한국해양공학회지 제25권 제3호, pp 40-46, 2011년 6월 (ISSN 1225-0767)

플라이애시를 혼입한 수중불분리성 콘크리트의 내 황산염에 관한 실험적 연구

권중현* · 김봉익*
*경상대학교 해양과학대학 해양토목공학과 해양산업연구소

An Experimental Study on the Sulfate Resistance of Fly Ash Antiwashout Underwater Concrete

Joong-Hyen Kwon* and Bong-Ik Kim*
Institute of Marine Industry, Division of Ocean civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

KEY WORDS: Antiwashout underwater concrete 수중불분리성 콘크리트, Fly ash 플라이애시, Sulfate Resistance 내 황산염

ABSTRACT: *This paper describes the effects of fly ash replacement on the sulfate resistance of antiwashout underwater concrete which was replaced cement by fly ash from 0% to 50%. and the experimental works were performed on sulfate acceleration test of 5%Na_2SO_4 solution to find out the variance of length and weight of specimens. The experimental result shows that the length of specimens of antiwashout underwater concrete age at 180day was highly increased compare with normal concrete by acceleration test. but the mixture which was replaced 50% of fly ash shows reduction of the expansion, weight various, compare with normal concrete specimen. accordingly by using fly ash as admixture in antiwashout underwater concrete in sea environment, it will makes more durable for the attacks of sulfate by sea water.*

1. 서 론

해양콘크리트는 기상, 해상의 물리 화학적 작용에 의해 일반콘크리트보다 열화가 발생하기 쉬우므로 내구성저하가 일어날 가능이 매우 크다. Monica et al.(1993)는 해양콘크리트 구조물의 설계 시 고려하여야 할 항목 중 가장 중요한 요소를 콘크리트의 내구성으로 지적하고 있다. 해양콘크리트에 발생할 수 있는 내구성 저하의 원인 중 해수중의 콘크리트 타설로 일어나는 시멘트 유실, 재료분리 등의 품질저하는 수중불분리성 혼화제의 개발로 인해 획기적으로 개선되었다. 그러나 콘크리트가 화학적 열화작용의 원인이 되는 염류 중 황산염 (Na_2SO_4 및 $MgSO_4$)과 결합하게 되면 용출되어 콘크리트의 다공화 현상을 진행시키는 NaOH를 생성하게 되며, 간상결정체인 에트링가이트를 만들어 급격히 콘크리트의 팽창 붕괴에 이를 수 있다. 이와 같이 시멘트의 해수작용에 의한 복잡한 화학적 작용에 증점제인 수중불분리성 혼화제와 고유동화제를 사용하였을 시 콘크리트의 물성의 변화는 더욱 더 복잡한 화학적 변화가 예상된다. 따라서 이를 개선시킬 수 있는 적절한 혼화재료에 대한 연구가 필요하나 수중불분리성 콘크리트는 개발의 역사가 길지 않아 시공실적과 연구가 미흡한 실정이다. Takeshi et al. (1995)는 수중불분리성 콘크리트에 셀룰로오스계의 수중불분리성 혼화제를 사용하였을 경우 혼화제는 시멘트입자와 결합하고 다른 혼화제를 흡착한다는 연구결과를 제안한 점을 미루어보면 콘크리트를 해양에 타설 할 때 수중불분리성 콘크리트에 사용된 혼화제의 화학적 조성과 해수의 상호작용이 콘크리트에 영향을 줄 수 있음을 예상할 수 있다. 그러나 콘크리트의 화학적 반응은 장시간에 걸쳐 복잡하게 발생하므로 자연 상태에서 단시간에 해양환경작용에 의한 내구성을 평가하기는 어렵다. Seochon(1981)에 의하면 포졸란 물질인 플라이애시나 고로슬래그 등을 콘크리트에 첨가하면 내해수성이 개선되며, 이와 같은 경우는 시멘트 중에 C_3A의 양이 많은 경우가 오히려 내해수성이 우수하다는 연구도 있다. Malhotra et al.(1990)는 콘크리트에 플라이애시를 다량 혼입할 경우 C_3A의 수화를 완화시키는 효과가 있다고 보고하고 있다. 그러므로 해수환경 하에서는 C_3A의 양을 줄인 5종 시멘트의 사용보다는 오히려 보통 시멘트에 플라이애시와 같은 포졸란 물질을 다량 혼입함이 오히려 효과적일 것으로 예상된다. 그러나 이와 같은 연구사례가 희귀한 편이며, 특히 수중불분리성 콘크리트의 황산염의 침식작용에 대한 플라이애시의 혼입 효과에 대한 연구사례가 발견되지 않으므로 수중불분리성 콘크리트의 플라이애시 효과를 확인하기위해 플라이애시 사용량은 변화시키고 그 외 요소는 고정하였다. 침지재령은 7, 28, 60, 91, 180일간으로 하고 황산나트륨용액의 농도는 5%로 정하였다. 촉진시험 후 재령별 모르타르의 변화를 측정하였고 콘크리트의 무게 변화와 초음파 속도의 변화 측정과 SEM관찰을 하였으며, 수중불분리성 콘크

