

スラグ石こうセメントの利用方法

Use of Slag-Gypsum Cement Concrete

小林 一 輔*・魚 本 健 人*

Kazusuke KOBAYASHI and Taketo UOMOTO

スラグ石こうセメントの歴史は決して新しいものではないが、その実用性についての検討はほとんど行われていなかったと言ってよい。本文はスラグ石こうセメントの諸特性に関する研究結果に基づいて、その使用方法を明らかにし、この種のセメントを汎用のセメントとして利用する場合の指標を与えたものである。

1. は し が き

その大半が高炉水砕スラグと回収石こうによって構成される“スラグ石こうセメント”は、強度ならびに耐久性のいずれの面からも普通ポルトランドセメントに劣らぬ優れたセメントであることが、著者らの研究によって明らかにされた^{1)~13)}。このセメントは、省資源・省エネルギーに寄与するのみならず、未利用資源の活用と産業廃棄物の高度利用にもなることから、その速やかな実用化が望まれる。しかし、スラグ石こうセメントを使用する場合には、現在一般的に用いられているセメントとは自ら異なった取り扱いが必要となる。本文ではこの点を中心に取りまとめ、スラグ石こうセメントを実用化する上での指標を与えたものである。

2. スラグ石こうセメントの特性

スラグ石こうセメントは、全体の80%以上を高炉水砕スラグが占め、これに10数%の石こうと少量のアルカリ刺激剤から成る高スラグ型のスラグセメントである。しかし、同じスラグセメントであっても高炉セメントと大きく異なる点は、アルカリ刺激剤¹⁴⁾添加量が著しく小さいことである。

スラグ石こうセメントの水和反応過程においては、高炉水砕スラグは直接アルカリ刺激剤によって水和反応を起こすのではなく、石こうと反応して水和するのであって、この場合アルカリ刺激剤はこの反応を促進させる役割を果たすことになる。このためアルカリ刺激剤は少量で良いことになるが、反面これを過剰添加した場合にはその効果がなくなり、かえって強度の低いセメントになる。

以上のことから明らかのように、スラグ石こうセメントとして利用可能な結合材配合比には一定の範囲があり、最も利用価値の高い結合材配合比の範囲を重量比で示すと次のとおりである^{3) 4)}。

高炉水砕スラグ : 80 ~ 85 %

* 東京大学生産技術研究所 第5部

注1) 一般には普通ポルトランドセメントが用いられる。

排煙脱硫石こう(二水石こう) : 12 ~ 18 %
普通ポルトランドセメント : 2 ~ 3 %

なお、アルカリ刺激剤として水酸化カルシウムを用いる場合には1 ~ 1.5%とすれば良いことは、図-1および図-2からも明らかである。

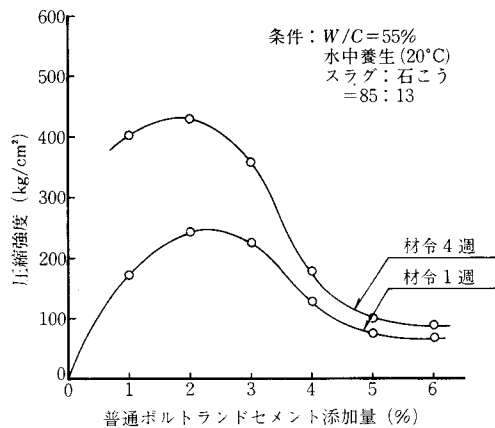


図-1 普通ポルトランドセメント添加量とコンクリート圧縮強度との関係

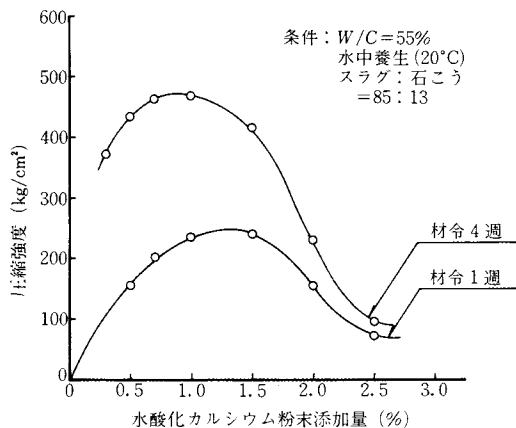


図-2 水酸化カルシウム粉末添加量とコンクリート圧縮強度との関係

3. スラグ石こうセメントの使用法

スラグ石こうセメントは、一般に使用されている普通ポルトランドセメントとやや異なった特性を有するので、その利用に当たっては、普通ポルトランドセメントとは異なった取り扱いが必要になってくる。以下にその主なものを示す。

