

高爐슬래그 微粉末과 플라이애쉬를 利用한 3성분계 콘크리트의 基礎物性에 관한 實驗的 研究[†]

李和重 · [†]洪昌佑 · 金敬鎮

忠州大學校 土木工學部

An Experimental Study on Ternary System Concrete Using Blast-furnace Slag and Fly-ash[†]

Hwa-Joong Lee, [†]Chang-Woo Hong and Kyeong-Jin Kim

Division of Civil Engineering, Chungju National University, 72, Dahak-ro, Chungju, Chungbuk 380-702 Korea

요 약

본 연구에서는 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬 혼입률에 따른 3성분계 콘크리트의 역학적 특성과 내구성을 평가하였다. 이를 위해 플라이애쉬 혼입률 변화(0%, 10%)와 고로슬래그 혼입률 변화(0%, 10%, 20%, 30%)를 실험변수로 하였으며, OPC와 TBC의 특성분석을 위하여 압축강도, 휨강도 그리고 내약품성 시험을 실시하였다. 실험결과, 압축강도와 휨강도에서 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말 혼입이 장기재령에서 강도 증진효과를 나타내는 것으로 평가되었다. 특히 플라이애쉬 10%와 고로슬래그 30%의 3성분계 콘크리트 사용은 매우 타당한 것으로 나타났다. TBC의 투수저항성은 재령 90일에서 매우 낮은 등급으로 나타났다. 또한 OPC에 혼입되는 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말은 투수저항성 및 화학저항성의 향상을 가져오는 것으로 나타났다.

주제어 : 3성분계 콘크리트, 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말, 투수성, 내구성

Abstract

The purpose of this study was to evaluate the effects of fly-ash and blast-furnace slag on strength development and durability of ternary blended concrete (TBC) and ordinary portland cement concrete as fly ash and slag contents. Main experimental variables were performed fly ash contents (0%, 10%) and slag contents (0%, 10%, 20%, 30%). The compressive and flexural strengths, chloride-ion rapid permeability and chemical attacks resistance were measured to analyze the characteristic of the developed TBC on hardened concrete. The test results showed that compressive and flexural strength of TBC increased as the slag contents increased from 0% to 30% at the long term of curing. It considers blast furnace slag used when fly ash content was up to 10%. The permeability resistance of TBC(fly ash 10%, blast 30%) was extremely good at the curing time 90 days. Also, the effects of added blast furnace slag on OPC and TBC were increased on the permeability and chemical attacks resistance.

Key words : ternary blended concrete(TBC), Fly ash, blast furnace slag, permeability, durability

1. 서 론

최근, 콘크리트의 강도 증진은 물론 내구성 및 유동성

을 향상시키기 위하여 보통 포틀랜드 시멘트에 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬 또는 실리카폼을 혼입한 3성분계 시멘트를 사용한 콘크리트(Ternary Blended Concrete, TBC)의 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 염해환경에 노출된 콘크리트 구조물의 염소이온침투와 황산염 등에 대한 저항성을 높이기 위하여 3성분계 시

[†] 2009년 1월 28일 접수, 2009년 4월 1일 1차수정,
2009년 6월 23일 수리

^{*} E-mail: cwhong@cju.ac.kr

멘트를 사용한 콘크리트가 요구되고 있다. 1970년대 이후부터 굳지 않은 콘크리트에 혼화재료를 투입하여 경화된 콘크리트 성능을 높이는 2성분계 시스템 연구를 하였으며, 이러한 시스템을 바탕으로 1990년대에 포틀랜드 시멘트와 두 개의 다양한 혼화재를 사용함으로 새로운 품질의 콘크리트인 3성분계 콘크리트의 기술개발을 활발히 진행하고 있다.^{3-7,10)} 3성분계 콘크리트란 두 가지의 혼화재를 혼입하여 서로 상반된 단점을 보완하며 장점을 극대화시켜 콘크리트의 레올로지 및 강도증진을 발휘하는 콘크리트이다. 이것은 성분이 다른 혼화재를 적정 비율로 혼입하여 일반 콘크리트 및 2성분계 콘크리트보다 경제적이고, 우수한 품질의 콘크리트를 확보할 수 있다.²⁾

