염해에 의해 열화된 철근콘크리트부재의 내진성능에 관한 연구

Experimental Study on Seismic Behavior of RC Member Deteriorated by Chloride Corrosion

윤현도* *Hyun-Do Yun*　양일승** *Il-Seung Yang*　이원석*** *Won-Suk Lee*

본 번역기사는 일본콘크리트공학협회(JCI)에서 발간한 「콘크리트 논문집」에 게재된 小林孝一의 논문(2005. 5)을 번역한 것이다.

1. 서 론

철근콘크리트(RC)구조는 적절하게 설계, 시공, 유지관리할 경우는 상당히 내구성이 뛰어난 구조형식이며, 일본 내에서 사회자본정비에서도 중요한 역할을 해왔다. 그러나 최근 조기열화가 문제가 되고 있으며, 신속한 대책이 요구되어지는 것이 현실이다. 이러한 상황에서 일본토목학회 콘크리트표준시방서〔시공편〕[1]는 종래의 사양규정형으로부터 내구성에 대한 성능조사를 행하는 성능규정형으로 개정되었으며, 또한 새롭게 시방서〔유지관리편〕[2]이 제정되는 등의 대응을 세워 병용개시 후에는 유지관리를 포함한 구조물의 일생을 디자인하는 개념이 중요해지리라 사료된다[3]. 그러나, RC구조에 있어서 각종 요인에 의한 열화의 진전에 대해서 각종모델이 제안되어져 있으며 열화가 내화성능에 미치는 영향도 검토되고 있지만[4~7], 정량적으로 분명하게 평가되어졌다고 말하기는 어렵다. 따라서 구조물의 적절한 유지관리 또는 수명평가를 위해서는 아직 미비한 부분이 있다는 것도 사실이다.

본 연구에서는 RC구조의 열화요인 중에 비교적 피해가 큰 염해를 대상으로 그 진전이 RC부재의 내하성능, 특히 대변위가 반복 작용하는 경우의 내진성능에 미치는 영향을 파악하고 열화도와 내진성능과의 관계를 정량적으로 파악하는 것을 목표로 하고 있다. 여기서는 RC부재를 염해로 손상시켜 각종열화지표에 의해 열화도를 파악함과 동시에 부재에 대한 정/부 반복재하시험을 행하였다. 특히, 지진력이 작용한 경우의 종국한계상태에 대해서 검토하였다. 또한 철근부식에 기인하는 피복콘크리트의 균열을 재현한 모델부재를 제작하여 균열이 내진성능에 미치는 영향에 대해서 고찰을 수행하였다.

* 정회원, 충남대학교 건축공학과 부교수
wiseroad@cnu.ac.kr
** 정회원, 충남대학교 건축공학과 연구원
*** 정회원, 충남대학교 건축공학과 석사과정

2. 염해열화시험의 개요

2.1 공시체

본 연구에서는 RC기둥부재의 염해열화를 대상으로 하고 있지만, 공시체 제작 및 실험수행을 용이하게 하기 위해 상부와 하부에 주근을 갖는 스팬 1,400 mm의 보 부재를 대상으로 하였다.〈그림 1〉

콘크리트는 열화를 촉진시키기 위해 물-시멘트비는 0.6으로 하였으며, 주근은 D10, 전단보강근과 횡보강근은 Ψ6을 사용하였다. 사용한 철근의 품질은 〈표 1〉과 같다. 공시체에는 전단파괴가 생기지 않도록 스트럽을 100 mm 간격(전단보강근비 0.47 %)으로 배근하였다. 또한, 부재의 대변위 영역에서 내하성능에 대한 철근부식의 영향을 검토하기 위하여 공시체의 중앙부분에 순휨구간과 공시체의 유효높이에 해당하는 구간에 전단보강근을 간격 60 mm(회구속근비 1.6 %)을 배근하였다. 이 값은 횡구속근비가 1.2 %이면 충분한 휨인성을 확보할 수 있

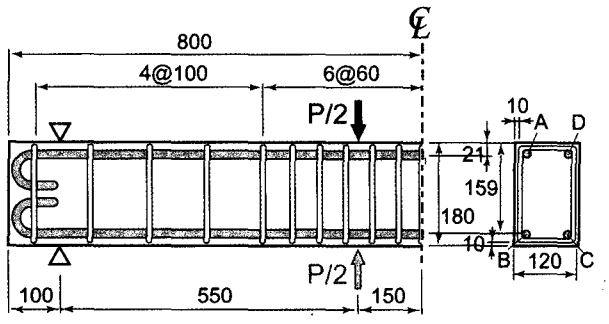

그림 1. RC 공시체(단위 : mm)

표 1. 철근의 품질(염해 열화시험용)

	항복강도(N/mm²)	인장강도(N/mm²)	파단시 연신율(%)
D10	391	545	29.8
∮6	339	490	30.0

표 2. 염해열화 시험공시체

	공시체	비빔	살수
A시리즈	No.1 ~ 4	수돗물	수돗물
	No.5 ~ 16		5 % NaCl 용액
B시리즈	No.17 ~ 20	C = 12 kg/m³	수돗물
	No.21 ~ 32		

다는 문헌을 참고하였다[8]. 또한, 공시체의 전단여유도(전단강도/휨강도)는 재하점에서 4.88, 전단보강근이 변화하는 위치(재하점으로부터 210 mm 위치)에서는 3.40으로 전단파괴에 대한 충분한 안전율을 고려하였다.

공시체는 32개 제작하였지만, 그 중에 No.1 ~ No.16은 A시리즈, 나머지(No.17 ~ 32)는 B시리즈로 하였다. 시험체의 일람은 〈표 2〉에 나타낸 것과 같다.

A시리즈는 일반적인 W/C = 0.6의 콘크리트를 사용하고 있다. 타설 후 1개월간은 수돗물에 의한 살수양생을 행하였다. 그 이후에 No.1 ~ No.4는 계속해서 수돗물로 살수하였고, No.5 ~ No.16 시험체는 5 %의 Nacl수용액(Cl^- 농도는 3 %)을 주 2일, 0.01 m^3 정도 살포하여 해수환경에 있어서 해수의 작용과 염해의 진전을 모색하였다. B시리즈는 A시리즈와 마찬가지로 W/C = 0.6으로 하였지만, 콘크리트 비빔시에 철근의 방청한계인 1.2 kg/m^3의 10배에 상응하는 12 kg/m^3의 Cl^-을 NaCl의 형태로 혼입하여 열화를 촉진시킨다. 단, B시리즈 중에 No.17 ~ 20의 시험체는 A시험체와 마찬가지로 수돗물로 비빈 후에, 제작 시에 Cl^-는 혼입하지 않았다. B시리즈의 공시체는 수돗물의 살포를 탈형 직후부터 계속하였다. 단, 탈형 후 재하시험을 행할 때까지 자연전위 등의 측정이나 균열 관찰의 경우를 제외하고는 실내에서 타설면을 상부로 하여 목재의 간격재 위에 놓았다. 단, A시리즈의 시험체는 자연전위, 분극저항을 측정하기 위해서 주근의 단부 20 mm 정도를 그라인더로 연마하고 피복이 붙어있는 코드를 납땜을 이용하여 붙였으며, 그 위를 자기융착 테이프와 에폭시를 바르고 이 부분에 수분이 철근과 접촉하여 부식되지 않도록 하였다. 마찬가지로 철근의 절단면도 전부 에폭시수지를 바르고 부식이 절단면에서 발생하지 않도록 하였다.

