

강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 R/C 보의 피로거동에 관한 연구

Study on the Fatigue Behaviors of R/C Beam Strengthened with Steel Plate and Carbon Fiber Sheet

심종성¹⁾ 홍영균²⁾ 최완철³⁾ 황의승⁴⁾
 Sim, Jongsung Hong, Young Kyun Choi, Won Chul Hwang, Wui Seung
 이차돈⁵⁾ 배인환⁶⁾ 박성재⁷⁾
 Lee, Cha Don Bae, In Hwan Park, Seong Jae

ABSTRACT

Strengthening a damaged structure by bonding steel plate on the surface of cracked structural members have been widely accepted for strengthening the structural components. Recently, however, carbon fiber sheets have been developed in order to achieve more effective way of strengthening damaged structures due to their superior material properties to those of conventionally used steel plates in terms of their lighter unit weight and higher tensile strength. It has been reported that when both methods are applied to a damaged beam element, flexural strength and its stiffness of a beam increase and the rate of crack development as well as crack width and deflection under service loads are reduced. In this study some experiments are performed in order to comparatively observe the structural properties of the damaged beams which are either strengthened with different lengths of steel plates or with carbon sheets on the crack propagation, failure mechanisms, and load-deflection characteristics under the fatigue loadings.

1 서론

구조물의 사용성 향상과 강도회복을 목적으로 하는 보수 및 보강공법은 공공의 안전성, 구조적 적절성, 환경에 미치는 영향, 사용성 및 미관 그리고 성능저하에 따라 선택, 적용된다.

본 연구에서는 현장에서 널리 적용되고 있는 강판보강공법과 최근 개발된 신소재인 탄소섬유 적층판을 이용한 보강공법의 보강효과를 비교·고찰하기 위하여 보강재료, 보강길이의 실험변수에 따른 시험체를 제작하여, 반복하중하에서의 균열 및 파괴양상, 하중-중양처짐, 하중-변형을 관계 등을 조사하였다.

2. 실험 계획

2.1 실험 변수

본 연구에서는 2.40m의 R/C 보에 대하여 응력수준, 보강재료 및 보강길이를 변수로하여 실험을 수행하였다. 보강재료로는 강판과 탄소섬유sheet가 사용되었고 보강길이는 각각의 재료에 대해 1.5m와 1.9m를 사용하였다. 채택된 실험변수를 사용하여 제작된 시험체 명칭 및 보강현황은 표.1과 같다.

표.1 시험체의 명칭 및 보강현황

시험체 명칭	보강 재료	보강길이 (cm)	시험체 명칭	보강 재료	보강길이 (cm)
C-0-60	없음	없음	S-1.5-60	강판	150
C-0-70			S-1.5-70		
C-0-90			S-1.5-90		
F-1.5-60	탄소섬유 sheet	150	S-1.9-60	강판	190
F-1.5-70			S-1.9-70		
F-1.5-90			S-1.9-90		
F-1.9-60	탄소섬유 sheet	190	*주)보강재료별 두께		
F-1.9-70			1.강판: 2.3mm		
F-1.9-90			2.탄소섬유sheet : 0.22mm		

- 1) 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 부교수
- 2) 정회원, 홍익대학교 건축학과 조교수
- 3) 정회원, 숭실대학교 건축공학과 부교수
- 4) 정회원, 경희대학교 토목공학과 조교수
- 5) 정회원, 중앙대학교 건축공학과 부교수
- 6) 한양대학교 토목공학과 박사과정
- 7) 한양대학교 토목공학과 석사과정

2.2 사용재료

2.2.1 콘크리트

본 실험에서 사용된 콘크리트는 설계강도가 210kg/cm²으로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 211kg/cm²으로 나타났고 슬럼프량은 22로 나타났다.

2.2.2 철근 및 강판

시험체의 배근에 사용된 철근과 보강에 사용된 강판은 각각 설계 항복응력 4000kg/cm²인 D10, D13철근과 설계 항복응력 2400kg/cm²인 SS41이다. 이들에 대한 재료시험이 실시되었으며, 그 결과를 표.3와 같이 정리하였다.

