철근콘크리트 구조물의 철근부식에 관한 실험 연구

채영석 · 최일윤* · 민인기**

우송대학교 건축공학과 · *한국철도기술연구원 첨단고속철도연구실 · **우송정보대학 철도토목과
(2012. 11. 7. 접수 / 2013. 10. 7. 채택)

An Experimental Study on Steel Bar Corrosion of Reinforced Concrete Structure

Young-Suk Chae · Il-Yoon Choi* · In-Ki Min**

Department of Architectural Engineering, Woosong University

*Advanced HSR Research Division, Korea Railrode Research Institute

**Department of Railroad Civil Engineering, Woosong Collage

(Received November 7, 2012 / Accepted October 7, 2013)

Abstract : The purpose of this study is to investigate the steel bar corrosion and degree of reinforced concrete bridge, and analyze the cause of corrosion occurrence. Therefore they could ensure the durability and stability as to suggest the corrosion prevention of reinforced concrete structure. To study the corrosion state reinforced concrete structure, We investigate the cover of concrete, the compressive strength by schmidt hammer, the neutralization test of site, the compressive strength of core and the measurement of neutralized depth. As the results of test, the corrosion-grade of reinforced concrete structure which the degree of corrosion is 3, 4 degree get to 18% in the used time of 40 years and the time elapsed of 25 years. Therefore the corrosion of steel bar give rise to public discussion. The degree of corrosion is serious, and the neutralization come to the cover of concrete

Key Words : corrosion-grade, concrete cover, neutralization, compressive strength

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

건설재료 가운데 최근까지도 콘크리트는 내구성이 우수하여 유지관리가 필요 없는 반영구적인 구조물에 적용되어 왔다. 그러나 철근 콘크리트 구조물이 오랜 기간동안 공기 중의 탄산가스에 노출될 경우 콘크리트의 중성화가 진행되거나, 겨울철에 눈이나 얼음을 녹일 목적으로 사용되는 용빙제로 인하여 염화물이 침투되어 콘크리트가 침식되고, 콘크리트 속에 묻힌 철근이나 PC강재의 녹이 발생하여 부식을 일으키며, 체적의 팽창으로 인하여 콘크리트의 균열 및 박리를 일으켜, 심할 경우 구조물의 붕괴에 까지 이르게 된다. 이러한 상황은 특수한 환경조건 즉, 기후조건이 좋지 않은 한냉지의 경우 동결융해와 상승작용 및 건조와 습윤의 반복작용 등을 받게 되면 훨씬 더 빠른 진행속도로 콘크리트구조물의 내구성을 저하시키게 된다^{1,2)}.

도심지의 철근콘크리트 도로구조물의 성능저하나 구조적인 피해는 운전자들의 안전에 좋지 않은 영향을 미칠 뿐만 아니라 장기간에 걸쳐 사회와 국가 경제에 막대한 손실을 끼치게 된다.

본 연구에서는 국도상의 1등급교량 142개를 대상으로 콘크리트 교량의 철근 부식상태 및 정도를 조사하고 아울러 그 발생원인을 분석, 검토하여 콘크리트 구조물의 부식 방지대책을 수립하는데 기초 자료를 제시함으로써 콘크리트 도로구조물의 내구성 증진 및 안정성을 확보하는데 그 목적이 있다.

2. 콘크리트의 중성화 및 철근부식에 대한 이론적 고찰

2.1. 콘크리트의 중성화

콘크리트는 시멘트의 수화반응으로 생성된 Ca(OH)_2 에 의해 강알칼리성(PH 12~13)을 가지고 있기 때문에 콘크리트 중에 매입되어 있는 철근은 일반적으로 부식하지 않는다. 그러나 공기 중의 탄산가스의 작용을 장기적으로 받게 되면 콘크리트중의 수산화칼슘이 서서히 탄산칼슘으로 변하여 PH가 8.5~10정도로 낮아져 콘크리트가 알칼리성을 상실하는데 이러한 현상을 중성화라 한다. 일반적인 중성화 화학방정식은 다음과 같다³⁾.

