

## [1028] 蒸気養生がアルカリ硫酸塩を添加したセメントを用いた コンクリートの諸性状に及ぼす影響

正会員 ○小倉盛衛 (関東学院大学工学部)

正会員 小林一輔 (東京大学生産技術研究所)

### 1. まえがき

アルカリの多いセメントを用いた場合には、異常凝結や強度低下などコンクリートの諸性状に種々の異常現象が発生する可能性があることについてはJawedおよびSkalny<sup>1)</sup>、OdlarおよびWonnemann<sup>2)</sup>、Spellman<sup>3)</sup> など多くの研究者によって指摘されているが、著者らもまたこれをこれまでの研究<sup>4)</sup>の中で確認している。

本研究は、工場製品を用いた既存のコンクリート構造物および二次製品を念頭においた劣化診断などに対する基礎資料を得ることを目的として、蒸気養生およびコンクリートの暴露がこのようなセメントを用いたコンクリートの諸性状にどのような影響を及ぼすかを明らかにするために行ったものである。コンクリート構造物が、竣工後数年でひびわれを生ずる例があることなどが近年話題となり、その原因はアルカリ骨材反応による劣化であろうとされているが、その中には原因不明のものも多数含まれている。これらに関して、筆者らはセメントの高アルカリ化に伴う品質低下そのものも無視できないのではないかと考えている。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および配合

アルカリ分の多いセメントを得る方法として、比較的低アルカリのポルトランドセメント ( $R_2O=0.53\%$ ) にアルカリ硫酸塩を添加する方法を採用した。このような手法については既にJawedおよびSkalnyやJohansen<sup>5)</sup> らが試みており、現実に工場で生産されたセメントの使用にともなって発生した種々の異常現象をよく再現することが指摘されている。添加したアルカリは試薬特級の硫酸塩カリウム (以下 $K_2SO_4$ ) で、添加量は 0、1、3、5および10%の5水準である。従って、使用したセメントの総アルカリ量は、 $Na_2O$ 当量換算で 0.53%から4.13%の範囲にある。

細骨材は大井川産の川砂で、比重2.63、吸水率1.01%、粗粒率3.04のものである。粗骨材は奥多摩産の硬質砂岩の碎石であり、最大骨材寸法20mm、比重2.70、吸水率0.63%のものである。これらの骨材については、偏光顕微鏡の観察によって非反応性であることを確認した。

コンクリートの配合は水セメント比が40、55および70%の3種でアルカリを添加していないベースセメントを用いたコンクリートのスランプが $12\pm 1\text{cm}$ となるよう配合を定めた。

#### 2.2 供試体の製作、養生方法および測定方法

圧縮強度用供試体 ( $\Phi 10\times 20\text{cm}$ ) および長さ変化測定用供試体 ( $10\times 10\times 40\text{cm}$ ) の製作はそれぞれ JIS A 1108-76 および JIS A 1129-75 に準じて行った。

供試体の養生方法は蒸気養生の外、屋外の暴露による方法 (昭和61年8月上旬から同9月初旬までの約40日間、鉄筋コンクリート造建物屋上に放置) などである。また、標準養生を行った供試体の1部については、材令1年目に加熱 (温度 $80^\circ\text{C}$ 、湿度95%以上、加熱時間約10時間) を行い再び水中で養生を継続する方法を採った。コンクリートの圧縮強度および弾性係数の測定は蒸気養生シリーズについてのみ行った。

コンクリートの長さ変化の測定はJIS A 1123-57 の『コンパレーター方法』により行い、供試体の脱型直後の測定値を基長とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 蒸気養生がアルカリの多いセメントを用いたコンクリートの強度発現性および弾性係数に及ぼす影響

図-1 (A) および (B) は、 $K_2SO_4$ の添加が蒸気養生を行ったコンクリートの強度発現性および弾性係数にどのような影響を及ぼすかを示したものである。図中の記号K 1からK 5はセメント重量に対する $K_2SO_4$ の添加率がそれぞれ1%から5%の範囲にあることを示している。また、実線は蒸気養生の結果を示し、破線は水中養生の結果を示している。

