

광물질 혼화재를 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 물성 향상을 위한 연구

문한영^{1)*} · 신국재¹⁾ · 이창수²⁾

¹⁾한양대학교 토목공학과 ²⁾서울시립대학교 토목공학과

(2002년 1월 17일 원고접수, 2002년 5월 6일 심사완료)

A Study for Improving Properties of Antiwashout Underwater Concrete Mixed with Mineral Admixtures

Han-Young Moon^{1)*}, Kook-Jac Shin¹⁾, and Chang-Soo Lee²⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, University of Seoul, 130-743, Korea

(Received January 17, 2002, Accepted May 6, 2002)

ABSTRACT

Nowadays, antiwashout underwater concrete is widely used for constructing underwater concrete structures but they, especially placed in marine environment, can be easily attacked by chemical ions such as SO_4^{2-} , Cl^- and Mg^{2+} , so the quality and capability of concrete structures go down.

In this paper, to solve and improve those matters, flyash and GGBFS(ground granulated blast furnace slag) were used as partial replacements for ordinary portland cement.

As results of experiments for fundamental properties of antiwashout underwater concrete containing 10, 20, 30% of flyash and 40, 50, 60% of GGBFS respectively, setting time, air contents, suspended solids and pH value were satisfied with the "Standard Specification of Antiwashout Admixtures for Concrete" prescribed by KSCE, and also slump flow, efflux time and elevation of head were more improved than that of control concrete. From the compressive strength test, it was revealed that the antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures(flyash and GGBFS) is more effective for long term compressive strength than control concrete. An attempt to know how durable when they are under chemical attack has also been done by immersing in chemical solutions that were $\times 2$ artificial seawater, 5% sulphuric acid solution, 10% sodium sulfate solution and 10% calcium chloride solution. After immersion test for 91days, XRD analysis was carried out to investigate the reactants between cement hydrates and chemical ions and some crystalline such as gypsum, ettringite and Friedel's salt were confirmed.

Keyword: Antiwashout underwater admixture & concrete, Ground granulated blast furnace slag, Flyash, chemical attack, artificial seawater, sulphuric acid solution, sodium sulfate solution, calcium chloride solution, XRD analysis

1. 서 론

근년에 와서 수중불분리성 콘크리트는 서해대교, 영종대교 및 부산의 수영만에 건설중인 광안대교와 같은 교량의 기초와 한강상의 양화대교, 한남대교의 교각 기초부위의 보수·보강 및 대형 수중콘크리트 구조물의 현장시공 등에 적용하는 사례가 점차 증대되고 있는 추세이다.

그러나 수중불분리성 콘크리트는 수중불분리성 혼화제의 증점작용 때문에 소정의 유동성을 확보하기 위해서는 고성능감수제 또는 AE 감수제의 적당량 사용이 필수적이며, 수중불분리성 혼화제와 고성능감수제를 병용한 수중불

분리성 콘크리트는 트레미, 콘크리트 펌프 및 프리팩트 콘크리트와 같은 수중콘크리트 공법과는 달리 개발된 역사가 비교적 짧은 탓으로 현장에 적용된 시공실적이 적어 신뢰성에 대한 의문을 제기하는 등의 문제점이 지적되고 있다^{1~4)}.

또한 해양 환경하에 수중콘크리트 구조물을 건설할 경우, 육상에서 건설되는 콘크리트구조물과는 달리 해풍, 조풍, 파도, 파랑 및 부유물질 등에 의한 물리적 작용, 해수 중의 SO_4^{2-} , Cl^- 및 Mg^{2+} 등의 유해이온에 의한 화학적 침식작용 및 동결융해의 반복작용과 같은 가혹한 환경 조건의 영향을 받아 콘크리트구조물의 내구성능은 크게 저하된다^{5~6)}.

특히 콘크리트 내부로 침투한 유해한 이온의 영향으로 콘크리트 중에 묻혀있는 철근을 녹슬게 하며 균열을 발생

* Corresponding author

Tel : 02-2290-0323 Fax : 02-2293-9977

Email : moon77@hanyang.ac.kr

시킬 뿐만 아니라 그 정도에 따라 콘크리트구조물의 내하력을 크게 떨어뜨리는 결과를 초래하게 된다. 따라서 수중콘크리트에 발생하는 문제점을 개선하기 위한 대책의 일환 및 수중불분리성 콘크리트의 제물성 향상을 도모하기 위한 목적으로 제철산업의 부산물로 발생하는 고로슬래그미분말과 화력발전소의 석탄 연료에서 발생하는 플라이애시를 포집하여 보통포틀랜드시멘트에 혼합 사용하는 연구에 착안하게 되었다.

본 연구에서는 수중불분리성 콘크리트의 기초물성을 평가하기 위하여 보통포틀랜드시멘트만 사용한 경우와 보통포틀랜드시멘트에 플라이애시 및 고로슬래그미분말을 각각 3단계씩 사용량을 변화시켜 혼합하여 제조한 총 7배합 수중불분리성 콘크리트의 pH, 재료분리도, 공기량, 응결시간, 유동성 및 압축강도를 측정된 결과에 대하여 고찰하였다. 또한, 수중불분리성 콘크리트 배합 중 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 경우와 플라이애시 20% 및 고로슬래그미분말 50%를 각각 혼합한 3배합만을 선정하여 표준양생한 각각의 압축강도가 200 kgf/cm²에 도달하였을 때 2배농도 인공해수, 황산나트륨용액, 염화칼슘용액 및 황산용액에 각각 91일 동안 침지한 결과에 대해서도 비교 고찰하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

Table 1 Chemical compositions and physical properties of cement

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)	Ig. loss(%)	Specific gravity	Blaine(cm ² /g)
21.95	6.59	2.81	60.1	3.32	2.11	2.58	3.15	3,112

Table 2 Physical properties of aggregate

Items Types	Specific gravity	Absorption(%)	F.M.	Unit weight (kg/m ³)	Percentage of solids (%)	Abrasion value (%)
Fine aggregate	2.60	0.94	2.60	1,475	56.8	-
Coarse aggregate	2.54	0.78	6.47	1,741	65.4	28.9

Table 3 Chemical composition and physical properties of admixtures

Items Types	Main composition	Specific gravity	Density(kg/l)	Amount of dosage	pH	Appearance
AWA	HPMC	-	0.8±0.1	1.2 (W×%)	-	White powder
HRWR	Melamine	1.23±0.02	-	1.8 (C×%)	10±1	Transparent liquid

Table 4 Chemical composition and physical properties of FA and SG

Items Types	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)	Ig. loss(%)	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
FA	67.7	25.0	2.85	2.00	0.90	-	3.47	2.15	3,274
SG	32.3	14.8	0.40	44.1	5.50	1.0	1.10	2.80	4,580

2.1.1 시멘트

보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.1.2 골재

잔골재는 바다모래를 세척한 세척해사를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 25mm인 부순골재를 사용하였고 물리적 성질은 Table 2와 같다.

