

플라이애시 혼입 콘크리트의 내구성 평가

Durability Evaluation of concrete using fly ash

조명석* 송영철** 류금성*** 고경택**** 김성욱***** 이장화*****

Cho, Myung Sug, Song, Young Chul, Ryu, Gum Sung Koh, Kyung Taeg Kim, Sung Wook Lee, Jang Hwa

ABSTRACT

The concrete structures in marine environment has been used type V cement(sulfate-resisting Portland cement), but according to the study results reported recently, the question has been raised for effect of the resistance to salt attack of the concrete using type V cement. It is increased the demands on the use of mineral admixtures such as fly ash, ground granulated blast-furnace slag instead of type V cement in order to improve the durability of concrete structures.

Therefore, this study focused on the durability evaluation of concrete containing fly ash under marine environment, and the tests such as salt attack, carbonation, sulfate attack, and freezing-thawing were performed. Test results showed that the resistance to salt attack, sulfate attack and freezing-thawing was improved, and the carbonation was in some disadvantage compared with normal concrete. Nevertheless, the durability of fly ash concrete would be maintained during the service life of structures.

1. 서론

해안가에 위치하고 있는 국내 콘크리트 구조물은 해수중의 황산염 침해방지 등을 목적으로 C₃A의 함량을 낮춘 V종 시멘트(내황산염 시멘트)를 최근까지 사용하였으며, 또한 일부 구조물의 경우에는 아직도 사용되고 있다. 그러나 V종 시멘트의 경우 황산염에 대한 저항성은 우수하나 해수의 주요 성분인 염화물에 대한 저항성은 오히려 I종 시멘트보다 취약하다는 연구결과가 보고되고 있다.³⁾ 따라서 미국, 일본 등에서는 해수의 영향을 받는 구조물의 설계 시 황산염에 의한 침해보다는 염화물에 의한 침해를 고려하기 위해 V종 시멘트 대신에 I종 시멘트에 플라이애시, 고로슬래그와 같은 혼화재를 혼합한 시멘트를 사용할 것을 권장하고 있으며, 국내에서도 이런 점을 고려하여 관련 시방규정을 개정하고 있다.

* 정회원, 전력연구원 원자력연구실 선임연구원
** 정회원, 전력연구원 원자력연구실 책임연구원
*** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원
**** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원
***** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

본 연구는 플라이애시를 혼합한 콘크리트의 내구성 측면의 사용성을 검증하기 위한 연구로서 플라이애시를 혼합한 콘크리트의 염해, 중성화, 황산염 침해 및 동결융해 저항성을 I종 시멘트 및 V종 시멘트를 사용한 배합과 비교 검토하였다.

2. 시험개요

2.1 콘크리트 배합

시멘트는 I종 시멘트에 플라이애시 치환율 20%, I종 및 V종 시멘트를, W/(C+F/A)비는 62, 48, 44, 40%를 사용하였고, 콘크리트 배합은 표 1과 같다.

표 1 콘크리트 배합표

시멘트종류	W/(C+FA)%	S/a (%)	W (kg)	C (kg)	FA (kg)	S (kg)	G (kg)	WRA (ml)	AE (ml)
I종, V종	62	45	164	265	0	804	980	813	31
I+F/A(20%)				212	53	799	1003		
I종, V종	48	46	178	370	0	771	891	852	26
I+F/A(20%)				296	74	759	916		
I종, V종	44	44	169	380	0	809	959	874	26
I+F/A(20%)				304	76	744	957		
I종, V종	40	43	172	436	0	773	941	906	24
I+F/A(20%)				349	87	709	936		

2.2 시험방법

(1) 염해

시험체 크기는 100×100×100mm 몰드를 사용하였으며, 일방향으로 염화물 이온의 침투를 유도하기 위해 5면은 에폭시 코팅을 하여 NaCl 3.6% 수용액에 침적시켜 28일, 60일, 90일에 시험체 표면으로부터 15mm 간격으로 시료 40g을 채취한 후 이온 전극법을 이용하여 수용성 염화물 이온량을 측정하였다.

