

## [43] アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の影響

本田裕夫（奥村組技術研究所）  
 正会員 ○白石文雄（奥村組技術研究所）  
 正会員 植田浩吉（奥村組技術研究所）  
 林 芳尚（奥村組技術研究所）

### 1. まえがき

関西地方を中心として、昭和40年代から50年代にかけて施工されたコンクリート構造物にアルカリ骨材反応の事例が多く発生している。最近では海砂の塩分規制、有害骨材の排除などによりアルカリ骨材反応の促進要因は排除されつつあるといわれるが、アルカリ骨材反応が発生しているコンクリート構造物に関しては、その性状や劣化防止などを含め今後の研究がまたれるところである。

アルカリ骨材反応の事例は無筋コンクリートや鉄筋比が小さいマス構造物で多いといわれている。また、ひびわれの発生形態も内部鉄筋の配置と大いに関係があるといわれる。本報告は、アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の効果を検討するために行った拘束膨張試験およびアルカリ骨材反応を生じているコンクリートの強度特性試験の結果について報告するものである。

表-1 使用材料

### 2. 実験の概要

#### 2.1 使用材料

実験に用いたコンクリート材料を表-1に示す。粗骨材は瀬戸内海地方産の輝石安山岩と赤穂産の流紋岩を1:1で混入して用いた。細骨材としては砂を用い等価アルカリ量に影響を与えないように事前に水洗いした。

アルカリ含有量の調整はNaClを添加して行った。

#### 2.2 反応性骨材の特性

反応性骨材として用いた輝石安山岩の骨材試験結果は以下のとおりである。

X線粉末回折の結果は図-1のとおりであり、クリストバライトおよび長石が同定されている。化学法の結果は図-2のとおりであり、潜在的に有害の範囲に入っている。

NaClを添加し、セメントに対するアルカリ量(Na<sub>2</sub>O等量)を1.2%に調整したモルタルバー試験の結果を表-2に示す。材令3ヶ月での膨張量は910×10<sup>-6</sup>である。

#### 2.3 供試体の作成

拘束膨張試験用の鉄筋拘束供試体は、10cm×10cm×38.5cmのコンクリートバーとした。Aシリーズ供試体は鋼棒を直接コンクリートに埋込み、Bシリーズ供試体は鋼棒を紙パイプの孔中を通して付着をなくした。Bシリーズ供試体については、はじめ無拘束とし、材令40日の時点で鋼棒のひずみが200×10<sup>-6</sup>となるように拘束した。図-3にAシリーズ供試体の形状を示す。

鋼棒の径は9mm、13mm、19mm、23mmの4段階とし、供試体は各条件につき3本とした。

供試体の両端は拘束端板を介してボルトで締着した。コンクリートの縦割れ防止のためにφ6mmのスターラップを約5cm間隔に入れた。

| 材 料       | 寸 法 そ の 他                                 |
|-----------|---|
| 反応性粗骨材    | G max 20mm                                |
| 非反応性粗骨材   | G max 20mm 赤穂産碎石                          |
| 細骨材       | G max 2.5mm 瀬戸内海産                         |
| セメント      | 普通ポルトランドセメント<br>等価Na <sub>2</sub> O 0.62% |
| 混和剤 AE減水剤 | オキシカルボン酸塩<br>無塩化型                         |
| NaCl      | 食 塩                                       |

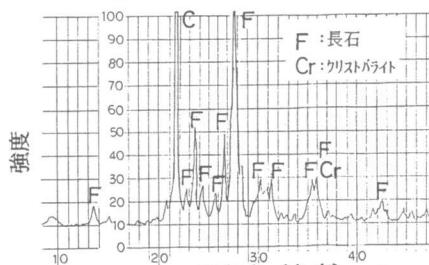


図-1 X線粉末回折

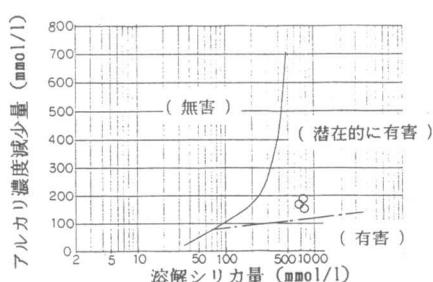


図-2 化学法試験結果

コンクリートの配合を表-3に示す。セメントの等価アルカリ量は0.62%であるので、混練り時にNaClを添加して、等価アルカリ量が2.0%となるようにした。

拘束膨張試験用の供試体は、コンクリート打設後24時間で脱型し、さらに1日20°C空中養生した後に膨張量測定用のゲージポインツを設置し、初期値を測定したあと20°C水中および40°C湿空(95~100%RH)状態で所定の材令まで養生した。強度試験用の円柱供試体は、コンクリート打設後24時間で脱型し、ただちに20°C水中および40°C湿空(95~100%RH)状態で所定の材令まで養生した。