2.2 철근의 전기화학치의 측정

앞에서 언급한 코드를 이용하여 주근의 자연전위, 분극저항을 측정하였다. 자연전위는 〈그림 1〉에서 나타낸 것과 같이 주근 A와 D에 대해서는 공시체 타설면의 주근 직사 위치에서 200 mm 간격으로, 주근 B와 C에 관해서는 공시체 하부면의 주근 직하 위치에 200 mm 간격으로 은/포화염화은전극에 대한 전위를 측정하였다. 또한, 중량이중단형파법(전압 : ± 2 ~ 20 mVp-p`, 주파수 : 0.1 Hz와 800 Hz)에 의한 분극저항을 측정하였다. 단, 분극저항 측정시에는 120 × 1,600 mm의 동판을 습포를 사이에 놓고 공시체의 타설면 혹은 저면을 밀착시켜 대극으로 하고, 조합전극은 공시체 측면의 철근 중앙부에 설치하여 측정하였다.

2.3 재하방법

재하시험은 재령 0.5년에서 4년까지 순차적으로 행하였다. 본 연구에서는 (1) 일방향 단조재하 (2) 일방향재하와 재하의 반복 (3) 정/부 반복재하의 3종류의 재하로 행하였지만, 본 논문에서는 내진성능에 밀접한 관련이 있는 정/부 반복재하의 결과만을 보고한다.

RC부재의 내진성능을 검토하기 위해 행한 정/부 반복시험은 〈그림 2〉에 나타낸 것과 같이 스팬의 중앙의 변위가 항복변위 δ_y에 달한 후는 $2\delta_y$, $-2\delta_y$, $4\delta_y$, $-4\delta_y$ · · · $2n\delta_y$, $-2n\delta_y$로 부재가 종국에 이를 때까지 재하를 반복하였다. 본 연구와 같이 부식에 의한 철근단면이 감소한 경우는 본래는 철근의 항복변위 δ_y는 열화의 진행정도에 따라 부재에 따라 다르다. 그러나 재하시험 전에는 내부의 철근의 부식상황을 정확히 파악하는 것이 곤란하며, 공시체작업 시에 변형도 게이지의 부식에 의해 재하시험시의 철근의 항복을 찾아내는 것이 불가능하다. 따라서 A시리즈의 건전한 공시체의 일방향 휨 재하시험을 재령 약 450일의 시점에서 별도로 행하여 δ_y = 3 mm의 값을 얻은 후에 전체의 공시체에 대해 이 값을 적용하여 재하시험을 행하였다. 또한, 부재의 인성률은 종국변위를 δ_y = 3 mm로 나눠서 구하였다. 그리고 부재의 종국은 하중-변위곡선의 포락선 상에서 하중이 최대하중의 80 %까지 저하한 시점으로 한다. 이것은 항복점이 불명확하기 때문에 종국하중을 항복점하중과 같다

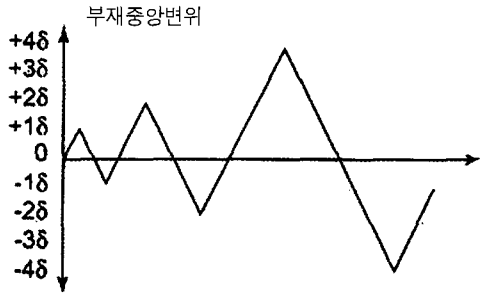

그림 2. 재하내력

는 정의[10]의 적용이 곤란하기 때문이다.

2.4 철근의 부식감량과 부식 후 품질의 측정

재하시험 종료 후, 공시체는 가능한 한 단부에 가깝고, 휨재하 영향이 작은 부분으로부터 길이 약 400 mm의 주근을 잘라내어 60 °C의 10 % 구연산 암모니아 수용액에 24시간 침전시킨 후에 주근의 부식감량을 측정하였다. 그 후에 주근의 중앙부 8D(= 약 76 mm)를 인장구간으로 하는 인장시험을 행하여 주근의 항복강도, 인장강도, 표점간거리에 대한 파단시의 연신율을 측정하였다.

3. 열화공시체에 관한 결과 및 고찰

〈표 3〉에는 콘크리트의 압축강도를 나타내고 있다. B시리즈에 사용된 콘크리트 강도가 재령 28일에 작은 것은 염화물이온의 감수효과와 시공불량을 상정하여 약간 높은 단위수량을 채용하고 있어서 상당히 연비빔(슬럼프 15 cm) 콘크리트가 되어, 대량으로 블리딩이 발생하여 경화체 조직이 밀실하지 않기 때문으로 사료된다. 또한, 다른 공시체를 이용한 콘크리트슬럼프에 대해서는 6 ~ 10 cm 정도였다. 단, 재령이 경과한 후에는 A시리즈와 B시리즈의 콘크리트 강도 차는 작아졌다. 또한

표 3. 콘크리트 강도

	시험재령 (일)	A시리즈 No.1~16	B시리즈 No.17~20	B시리즈 No.21~32
압축 강도(N/mm^2)	28	35.5	25.5	26.4
	450	38.9	-	34.6

〈표 4〉에 A시리즈, B시리즈의 공시체 중에 정/부 반복재하를 행한 것에 대해 각종 시험결과를 나타내었다. 결과의 상세한 내용에 대해서는 지금부터 상세하게 언급하였다.

