

케이블볼트 충전재의 내구성 평가 Durability Evaluation of Grout in Cablebolt System

최정인¹⁾, Jung-In Choi, 김원근²⁾, Won-Keun Kim, 전재현²⁾, Jae-Hyun Jeon, 이석원³⁾, Seok-Won Lee

¹⁾ (주)청석엔지니어링 사원, Engineer, Chung Suk Engineering

²⁾ 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University

³⁾ 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University

SYNOPSIS : Like the shotcrete can be deteriorated by chemical compounds as service years increase, the grout which is used to fasten the cablebolt(rockbolt) system in the underground structures also can be deteriorated by chemical compounds such as sulphate and/or chloride contained in groundwater during service years. This can induce issues on the long term durability of cablebolt(rockbolt) system and consequently on the stability of underground structures. In this study, the deteriorations of long term durability of cement mortar grout by each chemical compound of sulphate or chloride are studied experimentally and also complex deterioration by the mix of sulphate and chloride is investigated. Based on the results obtained in this study, the characteristics and prediction of deterioration of long term durability of cement mortar grout for cablebolt(rockbolt) system are suggested.

Keywords : durability evaluation, rockbolt, cement mortar grout, cablebolt

1. 서론

케이블볼트(록볼트)의 경우 슛크리트와 같이 케이블볼트(록볼트)의 정착에 사용되는 충전재(그라우트)가 지하수에 포함된 황산염이나 염화물과 같은 화학적 성분으로 인하여 열화가 발생함으로써 케이블볼트(록볼트) 시스템의 장기 내구성에 저하를 가져올 수 있다. 그로 인해 전체 지하구조물의 안정성에 문제가 될 수 있다. 특히 대형·대단면 지하구조물이 콘크리트라이닝을 생략한 단일 라이닝 구조로 설계·시공되어지는 경우는 이중 라이닝 구조보다 케이블볼트(록볼트)를 포함한 주지보재의 내구성능 감소가 중요한 문제점으로 대두될 수 있다.

황산염의 경우, 수화과정 중과 외부의 침투에 의해 팽창, 균열의 현상뿐 만 아니라 강도손실이나 연질화 등의 현상으로도 나타날 수 있다(형원길, 2000). 염화물의 경우, 록볼트의 충전재를 침투하여 록볼트(철근 등)의 팽창을 일으키고 부식을 발생시킨다. 이로 인해 록볼트와 충전재 사이의 장기적인 내구성능 저하로 인하여 인발(결합)강도 저하와 함께 안정성에 문제를 유발 시킬 수 있다.

따라서 이러한 열화 현상 및 그에 따른 인장강도 저하를 고려하여, 터널의 주지보재로 사용되는 록볼트의 단일화합물 및 복합열화로 인한 장기적인 내구성을 예측하고, 예측한 모델의 타당성을 검토하여 안정성 검토 자료를 제시하여야 한다. 즉, 염화물 또는 황산염이 따로 지하수에 존재하여 각각 한 개의 성분만이 지하수에 포함되어 있을 경우의 열화현상을 조사할 필요가 있으며, 또한 염화물과 황산염이 같이 지하수에 존재하여 복합화합물에 의한 복합열화 현상을 연구 할 필요가 있다.

