

염해 환경하에서 지속하중을 받는 철근콘크리트 부재의 내구성 평가

An Evaluation of Reinforced Concrete Durability in Chloride Attack Environment under Sustained Load

홍준서^{***} 임창훈^{**} 윤상천^{**} 지남용^{*}
Hong, Junseo Im, Chang Hun Yoon, Sang Chun Jee, NamYong

ABSTRACT

This study was performed to evaluate reinforced concrete durability in chloride attack environment under sustained load by the corrosion of reinforcing bars and the permeation of chloride ion.

Generally, it is regarded that permeability of chloride ion is determined by the properties of concrete, but the effects of load which make alternation of concrete inner structure such as crack and so on should not neglected. In this study, it is shown that the relation between bending load on RC beam, deflection and crack of specimen, permeation of chloride ion, rating of re-bar corrosion, and the relation between compression load and permeation of chloride ion. Therefore the effects of load on permeation of chloride ion and re-bar corrosion are evaluated.

1. 서론

철근콘크리트는 탄성재료인 철근과 소성재료인 콘크리트가 일체가 되어 외력에 저항하는 구조재료로 콘크리트가 철근의 부식을 보호하는 내구성이 우수한 복합재료이나, 염해 환경하에 노출되면 철근 주위의 염화물 농도 증가로 인해 철근의 부동태피막이 파괴되고 산소와 수분의 공급에 의해 철근부식이 진전되어 피복 콘크리트의 균열, 박리와 탈락 및 철근의 단면 감소로 부재내력이 저하되게 된다.

일반적으로 콘크리트의 철근 방식 역할은 높은 pH에 의한 부동태 피막의 생성과 염분, 산소, 이산화탄소 등 부식영향인자의 여러 물질의 침입을 억제하는 것으로서 콘크리트가 높은 수밀성을 유지할 수록 높은 내구성을 갖게 되지만, 콘크리트가 하중을 받게 되면 변형 또는 균열 등 조직 내부의 변화가 발생된다.

한편, 염화물이 콘크리트 내부로 침투하는데 있어 하중의 유형 및 크기에 따라 염화물의 침투 및 철근부식의 양상이 달라지는 것으로 보고되고 있어^{1),2)} 철근콘크리트 부재의 내구성을 평가하는 데 있어 하중의 영향을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 하중의 유형 및 크기에 따른 철근콘크리트 부재의 염화물 침투 및 철근 부식 실험을 통하여 염해 환경하에서 지속하중을 받는 철근콘크리트 부재의 내구성을 평가해 보고자 한다.

* 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사
** 정회원, 경주대학교 건축공학과 교수, 공학박사
*** 정회원, 한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정

2. 실험개요

2.1 실험인자 및 수준

본 실험에서 하중의 유형은 휨하중과 압축하중으로 구분하였으며 실험수준은 표 1과 같다.

표 1 실험인자 및 수준

인 자	수 준(%)	수 준 수
휨 하 중	M_{cr} 의 0, 80, 100, 120, 140, 160, 180	7
압 축 하 중	최대하중의 0 25, 50	3

* 최대하중: $f_{ck} \cdot A_g$ (A_g : 시험체의 단면적)

2.2 시험체

시험체는 물시멘트비 0.55, 잔골재율 0.458로 실험에 사용한 콘크리트의 배합표는 표 2와 같다. 실온에서 48시간 경과 후 탈형하여 26일동안 수중양생하였다. 콘크리트의 슬럼프 및 공기량은 각각 16cm 및 3.5%이며, 재령 28일 압축강도는 25kgf/cm^2 이다.

표 2 콘크리트 배합

굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	잔골재율 (%)	단 위 량 (kg/m^3)				AE감수제 (g/m^3)
					물	시멘트	잔골재	굵은골재	
19	16	3.5	55	54.8	181.8	330.6	817.6	937.6	396.7

휨시험체와 압축시험체의 형상은 각각 그림 1, 2와 같다.

휨시험체는 $100\text{mm} \times 120\text{mm} \times 1,000\text{mm}$ 의 단근보로 항복강도 $4,000\text{kgf/cm}^2$ 인 D10 양 단부를 각각 100mm 씩 에폭시 코팅한 철근을 인장측에 배근하였고, 철근피복두께는 30mm 로 하였다. 압축시험체는 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 크기의 무근 콘크리트로 제작하였다.