3.1 セメントの製造と素材の品質

今日、我が国で容易に入手し得る材料を用いスラグ石こうセメントを製造するためには、表-1に示すような品質のものであれば良い⁹⁾しかし、特に注意すべき点としては今日容易に入手し得る素材としての微粉碎スラグ中に既にアルカリ刺激剤となる物質が混入している可能性があることである。このことを確かめずにセメント材料として使用すると、結果的にアルカリ刺激剤を過剰添加したことになり、図-1,2に示すように著しく品質の異なったセメントとなる。このため、セメント製造時にはアルカリ性物質の混入が生じないような厳重な管理が必要である¹⁾

3.2 セメントの貯蔵と風化

3.1で述べたようにスラグ石こうセメントはアルカリ刺激剤量の多少によって著しい品質変化を起こす。したがって、これを貯蔵する場合には空気中の炭酸ガス等によって添加したアルカリ刺激剤が消失しないよう厳重に管理することが重要であり、さらに、セメント製造時におけるアルカリ刺激剤の添加量を最適添加量よりやや多くし、風化に対する抵抗性を増大させることが必要となる。なお、使用時においてセメントの風化がかなり進行している場合には新たにアルカリ刺激剤を添加すれば再度使用可能なセメントとなるが、その場合の添加量は著者らの提案している方法で行えば簡便に決定することが可能である¹³⁾

3.3 コンクリートの練り混ぜと強度

スラグ石こうセメントを用いたコンクリートの施工は、普通ポルトランドセメント等の場合とほぼ同様に行うことができるが、ただ1つ注意すべき点はコンクリートの練り混ぜである。この場合重要なことは、コンクリート材料がミキサー中で均等になるよう練り混ぜること

表-1 スラグ石こうセメント用結合材素材の品質条件

素 材	条 件
高炉水砕スラグ	塩 基 度：1.8 以上 ガラス量：95% 以上 粉 末 度：4000 cm ² /g 以上
排煙脱硫石こう (二水石こう)	粉 末 度：1500 cm ² /g 以上
アルカリ刺激剤	普通ポルトランドセメントまたは水酸化カルシウム粉末

ではなく、アルカリ刺激剤が均等に行き渡るよう練り混ぜることである。特に水セメント比が小さく、セメント量の大きい配合の場合に十分な練り混ぜが行われないとアルカリ刺激剤が偏在し、スラグ石こうセメントの水和反応が満足に行われない場合が生じ、いわゆる“水セメント比法則”が成立しなくなることがある¹¹⁻¹³⁾しかし、このようなことが起る条件は使用するミキサー、練り混ぜ時間、練り混ぜ量によっても異なるため、事前に確認することが必要である。万一、水セメント比の小さい配合で十分な強度発現が認められないことが明らかになった場合には、練り混ぜ量を少なくし、練り混ぜ時間を長くすれば良い⁹⁾他の方法として、アルカリ刺激剤添加量の多いセメントを製造するか、アルカリ刺激剤を練り混ぜ水中に混入させて使用する方法を採用することも考えられる。

3.4 コンクリートの養生と表面劣化

スラグ石こうセメントは普通ポルトランドセメントに比べて水和反応が遅いので、水分の逸散や空気中の炭酸ガスによる表面劣化を起こし易い。したがって、コンクリートは十分に養生することが必要である^{9)~12)}

最も望ましい養生は湿潤養生であるが、その他の養生を行う場合には特に若材令時においてコンクリート表面からの水分の逸散や炭酸ガスの侵入を防止する措置をとることが必要である。そのためには、プレキャスト型枠を用いたり、脱型後直ちにコンクリート表面に塗装を施すなどの方法がある。図-3,4は材令2日で脱型し直ちにコンクリート表面に塗装を施した場合のコンクリート強度を示したものであるが、塗料としては炭酸ガスの侵入を防止するのみならず、コンクリートからの水分の逸散を防ぐものでなければならない。また、表面劣化による影響は断面寸法の小さい構造物の場合に顕著に表

