

論文 反応性骨材使用高強度コンクリートの膨張に及ぼす環境条件の影響

来海 豊*1

要旨: 本研究では、アルカリ骨材反応性のある骨材を用いた圧縮強度 90~100N/mm² 程度の高強度コンクリートを対象とし、種々の環境条件下の部材の膨張性状について実験を行い、断面内のひずみ分布、断面寸法の影響、シール養生の影響、乾湿繰り返し作用の影響を検討した。その結果、高強度コンクリート部材の場合、ほとんど外部から浸透した水分によってアルカリ骨材反応に起因する膨張が進行したものと推察された。また、高温・高湿環境下でも、初期材齢で水分の浸透を抑制することによって膨張を遅延できることや乾湿繰り返し作用がその後の膨張を特に促進する傾向はみられないこと等がわかった。

キーワード: 高強度コンクリート, 環境条件, アルカリ骨材反応, 自己収縮

1. はじめに

高強度コンクリートは、水セメント比の低減によって硬化体組織が緻密になるため、劣化因子の侵入に対する抵抗性に優れると考えられる。その反面で高強度コンクリートは、自己収縮の顕在化、単位セメント量の増加によりアルカリ骨材反応に対して不利になる等の問題点も有している。したがって、高強度コンクリート部材の信頼性向上を図るには、アルカリ骨材反応性のある骨材を用いた場合の部材の性状について明らかにしていく必要があると考えられる。

高強度コンクリートのアルカリ骨材反応に関しては、促進膨脹試験の結果¹⁾や反応による応力を測定した例²⁾等の報告はあるが、十分に検討されているとはいえない。一方、筆者は、反応性骨材を用いた高強度コンクリートを対象として、アルカリ総量、鉄筋の拘束および初期養生条件が部材の膨張性状に及ぼす影響について検討してきた³⁾。しかし、外部からの水分の供給条件が部材の膨張性状に及ぼす影響等については、不明な点が多い。

本研究では、反応性骨材を用いた圧縮強度 90~100N/mm² 程度の高強度コンクリートを対象とし、種々の環境条件下における部材の膨張性状

について実験を行い、断面内のひずみ分布、断面寸法の影響、シール養生の影響および乾湿繰り返し作用の影響を検討した。その際、実験は水セメント比が 25%と 55%のコンクリート部材について行い、部材の性状を比較検討した。

2. 実験の概要

セメントは、Na₂O 等価量が 0.60%の普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材は表乾比重 2.60 の輝石安山岩 2005 碎石の粗骨材 A と表乾比重 2.65 の硬質砂岩 2005 碎石の粗骨材 B の 2 種類とし、細骨材には表乾比重 2.59 の陸砂を用いた。粗骨材と細骨材の JIS A 5308 の化学法によるアルカリシリカ反応性を表-1 に示す。

コンクリートの配合は水セメント比(W/C)が 25%と 55%の表-2 に示す 2 種類とし、粗骨材にはペシマム現象を考慮して粗骨材 A と粗骨材 B との比率が 6 : 4 の混合骨材を使用した。ア

表-1 骨材のアルカリシリカ反応性

骨材種別	Rc (mmol/l)	Sc (mmol/l)	判定
粗骨材A	114	648	無害でない
粗骨材B	45	42	無害
細骨材	123	43	無害

Rc: アルカリ濃度減少量, Sc: 溶解シカ量

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部主幹 工博 (正会員)

ルカリ総量については、いずれの配合も 8kg/m^3 となるように NaOH の試薬を用いて調整した。また、W/C が 25% の場合にスランブフロー45cm、W/C が 55% の場合にスランブ 8cm となるように、それぞれ高性能 AE 減水剤と AE 減水剤を添加した。なお、コンクリートの材齢 28 日の標準水中養生圧縮強度を、配合とともに表-2 に示す。