또한, 휨·압축시험체 모두 염화물 침투량 측정시 측면으로의 수분증발을 막기 위해 측면을 에폭시 코팅 처리하였다.

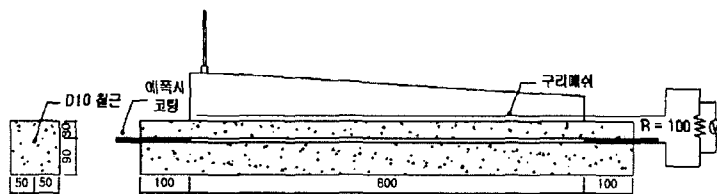


그림 1 휨 시험체의 형상

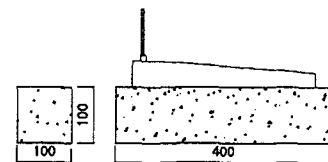


그림 2 압축 시험체의 형상

2.3 실험장치

휨 가력장치와 압축 가력장치를 각각 그림 3, 4와 같이 제작, 사용하였으며 염수 침투량을 측정하기 위해 그림 1, 2와 같이 시험체 상부에 20ml 메스피펫을 부착한 아크릴 폰딩장치(폰딩면적: $80\text{mm} \times 600\text{mm}$ -휨, $80\text{mm} \times 250\text{mm}$ -압축)를 사용하여 3% 염화나트륨용액이 침투되도록 하였고, 휨 시험체의 부식전류를 측정하기 위해 폰딩장치 내부에 구리메쉬를 사용하여 부식셀을 구성하였다.

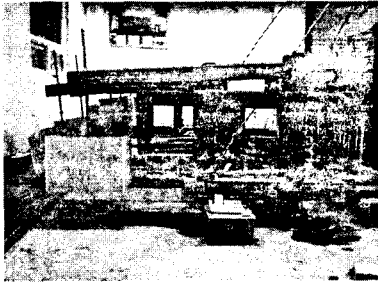


그림 3 휨 가력장치

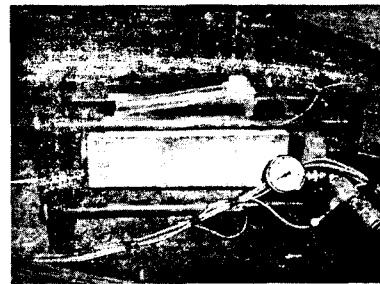


그림 4 압축 가력장치

2.4 실험내용 및 방법

휨 시험체의 재하는 지렛대의 원리를 이용하여 지속하중을 받도록 하였으며 하중 수준별로 Mcr의 80%~180%에 해당하는 하중을 2점 재하로 가하였으며 또한, 시험체의 중앙부에 다이얼게이지를 부착하여 시험체의 처짐값을 측정하였다.

철근의 부식을 촉진하기 위해 3일 동안의 염수 폰딩 후 4일 동안의 건조를 주기적으로 반복하였다. 3일의 폰딩기간중 염수침투량과, 철근과 구리메쉬로 구성된 갈바닉 셀에 100Ω의 저항을 연결하여 부식전류를 측정하였고, 건조기간 중에는 황산구리 전극으로 구성된 하프셀을 사용한 자연전위와, 40배율의 현미경을 사용하여 균열폭을 측정하였다.

철근의 총 부식감량은 식(1)과 같이 페러데이 법칙에 근거한 부식전류의 누계값에 의해 산출하였다.

$$W_{loss} = \left[C_{j-1} + \frac{(I_j + I_{j-1})}{2} \times (t_j - t_{j-1}) \right] \times \frac{55.8}{2 \times 96500} \quad \text{-- 식(1)}$$

W_{loss} : 총철근부식감량, C_{j-1} : 임의의(j-1)시점까지 부식 전하량,

I_j : 임의의 j시점에서의 부식전류, I_{j-1} : 임의의 (j-1)시점에서의 부식전류, t_j : 전류측정시점

압축 시험체는 4개의 강봉으로 지지된 강판 사이에 20tf 용량의 유압잭을 사용하여 하중을 가하였다. 조직내부 미세균열의 길이, 폭, 수가 진전되기 전 후의 하중인 최대하중^{3),4)}의 25%와 50%를 가한 상태에서 지속적으로 염수를 침투시키며 침투량을 측정하였다. 가력상태를 압력계와 스트레인 게이지를 부착하여 확인하였다.

