



부순모래를 사용한 습식 슛크리트의 광물성 혼화재료 혼입에 따른 내구성 평가

이겨레 ^{1)*} · 한승연 ¹⁾ · 남궁경 ¹⁾ · 윤경구 ¹⁾

¹⁾강원대학교 토목공학

Durability Assessment for Crushed Sand Wet-mix Shotcrete Mixed with Mineral Admixtures

Kyeo-Re Lee,¹⁾ Seung-Yeon Han,¹⁾ Kyeong Nam Gung,¹⁾ and Kyong-Ku Yun¹⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, Cuncheon 200-701, Korea

ABSTRACT The purpose of this dissertation was to investigate the effect of mineral admixtures, such as fly ash, blast furnace slag powder, meta kaolin and silica fume, on the basic properties and durability of crushed sand shotcrete, selecting a series of shotcrete mixtures with a variable admixture. Compressive strength increased as the content of mineral admixtures increased, specially it was the most effective when using meta kaolin both at sample specimen and core after shotcreting. Rapid chloride ion permeability test and sulfuric acid resistance test showed that both durability increased as the substitute rate of mineral admixture increased. In air void analysis with image analysis, the targeted the spacing factor and specific surface were not satisfied because air-entrained agent was not used.

Keywords : wet-mix shotcrete, durability, fly ash, blast furnace slag powder, meta kaolin, silica fume

1. 서 론

스츱크리트 도입 초기에는 주변 지반으로부터의 누수투과와 동해방지, 갱내 미관 향상 등의 비구조적인 역할로 사용되었으나, 최근에는 굴착 직후 발생하는 원지반의 초기변위 제어 및 풍화의 방지를 통한 굴착면의 붕락방지 뿐만 아니라 구조물의 장기적인 지반이완, 배수기능 저하에 따른 잔류수압 등 불확실한 요소에 대한 안전성을 확보하기 위해 시공되고 있다. 최근 미국, 유럽 등에서 영구 슛크리트 라이닝 개념의 공법으로 콘크리트 라이닝을 생략하고 단층 또는 다층의 고성능 슛크리트를 사용하는 영구 지보재 개념의 터널공법에 대한 연구가 진행되고 있으며 유럽의 경우 무라이닝 터널의 시공 사례가 증가하고 있다. 또한 슛크리트를 건축 구조물 시공에 접목시켜 기존 거푸집을 사용하는 방법 대신 슛팅을 통해 시공하는 구조물용 슛크리트 공법을 사용하여 공기를 단축시키는 사례도 있다. 그러므로 슛크리트가 콘크리트를 대체하는 영구적인 재료로 사용되기 위해서는 내구성에 관한 연구가 필수적인 실정이다.⁸⁾

스츱크리트 공법은 빠른 시간내에 구조재로서의 역할을 할 수 있고 거푸집을 사용치 않으며, 극히 얇은 것으로부터 상당히 두꺼운 것에 이르기까지 자유로이 시공할 수 있어 사갱, 수직갱, 비탈면 혹은 벽면의 풍화나 박리, 박락의 방지, 터널 및 지하구조물의 1차 지보재 등에 적용될 수 있으며, 구조물의 유지보수에도 적용이 가능하다. 특히, 습식방법(Wet-Mix Process)은 물-시멘트 비를 포함한 품질관리가 용이하며, 시간당 토출량이 커서 시공능력이 우수하고, 리바운드율과 분진발생이 적은 장점을 가지고 있어 최근에 많이 사용되고 있다.

스츱크리트는 뽀머 붙이는 특성으로 인해 지반에 부착하여 급격히 경화하는 특성과 함께 조기에 강도를 발현하여 후속작업을 신속히 진행할 수 있도록 장기적으로 안정한 강도를 발휘하여 1차 지보재로서의 역할을 하여야 한다. 이와 동시에 슛크리트는 굴착 직후 발생하는 원지반의 초기 변위 제어 및 풍화 방지를 통해 굴착면의 안정을 도모하기 위한 구조물로서, 최근 구조물의 장기적인 사용성 및 안전성의 개념에서 그 역할이 매우 중요하게 부각되고 있다. 따라서 슛크리트에 급결제를 사용하지 않고, 광물성 혼화재료를 혼입하여 슛크리트의 장기강도 및 내구특성을 향상시켜 영구적인 구조물로서 사용할 수 있는 연구가 필요한 실정이다.^{6,7)}

본 연구에서는 슛크리트의 장기강도 및 내구성특성을

*Corresponding author E-mail : leekr@kangwon.ac.kr

Received April 22, 2014, Revised July 22, 2014,

Accepted Aug 13, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

향상시키기 위해 혼입되는 광물성 혼화재료(플라이애시, 실리카폼, 메타카올린, 고로슬래그 미분말) 혼입률을 변수로 설정하여 실험을 진행하였다. 슬럼프, 공기량, 강도 발현 특성 등을 기초특성으로 고찰하였다. 또한 부식 환경에 대한 안정성을 간접적으로 평가하기 위해 염소이온 침투저항성 시험(KS F 2711)과 황산저항성 시험(ASTM C 267)을 하였고, 슛크리트의 흡수성을 평가하기 위한 끓는 물 흡수시험(ASTM C 642)을 실시하였다.^{1,3)}

2. 실험계획 및 방법

2.1 개요

본 연구에서는 부순모래와 굵은골재를 혼합골재 입도 분포에 맞게 혼합하여 슛크리트에 적용을 하였다. 또한 플라이애시, 실리카폼, 메타카올린, 고로슬래그 미분말의 혼화재료를 부순모래 슛크리트에 적용함에 따라 슛크리트의 기초물성 및 내구 특성을 평가하였다.

