

고내구성콘크리트의 염해저항성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Salt Damage Resistance of High Durable Concrete

윤재환*

정재동**

Yoon, Jai-Hwan

Jaung, Jae-Dong

Abstract

In this paper, salt damage resistance of high durable concrete was tested. High durable concrete was made by using low water cement ratio, chemical admixture called super-durable admixture and mineral admixtures such as fly-ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume. Two kinds of salt damage resistance test were carried out. One method is chloride ion penetration test (ASTM C1202), and the other one is depth of chloride penetration test in saline solution. Test results were as follows:

- 1) The depth of chloride ion penetration increased exponentially as water cement ratio was increased and time passed.
- 2) Super-durable admixture had little effect on the improvement of salt damage resistance of concrete.
- 3) Silica fume and ground granulated blast-furnace slag were effective on salt damage resistance because of pozzolanic reaction, but fly-ash had a little effect.

키워드 : 고내구성콘크리트, 염해저항성, 염분침투깊이, 염화물이온투과성

Keywords : High durable concrete, Salt damage resistance, Depth of chloride ion penetration, Chloride ion penetration

1. 서론

최근 철근콘크리트구조물의 조기열화로 인한 내구성능 감소 현상이 국내·외적으로 현저화하고 있으며 지구환경의 보전, 자원에너지의 절감이라는 차원에서도 콘크리트구조물의 고품질화 및 장수명화에 대한 요구가 증대하고 있다.

우리나라는 과거 성수대교와 삼풍백화점의 붕괴를 계기로 특별법의 제정, 시설안전기술공단의 설립 등 구조물의 유지관리를 위하여 많은 노력을 기울여 왔다. 우리는 그동안 급격한 경제발전에 따라 수많은 콘크리트구조물을 건설하여 왔으며, 건설되어온 수많은 콘크리트구조물의 안정적인 축적이야말로 선진산업국가에 진입하기 위한 필수조건이라 생각된다.

그러나 준공된지 28년 밖에 경과되지 않은 남산 2호 터널은 전면 재시공하였고, 서울 중학전의 복개구조물은 철근이 녹슬어 손으로도 콘크리트가 부스러질 정도라고 보도된 바 있다. 또한 과거 1990년대초부터는 200만호 주택건설로 인하여 해사를 사용하여 많은 콘크리트구조물을 지어와 철근부식으로 인한 아파트 수명단축이 우려되고 있는 실정이다. 또한 우리 주위의 콘크리트 아파트는 불과 20여년만에 재건축이란 미명하에 해체되고 있으며, 우리 주위에 있는 콘크리트구조물은 지금도 저저분하고 흉한 모습을 여기저기에서 우리에게 드러내고 있다.

지금까지 토목, 건축의 콘크리트구조물은 모두 역학적으로 버티기만 하면 된다는 사고를 가지고 있었으나 역학적 성능 이외에도 내구성과 같은 중요한 성능을 무시한 것은 아니었는지 반성할 필요가 있다. 또한 지금까지의 철근콘크리트구조물은 강도위주의 설계방법을 채택하여 내구성에 대한 고려가 충분히 이루어지지 않았다. 그 결과 많은 콘크리트구조물이 내구성이 부족하여 본래의 사용성을 발휘하지 못하고 해체되는 경우가 많아지게 되었다. 한편으로는 자원 및 에너지 절약과 환경보존의 측면에서 콘크리트구조물을 장기간 사용할 필요성이 대두되어 구조물의 기획, 설계, 시공, 유지관리, 보수, 해체, 재활용의 전 라이프사이클에 있어서 철근콘크리트구조물의 고품질화 및 장수명화를 위한 검토 즉 내구성과 사용성을 고려한 내구성 설계법의 확립이 절실히 요구되게 되었다.

또한 최근 콘크리트기술은 산업발전과 더불어 전통적인 기능과 성능인 높은 강도 및 양호한 시공성뿐만 아니라 큰 내화성을 갖는 비폭열성콘크리트, 고내구성을 갖는 장수명콘크리트, 고인성콘크리트 등 자체 품질의 개량 외에 식생콘크리트, 방오콘크리트, 조습콘크리트, 건설폐기물 및 재생골재콘크리트, 발열콘크리트, 전기전도성콘크리트 등 특수한 성능을 부여한 고기능콘크리트가 속속 출현하고 있다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 구조물의 장수명화를 위한 고내구성콘크리트의 제조방법을 제안하고 또한 실용화를 목적으로 고품질 및 고내구성 콘크리트를 여러 가지 방법으로 제조한 후 염분침투깊이 및 염소이온투과성 등 염해에 대한 저항성을 실험적으로 규명하여 고내구성콘크리트의 성능을 실험적으로 평가한 것이다.

* 정회원, 수원대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

** 정회원, 대구대학교 건설환경공학부 부교수, 공학박사

2. 실험계획

본 실험에서 제조하는 고내구성콘크리트의 종류는 다음과 같다.

- 1) 낮은 물시멘트비의 콘크리트를 제조하되 유동성확보를 위하여 고성능감수제를 사용한다
- 2) 고내구성을 확보하기 위하여 일본에서 개발되어 실용화된 혼화제인 내구성개선제의 사용
- 3) 실리카흙, 플라이애시, 고로슬래그미분말 등의 혼화재료를 시멘트의 일부와 치환하여 제조

콘크리트의 배합을 위한 실험인자로서는 표1과 같이 물시멘트비를 30, 40, 50, 60%의 4수준으로 하여 물시멘트비의 대소에 의한 차를 비교하였다. 또한 물시멘트비 50, 60%의 경우에 내구성개선제를 첨가하여 그 효과를 실험하였다. 혼화재료의 첨가는 물시멘트비 50, 60%의 경우에 한하여 첨가하여 비교하였으며 플라이애시의 첨가율은 10, 20%이며, 고로슬래그미분말의 첨가율은 20, 40%이고, 실리카흙의 첨가율은 10%로서 보통포틀랜드시멘트중량의 내할로 첨가하여 시멘트를 치환하였다.

표 1. 실험인자 및 수준

| 실험인자 | | 실험수준 | 비고 |
|-----------|----------|------------------|------------------|
| 물시멘트비 | | 30, 40, 50, 60 % | |
| 내구성개선제 사용 | | | |
| 혼화재료 사용 | 플라이애시 | 10, 20% 첨가 | 물시멘트비 50,60%의 경우 |
| | 고로슬래그미분말 | 20, 40% 첨가 | |
| | 실리카흙 | 10% 첨가 | |

콘크리트의 배합은 슬럼프 15cm를 목표로 하였으며 공기량은 $4.5 \pm 1.5\%$ 를 목표로 하여 고성능감수제 및 AE제의 사용량을 조절하였다. 굵은골재의 최대치수는 25mm이며 색석골재를 사용하였다. 잔골재는 강모래를 사용하였다. 시험비법을 거쳐 확정된 콘크리트의 배합은 다음 표 2와 같다.