표 3 시험체별 적용하중 및 실험 내용

시	험	체	적용하중(kgf)	측정항목	실험조건
휨	B-0		0	<ul style="list-style-type: none"> • 처짐 및 균열폭 • 염수침투량 • 부식전류 • 자연전위 	<ul style="list-style-type: none"> • 지속하중 • 3일 염수 폰딩, 4일 건조 주기로 반복
	B-80		405		
	B-100		506		
	B-120		607		
	B-140		708		
	B-160		810		
	B-180		911		
압축	C-0		0	<ul style="list-style-type: none"> • 염수침투량 	<ul style="list-style-type: none"> • 지속하중 • 염수 폰딩 계속
	C-25		6,250		
	C-50		12,500		

3. 결과 및 고찰

3.1 시험체의 변위와 균열폭

휨 시험체에 있어서 B-80 부터 B-180 시험체 처짐량은 25일 경과후 각각 1.11mm, 1.21mm, 1.62mm, 1.67mm, 1.80mm, 2.04mm가 되어 그림 5와 같이 하중의 크기에 따라 처짐값이 크게 나타났고, 그에 따라 각 시험체의 균열폭은 그림 6과 같이 증가되었다. 25일 경과 후 재하초기에는 균열폭이 급속히 증가되었지만 시간이 경과함에 따라 균열폭은 완만히 증가되었다. 하중의 크기가 적은 B-80과 B-100 시험체는 균열폭 크기의 증가가 거의 일정하게 증가되는데, 이는 처짐값이 크게 증가하지 않기 때문으로 판단된다.

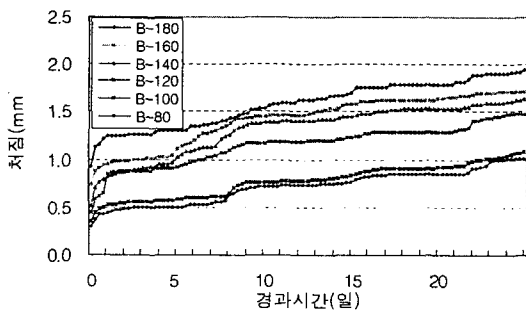


그림 5 휨 시험체의 처짐량

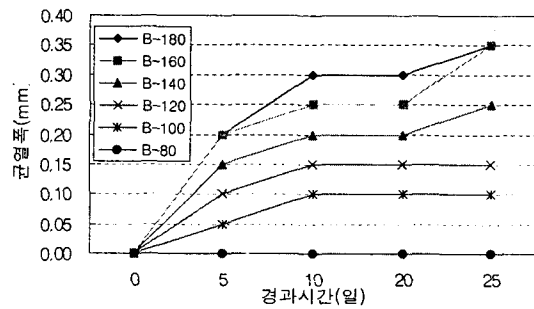


그림 6 최대 균열폭의 경시변화

3.2 하중과 염수 침투속도와의 관계

휨 시험체의 경우 그림 7과 같이 하중이 클수록 침투량이 많은 것으로 나타나 하중에 따른 균열에 의한 영향으로 판단되며, 습윤-건조의 반복으로 시험체 내부가 완전 건조되지 않아 시간 경과에 따라 침투속도가 감소되는 것으로 판단된다.

균열이 일어나지 않거나 균열폭이 작은 B-0에서 B-100까지의 시험체는 다른 시험체에 비해 침투속도가 현저히 낮았으며, 4주 경과 후 B-120에서 B-180 시험체의 침투속도가 초기의 60%~80%정도 감소되어 콘크리트 내부가 습윤 상태에 있다면 침투속도는 균열 폭 뿐만 아니라 콘크리트의 함수상태에 영향을 받는 것으로 나타났다.

