

혼화재 종류가 슛크리트 내구성에 미치는 영향에 관한 연구

백신원[†] · 정덕추* · 김의성*

한경대학교 안전공학과 · *현대산업개발
(2004. 2. 4. 접수 / 2004. 6. 10. 채택)

An Experimental Study on the Effect of Mineral Admixtures for the Durability of Shotcrete

Shin-Won Paik[†] · Dok-Chu Chung* · Eu-Sung Kim*

Department of Safety Engineering, Hankyong National University
*Hyundai Industrial Development Corporation

(Received February 4, 2004 / Accepted June 10, 2004)

Abstract : Shotcrete needs the enough durability without deterioration for life time. But shotcrete is being deteriorated according to aging like concrete by internal causes within itself and by external causes which can be physical, chemical, or mechanical. Durable shotcrete can be made by increasing the cement content, adding chemical and mineral admixtures and so on. So, in this study, chloride ion penetration test, freeze and thaw test, neutralization test were conducted to examine the durability characteristics of shotcrete with mineral admixtures such as silica fume, blast-furnace slag and fly ash. These results indicate that shotcrete with silica fume is durable. Therefore, the present study provides a firm base to make high performance shotcrete.

Key Words : durability, mineral admixture, silica fume, blast-furnace slag, fly ash

1. 서 론

슛크리트는 굴착면 위에 고속으로 뿜어 붙여지는 모르타르나 콘크리트를 통칭하는 용어로, 개발초기에는 Gunit, Guncrete, Pneucrete, Blastcrete, Blocrete, Jetcrete 등의 여러 이름으로 불려지다가 미국 철도 공학협회(AREA)에서 1930년대에 최초로 "Shotcrete"라는 명칭으로 소개하여 지금까지 이르고 있다¹⁻³⁾.

슛크리트는 본질적으로 보통 콘크리트와 같으나 압축공기로 뿜어 붙여 시공을 한다는 점에서 일반 콘크리트와 차이를 나타낸다. 즉, 슛크리트는 터널 굴착 직후에 굴착면에 급결성의 콘크리트를 뿜어 붙여서 밀착시킴으로써 원지반의 표층부와 협동해서 원지반 내부의 이완을 억제하고, 표면의 요철을 매끄럽게 마무리함으로써 응력 집중에 의한 원지반 균열의 발달을 억제함과 동시에 대기작용에 의한

암반의 풍화를 방지하여 굴착면의 안정을 도모하는 것이다¹⁻⁴⁾.

슛크리트의 내구성에 관한 연구는 북유럽을 중심으로 1990년대 중반부터 활발히 논의되기 시작하였으나 아직까지 국내에서는 이에 대한 연구가 거의 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트에 다양하게 적용되고 있는 혼화재인 실리카흄, 슬래그, 플라이애쉬 등을 슛크리트에 적용하여 다양한 내구특성 실험을 통해 내구특성을 파악하고, 고내구성의 슛크리트를 현장에 적용할 수 있는 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 실험변수

다양한 혼화재의 효과를 분석하기 위해 기존 문헌 분석을 통해 혼화재 별로 적정 혼입률이라 판단되는 혼입률을 추정하여 실험변수로 선정하였다. 실리카흄의 경우 시멘트 중량대비 5%, 10%, 슬래그 10%, 20%, 플라이 애쉬 15%, 30%까지 첨가하여 각

[†]To whom correspondence should be addressed.
paiksw@hnu.hankyong.ac.kr

Table 1. Experimental variable definition

Series	Contents	Notes
NO	Non mineral admixture	Alkali-free accelerator Superplasticizer
SF05	Silica fume 5%	Alkali-free accelerator Superplasticizer
SF10	Silica fume 10%	
SG10	Slag 10%	Alkali-free accelerator Superplasticizer
SG20	Slag 20%	
FA15	Fly ash 15%	Alkali-free accelerator Superplasticizer
FA30	Fly ash 30%	

Table 2. Mixing properties(kg/m³)

Variable	w/b	C	W	Aggregate		Admixture		
				G	S	S/F	F/A	Slag
NO	0.40	550.0	220	785	774	0	0	0
SF05		522.5				27.5	-	-
SF10		495.0				55.0	-	-
SG10		495.0				-	55.0	-
SG20		440.0				-	110.0	-
FA15		467.5				-	-	82.5
FA30		435.0				-	-	165.0

각의 혼화제가 숏크리트의 내구성향상에 미치는 효과 및 최적 혼입률을 판단하고자 하였다.