교신저자 권중현: 경상남도 통영시 인평동 천대 국치길 38 055-772-9121 vxxv@korea.com

Table 1 Physical properties of cement and fly ash

Items	Specific gravity	Blaine (cm^2/g)	Setting time (h : m)				Compressive strength (MPa)				Median size(μm)	Moisture (%)	L0I (%)
			Initial		Final		3d's	7d's	28d's	91d's			
			Vicat	Gill more	Vicat	Gill more							
OPC	3.15	3,250	2:33	3:54	5:59	6:19	21.3	27.1	41.0	45.2	15.8	0.39	1.38
FA	2.15	4,440				-					30.2	0.27	2.35

리와 일반 콘크리트의 비교를 통하여 내 황산염의 특성을 비교 분석하고 플라이애시 혼입율에 따른 플라이애시의 내 황산염 효과를 확인하였다.

2. 실험 개요

2.1 황산염에 의한 콘크리트의 침식 기구

황산염에 의한 침식기구는 염소이온에 의한 침식과 양상이 다르고 반응이 매우 복잡하다. 그 과정은 해수로부터 침투한 황산염이 콘크리트의 수화과정에서 생성되는 수산화칼슘과 반응하여 석고를 생성하게 되고 석고는 다시 시멘트 중의 C_3A와 반응하여 팽창성 물질인 에트린가이트를 생성한다. 이 때 에트린가이트가 과다하게 생성되면 콘크리트는 팽창 붕괴에 이르게 되며 그 과정은 아래와 같다 (Bunmoku, 1993).

$$2C_3S+6H \rightarrow C_3S_2H_3+3CH2C_2S+4H \rightarrow C_3S_2H_3+CH \quad (1)$$

[Hydration] → [C S H] + [$Ca(OH)_2$]

위의 과정으로 생성된 $Ca(OH)_2$는 해수 중의 황산염(Na_2SO_4 및 $MgSO_4$)을 만나 Gypsum($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)을 생성하고, 용출되어 콘크리트의 다공화 현상을 진행하는 Thaumasite, brucite와 2NaOH를 생성하게 되며 화학적 반응식은 다음과 같다.

$$Ca(OH)_2+Na_2SO_4+2H_2O \rightarrow \underline{CaSO_4 \cdot H_2O}+NaOH \quad (2)$$

$$Ca(OH)_2+MgSO_4+2H_2O \rightarrow \underline{CaSO_4 \cdot 2H_2O} + Mg(OH)_2 \quad (3)$$

위에서 생성된 Gypsum($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)은 시멘트 중에 함유되어 있는 C_3A나 C_4AF의 수화에 의해 생성된 $C_3A_6H_2O$와 반응하여 에트린가이트를 생성하며, 다른 한편으로는 해수로부터 공급되는 황산나트륨(Na_2SO_4)이 콘크리트 중의 시멘트화합물인 C_3A를 만나 (5)식의 과정과 같이 다량의 결정수를 함유하면서 간상결정으로 급격히 팽창하여 콘크리트를 붕괴하는 에트린가이트를 생성하게 되며 그 반응식은 아래와 같다.

$$3(CaSO_4 \cdot 2H_2O)+C_3A \rightarrow \underline{3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O} \quad (4)$$

$$3(Na_2SO_4 \cdot 10H_2O)+2(C_3A) \rightarrow \underline{3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O} + 2Al(OH)_3+6NaOH+17H \quad (5)$$

2.2 사용 재료

시멘트는 제1종 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였으며 그의 물리 화학적 성질은 각각 Table 1, 2와 같다. 플라이애시(FA)는 ASTM C 618-78에 의한 F급 이며, 품질은 Tab1e 1, 2와 같다. 사용된 혼화제는 수중불분리성 혼화제(AWA)와 고유동화제(SP)이다. 수중불분리성 혼화제는 셀룰로오스계로서 HPMC (Hydroxy propyl methyl cellulose)계통이다. 고유동화제는 강도 발현이 우수한 표준형 멜라민슬폰산염 축합물로서 성분 및 특성은 Tab1e 3과 같다. 사용된 골재는 최대치수가 20㎜인 고성 산부순돌과 바다 모래를 사용하였다. 골재의 시험은 KS F의 제규정에 따라 실시하였으며 그 결과는 Tab1e 4와 같이 단위질량은 다소 작은 값을 보이나 보통 콘크리트용 골재로서 필요한 제조건을 모두 충족하였다.