실험 변수로는 광물성 혼화재료의 적정 혼입량으로 알려진 혼입량을 시멘트량 대비 혼입하였으며, 슛팅 전·후의 내구 특성을 비교 고찰하기 위하여 각각 펌핑 전(BP), 슛팅 후(AS)로 나누어 실험을 실시하였다. 펌핑 전(BP) 변수는 실내배합을 통해 제작된 원주형 공시체를 이용하여 실험을 실시하였고, 슛팅 후(AS) 변수는 슛팅을 통해 제작된 콘크리트 패널에서 코어 채취하여 실험을 실시하였다. 실험 변수 설정은 Table 1과 같다.

Table 1 Types and substitution ratios of mineral admixtures

Shotcrete Before Pumping (BP)			After Shooting (AS)
BP.Control			AS.Control
BP.FA 10	BP.FA 20	BP.FA 30	AS.FA 20
BP.SF 5	BP.SF 10	BP.SF 15	AS.SF 10
BP.MK 5	BP.MK 10	BP.MK 15	AS.MK 10
BP.GGBFS 30	BP.GGBFS 40	BP.GGBFS 50	AS.GGBFS 40

Table 2 Durability of Test item

Test item	Test types	Note
Compressive strength test	KS F 2405	B.P. - 7, 28, 56 day A.S. - 28, 56 day
Rapid chloride ion permeability test	KS F 2711	28 day
chemistry resistance test	ASTM C 267	28 day sulfuric acid 5%
image analysis for air void structure	ASTM C 457	28 day
boiled water absorption test	ASTM C 642	28 day

2.2 시험 계획

본 연구에서 평가할 굳기 전 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 시험과 강도특성 측정과 같은 기초물성 시험, 염소이온 침투 저항성 시험, 내약품성 시험, 끓는 물 흡수 시험, 화상분석 시험과 같은 내구특성을 평가 분석 하고자 하며, 시험에 적용한 평가방법과 시험 일정은 Table 2와 같다.

2.3 실험 재료

2.3.1 시멘트

시멘트는 KS L 5201에서 규정에 의거, 규격에 만족하는 국내 S사 생산의 1종 포틀랜드 시멘트(분말도 3,289 cm²/g, 밀도 3.15 g/cm³, 강열감량 0.61%, 안정도 0.08%)를 사용하였다.

2.3.2 골재

굵은 골재는 최대치수(Gmax) 10 mm인 세척 쇄석과 잔골재는 부순 모래를 사용하였다. 굵은 골재와 잔골재의 기준은 따로 정하지 않았고 다만, 13, 10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15 mm 체를 준비하여 각각의 체에 잔류하는 입도의 골재를 제작 한 뒤 KS F 2577 “스�크리트용 재료” 입도분포 곡선의 중간선에 해당하는 골재를 각각 따로 개량하여 실험하였다. 혼합골재의 물리적 특성은 Table 3과 같고, KS F 2577 “스�크리트용 재료” 입도분포 곡선과 실험에 사용된 혼합골재의 입도분포 곡선은 Fig. 1과 같다.

2.3.3 혼화재료

1) 플라이애시

플라이애시는 자체 수화반응은 없지만 수산화칼슘과 반응하여 수화물을 생성하는 포졸란 반응을 하는 혼화제

Table 3 Physical properties of mixed aggregate

Aggregate type	Specific gravity	Fineness modulus
Mixed aggregate	2.82	3.75

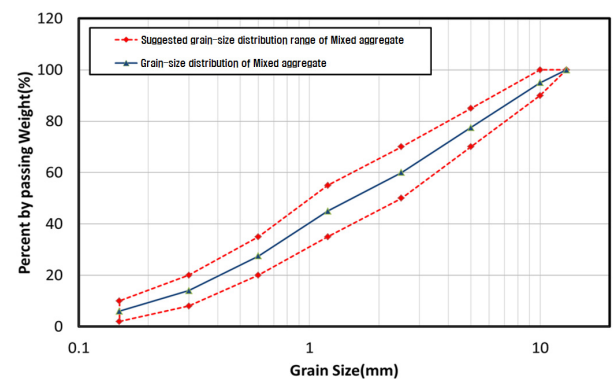


Fig. 1 KS F 2577 Distribution of mixed aggregate

이다. 본 실험에서는 KS L 5405에서 규정된 1종 플라이 애시를 사용하였고, Table 4는 실험에 사용된 플라이애시의 물리·화학적 특성을 나타낸 것이다.

2) 실리카폼

실리카폼은 각종 실리콘 및 웨로 실리콘 등의 규소합금을 전기아크식 노에서 제조할 때 배출되는 가스에 부유하여 발생하는 미세한 분말이다. 비표면적이 약 200,000 cm²/g로서 보통 포틀랜드 시멘트의 50~60배 이다. 입자의 90%이상이 구형으로 된 초미립자 분말로서, 시멘트 중량의 5~15%정도 치환하면 콘크리트 내부 구조가 치밀하게 되어 고강도를 발현할 수 있으며 재료분리 저항성, 수밀성, 내화학약품성이 향상되고 알칼리 골재반응의 억제효과 또한 기대할 수 있다. Table 5는 본 실험에서 사용된 실리카폼의 물리·화학적 특성을 나타낸 것이다.