3성분계 콘크리트 개발 및 적용은 시멘트 생산에 따른 환경오염 방지, 산업부산물의 재활용, 경제적인 콘크리트 구조물 건설 등의 효과를 동시에 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 산업폐기물의 일종인 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 동시에 사용한 3성분계 콘크리트에 대한 최적의 배합조건을 제시하고 그에 따른 강도 및 내구특성을 평가하여 3성분계 콘크리트의 현장적용에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

본 연구에서는 3성분계 콘크리트에 대한 최적배합 제

시 및 기초적인 물성변화와 내구특성을 고찰하고자 보통포틀랜드시멘트에 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말을 혼합하여 3성분계 콘크리트를 제조하였다. 이를 위하여 단위시멘트 400kg/m³를 기준으로 플라이애쉬 10%, 고로슬래그미분말 0, 10, 20, 및 30%씩 각각 치환하여 혼입하였으며 배합표는 Table 1과 같다. 적정공기량과 유동성을 확보하기 위하여 AE제와 유동화제를 첨가하였다. 그리고 실험항목으로는 압축 및 휨강도, 염소이온 침투에 의한 투수성 실험, 그리고 황산용액에 침지한 후 침지제령에 따른 중량변화와 압축강도를 측정하여 화학약품 저항성을 평가하였다.

2.1. 사용재료

2.1.1. 시멘트 및 3성분계 혼화재

시멘트는 국내 S사 제품으로서 비중이 3.15인 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 플라이애쉬는 경남 하동군에 있는 화력 발전소에서 생산된 것을 사용하였으며, 고로슬래그 미분말은 국내 B사의 제품을 사용하였으며 약 2.7%의 석고가 첨가된 것으로 보다 자세한 화학적 성질은 다음 Table 2와 같다.

2.1.2. 골재

굵은 골재는 충북 충주시 가금면 용전리에서 생산되는 최대치수 19 mm인 골재를 사용하였고, 잔골재는 충

Table 1. Mixture proportions of concrete

변 수	Fly-ash (%)	Blast slag (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)						AE (%)	S.P (%)
					W	binder			S	G		
						C	F	B				
CF0B0	0	0	45	45	180	400	0	0	745.9	944.0	0.015	0.90
CF10B0	10	0	45	45	180	360	40	0	740.4	937.1	0.016	0.90
CF10B10	10	10	45	45	180	320	40	40	739.2	935.5	0.017	0.90
CF10B20	10	20	45	45	180	280	40	80	738.0	934.0	0.019	0.85
CF10B30	10	30	45	45	180	240	40	120	736.8	932.5	0.019	0.80

주) F : 플라이애쉬, B : 고로슬래그, W/C : 물-시멘트비, S/a : 잔골재율, AE : 공기연행제, S.P : 유동화제

Table 2. Chemical compositions of TBC

Types	Chemical Composition (%)					Blaine (cm ² /g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	
Cement	21.40	4.78	3.47	62.06	2.81	3293
Fly ash	53.33	30.17	5.21	3.21	0.98	3804
Slag	30~36	12~18	0.25~0.35	38~45	>10.0	4387

Table 3. Physical properties of Aggregate

Classification	Size (mm)	Specific Gravity	Absorption (%)	Fineness Modules
Fine Aggregate	<5	2.56	0.9	2.99
Coarse Aggregate	<19	2.65	0.8	6.61

북 충주시 기금면 용진리에서 생산되는 잔골재를 사용하였다. 보다 자세한 골재의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

2.2. 실험계획 및 방법

2.2.1. 압축강도 및 휨강도 시험

압축강도는 KS F 2405 규정에 의하여 재령 7, 14, 28, 56, 90일에 시험을 수행하였다. 휨강도 시험은 10×10×46 cm의 빔 공시체를 제작하여 재령 7, 28, 90일에 KS F 2408에 의해 시험을 수행하였다.

2.2.2. 염소이온 침투성 시험

콘크리트 내의 염소이온 침투에 대한 저항성을 평가하기 위한 표준화된 시험방법인 ASTM C 1202(1994)에 의해 실시하였다. 이 방법의 시편은 포화된 50mm 두께의 시편을 사용하여 양극(+)에는 0.3mol의 NaOH 수용액을, 음극(-)에는 3%의 NaCl 수용액을 채우고, DC 60V의 전위차로 6시간동안 통전시키면서 측정하였다. 이때 실험조건은 20°C, 습도 60±3%인 항온항습실에서 실시하였다. 충전하량은 다음 식(1)을 사용하여 계산한다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

여기서, Q : 회로를 통과한 전하량 (coulombs)

I_n : n분 경과하였을 때의 전류

이 충전하량으로 ASTM에서 규정하고 있는 Table 4에 따라 3성분계 콘크리트의 투수성을 분석하였다.