2.1.3 화학혼화제

주성분이 HPMC(hydroxypropyl methyl cellulose)계인 수중불분리성 혼화제(antiwashout admixture 이하 AWA)와 멜라민계 고성능 감수제(이하 HRWR)를 병용하여 사용하였으며, 화학성분 및 물리적 성질은 Table 3과 같다.

2.1.4 광물질 혼화제

보령 화력발전소에서 포집하여 정제한 플라이애시(이하 FA)와 광양 제철소에서 발생된 고로슬래그미분말(이하 슬래그미분말 또는 SG)을 사용하였으며, 그 화학성분 및 물리적 성질은 Table 4와 같다.

2.2 시험용 약품용액

시험용 약품용액은 5% H₂SO₄, 10% Na₂SO₄, 10% CaCl₂ 및 2배농도 인공해수(이하 인공해수)이며, 인공해수

는 ASTM D 1141 "Standard specification for substitute ocean water"에 의하여 제조하였고 구성성분은 Table 5과 같다.

2.3 실험방법

2.3.1 공시체의 제조방법

φ10×20 cm 원주형 공시체를 KS F 2403에 의하여 수중 불분리성 콘크리트를 공기중에서 제조하였으며, 또한 현장을 모사한 수중제조 공시체는 대한토목학회의 "수중불분리성 콘크리트의 압축강도 시험용 수중제조 공시체의 제조방법(안)"에 의하여 Fig. 1과 같이 제조하였다.

2.3.2 공기량 및 응결시간

수중불분리성 콘크리트의 공기량 및 응결시간은 각각 KS F 2421 과 KS F 2436에 의하여 측정하였다.

2.3.3 재료분리도

수중불분리성 콘크리트의 타설시 발생하는 시멘트 유실에 따른 재료분리도를 측정하기 위하여 대한토목학회의 "콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(안)"에 따라 현탁물질량과 pH을 측정하였다.

2.3.4 유동성 및 충전성

슬럼프플로우시험은 대한토목학회 "수중불분리성 콘크리트의 슬럼프플로우 시험방법(안)"에 의하여 측정하였으며, 충전성을 알아보기 위하여 문한영의 연구²⁾에서 사용한 U형박스를 이용하여 높이차(elevation of head)를 cm 단위로 측정하였으며, 또한 문한영의 연구³⁾에서 사용한 L형박스를 이용하여 수중불분리성 콘크리트 시료가 40 cm 위치에 도달하는 시간(efflux time)을 측정하였다.

2.3.5 압축강도

압축강도는 KS F 2405에 의해 시험하였다.

2.3.6 약품저항성

해수중에서 제조한 φ10×20 cm 공시체를 압축강도 200 kgf/cm² 이상이 발현될 때까지 표준양생을 실시한 후 약품 용액에 침지하여 침지 후 경과일 별 압축강도, 중량변화 및 XRD 분석을 실시하였으며 압축강도는 KS F 2405에 의해 측정하였다.

2.3.7 중량변화

3종류의 수중불분리성 콘크리트를 약품용액에 침지한 후 경과일 7, 28, 56 및 91일에 다음 식에 의하여 측정하였다.

$$\text{중량변화(\%)} = \frac{\text{침지후 공시체의중량(g)}}{\text{침지전 공시체의중량(g)}} \times 100$$

2.3.8 X선 회절분석

약품용액에 91일간 침지한 수중불분리성 콘크리트 공시체의 침식 부위를 채취하여 분말법에 의하여 X선 회절분석을 실시하였으며 측정조건은 Cu Kα : 36 KV, 20 mA, Ni filter, Scan speed : 5°/min, 2θ : 5~40°로 하였다.

2.4 수중불분리성 콘크리트의 배합

설계기준강도 300 kgf/cm², 물-결합재비 50 % 및 공기량 4 %의 수중불분리성 콘크리트를 목표로 플라이애시 10, 20 및 30 %와 슬래그미분말 40, 50 및 60 %를 시멘트와 각각 혼합하여 제조하였으며 본 실험에 사용된 수중불분리성 콘크리트의 배합은 Table 6과 같다.

3. 수중불분리성 콘크리트의 기초물성에 대한 실험결과 및 고찰

3.1 공기량 및 응결시간

보통포틀랜드시멘트만을 사용한 수중불분리성 콘크리트(이하 OPC 또는 기준콘크리트)와 플라이애시 및 슬래그미분말을 각각 3단계로 시멘트에 혼합한 7배합의 수중불분리성 콘크리트의 공기량 및 응결시간을 측정하여 정리한 것이 Fig. 2이다.

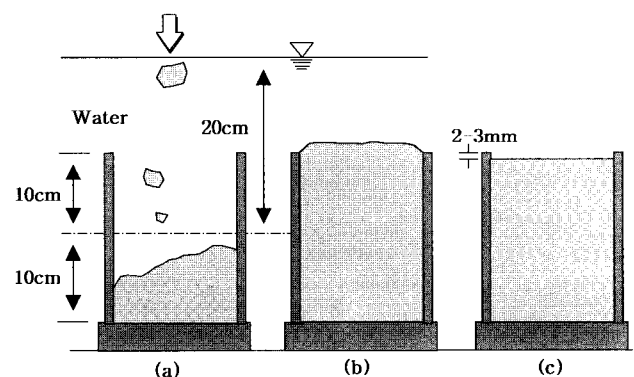


Fig. 1 Cast method of antiwashout underwater concrete

Table 5 Composition of artificial seawater(g/ℓ)

NaCl	MgCl ₂ · 6H ₂ O	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl
24.53	5.20	4.09	1.16	0.695

Table 6 Mix proportions of antiwashout underwater concrete

Items Types	G _{max} (mm)	Slump flow (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						AWA (W×%)	HRWR (C×%)
						C	FA	SG	G	S	W		
OPC	25	50±5	4	50	42	420	0	0	938	674	210	1.2	1.8
FA10	"	"	"	"	"	378	42	0	928	667	"	"	"
FA20						336	84	0	918	660			
FA30						294	126	0	909	653			
SG40	"	"	"	"	"	252	0	168	927	666	"	"	"
SG50						210	0	210	924	664			
SG60						168	0	252	921	662			

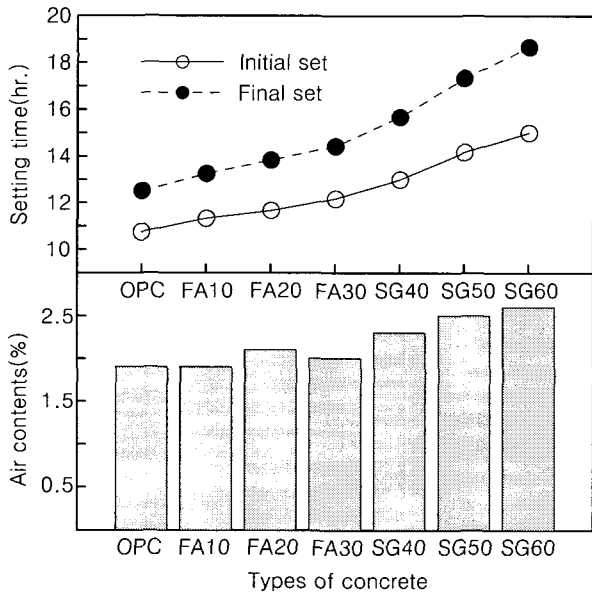


Fig. 2 Air contents and setting time of antiwashout underwater concrete

이 그림에서 알 수 있듯이 수중불분리성 콘크리트의 공기량은 혼화제의 종류 및 혼합물에 따라 약간 상이하였으며, 슬래그미분말 및 플라이애시를 각각 사용한 수중불분리성 콘크리트의 공기량이 기준콘크리트와 비교하여 약간 크게 나타났다.