시멘트 페이스트에서의 탄산화 반응은 수산화칼슘 뿐만 아니라 각종 수화생성물 및 미수화물에서도 일어나지만

*Corresponding Author: In Ki Min, Tel: +82-42-629-6380, E-mail: ikmin@wst.ac.kr
Department of Railroad Civil Engineering, Woosong Collage, 171, Dongdaejon-ro, Dong-Gu, Daejeon 300-715, Korea

중성화에 관해서는 수산화칼슘의 영향이 가장 크다. 중성화는 콘크리트 표면에서 내부로 진행하며 콘크리트는 탄산가스과 반응한 중량만큼 무거워지고 치밀해 진다.

콘크리트가 중성화되고 물과 공기가 침투하면 철근이 녹슬고 체적이 팽창하여 콘크리트 덮개에 균열이 발생하여 구조물의 내력과 내구성을 상실하게 된다^{4,5)}.

2.2. 콘크리트중의 철근부식 메커니즘

콘크리트 세공중의 수분은 포화 수산화 칼슘용액과 그 속의 약간의 수산화나트륨과 수산화칼슘을 함유한 용액으로 존재하고 있어 용액의 1개가 약 12.5정도이기 때문에 보통 콘크리트 중의 철근은 부식하지 않는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 콘크리트는 강한 알칼리성 환경을 가지고 있기 때문에 철근은 그 표면에 부동태 피막이라 하는 20~60Å 두께의 수산화물($r-Fe_2O_3 \cdot nH_2O$)로 된 얇은 산화피막을 형성하기 때문에 철근은 부식작용으로부터 보호되고 있다. 그렇기 때문에 잘 시공되고 균열이 없는 철근 콘크리트 구조물에서는 철근의 부식은 문제가 되질 않는다. 그러나 알칼리성분의 용추와 탄산화에 의해서 콘크리트 중의 알칼리성이 저하되고 콘크리트 중에 각종 유해성분이 혼합되면 철근은 활성태로 되어 쉽게 부식한다⁶⁾.

철근의 부동태 피막을 파괴하는 유해성분에는 할로젠, 황산염이온, 황이온 등이 있다. 이것들 중에서 염소이온의 작용이 가장 활발하다. 또한 염소이온은 콘크리트 중에 혼입되는 기회가 많기 때문에 콘크리트 중의 철근 부식에 가장 유해한 이온이다. 콘크리트 중의 철근이 염화물에 의해 부식하는 메커니즘은 콘크리트 중의 염소이온과 수분의 존재로 철근의 부동태 피막이 파괴되고 Fig. 1과 같이 철근 중에 부식전지가 형성된다. 이때 철이 이온화하여 산화된 양극반응과 산소가 환원하는 음극반응이 식 (1)과 (2)와 같이 진행된다.

철근의 부식반응은 식 (1) 과 (2)의 양 반응을 조합한 반응으로 다음 식 (3)과 같이 수산화 제2철 표면에 분출된다.

따라서, 위의 화합물은 용존산소에 의해 산화되어 수산화 제2철 ($Fe(OH)_2$) 이 된다. 더욱이 이 화합물은 물을 잃어 $FeOH$ 또는 Fe_2OH_3 의 붉은 녹이 되며, 또한 일부는 산화 불충분상태로 Fe_3OH_4 의 검은 녹이 되어 철근 표면에 녹의 층을 형성한다⁷⁾(Fig. 1).

3. 연구조사 및 방법

3.1. 구조물의 외관 및 부식에 대한 현장조사

3.1.1. 콘크리트의 덮개조사

Fig. 1. Mechanism of steel corrosion reaction.

콘크리트의 덮개조사는 철근탐지기를 이용하여 가로 60 cm, 세로 60 cm의 격자망 구조로 철근위치를 탐지하고 철근이 매입된 위치까지의 거리를 측정하여 콘크리트의 덮개로 간주하였다.

