

論文 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

来海 豊^{*1}

要旨: 本研究では、アルカリ骨材反応のある骨材を用いた圧縮強度 100N/mm^2 程度の高強度コンクリートを対象とし、アルカリ総量、鉄筋の拘束、初期養生条件が部材の収縮・膨張性状に及ぼす影響を促進膨脹試験により調べた。その結果、膨張を生じるアルカリ総量の高強度コンクリート部材中の鉄筋のひずみは、ある期間圧縮ひずみを生じた後に引張ひずみに転じ、鉄筋のひずみが小さい時でも、部材表面にひび割れが発生することがわかった。また、著しく乾燥するような悪い養生をした後に多量の水を与えると、高強度コンクリート部材でも、その後の膨張が急速に進行する危険性のあること等が明らかとなった。

キーワード: 高強度コンクリート、アルカリ骨材反応、自己収縮、初期養生条件

1. はじめに

混和剤の進歩に伴って登場してきた高強度コンクリートは、低水セメント比化によって硬化体組織の緻密化も図られるため、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、単位セメント量が多くなることから、アルカリ骨材反応に対して不利になるとと考えられる。さらに、自己収縮の顕在化やプラスティック収縮ひび割れの危険性が高くなる等の問題点も併せもっている。したがって、これらの点を踏まえて高強度コンクリート部材の信頼性向上を図るには、アルカリ骨材反応の危険性のある骨材を用いた場合等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。しかし、高強度コンクリートのアルカリ骨材反応に関しても、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、自己収縮や養生条件等が部材の収縮・膨張性状に及ぼす影響については不明な点が多い。

そこで本研究では、反応性骨材を用いた圧縮強度 100N/mm^2 程度の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収縮・膨張性状に及ぼす影

響を調べるために、水セメント比が 25% と 55% のコンクリート部材の性状を比較検討した。

2. 実験の概要

セメントは、 Na_2O 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 砕石の粗骨材 I と粗骨材 II, 表乾比重 2.65 の硬質砂岩 2005 砕石の粗骨材 III の 3 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。粗骨材 I と粗骨材 II は同一産地で入手時期が異なるものであり、アルカリ総量と鉄筋拘束の影響の検討には粗骨材 I, 初期養生条件の影響の検討には粗骨材 II を用いた。なお、使用した骨材の粉末 X 線回折試験結果によると、高アルカリの時に反応性鉱物となる可能性があるものとしては、粗骨材 I と粗骨材 II の

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 I	133	696	無害でない
粗骨材 II	122	637	無害でない
粗骨材 III	45	42	無害
細骨材	123	43	無害

Rc : アルカリ濃度減少量, Sc : 溶解シリカ量

*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)

表-2 コンクリートの配合

配合	水セメント比 W/C (%)	アルカリ総量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
A4	25	4	165	660	632	962
A8	25	8	165	660	632	962
B4	25	4	165	660	632	973
B8	25	8	165	660	632	973
C4	55	4	165	300	811	1001
C8	55	8	165	300	811	1001

場合にクリストバライト、粗骨材Ⅲの場合に石英、細骨材の場合には石英が考えられる。

コンクリートの配合については、水セメント比(W/C)が25%と55%の表-2に示す6種類とした。配合A4, A8, C4およびC8の場合の粗骨材は、粗骨材Iあるいは粗骨材IIと粗骨材IIIの比率が6:4の混合骨材である。配合B4とB8の場合には、粗骨材IIIのみを用いた。コンクリート中のアルカリ総量については、NaOHを用いて調整した。また、W/Cが25%の場合にスランプフローが45cm、W/Cが55%の場合にスランプが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。

(1) アルカリ総量と鉄筋拘束の影響の検討

鉄筋コンクリート供試体は、断面中央に鉄筋を配置した100×100×1200mmの図-1に示す角柱である。各供試体について配合と鉄筋を表-3に示すが、鉄筋には断面積68.7mm²(拘束鉄筋比0.687%)のD10と断面積287mm²(拘束鉄筋比2.87%)のD19を用いた。型枠については、脱型までの拘束を低減する目的で内側全面にテフロンシートを2枚重ねて配置した。

鉄筋のひずみは、図-1に示す3箇所にゲージ長5mmの箔ゲージを上下2枚ずつ貼付し、供

表-3 供試体の種類

供試体記号	配合	鉄筋
RA41, RA42	A4	D10
RA81, RA82	A8	D10
RA83, RA84	A8	D19
RB41, RB42	B4	D10
RB81, RB82	B8	D10
RC41, RC42	C4	D10
RC81, RC82	C8	D10