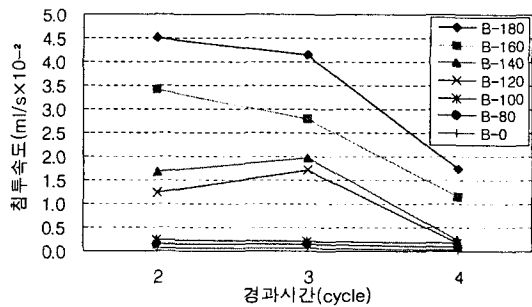


그림 7 휨 시험체의 염수침투 속도

압축 시험체 침투속도 역시 그림 8과 같이 실험개시 직후에는 시험체 초기흡수에 의해 침투속도가 크게 나타났으나 시간 경과에 따라 침투속도가 감소하였다. 그림 9는 하중을 가하지 않은 C-0 시험체를 기준으로 하여 C-25와 C-50 시험체의 침투속도를 비교한 것으로 대체적으로 C-50 시험체의 침투속도가 C-25 보다 작아 최대하중의 50% 이내의 범위에서는 조직 내부 미세균열 진전에 의한 효과보다는 시험체의 압밀에 의한 조직 내부 변화에 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

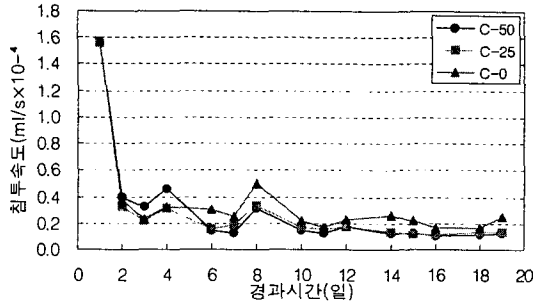


그림 8 압축 시험체의 염수침투 속도

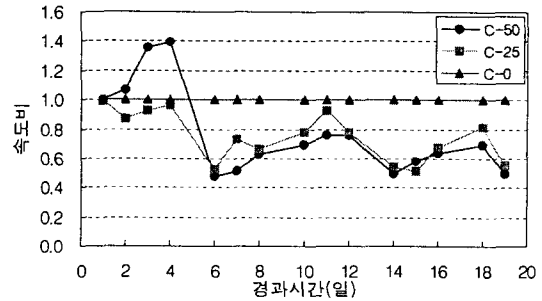


그림 9 압축 시험체의 염수침투 속도비교

3.3 콘크리트 내부의 철근부식

그림 10은 주기별 폰딩 종료 직후 시간경과에 따른 자연전위의 변화를 나타낸 것이며 그림 11은 폰딩 기간 중 부식 전류 평균값의 경시변화를 나타낸 것이다. 하중을 적용하지 않은 B-0 시험체는 자연전위가 -200mV 보다 커서 부식이 되었을 가능성이 거의 없는 것으로 판단되며, Mcr의 100% 수준까지의 B-80과 B-100 시험체는 각각 25일, 11일 이후에 -200mV 를 넘어 부식여부가 불확실한 것으로 나타났으나 B-100 시험체의 경우 그림 11과 같이 부식전류 밀도 $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에 해당하는 부식전류 0.075mA 를 넘어 25일부터 부식이 되고 있음을 알 수 있다. B-120 시험체의 경우 18일 이후에 -350mV 보다 작은 값을 나타내고 있어 이 시점에서 철근부식이 개시된 것으로 판단되며 B-140 시험체는 11일 이후, B-160과 B-180 시험체는 실험 개시후 4일 이내에 부식이 개시된 것으로 나타났다.

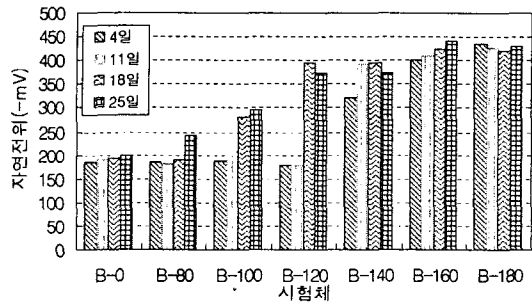


그림 10 자연전위

적용하중이 클수록 부식개시시점이 빨라지는 것은 하중에 따라 발생하는 콘크리트의 균열폭의 차이가 있기 때문으로 판단되며 부식개시시점은 균열폭이 0.15mm 가 되는 시점과 거의 유사한 것으로 나타났다.