본 연구에서는 시멘트 모르타르계 충전재의 염화물 및 황산염에 의한 내구성 저하를 평가하기 위해 황산마그네슘의 농도를 1%, 3%, 5%로 설정하고 염화나트륨 5%의 용액에 제조한 모르타르를 일정기간 침지하여 실험을 수행하였다. 또한, 복합열화에 따른 충전재의 내구성 저하를 평가하기 위해 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%의 용액을 함께 사용하여 일정기간 침지한 후 실험을 수행하여 내구성 저하를 평가하였다. 이를 토대로 시멘트 모르타르계 충전재의 열화에 따른 내구성 저하 특성 및 예측할 수 있는 방안을 연구하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 실험에서는 시멘트 모르타르계 충전재 재료 자체의 염화물 및 황산염에 의한 단일화합물과 복합염화(염화물+황산염)에 의한 내구성 저하와 초기재령에 따른 내구성의 변화를 알아보고자 각각 실험적으로 연구하였다. 초기재령에 따른 영향을 파악하고자 수중양생을 0일, 28일로 각각 실시하였고, 아래 그림 1과 같이 단일화합물에 의한 내구성 저하 특성 평가를 위해서 황산염의 경우는 용액의 농도를 1%, 3% 및 5%로 설정하였고 염화물의 경우는 염화나트륨 5% 용액에 제조한 모르타르 공시체를 침지하여 실험을 실시하였다. 또한 두 가지 용액이 함께 존재할 때의 충전재의 열화, 즉 복합염화에 따른 성능저하를 알아보기 위해서는 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%의 용액을 함께 사용하여 일정기간 침지시켜 실험을 실시하였다. 본 연구에서 수행한 전체 실험범위는 표 1과 같다.



그림 1. 용액에 침지된 시편

표 1. 수행된 실험 범위

구분	용액	수중양생	침지 일수	실험 항목
단일화합물	황산염 1%	수중양생 0일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 염화물 확산계수
	황산염 3%	수중양생 0일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 염화물 확산계수
	황산염 5%	수중양생 0일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 염화물 확산계수
	염화물 5%	수중양생 0일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 염화물 확산계수
복합화합물	황산염 5% +염화물 5%	수중양생 0일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 염화물 확산계수
충전재 재료	황산염 1%	수중양생 28일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140, 160, 180, 250, 365, 400일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 길이변화 표면박리현상 염화물 확산계수
	황산염 3%	수중양생 28일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140, 160, 180, 250, 365, 400일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 길이변화 표면박리현상 염화물 확산계수
	황산염 5%	수중양생 28일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140, 160, 180, 250, 365, 400일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 길이변화 표면박리현상 염화물 확산계수
	염화물 5%	수중양생 28일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140, 160, 180, 250, 365, 400일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 길이변화 표면박리현상 염화물 확산계수
복합화합물	황산염 5% +염화물 5%	수중양생 28일	0, 7, 28, 56, 91, 120, 140, 160, 180, 250, 365, 400일	<ul style="list-style-type: none"> 일축압축강도 길이변화 표면박리현상 염화물 확산계수

2.2 사용 재료

본 실험에서의 시편제작은 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 A사의 록볼트(케이블볼트) 충전용 시멘트 모르타르 제품으로서 중량비는 보통 포틀랜드 시멘트 60%, 주문진 표준사 39% 그리고 기타 혼화재료 1%로 구성되어 있다. 물/시멘트 비 조건은 40%로 하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 일축 압축강도

황산염과 염화물의 침식에 의한 일축 압축강도의 변화를 알아보기 위해 KS F 2405 「콘크리트 압축강도 시험방법」에 의하여 강도실험을 실시하였다. 공시체는 $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ 로 제작하여 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 50%의 항온 항습실에 1일 양생 후 수중양생 0일, 28일 동안 실시하였다. 수중양생 0일 실시한 후 황산염 및 염화물의 침식에 대한 영향을 알아보기와, 황산마그네슘은 각각 1%, 3%, 5% 농도, 염화나트륨은 5% 농도 그리고 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 같이 존재하는 용액에 0, 7, 28, 52, 91, 120, 140일 동안 침적하였고, 수중양생 28일 실시한 후 각각의 용액에 0, 7, 28, 52, 91, 120, 140, 180, 250, 365 그리고 400일 동안 침적한 후 일축 압축강도를 측정하였다.

2.3.2 길이변화

황산염과 염화물의 침식으로 인한 팽창의 정도를 알아보기 위해 ASTM C 1012에 준하여 길이변화 측정을 실시하였다. $5 \times 5 \times 5\text{cm}$ 의 정육면체 압축강도 시험 공시체의 강도가 20MPa 이상 발현되는 재령까지 수중양생 한 후, $25 \times 25 \times 285\text{mm}$ 의 길이변화 공시체를 황산마그네슘은 각각 1%, 3%, 5% 농도, 염화나트륨은 5% 농도 그리고 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 함께 존재하는 용액에 침지시키면서, 0, 7, 28, 52, 91, 120, 140, 180, 250일에 측정하였다.

