

폴리머 시멘트 모르타르의 철근부착력 평가를 위한 인발실험과 모델링

Bonding Properties of Steel-reinforced Polymer Cement Mortar Evaluated by Pull-off Test and FEM Modeling

박 동 천¹

노부토시 요네다²

조 봉 석^{2*}

Park, Dong-Cheon¹

Nobutosi Yoneda²

Cho, Bong-Suk^{2*}

*Department of Architectural Engineering, Korea Maritime and Ocean University, YoungDo-Gu,
Busan, 606-791, Korea^{1*}*

*Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan, Tokyo, 2-3-1, Japan²
Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST), Slag Utilization Researcher Team,
PoHang-Si, 790-600, Korea²*

Abstract

Chloride attack to reinforced concrete structures located in seaside can cause a serious problem of durability and maintenance during the service life. Corrosion of reinforced steel bars in concrete decreases the bond strength and finally causes the detachment of concrete cover. Polymer cement mortar is usually adopted to repair the deteriorated RC structures because of its strong bonding property. The recovered load-carrying capacity after the repair was simulated by non-linear FEM analysis. The properties of concrete, repairing materials, bonding materials and reinforced bar were used as input data. Four types of redispersible polymer powders were used as components of polymer cement mortar. Pull-off tests were carried out to examine the bond properties such as rigidity and strength. Effects of a corrosion inhibitor and the loss of reinforced bars due to the corrosion were also considered in this study. FEM modeling and analysis were conducted to propose the universal model. Physical bonding in the relationship between repair materials and steel reinforced bar is more dominant than chemical bonding.

Keywords : repair materials, bond property, pull-off test, polymer cement mortar, FEM analysis

1. 서 론

해안가에 위치한 철근 콘크리트 구조물의 열화는 염해의 영향이 지배적이며, 철근 부식이 발생할 경우 부식 팽창압에 의해 피복콘크리트가 박리되며 결과적으로 철근 콘크리트 구조물로서의 역학적 기능이 급격히 저하한다

[1]. 이에 대한 보수로 가장 직접적인 방법이 단면복구공법[2]이며, 주로 높은 부착성과 연성의 폴리머 시멘트 모르타르가 많이 사용된다. 하지만 재료선정에 있어 부착성에 치중한 나머지 역학적 적합성에 대한 검토가 부족한 실정이며, 이를 실험을 통하여 검증할 경우에도 보수재료의 역학적 특성 및 부착성이 평가되기 전에 부착계면 조정 편차가 부재 성능의 차를 좌우하는 경우가 많다 [3,4,5].

보수 후 부재의 내하성능 예측을 위해서는 철근과 기존 콘크리트 그리고 보수 모르타르와 부착계면(철근 및 기존 콘크리트와의 부착)의 특성을 입력값으로 하는 수치해석이 필요하다. 철근과 기존 콘크리트, 보수 모르타르의 물

Received : December 30, 2013

Revision received : May 13, 2014

Accepted : May 14, 2014

* Corresponding author : Cho Bong-Suk

[Tel:82-10-4327-5217, chos8@rist.re.kr]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

성 평가는 많은 실적을 확보하고 있는 반면 부착계면에 관한 연구실적이 부족하고 특히 보수재와 철근의 부착에 관한 연구는 전무한 상황이어서 해석에 의한 예측에 곤란을 겪고 있는 실정이다.

Table 1. Mix design of polymer cement mortar

Polymer cement ratio (%)	W/C(%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Fine aggregate (kg/m ³)	Deformer (g/m ³)
0					0
5	50	43.38	650.63	1,951.89	325.32
10					650.63
20					1,301.26

Table 2. Properties of redispersible polymer powder

	Apparent density(mg/l)	MFT(°C)	Tg(°C)
VVA	0.40± 0.10	0	14
EVA	0.35±0.10	10	45
PAE	0.35±0.10	32	9
CPAE	0.35±0.10	0	9

Table 3. Property of steel bar

Type of steel bar	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elasticity modulus (kN/mm ²)
D19/D16 Φ19/Φ16	368	544	193

Table 4. Components and mix in Series 1

Type of steel bar	Redispersible polymer type	Polymer cement ratio(%)
D19	VVA, EVA, PAE, CPAE	0,5,10,20

Table 5. Components and mix in Series 2

Components	Type
Steel bar	D19, D16, Φ16
P/C	0%, EVA 10%
Corrosion inhibitor	none, PCP, corrosion Inhibitor

본 연구에서는 단면복구 보수재료로 대표되는 폴리머시멘트 모르타르와 보강철근의 부착특성에 대한 범용성을 가진 모델구축을 목적으로 하였다. 일련의 철근인발 실험을 실시하고 측정결과를 토대로 유한요소 해석을 실시함으로써 부착강성과 강도로 구성된 모델을 구축하였다.

