

휨하중을 받는 콘크리트 보수재의 적합성기준 평가

The Compatibility Evaluation of Concrete Repairs under Bending Load

이 웅 종^{*} 정 연 식^{**} 양 승 규^{***} 유 재 상^{****} 이 종 열^{*****}
Lee, Woong Jong Chung, Youn Sik Yang, Seung Kyu Ryu, Jae Sang Lee, Jong Ryul

ABSTRACT

The compatibility of concrete repairs is proposed by D. Cusson et al. and N. K. Emberson et al. But this is the general compatibility of concrete repairs. This study is actualized the general compatibility of concrete repairs on the flexural specimen under bending load. This study is obtained following results. 1) As a results of analysis for repair effects on failure shape, debonding between concrete and repairs, yielding load and ultimate/yielding ratio, the repair effects is ascertained that the repair R3 is much excellent than the repair R7, but on the other hand R7 is very high than R3 on the viewpoint of compressive strength, where repair R7, R3 is a product. 2) Therefore the compatibility of concrete repair proposed by D. Cusson et al. and N. K. Emberson et al. must be reanalyzed for structures types of column, beam, wall, slab et al.

1. 서론

콘크리트 구조물은 공용기간이 증가함에 따라 설계조건, 시공조건, 사용조건, 환경조건 등 복합적인 작용을 받아 노후화가 진행되며, 진단기술자의 판단에 따라 콘크리트 구조물의 내구년한을 증진시킬 목적으로 보수 및 보강방안을 수립하게 된다. 이 때 보수 및 보강공법 적용시 결손단면을 복원시키기 위한 행위로 단면복구재(보수재료)를 적용하는데, 우선적으로 콘크리트 모재와의 일체성을 확보할 수 있는 재료의 선정이 필요하다.

일반적으로 보수재료를 적용하는 손상부위는 콘크리트 모재에 비해 면적이 작고 내하력의 개념은 적용 받지 않는다. 그럼에도 불구하고 콘크리트 모재는 내구년한 동안에 이동하중 및 예상치 못한 충격하중 혹은 과하중을 받게 되면, 보수된 구조물은 구조체로서의 거동을 하게됨으로 콘크리트 모재와 보수재료간의 상호 거동은 무시할 수 없으며, 이는 내구성 측면에서도 중요한 요소이다. 한편 열화를 받은 콘크리트 구조물에 단면복구재를 적용할 때, 콘크리트 모재의 강도레벨에 적합한 보수재료의 강도레벨은 중요한 관심사가 되며, 검증이 필요한 핵심기술이다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 보수재료의 일반적인 적합성기준의 개념¹⁾에 근거하여 보수된 철근 콘크리트 휨시험체에 적용하여 적합성기준을 검증하고자 한다. 특히, 본 연구에서는 기초적인 연구로서 적합성기준 중에 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도 및 탄성계수에 대해 검토하였으며, 본 연구결과로부터 적용대상구조물(휨, 기둥 슬라브 등) 부위별 적합성 기준은 재해석되어야 함을 알 수 있었다

2. 열화콘크리트 단면복구용 보수재료의 적합성 기준과 실험내용

2.1 적합성을 고려한 단면복구재의 선정기준

단면복구재에 요구되는 특성은 보수가 행해지는 부위, 환경조건, 시공방법 등에 따라 여러 가지가

*정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 주임연구원, 공학박사
**정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 선임연구원, 공학박사
***정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 연구원
****정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 실장, 공학박사
*****정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 소장

있다. N. P. Mailvaganam²⁾ 등은 다음과 같은 4가지 사항에 적합한 보수재료를 선정하는 것이 바람직하다고 제안하였다. 1) 철근과 콘크리트의 결합에 의한 역학적 성질의 향상, 2) 두 재료의 열팽창계수가 거의 동등할 것, 3) 콘크리트의 철근방식 효과가 있을 것, 4) 콘크리트의 철근에 대한 내화피복적 기능을 가질 것 등이다. 한편, 보수재료의 보수효과를 장기간 유지하기 위해서는 표 1과 같이, 각각의 특성치마다 단면복구재와 콘크리트 모재와의 상대적인 대소관계를 갖으면서, 이런 적합성을 갖는 재료를 선정하는 것이 바람직하다고 D. Cusson 등과 N. K. Emberson 등이 제안하였다¹⁾.

