

FRP보강근을 이용한 표면매립 및 단면확대공법의 실험적 성능평가

Experimental Evaluation on Strengthening of NSM and Section Increment with FRP Rebars

정상모^{*} 이차돈^{**} 원종필^{***} 황윤국^{****} 김정호^{****}
Jeong, Sang Mo Lee, Cha Don Won, Jong Pil Hwang, Youn-Guk Kim, Jeong Ho

ABSTRACT

In order to overcome the brittle failure of strengthening with FRP-rebars inherent to their brittle properties, two approaches have been attempted. One is to improve the properties like ductile Hybrid FRP Rods, and the other is to develop a ductile strengthening with partially unbonded FRP rebars. Experiments on real size specimen were performed to evaluate the performance of NSM (Near Surface Mounted Strengthening) and SIM (Section Increment Methods) with FRP rebars. This paper discusses the results of the tests on 8 slab specimen in terms of flexural resistance, ductility, and fatigue. They show that NSM or SIM with FRP rebars are very effective measures to strengthen existing RC structures. Above all, strengthening with partially unbonded ductile Hybrid FRP Rods shows sufficient ductility similar to that of properly designed RC structures.

1. 서론

철근콘크리트 구조물 보강에 강판부착이 사용되었으나 보강재료로서 강판의 결함 및 접착부의 계면 파괴 등의 문제로 FRP Sheet 부착을 대안으로 활용하여왔다. 그러나 FRP-Sheet 보강도 계면파괴에 대한 취약성과 FRP 자체의 재료적 결함으로 내구성 및 신뢰성이 우수한 보강공법으로는 평가되지 못하였다. 이에 FRP Sheet 부착공법에 대한 개선책으로 FRP Rebar를 이용한 표면매립보강공법(NSM-Near Surface Mounted Strengthening) 또는 단면확대공법(SIM-Section Increment Method)이 개발되었다. 실험에 의하면 NSM 및 SIM 공법은 접촉면을 현저히 증가시켜서 계면파괴는 방지할 수 있으나, FRP 복합재료의 단점에 기인하는 계단형식의 단계적 취성파괴 양상은 피할 수 없는 것으로 평가되었다.⁴⁻⁶⁾

* 정회원, 한동대학교 공간시스템공학부 교수

** 정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수

*** 정회원, 건국대학교 지역건설환경공학과 교수

**** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

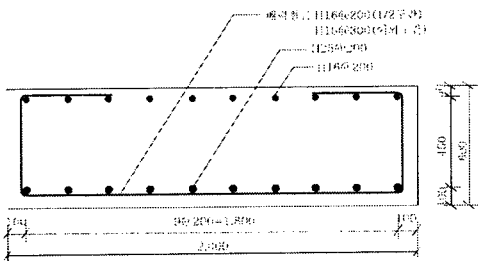
이러한 취성과파괴를 해결하고자 재료적인 특성개선과 공법적인 거동개선의 두가지 접근방법으로 연구를 수행한 바 있다. 그 결과 재료적인 개선방법으로는 재료의 전단취약점을 개선하기 위한 횡방향 보강과 함께, 특성이 다른 섬유를 혼용한 고연성의 Hybrid FRP-Rod를 개발하였다. 또한 공법연구를 통하여 부분 비부착 공법을 개발하였으며, 이미 파이롯실험에 의해 내하력 보강 및 고연성확보에 효과적임을 확인한 바 있다.

본 논문에서는 축소하지 않은 실물크기의 슬래브 실험체를 제작하여 실험을 통하여 그 성능을 평가하고자 하였다. 실험은 총 8개의 슬래브 실험체를 제작하여 수행하였으며, 재하능력과 연성을 평가하기 위한 정적실험 외에도 장기간 사용에 따른 피로저항 평가를 위하여 반복하중재하에 의한 피로실험을 수행하였다.