일반적으로 수중불분리성 혼화제는 혼합수와 접촉하면서 망상의 고리를 형성하여 점성을 증가시키며 크고 불규칙한 기포가 형성되면서 공기량을 증가시켜 수중불분리성 콘크리트의 물성 및 내구성에 악영향을 미친다. 그러나 혼화제의 유무에 관계없이 공기량은 2.0~2.5%로서 대한토목학회 “콘크리트용 수중불분리성 혼화제의 품질기준(안)”의 공기량 규정 값 4% 이하였다.

한편 수중불분리성 콘크리트의 응결시간을 측정된 결과, 혼화제의 종류에 따라 상이하였으며 혼합물이 증가함에 따라 초결 및 종결시간이 다같이 비례하여 지연됨을 알 수 있다. 그러나 본 실험에 사용된 수중불분리성 콘크리트의 경우, 플라이애시 및 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 응결시간은 대한토목학회의 “콘크리트

용 수중불분리성 혼화제 품질기준(안)”에서 규정한 초결 5시간 이상, 종결 30시간 이하를 만족하는 결과를 나타내었다.

수중불분리성 콘크리트의 응결시간이 보통콘크리트보다 크게 지연되는 경향은 셀룰로오스계 수중불분리성 혼화제가 시멘트입자에 흡착되어 시멘트의 수화를 지연시키기 때문이다⁷⁾.

3.2 재료분리도

일반적인 수중콘크리트의 경우, 수중 작업 시 물에 의한 시멘트 유실 및 희석으로 인한 콘크리트의 품질 저하뿐만 아니라 수질오염에 따른 타설 현장 주변의 생태계에 나쁜 영향을 미치는 문제가 종종 발생한다. 따라서 수중불분리성 콘크리트의 물에 의한 분리저항성을 비교 평가하기 위하여 씻기분석시험, pH, 탁도 시험 및 수중에서 제조한 압축강도와 기중에서 제조한 압축강도(수중/기중 압축강도비) 등이 있으며, 이들 중 탁도와 pH 값이 수중 불분리 저항성을 평가하는 척도로 주로 많이 사용되고 있다. 그래서 광물질 혼화제의 혼합률을 달리하여 제조한 수중불분리성 콘크리트의 pH값과 현탁물질량을 측정된 결과를 정리한 것이 Fig. 3이다. 먼저 Fig. 3에서 현탁물질량을 살펴보면, 기준콘크리트 65mg/l 에 비하여 플라이애시 및 슬래그미분말을 각각 혼합한 수중불분리성 콘크리트는 102~127mg/l 및 73~94mg/l 정도였으며, 혼화제의 혼합

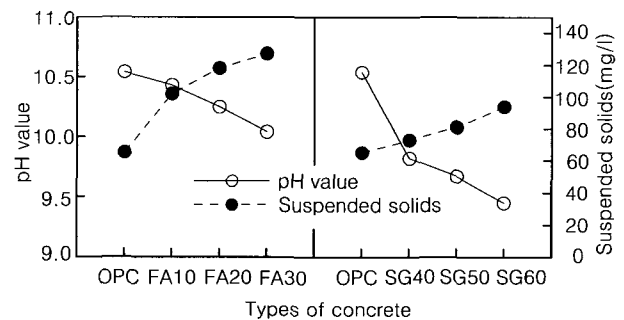


Fig. 3 pH value and suspended solid of antiwashout underwater concrete

물이 증가할수록 현탁물질량이 증가하는 경향을 나타내었다.

슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 현탁물질량이 증가하는 이유는 슬래그미분말이 수중불분리성 혼화제에 흡착되는 양이 적을 뿐만 아니라 수중에서 물과 접촉하면 분리되어 혼합물이 증가할수록 현탁물질량이 많아졌다고 생각되며, 특히 플라이애시를 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 현탁물질량이 슬래그미분말을 혼합한 수중 불분리 콘크리트보다 큰 이유는 플라이애시 중의 미연소 탄소가 수중불분리성 혼화제를 흡착하는 양이 많기 때문에 시멘트입자의 유실이 커진 탓으로 생각된다⁸⁾.

한편, 플라이애시 및 슬래그미분말을 각각 혼합한 수중 불분리성 콘크리트의 pH값은 기준콘크리트와 비교하여 약간 작은 값을 나타내었으며, 혼합률이 증가함에 따라 감소하는 경향은 혼화제의 혼합률이 증가함에 따라 상대적으로 시멘트량이 적어져 수중불분리성 콘크리트의 알칼리가 낮아진 결과로 생각된다. 그러나 이들 값들은 대한도목학회의 “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(안)”에서 규정한 pH값 12이하 및 현탁물질량 150 mg/l 이하를 모두 만족하는 결과를 나타내었다.

3.3 유동성 및 충전성

수중불분리성 콘크리트는 주로 수중에서 시공하기 때문에 다짐을 할 수 없는 경우가 많으므로 보통 콘크리트와는 달리 매우 큰 유동성 및 충전성이 요구되는 특성이 있다⁴⁹⁾. 따라서 본 연구에서는 셀룰로오스계 수중불분리성 혼화제를 사용한 수중불분리성 콘크리트의 유동성을 향상시키기 위한 수단으로 멜라민계 고성능 감수제를 병용하였다.

두 종류의 광물질 혼화제를 3단계로 각각 혼합하여 제조한 수중불분리 콘크리트의 슬럼프플로우, U형박스를 이용한 높이차 및 L-type 박스에 의한 도달시간을 측정된 결과를 정리한 것이 Fig. 4이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 플라이애시 및 슬래그미분말의 혼합률의 증가에도 불구하고 슬럼프플로우 값의 변동은 매우 작았으나, 도달시간은 거의 비례적으로 단축되는 경향을 나타내었다. 한편, U형박스를 이용한 높이차를 경과시간 5 및 10분 후에 측정된 값을 비교해본 결과, 플라이애시 및 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 높이차는 경과시간에 관계없이 기준콘크리트보다 감소됨을 알 수 있다.