실험에서 하중에 의한 보강근의 슬라이딩 변위로부터 응력 변형도 곡선을 구하고 부착강성과 부착강도를 도출하여 부착특성으로 규정하였다[4].

폴리머 시멘트 모르타르 속의 분말수지 함유량, 철근의 조건 등 다양한 실험변수를 상정하여 실험을 실시하였으

며 범용성 있는 연구결과로 확장하기 위하여 일련의 시험결과에서 도출한 부착특성을 비선형 수치해석에서 부착요소의정보로 입력하였다. 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 해석모델의 신뢰성을 검증하였다.

2. 실험개요

폴리머 시멘트 모르타르의 물성변화와 부착특성의 관계를 도출하기 위하여 분말수지 함유량 및 철근의 종류, 부식유무, 방청제 사용을 실험변수로 하였다.

2.1 사용재료

2.1.1 보수재료

보수재료는 폴리머 시멘트 모르타르를 사용하였다. 분말수지는 재유화형 타입으로서 VVA(Vinyl Acetate /VelVa /Acrylate), EVA(Vinyl Acetate/Ethylene), PAE(Poly Acrylic Acid Esters), CPAE(Cellulose Poly Acrylic Acid Esters) 4종을 사용하였다. Table 1에 배합상세를 나타내었으며 Table 2는 재유화형 분말수지의 물성이다.

2.1.2 철근 및 스파이럴 전단 보강근

철근의 마디, 리브의 유무에 따른 부착성능 평가를 위하여 원형철근과 이형철근 2종을 사용하였다. 철근의 역학적 특성을 Table 3에 나타내었다. 그리고 시편의 취성 파괴 방지를 위해 스파이럴 전단 보강근을 사용하였으며 치수는 내경 120mm에 피치 20mm의 것을 사용하였다.

2.2 시험체 제작

시험체의 제작 관련 사진을 Figure 1에 나타내었다. 한 변이 150mm이고 철근을 연직방향의 120mm 부착길이가 되도록 제작하였다. 비정상적 균열발생을 막기 위해 본 드프리를 설정하였으며, 상하 15mm정도 비닐테이프로 감았다. 나무 거푸집을 제작하여 3개의 시험체가 동시에 제작가능토록 하였다.

24시간 후 탈형하여 28일간 수중(20°C)에서 양생하였다. 인발시험을 실시한 90일까지 온도 20°C, 상대습도 60%의 기중에서 양생하였다.



Figure 1. Preparation of test specimens

2.3 철근 인발시험

Figure 2에 철근 인발시험장치의 개요도와 실험 사진을 나타내었다. 철근을 하향으로 인발하면서 로드셀로부터 하중을 측정하였다.

Table 5. Detailed information of Series 2 and experiment

test number	steel bar	P/C	corrosion inhibitor	corrosion
test 1	D16	EVA10%	none	none
test 2	Φ16	EVA10%	none	none
test 3	D19	EVA10%	none	none
test 4	D19	EVA10%	PCP	none
test 5	D19	EVA10%	PCP	exist
test 6	D19	EVA10%	commercial corrosion inhibitor	none
test 7	D19	EVA10%	none	exist