본 연구에서 사용한 각각의 변수와 특징은 아래 Table 1과 같으며, 이 때의 배합은 Table 2와 같다.

3. 실험방법

3.1. 실험개요

콘크리트의 내구특성은 여러 가지 방법에 의해 평가될 수 있다. 그 중에서도 가장 널리 쓰이는 방법으로 동결융해, 중성화, 염소이온 투과시험 등을 들 수 있다. 따라서 본 논문에서는 숏크리트의 내구성능을 평가하기 위해서 위의 세 가지 실험을 기본으로 하고 재령에 따른 압축강도와 휨강도를 측정하였다.

또한 숏크리트 내구성 영향인자들 중에서 현재 콘크리트의 내구성을 향상시키기 위해 가장 널리 이용되는 혼화제인 실리카흄, 플라이애쉬, 슬래그 등을 변수로 하였다.

본 연구에서는 현장에서 숏크리트 장비를 이용하여 숏크리트를 패널에 타설 후 24시간 뒤에 시편을 채취하여 수중양생을 실시하였다. 압축강도, 중성화, 염소이온 투과시험에 사용되는 원형 시편은 패널 타설 후 $\phi 10\text{cm}$ 의 코어채취기를 통해 채취하였고, 휨강도 시험 및 동결융해 저항성 시험에 사용되

는 직사각형 시편은 패널 타설 후 전면 커팅에 의해 제작하였다.

3.2. 염소이온 투과시험

염소이온 투과시험은 ASTM C1202-91(Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration^{5,6})의 방법에 의거하여 수행하였다. 28일 수중 양생한 직경 10cm의 콘크리트 시편을 길이가 5cm가 되도록 절단한 다음 실험을 수행하기 전까지 상대습도 95%이상 유지시킨다. 실험시 시편은 Applied Voltage Cell 에 고정시키고 회로 구성을 한다. 이 회로에서 전원은 $60 \pm 0.1\text{V}$ 의 직류를 안정적으로 공급할 수 있어야 한다. 실험을 수행하는 동안 전해질 용액이 세지 않게 하기 위하여 사용되는 Sealant는 고무제품이고 무게는 20~40g 정도의 것으로 Cell 과 시편사이를 고정시킨다.

전류를 측정하는 방법으로는 기지의 저항체를 연결하여 전압을 측정함으로써 얻을 수 있는데 이 때에 사용되는 저항으로는 콘크리트 시편에 적용되는 전압에 영향이 적도록 하기 위하여 가능한 작은 저항을 사용하는 데 본 실험에서는 0.1Ω 을 사용하였다. 콘크리트 시편의 노출된 부분은 불투수성의 재료로 덮개를 하는데 이는 실험이 진행되는 동안 콘크리트 표면이 건조되어 염소이온의 투과에 영향을 미치는 것을 방지하기 위함이다.

A.V. Cell의 (-) 전극에 3.0%의 NaCl 용액을 채우고 (+) 전극 쪽에는 0.3N의 NaOH 용액을 채운다. 3% NaCl 용액은 물 900ml 에 NaCl 30g을 용해시킨 후 물을 가하여 1000ml의 용액을 만들고 0.3N NaOH는 물 1L에 NaOH 12g을 용해시켜 제조한다. 실험시 용액의 초기 온도는 20~25℃를 유지하도록 한다. 또한 시험 중 용액의 온도는 90℃이하가 되도록 한다.

