

진동시험을 통한 R/C Beam의 보강효과 검증기법

Strengthening Effect Evaluation Technique of R/C Beams using the Vibration Test

심종성* · 유태석**
Sim Jongsung · Yoo Tae Seok

ABSTRACT

This study suggests a strengthening effect evaluation technique of reinforced concrete beams using the vibration test. To evaluate the strengthening effect of R/C beams, Strengthening Factor(S_F) was suggested. Using the value of S_F , 20 beams were evaluated. According to these results the effects of R/C beams strengthened by steel plate is superior than those of R/C beams strengthened by carbon fiber sheet.

1. 서론

1.1 연구배경

철근콘크리트(R/C) 구조물은 시공 후 시간이 지남에 따라 여러 가지 요인에 의해 성능저하현상을 나타내게 된다. 교량구조물인 경우에도 중차량 및 통행차량의 증가로 성능저하현상이 가속화되어 보수, 보강해야 하는 사례가 늘고있다.

균열에 의해 손상된 구조물의 보수는 미관, 내구성, 방수성 등 내력 이외의 기능을 회복시키는 작업을 일컬으며, 보강은 내력을 회복시키는 일을 목적으로 하는 행위를 일컫는다. 철근콘크리트 부재의 보강방법에는 강판접착공법, 프리스트레싱공법, 단면증가

공법, 부재증설공법 등이 있으며, 최근에는 탄소섬유 sheet 접착공법 등도 시도되고 있다. 일반적으로 강판접착공법은 성능이 저하된 구조물의 휨강도를 증진시키는 잇점 외에 처짐과 균열폭을 감소시키는 잇점이 있다.¹⁾ 이들 공법에 관련된 연구결과에 의하면, 강판의 접착길이가 보강부재의 거동에 가장 많은 영향을 주고있다.²⁾ 그러나 많은 보수, 보강공법에 대한 시공 및 연구에도 불구하고 아직까지 보강효과를 검증하는데 필요한 자료는 미흡한 실정이다.

1.2 연구목적 및 방법

본 연구에서는 교량구조물 보강공사에서 가장 널리 사용되고 있는 강판접착공법과 최근에 그 사용이 시도되기 시작한 탄소섬유 sheet 접착공법을 그 대상으로 보강효과를 정량적으로 검증하기 위하여 진동시험을

* 한양대학교 토목공학과 부교수

** 한양대학교 토목공학과 석사과정

실시하였다. 본 연구에서 제작된 20개의 보는 DAS-ON이라고 불리는 계측장치를 통해 건전상태, 손상상태, 보강상태에서 각각 고유진동수가 측정되었다. 측정된 고유진동수에 근거하여 본 연구에서 제안된 손상계수 및 보강계수 등을 적용하여 R/C보의 보강효과를 검증하였다.

2. 실험

2.1 실험변수

본 연구에서는 지간 2.0m의 손상된 R/C 보에 대하여 보강재료 및 보강길이를 변수로 하여 실험을 실시하였다. 보강재료로는 강판과 탄소섬유 sheet가 사용되었고 보강길이는 각각의 재료에 대해 1.5m와 1.9m를 사용하였다. 채택된 실험변수를 사용하여 제작된 시험체 번호 및 갯수는 표2.1과 같다.

표2.1 시험체의 명칭 및 갯수

시험체명칭	보강재료	보강길이(cm)	시험체수
CONT	없음	없음	4
F19	탄소섬유 Sheet	190	4
F15	탄소섬유 Sheet	150	4
S19	강판	190	4
S15	강판	150	4

2.2 사용재료

2.2.1 콘크리트

본 실험에서 사용한 콘크리트는 설계 강도가 210kg/cm²으로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 실험결과 211kg/cm²으로 나타났고 배합비는 표2.2과 같다.

