

# 역량스펙트럼 및 에너지분석을 이용한 RC교각의 내진성능평가에 관한 연구

## Seismic Performance Evaluation of RC Bridge Piers using Capacity Spectrum and Energy Analysis

정 영 수\*                      박 종 협\*\*  
Chung Young Soo              Park Jong Heob

---

### Abstracts

This research aims at evaluating the seismic performance of the R/C bridge piers, which were seismically designed in accordance with the seismic provision of limited ductile behavior of Eurocode 8. Pseudo dynamic test for six(6) circular RC bridge piers has been carried out so as to investigate their seismic performance subjected to expected artificial earthquake motions. The objective of this experimental study is to investigate the hysteretic behavior of reinforced concrete bridge piers. Important test parameters are confinement steel ratio, input ground motion, etc. The seismic behavior of circular concrete piers under artificial ground motions has been evaluated through displacement ductility, energy analysis, capacity spectrum. It can be concluded that RC bridge piers designed in the seismic code of limited ductile behavior of Eurocode 8 have been determined to show good seismic performance even under expected artificial earthquakes in moderate seismicity region.

---

### 1. 서론

교량에 있어서 중요 구성요소인 RC교각에 대한 세계각국의 내진설계는 소성힌지구간의 횡방향 철근량 및 소성힌지길이를 조정하여 ductility를 증가시켜 에너지 흡수 혹은 소산능력을 크게 하는 것으로 주로 설계가 이루어지고 있다. 우리나라에서는 1992년 개정도로교표준시방서에 처음으로 내진설계편이 신설되어 교량에 대한 내진설계가 이루어지고 있다. 그러나 신설된 RC교각에 대한 도로교 내진설계 규정은 중약진지역으로 분류되고 있는 국내지진특성에 대한 고려없이 USA의 내진규정을 반영한 설계지침이라고 할 수 있다. Eurocode 8과 같이 한정연성거동개념이 아닌 완전연성(Full Ductile)거동개념을 도입하고 있는 국내시방규정에 따라 설계된 교각은 큰 지진하중

---

\* 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

\*\* 중앙대학교대학원 토목공학과 박사수료

에 의해 에너지를 크게 소산시킬 필요가 있는 강진지역에 적합한 설계개념이라 할 수 있으나 중약진지역으로 분류되고 있는 국내지진특성을 감안해 볼 때 비경제적이라 사료된다. 따라서 본 연구는 실구조물을 모델로 하여 1992년 도로교표준시방서 내진설계규정도입이전의 설계규정에 따라 설계된 교각, Eurocode 8(Parts2)의 한정연성거동(Limited Ductile Behavior)에 따라 설계된 교각 및 현행도로교표준시방서 내진설계규정에 따라 설계된 교각을 제작하여 유사동적실험에 의해서 내진성능을 평가, 분석하고자 한다.

## 2. RC교각실험

### 2.1 실험계획

총 6본의 실험체 대하여 입력지진파의 Loading Pattern, 내진설계 적용 유무에 따른 소성힌지 구간의 횡방향철근량을 실험변수로 하여 유사동적실험을 수행하였으며 표 1은 실험계획 및 실험체명을 보여 주고 있다. 축방향력은 하갈교의 상부공중량에 대해 상사법칙이 적용된 43.01tonf를 작용시켰다. 콘크리트는 목표압축강도  $240kgf/cm^2$ 로 최대골재치수 13mm골재의 레미콘을 사용하였으며 철근은 SD40을 사용하였다. 기둥본체의 콘크리트 압축강도는 약  $261kgf/cm^2$ 이었다. 철근은

표 1 실험계획

Loading Pattern		Designation
Ground Motion	PGA	
LP1 (KHC 인공지진파)	0.154g	NS-LP1
	0.220g	
	0.300g	ML-LP1
	0.400g	
0.500g	S-LP1	
LP2 (Kaihikus인 공지진파)	0.154g	NS-LP2
	0.220g	ML-LP2
	0.260g	S-LP2
총 6본		

표 2 설계특성

구 분	Circular Solid Section			
	Prototype	비내진	한정연성	내진
중방향철근	40@D19	32@D10	32@D10	32@D10
횡방향철근	D6	D6	D6	D6
횡방향 철근 간격	소성 hinge : s=10.5 cm 비소성 hinge : s=15.5 cm	전구간 s=12.5 cm	소성 hinge : s=5.5 cm 비소성 hinge : s=4.5 cm	소성 hinge : s=3.0 cm 비소성 hinge : s=4.5 cm
소성 Hinge	170 cm	-	50cm	28.5cm
직경/높이	170cm/640cm	188.2cm/50cm		

[Notation] NS : Conventional Non-Seismic Code Design ML : Limited Ductile Behavior Design of Eurocode 8

S : Current Seismic Code Design LP1 : Loading Pattern 1 LP2 : Loading Pattern

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.

