

복합열화촉진시험 및 장기현장폭로시험에 의한 RC구조물 보수공법의 보수성능평가

Performance Evaluation of Repair Methods for RC structures by Accelerating Test in Combined Deterioration Chamber and Long-Term Field Exposure Test

권영진[†] · 김재환^{*} · 한병찬^{*} · 장승엽^{**}

Young-Jin Kwon · Jae-Hwan Kim · Byung-Chan Han · Seung-Yup Jang

Abstract

At present, the selecting system and analytic estimation criterion on repair materials and methods of the deteriorated RC structures have not yet been set up in domestic. Under these circumstances, deterioration such as shrinkage crack, corrosion of rebar has been often occurred after repair, and this finally results in too frequent repairs. In this study, three types of repair methods were experimentally investigated by the accelerating test in a combined deterioration chamber and long-term field exposure test. Three types of repair methods applied in this study belong to a group of polymer cement mortar, which is commonly used in repair works. According to the results of this study, durability of repair mortar layers and corrosion properties of recovered rebar could be investigated in short period by the accelerating test in a combined deterioration chamber, which can simulate the condition of repeated high-and-low temperature and repeated dry-and-wet environment, spraying chloride solution and emitting CO₂ gas. After 36 month long-term field exposure test in the coastal area, harmful macro-cracks are observed in the polymer cement mortar layer of some repair methods. These crack are considered to result from drying shrinkage of polymer cement mortar. Also, after 36 month exposure, amount of corrosion area and weight loss of rebar are found to be different according to the types of repair methods.

Keywords : Repair method(보수공법), Combined deterioration(복합열화), Exposure test(폭로시험), Polymer cement mortar(폴리머시멘트모르타), Engineered cementitious composite(고인성 시멘트 복합체)

1. 서론

최근, 염해 및 중성화 등 각종 성능저하요인에 의한 철근 콘크리트구조물의 내구성 저하현상이 국가사회적인 문제로 대두됨에 따라 국내에서도 노후화된 철근콘크리트구조물의 내구성 회복 및 장수명화를 위한 보수재료 및 시공기술이 다종다양하게 개발되어 특허 및 신기술 등으로 인정되어 실용화 되고 있는 상황이다[1-5].

그러나, 국내 보수재료 및 보수시공업계의 현황을 살펴보면, 아직까지 보수재료 및 공법의 선정기준이 되는 규격과

규준이 명확히 규정되어 있지 않은 상황이며, 또한 일부 보수시공현장에서는 내구성이 저하된 철근콘크리트구조물의 성능저하 메커니즘 및 진행단계를 고려하지 않은 무분별한 보수시공, 환경조건 및 시공조건을 고려하지 않은 천편일률적인 보수시공으로 인하여, 보수시공 후에도 보수부위의 요구성능을 만족시키지 못하고 있을 뿐만 아니라, 오히려 공용중에 Photo 1과 같이 건조수축균열, 들뜸, 박리 및 박락, 녹유출 등의 재열화현상을 유발함으로써 추가적인 보수공사가 요구되는 사례도 빈번히 보고되고 있다[6-8].

특히, 국내에 있어서의 보수공법은 바탕처리공정, 함침제도포공정, 단면복구공정, 표면피복공정 및 탑코트공정으로 구성되어 있어 보수공정이 매우 복잡하며, 더욱이 상기의 각 공정에 있어서 다양한 보수재료들이 사용되고 있어 시공중 시공자의 오류에 의한 하자발생이 매우 빈번히 발생되고 있고, 이로 인해 공용중 재열화현상의 발생우려가 매우 높

[†] 정회원, 호서대학교 소방방재학과, 교수, 공학박사
E-mail : kjh0999@empal.com
TEL : (042)821-8909 FAX : (042)825-6456

^{*} 정회원, (주)AMS엔지니어링, 기술이사, 공학박사

^{**} 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원, 공학박사

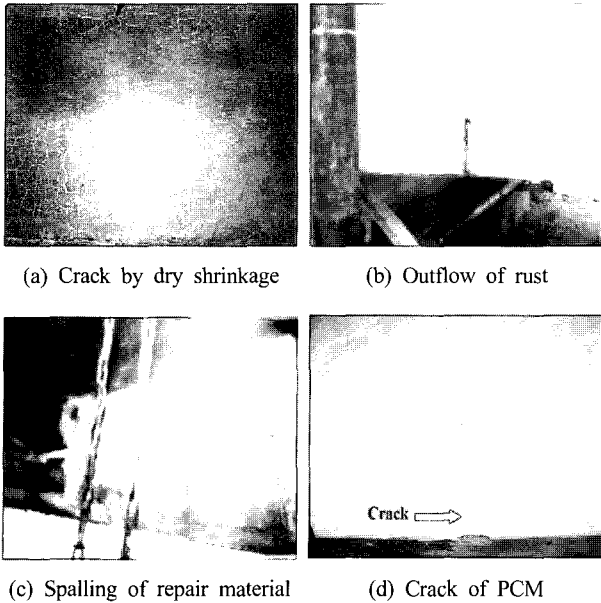


Photo 1. Exaple of re-deterioration occurred after use

은 편이라 할 수 있다.

