

[1142] アルカリ骨材反応に及ぼす鉄筋拘束の影響に関する研究

正会員 西林新蔵（鳥取大学工学部）

正会員 ○矢村 潔（鳥取大学工学部）

定清 毅（機動建設（株））

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物にアルカリ骨材反応が起った場合、コンクリートの膨張は鉄筋による拘束の影響を受け、劣化の進行過程は相当複雑なものになることが考えられる。現在までの研究を通じて、いわゆる促進膨張させた鉄筋コンクリート部材の静的耐力に関してはそれほど問題がないことが明らかになってきた¹⁾。しかし、付着特性を含めて、コンクリートの強度発現と反応による膨張に起因する劣化の進行の時間的相関関係、コンクリートのクリープさらには反応生成物の乾燥、脱水に伴う鉄筋に囲まれた内部のコンクリートの応力緩和さらにはゆるみ等の影響に関しては、従来からの促進劣化させた供試体による強度試験、あるいは、実構造物の被害調査からは、かならずしも適切なデータが得られないことが推測され、この分野での資料の蓄積はきわめて不十分である。このような観点から、本研究は反応性骨材を用いた鉄筋コンクリート部材の小型モデルについて、拘束鉄筋量、かぶり厚等がコンクリートあるいは部材としての劣化の進行に及ぼす影響について主として実験的に明らかにし、今後、しばらくは発生が続くと予想される鉄筋コンクリート部材のアルカリ骨材反応による損傷に対処していくための基礎資料を得ることを目的とする。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本実験で使用した反応性粗骨材は、鳥取県産斜方輝石安山岩（比重2.64，M.S.=20mm）で、化学法によるアルカリ濃度減少量は $R_c=301\text{m mol/l}$ 、溶解シリカ量は $Sc=67.5\text{m mol/l}$ （有害領域）である。また、この骨材はコンクリート実構造物に使用され損傷の生じたことが報告されている。細骨材としては、非反応性の河口砂と丘砂との混合砂（比重2.58、F.M.2.82）を使用した。使用セメントは普通ポルトランドセメントで、アルカリ含有量はセメント重量比で Na_2O 当量で0.47%である。これに練り混ぜ水とともに NaOH を加えて、総アルカリ量が Na_2O 当量2%となるように調整した。鉄筋としては、異形棒鋼（SD35）で、 $\phi 10$ ， $\phi 13\text{mm}$ のものを使用した。

表 - 1 実験計画

供試体寸法 (cm)	40×40×40
鉄筋比 (%)	0 (無筋コンクリート) 0.36 (A), 0.54 (B), 0.95 (C)
かぶり (mm)	25, 55, 75
保存環境	40℃, R.H.95%以上 屋外暴露
測定項目	供試体中心ひずみ、鉄筋ひずみ 供試体表面ひずみ 超音波伝播速度、ひびわれ観察

表 - 2 コンクリートの示方配合

2. 2 実験計画

本実験では、40×40×40cmの鉄筋コンクリート立方供試体について各種要因の影響を調べた。

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量 (%)	W/C	s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
20	12~15	2	0.45	40	203	450	660	1003

本実験における主たる要因は拘束鉄筋量、かぶり厚および供試体の保存環境である。それぞれの要因における水準および測定項目を表-1に示す。また、コンクリートの示方配合を表-2に示す。2.3 実験方法

本実験におけるAシリーズは $\phi 10\text{mm}$ の異形棒鋼を鉛直方向8本、水平帯鉄筋4段をそれぞれのかぶりに合わせて等間隔で配置している。Bシリーズでは、 $\phi 10\text{mm}$ の異形棒鋼を鉛直方向12本、水平帯鉄筋6段を、Cシリーズでは、 $\phi 13\text{mm}$ の異形棒鋼を鉛直方向12本、水平帯鉄筋6段を、それぞれ かぶり厚さを55mmにとって等間隔で配置した。すなわち、供試体を鉛直面および水平面で切断したときに鉄筋断面積が同じになるようにした。供試体の配筋図の一例を図-1に示す。供試体は、コンクリート打設後48時間で脱型し、1週間実験室内に保存し、初期値を測定した後 40°C 、R.H.95%以上の保存槽中および屋外暴露として実験室屋上へ移動させた。なお、屋外暴露試験の開始は昭和62年6月中旬であった。供試体中心のひずみは、埋込み型ひずみ計によって（鉛直、水平の2方向）、鉄筋ひずみは、鉄筋に貼付し防水処理を施した電気抵抗線ひずみゲージによって、また、コンクリートの表面ひずみは、コンクリートの表面に貼りつけたプラグ間の距離をフーゲンベルガー型ひずみ計（検長10インチ）によって計る方法で行った。各ひずみの測定は、3ヶ月目までは0.5ヶ月ごとに行い、以後、1ヶ月ごとに行った。さらに、6ヶ月目には、超音波伝播速度の測定、ならびにひびわれの観察も同時に行った。