표2와 같은 배합으로 $\phi 10 \times 20$ cm의 원주공시체 및 $10 \times 10 \times 40$ cm의 각주공시체를 제작하여 염화물이온 침투깊이 측정실험과 염화물이온투과성시험을 행하였다.

표 2. 콘크리트의 배합

| 요인 | No. | 배합기호 | W/C | s/a | 단위수량 (kg/m ³) | 시멘트 (kg/m ³) | 혼화재료 (kg/m ³) | 잔골재 (kg/m ³) | 굵은골재 (kg/m ³) | 고성능감수제 (kg) | AE제 (g) | |
|--------|----------|------|---------|-----|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|---------|-------|
| W/C | 1 | A-30 | 30 | 46 | 165 | 550 | 0 | 710.5 | 877.3 | 3.91 | 38.5 | |
| | 2 | A-40 | 40 | 46 | 170 | 425 | 0 | 750.5 | 926.6 | 1.85 | 28.1 | |
| | 3 | A-50 | 50 | 46 | 175 | 350 | 0 | 772.3 | 953.6 | 2.48 | 21.0 | |
| | 4 | A-60 | 60 | 46 | 180 | 300 | 0 | 784.9 | 969.1 | 0.77 | 18.0 | |
| 내구성개선제 | 5 | D-50 | 50 | 46 | 175 | 350 | 10 | 812.7 | 1003.5 | 2.34 | 0 | |
| | 6 | D-60 | 60 | 46 | 180 | 300 | 10 | 825.3 | 1018.9 | 2.08 | 0 | |
| 혼화재료 | 플라이애시 | 7 | F-50-10 | 50 | 46 | 175 | 315 | 35 | 766.8 | 946.7 | 1.33 | 104.3 |
| | | 8 | F-50-20 | 50 | 46 | 175 | 280 | 70 | 761.2 | 939.9 | 0.74 | 103.1 |
| | | 9 | F-60-10 | 60 | 46 | 180 | 270 | 30 | 780.1 | 963.2 | 0.72 | 46.3 |
| | | 10 | F-60-20 | 60 | 46 | 180 | 240 | 60 | 775.3 | 957.3 | 0.79 | 55.6 |
| | 고로슬래그미분말 | 11 | B-50-20 | 50 | 46 | 175 | 280 | 70 | 770.1 | 950.8 | 1.77 | 26.2 |
| | | 12 | B-50-40 | 50 | 46 | 175 | 210 | 140 | 767.9 | 948.1 | 1.85 | 24.1 |
| | | 13 | B-60-20 | 60 | 46 | 180 | 240 | 60 | 782.9 | 966.7 | 0.95 | 20.4 |
| | | 14 | B-60-40 | 60 | 46 | 180 | 180 | 120 | 781.1 | 964.4 | 0.93 | 61.1 |
| | 실리카흙 | 15 | S-50-10 | 50 | 46 | 175 | 315 | 35 | 766.8 | 946.7 | 2.89 | 30.6 |
| | | 16 | S-60-10 | 60 | 46 | 180 | 265 | 35 | 780.1 | 963.2 | 2.13 | 26.9 |

* 비중 : 시멘트 3.15, 잔골재 2.51, 굵은골재 2.64, 플라이애시 2.20, 고로슬래그 2.9, 실리카흙 2.2

* 배합기호에서 A는 AE콘크리트를, D는 내구성개선제를 첨가한 플레인콘크리트를 가리키며 그 다음의 숫자는 물시멘트비를 의미한다.

* 배합기호에서 F는 플라이애시를, B는 고로슬래그미분말을, S는 실리카흙을 가리키며 그 다음의 숫자는 물시멘트비를 그리고 맨나중의 숫자는 혼화제의 첨가율을 나타낸다.

2.1 실험재료

1) 시멘트

시멘트의 종류는 국내 D사의 보통포틀랜드시멘트(1종)를 사용하였으며, 그 화학성분 및 물리적 성질은 표 3 및 표 4와 같다.

표 3. 보통포틀랜드시멘트의 화학분석

| 화학 성분 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | Ig. loss |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|----------|
| % | 20.64 | 5.38 | 3.14 | 61.96 | 3.98 | 2.15 | 0.80 | 0.09 | 2.08 |

표 4. 보통포틀랜드시멘트의 물리적성질

| 시멘트 의 종류 | 비중 | 비표면 적 | 안정 도 (%) | 응결시간 | | 압축강도(kgf/cm ²) | | |
|----------------|------|----------|----------------|-----------|-----------|----------------------------|-----|-----|
| | | | | 초결 (h) | 종결 (h) | 3일 | 7일 | 28일 |
| 보통 | 3.15 | 3450 | 0.24 | 3:29 | 5:40 | 201 | 283 | 376 |

2) 골재

잔골재는 경기도 여주 남한강산 천연 강모래를 사용하였다. 굵은골재는 경기도 안성산 부순굵은골재를 사용하였다. 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질은 표 5와 같으며, 그림 1은 체가름 시험결과에 의한 잔골재의 입도분포곡선을 나타낸다.

표 5. 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질

| | 최대 치수 (mm) | 표준 비중 | 흡수율 (%) | 단위 질량 (kg/m ³) | 점토량 (%) | 안정성 (%) | 염화물 (%) | 0.08mm 통과량 (%) |
|----------|------------------|----------|------------|----------------------------------|------------|------------|------------|----------------------|
| 잔골재 | 5 | 2.51 | 2.88 | 1,630 | 0.1 | 4.4 | 0.01 | 1.2 |
| 굵은 골재 | 25 | 2.64 | 0.83 | 1,559 | 0.01 | 4.6 | - | - |

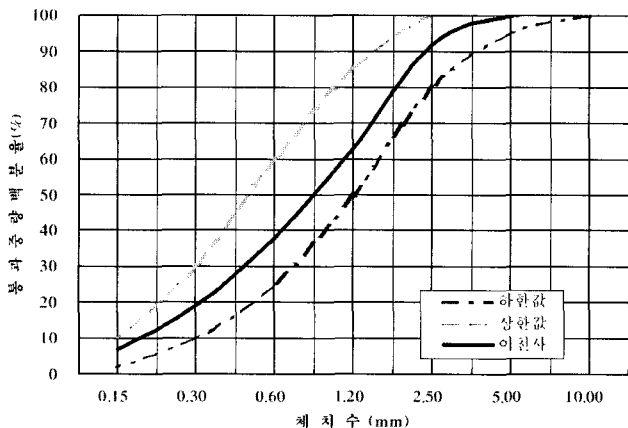


그림 1. 잔골재의 입도분포곡선

3) 혼화재료

플라이애시는 충남 당진화력발전소에서 생산되어 정제된 KS L 5405(“플라이애시”)의 규격에 적합한 제품으로서 그

화학성분 및 물리적 성질은 표 6과 같다.

