

준정적실험에 의한 섬유보강된 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가

Quasi-Static Test for Seismic Performance of R/C Bridge Piers Retrofitted with Glassfibers

이 대 형**

Lee, Dae Hyoung

이 재 형***

Lee, Jae Hyung

정 영 수*

Chung, Young Soo

박 진 영***

Park, Jin Young

ABSTRACT

Recent earthquakes in California and Japan caused extensive damage to highway bridge structures. It is also thought that during probable earthquakes bridge structures in Korea could be failed due to the structural deficiencies, which were nonseismically designed and constructed before 1992. In these regards, innovative strengthening methods have been developed to repair reinforced concrete bridge columns, especially by glassfiber sheet bonding methods which are widely used today.

The primary objective of this research is to investigate the seismic behavior of RC bridge columns retrofitted with composite straps and to propose pertinent guidelines of repair and rehabilitation method for earthquake resistant design procedure of RC bridges which are located in low or moderate seismicity regions. Six scaled-down concrete test specimens were made with test variables such as lap splice ratio, axial force ratio, confinement ratio, composite straps in the plastic hinge region. Pertinent design guidelines could be developed for the earthquake resistant design of RC bridge piers retrofitted with glassfibers in low or moderate seismic region.

1. 서론

국내의 철근콘크리트 교각은 1992년 내진설계규정이 도입된 이후 교각의 주철근을 구속철근으로 보강하는 내진설계가 이루어지고 현재까지의 연구결과는 국내의 지진위험도에 비추어 상당한 내진성능을 보유하는 것으로 보고되고 있다. 하지만, 내진설계규정(1992)이 도입되기 이전에 건설된 철근 콘크리트 교각이 지진에 의해 어떠한 거동을 보일지 의문시되고있으며 이러한 교각을 내진설계규정에 만족할 수 있도록 하기 위해 재시공되는 것은 많은 경제적 어려움이 예상된다. 따라서 적절히 기존 교각을 보수·보강하여 사용하는 것이 최선의 방법이라 사료된다. 보수·보강 방법에는 여러 가지가 있겠으나 본 연구에서는 유리섬유로 철근콘크리트 교각의 소성힌지구간을 보강하는 방법을 이용하였다.

또한, 기존의 철근콘크리트 교각의 경우 시공상의 이유로 인하여 소성힌지구간에 주철근을 접이음하는 경우가 많이 있으며 이로 인한 교각전체의 내진성능 저하가 예상된다. 따라서 본 연구에서는 소성힌지구간에 접이음된 철근콘크리트교각을 유리섬유 등으로 보강하는 경우 내진성능의 향상정도를 평가하여 기존의 교각에 대한 보수보강의 기준을 마련하고자 하였다. 아울러 RC교각의 내진성능에 영향

* 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

** 정회원, 경북도립 경도대학 건설환경공학과 조교수

*** 정회원, 중앙대학교 대학원 석사과정

을 미치고 있는 변수들로서 내진설계의 주요원인인 구속철근비, 주철근 겹이음, 축방향력, 보강유/무 등에 대한 준정적(Quasi-static)실험을 실시하여 이들 변수에 의한 RC교각의 내진성능을 평가하고자 하였다. 이러한 결과를 이용하여 기존 철근콘크리트 교각의 내진성능 향상기법 및 주철근겹이음에 대한 보강, 축하중의 변화에 의한 내진규정을 제시하고자 한다.

2. 연구내용

본 연구를 위한 대상 모델은 국내의 내진 1등급으로 설계된 수원시의 하갈교를 대상으로 비내진, 중저진, 내진설계한 교각을 1/2.8로 축소하고 Aspect Ratio를 4로하여 휨파괴를 유도한 원형 콘크리트 교각시험체를 제작하였다. 또한, 시험체를 유리섬유로 보강하여 보강에 따른 내진성능을 평가하고자 하였다. 보강시험체는 소성힌지구간에 1장의 유리섬유로 보강하였으며 유리섬유의 탈락을 방지하기 위하여 기초부위까지 연장하여 보강하고 앵커링을 하였다.