Table 4. Chloride Ion permeability rating

Relative Permeability	Charge Passed (Coulombs)
High	>4000
Moderate	2000~4000
Low	1000~2000
Very Low	100~1000
Negligible	<100

2.2.3. 화학저항성 시험

화학저항성 실험은 ASTM C 267 규정에 준하여 $\phi 10 \times 20$ cm의 원형 공시체를 제작하여 28일 동안 기건양생(20°C, 50% RH)을 실시한 후 5% 황산 수용액을 시험 용액으로 28일 동안 수용액에 침적하였고, 7일마다 시험액에서 공시체를 꺼내어 침식되고 약화된 부분을 수돗물로 세정하여 제거한 후 천으로 닦은 후에 아래의 식(2)에 의해 중량 변화율을 구하였다.

$$\text{중량 변화율(\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

여기서, W_0 는 시험액 침적 전의 공시체중량

W_1 는 시험액 침적 후의 공시체 중량 (g)

또한, 수용액에 28일, 56일 동안 침지하여 수중양생 콘크리트에 대한 압축강도비를 정리하여 RILEM과 일본토목학회에서 제안한 식(3)의 열화깊이 산정식을 통하여 열화이자 침투속도계수를 평가하였다.⁹⁻¹⁰⁾

$$s_i = \frac{d}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{F_s}{F_i}} \right) \quad (3)$$

여기서, d : 시험체의 직경(mm),

F_i : 표준양생 시험체 강도(MPa)

F_s : 열화된 시험체의 강도(MPa)

s_i : 열화이자침투속도((mm.√year))

3. 3성분계 콘크리트의 결과 및 고찰

3.1. 강도발현 특성

Table 5는 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말 혼입을 변화에 따른 강도발현 특성을 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 1에서 고로슬래그 미분말 혼입률 증가에 따른 3성분계 콘크리트의 강도발현 특성을 살펴보면, 고로슬래그 미분말 혼입율이 증가함에 따라 초기재령에서 압축강도가 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 2성분계 콘크리트의 특성과 마찬가지로 1차적인 시멘트 수화반응물 형성 후 플라이애쉬의 2차 포졸란 반응과 고로슬래그 미분말의 잠재수경성 반응에 기인한 것으로 판단된다.^{1,11)}

Table 5. Results of strength and permeability of TBC

Spec.	Fly-ash (%)	B.S (%)	W/B (%)	Compressive strength (MPa)					Flexural strength (MPa)			Permeability (Coulombs)	
				7 days	14 days	28 days	56 days	90 days	7 days	28 days	90 days	28 days	90 days
CF0B0	0	0	45	32.29	40.23	42.27	43.50	49.36	8.56	11.39	12.47	8492.9	5437.4
CF10B0	10	0	45	27.15	35.37	39.04	41.82	46.07	8.69	10.49	11.60	7490.8	2544.8
CF10B10	10	10	45	23.64	35.15	38.34	40.79	45.54	7.23	10.18	11.72	6460.7	1683.0
CF10B20	10	20	45	20.84	29.86	38.58	40.91	46.37	6.41	9.83	11.18	4154.0	1619.6
CF10B30	10	30	45	20.03	29.70	40.29	41.64	47.43	5.98	9.64	11.78	2969.1	1138.6

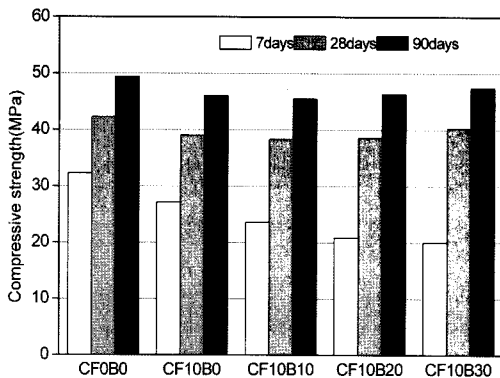


Fig. 1. Comparison of compressive strength for TBC.

