

# 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

## THE EFFECTS OF ALKALI SULFATE IN CEMENT ON THE PROPERTIES OF CONCRETE

小林一輔\*・小倉盛衛\*\*

By Kazusuke KOBAYASHI and Morie OGURA

An experimental study was performed to clarify the influence of high alkali content of portland cement on the properties of concrete by addition of potassium sulfate. The results suggest that increase of alkali content in cement not only causes the flash set of fresh concrete resulting in slump loss but reduces the strength of concrete. Addition of blast furnace slag to these high alkali cements makes up for the loss in slump and strength to a large extent.

*Keywords* : high alkali cement, compressive strength, slump loss, flash set, blast furnace slag

### 1. はしがき

わが国におけるセメントの製造方法は昭和40年代に湿式からSPキルンを用いる乾式に転換している。SPキルンを用いる乾式方法によって製造されるポルトランドセメントについてはアルカリ分が多くなる傾向があることが指摘されている<sup>1)</sup>。アルカリ分の多いセメントはアルカリ骨材反応の面で好ましくないことはよく知られているが、凝結速度が異状に早まったり、強度低下を招くなどコンクリートの性状に悪い影響を及ぼすことは意外に知られていない。これらの点についてはすでにHogan<sup>2)</sup>やFrohnsdorf<sup>3)</sup>などによって指摘されているが、これをコンクリートについて確かめた報告は見当たらない。

今後、わが国においては多量のアルカリを含むセメントが定常的に生産されるケースは考えられないが、過去にアルカリの多いセメントを用いたコンクリート構造物が多くつくられたことは確かである。このようなコンクリート構造物の劣化調査や耐久性診断を実施する場合に

は使用材料の品質とこれがコンクリートの性状に及ぼす影響に関する基礎資料を整えておくことが必要不可欠である。

本論文はこのような観点から、アルカリ量の多いセメントがコンクリートの諸性状に及ぼす影響について明らかにするために以下のような検討を行った結果をとりまとめたものである。

- 1) コンクリートの初期性状に及ぼす影響
- 2) コンクリートの圧縮強度、弾性係数および容積変化に及ぼす影響
- 3) 高炉スラグ微粉末が上記の影響に及ぼす効果に関する検討

### 2. 研究の方法

セメント中の可溶性アルカリ分は $K_2SO_4$ 、 $Na_2SO_4$ ・ $3K_2SO_4$ 、 $2CaSO_4$ ・ $K_2SO_4$ などのアルカリ硫酸塩である。本研究を進めるにあたり、アルカリ硫酸塩を多く含むセメントを得る方法として比較的lowアルカリのセメント中に硫酸カリウムを添加する方法を採用した。このような手法についてはすでにJawedおよびSkalny<sup>4)</sup>やJohansen<sup>5)</sup>などが試みており、現実に工場で生産されたセメントの使用に伴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。つまり、セメントまた

\* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所第5部  
(〒106 港区六本木7-22-1)

\*\* 正会員 工修 関東学院大学助教授 工学部土木工学科  
(〒236 横浜市金沢区六浦町4834)

は練りませ水を通じて外部から添加した硫酸カリウムはクリンカー中の硫酸カリウムと同じ効果があるといわれている。

### 3. 使用材料および配合

#### (1) 使用材料

セメントは市販の普通ポルトランドセメントであり、その化学成分を表-1に示す。このセメントをベースセメントとして、アルカリ硫酸塩を添加して使用した。

細骨材は川砂であり、比重2.63、吸水率1.01%、粗粒率3.04のものである。粗骨材は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。

硫酸カリウム(以下 $K_2SO_4$ )は試薬特級のものであり、これを $88\mu$ 以下に粉碎して使用した。

高炉水砕スラグ微粉末(以下高炉スラグ)はガラス化率95%以上、塩基度1.84%、粉末度がブレン値で $3770\text{ cm}^2/\text{g}$ のものである。

$K_2SO_4$ および高炉スラグはセメントに重量比内割で添加し、入念に混合して使用した。 $K_2SO_4$ の添加量は1%から10%の範囲に変化させた。対応する $R_2O$ 量および $SO_3$ 量を表-2に示す。 $K_2SO_4$ の添加量を3%以上に高めた理由については、はしがきにおいても指摘したように、過去においてこのような非常にアルカリ分の多いセメントが製造されたことや、今後も一時的にこのようなセメントが市場に出回る可能性があることが予想されるためである。

#### (2) 配合

コンクリートの水セメント比は40%、55%、70%

の3種である。アルカリを添加していない場合の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。

### 4. 実験方法

#### a) 練りませ方法

$K_2SO_4$ および高炉スラグの分散性を高めるため、各材料のミキサーへの投入順序は次のようにした。

最初に細骨材およびセメントの順序で材料を投入して空練りを2分間行い、次に粗骨材を投入してさらに30秒間空練りを行った後に、練りませ水を注入して1分30秒間本練りを行った。