길이변화는 KS F 2424의 다이얼게이지 방법에 의하여 재령별로 측정하였으며, 다음의 식 (1)에 의하여 계산하였다.

$$\Delta l(\%) = \frac{l_t - l_o}{l_o} \times 100 \quad (1)$$

여기서, Δl : 길이변화(%)

l_t : 침지재령에서 모르타르의 길이

l_o : 침지 전 모르타르의 길이

2.3.3 표면박리 현상 촬영

황산염 및 염화물에 의한 시멘트 모르타르계 충전재의 성능저하를 육안으로 평가하기 위하여 외관 변화를 재령별로 조사하였다. 외관 조사용 큐빅 모르타르 공시체를 제작하여 황산마그네슘은 각각 1%, 3%, 5% 농도, 염화나트륨은 5% 농도 그리고 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 함께 존재하는 혼합 용액에 침지시켜 침지일수별로 표면박리 현상을 조사하였다. 조사 방법은 Al-Amoudi 등(1995)의 연구에서 제시한 총 6등급으로 분류된 화학적 침식에 의한 외관등급기준 및 손상상태를 준용하였다. 즉, 황산염 및 염화물에 의해 침식 받은 시멘트 모르타르계 충전재 공시체의 외관상태 및 성능저하 정도를 평가하였다.

2.3.4 염화물 이온 확산계수 산정 실험

압축강도와 함께 열화가 진행된 충전재의 염화물 이온 확산특성을 평가하기 위하여 수중양생 0일 실시한 후 0, 7, 28, 52, 91, 120, 140일 동안 침적하였고, 수중양생 28일 실시한 후 각각의 용액에 0, 7, 28, 52, 91, 120, 140, 180, 250, 365 그리고 400일 동안 침적한 후 아래 그림 2와 같이 급속 전기이동에 의한 확산 실험을 실시하였다. 급속 전기이동에 의한 염화물 이온의 확산 평가는 북유럽 실험기준인 NT Build 492에 준하여 실시하였다.

실험에 필요한 시편은 지름 10cm, 두께 5cm의 원형 공시체를 사용하였다. 강도 실험에 사용된 배합과 동일한 배합으로 각 재령별로 2개의 공시체를 확산계수 평가용으로 제작하고, 각 시편으로부터 5cm 두께로 절단하여 시편을 준비하였다.

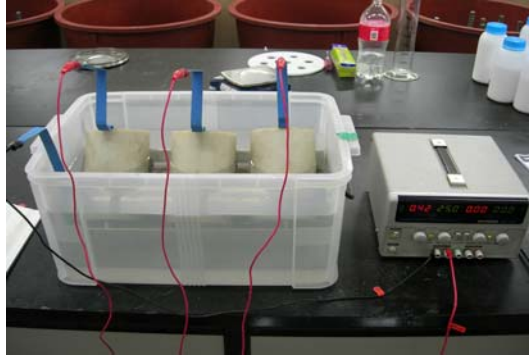


그림 2. 염화물 이온 확산 계수 실험 장치

3. 실험 결과

3.1 일축 압축강도 실험 결과

황산염 및 염화물 침식에 대한 영향과 초기재령에 대한 영향에 따른 압축강도 실험 결과는 아래 그림 3과 4에 나타나고 있으며, 그림 3과 같이 수중양생 0일 실시한 경우에 실험 결과를 보면, 전체적으로 침지 일수 28까지는 압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 황산마그네슘과 염화나트륨 용액이 함께 존재하는 경우와 황산마그네슘 용액에 침지한 압축강도가 수중양생의 압축강도보다도 낮은 결과를 보이고 있다. 반면에 염화나트륨 5%에 침지한 경우에는 수중양생과 비슷한 수준을 보이고 있다. 이는 기존 연구 결과(문한영 2001)와 같이 수중양생을 거치지 않고 바로 황산염에 노출할 경우 초기 재령에서는 황산이온이 침투하여 에트링가이트(ettringite)가 생성되어 공극을 채워주기 때문에, 초기 재령에서는 압축강도가 증가하는 경향이 나타난 것으로 판단된다.