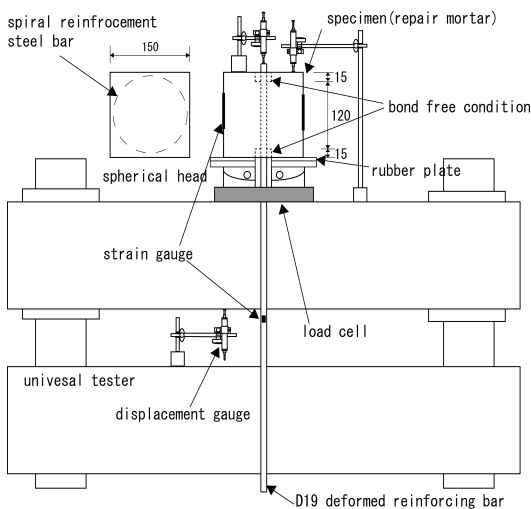


Figure 2. Pull-off test set-up

시리즈 1 : D19 철근을 이용하였으며 분말수지 함유에 따른 부착특성을 평가

시리즈 2 : 철근의 종류 및 부식 및 방청제 사용 유무의 영향 평가

- 철근의 종류 : 원형철근과 이형철근
- 철근의 직경변화
- 철근의 방청처리 유무

철근부식은 전식으로 평균 19.67%정도 발생시켰으며 방청제 PCP는 분말수지 EVA와 시멘트를 이용한 페이스트를 도포한 경우이며, 시판 방청제의 경우 Sodium nitrite (NaNO₂) 계 방청제를 사용하였으며 사용 규정에 맞게 얇게 도포하여 건조한 상태에서 시험체를 제작하였다. Table 4과 Table 5에 실험의 상세를 나타내었다. Table 6에 시리즈2의 실험조건을 구분하여 기술하였다.

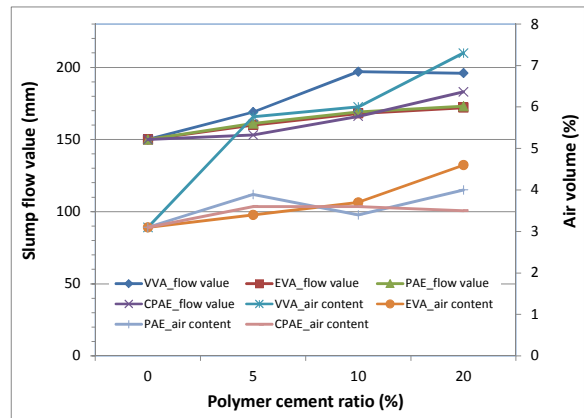


Figure 3. Slump flow and air volume of PCM

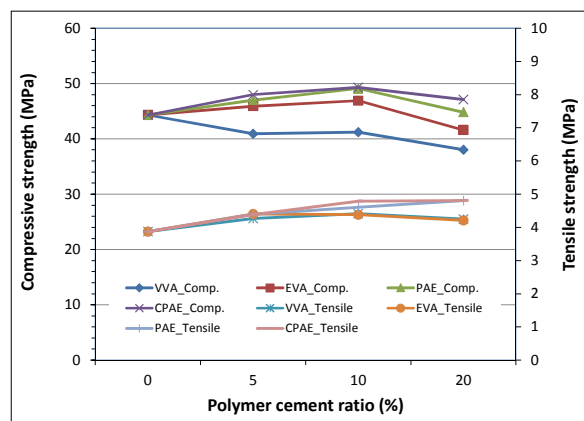


Figure 4. Compressive and tensile strengths of PCM

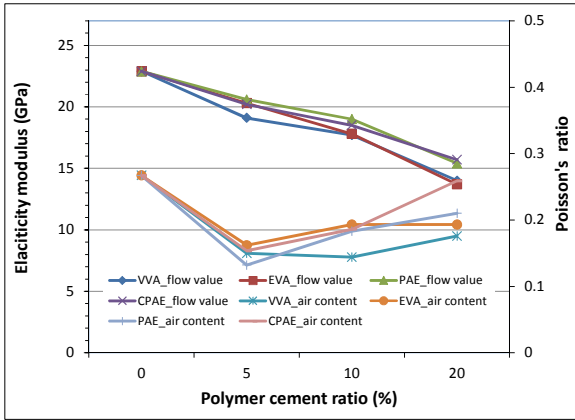


Figure 5. Elasticity modulus and Poisson's ratio of PCM

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳기 전 보수재료의 물성

Figure 3에 폴리머 시멘트 모르타르의 슬럼프 플로값과 공기량의 결과를 나타내었다. 범례는 사용한 폴리머의

종류 - 함유율 또는 측정항목으로 기술하였다(예 : PAE_20%는 PAE폴리머의 시멘트 중량비 20% 함유를 의미함). 동일 물시멘트비의 배합에서 무함유의 경우의 플로 150mm, 공기량 3.1%는 분말수지 함유가 증가할수록 공기량의 증가와 함께 플로 값의 증가하는 경향을 나타냈다. 같은 량의 소포제를 사용하였음에도 불구하고 VVA 분말수지를 혼입한 경우 20%의 함유에 플로 196mm에 공기량이 7.3%에 이를 정도로 그 값은 탁월하였다.

