拘束度およびアルカリ量の膨張圧におよぼす影響

図 - 4 は、単位アルカリ量 5.4 kg/m^3 のコンクリートの種々の拘束度下 (A_s/A_c) における膨張圧曲線を示す。

自由膨張量曲線 (図 - 2) に対応して、膨張圧は材齢 28 日以後時間とともに徐々に増大するが、その後材齢 100 日以降定常状態に達した。自由膨張量が材齢約 140 日まで増加するのに対し膨張圧が材齢約 100 日で収束しているのは、拘束により発生する拘束膨張圧と A S R ゲルの粘性が関係しているものと思われる。また、これらの傾向は各アルカリ量の試験に対しても同様であった。

各単位アルカリ量毎に拘束度 A_s/A_c に対して材齢 182 日における膨張圧 (以下、終局膨張圧) をプロットすると図 - 5 のようになる。この図から、 A_s/A_c 約 1.0% 以下では、終局膨張圧は A_s/A_c とともに急激に増大するが、それ以上では、 A_s/A_c の増大にともなう終局膨張圧の増

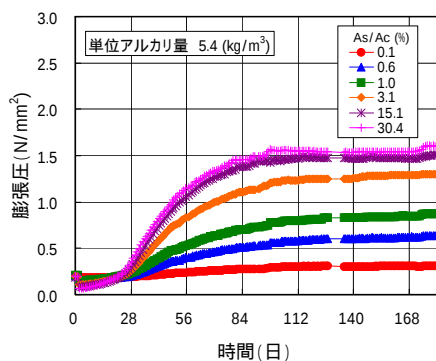


図 - 4 膨張圧曲線 (単位アルカリ量 5.4 kg/m^3)

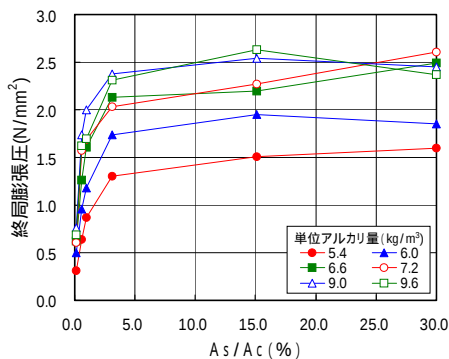


図 - 5 終局膨張圧と A_s/A_c (%) の関係

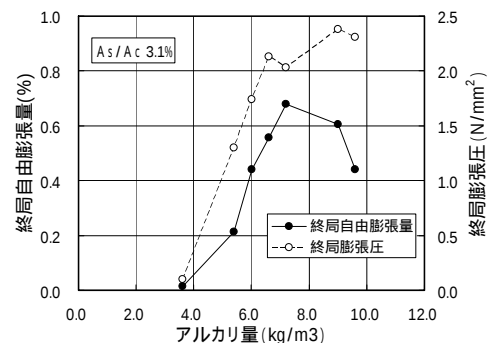


図 - 6 終局自由膨張量、膨張圧と単位アルカリ量の関係

加割合は急速に低下することがわかる。特に、 A_s/A_c 3% 以上においては、 A_s/A_c の増大にともなう膨張圧の増加割合は極めて小さい。

図 - 6 は、材齢 182 日における自由膨張量 (以下、終局自由膨張量)、終局膨張圧と単位アルカリ量の関係を $A_s/A_c = 3.1\%$ において図化したものである。この図に示すように、終局自由膨張量は単位アルカリ量が 7.2 kg/m^3 まではアルカリ量とともに増大し、その後低下するが、終局膨張圧は 7.2 kg/m^3 以上でも多少増大を続ける。これは、アルカリ量が増大するにしたがって細孔溶液中の NaOH の濃度が上昇し A S R がより活発に進行し、生成する A S R ゲル量も多くなった結果、供試体内部の微視ひび割れ発生数およびひび割れ幅が大きくなり、膨張量が増大したと考えられる。A S R ゲル中のアルカリ含有量が多くなるとゲルの粘性が小さくなることが報告³⁾されているが、今回の場合は、アルカリ量は 7 kg/m^3 以上になると A S R ゲルの粘性が低下し、生成するゲルの量は多くなってもゲルの周囲で発生する圧力が低下するために、ひび割れ発生数、幅ともに低下し、膨張量が低下したものと解釈できる。一方、膨張圧は 7 kg/m^3 を境に増加割合が低下するが、アルカリ含有量の増大にともなうゲルの粘性の低下の反映の仕方が、膨張量と膨張圧とは異なるものと考えられる。