### 2.2 RC교각설계

본 연구에서는 경기도 수원시에 위치한 내진1등급 교량으로 설계된 수원시 하갈교를 1/3.4축소 모델로 하여 각 실험체를 설계하였다. 비내진설계는 1992년 도로교표준시방서 내진설계규정 도입 이전의 설계규정에 따라 최대횡력에 대한 전단규정으로 비내진설계를 하였으며, Eurocode 8(Part2)의 한정연성거동에 따라 식 (1)과 같이 주어지는 횡방향철근량규정식에 의해 한정연성설계를 하였다.<sup>4)</sup> 그리고 현행도로교표준시방서 내진설계규정에 따라 내진설계를 하였으며,<sup>1)</sup> 대상

모델인 하갈교 및 각 실험체의 설계특성은 표 2에 보여주고 있다.

$$\omega_{wd,c} = 1.4 \omega_{wd,r} \quad \omega_{wd,r} = 1.74 \frac{A_c}{A_{cc}} (0.009 \mu_c + 0.17) \eta_k - 0.07 \geq \omega_{w, \min} \quad (1)$$

여기서  $\omega_{wd,c}$ : 횡방향철근체적비(원형단면),  $\omega_{wd,r}$ : 횡방향철근체적비(사각형단면),  $A_c$ : 전단면적,  $A_{cc}$ : 코아콘크리트 단면적,  $\mu_c$ : 요구회전연성도,  $\eta_k$ : 축방형력비를 나타낸다. 연성거동(ductile behavior)의 경우 Eurocode 8에서는  $\mu_c = 13$ ,  $\omega_{w, \min} = 0.12$ 로 주어져 있으며 한정연성거동(limited ductile)의 경우는  $\mu_c = 7$ ,  $\omega_{w, \min} = 0.08$ 으로 주어져 있다.

### 2.3 입력지진동

본 연구에서는 한국도로공사(Korea Highway Cooperation)에서 작성한 인공지진파(KHC Artificial Earthquake)와 일본건설성 토목연구소에서 작성한 인공지진파(Kaihokus Artificial Earthquake)를 이용하여 유사동적실험을 수행하였다. KHC인공지진파는 토질조건에 있어서 토질층은 암반 또는 경질의 토층이며 지속시간은 24초이다. PGA(Peak Ground Acceleration)는 0.2g이며 아래의 그림 1에 인공지진파형을 보여 주고 있다. Kaihokus인공지진파(지진시 보유 수평내력 조사용)는 토질조건에 있어서 경암 조건에 해당하며 지속시간은 24초, PGA는 0.36g이고, 그림 2에 인공지진파형을 보여 주고 있다.

