

시멘트계 보수재료로 코팅된 강재의 부식 및 휨강성 평가

Evaluation of Steel Corrosion and Flexural Strength Coated with Cementitious Repair Material

윤용식¹ · 김태상² · 김호룡² · 권성준^{1*}

Yong-Sik Yoon¹ · Tae-Sang Kim² · Ho-Ryong Kim² · Seung-Jun Kwon^{1*}

(Received August 9, 2016 / Revised September 12, 2016 / Accepted September 12, 2016)

The present work is for an evaluation of resistance to corrosion in steel coated with cementitious repair material, so that 3 cases of steel plate(Normal, Welding, Welding & coating case) are subjected to ICM(Impressed Current Method) for acceleration of corrosion for 7days. Tested and estimated corrosion ratio through Faraday's Law are compared, and the related flexural strength are evaluated. In Normal and Welding cases, similar level of corrosion ratio(70%) is evaluated, however only 17% level of corrosion ratio is evaluated in the Welding & coating case, which indicates that cementitious repair material is effective to anti-corrosion due to a block of chloride penetration. The flexural test results are consistent with those in accelerated corrosion test, which shows a significant flexural strength in Welding & coating case by 3.4times greater than the others. The cementitious material repair coating is evaluated to be effective to anti-corrosion in welding of steel plate.

키워드 : 시멘트계 보수 코팅 재료, 철판, 부식, 휨 강도

Keywords : Cementitious repair coating material, Steel plate, Corrosion, Flexural strength

1. 서론

콘크리트는 안정적이고 경제적인 건설재료로 인식되어왔으며, 철근을 사용함으로써 구조부재인 RC(Reinforced Concrete)로 사용되어왔다. 그러나 해양환경 및 제설제 사용과 같은 염해에 장기간 노출되었을 경우 콘크리트내의 공극을 통한 염화물 이온 또는 이산화탄소 등으로 인해 매립된 철근은 부식되고 이에 따라 내구적인 문제가 발생하게 된다(Broomfield 1997; Kwon et al. 2009). 일단 철근의 부식이 시작되면 부식전보다 3~4배 이상의 체적 증가를 유발하게 되어 콘크리트 구조물에 균열이 발생하고, 이러한 균열은 부식에 필요한 산소, 수분 및 염분의 침투를 더욱 용이하게 한다(Lee and Lee 2000). 또한 해양환경에 RC구조물이 노출되면 콘크리트의 알칼리성이 저하되고 콘크리트 중에 각종 유해성분이 혼입되면 철근은 활성 상태가 되어 쉽게 부식하게 된다(Ai Amoudi

and Maslehuddin 1993). 이러한 부식에 따른 내구적인 문제점은 피복 콘크리트의 박락 및 균열 문제로 진전되며 최종적으로는 철근 단면적의 감소를 통하여 구조물 안전성에 문제가 생기게 된다(Broomfield 1997; RILEM 1994). 이러한 부식 문제를 방지하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며 예폭시 철근코팅, 용융아연도금, 해수전착기법과 같은 철근 방청 기술들이 연구되어 왔다(Lee et al. 2004; Lee and Ryu 2004).

강재의 관점에서 보면 부식기구(corrosion mechanism)는 크게 탄산화에 따른 pH 저하와 염화물 이온의 침투에 따른 부식으로 나뉜다(Bautista and Gonzalez 1996). 탄산화에 의해 pH가 10 이하 수준으로 감소하면 철근의 부동태피막이 파괴되고 이로 인한 부식이 발생한다. 또한 내부에 염화물 이온이 없더라도 외부로부터 확산 및 침투에 의해 유입된 염화물 이온은 부분적인 공식(pitting)을 발생시키고 산소와 수분의 영향으로 부식이 진전된다

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr

¹한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

²한국건설생활환경시험연구원 에너지환경사업본부 건축환경재료센터 (Korea Conformity Laboratories Energy & Environment Business Division Built Environment Materials Center, Seoul, 08503, Korea)

(Bautista and Gonzalez 1996).