시험중 30분 마다 0.1Ω 의 저항에 걸리는 전압을 Data Logger로 측정하여 기록한다. 이 때 전압은 0.1mV까지 측정 가능해야 하고 $\pm 0.1\%$ 의 정도를 가진 장치이어야 한다. 측정된 전압값은 다음 식 (1)에 의하여 전류치로 환산한다.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{0.1} \quad (1)$$

여기서, I = 전류(Ampere, A)

V = 전압(Volts, V)

R = 저항(Ohms, Ω)

염소이온 투과실험은 매 시편마다 6시간이 소요되고 30분 간격으로 전압값을 측정한다. 측정된 전압을 전류를 환산하여 다음 식 (2)를 이용하여 회로를 통과한 총 전하량을 산정한다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2)$$

여기서, Q = 회로를 통과한 전하량(Coulombs)

I_n = 실험시작후 n분이 경과하였을 때의 전류(Amperes)

3.3. 동결융해 시험

콘크리트 구조물은 노출되는 환경과 구조물 자체의 내적 원인에 의하여 동결융해 환경에 대하여 성능 저하를 일으키고 가장 보편적인 경우는 콘크리트 표면에서의 박리나 탈락 등을 들 수 있다.

기존의 연구 결과에 의하면 콘크리트의 동결융해 저항성을 증진시키기 위해서 공기연행이 가장 효율적인 방법으로 밝혀져 있는데 숯크리트의 경우에서도 동결융해에 대한 저항성을 평가함으로써 숯크리트 라이닝의 내구성능을 평가하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

동결융해 시험은 KS F 2456 급속동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법의 규정에 의해 수행하였으며, 시편은 현장타설 숯크리트 블록으로부터 채취한 8×10×40cm 의 각주형 공시체를 14일간 기건 양생한 후 동결융해 시험을 수행하였다. 구체적인 시험은 두 가지 과정으로 수행할 수 있는데 시험방법 A는 수중급속 동결융해시험, 시험방법 B는 공기 중에서 급속동결하여 수중에서 융해하는 방법이다. 두 방법 모두 특별히 규정된 시험절차에 의해 콘크리트의 동결융해저항성에 대한 콘크리트 특성의 변동성을 결정하는데 그 의도가 있으나, 직접적으로 특정한 콘크리트 구조의 사용연한에 대한 정성적인 예측을 의도하는 것은 아니다. 일반적으로 수중급속 동결융해 시험법이 공기 중 급속 동결융해 시험법보다 더 큰 성능저하를 유발하는 것으로 알려져 있다. 본 실험의 경우 수중 급속 동결융해 시험법에 따라 수행하였다.

3.4. 중성화 시험

축진중성화는 축진중성화 시험기를 사용하여 수행하며 CO₂ 농도 10%, 온도 40℃, 상대습도 60%로 시험 조건을 설정하였다. 시편은 염수침지시편과 같은 것을 사용하며, 역시 이산화탄소의 침투가 일방향이 되도록 옆면은 에폭시로 코팅한 후 1주간 축진

중성화하고 1주간 기중 방치하는 방법을 택하였다.

콘크리트의 중성화를 진단하는 방법으로는 여러 가지가 제시되어 있으나 페놀프탈레인 용액 분무법을 사용하는 것이 일반적이다. 이 방법은 콘크리트의 절단면에 페놀프탈레인-알코올 용액을 분무기 등으로 분사하여 자적색으로 변하지 않는 부분을 중성화한 것으로 보고 깊이를 재는 것으로 이 방법을 사용할 경우에는 수산화 칼슘이나 탄산칼슘 등 생성물의 일부가 유실되거나 가수분해되는 것을 피하기 위해 할렬면을 이용하는 것이 좋다.