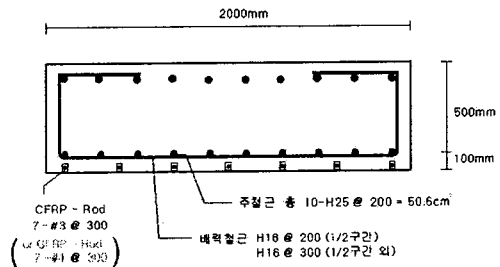
실험체로는 슬래브교 또는 대형 교량바닥판에 해당하는 철근 콘크리트 슬래브를 대상으로 설계하였다. 보강용 FRP Rebar의 종류로는 기존의 상용 CFRP와 GFRP 및 신규 개발된 고연성 Hybrid FRP Rod를 활용하였다. 보강기법으로는 표면매립부착공법, 단면확대부착공법, 연성확보가 가능한 FRP Rod 부분비부착 표면매립공법, 및 연성확보가 가능한 FRP Rod 부분비부착 단면확대보강공법을 고려하였다.

2. 실험체설계

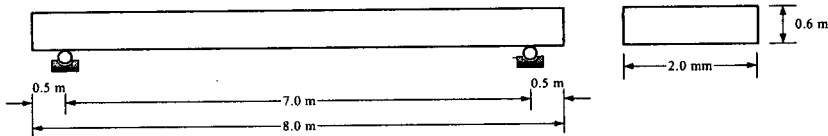
슬래브 실험체는 현행 도로교 설계기준에 부합하는 두께를 만족하도록 길이 8m 폭 2m 두께 60cm를 갖도록 설계하였다. 슬래브의 철근배근 단면도 및 FRP Rod보강 단면도를 그림 1에 나타내었다. 실험은 그림 1과 같이 지간장이 7m의 단순지지형태이며, 하중은 지간 중앙에 집중하중을 가력하는 것으로 계획하였다. 슬래브 실험체는 총 8분을 제작하였으며, 이를 보강형식, 실험종류 등으로 분류하여 표 1에 나타내었다.



(a) 슬래브 무보강 실험체 단면도



(b) 슬래브 표면매립 보강 실험체 단면도



(c) 슬래브 실험체 측면도

그림 1 실물 실험체 보강단면도 및 측면도

표 1 실물 실험체명 및 배근

슬래브 실험체명	주요보강 내용	철근				FRP Rod			비고
		주방향		부방향		종류	직경 mm	간격 mm	
		직경 mm	간격 mm	직경 mm	간격 mm				
S	표준 (무보강)	25(인장) 16(압축)	200 200	16	200 300	-	-	-	10-D25(인장) 10-D6(압축)
S-G-G	GFRP Rod 표면매립 부착	"	"	"	"	유리	13	300	"
S-G-C	CFRP Rod 표면매립 부착	"	"	"	"	탄소	10	"	"
S-O-C	CFRP Rod 단면확대 부착	"	"	"	"	"	10	"	"
S-G-H	하이브리드 FRP Rod 비부착 표면매립	"	"	"	"	복합	9	"	"
S-O-H	하이브리드 FRP Rod 비부착 단면확대	"	"	"	"	"	"	"	"
S-G-H-D	하이브리드 FRP Rod 비부착 표면매립	"	"	"	"	"	"	"	피로실험용
S-O-H-D	하이브리드 FRP Rod 비부착 단면확대	"	"	"	"	"	"	"	피로실험용

3. 정적 및 피로실험

슬래브 시험체의 설치를 위하여 3.0m 폭, 4.5m 높이의 문형프레임을 설치하고 횡방향 프레임의 중앙에 300tonf 용량의 가력기를 설치하였다. 지점부는 베이스 블록을 설치하고 슬래브 폭 2.0m가 모두 올라오도록 로울러 지점을 설치하였다.

정적 파괴하중의 가력방법은 슬래브 지간 중앙에 슬래브의 전 폭에 걸쳐 30*30의 H형강을 보강하여 제작한 가력부재를 이용하여 재하하도록 하였다. 하중은 초기 약 10tonf의 하중을 2-3회 반복 재하하여 구조물과 실험 시스템을 안정화 시킨후 초당 0.05mm씩 변위를 증가시키며 재하하였다. 시험체의 하중재하 전경 및 위치는 그림 2 및 그림 3과 같다. 피로하중은 설계활하중과 동가의 내력이 발생하도록 하는 집중하중을 약 6Hz로 재하하였다. 일정 반복회수의 피로하중 재하 후 유압가력기를 멈추고 단계별 정적 재하를 실시하였다.