3.1.2. 슈미트해머에 의한 압축강도 조사

슈미트해머에 의한 콘크리트 표면 반발경도를 이용하여 콘크리트 압축강도 추정시 사용한 강도추정식은 다음의 두 가지 식을 평균하여 사용하였다.

$$f_c = \alpha(13R_0 - 184) \text{---- 일본재료학회} \quad (4)$$

$$f_c = \alpha(10R_0 - 110) \text{---- 동경도 건축재료 검사소} \quad (5)$$

여기서, f_c : 콘크리트 강도(kgf/cm²)

α : 재령보정 계수

R_0 : 보정 반발 경도 $R_0 = R + \Delta R$

ΔR : 타격방향에 따른 보정치

반발경도법에 의한 압축강도의 추정은 부재단면 전체에 대한 압축강도가 아닌 표면강도인 단점을 가지고 있으며, 표면상태에 따라 많은 불확실량을 내포하고 있다. 본 연구에서는 가로 20 cm, 세로 16 cm를 확보하여 총 20점에 대한 반발경도 측정값에 각종 보정을 취하고 이를 평균한 값을 이용하여 콘크리트의 압축강도를 추정하였다.

3.1.3. 현장 중성화 시험

대상구조물의 각 부위에 대한 중성화 진행정도를 평가하기 위하여 측정위치별로 천공기를 사용하여 천공하고 1% 페놀프탈레인 - 알코올용액을 분무하여 붉은 색으로 변하지 않은 깊이를 측정하여 그 깊이를 간주하였다.

3.1.4. 철근의 부식정도의 평가

철근 부식정도의 평가는 다음과 같이 5등급으로 나누어 육안관찰에 의해서 철근의 부식을 판정하였으며, 조사결과 는 사진 및 스케치에 의해 기록하였다.

Grade 1 : 구조물의 전체에 부식이 발생하지 않은 건전

한 상태

Grade 2 : 구조물의 일부의 표면에 약간의 녹물이 발생한 상태

Grade 3 : 구조물의 일부에 철근부식으로 인한 균열이 발생하고 표면에 얇은 뜸 녹이 광범위하게 발생하여 콘크리트 녹이 부착되어 있는 상태

Grade 4 : 구조물의 전체에 약간의 두께가 있는 팽창성의 녹이 발생하였지만, 콘크리트의 탈락이나 단면손상이 비교적 적은 상태

Grade 5 : 철근전체에 걸쳐 현저한 팽창성의 녹이 발생하고, 단면손상이 있는 상태

3.2. 코어 공시체에 의한 실내실험

3.2.1. 코어 공시체의 압축강도

콘크리트 코어에 의한 압축강도 실험은 구조물의 각 부위 중에서 채취가 가능한 부위를 직경 7 cm의 코어 천공기로 채취하여 실시하였다. 현장에서 채취한 코어 공시체의 양 단면을 절단하여 캡핑한 후 압축강도를 측정하였다.

3.2.2. 중성화 깊이 측정

코어 공시체를 쪼개어 표면의 먼지, 가루 등을 제거한 후 1%의 페놀프탈레인-알코올 용액을 분무하였다. 중성화된 부분은 적색으로 변색된 부분과 변색되지 않은 부분과의 경계선에서 콘크리트 표면까지의 깊이를 측정하여 구하였다. 측정수는 한 공시체에 대해 각각 4점 정도로 정하여 그 평균 값을 구하였다.

4. 연구조사 결과 및 고찰

4.1. 콘크리트의 덮개

콘크리트 덮개란 최외측 철근의 표면으로부터 콘크리트 표면까지의 두께를 일컬으며, 콘크리트의 최소덮개를 두는 이유는 첫째, 철근이 부식되지 않도록 하기 위해, 둘째, 내화구조로 만들기 위해, 셋째, 부착응력을 확보하기 위하여 등이다. 따라서 설계자는 사용재료, 구조물이 받는 기상작용 콘크리트의 표면에 작용하는 유해한 물질, 부재의 치수, 구조물의 중요성과 시공의 양부 등에 따라 덮개의 크기를 결정해야 한다.