これによれば、水中養生を行った場合に比べ、蒸気養生を行ったコンクリートは強度および弾性係数とも著しく低下していることが分かる。 $K_2SO_4$ の添加が5%の場合は、材令52週での強度が水中養生を行ったベースコンクリートの20%程度にまで低下している。これらのコンクリートの弾性係数を材令との関係で示した図-1 (B)によれば、 $K_2SO_4$ の添加率が増大するほど材令4週以降での弾性係数の低下傾向が認められ、特に、 $K_2SO_4$ の添加率が5%の場合には、その低下が一層顕著となっている。このような傾向は、水中養生の結果から得られた著者らの実験<sup>1)</sup>からも確かめられているが、本実験のように蒸気養生を行った場合には、その傾向が一層顕著となっている。

これらのコンクリートのX線回折試験の結果では、ettringiteに対する強い回折強度が認められており、アルカリの増加によるいわゆる硫酸塩膨張がその原因となっている。また、蒸気養生の場合にはその傾向が一層顕著となっているものと思われる。図-1 (B)に示される弾性係数の著しい低下傾向は、このような現象が発生した結果をとくに顕著に反映しているといえることができる。

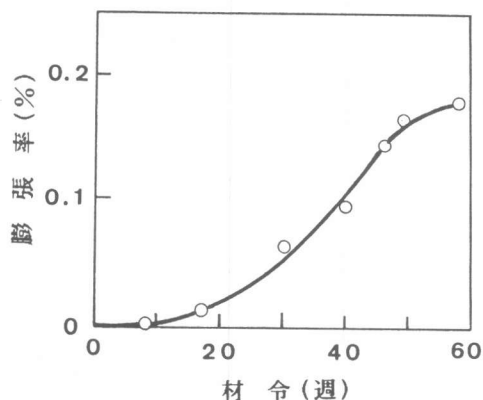
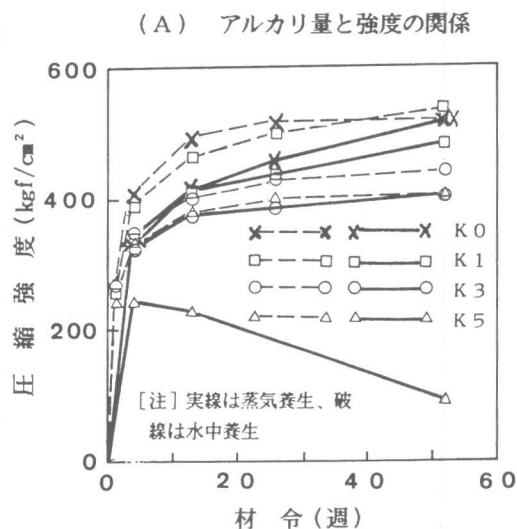
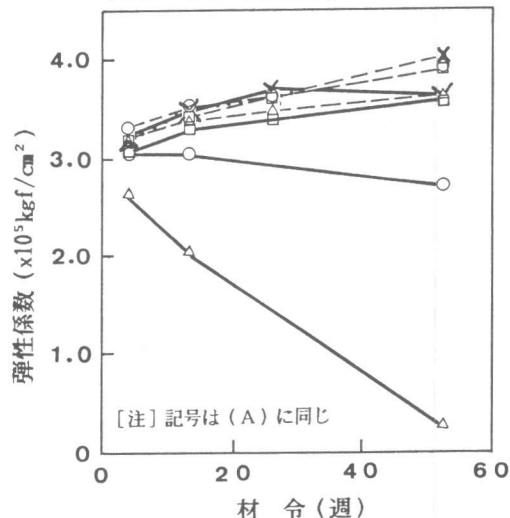


図-2 水中養生に伴い、蒸気養生を行ったコンクリートが膨張した一例 ( $K_2SO_4$ 添加率 3%)