Table 2 Chemical composition of cement and fly ash (%)

Items	Chemical composition							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O_3	K_2O	SO_3
opc	20.20	5.80	3.00	63.30	3.40	0.12	0.92	2.10
FA	49.66	22.88	8.16	8.91	3.79	0.38	0.70	0.30

Table 3 Physical and chemical properties of admixtures

Admixtures	Composite	Form	Specific gravity	pH	Solid content (%)
A W A	HPMC	Powder	0.7	8.0	-
S P	Melamine	Liquid	1.30	7.5	35

2.3 실험 파라미터

수중불분리성 콘크리트의 해양에서의 내구성과 안정성에 미치는 영향을 확인하기 위해서 물・결합재(시멘트와 플라이애시)비 W/B, 잔골재율(S/a), 단위수량(W)을 고정한 보통 콘크리트와, 수중불분리성 혼화제 4.9kg/m^3과 고유동화제 4.4kg/m^3을 첨가한 수중불분리성 콘크리트 공시체를 제작하였다. 촉진시험 용액은 침지재령과 팽창성 및 무게변화 측정의 적정성을 고려하여 5% 농도의 황산나트륨용액으로 정하였다. 또한 콘크리트의 플라이애시 사용량 변화에 따른 내 해수성의 효과를 확인하기 위해 플라이애시의 치환율은 0%, 10%, 30%, 50%로 변화시켰다.

공시체의 침지 재령은 7일, 28일, 91일, 180일까지로 변화시켜 길이변화, 무게변화를 측정하고 X선 회절분석과 SEM촬영을 통해 화학적 생성물질을 확인하였다.

2.4 콘크리트 배합설계 및 혼합

2.4.1 배합설계

콘크리트의 설계기준강도는 21MPa이다. 콘크리트의 강도, 내구성, 수밀성을 고려하고 문헌(대한토목학회, 1991; Hanhon, 1994; Malhotra, 1994)를 참고하여 물・결합재비 W/B를 50%로 정하

Table 4 Physical properties of aggregates

Agg.	Coarse agg.max (mm)	Specific gravity	Abso-rption (%)	F.M	Unit weight (kg/m)	Porosity (%)	Solid vol. (%)	Salinity (%)	Shell (%)	Sound-ness (%)	Fine particle (%)	Alkali reaction		
												RC	SC	Judge
Fin.agg.	-	2.58	1.50	2.71	1535	40.69	-	0.0053	3.46	-	0.37	72	51.0	harmless
Coarse agg.	20	2.56	1.63	6.83	1454	41.48	56.8	-	-	5.0	1.00	95	32.3	harmless

Table 5 Mix proportions of concrete

Mix. No.	W/B (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/㎥)						
				W	C	S	G	FA	AWA	SP
Control	50	50	43	220	440	666	876	0	0.0	0.0
F0 -N	50	50	43	220	440	666	876	0	0.0	0.0
F00-A	50	50	43	220	440	666	876	0	4.9	4.4
F10-N	50	56	43	220	396	659	867	44	0.0	0.0
F10-A	50	56	43	220	396	659	867	44	4.9	4.4
F30-N	50	71	43	220	308	645	847	132	0.0	0.0
F30-A	50	71	43	220	308	645	847	132	4.9	4.4
F50-N	50	100	43	220	220	630	829	220	0.0	0.0
F50-A	50	100	43	220	220	630	829	220	4.9	4.4

였다. 단위수량은 수중불분리성 콘크리트에 관한 문헌을 참고하면 슬럼프 플로우값 45±5cm 범위를 기준으로 할 때 210~230kg/m^{3}이 일반적으로 적용되므로 본 실험에서는 220kg/m^{3}으로 정하였다(채소언, 1993; 이영제, 1992). 수중불분리성 콘크리트의 공기량은 일반 콘크리트보다 다소 많은 4±1%로 정하였고 시험결과 이 범위를 만족하였다. 잔골재율은 43%로 정하였다. 배합설계의 결과는 Table 5와 같다.

2.4.2 혼 합

대한토목학회(1995)와 한국콘크리트학회(2003)에 의하면 수중불 분리성 콘크리트의 혼합은 균질하고 양호한 콘크리트를 만들 수 있게 그 방법과 시간을 미리 시험을 통하여 콘크리트의 품질을 확인한 후 결정하는 것으로 되어 있다. 수중불분리성 콘크리트의 혼합 방법은 수중불분리성 혼화제와 시멘트 및 골재를 투입하여 30초 간 건비빔을 한 후 혼합용수와 유동화제를 투입하고 60~200초 정도 혼합하는 방법을 일반적으로 택하고 있다(Ravina, 1960; Center of Costal Engingeering Developnent, 1990; JSCE, 1994). 그러나 콘크리트에 플라이애시를 첨가하면 일반 콘크리트에 비하여 비빔시간이 더 소요된다는 보고가 있고(권중현과 김봉익, 2001), 또한 문헌에 의하면 수중불분리성 콘크리트의 경우 배합시간을 길게 함으로써 압축강도가 증가한다는 연구가 있다(Ravina, 1960). 본 연구에서는 플라이애시를 사용한 양질의 수중불분리성 콘크리트를 만들고자 건비빔 30초를 포함하여 10분간 혼합하였다.