표 1 단면복구재의 일반적인 적합성

특성치의 분류	R과 C의 관계	특성치의 분류	R과 C의 관계
건조수축	$R < C$	피로 성능	$R > C$
열팽창계수	$R \approx C$	크리프 계수(단면복구재에 압축이 작용)	$R < C$
탄성계수	$R \approx C$	크리프 계수(단면복구재에 인장이 작용)	$R > C$
포아송비	$R \approx C$	최종 변형률	$R > C$
조깅인장강도	$R > C$	점착성	$R \approx C$
압축강도	$R > C$	기공률(Porosity) · 전기저항성	$R \approx C$
휨 강도	$R > C$	화학 반응성	$R < C$

주) R : 단면복구재, C : 콘크리트 모재

2.2 실험내용

2.2.1 실험개요

일반적으로 단면복구재가 사용되는 부위는 철근의 피복두께 부족에 의한 단면 증설, 중성화, 염해 및 화재 등에 의해 손상을 입은 콘크리트 표면 등에 내하력은 문제가 되지 않은 열화 콘크리트구조물로 볼 수가 있다. 또한 보강공법 적용 전 결손단면에 단면복구재를 사용하기도 한다. 이러한 경우에 구조물의 설계상 보수재료 자체의 역할은 콘크리트 구조물의 내하력과 상관이 없을지라도 구조물이 장기적으로 여러 하중(이동하중, 충격하중 및 피로하중)을 받아 구조거동을 하게됨으로 콘크리트 모재와의 구조적 일체성은 중요한 관심사가 된다.

한편, 현행 보수재료를 단면복구용으로 사용될 때 보수재료의 선정기준은 가장 일반적이고 보편적인 특성치인 압축강도를 중심으로 종종 행해지고 있으며, 이것은 적합성기준 측면에서 이론의 여지가 많고 반드시 실험을 통하여 규명을 해야 할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구는 보수재료의 선정기준을 실험을 통하여 평가하고자 하며 접근방법으로서, 표 1의 적합성기준 중에서 휨하중을 받는 휨시험체를 대상으로 표 2와 같은 적합성기준만을 실험을 통하여 규명하고자 한다.

표 2 본 연구에서 고려한 단면복구재의 적합성 기준

특성치의 분류	R과 C의 관계	특성치의 분류	R과 C의 관계
탄성계수	$R \approx C$	압축강도	$R > C$
조깅 인장강도	$R > C$	휨강도	$R > C$

2.2.2 실험 인자 및 내용

본 연구에서는 표 2의 적합성기준을 휨시험체를 기준으로 평가하기 위한 실험인자 및 내용은 표 3과 같다. 콘크리트의 강도수준은 3수준으로 설정하였고, 보수재료는 압축강도측면에서 강도레벨이 다른 2종류를 선정하였다. 결손단면 보수깊이는 실제 구조물에서 균열이 발생하였을 당시에 보수재료로 대체할 수 있는 균열의 임계깊이로 제안된 깊이로서 보 깊이의 30%를 실험변수 설정하였고³⁾, 휨시험체 하면 순지간에 대한 보수깊이비 실험변수는 4수준으로 설정하였다.

표 3 실험인자 및 내용

콘크리트강도수준	보수재의 강도수준	보수깊이	보수깊이	비고
3수준[200, 300, 400kg/cm ²]	2수준[300, 600kg/cm ²]	1수준[30%]	4수준[0%, 30%, 50%, 70%]	

2.2.3 시험체 현황 및 실험조건

휨시험체는 기본적으로 인장철근이 항복하여 휨파괴가 이루어지도록 설계를 하였고, 재하방식은 3점 휨재하방식을 채택하였으며, 전단지간(a/d)은 3.5로 설정하였고, 전단보강철근은 사용하지 않았다. 전체적인 시험체의 크기와 형상 개략도는 그림 1과 같으며, 인장철근량은 평형철근비의 콘크리트 압축강도 수준별로 12~19%만을 사용하여 인장철근이 콘크리트 압축파괴이전에 먼저 항복하도록 설계하였다.

