

황산염의 침해를 받는 고강도 콘크리트의 강도특성과 물성변화

Strength Characteristics on High Strength Concrete
against Sulfate Attack



박영식*

Park, Young-Shik



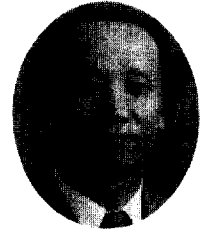
서진국**

Suh, Jin-Kook



이재훈***

Lee, Jae-Hoon



신영식***

Shin, Young-Shik

ABSTRACT

Recently, it is very serious that the structures, which are under construction or have been already constructed, are exposed to chemical pollution due to the reclamation of ground or around huge chemical plants. The study on high strength concrete with admixtures against chemical attack should be performed, because the durability of concrete structures is deteriorated inevitably by chemically polluted environment. The variation in compressive strength and physical properties of high strength concrete with silica fume on sulfate attack need to be investigated. Tests on the sulphate resistance of concrete were carried out for a comparative study on the durability of normal and high strength concrete. Test specimens, which were made of the high strength concrete by adding silica fume and by using low water/cement ratio as well as the normal strength concrete, were immersed in pure water, sodium sulfate solution, magnesium sulfate solution and combined sulfate solution during 270 days. Test on the change in compressive strength according to the duration of immersion time and the content of silica fume was performed. Also, the linear expansion and the weight-change of concrete specimens by variable silica fume content were evaluated. The difference of characteristics between normal and high strength concrete has been discussed with the test results, and the scheme for maximizing the resistibility of high strength concrete against various kinds of sulphate has been suggested as a means for practical use of the high strength concrete.

Keywords: Durability, High strength concrete, Silica fume, Sulfate, Sulfate attack

* 정회원, 안동정보대학 토목과 전임강사

** 경동정보대학 토목과 조교수

*** 정회원, 영남대학교 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 1999년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

대부분의 매립지역내의 구조물과 해양 구조물, 땅 속에 묻힌 기초, 교량의 하부구조 등의 콘크리트 구조물은 지하수나 해수에 포함된 산과 염 등 여러 형태의 화학적으로 유해한 환경에 노출됨으로써 사용, 유지되는 과정에서 그 성능이 많이 저하된다고 할 수 있다. 한편, 성능, 강도, 작업성, 내구성 등에서 탁월한 효과를 보이는 혼화제인 실리카-흙(silica fume)을 사용하여 고강도 콘크리트를 제조하는 경향이 최근들어 증가하고 있는데, 이에 따라 상기와 같은 고강도 콘크리트가 화학적으로 열악한 환경에 놓이게 된 것은 필연적이라 할 수 있으므로 혼화제를 포함한 콘크리트 또는 혼화제 그 자체가 화학물질에 오염된 환경하에서 어떤 변화를 일으키는가에 대한 연구의 필요성이 점차 증대되고 있다.

최근의 경우, 갯벌에 모래를 준설하여 건설되는 인천국제공항내 대부분의 구조물이 염해 환경에 노출됨에 따라 콘크리트 구조물에 대한 침식성을 파악하기 위하여 시추공을 통하여 이를 측정하였는데, 그 결과 인천국제공항 건설부지내의 지하수 염소이온의 농도가 약 1.7~1.8%로 비교적 높게 나타나고 있어 각종 구조물에 대하여 이에 따른 대책마련이 시급하다고 할 수 있다. 또한, 지하수 및 토양의 황산염 이온량은 표층부 토양에서 0.11~0.16mg/g으로 나타난 반면, 해수가 지하수로 상당량 유입됨에 따라 지하구조물 위치의 토양(0.81~0.88mg/g)과 지하수(2.717~3.101mg/g)에서는 그 양이 매우 심각한 수준인 것으로 보고되었다.⁽¹⁾ 이와 같은 자연적인 원인과 더불어 산업발전과 관련된 인위적인 경우의 급격한 환경악화는 1970년대 초부터 발전한 화학비료산업과 석유화학산업에 기인하는데, 이는 지하수와 하천, 토양, 해수 등 환경전반에 걸쳐 더욱 더 심각한 화학적 오염의 결과를 가져다 주었다.

여기서, 콘크리트 구조물을 침해하는 주된 요인인 여러 가지 유해한 화학물질 중 황산염의 영향이 가장 중요한 것으로 알려져 있는데, $MgSO_4$, $CaSO_4$, K_2SO_4 , Na_2SO_4 등의 성분으로 나타나는 이러한 수용성 황산염은 암석 중

의 광물에서 유래되어 암석의 풍화에 의한 분해와 비 또는 지하수의 용해작용에 의하여 지하수, 해수, 토양 등에 넓게 분포되어 있으며, 특히 점토질 토양에는 많은 양의 황산염이 함유되어 있다. 황산나트륨(sodium sulfate)과 황산칼슘(calcium sulfate)은 흙과 물 속에 용해되어 존재하고 또한 산업과정에서도 발생하는 가장 흔한 종류의 황산염이며, 황산마그네슘(magnesium sulfate)은 이들보다 흔하지는 않지만 더욱 유해한 것으로 알려져 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 황산염의 침해를 받는 경우에 일어나는 보통포틀랜드시멘트의 경화체와 실리카-흙을 포함한 포틀랜드시멘트 경화체인 고강도 콘크리트의 강도감소와 체적 및 중량변화에 대한 영향을 조사하기 위하여 이전의 연구^{(2),(3),(4)}와는 달리 실험에 사용되는 콘크리트 공시체를 레미콘에 의해 제작하는 등 실험변수들을 실제 현장조건에 맞게 사용하여 실험을 수행하였으며, 이 실험결과를 토대로 실리카-흙을 사용한 고강도 콘크리트에 황산염이 미치는 영향들을 분석하여 그 결과를 고강도 콘크리트 실용화를 위한 극대화 방안의 하나로 제시하고자 한다.