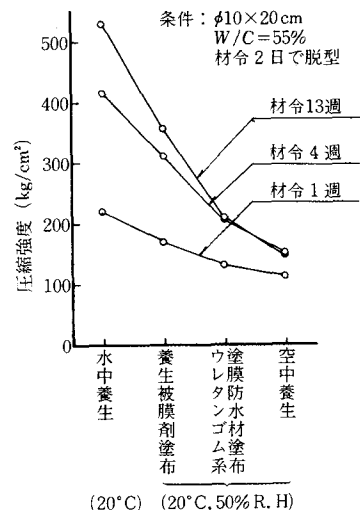


図-3 コンクリート表面塗装の効果

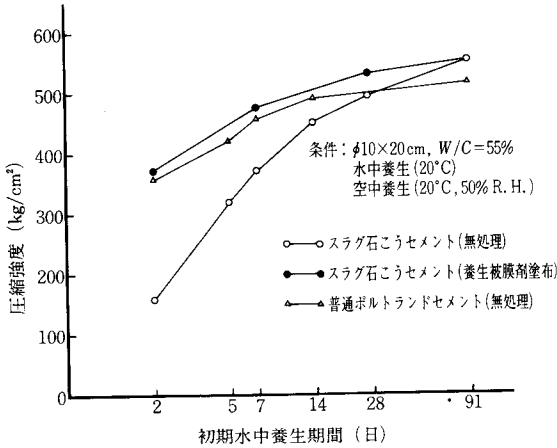


図-4 初期水中養生期間と表面塗装が圧縮強度に及ぼす影響 (材令13週)

れるので注意が必要である。なお、表面劣化深さの目安として中性化深さを用いることが可能である^{11),12)}

3.5 コンクリート中の鋼材の腐食と防食

スラグ石こうセメントを鉄筋コンクリート構造物に使用する場合には、鋼材の腐食に関する配慮が必要である。スラグ石こうセメントを用いた場合、たとえコンクリートが中性化しない場合であっても鋼材に発錆が認められるが、その原因はセメントの水和に伴う反応生成物にあることが著者らによって、明らかにされている⁵⁾

コンクリート中の鋼材を防食する方法としては種々の方法が考えられるが、市販のアノード反応抑制型防錆剤の主成分である亜硝酸塩を用いれば若材令時における鋼材の発錆をほぼ完全に防止することが可能である⁵⁾。また、長期的な問題に関しては、スラグ石こうセメントを用いた場合、普通ポルトランドセメントに比べ中性化を生じやすいため、中性化の生じにくいコンクリート配合とするだけでなく、鉄筋等のかぶり厚さをより大きく取ることが必要である。なお、初期養生7日、20°C、50% R.H.の条件で養生した場合、中性化深さ(δ)は暴露期間をT(週)とすると、実験では次の結果が得られた。

W/C = 40%の場合 $\delta = 0.7 \log T$

W/C = 70%の場合 $\delta = 1.35 \log T$

3.6 凍結融解作用に対する抵抗性

スラグ石こうセメントを用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性を調べたものを図-5に示す。この図から明らかのように、普通ポルトランドセメントの場合に比べ、スラグ石こうセメントの場合には耐久性指数を95以上にするためには8.5%の空気量とすることが必要である。しかし、一般に空気量を多くすれば、コンクリート強度は低下するので、所要の強度を得るためにはより小さな水セメント比の配合とする必要がある。

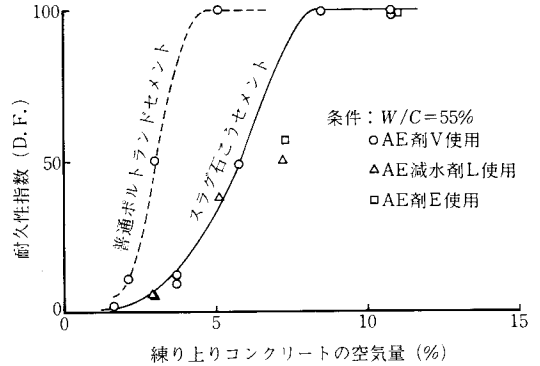


図-5 コンクリートの耐久性指数に及ぼす空気量の影響

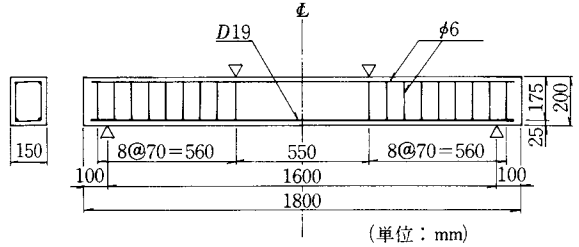


図-6 曲げ試験用供試体 (Type M)

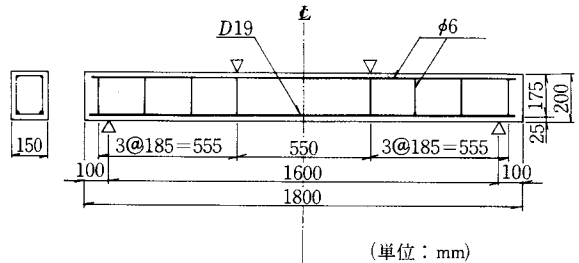


図-7 せん断試験用供試体 (Type S)