2.5 실험방법

길이변화측정용 공시체는 모르타르를 만든 다음 습기함에 48시간 존치 후 탈형하여 해당 재령기간동안 촉신시험을 한 후 길이변화율을 측정하였다. 무게변화 및 초음파측정용 공시체는 KS F 2403에 따라 각 배합별로 100×200mm 규격의 실린더형 몰드를 제작하여 담수 중에 28일간 표준양생한 후, 해당 재령기간 동안 5%농도의 황산나트륨용액에 침지하였다. 침지 재령 180일의 공시체를 표면에서 5mm 이내의 깊이로 시편을 채취하여 절대건조상태로 만든 다음 주사형전자현미경에 의한 콘크리트의 조직과 생성물질을 관찰하고 X선 회절분석을 통하여 조성된 화합물질을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

플라이애시의 사용량 변화에 따른 굳지 않은 콘크리트의 실험결과를 정리하면 Table 6과 같다. 수중불분리성 콘크리트의 플라이애시의 첨가에 따른 콘크리트의 공기량은 Fig. 1과 같이 보통 콘크리트에 비해 플라이애시 치환율에 관계없이 약 3%정도 증가되었다. 이와 같은 현상은 문헌(JSCE,1993; Laboratory of Conrete ,1990)의 내용과 같이 수중불분리성 혼화제의 증점작용에 따라 갇힌 공기의 영향으로 판단된다. 전 배합은 오탁방지를 위해 정해진 수중불분리성 콘크리트의 최대 공기량기준(JSCE, 1993; 한국콘크리트학회, 2003) 4% 이하를 모두 만족하였다.

굳지 않은 수중불분리성 콘크리트의 단위중량의 변화는 Fig. 2와 같이 플라이애시의 치환율에 비례하여 현저하게 감소하여 보통 콘크리트보다 100㎏/㎥정도 감소된다. 그 원인은 분석결과 수중불분리성 콘크리트의 갇힌 공기량의 증가와 플라이애시와 시멘트의 비중 차에 기인함이 확인되었다. 수중불분리성 콘크리

Table 6 The properties of fresh concrete

Mix. No.	Bleeding (㎤/㎠)	Slump flow (㎝)	pH	Air (%)	Unit weight (kg/㎥)
Control	0.28	38.0	12.00	0.35	2330
F0 -N	0.28	38.0	12.00	0.35	2330
F00-A	0.00	58.0	11.70	3.20	2252
F10-N	0.27	36.5	11.50	0.45	2328
F10-A	0.00	54.5	11.40	3.55	2231
F30-N	0.43	36.5	11.10	0.50	2291
F30-A	0.00	58.5	11.00	3.45	2195
F50-N	0.50	38.0	11.20	0.45	2270
F50-A	0.00	56.5	10.90	3.60	2166

