

섬유보강 RC교각의 내진성능에 관한 유사동적실험 연구

Pseudo Dynamic Test Research on the Seismic Performance of RC Bridge Piers Retrofitted with Fiber Sheet

박 종 협^{*} 박 희 상^{**} 정 영 수^{***}
Park, Jong Heob Park, Hee Sang Chung, Young Soo

ABSTRACT

The objective of this experimental research is to assess the seismic performance of circular RC bridge pier specimens retrofitted with fibers which were designed as a prototype of Hagal bridge in the city of Suwon, Korea. Pseudo-dynamic test has been done for two nonseismic test specimens which were nonseismic designed by the related provisions of the Highway Design Specification, and four nonseismic test specimens retrofitted with fibers in the plastic hinge region. Important test parameters were load patterns, and retrofit. The seismic behavior has been analyzed through the displacement ductility, energy analysis, and capacity spectrum. Approximate 7.0 displacement ductility was observed for nonseismic test specimens retrofitted with fibers. It is concluded that these retrofitting test specimens could have sufficient seismic capacity in the region of moderate seismic zone.

1. 서 론

최근에 연이은 국내외의 지진으로 인하여 내진에 대한 국민적 관심이 크게 고조되고 있다. 많은 역사지진기록이나 최근에 발생한 한반도 지진활동으로부터 우리나라는 중·약진지역으로 분류되고 있으며, 더 이상 지진의 위협으로부터 안전한 지역이 아니라는 인식이 확산되고 있다. 이에 1992년 처음으로 도로교표준시방서에 내진설계 규정을 도입하여 시행하고 있다. 그러나 국내에서는 14,000여개 이상의 각종 교량이 있지만 이들 중 절대 다수가 도로교표준시방서에 내진설계기준이 제정된 1992년 이전에 설계시공된 교량으로서 도로교표준시방서의 내진설계규정이 적용되지 않았으며, 이들 교량에 대한 내진성능평가 및 내진보강에 관한 연구는 아직 체계적으로 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 연구는 실제의 입력지진동을 이용하여 유사동적실험(Pseudo Dynamic Test) 방법으로 도로교표준시방서의 내진설계규정이 적용되지 않은 비내진 설계된 RC교각의 내진성능을 평가하고 섬유보강공법을 이용하여 비내진 RC교각의 내진성능향상 및 보강효과를 평가하기 위한 실험적 연구이다.

*정회원, 중앙대학교 토목공학과 박사수료

**정회원, 중앙대학교 토목공학과 석사과정

***정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수

2. RC 교각 실험

2.1 실험계획

본 연구에서는 경기도 수원시에 위치한 하갈교를 1/3.4축소모델로 하여 총 6본의 실험체를 제작하여 Load Pattern, 횡방향철근비, 섬유보강유무를 실험변수로 하여 유사동적실험을 수행하였다. Table 1은 Load Pattern을, Table 2는 실험계획 및 실험체명을 보여주고 있다.

Table 1 Load Pattern

Load Pattern	Earthquake Data	Input Ground Motion	
		Sequence	PGA
LP1	KHC Artificial Earthquake (PGA : 0.20g)	1	0.154g
		2	0.220g
		3	0.300g
		4	0.400g
		5	0.500g
		6	0.600g
LP2	Kaihokus Artificial Earthquake (PGA : 0.36g)	1	0.154g
		2	0.220g
		3	0.260g

Table 2 Experimental Plan and Specimen Designation

Classification	Specimen Designation	Remark
Nonseismic Design	NS-LP1	Axial Force 43.01 tonf
TYFO SHE51 Fiber Glass	FT-LP1	
CAFGL 1000 Fiber Glass	DT-LP1	
Nonseismic Design	NS-LP2	
TYFO SHE51 Fiber Glass	FT-LP2	
SK-N300 Carbon Fiber	CF-LP21	
Toatl 6 Specimen		
* NS : Non-Seismic FT : TYFO SHE51 Fiber Glass CF : SK-N300 Carbon Fiber DT : CAFGL 1000 Fiber Glass LP1,2 : Load Pattern 1,2		