3.1 열화의 진전

〈그림 3〉에 공시체 No.12의 피복콘크리트에 있어서 부식균열의 진전모양의 예를 나타내고 있다. 피복이 작기 때문에 모든 시험체에서 초기부터 주근의 부식과 함께 축방향의 균열이 발생하였으며, 재령의 경과와 함께 철근의 부식이 진행됨과 동시에 부식균열이 진전되었다. 또한, 열화의 비교적 초기에는 공시체의 타설면보다 바닥면측의 부식균열의 연장이 길고, 폭도 커서 바닥면에서 철근의 부식이 보다 진전되었다고 생각되었으며, 재령의 경과 및 열화의 진행과 함께 타설면과 바닥면의 피복콘크리트의 균열상황은 차이가 거의 없었다. 또한, 주근의 부식에 기인하는 피복콘크리트의 축방향 균열폭 중에 각각 부재

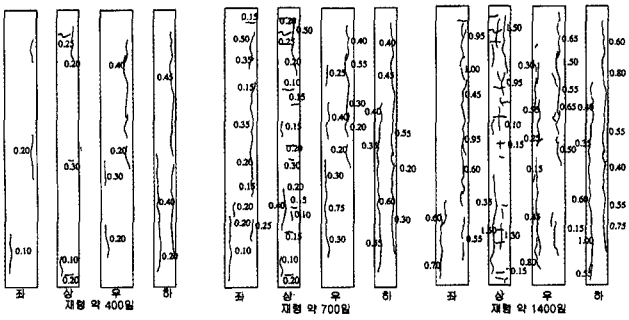

그림 3. 공시체 NO.12의 부식균열의 진전
(그림 중 숫자는 균열 폭 : mm)

표 4. RC 공시체 A시리즈와 B시리즈의 각 시험항목의 결과

	공시체명	재하재령(일)	RC 부재의 재하시험 직정의 양 자연전위 (mV vs Ag/AgCl)	부식속도지표 ($1/\Omega/m^2$)	주철근량 (%)	균열 폭 (mm)	RC 부재의 정·부 반복 재하시험의 결과 최대하중 (kN)	인성률	누적소산 에너지 (kN·m)	파괴형식
A 시리즈	1	455	-99	0.5	0.06	0	42.71	20.25	20.07	
	2	455	-113	0.3	0	0	45.22	20.06	22.71	
	9	450	-423	3.9	1.96	0.50	38.05	14.67	15.27	
	13	449	-397	7.0	1.85	0.25	36.53	19.69	18.18	
	8	756	-433	13.7	1.51	0.90	41.11	13.59	13.94	
	11	755	-429	10.1	1.97	0.75	41.17	17.71	17.42	
	12	1462	-328	7.4	2.54	4.50	32.24	14.27	10.48	
	15	1461	-327	77.1	3.10	1.45	34.12	14.01	12.49	
	16	1461	-316	25.9	3.27	1.50	34.03	13.92	10.33	
B 시리즈	17	138			0	0	44.02	16.98	19.08	
	18	138			0.08	0	42.87	16.06	15.07	
	23	139			1.82	0.45	42.36	14.93	16.11	
	24	443	-		2.00	0.60	43.22	14.81	14.40	
	25	442			1.60	0.40	46.31	14.43	17.31	
	26	1232			2.58	0.80	44.56	14.03	11.15	
	30	1232			3.08	0.95	37.85	14.02	13.34	

중에서 재하직전에 가장 큰 것은 〈표 4〉에 나타내고 있으며 그 값은 0 ~ 1.50 mm 였다.

〈그림 4〉에는 가장 장기의 재령에 있어서 재하시험을 행한 공시체 중의 하나인 No.16의 4개의 주근 중에 공시체 타설면측에 배치된 주근 A와 바닥면에 비치된 주근 B상의 자연전위의 분포상황을 나타내고 있다. 또한, 그림 중에 점선은 문헌[11]에 의한 부식판정기준을 나타내고 있다.

재령 83일 단계에서는 공시체하부면에 위치한 주근 B에서 단부에 자연전류가 동철근의 다른 부위에 비해 낮은 경향이 강한 장소가 있다. 염화물이온이 피복콘크리트를 통해서 철근위치까지 침투하는 과정에 있어서도 피복콘크리트 조직이 완전하게 균일하지 않기 때문에 장소에 따라 약간의 부식환경의 차가 생기기 때문으로 사료된다. 또한, 이 부위의 자연전위는 공시체 타설면의 주근 A와 동일한 재령의 값과 비교해도 낮은 경향이 강하다. 앞에서 언급한바와 같이 비교적 조기의 재령에 있어서는 공시체 타설면측보다 바닥면측이 부식균열이 약간 많은 경향이 있으며, 자연전위가 낮은 것과 경향이 일치하고 있다. 이것은 살포된 염화물이온 수용액이 공시체 상부면보다 하부면에 축적되기 쉽기 때문에 부식이 조기에 진전되는 것으로 생각된다.[12]

공시체 타설면의 주근 A의 자연전위는 재령 1461일에서 공시체단부에는 약간 높고, 중앙부에서 낮은 분포를 보였으며, 재령 754일의 시점보다 높다. 〈그림 3〉에서는 공시체 No.12의 부식균열진전을 나타내고 있지만, 이 단계에서는 부식균열이 다수 발생하였기 때문에 자연전위값이 균열의 영향을 받았을 가능성이 있어서, 균열발생이나 철근과 콘크리트와의 박리에 의해 측정시 적절한 전기회로가 형성되지 않았을 가능성도 있다.

앞에서 언급한 두 가지를 제외하면, 여기에서 측정된 자연전위는 동일재령에 있어서 각 철근 내에 비교적 유사한 값으로 되어 있다. 이것은 철근위치에 염화물이온 농도가 일정한 값 이상이 되면, 부식의 진행은 염화물이온의 농도에 영향을 받지 않으며[13], 또한 전위가 다른 것이 접속하는 경우는 분극이 발생한다. 예를 들면 철근의 미소부위가 서로 다른 자연전위를 가지고 있어도, 외부로부터 측정이 가능한 전위는 분극에 의해 평준화된 자연전위로 생각된다. 〈그림 5〉에서는 자연전위와 부식속도지표의 경시변화의 예를 나타내고 있다. 여기에 나타내지 않은 시험체는 비슷한 결과를 나타냈다. 여기서 부식속도지표는 분극저항의 역수로, 부식속도에 비례한다. 〈그림 4〉로부터 명확하게 된 것처럼, 동일철근 내의 각 부분에서의 자연전위는 거의 동일하기 때문에 여기서는 각 철근 내의 7곳에 있어서 측정된 자연전위의 평균치를 나타냈다. 또한, 재령 800일 정도의 시점에서 부식균열이 현저하게 되어 열화의 진행이 뚜렷해져 비파괴검사인 자연전위, 분극저항의 측정빈도는 그 이