3.3 拘束度およびアルカリ量の単位膨張圧におよぼす影響

図 - 7 は自由膨張量と $A_s/A_c = 1.0\%$ における拘束膨張圧の関係を示す。供試体に入ったひび割れが原因で測定値にばらつきがみられるが、実験初期段階では両者間に直線関係が見られるものの、その後自由膨張量の増大にともなう膨張圧の増加割合は徐々に低下する。この直線部分の勾配は、膨張初期段階における単位自由膨張量を拘束したときにコンクリートに生じる膨張圧を表す。以降、この初期の直線部分の勾配を初期単位膨張圧 (α_i)、また、終局膨張圧に対する終局自由膨張量の比を終局単位膨張圧 (α_u) と定義する。図 - 8 (a) に α_i と A_s/A_c の関係を示す。この図から、 α_i 値は約 1.0% まで A_s/A_c にともなって直線的に増大するが、それ以後 A_s/A_c にともな

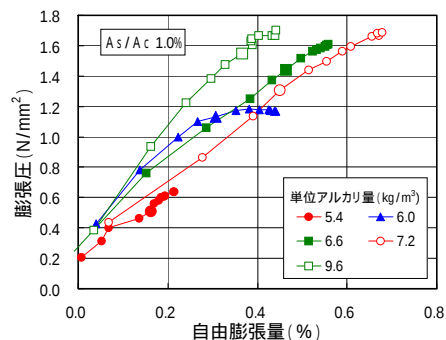


図 - 7 自由膨張量と膨張圧の関係

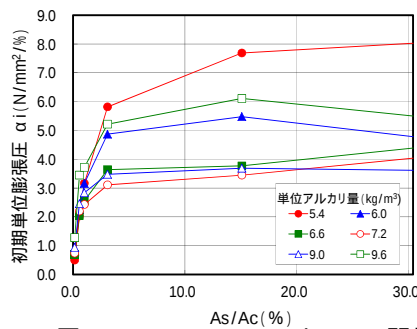


図 - 8 (a) A_s/A_c と α_i の関係

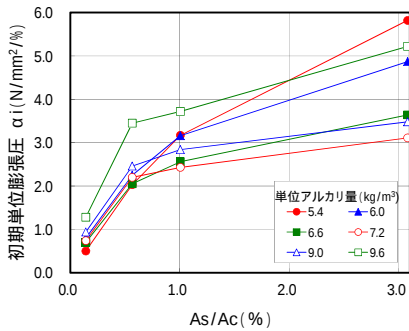


図 - 8 (b) A_s/A_c と α_i の関係 (A_s/A_c 3%以下)

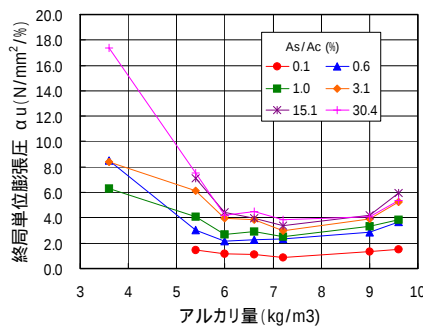


図 - 9 終局単位膨張圧 (α_u) とアルカリ量の関係

う α_i 値の増加割合は急激に低下する。また、図 - 8(b) から A_s/A_c が 3.0%以下においても、 A_s/A_c にもなう α_i 値の増大割合は A_s/A_c にもなって徐々に減少することがわかる。このことは、通常の A S R 劣化鉄筋コンクリート部材においては、鉄筋量が多くなるにしたがって A S R 膨張によって鉄筋に生じる応力は小さくなることを示している。

終局単位膨張圧 (α_u) とアルカリ量との関係を示すと図 - 9 のようになる。前述のように単位アルカリ量 7.2 kg/m³ まで終局自由膨張量や終局拘束膨張率はアルカリ量とともに増大するが (図 - 6), 終局単位膨張圧 α_u は単位アルカリ量とともに大きく減少する。これらの結果から、本コンクリートでは、単位アルカリ量 7 kg/m³ 程度までは、アルカリ量が大きくなるにしたがって終局自由膨張量は増大するが、コンクリートを拘束したときに発生する終局単位膨張率は低下すると言える。これは、アルカリ量の増大に伴うゲルの粘性の低下によるものと考えられる。