#### 2.4 測定の方法

膨張量は、コンタクトストレンゲージ(標点間きより30cm)により測定した。

圧縮試験時には供試体表面にワイヤーストレングージを貼付し、縦ひずみ、横ひずみをもとめ、それから弾性係数、ポアソン比、体積ひずみを求めた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 コンクリートの強度特性

##### a. 圧縮強度

圧縮強度と材令の関係を図-4に示す。材令1.0ヶ月では標準(20°C水中)養生供試体と促進(40°C湿空)養生供試体でほとんど同じ値である。促進養生供試体ではそれ以降減少している。一方標準養生供試体では材令4.0ヶ月まで、強度は増進しておりそれ以降に低下している。

##### b. 弾性係数

弾性係数と材令の関係を図-5に示す。材令1.0ヶ月での促進養生供試体の弾性係数は $2.44 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であり、標準養生供試体の約70%である。材令1.0ヶ月以降標準養生では弾性係数はわずかに増大しているが、促進養生ではあきらかに減少しており、材令4.0ヶ月では $2.03 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ と標準養生供試体の58%となっている。

しかし、材令6.5ヶ月では、標準養生供試体の弾性係数の低下が著しく、両者とも約 $2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ となっている。

##### c. 応力-ひずみ曲線

材令4.0ヶ月の圧縮試験時の応力-ひずみ曲線の例を図-6に示す。標準養生供試体では、縦ひずみ、横ひずみ、体積ひずみ(縦ひずみ、横ひずみより算出した)ともほぼ直線的に変化しているが、促進養生供試体では縦ひずみはほぼ直線的であるが高応力になるに従い、横ひずみは急増し、体積ひずみは圧縮から反転して膨張に変わっている。

上記の試験結果を応力とポアソン比の関係で表わすと図-7のとおりであり、標準養生供試体とアルカリ骨材反応が進行している促進養生供試体ではその変化の状態に明確な差がでている。

表-2 モルタルバー試験結果

| モルタルバーの材令 |       |       |       |     |     | (単位: %) |
|-----------|-------|-------|-------|-----|-----|---------|
| 14日       | 1ヶ月   | 2ヶ月   | 3ヶ月   | 4ヶ月 | 6ヶ月 |         |
| 0.013     | 0.035 | 0.070 | 0.091 | **  | **  |         |

註 1. 各値は試験体4個の平均値を示した。

2. 水セメント比 ..... 5.8%

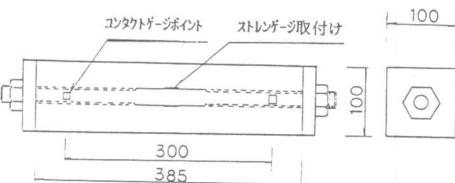


図-3 膨張量測定用供試体

表-3 コンクリートの配合

| 粗骨材の<br>最大寸法<br>(mm) | 水セメント<br>比 W/C<br>(%) | スパンの<br>範囲<br>(cm) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |          |       | 粗骨材G<br>20 mm<br>kg | AE液 NaCl<br>水剤<br>(kg) |
|----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|-----------|----------|-------|---------------------|------------------------|
|                      |                       |                    | 水<br>W                   | セメント<br>C | 細骨材<br>S | 5 mm  |                     |                        |
|                      |                       |                    |                          |           |          | 20 mm |                     |                        |
| 20                   | 48                    | 12±2               | 179                      | 376       | 752      | 9.96  | 3.779               | 7.9                    |

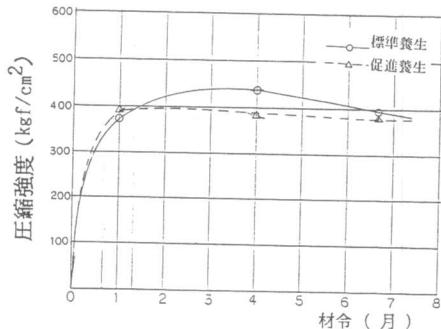


図-4 圧縮強度と材令の関係

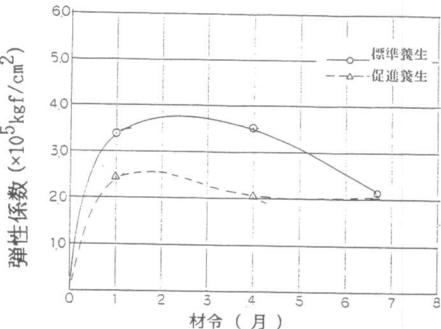


図-5 弾性係数と材令の関係

標準養生供試体では応力の増加に伴うポアソン比の変化はあまり大きくなく、ポアソン比は0.20～0.26である。一方促進養生供試体では圧縮応力の小さい範囲では、標準養生供試体よりも小さく0.15～0.18程度であるが、応力の増加とともに急激に増大しており圧縮応力が $300\text{kgf/cm}^2$ ではポアソン比は0.3以上となっている。