2. 황산염에 의한 콘크리트의 침해

황산염을 포함한 해수 속의 콘크리트의 화학적 침해에 관해서는 그동안 많은 연구^{(2),(5),(6)}가 되어 왔다. 그러나 콘크리트에 대한 이러한 종류의 화학적 침해는 20세기 초부터 연구되어 왔지만 지금까지도 정확한 침해의 메카니즘은 완전히 이해되지 않고 있다.

콘크리트 구조물이 흙이나 물과 접하고 있는 경우 가장 일반적이고 광범위하게 발생하는 콘크리트 구조물의 성능저하 현상은 대부분 황산염 반응(sulfate attack)에 의한 것인데, 이 반응의 결과로 그 구성물보다 더 큰 체적을 가진 고체생성물인 에트링가이트(ettringite)가 생성되어 콘크리트의 마모와 팽창균열 및 조직붕괴를 유발하게 된다. 이러한 황산염을 함유한 지하수나 토양에 콘크리트가 접하여 황산염에 노출되는 경우 반복된 건설과정을 통하여 상당량의 황산염이 콘크리트에 축적되며, 따라서 축적된 황산염과의 화

학반응이 계속하여 일어나게 된다. 이와 같은 황산염에 의하여 콘크리트 표면이 연화되어 먼저 표층의 시멘트 부분이 용해되는 콘크리트의 열화가 계속 진행되면 골재의 박리에 따른 콘크리트의 체적 및 강도의 감소가 발생하게 되어 궁극적으로 콘크리트의 성능저하를 가속화하게 된다.

2.1 콘크리트의 약화 메카니즘

황산염에 의한 콘크리트 경화체의 약화 메카니즘은 이전의 여러 연구^(5,7,8)를 통하여 볼 때 다음과 같이 3단계로 진행되는 것으로 정리될 수 있다. 여기서, 황산염의 침해는 포틀랜드시멘트에 존재하는 칼슘알루미늄에이트 수화물과 황산이온의 반응에 의하여 발생한다고 일반적으로 이해되고 있다.

- 콘크리트 경화체 속에서의 황산이온의 확산
- 여러 종류의 수화물과 황산이온의 반응으로 인한 에트리타이트, 석고와 같은 팽창성 혼합물의 생성
- 강도의 손실과 열화를 통한 콘크리트 경화체의 균열

첫 번째 단계에서의 확산은 콘크리트 입자의 공극과 침투성에 따라 영향을 받는다는 것을 뜻하고, 두 번째 단계는 시멘트의 화학적 성분과 공극내의 용해성 용액의 관계에 의한 현상을 말하며, 마지막 단계는 유해한 이온의 유입에 의해 영향을 받는 콘크리트 경화체의 붕괴(spalling)와 열화현상의 가속화를 의미하는 것이다.

2.2 실리카-흙과 황산염의 화학반응

최근들어 고강도 콘크리트용 혼화재 중 실리카-흙에 대한 관심이 점점 커지고 있는데 반해, 여러 가지 황산염에 오염된 환경에서의 실리카-흙의 영향은 아직 명확히 파악되지 않고 있으므로 이와 유사한 다른 약화 메카니즘의 이해를 통하여 잠재적인 내구성 개선을 위한 예측에 적용해 볼 필요가 있다.

실리카-흙은 실리콘(silicon)과 페로실리콘(ferro-silicon)산업의 부산물로서 SiO_2 가 주성분이며, 입자의 크기는 보통 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 이다. 그

분말도는 약 $20 \sim 430 \text{m}^2/\text{g}$ 정도이며, 화학적으로는 칼슘수산화물(CH)과 반응하여 빠른 시간내에 칼슘-실리카수화물(C-S-H; calcium-silicate hydrates) 겔을 생성하는 포졸란 반응($3\text{CH} + 2\text{S} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$; 여기서, C=CaO, S= SiO_2 , H= H_2O)⁽⁹⁾을 따른다.

지금까지의 연구^{(3), (5), (10)}에서 "포졸란은 해수나 황산마그네슘에서의 포틀랜드시멘트와는 근본적으로 친화력을 가지고 있기 때문에 포졸란 반응에 의한 부가적인 칼슘-실리카 수화물이 생성된다"고 보고된 바 있을 뿐, 위에서 언급한 바와 같이 황산염 용액 속에서의 화학작용으로 인한 실리카-흙에의 영향에 대해서는 화학적으로 정확한 설명을 할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 여러 가지 실험을 통하여 실리카-흙을 포함한 고강도 콘크리트가 황산염에 노출될 때의 시간에 따른 물리적, 화학적 변화를 고찰함으로써 그 영향을 파악하고자 하였다.

3. 실험개요

3.1 재료의 물성과 화학적 성분

3.1.1 골재

본 실험에 사용된 굵은골재는 경북 북부지역에서 생산된 쇠석을 사용하였고, 잔골재는 경북 상주에서 채취한 낙동강 지역의 천연모래를 사용하였다. 그 물리적 성질은 Table 1, Table 2와 같다.

3.1.2 시멘트

국내에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트(KS L 5201, ASTM Type I)를 사용하여 실험을 수행하였다.

3.1.3 실리카-흙

노르웨이 엘켄사(Eikem Co.)에서 생산되는 분말 실리카-흙을 고강도 콘크리트 시편제작에 사용하였다.

3.1.4 혼화재

고강도 콘크리트 제조시 사용되는 고유동화제로 멜라민계인 SIKAMENT-FF5를 사용하였다.

3.1.5 황산염 용액

실험에 사용된 황산염 용액의 종류는 10% 황

산마그네슘 용액, 10% 황산나트륨 용액 및 황산 마그네슘과 황산나트륨의 10% 혼합용액 등 3종이다.