표.2 철근과 강판의 기계적성질

구분	항복강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)
철근	D10	7360	1.95×10 ⁶
	D13	6430	2.04×10 ⁶
강판 SS41	5270	6260	1.90×10 ⁶

2.2.3 에폭시

실험에서 콘크리트와 강판의 접착에 사용된 에폭시는 EPX-3W으로써 이에 대한 물성은 다음 표.3과 같다.

표.3 에폭시 수지 물성

인장강도 (kg/cm ²)	압축강도 (kg/cm ²)	휨강도 (kg/cm ²)	인장전단강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)
200이상	700이상	400이상	150이상	10000이상

2.1.4 탄소섬유

본 실험에 사용된 탄소섬유는 T사에서 개발한 것으로 이형지 위에 형태유지의 목적으로 접착성이 있는 소량의 수지를 함침시킨 유리섬유를 짜서 그 위에 탄소섬유를 일방향으로 배열시켜 만든 것이다. 탄소섬유는 탄성율의 차이에

표.5 탄소섬유의 물성

섬유종류	단위비중 (g/cm ³)	두께 (mm)	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)	파괴신장율
CF	1.82	0.11	390	2.35×10 ⁶	1.5

의해 몇가지 종류가 있으나 본 실험에서는 FTS-CI-20이라는 제품을 사용하였고 이 제품의 물성은 표.5와 같다.

2.3 시험체의 설계 및 제작

2.3.1 철근콘크리트보

철근콘크리트 보의 시험체는 단면치수 15×25cm, 인장철근 2D-13, 압축철근 2-D10, 순지간 길이 2.0m, 총길이 2.40m로 그림.2.1과 같이 설계, 제작되었다. 사용된 철근량은 보강설계를 고려하여 평형철근비의 33%를 배근하였고, 시험체의 잔단파괴를 막기위해 D10 스트립을 10cm 간격으로 설치하였다.

2.3.2 시험체의 제작방법

본 시험체에서는 3점 재하시험을 실시하였다. 손상된 보를 제작하기위해 정적 극한하중의 70%인 3.5ton을 재하하여 균열을 발생시켰는데 이론적으로 계산된 보의 정적 극한하중은 표준 시험체(Control Beam)를 파괴시킴으로써 검증하였다. 손상된 보는 강판 및 탄소섬유sheet로 보강되었다. 제작된 시험체의 재원 및 제작방법은 그림 2.1과 그림 2.2와 같다.

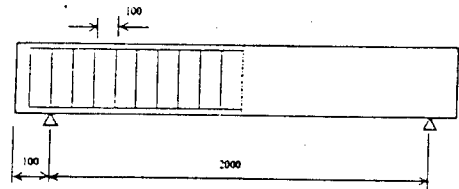


그림 2.1 시험체 제원(단위: mm)

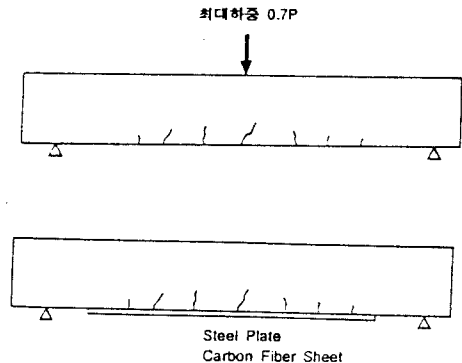


그림 2.2 시험체 제작방법

2.4 가력방법 및 측정

1) 정적파괴실험

본 연구에서는 피로실험에 앞서서 시험체의 변수별 정적강도를 알아 보고자 정적파괴실험을 실시하였다. 정적파괴실험의 실험방법은 3점 휨 시험으로서 재하하중은 load cell 로 측정하였다. 하중재하는 0.5ton 간격으로 재하하였으며, 지간 중앙부의 처짐이 약 2mm 간격이 되도록 처짐제어방식으로 가력하였다.

정적파괴실험에 대한 시험체 설치 및 가력장치는 그림 2.3과 같다.