作製したコンクリート供試体は、すべて成形後温度 20°C の養生室内に置き、材齢 24 時間で脱型した。その後所定材齢まで供試体を置く環境条件を、表-3 に一覧にして示す。環境条件が a ~ e は、高温・高湿環境条件下において外部からの水分の供給量が多いと考えられる方から順に 5 段階の条件を設定したものである。また、環境条件が f と g は、温度 20°C で湿度 60% の気中環境を乾、温度 40°C で湿度 97.5% の高温・高湿環境を湿として乾湿繰り返し作用の影響をみるための条件である。

(1) 断面内のひずみ分布の検討

コンクリート供試体は、中央断面にゲージ長 100mm の埋込みゲージを側面から 25mm、50mm および断面中心の 3 箇所に配置した $200 \times 200 \times 400\text{mm}$ の図-1 に示す角柱である。その型枠については、内側全面にテフロンシートを 2 枚重ねて配置した。そして、中央断面における 3 箇所の収縮・膨張ひずみは、供試体成形直後を原点として、表-3 に示した環境条件が a と b の供試体について材齢 140 日まで測定した。

(2) 断面寸法とシール養生の影響の検討

コンクリート供試体は、中央断面の中心にゲ

表-2 コンクリートの配合と圧縮強度

配合	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				圧縮強度 (N/mm^2)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
HC8	25	165	660	632	962	92.8
OC8	55	165	300	811	1001	29.3

注) アルカリ総量: 8kg/m^3

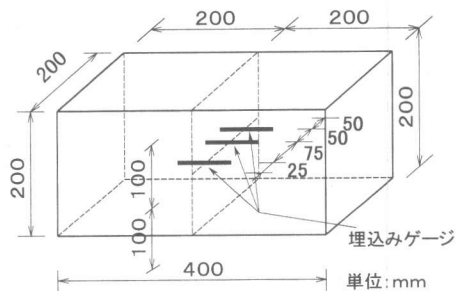


図-1 コンクリート供試体

ージ長 100mm の埋込みゲージを配置した $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱である。型枠については、内側全面にテフロンシートを 2 枚重ねて配置した。そして、収縮・膨張ひずみの測定は供試体成形直後を原点とし、表-3 に示した環境条件が a と b の供試体については材齢 140 日まで行ったが、シール養生をする環境条件が c ~ e の供試体については測定時にひび割れが発生していると考えられたために材齢 112 日までとした。なお、断面寸法の影響は、図-1 に示した供試体の場合との比較により検討した。また、シール養生は、供試体をサランラップで 2 重に包み、その周囲をガムテープで巻いた後、アルミ製粘着シートで 2 重にシールしたものをポリエチレンの袋に入れて環境条件 a に置く形とした。

表-3 コンクリート供試体の環境条件

a	脱型→ 40°C ・湿度 97.5%
b	脱型→材齢 14 日まで 20°C ・湿度 60% → 40°C ・湿度 97.5%
c	脱型→材齢 28 日まで 40°C ・湿度 97.5% → シール養生 (40°C ・湿度 97.5%)
d	脱型→材齢 14 日まで 40°C ・湿度 97.5% → シール養生 (40°C ・湿度 97.5%)
e	脱型→シール養生 (40°C ・湿度 97.5%)
f	脱型→材齢 14 日まで 20°C ・湿度 60% (乾) → 材齢 28 日まで 40°C ・湿度 97.5% (湿) → 材齢 112 日まで 14 日単位で乾・湿の繰り返し → 40°C ・湿度 97.5%
g	脱型→材齢 14 日まで 40°C ・湿度 97.5% (湿) → 材齢 28 日まで 20°C ・湿度 60% (乾) → 材齢 112 日まで 14 日単位で湿・乾の繰り返し → 40°C ・湿度 97.5%