### 3.2 拘束膨張試験

#### a. 膨張量

鉄筋拘束供試体の膨張量の材令による変動を図-8、図-9に示す。鉄筋拘束供試体の膨張量は無拘束供試体と比較すると20～45%に抑制されている。

鉄筋埋込み供試体(Aシリーズ)と付着をなくした供試体(Bシリーズ)で膨張量に差はない。膨張量と拘束鉄筋比の関係を図-10に示す。

#### b. コンクリート応力および拘束緩和率

拘束鉄筋のひずみをもとに算出したコンクリートの応力と拘束鉄筋比の関係を図-10に示す。今回の実験での最大膨張圧力は約 $60\text{kgf/cm}^2$ であった。

無拘束供試体の膨張ひずみを基準にして各供試体の拘束ひずみを求める。さらにこの拘束ひずみと上記のコンクリート応力を比較することにより拘束緩和率(k)を求める。

体積変形を拘束されるコンクリートにおいて、拘束ひずみとコンクリート応力の関係は(1)式で表わされる。

$$\sigma = k \cdot E c \cdot \epsilon_z = \frac{1}{1 + \varphi} \cdot E c \cdot \epsilon_z \quad (1)$$

ここに、 $\sigma$ ：コンクリートの応力

$k$ ：拘束緩和率

$E c$ ：コンクリートの弾性係数

$\epsilon_z$ ：拘束ひずみ

$\varphi$ ：クリープ係数

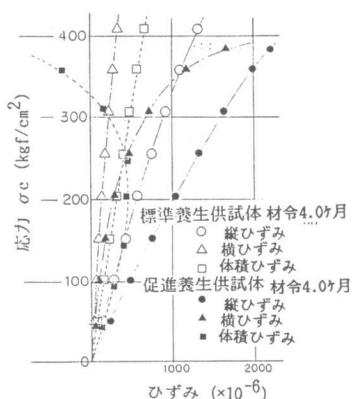


図-6 応力～ひずみ関係

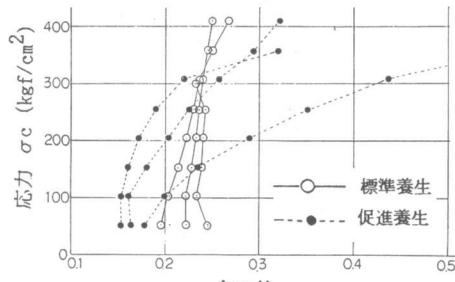


図-7 応力～ポアソン比の関係

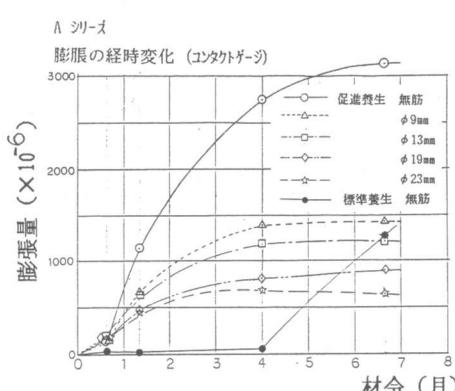


図-8 膨張量と材令の関係(Aシリーズ)

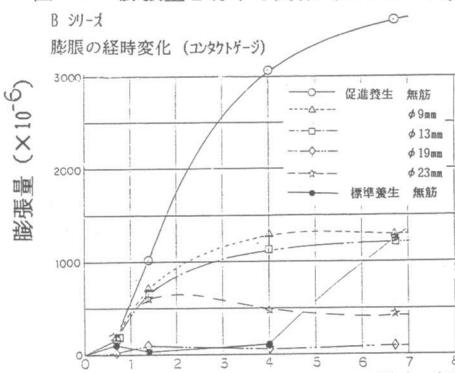


図-9 膨張量と材令の関係(Bシリーズ)

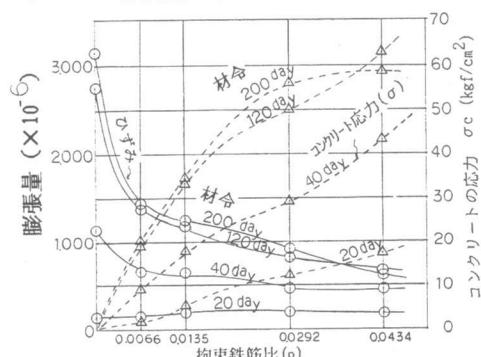


図-10 拘束鉄筋比と膨張量およびコンクリート応力の関係

(1)式により計算した各供試体の拘束緩和率およびクリープ係数の値を表-4に示す。クリープ係数は通常1.0~4.0程度といわれ、コンクリート構造物の設計には2.0~3.0の値が用いられるが、今回の実験結果から算定した値は5.7~13.3と通常の値と比べると相当大きな値となっている。