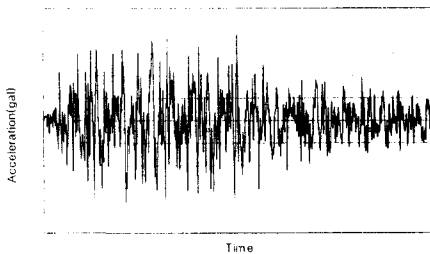


그림 1 KHC인공지진파

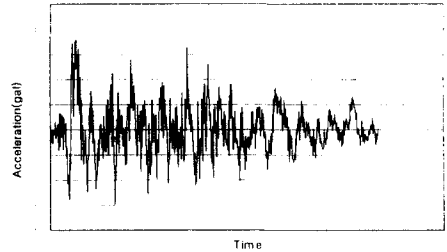


그림 2 Kaihokus인공지진파

## 3. 실험 결과 분석

### 3.1 서론

경기도 수원시에 위치한 하갈교를 1/3.4축소 모델로 하여 1992년 도로교 설계시방서 내진설계규정 도입이전의 설계규정에 따라 설계된 비내진실험체 2본, 현행도로교 설계시방서 규정에 따라 설계된 내진실험체 2본, Eurocode 8의 한정연성설계규정에 따라 설계된 실험체 2본으로 하여 총 6본의 실험체에 대해 Explicit Newmark 방법<sup>5)</sup>으로 유사동적실험을 수행하였으며, 유사동적 실험결과로 나타난 일반적인 실험체의 파괴현상은 먼저 수평균열이 발생하고, 수평균열 주위로 미세한 수직균열이 발생한다. 상부 변위가 더욱 커지면서 최초로 발생한 수평균열이 사방향으로 발전하게 되며 균열의 폭이 더욱 커지게 된다. 이후 하중이 반복되면서 소성힌지부에서 피복콘크리트의 탈락이 시작되며, 피복콘크리트가 탈락된 이후에도 상당한 변형능력을 보이다가 노출된 철근이 휨인장이 반복되면서 이후 주철근이 파단에 이르게 되는 파괴메카니즘을 보여 주었다.

### 3.2 연성(Ductility)

구조물의 소성변형능력의 크기로 표현되는 변위연성능력을 기준으로 RC교각의 내진성능을 평가할 수 있다. RC교각의 내진성능을 변위연성도( $\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$ )를 기준으로 평가하기 위한 항복변위의 정의는 그림 3에서 보는 것처럼 이론적인 공칭휨능력에 상응하는 수평하중  $V_i$ 를 구한후 0.75  $V_i$ 와 interpolation에 의해서 항복변위를 결정하였다. 극한변위는 그림 3에서 보는 것처럼 strength envelope상에서 strength가 0.85  $V_{max}$  이하로 drop되지 않았음에도 불구하고 주철근의 극한변형율( $\epsilon_{su}$ )이 0.03에 도달하였을때는 극한변형율이 나타나는 시점까지 경험한 최대변위를 극한변위로 정의하였고, 주철근의 극한변형율( $\epsilon_{su}$ )이 0.03에 도달하지 않았는데도 불구하고 strength가 0.85  $V_{max}$  이하로 저하되었을때는 0.85  $V_{max}$ 에 해당하는 변위를 극한변위로 정의하였다. 위에서 정의한 항복 및 극한변위의 정의에 따라 변위연성도( $\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$ )를 분석하였으며, 현행도로교표준시방서에 단주에 대해서 3으로 규정하고 있는 반응수정계수, R Factor를 분석하였다. 표 3에서 보는 것처럼 비내진실험체의 변위연성도는 5.143~4.065, 한정연성설계실험체는 5.813 ~6.000, 내진실험체는 6.653~7.616의 값을 나타내었다. 표 3에서 보여 주는 것처럼 R Factor 분석결과 비내진실험체도 LP1의 KHC인공지진파에 대해 어느 정도 R factor를 만족하는 것을 볼 수 있었다.

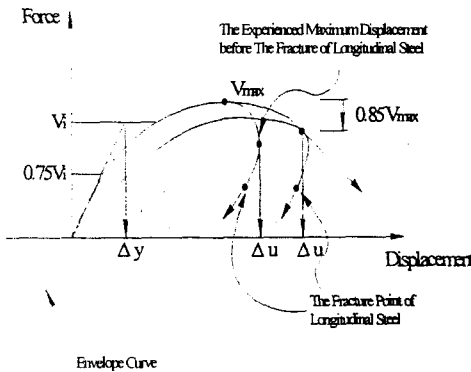


그림 3 항복 및 극한변위의 정의

표 3 변위연성도

구분	변위연성도	R Factor
	$\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$	$R = \sqrt{(2\mu_d - 1)}$
NS-LP1	5.143	3.047
ML-LP1	6.000	3.316
S-LP1	7.616	3.773
NS-LP2	4.065	2.670
ML-LP2	5.813	3.259
S-LP2	6.653	3.507
S-LP3	5.383	3.125