초미분말의 실리카흙은 노르웨이산 Elken社의 Microsilica Grade 920D를 사용하였으며, 그 화학성분 및 물리적 성질은 표 6과 같다.

고로슬래그 미분말은 KS F 2563(“콘크리트용 고로슬래그 미분말”)의 규격의 1종에 해당하는 국내 K사에서 시판중인 제품을 사용하였으며, 그 화학성분 및 물리적 성질은 표 7과 같다.

콘크리트용 화학혼화제는 콘크리트의 공기량 조절을 위하여 KS F 2560(“콘크리트용 화학혼화제”)에 적합한 국내 K사의 AE제를 사용하였고, 또한 콘크리트의 단위수량 감소 및 슬럼프 조절을 위하여 同社의 AE성분을 배제한 고성능감수제를 사용하였다. 또한 콘크리트의 내구성 향상을 위하여 일본 Sanflo Paric사의 내구성개선제를 사용하였다. 각 제품의 특성 및 성능은 표 8과 같다.

표 6. 플라이애시 및 실리카흙의 특성

| 종류 | 화학성분 | | | | 물리적 성질 | | | |
|-----------|------------------|-----|-----|----------|--------------------------------|------|------------------|-------------------|
| | SiO ₂ | 습분 | 탄소 | 강열 감량 | Blaine (cm ² /g) | 비중 | 단위수 량비 (%) | 압축강도비 (%, 28일) |
| 플라이 애시 | 51% | 0.1 | - | 3.7 | 3650 | 2.20 | 95 | 96 |
| 실리카 흙 | 92.4 % | 0.4 | 0.7 | 1.0 | 205000 | 2.20 | - | - |

표 7. 고로슬래그미분말의 화학성분 및 물리적성질

| 화학성분 | | | | 물리적 성질 | | | | |
|------------|------------------------|--------------|------------------|--------------------------------|------|--------------|---------|------|
| MgO (%) | SO ₃ (%) | L.O.I (%) | 염화물 이온 (%) | Blaine (cm ² /g) | 비중 | 활성도 지수(%) | | 플로값비 |
| | | | | | | 7일 | 28 일 | |
| 5.0 | 1.86 | 0.63 | 0.001 | 4376 | 2.90 | 88 | 118 | 102 |

표 8. 콘크리트용 화학혼화제의 특성

| 종류 | 유형 | 색상 | 주성분 | 고형분 (%) | pH | 점도 (cP) | 비중 |
|------------|----|-----|-----------------------------|------------|-----|------------|-------|
| AE제 | 액상 | 연노랑 | 소듐라우릴에테르 설페이트 | 28±2 | 9.5 | 100 | 1.045 |
| 고성능 감수제 | 액상 | 암갈색 | 폴리카복실에테르 | 16±2 | 8.3 | 100 | 1.040 |
| 내구성 개선제 | 액상 | 무색 | 클리롤에테르유도 체 및 아미노알콜유도체 | - | - | - | - |

2.2 실험방법

1) 염화물이온 침투깊이 실험

10×10×10cm의 콘크리트 시험체를 동일 배합에 대하여 4 개씩 제작하여 20℃의 수중에서 28일간 표준양생시킨 후 1주 일간 건조시킨 뒤 양 측면을 제외한 4면을 에폭시수지로 seal 한다. 그 후 20℃의 3.5%의 NaCl 수용액 중에 공시체를 침지

하여 4주, 90일, 6개월 경과후 꺼내어 할렬한다. 또한 시험액의 양은 침지하는 공시체체적의 3배 이상으로 하여 공시체상호간격 및 시험조바닥으로부터의 거리는 3cm이상 띄어 공시체를 완전히 침지시킨다.

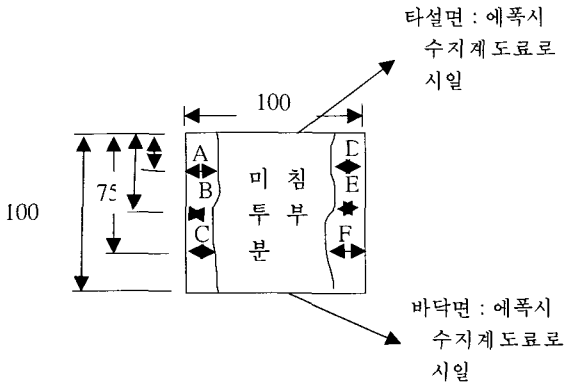


그림 2. 염화물이온 침투깊이 측정개소

염화물이온침투깊이의 측정은 먼저 소정기간 침지후 공시체를 할렬시험에 의하여 둘로 나눈 다음 콘크리트 할렬면에 0.1% 프레오레세인나트륨 용액을 분무한다. 다음에 그 위에 2%농도의 질산은수용액을 뿌려 반응에 의하여 염소이온이 없는 곳은 홍갈색, 염소이온이 있는 곳은 백색을 띤다(프레오레세인나트륨 변색법).염소이온의 침투깊이는 공시체 2 측면에 각각 3개소씩을 측정한 합계 6개소의 평균치를 가지고 나타낸다. 그림 2는 염화물 이온 침투깊이 측정개소를 나타낸다.

또한 프레오레세인나트륨 수용액을 사용한 발색법에 의한 발색한계역의 염화물이온량은 모르타르의 건조중량에 대하여 약 0.25%이다.

2) 염화물이온 투과성 실험

염화물이온 투과시험은 ASTM C1202-97 "Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration"과 AASHTO T259의 방법에 의거하여 수행하였다.

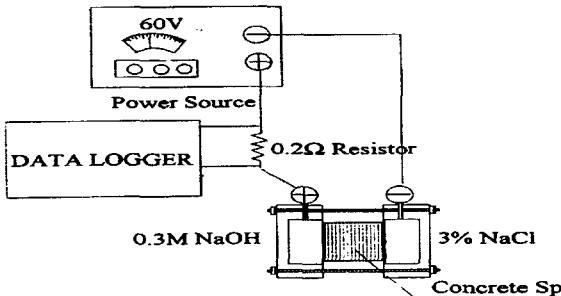


그림 3. 염화물이온 투과시험의 장치도

본 실험에 사용된 시편은 10×20cm 공시체를 28일 및 90일간 수중양생한 후 5cm 두께로 절단하여 염화물이온투과시험을 수행하였다. 공시체는 절단한 다음 실험을 수행하기 전까지 상대습도 95%이상을 유지시킨다.