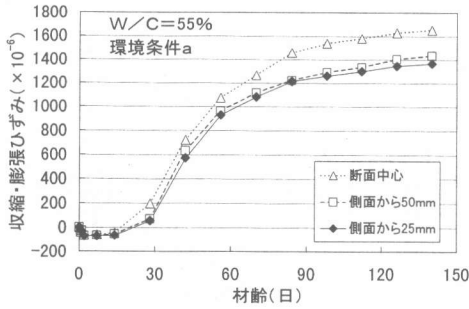


図-2 断面内のひずみ分布

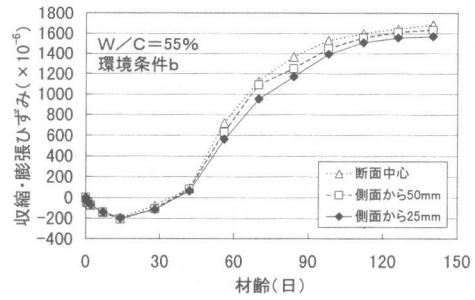


図-3 断面内のひずみ分布

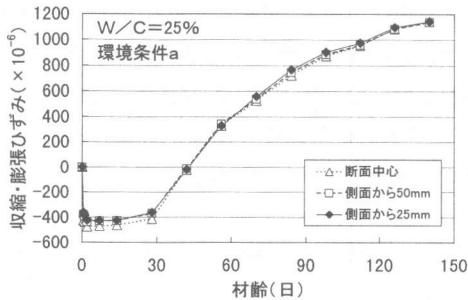


図-4 断面内のひずみ分布

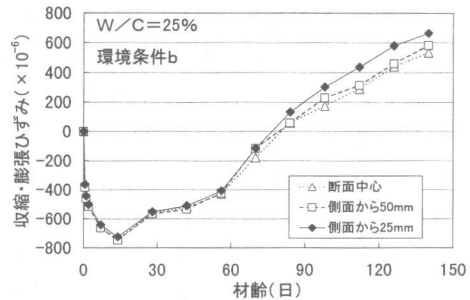


図-5 断面内のひずみ分布

(3) 乾湿繰り返し作用の影響の検討

乾湿繰り返し作用の影響は、表-3に示した環境条件がfとgの100×100×400mmのコンクリート供試体の長さ変化(収縮・膨張ひずみ)を、ダイヤルゲージ法により脱型時を原点として材齢182日まで測定して検討した。その際、比較のために環境条件がaとbの供試体の収縮・膨張ひずみも、測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 断面内のひずみ分布

図-2には、W/Cが55%で環境条件がaの供試体について、中央断面における3箇所の収縮・膨張ひずみを示す。3箇所のいずれについても、初期に若干の収縮ひずみを生じてから材齢28日以降膨張に転じ、その後ひずみは材齢とともに増大している。そして、初期の収縮ひずみにはほとんど差がないが、膨張に転じてからは、断面中心部のひずみが側面から50mmや側面から25mmの位置よりも大きくなっている。

図-3には、W/Cが55%で環境条件がbの供試体について、中央断面における3箇所の収縮・膨張ひずみを示す。3箇所のいずれについても、初期の気中乾燥によって環境条件がaの供試体に比べて大きな収縮ひずみを材齢14日まで生じてから材齢42日以降膨張に転じており、その後ひずみは材齢とともに増大している。そして、初期の収縮ひずみにはほとんど差がないが、膨張に転じてからは、断面中心部のひずみが側面側よりも大きくなる傾向がみられる。

図-4には、W/Cが25%で環境条件がaの供試体について、中央断面における3箇所の収縮・膨張ひずみを示す。3箇所のいずれについても、自己収縮により材齢28日程度まで大きな収縮ひずみを生じており、その後ひずみは材齢42日頃から膨張に転じて材齢とともに増大している。そして、初期の収縮ひずみは断面中心部の方が側面から25mmおよび側面から50mmの場合よりも大きくなっている。これは、中心部の方が自己乾燥状態になりやすかったことを示