강재의 경우 공사현장과 제작한계에 따라 연결이음부분인 취약 부가 필연적으로 발생하게 되며 이를 용접하여 이용하고 있는 실정이다. Welding 부분에 부식이 진행될 경우 구조물의 안전성에 큰 문제를 초래하게 된다(Lim et al. 2008).

본 연구에서는 철판을 대상으로 부식에 취약한 Welding 부분에 시멘트계 코팅을 적용하여 1차적인 염화물 이온(Cl⁻)의 침투를 효과적으로 막을 수 있는지 평가하고자한다. 일반 철판, 이음부분에 Welding한 철판, Welding 부분에 시멘트계 보수재료를 코팅한 철판에 대하여 ICM(Impressed Current Method)을 적용하여 부식을 평가와 부식 후의 휨강성에 대한 평가를 수행하여 부식저항성을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 철판 제작

시멘트계 코팅의 부식저항능력을 평가하기 위해 160×100×50mm의 보통 철판을 제작하였고, 이음부분인 취약부를 유도하기 위해 80×100×50mm의 철판을 제작하여 용접하였다. 또한, 염화물 이온의 1차 침투를 막기 위해 취약부인 Welding 부분에 중앙으로부터 좌우 20mm 총 40mm에 대하여 시멘트계 보수재료를 코팅하였다. 코팅은 W/C 16%의 시멘트(지오세라믹바인더) 풀을 만든

Table 1. Chemical compositions of cementitious repair material

Types	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃
	41.2%	3.04%	10.8%	31.8%	2.42%
Compressive strength	Flexural strength	Bond strength	Length variation	Chemical resistance	Blaine
30.0~50.0MPa	6.0~9.0MPa	2.0~2.5MPa	± 0.1% below	-	3,500~5,000cm ² /g

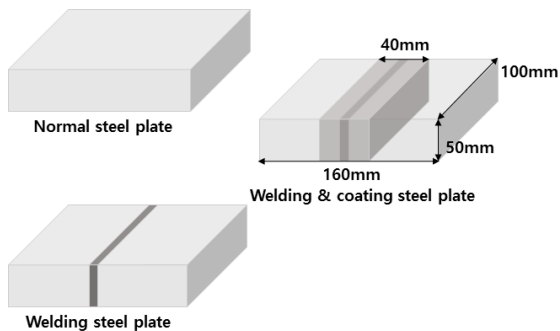


Fig. 1. Geometry of normal, welding, welding & coating steel plates

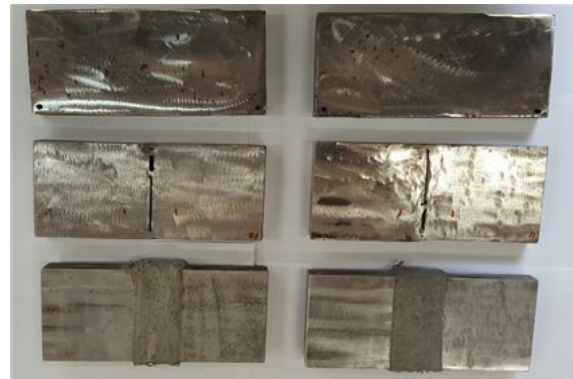


Fig. 2. Photo of normal, welding, welding & coating steel plates

후 흡착포를 담가 시멘트 풀을 충분히 흡수 시킨 다음 흡착포를 Welding된 부분에 감아 경화시키는 방법으로 수행하였다. Table 1은 코팅에 사용된 시멘트의 주요 화학성분 및 기초 물성을 나타낸다. 이에 따라 Normal, Welding, Welding & coating 총 3가지 경우에 대하여 각각 철판을 2개씩 제조하여 실험을 수행하였다.

Fig. 1은 본 실험을 위해 준비한 철판의 모식도를, Fig. 2는 제작한 철판의 모습을 나타낸다.

2.2 Impressed Current Method

ICM(Impressed Current Method)의 실험조건은 많은 문헌에서 채택되어 사용되어왔다(Baek et al. 2012; Sakurada et al. 2008). 본 연구에서는 실제 염해 환경에 따른 부식을 유도하기에는 연구 기간의 제한이 있으므로 ICM을 적용하여 부식으로 인한 부식 유발 시기를 앞당겼다. Fig. 3은 이번 실험의 ICM 모식도를 나타내고 있다.