이와 같은 배경에서, 철도구조물을 비롯한 사회간접자본시설의 대부분을 차지하고 있는 철근콘크리트구조물의 주요 성능저하 요인으로서 염해 및 중성화에 대한 다양한 문제점에 대응하고, 철근콘크리트구조물의 내구성 회복 및 장수명화를 도모하기 위해서는 염해 및 중성화에 의해 성능저하된 철근콘크리트구조물의 내구성 회복을 위한 체계적이고 합리적인 보수공법의 개발이 국가·사회적으로 시급히 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는, 염해, 중성화, 건습반복 및 온도변화가 복합적으로 작용하는 복합열화축진실험과, 해양환경하의 현장에서 장기간 외기 폭로하는 장기현장폭로실험을 통해 최근 국내에서 개발되거나 실용화된 폴리머시멘트모르터계 보수재료·공법의 보수성능을 실증적으로 검증함으로써, 향후 성능저하 된 철근콘크리트구조물의 내구성 회복 및 장수명화를 위한 합리적인 보수재료·공법의 선정기준에 대한 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 바와 같이 국내에서 대표적인 보수재료로 사용되고 있는 폴리머시멘트모르터계 보수재료·공법을 대상으로, 보수시공 후 공용중의 실증적인 보수성능을 검증하기 위해 기초물성평가와 복합열화축진실험 및 장기현장폭로실험으로 구분하여 실시하였으며, 본 연구에서 대상으로 한 보수재료·공법으로는 건설교통부 신기술 또는

Table 1. Experiment scheme

Classification	Repair method	Note
Estimation of physical properties	A-method ^{a)}	KS F 4204
Accelerating test	B-method ^{b)}	Combined deterioration chamber
Long-term fieldexposure test	C-method ^{c)}	Coastal environment

- a) Polymer cement mortar
- b) Polymer cement mortar
- c) ECC (Engineered cementitious composite)

특히로 인증된 3종류의 보수재료·공법을 선정하였다.

즉, A 및 B공법은 폴리머시멘트모르터를 단면복구재로 사용한 공법으로 현재 보수공사에 일반적으로 사용되고 있는 공법이며, C공법은 폴리머가 혼입된 고인성시멘트복합체(ECC; Engineered cementitious composite)를 단면복구재로 사용한 공법이다. 여기서, C공법에 사용된 ECC는 직접인장하에서 변형경화거동(Stain-hardening behavior)과 멀티플랙(Multiple crack)특성을 발현하는 재료로 최근 국내외적으로 활발히 개발되고 있다.

1) 단면복구재의 기초물성평가

우선, 본 연구에서는 선정된 3종류의 보수공법에 있어서 단면복구재인 폴리머시멘트모르터의 기초물성을 재령 7, 14 및 28일에 각각 평가하였으며, 평가항목으로는 압축, 휨 및 부착강도를 A, B 및 C공법 모두에서 측정하였고, C공법의 ECC에 대해서는 직접인장시험을 실시하였다.

2) 복합열화축진실험

본 연구의 복합열화축진실험에 있어서는 선정된 3종류의 보수공법 중 단면복구재로 사용되는 폴리머시멘트모르터에 대하여 복합열화 축진조건하에서의 보수성능, 즉 내구성능