Fig. 2. Concrete cover distribution of abutment.

Fig. 3. Concrete cover distribution of pier.

Fig. 4. Concrete cover distribution of slab.

142개 교량에 대한 콘크리트 덮개를 측정 부위별로 교대(Fig. 2), 교각(Fig. 3) 및 슬래브(Fig. 4)로 나누어 분석하였다.

교대의 경우는 93개 구조물에서 측정되었으며, 이들 가운데 약 23%인 20개 구조물에서는 최소 덮개 규정을 만족하지 못하였으며, 이중 2개 구조물에서는 덮개가 11 mm로 측정되었다. 교대의 콘크리트 덮개가 부족한 이들 교량 중 외관 등급 4등급이 3개, 5등급이 2개이며, 중성화가 콘크리트 덮개 이상으로 진행된 교량이 3개로 판명되었다.

교각은 111개 구조물에서 측정한 결과 중 51%에 해당하는 57개 구조물에서 40 mm이하의 값을 나타내었으나 이들 중 25개 구조물만이 30 mm이하이고 나머지의 대부분은 35 mm이상으로 측정하였다. 최소덮개 만족하지 못하는 교량 중 외관 등급이 3등급 18개, 4등급 5개, 5등급 2개이다.

또한, 이들 중 중성화 깊이가 콘크리트 덮개를 초과한 경우의 교량은 8개로 판명되었다.

슬래브는 모두 81개 교량에서 측정되었으며, 이들 중 29개 교량에서 콘크리트 덮개가 25 mm이하로 나타났다. 그리고 교량의 외관등급이 4등급인 경우가 4개, 5등급 1개이며, 슬래브하면의 중성화가 콘크리트 덮개를 초과한 교량이 7개로 나타났다. 이렇게 중성화가 콘크리트의 덮개를 초과한 경우 콘크리트중의 철근은 부식의 가능성이 높으며, 부식이 진행됨에 따라 덮개 콘크리트가 녹의 체적 팽창압에 의해 탈락되어 구조물의 내구성은 현저하게 떨어지게 된다.

Fig. 5. Relation of core and non-destructive strength in bridges.

4.2. 콘크리트 품질

교량을 대상으로 226개소에서 측정한 코어강도 및 비파괴강도에 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

전체 구조물에서와 마찬가지로 상관계수가 0.65인 대체로 만족할 만한 수준의 관계를 얻을 수 있으며 비파괴 압축강도 값이 적게 평가된 이유는 반발정도로 구한 비파괴 압축강도값에 재령계수가 반영되었기 때문으로 추정된다.

교대 85개소, 교각 85개소, 슬래브 56개소 등 모두 226개소에서 측정된 부위별 코어강도의 분포(Fig. 6)를 살펴보면 10 kgf/cm²이하의 강도는 교대에서 약 8%인 7개소에서 측정되었으며, 교각의 경우는 약 5%에 해당하는 4개소, 슬래브는 약 4%인 2개소에서 측정되었다. 151~200 kgf/cm²사이의 강도는 교대가 33%인 28개소, 교각이 29개소, 슬래브가 14%인 8개소로 나타났으며, 201~250 kgf/cm²사이의 강도가 49%인 42개소, 교각은 41%인 35개소, 슬래브는 46%인 26개소이다.

Fig. 7은 교대 129개소, 교각은 137개소 및 슬래브 98개소 등 364개소에서 측정된 비파괴 압축강도 분포를 나타낸 것으로 150 kgf/cm²이하인 경우가 교대는 약 8%인 10개소, 교각은 약 4%인 5개소, 슬래브는 3%인 3개소로 나타났다. 강도가 151~200 kgf/cm²사이의 값은 교대에서 약 28%인 36개

소, 교각이 26%인 26개소 슬래브가 21%인 21개소이며, 201~250 kgf/cm²사이의 강도는 교대가 47%인 60개소, 교각이 48%인 66개소, 슬래브는 약 36%인 35개소에서 측정되었다. 또한 251 kgf/cm²이상인 강도는 교대가 23개소, 교각이 30개소, 슬래브가 39개소임을 보여주고 있다.