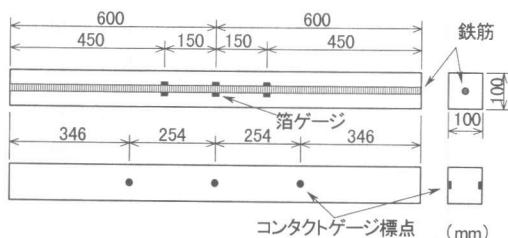


図-1 鉄筋コンクリート供試体

試体成形直後を原点として測定した。さらに、供試体表面のひずみも、図-1に示す側面の位置に標点間隔が254mmとなるようにコンタクトゲージ標点を設置し、両側面で4箇所について脱型時を原点として材齢203日の値を測定した。また、100×100×400mmの無筋コンクリート供試体の長さ変化(収縮・膨張ひずみ)も、脱型時を原点として測定した。供試体の養生については、材齢24時間の脱型時まで温度20℃の養生室内に置き、その後は温度40℃・湿度97.5%の促進養生とした。

(2) 初期養生条件の影響の検討

アルカリ総量が8kg/m³の配合A8とC8について、材齢14日までの養生条件を表-4に示すように変えた100×100×400mmの無筋コンク

表-4 養生条件

a	脱型→温度40℃・湿度97.5%
b	脱型→材齢14日まで温度20℃水中→その後温度40℃・湿度97.5%
c	脱型→材齢14日まで温度20℃・湿度60%→その後温度40℃・湿度97.5%
d	脱型→材齢12日まで温度20℃・湿度60%→材齢14日まで温度20℃水中(48時間)→その後温度40℃・湿度97.5%
e	脱型→温度55℃(乾燥炉)で4日間乾燥後徐冷→材齢14日まで温度20℃・湿度60%→その後温度40℃・湿度97.5%
f	脱型→温度55℃(乾燥炉)で4日間乾燥後徐冷→材齢12日まで温度20℃・湿度60%→材齢14日まで温度20℃水中(48時間)→その後温度40℃・湿度97.5%

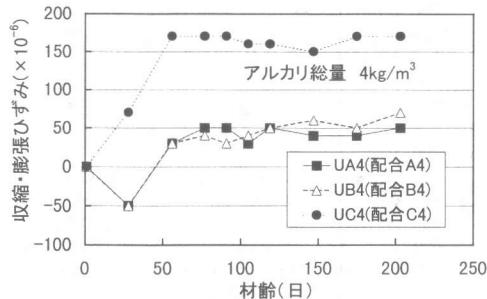


図-2 無筋コンクリート供試体の
収縮・膨張ひずみ

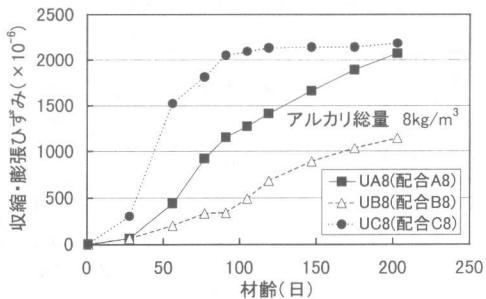


図-3 無筋コンクリート供試体の
収縮・膨張ひずみ

リート供試体の収縮・膨張ひずみを脱型時を原点として測定した。なお、養生条件aは脱型後に養生をしないで膨張が促進された場合であり、養生条件bは初期に良好な養生を行うことが以後の膨張を遅延させるのに有効であるかを調べるものである。また、養生条件c～fは、脱型後に乾燥を受けるような養生をした場合を想定し、初期の収縮がその後の膨張性状にどのような影響を与えるかを検討するものである。

3. 実験結果および考察

3. 1 アルカリ総量と鉄筋拘束の影響

(1) 無筋コンクリート供試体

図-2は、アルカリ総量が $4\text{kg}/\text{m}^3$ の無筋コンクリート供試体の収縮・膨張ひずみを示したものである。なお、図-2と図-3に示す供試体の種類の記号は、配合A4の場合に対してUA4のように記すものとする。 W/C が55%のUC4の場合、膨張ひずみは材齢56日まで単調に増大し、その後ほぼ一定になっている。また、 W/C が25%のUA4とUB4の場合には両者とも、一度収縮ひずみを生じてから膨張し、材齢56日以降はUC4に比べて小さいほぼ一定の膨張ひずみを示している。ただし、この図に示したいずれの場合も、ひび割れは認められなかった。