시험시 시편은 Applied Voltage Cell에 고정시키고 회로 구성을 한다. 그림 3은 염소이온 투과시험의 장치도를 나타내며,

그림 4는 Applied Voltage Cell의 상세도이다. 이 회로에서 전원은 60±0.1V의 직류를 ±0.1V의 정도로 안정적으로 공급할 수 있어야 한다. 실험을 수행하는 동안 전해질용액이 새지않게 하기 위하여 사용되는 Sealant는 고무제품이고 무게는 20~40g정도의 것으로 Cell과 시편사이를 고정시킨다.

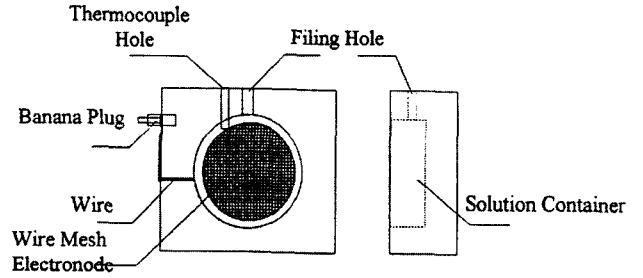


그림 4. Applied Voltage Cell의 단면도

전류를 측정하는 방법으로는 기지의 저항체를 회로에 연결하여 전압을 측정함으로써 얻을 수 있는데 이때 사용되는 저항으로는 콘크리트 시편에 적용되는 전압에 영향이 적도록 하기 위하여 가능한 작은 저항을 사용하는데 본 실험에서는 0.2Ω을 사용하였다.

콘크리트 시편의 노출된 부분은 불투수성의 재료로 피복하는데 이는 실험이 진행되는 동안 콘크리트 표면이 건조되어 염소이온의 투과에 영향을 미치는 것을 방지하기 위함이다. 본 실험에서는 콘크리트시편의 노출 부분은 에폭시도료로 도포하였다.

A.V.Cell의 (-)전극에 3.0%의 NaCl 용액을 채우고 (+)전극 쪽에는 0.3N의 NaOH 용액을 채운다. 3% NaCl 용액은 물 900ml에 NaCl 30g을 용해시킨 후 물을 가하여 1000ml의 용액을 만들고 0.3N NaOH는 물에 NaOH 12g을 용해시켜 용액 1L을 제조한다. 시험시 용액의 초기 온도는 20~25℃의 범위에 있어야 하고 시험중에는 대기의 온도를 20~25℃로 유지하도록 한다. 또한 시험중 용액의 온도는 90℃이하가 되도록 한다.

시험중 30분마다 0.2Ω에 걸리는 전압을 Data logger로 측정하여 기록한다. 이때 전압은 0.1mV까지 측정가능해야 하고 ±0.1%의 정도를 가진 장치이어야 한다. 측정된 전압값은 다음 식에 의하여 전류치로 환산한다.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{0.2}$$

여기서 I = 전류(amperes, A)

V = 전압(volts, V)

R = 저항(ohms, Ω)

염화물이온 투과시험은 매 시편마다 6시간동안 수행하며 30분간격으로 전압값을 측정한다. 측정된 전압을 전류로 환산하여 다음 식을 이용하여 회로를 통과한 총전하량을 산정한다.

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

여기서 Q = 회로를 통과한 전하량(coulombs)
 In = 실험시작후 n분이 경과하였을 때의 전류
 (ampere)

만약 시편의 직경이 95mm가 아닐 경우 투과면적에 대한 보정을 해야 하고 이는 다음 식에 의거한다.

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{X}\right)^2$$

여기서 Q_s = 직경 95mm를 통과한 전하량
 Q_x = 직경 xmm를 통과한 전하량

ASTM의 규정에서는 본 실험에서 산정된 전하량을 염화물 이온 투과성과 비교하는 자료를 표9와 같이 제시하고 있다.

표 9. 통과전하량에 따른 염화물이온 투과성

| 통과 전하량 (coulombs) | 염화물이온 투과성 |
|-------------------|-----------|
| 4000이상 | 높음 |
| 2000~4000 | 보통 |
| 1000~2000 | 낮음 |
| 100~1000 | 매우 낮음 |
| 100이하 | 무시할만함 |

3. 실험결과

3.1 염화물이온 침투깊이

본 시험에서는 각종 배합으로 제조한 콘크리트 공시체의 염화물이온침투에 대한 저항성을 평가하기 위하여 염화물 이온 침투실험과 염화물이온 투과성실험을 행하였다.

염화물이온 침투깊이는 콘크리트배합의 종류에 따라 다르며, 공시체를 침지하는 염분용액의 염분농도 및 침지기간에 따라서 그 결과가 다를 것이 예상된다.

본 실험에서는 염분용액의 염분농도를 3.5%로 하고, 침지 기간은 28일, 90일, 180일의 3가지 재령으로 하였다. 염분농도에 대해서는 규격이 정해져 있지 않기 때문에 KS F2561 (철근 콘크리트용 방청제)의 부속서1 철근의 염수침지시험방법에서 규정한 염분용액의 농도와 유사한 3.5%를 택하였다. 28일 침지, 90일 침지 및 180일 침지의 경우 염화물이온 침투깊이를 표 10 및 그림 5~그림 8에 나타내었다.

그림 5로 부터 물시멘트비가 30%에서 60%로 증가함에 따라 염화물이온 침투깊이는 증가하고 있으며, 또한 침지기간이 28일에서 90일, 180일로 증가함에 따라 침투깊이도 증가하고 있다. 그러나 물시멘트비 40%와 50%사이의 명확한 차이는 보이지 않았다. 이것은 공시체 제작상에 있어서 잘못된 기인한 결과로 사료된다.

침지재령 28일, 90일 및 180일에 있어서 물시멘트 50%, 60%의 보통콘크리트와 비교하여 내구성개선제, 플라이애시 10%, 20%, 고로슬래그미분말 20%, 40%, 실리카흄 10%를 첨가한 경우의 염소이온 침투깊이를 그림 6~그림 8에 나타내었다.

이 그림에 의하면 내구성개선제의 염소이온침투에 대한 저항성은 거의 없거나 미미하다. 그러나 고로슬래그미분말, 실리카흄의 혼화재료는 첨가량이 증가함에 따라 염소이온침투에 대한 저항성이 증가하여 염소이온 침투깊이가 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 플라이애시는 혼화재의 첨가에 의한 염소이온 침투에 대한 저항효과가 거의 없게 나타났으며, 가장 효과가 있는 것은 실리카흄, 그리고 그 다음이 고로슬래그미분말인 것을 알 수 있다.

