

[25] 硫酸塩がコンクリートの耐久性に及ぼす影響

正会員 ○成田一徳（清水建設技術研究所）

正会員 森永 繁（清水建設技術研究所）

1. はじめに

中近東などの海外コンクリート工事では、骨材中に含まれる硫酸塩および土壌中の硫酸塩による耐久性低下（サルフェートアタック）がしばしば問題となる。このような場合、骨材中の硫酸塩がある規定値以下に抑え、かつ土壌に接する部分には耐硫酸塩ポルトランドセメントを使用する等の規定が設けられるのが通常である。

例えばイラク国では細骨材に対してSO₃として0.5%以下との規定が設けられている¹⁾。硫酸塩の形態としてはNa, Mg, Ca塩などの報告があるが、²⁾バグダッド周辺の4個所の採取場の細骨材中の硫酸塩を調査した範囲ではすべて2水石膏(CaSO₄・2H₂O)の形態をしている。しかし硫酸塩の規定が小さすぎて骨材を確保するのが困難な場合もある。また、0.5%の根拠についても必ずしも明確にされているとは言い難い。

一方、土壌にコンクリートを打設する場合のサルフェートアタックの対策としては、例えばACIでは土壌中のSO₄が0.2%以上の場合はW/Cを小さくして耐硫酸塩ポルトランドセメント(SRC)の使用が推奨されている。しかし、SRCについては、内部に硫酸塩を含み、同時に外部からサルフェートアタックをうけた場合の耐久性の効果についての検討は不十分のようである。

このようなことから、ここでは硫酸塩の混入許容量、SRCの耐久性の効果について実験的に検討した。

2. 実験計画と方法

2.1 実験方針

普通ポルトランドセメント(OPC)およびSRCを用いたコンクリートに細骨材に対して2水石膏(以下石こうとする)を0~100%を混入した試験体を約2,000本作製し、これを屋外の空中、水中、MgSO₄液中に暴露した。その後、材令1カ月、7カ月、2年および3年半で、圧縮強度、弾性係数、長さ変化、重さ変化、ひびわれ、中性化深さおよびエトリンガイトの生成状況を測定した。

2.2 使用材料

a. セメントを表-1に示す。

b. 骨材は表-2の鬼怒川産骨材を用いた。

c. 石こうはモロッコ産の天然2水石膏を用いた。

表-2の(A)は細骨材を100%置換した場合に、(B)は細骨材を1~13%置換した場合に用いた。

d. 混和剤はP社製のAE減水剤とした。

2.3 要因と水準(表-3)

a. 石こう量:「細骨材+石こう」に対して石こうを0~100%混入した。なお分子量の関係からCaSO₄・2H₂Oの約1/2がSO₃となる。従って石こう1%が前述のSO₃の規定値の0.5%に相当する。

b. 暴露環境:材令1週まで標準水中養生を行い、以後、屋外の空中(Aとする)、水中(Wとする)および硫酸塩溶液(従来の文献を参考として2%のMgSO₄溶液とした、Mとする)に暴露した。

c. セメント種類:OPCとSRCを用い、セメント種類による強度、ひびわれ等を比較した。

d. 水セメント比:45,55,65%を採用した。

e. 測定材令:1カ月、7カ月、2年および3.5年とした。なお長さ測定等は約3カ月毎に、1年半以後は約6カ月毎に測定した。

表-1. セメントの化学成分と物理的性質

セメント種類	化学成分(%)									鉱物組成(%)					比重	比表面積(平方メートル/グラム)	圧縮強度(28日)(kg/cm ²)
	ig. loss	inno	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	計	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄				
OPC	0.6	0.2	22.3	5.3	2.9	64.9	1.3	2.0	99.5	49.2	26.9	9.1	8.8	3.4	3.16	3160	41.7
SRC	0.6	0.2	23.4	3.7	4.2	64.5	1.2	2.1	99.9	47.8	31.1	2.7	12.8	3.6	3.22	3300	37.1

表-2. 使用骨材の諸性質

骨材	最大寸法(mm以下)	粗粒率	表化比重	吸水率(%)	単位容積(kg/m ³)	尖鋭率(%)	0.075mm以下(%)
粗骨材	2.5	7.1.8	2.61	1.3	1.760	6.74	-
細骨材	2.5	2.3.2	2.52	1.9	1.630	6.60	1.8
石こうA	5.	2.9.7	2.28	2.2.4	1.210	6.4.7	1.1.0*
石こうB	1.2	2.0.2	2.28	2.2.4	1.150	6.1.5	2.1.0*