#### b) 供試体の製作、養生および保存

圧縮強度用供試体( $\phi 10\times 20\text{ cm}$ )および長さ変化用供試体( $10\times 10\times 40\text{ cm}$ )の製作はそれぞれJIS A 1108-76およびJIS A 1129-75に準じた。圧縮強度用供試体は脱型後 $20^\circ\text{C}$ の恒温水槽中で所定の材令まで養生を行い、長さ変化用供試体は同水槽中で材令1週まで養生の後に、湿度50%RH、温度 $20^\circ\text{C}$ の恒温室に保存して材令13週まで乾燥した。材令13週まで乾燥した供試体を再び上記の水槽中に3か月間浸漬した。

#### c) フレッシュコンクリートおよび硬化したコンクリートの試験方法

スランプ、ブリージングおよび凝結硬化速度試験はそれぞれJIS A 1101-75、JIS A 1123-75およびASTM C 469-65に準じて行った。長さ変化率はJIS A 1123-57の「コンパレータ方法」により測定した。材令2日の脱型直後の測定値を基長とし、コンクリート打込日および水中浸漬日より1週、2週、4週、8週および13週目

表-1 セメントの化学成分 (%)

種類	ig. loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O
普通ポルトランドセメント	1.66	0.09	21.95	4.73	3.33	63.46	1.90	1.79	0.23	0.46	0.53

表-2  $K_2SO_4$ の添加率と $Na_2O$ 、 $SO_3$ の含有量

$K_2SO_4$ 添加率 (%)	0	1	3	5	10
$Na_2O$ (eq.%)	0.53	0.89	1.61	2.33	4.13
$SO_3$ 量 (%)	1.79	2.19	3.00	4.00	6.20

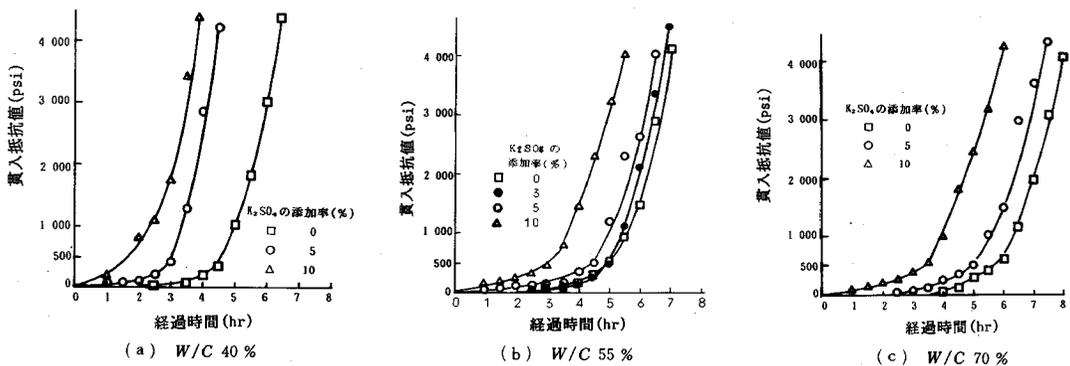


図-1  $K_2SO_4$ を添加したセメントを用いたコンクリートのプロクター貫入抵抗試験結果

でそれぞれ測定した。

5. フレッシュコンクリートの諸性状に及ぼすアルカリ硫酸塩の影響

(1) コンクリートの凝結速度に及ぼす影響

コンクリートの凝結速度に及ぼす  $K_2SO_4$  の添加の影響を水セメント比ごとに示したものが図-1である。これによれば、 $K_2SO_4$  の量が増加するにつれて凝結速度は著しく早くなっており、水セメント比が小さいほど顕著となる。

これらの結果から、ASTM に規定する凝結の始発時間（貫入抵抗値 500 psi）および終結時間（4000 psi）を求め、 $K_2SO_4$  の添加率との関係で示すと図-2 のようになる。これによれば、 $K_2SO_4$  の添加率が 5% 以上になると添加の影響が大きくなる傾向が認められ、水セメント比が 40% の場合は凝結時間の短縮が始発で 1 時間 40 分、終結で 1 時間 30 分程度となっている。添加率を細かく変化した水セメント比が 55% の場合について検討すると、添加率を 3% 程度にしてもその影響があまり現われていないが、これらのコンクリートの目視での観察ではかなりのこわばりを生じていた。

セメントクリンカー中のアルカリ分の多いセメントがこれを用いたモルタルの凝結硬化を早める作用を有することはすでに数多くの研究者<sup>5)~8)</sup>によって指摘されているが、その中の Richartz と Sprung はこのような急結現象がセメントクリンカー中の  $K_2SO_4$  と石こうとの反応による syngenite ( $K_2SO_4 \cdot CaSO_4 \cdot H_2O$ ) の形成に起因するとしている。すなわち、硬い syngenite 組織の形成は急結を招くのみでなく、 $C_3A$  の水和を適当に遅延させることを難しくするのである。図-1 および 2 においてみられる  $K_2SO_4$  の添加に伴うコンクリートの著しい凝結促進作用はまさにこれを裏付けるものといえる。

(2) コンクリートのブリージングに及ぼす影響

$K_2SO_4$  を添加したセメントを用いたコンクリートの

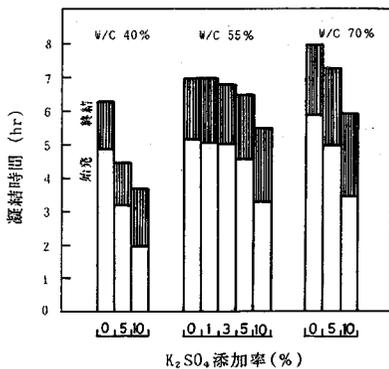
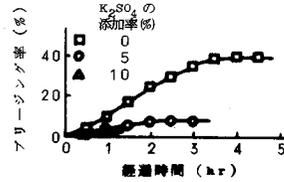