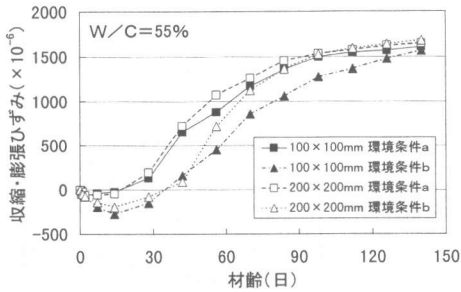


図-6 断面寸法の影響

唆していると思われる。しかし、その後膨張に転じてからは、外部からの水分の浸透により、位置によるひずみの差はほとんど認められない。

図-5には、W/Cが25%で環境条件がbの供試体について、中央断面の3箇所の収縮・膨張ひずみを示す。3箇所のいずれについても、自己収縮と乾燥収縮によって材齢14日まで大きな収縮ひずみを生じてから材齢84日以降膨張に転じており、その後のひずみは材齢とともに増大している。また、初期に側面側から乾燥収縮が進行するため、初期の収縮ひずみに断面内の位置による差は特に認められない。しかし、その後膨張に転じてからは、側面から25mmの位置のひずみが、側面から50mmの位置や断面中心部に比べて大きくなる傾向がみられる。

3.2 断面寸法の影響

図-6には、W/Cが55%で環境条件がaとbの供試体について、断面が100×100mmと200×200mmの供試体の断面中心部の収縮・膨張ひずみを示す。環境条件がaの供試体では、断面寸法による差は材齢28日程度までほとんど認められないが、それ以降は断面が200×200mmの供試体の膨張ひずみが断面が100×100mmの場合よりも若干大きくなっている。一方、環境条件がbの供試体では、断面の大きい供試体の初期の収縮ひずみは断面の小さい場合よりも若干小さくなっている。その後膨張に転じてからは、断面の大きい供試体のひずみが断面の小さい場合に比べて大きくなる傾向がみられる。

図-7には、W/Cが25%で環境条件がaとb

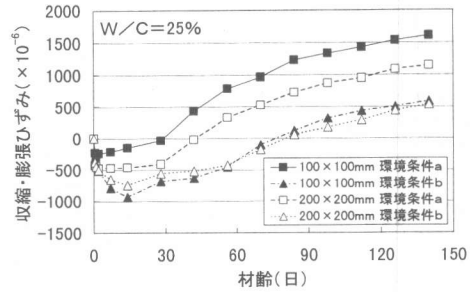


図-7 断面寸法の影響

の供試体について、断面が100×100mmと200×200mmの供試体の断面中心部の収縮・膨張ひずみを示す。環境条件がaの供試体では、断面が200×200mmの供試体の断面中心部の初期収縮ひずみは断面が100×100mmの場合に比べて大きいですが、これは断面の大きい供試体の中心部の方が自己乾燥状態を継続しやすかったことを示唆していると思われる。また、膨張に転じてからも、断面の大きい供試体のひずみが断面の小さい場合よりも小さくなっている。一方、環境条件がbの供試体では、初期の収縮ひずみは断面の小さい供試体の方が断面の大きい場合よりも若干大きく、膨張に転じてからは断面の小さい方の膨張ひずみが若干大きくなる傾向にある。

以上より、前記の断面内のひずみ分布の傾向も考慮すると、W/Cが55%の場合には、内部に保持している水分と外部から浸透した水分の両方によってアルカリ骨材反応による膨張を生じたと考えられる。しかし、W/Cが25%の場合には、セメントの水和により内部空隙が形成される速度に比べて水分が外部から浸透する速度が非常に遅いため⁴⁾、ほとんど外部から浸透した水分によってアルカリ骨材反応による膨張が進行したものと推察される。

3.3 シール養生の影響

図-8には、W/Cが55%の供試体の中央断面中心部のひずみを示す。材齢28日からシール養生をする環境条件がcの供試体は、環境条件がc～eの供試体の中で、特に材齢56日程度までの膨張ひずみが大きくなっている。また、脱型