4. 실험결과

3.1. 압축강도

실리카흙의 경우 숯크리트의 강도를 증진시키기 위해 가장 널리 사용되는 혼화재로서 본 실험에서는 시멘트 중량의 5%와 10%를 혼입하여 그 성능과 효과를 분석하고자 하였다. Fig. 1에서 보듯이 실리카흙을 혼입한 숯크리트의 압축강도 특성을 보면 실리카흙을 혼입한 숯크리트의 압축강도가 첨가하지 않을 때보다 높은 압축강도를 보임을 명확히 알 수 있다. 또한 혼입량의 적정성 측면에서 보면 시멘트 중량의 10%를 첨가하였을 때가 좀 더 높은 강도 증진 효과를 볼 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 2에는 슬래그를 혼입한 숯크리트의 압축강도 실험결과를 나타내었다. 슬래그의 경우 혼입량에 따라 약간의 강도 증진 효과를 있는 것으로 나타났으나 콘크리트에서 보여지는 장기 강도 증진 효과는 미미한 것으로 나타났다. 또한 시멘트 중량의 10%를 첨가한 경우와 20%를 첨가한 경우의 결과가 거의 비슷하게 나와 20% 정도까지는 적절히 사용되어도 강도 측면에서는 무방할 것으로 판단된다.

플라이 애쉬는 콘크리트 혼화재로는 널리 인정되어 활발히 사용되는 혼화 재료이다. 특히 장기적인 내구성 증진을 위해서는 거의 모든 콘크리트 배합에서 사용되고 있으며 강도 측면에서도 28일 이후의 강도를 증진시키는 것으로 알려져 있다. Fig. 3에는 플라이 애쉬를 혼입한 숯크리트의 강도 발현을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 28일 이전의 강도는 플라이 애쉬를 혼입하지 않은 숯크리트가 조금 높게 나오고 있으나 56일 강도에서는 플라이 애쉬 15% 혼입한 숯크리트가 더 높게 나오고 있어 콘크리트에서 보여지는 플라이애쉬의 장기강도 증진 효과가 숯크리트에서도 보여진다고 볼 수 있다.

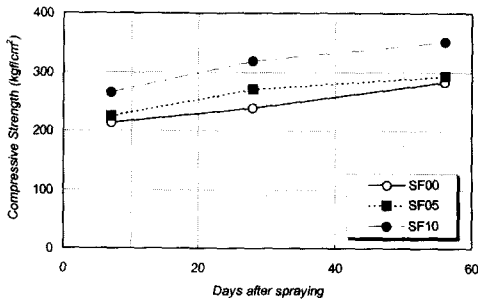


Fig. 1. Compressive strength for different silica fume contents

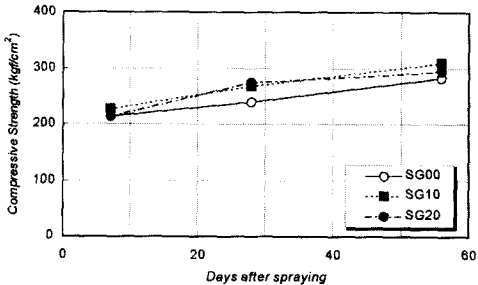


Fig. 2. Compressive strength for different slag contents

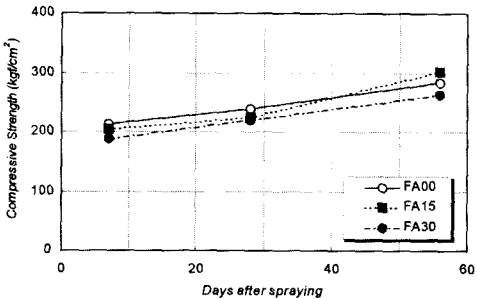


Fig. 3. Compressive strength for different fly ash contents

3.2. 염소이온 투과시험

실리카흙의 경우 5%와 10% 첨가시 모두 뛰어난 투수율 감소 효과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 실리카흙 5%를 혼입한 SF05의 경우 ASTM의 투수 성능 분류에 따르면 3등급에 해당하며, SF10의 경우 4등급에 해당하는 높은 성능을 보이고 있다. 따라서 실리카흙의 경우 숯크리트의 강도 뿐만 아니라 내구성 측면에서도 꼭 필요한 요소로 판단된다.