3.2 보수재료의 역학적 특성

Figure 4에 폴리머 시멘트 모르타르의 압축강도와 인장강도를, Figure 5에 탄성계수와 포아송비를 나타내었다. 시험규준은 KS F 2476(폴리머 시멘트 모르타르의 시험 방법)에 준하여 실시하였다. 압축강도는 VVA 분말수지 혼입 모르타르 이외에는 10%함유까지 증가하는 경향을 나타내다가 20%에서는 다소 낮아지는 결과가 얻어졌다. VVA 분말수지를 함유한 경우 전반적으로 다소 낮아졌다. 이는 굳기 전 모르타르의 특성이 공기량과 슬럼프

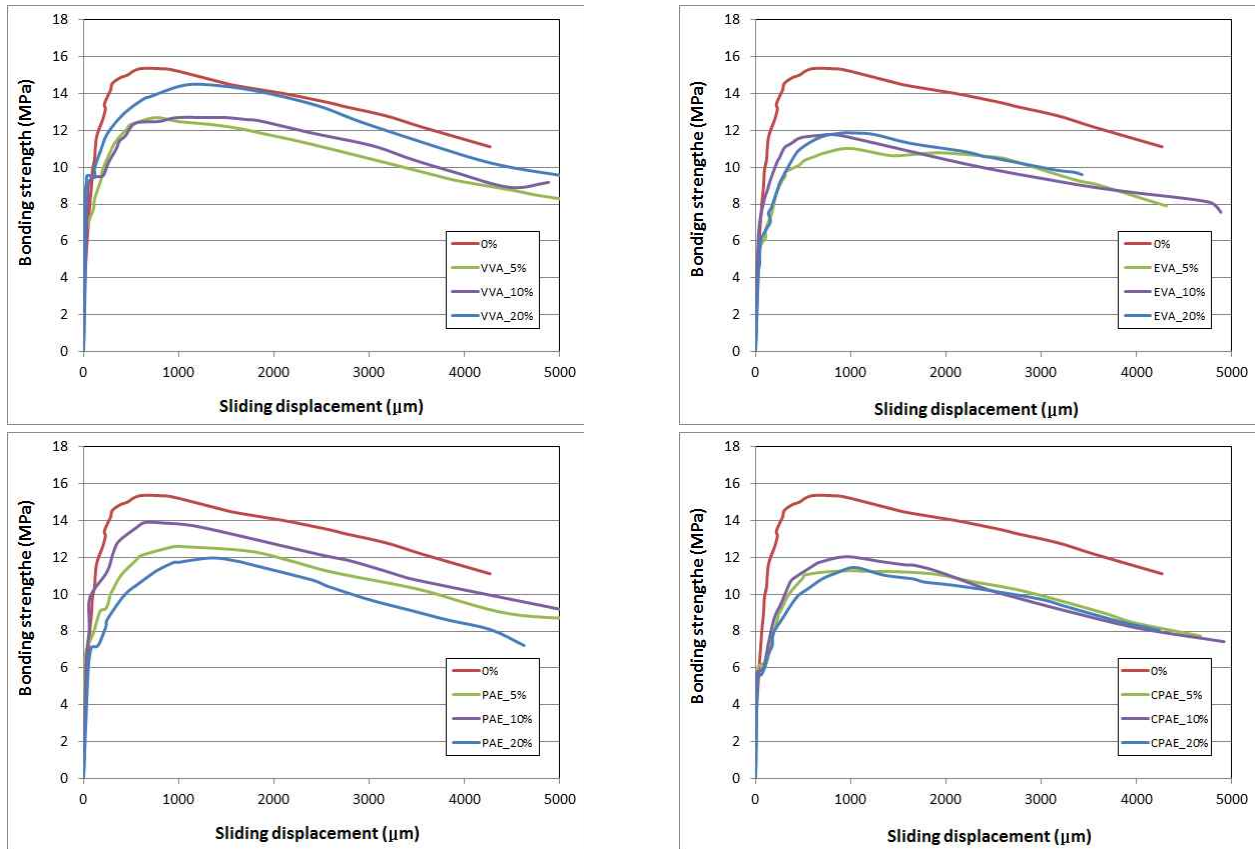


Figure 6. The results of pull-off test

플로 값과 무관하지 않는 것으로 사료되며, 다소 많은 공기의 유입이 강도저하로 이어진 것으로 사료된다. 인장강도는 분말수지의 종류에 상관없이 함유량의 증가에 비례하면서 최대 약 1MPa가량 증가하였다. 반면 탄성계수는 분말수지 함유로 다소 낮아졌고 포아송비는 5% 함유에서 최저를 나타낸 후 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