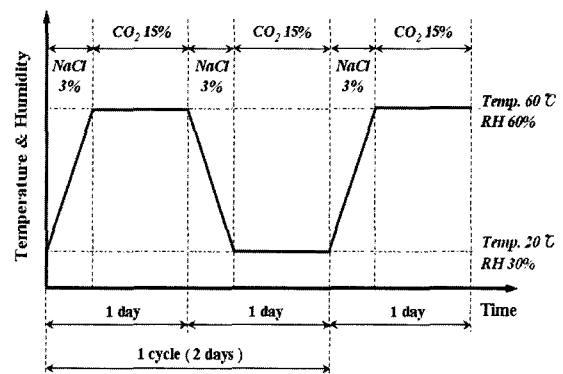


Fig. 1. Accelerating cycle

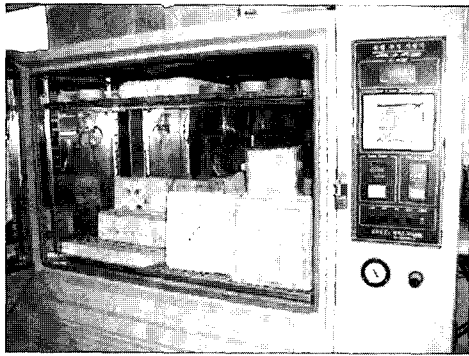


Photo 2. Combined deterioration chamber

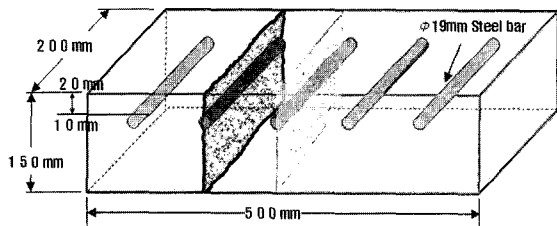


Fig. 2. Schematic of specimens used the accelerating test

및 철근방청성능을 실험적으로 평가하고자 하였다.

본 연구에서의 복합열화 축진조건은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 NaCl 3% 수용액과 CO₂ 가스 15%가 반복적으로 분무되도록 설정하였으며, 더욱이 상기 조건하에서 온도 및 상대습도가 각각 20~60℃ 및 30~60%의 범위로 변화하도록 설정하였다. 또한, Photo 2는 상기의 복합열화 축진시험조건을 구현할 수 있도록 특수 제작된 복합열화축진시험기의 외관을 나타낸다.

한편, Fig. 2는 복합열화축진시험에 사용된 축진시험체의 제작 모식도를 나타낸 것으로, 200×150×500mm의 각형 몰드에 φ19mm 원형철근의 피복두께가 20mm가 되도록 배치하여 타설·제작하였으며, 제작된 시험체는 온도 20±3℃, 상대습도 60±10%의 실내에서 재령 28일간 기중양생을 실시하여 완성하였다. 그 후, 복합열화축진시험장치에 각각의 축진시험체를 준치시켰으며, 축진사이클 10, 20, 30 및 40사이클에 있어서 시험체를 절단한 후, 중성화깊이, 염화물이온 침투깊이 및 철근부식면적율을 각각 측정하였다.

3) 장기현장폭로시험

본 연구의 장기현장폭로시험에서는 선정된 3종류의 보수공법 각각의 모두 공정을 적용한 폭로시험체를 제작하여 해양환경하에서 장기간 외기에 폭로시킨 후, 선정된 각 보수공법의 보수성능을 정량적으로 평가하고자 하였다. 즉, 본 연구의 폭로환경은 Photo 3에 나타낸 바와 같이 염해(특히, 비래염분)를 대상

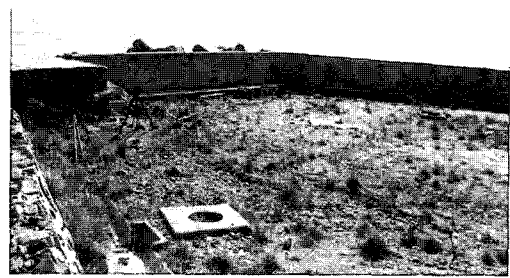


Photo 3. Exposure experiment station (Taeon, Chungnam)

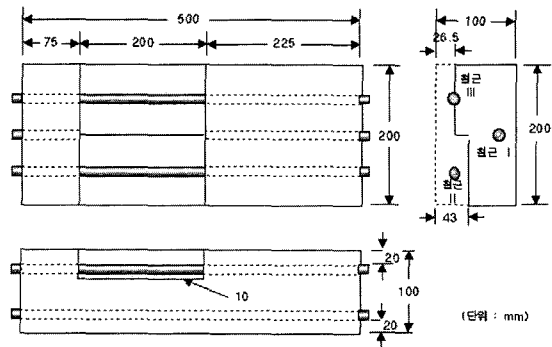
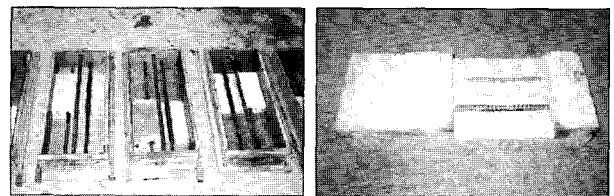


Fig. 3. Schematic of exposed specimens



(a) Mold

(b) Substrate concrete specimen

Photo 4. Mold and substrate concrete specimen

Table 2. Mix proportion of substrate concrete

W/C (%)	Target slump (cm)	S/a (%)	Unit water (kg/m ³)	Unit weight (kg/m ³)		
				Cement	Sand	Gravel
60	18±1	48	186	310	830	931

으로 해양환경으로 설정하였으며, 위치는 비래염분의 영향을 많이 받는 충청남도 태안군의 수산종묘시험장으로 선정하였다.