플라이 애쉬와 슬래그 미분말의 경우도 시멘트만을 사용한 숯크리트에 비해 어느 정도의 투수율을 저하에 기여하는 것으로 나타났다. 슬래그 미분말의 경우 혼입량이 20%까지 투수율이 저하되었으나 플라이 애쉬의 경우는 앞서 강도 특성과 비슷하게 15% 혼입한 경우가 가장 좋은 성능을 보였다. 그리

나 두 가지 혼화재 모두 혼입량에 상관없이 상당히 높은 투수율을 보여 내구성 측면에서 사용에 좀더 신중할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.3. 동결융해 시험

실리카흙을 혼입한 숯크리트의 동결융해 저항성을 살펴보면 혼입량에 따라 큰 차이가 없을 뿐 아니라 기준 배합과도 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 투수율 실험결과에서 보듯이 실리카흙을 혼입함에 따라 내부 공극이 현저히 감소하게 되어 동해에 취약할 것으로 예상되나 이에 반해 실리카흙 혼입에 따른 강도 향상이 동반되어 두 가지 효과가 상쇄되면서 혼입량에 따른 영향없이 비슷한 내동해 성능을 보이는 것으로 판단된다.

플라이애쉬와 슬래그 미분말을 혼입한 숯크리트의 경우 동해에 대하여 상당히 높은 저항성을 보이는 것으로 나타났다. 이는 두 가지의 포졸란 재료에 의해 꾸준한 강도 발현이 이루어지면서 상대적으로 성능저하가 적게 발생하는데 따른 것으로 판단된다. 또한 혼입량에 따른 영향을 살펴보면 슬래그의 경우 혼입량 10%에서 월등히 높은 내동해성능을 보이고 있으며 플라이 애쉬의 경우 15%와 30% 모두 비슷한 성능을 나타내고 있다. 따라서 이들 혼화재의 경우 적정 혼입량의 산정이 중요하다고 할 수 있다.

Table 3. Chloride ion penetration test results

Series	Charge passed (Coulombs)	Remarks
NO(SF00,SG00,FA00)	13,844	
SF05	3,121	
SF10	1,308	
SG10	10,449	
SG20	8,320	
FA15	10,287	
FA30	11,626	

Table 4. The results of freeze and thaw test

Specimens	Initial Value	300 Cycles	Relative Dynamic Modulus (%)
NO(SF00,SG00,FA00)	1734	1600	85.1
SF05	1775	1693	91.0
SF10	1751	1650	88.8
SG10	1707	1682	97.1
SG20	1746	1656	90.0
FA15	1657	1612	94.6
FA30	1718	1671	94.6

3.4. 중성화 시험

혼화제에 따른 촉진중성화 깊이를 Fig. 4에서 Fig. 6까지 나타내었다. 먼저 실리카흄의 경우 혼입량이 증가할수록 중성화 깊이가 현저히 줄어들음을 알 수 있다. 이는 실리카흄에 의해 조직이 치밀해지면서 중성화에 의한 열화 가능성이 감소하는 것으로 판단된다.

슬래그나 플라이애쉬의 경우 혼입에 따라 오히려 중성화 깊이가 증가하는 경향을 보이고 있는데 슬래그의 경우 20%까지는 큰 영향이 없는 것으로 보이나 플라이 애쉬의 경우에는 시멘트 중량 대비 30%를 첨가할 경우 중성화에 의한 심각한 열화가 우려된다. 따라서 다른 특성을 종합하여 적절한 혼입량을 산정하여야 할 것으로 판단된다.