2.1 재료의 특성

2.1.1 콘크리트 및 철근

콘크리트 및 철근의 물리적 특성은 참고문헌[2]에 상세하게 나타내었으며 슬럼프 18cm, 굵은 골재 최대치수는 13mm, KS F 2405에 따른 압축강도 296kg/cm^2 의 레미콘을 사용하고 주철근은 KS D 3504에 규정된 SD40, D6을 사용하였다. 이들의 항복강도는 KS B 0820에 따라 각각 5600kg/cm^2 과 4400kg/cm^2 의 항복강도를 얻었다.

2.1.2 유리섬유

본 연구에서 이용한 유리섬유는 SEH51과 CAF GL-1000을 사용하였으며 이들의 물리적 특성은 다음 표 1과 같다. 유리섬유의 두께는 다음 식(1)에 의해 계산되었다.⁵⁾

$$t_g = \frac{0.1(\epsilon_{cu} - 0.004)Df_{cc'}}{f_{ul}\epsilon_{ul}} \quad (1)$$

여기에서, t_g =Thickness of Fiber Sheet, ϵ_{cu} =Strain of Confinement Concrete, D =Diameter of Section, $f_{cc'}$ =Yield Stress of Confinement Concrete, f_{ul} =Yield Stress of Fiber Sheet, ϵ_{ul} =Ultimate Strain of Fiber Sheet

표 1 유리섬유의 물리적 특성

Classification	Tensile Strength (kgf/cm^2)	Tensile modulus (kgf/cm^2)	Elongation (%)	Thickness (mm)
Foreign Glass Fiber (TYFO SEH 51)	5,600	252,000	2.0	1.3
Domestic Glass Fiber (CAF GL-1000)	6,200	250,000	2.4	1.0

2.2 시험체 제작

Quasi-static실험에 사용된 시험체의 단면과 띠철근 및 Cross tie제원은 그림 1에 나타내었다. 상세한 실험변수에 따른 띠철근 간격 및 축하중은 다음 표 2에 나타내었다. 본 연구를 위한 시험체는 띠철근의 간격에 의한 내진설계 유/무, 주철근의 50% 겹이음, 겹이음시험체의 유리섬유보강 시험체를 제작하였다. 주철근의 겹침이음은 그림 3과 같이 기존 연구결과³⁾로부터 주철근의 파단이 처음으로 발생된 부분(기초상단 0.28D)을 겹침이음 중심으로 하여 배근하였다. 겹이음 길이는 다음 식(1)과 같이 결정하였다.¹⁾ 내진시험체의 보강띠철근 및 후프띠철근의 갈고리의 연장길이는 40mm, 겹침이음길이는 190mm이고 중저진(EC8)시험체의 보강띠철근 및 후프띠철근의 갈고리의 연장길이는 65mm, 겹침이음 길이는 190mm이고 비내진시험체는 후프띠철근에 갈고리없이 겹침이음이 190mm만 있게 설계하였다.

$$l_d = 0.007 f_y d_b = 0.007 \times 4000 \times 0.953 = 26.684 \text{ cm} \approx 27 \text{ cm} \quad (1)$$

표 2 실험변수 및 시험체명

Classification	Nomenclature	Confinement Steel Space		Axial Force	Remark	
		PHR	NPHR			
Nonseismic	$P/f_{ck}A_g=0.1$	N-SP00-P1-R0	12.2 cm	16.8cm	67.8 ton	$\rho = 1.1\%$
	50% splice	N-SP05-P1-R0	12.2 cm	16.8cm		
		N-SP05-P1-R1	12.2 cm	16.8cm		SEH 51
		N-SP05-P1-R2	12.2 cm	16.8cm		CAF GL-1000
Seismic	S-SP00-P1-R0	3 cm	4.5 cm			
Limited Seismic	L-SP00-P1-R0	5 cm	6 cm			

