

# 비내진 상세 기존 RC 교각의 비선형 거동특성 및 내진성능 Nonlinear Behavior Characteristics and Seismic Performance of the Existing RC Piers without Seismic Detailing

김재관\*, 김익현\*\*, 임현우\*\*\*, 전귀현\*\*\*\*  
KIM, Jae Kwan, KIM, Ick-Hyun, LIM, Hyun-Woo, JUHN, Gui-Hyun

## ABSTRACT

The seismic performance evaluation of the existing non-seismic detailed RC piers has risen as urgent task for rational and cost-effective seismic retrofitting works as well as development of new seismic design concept. The scale model test has been conducted to investigate nonlinear behavior characteristics and the seismic performance of existing piers with lap-spliced longitudinal reinforcements in the plastic hinge zone, which are of the solid circular and the hollow rectangular section. The lap splice in this zone is found to cause premature bond failure. The experimental results show very poor seismic performance of circular section pier but relatively large ductility of the rectangular one.

## 1. 서론

최근, 세계 각지의 지진으로 인한 심각한 인적, 물적피해는 우리로 하여금 다시 한번 시설물의 내진성능 확보가 얼마나 중요한 것인지를 일깨워 주는 계기가 되고 있다. 이들 시설물 중 특히 교량은 사회기반시설로서 평상시뿐만 아니라 지진발생시에도 신속한 피난 및 복구용, 2차 재해 방지를 위하여 매우 중요한 역할을 수행하는 구조물이다. 이 교량의 구성요소 중에서 교각은 지진하중에 대하여 매우 취약한 곳으로 적절한 내진성능의 확보가 요구된다.

우리나라 도로교의 내진설계는 1992년부터 도입되기 시작하여 1996년 이 후에야 본격적으로 적용되고 있다. 따라서, 대다수의 기존교량은 지진하중에 대하여 상당히 취약한 구조로서 이에 대한 적절한 대책이 시급한 과제로 떠오르고 있다.

내진상세가 적용되지 않은 기존 교각구조의 비선형 거동특성을 이해하고 내진성능을 평가하는 것은 합리적인 내진보강방안을 확립하기 위해서뿐만 아니라 신설구조물의 합리적인 내진설계 개념을 정립하는데도 매우 중요한 정보를 제공하게 된다.

이러한 배경하에 본 연구에서는 내진상세가 적용되지 않은 기존교각의 구조적 특성을 살펴보고, 우리나라에서 광범위하게 채택되고 있는 중실원형교각과 중공구형교각에 대하여 축소모형을 제작하여 준정적 반복재하 실험을 수행하였다. 본 실험을 통하여 비내진상세 기존교각의 비선형 거동특성을 파악하고 연성도와 역량스펙트럼 방법<sup>(1)</sup>을 이용하여 교량의 내진성능을 평가하였다.

\* 서울대학교 토목공학과 교수, 정회원  
\*\* 지진공학연구센터 연구전담교수, 정회원  
\*\*\* 광주광역시 토목사무관  
\*\*\*\* 시설안전기술공단 교량2실장

## 2. 비내진상세 기존 교각의 구조적 특징<sup>(2),(3)</sup>

콘크리트의 강도는 210~280  $kgf/cm^2$ 이며 철근은 SD30( $\sigma_y=3000kgf/cm^2$ )이 주로 사용되었다. 기존교각의 단면의 크기는 PC 박스교의 원형교각인 경우 3.0m-3.5m 가 일반적인 크기로 하중을 고려한 강도측면보다 교량의 받침크기 등에 의해 결정되는 것이 일반적이다. 따라서, 주철근비는 0.7%-1.2% 정도로 도로교 표준시방서에서 규정한 0.15~6%에 비해 작은 편이며 교각에 작용하는 압축력도 강도의 5-10% 정도로 매우 낮은 수준이다.

주철근의 겹침이음과 횡철근의 상세는 구조물의 연성도에 특히 크게 영향을 미치는 주요한 인자로 주철근은 시공의 편의 상 기초의 상단면에서 절단하여 겹침이음하는 것이 일반적이다. 겹침이음위치는 엇갈리게 배치하거나 또는 동일한 단면에서 실시하였다. 이 때 겹침이음길이는 압축이형철근의 겹침이음길이를 적용하고 있으며 주철근 지름의 30-40배 정도가 일반적이다. 따라서, 대부분의 경우 겹침이음 위치가 소성현지역역내에 위치하게 된다.