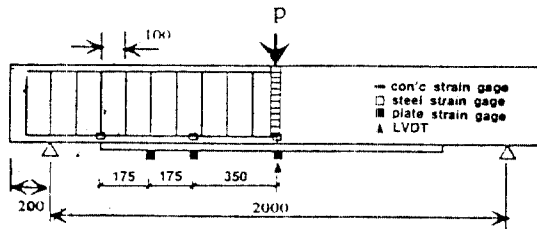


그림 2.3 정적파괴실험 및 피로시험 개략도

2) 피로실험

시험시 하중재하속도는 1990kgf/min의 속도로 시험체가 파괴될 때까지 일정하게 재하하였으며, 보의 파괴는 중앙부의 처짐이 20mm일 때 보가 파괴된 것으로 간주하였다. 피로시험의 재하는 100ton 용량의 피로시험기를 사용하였으며, 단진재하로 그림2.3과 같이 재하 하였다. 재하방법은 정적실험 후 반복회수 5회까지는 정적으로 재하하였으며, 그 이후 반복하중의 최소값과 최대값을 일정하게 유지하면서 3Hz의 속도로 재하 하였다.

피로하중의 반복회수에 따른 변형을 및 균열진전상황을 측정하기 위하여 표.7과 같은 반복회수에 대해서는 피로시험기를 정지시킨 후 정적으로 최대하중(P_{max})까지 하중을 500kgf 씩 증가시키면서 육안, 변형계이지 및 변위측정기(LVDT)에 의해 시험체의 균열진전상황, 반복하중에 따른 콘크리트 변형을, 철근 변형을, 변위관계를 측정하였다. 피로실험의 재하 및 지점 조건은 정적파괴실험과 동일하며, 재하하중은 파괴실험시 정적 극한강도의 90%, 70%, 60%로 하였으며, 응력비(P_{min}/P_{max})는 0.1로 일정하게 하였다. 이를 표.6에 나타내었다.

표.6 각 시험체별 파괴시의 피로하중회수

시험체명	정적최대 하중(kg)	최대하중(P_{max}) (kg)	최소하중(P_{min}) (kg)
C -0 -60	5,500	3,300	300
C -0 -70		3,900	400
C -0 -90		5,000	500
S-1.5-60	7,700	4,600	400
S-1.5-70		5,400	500
S-1.5-90		6,900	700
S-1.9-60	10300	6,300	600
S-1.9-70		7,200	700
S-1.9-90		9,200	900
F-1.5-60	8,600	5,200	500
F-1.5-70		6,000	600
F-1.5-90		7,700	700
F-1.9-60	8,600	5,200	500
F-1.9-70		6,000	600
F-1.9-90		7,700	700

표.7 측정 반복횟수

측 정	1	2	3	4	5	6
반복횟수	0	5	1000	5000	10000	30000
측 정	7	8	9	10	11	12
반복횟수	50000	80000	100000	200000	300000	400000
측 정	13	14	15	16	17	18
반복횟수	500000	6000000	7000000	8000000	9000000	10000000

하중, 중앙점변위, 재료의 변형도는 시험체에서 얻어진 아날로그 신호를 사용자의 의도에 따라 초당 얻고 싶은 데이터의 갯수를 정하여 이를 디지털 데이터로 바꾸어 저장하는 DAS-ON(Data Acquisition System)를 사용하여 측정값들을 기록하였다.

3 피로실험 결과 및 고찰

3.1 보강재료별 반복회수에 따른 균열 및

파괴형상

3.1.1 강판보강시험체

피로파괴 양상은 응력수준 60%, 1.5m 보강된(S-1.5-90)보강시험체는 보강단부에서 발생된 사인장균열로 인해 전단파괴 양상을 보였으며, 나머지 전 시험체가 보강판 중앙부에서 보강재의 피로파괴 양상을 보였다.

강판의 경우 주입공법을 적용할 때 만든 주

입공에서 균열이 진전되어 파괴되었다. 그리고 강판보강시험체는 피로하중에서 bonding에 대한 문제가 크게 발생되지는 않은 것으로 나타났다.