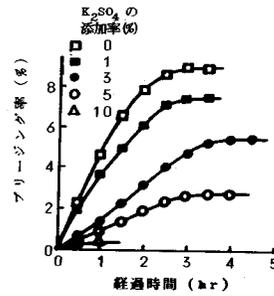
図-2  $K_2SO_4$  の添加がコンクリートの凝結に及ぼす影響

ブリージング試験結果を図-3に示す。 $K_2SO_4$  の影響は微量の添加であっても顕著に現われ、また、水セメント比が大きくなるほどその影響が大きくなっている。

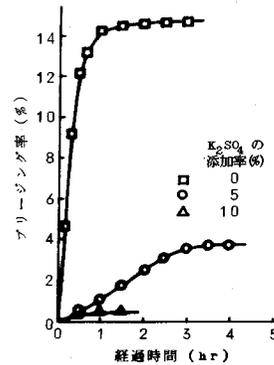
ブリージングがほぼ終了した測定開始 3 時間後のブ



(a) W/C 40%



(b) W/C 55%



(c) W/C 70%

図-3  $K_2SO_4$  を添加したセメントを用いたコンクリートのブリージング試験結果

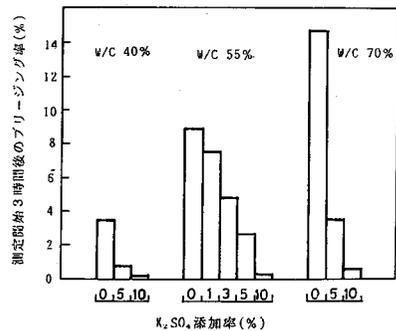


図-4  $K_2SO_4$  の添加がブリージングに及ぼす影響

リージング率と  $K_2SO_4$  の添加率との関係を図-4 に示す。これによれば、添加率5%でブリージング率は正常なセメントによる場合の1/4程度にまで低下しており、この添加率を10%まで高めた結果ではブリージング率が0%近くになっている。

セメントペーストにおけるブリージング率はポルトラ

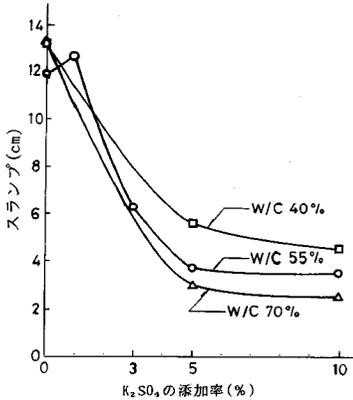


図-5  $K_2SO_4$  の添加がスランブに及ぼす影響

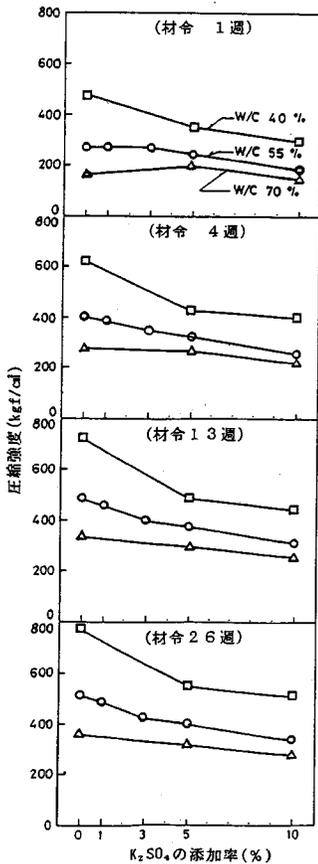


図-6  $K_2SO_4$  の添加が強度に及ぼす影響

ンドセメント中の水溶性アルカリの増大により低下する<sup>9)</sup>ことが確かめられており、このような現象がコンクリートの場合にも生ずることが実験的に確かめられた。

(3) スランブに及ぼす影響

$K_2SO_4$  の添加がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす最も顕著な影響はスランブの著しい低下として現われる。図-5より明らかなようにスランブは  $K_2SO_4$  の増大とともにほぼ直線的に低下し、その割合は1% (すなわち、 $Na_2O$  換算で0.36%) の増加に対してスランブは約2 cm 減少する。添加率が5%を越えるとスランブの低下が10 cm にも達するが、その低下傾向はゆるやかになっている。

このようにスランブが著しく低下する原因については凝結の節で詳しく検討したように、水溶性アルカリの増加に伴う急結作用によるものと思われる。

6. 硬化したコンクリートの諸性状に及ぼすアルカリ硫酸塩の影響

(1) コンクリートの強度に及ぼす影響

a)  $K_2SO_4$  の添加率と強度との関係

$K_2SO_4$  の添加率と強度との関係を図-6 に示す。これによれば、 $K_2SO_4$  の増大に伴って強度が低下しており、この傾向は水セメント比が小さくなるほど著しい。水セメント比が40%の場合には、この添加率が5%で強度低下が30%以上に達している。