또한, 장기현장폭로시험용 모체콘크리트부재는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 200×100×500mm의 몰드에 피복두께가 20mm로 되도록 13mm 철근 3본을 배근(Photo 4(a) 참조)한 후, Table 2의 보통콘크리트를 타설하여 제작하였으며, 보수 부위에 있어서 각각의 철근은 모체콘크리트에 완전 매립된 철근(I), 반매립된 철근(II), 완전 노출된 철근(III)이 되도록 모체콘크리트부재(Photo 4(b) 참조)를 제작하였다.

한편, 제작된 모체콘크리트부재는 보수공정에 앞서 Photo

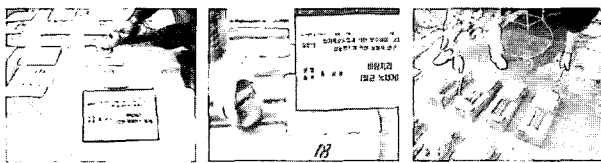
5에 나타난 바와 같이 (a)면처리, (b)철근녹제거, (c)표면세정을 포함한 바탕처리를 동일하게 실시하였다. 그 후, 모체 콘크리트의 표면이 건조된 후에 Table 3에 나타난 각 보수공법의 보수공정에 따라 보수를 실시하였으며, Photo 6은 A공법의 보수시공 일례를 나타낸 것이다.

이와 같이 제작된 현장폭로시험용 시험체는 온도 20±3℃, 상대습도 60±10%의 실내에서 재령 28일간 기중양생을 실시한 후, Photo 7에 나타난 바와 같이 각각의 폭로환경하에 설치하였다. 또한, 각 보수공법의 보수성능을 평가하기 위해 폭

Table 3. Process of repair methods

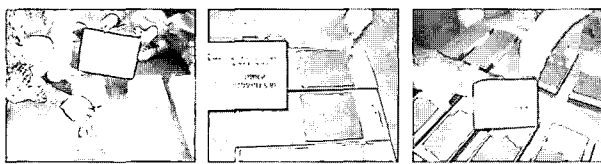
order	Repair process	Kinds of repair method		
		A-method	B-method	C-method
1	Surface treatment	●	●	●
2	Primer application	×	●	×
3	Application of anti-corrosion agent	●	●	×
4	Section recovery	●	●	●
5	Surface coating	●	×	×
6	Top coating	●	●	●

Note) ● : Done, × : Not done



(a) Grinding (b)Removal of corrosion (c) Washing of surface

Photo 5. Example of surface treatment



(a) Application of anti-corrosion agent (b) Section recovery (c) Surface coating

Photo 6. Example of specimen repair

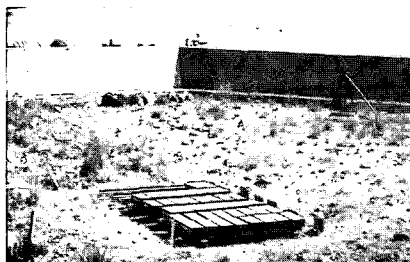


Photo 7. Specimens exposed in field

로재령 중에 정기적으로 외관관찰을 실시하였으며, 폭로재령 3년에 있어서는 폭로시험체를 절단한 후 철근을 발취하여 철근부식면적율 및 철근중량감소율을 각각 측정하였다.

2.2 시험방법

1) 기초물성 평가방법

단면복구재인 폴리머시멘트모르타의 압축강도, 휨강도 및 부착강도 시험은 KS F 4042에 준하여 각각 측정하였다.