(A) アルカリ量と強度の関係



(B) アルカリ量と弾性係数の関係

図-1 セメント中のアルカリ量が蒸気養生を行ったコンクリートの強度および弾性に及ぼす影響

図-2は、アルカリの多いセメントを用いて蒸気養生を行ったコンクリートが、その後の水中養生の結果、異常な膨張性状を示した場合の一例を示したものである。

これによれば、このコンクリートが材令13週以降で著しく膨張してゆく傾向が認められる。図-1の中に示すアルカリ添加率の同じコンクリートの強度および弾性係数の低下傾向と対比してみると両者はよく対応した関係にある。

### 3. 2 蒸気養生を行ったコンクリートの強度および弾性係数に及ぼすアルカリの種類の影響

硫酸カリウム ( $K_2SO_4$ )、硫酸ナトリウム ( $Na_2SO_4$ ) およびこれらのアルカリを重量比で3:2の比率でセメント重量の5%添加した場合において、蒸気養生を行ったコンクリートの強度および弾性係数が、アルカリの種類により、どのような影響を受けるかについて示したものが図-3である。強度に及ぼす影響について検討した図-3 (A) によれば、いずれのアルカリを添加した場合であっても、コンクリートは材令4週ないし13週以降において著しい強度低下を示し、材令52週で標準養生を行った場合の20%から35%程度まで強度が低下している。また、アルカリの種類との関係で検討すると、 $K_2SO_4$ および $Na_2SO_4$ を混合して添加した場合の強度低下が最も著しく、ついで $K_2SO_4$ を単独で添加したケースがこれとほぼ同水準で低下している。また、 $Na_2SO_4$ を単独で添加した場合の強度低下は材令13週以降の長期材令に達して現れる傾向を示している。いずれにしても、アルカリ硫酸塩の添加率が5%程度に達すると、その種類にかかわらず、これらのコンクリートは崩壊状態に達している。

これらのコンクリートの弾性係数の測定結果は図-3 (B) のようになっており、アルカリを混合して添加した場合の弾性係数の低下傾向が一層顕著となっている。この場合は材令1週以降の初期材令より弾性係数が著しく低下しており、弾性係数において、アルカリの影響が最も顕著に現れる結果となっている。

OdlerおよびWonnemann<sup>2)</sup>らによれば、アルカリ分の多いセメントを用いたコンクリートの標準養生試験結果から、 $K_2SO_4$ および $Na_2SO_4$ が同時に(多量に)セメント中に存在している場合は、強度低下が特に著しいとしている。これらの実験結果はこれとよく一致しており、蒸気養生はそのような傾向を高める結果となっている。

図-4は、図-3に示す供試体について、蒸気養生を行ったコンクリートの水中養生にともなう膨張性状の一例を示したものである。これによれば、アルカリの種類によりコンクリートが膨張す