以上のような強度低下の原因を究明するため、材令13週を経過したコンクリートのペースト部分の粉末X線回折試験を行った結果が図-7である。これによれば、 $K_2SO_4$  の添加率が增大するほど ettringite に対する強い回折強度が観察され、アルカリの増加によるいわゆる硫

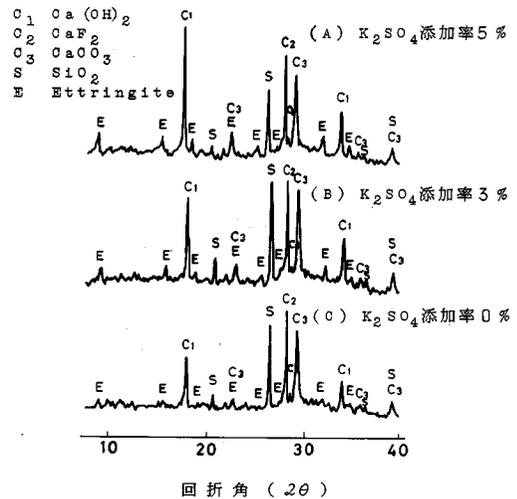


図-7 コンクリートのペースト部のX線回折図

酸塩膨張がコンクリートの強度低下の一要因となっていることが認められる。ここでさらに注目を要するのは  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  に対する異常に高い回折強度である。

Jawed および Skalny<sup>1)</sup> らによれば、正常なセメントを用いた場合には練りませ水が  $\text{Ca}^+$  イオンに対して速やかに過飽和の状態に達するが、アルカリが存在する場合は  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の溶解度を低下させて水和生成物の結晶核の形成や結晶化の割合を変化させて、このためセメントの凝結や硬化過程を修正してしまうとしている。

このことはアルカリの水和促進作用によって生じた多量の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  がアルカリの存在により液相より晶出して結晶化し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の2次反応による水硬性化合物の生成を困難にしていることと関係している。

図-8は  $\text{K}_2\text{SO}_4$  を添加したセメントを用いたコンク

リートの強度発現傾向を示したものである。これによれば、 $\text{K}_2\text{SO}_4$  の添加の影響は材令4週以降での著しい強度低下となって現われており、この傾向は水セメント比が55%の場合に認められるように、この添加率が1%程度の比較的低水準であっても、セメント中のアルカリ分の増加の影響が明瞭に現われている。

Kryzhanovskaya<sup>10)</sup> らの指摘によれば、アルカリ硫酸塩とアルカリ固溶相が同時にポルトランドセメント中に存在している場合は、どちらか一方だけが存在している

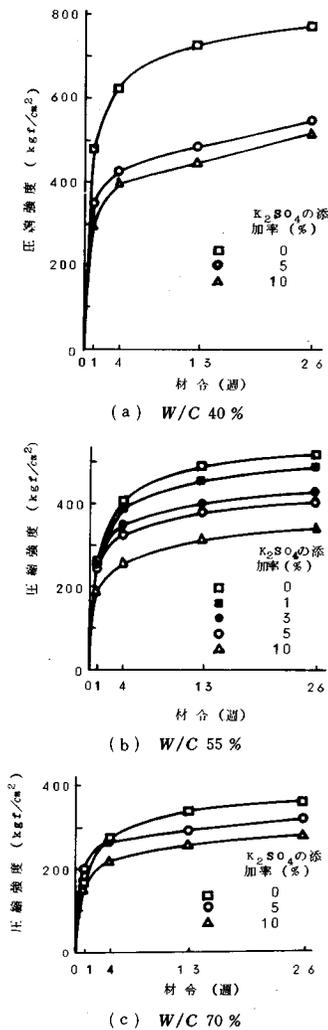


図-8  $\text{K}_2\text{SO}_4$  を添加したセメントを用いたコンクリートの材令と強度との関係

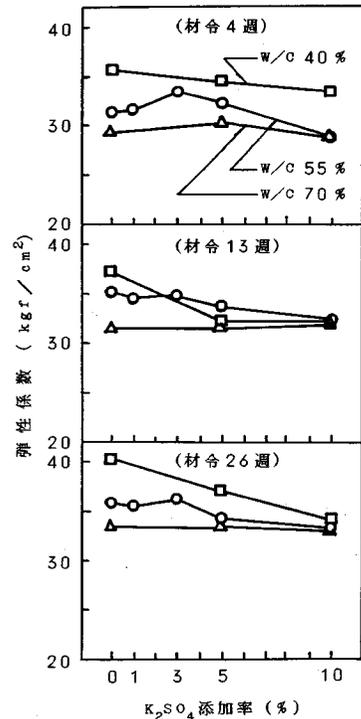


図-9  $\text{K}_2\text{SO}_4$  の添加率と弾性係数との関係

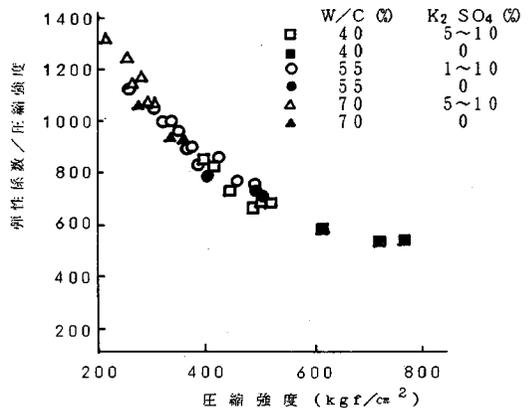


図-10  $\text{K}_2\text{SO}_4$  を添加したセメントを用いたコンクリートの弾性係数 (材令4週~26週)