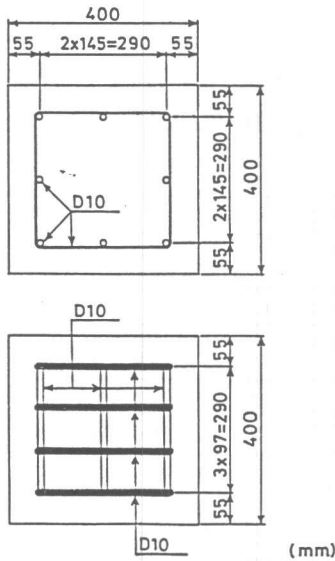


図-1 供試体の配筋の一例

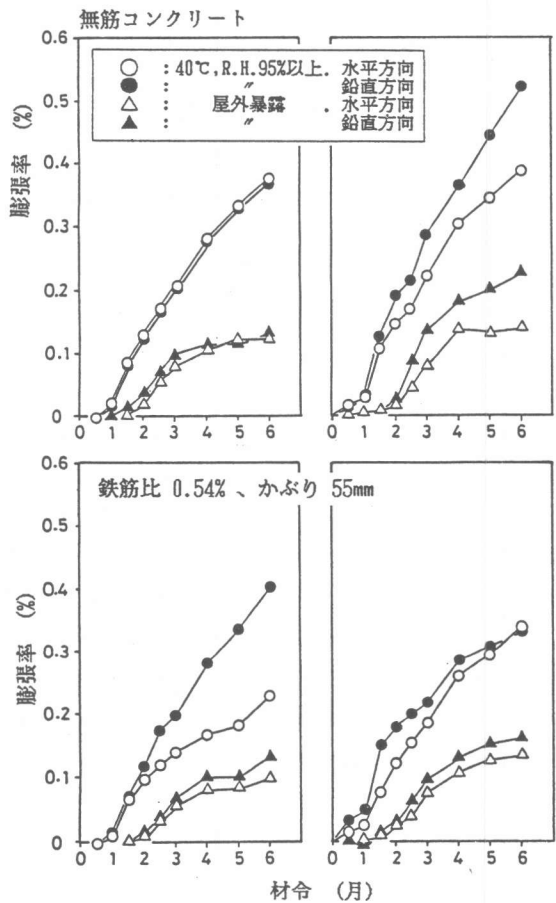


図-2 膨張の経時変化

3. 実験結果とその考察

3. 1 膨張の概要

本実験では、鉄筋ひずみ、供試体表面のひずみは、鉛直、水平それぞれ5～10箇所程度で測定している。それらの分布は、ひびわれの影響、さらに電気抵抗線ひずみ計の能力の問題等のためかなりのばらつきを示しているが、全般的には、鉛直ひずみは、隅付近より面中央の方が大きく、水平ひずみは、上面（打設面）に近いほど大きくなる傾向が見られた。また、屋外暴露供試体では、面の方向によって膨張量にかなりの変動が認められ、日照が多く温度が高くなる南、西に向いた面での膨張量が大きかった。以後ひずみの値は、それぞれの平均値で示す。また、図-2に無筋コンクリートと代表的な鉄筋コンクリート供試体のひずみの経時変化を示す。無筋コンクリートでは、40℃、R.H.95%以上の場合、0.5ヶ月から膨張が始まり、現在に至るまで急激な膨張が続いている。中心部の膨張ひずみより供試体表面の膨張ひずみの方が大きく特に表面の鉛直ひずみは大きい。屋外暴露の供試体では、1.5ヶ月あたりから膨張が始まり、以後かなり急激に膨張するが4ヶ月あたりから膨張割合が小さくなる。これは、気温が低くなり、反応が一時的に弱まったためと考えられる。なお、本実験では測定した膨張ひずみの値に対して温度膨張の補正は行っていない。鉄筋コンクリート供試体では、膨張ひずみは、無筋コンクリートより小さくなるが、中心部の鉛直ひずみは、ほとんど変らない。これは、この供試体では、中心部が鉛直方向の鉄筋から相当離れているためと考えられる。また、本実験では、大部分の供試体について40℃、R.H.95%以上の場合で材令1～2ヶ月、屋外暴露の場合で3ヶ月程度でコンクリート表面にひびわれが発生した。