그림 4의 결과를 보면, 전체적으로 120일 이전까지는 농도에 관계없이 수중양생과 비슷한 수준의 압축강도를 나타내고 있다 반면, 120일 이후부터는 압축강도가 감소하는 경향을 보이기 시작하여 재령 400일까지 계속적으로 감소하는 경향을 보였다. 황산염의 농도에 따른 압축강도의 경향을 보면 재령 180일부터는 농도가 커질수록 낮아지고 있다. 이는 침지 초기재령에서는 시멘트 모르타르계 충전재의 공시체에 황산염인 SO_4^{2-} 이온의 침투정도가 작아 압축강도에 영향을 크게 미치지 않지만 장기재령으로 갈수록 침투정도가 증가하여 팽창성 균열의 발생과 석고(gypsum)의 생성으로 인하여 연화현상으로 압축강도가 감소하였다. 또한 염화나트륨 5%와 황산마그네슘 5%가 함께 존재하는 경우에도 120일 이후부터 감소하는 경향을 보이기 시작하여 재령 400일 까지 계속적으로 감소하는 경향을 보였다. 특히 황산마그네슘 5%와 비교하여 볼 때, 복합열화가 발생할 경우 화합물간의 상호작용을 통해 압축강도의 성능 저하가 더욱 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 염화나트륨 5%의 경우에는 장기간 침적하여도 압축강도가 감소하는 경향을 보이지 않고 있다. 따라서 염화나트륨의 용액은 단일화합물로서는 압축강도의 성능

에 영향을 미치지 않지만 황산염과 함께 존재할 경우에는 상호작용을 통해 압축강도 성능저하에 영향을 미친다고 판단된다. 또한 기존 연구결과(윤태형 등, 1993; 김동규 등, 2005)에서 보듯이 감소경향이 나타나는 침지일수가 대략 91~180일 사이라고 제시하였는데 이와 유사하게 본 연구에서도 침지일수 120일 부터 다소 감소하는 경향을 보이기 시작함을 알 수 있다.

그림 3과 4를 비교해 보면, 전체적으로 초기 재령에서 황산염에 노출한 경우 수중양생 0일 실시한 압축강도가 수중양생 28일 실시한 압축강도 보다 작게 나타났으며 담수에 침지한 경우보다도 낮은 압축강도를 보이고 있다. 반면에 염화나트륨 5%의 경우 28일 이후에는 비슷한 수준에 도달하였다. 결국 황산염 용액이 존재하는 지하공간에 케이블볼트(록볼트)를 설치 할 때 충전재에 바로 노출할 경우 기존의 압축강도를 발휘하지 못하여 지하공간의 안정성에 문제가 발생 할 수 있다고 판단된다.