これは、アルカリ骨材反応による拘束膨張圧が、同じ体積変形により発生する温度応力や乾燥収縮による応力と、その発生の機構が異なるためではないかと考えられる。

### 3.3 ひびわれの形状

材令4ヶ月の拘束膨張試験供試体のひびわれの形状を写真-1に示す。標準養生供試体ではひびわれはほとんど見られない。

促進養生供試体で無拘束のものは、亀甲状のひびわれが、また鉄筋拘束供試体では拘束鉄筋の方向に卓越したひびわれが発生している。

材令6.5ヶ月では、標準養生供試体にもひびわれが発生した。

圧縮強度、弾性係数の経時変化ともあわせて考えると、標準養生供試体では材令4.0ヶ月以降にアルカリ骨材反応が始まっていると推定される。

### 4.まとめ

アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の影響を知るためにコンクリート供試体の拘束膨張試験を行った。また、あわせて弾性係数、ポアソン比などの強度特性試験を行った。実験の結果のまとめを以下に示す。

#### 〈強度特性実験結果〉

- i . 促進養生供試体では、圧縮強度、弾性係数とも材令1.0ヶ月以降低下する傾向にあるが、標準養生供試体では材令4.0ヶ月まで圧縮強度、弾性係数とも増加しており、4ヶ月以降で低下する傾向にある。
- ii . 材令4.0ヶ月における圧縮強度試験時の応力増加に伴なうポアソン比の変化は、アルカリ骨材反応が進んでいない標準養生供試体では変化があまり大きくなく、0.20~0.26程度であるが、アルカリ骨材反応が進んでいる促進養生供試体では低応力下でポアソン比が標準養生供試体より小さく、応力の増加とともに増加し0.30以上になっている。

#### 〈拘束膨張試験結果〉

- i . 鉄筋拘束供試体の膨張量は、無拘束供試体にくらべて20~45%となっている。
- ii . 今回の実験でのアルカリ骨材反応による最大膨張圧は60kgf/cm<sup>2</sup>であった。
- iii . 拘束膨張量の測定結果から算定したクリープ係数は、5.7~13.3と大きく通常設計で用いられている値と比べると相当大きい値となる。

#### [参考文献]

- (1) 小林和夫：RC梁部材の静的保有耐荷特性（その1），アルカリ骨材反応に関するシンポジウムテキスト，1985年7月
- (2) 明石外世樹：アルカリシリカ反応によるコンクリートの物性変化について，土木学会年次学術講演会概要集第5部 Vol.39, 1984年

表-4 クリープ係数の試算

| 供試体<br>No | 拘束鉄筋<br>比(p) | 膨張歪<br>(ε <sub>1</sub> )<br>(×10 <sup>-6</sup> ) | 拘束歪<br>(ε <sub>2</sub> )<br>(×10 <sup>-6</sup> ) | E <sub>c</sub> ・ε <sub>2</sub><br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | コンクリート<br>応力(σ)<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 拘束緩和<br>率(k) | クリープ<br>係数(ψ) |
|-----------|--------------|--|--|--|---|--------------|---------------|
| A1        |              | 2748   |  |  |   |              |               |
| A2        | 0.0066       | 1391   | 1357   | 275  | 19.4                                      | 0.07         | 13.3          |
| A3        | 0.0135       | 1179   | 1569   | 319  | 33.4                                      | 0.10         | 9.0           |
| A4        | 0.0292       | 815  | 1933   | 392  | 50.0                                      | 0.13         | 6.7           |
| A5        | 0.0434       | 688  | 2060   | 418  | 62.7                                      | 0.15         | 5.7           |

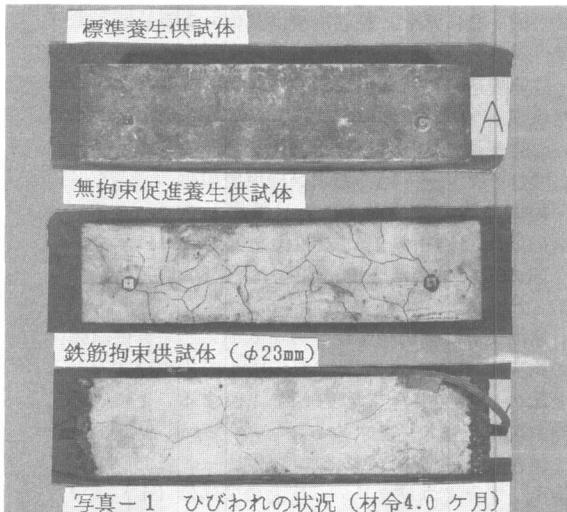


写真-1 ひびわれの状況 (材令4.0ヶ月)