なお、本実験では、実構造物よりかなり小さいモデル供試体を採用している。従って、これよりも断面寸法がはるかに大きい実構造物の場合には、単にコンクリートと鉄筋の力学的複合機構が変化するのみならず、中心部付近は外部からの水分の影響や表面の温度変化の影響等を受にくくなるため膨張自体の挙動が異なり、その全体的な挙動については本実験の結果とはかなり異なることが推測される。

3. 2 かぶり厚の影響および

供試体内のひずみ分布

図-3にかぶり厚の異なる供試体について、供試体中心部、鉄筋、供試体表面位置でのひずみを示す。まず、40℃、R.H.95%以上の場合、水平方向のひずみは、供試体中心部が最小で、中心からの距離に対して、比較的線形に近い関係がみられるが、鉛直方向ひずみは鉄筋位

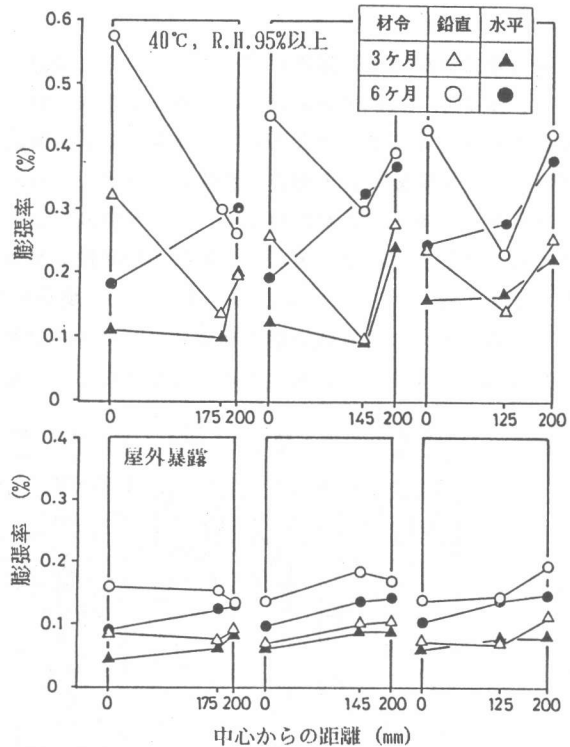


図-3 供試体内のひずみ分布

置での膨張ひずみが小さくなり、ひずみ分布が不連続となっている。これは供試体上、下面に鉄筋が配置されていないためこの面内で鉛直方向の膨張が拘束されないためと考えられる。次に、供試体表面ひずみは、コンクリートのかぶり厚が大きいほど大きくなる傾向がある。一方、試体中心部および鉄筋のひずみは、同じかむしろ逆の傾向がある。このことは、鉄筋で囲まれたコンクリートの体積が、かぶり厚が大きいほど小さくなることに起因すると同時に、ひびわれ損傷が主としてかぶり部コンクリートに集中していることを示唆するものである。屋外暴露の供試体では、膨張量がまだそれほど大きくなく、さらに、供試体内部での膨張ひずみの分布の変動が小さく、はっきりとしないが、ほぼ40℃、R.H.95%以上の場合と同様の傾向が認められる。なお、本実験では、材令6ヶ月の時点で、40℃、R.H.95%以上の場合の供試体では、すでに鉄筋はすべて降伏しており、一方、屋外暴露では、まだ降伏点には達していないと推察される。