ICM은 철판과 바닥에 깔린 구리판을 각각 Anode와 Cathode로 전극을 선택하여 전압을 가압하고 인위적인 부식전지를 만든다. 각 case의 철판에 +극을 연결한 후 테프론 테이프로 고정시켰고,

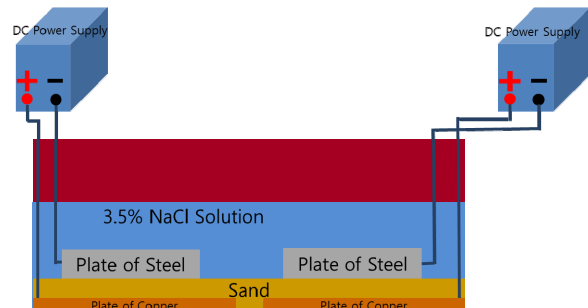
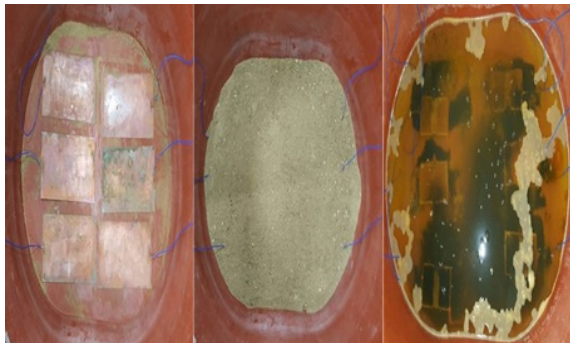


Fig. 3. Schematic diagram of ICM



Fig. 4. Photos of pre-treated steel plate



(a) Copper plate (b) Sand (c) ICM

Fig. 5. Photos of process of ICM

부식을 유도할 중앙 40mm를 제외한 나머지 부분에 수중 에폭시를 도포하여 염화물 이온의 침투를 차단하였다. Fig. 4는 전 처리된 철판의 모습을 나타낸다.

실제 해양환경과 같은 환경을 조성하기 위해 수조바닥에 깔린 구리판위에 잔골재를 30mm 높이로 쌓았으며, 해수와 같은 염화물 농도를 조성하기 위해 3.5% NaCl 수용액을 사용하였다. G사와 H사의 DC Power Supply를 이용하여 모든 철판에 10V의 전압을 7일간 가하여 부식을 유도하였다.

시험 기간 동안 전압이 잘 인가되어있는지 확인하기 위하여 24시간 간격으로 멀티미터기를 사용하여 확인하였다. Fig. 5는 시험의 진행 과정을 나타낸다.

철판의 부식을 평가는 다음 식과 같은 Faraday 법칙을 이용한 이론 값과 시험 후 철판의 부식량과 코팅을 제거하는 시험 값을 고려하여 각 결과를 비교 평가하였다. 식 (1)에서는 Faraday 법칙을 나타내고 있다.

$$M = \frac{c}{zF} \int qdt \quad (1)$$

여기서, M 은 부식량(mol), z 는 철의 이온수(=2), F 는 Faraday

의 수(=96,500 C), q 는 전류(A), t 는 측정시간(sec), c 는 실험상수(0.13)이다. 증류수를 사용하지 않고 저면에 모래를 적층하여 이상 조건과 실험조건이 다르므로 실험상수를 도입하여 실험값을 평가하였다.

2.3 휨 강도 시험

휨 강도 평가는 ICM(Impressed Current Method) 실험 후 부식된 철판을 대상으로 KS F 2408를 준용하여 3점 재하법으로 실시하였다. Fig. 6은 휨 강도 실험의 모식도를 나타낸다.

$$\delta = \frac{PL}{BD^2} \quad (2)$$

여기서, P 는 항복강도(N), L 은 철판의 길이(mm), B 는 철판의 폭(mm), D 는 철판의 두께(mm)를 나타낸다. Fig. 7은 휨 강도 시험 전경을 나타낸다.