※註 : S : Seismic Design, L : Limited Ductile Design, N : Nonseismic Design
 SP00 : 0% Lap-splice, SP05 : 50% Lap-splice,
 R0 : Non-retrofit PHR : Plastic Hinge Region, NPHR : Non-plastic Hinge Region

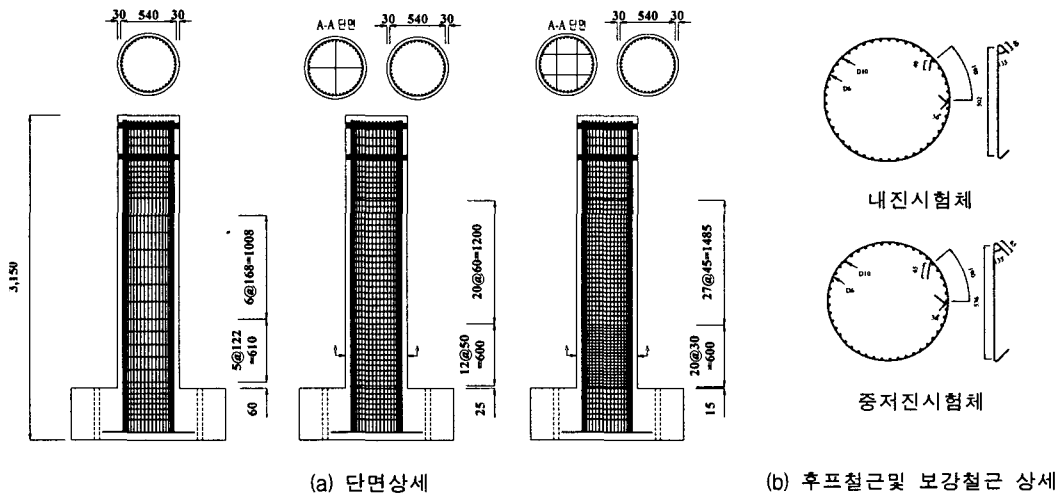


그림 1 시험체 상세

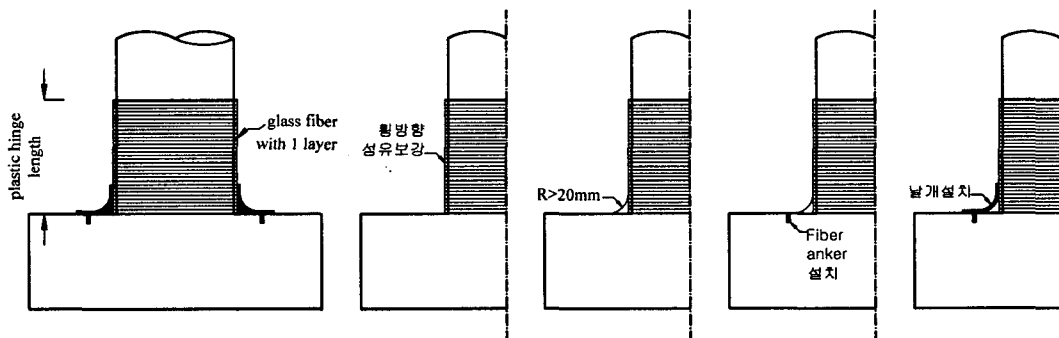


그림 2 유리섬유부착 상세

2.3 계측장비

시험체의 주철근, 띠철근, Cross Tie에 Strain Gage를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였고 시험체 柱부의 변위를 측정하기 위하여 시험체의 중앙부와 횡방향 가력위치에 LVDT를 설치하였고 기초부의 들림 및 밀림을 측정하기 위하여 상면, 측면에 LVDT를 설치하였다. 시험체의 소성힌지구간에서의 곡률을 측정하기 위하여 Displacement Transducer를 앞뒷면에 3기씩 부착하여 측정하였다. 그림 3에 시험체의 측정장치 부착도를 나타내었다.