3.3 鉄筋量の影響

膨張量と鉄筋比との関係を図-4に示す。この図から、40℃、R.H.95%以上の場合、中心部の鉛直ひずみは、鉄筋量に関係なくほぼ一定である。これは、先に述べたように供試体中心では鉛直鉄筋からの距離があり、上下面に鉄筋が配置されておらず鉄筋による拘束の影響を受けにくいため、この膨張量は、無筋コンクリートの値とほぼ同じである。これに対して、中心部の水平ひずみは、鉄筋量が多くなるにつれて急激に小さくなっており、鉄筋拘束による膨張の抑制機能が顕著である。一方、供試体表面の膨張ひずみは、鉛直、水平方向とも無筋コンクリートの場合を除いて、鉄筋の量の影響をあまり受けていない。このように、供試体表面の挙動は、かぶり部の挙動を表わしているにすぎず、鉄筋で囲まれた内部のコンクリートの状況とはかなり異なっている場合がある。屋外暴露の供試体については

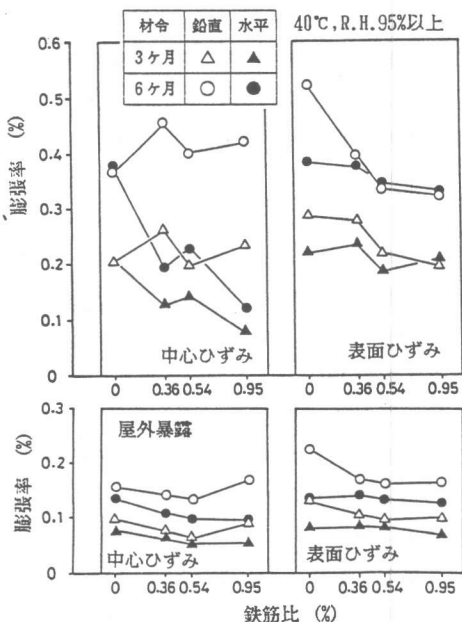


図-4 鉄筋量の影響

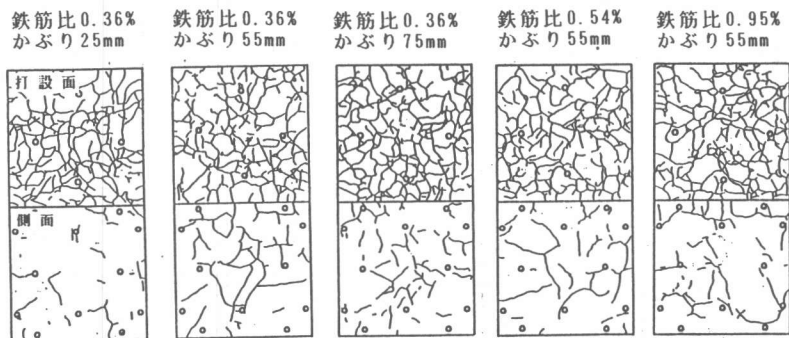


図-5 ひびわれ状況

6ヶ月

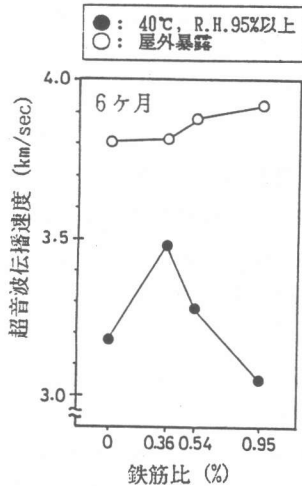


図-6 鉄筋比と超音波伝播速度の関係

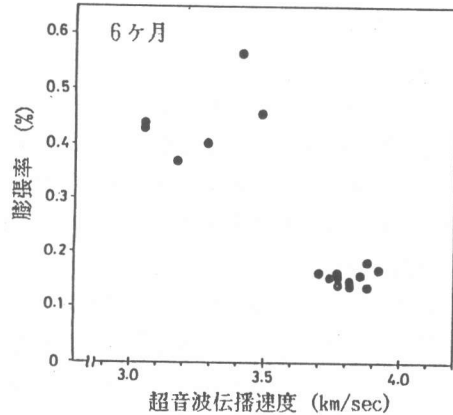


図-7 膨張率と超音波伝播速度の関係

膨張率が相対的に小さく、鉄筋量の相違による膨張ひずみ量の差も非常に小さいが、40°C、R.H. 95%以上の場合とほぼ同様の傾向がみられる。

3.4 ひびわれ状況

材令6ヶ月における供試体表面のひびわれの分布の概略を40°C、R.H. 95%以上の場合について図-5に示す。図から明らかなように、いずれの供試体も打設面には非常に細かいひびわれが多数発生している。側面のひびわれに関しては、コンクリートのかぶり厚が大きくなるにつれて、ひびわれが多くなり、膨張率と相関関係にある。また、鉄筋量によるひびわれ発生状況の特性に関しては、はっきりとした傾向は認められない。なお、屋外暴露供試体にもすでにひびわれが相当発生しており、ひびわれ本数およびパターンは40°C、R.H. 95%以上の場合と比較して大差ないが、現在のところ、ひびわれ幅は非常に小さい。また、屋外暴露供試体の底面にはひびわれはほとんど発生していない。