사용된 인공지진파는 KHC(Korea Highway Corporation) 인공지진파와 Kihokus 인공지진파를 입력 지진파로 구분하여 유사동적실험을 수행하였다. KHC 인공지진파는 한국도로공사에서 작성된 인공지진파로서 토질조건은 암반 또는 경질의 토층이며 PGA(Peak Ground Acceleration)는 0.2g이다. Kaihokus인공지진파는 일본 건설성 토목연구소에서 개발한 형태Ⅱ(지진시 보유 수평내력 조사용)로서 경암 조건이며 PGA는 0.36g이다. Fig. 1 및 2는 인공지진파의 가속도를 보여주고 있다.

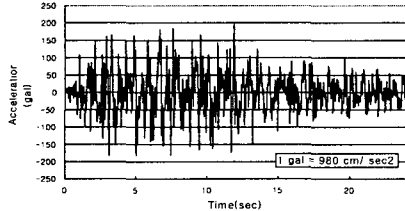


Fig. 1 KHC Artificial Earthquake

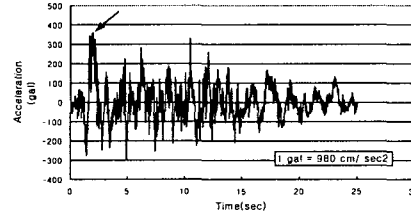


Fig. 2 Kaihokus Artificial Earthquake

2.2 보강 설계 및 실험개요

하갈교를 1/3.4축소모델로 하여 최대 수평력에 대한 전단검토로서 최소전단철근량 규정에 의해 비내진 설계를 하였다. 내진설계 교량인 하갈교의 구속철근비는 0.00826로서, Fig. 4의 섬유보강설계는 이와 동일한 횡방향 구속력을 줄 수 있도록 Priestley가 제시하고 식 (1)과 같이 보강설계를 하였다.⁽⁵⁾

$$t_j = \frac{0.1(\epsilon_{cu} - 0.004)Df'_{cc}}{f_{tj} \epsilon_{tj}}, \quad \epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5 \rho_{sh} f_{yh} \epsilon_{sh}}{f_{cc}} \quad (1)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c}} - \frac{2 f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (2)$$

식 (1)에서, t_s 는 섬유보강설계두께, ϵ_{cu} 는 구속콘크리트의 극한변형률, D 는 단면의 직경, f_{cc} 는 구속콘크리트의 항복강도, f_{ug} 및 ϵ_{ug} 는 보강재료의 극한응력 및 극한변형률을 나타낸다. 구속콘크리트의 극한변형률 ϵ_{cu} 및 구속콘크리트의 항복강도 f'_{cc} 는 식 (1) 및 (2)에 따라 계산되며 여기서, ρ_{sh} 는 횡방향철근비, f_{yh} 및 ϵ_{sh} 는 횡방향철근의 항복강도 및 극한변형률을, f'_i 및 f'_c 는 단면형상에 따른 유효구속응력 및 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. 위의 계산과정에 의해 비내진설계 교각에 대하여 계산해본 결과 요구되는 보강섬유의 두께가 TYFO SEH51제품은 1.382mm, CAFGL1000제품은 1.548mm, SK-N300탄소섬유는 보강두께가 0.290mm로 나타났으므로, Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 소성hinge 아래 구간(50cm 중 25cm)에는 2장을 횡으로 감싸고, 소성hinge 위구간(25cm)에는 횡으로 1장을 감싸는 방법으로 비내진 설계 교각을 보강하였다. 콘크리트는 목표압축강도 $240kgf/cm^2$ 로 최대골재치수 13mm골재의 레미콘을 사용하였으며 철근은 SD40을 사용하였다. 기둥본체의 콘크리트 압축강도는 약 $261kgf/cm^2$ 이었다. 철근은 KS D 3504에 의한 SD40인 D10의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 D6을 사용하였으며 KS B 0820에 따라 각각의 3개의 시편에 대한 인장실험을 실시하여 각각 평균항복강도 $4,700kgf/cm^2$ 과 $4,400kgf/cm^2$ 의 값을 얻었다. 비내진설계된 기존 교각 교각의 내진성능 향상을 위하여 기둥의 소성hinge 구간에 유리섬유, 탄소섬유로 각각 보강하였다. 유리섬유는 인장강도 $5,600kgf/cm^2$, 두께 1.3mm의 TYFO SEH51제품과 $5,000kgf/cm^2$, 1.0mm인 CAFGL1000제품을 사용하였으며, 탄소섬유는 인장강도와 두께가 $35,500kgf/cm^2$, 0.167mm인 SK-N300를 사용하여 각각 보강하였다.