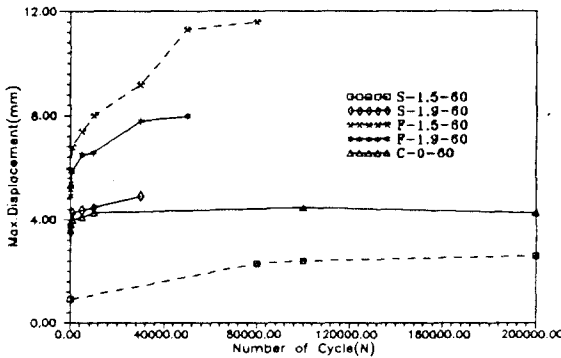
3.1.2. 탄소섬유sheet보강 시험체

탄소섬유sheet보강 시험체의 경우 파괴양상은 강판보강한 시험체와는 달리 모든 보강시험체의 보강재 단부에서 bonding failure가 발생된 후 부재의 파괴에 이르렀다.

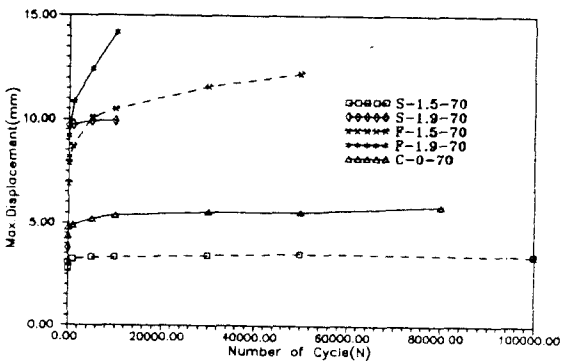
3.2 보강재료별 반복회수에 따른 하중-중양부 처짐과의 관계

보강재의 거동을 파악할 수 있는 N에 따른 하중-처짐 관계는 다음과 같다.

응력수준 60%인 경우, 강판보강 1.5m와 표준시험체의 최대처짐은 각각 2.59m, 4.26mm로써 표준시험체에 대한 즉시처짐 제한 규준인



그림(a) (응력수준: 60%)



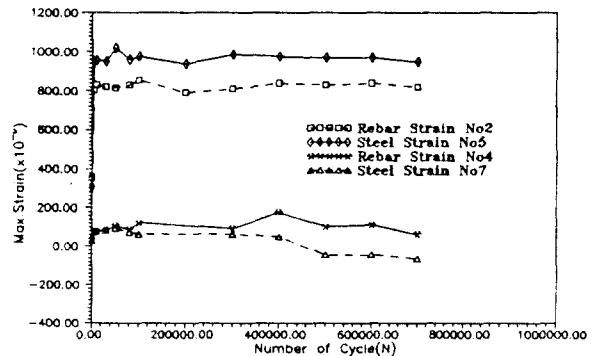
그림(b) (응력수준: 70%)

그림 3.2.1 반복회수에 따른 보강재의 최대처짐

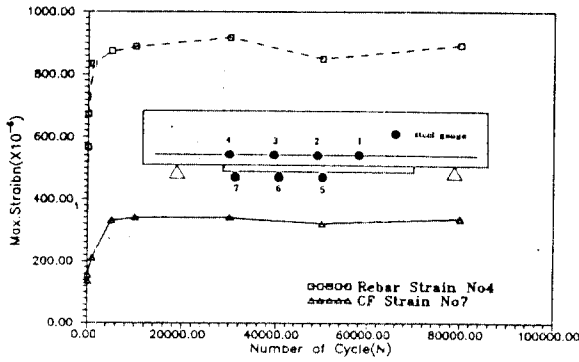
5.6mm 이내에 있는 것으로 나타났으며, 최대처짐은 반복회수가 증가함에 따라 일정하게 나타나 강성의 저하없이 보강재의 파단과 함께 부재가 파괴되는 양상을 보였다. 반면 탄소섬유 1.5m 및 1.9m 보강시험체의 초기 반복회수에서의 최대처짐은 각각, 5.9mm, 5.84mm로써 처짐 허용기준인 5.6mm를 초과하였으며, 반복회수가 증가함에 따라 중앙부의 최대처짐은 1.5m 및 1.9m 보강시험체에서 각각 11.3mm, 7.97mm로 증가하였다(그림(a)). 1.5m 탄소섬유보강시험체의 응력수준 60% 및 70%는 각각 4.6ton, 5.4ton 그리고 1.9m 탄소섬유보강시험체의 응력수준 60%, 70%는 각각 6.3ton, 7.2ton으로써 정적항복강도 이상(4.8ton)의 수준을 보이고 있고, 보강시험체의 강성이 강판시험체 보다 상대적으로 작기때문에 큰 처짐이 유발된 것으로 나타났다. 그리고 응력수준 70%에서의 실험변수별 보강시험체의 하중-처짐은 60%와 유사한 경향을 나타내고 있다(그림(b)).