그림 2 실험 시스템 전경

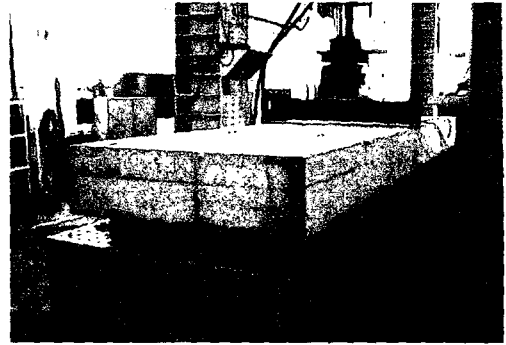


그림 3 하중재하 전경

4. 실험결과평가

실험결과중 하중-처짐곡선 총괄과 피로실험의 결과를 나타내면 다음과 같다. 표면매립공법의 종류 및 FRP Rod의 종류에 따른 하중-처짐 관계를 보면 무보강 시험체에 비해 보강한 시험체가 강성이 상당히 증가함을 알 수 있었으며 하중-처짐곡선역시 하이브리드 FRP Rod를 사용한 표면매립 비부착 보강공법이 타 공법과 달리 연성거동을 함을 알 수 있었다.

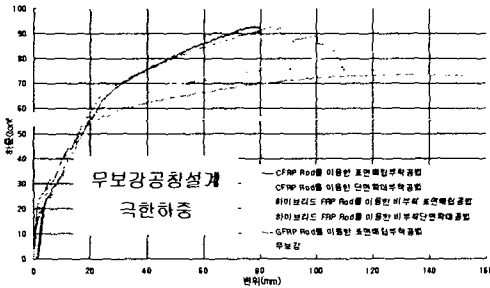


그림 4 하중-처짐곡선도

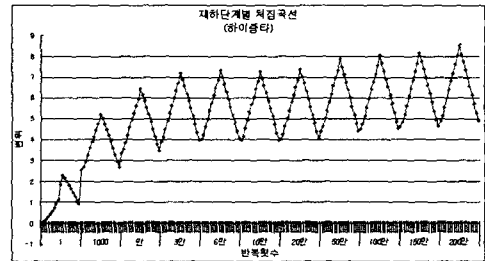


그림 5 피로실험결과 재하단계-처짐곡선도

4.1. 휨내력을 기준으로 한 안전도에 대한 성능평가

휨내력을 기준으로 한 안전도에 대한 성능평가 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2의 평가와 같이 설계식에 의한 휨내력을 1.1배 이상 상회하여 충분히 안전한 것으로 평가되었다. 일반적으로 구형보의 경우에도 슬래브의 실험결과를 토대로 추정하면 안전도는 충분할 것으로 사료된다.

표 2 안전도에 대한 성능 평가 비교

실험체구분		실험결과에 의한 휨내력(T · m)	설계식에 의한 휨내력(T · m)	실험결과/설계식	평가판정
슬래브	무보강	129.5	96.7	1.34	O.K
	CFRP Rod 표면매립 부착	162.5	142.8	1.14	O.K
	CFRP Rod 단면확대 부착	166.7	144.5	1.15	O.K
	GFRP Rod 표면매립 부착	162.3	130.7	1.24	O.K
	하이브리드 FRP Rod 표면매립 비부착	144.9	112.6	1.29	O.K
	하이브리드 FRP Rod 단면확대 비부착	134.8	113.2	1.19	O.K

4.2. 피로시험에 결과에 따른 사용성에 대한 성능평가

피로시험에 의한 성능평가를 표 3에 나타내었으며, 사용하중을 기준으로 하여 반복하중 재하횟수가 200만회를 상회할 때 초기처짐의 약 2배정도로 증가하였다. 그러나 이러한 처짐은 도로교설계기준에 따른 시간장의 1/800에 충분히 안전한 것으로 평가되었다. 특히 반복하중은 도로교설계기준에 따라 DB-24와 동등한 하중을 적용하였으나 일상적인 하중은 이보다 작을 것이므로 실험결과는 매우 보수적일 것이다.