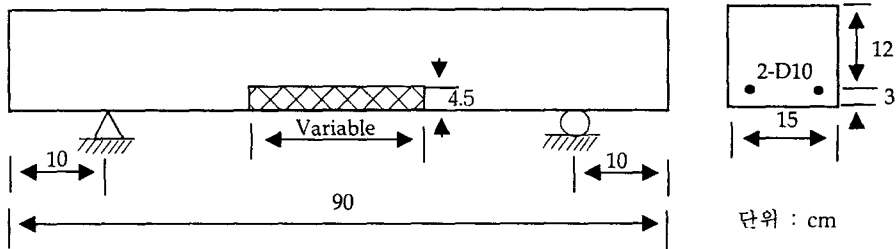


그림 1 휨시험체의 형상과 철근배근 현황

한편, 본 실험을 수행함에 있어, 실험오차를 가능한 한 최소화하기 위한 실험조건과 기준은 다음과 같다. 1) 휨시험체 제작시 결손단면을 유도하기 위해 스티로폼을 이용하였고, 콘크리트 강도수준에 상관없이 동일한 인장철근을 사용하였다. 휨시험체의 양생조건은 7일 습윤양생, 이후는 기건양생이다. 2) 보수재료의 시공조건은 결손부위를 위로하여 시공하였고, 보수단면의 면처리(chipping)은 실시하지 않고, 계면의 접착력을 증진하기 위해 프라이머를 도포하였다.

2.2.4 시험체 제작 내용

휨시험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도가 200, 300, 400kgf/cm²수준이 되도록 배합강도를 20%이상 할증하여 콘크리트를 실험실적으로 배합하였다. 굵은골재 최대치수는 25mm를 사용하였으며, 콘크리트 모재를 만들기 위한 배합설계표는 다음 표 4와 같다. 콘크리트 강도수준별 기호는 N2, N3, N4로 명명하였다.

표 4 콘크리트 배합비

시험체명	단위재료량(kgf/m ³)					
	물-시멘트비(%)	잔골재율(%)	시멘트(kgf/m ³)	물(kgf/m ³)	잔골재(kgf/m ³)	굵은골재(kgf/m ³)
N2	57	47	340	195	821	937
N3	46	44	441	201	730	930
N4	38	42	553	209	653	895

국내에 유통되는 무기계의 보수재료는 수십 종에 이르며, 보수현장별 시공여건(기둥의 결손단면, 슬래브하면의 결손단면 등)에 따라 보수재료의 물성(특히 유동성)이 서로 다르기 때문에 본 실험에서는 단순히 압축강도측면에서 강도레벨이 다른 2종류의 보수재료를 모르타의 28일 압축강도가 300, 700kgf/cm²을 만족하는 제품을 선정하였으며, 기호는 각각 R3과 R7로 명명하였다.

휨시험체 제작은 1회 12개씩 총 24개의 시험체를 제작하였으며, 시험체 제작내용은 다음 <표 5>와 같다.

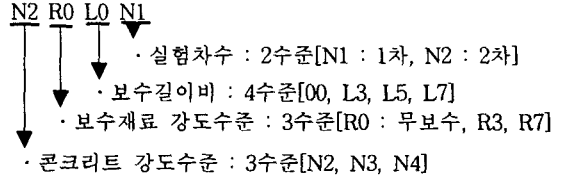
3. 콘크리트 및 보수재료의 기초 물성평가결과 및 시험체의 하중재하방법

3.1 콘크리트 모재 및 보수재료의 기초물성평가 결과 및 특성치 비교결과

콘크리트 및 보수재료의 기초 물성평가 결과는 표 6과 같다. 한편, 보수재료의 강도레벨을 선정

표 5 험시험체 제작 내용

구분	콘크리트 모재	보수재	보수 깊이비	보수길이비	시험체 수
1차 제작	N2, N3, N4	R7	30%	0%, 30%, 50%, 70%	12개
2차 제작	N2, N3, N4	R3	30%	0%, 30%, 50%, 70%	12개



할 때는 모르터의 압축강도 측정결과(큐빅몰드 5×5×5)에 의하여지만, 본 실험에서는 콘크리트용 공시체(φ10×20)몰드를 제작하여 압축강도, 탄성계수, 조괸인장강도 및 휨강도를 측정한 결과이다.

