

## 섬유보강 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능 향상에 관한 유사동적 실험

정영수<sup>1)\*</sup> · 박종협<sup>1)</sup> · 박희상<sup>1)</sup> · 조창백<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 중앙대학교 건설대학 토목공학과

(2001년 9월 3일 원고접수, 2002년 1월 29일 심사완료)

### Pseudo Dynamic Test for the Seismic Performance Enhancement of Circular RC Bridge Piers Retrofitted with Fibers

Young-Soo Chung<sup>1)\*</sup>, Jong-Heob Park<sup>1)</sup>, Hee-Sang Park<sup>1)</sup>, and Chang-Beak Cho<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University, Ansong, 456-756, Korea

(Received September 3, 2001, Accepted January 29, 2002)

#### 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 four(4) test specimens which were nonseismically or seismically designed by the related provisions of the Korea roadway bridge design specification, and four nonseismic test specimens retrofitted with fibers in the plastic hinge region. Glass and carbon fiber sheets were used for the seismic capacity enhancement of circular test specimens. Important test parameters were confinement steel ratio, load pattern, and retrofitting. The seismic behavior has been analyzed through the displacement ductility, energy analysis, and capacity spectrum. Approximate 7.7~8.7 displacement ductility was observed for nonseismic test specimens retrofitted with fibers subjected to Korea Highway Cooperation artificial earthquake motions. It is concluded that these retrofitted test specimens could have sufficient seismic capacity in the region of moderate seismic zone.

**Keyword :** pseudo dynamic test, RC bridge pier, retrofit, input ground motion, seismic performance, ductility

## 1. 서 론

1996년 영월지진, 1997년 경주지진, 1999년 대만지진 (Chi-Chi)지진 그리고 2001년 엘살바도르지진 및 인도지진등과 같은 최근의 국내외의 지진 발생으로 내진에 대한 국민적 관심이 증대되고 있다. 우리나라는 중·약진지역으로 분류되고 있으나 역사지진기록이나 최근에 연이어 발생한 한반도 지진활동은 한반도에서의 강진발생의 가능성을 시사하고 있다. 따라서, 내진설계기준제정 이전에 설계시공된 각종사회기반시설의 지진에 대한 취약성등은 우리의 주요 사회기반시설에 대한 내진대비책의 필요성이 요구되고 있다. 특히, 국내에서는 14,000여개 이상의 각종 교량 중 다수가 도로교설계기준의 내진설계기준이 제정된 1992년 이전에 시공된 교량으로서 내진설계규정이 적용되지 않았으며, 이들 교량에 대한 내진성능평가 및 내진보강에 관한 연구는 아직도 체계적으로 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 이 연구는 예상되는 입력지진동을 이용한 유사동

적실험(pseudo dynamic test)을 통하여 도로교설계기준의 내진설계규정이 적용되지 않은 1992년 이전의 비내진 시공된 철근콘크리트교각 및 내진설계규정에 따라 시공된 철근콘크리트교각의 내진성능을 비교 평가하고, 섬유로 보강된 비내진 철근콘크리트교각의 내진성능향상 및 보강효과를 평가하기 위한 실험적 연구이다.

## 2. 철근콘크리트 교각 실험

### 2.1 실험개요

실험에 사용된 실험체는 총 8개로서 입력지진동, 횡방향 철근비, 섬유보강유무를 실험변수로 하여 유사동적실험을 수행하였다. Table 1은 실험체명 및 인공지진파의 특성을 보여주고 있다. 보강섬유로는 유리섬유와 탄소섬유로 3종류의 다른 제품을 사용하였으며 교각심부에 작용하는 축방향력은 하갈교의 상부공중량에 대해 상사법칙을 적용하여 43 tonf를 작용시켰다. 이는 약  $0.1f_{ck}A_g$ 에 해당되는 값이다.

유사동적실험을 위해 사용된 수치적분방법은 Explicit Newmark  $\beta$ 방법<sup>1)</sup>이며 Photo 1에 보이는 바와 같이 횡방

\* Corresponding author

Tel : 031-670-4661 Fax : 031-675-9563

E-mail : chung47@cau.ac.kr

Table 1 Specimen designation and artificial earthquake property

Classification	Specimen designation <sup>1)</sup>	Diameter/ Height/ Aspect ratio	Long. steel Ratio/ Confinement steel ratio	Space of confinement steel(cm)		Artificial earthquak (PGA)	Input ground motion		
				PHR <sup>2)</sup>	NPHR <sup>3)</sup>		Sequence	PGA	
Nonseismic design	N-LP1	50cm/ 1.88m/ 3.8	1.1% / 0.23%	12.5	12.5	Korea highway corporation (0.20g)	1	0.154g	
Seismic design	S-LP1		1.1% / 2.30%	3.0	4.5		2	0.220g	
TYFO SEH51 Fiber glass	F-LP1		1.1% / 0.23%	12.5	12.5		3	0.300g	
CAFGL 1000 Fiber glass	D-LP1		1.1% / 0.23%				4	0.400g	
							5	0.500g	
							6	0.600g	
Nonseismic design	N-LP2			1.1% / 0.23%	12.5	12.5	Kaihokus (0.36g)	1	0.154g
Seismic design	S-LP2		1.1% / 2.30%	3.0	4.5	2		0.220g	
TYFO SEH51 Fiber glass	F-LP2		1.1% / 0.23%	12.5	12.5	3		0.260g	
SK-N300 Carbon fiber	C-LP2		1.1% / 0.23%						

1) N : Nonseismic, S : Seismic, F : TYFO SHE51 Fiber glass, C : SK-N300 Carbon fiber, D : CAFGL 1000 Fiber glass, LP1,2 : Load pattern 1,2  
 2) PHR : Plastic hinge region      3) NPHR : Nonplastic hinge region

향의 지진하중은 1,000 kN 유압 가력기를 이용하여 가력하였으며, 정확한 축방향력 재하를 위하여 축방향력이 초기 설정한 값의 5%이내로 변화도록 제작한 유압 축방향력 제어 가력기를 이용하여 재하하였다. 적용된 상사법칙은 Table 2와 같으며 상사값은 s=3.4로 하였다.