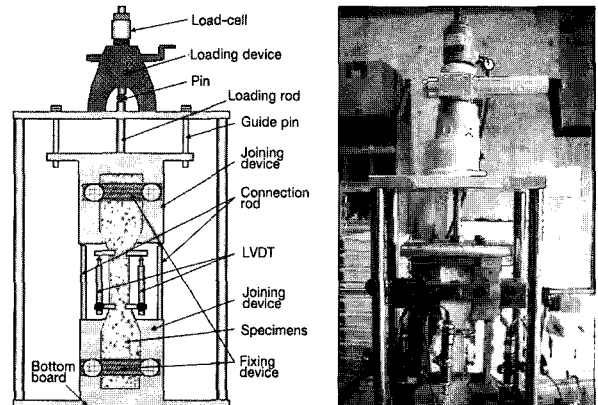
한편, C공법에 사용된 폴리머시멘트모르타(고인성시멘트 복합체; ECC)는 직접인장하에서 변형경화거동 및 멀티플렉트특성을 발현하는 특수한 단면복구재로 품질관리상 재령 28일에 있어서 직접인장시험을 실시하였으며, 직접인장시험기 및 시험체의 모식도는 Fig. 4에 나타난 바와 같다[9,10].

2) 중성화깊이 및 염화물이온침투깊이

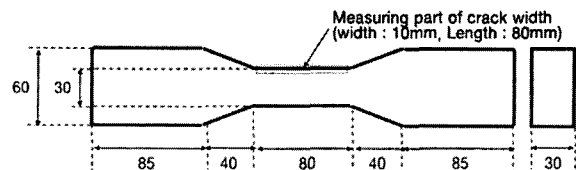
복합염화축진실험에 있어서, 중성화깊이 및 염화물이온 침투깊이는 측정사이클에 있어서 시험체를 절단한 후, 절단면에 1% 페놀프탈레인용액 또는 0.1N AgNO₃용액을 분무하여 측정면으로부터의 침투깊이를 각각 5개소 측정하여 평균값으로 하였다.

3) 철근부식면적율 및 철근중량감소율

철근부식면적율은 철근의 부식발생부위를 트레이싱지로 스케치한 후, 화상해석프로그램을 활용하여 식 (1)에 의해



(a) Schematic of tester (b) Direct tensile tester



(c) Schematic of specimen

Fig. 4. Schematic of direct tensile tester and specimen

Table 4. Test results of physical properties of PCM

Method	Compressive strength			Bending strength (MPa)			Bonding strength (MPa)		
	7d	14d	28d	7d	14d	28d	7d	14d	28d
A	18.1	39.8	43.2	9.3	9.9	12.0	3.1	2.9	3.5
B	25.6	60.5	58.9	8.2	7.1	9.5	1.0	0.9	0.9
C	24.5	43.7	51.1	10.4	14.6	15.2	1.8	2.3	2.5

산출하였다.

$$\text{철근부식면적율(\%)} = \frac{\text{부식면적}}{\text{철근전체면적}} \times 100 \quad (1)$$

또한, 철근중량감소율은 구연산암모늄 10% 수용액으로 녹을 제거한 후, 식 (2)에 의해 산출하였다.

$$\text{중량감소율(\%)} = \frac{\text{시험전중량} - \text{부식후중량}}{\text{시험전중량}} \times 100 \quad (2)$$

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 단면복구재의 기초물성 평가

Table 4는 본 연구에서 선정된 3종류의 보수공법에 사용된 단면복구재의 압축강도, 휨강도 및 부착강도 측정결과를 나타낸 것이다. 즉, 본 연구에서 사용된 단면복구재의 기초물성은 KS F 4042에 규정된 요구성능(압축강도 20.0MPa 이상, 휨강도 6.0MPa 이상)을 모두 만족하였으나, B공법에 사용된 단면복구재는 부착강도 기준(1.0MPa 이상)을 다소 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.

한편, Fig. 5는 C공법에 사용된 단면복구재(ECC)의 1축 직접인장시험시 인장응력-변형곡선을 나타낸 것으로, 인장강도 및 인장변형률은 품질관리상 자체 기준치인 3.0MPa 이상 또한 1.0% 이상을 모두 만족하였고, 안정적인 변형경화거동(Strain-

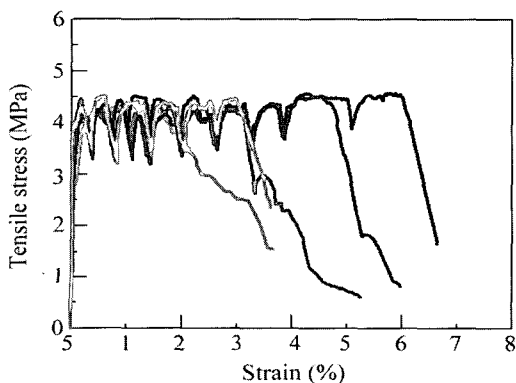


Fig. 5. Direct tensile stress - strain curve of ECC (C-method)