3.3 보강재료별 반복회수에 따른 하중-변형과의 관계

강판 및 탄소섬유sheet 보강시험체에서 보강재와의 일체거동 여부를 확인하기 위하여 시험체 내부 철근변형률과 같은 위치에 부착된 보강재의 변형률의 변화를 비교하였다. 그림 3.3.1(a)에서 나타낸 바와 같이, 응력수준 60%, 1.5m 보강시험체에서 강판보강시험체의 철근과 보강재의 변형률은 반복회수가 증가하면서 유사한 경향을 나타내었다. 반면, 탄소섬유 보강시험체는 보강시험체 단부에서 상당한 차이를 보이고 있



(a) 강판보강 시험체



(b) 탄소섬유보강 시험체
 그림 3.3.1 반복회수에 따른 보강재와 철근의 변형율(응력수준 60%, 1.5m 보강)

어 일체거동하지 않는 것으로 나타났다(그림 3.3.1(b)).

3.4 보강재료별 S-N 선도

구조물의 피로거동에 관한 작용하중과 반복회수의 S-N선도 관계는 어느 특정한 반복회수 N에 대한 응력수준 값인 피로강도를 예측하는데 적용된다. 또한 콘크리트는 강재와는 달리 미리정한 반복회수에 대한 피로강도를 사용한다. 본 실험에서 보강재료별 정적하중에 대한 피로하중 백분율(%)을 피로수명(N)과 비교, 분석하였다.

피로파괴시험을 통하여 측정된 시험체 파괴

표 3.4.1 각 시험체별 파괴시의 피로하중회수

시험체번호	보강길이	피로하중크기 (%)	피로하중 반복회수(N)
C-0 -60	-	60	42,5882
C-0 -70	-	70	111,014
C-0 -90	-	90	1
S-1.5-60	1.5m	60	757,800
S-1.5-70	1.5m	70	469,572
S-1.5-90	1.5m	90	269
S-1.9-60	1.9m	60	35,717
S-1.9-70	1.9m	70	15,180
S-1.9-90	1.9m	90	2
F-1.5-60	1.5m	60	98,660
F-1.5-70	1.5m	70	51,285
F-1.5-90	1.5m	90	10
F-1.9-60	1.9m	60	69,941
F-1.9-70	1.9m	70	18,519
F-1.9-90	1.9m	90	1

시의 피로하중 반복회수는 표 3.4.1과 같이 나타났다.

표 3.4.1에 나타난 각 시험체의 파괴시의 피로하중 반복회수를 이용한 S-N선도는 그림 3.5.1과 같이 나타났다.

피로실험결과 각 시험체에 대한 피로수명과 피로강도와의 관계는 회귀분석을 통하여 고찰하였으며, 다음 표 3.4.2와 같은 식을 얻을 수 있다.

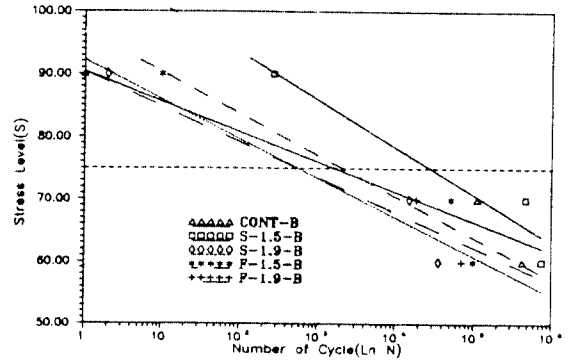


그림 3.4.1 보강재료별 S-N선도

표 3.4.2 시험체별 회귀분석 결과

시험체명	응력수준(%)	회귀분석 결과 식
C - 0	90, 70, 60%	$S = -2.0823 \times \ln(N) + 90.3939$
S - 1.5	90, 70, 60%	$S = -3.29593 \times \ln(N) + 108.701$
S - 1.9	90, 70, 60%	$S = -2.72639 \times \ln(N) + 92.2401$
F - 1.5	90, 70, 60%	$S = -2.86925 \times \ln(N) + 96.9063$
F - 1.9	90, 70, 60%	$S = -2.4414 \times \ln(N) + 90.4276$

S-N 선도로 부터 추정한 피로한계 백만회에 대한 피로강도는 표 3.4.3에 나타내었다.