특히 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 도달시간 및 높이차는 슬래그미분말의 혼합률이 증가함에 따라 각각 크게 단축 및 작아지는 좋은 결과를 나타내었다. 이상의 실험결과를 종합해보면, 플라이애시 및 슬래그미분말은 수중불분리성 콘크리트의 유동성 및 충전성의 향상에 크게 유효함을 알 수 있었다.

플라이애시 및 슬래그미분말이 수중불분리성 콘크리트

의 유동성 및 충전성 향상에 크게 기여하는 데는 플라이애시의 구형 미립자가 시멘트 입자사이에서 불-베어링작용 때문이며, 슬래그미분말은 믹싱하는 동안 콘크리트 중의 혼합수를 시멘트 보다 적게 흡수하기 때문으로 생각된다^{10~11)}.

3.4 압축강도

기준콘크리트와 플라이애시 및 슬래그미분말을 각각 3 단계로 변화하여 제조한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도를 측정하였으며 기준콘크리트 100에 대한 압축강도비를 제조조건(기중, 수중 및 인공해수)과 재령별로(7, 28 및 91일) 정리한 것이 Fig. 5이다. 이 그림에서 재령 7일 및 28일에서 혼화제의 종류, 혼합량 및 제조조건에 따라 수중

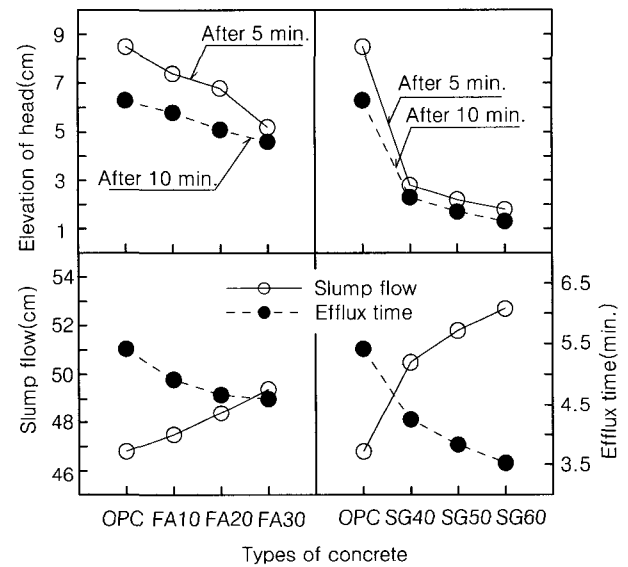


Fig. 4 Slump flow, efflux time and elevation of head of antiwashout underwater concrete

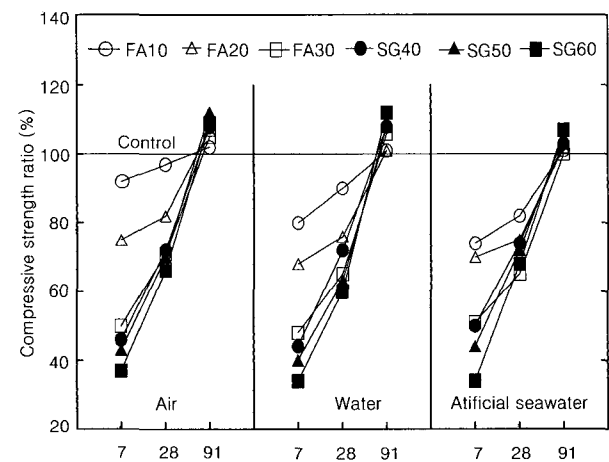


Fig. 5 Compressive strength ratio of antiwashout underwater concrete

불분리성 콘크리트의 압축강도 차이가 매우 큼을 알 수 있다. 특히 재령 28일까지는 광물질 혼화재의 혼합률이 증가함에 따라 기준콘크리트보다 강도발현이 크게 지연되었으나, 재령 91일에서는 플라이애시의 포졸란반응 및 슬래그미분말의 잠재수경성의 영향으로 인하여 기준콘크리트보다 오히려 큰 강도증진 현상을 나타내었다.

한편 Fig. 6은 플라이애시 및 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트 압축강도를 각각의 재령에서 기준콘크리트에 대한 비로 정리한 것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 각 재령에서 혼화재의 종류 및 혼합량에 따른 압축강도 발현 특성을 확연히 구분할 수 있으며 혼화재의 혼합량이 많을수록 초기재령에서 압축강도 발현이 늦어지는 경향을 볼 수 있었다. 한편 재령 28일까지는 플라이애시를 사용한 수중불분리성 콘크리트가 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트에 비하여 높은 압축강도를 나타내었으나 재령 91일에서는 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트가 플라이애시를 사용한 경우보다 약간 상승하는 결과를 나타내었다.

다음 Fig. 7은 각각 수중/기중 및 해수중/기중 압축강도비를 나타낸 것이다.

대한토목학회(1995)의 “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질기준(안)”에서는 수중불분리성 콘크리트의 수중/기중 압축강도비를 재령 7일에서 60% 이상, 재령 28일에서 70% 이상으로 규정하고 있으며 본 실험에서는 광물질 혼화재의 종류 및 혼합률에 관계없이 수중/기중 압축강도비의 경우는 75% 이상, 해수중/기중의 경우는 70% 이상으로 측정되어 대한토목학회의 기준을 만족함을 알 수 있다.

4. 수중불분리성 콘크리트의약품저항성에 대한 고찰

수중불분리성 콘크리트 7배합 중 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 경우와 플라이애시 20% 및 슬래그미분말 50%를 각각 혼합한 3배합을 선정하여 해수중 제조만을 하였고, 제조된 수중불분리성 콘크리트를 4종류의약품용액에 91일 간 침지하여 압축강도를 측정하여 정리한 것이 Table 8이다. 이때 수중불분리성 콘크리트를약품용액에 침지하는 시기는 각각의 공시체가 200 kgf/cm² 이상의 압축강도를 발현하는 재령으로서 수중불분리성 콘크리트에 사용된 광물질 혼화재의 종류에 따라 압축강도의 발현시기는 Table 7에서 알 수 있듯이 크게 상이하게 나타났다.