図-3には、アルカリ総量が $8\text{kg}/\text{m}^3$ の無筋コンクリート供試体の膨張ひずみを示す。 W/C が55%のUC8の場合は、材齢28日から急激に膨張し、材齢56日にひび割れが認められたが、

材齢91日以降は膨張ひずみの増大がほとんどみられない。これに対し、 W/C が25%のUA8の場合には、初期の膨張はUC8に比べて小さいが、材齢77日にひび割れも確認され、材齢203日の膨張ひずみはUC8の場合とほぼ同等の値となっている。また、 W/C が25%のUB8の場合には、材齢203日における膨張ひずみは他の2つの場合の50%程度であるが、材齢105日にひび割れが認められた。すなわち、表-1に示した化学法の結果も考慮すると、粗骨材Ⅲは高アルカリの条件下で膨張を引き起こす可能性のある骨材であると推察される³⁾。なお、UA8とUB8および図-2に示したUA4とUB4のひずみは脱型時を原点としたものであり、それまでに生じた自己収縮ひずみが無視されている。そして、UA4とUB4では材齢28日に若干の収縮ひずみが測定されたのに対して、UA8とUB8の場合に膨張ひずみが生じているのは、高アルカリの条件下でアルカリ骨材反応が促進されたため、早い段階で収縮ひずみが打ち消されたものと思われる。

(2) 鉄筋コンクリート供試体

図-4には、アルカリ総量が $4\text{kg}/\text{m}^3$ で拘束鉄筋比が0.687%の鉄筋コンクリート供試体について、材齢119日までの鉄筋のひずみを3箇所の平均値で示す。 W/C が55%の表-3に示した供試体RC42の場合は、一度若干の圧縮ひずみを生じてから材齢28日以降引張ひずみを生じている。しかし、ひび割れの発生までには至っていない。また、 W/C が25%のRA42とRB41

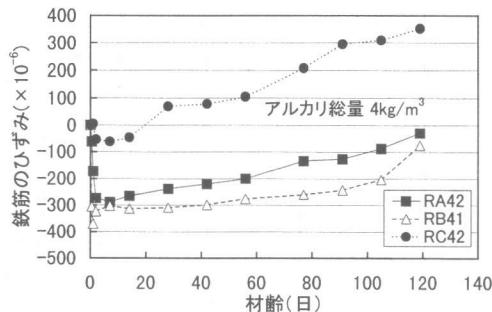


図-4 鉄筋コンクリート供試体の
鉄筋のひずみ

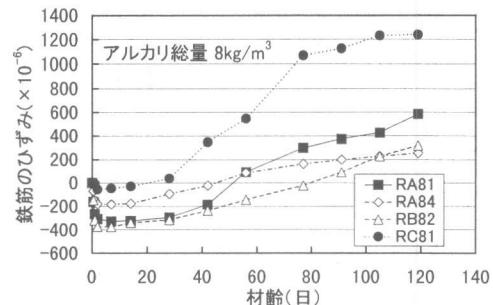


図-5 鉄筋コンクリート供試体の
鉄筋のひずみ

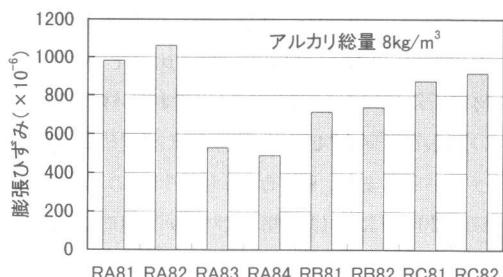


図-6 鉄筋コンクリート供試体表面の
ひずみ（材齢 203 日）

の場合には、自己収縮のために比較的長期に渡って大きな圧縮ひずみを生じており、材齢に伴って徐々に引張側に向かう傾向はみられるが、材齢 119 日では圧縮ひずみのままである。なお、図-4 と後の図-5において自己収縮による圧縮ひずみが鉄筋に生じているのは、供試体成形直後を原点としてひずみを測定していることによる。すなわち、図-3 に示した UA8 と UB8 の場合も、供試体成形直後を原点としてひずみを初期材齢において比較的短い間隔で測定すれば、自己収縮が顕在化すると考えられる。

図-5 には、アルカリ総量が $8 \text{ kg}/\text{m}^3$ の鉄筋コンクリート供試体について、材齢 119 日までの鉄筋のひずみを示す。 W/C が 55% で拘束鉄筋比が 0.687% の RC81 の場合は、材齢 56 日にひび割れが確認されたが、初期に一度若干の圧縮