Table 1 Properties of coarse aggregate

Grading	Weight percentage passing(%)	25mm	100
		20mm	98
		10mm	28
		5mm	1
		2.5mm	1
F.M.		6.72	
Percentage of solids(%)		56.0	
Passing No.200 sieve (%)		0.5	
Abrasion(%)		13.9	
Specific gravity of S.S.D.		2.73	
Absorption(%)		1.18	
Unit weight(kg/m ³)		1513	

Table 2 Properties of fine aggregate

F.M.	2.56
Specific gravity	2.65
Absorption(%)	1.0
Clay lumps	0.2
Loss of washing	1.1
Organic impurities	O.K.
Salt contamination	0.0
Soundness	below 3%

3.2 시편제작

본 실험에 사용된 시편은 $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형 공시체 몰드와 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 의 정육면체(큐브형) 몰드를 사용하여 제작되었는데, 이를 위하여 레미콘 공장의 배치플랜트를 통과한 콘크리트를 레미콘 트럭에 상차하여 1시간 경과한 후에 타설하였으며, 다짐은 봉상의 다짐기를 사용하여 3단계로 나누어 수행하였다. 압축강도 시험을 위한 고강도 콘크리트 공시체의 표면 마무리 방법에는 여러 가지가 있으나, 실제 현장의 조건과 일치시키기 위하여 시멘트 모르타 캡핑방법을 사용하였다. 그러나 기준이 되는 고강도 콘크리트의 정확한 압축강도를 파악하기 위하여 일부 공시체는 표면을 그라인딩하는 방법을 사용한 후 압축강도시험을 수행하였다. 양생은 온도조절이 가능한 스텐레스재질의 수조(water bath)를 사용하였다. 실험에 사용된 공시체의 제작을 위한 배합비는 Table 3과 같다. 여기서, 'B'는 실리카-흙과 시멘트를 혼합한 결합재(binder)를 의미

한다. 또한 실리카-흙을 첨가한 고강도 콘크리트 공시체는 경제성 등의 현장 실용성을 고려하여 실리카-흙의 첨가율을 15% 이하로 제한하였으며, 각 5%씩 단계별로 혼합, 제작하였다. 본 실험의 변수는 보통강도의 콘크리트(OPNSC), 낮은 물-시멘트 비를 적절하게 이용한 고강도 콘크리트(OPHSC), 실리카-흙을 사용한 고강도 콘크리트(SFHSC) 등 3종류의 배합비를 이용하여 제작된 시편과 실리카-흙의 첨가량(시멘트량의 0%~15%)에 따른 4종류의 시편(HSC-S0~HSC-S15)을 사용하였다.

Table 3 Mix proportions for cylinders

Specimen Name	SFHSC	OPHSC	OPNSC
Water-binder ratio(w/b)	0.36	0.36	0.54
Cement(kg/m ⁴)	400	450	300
Water(kg/m ⁴)	158.4	162	162
Fine aggregate(kg/m ³)	730	730	980
Coarse aggregate(kg/m ³)	1150	1100	1000
Superplasticizer(%)	1	1	0
Silica-fume(%)	10	0	0
Slump(cm)	11	13	8
Compressive strength at 28 days (kg/cm ²)	630	500	230

HSC-S0	HSC-S5	HSC-S10	HSC-S15
0.28	0.28	0.28	0.28
483	463	430	409
135.3	135.4	131.9	131.9
756	756	756	756
1124	1124	1124	1124
1.7	1.7	1.7	1.7
0	5	10	15
10	8	6	4
680	710	852	879

3.3 실험방법 및 내용

본 실험의 목적은 콘크리트의 황산염에 대한 외적 침해를 고찰하는 것으로서, 이를 위하여 콘크리트를 몰드에 타설하고 3일만에 탈형한 후 각 시편을 즉시 담수와 3종류의 황산염 용액에 침지시켜 재령 60일, 90일, 120일, 150일, 210일, 270일에 각각 아래의 사항들을 측정하였다. 여기

서 압축강도의 결정을 위하여 각 침지재령별 5개 공시체 강도의 평균값을 취하였다. 또한, 실험에 사용된 용액은 증발에 의한 수분의 손실 등과 같은 요인을 고려하여 평균 농도 10%를 상회하도록 매달 한 번씩 새로운 용액으로 교체하였다. 특히, 콘크리트의 선형팽창 및 중량변화의 측정을 위한 50mm×50mm×50mm의 정방형 시편은 콘크리트의 물성변화의 측정에 일반적으로 부적절한 면이 있지만, 황산염의 침해에 따른 콘크리트의 선형팽창은 시멘트 페이스트의 팽창이 지배적이라고 사료되므로 굵은골재의 화학적 팽창은 고려하지 않고 시멘트 페이스트의 팽창만을 고려할 목적으로 굵은골재를 제거한 후 제작되었다. 이 때, 선형팽창 측정용 장비는 50~75mm×0.01mm의 규격을 가진 마이크로미터와 미세한 무게변화를 측정하기 위해 1.210g×0.01g의 규격을 가진 전자저울을 사용하였고, 정방형 시편의 각 단면에 미리 3개 부분에 표시를 한 뒤 그 측정값을 평균하여 선형팽창량을 측정하였고, 중량변화의 측정에서는 건조로에서 시편을 완전건조시킨 후 재령 28에 측정된 콘크리트 중량을 기준으로 하였다.

- 원주형 공시체, OPNSC, OPHSC, SFHSC 계열 각 50개의 압축강도 변화
- 원주형 공시체, HSC-S0~HSC-S15 계열 각 50개의 압축강도 변화
- 큐브형 공시체, HSC-S0~HSC-S15 계열 각 20개의 팽창성 및 중량변화

4. 실험결과 및 고찰

4.1 콘크리트 시편의 압축강도 변화

황산염에 침지시킨 공시체에 대한 화학적 침해의 양상이 외관상으로는 Fig. 1과 같이 나타났는데, 그 중 황산마그네슘 10%와 황산나트륨 10%의 혼합용액에 침지된 SFHSC와 HSC-S15 계열의 공시체가 외관상으로 침식이 가장 뚜렷하게 나타났다. 이 경우 침지재령 약 90일 이후부터 화학반응에 의한 공시체의 침식현상으로 강도가 감소하기 시작하였으며, 그 후 시편에 균열이 발생함과 동시에 석고성분인 백색의 결정이 나타

나고, 재령 150일 이후부터는 골재의 분리를 통한 붕괴현상이 심각하게 나타난 것을 알 수 있었다. 아래 그림의 용액 기호에서 'W'는 담수(pure water), 'NS'는 황산나트륨 10% 용액, 'MS'는 황산마그네슘 10% 용액, 'NS+MS'는 황산나트륨 10%와 황산마그네슘 10%의 혼합용액을 각각 의미한다.