횡철근의 체적비는 0.1~0.3%로 매우 작은 편이다. 이는 설계시 작용수평력으로 받침의 마찰력, 제동에 의한 수평력 등만이 고려되어 설계전단력이 매우 작아 도로교 표준시방서 규정상의 최소 철근을 사용하였기 때문이다. 또한, 횡철근은 주로 D13 또는 D16의 띠철근을 사용하였으며 후크를 사용한 경우는 극히 드물고 300~400mm의 이음길이를 가지는 겹침이음 형태를 가지고 있다. 그 간격은 200~300mm의 간격으로 겹침이음부를 엇갈리게 배치하는 경우보다는 일반적으로 한 방향으로 집중적으로 설치되어 있다. 보강띠철근의 사용은 극히 드물다.

상기의 철근상세로 볼 때 횡철근에 의한 효과적인 심부콘크리트의 구속은 기대하기 어려운 상황이며 지진하중과 같은 정부의 교대하중이 지속적으로 작용하는 경우 주철근 겹침이음의 선단위치에서의 휨균열 발생에 따른 급속한 전단균열의 진전, 또는 주철근의 부차파괴에 의한 조기파괴가 예상되는 구조적 특성을 지니고 있다.

## 3. 실험의 개요(시험체 개요 및 실험 방법)

일반적으로 내진설계가 실시되지 않은 교각은 지진 시 크게 휨파괴, 휨-전단파괴, 전단파괴, 주철근의 부차파괴, 기타 기초 및 연결부의 국부적인 파괴형태를 보이게 된다. 본 연구에서는 전단파괴가 동반되지 않는 기존교각의 거동특성 분석을 목표로 하여 i) 1987년도에 중부고속도로 상에 건설된 변천 3교의 중실원형교각과 ii) 1994년도에 영동고속도로 상에 건설된 강천 2교의 중공구형교각을 대상으로 하여 축소모형을 제작하여 준정적 반복하중재하 실험을 수행하였다.

파괴형태와 실험여건 등을 고려하여 축소비는 1/3.5(원형단면), 1/5.0(중공구형단면)으로 하고 종횡비(Aspect ratio)는 각각 5.0, 8.33을 적용하였다.

### 3.1 시험체 개요

콘크리트는 설계기준강도 240  $kgf/cm^2$ (교각부 실제 평균강도 313  $kgf/cm^2$ ), 주철근 및 횡철근은 SD30( $\sigma_y=3000kgf/cm^2$ )의 철근을 사용하였다. 단, 횡철근의 경우, 중실원형교각은  $\phi 6$ 의 원형철근을 사용하였고, 중공구형교각에서는 #6 Wire를 열처리하여 사용하였다. 콘크리트의 타설은 기초부와 교각부를 분리하였으며 교각부도 하부와 상부로 2차례로 나누어 타설하였다. 이 때 시공이음위치는 소성현지역역에서 충분히 떨어지도록 하였다.

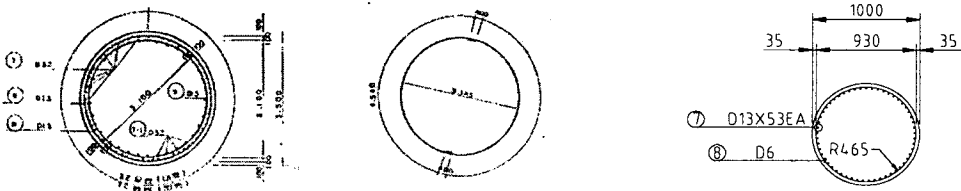
주철근 겹침이음의 위치는 설계도면 상에는 명시되어 있지 않다. 조사를 통하여 기초상면에 30  $d_b$ 의 겹침이음 길이로 동일한 단면에서 한꺼번에 겹침이음을 하는 경우를 기준으로 삼았다. 이

때 겹침이음은 겹침이음길이를 고려할 때 소성힌지영역내에 놓이게 된다.

횡철근의 이음길이는 설계도상에 명시되어 있으며 이를 기준으로 철근지름( $d_b$ )에 비례하여 이음 길이를 두었다. 축소모형의 단면상세는 그림1, 그림2와 같다.