3.4 拘束中および拘束解放後の膨張挙動

3.4.1 拘束中の供試体の膨張挙動

単位アルカリ量 5.4 kg/m³ のコンクリート供試体を装置に固定した時点および試験終了時 (材齢 182 日) における測定値から得られた長辺および短辺方向の終局拘束膨張量を終局拘束膨張圧に対してプロットすると図 - 10 のようになる。この図に示すように、単位アルカリ量 5.4kg/m³ においては、長辺方向の膨張量は拘束によりさほど変化しないものの、短辺方向の膨張量は終局拘束膨張圧が増大する (拘束度が増大する) につれて増大することがわかる。長辺方向の終局拘束膨張量は終局自由膨張量より多少小さくなるが、短辺方向の終局拘束膨張量はほとんどの拘束度 (A_s/A_c) において終局自由膨張量よりかなり大きくなる傾向が見られた。実施した全ての実験ケースについて長辺、短辺方向の終局拘束膨張量をプロットすると図 - 11(a) のようになるが、この図から短辺方向の終局拘束膨張量は長辺方向よりも大きくなっていることがわかる。次に供試体の終局自由膨張量、および短辺方向の終局拘束膨張量と単位アルカリ量の関係をプロットすると図 - 11(b) のようになる。図中の×印は各単

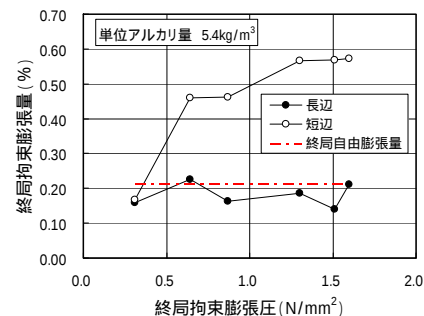


図 - 10 終局膨張圧と終局自由膨張量 (短辺, 長辺方向)

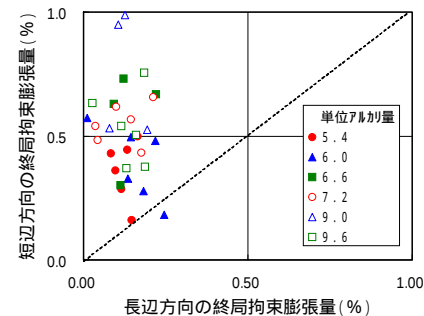


図 - 11(a) 拘束中の終局拘束膨張量

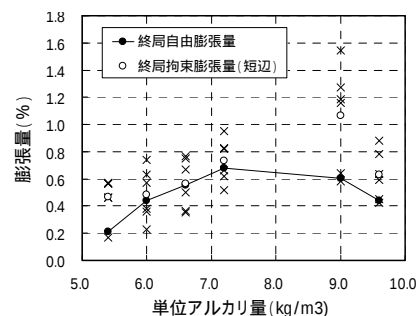


図 - 11 (b) 拘束中の短辺方向終局拘束膨張量と終局自由膨張量の関係

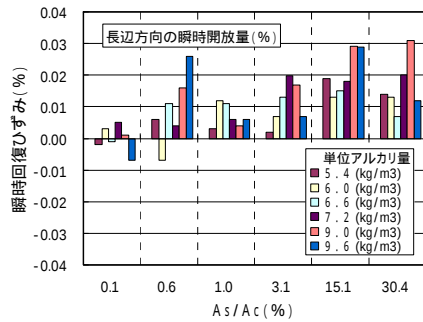


図 - 12(a) 拘束開放時の長辺方向瞬間開放ひずみ

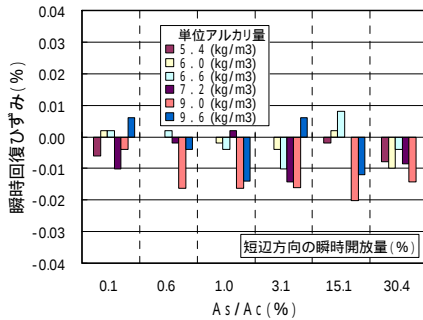


図 - 12(b) 拘束開放時の短辺方向瞬間開放ひずみ

位アルカリ量毎に実施した 7 種の各拘束度における終局拘束膨張量をプロットしたものであり、白抜き○印はその平均値を表す。この図からも、コンクリート直方体を長辺方向に拘束すると、無拘束方向の膨張量は終局自由膨張量より大きくなるのがわかる。このことは他の実験においても確認されている⁵⁾。