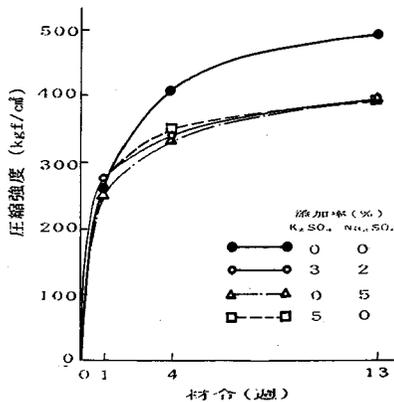
場合よりも強度が著しく低下するとしている。したがって、本研究のように外部からアルカリを単独に添加した場合は、強度の低下傾向はむしろ低めになるものと思われる。

これらのコンクリートの静弾性係数と  $K_2SO_4$  の添加率との関係を示したものが図—9である。これによれば、弾性係数は  $K_2SO_4$  の添加率の増大とともに減少しており、この傾向は特に水セメント比が小さいほど著しい。弾性係数/圧縮強度の比を圧縮強度との関係で示した図—10によれば、 $K_2SO_4$  を添加した場合のコンクリートの弾性係数比はこれを添加しない場合の値と同等であり、弾性係数の低下が強度低下とほぼ見合ったものとなっている。このことは骨材の反応が関与していないことを裏付けている。

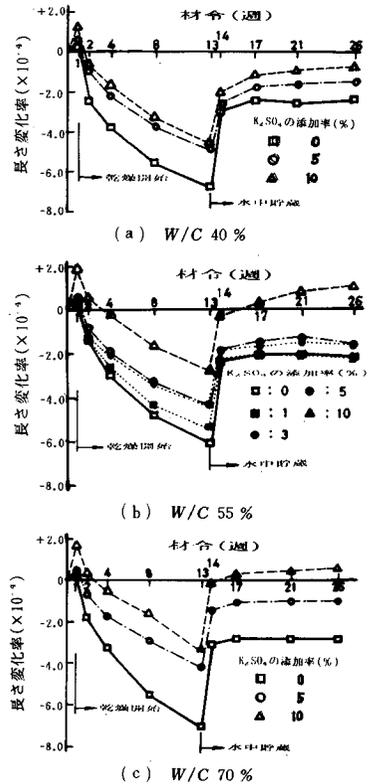
b) アルカリ硫酸塩の種類と強度との関係

硫酸カリウム ( $K_2SO_4$ )、硫酸ナトリウム ( $Na_2SO_4$ ) およびこれらの硫酸塩を重量比で 3:2 の比率で混合した 3 種のアルカリ硫酸塩をセメント重量の 5% 添加した場合において、アルカリの種類がコンクリートの強度発現性に及ぼす影響を示したものが図—11 である。これによれば、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強度は、アルカリを添加していない場合に比べて、いずれも材令 4 週以降で著しく低下してゆく傾向が認められ、材令 13 週で 25% の強度減となっている。

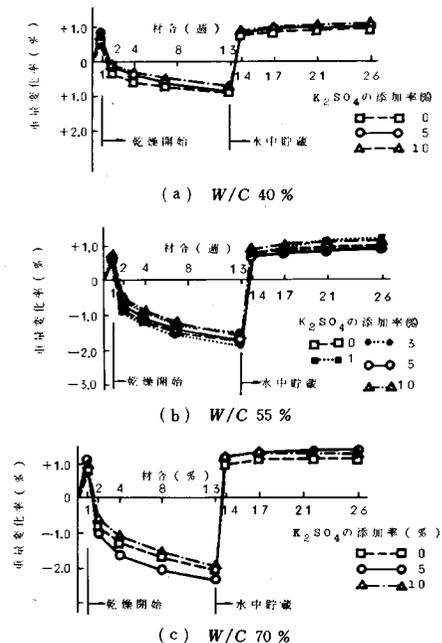
添加したアルカリの量は硫酸塩でいずれも 5% であるが、これらのアルカリ量を  $Na_2O$  当量に換算すると添加率は 1.78% から 2.18% の範囲にあり、かなり大きな差がある。しかし、これら 3 種のアルカリを硫酸塩として等量を添加した場合の影響がほぼ同水準であることから考えて、アルカリの種類による強度に対する影響の差はほとんどないものと思われる。また、これらの事実