기준교각은 주철근의 겹침이음부의 위치가 최대 휨모멘트가 발생하는 교각하단에 위치하여 반복 하중 작용시 주철근 겹침이음부에 미세균열이 발생하고 그에 따른 콘크리트의 유효인장강도 감소로 부착강도가 저하되어 주철근 겹침이음부의 부착파괴가 예상된다. 따라서, 주철근 겹침이음부의 부착파괴(Bond Failure) 모델<sup>(4)</sup>를 고려하여 피복두께를 결정하였다. 실제교각과 모형의 상세비교는 표1과 같다.

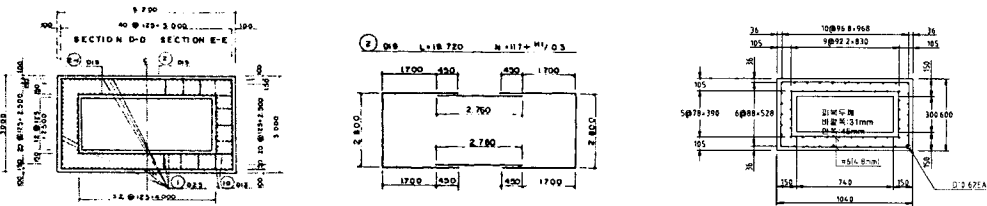
한편, 기준교각의 주철근의 기초부 정착은 갈고리를 사용하여 왔으며 철근강도를 발휘할 수 있는 정착장을 보유하고 있다. 실제 지진발생시 기초부도 취약부로 손상의 위험이 있으나 본 실험에서는 충분한 강도를 발휘하도록 설계하여 교각부의 파괴만을 고려하였다.



a) 실교각의 단면상세도

b) 축소모형의 단면상세도

그림 1 실교각과 축소모형의 단면상세 비교(중실원형교각)



a) 실교각의 단면상세도

b) 축소모형의 단면상세도

그림 2 실교각과 축소모형의 단면상세 비교(중공구형교각)

### 3.2 실험의 방법

본 실험에서는 교각의 내진성 평가를 위해 준정적 반복하중재하 실험을 수행하였다(그림 3). 축력은 ENERPAC사의 용량 100tf 오일 잭을 사용하여 재하하였으며 수평력에 의한 소성 변형시에도 시험체의 상부에  $P-\Delta$  효과에 의한 추가적인 모멘트가 걸리지 않도록 디바이스를 설치하였다. 수평력은 MTS사의 Stroke가  $\pm 10in.$ (254mm)이고 용량 2000kN의 Hydraulic Actuator를 이용하여 재하하였다. 이 때, 하중은 횡철근의 겹침이음이 놓이는 방향으로 재하되도록 하였다.

우선, 콘크리트 압축연단의 극한 변형률이 0.003인 상태에서의 이론적 수평내하력  $P_i$ (Ideal Lateral Load Capacity)을 구하고  $0.75 P_i$ 을 하중재하방식에 따라 재하하여 Push Direction과 Pull Direction의 변위  $\Delta_{0.75}^{\prime}$ ,  $\Delta_{0.75}^{\prime\prime}$ 를 각각 구하였다. 이를 외삽법에 의해 각 방향에 대한 항복변위  $\Delta_{y1}$ ,  $\Delta_{y2}$ 를 구하여 평균하여 항복변위  $\Delta_y$ 를 정의하였다(식 1 참조).  $0.75 P_i$ 까지는 하중재하방식, 그 후는 변위재하방식으로  $1.0 \Delta_y$ ,  $1.5 \Delta_y$ , ...의 변위를 각 2회씩 재하하였다.

$$\Delta_y = \frac{\Delta_{y1} + \Delta_{y2}}{2} = \frac{\Delta_{0.75}^{\prime} + \Delta_{0.75}^{\prime\prime}}{2 \times 0.75} \quad (1)$$

시험체의 비선형거동 특성은 기초상면에서 50cm, 100cm, 200cm, 500cm의 위치에 설치한 LVDT의 변위량을 측정하여 관찰하였다. 한편, 교각의 기초부의 예상치 못한 이동, 회전 변위 및 들림을 측정하기 위하여 기초부에 3개의 Dial Gauge를 설치하여 관측하였다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

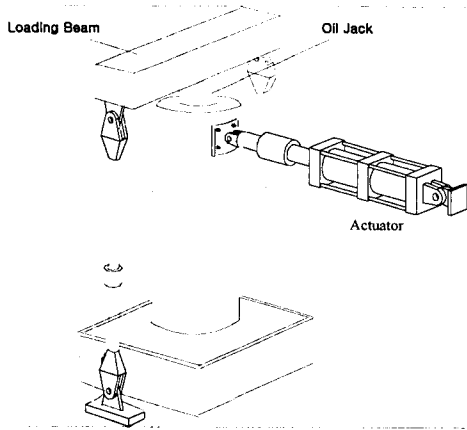
##### 4.1 내진성능의 평가방법

본 연구에서는 하중-변위 이력곡선을 이용하여 계산한 연성도와 역량 스펙트럼 방법에 의하여 교각의 내진성능을 평가한다.