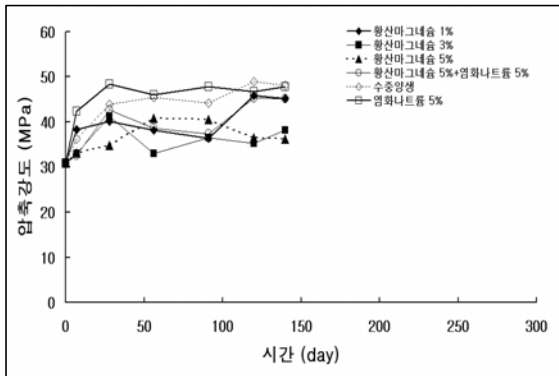


그림 3. 수중양생 0일 압축강도 변화

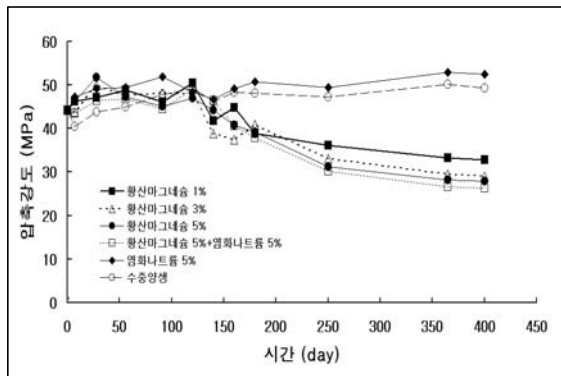


그림 4. 수중양생 28일 압축강도 변화

3.2 길이변화 결과

황산염 및 염화물 침식에 따른 길이변화의 영향을 알아보기 위하여 황산마그네슘 1%, 3%, 5%, 염화나트륨 5% 그리고 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 같이 존재하는 용액에 0, 7, 14, 28, 52, 91, 120, 140, 180, 250일 동안 침적한 후 길이변화를 측정하였다. 용액의 농도와 종류에 따른 침지 일자별 길이변화율은 그림 5와 같다.

전체적인 경향을 살펴 볼 때 침지 재령 120일까지 황산마그네슘 용액 농도와 염화나트륨 용액에 의한 길이변화가 크게 영향을 받지 않는다. 반면에 120일 이후부터 황산마그네슘에 침적한 공시체의 길이 변화율이 증가하는 경향을 보이기 시작한다. 침지일수 250일에서의 길이변화를 살펴보면 농도가 높을수록 길이변화율이 큰 것으로 나타났다. 이는 초기 재령에서는 용액의 농도에 의해 길이변화에 크게 영향을 미치지 않으나 장기재령으로 갈수록 농도가 높을수록 시멘트 경화체의 경우 용액의 농도에 따라 조직구조의 연화작용 및 팽창이 발생하여 길이변화에 영향을 미친 것으로 판단된다. 반면에, 염화나트륨 5%와 황산마그네슘 5%가 함께 존재하는 경우에는 황산마그네슘 5%와 비교하여 볼 때, 초기 재령 120일까지는 황산마그네슘 5%보다 염화나트륨 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 함께 존재할 경우에서 더 큰 길이변화를 보여주고 있으나 장기재령으로 갈수록 길이변화가 작아지는 것을 보여주고 있다. 이는 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 함께 존재할 경우 침지일수가 길어질수록 연화작용이 더 많이 발생하여 길이변화에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한, 염화나트륨 5%의 경우에는 침지 일수가 증가하여도 길이변화가 크지 않은 것을 볼 수 있다.

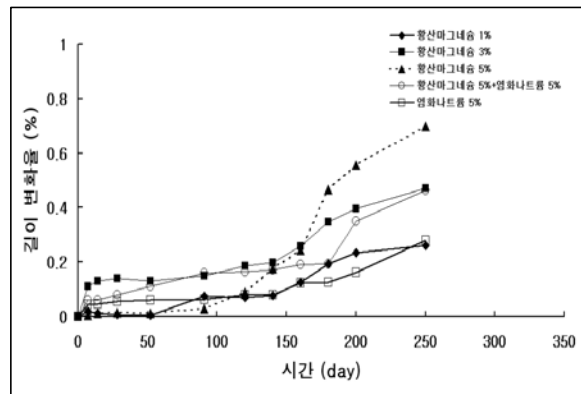


그림 5. 길이변화

3.3 표면박리 현상 결과

본 실험에서는 외관 조사용 큐빅 모르타르를 황산마그네슘 1%, 3%, 5%, 염화나트륨 5% 용액 그리고 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 같이 존재하는 용액에 150, 323일간 침지한 후, 외관 상태를 조사한 결과를 그림 6 및 7과 같이 나타내었다.

또한 Al-Amoudi 등(1995)의 연구에서 제시한 총 6등급으로 분류된 화학적 침식에 의한 손상상태 외관등급기준에 따라 본 연구의 공시체를 판단한 외관등급 값을 표 2에 나타내었다. 그림 7 (a)~(c)에서 볼 수 있듯이 황산마그네슘 1, 3, 5% 용액에 침지한 모르타르는 농도가 증가할수록 모서리 부분의 연화 정도가 크게 나타났다.