그러나 장기재령에 있어서는 모든 치환율에 있어 약 45MPa를 넘어서는 고강도 콘크리트를 나타내어 3성분계 콘크리트의 우수한 장기강도 발현 특성을 알 수 있다. 특히, 3성분계 콘크리트는 재령 7일에서 14일 사이 강도발현율이 가장 크게 나타나 이를 현장에 적용할 경우, 최소 재령일수가 약 14일은 확보되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 2의 휨강도 발현 특성을 살펴보면, 플라이애쉬 10%, 고로슬래그 20%까지의 3성분계 콘크리트까지 초기 및 장기재령에 있어 일반 콘크리트와 유사한 강도발현을 나타내었다. 고로슬래그 30%의 3성분계 콘크리트는 초기 휨강도가 다소 작게 측정되었으나 장기강도에서는 유사한 휨강도를 나타내었다. 이를 종합하여 분석할 경우 강도발현 측면에서 3성분계 콘크리트는 플라이애쉬 10%, 고로슬래그 30%의 혼입사용은 장기강도 측면에서는 기존 콘크리트의 강도발현과 차이가 없으며 초기 재령 7일에서 14일까지 양생에 주의할 경우, 고강도 콘크리트로 현장적용성에 문제가 없을 것으로 나타났다.

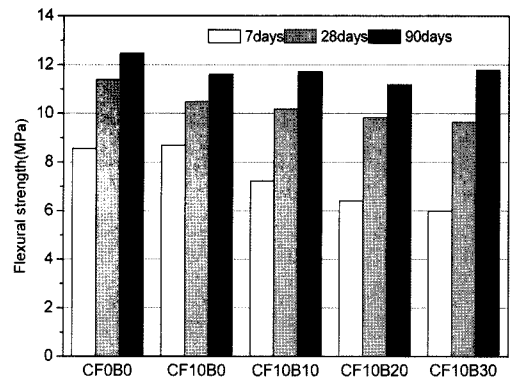


Fig. 2. Comparison of flexural strength for TBC.

3.2. 3성분계 콘크리트의 염소이온투과 특성

Fig. 3은 각 변수에 대한 재령 28일과 90일에 실시한 염소이온침투시험의 결과를 나타낸 것이다. 혼화제를 혼입하지 않은 CF0B0의 염소이온투과량이 재령 28일 8,000쿨롱이상에서 재령 90일에 약 5,000쿨롱으로 낮아지고는 있으나 ASTM C 1202에서 제시한 투수등급으로 평가하면 매우 높은 등급값에 해당한다. 또한 재령이 증가함에 따라 염소이온투과량이 약 40% 감소되는 것으로 나타났으나 플라이애쉬 10%와 고로슬래그 미분말 30%를 첨가한 3성분계 콘크리트의 경우(CF10B30), 재령 28일에 3,000쿨롱 재령 90일에 약 1,000쿨롱을 나타내어 투수저항성이 매우 크게 향상되는 것으로 나타났다. 이를 자세히 살펴보면, 재령 28일에 있어 투수등급은 CF10B30을 제외하고는 모두 매우 높은 투수등급을 나타내고 있으나 재령 90일에 있어 OPC(CF0B0)와 플라이애쉬 10%만을 첨가(CF10B0)한 경우를 제외하고 모든 3성분계 콘크리트에서 1,000~2,000쿨롱의 낮은 투수등급을 갖는 것으로 평가되었다.

이는 플라이애쉬만을 사용한 2성분계 콘크리트보다

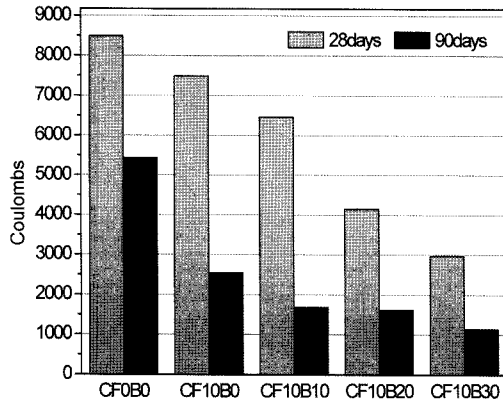


Fig. 3. Charge Passed of TBC.

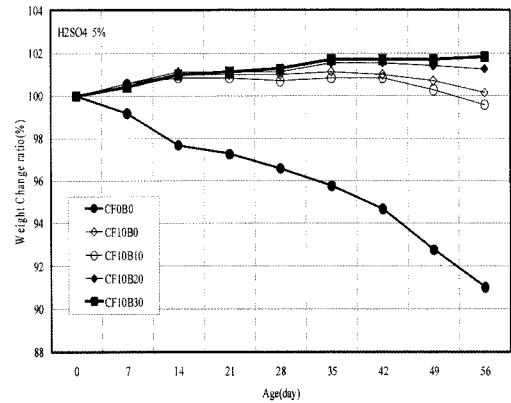


Fig. 4. Sulfuric acid resistance of TBC.