3) 메타카올린

메타카올린은 평균 입경이 시멘트 입자(약 10 μm)보다는 더 작으나 실리카폼(0.1 μm)보다는 더 큰 약 1~2 μm 정

도이다. 입자의 형상은 작은 판상 모양을 하고 있어 실리카폼의 둥근 구형과는 조금 다른 형상을 띄고 있다. 메타카올린의 비표면적은 대략 12,000~15,000 cm²/g 정도이며 밀도는 종류에 따라 다르나 약 2.4~2.5 g/cm³ 정도이다. 본 실험에서 사용된 메타카올린의 물리·화학적 특성은 Table 6과 같다.

4) 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 소정의 슬럼프를 얻기 위해 필요한 단위수량의 저감이 가능하며, 유동성, 유지성능이 우수한 것으로 알려져 있으며, 장기재령으로 갈수록 높은 수준의 압축강도가 발현되고 동결융해 저항성, 수밀성, 내약품성 등의 내구성 향상의 효과를 나타낼 수 있다. 또한, 고로슬래그 미분말의 분말도를 증가시키므로써 블리딩 및 단위수량 저감이 가능하며, 유동성이 우수한 콘크리트를 얻을 수 있다. 본 실험에서 사용한 고로슬래그 미분말의 물리·화학적 특성은 Table 7과 같다.

Table 4 Physical properties and chemical composition of fly ash

Type		Test
Physical Characteristics	Density (g/cm ³)	2.20
	ignition loss (%)	2.50
Chemical properties	Al ₂ O ₃ (%)	22.90
	CaO (%)	1.80
	Fe ₂ O ₃ (%)	1.84
	SiO ₂ (%)	50.70

Table 5 Physical properties and chemical composition of silica fume

Type		Test
Physical Characteristics	Density (g/cm ³)	1.5~3.5
	Specific gravity	2.2±0.2 (20°C)
	ignition loss (%)	3.45 below
	Fineness (cm ² /g)	150,000 ~ 300,000
	Form	Sphericity 90%
	Particle size (μm)	1
	Unit weight (kg/m ³)	250 ~ 300
Chemical properties	Ingredient	Silicon (85% more than)
	SiO ₂ (%)	85~95
	Al ₂ O ₃ (%)	1.5 below
	Fe ₂ O ₃ (%)	3.0 below
	CaO (%)	0.7 below
	MgO (%)	2.0 below
	SO ₃ (%)	0.2 below

2.4 배합 설계

배합설계는 단위결합재량 441 kg/m³, 물-결합재 비(W/B) 43%, 잔골재율(S/a) 77.5%로 기본조건을 설정, 각 혼화재료의 혼입율에 따른 배합설계를 실시하였다. 목표 공기량 5±2%, 목표 슬럼프 100±20 mm을 확보하기 위해 고유동

Table 6 Physical properties and chemical composition of meta kaolin

specific surface area (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
12,000	52.1	45.3	0.60	1.64	0.05	0.21	0.16	0.10

Table 7 Physical properties and chemical composition of ground granulated blast-furnace slag

Type		Test
Physical Characteristics	Density (g/cm ³)	2.88 ~ 2.94
	Residue (>45μm,%)	2.0 below
	Particle size (μm)	12~16
	specific surface area (cm ² /g)	4,000 ~ 6,000
	Moisture (%)	0.4 below
	Chemical properties	SiO ₂ (%)
Al ₂ O ₃ (%)		12.0 ~ 18.0
Fe ₂ O ₃ (%)		0.25 ~ 0.35
CaO (%)		38.0 ~ 45.0
MgO (%)		10.0 below
SO ₃ (%)		4.0 below
ignition loss (%)		3.0 below

Table 8 Mixing properties of shotcrete

	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)					SP (%)	비고
			W	C	S	G	Admixture		
Control	43	77.5	190	441.0	1326	376	-	1.1	AS
FA10				396.9	1311	372	44.1	1.0	
FA20				352.8	1297	368	88.2	0.9	AS
FA30				308.7	1283	364	132.3	0.8	
SF5				418.9	1320	374	22.0	0.9	
SF10				396.9	1314	373	44.1	0.9	AS
SF15				374.8	1308	371	66.1	1.1	
MK5				418.9	1323	375	22.0	1.0	
MK10				396.9	1320	374	44.1	1.0	AS
MK15				374.8	1317	374	66.1	1.0	
GGBFS30				308.7	1315	373	132.3	0.8	
GGBFS40				264.6	1311	372	176.4	0.7	AS
GGBFS50				220.5	1308	371	220.5	0.6	

화제를 사용하였다.

혼화재료 미혼입의 기준배합, 플라이애시 20%, 실리카 폼 10%, 메타카올린 10%, 고로슬래그 미분말 40%의 변수를 선정하였다. 배합표는 Table 8과 같다.