4.1 약품용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도

기준콘크리트와 플라이애시 및 슬래그미분말을 각각 20

% 및 50%로 혼합한 3종류의 수중불분리성 콘크리트를 각각 4종류 약품용액에 침지한 후 기준콘크리트에 대한 압축강도비로 정리한 것이 Fig. 8이다. 이 그림에서 광물질 혼화재 2종류를 혼합한 수중불분리성 콘크리트는약품용액에 따라 약간 상이하였으나 침지 7일 이후 전반적으로 기준콘크리트보다 월등히 큰 압축강도비를 나타내었다. 특히 5% 황산용액에 91일 동안 침지한 FA20 및 SG50 수중불분리성 콘크리트의 압축강도비는 기준콘크리트와

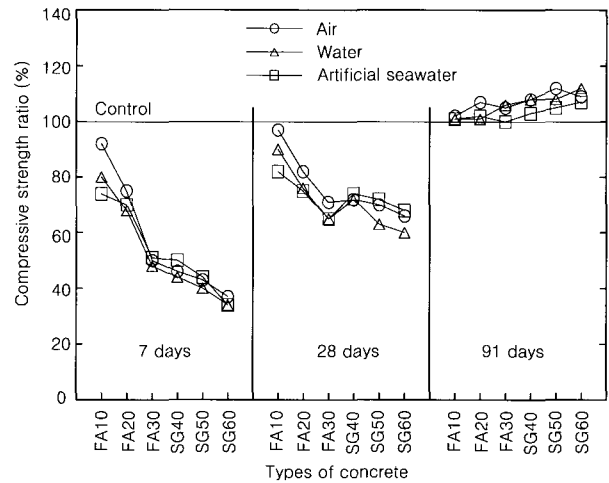


Fig. 6 Compressive strength ratio of antiwashout underwater concrete

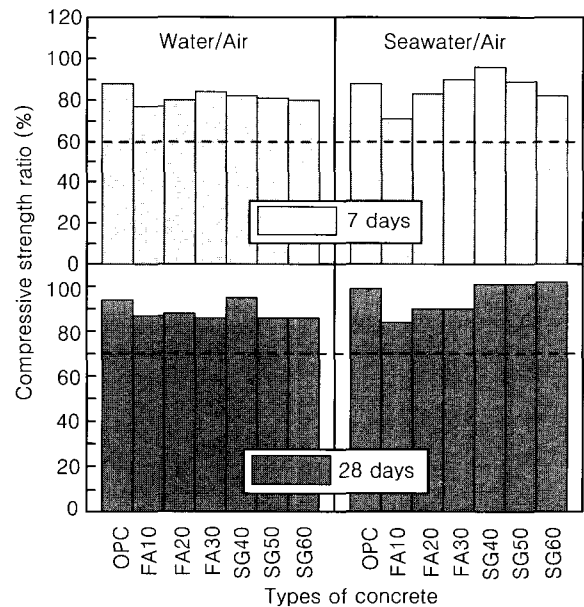


Fig. 7 Compressive strength ratio of antiwashout underwater concrete

Table 7 Pre-curing period for compressive strength of 200 kgf/cm²

Types of concrete	OPC	FA20	SG50
Age(days)	8	22	24

Table 8 Compressive strength of antiwashout underwater concrete immersed in chemical solution (kgf/cm²)

Immersed age(days)	Types			Water			×2 Artificial seawater			10 % Na ₂ SO ₄ solution			10 % CaCl ₂ solution			5 % H ₂ SO ₄ solution		
	OPC	FA20	SG50	OPC	FA20	SG50	OPC	FA20	SG50	OPC	FA20	SG50	OPC	FA20	SG50	OPC	FA20	SG50
7	260	210	224	226	208	224	250	228	222	242	214	231	210	206	220			
28	304	295	299	287	304	314	294	327	326	306	310	338	232	283	296			
56	340	348	357	327	351	376	299	358	367	328	359	388	215	312	335			
91	349	360	384	286	328	370	285	317	338	292	336	377	189	274	300			

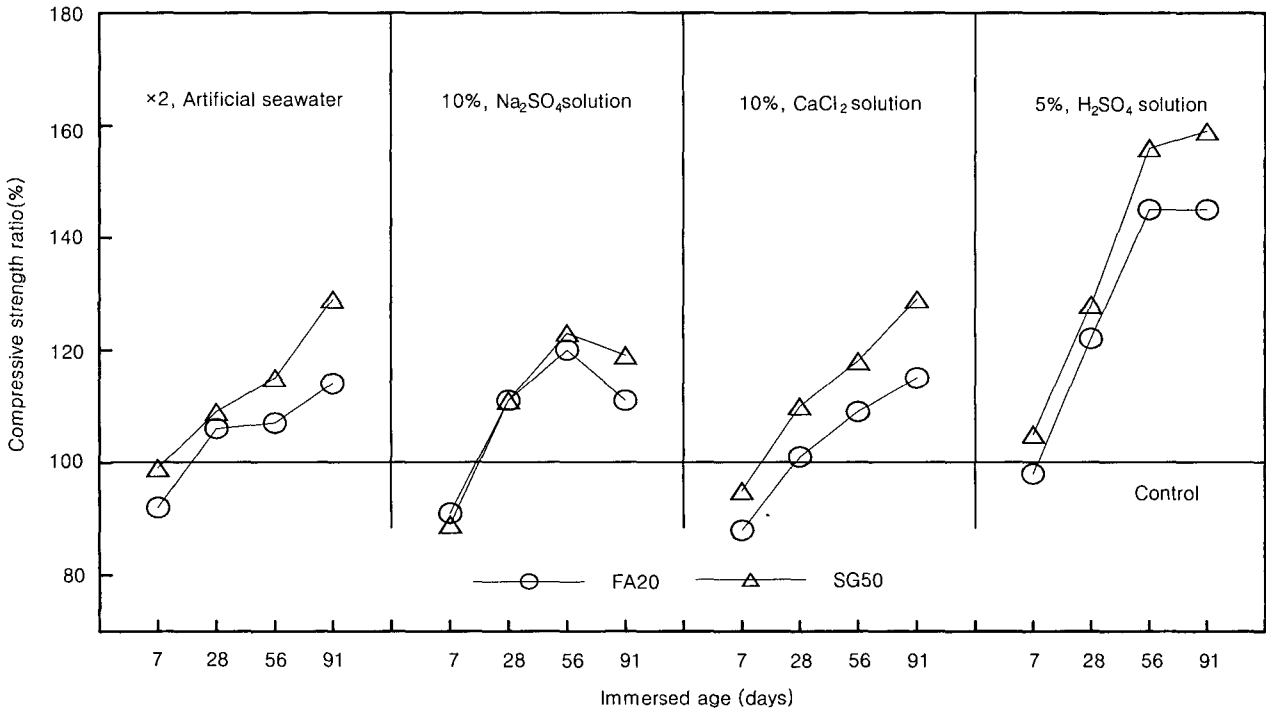


Fig. 8 Compressive strength ratio of antiwashout underwater concrete

비교하여 각각 45% 및 60% 정도의 큰 값을 나타내었다.

플라이애시 및 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도비가 기준콘크리트와 비교하여 큰 이유는 플라이애시의 포졸란반응과 슬래그미분말의 잠재수경성으로 시멘트 경화체의 조직을 밀실화 함으로써 Cl⁻ 및 SO₄²⁻ 등 유해이온의 침투를 부분적 차단 내지는 유해이온과 반응할 수 있는 Ca(OH)₂가 감소한 탓으로 판단된다.

그러므로 수중불분리성 콘크리트의 경우에도 각종 약품용액에 대한 저항성을 증진시키기 위해서는 플라이애시 또는 슬래그미분말 등과 같은 광물질 혼화재를 적정량 혼합 사용함이 바람직하며, 혼화제를 사용하여 약품저항성을 개선시킨 Freeman의 연구¹²⁾ 와도 일치하는 결과를 얻었다.