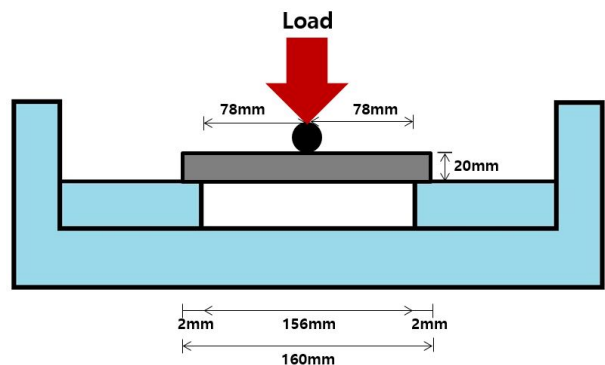


Fig. 6. Schematic diagram of flexural strength test



Fig. 7. Photos of flexural strength test

3. 실험 결과

3.1 ICM에 의한 부식을 평가

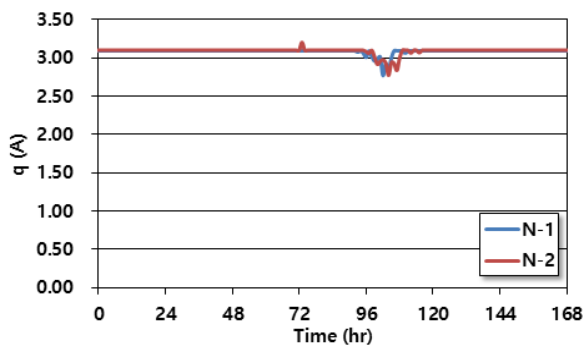
각 경우의 전류량을 1시간 간격으로 측정하여 평가하였는데, 측정 부식전류는 서로 다른 경향을 나타내었다. Normal case의 경우 거의 일정한 경향이 나타났는데 이는 부식이 활발히 진행되어 전류가 무리 없이 흘렀기 때문에 사료된다. Welding case의 경우 전류량이 미세하게 감소하는 경향을 나타내었지만 거의 일정하게 유지되었다. 이는 Normal case와 마찬가지로 부식이 활발히 진행되었기 때문에 사료되며, 일정한 전압이 가해지더라도 용접부의

단면적이 감소되어 저항이 커지면 전류량이 감소하게 된다. Welding & coating 경우에는 전류량이 감소하다가 간헐적으로 급증하는 경향이 나타났다. 이는 실험이 진행됨에 따라 코팅의 일부가 분리되면서 국소적인 부식증가를 나타내기 때문이다.

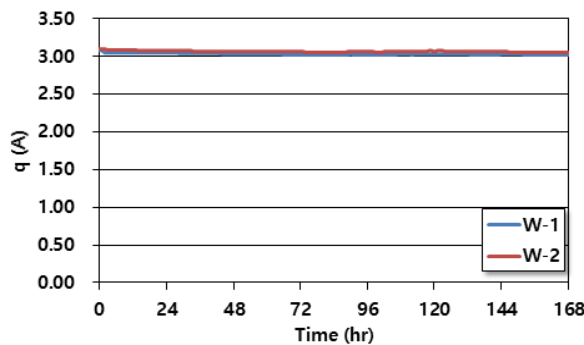
Fig. 8은 각 case의 전류량 그래프를 나타낸다. 밑의 Table과 Fig에서 N은 Normal case를, W는 Welding case를, WC는 Welding & coating case를 나타낸다.

실험을 통해 얻은 전류량을 Faraday 법칙에 적용하여 얻은 이론 부식률이 ICM 실험 후 부식과 코팅을 제거하여 얻은 실험 부식률보다 대체로 크게 측정되었다. 이는 에폭시로 실시한 철판의 전처리가 제 역할을 하지 못하여 부식을 유도하지 않은 부위에도 부식이 일어났기 때문에 사료된다. 또한 Normal case와 Welding case가 비슷한 부식률을 나타내는 반면에 Welding & coating case에서는 다른 경우에 비하여 약 24% 수준으로 부식률이 감소하였다. 시멘트계 보수재료의 코팅이 염화물 이온의 침투를 효과적으로 차단하고 이로 인해 부식전류가 낮은 것으로 판단할 수 있다.