(2) 중성화

시험체 크기는 100×100×100mm 몰드를 사용하였으며, 일방향으로 이산화탄소의 침투를 유도하기 위해 5면은 에폭시 코팅을 하여 이산화탄소 농도 10%, 온도 30℃, 습도 50%으로 중성화 촉진시험을 실시하였다. 중성화 시험 후 7일, 28일, 60일, 90일에 시험체를 할렬하여 페놀프탈레인 1% 용액을 분무하여 중성화 깊이를 측정하였다.

(3) 황산염

시험체 크기는 100×100×400mm 몰드를 사용하였으며, 28일 동안 표준양생을 실시한 후 황산나트

름 10% 수용액에 침적하였다. 시험 후 28일, 60일, 90일에 시험체의 길이변화를 측정하였다.

(4) 동결융해

시험체 크기는 100×100×400mm 각주 시험체를 제작하여 기중동결 수중융해시험법으로 실시하였다. 동결융해시험의 온도범위는 -18~+4.5℃로 하고 1사이클의 시간은 160분으로 하여, 동결융해 30사이클마다 초음파에 의한 상대동탄성계수를 300사이클까지 측정하였다.

3. 시험결과

3.1 염해

그림 1은 염화나트륨 3.6% 수용액에 90일 동안 침적시킨 후 Fick의 확산방정식을 이용하여 배합별 염화물 확산계수를 구한 결과로서, 콘크리트 표면부터 30mm 깊이까지 염화물 농도를 평균한 값이다. W/(C+F/A)비에 상관없이 I종+F/A(20%)<I종<V종 순으로 염화물 확산계수가 커지고 있음을 알 수 있다. 이처럼 플라이애시를 사용함으로써 내염해성이 향상되는 것은 플라이애시의 포졸란 반응에 의한 수산화칼슘이 감소되고 결과적으로 플라이애시에 의한 반응 생성물의 석출에 의한 세공구조의 치밀화, 투수성 감소 때문으로 판단된다.⁴⁾ 그리고 사용 시멘트별 내염해성을 분석해 보면, V종 시멘트를 사용한 경우가 가장 취약한 것으로 나타났는데, 이것은 V종 시멘트의 경우 I종 시멘트에 비해 프리델씨염 생성에 관련된 C₃A 성분을 상당히 저감시키기 때문으로 판단된다.³⁾

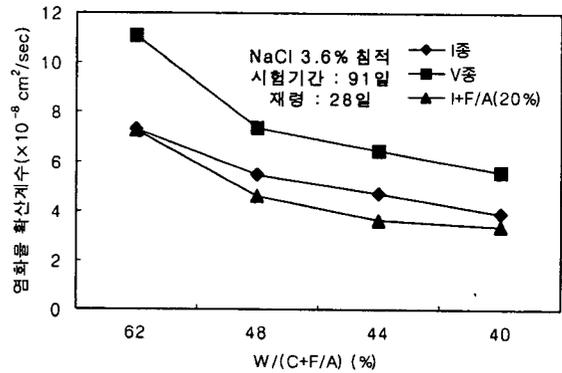


그림 1 염해시험 결과

W/(C+F/A)에 대한 영향은 플라이애시 혼입 유무 및 시멘트 종류에 상관없이 W/(C+F/A)가 낮을수록 염화물 침입속도는 지연되고 있다. 이것은 W/(C+F/A)가 낮을수록 경화체 조직이 치밀해져 염소이온의 침투를 억제시키기 때문이다. 또한 W/(C+F/A)가 낮을수록 플라이애시를 혼입한 콘크리트가 V종, I종 시멘트에 비해 염화물 침입속도에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 이것은 W/(C+F/A)가 낮을수록 시멘트의 수화가 빨리 진행되어 Ca(OH)₂을 빨리 생성하고 그 만큼 포졸란 반응이 빨라져 경화체 조직이 치밀해졌기 때문으로 추정된다.