콘크리트 모재와 보수재료의 특성치 레벨 비교분석 결과는 표 7과 같고, 분석결과에 의하면, 압축강도는 콘크리트 모재보다 보수재 R7이 가장 크고 R3이 가장 작은 것으로 분석되었고, 휨강도는 콘크리트 모재보다 보수재료(R7, R3)가 우수한 것으로 분석되었다.

표 6 콘크리트 및 보수재료의 기초물성평가 결과

시험체명	압축강도 (kgf/cm ²)			탄성계수 (×10 ⁵) (kgf/cm ²)			조괸인장강도 (kgf/cm ²)			휨강도 (kgf/cm ²)
	3일	7일	28일	3일	7일	28일	3일	7일	28일	28일
N2	161	255	343	2.07	2.66	2.83	16	21	26	37
N3	218	343	452	2.38	2.66	3.14	21	24	33	43
N4	308	430	540	2.61	2.92	3.37	24	32	35	45
R3	102	186	268	0.78	1.46	2.33	12	25	34	47
R7	450	586	662	2.57	2.88	3.10	41	45	49	55

표 7 콘크리트 및 보수재료의 특성치비교

특성치의 분류	특성치 레벨
압축강도	R7 > N4 > N3 > N2 > R3
탄성계수	N4 > N3 > R7 > N2 > R3
조괸 인장강도	R7 > N4 > R3 > N3 > N2
휨강도	R7 > R3 > N4 > N3 > N2

3.2 하중재하방법 및 하중재하이력

험시험체의 가력방법은 하중제어방법이며, 반복하중을 재하하였으며 하중재하이력은 그림 2와 같다.

제어방법	재하속도	재하방법
하중제어방법	500kgf/sec	반복하중

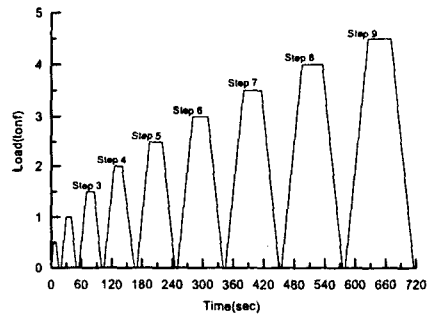


그림 2 하중재하이력

4. 험시험체 파괴실험 결과분석

4.1 파괴형상분석

콘크리트 강도수준별 무보수 시험체의 전반적인 파괴형상은 시험체의 지간 중앙부에서 초기에 휨균열이 미세하게 발생하고, 최종 극한하중 단계에서 갑자기 파괴되는 전단파괴 혹은 휨전단파괴로 발생하였다. 압축강도수준이 증가할수록 휨전단파괴에서 휨파괴에 가까운 파괴양상으로 나타났고, 이는 평형철근비에 대한 인장철근비가 작아서 나타난 것으로 볼 수 있다.

각 시험체별 파괴형태 및 계면분리정도를 정리한 결과는 다음 표 8과 같다. 분석결과에 의하면 보수재료의 종류에 따라 콘크리트 모재와 보수재료의 계면분리 양상은 크게 다른 것으로 나타났다. 보수재 R3이 보수재 R7보다 계면분리현상이 적게 나타났으며, 파괴형태도 무보수 시험체와 유사한 파괴형태를 나타냈다. 보수재 R7는 보수길이의 증가에 관계없이 거의 일정하게 휨균열이 발생하였으며 콘크리트 모재와 보수재사이에 계면분리현상이 심하게 발생하였다(사진 1참조). 한편 보수재 R3은 보수길이가 50%까지는 무보수 시험체의 파괴양상 유사하고, 계면분리현상도 R7에 비해 양호하며, 70%에서는 균열발생개소도 증가하고 계면분리현상도 증가하는 것으로 분석되었다(사진 2 참조).