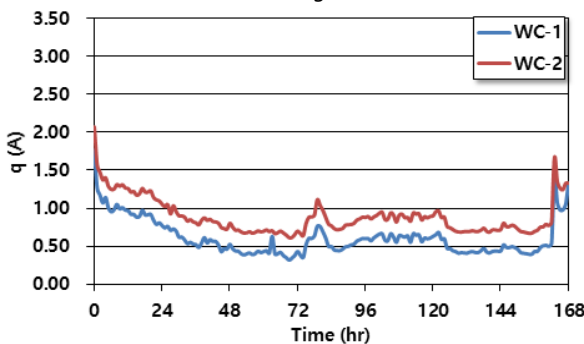
Table 2와 Fig. 9는 실험 부식률과 이론 부식율을 나타낸다. 또한 Fig. 10은 ICM 실험 후 부식과 코팅 제거하기 전 철판의 모습을, Fig. 11은 ICM 실험 후 부식과 코팅을 제거한 철판의 모습을 나타내고 있다.



(a) Normal case



(b) Welding case



(c) Welding & coating case

Fig. 8. Amount of current measurement results

Table 2. Results of corrosion ratio

Case	Tested corrosion ratio (%)	Estimated corrosion ratio (%)
N-1	70.34	53.92
N-2	70.30	64.85
W-1	68.95	54.33
W-2	69.64	57.70
WC-1	13.76	9.19
WC-2	20.14	25.59

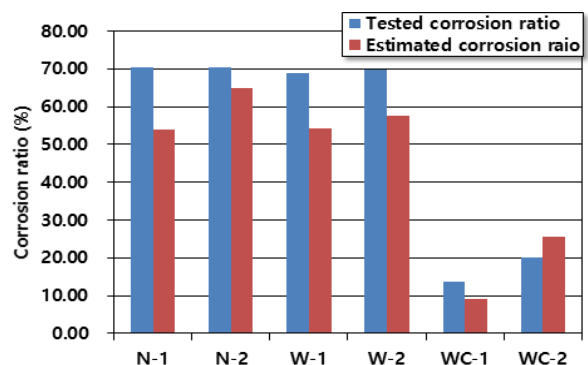


Fig. 9. Evaluation of corrosion ratio after test

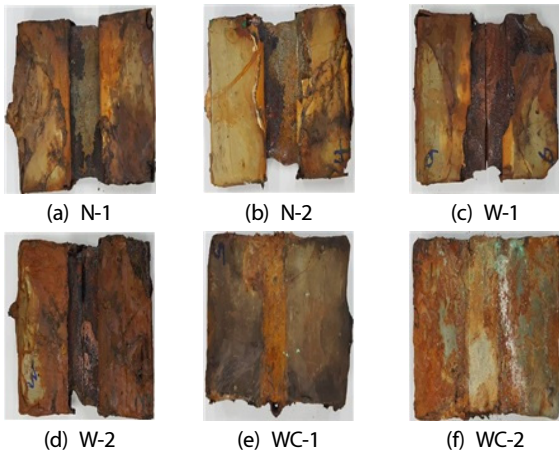


Fig. 10. Photos of steel plate before corrosion and coating removed

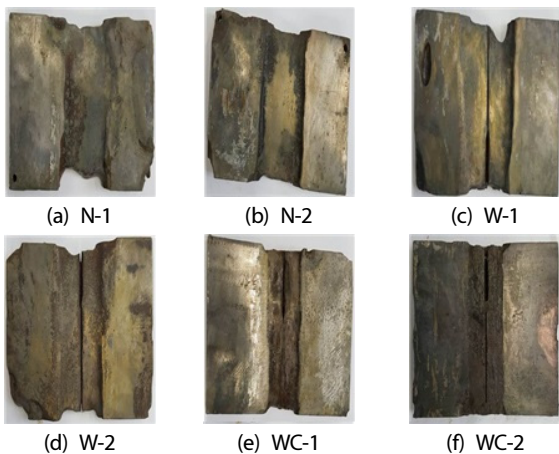


Fig. 11. Photos of steel plate after corrosion and coating removed

3.2 휨 강도 평가

휨 강도 평가 결과 3개의 경우 중 Normal case의 휨 강도가 가장 높게 측정되었고 Welding & coating, Welding case 순으로 강도가 평가되었다. 이는 부식률 평가와 같은 경향을 나타냈다. Welding case에서 Normal case 대비 약 6.5% 수준의 휨 강도가 측정되었는데, 이는 Welding case의 이음부 가 완벽히 용접되지 않은 점, 그리고 부식에 따라 단면결손이 커져서 휨강성이 저하하였기 때문이다.