한국도로공사(korea highway corporation, KHC)에서 작성된 인공지진파<sup>2)</sup>와 일본건설성 토목연구소에서 작성된 Kaihokus 인공지진파를 입력지진파로 구분하여 유사동적 실험을 수행하였다. 인공지진파의 특성은 Table 1에서 보여주고 있으며 Fig. 1과 Fig. 2는 사용된 인공지진파의 가속도 및 파워스펙트럼을 보여 주고 있다.

2.2 실험체 설계

Fig. 3(A)에 보여주는 바와 같이 비내진 교각 실험체는 최대 수평력에 대한 전단검토로서 최소전단철근량 규정에

의해 설계를 하였으며, 내진설계실험체는 현행 도로교설계 기준<sup>3)</sup>의 내진설계규정에 따라 Fig. 3(B)와 같이 설계하였다. 콘크리트는 목표압축강도 240 kgf/cm<sup>2</sup>로 최대골재치수 13 mm골재의 레미콘을 사용하였으며 압축강도실험결과 기둥의 콘크리트 압축강도는 261 kgf/cm<sup>2</sup>이었다. 철근은 KS D 3504에 의한 SD40인 32@D10의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 D6을 사용하였으며 KS B 0820에 따라 각각의 3개의 시편에 대한 인장실험을 실시하여 각각 평균항복강도 3,800 kgf/cm<sup>2</sup>과 3,500 kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 얻었다.

내진설계 교량인 하갈교의 구속철근비는 2.5 %로서, Fig. 3(C)의 섬유보강설계는 이와 동일한 횡방향 구속력을 줄 수 있도록 Priestley가 제시하고 식 (1)과 같이 비내진시험체에 대한 보강설계를 하였다<sup>4)</sup>.

$$t_j = \frac{0.1(\epsilon_{cu} - 0.004)Df'_{cc}}{f_{uj}\epsilon_{uj}} \quad (1)$$

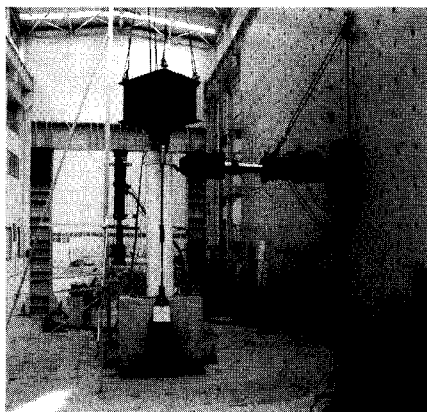


Photo 1 Experimental setup

Table 2 Scale factor

Quantity	Dimension	Scale factor
Length	L	S
Mass	M	S <sup>3</sup>
Time	T	S
Stress	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	1
Velocity	LT <sup>-1</sup>	1
Acceleration	LT <sup>-2</sup>	1/S
Force	MLT <sup>-2</sup>	S <sup>2</sup>
Stiffness	MT <sup>-2</sup>	S
Damping	MT <sup>-1</sup>	S <sup>2</sup>
Natural frequency	T <sup>-1</sup>	1/S