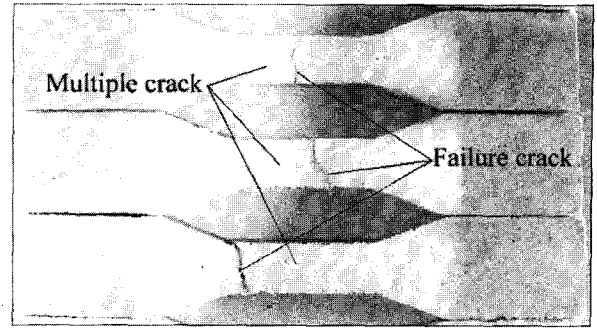


Photo 8. Example of multiple crack during tensile test

hardening behavior)을 나타내었다. 또한, Photo 8은 직접인장 시험 종료후 시험체에 발생된 멀티플크랙(Multiple crack)의 일례로, 모든 시험체에서 미세균열이 안정적으로 발생하였다.

3.2 복합열화촉진실험에 의한 보수성능 평가

1) 중성화깊이 및 염화물이온 침투깊이

Fig. 6 및 Fig. 7은 복합열화촉진실험에 의한 각 공법별

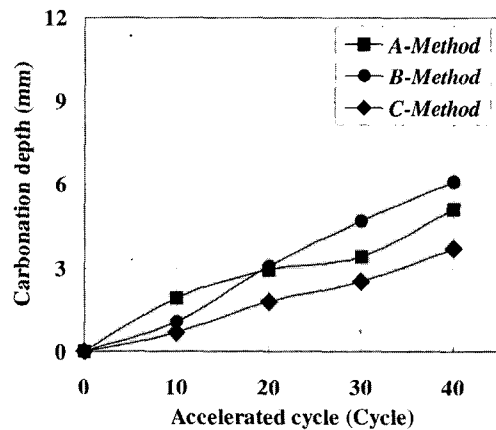


Fig. 6. Carbonation depth

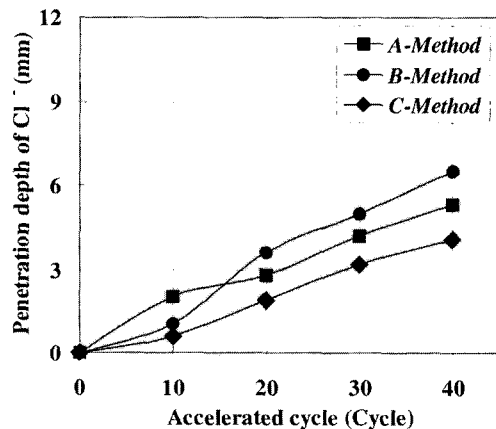


Fig. 7. Penetration depth of Cl⁻

단면복구재의 중성화깊이 및 염화물이온 침투깊이를 나타낸 것으로, 단면복구재의 종류에 관계없이 복합열화 촉진사이클이 증가될수록 중성화깊이 및 염화물이온 침투깊이도 직선적으로 증가되고 있음을 알 수 있다.

또한, 중성화 및 염해에 대한 저항성은 전반적으로 C공법이 가장 우수하고, 다음으로 A공법, B공법의 순으로 우수하게 나타나 현재 국내에서 개발되었거나 실용화 된 단면복구재는 제품의 종류에 따라 물질투과저항성이 비교적 큰 차이를 보임을 확인할 수 있었다.

한편, C공법에 사용된 단면복구재의 압축강도는 B공법에 비하여 다소 낮은 수준을 보였으나 중성화 및 염해에 대한 저항성은 오히려 양호하게 나타났으며, 이는 혼입된 섬유(PVA섬유)에 의해 압축강도는 다소 저하되나 섬유와 시멘트매트릭스의 계면이 일체화되고 이로 인해 물질투과저항성은 그대로 유지할 수 있었기 때문인 것으로 판단된다.

2) 철근부식면적율

Fig. 8은 복합열화촉진실험에 의한 각 공법별 단면복구재에 매립된 철근의 부식면적율을 나타낸 것으로, 보수재료의 종류에 관계없이 철근의 부식은 복합열화 10사이클까지는 전혀 발생하지 않았으나, 30사이클 이후에 비교적 급격히 발생하고 있으며, 특히 40사이클에서의 부식면적율이 큰 폭으로 증가되는 것을 알 수 있다.

한편, 철근부식에 대한 저항성은 C공법>A공법>B공법의 순으로 우수하게 나타났으며, 이러한 경은 단면복구재의 중성화 및 염해에 대한 저항성과 유사하게 나타났다.