이상으로 염해에 대한 시험 결과를 정리해 보면, 플라이애시를 콘크리트에 혼입하면, 현행 V종 시멘트를 사용하는 콘크리트보다 내염해성 측면에서 우수한 콘크리트의 생산이 가능할 것으로 판단된다. 또한 W/(C+F/A)가 작은 배합일수록 플라이애시 혼입 효과가 더욱 증가할 것으로 사료된다.

3.2 중성화

그림 2는 W/(C+F/A)별 중성화 깊이와 재령의 평방근에 대한 비율을 중성화속도계수를 정의하여 구한 결과이다. W/(C+F/A)에 상관없이 I종<V종<I종+F/A(20%) 순서로 중성화속도가 빨리 진행되고 있다. 플라이애시를 혼입한 콘크리트는 재령이 경과함에 따라 포졸란 반응에 의해 경화체 조직은 치밀해지지만, 콘크리트 중의 Ca(OH)₂가 포졸란 반응에 의해 소비되어 세공용액의 pH가 저하되어 중성화

진행속도가 촉진되는 것이다. 즉 포졸란 반응은 콘크리트의 중성화에 대해 상반되는 작용을 하므로 플라이애시를 사용한 콘크리트의 내구성을 평가할 때 이런 점에 유의할 필요가 있다.

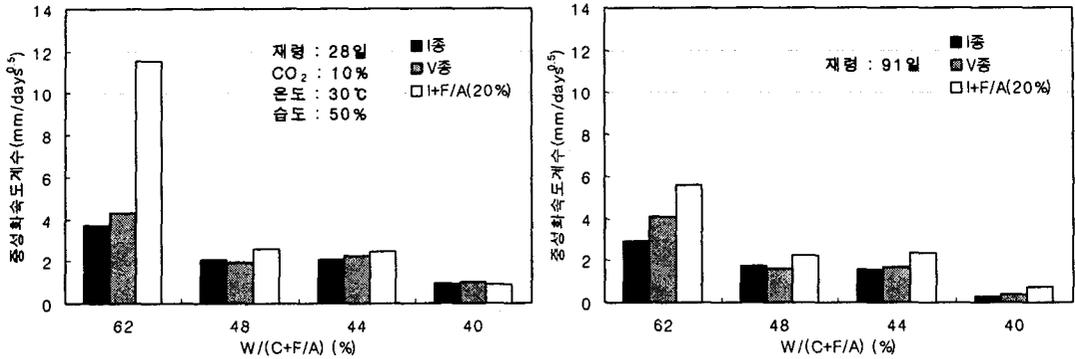


그림 2 W/(C+F/A)별 중성화 속도 계수

그리고 재령 28일에서 중성화시험을 시작한 콘크리트에 비해 재령 91일에서 시험을 시작한 콘크리트의 중성화 진행속도가 상당히 억제되는 것으로 나타났는데 이것은 포졸란 반응에 의해 소비되는 Ca(OH)₂의 영향보다 경화체 조직의 치밀화에 의해 CO₂ 가스의 콘크리트 내부 침투를 억제하는 영향이 크기 때문으로 추정되며, 장기재령으로 갈수록 그 경향이 커질 것으로 판단된다. 이런 결과로부터, 플라이애시를 사용한 콘크리트의 내구성을 향상시키기 위해서는 충분한 양생을 실시하는 것이 무엇보다 중요함을 알 수 있다.