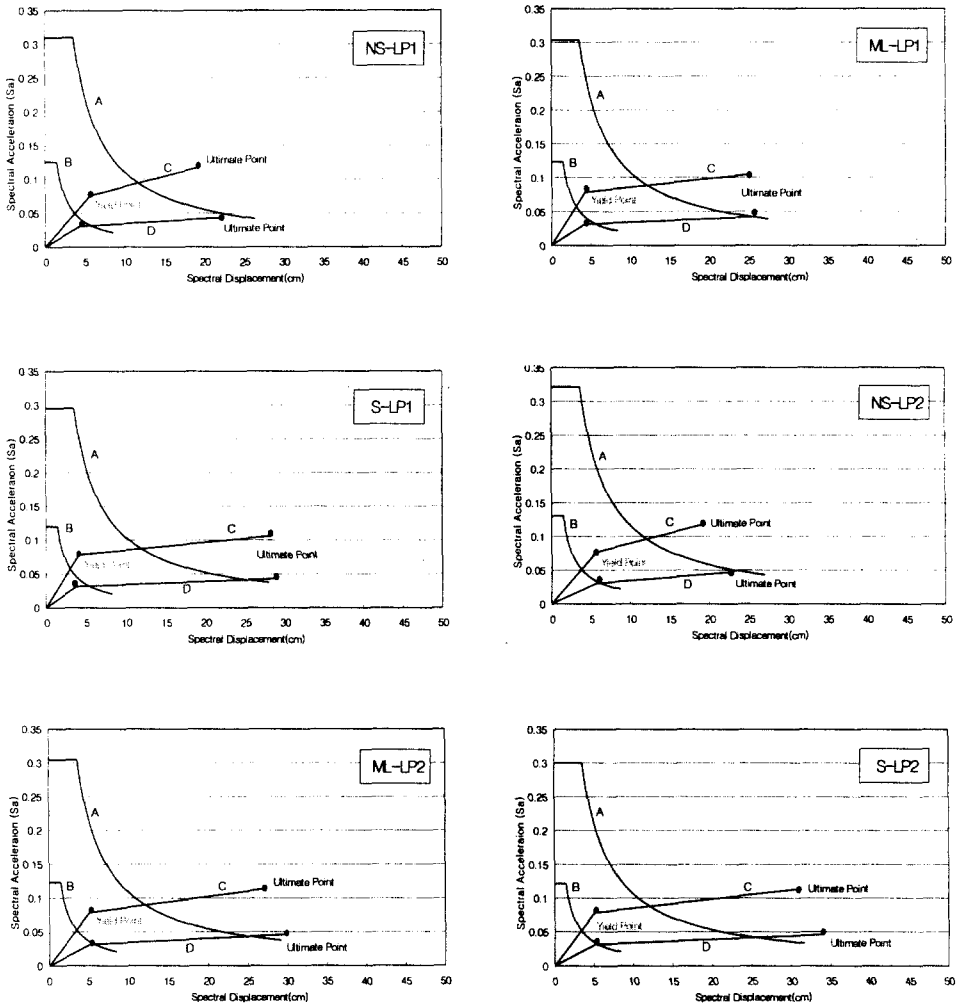
### 3.3 Capacity Spectrum

하중-변위 이력곡선을 이용하여 역량스펙트럼방법에 의하여 RC교각실험체의 내진성능을 평가하였다.<sup>6)</sup> 수원시에 위치한 내진1등급 교량을 기준모델로 그 대상 구조물을 지진구역 I 지역에 위치한 내진 I 등급 구조물로 단단한 토사지반( $S_D$ )상에 위치한다고 가정하였을 경우 역량스펙트럼방법을 이용하여 도로교표준시방서에 규정하고 있는 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대해 교각의 내진성능을 평가하였다. ATC40에서 제안하고 있는 Capacity Spectrum에 의해 내진성능을 평가하기 위해 등가점성감쇠비는 식 (2)의 다케다모델(Takeda Model)을 이용하였다.

$$\zeta_{eq} = 0.05 + (1 - (1 - \gamma) / \sqrt{\mu} - \gamma \sqrt{\mu}) / \pi \quad (2)$$