이번에는 91일간 4종류의 약품용액에 침지한 3종류 수중불분리성 콘크리트의 압축강도 감소율을 아래 식으로 계산하여 나타낸 것이 Fig. 9이다.

$$\text{압축강도 감소율} = \frac{f_w - f_s}{f_w} \times 100$$

여기서, f_w = 표준양생한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도(kgf/cm²)

f_s = 각 약품용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도(kgf/cm²)

이 그림에서 플라이애시 및 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도 감소율이 기준콘크리트보다 적게 나타남을 알 수 있으며, 특히 5%의 황산용액에 침지한 경우, SG50 수중불분리성 콘크리트의 압축강도 감소율이 기준 콘크리트에 비교하여 24% 정도 작게 나타났다.

이상의 실험결과를 종합해 볼 때, 슬래그미분말 50% 혼합 수중불분리성 콘크리트의약품용액에 대한 저항성이 플라이애시 20% 혼합 수중불분리성 콘크리트 보다 약간 효과적임을 확인하였다.

또한 용액별로 압축강도 감소율을 살펴보면 황산용액에서 가장 큰 감소가 일어났으며 황산나트륨, 인공해수, 염화칼슘의 순으로 압축강도 감소율이 작게 나타났다. 한편 염화칼슘용액에서 압축강도 감소는 침투한 Cl^- 이온과 수산화칼슘 및 C-S-H와 반응하여 가용성의 $CaCl_2$ 를 생성하고, 용출함으로써 시멘트 경화체를 다공화시켜 압축강도가 감소한 것으로 판단되며 Longo¹³⁾의 연구에서는 염화칼슘에 대한 저항성을 증진시키기 위해서 혼합시멘트의 필수적 사용을 권장하고 있다

4.2 약품용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트의 중량변화

4종류의 약품용액에 각각 침지한 기준콘크리트와 FA20 및 SG50 수중불분리성 콘크리트의 중량변화를 91일 까지 측정하여 침지전 중량에 대한 비로 정리해 본 결과 재령이 짧은 탓으로 5%의 황산용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트를 제외한 나머지 3종류의 약품용액에 대한 중량 변화는 평가하기 어려울 정도로 미미하였다.

그래서 4종류 약품용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트 중 중량변화가 가장 큰 5% 황산용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트만의 중량변화율을 각각 재령별로 나타낸 것이 Fig. 10이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 침지 후 경과 일에 관계없이 3종류 수중불분리 콘크리트 다같이 중량감소율이 크게 일

어났으며, 특히 기준콘크리트의 중량감소율이 가장 컸으며 침지 후 91일에서는 36%의 중량감소율을 나타내었다. 반면, FA20 및 SG50 수중불분리성 콘크리트의 경우, 침지 후 91일에서 중량감소율이 각각 25% 및 20%로 기준콘크리트 보다 각각 11 및 16%로 월등히 작게 나타났다.

수중불분리성 콘크리트를 약품용액에 침지할 경우, 중량이 감소되는 이유는 약품용액 중 SO_4^{2-} 이온이 침투하여 시멘트 수화물 중 $Ca(OH)_2$ 와 반응함으로써 석고를 생성하게되며, 석고의 연화작용으로 인하여 중량이 감소되었다고 판단된다. 따라서 시멘트 경화체의 조직이 밀실한 FA20 및 SG50 수중불분리성 콘크리트는 기준콘크리트와 비교하여 SO_4^{2-} 이온의 침투가 용이하지 못했을 뿐만 아니라 반응할 수 있는 수산화칼슘의 양도 적어 중량감소가 기준콘크리트에 비하여 작게 나타난 것으로 생각된다.

4.3 약품용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트의 반응생성물

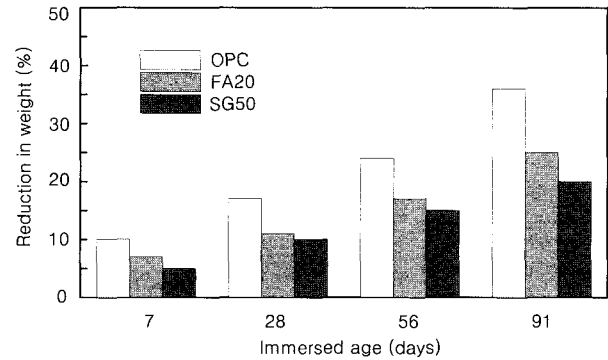


Fig. 10 Weight change ratio of antiwashout underwater concrete immersed in 5% H_2SO_4 solution

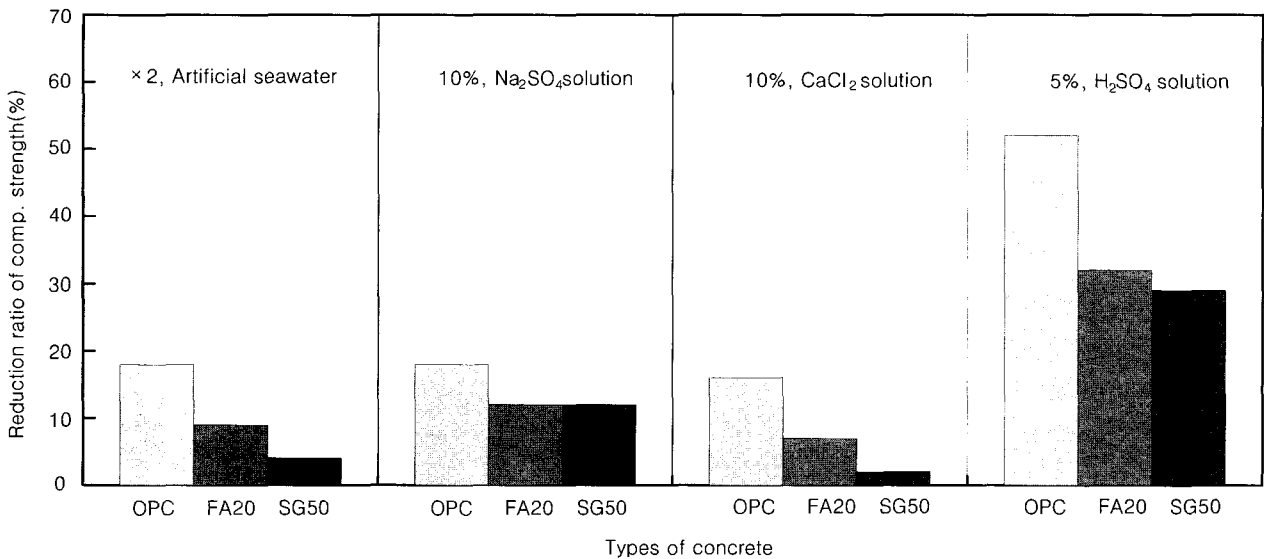


Fig. 9 Reduction in compressive strength (% , 91 days)

인공해수, 황산나트륨, 염화칼슘 및 황산용액에 91일간 침지한 3종류 수중불분리성 콘크리트의 반응생성물을 알아보기 위하여 XRD 분석을 실시하였으며 그 결과를 정리한 것이 각각 Fig 11, 12, 13 및 14이다. 그러나 각 종류의 약품용액에서 Quartz 결정의 강한 회절피크로 인하여 생성물을 규명하는데 어려움이 있었다.