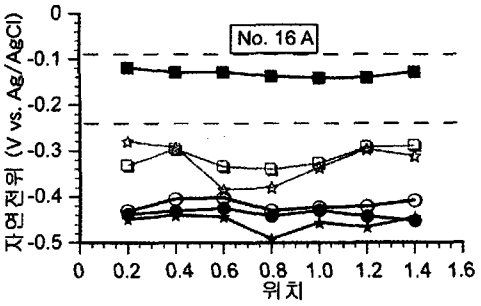

그림 4. 공시체 내의 자연전위의 평균치

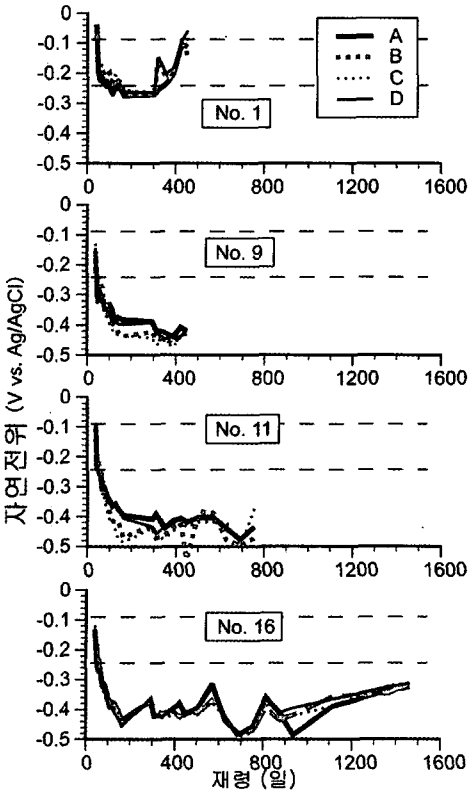

그림 5. 자연전위와 부식속도 지표의 경시변화

전에 비해서 상당히 적어졌다.

염화물이온 작용이 없는 공시체 No.1은 재령 1년 이내의 자연전위의 값은 -240 mV/(대은/포화염화은 전극)보다 낮고, 문헌[11]에 따르면 90 % 이상의 확률로 부식이 발생하는 것으로 되어있지만, 그 이후의 값은 높다. 재령초기에는 시멘트 수화가 진행중에 부동태피막의 형성이 불충분하기 때문에 자연전위가 일시적으로 낮은 값으로 된다. 또한, 자연전위의 높아짐으로써 부식속도지표도 저하한다.

한편, NaCl수용액의 살포를 행한 다른 시험체에 대해서는 재령초기부터 시험기간을 통해 자연전위는 낮은 값을 나타내고, 부식속도도 크기 때문에 모든 재하시험을 행할 때까지 부식반응이 지속되는 것으로 사료된다. 〈표 4〉에서 나타낸 것과

같이 이러한 공시체의 재하직전의 자연전위는 -310 ~ -430 mV, 부식속도지표는 3.9 ~ 77.1(Ωm^2) -1이었다. 또한, 재령 1,000일 정도부터 전위는 약간 높아지고, 부식속도지표는 작아지는 경향이 보였다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 피복콘크리트의 부식균열의 발달과 철근과 콘크리트간의 박리의 영향을 받았을 가능성이 있다.

〈표 4〉에서 나타낸 것과 같이 재하시험 직후의 RC보부재에서 떼어낸 주철근의 부식량은 0 ~ 3.27 %이지만, 〈그림 6〉에서 나타낸 것과 같이 부식량의 증가와 함께 주근의 항복강도, 인장강도 및 파단시 연신율이 저하한다. 모든 철근시편에서 항복참을 가지고 있다. 또한, 염해에 의한 철근의 부식이기 때문에 항복강도와 인장강도는 겉보기강도이다.

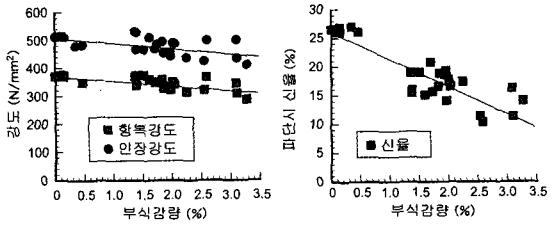

그림 6. 주근의 부식감량과 강도, 연신율과의 관계

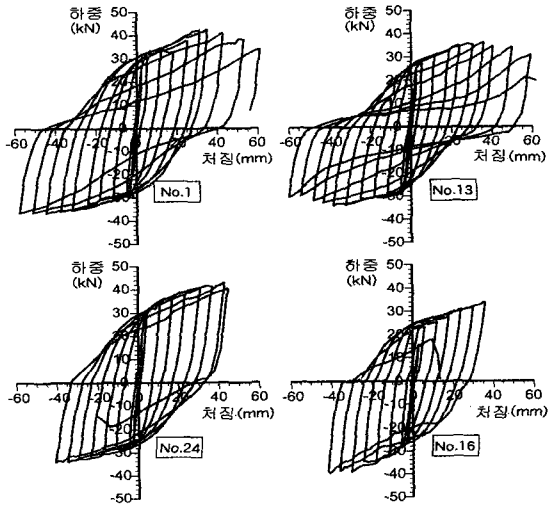

그림 7. 재하이력 곡선 예 (공시체 No.1, 13, 24, 16)

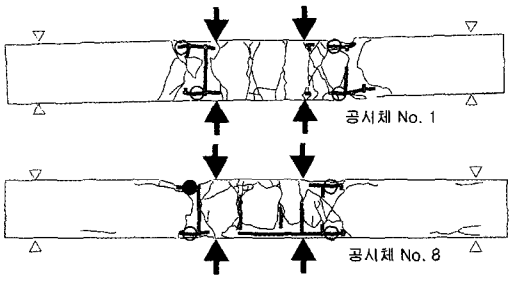

그림 8. 재하 후의 공시체 예
(공시체 No.1, 8, 그림에서 음영은 발락장소,
○은 주근좌굴위치, ○은 주근파단위치)

부식의 진전은 항복강도, 인장강도의 저하보다 연신능력의 저하에 큰 영향을 미치며, 부식이 가장심한 시험체에서는 연신능력이 1/3 정도까지 저하한다. 부식감량이 3 ~ 4 % 정도의 경우는 그 부식 정도가 5단계에서 Ⅳ에 해당하며[15], 이는 기존의 연구성과와 대략적으로 일치한다.