* 既式ふるいで測定した。

表-3 要因と水準

要因	水準
石こう混入率(%)	0, 1, 3, 6.5, 13, 100
暴露環境	空中, 水中, 2% MgSO ₄ 液中
セメント種類	OPC, SRC
水セメント比(%)	45, 55, 65
材令(月)	1, 7, 24, 42

2.4 コンクリートの調合、試験体の作成

スランブは中近東のコンクリート工事で一般に使用されている15cmを目標とした。空気量は4%を目標とした。石こうを混入しない時の基準調合を表-4に示す。同一W/Cではセメント種類によらず、C量、W量を同一にした。SRCのコンクリートではスランブが大きめになるため、OPCの場合によりS/Aを1~2%大きくした。石こう混入の場合は、石こうの微粉が多いために基準調合に対して、石こう1%につきWを0.4kg/m³を増加させ、S/Aを0.5%減少させた。なお、石こう量100%の場合は、粒度の異なる石こうであるため、W、S/Aは石こう3%のものと同じとした。但しいずれもW/Cは不変とした。

圧縮強度、弾性係数、中性化深さ、エトリンガイトの測定には円柱試験体(φ10×H20cm)を用いた。

長さ変化、重さ変化、ひびわれの測定には角柱試験体(10×10×40cm)を用いた。

混練は強制攪拌型ミキサーで行い、打設は棒状バイブレータを用いて行った。

2.5 測定方法

- 圧縮強度；JISA1108に準じ測定した。試験日に速硬型の硬石こうを用いてキャッピングした。
- 弾性係数；圧縮強度試験時に荷重と歪を測定した。歪をコンプレッソメーターとデジタル式インジケータで測定し、最大応力の1/3における割線弾性係数を求めた。
- 長さ変化；材令1週を基長とし、ダイヤルゲージ式のもので1/1,000mm単位で測定した。
- 重さ変化；材令1週を基準とし、直示天秤で1g単位で測定した。試験体は長さ変化用のものと同じである。
- 中性化深さ；圧縮試験後の試験体を割裂し、1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して測定した。
- 表面ひびわれ；長さ変化の試験体を用いた。ひびわれに沿って赤マジックペンでなぞり幅を記入して写真撮影した。打設上面の長手方向の中央に直線を引きこれに交わる0.04mm以上のひびわれ本数を求めた。
- エトリンガイト；圧縮試験とは別の円柱試験体を用い、打設した時の上部、中央部から厚さ1cm程度の円盤状の試験体をダイヤモンドカッターで切断し採取した。この試験体の粗骨材を除きモルタル部分を微粉砕し、さらにメノウ乳鉢で微粉末にしてX線回折装置で測定した。

3. 実験結果と検討

基本物性としての圧縮強度、長さ変化、ひびわれについてのべる。

なお、弾性係数は圧縮強度と同様の傾向であるため割愛する。また重さ変化もここでは割愛する。

中性化深さは空中3.5年で約2~5mmでW/Cが大きい方が若干大きい傾向であり、W、Mでは0である。

エトリンガイトは、材令が経つほど、SRCよりOPCの方が、AよりW、Mの方が多く生成される傾向にあった。すなわち、後述の膨張量の大きいほどエトリンガイトが多く生成される傾向があった。

強度比、長さ変化、ひびわれの測定結果の一覧を図-2に示すが、他の要因の影響を検討するため、W/Cを平均したものである。また、図-3、4、5に材令3.5年の強度比、長さ変化、ひびわれの結果を示す。

3.1 圧縮強度

図-1に材令3.5年の圧縮強度を示す。

- 石こうが0から3%または6.5%までは石こうが増加するに従い、強度が増加し、この量を越えると強度が低下する傾向がある。
- 材令1カ月の強度は、W/Cが小さいと強度が大きいという従来の知見と同様

表-4. 調合と圧縮強度(石こうを混入しない時)(材令1カ月)

セメント種類	W/C	S/A	m ³ /kg				圧縮強度(kg/cm ²)			
			W	C	S	G	Add.	空 中	水 中	MgSO ₄ 液中
OPC	45	36.1	172	382	635	1.161	1.146	447	431	427
SRC			172	382	670	1.130	1.146	424	421	395
OPC	55	39.1	167	304	716	1.156	0.912	340	325	319
SRC			167	304	736	1.138	0.912	292	277	267
OPC	65	41.1	163	251	774	1.151	0.753	268	248	241
SRC			163	251	814	1.112	0.753	219	211	210