2.5 시험 방법

2.5.1 압축강도 시험

콘크리트의 압축강도는 콘크리트의 성능평가를 위한 기본적인 자료로서 중요한 의미를 가진다. 실내배합의 경우는 Ø100×200 mm의 원주형 공시체를 이용하여 제작하였고, 숏팅의 경우에는 400×400 mm의 패널을 제작하여 약 70° 정도를 기울여 숏팅 하여 제작한 후 KS F 2422에 의거하여 코어를 채취하여 KS F 2405에 준하여 각각 재령 7일, 28일, 56일에 측정을 하였다.⁵⁾

2.5.2 염소이온 침투 저항성 시험

염소이온 침투 저항성 시험은 KS F 2711에 의거하여 수행하였다. 직경 Ø100 mm 콘크리트 공시체를 길이 50 mm가 되도록 절단을 하여 시험 수행 전까지 상대습도 95% 이상 유지시켰다. 시험 시 공시체는 시험셀(Test cell)에 고정시키고 회로 구성을 한다. 이 회로에서 전원은 60±0.1 V의 직류를 안정적으로 공급할 수 있어야 하고 시험을 수행하는 동안 전해질 용액이 새지 않게 하기 위하여 방수제로서 고무제품을 사용하여 전극용기와 공시체 사이를 고정시켜 실시했다.

2.5.3 내약품성 시험

본 연구에서 내약품성 시험은 ASTM C 267 규정에 준하

여 공시체를 제작하여 28일 동안 기건 양생(20°C, 50% RH)을 실시하였다.¹⁾ 그 후 5% 황산 수용액을 시험 용액으로 28일 동안 수용액에 침적하여 내약품성 시험을 수행하였다. 수용액을 7일에 한번 씩 교환하였으며, 28일간 침적 후 시험액에서 공시체를 꺼내어 침식되고 약화한 부분을 물로 세정하여 제거한 후 천으로 닦은 다음 중량 변화율을 구하였다.

2.5.4 화상분석 시험

경화 후 콘크리트의 공극구조 분석을 위해 분석기기인 HF-MA C01을 사용하여 ASTM C 457에 준하여 시험을 수행하였다.²⁾ 화상분석 시험은 리니어트래버스법을 자동화 측정하는 시험으로써 주어진 화상(image)으로부터 정량적인 정보를 추출할 수 있는 분석법이다. 이는 공극의 크기와 분포도, 위치 등을 측정하여 전체 공기량, 간격계수, 비표면적, 공극 크기별 공기량, 공극 크기별 개수 등을 분석하였다.

2.5.5 끓는 물 흡수 시험

끓는 물 흡수 시험은 ASTM C 642에 의거하여 실시하였다.³⁾ 공시체의 형상과 크기는 규정되어 있지 않다. 그러나 공시체는 최소 350 cm³ 이상 또는, 일반적인 콘크리트의 중량으로 800 g 이상 되어야 한다. 시험과정은 Dry (건조), Immersion (수침), Boiling (끓임)의 3단계로 구분되어 지며, 각각의 단계에서 공시체의 중량이 측정한다. 추가적으로 끓인 후 수중에서의 중량을 측정하여 총 4개의 중량을 이용하여 단위중량, 흡수율, 공극률을 결정하였다.

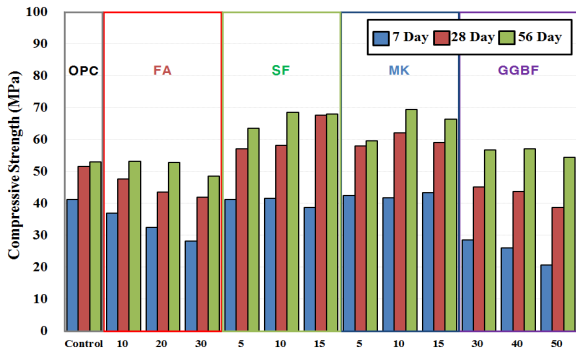
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 압축강도

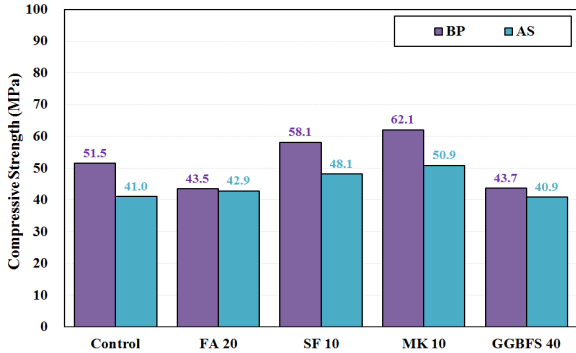
혼화재료 혼입률에 따른 압축강도를 알아보기 위하여 혼화재 변수 별로 각각 재령 7, 28, 56일에서의 압축강도를 측정한 결과는 Fig. 2(a)와 같다. 플라이 애시, 고로슬래그 미분말의 경우 혼입률이 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 경향을 보이며, 실리카폼, 메타카올린의 경우 혼입률이 증가함에 따라 압축강도는 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 2(b)는 앞에서 시험결과로 나타난 재령 28일 압축강도를 숏크리트 펌핑 전(BP)과 숏팅 후(AS)로 비교 분석한 그래프이다. 숏크리트 펌핑 전에는 메타카올린 10% 혼입 변수가 62.1 MPa로 가장 큰 강도값을 나타내었고, 플라이애시 20% 혼입 변수가 43.5 MPa로 가장 낮은 결과를 얻을 수 있었다. 다음으로 숏팅 후에는 메타카올린 10% 혼입 변수가 50.9 MPa로 가장 큰 강도값을 나타내었고, 고로슬래그 미분말 40% 혼입 변수가 40.9 MPa로 가장 낮은 결과를 얻었다. 모든 변수에서 숏크리트 펌핑 전 보다 숏

팅 후에 강도 저하 현상이 발생했다. 이것은 코어링에 의한 강도 저하 때문이라 판단된다.