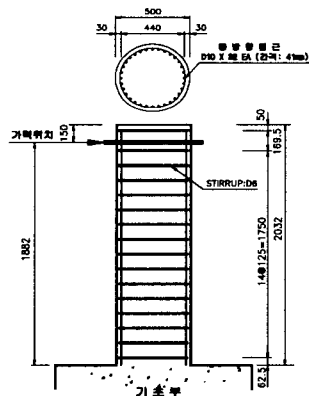


Fig. 3 Conventional Nonseismic Code Design

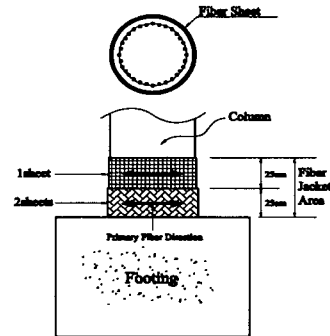


Fig. 4 Retrofit Design

3. 실험 결과 분석

3.1 서론

Explicit Newmark β 방법에 의해서 총 6본의 실험체에 대해 수행된 유사동적실험 결과로 각 실험체의 파괴양상을 살펴보면 비내진실험체는 균열발생, 피복박리, 횡방향철근 혹은 주철근 좌굴, 파단하는 현상을 보였고, 섬유보강실험체의 경우는 무보강부근의 균열, 보강부분의 균열, 섬유일부파단 및 피복박리, 최종적으로 섬유가 심각한 파단현상을 보이면서 주철근이 좌굴하는 파괴 양상을 보였다.

3.2 변위연성도

교각의 내진성능은 일반적으로 소성변형 능력의 크기로 표현되는 변위연성도($\mu_d = \Delta_u/\Delta_y$)를 기준으로 평가할 수 있다. 극한변위(Δ_u)는 Fig. 5에 보이는 바와 같이 최대강도 이후 15% drop이 발생한 시점까지 경험한 최대변위와 주철근 파단시점까지 경험한 최대변위 중 작은값을 극한변위로 정의 하였으며, 항복변위(Δ_y)는

Fig. 5에서 정의한 방법에 따라 하중-변위곡선상에서 설계모멘트 M_u 에 해당하는 횡력 V_i 를 지나는 수평선과 원점에서 설계모멘트강도의 75%에 해당하는 횡력 ($0.75 V_i$)을 지나는 직선과의 교점을 항복 변위로 정의 하였다. 이에 따라 변위연성도 ($\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$)를 분석해 본 결과 Table 3에서 보여주는 바와 같이 TYFO SHE51 Fiber Glass 보강실험체는 비내진실험체에 비해 1.323~1.537 정도의 변위연성능력의 차이를 보여주고 있으며, SK-N300 Carbon Fiber 보강실험체는 1.134배, CAFGL1000 Fiber Glass 보강실험체는 1.148배의 변위연성능력의 차이를 보여주고 있다.