그리고 그림 6과 7 (e)과 같이 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 함께 존재하는 경우 모서리의 연화가 가장 많이 발생하였고 그림 7 (e)에서는 부피가 축소하였다. 그러나 그림 6과 7 (d)에서 볼 수 있듯이 염화나트륨 5%의 용액에서는 연화가 거의 발생하지 않았다.

따라서 황산염 용액의 농도가 시멘트 모르타르계 충전재의 표면박리 현상에 영향을 미치는 주요 요인으로 판단된다. 또한, 황산마그네슘 용액과 염화나트륨 용액이 함께 존재할 경우에 시멘트 모르타르 표면의 열화를 더욱 가속화 시켜 단일화합물에 의한 표면연화보다 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 표면박리 현상은 공시체 표면만을 육안으로 관찰한 결과로 실제 공시체 내부의 열화정도와는 매우 다를 수 있다. 따라서 전체적인 내구성능 판단으로는 주요한 지표가 될 수 없다고 판단된다.

표 2. 외관 등급

구분	등급	
	150일	323일
황산마그네슘 (1%)	II	II
황산마그네슘 (3%)	III	III
황산마그네슘 (5%)	III	IV
염화나트륨 (5%)	I	I
황산마그네슘(5%) +염화나트륨(5%)	IV	VI

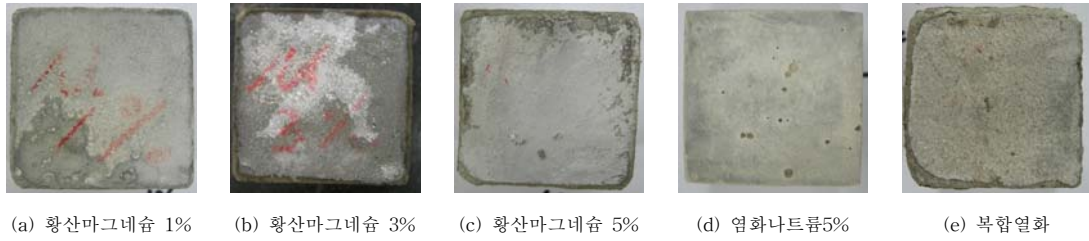


그림 6. 화학적 침식에 의한 모르타르의 외관(침지 일수 150일)

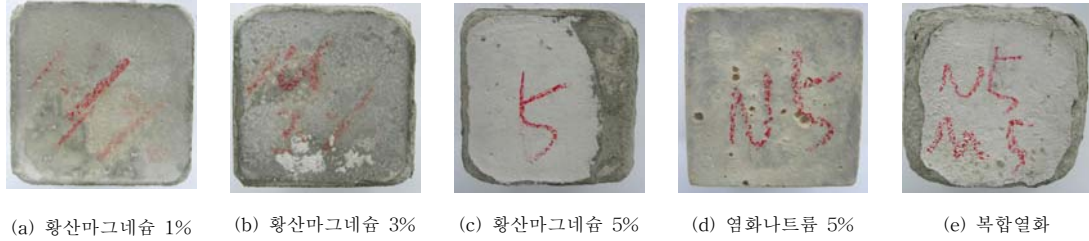


그림 7. 화학적 침식에 의한 모르타르의 외관(침지 일수 323일)

3.4 염화물 이온 확산계수 산정 실험 결과

시멘트 모르타르계 충전재의 황산염 및 염화물 침식에 대한 염화물 이온의 확산특성을 평가하기 위하여 수중양생 0일 실시한 후 0, 7, 28, 52, 91, 120, 140일 동안 침적하였고, 수중양생 28일 실시한 후 각각의 용액에 0, 7, 28, 52, 91, 120, 140, 180, 250일 동안 침적한 후 급속 전기이동에 의한 확산 실험을 그림 8과 같이 측정하여 결과를 그림 9와 10에 나타내었다.