다음 Fig. 2, 3, 4는 각종 시험용액에 침지시킨 각 시편에 대한 침지재령별 압축강도를 나타낸 것으로, 배합비에 따른 공시체의 종류별로 나타내본 것이다.

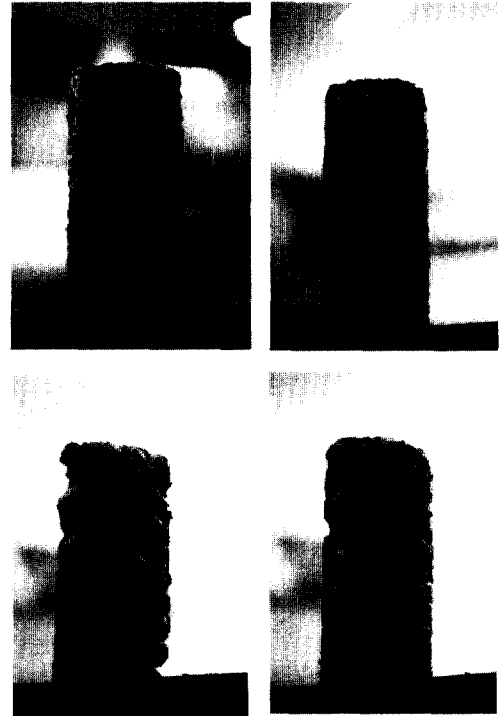


Fig. 1 Sulfate attack on concrete cylinders with silica-fume at 90, 120, 150, and 270 immersion days (clockwise)

Fig. 2는 OPHSC에 비해 단위시멘트량을 1/3 가량 줄여 제작한 보통강도 콘크리트에 대한 강도변화를 나타낸 것으로서, 황산염 용액 전반에 걸쳐 강도감소 경향을 보인다. 특히 황산나트륨과 황산마그네슘 용액에서는 OPNSC의 강도감소폭이 OPHSC에 비해 더 크게 나타났다. Fig. 3에서는 실리카-흙을 사용하지 않고 감수제만으로

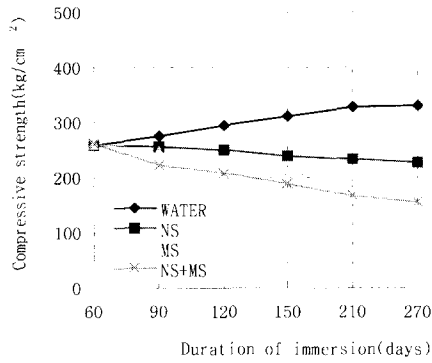


Fig. 2 Compressive strength of OPNSC

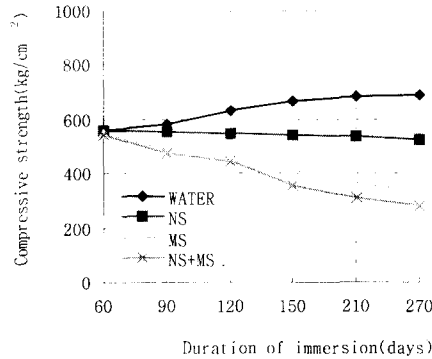


Fig. 3 Compressive strength of OPHSC

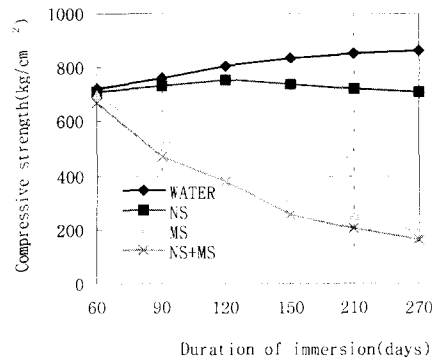


Fig. 4 Compressive strength of SFHSC

낮은 물-시멘트 비를 유지하여 제작한 고강도 콘크리트인 OPHSC 시편은 황산나트륨의 침해에 대한 강도감소는 아주 미약하나 황산마그네슘 침해에 대한 강도감소는 크게 일어났다. 혼합용액에서의 강도감소 경향은 황산마그네슘의 영향이 그 원인인 것으로 사료된다. Fig.4는 실리카-흙 10%를 포함한 고강도 콘크리트 시편의 담수와

황산염 용액에 침지시킨 후의 강도변화를 나타낸 것으로서, 황산나트륨 용액에는 저항성이 있으나 황산마그네슘 용액에서는 Fig. 3의 실리카-흙을 포함하지 않은 고강도 콘크리트인 OPHSC 시편보다 오히려 더 큰 강도감소를 일으키는 것으로 나타났다.

Fig. 5와 같이 황산나트륨 10% 용액에 침지된 대부분의 공시체는 큰 강도감소는 일어나지 않았으나, 그 중에서는 실리카-흙이 포함된 공시체의 강도감소가 가장 작게 일어났고, 물-시멘트 비가 큰(w/c= 0.54) 보통강도의 공시체가 가장 큰 강도감소를 보였다. Fig. 6의 황산마그네슘 10% 용액의 경우는 Fig. 7의 혼합용액의 경우와 같이 실리카-흙을 포함한 공시체(SFHSC)가 가장 큰 강도감소를 보였다.