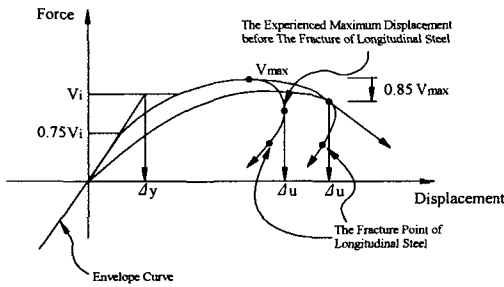


Fig. 5 Definition of Yield and Ultimate Displacement

Table 3 Displacement Ductility

Specimen	Displacement Ductility $\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$	Normalized Displacement Ductility
NS-LP1	5.630	1.000
FT-LP1	7.661	1.323
DT-LP1	6.648	1.148
NS-LP2	6.731	1.000
FT-LP2	10.343	1.537
CF-LP2	7.636	1.134

3.3 역량 스펙트럼

ATC40에서 제안하고 있는 역량스펙트럼방법에 따라 지진구역 I 지역에 위치한 내진 I 등급 구조물로 단단한 토사지반상에 위치한다고 가정하고 RC교각실험체의 내진성능을 평가하였다.⁴⁾ 역량스펙트럼 분석법에 의해 내진성능을 평가하기 위해 등가점성감쇠비는 식 (3)의 다케다모델(Takeda Model)을 이용하였다.

$$\zeta_{eq} = 0.05 + (1 - (1 - \gamma) / \sqrt{\mu} - \gamma \sqrt{\mu}) / \pi \quad (3)$$