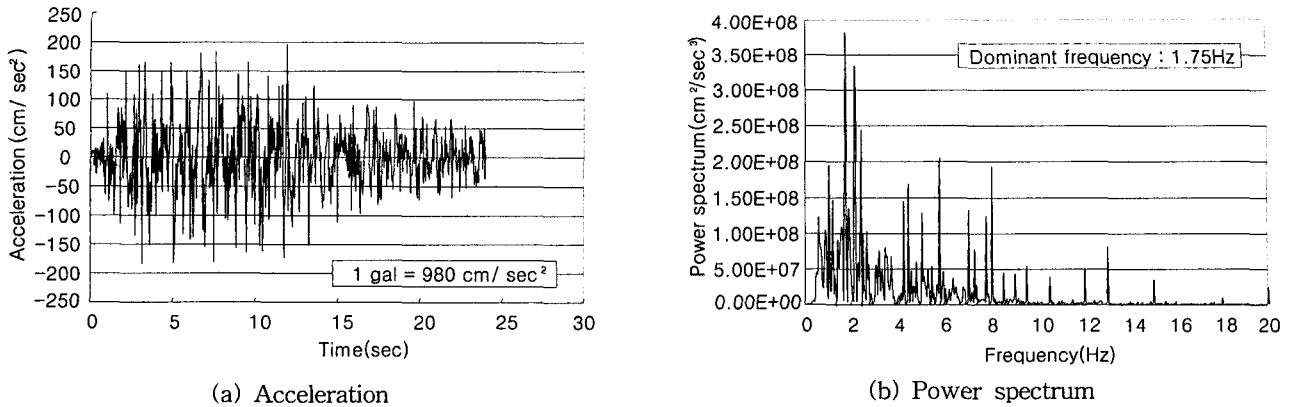


Fig. 1 KHC (korea highway corporation) artificial earthquake

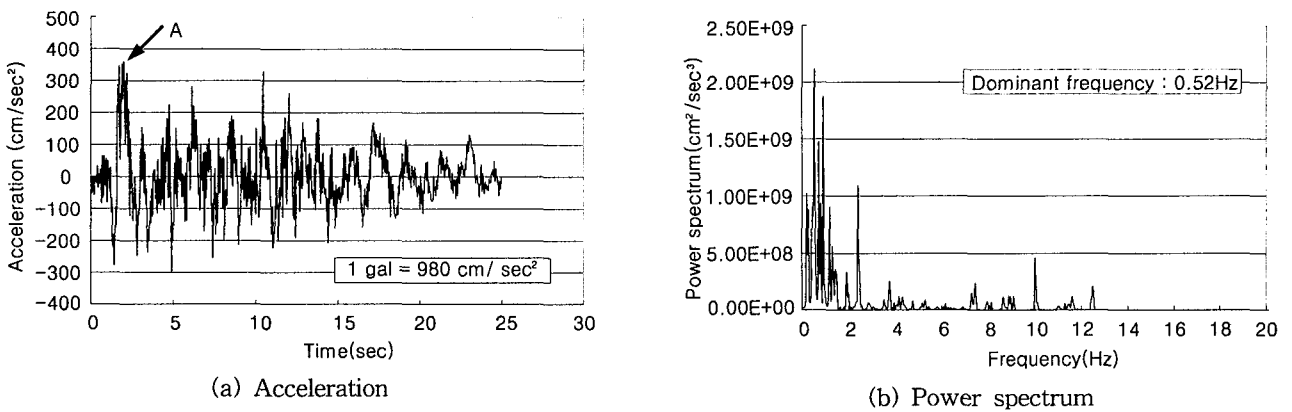


Fig. 2 Kaihokus artificial earthquake

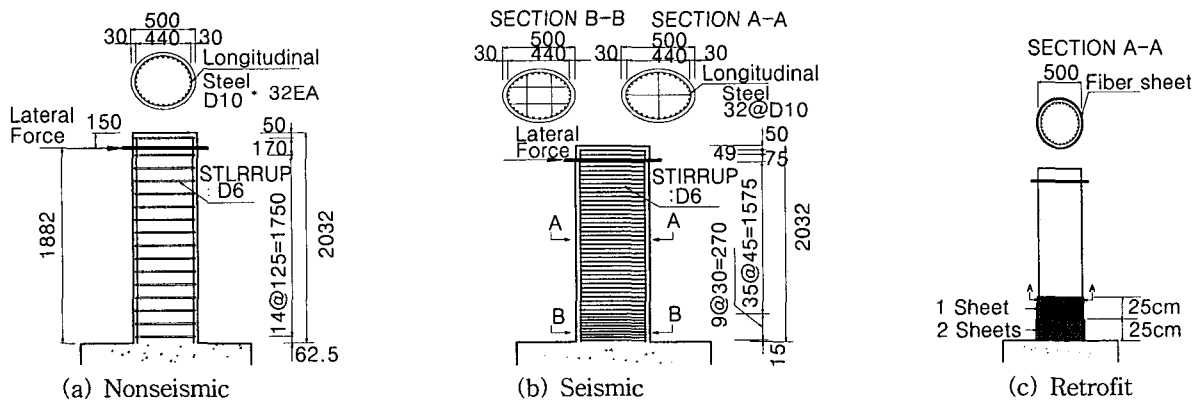


Fig. 3 Test specimens

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5 \rho_s f_{wj} \epsilon_{wj}}{f'_{cc}} \quad (2)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left( 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c}} - \frac{2 f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (3)$$

식 (1)에서,  $t_s$ 는 섬유보강설계두께,  $\epsilon_{cu}$ 는 최외측면 콘크리트의 종방향 극한변형률,  $D$ 는 단면의 직경,  $f'_{cc}$ 는 구속콘크리트의 항복강도,  $f_{wj}$  및  $\epsilon_{wj}$ 는 보강재료의 극한

응력 및 극한변형률을 나타낸다. 최외측면 콘크리트의 종방향 극한변형률  $\epsilon_{cu}$ 와 구속콘크리트의 항복강도  $f'_{cc}$ 는 식 (2) 및 (3)에 따라 계산된다. 여기서,  $\rho_s = \frac{4t_s}{D}$ 로 보강재의 체적비를 나타낸다.  $f'_l$  및  $f'_c$ 는 단면형상에 따른 유효구속응력 및 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. 이 실험에서 사용된 보강재료로는 유리섬유와 탄소섬유를 사용하였으며, 각 보강재의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

Table 3 Physical property of retrofitting material

Classification	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensile modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	Elongation(%)	Thickness (mm)
TYFO SEH51 fiber glass	5,600	252,000	2.0	1.3
CAFGL 1000 Fiber glass	5,000	250,000	2.0	1.0
SK-N300 Carbon fiber	35,500	2,350,000	1.5	0.167

식 (1), (2) 및 (3)에 의해 비내진실험체의 내진성능을 내진실험체 정도까지 향상시키기 위한 보강섬유의 두께는 TYFO SEH51제품은 1.382 mm, CAFGL1000제품은 1.548 mm, SK-N300탄소섬유는 보강두께가 0.29 mm로 나타났다. 정영수등의 실험결과<sup>5,6)</sup>를 참조하여 볼 때 기둥과괴시 소성힌지구간의 아래부분(D/2구간)에서 파괴현상이 나타났고 그 윗부분(D/2~D구간)에서는 균열이 진전됨을 보이고 있다. 따라서 Fig. 3(C)에서 보여주는 바와 같이 50 cm의 소성힌지구간중 하부 1/2 구간에는 2장을 횡으로 감싸고, 상부 1/2구간에는 횡으로 1장을 감싸는 방법으로 비내진 실험체를 내진실험체의 내진성능수준으로 보강하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 서론

유사동적실험 결과로 나타난 파괴시까지 각 실험체의 파괴양상을 살펴보면 비내진 및 내진실험체는 균열발생, 피복박리, 주철근 좌굴, 최종적으로 주철근이 파단하는 현상을 보였고, KHC인공지진파를 입력 하중으로 작용시켰을 경우 0.70 g 및 0.90 g에서 각각 최종 파괴 현상을 보이는 반면에 Kaihokus인공지진파인 경우는 0.22 g 및 0.26 g의 낮은 PGA에서 최종 파괴 현상을 보였다. 이는 Fig. 2(A)에서 A로 표시한 부분의 일방향으로 편중된 큰 PGA가 집중적으로 작용하여 이 부근에서 큰 응답변위를 유발하였기 때문인 것으로 판단된다. 섬유보강실험체의 경우는 무보강부분의 균열발생, 보강부분의 균열발생, 섬유일부파단 및 피복박리, 최종적으로 섬유가 심각한 파단현상을 보이면서 주철근이 좌굴하는 파괴 양상을 보였으며, KHC인공지진파에 대해서 0.90 g~1.0 g까지 견디어 우수한 내진성능을 보여 주었으며, Fig. 4는 유사동적실험에서 actuator로부터 얻어지는 복원력값과 Explicit Newmark방법에 의해 계산되는 제어변위값을 가지고 분석한 각 실험체의 하중-변위 이력곡선을 보여 주고 있다.

#### 3.2 곡률

곡률은 유압식 가력기의 가력방향과 일치되게 실험체의 소성힌지구간 양방향에 Fig. 5에 보여 주는 바와 같이 각각 4개씩 총 8개의 clip gauge를 부착하여 측정하였으며 LP1실험체의 분석결과는 Fig. 6에 보여 주고 있다. Fig. 6

에서 보는 바와 같이 LP1실험체는 0.30g에서 비선형분포를 나타내기 시작하였으며, 비내진 및 내진실험체는 모두 기둥과 기초와의 접촉부근에서 최대 휨변형이 발생하는 것에 반해 보강실험체는 기초로부터 25 cm구간에 섬유를 1장과 2장으로 보강한 경계부근에서 최대 휨변형이 발생하는 것을 볼 수가 있었다. LP2실험체는 Kaihokus인공지진파의 초기 2초부근에서 과도한 휨변형에 의한 clip gauge의 탈락으로 곡률분석을 수행하지 못하였다.