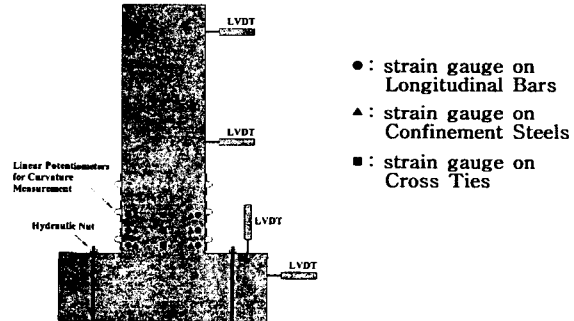


그림 3 측정장치 부착도

3. 실험개요 및 하중

Quasi-Static 실험을 위하여 축하중을 300ton Oil jack을 이용하여 재하하고 횡방향 변위가 발생하더라도 일정한 축하중이 재하될 수 있도록 일정한 하중을 유지할 수 있는 유압기를 이용하였다.

횡방향의 반복하중은 1000kN hydraulic actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력하였으며 하중 재하 Pattern은 다음 그림 4와 같다.

기동시험체의 항복변위, Δ_y 는 탄성해석을 통하여 이론적인 휨응력에 상응하는 횡방향 하중에 대한 주철근의 변형률이 0.002의 75%에 도달시까지 하중 제어방식으로 1 cycle 재하한 후 그때 측정된 양방향 변위의 평균값($\Delta_y = \frac{|\Delta_{y1}| + |\Delta_{y2}|}{2}$)을 항복변위로 규정하였다. 횡방향 하중형태는 실험을 통하여 얻은 Δ_y 에 대하여 그림 4와 같이 1.0 Δ_y , 1.5 Δ_y , 2.0 Δ_y , 2.5 Δ_y , 3.0 Δ_y , 4.0 Δ_y , ...로 초기에는 변위를 0.5 Δ_y 씩 증가시켜 초기 교각의 연성도를 상세하게 관측하고 3.0 Δ_y 이후로 1.0 Δ_y 씩 증가시키는 2cycle형태의 피로거동으로 반복재하하여 동일진폭에 대한 교각의 거동특성의 차이를 비교 분석하였다.

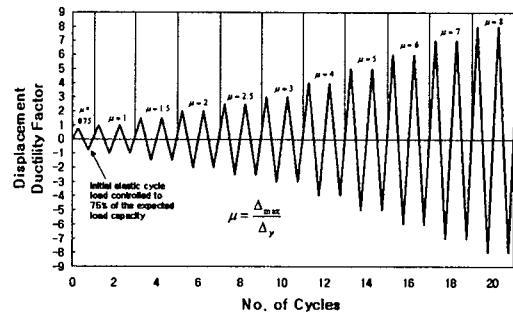


그림 4 반복하중 형태

4. 실험결과 분석

4.1 변위 연성도

설계하중 이상의 대규모 지진이 발생할 경우 혹은 설계하중보다 작은 하중이라도 발생빈도가 낮은 지진하중에 대하여 탄성설계를 하는 것은 매우 비경제적이다. 따라서 설계시 소성설계개념은 경제적인 관점에서 매우 중요하다. 이러한 소성설계개념은 철근콘크리트 구조물에 도입할 경우 지진하중과 같이 반복하중에 대한 콘크리트 구조물의 유연성 확보가 가능한 설계방법이 필요하다. 지진하중에 의한 콘크리트 구조물의 파괴는 인장력을 받는 횡방향 철근에 소성변형이 발생할 경우 심부 콘크리트의 균열 및 팽창으로 횡방향 철근의 판단에서부터 시작된다. 현행 도로교 시방서에 규정된 응답수정계수, R,는 이러한 콘크리트 구조물의 유연도를 고려하기 위한 방법이다.