Table 6. Ratio of compressive strength of TBC

Spec.	Compressive Strength of 56day		Compressive Strength of 90day	
	water	5% H ₂ SO ₄	water	5% H ₂ SO ₄
CF0B0	43.50	27.35	49.36	20.27
CF10B0	41.82	30.97	46.07	22.76
CF10B10	40.79	29.93	45.54	21.34
CF10B20	40.91	30.25	46.37	22.76
CF10B30	41.64	30.42	47.43	25.20

고로슬래그 미분말을 추가로 혼합한 3성분계 콘크리트의 내부 조직이 더욱 치밀해짐을 나타내는 것이다. 이러한 경향은 콘크리트의 수화반응과 더불어 발생하는 고로슬래그 미분말의 잠재수경성 반응으로 콘크리트 내부구조가 치밀해져 불투수성이 우수하게 되고, 플라이애쉬에 의해 그 효과가 배가되는 것으로 판단된다.

3.3. 3성분계 콘크리트의 내화학약품성

Fig. 4는 시편을 황산 5% 수용액에 침전시킨 후 각 재령에 따른 중량감소율을 나타낸 것이다. 플라이애쉬만을 첨가한 2성분계 및 고로슬래그 미분말을 동시에 혼합한 3성분계 모두 황산에 대한 저항성이 개선되는 것을 알 수 있다. 즉, OPC에서는 침식 56일에 있어서 중량감소율은 약 9%로 나타났으나 3성분계 콘크리트에서는 황산에 의한 중량변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

그러나 Table 6에 나타난 침지재령에 따른 압축강도 변화를 살펴보면, 황산 침식에 따라 압축강도가 감소하는 것을 알 수 있다. OPC의 경우 침지재령 56일에 압축강도가 약 37%감소하였으며 3성분계 콘크리트는 약

26.6%감소한 것으로 측정되었으며 OPC보다는 3성분계 콘크리트에서 강도저하가 다소 개선되는 것으로 나타났다.

황산에 의한 침식결과에서, 중량감소율은 변화가 없으나 강도가 저하된 원인은 시멘트 수화물과 황산이온이 반응하여 석고를 생성하고, 석고의 일부는 C3A와 반응하여 다시 에트란자이트가 생성되어 조직이 팽창하게 된다.

그러나, 이러한 과정에서 생성된 석고가 칼슘알루미네이트 수화물과 반응하여 시멘트 바실러스(bacillus)를 생성하므로써 이때의 팽창압으로 인하여 콘크리트 내부 조직이 피해를 입게 된다. 즉 황산용액에 침지한 경우, 압축강도 감소율은 시멘트 경화체를 연화 내지는 팽창시켜 콘크리트 강도를 크게 저하시킨다고 판단된다. Fig. 5는 28일, 56일 동안 황산용액에 침지하여 수중양생 콘크리트에 대한 압축강도비를 이용하여 열화인자 침투속도계수를 평가한 결과이다. 이를 살펴보면, 재령에 상관없이 3성분계 콘크리트의 침투속도계수가 OPC와 비교하여 크게 향상됨을 알 수 있으며 플라이애쉬만을 사용한 2성분계와 3성분계의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

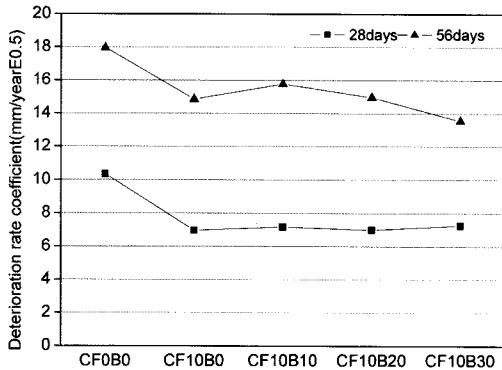


Fig. 5. Deterioration coefficient by 5% H₂SO₄.