図—11 セメント中のアルカリ硫酸塩の種類とコンクリートの強度の発現性との関係



図—12  $K_2SO_4$  を添加したセメントを用いたコンクリートの長さ変化率



図—13  $K_2SO_4$  を添加したセメントを用いたコンクリートの重量変化率

はセメント中のアルカリ硫酸塩の量がコンクリートの強度と深く関係していることを示唆している。

(2) コンクリートの容積変化に及ぼす影響

図-12は材令13週まで乾燥した供試体を再び水中に浸漬して、材令26週まで測定したコンクリートの長さ変化率を示したものである。材令13週に至るまでの乾燥収縮ひずみは $K_2SO_4$ の添加率が增大するほど小さくなる傾向にあり、添加率10%でこれが1/2以下になるケースがある。この原因は $SO_3$ 量の増大に伴う ettringite の生成による膨張の影響が大きいためであると考えられるが、一般にアルカリ分の多いセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮は増大することが指摘されており<sup>1)</sup>、図-12の結果はこれらとは異なった傾向を示している。

この点に関しては、外部から添加したアルカリは当初から多くのアルカリを含んでいるセメントに比較して乾燥収縮を減らすことが報告されている<sup>1)</sup>ので、乾燥収縮に関してはアルカリ分の影響を本研究のようにして再現することが難しいように思われる。

なお、これらの供試体の重量変化率を材令との関係で示せば図-13のような結果となっており、アルカリ量の差による変化があまり認められない。

7. アルカリ量の多いセメントに対する高炉スラグ混入の影響

(1) 概要

アルカリ骨材反応の防止策などとして、アルカリ分の多いセメントを使用せざるを得ない場合は、高炉水砕スラグ微粉末(高炉スラグ)を50%以上混入することが有効であると指摘されている。これまで明らかにしてきたような高アルカリセメントの使用がコンクリートの諸性状に及ぼす種々の影響に対して、高炉スラグの混入が

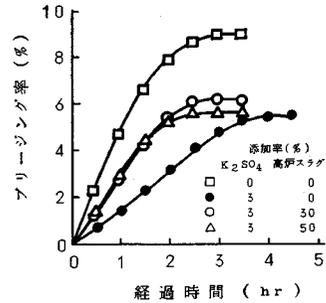


図-16 高炉スラグの混入がフリージングに及ぼす影響

どのような作用を及ぼすかを検討するのが本章の目的である。

(2) フレッシュコンクリートの諸性状

$K_2SO_4$ を添加したセメントを用いたコンクリートの凝結速度に及ぼす高炉スラグの影響を図-14および図-15に示す。 $K_2SO_4$ の添加率が3%程度の場合には凝結に及ぼす影響があまり大きくないため、高炉スラグ混入の影響もそれほど顕著には現われなかった。 $K_2SO_4$ の添加率を4%および6%とさらに高くして、高炉スラグの混入率を30%および50%とした場合についても、始発時間は $K_2SO_4$ の影響が卓越して短縮される傾向があるのに対して、終結時間は高炉スラグの遅延効果が作用を及ぼして遅延される傾向が認められた。

このような高アルカリセメントを用いたコンクリートのフリージングに対する高炉スラグの作用はきわめて特徴的である。すなわち、図-16に示すように、 $K_2SO_4$ を3%添加したセメントに高炉スラグを30~50%混入すると $K_2SO_4$ の添加により低下したフリージングの速度を著しく早めるとともに、この終了時間も短縮する作用がある。図-17に示す測定開始3時間後のフリージ

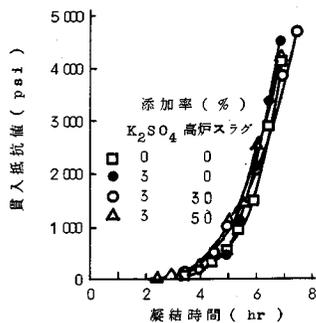


図-14 高炉スラグの混入がコンクリートの凝結に及ぼす影響

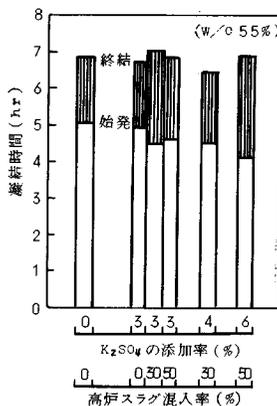


図-15 コンクリートの凝結に及ぼす $K_2SO_4$ と高炉スラグの影響

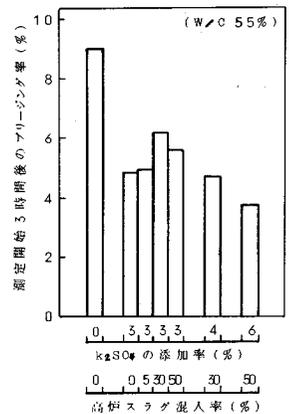
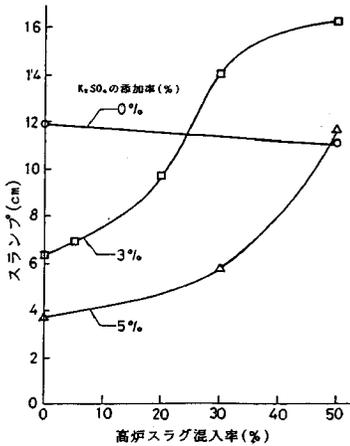