또한, 〈그림 6〉의 결과로부터 주근의 부식감량을 x %로 나타내면 다음과 같은 회귀식을 얻을 수 있다.

$$\text{항복강도 잔존율}(\%) = 100 - 4.84x \quad (1)$$

$$\text{인장강도 잔존율}(\%) = 100 - 4.09x \quad (2)$$

$$\text{연신률 잔존율}(\%) = 100 - 18.1x \quad (3)$$

항복강도, 인장강도에 대해서는 문헌[7,17]에 나타낸 것보다, 부식감량의 증대에 따른 저하가 크다. 염해에 의해 부식한 강재의 경우는 단면적에 불균일하여 최소단면적이 역학적 성질을 지배하는 것으로 판단되지만 부식이 진행됨에 따라 동일강재내의 단면적 평균치에 대한 편차가 적어지는 것으로 판단된다. 본 연구에서 검토한 부식감량의 범위는 3.5 % 이하로 상기의 참고문헌에 비하여 상대적으로 작기 때문에 부식영향이 예민하게 나타낸 것으로 판단된다.

3.2 재하시험의 결과

정부반복재하시험의 결과에 대해서는 A시리즈와 B시리즈의 결과사이에 커다란 편차가 없어서 결과를 구분하지 않고 나타내었다. 본 연구의 범위 내에서는 전단보강근은 재하시험시에 파단되지 않았으며, 육안에 의해 부식량이 주근에 비해 적은 것으로 판단되었다. 지금까지의 염화물이온량이 8 kg/m^3 이상의 범위 이내에서는 그 이상의 염화물이온이 증가하여도 강재의 부식속도는 증가하지 않는다는 보고가 있으며[13], 본 연구의 공시체에서도 같은 결과를 얻었다. 이와 같은 경우는 강재의 부식속도는 카조드반응에 소비되는 산소의 공급량에 의존하기 때문에 여기서는 피복이 작은 스트럽이 카조드, 주근이 아노드로 되어, 주근에 있어서 부식에 많이 진행한 것으로 생각된다. 또한, 스트럽은 치수가 작기 때문에 재하시험 후에 인장시험을 행할 수 없었지만, 앞에서 언급한 것과 같이 전단여유도가 상당히 크기 때문에 스트럽의 부식이 RC부재의 내하성상에 미치는 영향은 작은 것으로 판단된다.

〈그림 7〉은 재하이력곡선을 나타내고 있다. 처음에 종국시의 인성률은 20 정도이지만, 이 값은 열화의 진전과 함께 서서히 감소되어, 주근의 부식감량률이 3.3 %, 피복콘크리트의 축방향 균열폭이 1.5 mm 정도 된 단계에서는 14 정도까지 저하되었다. 따라서 부재종국에서의 누적소산에너지도 저하되었다〈표 4〉. 또

한 파괴형식은 〈표 4〉에 나타내고 있으며, NaCl수용액을 살포하지 않은 건전공시체나 열화초기의 공시체에서는 모든 공시체가 휨전단 파괴형식으로 파괴된 반면, 열화가 진행됨에 따라서 주근파단으로 종국에 이르는 시험체가 많아졌다.

〈그림 8〉은 재하시험 후 공시체의 예로써 No.1과 No.8에 있어서 균열의 진전과 박리상황을 보여주고 있다. 모든 공시체는 재하에 의해 휨전단구간의 재하점에 인접한 위치에서 피복콘크리트의 박리, 압괴, 주근의 좌굴이 발생하였다. 또한, 주근이 파괴된 경우에도 파단위치는 휨전단에 의해 콘크리트가 크게 박락된 부분으로 주근의 좌굴이 발생한 후에 파단되었다. 또한, 공시체 No.8의 예에서 나타낸 것과 같이, 철근의 부식이 진행하면서 재하를 한 시험체에서는 휨구간에 있어서 공시체의 상부, 하부의 피복콘크리트의 박락이 심하였다.

〈그림 9〉는 RC부재의 내하력, 종국시의 인성률, 누적소산에너지와 재하시험 후 떼어낸 주근의 부식감량, 인장강도, 파단시 연신율과의 관계를 나타내고 있다. 또한, 본래는 부재중의 파괴가 생긴 부분에 존재하는 철근의 품질을 논할 필요가 있지만, 이런 부분의 철근은 재하이력의 영향을 받고 있다. 따라서 〈그림 4〉에 나타낸 결과로부터 부재내의 부식속도의 불균일은 현저하지 않다고 생각되어, 가능한한 스팬단부에 가까운 부분으로부터 떼어낸 철근의 품질과 비교를 하였다.

주근의 부식에 진행되고, 부식감량이 증가함에 따라 RC부재의 각종내하성능은 저하하는 경향이 있다. 특히, 영향이 큰 것은 종국까지의 누적소산에너지이며 가장 열화가 심한 것은 당초의 1/2 정도까지 저하하였다. 따라서 부재의 내하력의 저하가 그다지 현저하지 않을 정도의 열화상태에서도 지진력 등의 대변위반복재하의 영향을 받는 경우는 내진성능의 저하는 클 것으로 생각된다.

주근의 인장강도에 주목하면, RC부재의 내하력은 주근의 인장강도에 의존하지만, 부재의 인성률, 누적소산에너지와의 상관관계는 그다지 명확하지 않다. 또한 주근의 연신율 저하와 함께 RC부재의 누적소산에너지는 저하하지만, 부재의 연성률과의 상관관계는 작다. 부재 중 약 2/3가 철근의 파단 없이 종국에 이르렀고, 앞에서 언급한 것과 같이 주근의 파단은 지점밖의 휨전단영역에서 발생하고 있어서, 순인장에 좌굴이나 전단현상이 작용하여 파단하였기 때문에 직접인장시험에 의한 주근의 연신능력과 부재의 인성과의 상관관계가 작은 결과가 되었다.

또한, 〈그림 10〉에서 재하직전의 시점에서 피복콘크리트에 생긴 축방향부식의 균열 중 최대폭과 RC부재의 각종재하성능과의 관계를 나타내고 있다. 여기서는 부재 중 발생부위 등은 고려하지 않고, 부재 중 최대균열폭을 이용하였다.