(a) BP(7, 28, 56 Day) All the variables



(b) BP&AS(28 Day) Compared to the main variables

Fig. 2 Compressive strength test results

3.2 염소이온 침투 저항성

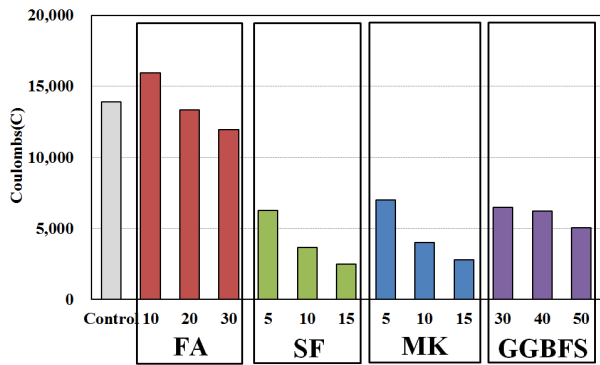
혼화재료 혼입률에 따라 재령 28일의 공시체를 대상으로 염소이온 침투저항성 시험을 실시하였으며, Fig. 3(a)는 혼화재료 혼입률에 따른 숏크리트의 염소이온 침투 저항성을 나타낸 것이다. 혼화재료 혼입률이 증가할수록 염소이온 침투 저항성은 증가하는 경향을 보였으며, 특히 실리카폼 변수에서 가장 높은 저항성이 나타났다.

Fig. 3(b)는 앞에서 시험결과로 나타난 재령 28일 염소이온 침투저항성 시험을 숏크리트 펌핑 전(BP)과 숏팅 후(AS)로 비교 분석한 그래프이다. 숏크리트 펌핑 전에는 실리카폼 10%혼입 변수가 3,681 Coulombs “보통” 등급으로 가장 높은 침투저항성을 보였고, 광물성 혼화재료 무혼입 변수가 13,890 Coulombs “높음” 등급으로 가장 낮은 침투저항성을 나타냈다. 다음으로 숏팅 후에는 마찬가지로 실리카폼 10%혼입 변수가 1,342 Coulombs “낮음” 등급으로 가장 낮은 침투저항성을 보였고, 플라이애시 20%혼입 변수에서 12,357 Coulombs “높음” 등급으로 가장 높은 침투저항성을 나타냈다. 모든 변수에서 숏크리트 펌핑 전 보다 숏팅 후에 염소이온 침투저항성이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 숏팅을 통해 재료가 더욱 밀실하게 충전되어 염소이온 침투저항성이 향상되기 때문이라고 판단되며, 실리카폼이 침투저항성 향상에 가장 좋은 혼화재료라고 판단된다.

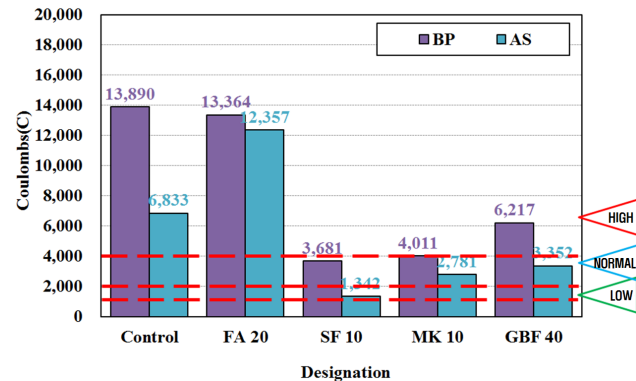
3.3 황산에 대한 내약품성

혼화재료 혼입률에 따른 황산저항성을 알아보기 위하여 재령 28일의 공시체를 대상으로 7일 간격으로 28일간 황산저항성 시험을 실시하였으며, Fig. 4(a)는 혼화재료 혼입률에 따른 숏크리트의 내약품성 시험 결과를 나타낸 것이다. 혼화재료 혼입률이 증가함에 따라 증량변화율이 감소하는 경향을 보였으며, 특히 플라이애시 변수에서 가장 낮은 증량 변화율을 나타냈다.

Fig. 4(b)는 앞에서 시험결과로 나타난 재령 28일부터 7일 간격으로 28일간 실시한 황산저항성의 28일 후 최종 증량 변화율을 숏크리트 펌핑 전(BP)과 숏팅 후(AS)로 비교 분석한 그래프이다. 숏크리트 펌핑 전에는 플라이애시 20%혼입 변수가 -11.4%로 가장 낮은 증량변화량을 보였고, 실리카폼 10%와 메타카올린 10% 혼입 변수가 -20.1%로 가장 높은 증량변화량이 나타났다. 다음으로 숏팅 후에는 플라이애시 20%혼입 변수가 -5.2%로 가장 낮은 증량변화량을 보였고, 광물성 혼화재료 무혼입 변수에서 -17.0%로 가장 높은 증량변화량을 나타냈다. 모든 변수에서 숏크리트 펌핑 전 보다 숏팅 후에 황산에 의한 증량변화량이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 숏팅을 통해 내부의 공기가 소산 하면서 재료가 더욱 밀실하게 충전 되어 황산에 대한 저항성이 향상되기 때문이라고 판단되며, 플라이애시가 황산저항성 향상에 가장 좋은 혼화재료라고 판단된다.