3.4.2 拘束解放直後の瞬間回復ひずみ

拘束解放前後のひずみ差（瞬間回復ひずみ）を図 - 12 に示す。この図から、拘束を解放すると、長辺および短辺方向に、それぞれ引張および圧縮の弾性ひずみが瞬間的に回復することがわかる。しかし、次項で述べるように、瞬間回復ひずみ発生後、長辺および短辺のいずれの方向においてもコンクリートは時間の経過とともに再び徐々に膨張した。

3.4.3 拘束解放後の膨張挙動

図 - 13 は、単位アルカリ量 6.0kg/m^3 のコンクリートにおいて拘束解放後に生じる長辺および短辺方向の膨張量の時間とともに増加状況を示す。この図に示されるように、本コンクリートの拘束解放後の膨張挙動は拘束度 (A_s/A_c) によって異なるが、拘束解放後約 28 日までかなり急速に膨張する。また全体として、短辺方向の膨張量は長辺方向のそれよりも大きい。

供試体表面には、図 - 14 に示すようなひび割れが発生しているので、測定される膨張量のばらつきは大きくなるが、拘束解放後における長辺と短辺方向の膨張量を全ての試験ケースについてプロットすると、全体として拘束解放後における短辺方向の膨張量は長辺方向のそれよりも大きいことがわかる（図 - 15）。また、拘束解放後に

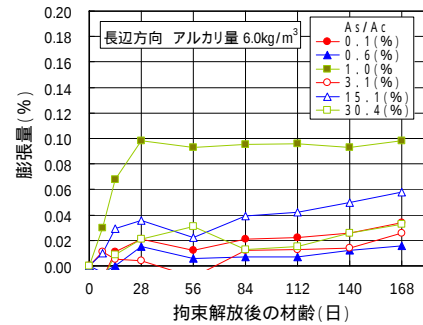


図 - 13(a) 拘束解放後の長辺方向膨張量の変化

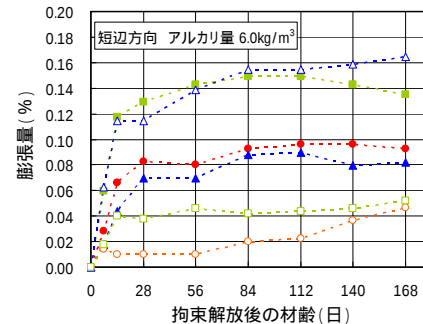


図 - 13(b) 拘束解放後の短辺方向膨張量の変化

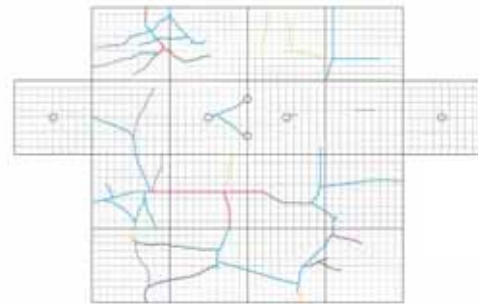


図 - 14 拘束解放後に生じたひび割れ
(単位アルカリ量 6.0kg/m^3 , $A_s/A_c=3.1\%$)

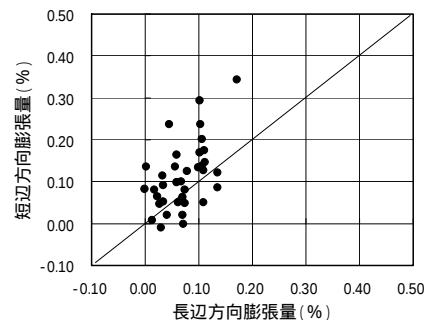


図 - 15 拘束解放後の長辺、短辺方向の膨張量

発生する膨張量が 0.3% をこえるもの、膨張が数ヶ月にも及ぶものもあった。

3.4.4 拘束解放後の膨張機構と構造物から採取したコアの評価

拘束開放後の膨張メカニズムは、以下のとおりであると考えられる。拘束開放直後は、まず拘束中に生成した A S R ゲルの膨張によって発生した内部応力の平衡状態が破れる。すなわち拘束解放後の膨張は、弾性ひずみの回復による瞬間回復ひずみと、その後内部応力が再調整

される過程において生じたものと考えられる。

C.F. Dunant ら⁹⁾ は、一軸方向に一定応力を与えた反応性骨材コンクリートにおいては、ASRゲル領域の膨張によって局部的に発生する微視ひび割れは応力方向に配向することをコンピュータによる数値解析によって明らかにしている。今回得られた結果において、拘束解放後の膨張挙動が長辺と短辺方向とで異なるのは、一軸方向に拘束膨張圧が作用するコンクリート内部において時間とともに進展する微視ひび割れが拘束方向に配向するためであると推察される。