4.3. 콘크리트의 중성화

교량의 교대, 교각 및 슬래브 부위 333개소에서 측정된

Fig. 7. Non-destructive strength in bridges.

Fig. 6. Core strength in bridges.

Table 1. Neutralization distribution of bridges

	Abutment	Pier	Slab
10mm or less	57	45	27
11 ~ 20mm	36	44	26
21 ~ 30mm	15	25	11
31 ~ 40mm	7	10	6
41 ~ 50mm	5	6	3
51 ~ 60mm	3	1	2
61 ~ 70mm	1	0	1
71 ~ 80mm	0	0	0
81 ~ 90mm	1	0	0
91mm or more	0	1	0

Fig. 8. Distribution by neutralization depth of bridges.

Fig. 9. Distribution of corrosion grade in bridges.

중성화에 대한 깊이별 분포 현황을 Fig. 8과 Table 1에 나타내었다.

4.4. 철근 부식상태

조사 구조물의 외관조사와 부분적으로 철근을 채취하여 콘크리트 중의 철근의 부식정도를 5등급으로 분류하였다. 교량의 부식등급 분포는 Fig. 9과 같다. 전체 424개 부위에서 평가된 부식등급은 1등급이 약 55%인 235개, 2등급이 27%인 149개, 3등급이 10%인 43개, 4등급이 7개로 나타났으며, 5등급은 없는 것으로 나타났다.

5. 콘크리트 구조물의 철근부식원인에 대한 고찰

콘크리트 교량의 부식상태조사 결과 부식의 가능성 또는 부식이 진행되고 있는 것으로 평가되는 구조물에 대해 철근 부식의 원인 분석 및 부식에 영향을 미치는 여러 요인들 간의 상관관계를 고찰하였다.

외관등급 1등급의 판정을 받은 교량의 교대, 교각, 슬래브의 부식등급이 구조물의 전체에 부식이 발생하지 않은 건전한 상태인 부식등급 1등급 전체의 약 89%정도이다. 또한 외관등급 2등급의 경우는 부분별로 부식등급 2등급 이하가 약 39%인 76개 부재에서 구조물의 일부의 표면에 약간의 녹물이 발생한 상태로 나타났다(Table 2). 외관등급 3등급의 경우는 부식등급 2등급이하의 경우가 60%인 90개이며 특히 부식 3등급으로 구조물의 일부에 철근부식의

Table 2. Distribution of corrosion grade according to appearance grade

Appearance grade	Location	Corrosion grade				Sum
		1-grade	2-grade	3-grade	4-grade	
1	Pier	16	2			18
	Abutment	15	3			18
	Slab	17	1			18
2	Pier	38	23	2	1	64
	Abutment	44	15	6		65
	Slab	35	25	3	1	64
3	Pier	21	21	8		50
	Abutment	26	17	6	1	50
	Slab	13	22	13	2	50
4	Pier	5	1	1		7
	Abutment	3	4			7
	Slab	2	3	2		7
5	Pier		1	1		2
	Abutment		1	1		2
	Slab				2	2
Total		235	139	43	7	424

Fig. 10. Corrosion grade according to appearance grade 3.

Fig. 11. Corrosion grade according to appearance grade 4.

로 인한 균열이 발생하고 철근 표면에 얇은 뜬 녹이 광범위하게 발생하여 콘크리트 녹이 부착되어 있는 상태인 부식등급3등급도 18%정도이다(Fig. 10).