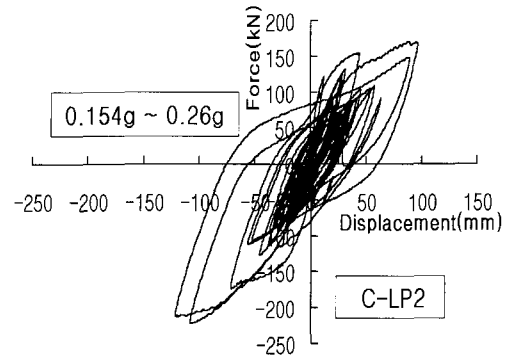
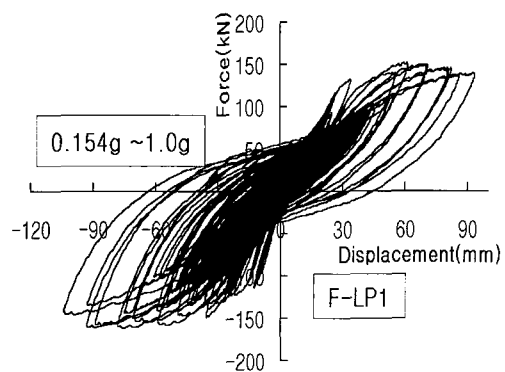
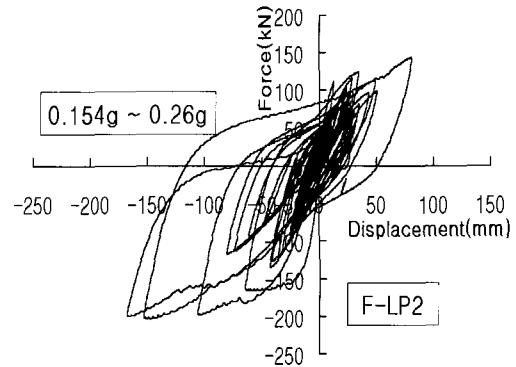
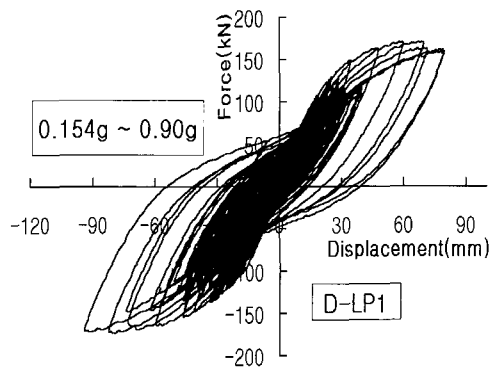
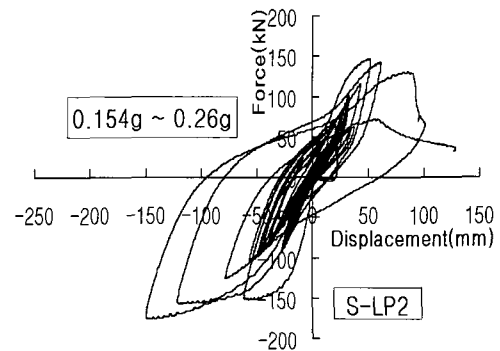
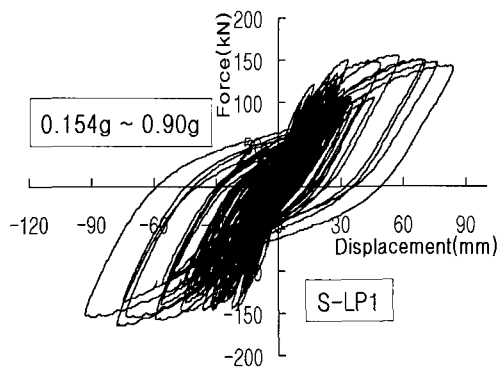
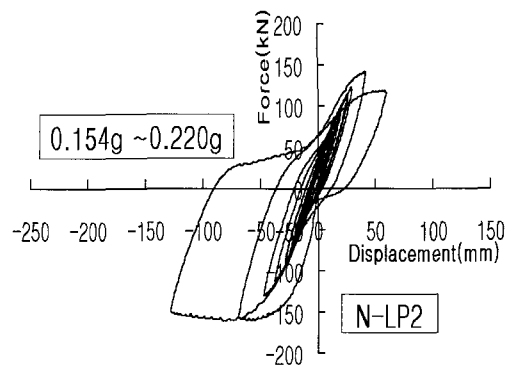
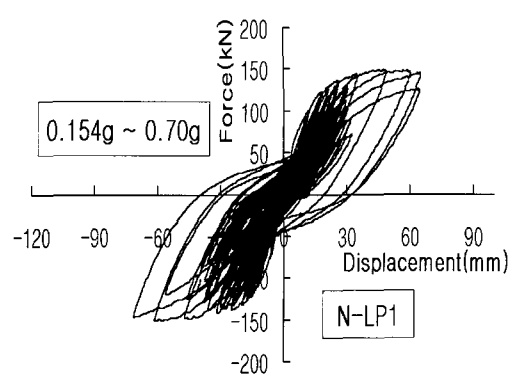
#### 3.3 철근변형률

소성힌지구간에서의 철근변형 거동을 파악하기 위하여 Fig. 7에서 보는 바와 같이 내진실험체의 주철근에는 8개, 비내진 및 보강실험체에는 6개의 strain gauge를 부착하였으며 그 결과를 Fig. 8에 보여 주고 있다. Fig. 8에서 N-LP1실험체는 0.70 g에서, S-LP1실험체는 0.90 g에서, F-LP1실험체는 1.0 g에서 주철근파단을 보였으며, N-LP2 실험체는 0.22 g에서, S-LP2, F-LP2 및 C-LP2실험체는 0.26 g에서 주철근 파단을 보였다.