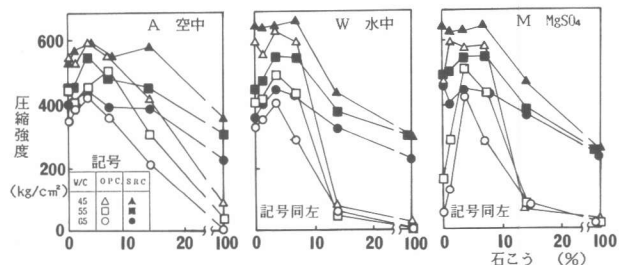


図-1. 圧縮強度(3.5年)

強度比；円柱試験体、「空中、1カ月、石こう0%を100とした」

膨張量；角柱試験体

ひびわれ；角柱試験体、2本の打設上面のひびわれ本数

すべてW/Cを平均 ○ OPC

● SRC

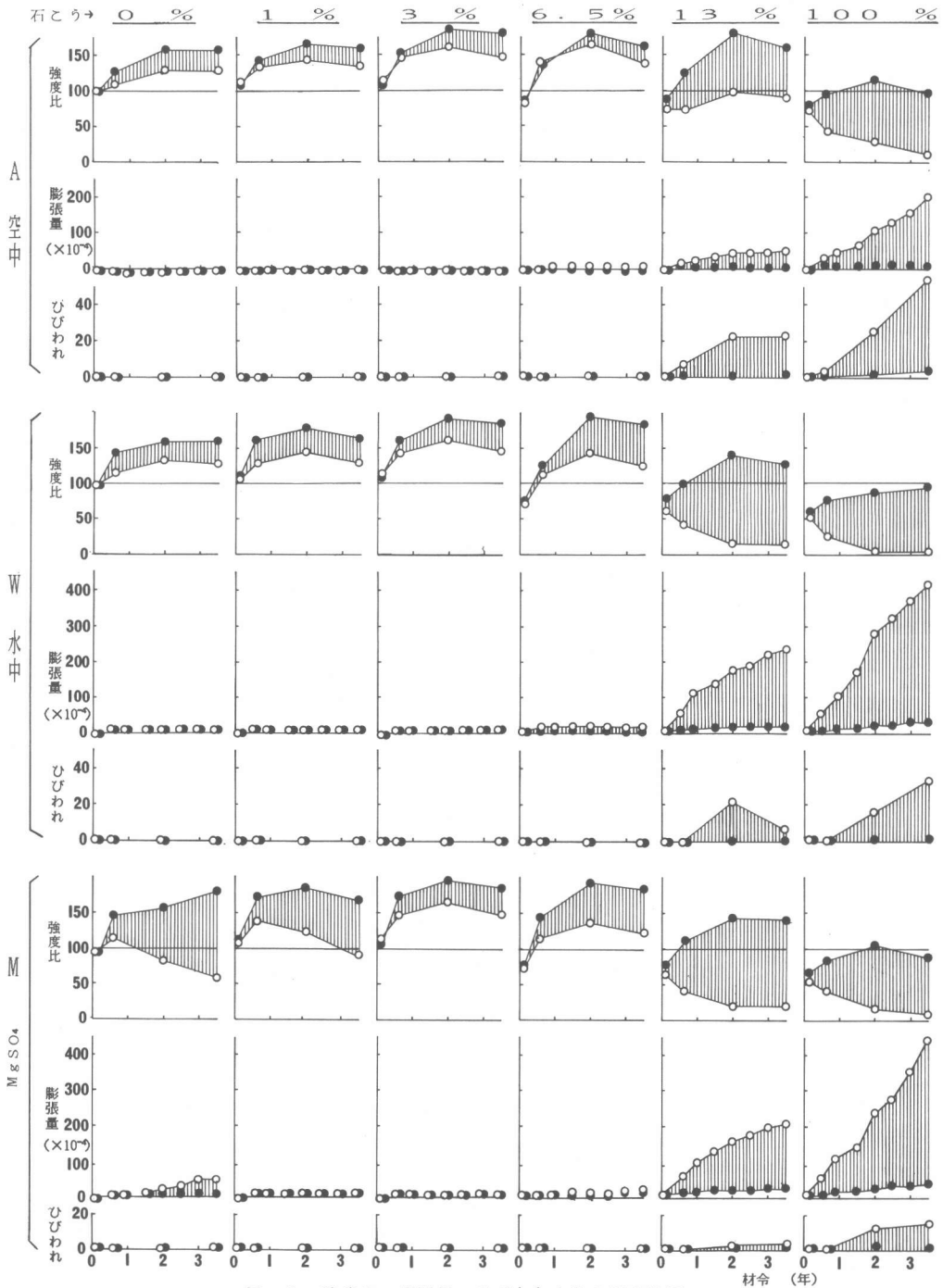


図-2. 強度比, 膨張量, ひびわれ本数の測定結果

であるが、石こうが多い場合およびOPCのMの石こうのすくない場合には、W/Cの差が小さくなっている。このように、主にOPCの石こうの多い場合やMの石こうの少ない場合にはW/Cの影響が特異となっている。しかし、全体的にはW/Cの小さい方が強度が大きい傾向にある。また、後述する膨張量、ひびわれについてはW/Cを平均してのべるが、W/Cの小さい方が膨張量、ひびわれ数が小さい傾向にある。