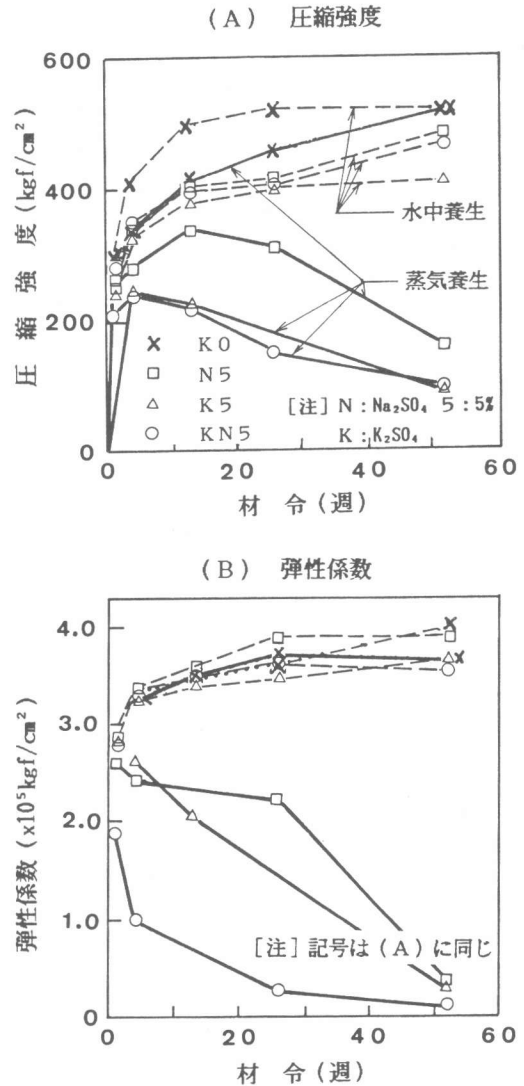


図-3 蒸気養生を行ったコンクリートの強度および弾性係数に及ぼすアルカリの種類の影響

る時期が異なっており、また、これらのコンクリートが異常膨張性状を示す傾向と図-3に認められる強度低下の傾向がよく一致している。このことは、アルカリの多いセメントを用いて蒸気養生を行ったコンクリートの強度低下が異常膨張に起因することを裏付けている。

### 3.3 屋外暴露がアルカリの多いセメントを用いたコンクリートの膨張性状に及ぼす影響

図-4は、材令1年の水中養生を行ったコンクリートを、鉄筋コンクリート造建物の屋上において夏季の約40日間暴露の後に再び水中に浸漬して、暴露がその長さ変化にどのような影響を及ぼすかを検討したものである。これと対比するために、水中養生を継続した供試体についても図中に破線でプロットしてある。暴露中の供試体の温度は最高40℃に達しており、また、建物屋上という条件下では乾湿の厳しい作用も受けたものと思われる。

これによれば、水セメント比が40%の場合には、 $K_2SO_4$ の添加率が5%以上の場合に大きな膨張がみとめられ、また、水セメント比が55%の場合には、これが10%の場合に特に大きな膨張性状が認められた。このことは、このようなセメントを用いたコンクリートは、暴露にともなう温度履歴および乾湿などの影響で異常膨張を起こす可能性を有していることを意味している。

これらについては、今後の数年に及ぶ暴露試験の繰り返しの結果から結論を出す必要があるが、温度履歴による化学反応の促進および乾燥による組織の緩みなどが起因して膨張を起こし易い条件をつかった結果であろうと考えられる。