표 10. 염화물이온 침투깊이 (단위: mm)

| 종류 \ 재령 | 28일 침지 | 90일 침지 | 180일 침지 |
|---------|--------|--------|---------|
| A30 | 9.5 | 15.2 | 17.7 |
| A40 | 14.9 | 22.5 | 25.6 |
| A50 | 14.3 | 22.3 | 26.4 |
| A60 | 19.6 | 29.0 | 31.8 |
| D50 | 14.3 | 27.1 | 25.4 |
| D60 | 17.6 | 26.3 | 33.8 |
| F50-10 | 18.4 | 24.1 | 30.3 |
| F50-20 | 12.5 | 21.5 | 27.6 |
| F60-10 | 13.6 | 26.8 | 29.6 |
| F60-20 | 12.1 | 28.0 | 27.0 |
| B50-20 | 7.9 | 16.2 | 19.7 |
| B50-40 | 4.6 | 11.5 | 13.6 |
| B60-20 | 9.3 | 19.6 | 22.8 |
| B60-40 | 8.2 | 13.0 | 14.2 |
| S50-10 | 8.8 | 13.5 | 14.2 |
| S60-10 | 10.0 | 16.1 | 16.8 |

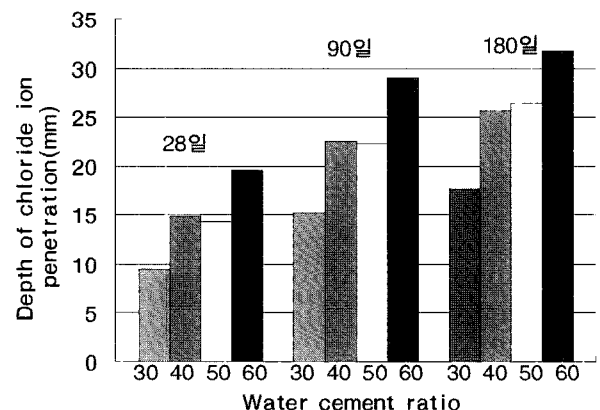


그림 5. 물시멘트비별 염소이온 침투깊이(AE콘크리트)

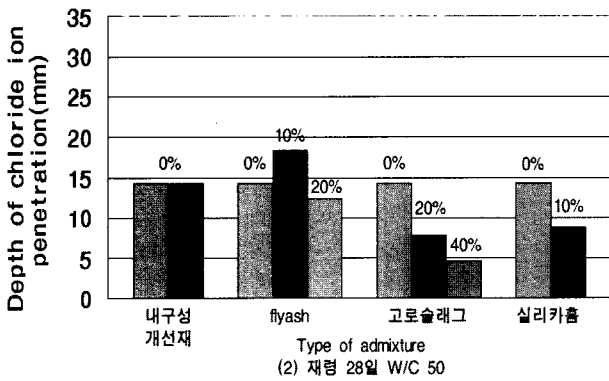
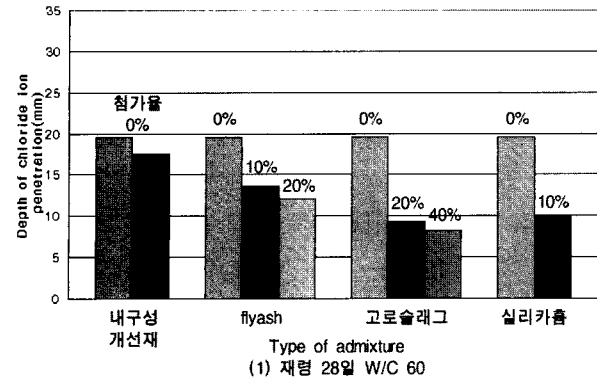


그림 6. 재령 28일의 혼화재료첨가에 따른 염소이온침투깊이

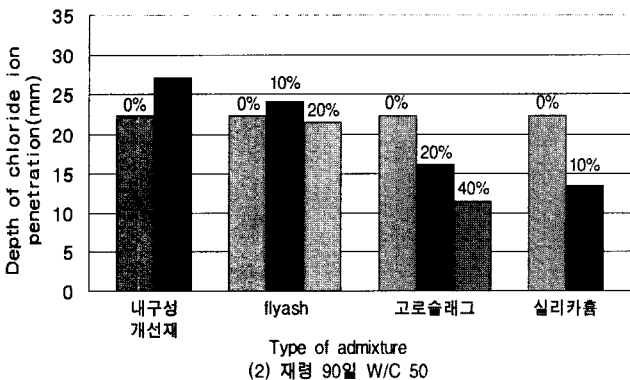
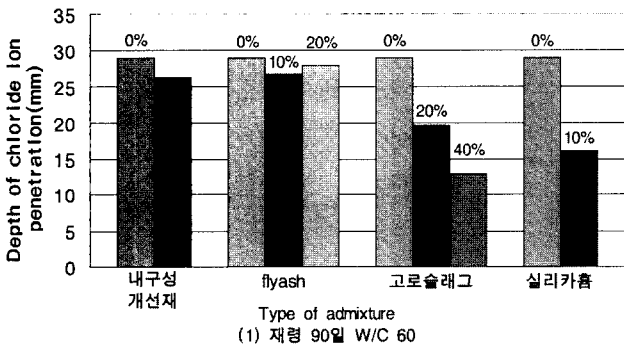


그림 7. 재령 90일의 혼화재료첨가에 따른 염소이온침투깊이

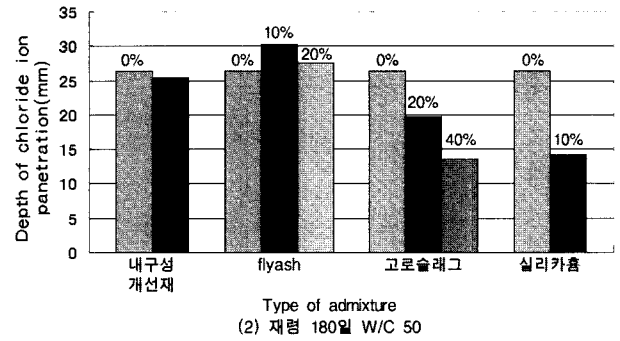
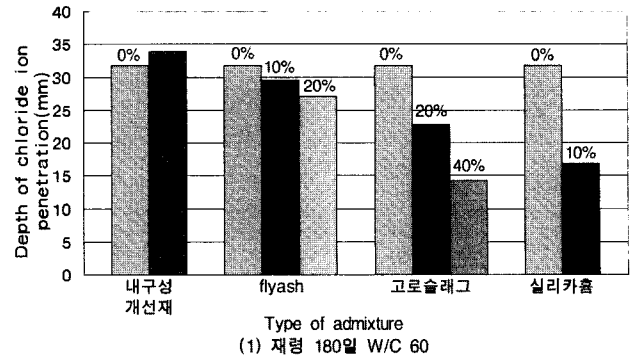


그림 8. 재령 180일의 혼화재료첨가에 따른 염소이온 침투깊이

1) 염소이온확산계수의 계산

각 시험체에 대한 염화물이온 침투깊이 실험결과로부터 염소이온확산계수를 구하였다. 염소이온확산계수의 계산은 다음식에 의하였다.