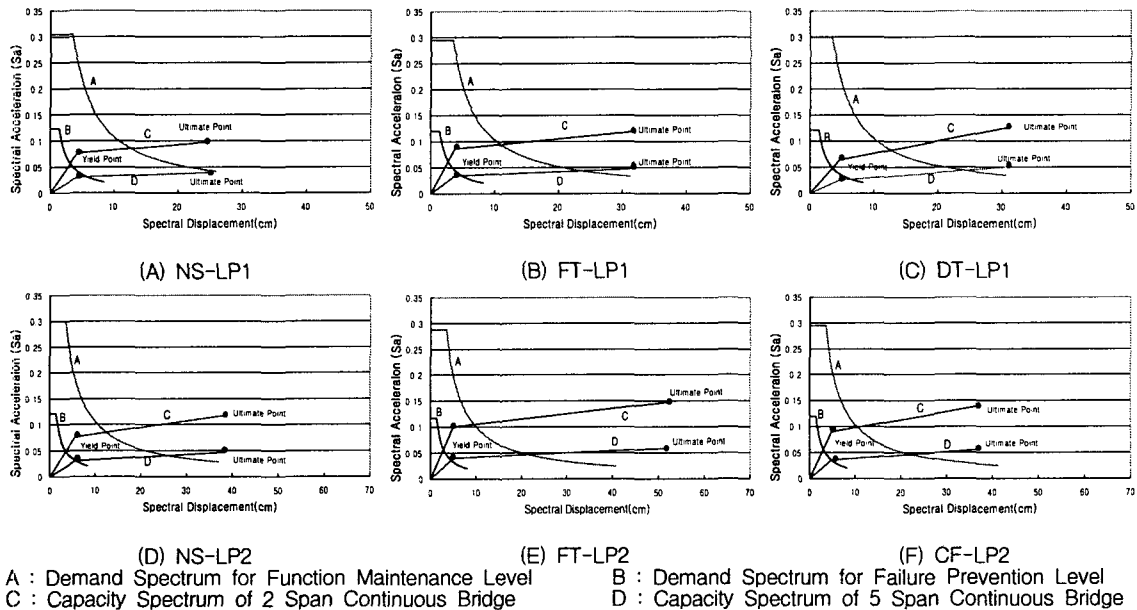


Fig. 6 Capacity Spectrum Analysis

식 (3)에서 γ 는 초기강성에 대한 항복후의 2차강성비로 전형적인 값 0.05를 사용하였으며, μ 는 구조물의 변위연성도이다. 역량스펙트럼분석법에 의해 분석한 결과를 Fig. 6에 보여 주고 있다. 위의 2경간 연속 교량인 하갈교를 대상모델로 하여 각 실험체의 역량스펙트럼 분석 결과 모든 실험체가 기능수행 수준 및 붕괴방지수준을 만족하는 것으로 나타났다. 한편 5경간 연속교로 하여 역량스펙트럼을 분석해 본 결과 비내진실험체는 현행도로표준시방서에서 규정하고 있는 붕괴방지수준을 만족하지 않았으며 섬유보강실험체는 각각 붕괴방지수준을 만족하는 것으로 나타났다.

3.4 에너지분석

SDOF시스템의 구조물이 지진동을 받는다면 운동방정식은 식 (4)와 같이 표현될 것이다.

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + f_s = -m\ddot{v}_g \quad (4)$$

여기서 m 은 질량, \ddot{v} 는 가속도, c 는 damping, \dot{v} 는 속도, f_s 는 복원력을 \ddot{v}_g 는 지반가속도를 나타낸다. 구조물이 지반가속도에 의한 입력지진동을 받는다면 입력지진동에 의한 total input 에너지는 운동에너지 및 변형에너지로 구조물에 일시적으로 저장될 것이며 나머지 부분들은 damping 에너지 및 hysteretic energy의 형태로 모두 소산될 것이다.⁷⁾ 식 (4)의 운동방정식을 에너지 방정식으로 바꾸면 식 (5)이 될 것이다.

$$\int m\dot{v}dv + \int c\dot{v}dv + \int f_s dv = - \int m\dot{v}_g dv \quad (5)$$

위의 식에서 $\int m\dot{v}dv = E_k$ 는 운동 에너지를, $\int c\dot{v}dv = E_d$ 는 damping 에너지를, $\int f_s dv = E_h$ 는 구조물의 흡수되는 흡수에너지를 나타내면 E_h 는 회복 가능한 탄성변형에너지 E_s 및 회복 불가능한 구조물의 hysteretic energy E_h 의 합으로 구성되며, $-\int m\dot{v}_g dv = E_i$ 는 입력지진하중에 의한 total input energy를 나타낸다. 식 (5)의 에너지방정식을 이용하여 유리섬유보강 실험체의 LP1 및 LP2에 대한 전형적인 에너지 분석 결과를 Fig. 7에 보여 주고 있다. Fig. 7에서 보듯이 KHC인공지진파를 받는 LP1실험체는 fatigue현상과 같이 일정한 hysteretic 에너지의 증가현상을 보여 주었으며 파괴까지의 PGA값도 LP2 실험체에 비해 높은 값을 나타내었다. Kaihokus인공지진파를 받는 LP2 실험체는 지진 Data의 초기 2초 부근에서 일방향 편축의 집중적인 PGA에 의해서 강력한 에너지 소산이 발생하여 이 부분에서 실험체는 심각한 손상을 받아 내진성능을 극도로 저하시키는 것을 볼 수가 있었다. 섬유보강실험체는 LP1에 대해 0.90g, LP2에 대해 0.26g에서 파괴상태를 보였으며, 이는 Fig. 7에서 보듯이 LP1하중을 받는 섬유보강실험체의 0.154g에서 최대 total input 에너지는 약 15,000(KN·mm) 인데 반하여, LP2하중을 받는 섬유보강실험체는 동일 PGA인 0.154g에서 최대 total input 에너지가 약 55,000(KN·mm)로 약 3배의 손상을 미치는 것을 알 수가 있다. 따라서 동일한 PGA를 갖는다 할지라도 지진파형의 차이에 의해서 에너지소산능력에서 상당한 차이를 보이므로 향후 내진보강시 이에 대한 고려가 있어야 하리라 사료된다.