균열폭 증대와 함께 부재의 내하력 혹은 누적소산에너지는 저하한다. 특히, 피복콘크리트의 균열폭이 적은 단계에서는 누적소산에너지의 저하는 크다. 이것은 균열이 발생한 단계, 즉 열화가 진전기에서 가속기로 이행하는 단계에서는 이미 철근의 부식이 어느 정도까지 진행되고 있기 때문으로 사료되어 이 단계에서는 내하력의 저하가 현저하지 않음에도 불구하고 누적소산에너지가 저하한다. 〈그림 11〉은 〈그림 7〉에서 나타낸 공시체의 소산에너지의 누적과정을 나타내었다. 균열폭이 0.35 mm의 공시체 No.13에서는 재하변위가 $12\delta_y$ 이후에 균열폭이 0 mm인 No.1 공시체와의 누적소산에너지의 차가 점점 커지고 있다. 〈그림 7〉에서 공시체 No.1과 No.13의 재하이력곡선을 비교하면 No.13은 각 사이클의 대변위에서 부재강성이 작다. 이것은 부식균열의 존재가 휨구간 또는 휨전단구간의 재하점에 인접한 부분에서 재하에 따른 피복콘크리트의 균열, 박락을 유발하여(〈그림 8〉 참조), 대변위에서 부재강성이 저하한 것으로 판단된다. 따라서 염해열화부재의 내진성능을 고려할 때는 철근의 부식뿐만 아니라 그에 동반되는 피복콘크리트에 있어서 균열의 발생이나 철근과 콘크리트와의 박리도 고려할 필요가 있다. 더욱이 열화가 진행한 공시체 No.24와 No.16의 경우는 파괴가 발생시 변위는 작지만, 그 변위에 이르기까지의 소산에너지 누적과정은 열화가 없는 공시체나 열화가 경미한 공시체와 차이가 거의 없다. 예를 들면 공시체 No.1에 있어서 순휨구간에서 피복콘크리트의 박리가 현저하게 나타난 것은 10

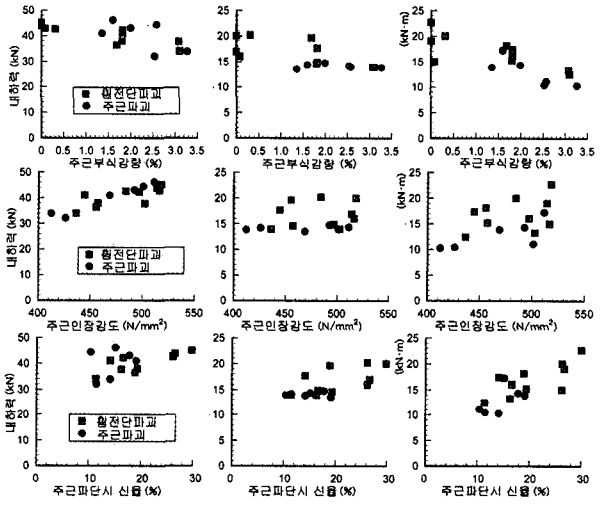

그림 9. 철근부식의 진행과 공시체의 내하 · 내진성능 저하와의 관계

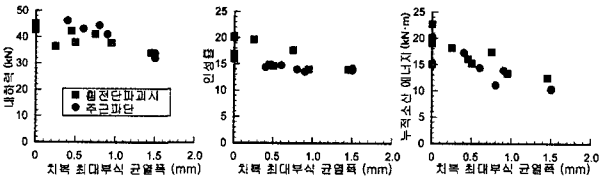

그림 10. 피복의 균열폭 확대와 공시체의 내하 · 내진성능 저하와의 관계

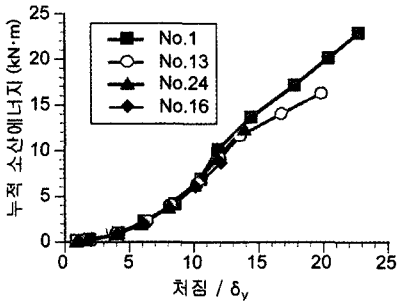

그림 11. 소산에너지의 누적과정
(염해열화 시험)

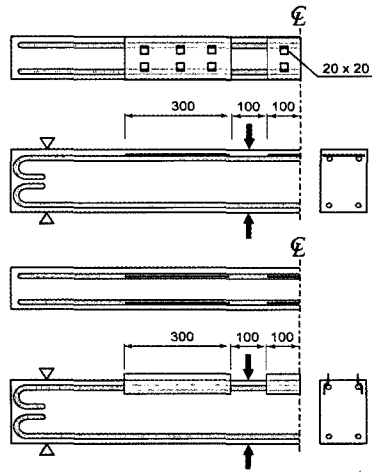

그림 12. 균열모델 시험공시체
(상 : 수평균열, 하 : 연직균열, 단위 : mm)

표 5. 균열 모델시험 공시체 일람

	공시체	균열
C시리즈	X1, X2	-
	Y1, Y2	수평
	Z1, Z2	수직

표 6. 철근의 품질

	항복강도 (N/mm^2)	인장강도 (N/mm^2)	파단시 연신율 (%)
D10	371	496	27.8
ϕ6	421	526	25.5

표 7. 콘크리트 강도(재령 28일)

	C시리즈
압축강도(N/mm^2)	38.9

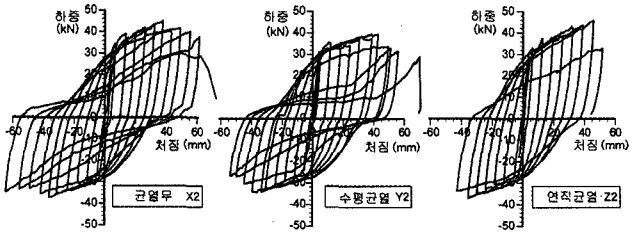

그림 13. 재하이력곡선의 예(공시체 X2, Y2, Z2)

δ_y 이후이다. 따라서 〈그림 11〉에 공시체 No.1과 No.13의 비교에서 알 수 있는 것처럼 소산에너지에 부식균열이 현저한 영향을 미치는 것은 그 이후의 대변위이며, 열화가 심한 공시체는 인성률이 적고, 휨강성의 저하가 두드러지기 전에 파괴가 발생한 것을 알 수 가 있다(〈그림 7〉 참조). 단, 대변위가 작용하기 전에 종국에 이른 공시체에서도 균열폭의 확대와 종국까지의 누적소산에너지의 저하사이에는 상관관계가 보였다(〈그림 10〉 참조). 이것은 순휨구간에 있어서 부식균열의 발생과 철근과 피복콘크리트 간의 박리가 내진성능의 저하에 미치는 영향은 크지 않지만, 휨전단구간에 있어서 부식의 진전과 균열폭의 확대는 내진성능에 큰 영향을 미치기 때문에 결과적으로 균열폭이 내진성능의 지표가 되는 것으로 사료된다.