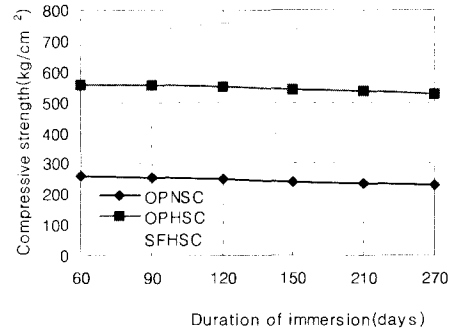


Fig. 5 Compressive strength of cylinders in NS solution

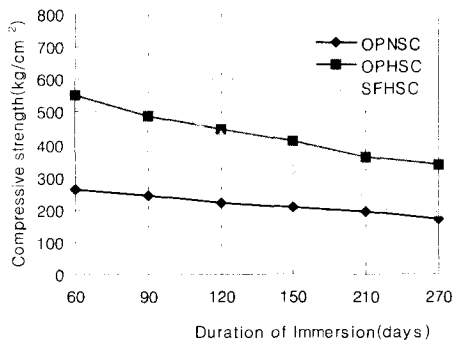


Fig. 6 Compressive strength of cylinders in MS solution

Fig. 8, 9, 10은 황산염 용액에 침지시킨 공시체의 압축강도(F_c)를 담수에 침수시킨 공시체

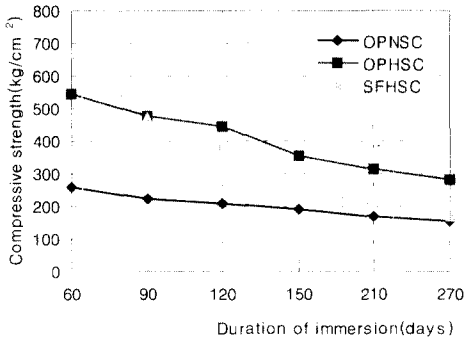


Fig. 7 Compressive strength of cylinders in NS+MS solution

의 압축강도(F_w)와 비교한 강도 감소율을 알아보기 위하여 이것의 강도비(strength ratio; $SR = F_s/F_w$)를 이용하여 나타낸 것이다. 여기서, 황산나트륨 용액에 침지시킨 경우에는 침지재령이 경과함에 따라 SFHSC 공시체가 가장 작은 강도비의 감소경향을 보인 반면(Fig. 8), 다른 두 종류의 용액에서는 SFHSC의 경우에 강도비 감소경향이 가장 크게 나타난다.(Fig. 9, Fig. 10) 특히, Fig. 11은 침지재령 270일을 기준으로 3가지 황산염 용액에 침지된 공시체의 강도감소율을 나타낸 것이다.

실리카-흙의 첨가량에 따른 배합비에 의하여 제작된 공시체(HSC-S0~HSC-S15)의 경우, 일반적으로 담수에서는 실리카-흙의 증가에 따라 강도가 증가하는 경향이 나타나지만, 본 실험에서는 실리카-흙 첨가량이 10%일 때와 15%인 경우의 강도 차이가 크게 나타나지 않았다. 황산나트륨 용액에서는 모든 공시체가 약간의 강도감소 현상을 보이는 반면, 황산마그네슘 용액에 침지시

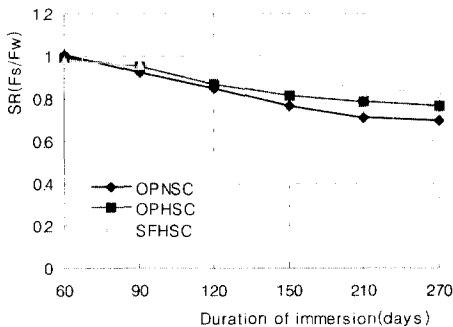


Fig. 8 Strength ratio of cylinders in NS solution

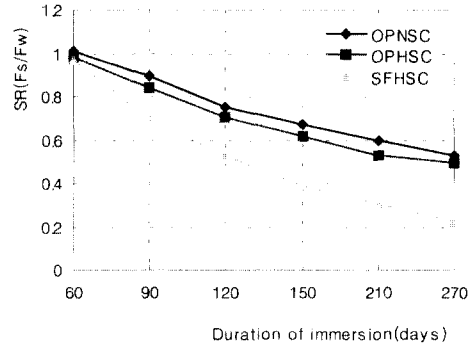


Fig. 9 Strength ratio of cylinders in MS solution

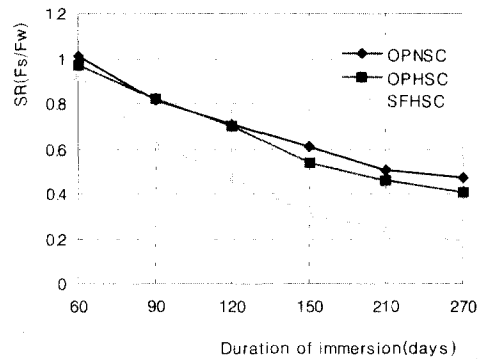


Fig. 10 Strength ratio of cylinders in NS+MS solution

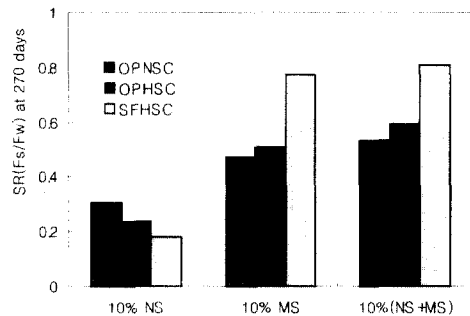


Fig. 11 Strength ratio of cylinders in sulfate solutions at 270 immersion days

킨 경우에는 실리카-흙을 10% 이상 사용한 공시체(HSC-S10, HSC-S15)가 강도감소 현상이 현저하게 나타나므로 오히려 실리카-흙을 적게 사용한 공시체 보다 작은 압축강도 값(270일 기준)을 가지게 된다.(Fig. 12~Fig. 14)