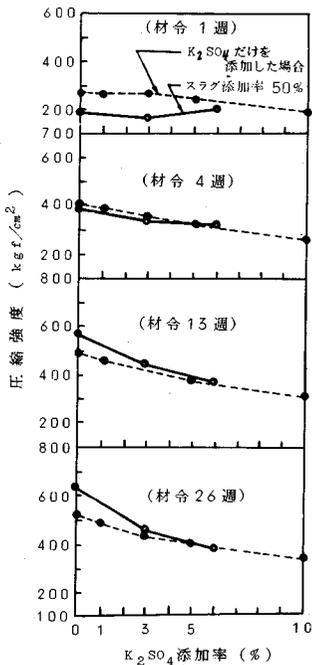
図-17 コンクリートのフリージングに及ぼす $K_2SO_4$ と高炉スラグの影響

ング率により検討すると、 $K_2SO_4$ の添加率と高炉スラッグの混入率の比率により、ブリージング率は大きく変動する傾向を示すが、全体として $K_2SO_4$ の添加量の影響が卓越した結果となっている。

図一18は高アルカリセメントを用いたコンクリートのスランブに及ぼす高炉スラッグの影響を示したものである。これによれば、 $K_2SO_4$ の3%の添加で6cm低下したスランブが、高炉スラッグ25%の混入で完全に回復できることを示しており、さらに、 $K_2SO_4$ の添加率を5%と異常に高めた場合でも、高炉スラッグの混入率



図一18 スランブに及ぼす  $K_2SO_4$  と高炉スラッグの影響



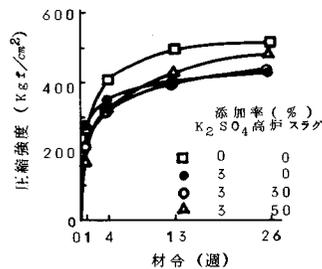
図一19 高炉スラッグを50%混入した場合のコンクリートの強度と  $K_2SO_4$  添加率との関係

を50%程度に高めることにより、アルカリによるスランブ低下の影響を完全に除去できることを示している。高炉スラッグの混入がスランブに及ぼす影響は、 $K_2SO_4$ の添加率に比例してその混入量のある程度高くすることにより急激に現われる傾向があり、また、高アルカリのもとでは、この混入量をさらに高くすることにより、高炉スラッグが現象的にはコンクリートの流動性を著しく増加させる作用をしている。Smolczyk<sup>11)</sup>によれば、高炉セメントを用いたコンクリートにおいては、高炉スラッグがアルカリイオンとの強い結合作用 (bonding effect) を有しており、これが間隙水中のアルカリ濃度を低下させるとしている。したがって、高炉スラッグの混入によるスランブの著しい回復作用は、フレッシュコンクリートの液相中のアルカリ濃度の低下によって、5.(1)で指摘したような syngenite の形成に伴う  $C_3A$  の急結作用などを抑止した結果であろうと思われる。

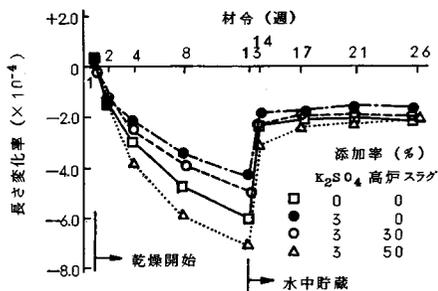
(3) 硬化したコンクリートの諸性状

図一19は高炉スラッグを50%混入した場合について、コンクリートの強度を  $K_2SO_4$ の添加率との関係で示したものである。材令26週に至るまでの結果では、高炉スラッグの混入率を50%まで高くしても、 $K_2SO_4$ の添加率がある程度高くなると、この添加により低下したコンクリートの強度の回復が困難であることを示している。図から推測すると、高炉スラッグの混入率が50%の場合には、材令26週以内で強度が回復する  $K_2SO_4$ の添加率の限度は2%程度になっている。

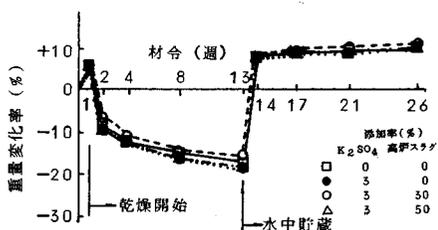
図一20は  $K_2SO_4$ の添加率が3%のセメントを用いたコンクリートの強度発現性に及ぼす高炉スラッグの影響を示したものである。この図によれば、高炉スラッグの混入率が50%の場合には、材令26週における強度が  $K_2SO_4$ を添加していないセメントを用いた場合の95%程度に達している。また、これは長期にわたる強度の発現性が高いことからさらに高い強度の伸びが期待できる。しかし、高炉スラッグの混入率が30%の場合には材令4週以降での強度の発現性がかなり低くなっており、高炉スラッグ混入効果がほとんど期待できない結果となっている。以上のことから、高アルカリセメントの使用による強度低



図一20 高炉スラッグの混入が強度発現性に及ぼす影響



図—21 高炉スラグを混入したコンクリートの長さ変化率



図—22 高炉スラグを混入したコンクリートの重量変化率

下に対しては高炉スラグの混入量を50%以上とすることが必要であるといえる。

高アルカリセメントに高炉スラグを混入した場合、コンクリートの長さ変化にどのような影響を及ぼすかを示したものが図—21である。これによれば、 $K_2SO_4$ の添加率が3%の場合、高炉スラグの混入率を50%とすることで、材令13週での乾燥収縮ひずみが $K_2SO_4$ を添加していない正常なセメントにおける場合に比べてかなり大きくなっている。また、高炉スラグの混入率が30%の場合には乾燥収縮ひずみが逆にかなり小さくなっており、 $K_2SO_4$ を単独で添加した場合とほぼ同水準となっている。これらの事実は高アルカリの影響を除去する目的で高炉スラグを混入した場合、乾燥収縮ひずみが幾分大きくなることを意味している。