콘크리트내부의 염소이온의 침투는 다음식과 같은 Fick의 제2법칙에 따른 확산방정식에 의한 것으로 설명되고 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

여기에서, C : 콘크리트 중량에 대한 염분량(wt.%)

t : 사용기간

x : 콘크리트 표면으로부터의 거리

D : 염분의 겉보기확산계수

이것을 풀면 다음식과 같이 된다.

$$C = C_o [1 - erf (\frac{X}{2\sqrt{D \cdot t}})]$$

여기에서, C : 깊이 Xcm 에서의 염화물 이온농도 (kg/m³)

C_o : 표면염화물 이온농도 (kg/m³)

X : 콘크리트 표면에서의 깊이 (cm)

D : 염화물 이온의 확산계수 (cm²/sec)

t : 시간 (s)

이 식에서 X값은 염소이온침투깊이값을 사용하였으며, 프 레오레세인나트륨수용액을 사용한 발색법에 의한 발색한계역 의 염화물이온량은 모르타르의 건조중량에 대하여 약 0.25% 이므로 C값은 $2300 \times 0.0025 = 5.75 \text{kg/m}^3$ 로 하였다.

또한 표면염화물농도값인 Co값은 염분농도 3.5%의 용액중 에 공시체를 침지하였으므로 해양환경에서의 통상값인 20 kg /m³로 하였다. 이 식에 의하여 구한 염소이온확산계수값을 표 11에 나타낸다.

표 11로부터 계산된 염소이온확산계수값은 $0.39 \times 10^{-7} \sim 7.06 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 사이에 존재한다. 해양환경의 실제구조물에서 내부염화물량을 측정된 결과에 의하면 염화물이온의 확산 계수는 대략 $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다. 본 실험에서는 염분용액에 공 시체를 침지하여 시험하였기 때문에 염분환경에 노출된 경우 보다 약 10배 높은 확산계수값을 보여주고 있다.

표 11로부터 물시멘트비가 증가하면 염소이온확산계수값은 증가한다. 또한 재령의 경과에 따라 염소이온 확산계수값이 감소함을 알 수 있다. 내구성개선제의 첨가는 염소이온의 확산을 방지하는 효과가 없으며 고로슬래그미분말 및 실리카흙을 첨가한 콘크리트가 염소이온 확산방지효과가 큼을 알 수 있다.

표 11. 염소이온확산계수 계산결과(cm²/s)

| | 28일 재령 | 90일 재령 | 180일 재령 |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| A30 | 1.66×10^{-7} | 1.32×10^{-7} | 0.90×10^{-7} |
| A40 | 4.08×10^{-7} | 2.89×10^{-7} | 1.87×10^{-7} |
| A50 | 3.76×10^{-7} | 2.84×10^{-7} | 1.99×10^{-7} |
| A60 | 7.06×10^{-7} | 4.81×10^{-7} | 2.89×10^{-7} |
| D50 | 3.76×10^{-7} | 4.20×10^{-7} | 1.84×10^{-7} |
| D60 | 5.69×10^{-7} | 3.95×10^{-7} | 3.26×10^{-7} |
| F50-10 | 6.22×10^{-7} | 3.32×10^{-7} | 2.62×10^{-7} |
| F50-20 | 2.87×10^{-7} | 2.64×10^{-7} | 2.18×10^{-7} |
| F60-10 | 3.40×10^{-7} | 4.11×10^{-7} | 2.50×10^{-7} |
| F60-20 | 2.69×10^{-7} | 4.48×10^{-7} | 2.08×10^{-7} |
| B50-20 | 1.15×10^{-7} | 1.50×10^{-7} | 1.11×10^{-7} |
| B50-40 | 0.39×10^{-7} | 0.76×10^{-7} | 0.53×10^{-7} |
| B60-20 | 1.59×10^{-7} | 2.20×10^{-7} | 1.49×10^{-7} |
| B60-40 | 1.24×10^{-7} | 0.97×10^{-7} | 0.58×10^{-7} |
| S50-10 | 1.42×10^{-7} | 1.04×10^{-7} | 0.58×10^{-7} |
| S60-10 | 1.84×10^{-7} | 1.48×10^{-7} | 0.81×10^{-7} |

이상의 결과로부터 내구성개선제의 첨가는 염소이온침투를 방지하는 효과가 거의 없음을 알 수 있다. 또한 혼화재료의 사용에 의한 침투방지효과는 실리카흙이 가장 크고, 그 다음 에 고로슬래그미분말의 순이며, 플라이애시는 효과가 거의 없 게 나타났다.

3.2 염화물이온 투과성 실험결과

1) 영향요인별 염화물이온 투과성

ASTM C 1202에 의한 염화물이온 투과성 실험결과를 표 12 및 그림 9~그림 11에 나타내었다. 예비실험결과, 실험결과 에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 공시체의 함수율이었다. 따 라서 본 실험에서는 공시체의 함수율을 포화상태에 가까운 상태로 조정된 후 투과성실험을 실시하였다.

물시멘트비별 및 재령별 염화물이온 투과성을 나타낸 그림 9로부터 통과한 총 전하량은 물시멘트비가 증가함에 따라 커 지며, 재령이 경과함에 따라 작아짐을 알 수 있다.

재령 28일 및 90일에 있어서 물시멘트비 50%, 60%의 보통 콘크리트와 비교하여 내구성개선제, 플라이애시 10%, 20%, 고로슬래그미분말 20%, 40%, 실리카흙 10% 첨가한 경우의 통과전하량을 그림 10~그림 11에 나타내었다.

이 그림에 의하면 내구성개선제의 염화물이온 투과성에 대 한 저항성은 거의 없거나 오히려 투과성이 증가하는 역효과 를 보인다. 이것은 염화물이온 침투깊이 실험 결과와도 일치 한다. 그러나 고로슬래그미분말, 실리카흙, 플라이애시 등 혼 화재료의 경우에는 첨가량이 증가함에 따라 염화물이온 투과 에 대한 저항성이 증가하여 통과전하량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 포졸란반응의 결과로 콘크리트조직이 치 밀화되는 것에 기인하는 것으로 사료된다. 가장 효과적인 혼 화재료는 실리카흙이었으며, 실리카흙을 10% 첨가한 경우만 이 ASTM C 1202에서 제시한 기준에 의하여 염화물이온 투 과성이 매우 낮은 결과가 되었다. 그러나 플라이애시 및 고 로슬래그의 경우에는 첨가량이 증가함에 따라 통과전하량이 감소하고 있다.