#### 3.4 변위연성도

교각의 내진성능은 일반적으로 소성변형 능력의 크기로 표현되는 변위연성도( $\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$ )를 기준으로 평가할 수 있으며, 이때  $\Delta_u$ 는 극한변위를,  $\Delta_y$ 는 항복변위를 나타낸다. 항복변위는 Fig. 9에서 정의한 방법에 따라 하중-변위곡선 상에서 설계모멘트  $M_n$ 에 해당하는 횡력  $V_i$ 를 지나는 수평선과 원점에서 설계모멘트강도의 75%에 해당하는 횡력 ( $0.75 V_i$ )을 지나는 직선과의 교점을 항복변위로 정의하였다. 극한변위는 Fig. 9에서 보이는 것처럼 하중포락곡선상에서 강도가  $0.85 V_{max}^{7,8)}$ 이하로 저하되지 않았음에도 불구하고 소성힌지구간의 주철근이 파단에 도달하였을 때와 주철근이 파단에 도달하지 않았는데도 불구하고 강도가  $0.85 V_{max}$  이하로 저하되었을 때를 극한상태로 정의하고 그 시점까지 경험한 최대변위를 극한변위로 정의하였다.

Fig. 9에서 정의한 항복변위( $\Delta_y$ )와 극한변위( $\Delta_u$ )에 따라 변위연성도( $\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$ ) 및 비내진교각실험체의 변위연성도에 대한 각 실험체의 변위연성도들의 정규변위연