また、水中養生を継続した供試体については、

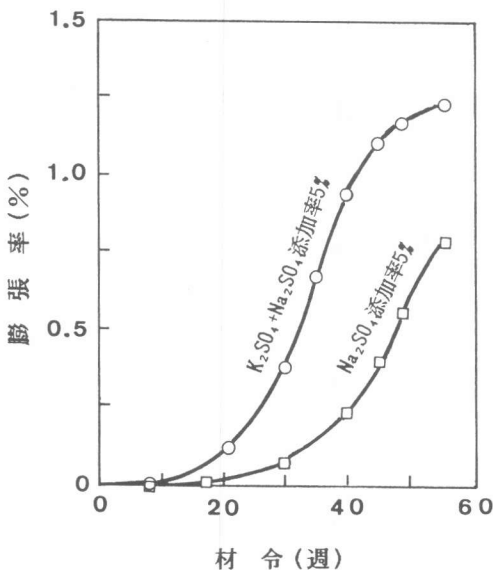


図-4 蒸気養生を行ったコンクリートの膨張性状に及ぼすアルカリの種類の影響

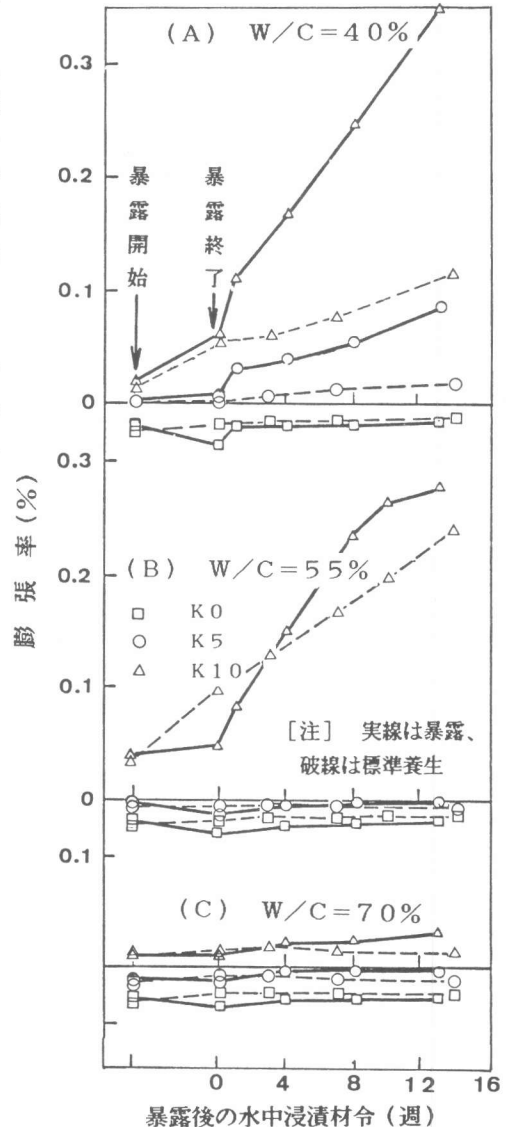


図-5 アルカリ分の多いセメントを用いたコンクリート(水中養生1年)の暴露が膨張性状に及ぼす影響

材令1年以降において、 $K_2SO_4$ の添加率が10%の場合に異常膨張が認められ、材令約1年7ヶ月で膨張率は0.1%から0.2%にも達している。これらはさらに長期に渡って膨張する傾向を示している。

### 3.4 アルカリ分の多いセメントを用いたコンクリートの加熱が膨張性状に及ぼす影響

前節において、アルカリの多いセメントを用いた場合は、コンクリートが暴露養生に伴う温度履歴などの影響を受けて、水中で異常膨張を起こす可能性があることを指摘した。しかし、このような屋外放置などによる手法を通じて、コンクリートにもたらすこのような影響を究明するためには実に長期に及ぶ観察が必要である。そこで、短期的にその傾向を探るための一手法として、これらのコンクリートを加熱する方法を採用した。

即ち、本実験においては、供試体を温度80℃で加熱（湿度95%以上、加熱時間10時間）した後に再び供試体を水中に浸漬して、その膨張性状を検討することとした。また、これらの結果については暴露試験結果と対比し、その妥当性についても検討するとした。

加熱を行った供試体の水セメントは40%および55%の2種類であり、前者はアルカリの添加率が0.5および10%の3水準、後者は0.1、3、5および10%の5水準である。実験結果は図-5 (A) および (B) 示す通りである。

水セメント比が40%の場合について検討すると、 $K_2SO_4$ の添加率が10%および5%の場合の膨張率が著しく大きくなっているが、その膨張性状は図-4 (A) で示される暴露試験結果と極めて類似のものとなっており、暴露の結果を増幅したものとなっている。図-5 (B) に示す水セメント比が55%の場合について検討すると、 $K_2SO_4$ の添加率が10%の場合膨張速度が特に早くなっているが、この傾向は暴露試験の結果にもみられるところで、この場合も比較的よい相関関係が認められ、暴露で示される傾向を増幅したものとなっている。また、この場合は、 $K_2SO_4$ の添加量の差が膨張量の差異として明瞭に現れており、図-5 (B) に示されるデータの今後の挙動を暗示するものとなっている。

以上の結果から考察すると、ここに提示した加熱による手法は、セメント中のアルカリ硫酸塩に起因して生ずるコンクリートの膨張性状を比較的短期間に、しかも比較的精度よく判定することが出来る方法として有望であり、今後の研究の成果を待ってさらに検討していきたい。