3.5 超音波伝播速度

材令6ヶ月における各供試体の超音波伝播速度を鉄筋比との関係で図-6に示す。超音波伝播速度は供試体上、下面の中心付近で鉛直方向に測定したものである。40°C、R.H. 95%以上の場合には全般的に超音波伝播速度が遅くなっており、内部のコンクリートの劣化が相当に進んでいることが明らかであるが、鉄筋比の違いによる影響に関しては、変動が大きくはっきりしない。とくに鉄筋比が大きい供試体で超音波伝播速度がかなり小さくなっており、これについてはさらに検討を要する。屋外暴露の供試体については、全体的には40°C、R.H. 95%以上の供試体と比較して、超音波伝播速度は速いが、鉄筋比が小さくなるにつれて、この値がわずかながら小さくなっており、すでに一部の供試体では、内部のコンクリートの劣化が進行しはじめていることがうかがえる。

図-7に材令6ヶ月における各供試体の超音波伝播速度と中心部の膨張ひずみ（鉛直ひずみ）

との相関関係を示す。図中の左上のグループが40℃、R.H.95%以上の供試体で測定したもので、右下のグループが屋外暴露の供試体についての値である。両グループ間では、超音波伝播速度と中心部の膨張ひずみの間には相関が見られるが、それぞれの保存環境グループ内での細かい相関については明確でない。

4. まとめ

本研究は、アルカリ骨材反応による鉄筋コンクリート構造物の劣化機構を明らかにしていくために、小型モデル供試体による実験を行い、その結果について検討を加えたものである。本実験では対象とした要因も限られており、また、供試体数も少なく、供試体の保存期間が短かいために、一般的な断定は困難であるが、本実験の範囲内で現在までに明らかになったことを以下に列挙し、本研究の結論とする。

(1) 供試体内部におけるアルカリ骨材反応による膨張ひずみの分布は、面内拘束を受けている場合には基本的には中心付近が最小となり、表面にちかいほど大きくなる。

(2) アルカリ骨材反応によるコンクリートの表面膨張ひずみは、かぶり厚が大きくなるほど大きくなる。しかし、この値は表面ひびわれに大きく影響され、鉄筋で囲まれた内部コンクリートの状況を必ずしも表わしているものではない。

(3) 屋外暴露実験のようなゆるやかな実験では、鉄筋コンクリート供試体内の膨張ひずみの分布は比較的均一となる。

(4) 鉄筋で囲まれた内部コンクリートの膨張ひずみは、鉄筋量が多くなるほど小さくなる。しかし、供試体表面のひずみは、鉄筋の量にはそれほど影響されない。

(5) 鉄筋コンクリート供試体のひびわれは打設面で最も多い。また、ひびわれ本数はかぶり厚が大きいほど多く、鉄筋量にはあまり関係しない。屋外暴露供試体についても材令6ヶ月程度で40℃、R.H.95%以上の供試体とほぼ同様のひびわれ模様を形成する。

(6) 超音波伝播速度と膨張ひずみの間には総体的には相関があるが、細かい部分に関しては明確でない。

本研究を通して、鉄筋コンクリート構造にアルカリ骨材反応が発生した場合、表面部の挙動はかぶり部のコンクリートに支配され、内部の状態を反映しない可能性があることが明らかとなった。今後長期の測定を継続し、より直接的に内部の挙動を把握していくことが重要である。

最後に本実験を遂行するにあたって多大の協力を賜った鳥取大学工学部土木工学科材料研究室の諸氏に感謝の意を表する次第である。また、本研究は文部省科学研究費補助金によって行ったものの一部である。

参 考 文 献

- 1) 日本材料学会：アルカリ骨材反応に関するシンポジウム，昭和60年 7月，pp113～171