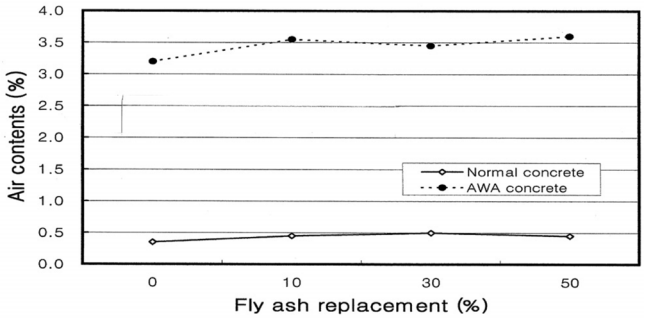

Fig. 1 Air content of fresh concrete

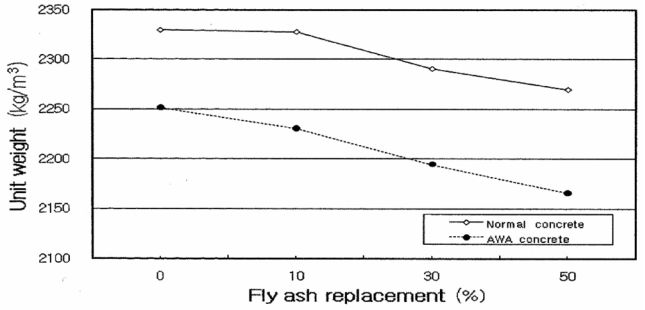

Fig. 2 Unit weight of fresh concrete

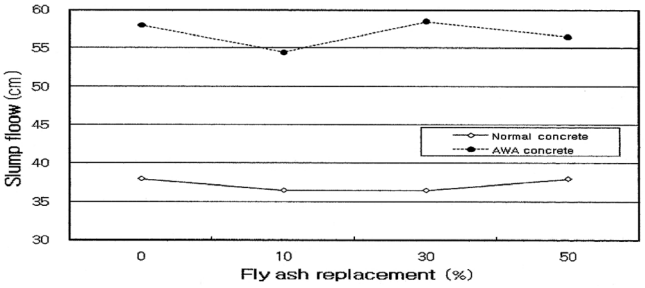

Fig. 3 Slump flow of fresh concretes

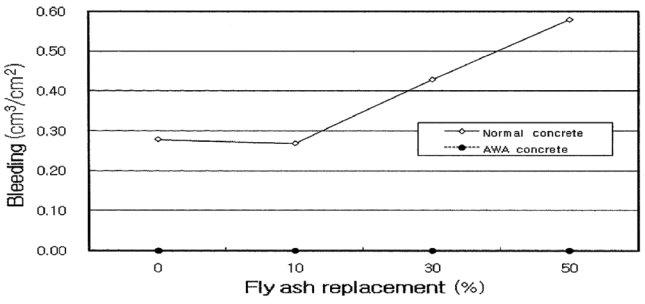

Fig. 4 Bleeding of fresh concrete

트는 증점제 4.9㎏/㎥ 고유동화제를 4.4㎏/㎥ 사용함에 따라 슬럼프 플로우값은 보통 콘크리트에 비하여 약 20㎝정도 증가하였다.

그러나 플라이애시의 치환량과 슬럼프 플로우의 관계는 Fig. 3과 같이 플라이애시의 치환에 따른 슬럼프 플로우는 증가하지 않았다. 이는 문헌(김기철 등, 1996)의 연구에서 증점제 첨가량을 일정량 이상 사용하면 플라이애시의 치환율이 증가할수록 슬럼프 플로우값이 감소한 연구 결과와 일치하였다. 이와 같은 현상은 단위수량을 고정한 배합에서 시멘트보다 분말도가 높은 플라이애시를 치환함에 따른 콘크리트의 점성 증가가 그 원인으로 사료된다. 반면 수중불분리성 콘크리트의 슬럼프 플로우 경시변화시험 결과 배합 30분 후 48㎝의 스럼프 플로우값이 30.5㎝에 도달한 시간이 플라이애시 치환율 0%인 경우 240분인 반면, 치환율 50%의 경우 360분으로 플라이애시를 다량 치환하면 수중불분리성 콘크리트의 유동성을 장시간 유지할 수 있어서 수중불분리성 콘크리트에 플라이애시를 혼합하면 콘크리트 운반 및 타설에 제약을 많이 받는 해양공사의 시공성 확보에 많은 도움이 될 것으로 기대된다. 플라이애시의 사용으로 콘크리트의 블리딩 특성은 Fig. 4와 같이 수중불분리성 콘크리트의 경우는 수중불분리제의 증점작용으로 인하여 블리딩이 전혀 발생하지 않았다. 그러나 보통 콘크리의 경우 플라이애시의 치환율이 증가할수록 장시간 동안 소성상태를 유지함에 따라 블리딩량이 비례하여 증가하였다.

3.2 황산염 촉진시험에 의한 공시체 길이변화

플라이애시를 혼입한 수중불분리성 콘크리트의 황산염의 침식에 대한 저항성을 평가하기 위하여 플라이애시를 0, 10, 30, 50% 혼입한 수중불분리성 모르타르 9배합에 대한 길이 및 무게 변화를 재령 28, 60, 91, 180일 별로 측정하였다. 공시체는 해당 배합의 굳지 않은 콘크리트를 5mm체로 체가름하여 제작하였으며 재령 28일간 21℃의 담수 중에 표준양생 한 후 5%의 황산나트륨용액에 침지하였다. 한편 침지 공시체의 황산염의 침식을 비교하기 위해 플레인 모르타르를 담수 중에 표준양생을 하였으며, 플라이애시 10%를 혼입한 보통 모르타르의 경우 F10-N으로 배합번호를 부여하고 이 배합에 수중불분리성 혼화제 4.9kg/m^3, 고유동화제 4.4kg/m^3을 사용한 수중불분리성 모르타르의 경우 배합번호를 $F_{10\text{-}A}$로 부여하였다. 공시체 제작을 위해 사용한 재료의 단위량은 Table 5와 같고, 5% 농도의 황산나트륨용액에 침지한 배합별 모르타르의 길이변화시험의 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다. 시험결과 재령의 변화에 따른 일반 공시체는 큰 변화가 없으나 수중불분리성 공시체는 급격한 팽창이 일어났다.

특히 플라이애시를 혼입하지 않은 수중불분리성 모르타르 $F_{0\text{-}A}$배합의 경우 길이변화율은 674×10^{-3}%로 담수 중에 침지한 Control 모르타르 8.58×10^{-3}%의 약 80배에 해당하는 팽창율을 보였다. 이와 같이 수중불분리성 모르타르는 황산나트륨용액 촉진시험결과 큰 길이 변화(팽창성)를 유발하므로, 해수 환경의

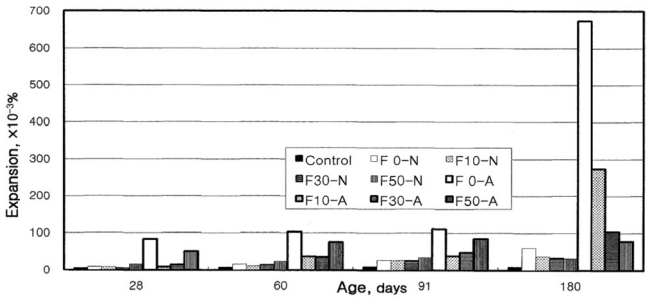

Fig. 5 Sulfate expansion of mortar exposed with 5% $NaSO_4$ solution.