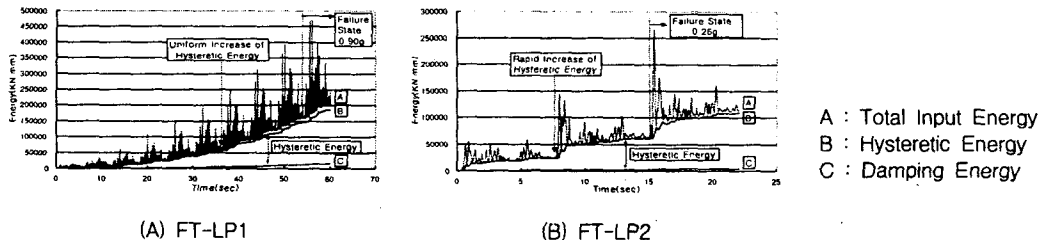


Fig. 7 Energy Analysis

4. 결론

본 실험연구는 경기도 수원시 국도상에 위치한 하갈교를 3.4:1의 축척을 고려한 원형충진단면의 RC 교각에 대하여 유사동적실험(Pseudo Dynamic Test)을 수행하였다. 비내진설계된 실험체, 그리고 비내진실험체에 유리섬유 및 탄소섬유로 보강 제작하여 KHC인공지진파와 Kaihokus인공지진파를 입력하여 실험을 수행하였으며 이에 따른 본 실험 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 유사동적 실험결과로 나타난 일반적인 RC 교각의 소성힌지부는 기둥의 지름이하의 위치이며 대부분의 실험체가 기둥지름의 1/2이하의 위치에서 파괴가 발생되었다.
- ② 섬유보강실험체는 비내진설계된 실험체에 비해 1.15~1.54배 정도의 변위연성능력을 보여 주었다.
- ③ 대상교량을 5경간 연속교로 하여 역량스펙트럼을 분석해 본 결과 비내진 실험체는 현행도로교표준시방서에서 규정하고 있는 붕괴방지수준을 만족하지 않았으며 섬유보강실험체는 각각 붕괴방지수준을 만족하는 것으로 나타났다.
- ④ LP2 실험체는 지진 Data의 초기 2초 부근에서 일방향 편측의 집중적인 PGA에 의해서 강력한 에너지 소산이 발생하여 이 부분에서 실험체는 심각한 손상을 받아 내진성능이 극도로 저하됨을 알 수 있었다.
- ⑤ 비내진설계된 실험체라도 정확한 보강설계에 의한 시공이 이루어진다면 중약진 지진에 대하여 충분한 연성을 발휘할 수 있으리라 사료된다.

5. 감사의 글

본 연구는 건설교통부(과제번호:970003-4), 한국지진공학센터(과제번호:1997G0402), 현대건설기술연구소 및 콘크리닉(주) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 한국도로교시방서(1996), 건설교통부
- (2) 정영수, 한기훈, 이강균, 이대형, "원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험", 한국지진공학회 논문집, 제3권 2호, 1999. 6.
- (3) 정영수, 이강균, 한기훈, 박중협, "단일주 원형 철근콘크리트 교각의 내진거동에 관한 준정적 실험", 한국지진공학회 논문집, 제3권 2호, 1999. 6.
- (4) ATC32, "Improved Seismic Design Criteria for California Bridges :Provisional Recommendations", Applied Technology Council, USA, 1996
- (5) M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi, "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, Inc.
- (6) Pui-shum B. Shing and Stephen A. Mahin (1984), "Pseudo-Dynamic Test Method for Seismic Performance Evaluation: Theory and Implementation", UCB/EERC- 84 /01
- (7) Nadim I. Wehbe, M.Saiid Saiidi and David H. Sanders, "Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement", ACI Structural Journal, March-April 1999, pp248~258
- (8) Christopher R. Thewalt and Stephen A. Mahin(1987), "Hybrid Solution Techniques for Generalized Pseudodynamic Testing", Report No. UCB/EERC-87/09