Welding & coating case에서는 Welding case 대비 약 3.4배 큰 휨 강도를 나타냈다. 이는 비록 용접부 단면적이 일반 상판에 비하여 감소하였고 부식이 촉진되는 환경이지만, 시멘트계 보수재료의 부식저항성을 통하여 단면적 결손을 일부 방지하였기 때문이다.

Table 3과 Fig. 12는 각 case의 휨 강도 평가 결과를 나타내고, Fig. 13은 휨 강도 시험 후 철판의 모습을 나타낸다.

Table 3. Results of flexural strength

	Flexural strength(MPa)		
	Normal	Welding	Welding & coating
1	585.0	40.2	141.6
2	501.6	30.6	102.0
Average	543.3	35.4	121.8

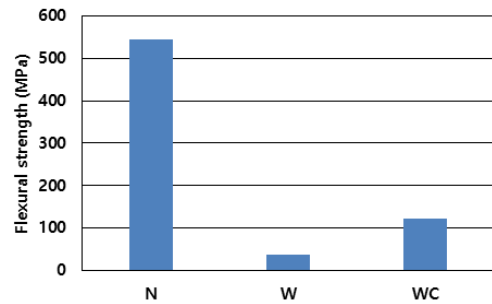


Fig. 12. Evaluation of flexural strength after test

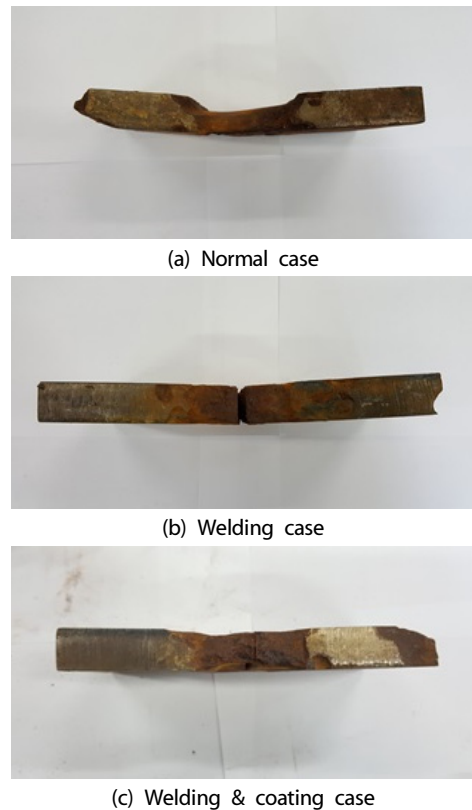


Fig. 13. Photos of steel plate after flexural strength test

4. 결론

본 연구에서는 시멘트계 코팅이 시공된 철판의 부식특성을 평

가하였다. ICM(Impressed Current Method)를 적용하여 측정된 전류량, 이론 부식률과 실험 부식률, 부식 후 휨 강도를 각 경우에 대하여 비교 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Normal, Welding case의 경우 전류량이 거의 일정하게 유지되는 경향을 보인 반면, Welding & coating case의 경우 다른 조건보다 전류량이 낮았지만 일부 급증하는 경향이 나타났다. 이는 보수재 코팅의 일부가 부식에 의해 파괴되면서 전류량이 급증한 것으로 보인다. 코팅을 실시한 case에서 가장 적은 전류량이 발생한 점으로 보아 부식에 대비한 보수재 코팅을 시공한다면 더욱 개선된 염해 저항능력을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.
2. 실험 부식률은 Normal case와 Welding case 사이에 큰 차이가 없었으며, 철판 이음부의 Welding은 부식에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. Welding & coating case에서는 다른 Case 대비 부식률이 약 23% 수준으로 감소하였는데, 이는 시멘트 보수재 코팅이 부식 저감에 효과적이었으므로 사료된다.
3. ICM(Impressed Current Method) 이후 휨 강도 평가 결과 Normal case에서 Welding case보다 약 15.3배의 휨 강도가 나타났다. 이는 철판 이음부의 Welding에 부식이 발생하면 역학적으로 매우 취약해지는 것으로 판단된다. Welding & coating case에서는 Welding case 대비 약 3.4배의 휨 강도 증가가 나타났는데 이는 시멘트계 보수재의 코팅으로 인해 부식저항이 높아져 휨 강도가 개선된 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(16FIP-B067106-04)에 의해 수행되었습니다.

References

Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M. (1993). The effect of chloride and sulfate ions on reinforcement corrosion, *Cement and Concrete Research*, **23(1)**, 139-146.

Baek, S.H., William, X., Maria, Q., Kwon, S.J. (2012). Nondestructive corrosion detection in RC through intergrated heat induction and IR thermography, *Journal of Nondestructive Evaluation*, **31(2)**, 181-190.

Bautista, A., Gonzalez, J.A. (1996). Analysis of the protective

efficiency of galvanizing against corrosion of reinforcements embedded in chloride contaminated concrete, *Cement and Concrete Research*, **26(2)**, 215-224.

Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1-15.

KS F 2408. (2015). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete*, Korean Agency for Technology and Standards.

Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S., Jung, S.H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: probabilistic approach for chloride diffusion, *Structural Safety*, **31(1)**, 75-83.

Lee, C.S., Bae, I.Y., Kim, K.J., Moon, K.M., Lee, M.H. (2004). Properties analysis of environment friendly electrodeposit films formed at various current density conditions in natural seawater, *Journal of Korea Institute of Surface Engineering*, **37(5)**, 253-262.

Lee, M.H., Ryu, H.J. (2004). Surface coating method of environment-friendly calcareous deposit formed in natural seawater, *Fourth International Symposium on Biomimetic Materials Processing*, **4**, 94.

Lee, S.Y., Lee, J.B. (2000). Application of electrochemical corrosion measurement techniques for rebars in concrete, *Journal of the Corrosion Science Society of Korea*, **29(6)**, 313-324.

Lim, S.W., Jang, I.H., Kim, S.S., Song, H.C. (2008). Effect of weld improvement on the corroded fatigue life of welded structures, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, **22(2)**, 50-57.

RILEM. (1994). *Durability Design of Concrete Structures*, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, London, 28-52.

Sakurada, S., Irie, H., Yoshida, Y. (2008). "Development of reinforced concrete corrosion amount presumption method by ultrasonic method," 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 1-6.

시멘트계 보수재료로 코팅된 강재의 부식 및 힘강성 평가

본 연구에서는 시멘트계 보수재 코팅이 철판의 부식 저항성에 미치는 영향을 평가하기 위해 보통 철판(Normal), 용접철판(Welding), 용접 후 보수재 철판(Welding & coating)의 세 가지 경우에 대하여 7일간 ICM(Impressed Current Method)를 통하여 부식을 촉진시켰다. 이후 Faraday 법칙을 통해 얻은 이론 부식률, 실험 부식률 그리고 부식 실험 후 측정된 힘 강도를 비교 평가하였다. Normal case와 Welding case에서는 약 70% 수준의 부식률이 측정되었으며, Welding & coating case에서는 약 17%정도의 부식률이 측정되었다. 이는 시멘트계 보수재료의 코팅이 염화물 이온의 침투를 효과적으로 차단하였으며 이로 인해 부식전류의 발생이 억제되었기 때문이다. 힘 강도 역시 부식률 평가와 같은 경향을 나타내었으며 Welding & coating case에서 Welding case 대비 약 3.4배 큰 강도가 평가되었다. 시멘트계 보수재 코팅이 용접부에 시행되면 용접부 철판의 부식 차단에 효과적일 것으로 판단된다.