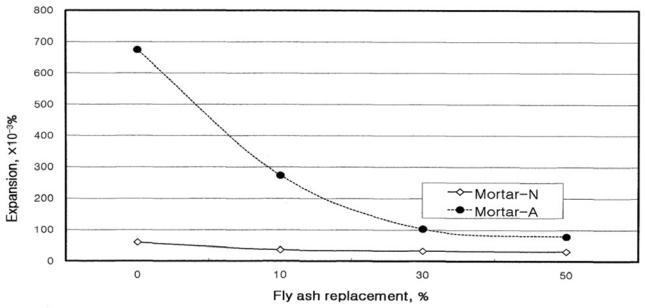

Fig. 6 Sulfate expansion of mortar exposed with 5% $NaSO_4$ solution. age in 180 days

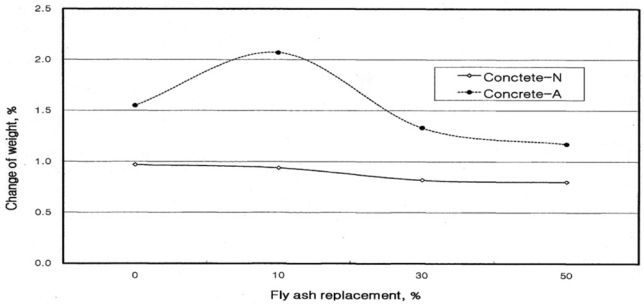

Fig. 8 The variance of concrete cylinders weight exposed with 5% sulfate solution at age 180days

황산염농도는 실험 조건 시 부여한 농도에 비하면 극히 적은 양이 포함되어 있겠으나 안정성을 확인하기 위해 수중불분리성 콘크리 트를 실제 해수 중에서 장기간 침지시험을 할 필요가 있다. 이와 같이 불안정한 수중불분리성 콘크리트도 플라이애시의 치환율을 증가시킴에 따라 길이변화율이 현저하게 감소되었다. 그 정도는 플라이애시를 50%로 다량 혼입함으로써 길이변화율은 78.63×10^{-3}%로 나타나 혼입하지 않은 경우, 674×10^{-3}%에 비해 길이변화율을 7배 이상 감소시킬 수 있었다.

3.3 황산염에 의한 콘크리트의 무게변화, 초음파시험 특성

수중불분리성 콘크리트의 플라이애시 혼입에 따른 황산염에 대한 침식저항성을 평가하기 위해 플라이애시를 10, 30, 50% 혼입한 보통 콘크리트와 수중불분리성 콘크리트 무게변화를 재령별로 측정하였다. 배합 후 공시체를 KS F 2403(강도 시험용 공시체 제작방법)에 따라 각 배합별로 공시체를 만들어 담수 중에 28일간 표준양생을 한 후 5%의 황산나트륨용액에 침지하였다.

황산나트륨용액에 침지한 공시체의 무게변화는 Fig. 7과 같이 침지 재령의 증가에 따라 보통 콘크리트 공시체는 거의 변화가 없는 반면 수중불분리성 콘크리트는 재령에 비례하여 증가하였다. 침지 재령 180일을 기준하면 Fig. 8과 같이 보통 콘크리트의 무게변화율은 플라이애시를 사용하지 않은 경우 0.97%이고 50% 치환의 경우 0.80%로 나타나 플라이애시의 혼입량 증가에 따라 콘크리트의 무게증가율은 다소 감소되었다. 반면 수중불분리성 콘크리트의 경우에는 플라이애시를 첨가하지 않은 경우 1.55%인 반면 플라이애시 50%첨가 시 1.17%로 나타나 플라이애시를 다량 혼입하면 황산염 작용에 의한 콘크리트의 무게변화가 안정화됨을 확인 할 수 있었다. 즉 치환율을 30% 이상 증가시키면 콘크리트의 무게변화율은 보통 콘크리트에 비하여 급격히 감소되어 황산염에 의한 에트린가이트의 생성이 억제됨을 알 수 있다. 콘크리트의 초음파시험 결과 초음파속도는 Fig. 9와 같이 침지 재령의 증가에 따라 Control 콘크리트의 경우는 비례하여 증가하였다. 황산나트륨용액에 침지한 공시체는 침지 재령 91일까지 초음파 속도가 증가하였으나 180일의 장기 침지 결과, 재령 7일의 수준으로 감소하여 콘크리트의 열화가 일어남을 확인 할 수 있었다. 그러나 전술한바와 같이 플라이애시를 다량 혼입하면 콘크리트의 길이변화나 무게변화를 감소시켜 수중불분리성 콘크리트의 황산염 침식에 대한 불안정성을 개선할 수 있음을 확인하였다. 그러나 초음파시험의 결과에 의하면 플라이애시의 치환율 증가에 따라 초음파속도는 오히려 감소하므로 초음파시험을 통한 황산염에 의한 열화의 평가방법은 보다 더 심도 있는 연구가 필요한 것으로 확인되었다.