Fig. 11은 인공해수에 침지한 3종류 수중불분리성 콘크리트의 XRD 분석결과로써 황산이온 및 Cl 이온의 침투로 인한 에트링가이트 및 Friedel's salt($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)의 피크가 나타났으며, 기준콘크리트의 경우 작은 피크강도 였으나 Mg^{2+} 이온의 영향으로 인한 brucite로 추정되는 피크를 확인할 수 있었다.

황산나트륨용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트의 XRD 분석결과가 Fig. 12로써, 3종류의 수중불분리성 콘크리트에서 각각 Portlandite의 피크를 확인할 수 있었으며, 에트링가이트 및 석고의 피크도 확인되었으나 기준콘크리트에서 약간 큰 강도의 피크를 나타내었다.

이는 플라이애시의 포졸란 반응 및 슬래그미분말의 잠재수경성으로 시멘트 경화체의 조직이 밀실해져 황산이온의 침투를 용이하지 못하게 한 탓으로 판단된다.

Fig. 13는 염화칼슘용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트의 XRD 분석결과로써, 염화물이온의 일부가 C_3A 와 반응하여 생성된 Friedel's salt의 피크와 Portlandite 피크를 확인하였으며, 황산용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트의 XRD 분석결과를 나타낸 것이 Fig. 14으로써 황산이온의 침투로 인하여 수산화칼슘과 반응으로 생성된 석고의 피크가 크게 나타난 반면 portlandite 피크는 작은 피크로서 확인되었다. 황산용액에 침지한 경우, 압축강도 감소율이 가장 큰 결과에서 알 수 있듯이 석고의 생성은 시멘트 경화체를 연화 내지는 팽창시켜 콘크리트 성능을 크게 저하시킨다고 판단된다.

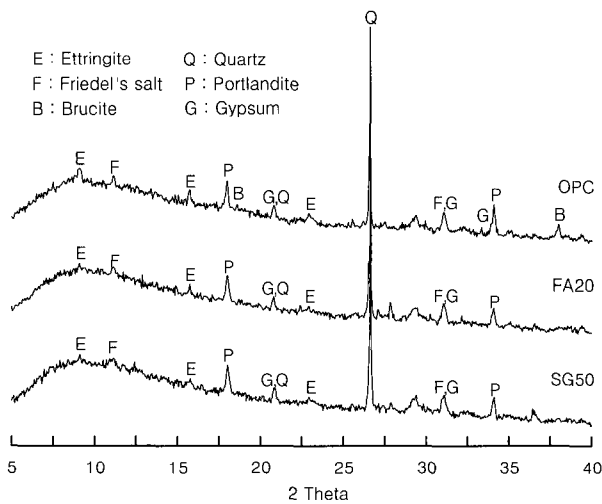


Fig. 11 XRD analysis($\times 2$, Artificial seawater, 91 days)

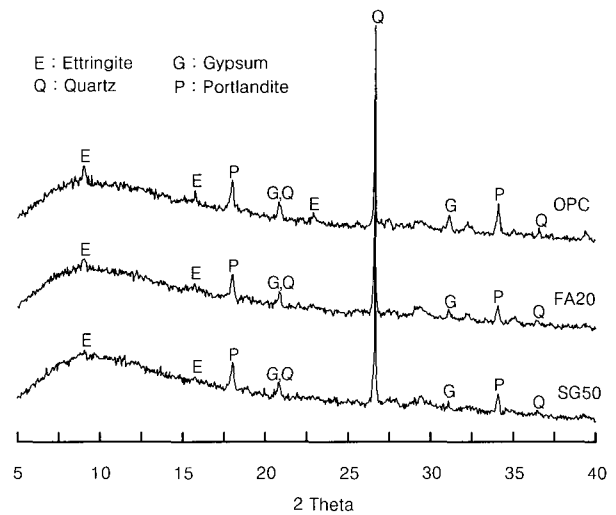


Fig. 12 XRD analysis(10 %, Na_2SO_4 solution, 91 days)

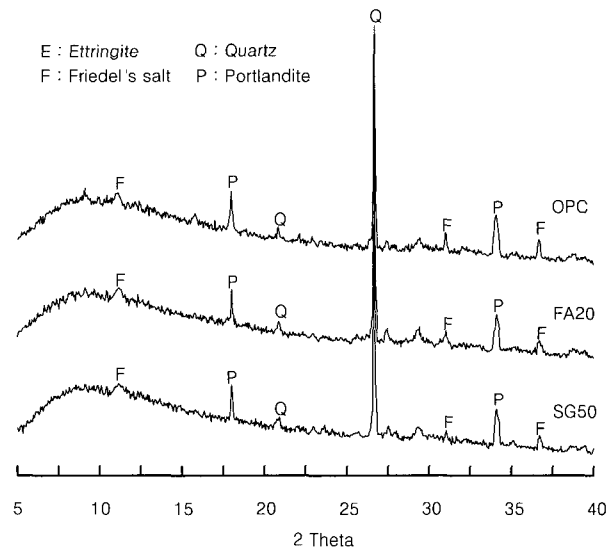


Fig. 13 XRD analysis(10 %, $CaCl_2$ solution, 91 days)

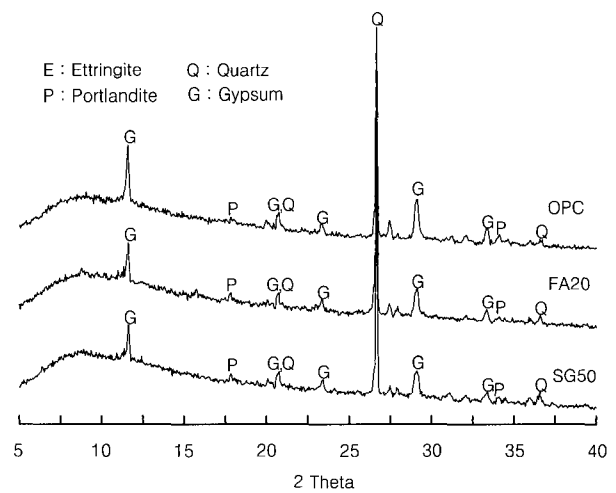


Fig. 14 XRD analysis(5 %, H_2SO_4 solution, 91 days)

1) 플라이애시 및 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 공기량 및 응결시간은 혼화재의 종류 및 혼합률에 따라 기준콘크리트와 비교하여 각각 상이하였으나, “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(안)”의 공기량은 4% 이하 및 초결 5시간이상과 종결 30시간 이하의 규정을 만족하는 결과를 나타내었다.