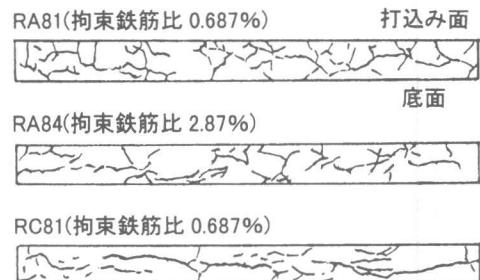
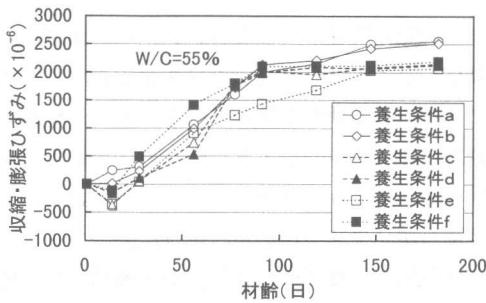


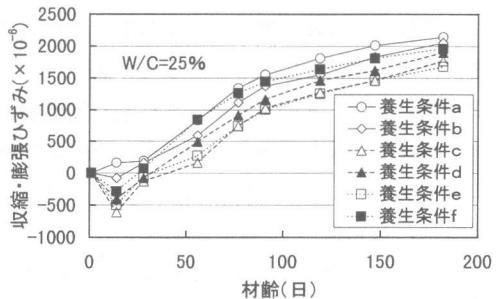
図-7 鉄筋コンクリート供試体の
ひび割れ発生状況

ひずみを生じてから引張に転じ、その後引張ひずみは材齢とともに増大する傾向を示している。

一方、 W/C が 25% で拘束鉄筋比が 0.687% の RA81 の場合には、材齢 77 日にひび割れが認められたが、初期に大きな圧縮ひずみを生じてから材齢 56 日以降引張に転じ、ひずみが材齢とともに増大している。また、 W/C が 25% の RA84 の場合は、RA81 の場合に比べて拘束鉄筋比が 2.87% と高いために圧縮ひずみの最大値と材齢 119 日の引張ひずみが小さくなっている。さらに、RB82 の場合は、粗骨材が RA81 の場合との相違点であるが、材齢 77 日まで圧縮ひずみを生じ、材齢 119 日の膨張ひずみも RA84 の場合と同様に小さい。そして、RA84 と RB82 のひび割れは、材齢 105 日の小さい引張ひずみの時に認められた。なお、図-6 には、供試体 8 体に



図一 8 初期養生条件の影響



図一 9 初期養生条件の影響

ついて、材齡 203 日の表面の膨張ひずみを 4 箇所の平均値で示す。表面の膨張ひずみは、1) RA81 と RA82, 2) RC81 と RC82, 3) RB81 と RB82, 4) RA83 と RA84 という供試体の種類の順となった。

図一 7 には、W/C が 25% の RA81, RA84 および W/C が 55% の RC81 の供試体側面のひび割れ発生状況を示す。W/C が 55% の RC81 の場合には、軸方向のひび割れが比較的多くみられるが、これは初期の収縮が僅かであり、鉄筋の拘束作用のほとんどを膨張する際に軸方向に受けながら、横方向にも膨張するためと考えられる。これに対し、W/C が 25% の RA81 と RA84 の場合には、自己収縮を鉄筋が拘束するために最初に軸方向引張応力が作用し、膨脹側に入つてから鉄筋の拘束による軸方向圧縮応力が作用することになる。そして、全体的に膨張するならば、拘束鉄筋比が高い場合には、軸方向にひび割れが発生する可能性が高くなると考えられる。しかし、自己乾燥が原因とされている自己収縮が生じる RA81 と RA84 の場合、促進養生中に外部から水分が浸透していく速度が遅く、アルカリ骨材反応の進行に伴つて表層部から膨張に転じていくために、両者とも亀甲状に比較的近いひび割れ発生状況になったものと思われる。

3. 2 初期養生条件の影響

図一 8 には、W/C が 55% の場合について、前記の表一 4 における 6 種類の養生条件 a ~ f が無筋コンクリート供試体の収縮・膨張ひずみに及ぼす影響を示す。養生条件 a と b の時はほぼ