4. 공시체의 실험

4.1 공시체

앞에서 언급한바와 같이 철근의 성능저하 뿐만 아니라 철근부식에 따른 피복콘크리트의 균열발생도 내하력의 저하에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 그래서 인공균열을 갖는 모델 RC부재(C시리즈)를 제작하여, 앞에서와 같이 재하실험을 행하여, 피복콘크리트의 부식균열과 철근과 콘크리트 사이의 부착력저하가 RC부재의 내하성능, 내진성능에 미치는 영향을 검토하였다. 공시체의 재료와 수치 등은 전과 동일하지만 〈그림 12〉에 나타낸 것과 같이 두께 0.1 mm 정도의 폴리필름에 인공적으로 수평균열 혹은 수직균열을 공시체 상부에 도입하였다. 수평균열을 도입하기 위해 필름에는 피복콘크리트가 재하 이전에 완전히 박리되고, 타설시 필름하부에 기포가 체류하는 것을 막기 위하여 20 × 20 mm의 구멍을 설치하였다. 또한, 수평균열, 수직균열의 공시체에 재하시험 중에 공시체 재하점의 붕괴를 막기 위하여 재하점 주변에는 필름을 매립하지 않았다. C시리즈의 공시체의 일람은 〈표 5〉에 나타내었다. 균열이 없는 시험체, 수평균열을 갖는 시험체, 수직균열을 갖는 시험체에 대해 각각 2개씩 제작하였다. 또한, 시험체에 사용된 철근의 품질은 〈표 6〉에 나타내었다

4.2 재하방법

재령 약 28일에 2.3에서 나타낸 방법으로 재하시험을 행하였다. 부재의 항복변위에 대해서도 일률적으로 $\delta_y = 3$ mm을 적용하여, 인성률을 구할 때도 이 값을 사용하였다.

5. 공시체에 대한 결과 및 고찰

C시리즈의 공시체를 이용한 콘크리트의 재령28에서의 압축강도는 〈표 7〉에 나타내었다. A시리즈에 이용한 것과 거의 동일한 값이었고, 슬럼프는 5 ~ 8 cm 정도였다. 〈그림 13〉의 예로써 공시체 X2, Y2 및 Z2의 재하이력곡선을 나타내고 있다.

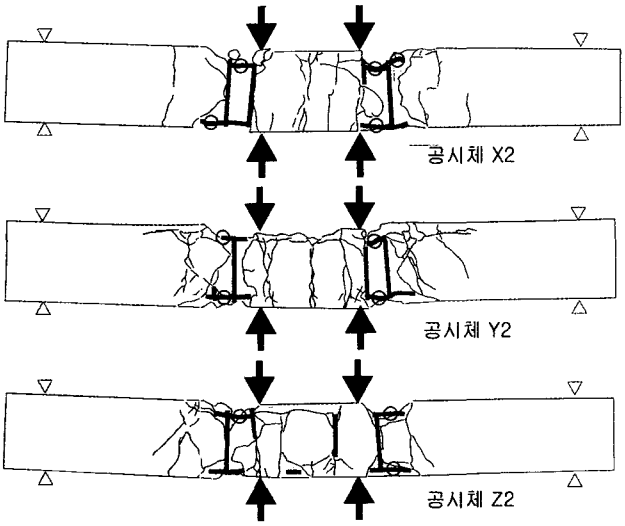

그림 14. 재하후의 공시체 예
(공시체 X2, Y2, Z2, 그림중 음영은 박락장소, ○은 주근좌굴 위치)

또한 재하시험 후의 균열 및 박리상황을 〈그림 14〉에 나타내었다. 또한, 부재의 파괴형식은 공시체 Y1이 철근파단, 나머지 5개의 공시체는 휨전단파괴였다.

〈그림 14〉에서 볼 수 있는 것과 같이 A시리즈와 B시리즈의 공시체 중 염해로 열화된 것과 같이 인공균열을 갖는 공시체는 휨전단 구간뿐만 아니라 순휨구간에 있어서도 피복콘크리트의 재하 중 박락이 심하였다. 수평균열공시체에서는 재하변위가 아주 작은 단계(δ_y = 12 mm 정도)부터 공시체의 표면에서도 수평균열이 관찰되었으며, 이 시점에서 순휨구간의 피복콘크리트는 RC부재에 대해 역학적인 기여가 적을 것으로 사료된다. 수직균열공시체에서는 순휨구간이나 휨전단구간의 피복콘크리트의 박락은 재하변위가 10 δ_y (≒ 30 mm) 정도에서 시작되었다.

〈그림 15〉에는 C시리즈 공시체의 내하력, 인성률, 종국시의 누적소산에너지를 나타내고 있다. 또한, 〈그림 16〉에서는 모델 공시체의 재하시의 소산에너지의 누적과정을 나타내고 있다. 수평균열을 갖는 공시체Y는 다른 공시체에 비해 내하력이 작다. 이것은 상기에서 언급한 것과 같이 피복콘크리트가 재하변위가 작은 단계부터 공시체 본체가 박리하였기 때문으로 부재의 유효높이가 작아졌기 때문이다. 또한 그 결과, 재하에 의해 소산된 에너지도 동일변위에 있는 다른 공시체에 비해 비교적으로 작다.

한편, 수직균열을 갖는 공시체 Z는 내하력이 균열이 없는 공시체 C와 동등하였다. 이것은 수평균열의 경우와 달리, 처음에는 균열보다 공시체 측면에 위치한 피복콘크리트도 압축력을 받기 때문이다. 그래서 누적소산에너지도 균열이 없는 공시체 X와 동일변위에서 동등하다. 단, 그 후에 균열보다 공시체 측면에 위치한 피복콘크리트가 대변위 작용 하에서 박락되어 단면이 감소함으로써 내하력이 감소하여 종국에 도달하며, 인성률 및 종국까지의 누적소산에너지가 작게 되는 결과가 되었다.

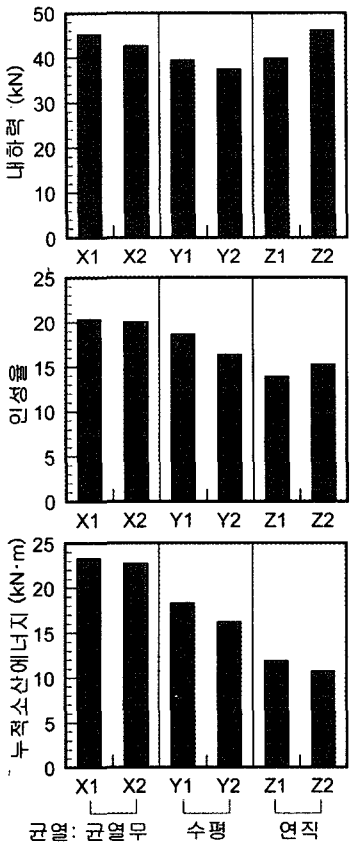

그림 15. 균열 모델 공시체의 내하 · 내진 성능

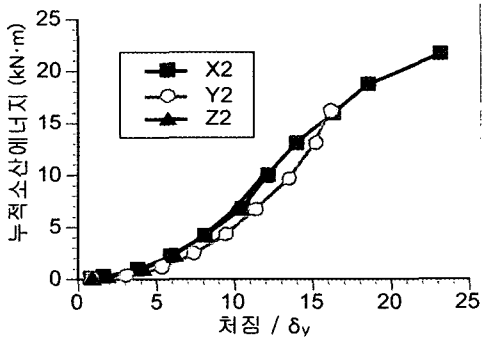

그림 16. 소산에너지의 누적과정(모델 공시체 시험)