2) 수중불분리성 콘크리트의 현탁물질량은 기준콘크리트 65 mg/l, 플라이애시 및 슬래그미분말을 각각 혼합한 경우 102~127 mg/l 및 73~94 mg/l 정도였으며, pH값은 기준콘크리트 보다 약간 작은 값이며 “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(안)”에서 각각 규정한 pH값 12 및 현탁물질량 150 mg/l 이하의 결과를 나타내었다.

3) 광물질 혼화제를 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 슬럼프플로우 값은 혼합률에 관계없이 큰 차이가 없었으나, L형박스 도달시간은 거의 비례적으로 단축되었다. 한편, U형박스를 이용한 높이차는 경과시간에 관계없이 기준콘크리트보다 감소됨으로써 수중불분리성 콘크리트의 유동성 및 충전성의 향상에 크게 유효함을 알 수 있었다.

4) 광물질 혼화제를 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도는 기준콘크리트보다 초기재령에서는 작았으나 장기재령에서는 오히려 크게 증진되었다. 또한, 수중불분리성 콘크리트의 재령 7 및 28일 수중/기중 압축강도비를 측정된 결과, 광물질 혼화제의 종류 및 혼합률에 관계없이 75% 이상으로 대한토목학회의 품질규준을 만족하였다.

5) 수중불분리성 콘크리트를 4종류 약품용액에 침지한 결과, 광물질 혼화제를 혼합한 경우 압축강도는 기준콘크리트를 크게 상회하였다. 그러나 인공해수, 황산나트륨 및 염화칼슘용액에 침지한 수중불분리성 콘크리트의 중량변화는 미미하였다. 한편, 황산용액의 경우 FA20 및 SG50 수중불분리성 콘크리트의 중량감소율은 기준콘크리트보다 11 및 16% 정도 작게 나타났다.

6) 수중불분리성 콘크리트를 4종류 약품용액에 91일간 침지하여 반응생성물을 분석한 결과, 인공해수에 침지한 경우 에트링가이트 및 Friedel's salt의 피크가 각각 나타났으며, 황산용액에 침지한 경우 FA20 및 SG50 수중불분리성 콘크리트의 석고의 피크가 기준콘크리트보다 약간 작게 나타남으로써 약품용액에 대한 저항성이 우수하였다.

7) 이상과 같은 실험결과를 바탕으로 수중불분리성 콘크리트의 기초물성 및 내구성을 향상시키기 위해서는 광물질 혼화재의 사용이 필수적이라 판단되며, 그 적정 사용량은 플라이애시의 경우 20~30%, 고로슬래그미분말은 50~60% 정도가 적정 혼합량이라고 사료된다.

1. 문한영, 김진철, “수중불분리성 콘크리트의 기초적 물성에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 제18권, 1998.5, pp. 313~321.
2. 문한영, 김성수, 전중규, 송용규, “수중불분리성 콘크리트의 고품질화 연구,” 콘크리트학회논문집, 제12권 5호 2000. 10.
3. 문한영, 김성수, 이재준, “수중불분리성 혼화제의 성능평가를 위한 실험적 연구,” 콘크리트학회논문집, 제11권 5호 1999. 10.
4. 문한영, 송용규, “수중불분리성 콘크리트의 고강도화를 위한 연구,” 대한토목학회논문집, 제20권 6~A호 2000. 11.
5. Haque, M. N., Al-Khaiat, H., “Durable Concrete Structure in a Chloride Sulfate Rich Environment,” *Concrete International*, Vol.9, 1999, pp.49~52.
6. Gjrv, O. E., “Long-Time Durability of Concrete in Seawater,” *ACI Journal*, January, 1971, pp. 60~67.
7. Kamal, H. K., “Effect of Antiwashout Admixture on Fresh Concrete Properties,” *ACI Material Journal*, Vol. 92, No. 2, 1995, pp.164~171.
8. 大友 建, 松岡康訓, “水中不分離性コンクリートの流動性の保持に及ぼす各種混和剤の作用に関する研究,” 工學年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, 1991, pp.192~202.
9. 舟橋政可, 大西雅也, 森本英樹, 渡部 正, “水中不分離性コンクリートの低發熱化, 高流動化に関する研究,” 콘크리트工學年次論文報告集, 20~2, 1998, pp.319~324.
10. 문한영 외, “고로슬래그미분말을 혼합한 고강도 수중불분리성 콘크리트,” 콘크리트 학술 발표회, Vol. 11, No. 2, 1999.
11. 문한영, 서정우, 손정호, “플라이애시를 혼합한 콘크리트의 내약품성에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 제 8권, 1호, 1988. 3.
12. Freeman, R. B. and Carrasquillo, R. L., “Product of Sulfate-Resistance Containing High Calcium Fly Ash and Sodium Sulfate Admixture,” Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, *ACI SP-91*, Vol. 2, 1986, pp.153~167.
13. Longo, A. and Torrent, R. J., “Method of Addition of Blast-Furnace Slag; Their Effect on the Compressive Strength of Mortar and Concrete,” Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, *ACI SP-91*, Vol. 2, 1986, pp. 1381~1399.

요 약

해양 환경하에 건설되는 수중콘크리트 구조물의 경우, SO_4^{2-} , Cl^- 및 Mg^{2+} 과 같은 유해이온에 의한 화학적 침식작용으로 인하여 콘크리트의 성능이 크게 저하된다. 수중콘크리트에 발생하는 이러한 성능저하의 문제점을 향상, 개선시키기 위한 목적으로 플라이애시 및 고로슬래그미분말을 보통포틀랜드시멘트에 혼합하여 수중불분리성 콘크리트의 물성 향상을 시도하였다. 본 연구 결과 플라이애시 및 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 pH, 현탁물질량, 공기량 및 응결시간은 각각 대한토목학회 “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질기준(안)”을 만족시켰다. 또한 광물질 혼화제를 혼합한 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 슬럼프플로우 값, L형박스 도달시간 및 U형박스의 높이차와 같은 유동성은 기준콘크리트보다 크게 향상되는 좋은 결과를 얻었다. 광물질 혼화제를 혼합한 경화한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도는 장기재령에서 크게 증진되는 효과가 있었으며, 재령 7 및 28일 수중/기중 압축강도비를 측정한 결과, 대한토목학회의 품질기준인 60 및 70%를 상회하였다. 그리고 수중 불분리성 콘크리트를 4종류의 약품용액에 침지하여 반응생성물을 XRD분석 결과, 인공해수의 경우 에트린가이트 및 Friedel's salt의 피크가 나타났으며, 황산용액의 경우 FA20 및 SG50 수중불분리성 콘크리트의 석고의 피크가 기준콘크리트보다 약간 작게 나타남으로써 약품용액에 대한 저항성이 어느 정도 우수함을 확인하였다.

핵심용어 : 수중불분리성 콘크리트, 고로슬래그미분말, 플라이애시, 약품저항성, 황산용액, 인공해수, XRD분석