여기서,  $\gamma$ 는 초기강성에 대한 항복후의 2차강성비로 전형적인 값 0.05를 사용하였으며,  $\mu$ 는

구조물의 변위연성도이다. ATC40에서 제안하고 있는 demand spectrum과 capacity spectrum을 이용하여 역강스펙트럼분석법에 의해 분석한 결과를 그림 4에 보여 주고 있다. 2경간 연속 교량인 하갈교를 대상모델로 하여 각 실험체의 Capacity Spectrum 분석 결과 모든 실험체가 기능수행 수준 및 붕괴방지수준을 만족하는 것으로 나타났으며, 이는 1992년 도로교시방서 내진규정이 도입되기 이전의 설계 code에 따라 설계제작된 비내진실험체도 중앙진지역에서는 어느 정도의 내진 성능을 갖고 있다고 판단할 수 있다. 한편 실제 교량은 대부분이 2경간 이상의 교량이 많으므로 대상교량을 5경간 연속교로 하여 Capacity Spectrum을 분석해 본 결과 비내진실험체는 현행도로 교표준시방서에서 규정하고 있는 붕괴방지수준을 만족하지 않았으며 한정연성설계교각 및 내진설계교각은 각각 붕괴방지수준을 만족하는 것으로 나타났다.



[Notation] A Curve - Demand Spectrum of Failure Prevention Level  
 B Curve - Demand Spectrum of Function Maintenance Level  
 C Curve - 2 Span Continuous Bridge D Curve - 5 Span Continuous Bridge

그림 4 Capacity Spectrum Analysis

### 3.4 에너지분석

SDOF시스템의 구조물이 지진동을 받는다면 구조물의 운동방정식은 식 (3)과 같이 표현될 것이다.

$$m \ddot{v} + c \dot{v} + f_s = -m \ddot{v}_g \quad (3)$$

여기서  $m$ 은 질량을,  $\ddot{v}$ 는 가속도를,  $c$ 는 damping을,  $\dot{v}$ 는 속도를,  $f_s$ 는 복원력을  $\ddot{v}_g$ 는 지반가속도를 나타낸다. 구조물이 ground motion에 의한 입력지진동을 받는다면 입력지진동에 의한 total input energy는 운동에너지 및 변형에너지로 구조물에 일시적으로 저장될 것이며 나머지 부분들은 damping energy 및 hysteretic energy의 형태로 모두 소산될 것이다. 식 (3)의 운동방정식을 에너지 방정식으로 바꾸면 (4)식이 될 것이다.

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

위의 식에서  $\int m \ddot{v} dv = E_k$ 는 kinetic energy를,  $\int c v dv = E_d$ 는 damping energy를,  $\int f_s dv = E_a$ 는 구조물의 흡수되는 흡수에너지를 나타내면  $E_a$ 는 회복 가능한 탄성변형에너지  $E_s$  및 회복 불가능한 구조물의 hysteretic energy  $E_h$ 의 합으로 구성되며,  $-\int m \ddot{v}_g dv = E_i$ 는 입력지진하중에 의한 total input energy를 나타낸다. 따라서 위의 식 (4)는 다음의 식과 같이 표현할 수 있으며, 식 (5)의 에너지방정식을 이용하여 각 실험체에 대해 에너지 분석을 한 결과를 그림 14에 보여 주고 있다.

$$E_k + E_d + E_a = E_k + E_d + E_s + E_h = E_i \quad (5)$$

그림 5에서 Failure State는 3.1절에 기술한 실험체의 파괴현상을 모두 보인 후 소성힌지구간의 주철근이 파단하는 시점의 PGA를 나타내며, 실험결과 KHC인공지진파에 대해 기존비내진실험체 및 내진실험체가 0.70g 및 0.90g에서 각각 파괴를 보인 반면에 Kaihokus인공지진파에 대해서는 0.154g 및 0.260g에서 각각 파괴를 보였다. LP1실험체가 LP2실험체에 비해 파괴 PGA가 높게 나타난 것은 그림 5에서 보듯이 Kaihokus지진 Data의 초기 2초 부근에서 일방향 편축의 집중적인 PGA에 의해서 강력한 에너지 소산이 발생하여 이 부분에서 실험체는 심각한 손상을 받아 내진성능을 극도로 저하시키는 것과는 달리 LP1 실험체는 fatigue현상과 같이 일정한 hysteretic 에너지의 소산현상을 나타내었기 때문이다.