3.3 철근 인발시험

3.3.1 시리즈 1 _ 부착응력과 슬라이딩 변위 곡선

Figure 6에 부착응력과 슬라이딩 변위의 측정 결과를 나타내었다. 분말수지 함유량의 증가에도 불구하고 그다지 부착강도가 증가하는 현상은 보이지 않았다. 슬라이딩 변위는 최대 6000 μ m에 이를 정도로 부착인성이 큰 것으로 평가되었다. 최대 부착강도의 1/3~1/2 정도의 단계에서 약간의 응력저하와 슬라이딩이 발생한 후 다시 증가하는 경향이 관찰되었다. 이것은 스파이럴 보강근의 작용이 미치지 않은 한도에서 약간의 취성과파괴가 발생하였으나 곧 보강근의 구속 영향으로 인성을 나타내며 지속적으로 증가하는 경향이 나타났다. 분말수지 함유율에 따른 부착 특성 파악은 힘들었으며 비교적 PAE 분말수지를 함유한 경우 다소 높은 부착력을 발휘하였다.

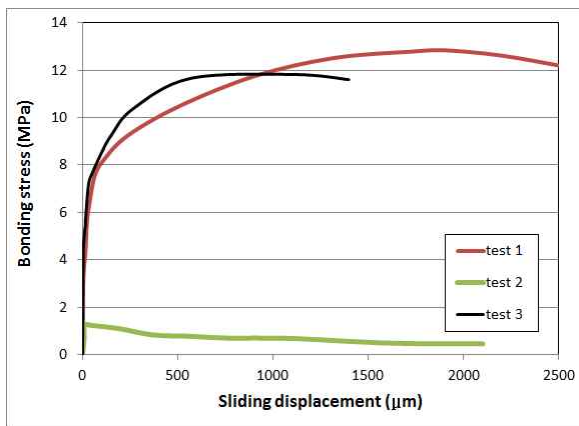


Figure 7. Bonding stresses under different reinforcement types and diameters

3.3.2 시리즈 2

1) 철근의 종류 및 직경의 영향

Figure 7에 철근 종류 및 직경에 따른 미끄럼변위와 강도의 상관관계를 나타내었다. test 1은 D16 철근을 이용

한 시험체이며, test 2는 ϕ 16를 이용한 시험체의 인발시험 결과이다. 두 시험체 모두 EVA 10% 재유화형 분말수지를 혼입 시멘트 모르타르를 이용하여 제작된 시험체이다. 원형 철근(test 2)을 이용한 경우 1.3MPa이하의 부착강도를 나타내었으며, 거의 부착요소에서 인성을 발휘하지 못한 채 미끄러지는 결과가 나왔다. 반면 마디와 리브가 있는 test 1은 13MPa에 이를 정도로 강한 부착력을 나타내었다. 폴리머 수지의 화학적 부착력은 그다지 크지 않으며 대부분 기계적 부착(마디와 리브에 의한 앵커링 작용)에 의한 것으로 사료된다. 철근의 직경이 다소 큰 test 3의 경우에는 마디와 리브의 크기도 커지며, 부착요소의 강성도 동시에 증가하였다. 하지만 부착강도 및 인성은 큰 변화가 없는 것으로 평가되었다.

2) 방청처리 및 부식상황의 영향

Figure 8에 철근 부식 및 방청제 사용유무에 따른 부착 특성 변화를 나타내었다. test 3과 test 7은 철근부식 유무에 따른 비교로서 방청처리가 없는 경우 철근 부식에 따라 4MPa 정도 강도가 저하하는 것을 알 수 있었다. 방청제의 종류에 따라서는 PCP(test 4)를 사용한 경우가 시판 방청제를 사용한 경우(test 6)에 비하여 낮은 부착강도를 나타내었다. 하지만 두 경우 모두 방청제를 사용하지 않은 test 3에 비해서는 낮은 강도를 나타내었으며, 방청제가 부착강도에 미치는 영향이 긍정적이지 않다는 것을 알 수 있었다. PCP방청제를 사용한 경우에도 철근부식이 발생한 test 5에서 강도저하를 확인할 수 있었다.