(a) BP All the variables



(b) BP&AS Compared to main variables

Fig. 3 Rapid chloride ion permeability test results

3.4 화상분석

혼화재료 혼입률에 따른 화상분석 결과를 알아보기 위하여 재령 28일의 공시체를 대상으로 화상분석을 실시했다. 간격계수와 비표면적의 변화를 분석하였으며, Fig. 5(a)

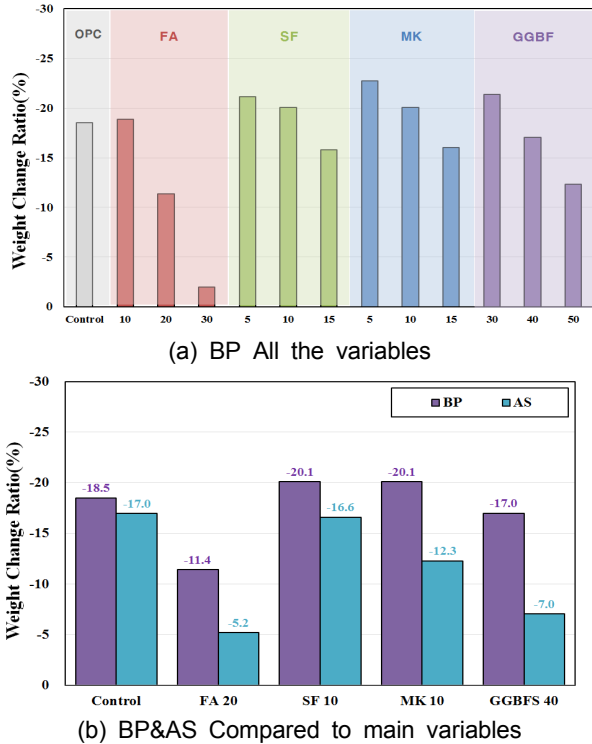


Fig. 4 Chemistry resistance test results

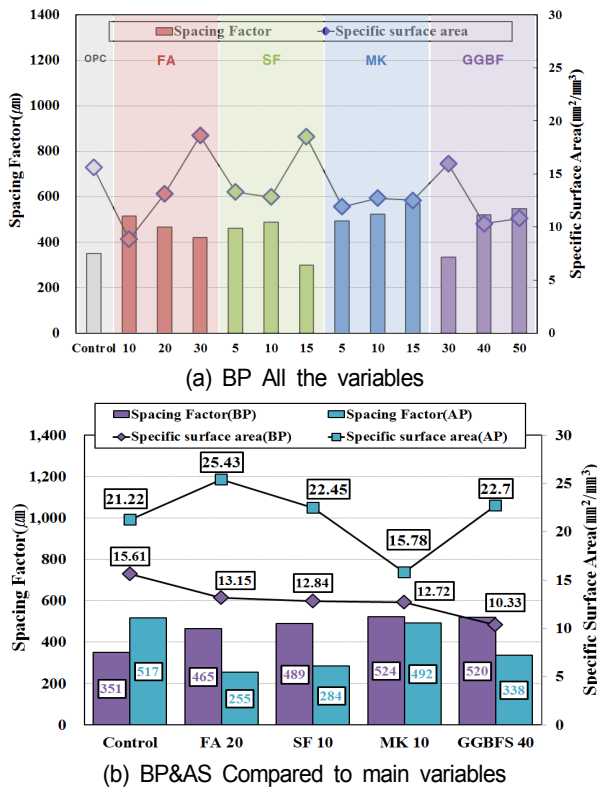


Fig. 5 Image analysis for air void structure results

는 화상분석을 통한 간격계수와 비표면적을 나타낸 그래프이다. 혼화재료 혼입률에 따라 간격계수는 증가하고, 비표면적은 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 5(b)는 앞에서 시험결과로 나타낸 재령 28일 실시한 화상분석 시험의 비표면적과 간격계수를 숯크리트 펌핑 전(BP)과 숯팅 후(AS)로 비교 분석한 그래프이다. 숯크리트 펌핑 전에는 광물성 혼화재료 무혼입 변수에서 15.61 mm⁻¹로 가장 높은 비표면적이 나타났고, 고로슬래그 미분말을 40%혼입한 변수에서 10.33 mm⁻¹으로 가장 낮은 비표면적이 나타났다. 다음으로 숯팅 후에는 플라이애시 20%혼입 변수에서 25.43 mm⁻¹으로 가장 높은 비표면적이 나타났고, 메타카올린 10%혼입 변수에서 15.78 mm⁻¹로 가장 낮은 비표면적 값이 나타났다. 모든 변수에서 숯팅 이후 비표면적이 증가하는 경향을 나타냈다.

다음으로 숯크리트 펌핑 전(BP)에는 메타카올린 10% 혼입 변수에서 0.524 mm로 가장 높은 간격계수가 나타났고, 광물성 혼화재료 무 혼입 변수에서 0.351 mm로 가장 낮은 간격계수가 나타났다. 다음으로 숯팅 후에는 광물성 혼화재료 무 혼입 변수에서 0.517 mm로 가장 큰 간격계수가 나타났고, 플라이애시 20%혼입 변수에서 0.255 mm로 가장 낮은 간격계수가 나타났다. 광물성 혼화재료 무 혼입 변수를 제외하고, 모든 변수에서 숯팅 이후 간격계수는 낮아지는 경향이 나타났다.