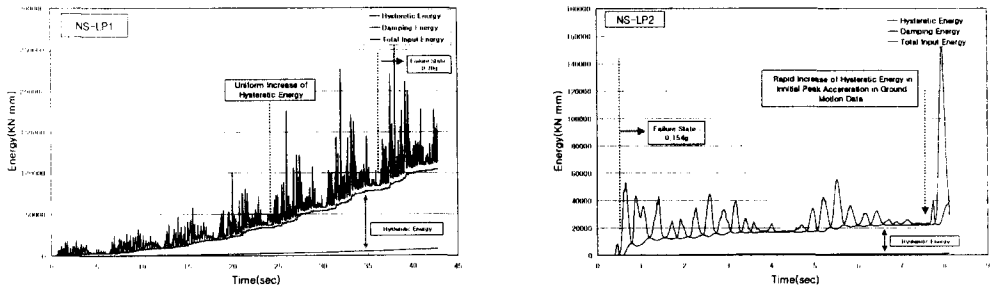


그림 5 에너지분석

#### 4. 결론

내진1등급교량으로 설계된 경기도 수원시에 위치한 하갈교를 1/3.4 축소모델로 하여 1992년 도로교표준시방서 내진설계규정도입이전의 설계규정에 따라 설계된 교각, Eurocode 8(Parts2)의 한정연성거동(Limited Ductile Behavior)에 따라 설계된 교각 및 현행도로교표준시방서 내진설계규정에 따라 설계된 교각을 제작하여 수행한 유사동적실험의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 현행도로교표준시방서의 내진설계규정 도입 이전의 설계규정에 따라 설계된 비내진 RC교각도 KHC인공지진파에 대해 0.60g까지 견디어 다소의 내진성능을 갖고 있는 것으로 타났으나 Kaihokus 인공지진파에 대해서는 0.154g에서도 현저한 손상을 보여 주었다. 이는 LP2실험체가 Kaihokus 인공지진파의 초기 2초 부근에서 일방향 편축의 집중적인 PGA에 의해서 강력한 에너지 소산이 발생하는 것과는 달리 LP1 실험체는 마치 fatigue실험현상과 같이 일정한 에너지의 소산현상을 나타내었기 때문이다.
- 2) Eurocode 8(Part2)의 한정연성거동(Limited Ductile Behavior)으로 설계된 중저진설계교각은 비내진설계교각에 비해 변위연성도는 1.43~1.92배정도의 내진성능을 보여 주었다.
- 3) 2경간 연속교량인 하갈교를 대상모델로 한 모든 실험체는 현행도로교표준시방서에 규정하고 있는 붕괴방지수준을 만족하는 것으로 나타났으나 5경간 연속교에 대해서는 비내진실험체는 붕괴방지수준을 만족하지 않는 것으로 나타났으며 한정연성실험체 및 내진실험체는 모두 붕괴방지수준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 장지간교량의 내진 대책에는 특별히 주의를 하여야 할 것으로 사료된다.
- 4) 현행도로교 내진설계교각과 Eurocode 8의 중저진설계교각을 비교해 볼 때 국내 실정을 반영하여 중약진지역에 적합한 설계규정이 시급히 이루어 져야 하리라 사료된다.

#### 5. 참고문헌

1. 한국도로교시방서(1996), 건설교통부
2. 정영수, 박종협, 이강균, 한기훈, "단알주 원형 RC교각의 내진거동에 관한 준정적 실험", 한국지진공학회지 제3권 2호, 1999년 6월
3. M. J. N. PRIESTLEY, F. SEIBLE, G. M. CALVI, "SEISMIC DESIGN AND RETROFIT OF BRIDGES", JOHN WILEY & SONS, INC.
4. Eurocode 8 Part 2, "Design Provisions for Earthquake Resistant Structures - bridges". European Committee for Standardization, 1996
5. Pui-shum B. Shing and Stephen A. Mahin(1984), "Pseudo-Dynamic Test Method for Seismic Performance Evaluation: Theory and Implementation", Report No. UCB/EERC-84/01
6. ATC-40, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building", ATC Applied Technology Council, California Seismic Safety Commission, Report SSC 96-01, 1996
7. 吉澤政司, 平澤征夫, 伊藤和幸, "各種ラソダム波形入力によるRC高橋脚モデルの損傷", 土木學會論文集 No. 433/V-15, pp. 51-60, 1991.8