iii) SRCでは全体的に材令が進むに従って強度が増加する傾向がある。しかし2～3.5年で若干強度が低下しており(図-2)、一般に3～5年で長期強度の伸びが止まると言われていることのためのものである。

OPCでは石こう6.5%までは材令と共に強度が伸びる傾向にあるが、13%以上のW、Mでは7カ月以後著しく強度が低下する。またOPCのM環境では石こうが少ない場合も強度が小さくなっている。(図-2.3)

3.2 膨張量

i) OPCでは、石こう3%まではそれ程の膨張量ではないが、6.5%から膨張量が大きくなり、特に13%以上で非常に大きな膨張量を示す。SRCでも類似の傾向であるが定量的には、はるかに小さい膨張量である。

ii) OPCでは石こう6.5%以上、SRCでは13%以上の場合、材令と共に膨張量が大きくなる。

iii) 全体的にOPCに比べてSRCの方が膨張量が明らかに小さい傾向である。

iv) Aに比べて、W、Mの方が膨張量が大きく(図-4)、これは水分の存在する方がエトリンガイトが多く生成されており、このことに影響されているものと考えられる。

3.3 ひびわれ

i) OPCでは石こう6.5%を越えてからひびわれが多くなる傾向がある。SRCでも同様に石こう13%以上になるとひびわれが認められるが、発生量はわずかである。(図-5)

ii) ひびわれが発生している場合、材令とともにひびわれが多くなる傾向がある。(図-2)

iii) W、Mに比べてAの環境でひびわれが多くなっている。また、SRCのW、Mの環境ではいずれもひびわれは認められなかった。

3.4 検討

以上のことから、SO₂の混入許容量は、細骨材に対してOPCでは1.5%、SRCでは3.0%と考えられる。これらは文献³⁾のOPCでは4.5%、SRCでは6.0%としているのより小さいが、実験条件等の影響と考えられる。しかしW/Cが小さい場合など条件によっては文献³⁾程度まで許容できそうである。

4. まとめ

硫酸塩の混入許容量およびSRCの耐久性の効果について実験的に検討した。

3.5年までの強度、膨張量、ひびわれ等から次のことが言える。

i) 硫酸塩の混入許容量を細骨材に対してSO₂としてOPCでは1.5%、SRCでは3.0%まで引き上げられる。すなわち、これらを越えると膨張量、ひびわれ等が増大し、強度等が低下する。

ii) SRCは環境の影響をそれ程うけないが、OPCでは水中、硫酸塩液中では耐久性が低下する。硫酸塩の存在する場所にはSRCの使用が効果的である。

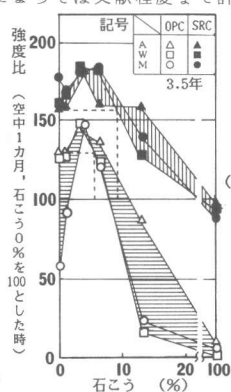


図-3 強度比(W/C平均)

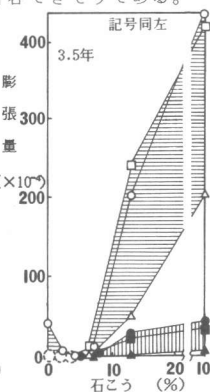


図-4 膨張量(W/C平均)

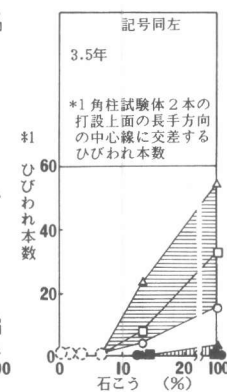


図-5 ひびわれ本数(W/C平均)

<参考文献>

- 1) Construction Work's Specification, NCCL, IRAQ
- 2) P.G.Fooks and L.Collis, CONCRETE, July, 1975
- 3) M.A.Samarai, Magazine of Concrete Research, Sept, 1976