표2.2 콘크리트의 배합설계표

각재료의 배합량(kg/cm ³)							
시멘트	물	잔골재	굵은 골재	혼화제	물 - 시멘트비	잔골재율	염화물 함유량
333	186	808	952	0.67	55.9%	46.0 %	0.30

2.2.2 철근 및 강판

시험체의 배근에 사용된 철근과 보강에 사용된 강판은 각각 항복응력 4000 kg/cm²인 D10, D13철근과 항복응력 2400 kg/cm²인 SS41이다. 이들에 대한 재료시험이 실시되었으며 그 결과는 표2.3과 같다.

표2.3 철근과 강판의 기계적 성질

구분		항복강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)
철근	D10	5260	7360	1.95×10 ⁶
	D13	4520	6430	2.04×10 ⁶
강판	SS41	5270	6260	1.90×10 ⁶

2.2.3 에폭시

실험에서 콘크리트와 강판의 접착에 사용된 에폭시는 T사 제품인 EPX-3W으로써 이에 대한 물성은 표2.4와 같다.

표2.4 에폭시 수지 규격치

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

2.2.4 탄소섬유

본 시험에 사용된 탄소섬유는 T사에서 개발한 것으로 이형지 위에 형태유지의 목적으로 집착성이 있는 소량의 수지를 함침시킨 유리섬유를 짜서 그 위에 탄소섬유를 일방향으로 배열시켜 만든 것이다. 탄소섬유는 탄성율의 차이에 의해 몇 가지 종류가 있으나 본 실험에서는 FTS-CI-20이라는 제품을 사용하였고 이 제품의 물성은 표2.5와 같다.

표2.5 탄소섬유의 기계적 성질

섬유 종류	단위비중 (g/cm ³)	두께 (mm)	인장강도 (kg/cm·폭)	탄성계수 (kg/cm ²)	파괴신장율(%)
CF	1.82	0.11	390	2.35×10 ⁶	1.5

2.3 시험체의 설계 및 제작

2.3.1 철근콘크리트보

철근 콘크리트 보의 시험체는 단면치수 15×25cm, 인장철근 2-D13, 압축철근 2-D10, 순지간 길이 2m, 총길이 2.44m로 그림2.1과 같이 설계, 제작되었다. 사용된 철근량은 보 강설계를 고려하여 평형철근비의 33%를 배근하였고 시험체의 전단파괴를 막기 위해 D10스터럽을 10cm간격으로 설치하였다.

2.3.2 시험체의 제작방법

본 시험에서는 3점 재하시험을 실시하였다. 손상된 보를 제작하기 위해서 정적 극한 하중의 70%인 3.5ton을 재하하여 균열을 발생시켰는데 이론적으로 계산된 보의 정적 극한하중은 CONT보 하나를 파괴시킴으로써 검증하였다. 손상된 보는 강판 및 탄소섬유 sheet로서 보강되었다.

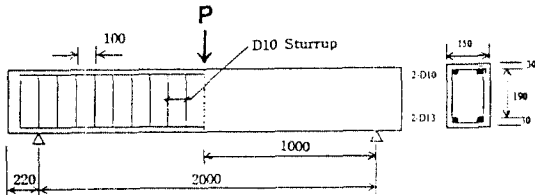


그림2.1 시험체 형상 및 하중재하 위치

2.3.3 강판보강 시험체

보강설계는 접착제의 접착력이 충분하여 콘크리트-에폭시-보강재의 접착계면에서 일체거동을 하여 콘크리트와 보강재는 완전한 합성부재로 볼 수 있다는 가정을 근거로 실시되었다. 보강시험체의 제작은 우선 얇은 에폭시 덩어리를 시험체에 일정한 간격으로 배치한 후 강판을 그 위에 올려놓고 putty epoxy수지로 강판의 주위를 씰링한 후 에폭시 주입용 gun을 사용하여 에폭시를 주입하는 방식을 적용하였다. 마지막으로 두드림 점검을 통해 에폭시의 주입상태를 확인하였다.