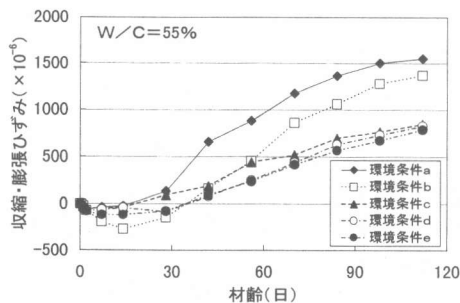


図-8 シール養生の影響

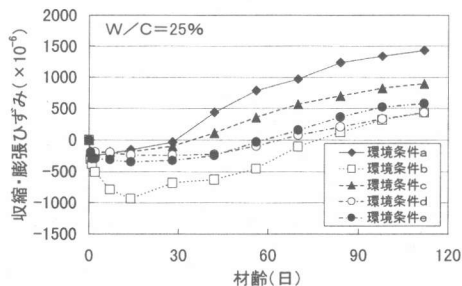


図-9 シール養生の影響

直後からシール養生をする環境条件がeの供試体の方が材齢14日からシール養生をする環境条件がdの場合に比べて初期の収縮ひずみはわずかに大きくなるが、両者とも材齢28日程度まで若干の収縮を生じてから膨張に転じている。そして、環境条件がc～eのいずれの供試体も材齢112日ではほぼ同程度の膨張ひずみを生じているが、その膨張ひずみは環境条件がaやbの供試体に比べれば小さい。

図-9には、W/Cが25%の供試体の中央断面中心部のひずみを示す。材齢112日の膨張ひずみは環境条件がaの供試体が最も大きく、材齢28日からシール養生をする環境条件がcの供試体が2番目に大きくなっている。また、初期に自己収縮と乾燥収縮を生じる環境条件がbの供試体のひずみが、材齢84日程度まで最も小さくなっている。環境条件がdとeの両供試体については、材齢56日程度まで収縮ひずみを維持した後に膨張に転じてひずみが緩やかに増大している。すなわち、初期材齢でシールをすることにより、その後の膨張は遅延している。

なお、ここに示した膨張ひずみは、W/Cが55%の供試体では外部からの水分の供給量が多いと考えられる環境条件のものほど大きくなっているが、W/Cが25%の供試体では初期に乾燥させたものが材齢84日程度まで最も小さくなっている。そこで、自己収縮と乾燥収縮の影響を除去するために収縮が最大となる時点のひずみをゼロとして、供試体の劣化が著しくならない材齢70日のひずみを表してみると、図-10のよ

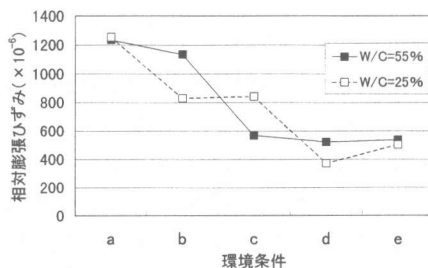


図-10 相対膨張ひずみ

うになる。その相対膨張ひずみは、W/Cが25%と55%のいずれの場合も外部からの水分の供給量が多いと考えられる環境条件のものほど大きくなるという傾向に概ねなっている。

3.4 乾湿繰り返し作用の影響

図-11には、W/Cが55%の場合について、環境条件fと環境条件gの条件の乾湿繰り返し作用が収縮・膨張性状に及ぼす影響を示す。最初に温度20℃で湿度60%の気中乾燥を与える環境条件がfの供試体は、乾湿繰り返しによってひずみの増減を繰り返しながら材齢とともに徐々に膨張が進行している。一方、環境条件がgの供試体では、最初に温度40℃で湿度97.5%の湿空環境に置くため、環境条件がfの供試体と逆の順番の乾湿繰り返しによって徐々に膨張が進行している。そして、乾湿繰り返しによる膨張の進行は、環境条件がgの供試体の方が環境条件がfの場合よりも速くなっている。また、乾湿繰り返しの終了する材齢112日以降についても、環境条件がgの供試体の膨張ひずみは環