표 8 시험체별 파괴형태와 계면분리 정도

시험체명	파괴형태	계면분리정도	시험체명	파괴형태	계면분리정도
N2R000N1	휨균열(초기)+휨전단균열(최종)	-	N2R000N2	휨균열(초기)+휨전단균열(최종)	-
N2R7L3N1	휨균열(초기)+휨전단균열(최종)	일부 계면분리	N2R3L3N2	휨균열+휨전단균열	계면분리 없음
N2R7L5N1	휨균열(최종)	전체 계면분리	N2R3L5N2	휨균열(초기)+휨전단균열(최종)	일부 계면분리
N2R7L7N1	휨균열(최종)	전체 계면분리	N2R3L7N2	휨균열	일부 계면분리
N3R000N1	휨균열(초기)+휨전단균열(최종)	-	N3R000N2	휨균열(초기)+휨전단균열(최종)	-
N3R7L3N1	휨균열(최종)	전체 계면분리	N3R3L3N2	휨균열+휨전단균열	일부 계면분리
N3R7L5N1	휨균열(최종)	전체 계면분리	N3R3L5N2	휨균열+휨전단균열	일부 계면분리
N3R7L7N1	휨균열(최종)	전체 계면분리	N3R3L7N2	휨균열	일부계면분리
N4R000N1	휨균열(초기)+휨전단균열(최종)	-	N4R000N2	휨균열+휨전단균열	-
N4R7L3N1	휨균열(최종)	전체 계면분리	N4R3L3N2	휨균열+휨전단균열	일부계면분리
N4R7L5N1	휨균열(최종)	전체 계면분리	N4R3L5N2	휨균열+휨전단균열	일부계면분리
N4R7L7N1	휨균열(최종)	전체 계면분리	N4R3L7N2	휨균열	일부계면분리

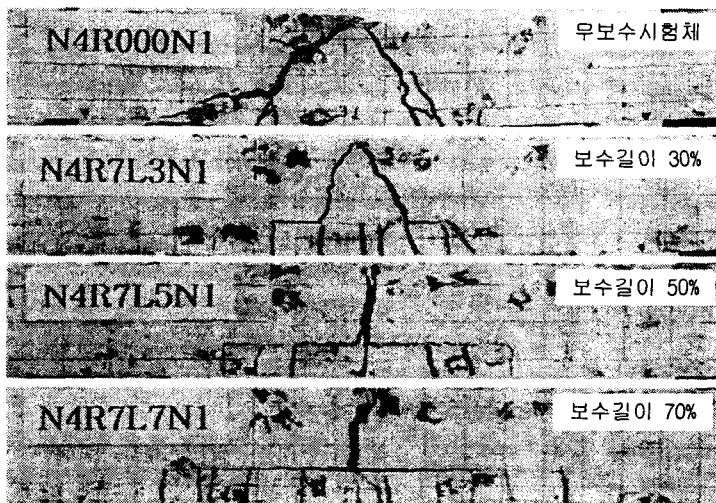


사진 1 보수재 R7에 대한 보수길이 증가에 따른 파괴형상



사진 2 보수재 R3에 대한 보수길이비 증가에 따른 파괴형상

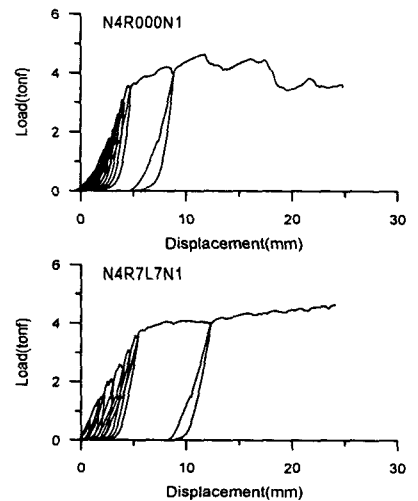


그림 3 전형적인 하중변위곡선(R7)

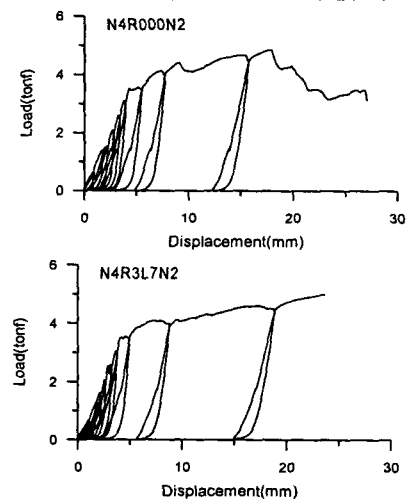


그림 4 전형적인 하중변위곡선(R3)

4.2 항복하중 비교분석

무보수 시험체와 보수 시험체의 항복하중 및 극한하중을 정리한 결과는 다음의 표 9와 같다. 보수효과를 분석해보면 보수재 R7은 평균 4%의 증진효과가 있었고, 보수재 R3은 평균 6% 정도의 보수증진 효과가 나타