4. 결 론

본 연구에서는 산업폐기물의 일종으로 콘크리트 혼화 재료 사용되는 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 사용한 3성분계 콘크리트의 강도 및 내구특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 플라이애쉬 10%에 고로슬래그 미분말을 혼입한 3성분계 콘크리트의 압축강도는 재령 28일에 38MPa 이상, 휨강도는 10MPa 이상의 매우 우수한 강도 발현 특성을 나타내었다.

2. OPC에 혼입된 플라이애쉬의 2성분계 콘크리트는 투수저항성이 1.5배 이상 향상되며 고로슬래그 미분말을 추가로 혼입한 3성분계 콘크리트는 혼입률이 증가할수록 투수저항성이 매우 크게 향상되는 것으로 나타났다. 특히, 플라이애쉬 10%에 고로슬래그 미분말 10~30%를 혼입한 경우 투수등급이 낮은 등급으로 평가되어 우수한 투수저항성을 보였다. 이와같은 결과는 플라이애쉬의 포졸란 반응과 고로슬래그 미분말의 잠재수경성 반응으로 콘크리트 내부구조가 치밀해진 것으로 판단된다.

3. 황산에 대한 침식저항성은 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말 혼입에 따라 약 10%정도 개선되는 것으로 나타났다.

4. 3성분계 콘크리트의 배합조건에서는 플라이애쉬 10%에 고로슬래그 30%의 혼입이 강도, 투수 및 내화학적에서 일반콘크리트와 비교하여 우수한 결과를 나타

내었으며 시멘트 치환을 40%로 생산할 경우 재료비 절감 효과가 클 것으로 평가되었다.

따라서 콘크리트 제조에 있어 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말의 사용은 콘크리트 성능개선 효과와 더불어 경제성 확보까지 이룰 수 있을 것으로 평가되었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임

참고문헌

- 고경택, 박정준, 이종석, 김성욱, 2003: 광물질 혼화제를 사용한 고성능 콘크리트의 수축특성, 대한토목학회 논문집 제23권 제6A호, pp. 1133-1141.
- 김대진, 2004: 3성분계 콘크리트의 포졸란재가 압축강도 특성에 미치는 영향, 부산대학교 석사학위논문.
- 김인수, 2000: 고로슬래그와 플라이애쉬를 혼입한 투수성 폴리머 콘크리트의 물리역학적 특성, 충남대학교 석사학위논문.
- 박상숙, 강화영, 한관수, 2007: 알칼리 활성반응을 이용한 플라이 애쉬/슬래그 시멘트개발(1), 대한환경공학회지, 제29권 제7호, pp. 801-809.
- 배수호, 이준구, 2007: 3성분계 시멘트를 사용한 콘크리트의 내구성 평가, 대한토목학회논문집, 제27권 제2A호, pp. 271-276.
- 오병환, 박대균, 박재명, 이종화, 2002: 석회석 미분말을 사용한 3성분계 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성능 연구, 한국콘크리트학회 봄학술대회논문집, pp. 569-574.
- 이창수, 윤인석, 2003: 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 복합 활용한 3성분계 혼합 콘크리트의 내구성능에 대한 실험적 연구, 한국구조물진단학회 제7권 제1호, pp. 139-144.
- 이화중, 2009: 3성분계 콘크리트의 내구특성, 충주대학교 토목공학과 석사학위논문.
- 일본토목학회, 2001: 콘크리트표준시방서(유지관리편), pp. 128-130.
- RILEM Report 16, 1997: Penetration and Permeability of Concrete; Barriers to Organic and Contamination Liquids. E&FN SPON, pp. 209.
- P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro, 2006: CONCRETE, pp. 228-237, McGraw-Hill.



李 和 重

- 2007. 2. 충주대학교 토목공학과 졸업(공학사)
- 2009. 2. 충주대학교 토목공학과 졸업(공학석사)
- 현재 충주대학교 토목공학과 조교

洪 昌 佑

- 현재 충주대학교 토목공학부 교수
- 당 학회지 제15권 2호 참조



金 敬 鎭

- 1983. 2. 강원대학교 토목공학과 졸업(공학사)
- 1985. 2. 강원대학교 대학원 토목공학과 졸업(공학석사)
- 1993. 2. 강원대학교 대학원 토목공학과 졸업(공학박사)
- 현재 충주대학교 토목공학과 교수

學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解説	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解説, Review
技 術 報 告	實際的인 試驗, 調査의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解説하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外的 研究 幾關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 隋霜 등
Group 紹介	企業, 研究幾關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 揭載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.