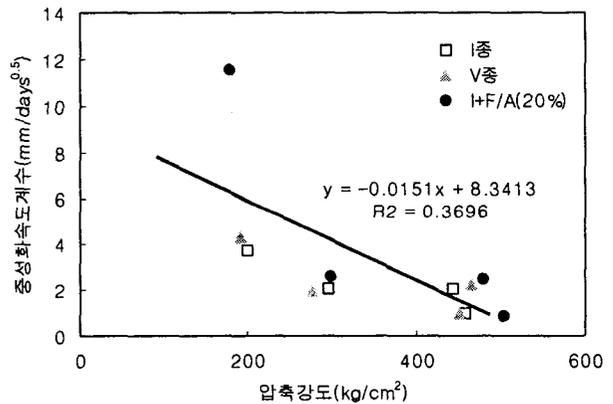


그림 3 압축강도-중성화속도계수 관계

W/(C+F/A)별 중성화 진행속도를 보면,

W/(C+F/A)가 낮을수록 중성화 진행 속도가 지연되고 있다. W/(C+F/A) 62%에서 중성화가 상당히 빨리 진행되고 있으나 48%이하에서는 급격히 중성화 속도가 낮음을 알 수 있다. 이처럼 W/(C+F/A)가 낮을수록 중성화 속도가 저감된 것은 고강도화에 의한 공극이 적어 경화체 조직이 치밀화 되어 이산화탄소 침입이 상당히 억제되었기 때문이다. 그림 3은 압축강도-중성화속도계수의 관계를 나타낸 것으로서 강도가 증가됨에 따라서 중성화 속도는 지연되는 경향을 보이고 있다. 즉 플라이애시를 사용한 콘크리트의 중성화를 억제하기 위해서는 Plain 콘크리트보다 높은 강도가 요구된다.

이상의 중성화 시험결과를 종합해 보면, 플라이애시를 콘크리트에 혼입함으로써 V종 시멘트를 사용하는 현행 콘크리트보다 중성화 측면에서 불리하나 W/(C+F/A)가 낮을수록 중성화 속도 저감에는 상당히 유효할 것으로 판단된다.

3.3 황산염

그림 4는 황산염 시험결과이다. 황산염 침해속도는 I종+F/A(20%)<V종<I종 순으로 증가함을 알 수 있다. I종 시멘트보다 V종 시멘트가 황산염에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났는데 이는 V종 시멘트의 경우 황산염과 반응하여 침상결정인 에트링가이트를 생성하는 C₃A의 함량을 저감시켰기 때문이며, 플라이애시를 사용한 경우의 황산염에 대한 저항성은 V종 시멘트의 동등 이상으로 나타났다. 또한, W/(C+F/A)비가 낮을수록 시멘트 종류에 상관없이 황산염에 대한 저항성이 증가함을 알 수 있다.

이상의 시험결과로 볼 때, 플라이애시를 사용하면 V종 시멘트 동등이상의 황산염에 대한 저항성을 가진 콘크리트의 생산이 가능할 것으로 판단된다.

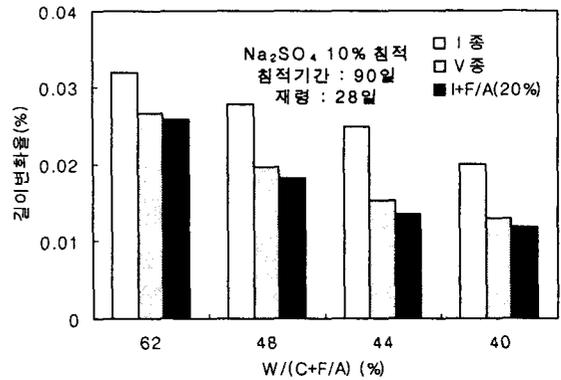


그림 4 황산염 시험결과

3.4 동결융해

그림 5~그림 6은 콘크리트의 동결융해 시험결과이다. AE제 양을 동일하게 사용하여 콘크리트를 제조한 결과, 플라이애시를 사용한 콘크리트는 I종시멘트와 V종시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 공기량 연행이 되지 않아 동결융해 저항성이 다소 저하되는 것으로 나타났으나, 동결융해에 대한 내구성을 판단하는 기준인 상대동탄성계수 60%이하로 되는 경우는 없는 것으로 나타났다. 그리고 AE제 양을 증가시켜 동일한 공기량을 연행한 결과, 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 동결융해 저항성은 I종시멘트와 V종시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 우수한 것으로 나타났다.