今回の実験で得られた一連の結果は、拘束を受けていた部分から採取されたコンクリートコアの残存膨張量の解釈の仕方において重要な意味を持っている。拘束環境下に置かれたコンクリートの膨張量、膨張圧が定常状態に達した後は（かつ、自由膨張量も定常状態に達した後）、内外部の力のバランスが保たれる限りコンクリートは膨張も収縮もしない。しかし、一度拘束が解放されるとかなり長期にわたって膨張が進行する（図 - 13）。このとき、初期に拘束を受けていた方向との関係で解放後の膨張量に大きな差異が生じることが本実験により明らかになった。

従来より、ASR劣化構造物の将来の膨張量を予測するために構造物から採取されたコアの残存膨張量を計測する¹⁰⁾ が行われているが、構造物から採取されたコアが温度 40℃、相対湿度 95%以上の環境下で大きく膨張したとしても、その構造物が将来において必ずしもASR膨張が大きく進行するとはいえないということになる。

4. 結論

本実験において得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) 拘束により供試体に発生する膨張圧は、コンクリートの膨張が始まる材齢 28 日以後時間とともに徐々に増大するが、その後材齢 100 日以降定常状態に達した。自由膨張量が材齢約 140 日まで増加するのに対し膨張圧が材齢約 100 日で収束しているのは、拘束により発生する拘束膨張圧とASRゲルの粘性が関係しているものと思われる。
- (2) A_s/A_c が約 1% 以下では、終局拘束膨張圧は A_s/A_c およびアルカリ量とともにほぼ直線的に増大するが、約 3%以上においては、 A_s/A_c の増大にともなう終局拘束膨張圧の増加割合は劇的に低下する。
- (3) アルカリ量が大きくなるにしたがって自由膨張量は大きくなるが、終局単位膨張圧は小さくなる。
- (4) 拘束によって拘束方向に直角方向の膨張は助長され、終局自由膨張量より大きくなる。

(5) 拘束解放後コンクリートは再び膨張を開始し、1 ～ 2 ヶ月間継続した。膨張量は最大約 0.3%にまで達した。また短辺方向の膨張量は長辺方向のそれよりも大きい。

(6) 拘束を受けていた部分から採取されたコンクリートコアの残存膨張量が大きくても、その構造物が将来において必ずしもASR膨張が大きく進行するといえない。

参考文献

- 1) 川村満紀, 竹本邦夫, 柳場重正, アルカリ・シリカ反応による劣化構造物の一調査, セメント技術年報, Vol. 39, 344, 1986.
- 2) M. Fujii, K. Kobayashi, T. Kojima, H. Maehara, The Static and Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Beams with Cracking Due to Alkali Silica Reaction, Proc. the 7th Intl. Conf. AAR, Ottawa, 126, 1987.
- 3) 川村満紀, 岩堀和馬, 拘束下のモルタルにおいて発生するアルカリシリカ反応による膨張圧, コンクリート工学論文集, 第 14 巻, 第 3 号, 1, 2003.
- 4) 奥山和俊, 尾花祥隆, 石井 豪, 鳥居和之, 実構造物から採取した ASR 劣化コアのクリープ性状, コンクリート工学年次論文集, 第 31 巻, 1231, 2009.
- 5) M. Berra, G. Faggiani, T. Mangialardi, A.E. Paolini, Influences of stress restraint on the expansive behavior of concrete affected by alkali-silica reaction”, Cem. Concr. Res. 40, 1403, 2010.
- 6) 鍵本広之, 川村満紀, 大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみ測定によるASR表面ひびわれ発生過程の解明, コンクリート工学年次論文集, 第 31 巻, pp.1225-1230, 2009.
- 7) 鍵本広之, 川村満紀, 乾燥・湿潤繰り返しを受ける反応性骨材含有コンクリート円柱内部のひずみ, 相対湿度および表面ひび割れの進展, コンクリート工学年次論文集, 第 33 巻, pp.977-982, 2011.
- 8) M. Kawamura, Estimation of critical expansions related to surface cracking in ASR-affected concrete, J. Cem. Concr. Comp, Vol. 29, No. 4, pp. 324-329, 2007.
- 9) C.F. Dunant, K.L. Scrivener, Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete, J. Cem. Concr. Res. 42, 745, 2012.
- 10) 日本コンクリート工学協会, JCI 基準集 (1997～2002 年度), 日本コンクリート工学協会, pp. 152-156, 2004.