그림 9를 살펴보면, 전체적으로 침지 재령 91일까지 용액의 농도와 종류에 의한 염화물 확산계수는 비슷한 수준을 보이고 있다. 반면에 재령 120일 이후부터 확산계수가 다소 증가하고 있으나 용액의 농도 변화에 의한 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 그리고 침지 일수 365일, 400일의 경우 연화가 많이 발생하여 시편절단과정에서 모서리 부분에 파괴가 많이 발생하여 측정이 불가능하였다.

그림 9와 10을 비교해 보면, 전체적으로 수중양생 28일을 실시한 경우보다 수중양생을 0일 실시한 경우에 염화물 확산계수가 높게 나타나고 있다. 이는, 수중양생 0일의 경우 시편의 조직구조가 밀실하지 않아 초기재령에서는 염화물 확산계수가 높게 나타나지만 시간이 경과하면서 수화열이 감소하고 조직이 밀실해지면서 공극이 작아져 염화물 확산계수가 낮아지는 것으로 보이고, 이때 용액의 농도와 종류에 의한 영향은 크게 미치지 않는 것으로 판단된다.

기존 연구결과에서 밝힌바와 같이 시멘트모르타르 충전재의 염화물 확산계수가 일반 콘크리트와 비교하여 약 6~7배 큰 것으로 나타났으며(양은익 2004), 천공경과 록볼트 지름이 38mm와 25mm일 경우 록볼트 내부의 염화물 농도는 단지 1년 경과 후에 지하수에 포함된 염화물 농도의 83.48%까지 도달한다(배규진 등, 2006). 기존 연구 결과처럼 염화물에 의한 록볼트의 부식이 내구성 측면에서 성능저하를 유발할 수 있다. 하지만, 염화물에 의한 록볼트의 부식은 황산염 등에 의한 충전재(그라우트)에 열화보다 장시간이 소요될 수 있다. 즉, 록볼트(철근)와 충전재(그라우트) 사이의 부착력의 성능저하보다 그라우트와 암반사이에서의 부착력의 성능저하가 먼저 발생할 가능성이 크다고 볼 수 있다.



그림 8. 실험 완료된 시편의 단면

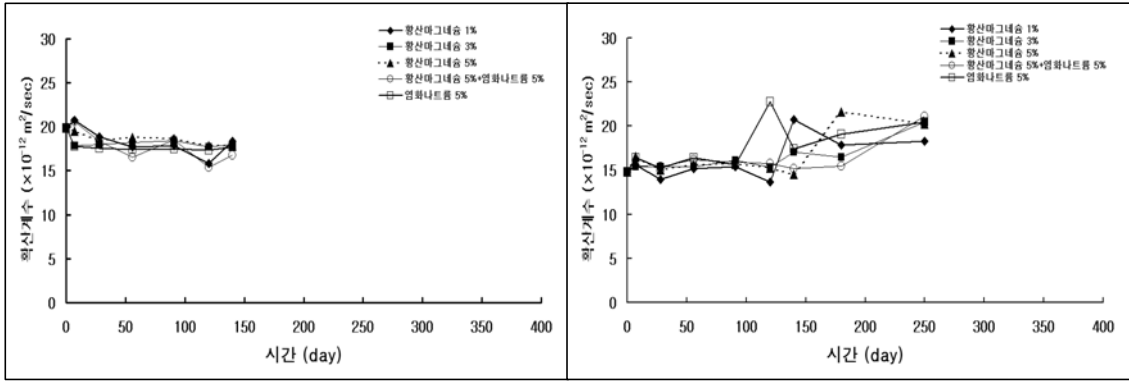


그림 9. 염화물 확산계수 (수중양생 0일) 그림 10. 염화물 확산계수 (수중양생 28일)