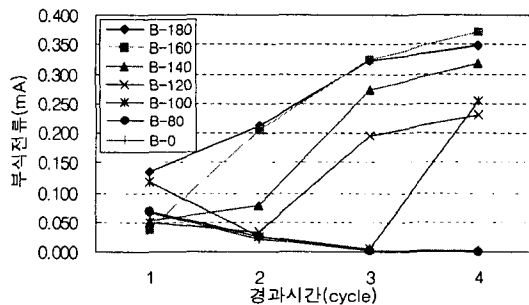


그림 11 부식전류의 경시변화

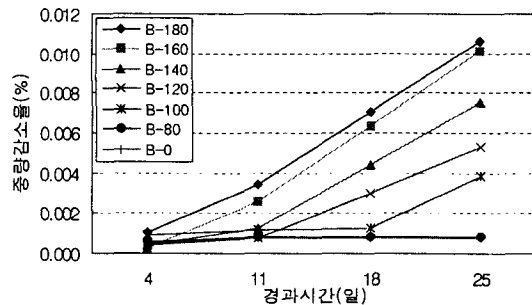


그림 12 철근의 중량감소율

부식전류량은 하중이 클 수록 크게 나타났고 그림 12는 시험체별 부식률을 나타낸 것이다. 식(1)로 계산한 25일 경과후의 부식률은 B-0에서 B-180의 시험체 별로 각각 0.0008%, 0.0009%, 0.0038%, 0.0053%, 0.0075%, 0.0101%, 0.0106%이며, 이 부식률은 주기별 3일간의 폰딩기간 동안 측정된 전류값을 사용하여 계산하였으므로 실제 부식량과는 다소 차이가 있을 수 있으나 하중의 크기가 커짐에 따라 부식률도 증가하는 것을 알 수 있으며, 균열이 없는 B-0와 B-80시험체는 부식의 진행이 거의 없어 균열이 철근부식에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4. 결론

지속하중이 염화물 침투 및 철근부식에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 염수침투 속도는 휨 시험체의 경우 하중이 클수록 침투속도 또한 빠르게 나타났으며 습윤-건조 주기가 반복되어 시험체 내부가 완전건조되지 않아 시간경과에 따른 침투속도는 줄어들었다. 압축시험체는 하중을 가하지 않은 경우보다 최대하중의 25%, 50%를 가한 경우가 염수침투가 늦게 진행되었으며, 25% 하중을 가한 시험체보다 50% 하중을 가한 시험체의 침투가 대체적으로 늦게 진행되어 50%까지는 조직내부 미세균열의 진전에 의한 영향보다는 시험체의 압밀에 의한 조직 내부 변화에 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다.
2. 하중의 값이 클수록 전류값이 크게 나타나 철근부식률도 크게 나타났다. 하중을 가하지 않은 시험체와 Mcr의 80%를 가한 균열이 없는 시험체에서는 부식이 거의 일어나지 않았으며, 균열의 크기가 0.15mm가 되는 시기에 철근부식이 개시되어 균열이 철근부식에 미치는 영향을 알 수 있다.

■ 본 연구는 한양대학교 부설 초대형구조시스템연구센터와 한국건설기술연구원의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 대한주택공사 주택연구소, "환경조건별 공동주택의 수명예측에 관한 연구", 1998.10
- 2) 최일호, "지속 하중하에서 철근콘크리트부재의 염화물 침투특성 및 철근부식에 관한 연구", 한양대 석사학위 논문, 1999.12
- 3) A.M. Neville, "Properties of Concrete(6th Edition)", Longman, 1995, p.298
- 4) 오병환 외, "최신 콘크리트공학", 사단법인 한국콘크리트학회, 1992, p.295, pp.337-340
- 5) ASTM C 876-91, "Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete", ASTM, 1991
- 6) ASTM G 109-92, "Standard test method for determining the effects of chemical admixtures in concrete exposed to chloride environments", ASTM, 1992