材令13週まで乾燥した供試体を再び水中に浸漬して測定した結果では、水中養生期間13週に至るまで、特に異常な性状を示すものは認められない。

また、これらの供試体の全材令にわたる重量変化率は図—22に示すとおりであり、特に変状の認められるものはない。

## 8. アルカリ分の多いセメントを使用したコンクリートの配合に関する考察

以上のように、アルカリ分の多いセメントを使用したコンクリートは、必然的に、所要のスランブを得るために必要な単位水量が増大する。たとえば、アルカリ量が $Na_2O$ 換算で1.25%のセメントを用いて水セメント比

が55%のコンクリートをつくる場合、図—5より明らかかなように、アルカリ量が $Na_2O$ 換算で0.5%程度のセメントを用いた場合に比べて、スランブは4cm減少する。このことは、スランブを所定の値に合わせるためには、単位水量および単位セメント量がそれぞれ5%程度増大することを意味する。一方、上記のようなセメントを用いた場合、図—6より明らかかなように、材令28日強度はアルカリ量が $Na_2O$ 換算で0.5%程度のセメントを用いた場合に比べて約40 kgf/cm<sup>2</sup>低下する。したがって、所要の強度を得るためには、コンクリートの水セメント比を少なくとも5%は減少させる必要がある。

ここで正常なセメント（アルカリ量 $Na_2O$ 換算で0.5%程度のセメント）を用いた場合、所要のスランブと材令28日強度を得るのに要する配合が水セメント比55%、単位水量176 kg/m<sup>3</sup>、単位セメント量320 kg/m<sup>3</sup>とすれば、所要の強度を得るためには単位セメント量は32 kg/m<sup>3</sup>増加する必要がある、さらに所要のスランブを得るためには単位水量を約9 kg/m<sup>3</sup>、単位セメント量を約18 kg増大させる必要がある。すなわち、最終的に単位水量は185 kg/m<sup>3</sup>、単位セメント量は370 kg/m<sup>3</sup>となる。単位水量の増大は乾燥収縮を大きくし、単位セメント量の増大はマッシュな構造物では温度応力の発生を招きいずれもコンクリートに有害なひびわれを発生させる可能性を増大させる。

近年、コンクリート構造物の乾燥収縮や温度応力によるひびわれが発生するケースが増大しており、その原因は碎石の使用、コンクリートポンプの使用に伴う圧送時の水の添加などが指摘されており、場合によってはセメントの粉末度が細かくなっていると主張する研究者もいるが、本研究を通じて著者らは、セメント中のアルカリ量の増大に伴うスランブ低下や強度低下も無視できないのではないかと考えている。

## 9. 結 論

アルカリの多いセメントを使用した場合にはコンクリートの初期性状や強度などに種々の異常な現象が発生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って明らかにしたものである。硫酸カリウムの添加を通じてセメント中の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) アルカリ分の多いセメントを使用した場合、コンクリートのスランブが低下し、ブリージングは減少し、凝結が促進される。この傾向はアルカリ量を増すに従って顕著になる。

(2) アルカリ分の多いセメントを使用した場合、コ

ンクリートの材令 28 日強度ならびにそれ以降の長期強度が低下する。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) 高炉水砕スラグ微粉末の混入はアルカリ量の多いセメントの使用に伴って生ずる種々の影響を減ずるような効果をもたらす。ただし、このような効果が得られるためには少なくとも高炉水砕スラグ微粉末を 50% 以上混入する必要がある。

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. : Cement and Concrete Research, Vol. 8, pp. 37~51, 1978.
- 2) Hogan, F.J. : Task Group Report to ASTM C 01. 32 on Alkalies, 1978. 10.
- 3) Frohnsdorff, G., Clifton, J.R. and Brown, P.W. : Cement Standards, Evolution and Trends, pp.16, ASTM, STP663, 1977.
- 4) Johansen, V. : Proceedings of the 1976 Symposium on Cement Concrete of Japan, pp.80~97, 1976.
- 5) Henning, O. and Stieler, R. : Proceedings of the 6th International Congress on Chemistry of Cement, Moscow, suppl. paper, 1974.
- 6) Sheikin et al., ibid, suppl. paper, 1974.
- 7) Locher, F.W., Zement-Kalk-Gips, 25, pp.53, 1973.
- 8) Grymek, J., Proceedings of the 7th International Conference, Silicate Ind., Budapest, pp.265, 1965.
- 9) Steinour, H.S., PCS Bulletin, No.4, 1945.
- 10) Kryzhanovskaya, I. A. et al., Tsement, Vol.8, pp.10, 1969.
- 11) Smolczyk, H.G. : Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement of Paris, Subtheme III-1, pp.3~17, 1980.

(1986.5.12・受付)