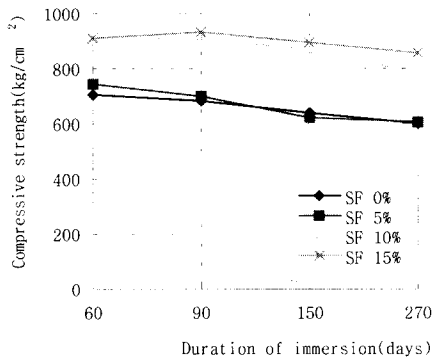


Fig. 12 Compressive strength of cylinders by silica-fume content in NS solution

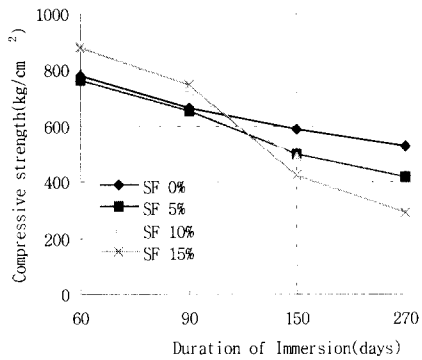


Fig. 13 Compressive strength of cylinders by silica-fume content in MS solution

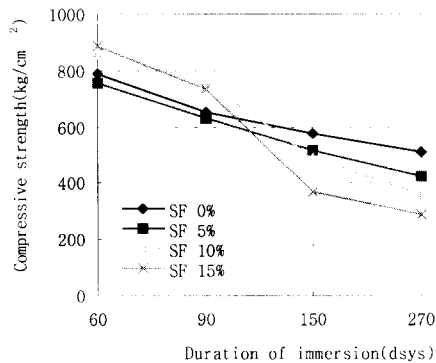


Fig. 14 Compressive strength of cylinders by silica-fume content in NS+MS solution

4.2 콘크리트의 선형팽창

콘크리트 시편의 선형팽창량은 Fig. 15, 16에 나타난 바와 같이 담수에 침수시킨 경우에는 침

가된 실리카-흙의 양이 많을수록 작게 나타내고, 황산나트륨 용액에서는 실리카-흙 사용량이 10% 이상 배합된 공시체의 선형팽창은 그 이하인 경우에 비해 침지재령 150일 기준으로 약 0.23% 작게 나타낸다. 황산마그네슘 용액의 경우 침지재령 150일에는 실리카-흙의 사용량에 따라 큰 차이를 보이지 않으나 270일이 경과한 후에는 실리카-흙의 사용량이 증가할수록 선형팽창량도 증가한다.

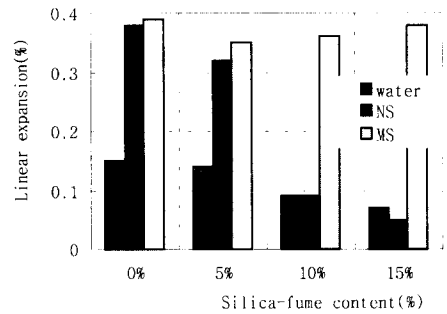


Fig. 15 Linear expansion of cubes at 150 immersion days

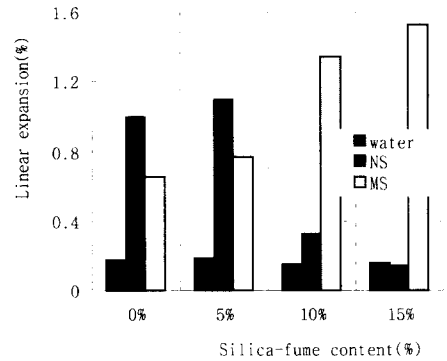


Fig. 16 Linear expansion of cubes at 270 immersion days

4.3 콘크리트의 중량변화

고강도 콘크리트 공시체 제작시 혼화재없이 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 경우와 시멘트의 15%를 실리카-흙으로 치환한 경우에 대해 콘크리트 중량변화를 비교하였다. 포틀랜드시멘트만을 사용한 공시체는 Fig. 17과 같이 침지한 지 90일이 경과한 공시체에서 3가지 황산염 용액 모두에 대하여 중량감소현상을 보였는데, 그 중 황

산마그네슘 용액에 침지시킨 공시체가 2.5%로 가장 큰 중량감소를 나타내었다. 210일이 경과한 후에는 담수와 황산나트륨 용액에서 각각 0.2%, 2.3%의 중량증가현상을 나타낸 반면, 황산마그네슘 용액에 침지시킨 공시체는 5.8% 중량감소를 보이는 등 침지기간에 관계없이 황산마그네슘 용액에서 가장 큰 중량감소를 나타내었다.

단위시멘트량의 15%를 실리카-흙으로 치환한 공시체를 담수와 황산염 용액에 침지시킨지 90일이 경과한 후의 결과도 포틀랜드시멘트만을 사용한 경우와 비슷한 경향을 보이지만, Fig. 18과 같이 담수에 침수시킨 공시체만이 0.1% 중량증가를 보이고, 황산나트륨과 황산마그네슘 용액에서는 각각 0.1%, 10.5%의 중량감소를 나타내었다. 담수와 황산나트륨 용액에 침지시킨지 210일이 경과한 후에는 1.1%, 0.6%의 중량증가를 나타낸 반면, 황산마그네슘 용액에서는 그 중량이 20.7%나 감소하였다. 결과적으로 Fig. 17 및 18에 나타난 고강도 콘크리트의 중량증가는 포틀랜드시멘트만을 사용하여 제작한 공시체를 황산나트륨 용액에 침지시킨 경우에 가장 크게 일어난 반면, 중량감소 현상은 실리카-흙을 15% 사용한 공시체를 황산마그네슘 용액에 침지시켰을 때 가장 크게 발생한다.

이와 같은 황산마그네슘 용액에서의 중량감소 경향은 C-S-H겔의 분해와 비결합질의 M-S-H의 생성으로 인한 콘크리트 경화체의 약화가 그 주된 원인이라고 할 수 있다. 또한, 실리카-흙을 포함한 시멘트의 경우에 가장 큰 중량감소를 보이는 것은 황산마그네슘이 일으키는 시멘트의 분해작용을 실리카-흙 성분이 더욱 가속화시키는 것으로 사료된다.