표 3.4.3 실험변수별 피로강도(N: 1,000,000회)

실험 변수	C-0	S-1.5	S-1.9	F-1.5	F-1.9
피로강도(%)	61.6	63.2	54.6	57.2	56.7
보강시험체					
표준시험체	1.0	1.03	0.89	0.93	0.92

표 3.4.3에서, 백만회에 대한 보강시험체의 피로강도값은 연구자들마다 상이한 결과를 보고하고 있지만 일반적으로 60%~70%(Hsu)로 알려져 있는 철근콘크리트 보의 피로강도범위 내

인 것으로 나타났다.

각 시험체별 피로강도로 부터 백만회에 대한 정적최대강도는 기본시험체 강관1.5m 및 1.9m, 그리고 탄소섬유 1.5m 및 1.9m 보강시험체에 대하여 각각 3.4ton, 4.87ton 및 5.62ton 그리고 4.92ton 및 4.88ton 으로 나타났다. 따라서 강관 보강은 보강길이에 따라 피로강도의 차이가 발생하였으나, 탄소섬유 보강시험체의 피로강도는 보수길이에 관계없이 유사한 결과를 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서 탄소섬유sheet 및 강판보강시험체에 대한 피로시험으로 부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 강판보강시험체의 파괴양상은 강판하부 주입 공법을 위하여 만든 주입공으로 부터 균열이 발생하여 강판이 파괴에 도달함과 동시에 부재가 파괴되었다. 반면, 탄소섬유보강 시험체는 보강재 단부에서 bonding failure가 발생하여 파괴되었다.
2. 강판보강시험체의 처짐은 반복회수에 따라 변화가 적었으나, 탄소섬유 보강시험체는 초기에 제한처짐량 이상의 처짐이 발생하였고, 반복회수가 증가함에 따라 처짐이 급격하게 증가되어 강성이 저하되었다. 또한 하중-변형율로 부터 강판보강시험체인 경우가 탄소섬유 보강시험체보다 보강재와 일체거동하는 것으로 나타났으며, 이는 보강시험체의 파괴양상과 동일한 것으로 나타난 것이다.
3. 보강시험체의 S-N선도로 부터, 보강시험체의 피로강도는 55~63% 사이를 나타냈으며, 강판보강시험체는 보강길이에 따라 피로강도의 차이가 다소 크게 나타났으나, 탄소섬유 보강시험체는 보강길이에 관계없이 유사한 값을 나타내었다.
4. 본 실험에서 사용한 강판접착용 에폭시 수지는 탄소섬유sheet 의 접착에는 피로시험시 분체가 있는 것으로 나타나므로 구조성능 확보를 위해서는 반드시 규격에 맞는 탄소섬유sheet 전용

에폭시 수지의 사용이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 T.S Bond 건설공업(주)의 연구지원을 받아 수행된 연구임을 밝히며, 이에 감사의 뜻을 표합니다. 또한 피로시험 수행을 기꺼이 허락한 한국통신 선로기술연구소에 감사드립니다.

참고문헌

1. R.N. Swamy, R. Jones, A. Charif. "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged R/C Beams," Structural Engineer, Vol.67, No. 3, 1989, pp. 45~54.
2. R.N. Swamy, R. Johnes, N. Bloxham, "Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates," Structural Engineer, Vol. 65A, No.2 1987, pp. 59~68.
3. JOHN M. Hanson, CRAIG A. BALLINGER "Consideration for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading," ACI 215R-74, 1986, pp. 215R~215R-25
4. Surendra P. Shah, Sushil Chandra, "Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading," No. 67-49 ACI Journal 1970, pp. 816~827.
5. Hsu, T.C., "Fatigue of Plain Concrete," ACI Journal, Vol.78, July-August, 1981, pp.292~305.
6. 최완철 외, "에폭시접착강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동에 관한 연구," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권 제1호, pp. 25~29.