3.3 장기현장폭로실험에 의한 보수성능 평가

1) 외관관찰

Table 5는 폭로재령 12개월 및 36개월에 있어서 각 공법

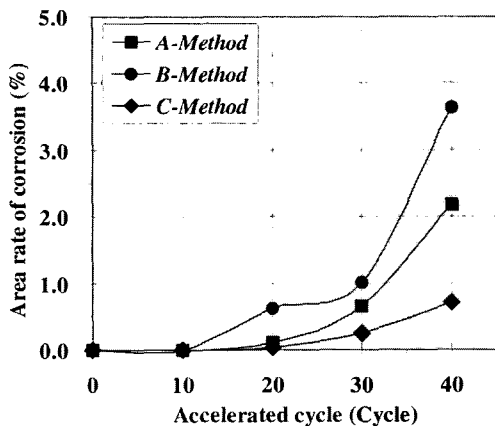


Fig. 8. Corrosion area rate of rebar

별 폭로시험체의 표면외관을 나타낸 것으로, A공법 시험체의 경우 폭로재령 12개월에 있어서 모체콘크리트 표면(즉, 철근 비노출부위)을 덮고 있는 단면복구재(두께 10mm)에 Photo 9(a)와 같이 유해한 매크로크랙이 발생하였고, 더욱이 보수부위(즉, 철근의 노출부위)의 단면복구재에 있어서도 Photo 9(b)와 같이 다수의 미세크랙이 발생되었다. 이는 A공법에 사용된 단면복구재가 직사광선 및 바람 등에 의한 건조수축에 의해 발생된 수축균열이라 판단된다.

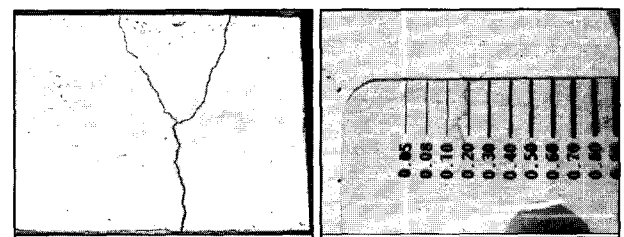
한편, B공법 및 C공법에 있어서는 표면에 약간의 이물질 등 표면오염이 발생되었을 뿐 외관관찰상 유의할 만한 결함은 발생되지 않았다.

2) 철근부식특성

Table 6은 폭로재령 36개월이 경과된 후 폭로시험체의 단면을 절단하여 발취한 철근의 부식상태를 도식화 한 것이며, Fig. 9는 이를 기초로 한 철근의 부식면적율 및 중량감소율을 나타낸 것이다. 여기서, Rebar-I은 완전매립, Rebar-II는 반노출, Rebar-III은 완전노출을 각각 나타낸다(Fig. 3 참조). 즉, 각 공법을 적용한 모의부재를 비례염분의 영향을 많이 받는 해양환경하에 36개월간 폭로시킨 결과, 철근부식면적율은 B공법>A공법>C공법의 순으로 크게 나타났으며, 이러한 경향은 복합열화촉진실험에 의한 철근부식특성과 유사한 경향을 보였다.

Table 5. Surface of exposed specimens

Method	Age : 12	Age : 36
A		
B		
C		



(a) Macro crack

(b) Micro crack

Photo 9. Example of Re-deterioration (A-method)

Table 6. Corrosion area of reclaimed rebar

Method	Rebar	Corrosion area
A	I	
	II	
	III	
B	I	
	II	
	III	
C	I	
	II	
	III	

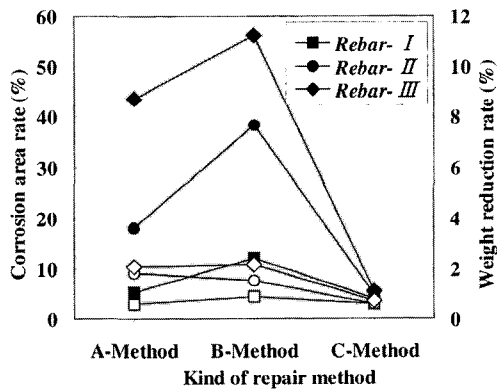


Fig. 9. Corrosion area rate and weight loss rate of rebar

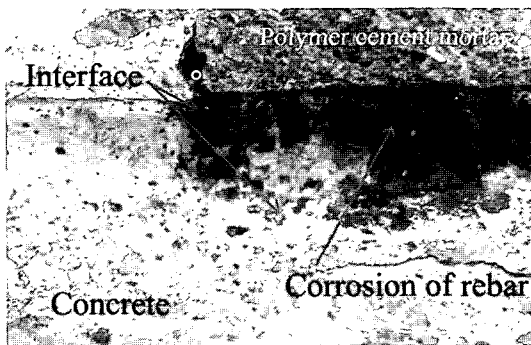


Photo 10. Example of specimen section after cutting (B-method)