3.4 촉진시험 공시체의 SEM관찰과 X선회절분석

황산나트륨용액에 재령 180일 동안 촉진시험을 한 콘크리트 공시체를 표면에서 5mm 이내의 깊이로 시편을 채취하여 주사형전자현미경으로 콘크리트의 조직과 생성물질을 관찰하고 X선 회절분석을 통하여 조성된 화합물질을 분석하였다. X선 회절분석 결과 수산화칼슘의 피크 값은 보통 콘크리트 보다 수중불분리성 콘크리트에서 크게 나타났으나 플라이애시 30% 혼입함으로 그 값이 감소하였다. 한편 에트린가이트는 X선 회절분석 시 다른 화합물질에 비하여 상대 회절 피크가 낮게 나타나는 특징이 있다. 따라서 전 배합에서 에트린가이트의 피크강도가

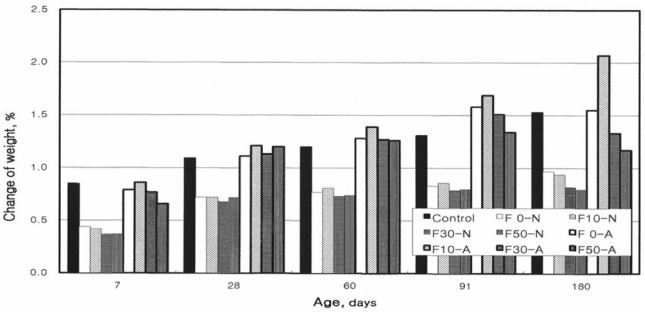

Fig. 7 The variance of concrete cylinders weight exposed with 5% sulfate solution at each age

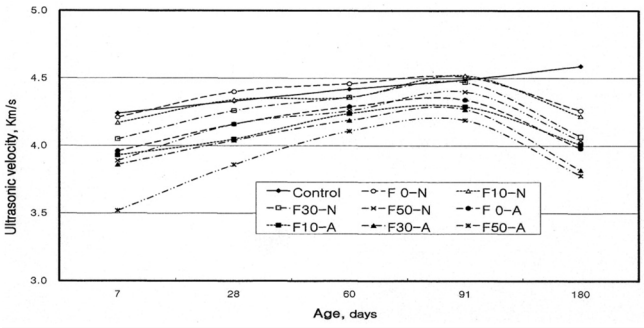

Fig. 9 Results of ultrasonic velocity tests for concrete cylinders exposed with 5% solution of Sulfate

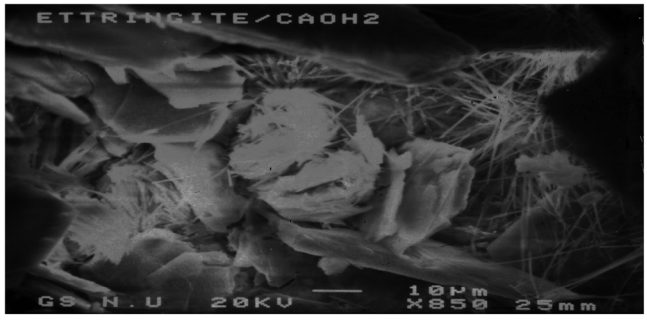

Fig. 10 SEM Photo of specimen exposed with 5% solution of Sulfate.

작아 판별이 어려웠다. 주사형전자현미경 관찰에 의하면 에트린가이트는 플라이애시를 치환하지 않은 보통 콘크리트를 담수 중에 침지한 공시체(Control concrete)에서는 관찰되지 않았다.

수중불분리성 콘크리트에 플라이애시를 혼입하지 않은 경우는 Fig.10과 같이 다수의 에트린가이트와 Gypsum이 관찰되었다. 그러나 플라이애시를 30% 혼입한 경우에는 Gypsum이 상대적으로 적게 발견된 반면 C-S-H의 생성이 확인되었다.

결 론

수중불분리성 콘크리트의 플라이애시에 의한 내 황산염 증대 효과를 확인하기 위해 플라이애시 치환율을 다양하게 변화시켜 만든 공시체를 5% 농도의 황산나트륨 용액에 침지하여 촉진시험을 한 후 결과 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 황산염 촉진시험을 한 결과 재령 180일까지 보통 모르타르는 큰 변화가 없으나 수중불분리성 모르타르는 플라이애시를 혼입하지 않은 경우 길이변화율은 674×10^{-3}%로, 담수 중에 침지한 Control 모르타르의 약 80배에 해당하는 팽창율을 보였다.