2.3.4 탄소섬유보강 시험체

탄소섬유보강방법은 바닥처리공정, 프라이머 도포공정, 탄소섬유접착공정, 마감공정으로 나누어 지는데 바닥처리공정은 콘크리트의 표면을 고르게 하여 응력분산을 막기 위해 행하는 공정이고, 프라이머 도포공정을 통해 탄소섬유를 콘크리트에 접착시켰다. 접착후에 정량의 수지를 섬유위에 도포함으로써 함침시킨후 경화시키고 마지막으로 경화후 표면도장을 통해 마감공정을 실시하였다.

2.4 진동수계측

본 연구에서 진동은 시험체의 일부분에 일정한 충격을 주어 얻어졌고, 이때의 진동 특성은 시험체의 L/4지점에 가속도계를 설치하여 측정하였다. 진동시험은 건전상태의 고유진동수와 균열을 발생시킨 손상상태 시험체의 고유진동수 그리고 보강상태의 고유

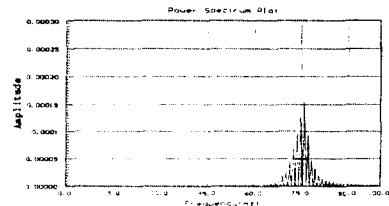
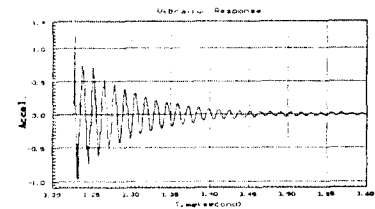
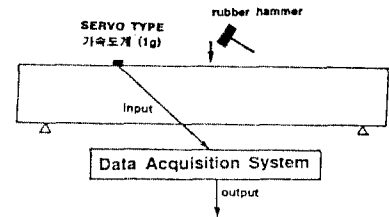


그림2.2 고유진동수 검출과정

진동수를 그림2.2와 같이 측정하였다. 그림 2.2에서 알 수 있듯이 본 연구에서 실시된 구조물의 진동은 rubber hammer에 의해 주어지며, 이때 발생된 아날로그 형식의 가속도신호는 DAS(Data Acquisition System)에 의해 디지털 데이터로 변환되며, 또한 고유진동수를 도출 하게 된다.

3. 진동수 계산 및 비교

3.1 단순식에 의한 계산

건전상태의 경우 고유진동수는 이론적으로 유도된 공식에 의해 계산이 가능하며 본 연구에서는 식(3.1)³⁾을 적용하여 고유진동수를 계산하였다.

$$f_n = \frac{9.87}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{wL^4}} \quad (3.1)$$

여기서, I = 단면2차모멘트
 w = 단위길이당 중량
 L = 지간
 f_n = 고유진동수(cycle per second)

손상상태인 경우에는 단면에 발생된 균열을 고려하기 위해 Branson이 제안한 처짐을 구하기 위한 유효단면2차모멘트 공식을 적용하였다.⁴⁾ 식(3.2)으로 표현되는 I_e 을 식(3.1)에 대입함으로써 손상상태의 고유진동수를 계산하였다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (3.2)$$

여기서 $M_{cr} = \sigma_w I_g / y_t$ = 균열모멘트
 σ_w = 콘크리트의 파괴계수 = $2.0\sqrt{\sigma_c}$
 y_t = 중립축에서 콘크리트의 인장축 최하단
 M_{max} = 처짐이 계산되는 시점에서 구조물에 작용하는 최대 모멘트
 I_g = 철근을 무시한 비균열 단면에 대한 중심축에 관한 단면2차모멘트
 I_{cr} = 환산단면의 단면2차모멘트

3.2 제안된 모델에 의한 진동수 계산

단순식에 의해 손상되거나, 보강된 보의

고유진동수를 예측하는 작업과정에서는 부재길이에 따른 손상정도 및 보강정도를 고려할 수 없다. 본 연구에서는 처짐을 계산하기 위해 Branson이 제안한 길이에 따른 유효 단면2차모멘트 공식인 식(3.3)을 채택하여 R/C보의 길이에 따른 손상상태를 표현하였다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^4 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^4\right] I_{cr} \leq I_g \quad (3.3)$$