플라이애시의 경우에는 염화물이온 투과성에 대한 저항성 에는 유효한 결과가 나왔으나 염화물이온침투깊이 실험에서는 거의 효과가 없는 것으로 나타나 서로 상이한 결과가 되었다. 이 이유에 대해서 보다 더 심도있게 검토할 필요가 있다.

표 12. 염화물이온 투과성 실험결과

| 시험체 종류 | 통과전하량(Coulombs) | |
|--------|-----------------|--------|
| | 재령 28일 | 재령 90일 |
| A30 | 3201 | 3695 |
| A40 | 4592 | 4289 |
| A50 | 4749 | 4181 |
| A60 | 5580 | 4761 |
| D50 | 5750 | 5685 |
| D60 | 5526 | 5795 |
| F50-10 | 4307 | 2748 |
| F50-20 | 2639 | 1800 |
| F60-10 | 4751 | 2757 |
| F60-20 | 4395 | 2241 |
| B50-20 | 3354 | 3092 |
| B50-40 | 2187 | 1985 |
| B60-20 | 3729 | 3393 |
| B60-40 | 2346 | 2127 |
| S50-10 | 1677 | 852 |
| S60-10 | 1553 | 926 |

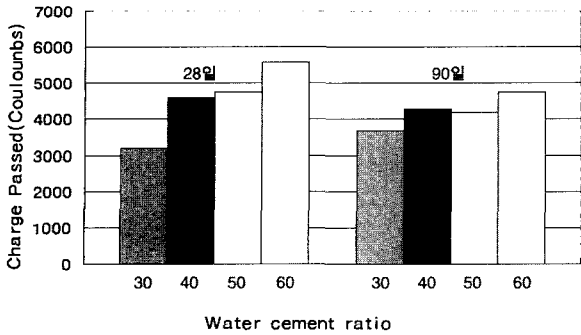


그림 9. 물시멘트비 및 재령별 염화물이온투과성

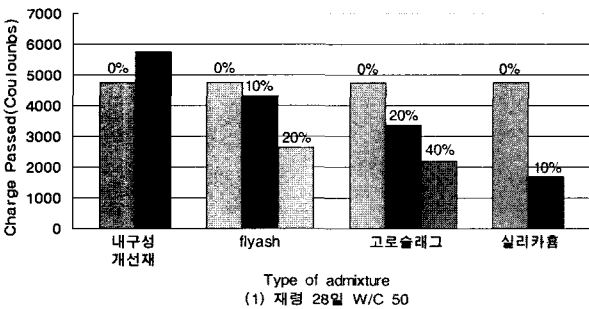
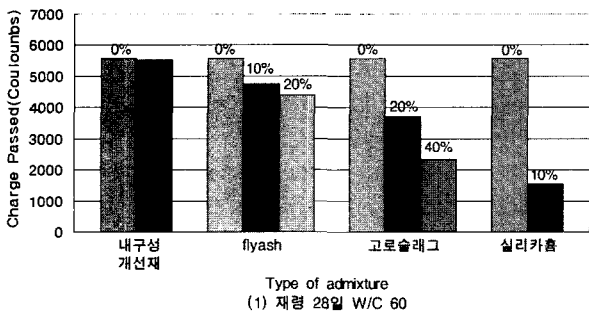


그림 10. 재령 28일의 혼화재료첨가에 따른 염화물이온투과성

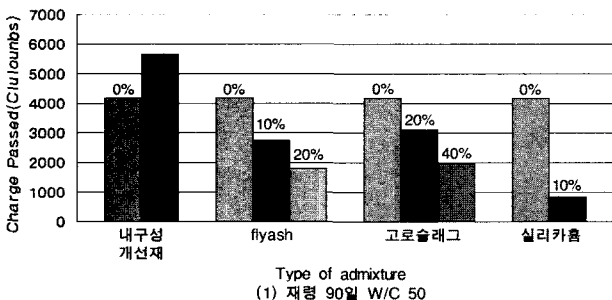
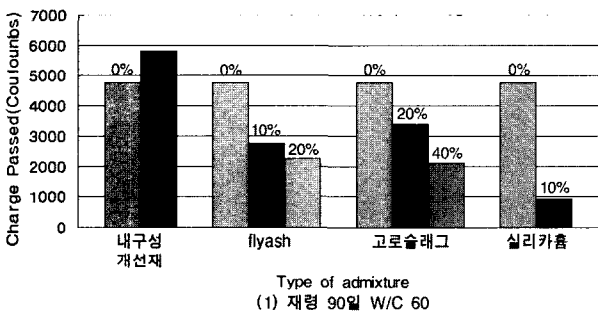


그림 11. 재령 90일의 혼화재료첨가에 따른 염화물이온투과성

2) 염화물이온 확산계수의 계산

표준양생 90일의 시험체에 대하여 염화물이온투과성시험을 종료한 후 할열하여 할열면에 0.1% 프레오레세인 나트륨용액 및 그 위에 0.1N AgNO3를 분무하여 변색되는 부위를 버니어 캘리퍼스를 사용하여 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 다음식을 이용하여 염소이온 확산계수를 산출하였으며, 그 결과는 표 13과 같다.

표 13의 염화물이온확산계수의 크기는 표11의 염화물이온 침투깊이의 실험결과로부터 구한 염화물이온확산계수와 유사한 경향을 보이고 있다. 즉 물시멘트비가 증가함에 따라 염소이온확산계수도 증가한다. 또한 내구성개선제의 첨가는 염소이온확산계수를 감소시키는 효과가 없다.

플라이애시, 고로슬래그미분말 및 실리카흄과 같은 혼화재료의 첨가는 염소이온확산계수를 저하시키는데 유효하며, 특히 실리카흄이 가장 효과가 컸다. 또한 혼화재료의 첨가량이 증가함에 따라 염소이온확산계수도 저하한다.