본 연구에서는 이러한 유연도를 정확하게 평가하기 위하여 항복 및 최대 변위를 이용한 변위연성도를 평가하였다. 하지만 항복 변위와 최대변위에 대한 정확한 기준이 불분명하여 연구자들에 따라 다소 차이를 보이나 현재 많은 연구자들이 채택하고 있는 방법에 따라 변위연성도를 평가하였다. 먼저 항복

변위는 실험적으로 주철근의 항복변형률의 75%가 발생할 만큼 기동시험체를 가력하여 1 cycle하여 이를 Push/Pull방향에 대하여 평균한 값, 그리고 구조물의 하중-변위곡선의 원점과 최대내력의 75%에 해당하는 변위점을 이은 직선이 최대내력점에 도달하였을 때의 수평변위로 정의한다. 최대 변위는 수평하중이 최대하중에 비해 15%정도 저하되었을 때의 변위[그림 5]와 주철근이 최초로 파단되었을 때의 변위로 정의하여 이들에 대하여 연성도를 구하였다.

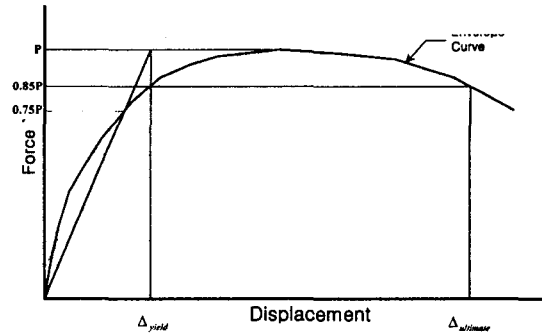


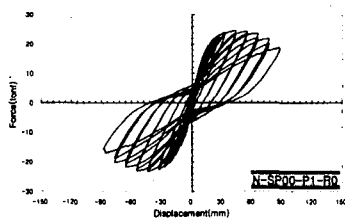
그림 5 항복변위와 극한변위의 정의

다음 표 3은 변위연성도를 평가한 결과이다. 이론적으로 구한 연성도의 결과가 실험에서 구한 연성도의 결과보다 작게 평가되며 비내진 시험체의 경우 2.5~7정도의 연성도를 갖는다. 또한 특이한 점은 접이음이 있는 시험체의 경우 연성도가 상당히 작게 나타나나 유리섬유로 보강한 경우 연성도가 1.7배 가량 증가하는 것으로 조사되었다. 내진 시험체와 중저진 시험체의 경우 비내진 시험체에 비해 50% 및 10%정도의 연성능력이 향상되었다.

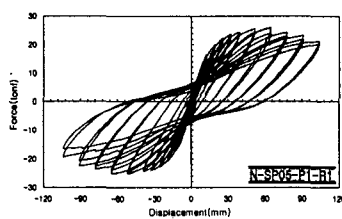
보강시험체의 경우 육안으로 주철근의 좌굴현상을 관찰할 수 없었으며 접이음 시험체의 경우에는 주철근의 파단이 발생하지 않았다.

표 3 변위연성계수(μ)

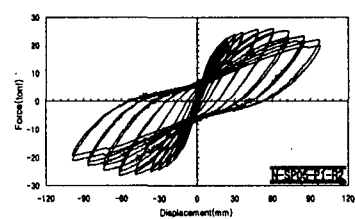
Specimen	Yield Displacement		Failure Displacement		Ductility Factor(μ)			
	Experimental (1)	Analytical (2)	Strength 15% drop(3)	Rebar Buckling (4)	(3)/(1)	(4)/(1)	(3)/(2)	(4)/(2)
N-SP00-P1-R0	11	19.973	79.810	66.469	7.25	6	4	3.33
N-SP05-P1-R0	10	18.719	46.928	without	4.69	-	2.5	-
N-SP05-P1-R1	13	24.527	98.751	without	7.6	-	4	-
N-SP05-P1-R2	12.4	22.217	94.834	87.369	7.65	7	4.27	3.93
S-SP00-P1-R0	12	21.339	123.724	117	10.31	9.75	5.80	5.48
L-SP00-P1-R0	11.9	22.339	97.902	71	8.22	5.96	4.38	3.18