또한, 동일 공법에 있어서 철근의 매립위치에 따른 철근 부식면적율은 Rebar-III(완전노출)>Rebar-II(반노출)>Rebar-I(완전매립)의 순으로 보수부위에 노출(즉, 치핑부분)된 철근

의 부식면적율이 크게 나타났다. 이는 Photo 10에 나타난 바와 같이 보수부위에서와 경계면에서의 철근부식이 비교적 집중되었기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 철근의 중량감소율은 부식면적율과 유사한 경향을 보였지만, 부식면적율에 비해 그 차이는 매우 미미한 것으로 나타났다. 이와 같이 철근중량감소율에서의 차이가 미미한 것은 폭로재령 36개월까지 발생된 철근의 녹이 대부분 점녹의 형태를 띠고 있기 때문으로 사료되며, 향후 보다 장기적인 폭로데이터의 확보가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서 복합열화축진실험 및 장기현장폭로실험에 의해 노후된 RC구조물용 보수공법의 보수성능을 실험적으로 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 염해, 중성화, 온도변화 및 건습반복이 복합적으로 작용하는 복합열화축진실험장치에 의해 단면복구재로 주로 사용되고 있는 폴리머시멘트모르타의 보수성능을 평가한 결과, Cl⁻ 및 CO₂의 침투깊이와 매립된 철근의 부식 특성은 폴리머시멘트모르타의 종류에 따라 비교적 큰 차이를 보이고 있으며, 본 연구에서 사용한 복합열화축진장치에 의해 보수재료의 철근부식특성을 단기간에 평가하는 것이 가능하였다.
- (2) 비래염분의 영향을 비교적 많이 받는 해양환경하에서 각 보수공법을 적용한 폭로시험체를 장기간 현장폭로한 결과, 폭로재령 12개월에 있어서도 일부의 보수공법에서는 건조수축 등에 의한 유해한 균열이 표면피복재 및 단면복구재에서 관찰되었다.
- (3) 또한, 폭로재령 36개월에 있어서 폭로시험체를 파괴하여 내부에 삽입된 철근의 부식특성을 평가한 결과, 보수공법의 종류에 따라 비교적 큰 차이를 보였으며, 이러한 경향은 복합열화축진실험과 유사하게 나타나 복합열화축진실험에 의해 현장에서의 장기성능 평가가 유효할 것으로 판단된다.
- (4) 균열제어성능 및 물질투과저항성이 우수한 ECC를 단면복구재로 사용한 보수공법(C공법)의 경우 기존의 폴리머시멘트모르타를 사용한 경우에 비해 탁월한 보수성능을 발휘하는 것을 축진실험 및 장기폭로실험에 의해 검증할 수 있었다.

감사의 글

본 연구의 일부는 건설교통부 2001년도 건설기술연구개발사업(E00-01)에 관한 연구결과이며, 연구진행 및 재료공급에 협조해주신 (주)AMS엔지니어링에 깊은 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김무한 외, 복합열화 환경하에서의 중성화 및 염화물이온 확산특성이 철근부식에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 가을학술발표논문집, 제23권 제2호, 2003.10, pp.455-458.
2. 日本コンクリート工學協會, 複合劣化コンクリート構造物の評價と維持管理計劃研究委員會, 2001.05
3. 日本コンクリート工學協會, 콘크리트構造物の補修工

- 法研究委員會報告書(III)-補修工法の性能評價のための暴露實驗-, 1996. 10, pp.1-44.
4. R.T.L Allen et al, The repair of concrete structures, 1993, pp.15-32.
5. Hidenori Hamada et al, Chloride diffusion, microstructure and mineralogy of concrete after 15years of exposure in tidal environment, ACI material journal, 2002. 6, pp.256-263.
6. 日本建築學會, 鐵筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)同解説-付2.補修工法の補修効果評價試験(案), 1997, pp.203-216.
7. 日本コンクリート工學協會, 콘크리트診断技術'01[基礎編], 2001. 1, pp.156-159.
8. 日本構造物診断技術協會, 콘크리트構造物の非破壊検査マニュアル, 1995. 7, pp.26-39.
9. (주)AMS엔지니어링 기술자료 (www.eng-ams.com).
10. 日本コンクリート工學協會, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム, 高靱性セメント複合材料の性能評價と構造利用研究委員會, 2003. 12.