(a) KHC Artificial earthquake

(b) Kaihokus Artificial earthquake

Fig. 4 Hysteretic curve

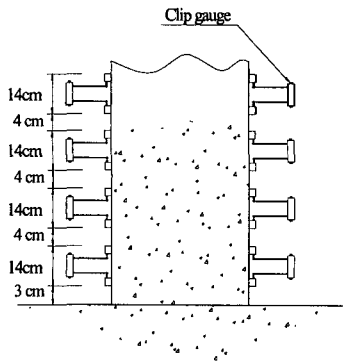


Fig. 5 Clip gauge setup

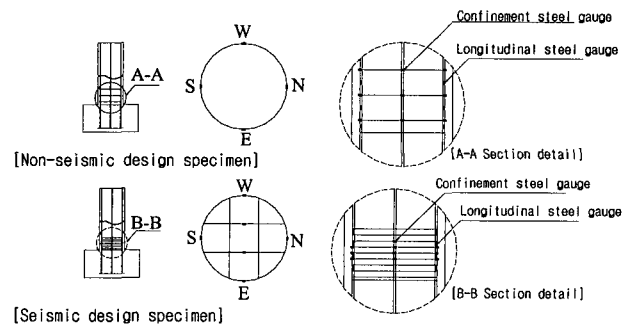


Fig. 7 Steel strain gauge setup

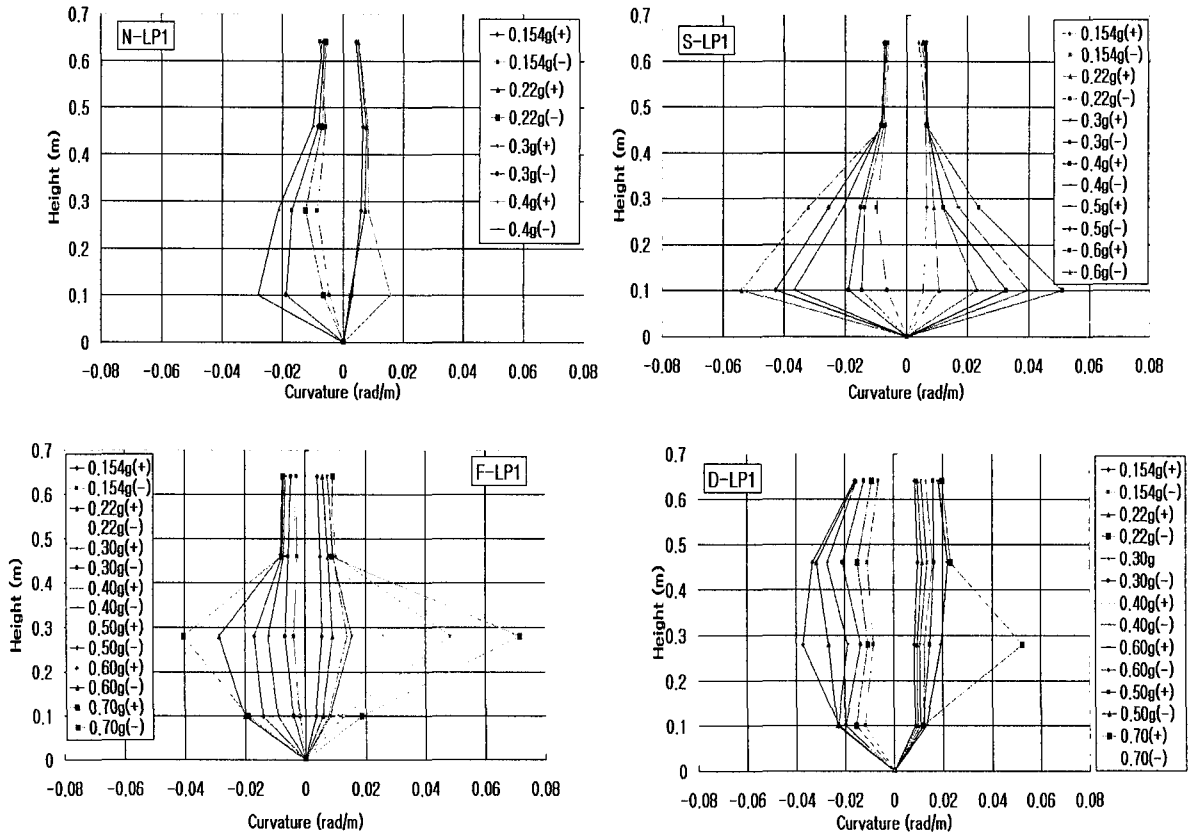


Fig. 6 Curvature analysis

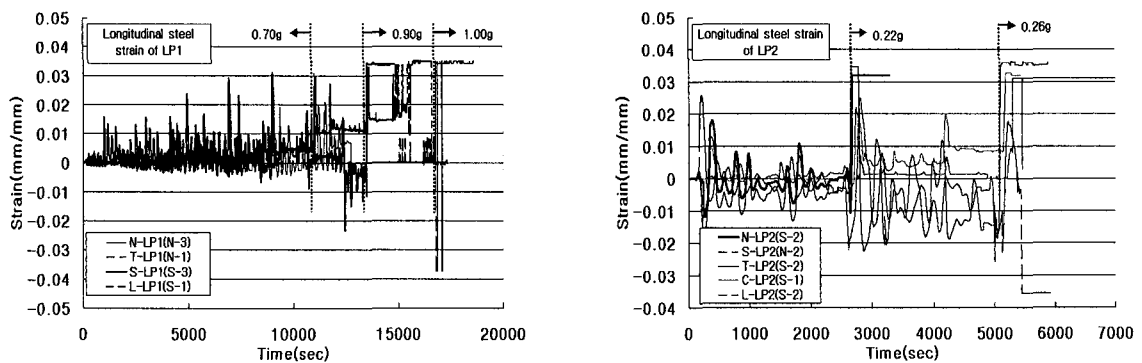


Fig. 8 Steel strain analysis

성도(normalized displacement ductility)를 분석해 본 결과를 Table 4에서 보여주고 있다. Table 4에서 보여주는 바와 같이 섬유보강 실험체는 비내진실험체에 비해 1.2~1.5배 정도의 변위연성능력이 향상된 것을 보여주고 있다. 또한 내진실험체의 변위연성도는 비내진실험체에 비해 1.4~1.5배로 섬유보강된 비내진설계실험체도 내진설계실험체와 비슷한 내진성능을 가지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 섬유보강 철근콘크리트교각 실험체는 KHC인공지진과에 대해서 충분한 연성능력을 가지고 있는 것으로 판단된다.

### 3.5 역량 스펙트럼

하중-변위 이력곡선을 이용하여 역량스펙트럼방법에 의하여 철근콘크리트교각실험체의 내진성능을 평가하였다. 대상 구조물을 지진구역 I지역에 위치한 내진 I등급 구조물로 단단한 토사지반상에 위치한다고 가정하였을 경우 역량스펙트럼방법에 의한 내진성능평가법을 이용하여 도로교설계기준에 규정하고 있는 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대해 교각의 내진성능을 평가하였다. ATC40<sup>9)</sup>에서 제안하고 있는 역량스펙트럼에 의해 내진성능을 평가하기 위해 등가점성감쇠비는 식 (4)의 다케다모델(Takeda model)을 이용하였다.

$$\xi_{eq} = 0.05 + (1 - (1 - \gamma) / \sqrt{\mu} - \gamma \sqrt{\mu}) / \pi \quad (4)$$

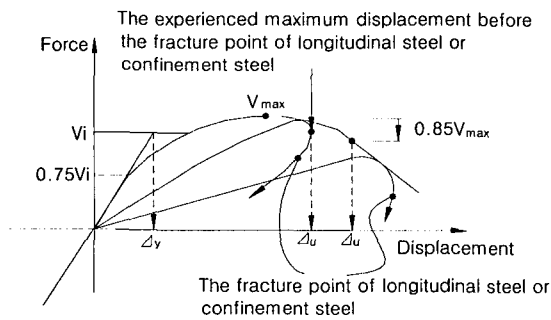


Fig. 9 Definition of yield & ultimate displacement

Table 4 Displacement ductility

Specimen	Displacement ductility ( $\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$ )	Normalized displacement ductility
N-LP1	6.3	1.0
S-LP1	9.1	1.5
F-LP1	8.7	1.4
D-LP1	7.7	1.2
N-LP2	6.8	1.0
S-LP2	9.7	1.4
F-LP2	10.3	1.5
C-LP2	10.2	1.5

여기서,  $\gamma$ 는 초기강성에 대한 항복후 2차강성비로 전형적인 값 0.05를 사용하였으며,  $\mu$ 는 구조물의 변위연성도이다. 2경간 연속 교량인 하갈교를 대상모델로 하여 ATC40에서 제안하고 있는 역량스펙트럼분석결과를 Fig. 10에 보여 주고 있으며, 2경간 연속교에 해당하는 역량스펙트럼 분석 결과 모든 실험체가 기능수행수준 및 붕괴방지수준을 만족하는 것으로 나타났다.

### 3.6 에너지분석

교량을 SDOF(single degree of freedom)으로 모델링하고 운동방정식을 세우면 식 (5)와 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f_s = -m\ddot{x}_g \quad (5)$$

여기서,  $m$ 은 질량,  $\ddot{x}$ 는 가속도,  $\dot{x}$ 는 속도,  $f_s$ 는 복원력,  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도를 나타낸다. 구조물이 지반가속도를 받으면 전체입력에너지는 운동에너지 및 변형에너지로 구조물에 일시적으로 저장될 것이며 나머지 부분들은 감쇠에너지 및 이력에너지의 형태로 모두 소산될 것이다. 식 (5)의 운동방정식을 에너지 방정식으로 바꾸면 (6)식이 될 것이다.

$$\int m\ddot{x}dx + \int c\dot{x}dx + \int f_sdx = - \int m\ddot{x}_gdx \quad (6)$$