표 13. 염소이온 투과시험체의 염소이온침투깊이 및 염소이온확산계수

| 시험체명 | 평균침투깊이 (mm) | 염소이온확산계수 (cm ² /s) |
|--------|-------------|-------------------------------|
| A30 | 15.4 | 1.363 × 10 ⁻⁷ |
| A40 | 27.49 | 2.495 × 10 ⁻⁷ |
| A50 | 34.59 | 3.164 × 10 ⁻⁷ |
| A60 | 44.78 | 4.129 × 10 ⁻⁷ |
| D50 | 47.2 | 4.358 × 10 ⁻⁷ |
| D60 | 50.0 | 4.62 × 10 ⁻⁷ |
| F50-10 | 15.56 | 1.378 × 10 ⁻⁷ |
| F50-20 | 11.74 | 1.024 × 10 ⁻⁷ |
| F60-10 | 22.22 | 2.00 × 10 ⁻⁷ |
| F60-20 | 21.14 | 1.899 × 10 ⁻⁷ |
| B50-20 | 15.97 | 1.416 × 10 ⁻⁷ |
| B50-40 | 9.17 | 0.788 × 10 ⁻⁷ |
| B60-20 | 16.17 | 1.435 × 10 ⁻⁷ |
| B60-40 | 11.16 | 0.97 × 10 ⁻⁷ |
| S50-10 | 6.16 | 0.513 × 10 ⁻⁷ |
| S60-10 | 8.22 | 0.701 × 10 ⁻⁷ |

$$D = \frac{R \cdot T \cdot L}{Z \cdot F \cdot u} \cdot \frac{xd - \alpha \sqrt{xd}}{t}$$

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{R \cdot T \cdot L}{Z \cdot F \cdot u}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2Cd}{Co}\right)$$

여기에서

- D : 확산계수(m^2/sec)
 z : 이온의 원자가(염소이온의 경우 Z=1)
 F : 페러데이 상수 (96481.04 J/V mol)
 U : 양극과 음극사이의 전압차(V) 60
 R : 기체상수 (8.314 J/Kmol)
 T : 용액의 온도(K) ($273 + 20^\circ C$)
 L : 시편의 두께(m)
 Xd : 염소이온의 침투깊이(m)
 t : 실험지속시간 (6시간 \times 3600=21600초)
 erf : error function
 Cd : 질산에 의해 변색된 부분의 염소이온 농도 ($Cd \approx 0.07N$)
 Co : 음극쪽 셀의 염소이온 농도 ($Co \approx 2N$)

4. 결 론

고내구성콘크리트를 만들기위하여 각종 콘크리트에 대하여 실시한 염화물이온 침투깊이실험 및 염화물이온투과성실험결과를 다음과 같다.

- 1) 염화물이온 침투깊이는 물시멘트비가 증가함에 따라 증가하며, 재령이 경과함에 따라 증가한다.
- 2) 염화물이온 침투깊이는 초기재령에서 급격히 증가하나 재령이 증가함에 따라 침투깊이는 지수함수적으로 감소한다.
- 3) 내구성개선제를 첨가한 공시체의 염화물이온 침투깊이는 무첨가의 경우와 동일하거나 오히려 증가하여 염화물이온 침투를 억제하는 효과가 거의 없다.
- 4) 혼화재료의 첨가량이 증가함에 따라 염화물이온 침투깊이가 감소하여 염화물이온 침투에 대한 저항성이 커지는 것을 알 수 있으며 이것은 포졸란반응에 의한 콘크리트조직의 치밀화에 기인한 것으로 사료된다.
- 5) 염화물이온 침투에 대한 저항성이 큰 혼화재료는 실리카흙 및 고로슬래그미분말의 순이었다.
- 6) 시험체를 통과한 총전하량은 물시멘트비가 증가함에 따라 증가하며, 재령이 경과함에 따라 작아진다.
- 7) 내구성개선제를 첨가한 공시체에 있어서 통과한 전하량은 내구성개선제 무첨가의 경우와 동일하거나 오히려 증가하여 염화물이온 투과를 억제하는 효과가 거의 없다.
- 8) 혼화재료의 첨가량이 증가함에 따라 통과전하량이 감소하여 염화물이온 투과에 대한 저항성이 커지는 것을 알 수 있으며 이것은 포졸란반응에 의한 콘크리트조직의 치밀화에 기인한 것으로 사료된다.
- 9) 혼화재료중 염화물이온 투과방지에 가장 큰 효과가 큰 혼화재료는 실리카흙이었다.
- 10) 혼화재료 중 플라이애시의 경우에는 염화물이온 침투 깊이 실험결과와 염화물이온투과성실험결과가 서로 상이하게 나타나 좀더 심도있는 연구가 필요하다고 사료된다.

감 사 의 글

본 연구는 한국양회협회의 연구비지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 윤재환, “장수명콘크리트”, 콘크리트학회지, 제10권 6호, 1998.12
2. 이태희 외 5인, “물시멘트비 및 도장재 종류에 따른 콘크리트의 염소이온확산 특성에 관한 실험적 연구”, 2002년도 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2002
3. 김영진 외 4인, “전기축진시험에 의한 광물질혼화재를 혼입한 콘크리트의 염소이온확산성능 평가에 관한 연구”, 2002년도 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2002
4. 정상진, “초고내구성 콘크리트의 개발”, 콘크리트학회지, Vol.6, No.1, pp.62-65, 1994. 2
5. 오병환, 정원기, “국내의 고내구성 콘크리트의 개발 및 실용화”, 콘크리트학회지, 제7권 5호, pp.58-65, 1995. 10
6. 동아건설산업(주), 서울대, “고품질 시공을 위한 고내 성콘크리트의 개발 및 실용화 연구”, 건설교통부, 1996. 10
7. 柳橋邦生 外2人, “超高耐久性コンクリート”, コンクリート工學, Vol.32, No.7, pp.91-94, 1994. 7
8. 米澤敏男, “第5回超壽命コンクリート”, 콘クリート工學, Vol.35, No.12, pp.41-43, 1997. 12
9. 柳橋邦生, “長壽命コンクリート”, 콘クリート工學, Vol.36, No.1, 1998. 1, pp.56-58
10. 柳橋邦生 外, “高耐久性コンクリート”, 콘クリート工學, Vol.37, No.6, 1999. 6
11. ポリマーセメントモルタル試験方法小委員会, “ポリマーセメントモルタル試験方法規準(案)その2”, 콘クリート工學, Vol.25, No.8, 1987
12. 飛坂基夫, 柳啓, “硬化コンクリート中への鹽素イオンの浸透性に関する2,3の検討”, 콘クリート工學年次論文報告集, 9-1, 1987
13. 柳橋邦生, “超高耐久性コンクリートの開發”, セメント・コンクリート”, No.645, 2000
14. 柳橋邦生, 吉岡保彦, 齊藤俊夫, “超高耐久性コンクリート”, 콘クリート工學, Vol.32, No.7, 1994. 7
15. 江原光雄, 柳橋邦生, 齊藤俊夫, “超高耐久性コンクリートを用いた建築物の施工”, 콘クリート工學, Vol.29, No.12, 1991. 12
16. 佐久田昌治, “高耐久性コンクリート開發研究その1-7”, 日本建築學會大會, 1986, 1988, 1989
17. 友澤史紀, “超高耐久性-低水セメント比-”, 第249回コンクリート講演會テキスト, 日本セメント協會, 1992. 2