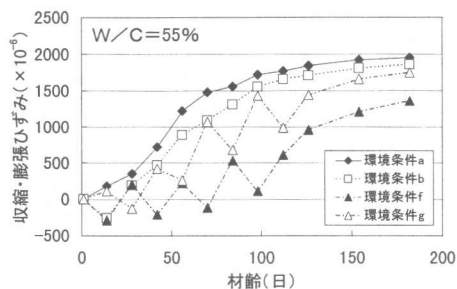


図-11 乾湿繰り返し作用の影響

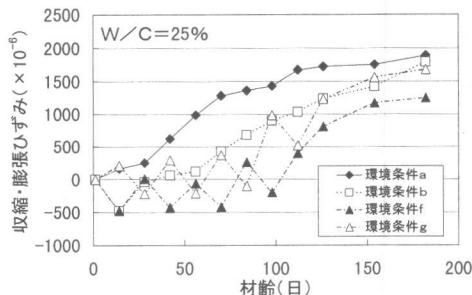


図-12 乾湿繰り返し作用の影響

環境条件が f の場合よりも大きいですが、その膨張ひずみは材齢 182 日では環境条件が a や b の供試体に比べて若干小さくなっている。

図-12 には、W/C が 25% の場合について、環境条件 f と環境条件 g の条件の乾湿繰り返し作用が収縮・膨張性状に及ぼす影響を示す。この場合も W/C が 55% の場合と同様に、環境条件が g の供試体の膨張の進行が環境条件が f の供試体よりも速くなる傾向にある。また、乾湿繰り返しの終了する材齢 112 日以降の性状についても、W/C が 55% の場合とほぼ同様の傾向が認められることから、環境条件 f や環境条件 g のような乾湿繰り返し作用がアルカリ骨材反応による膨張を特に進行させることはないと思われる。

4. まとめ

アルカリ骨材反応による膨張を生じる高強度コンクリート部材について本研究の範囲で得られた結果は、以下ようになる。

(1) 2 種の環境条件下で測定した断面内のひずみ分布と断面寸法の相違する部材のひずみを検討した。その結果から、普通コンクリート部材では内部に保持している水分と外部から浸透した水分の両方によってアルカリ骨材反応による膨張を生じたと考えられるが、高強度コンクリート部材の場合には、内部が自己乾燥状態になりやすいために、ほとんど外部から浸透した水分によってアルカリ骨材反応による膨張が進行したものと推察された。

(2) 高強度コンクリート部材を脱型直後から高温・高湿環境に置いた時でも、初期材齢で水分の浸透を抑制することにより、その後の膨張の進行は遅延した。また、乾湿がそれぞれ 14 日間ずつの乾湿繰り返いを 4 サイクル行った場合には、乾湿繰り返し作用がその後の膨張を促進する傾向は特に認められなかった。

参考文献

- 1) 澤田由美子, 権 寧進, 浜 幸雄, 田畑雅幸, 鎌田英治: 高強度コンクリートのアルカリ骨材反応性と高炉スラグ微粉末による抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 479 号, pp.1-6, 1996 年 1 月
- 2) Ferrais, C.F., Garboczi, E.J., Davis, F.L., and Clifton, J.R.: The Effect of Stress Relaxation, Self-Desiccation, and Water Absorption on the Alkali-Silica Reaction in Low Water Cement Ratio Mortars, Cement and Concrete Research, Vol.27, No.10, pp. 1553-1560, Oct., 1997
- 3) 来海 豊: 反応性骨材を用いた高強度コンクリートの収縮・膨張性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 1129~1134, 1999
- 4) 宮沢伸吾, 田澤栄一: セメント系材料の曲げ強度に及ぼす不均一な乾燥収縮応力の影響, 土木学会論文集, 第 426 号/V-14, pp. 121-129, 1991 年 2 月