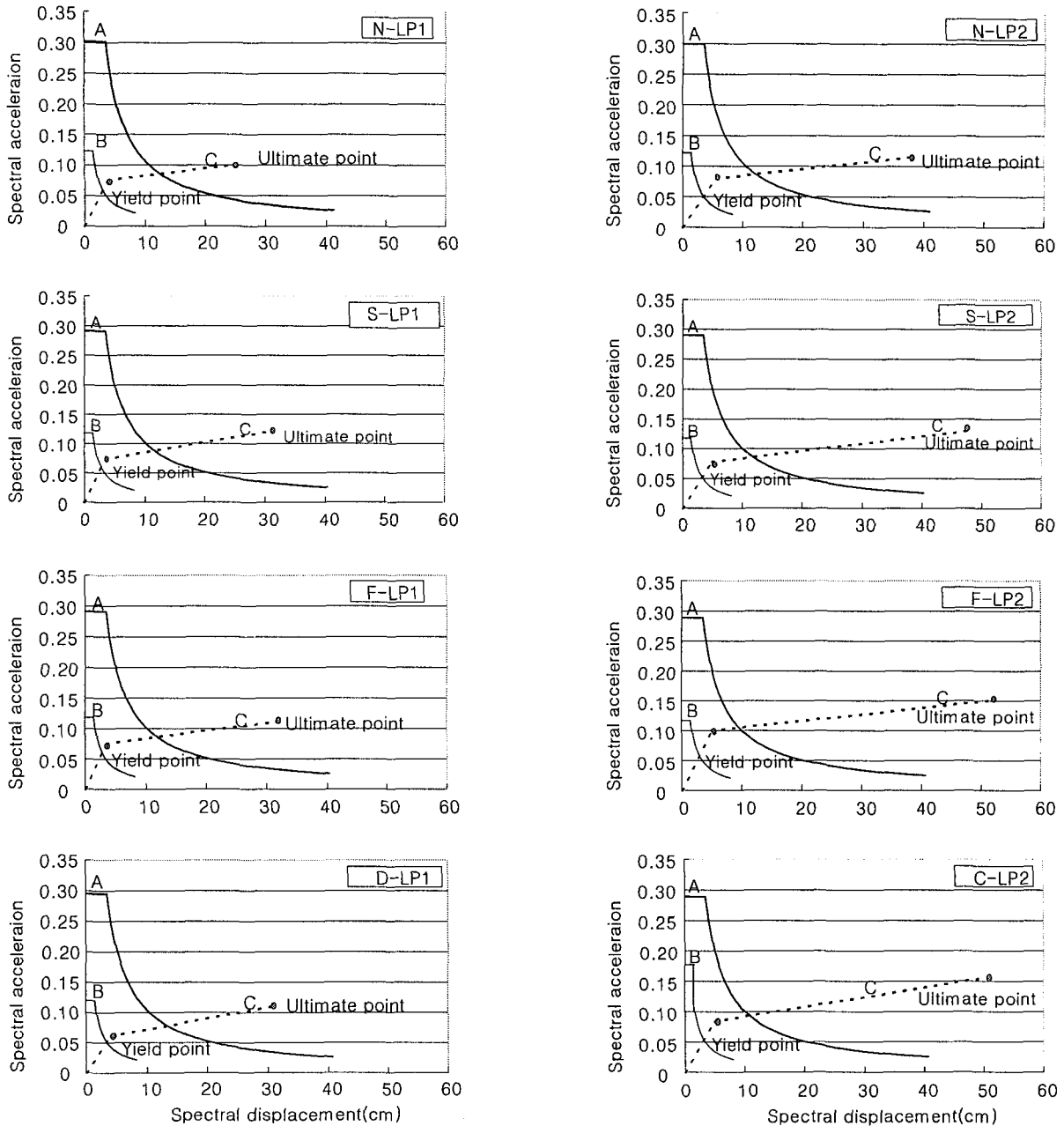
윗식에서  $\int m\ddot{x}dx = E_k$ ,  $\int c\dot{x}dx = E_d$ ,  $\int f_sdx = E_a$ 는 각각 운동에너지, 감쇠에너지 및 구조물의 흡수되는 흡수에너지를 나타낸다. 또한, 그 중에서 흡수에너지  $E_a$  ( $E_a = E_s + E_h$ )는 회복 가능한 탄성변형에너지  $E_s$  및 회복 불가능한 구조물의 이력에너지  $E_h$ 의 합으로 구성되며,  $-\int m\ddot{x}_gdx = E_i$ 는 입력지진하중에 의한 입력에너지를 나타낸다. 따라서 위의 식 (6)은 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$E_k + E_d + E_a = E_k + E_d + E_s + E_h = E_i \quad (7)$$

Zahrah[1984]<sup>10)</sup>, Uang[1990]<sup>11)</sup> 및 Dutta[1998]<sup>12)</sup>등의 연구결과를 참조하면  $E_k$ ,  $E_d$ ,  $E_s$  및  $E_h$ 는 다음의 식과 같이 표현된다.

$$E_k = \int m\ddot{x}dx = \frac{1}{2} m(x)^2 \quad (8)$$

$$E_a = \int f_s ds = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (f_i + f_{i-1})(x_i - x_{i-1}) \quad (9)$$



A : Demand spectrum for function maintenance level  
 B : Demand spectrum for failure prevention level  
 C : Capacity spectrum of 2 span continuous bridge

Fig. 10 Capacity spectrum

$$E_d = \int c \dot{x} dx = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\dot{x}_i + \dot{x}_{i-1})(x_i + x_{i-1}) \quad (10)$$

$$E_s = \frac{(f_s)^2}{2k}, \quad E_h = E_a - E_s \quad (11)$$

위의 식 (11)에서  $k$ 는 강성을 나타낸다. 이러한 에너지 특성을 이용하여 하중형식 1 및 2에 대한 비내진 실험체 및 보강실험체의 에너지 분석 결과를 Fig. 11에 보여 주고있다. 섬유보강실험체는 KHC인공지진파

에 대해 0.90 g, Kaihokus 인공지진파에 대해 0.26 g에서 파괴상태를 보였는데, 이는 Fig. 11에서 보듯이 KHC인공지진파를 받는 실험체는 파괴현상과 같이 점진적인 이력에너지의 증가현상을 보인 반면에 Kaihokus인공지진파를 받는 실험체는 초기 지진data 부근에서 급격한 이력에너지 증가현상으로 인한 심각한 손상을 실험체가 받았기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 동일한 PGA를 갖는다 할지라도 지진파형의 차이에 의해서 에너지소산능력에서 상당한 차이를 보