그리고 외관등급 4등급 교량의 경우는 52%인 11개 부위에서 부식등급 2등급이고, 외관등급 5등급의 경우는 모

든 부재의 부식등급이 2등급이하로 부식등급이 낮을수록 외관등급도 낮아짐을 알 수 있다. 외관등급 3등급 이하로 평가된 구조물에 대한 부식등급을 조사한 결과 역시 부식등급이 2등급인 경우가 40%, 3등급인 경우가 18%, 4등급인 경우도 3%로 나타나 61%정도가 부식의 진행 가능성이 높다는 것을 알 수 있다(Fig. 11). 또한, Fig. 12에서 알 수 있듯이 외관등급 3,4,5 등급에서 부식등급 3등급 이하가 61%로 나타남을 알 수 있었다.

중성화가 콘크리트 덮개를 초과한 경우의 부식등급을 Fig. 13에 나타내었다. 중성화가 콘크리트 덮개를 지난 경우의 부식등급은 2등급이 55%, 3등급이 28%, 4등급이 10%로서 약 93%가 부식등급 2등급이하로 나타났다.

Fig. 14에서 콘크리트의 압축강도가 클수록 중성화 깊이가 줄어들고 있음을 보여주고 있으며, 이는 콘크리트의 강도가 증가할수록 수화조직이 치밀해지고 콘크리트의 품질이 좋다는 것을 의미하며 결과적으로 대기 중의이

Fig. 13. Corrosion grade of Neutralized cover.

산화탄소를 통해 확산되는 속도가 감소한다는 것을 알 수 있었다.

6. 결론

1) 콘크리트 덮개를 조사한 결과 교대 및 벽체부위에서는 29%정도가 시방서상의 최소 덮개 규정에 미달하고 있으며, 교각 및 기둥부위에서는 조사대상 중 약 48%정도가 규정을 만족하지 못한 것으로 분석되었다. 반면 슬래브는 약 35%정도가 미달된 것으로 나타났다.

2) 준공년도 별로 구조물의 부위별 전체 구조물의 평균 및 최대 중성화 깊이를 조사한 결과, 특이한 점은 조사된 구조물의 공용년수가 모두 40년 미만임에도 불구하고 최대 100 mm이상까지 진행된 구조물도 있어 평균적인 중성화 진행속도보다 큰 결과를 나타내었다.

3) 조사대상 구조물에 대해서 부식등급을 조사한 결과 건전한 상태의 1등급이 46%인 277개, 2등급은 36%인 215개로

Fig. 12. Corrosion grade according to appearance grade 3, 4, 5.

Fig. 14. Relation of Core strength and Neutralization.

판명되었다. 또한 3등급은 15%인 93개, 4등급이 전체의 3%정도인 18개로 나타났으나, 현저한 팽창성의 녹이 발생하고 단면 손상이 있는 상태인 5등급은 조사대상 구조물에는 없었다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 조사대상 구조물의 공용년수가 40년 미만으로 경과년수가 25년인 구조물이 대부분인 점을 감안하면, 콘크리트 구조물의 부식정도가 3,4등급인 구조물이 전체구조물의 18%를 차지할 정도로 철근의 부식이 심각함을 알 수가 있었다. 또한 부식원인을 조사한 결과 부식정도가 심한 구조물에서 중성화가 콘크리트 덮개를 초과한 경우가 대부분이었다.

References

- 1) J. P. Skalny, "Materials Science of Concrete", The American Ceramic Society. Inc, 1989
- 2) M. H. Young, "Durability Investigation of Concrete Structure on Snow Melting Material", Journal of the Korea Concrete Institute, 1996
- 3) B. L. Martin and J. E. Bennett, "An Activated Titanium Mesh Anode for the Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Concrete", Corrosion Paper No. 147, 1987
- 4) M. H. Young and S. S. Kim, "A Study on Salt Damage of Concrete Structure in the Ocean Environment", Journal of the Korea Concrete Institute, 1996
- 5) K. C. Clear, "Growth and Evolution of Bridge Deck Cathodic Protection", 1984
- 6) Elgard Corporation, "Elgard Anode Mesh Installation List Revision of 17", 1991. 7
- 7) W. C. Choi, "Concrete Crack and a Decline of Efficiency", Dongwhapub, pp. 124~126, 2010