이상과 같이, 플라이애시를 20% 치환한 콘크리트와 V종시멘트와 I종시멘트를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성을 비교한 결과, 플라이애시를 사용한 콘크리트는 AE제를 흡착하는 경향이 있으므로 동일한 AE제를 사용한 경우에는 다소 동결융해 저항성이 저하되나 기준치를 만족하지 못하는 경우는 없으며, 동일한 공기량을 확보할 경우 현행 콘크리트 이상의 동결융해 저항성을 가질 것으로 판단된다.

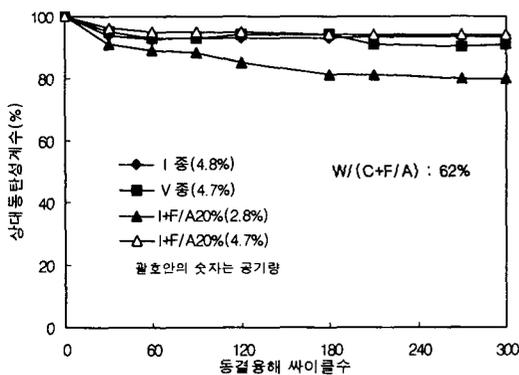


그림 5 동결융해 시험결과(W/(C+F/A)-62%)

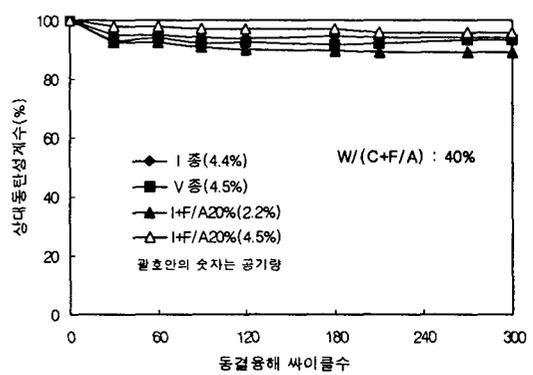


그림 7 동결융해 시험결과(W/(C+F/A)-40%)

4. 결론

플라이애시 치환율 20% 및 I종, V종 시멘트를 사용한 콘크리트 공시체를 대상으로 내구성 시험을 실시한 결과, 플라이애시를 사용한 경우 염해 및 황산염 저항성측면에서 우수한 결과를 나타내었으며, 중성화의 경우 적정 $W/(C+F/A)$ 를 유지시 사용수명 동안의 건전성 유지에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시를 사용한 콘크리트는 AE제를 흡착하는 경향이 있으므로 동일한 AE제를 사용한 경우에는 다소 동결융해 저항성이 저하되나, I종 및 V종 시멘트를 사용하는 콘크리트와 동일한 공기량을 확보할 경우에는 우수한 동결융해 저항성을 나타내었다.

따라서 이상의 연구결과에서 알 수 있듯이 해안 구조물에 플라이애시를 사용할 경우, 내해수성 측면에서 제 성질이 우수한 콘크리트의 생산이 가능할 것으로 판단되며, 이로 인한 건설재료비 절감 및 운영 중 유지관리비 절감 효과도 예상된다.

참고문헌

1. 한국전력공사, "1999년 석탄회 발생 및 재활용실적 보고서," 2000.
2. V. M. Malhotra, "Supplementary cementing materials for concrete," CANMET, 1987.
3. C. H. Ftikos, G. Parissakis, "The combined action of Mg^{2+} and Cl^{-} ions in cement pastes," Cement and Concrete Research No. 15, 1985.
4. K. Wesche, "Fly Ash in concrete properties and performance," Report of technical committee 67-FAB, RILEM, 1991.
5. 일본토목학회, 플라이애시를 혼합한 콘크리트의 중성화와 철근 발청에 관한 장기연구(최종보고), 1987.
6. K. Torii, K. Taniguchi and M. Kawamura, "Sulfate resistance of high fly ash content concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 4, 1995.