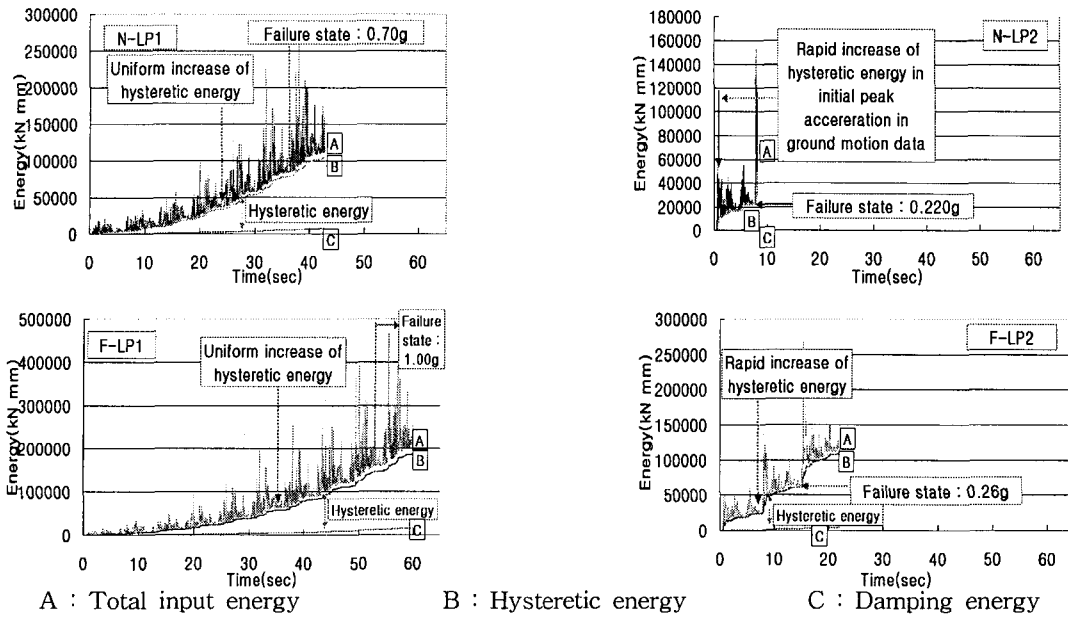


Fig. 11 Energy analysis

이므로 향후 내진보강시 이에 대한 고려가 있어야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 경기도 수원시 국도상에 위치한 하갈교를 3.4 : 1의 축척을 고려한 원형중진단면의 비내진 및 내진설계된 실험체, 유리 및 탄소섬유로 보강 제작한 비내진 실험체에 KHC 및 Kaihokus인공지진파를 입력하여 유사동적 실험을 수행한 것으로서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험체의 파괴양상을 살펴볼 때 일반적인 철근콘크리트교각실험체의 소성힌지현상은 기둥지름의 1/2이하의 위치에서 파괴가 발생되었다.
- 2) KHC인공지진파에 대해서는 보강실험체 및 내진실험체는 우수한 내진성능을 보였으며 비내진실험체도 0.7g의 PGA까지 견디어 연성능력을 가지고 있는 것으로 나타났으나 Kaihokus인공지진파에 대해서는 비내진실험체가 실험시작 직후 0.154 g에서 현저한 손상을 보였으며, 0.22 g에서 파괴상태를 보였다.
- 3) 대상교량을 2경간 연속교로 하여 역량스펙트럼을 분석해 본 결과 모든 실험체가 현행도로교설계기준에서 규정하고 있는 기능수행수준 및 붕괴방지수준을 만족하는 것으로 나타났다.
- 4) 섬유보강실험체는 비내진설계된 실험체에 비해 1.2~1.5배 정도의 변위연성능력을 보여 주었으며, 내진설계설

체와 비슷한 내진성능이 있는 것으로 판단된다. 따라서, 주철근 겹침이 없는 경우 비내진설계된 실험체라도 내진보강이 수행된다면 중약진 지진에 대하여 충분한 연성을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 내진설계가 적용되지 않은 비내진교각중 상당수가 실제 시공할 당시 소성힌지구간에 주철근겹침이 있는 것으로 생각되므로, 추후 이에 대한 많은 연구가 필요하리라 사료된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

1. Shing, P. B., Mahin, S. A., "Pseudo Dynamic Method for Seismic Testing," *Journal of Structural Engineering* Vol. 111, No. 7, 1994, July.
2. 한국도로공사 (1996) "고속도로교량의 내진설계지침"
3. 한국도로교설계기준(2000), 건설교통부.
4. Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., "Seismic Design and Retrofit of Bridges," John Wiley & Sons, Inc, 1996.
5. 정영수, 한기훈, 이강균, 이대형, "원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험," 한국지진공학회 논문집, 제3권 2호, 1999.
6. 정영수, 이강균, 한기훈, 박종협, "단일주 원형 철근콘크

- 리트 교각의 내진거동에 관한 준정적 실험,” 한국지진 공학회 논문집, 제3권 2호, 1999.
7. 김재관, “기존교량의 내진성능평가 및 보강방안,” 건설교통부 & 시설안전기술공단, BR-99-R3-48, 1999.
  8. 이재훈, 권영봉, “고강도콘크리트를 이용한 철근콘크리트 기둥과 합성 기둥의 거동 및 해석,” 한국도로공사 도로연구소, 도로연 99-47-28, 1999.
  9. ATC40, “*Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*,” Applied Technology Council, USA, 1996.
  10. Zahrah, T. F., Hall, W. J., “Earthquake Energy Absorption in SDOF Structures,” *Journal of Structural Engineering* Vol. 110, No. 8, 1998. 8.
  11. Uang, C. M., Bertero, V. V., “Evaluation of Seismic Energy in Structures,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* Vol. 19, 1990.
  12. Dutta, A., Mander, J. B., “*Capacity Design and Fatigue Analysis of Confined Concrete Columns*,” Technical Report MCEER-98-0007, 1998, July 14.

## 요 약

이 연구의 목적은 유사동적실험에 의한 섬유보강 원형철근콘크리트교각의 내진성능평가를 위한 연구로서 수원시에 위치한 내진설계된 교량인 하갈교를 대상모델로 하였다. 도로교설계기준의 내진설계규정이 적용되지 않은 비내진실험체 2개 및 내진설계규정에 따라 설계된 내진실험체 2개 그리고 내진성능향상을 위해 비내진실험체를 보강한 섬유보강실험체 4개 즉 총 8개에 대하여 유사동적실험을 수행하였다. 보강공법으로는 유리섬유 및 탄소섬유 보강공법을 사용하였으며, 실험변수로는 내진 및 비내진 설계, 하중형식, 섬유보강유무로 하였다. 내진성능평가 방법은 소산에너지, 변위연성도 그리고 능력스펙트럼이 분석되었다. 실험 결과로 유리 및 탄소섬유로 보강된 비내진실험체의 변위연성도는 KHC인공지진파에 대하여 7.7~8.7정도의 값으로서 충분한 내진성능을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

**핵심용어 :** 유사동적실험, 철근콘크리트교각, 보강, 내진성능, 연성도