同等の膨張ひずみとなっており、高アルカリの条件下では初期に水中養生を行つても、膨張を遅延させる効果は期待できないと考えられる。また、養生条件 c と d の時には初期に 20°C の気中乾燥によって大きな収縮ひずみが生じ、材齡 56 日まで膨張ひずみは養生条件 a や b の時に比べて小さい。この場合、養生条件 d の時には、2 日間の水中浸せきにより収縮の一部が回復してから養生条件 a と同じ促進養生によって膨張しているが、養生条件 c と d で促進養生中の性状に顕著な差が認められない。さらに、養生条件 e と f の時には、促進養生の前に 55°C の加熱乾燥によって大きな収縮ひずみを生じている。そして、養生条件 e の時には材齡 119 日までの膨張ひずみが比較的小さくなっているのに対し、養生条件 f の時には 2 日間の水中浸せきの影響によって材齡 56 日までの膨張ひずみが急激に増大している。

図一 9 には、W/C が 25% の場合について、6 種類の養生条件 a ~ f が無筋コンクリート供試体の収縮・膨張ひずみに及ぼす影響を示す。いずれの養生条件についても、W/C が 25% の場合の膨張ひずみは、材齡 182 日まで図一 8 に示した W/C が 55% の場合に比べて小さくなっている。

養生条件 a の時には材齡 14 日から膨張ひずみを生じ、最も大きい膨張を示しているのに対し、養生条件 b の時には材齡 14 日まで若干収縮した後に促進養生によって膨張している。また、養生条件 c と d の時には、自己収縮と 20°C

の気中乾燥による乾燥収縮を生じてから促進養生によって膨張している。そして、養生条件dの時には、2日間の水中浸せきにより促進養生前に収縮の一部が回復し、その後の膨張ひずみも養生条件cの時に比べて大きくなっている。さらに、初期に55℃の加熱乾燥を行った養生条件eとfをみると、養生条件eの時の膨張ひずみは養生条件cの時と同様に小さいが、養生条件fの時には2日間の水中浸せきの影響によって材齢56日まで急激に膨張し、その後の膨張ひずみも大きな値で推移している。これには、55℃の加熱乾燥によって約1.8%の質量減少を生じた後に、脱型時の値程度まで供試体質量が回復したのが養生条件eの時に材齢56日であったのに対し、養生条件fの時には2日間の水中浸せきのみによって急激に回復したことが関係していると推察される。

供試体のひび割れは、W/Cが25%で養生条件cとeの時には材齢77日に、それ以外は材齢56日に認められた。このW/Cが25%で養生条件cとeの時には、図-9に示したように、膨張ひずみも材齢182日まで他の条件に比べて小さくなっているが、自己収縮と乾燥収縮によって促進養生に入る前に非常に大きな収縮ひずみが生じている。そして、促進養生中に外部から水分が浸透していく際の浸透速度も遅いために、表層部の湿潤膨張ひずみが内部に拘束されて表層部に圧縮応力が生じることになるが、この圧縮応力は水分の拡散に伴い減少していくと考えられる⁴⁾。したがって、初期の収縮の影響で膨張ひずみは他の場合に比べて小さくなるが、外部からの水分の浸透によって内部拘束の減少とアルカリ骨材反応によるひび割れの発生や進展・拡大に伴って膨張ひずみが増大していると思われる。

4.まとめ

本研究の範囲で得られた主な結果は、以下のようになる。

(1) アルカリ骨材反応による膨張を生じるアル

カリ総量の場合、高強度コンクリート部材中の鉄筋のひずみは、自己収縮が無視できないために初期のある期間圧縮ひずみとなるが、材齢の経過に伴って引張ひずみに転じる。そして、鉄筋の引張ひずみは小さい時でも、部材表面にひび割れが発生することがわかった。

(2) 材齢14日までの養生条件を6種類として無筋の高強度コンクリート部材を材齢182日まで促進膨張させた結果、いずれの養生条件についても、膨張ひずみは普通コンクリート部材に比べて小さくなる傾向がみられ、特に初期に乾燥させた時に小さくなった。しかし、非常に乾燥するような悪い養生をした後に多量の水を与えると、高強度コンクリート部材でも、その後の膨張が急速に進行する危険性のあることも明らかとなった。

謝辞：本研究にご協力を頂いた（株）八洋コンサルタント高橋幸一氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 澤田由美子、權 寧進、浜 幸雄、田畠雅幸、鎌田英治：高強度コンクリートのアルカリ骨材反応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-Desication, 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) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート法によるアルカリ骨材反応判定試験方法研究委員会報告書、1991年6月
- 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