표 9 항복하중 및 보수효과 분석

시험체명	항복하중 (tonf)	극한하중 (tonf)	보수효과 (항복하중비교)	시험체명	항복하중 (tonf)	극한하중 (tonf)	보수효과 (항복하중비교)
N2R000N1	3.699	4.379	100%	N2R000N2	3.675	4.367	100%
N2R7L3N1	-	-	-	N2R3L3N2	4.049	5.041	110%
N2R7L5N1	3.799	4.792	103%	N2R3L5N2	4.011	4.970	109%
N2R7L7N1	3.532	4.670	96%	N2R3L7N2	4.021	4.997	109%
N3R000N1	3.628	4.953	100%	N3R000N2	3.846	4.679	100%
N3R7L3N1	3.861	5.468	106%	N3R3L3N2	4.067	5.248	106%
N3R7L5N1	3.706	4.914	102%	N3R3L5N2	3.941	5.557	102%
N3R7L7N1	3.929	4.643	108%	N3R3L7N2	3.740	5.046	97%
N4R000N1	3.643	4.621	100%	N4R000N2	3.540	4.860	100%
N4R7L3N1	3.940	5.132	108%	N4R3L3N2	3.804	5.028	107%
N4R7L5N1	3.779	4.905	104%	N4R3L5N2	3.948	5.269	112%
N4R7L7N1	3.783	4.634	104%	N4R3L7N2	3.506	4.991	99%

타났다. 즉, 무보수 시험체에 비해 강도저하 내지는 강성의 저하현상은 나타나지는 않았다. 한편 보수 시험체의 보수길이에 따른 보수효과는 보수길이가 증가할수록 보수효과는 저하되었다. 항복하중에 대한 극한하중의 비를 분석하여 보면 다음 표 10과 같다. 분석결과에 의하면 보수재 R7은 평균적으로 무보수 시험체인 콘크리트 모재강도 N2만이 증가하였고 N3, N4는 감소하였다. 한편 보수재 R3은 무보수 시험체에 비해 평균적으로 증가했으며, 보수재의 강도증진효과를 확인 할 수 있었다.

표 10 초기항복하중에 대한 극한 하중비

콘크리트 모재 강도	극한하중/ 항복하중비								비고	
	무보수 시험체	보수재 R7 보수길이				보수재 R3 보수길이				
		30%	50%	70%	평균	30%	50%	70%		평균
N2	1.19	-	1.26	1.32	1.29	1.24	1.24	1.24	1.24	
N3	1.33	1.41	1.33	1.18	1.31	1.29	1.41	1.35	1.35	
N4	1.32	1.30	1.30	1.22	1.27	1.32	1.33	1.42	1.36	

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 모재와 보수재료사이의 적합성기준을 검토하기 위해 휨시험체를 대상으로 파괴실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 보수재료의 보수효과를 최종파괴형상, 계면분리정도, 항복하중 및 (극한하중/항복하중)의 비에 대해 분석한 결과에 의하면, 압축강도측면에서는 보수재 R7이 R3보다 우수하지만, 보수효과는 R3이 더욱 우수한 것으로 평가되었다.
- 2) 휨하중을 받는 노후화된 구조물에 보수재료를 적용할 때는 압축강도레벨 측면에서 검토할 것이 아닌 휨강도 및 인장강도 측면에서도 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구결과에 의하면 표 1의 적합성기준은 재해석 되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 건설교통부 국책과제인 “건축구조물 보수·보강공법의 성능평가에 관한 연구”의 일부로 수행되었음을 밝히며, 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 콘크리트공학 문獻調査委員會, “劣化したコンクリート断面修復材との適合性に關する研究の現狀”, 콘크리트공학, Vol. 35, No. 2, 1997. pp. 46~50.
2. Mailvaganam, N. P. and Deans, J. J., "Repair and Protection of Concrete Structures Chapter 2 Materials, Selection, and handling, CRC Press Inc., 1992., p.29
3. 건설교통부, “프리믹스형 보수재료를 적용한 RC구조물의 보수 및 섬유보강공법개발”, 건설교통부, 1997. 2.
4. 건설교통부, “건축구조물 보수·보강공법의 성능평가에 관한연구”, 건설교통부, 2001. 11.