4.4 황산염 침해의 메카니즘적 고찰

황산염이 콘크리트에 침해를 일으키는 가장 큰 요인은 칼슘-실리카 수화물의 분해 및 에트링가이트의 생성으로 인한 경화체의 팽창인 것으로 여러 연구^{(11), (12), (13)}를 통하여 나타나고 있다. 그러나 황산염 용액에서 실리카-흙 자체의 영향으로 인하여 어떠한 화학적 반응이 일어나는가에 대한 명확한 메카니즘은 아직까지는 밝혀지지 않

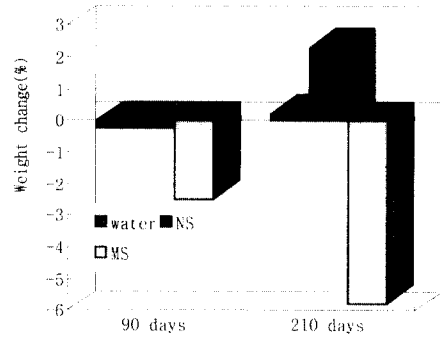


Fig. 17 Weight-change of HSC-S0

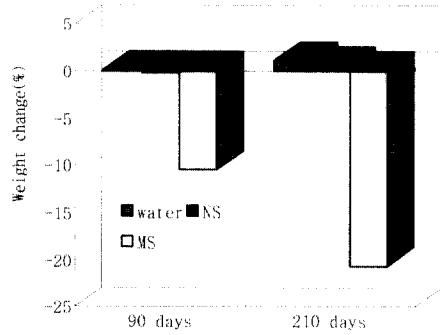


Fig. 18 Weight-change of HSC-S15

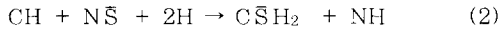
았으며, 다만 포졸란과 황산염이 일으키는 다음과 같은 화학반응을 통하여 메카니즘을 유추해볼 수 있을 것이다.

일반적으로 포졸란은 포틀랜드 시멘트의 수산화칼슘(CH:calcium hydroxide)와 화학적으로 반응하여 강도증진에 기여하는 결합체인 C-S-H 겔을 생성하는 것으로 알려져 있으며, 그 반응속도는 상당히 느리다. 그러나 황산염의 침해를 받는 실리카-흙은 분말도가 극도로 미세해서 포졸란과는 다르게 CH와 빠르게 반응하여 포틀랜드 시멘트의 수화물과는 다른 종류의 수화물을 생성하는 격렬한 반응을 일으키게 된다. 여기서, 부가적으로 생성되는 C-S-H 겔은 포틀랜드 시멘트의 Alite, Belite의 수화에 의해 생성되는 것과는 그 성분이 다른 'pozzolanic C-S-H gel'이다. 이러한 황산염 침해의 메카니즘을 요약하면 다음과 같다.



$N\bar{S}$ (sodium sulfate)와 $M\bar{S}$ (magnesium sulfate)는 CH와 반응하여 석고(gypsum, $C\bar{S}H_2$), MH, NH를 생성한다.

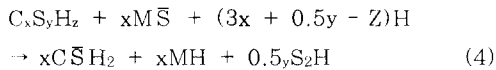
sodium hydroxide :



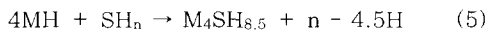
magnesium hydroxide :



여기서, $M\bar{S}$ 는 C-S-H 겔과 다음 (식4)와 같이 반응한다.



이 반응으로 생성된 석고는 칼슘알루미늄에이트(C_3A)와 반응하여 보다 많은 에트링가이트를 생성하며, 그리고 이 반응으로 생성된 MH와 실리카수화물은 비결합질의 생성물($M_4SH_{8.5}$)을 다음과 같이 형성하게 된다.



이와 같이 결합질의 C-S-H 겔이 비결합질의 M-S-H(magnesium silicate hydrate)로 분해되는 과정은 황산마그네슘 용액에 의해서만 이루어지고, 황산나트륨 용액에서는 Na^+ 이온은 C-S-H 겔에서 Ca^{2+} 이온으로 바뀔 수 없으므로 (식4), (식5)와 같은 반응은 일어나지 않기 때문에 황산마그네슘에 의한 침해가 황산나트륨에 비해 크게 나타나는 것으로 사료된다.

5. 결 론

실리카-흙을 사용한 고강도 콘크리트, 낮은 물-시멘트 비의 고강도 콘크리트, 보통강도의 콘크리트 등의 침지시간에 따른 압축강도 변화와 실리카-흙의 첨가량에 따른 압축강도 변화, 그리고 실리카-흙의 첨가량에 따른 팽창성 및 중량변화 등을 조사하기 위하여 담수와 3가지 종류의 황산염

용액에 여러 가지 배합비에 의해 제작된 공시체를 침지시켜 재령 60일, 90일, 120일, 150일, 210일, 270일에 대한 값을 측정하였다. 본 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 콘크리트의 약화를 가져오는 직접적인 원인이 되는 황산나트륨과 황산마그네슘은 장기간에 걸쳐 구조물에 작용하며, 특히 강도감소에 있어서는 황산마그네슘의 영향이 그 지배적인 요인이 된다.

2) 실리카-흙을 포함한 고강도 콘크리트는 황산나트륨의 침해에 대해서는 가장 효과적이지만, 황산마그네슘의 침해에 대한 저항성은 실리카-흙의 양이 증가할수록 오히려 감소한다.

3) 물-시멘트 비가 작은 콘크리트일수록 황산나트륨의 침해에 대한 저항성이 크다.

4) 본 실험에서 단위시멘트량을 1.5배 많게 한 OPHSC가 황산마그네슘 용액에서 OPNSC에 비해 투수성이 작음에도 불구하고 강도감소가 크게 나타나는 것은 배합설계에 있어 단위시멘트량을 많이 사용하는 것이 황산마그네슘에 대한 저항성을 작게 하는 결과를 보인다.

5) 황산나트륨 용액에서 공시체의 선형팽창은 실리카-흙의 양이 증가할수록 작게 일어나지만 황산마그네슘 용액에서는 실리카-흙의 사용량이 증가할수록 선형팽창이 크게 일어난다.

6) 황산나트륨 용액에서는 혼화재를 첨가하지 않은 OPHSC가 가장 큰 중량증가를 나타냈고, 황산마그네슘 용액에서는 실리카-흙을 단위시멘트량의 15% 치환하여 제작한 HSC-S15 공시체가 가장 큰 중량감소를 나타내었다.