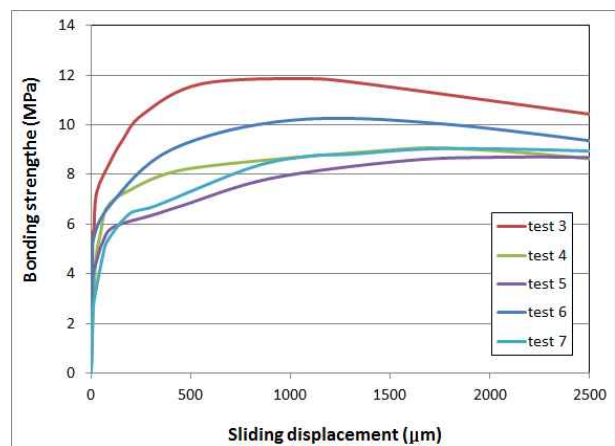


Figure 8. Bonding stresses under different rates of corrosion and the application of corrosion inhibitor

Table 6. Bond elasticity and strength produced by FEM analysis

polymer content (%)	bond elasticity				bond strength			
	VVA	EVA	PAE	CPAE	VVA	EVA	PAE	CPAE
0			49				12.5	
5	53	43	48	42	11.3	10.5	11.9	10.4
10	40	59	62	44	10.6	12.5	13.6	12.5
20	51	33	27	31	11.6	11.4	12.0	11.6

4. 유한요소 해석 및 고찰

4.1 해석의 개요 및 모델

본 해석에서는 폴리머시멘트 모르타르에서 분말수지 함량을 달리하여 제작된 시험체의 부착요소 특성을 유한요소 파라메타 해석을 통하여 산출하였다. 유한요소 해석은 슬라이딩 변위를 부착두께로 나뉘서 변형율로 하였으며 부착요소의 특성은 강성과 강도를 산출하였다. 해석의 메쉬는 폴리머시멘트 모르타르와 철근, 부착요소와 본드 프리로 구성하였다.

실험결과는 인발하중과 자유단의 슬라이딩변위 곡선으로 나타나며, 유한요소법 이용한 감도 역해석에 의해 부착요소의 특성을 산출하였다. 부착요소는 본드 인터페이스 요소를 사용하였다. 비선형 유한요소 해석에서 폴리머시멘트 모르타르와 철근은 본 연구에서 측정된 값을 입력하였고, 부착특성은 부착강성과 부착강도로 나뉘서 고려하였다. 본드 인터페이스 요소의 구성식은 최대 부착강도 (τ_{max})와 부착강성(D_s)으로 구성되도록 하였다.

4.2 감도 역해석을 통한 부착특성 도출

Figure 9에 시리즈 1 시험체의 실험값과 해석값의 비교를 나타내었다. 초기에는 폴리머 시멘트 모르타르와 철근의 앵커링 작용 직전의 슬라이딩이 발생한 후 본격적으로 앵커링이 작용하며 최대강도에 이른 후 파괴와 동시에 강도저하 및 미끄럼이 급격한 증가가 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 보수재료로 사용된 폴리머 시멘트 모르타르와 철근의 부착특성을 모델링하기 위해 폴리머의 종류와 함유율, 철근의 조건을 실험 변수로 하여 철근인발시험을 실시하였으며 비선형 유한요소 해석을 통하여 부착계면의 성능을 강성과 강도로 구분하여 특성 지었다. 이상의 실험과 해석을 통하여 얻은 결과를 정리하면 아래와 같다.

- 1) 인발시험에 의한 부착강도는 분말수지 종류 및 함유율에 따른 뚜렷한 차이는 없었으나 PAE 분말수지를 함유한 경우 상대적으로 다소 높은값을 나타내었다.
- 2) 철근부식에 의해 철근의 마디와 리브에 결손이 발생할 경우 건전 철근을 사용한 경우보다 부착강도가 저하하며 방청제를 사용한 경우에도 같은 경향을 나타내었다. 따라서 부착은 대부분 화학적 부착보다 기계적 앵커링에 의해 발생하며 방청제의 사용에 의