그러나 플라이애시를 50% 혼입함으로써 길이변화율은 78.63×10^{-3}%로 나타나 혼입하지 않은 경우에 비해 길이변화율은 7배 이상 감소되었다.

(2) 촉진시험을 통한 무게변화율은 수중불분리성 콘크리트의 경우 플라이애시 무첨가 시 1.55%인 반면 플라이애시 50% 첨가 시 1.17%로 나타나 플라이애시를 다량 혼입하면 황산염 작용에 의한 콘크리트의 무게변화가 안정화됨을 확인 할 수 있었다. 초음파시험 결과 Control 콘크리트는 재령의 증가에 따라 초음파속도가 증가하나 황산나트륨촉진시험 공시체는 침지 재령 91일까지 증가하였으나 180일의 장기 침지 결과 재령 7일의 수준으로 감소하였다. 또한 플라이애시 치한율에 비례하여 초음파 속도가 낮은 특징을 보였다.

(3) X선 회절분석결과 황산나트륨 촉진시험을 한 공시체의 수산화칼슘은 플라이애시를 혼입하지 않은 경우가 플라이애시를 30% 혼입한 경우보다 상대 피크가 크게 나타났다. 한편 에트린가이트는 X선 회절분석 시 다른 화합물질에 비하여 상대 회절피크가 낮게 나타나는 특징이 있어 판별이 어려웠다.

(4) 주사형전자현미경 관찰에 의하면 에트린가이트는 Control concrete의 경우에는 관찰되지 않았다. 그러나 촉진시험을 한 수중불분리성 콘크리트의 경우는 플라이애시를 혼입하지 않은 경우는 다수의 에트린가이트와 Gypsum이 관찰되었다. 그러나 플라이애시를 30% 혼입한 경우에는 Gypsum이 상대적으로 적게 발견된 반면 C-S-H의 생성이 확인되었다.

참 고 문 헌

권중현, 김봉익 (2001). “Fly ash를 사용한 수중분리성 콘크리트의 응결에 관한 실험적 연구”, 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, p 120-125

김기철, 한민철, 원종필, 최응규, 한천구 (1996). “증점제 및 플라이애쉬를 이용한 다짐불요 콘크리트의 개발에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회 가을 학술발표논문집, pp 266-270.

대한토목학회 (1991). 유동화콘크리트공지침(안), p 31.

대한토목학회 (1995). 콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질 규준(안), p 5.

이영제 (1992). 수중 콘크리트용 혼화제를 사용한 콘크리트의 실험적 연구, 건국대학교 대학원 석사학위논문, pp 1-2.

채소언 (1993). 수중 불분리성 혼화제를 사용한 콘크리트의 제성질에 대한 실험적 연구, 한양대학교 대학원 석사학위 논문, pp 3-4.

한국콘크리트학회 (2003). 콘크리트표준시방서, p 71, 195.

Bunmoku, E.(1993), Diagnosis of Concrete Structure Sambuk publish, pp 48-57.

Center of Costal Engineering Development (1990). Manual of Antiwashout Underwater Concrete, pp 42-471.

Hanhon, J. (1994). Construction of Underwater Concrete by the System of Divided Tube. Concrete Engineering 32(3), pp 86.

JSCE. (1993). Guide for Design and Construction of Antiwashout Underwater Concrete, pp 12-23.

JSCE. (1994). Standard of Quality of Antiwashout Admixture for Underwater Concrete, pp 12-19.

Laboratory of Concrete, Civil Engineering Department, The ministry of Construction of Japan (1990). The Experimental Report of Antiwashout Underwater Concrete(1), pp 2-36.

Malhotra,V.(1994). "Fly Ash in Concrete", CANMET, pp 135-166.

Malhotra, V., Carette, G. G, Bilodeau, A. Sivansundaram, V.(1990). "Some Aspects of Durability of High-Volume ASTM Class F(Low-calcium) Fly Ash Concrete. CANMET Division Report MSL 90-20, pp 3-11.

Monica, P., Philippe, G., Paulo, J. (1993). "Reliability Approach to Service Life Prediction of Concrete Exposed to Marine Environments", ACI material J. November-December, pp 544-551.

Ravina, D. (1960). "Effect of Prolonged Mixing on Compressive Strength of Concrete with and without Fly Ash and or Chemical admixture." ACI Materials Journal,

pp 451-455.
Seochon, S(1981), Seawater Resistance of Concrete. Cement. Concrete 410, pp 2-9
Takeshi, O., Yasunori, M., Yoshitaka, N. and Jun, N.(1995). "Influence of Materials on The Action of Admixtures in Antiwashout Underwater Concrete", ACI Material J. May-June, pp 315-320.

2010년 7월 16일 원고 접수
2011년 6월 9일 심사 완료
2011년 6월 20일 게재 확정