4. 결론

본 연구에서는 시멘트 모르타르계 충전재의 초기재령 및 염화물 및 황산염에 의한 내구성 저하를 실험적으로 연구하고, 시멘트 모르타르계 충전재의 복합 열화 현상을 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 시멘트 모르타르계 충전재를 수중양생 0일, 28일 실시한 후 황산마그네슘 1%, 3%, 5%, 염화나트륨 5% 그리고 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 같이 존재하는 용액에 침지한 후 압축강도를 측정 한 결과, 120일 이후부터 400일까지 압축강도가 감소하는 경향을 보이며, 180일부터는 농도가 높을 수록 낮은 압축강도를 보였다. 특히 복합열화가 발생한 경우 화합물간의 상호작용을 통해 압축강도의 성능저하가 크게 발생하였다.
- (2) 초기재령에 따른 압축강도의 영향을 알아본 결과, 수중양생 0일 실시한 후 용액에 침지한 압축강도가 수중양생 28일 실시한 압축강도 보다 작게 나타났으며 결국 황산염 용액이 존재하는 지하공간에 케이블볼트를 설치 할 때 충전재에 바로 노출될 경우 기존의 압축강도를 발휘하지 못하여 안정성에 문제가 발생 할 수 있다고 판단된다.
- (3) 길이 변화실험 결과, 침지일수 120일 이후부터 황산마그네슘 용액에 침적한 공시체의 길이변화율이 증가하는 경향을 보이며 농도가 높을수록 길이변화율이 크게 나타났다. 결국 용액의 농도에 따라 조 직구조의 연화작용 및 팽창이 발생하여 길이변화에 영향을 미친 것으로 판단된다.
- (4) 시멘트 모르타르 공시체를 황산마그네슘 1%, 3%, 5%, 염화나트륨 5% 그리고 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 같이 존재하는 용액에 침지한 후 외관 상태를 관찰한 결과, 황산마그네슘 용액의 농도가 증가할수록 연화 정도가 크게 나타났으며 황산마그네슘 5%와 염화나트륨 5%가 함께 존재하는 경우 연화정도가 가장 크게 나타났으며 부피 축소가 발생하였다. 따라서 암반과 충전재(그라우트) 사이에서의 록볼트 파괴관점에서 충전재 표면의 열화로 인해 암반과 충전재(그라우트) 사이에서의 파괴를 먼저 유발할 수 있다고 판단된다.
- (5) 염화물 이온 확산계수 산정 실험에서는 120일 이후부터 확산계수가 다소 증가하고 있으나 용액의 농도 변화에 의한 경향을 알 수 없었다. 그러나 기존연구결과와 마찬가지로 일반 콘크리트와 비교하여 6~7배 큰 것으로 나타났으며, 따라서 일반 콘크리트 재료에서보다 록볼트에서 염화물에 의한 철근 부식의 영향이 더 크게 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 문한영, 이승태, 정호섭, 김홍삼 (2001), “시멘트 모르타르의 황산염용액에 대한 침식평가”, 대한토목학회 논문집, 제21권, 제6호, pp. 977-986.
2. 배규진, 장수호, 김동규, 박해균 (2006), “시멘트 모르타르계 록볼트 충전재의 염화물 확산계수 측정을 통한 록볼트 부식예측”, 터널기술, 제8권, 제3호, pp. 259-270.
3. 양은익, 김명유, 민석홍 (2004), “콘크리트 물성 및 시험법에 따른 콘크리트 염화물 확산”, 한국콘크리트학회 논문집, 제16권, 제2호, pp. 261-268
4. 한국건설기술연구원 (2005), “노후터널 안전관리 및 재해예방 기술개발(II)”, 연구보고서.
5. 형원길, 소승영, 소양섭 (2000), “고로 슬래그 미분말을 혼입한 시멘트 모르타르의 황산염 침식에 미치는 초기양생재령의 영향”, 대한건축학회 학술발표논문집, 20권, 제1호, pp. 299-302.
6. Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin M., and Mahmoud M. Saadi (1995), “Effect of magnesium and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cement”, ACI Materials Journal, Jan.-Feb., pp. 15-24.
7. ASTM C 1012, Length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution.
8. NT Build 492, Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials : Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, Approved 1999-11. Nordtest.