이상의 결론으로 볼 때, 고강도 콘크리트의 제작에는 C_3A 함유량이 낮은 시멘트를 선정해야 할 것이며, 또한 실리카-흙을 포함한 고강도 콘크리트는 황산나트륨의 침해에 대해서는 강한 저항성을 나타내지만 황산마그네슘에 대해서는 심각한 침해를 일으키므로 인하여 황산마그네슘에 노출될 우려가 있는 콘크리트 구조물에 고강도를 발현하기 위하여 실리카-흙을 사용하는 것은 피해야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김영웅, "인천국제공항 콘크리트의 내염설계 현황 및 특성", 한국콘크리트학회지, 제9권4호, 1997.8, pp. 49~56
2. Roy, D. M., "Mechanisms of cement paste degradation due to chemical and physical factors," Proceedings of International Conference on Chemistry of Cements, 8th, Rio de Janeiro, Vol.402, 1986, pp.1~19
3. Mehta, P. K., "Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes," Cement and Concrete Research, Vol.15, No.6, 1985, pp.969~978.
4. Cohen, M. D. and Bentur, A., "Durability of Portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions," ACI Materials Journal, Vol.85, No.3, 1988, pp.148~157
5. Lea, F. M., The Chemistry of Cement and Concrete, 3rd Edition, Chemical Publishing Co., New York, 1971, p.727
6. Mather, K., "Current research in sulfate resistance at the waterways experiment station," Proceedings of George Verbeck Symp. on Sulfate Resistance of Concrete, ACI SP-77, ACI, Detroit, 1982
7. Thorvaldsen, T., "Chemical aspects of the durability of cement products," Proceedings of 3rd International Congress on the Chemistry of Cement, Cement and Concrete Association, London, 1954, pp.436~465
8. Mehta, P. K., "Mechanism of sulfate attack on Portland cement - another look," Cement and Concrete Research, Vol.13, No.3, 1983, pp.401~406
9. Nelson, J. A. and Young, J. F., "Additions of colloidal silicas and silicates to Portland cement pastes," Cement and Concrete Research, Vol.7, No.3, 1977, pp.277~282
10. Mehta, P.K., "Chemical attack of low water cement ratio concretes containing latex or silica fume as admixtures," Proceedings of RILEM/ACI Symposium On Technology of Concrete when Pozzolans, Slags and Chemical Admixtures are Used, Monterey, Mexico, 1985
11. Bentur, A., Goldman, A., and Ben-Bassat, M., "High performance concretes in concentrated magnesium sulfates, magnesium chlorides and sodium sulfates solutions," Proceedings of the International Conference on Concrete Under Severe Conditions, CONSEC'95, Vol.2, Aug. 1995, pp.1237~1246
12. Silva Filho, L. C. P. and Agopyan, V., "Effect of silica fume on concretes against sulfate attack," Proceedings of the International Conference on Concrete Under Severe Conditions, CONSEC'95, Vol.2, Aug. 1995, pp.1227~1236
13. Lawrence, C. D., "Sulphate attack on concrete," Magazine of Concrete Research, Vol.42, No.153, 1990, pp.249~264
14. Calleja, J., "Durability," Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 1980, Editions Septima, Paris, Vol.1, pp.2/1~2/48
15. Mehta, P. K., "Pozzolanic and cementitious by-products in concrete," Proceedings of the 3rd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI, Detroit, 1989, pp.1~44
16. Sarkar, S. L. and Aitcin, P. C., "Dissolution rate of silica fume in very high strength concrete," Cement and Concrete Research, Vol.17, 1987, pp.591~601
17. Sarkar, S. L., "Microstructure of very low water/cement silica fume concrete," Microscope, Vol.38, 1990, pp.141~152
18. Cohen, M. D., "Theories of expansion of sulfoaluminate-type expansive cements: schools of thought," Cement and Concrete Research, Vol.13, No.6, 1983, pp.809~818
19. Hanson, W. C., "Attack on Portland cement concrete by Al-Kali soils and waters - a critical review," Highway Research Record No.113, Highway Research Board, 1966, pp.1~32

요 약

화학적으로 유해한 환경에 놓인 콘크리트 구조물은 필연적으로 그 기능이 악화되므로 혼화재를 포함한 고강도 콘크리트 또는 혼화재 그 자체가 화학물질에 오염된 환경하에서 어떤 변화를 일으키는가에 대한 연구의 필요성이 점점 증대되고 있다. 따라서 본 논문에서는 건설현장에서 가장 흔히 사용되는 보통강도 콘크리트와 실리카-흙을 포함한 포틀랜드시멘트 경화체인 고강도 콘크리트가 황산염의 침해를 받는 경우에 일어나는 강도특성과 물성변화를 조사하기 위하여 담수와 함께 황산나트륨, 황산마그네슘, 황산나트륨과 황산마그네슘의 혼합용액 등 여러 종류의 황산염 용액에 실리카-흙을 사용한 고강도 콘크리트, 낮은 물-시멘트 비의 고강도 콘크리트, 보통강도의 콘크리트 등의 시험체들을 270일간 침지시켜 침지시간에 따른 압축강도 변화와 실리카-흙의 첨가량에 따른 압축강도 변화, 그리고 실리카-흙의 첨가량에 따른 선형팽창량 및 중량변화 등에 관한 실험을 수행하였다. 이에 대한 실험결과를 토대로 실리카-흙을 사용한 고강도 콘크리트에 황산염이 미치는 영향을 분석하여 고강도 콘크리트의 실용성을 극대화하기 위한 방안에 대하여 고찰해보았다. 그 결과, 실리카-흙을 포함한 고강도 콘크리트는 황산나트륨의 침해에 대해서는 강한 저항성을 나타내지만 황산마그네슘에 대해서는 심각한 침해를 일으키는 것으로 나타났으므로 황산마그네슘에 노출될 우려가 있는 콘크리트 구조물에 고강도를 발현하기 위하여 실리카-흙을 사용하는 것은 구조적으로 큰 문제가 발생할 것으로 사료된다.

(접수일자 : 1998. 2. 7)