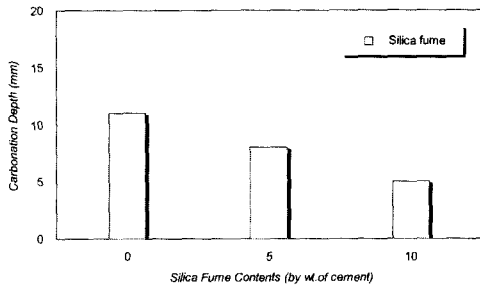


Fig. 4. Carbonation depth for different silica fume contents

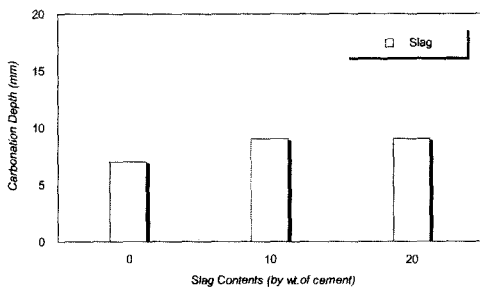


Fig. 5. Carbonation depth for different slag contents

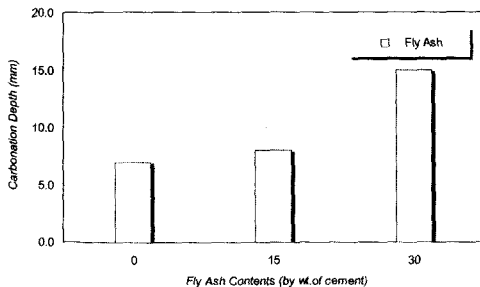


Fig. 6. Carbonation depth for different fly ash contents

4. 결론

본 연구에서는 슛크리트의 내구특성을 알아보기 위해 실리카흄, 슬래그, 플라이애쉬의 첨가량에 따라 슛크리팅을 하여 압축강도, 염소이온 투과시험, 동결융해시험, 중성화촉진시험 등을 광범위하게 수행하였다.

따라서, 이러한 연구결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었으며, 이러한 결과들은 고내구성의 고성능 슛크리트를 만드는 데 있어 기초자료로 제공될 수 있을 것으로 사료된다.

1) 플라이 애쉬를 혼입한 슛크리트의 강도 및 내구성 실험 결과 시멘트 중량 대비 15%를 혼입한 슛크리트가 가장 좋은 결과를 나타냈으며 30%를 첨가한 경우 오히려 성능 감소효과를 보이는 경우도 있는 것으로 나타났다. 이는 플라이 애쉬를 혼입한 기존 콘크리트 실험결과와 어느 정도 일치한 것으로 플라이 애쉬의 혼입 사용시 적정량을 산정하는 것이 중요함을 알 수 있다.

2) 혼화제로 슬래그를 사용한 슛크리트의 경우 시멘트 중량 대비 10%와 20%를 혼입한 경우의 성능은 비슷한 결과를 보였으나 슬래그 투입에 따른 성능 향상 효과는 뚜렷한 것으로 나타났다.

3) 실리카흄의 경우 슛크리트의 고성능화 및 고내구성화를 목적으로 가장 널리 사용이 검토되는 재료로써 본 연구에서도 실리카흄을 혼입한 슛크리트의 성능이 다른 혼화재료에 비해 탁월한 것으로 나타났다. 실리카흄을 시멘트 중량대비 10% 혼입한 경우 압축강도에서 약 20% 정도의 강도 증진 효과를 나타냈으며 내동해성, 중성화 저항성, 투수 저항성에서도 다른 슛크리트 배합에 비해 월등히 우수한 성능을 나타내었다.

참고문헌

- 1) (주)대우 건설기술연구소, "SHOTCRETE 성능개선 연구", 1992.
- 2) 현대건설기술연구소, "강성유보강 슛크리트의 적용성에 관한 실험적 연구", 1995.
- 3) SK건설연구소, "고품질 슛크리트 개발 연구", 1999.
- 4) ACI Committee 506, "Guide to Shotcrete", ACI Manual of Concrete Practice Part5, 1995

- 5) Annual Book of ASTM Standard, C1202, "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", 1990.
- 6) C. Andrade, M. Castellote, C. Alonso, C. Gonzalez, "Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1202-91", Cement and Concrete Research, 1999.