Mindess의 저서에 제시된 간격계수 기준(간격계수 0.200 mm 이하, 공극의 비표면적 25 mm⁻¹이상)에 의하면 플라이애시 20%혼입한 숯팅 이후의 변수가 가장 좋은 동결융해 저항성을 보일 것으로 예상된다.⁴⁾

3.5 끓는 물 흡수 시험

혼화재료 혼입량에 따라 재령 28일 공시체를 대상으로 흡수량과 공극률을 알아보기 위하여 끓는 물 흡수시험을 실시했다. Fig. 6(a)와 (b)는 끓는 물 흡수시험을 통한 혼화재료의 혼입량에 따른 흡수량과 공극률을 나타낸 그래프이다. 흡수량은 모든 변수에서 “Good” 등급 또는 그 이상의 등급을 만족하는 것으로 나타났으며, 공극률 또한 대부분의 변수에서 “Good” 등급 또는 그 이상의 등급을 만족했으나 메타카올린 10% 변수에서 “Fair” 등급으로 나타났다.

Fig. 6(c)는 앞에서 시험결과로 나타낸 재령 28일 실시한 끓는 물 흡수 시험의 흡수량을 숯크리트 펌핑 전(BP)과 숯팅 후(AS)로 모아 놓은 그래프이다. 숯크리트 펌핑 전에는 플라이애시 20%혼입 변수에서 7.05%로 가장 높은 흡수량이 나타났고, 실리카폼 10%혼입 변수에서 6.86%로 가장 낮은 흡수량이 나타났다. 다음으로 숯팅 후에는 메타카올린 10%혼입 변수에서 7.50%로 가장 높은 흡수량이 나타났고, 플라이애시 20%혼입 변수에서 6.63%로 가장 낮은 흡수량이 나타났다. 모든 변수에서 숯크리트 펌핑 전과 숯팅 후에 큰 흡수량 변화는 나타나지 않았고,

모두 “Good” 등급을 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 6(d)는 마찬가지로 공극률을 솟크리트 펌핑 전(BP)과 솟팅 후(AS)로 모아 놓은 그래프이다. 솟크리트 펌핑 전에는 메타카올린 10%혼입 변수에서 17.91%로 가장 높

은 공극률이 나타났고, 광물성 혼화재료 무 혼입 변수에서 14.47%로 가장 낮은 공극률이 나타났다. 다음으로 솟팅 후에는 메타카올린 10%혼입 변수에서 15.79%로 가장 큰 공극률 값이 나타났고, 플라이애시 20%혼입 변수에서 14.18%로 가장 낮은 공극률이 나타났다. 솟크리트 펌핑 전과 솟팅 후에 큰 공극률 변화는 나타나지 않았고, 메타카올린을 10%혼입한 솟크리트 펌핑 전의 변수를 제외하고 모두 “Good” 등급 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

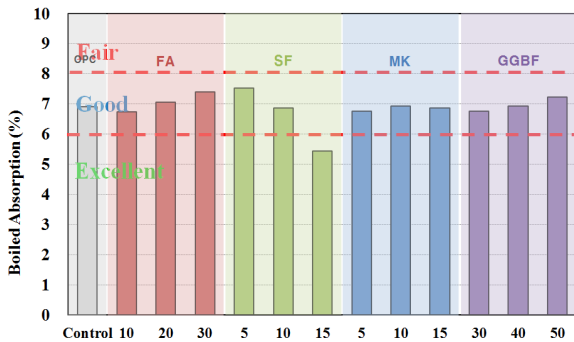
이 연구에서 광물성 혼화재료를 혼입률 변동에 따른 부순모래 솟크리트의 기초특성 및 내구특성 변화를 연구하였으며, 또한 솟팅 후 내구특성의 변화를 비교 분석하였다.

- 1) 메타카올린 28일 압축강도가 62.1 MPa로 가장 우수하며, 솟팅 후의 코어링에 의한 강도 감소현상을 감안하여도 강도발현 특성이 우수했다.
- 2) 염소이온 침투저항성 시험 결과 혼화재료 혼입률이 증가함에 따라 침투저항성이 증가하였고, 솟팅 후 침투저항성이 증가하는 경향을 나타냈다. 실리카폼 변수가 염소이온 침투저항성이 가장 우수했다.
- 3) 황산에 대한 내약품성 시험 결과 혼화재료 혼입률이 증가함에 따라 황산에 의한 중량변화량이 감소하는 것으로 나타났고, 솟팅 후 황산에 의한 중량변화량이 감소하는 경향을 나타냈다. 플라이애시를 혼입한 변수가 가장 낮은 중량 변화량을 나타내어 황산에 대한 내약품성이 가장 우수했다.
- 4) 화상분석법에 의한 공극구조 분석 결과 공기연행체를 사용하지 않아 소요의 간격계수와 비표면적을 얻는 것은 실패하였으나, 광물성 혼화재료의 종류와 혼입률에 따른 공극 구조 분석을 실시하여, 플라이애시를 혼입한 변수가 Mindess의 저서에서 제시된 간격계수와 비표면적 기준 가장 우수하게 평가되었다.
- 5) 끓는 물 흡수시험 결과 솟크리트 펌핑 전·솟팅 후 모든 변수에서 “Good” 이상의 등급으로 평가 되었으나, 메타카올린 변수에서는 “Fair”등급으로 나타났다. 모두 양호한 흡수량과 공극률을 나타냈지만 솟크리트 펌핑 전·솟팅 후 특별한 경향을 나타내지는 않았다.