그것에 비해 수평균열공시체 Y는 원래 내하력이 작기 때문에 80 % 이하까지 하중이 저하하여도 종국에 달하기 위해서는 커다란 변위가 작용할 필요가 있으며, 수평균열이 인성률의 저하에 미치는 영향은 수직균열보다 작게 된다. 결과적으로, 종국까지의 누적소산에너지는 수평균열보다 2할 정도, 수직균열보다는 5할 정도 저하되었다. 여기서, C시리즈는 공시체를 설치한 모델균열은 앞에서 검토한 염해열화공시체에 있어서 부식균열의 복잡한 분포를 완전하게 재현하고 있지는 않다. 또한 실제

의 염해열화부재는 철근의 역학적 성능이 저하되어있지만 C시리즈는 이를 고려하지 않았다. 3장에서 시사하는 것과 같이 염해에 의한 RC부재의 성능저하는 실제로는 피복균열발생과 철근의 성능저하와의 복합작용에 의해 생긴다. 따라서 여기서는 부식균열발생 및 그로인한 부착성능 저하가 내진성능을 저하시킬 가능성에 대해서 확인되었다고 할 수 있다.

6. 향후과제

본 연구에서 공시체로 이용한 RC부재는 부재치수가 실구조물과 비교하여 작기 때문에 피복의 유효높이에 대한 비는 실구조물보다 크다. 따라서 피복콘크리트의 균열, 박락이 부재의 내하성능, 내진성능에 미치는 영향은 실구조물의 경우보다 클 가능성이 있다. 따라서 부재의 단면치수나 피복을 요인으로 하여 검토를 행하고 수치해석에 의한 교각 등의 대단면부재의 검토를 행할 필요가 있다. 또한, 염해에 의한 열화에 대해 현실적인 대응책등을 마련할 필요가 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 염해열화 RC부재의 내진성능에 대해 검토를 행하였다. 본 연구의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일부재 내에서 부식의 분포는 작았다.
(2) 열화의 진전과 함께 RC부재의 파괴형식은 휨전단 파괴에서 철근파단에 의한 파괴로 바뀌었다.
(3) 부식열화의 진전과 함께 RC부재의 내하력, 인성률, 누적소산에너지는 저하하고, 특히, 부식감량 3.5 %의 범위에서 누적소산에너지는 처음의 50 % 정도까지 저하하였다.
(4) RC부재의 내하력 저하는 철근의 인장강도 저하와 가장 큰 상관관계를 가지고 있다.
(5) RC부재의 종국까지의 누적소산에너지, 즉 내진성능의 저하는 피복콘크리트의 부식 균열폭의 확대와 상관관계를 가지고 있다.
(6) 인공균열을 갖는 부재의 내하성능을 조사함으로써 피복콘크리트의 부식균열이 내진성능 저하에 미치는 것을 확인하였다. ◙

참고문헌

1. 日本土木學會, "2002年制定コンクリート標準示方書 「施工編」", 2002. 3.
2. 日本土木學會, "2001年制定コンクリート標準示方書 「維持管理編」", 2001. 1.
3. 宮川豊章, "リハビリテーションのすすめ―コンクリート構造物のシナリオ", デザイン―, コンクリート工學, Vol.3, No.7, 1998. 7, pp.4~5.
4. 日本コンクリート工學協會, "コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員會報告書", 1998. 10, pp.43~85.
5. Okada, K., Kobayashi, K. and Miyagawa, T., "Influence of Longitudinal Cracking due to Reinforcement Corrosion on Characteristics of Reinforced Concrete Members," ACI Structural Journal, Vol.85, No.2, 1988. 5, pp.134~140.
6. 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文, 大村陳庭, "塩害による鐵筋腐食がRC梁の耐力性能低下に及ぼす影響", コンクリート構造物の補修工法に關するシンポジウム論文報告集, 1996. 10, pp.87~92.
7. 長嶺希, 山川哲雄, "沖縄で自然暴露により損傷したRC柱の正負繰り返し水平加力實驗 コンクリート工學年次論文報告集", Vol.20, No.2, 1998. 6, pp.889~894.
8. 小林孝一, 志知裕幸, 榊原吉正, "塩害がRC部材の耐震性能に与える影響について, コンクリート工學年次論文報告集", vol.26, No.1, 2004. 6, pp.1059~1064.
9. 服部雋史, 井上普, 宮川豊章, 藤井學, 小林和夫, "横拘束コンクリートのはり部材への適用に關する檢討", 土木學會第44回年次學術講演會梗概集第5部, 1989. 10, pp.504~505.
10. 日本土木學會, "2002年制定コンクリート標準示方書「耐震性能照調編」", 2002. 12.
11. ASTM C876-91, "Standard Test Method for Half-cell Potentials od Uncoated Steel in Concrete", 1999.
12. 小林孝一, 渡辺奎彦, 服部雋史, 宮川豊章, "高流動コンクリートによる斷面補修を行った塩害コンクリート部材の鐵筋腐食特性について, 土木學會論文集, Vol.44, No.627, 1999. 8, pp.147~160.
13. 松村卓郎, 金津努, 西内達雄, "海岸近くの大氣中に位置するコンクリート構造物の鐵筋腐食特性について", 土木學會論文集, Vol.45, No.634, 1999. 11, pp.303~314.
14. 小林孝一ほか, "RC部材のひび割れによるマクロセル腐食の電氣化學特性を用いた解析的檢討", 土木學會論文集, Vol.61, No.746, 2003. 11, pp.71~89.
15. 樸田珪寬ほか, "鐵筋腐食度評価式の檢討", 日本建築學會大會(北陸)學術講演會梗概集A, 1992. 8, pp.1051~1052.
16. 森永繁, "鐵筋の腐食速度に基づいた鐵筋コンクリート建築物の壽命予測に關する研究", 東京大學學位論文, 1986.
17. 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文, 鹿毛忠継, "有限要素法による鐵筋の腐食したRC梁の耐力性能評価", Vol.19, No.1, 1997. 6, pp.1147~1152.