여기서, M_{max} = 처짐이 계산되는 시점에서 구조물의 구하고자 하는 단면에 작용하는 최대 모멘트

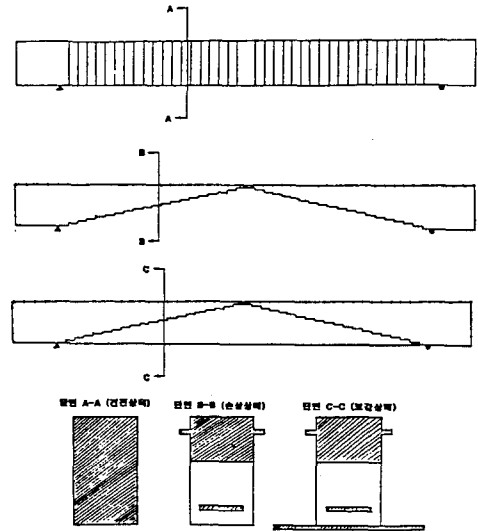


그림3.1 제안된 모델의 개념도

그림3.1은 건전상태, 손상상태 및 보강상태를 표현하기 위해 본 연구에서 제안된 physical model이다. 단면B-B 및 단면C-C는 손상되거나 보강된 R/C단면으로서 I_e 값에 근거하여 구한 유효깊이를 콘크리트 압축 유효면적으로 인정하고 있다. 제안된 physical model은 SAP90 software를 사용함으로써 각 상태에서의 보의 고유진동수를 제공하게 된다.

3.3 고유진동수 비교

표3.1은 본 연구에서 실시한 진동시험결과와 고유진동수 계산을 위한 단순식의 적용결과 및 제안된 physical model을 적용할 때 얻어지는 고유진동수를 비교한 것이다. 제안된 모델을 사용할 경우 건전상태 및 손상상태의 고유진동수는 단순식의 경우와 유사한 값을 나타내며, 강판보강의 경우 더욱 적절한 것으로 나타났다.

표3.1 실험 및 해석에 의한 진동수 비교

고유진동수		시험체상태		건 전 시험체	손상된 시험체	보강된시험체			
						강판보강 (m)		탄소섬유 보강(m)	
						1.5	1.9	1.5	1.9
고 유 진동수 (Hz)	실험값	70.3	65.8	77.5	77.3	73.9	73.9		
	해석값	단순식	84.6	46.7					
제안		82.4	48.6	69.4	69.6	52.5	52.6		
해석 실험	단순식	1.20	0.71						
	제안	1.17	0.74	0.90	0.90	0.71	0.71		

4. 손상계수 및 보강계수

본 연구에서는 시험체의 손상상태 및 보강상태의 정량적 평가를 위해 고유진동수에 근거를 두고 구조물의 평가를 위해 기 발표된 손상계수 및 본 연구에서 제안된 보강계수로서 강판 및 탄소섬유 sheet에 의한 보강효과를 평가하였다.

4.1 손상계수

손상계수(Damage Factor : D_F)란 구조물의 건전도 평가시 제안된 계수로서 이론적인 구조계의 고유진동수와 현존하는 손상된 구조계의 고유진동수를 비교함으로써 얻어진다.⁵⁾ 손상계수의 정의는 식(4.1)과 같은데, 이러한 개념을 본 연구에서 실시하고 있는 보 시험체에 적용하였다.

$$D_F = \frac{\omega_D^2}{\omega_I^2} \quad (4.1)$$

여기서, ω_D = 손상된 보의 고유진동수
 ω_I = 건전한 보의 고유진동수

4.2 보강계수

구조물의 손상평가 지수인 손상계수의 개념을 이용하여 본 연구에서는 보강계수라는 개념을 도입하였다. 보강계수(Strengthening Factor : S_F)란 손상된 보의 고유진동수와 보강된 보의 고유진동수를 비교 함으로써 얻어지며 식(4.2)와 같이 표현된다.