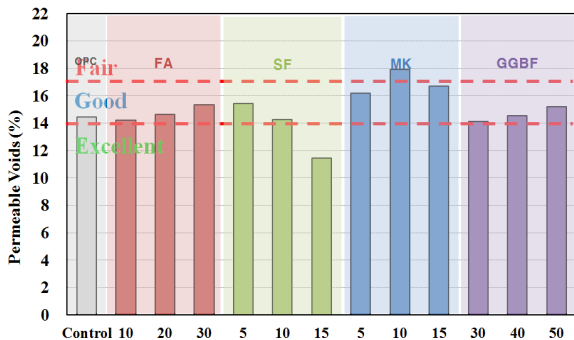
본 연구에서는 공기연행체를 사용하지 않아 소요의 간격계수와 비표면적을 얻는데 실패하였다. 그러므로 향후 연구에서는 광물성 혼화재료와 공기연행체를 혼입한 콘크리트의 동결융해 저항성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되어 진다.

감사의 글

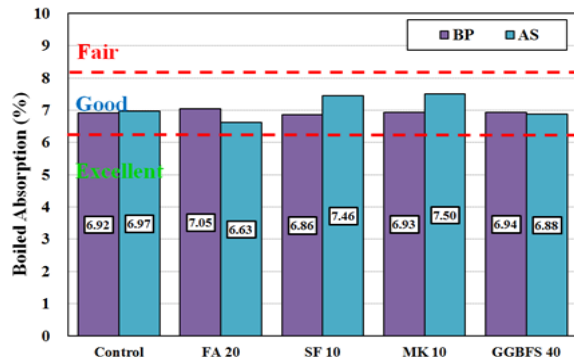
본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(13RDRP B066780)에 의해 수행되었습니다.



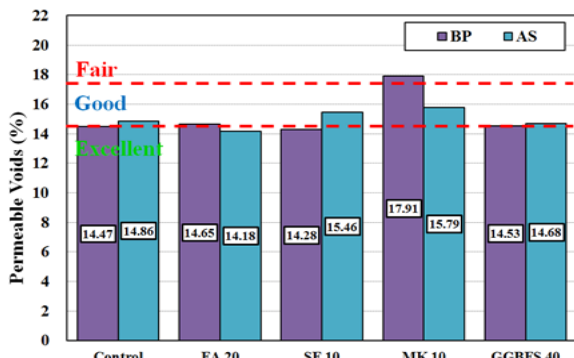
(a) Boiled Absorption of BP All the variables



(b) Permeable Voids of BP All the variables



(c) Boiled Absorption of BP&AS Compared to main variables



(d) Permeable Voids of BP&AS Compared to main variables

Fig. 6 Boiled water absorption test results

References

1. ASTM C 267 (2006), "Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes," ASTM.
2. ASTM C 457(2009), "Standard Test Method for Microscopical Determination of Air Void Content and Parameters of the Air Void System in Hardened Concrete," ASTM.
3. ASTM C 642 (2006), "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete," ASTM.
4. Morgan, D. R., "Freeze-Thaw Durability of Wet-Mix and Dry-Mix Shotcretes with Silica Fume and Steel Fibres," Reprinted, with permission, from Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 10, No. 2, 1988.
5. Ministry of Construction & Transportation (2007), "Design standard of Tunnel", Korean Tunnelling Association.
6. Kim J. W. (2011), "Evaluation of Rheology and Constructability of Crushed-Sand Shotcrete", doctorate thesis of engineering, Graduate school of Kangwon National University.
7. Sin H. G.(2009), "Mechanical Properties and Air Void Structure of Powdered Premixed Wet-mix Shotcrete", Master's thesis of Engineering, Graduate school of Kangwon National University.
8. Chio S. Y.(2009), "Rheology and Air Void Structures of Wet-Mix Shotcrete", doctorate thesis of engineering, Graduate school of Kangwon National University.

요약 본 논문에서는 품질확보를 위하여 혼합골재 입도분포를 적용한 부순모래 슛크리트에 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 메타카올린, 실리카폼을 종류 및 혼입률에 변동을 주어 혼입하여 슛크리트의 기초특성과 내구특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 각 혼화재료의 주요 혼입률을 선정하고 실제 슛팅을 실시 하여 슛팅 전·후의 기초특성과 내구특성을 분석하였다. 실내실험 결과 광물성 혼화재료 혼입률이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을 보였다. 특히 메타카올린을 혼입한 경우 가장 우수한 강도 증진효과를 보였으며, 슛팅 후 압축강도 역시 코어링에 의한 강도감소 현상을 감안하여도 강도 발현이 우수한 혼화재료로 판단된다. 염소이온 침투저항성 시험과 황산저항성 시험 결과 광물성 혼화재료 혼입은 염소이온과 황산에 대한 저항성이 증진되는 경향을 보인다. 화상분석을 통한 공극구조 분석 결과 공기연행체를 사용하지 않아 소요의 간격계수와 비표면적을 얻는데 실패하였으며, 향후 공기연행체의 도입 후 실험이 진행될 필요성을 보이고 있다.

핵심용어 : 습식 슛크리트, 내구성, 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 메타카올린, 실리카폼