### 4. 結論

アルカリの多いセメントを使用した場合は、蒸気養生、暴露養生などの影響でコンクリートは異

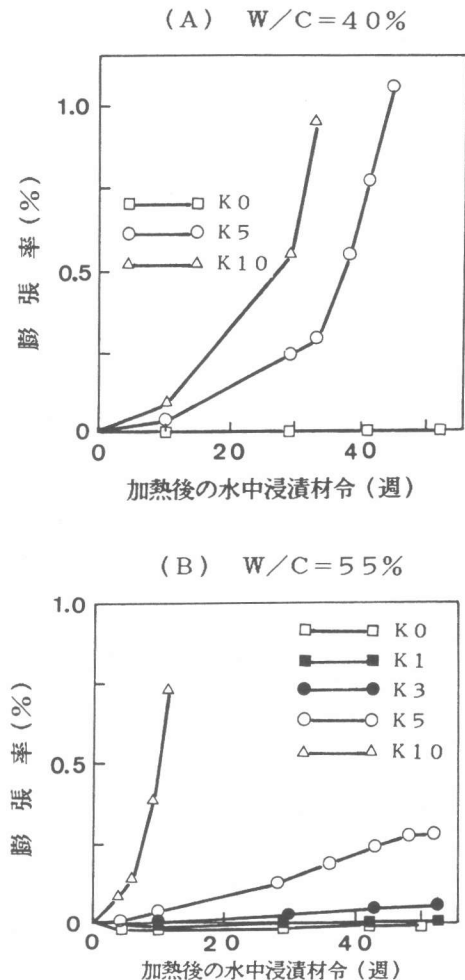


図-6 アルカリ分の多いセメントを用いたコンクリートの加熱(水中養生8月)が膨張性状に及ぼす影響

常膨張を起こして著しく劣化する可能性が高いことを、硫酸カリウムの添加によるシミュレーション実験により明らかにしたものである。

硫酸カリウムの添加を通じて、アルカリ量を増大させたセメントを用いたコンクリートの諸性状に関して以下のことが明らかになったと考える。

(1) アルカリの多いセメントを用いた場合には、蒸気養生はコンクリートの強度を著しく低下させるばかりでなく、長期に渡ってコンクリートの劣化をもたらす。この傾向はアルカリ量を増すに従って顕著となる。

(2) アルカリの多いセメントを用いた場合には、蒸気養生を行ったコンクリートは水中で急激な異常膨張を引き起こし、硫酸カリウムの添加率が5%の場合には、膨張率が1%以上にも達する。この傾向は水セメント比が小さくなるほど顕著となる。

(3) 水中養生を十分に行った長期材令のコンクリートであっても、アルカリの多いセメントを使用した場合は、暴露の結果、水中で異常膨張を引き起こす。この傾向は水セメント比が小さくなるほど顕著となる。

謝辞:本研究の一部は文部省科学研究費・総合研究A『セメントの品質がコンクリートの諸性状に及ぼす影響』によったものであることを付記する。なお、本研究の実施にあたり、多大の協力を頂いた東京大学生産技術研究所第5部 星野富夫技官に深謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) Jawed, I. and Skalny, J.: Alkalies in Cement: A Review, 1. Forms of Alkalies and Their Effect on Clinker Formation, Cement and Concrete Research, Vol. 7, pp. 719, 1977.
- 2) Odler, I. and Wonnemann, R.: Effect of Alkalies on Portland Cement Hydration II, Alkalies Present in Form of Sulphates, Cement and Concrete Research, Vol. 13, pp. 771.
- 3) Spellman, L. U.: Some Opportunities to Offset Poor Quality Characteristics of high-Alkali Cement, Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 5, No. 1, 1958.
- 4) 小林, 小倉: セメント中のアルカリ硫酸塩がコンクリートの諸性状に及ぼす影響, 土木学会論文集, 第354号/V-2, 1987年2月
- 5) Johansen, V.: Proceedings of the 1976 Symposium on Cement Concrete of Japan, pp. 80, 1976.