$$S_F = \frac{\omega_R^2}{\omega_D^2} \quad (4.2)$$

여기서, ω_R = 보강된 보의 고유진동수

또한 건전하였던 초기상태에 대한 보강된 최종상태와를 비교하기 위하여는 식(4.3)과 같은 회복계수(Recovery Factor : R_F)가 정의될 수 있다.

$$R_F = \frac{\omega_R^2}{\omega_I^2} \quad (4.3)$$

표4.1은 본 연구에서 실시된 진동실험에 근거한 고유진동수에 의한 구조물의 손상계수, 보강계수 및 회복계수를 정리한 것으로 보강계수를 살펴볼때 보강길이가 길어 질수록 보강효과가 나은 것으로 나타났고 강판접착 공법이 탄소섬유 sheet 보강공법에 비해 보강효과가 다소 나은 것으로 나타났다. 그림 4.1은 이를 도식적으로 나타낸 것이다.

표4.1 손상계수와 보강계수

시 험 체	손상계수 (D_F)	보강계수 (S_F)	회복계수 (R_F)
탄소섬유보강(1.9m)	0.84	1.35	1.14
탄소섬유보강(1.5m)	0.90	1.32	1.25
강 판 보 강 (1.9m)	0.83	1.43	1.18
강 판 보 강 (1.5m)	0.94	1.34	1.20

감사의 글

본 연구는 T.S본드 건설공업(주)의 연구지원을 받아 수행된 연구임을 밝히며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. R.N. Swamy, R. Jones, A. Charif, " The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams ", Structural Engineer, Vol. 67, No. 3, 1989 pp. 45~54
2. 최완철 외, " 에폭시접착강판으로 보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동에 관한 연구 ", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제6권 제1호, 1994년 5월, pp. 25~29.
3. Huang, T. C., " Eigenvalues and Modifying Quotients of Vibration of Beam, and Eigen Functions of Vibrations of Beam ", Univ. Wis. Eng, Exp. Sta. Repts. Nos. 25 and 26, 1964.
4. Dan E. Branson. Discussion of " Variability of Deflections of Simply Supported Reinforced Beams", by ACI Committee 435, ACI Journal, proceedings, 69, July 1972, 449~451.
5. 조효남, 장동일, " 농업토목 수리구조물 안전도 평가시스템 개발 ", 농업진흥공사, 1989.

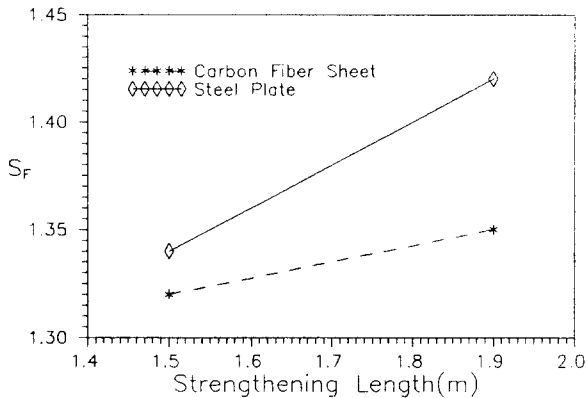


그림41 보강재료 및 보강길이에 따른 보강계수변화

5. 결 과

본 연구에서는 강판보강공법과 탄소섬유 보강공법을 이용하여 보강된 20개의 철근콘크리트 보의 보강효과를 검토하였다. 본 연구를 수행함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 손상상태 및 보강상태를 표현하기 위해 physical model을 제안하였다.

둘째, 보강된 보의 보강효과를 정량적으로 평가하기 위하여 보강계수(S_f)를 제안하였다.

셋째, 보강계수를 적용할 경우 강판보강이 탄소섬유sheet 보강 보다 보강효과가 약간 크게 나타났으나, 경제성에 대한 검토는 추가되어야 한다.

네째, 구조물의 경우에도 해석없이 현장에서 고유진동수 측정만으로 보강효과를 검증할 수 있을 것으로 사료된다.