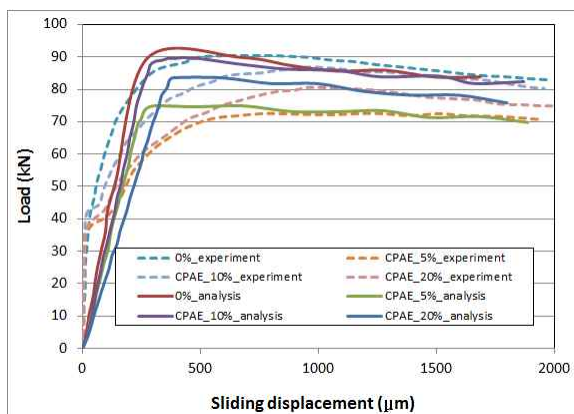
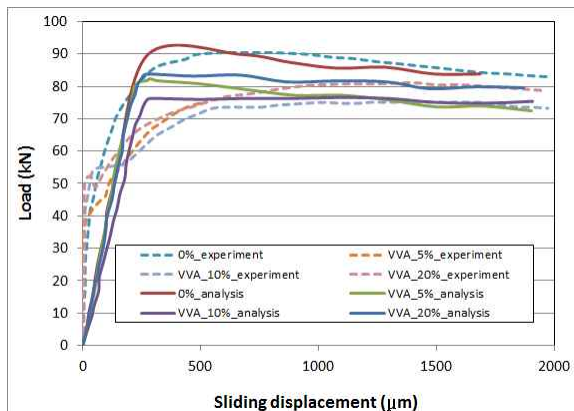


Figure 9. Comparison of simulated and observed results of Series 1

해서는 부착강도 향상을 도모할 수 없다는 것을 알 수 있었다.

- 3) 보수에서 기존에 철근부식이 발생하여 부식 생성물을 제거하고 방청제를 사용하면 건전 철근에 비해 부착강도가 저하하며, 보수재로 사용된 폴리머 시멘트 모르타르와 동일 성분의 PCP를 사용한 경우가 Sodium nitrite (NaNO_2) 계 시판 방청제를 사용한 경우보다 낮은 강도를 발현하였다.
- 4) 비선형 FEM 감도 역해석을 통하여 부착요소의 강성 및 강도를 도출할 수 있었으며 이를 이용한 범용성 있는 해석적용이 가능할 것으로 사료된다.

요 약

단면수복 보수를 실시한 RC조 부재의 내하성능 회복을 예측 평가하기 위하여 FEM해석이 빈도 높게 사용되고 있으나 부착에 대한 정보가 부족하여 정확도 있는 예측이 힘든 실정이다. 수치해석의 입력데이터가 되는 철근과 폴리머 시멘트 모르타르의 부착특성을 평가하기 위하여 폴리머 시멘트 모르타르를 이용한 일련의 인발실험을 실시하였다. 동시에 범용성있는 해석결과 활용을 위하여 부착특성을 부착강성과 부착강도로 정의하고 비선형 FEM 감도 역해석을 실시하였다. 결과를 요약하면 보수재료의 화학적 부착보다 물리적 부착이 지배적이며 폴리머 분말수지의 함유에 의해 다소 부착계면의 성능이 저하하는 것을 알 수 있었다. 부착계면의 물성은 강성과 강도로 구분하여 모델화하는 것이 합리적인 것으로 사료된다.

키워드 : 보수재료, 부착특성, Pull-off실험, 폴리머 시멘트 모르타르, 유한요소해석

Acknowledgement

This research was supported by a grant(10 RTIP B01) from Regional Development Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government

References

1. Kim MH, Kwon YJ, Kim YR, Kim JH, Jang JH, Cho BS. Corrosion Properties of Reinforced Concrete with Types of Surface Cover and Covering Depth under the Combined Deterioration Environments. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2004 March 31; 4(1): 119-26.
2. Ko JS, Lee SB, Seo CH. Evaluation of Injection Property on the Crack Repair Method by installing the packer with Right Angle Drill Type in RC Structure. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2006 June 30;6(2): 91-8.
3. Jo YK. Bond Strength and Corrosion Resistance of Coated Reinforcing Bar Using Hybrid-Type Polymer Cement Slurry. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2008 June 30; 8(3): 93-100.
4. Bae SC, Hyung WG. Properties of Polymer Modified Mortars Using Re-dispersible Polymer Powders. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2013 June 30;13(3): 235-41.
5. Jo YK. Bond Strength and Corrosion Resistance of Coated Reinforcing Bar Using Hybrid-Type Polymer Cement Slurry. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2008 June 30;8(3): 93-100.
6. Lee HS, Noguchi T, Tomosawa F. Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Research*, 2002 August 31;32(8): 1313-18.