4. 鉄筋コンクリート部材への適用

スラグ石こうセメントを実際の構造物に適用する場合には、3で述べた種々の項目について配慮すれば良いが、さらに鉄筋コンクリート部材へ適用する場合には鉄筋の付着等について検討をする必要がある。そこで鉄筋コンクリート梁による破壊試験から、特に問題とすべき点があるか否かを検討した。

図-6および図-7は実験に用いた供試体であり、それぞれ曲げおよびせん断破壊させることを目的としたものである。供試体はコンクリート打設後、打設面をシートによって覆い、型枠内で1週間養生した。脱型後、打設面に養生被膜剤を塗布し、側面および底面は無処理のまま屋外で養生した。なお、鉄筋はD19 (SD 35)及び、φ6 (降伏点応力度 3500 kg/cm²)の丸鋼を用い、コンクリートにはセメント量の0.3%の亜硝酸ナトリウムを添加した。

表-2 RC梁の破壊試験結果

水セメント比 (W/C)		55%	70%
コンクリートの圧縮強度 (kg/cm ²)	水中養生	425	320
	現場養生	352	258
	空中養生	341	235
コンクリートのヤング率 ($\times 10^5$ kg/cm ²)	水中養生	2.98	2.74
	現場養生	2.94	2.63
	空中養生	2.30	2.06
ポアソン比		0.22	0.22
Type M 供試体	破壊形式	曲げ破壊	曲げ破壊
	破壊荷重(実測値)	15.2 ton	14.6 ton
	破壊荷重(計算値) 注1)	13.6 ton	12.8 ton
	実測値/計算値	1.12	1.14
Type S 供試体	破壊形式	せん断破壊	せん断破壊
	破壊荷重(実測値)	12.4 ton	12.6 ton
	破壊荷重(計算値) 注2)	9.8 ton	9.1 ton
	実測値/計算値	1.27	1.38

注1) C. R. Whitney の応力ブロックを用いた。

注2) A. C. I. の耐力式を用いた。

表-2からも明らかなように、本実験の範囲においては、同強度の普通ポルトランドセメントコンクリートとほぼ同様な曲げおよびせん断破壊性状を示している。またその耐力もほぼ妥当な値であることが、計算値との比較から明らかである。一方、破壊試験時に測定を行った梁のたわみ変形や、鉄筋およびコンクリートの歪みから、スラグ石こうセメントを用いた場合でも断面保持が成り立つことや、コンクリートと鉄筋の付着が十分あること等が確認された。

コンクリートの中酸化深さおよび鉄筋の発錆についても調査を行ったが、材令8週程度まででは特に問題となる結果は得られなかった。

以上述べた結果から明らかなように、スラグ石こうセメントを鉄筋コンクリート部材に適用する場合、短期的には大きな問題はないと判断される。しかし、長期的に見ると、表-2からも明らかなように水中養生を行った場合の強度と現場養生を行った場合の強度に違いが認められることから、従来のように水中養生供試体のみによるコンクリート強度の判定には問題があると考えられる。特に、断面寸法の小さな部材の場合には、表面処理方法いかんによっては実構造物と同じ条件の現場養生供試体を用いた強度の判定が必要であると考えられる。

5. あとがき

スラグ石こうセメントの特性については、著者らの研究によってほぼ明らかにされたと考えられる。今後は、本文で述べたような事項に十分配慮をした実用化のための検討ならびに実構造物への適用を通じた検討を行うことが必要である。

(1981年3月12日受理)

参考文献

- 1) 小林, 魚本, 榎本, 森: 生産研究Vol 30, No 6, 1978
- 2) 魚本, 小林, 星野: 生産研究Vol 30, No 10, 1978
- 3) 小林, 魚本: 生産研究Vol 31, No 3, 1979
- 4) 魚本, 小林, 星野: 生産研究Vol 31, No 6, 1979
- 5) 魚本, 小林, 星野: 生産研究Vol 31, No 7, 1979
- 6) 魚本, 小林, 星野: 生産研究Vol 31, No 9, 1979
- 7) 魚本, 小林, 星野: 生産研究Vol 31, No 9, 1979
- 8) 魚本, 小林, 星野: 生産研究Vol 31, No 10, 1979
- 9) 魚本, 小林, 星野: 生産研究Vol 32, No 2, 1980
- 10) 小林, 魚本: 生産研究Vol 32, No 3, 1980
- 11) 魚本, 小林, 星野: 生産研究Vol 32, No 7, 1980
- 12) 魚本, 小林, 高木, 星野: 生産研究Vol 32, No 8, 1980
- 13) 魚本, 小林, 星野: 生産研究Vol 32, No 10, 1980