실제 반복횟수가 증가함에 따라 처짐도 증가하고 그에 따른 균열폭도 증가하였으나, 200만회의 반복하중 재하 후에도 충분히 지지능력을 보유하고 있는 것으로 평가되었다. 특히 반복하중의 횟수가 증가하여도 표면의 흠이나 증타부위에서 계면파괴등이 발생하지 않았다.

4.3. 연성도 (Ductility)에 대한 성능평가

연성도에 대한 성능평가 결과를 표 4에 나타내었으며, 모든 실험체에서는 연성도가 2.5 이상으로 충분한 것으로 평가되었다. 그러나 탄소섬유 및 유리섬유 보강 실험체의 연성도는 무보강실험체의 1/2보다도 작게 보여주었으며, 예상한 바와 같이 FRP Rod의 파단에 의한 급격한 취성파괴 양상을 보여주었다. 그러나 고연성인 하이브리드 FRP Rod으로 보강한 비부착 보강 시험체는 무보강실험체와 거의 동등한 연성도 6정도의 매우 높은 결과를 나타내었으며, 파괴양상도 무보강 실험체와 같이 FRP Rod의 파단이 아닌 콘크리트의 압축파괴 양상을 보여주었다.¹⁻³⁾

표 3 사용성에 대한 성능평가 비교표

실험체구분	초기처짐	200만회 반복후 처짐	200만회/초기처짐	처짐허용치(mm)
슬래브-1	3.5	6.6	1.89	8.75, O.K
슬래브-2	4	7.9	1.98	8.75, O.K

표 4 연성도에 대한 성능평가 비교표

실험체구분		철근 항복시 처짐, δ_y (mm)	최대처짐, δ_u (mm)	연성도, δ_u / δ_y (Ductility)	평가판정
슬래브	무보강	25	155	6.2	O.K
	CFRP Rod 표면매립 부착	30	80	2.67	O.K
	CFRP Rod 단면확대 부착	25	78	3.12	O.K
	GFRP Rod 표면매립 부착	24	86	3.58	O.K
	하이브리드 FRP Rod 표면매립 비부착	24	135	5.63	O.K
	하이브리드 FRP Rod 단면확대 비부착	24	130	5.42	O.K

5. 결론

본 연구에서는 FRP Rod를 이용한 표면매립공법 또는 단면확대공법의 보강효과를 실험적으로 평가하기 위하여 총 8개의 실험물기 실험체에 대한 실험을 수행하였다. 실험결과에 의하면 하중내하력, 피로도, 및 연성도를 기준으로 평가할 때 효과적인 보강공법으로 확인되었다. 특히 고연성 Hybrid-Rod를 이용한 부분비부착 공법을 적용하면, 일반 철근콘크리트 구조물과 동등한 연성도 6정도의 고연성을 확보할 수 있었다. 이들 실험체는 200만회 이상의 피로실험에도 만족할 만한 성능을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 (주)동원건설의 지원에 의하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 정상모, "FRP 긴장재를 이용한 콘크리트보의 연성지수 평가," 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1998.
2. 정상모, "FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트보의 연성개선방법," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 1998.
3. Jeong, Sang-Mo, "Strength Reduction Factors for Flexural Design of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons," ACI International Conference Proceedings SP-103, 2000.
4. "철근콘크리트 구조물의 내하력 증진을 위한 FRP Rod 및 보강공법 개발," 중간보고서, 건국대학교(주관연구기관), 중앙대학교,한동대학교(협동연구기관), 한국건설기술연구원(위탁연구기관), 2000.5, 182pp.
5. 이차돈, 정상모, 원종필, 이승환, 방정환, "FRP 보강근 표면매립 보강된 철근콘크리트보 휨거동" 한국진단학회 학술발표회 논문집, 2002.
6. 이차돈, 정상모, 원종필, 이승환, "부분 비부착 NSM Hybrid FRP 보강근에 의한 철근콘크리트보의 연성보강" 한국콘크리트학회 논문집, 2003.