(a) N-SP00-P1-R0



(b) N-SP05-P1-R1

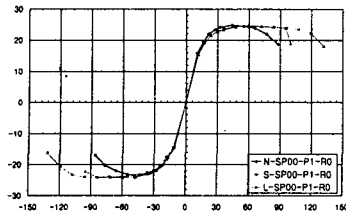


(c) N-SP05-P1-R2

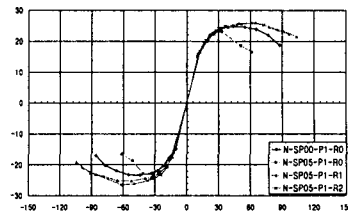
그림 6 하중-변위 이력곡선

4.2 하중-변위 포락곡선 및 에너지 흡수

하중-이력곡선에 대한 포락곡선은 그림7과 같이 나타나며 내진설계적용 시험체가 적용하지 않은 시험체에 비하여 우수한 연성능력을 보이고 있다. 또한 접이음시험체는 상당한 연성능력의 저하를 보이나 유리섬유로 보강한 경우에는 접이음이 없는 시험체보다 우수한 연성능력을 나타내고 있다.



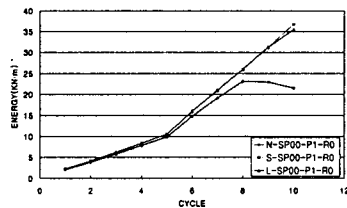
(a) 내진설계 유/무



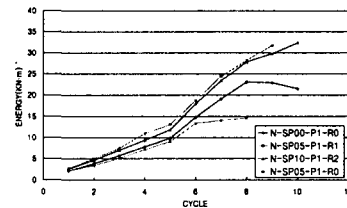
(b) 보강 유/무

그림 7 Lateral Force-Displacement Envelope Curve

각 Cycle별 에너지 흡수는 그림 8과 같으며 내진 및 중저진 시험체의 경우 75%정도의 에너지흡수 능력이 향상되었으며 보강 시험체의 경우 60%정도의 에너지 흡수능력이 향상되었다.



(a) 내진설계 유/무



(b) 보강 유/무

그림 8 Energy Absorption Curve

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험변수로 채택한 접이음, 내진설계 유/무에 따른 연성도의 평가에서 접이음에 의한 연성도의 저하가 가장 두드러지는 것으로 평가되었으나 이를 유리섬유로 보강하는 경우 오히려 연성능력이 접이음이 없는 시험체보다 증가하였다. 따라서, 기존의 철근콘크리트 교각의 접이음에 의한 연성능력저하 현상을 방지하기 위해 유리섬유 보강방법이 유효하리라 판단된다.
- 2) 내진 및 중저진 설계시험체의 연성능력이나 에너지 흡수능력이 상당히 우수하며 대체로 도로교시방서의 요구연성을 만족하는 것으로 평가되었다. 또한, 비내진 시험체의 경우도 유리섬유로 보강할 경우 충분한 연성능력을 발휘한다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(2000G0302) 및 (주)콘크리닉의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

1. 도로교설계기준(2000), 한국도로교통협회
2. 김태훈, 유영화, 신현목, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력에 관한 해석적 연구", 한국지진공학회 논문집, Vol.4, No.4, 2000.12
3. K.K.Lee, G.H.Han, Y.S.Chung, D.H.Lee, E.S. Hwang, "Quasi-Static Tests for Seismic Performance of R.C Bridge Piers," Proceedings of the Korea Concrete Institute, V.10, No.2, 1988, pp615~620
4. L.E. Aycardi, J.B. Mander, A.M. Reinhorn, "Seismic Resistance of Reinforced Concrete Frame Structures Designed Only for Gravity Loads : Part(II)," Experimental Performance of Subassemblages, Technical Report NCEER-92-0028, December1, 1992
5. M.J.N. Priestley, F.Seible, G.M.Calvi, "Seismic Design and Retrofit of Bridges", JOHN WILEY & SONS, Inc.