구조물의 연성도는 i)최대내하력에 대한 연성도  $\mu_m$ (수평 내하력이 최대가 될 때의 변위  $\Delta_m$ 을 항복변위  $\Delta_y$ 로 나눈값)와 수평 내하력이 최대점을 지나 그 최대 수평 내하력의 80%에 이를 때의 변위를 파괴변위  $\Delta_f$ 로 정의하여 ii)변위  $\Delta_f$ 을 항복변위  $\Delta_y$ 로 나눈 연성도  $\mu_f$ 를 도입하여 평가하였다.

표 1 실험교각과 축소모형의 상세비교(SCH-L:중실원형교각)

항목	타입	원형교각		중공구형교각	
		Prototype	Model(s=1/3.5)	Prototype	Model(s=1/5)
재료강도 ( $kgf/cm^2$ )	콘크리트	240	240	240	240
	철근	SD30	SD30	SD30	SD30
원형:지름(D) 중공구형: b×h(내,외)		3.5	1.0	5.2×3.0, 3.7×1.5	1.04×0.60, 0.74×0.30
H:높이(m)		17.5	5.0	25.0	5.0
주철근	지름	D32	D13	D32	D10
	철근비(%)	0.858	0.855	1.089	1.100
횡철근	지름	D13	φ6	D13	#6 Wire(4.8mm)
	간격 (소성힌지부)	20cm	8cm	20cm	6cm
	철근비(%)	0.158	0.151	0.710	0.736
피복두께(cm)		8.4cm+18.4cm (2열배열)	3.5cm	8.75, 13.75	3.10, 4.50
축력		0.05~0.10 $\sigma_{ck}A_g$	0.0378 $\sigma_{ck}A_g$ (=71.20tf)	0.05~0.10 $\sigma_{ck}A_g$	0.05 $\sigma_{ck}A_g$ (=48.25tf)



(a) 설치 개념도



(b) 설치 사진

그림 3 시험체의 설치

역량 스펙트럼 방법에 의한 내진성능의 평가법에서는 우리나라의 내진성능기준<sup>(5)</sup>인 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대해 교각의 내진성을 평가하였다. Demand Spectrum의 결정에 있어서도 우리나라의 설계지진레벨에 의거하였다.

본 연구의 내진성능평가에서는 단위길이당 상부구조가 중량 24.23 tf/m로 370 m의 교장을 갖는 8경간 연속교(상부구조물의 총중량: 8965.10tf)를 기본모델로 하여 지진구역 I, 내진 I 등급교, 단단한 토사지반( $S_D$ )에 위치한 것으로 가정하여 교량의 내진성을 평가하였다. 단경간교, 4경간 연속교에 대하여도 내진성능을 평가하여 비교하였다.

## 4.2 중실원형교각

### 1) 파괴패턴

균열의 발생순서는 우선 주철근 겹침이음부의 윗부분(높이 39cm 이상)에서 수평균열이 발생하여 주철근 겹침이음부(0~39cm)로 진전되었다. 이는 주철근의 겹침이음부에서는 실제적으로 주철근의 양이 다른 곳에 비해 2배가 되므로 비록 휨모멘트가 다른 곳에 비하여 크더라도 균열의 발생이 지연되는 것으로 여겨진다. 그 후 미세한 수직균열이 이러한 수평균열 근처에서 생성되었으며 특히, 주철근 겹침이음부에서는 보다 진전된 형태의 수직균열의 목격되었다.  $\mu_d=1.5$ 까지는 비교적 안정적인 이력곡선의 특성을 보여주고 있지만  $\mu_d=2.0$ 에서 일어난 갑작스러운 수직균열이 주철근의 겹침이음부인 기초부에서 높이 0~39cm에서 관찰되면서 급격한 하중의 저하가 있었다. 이러한 현상은 주철근의 겹침이음부의 부착파괴를 나타내는 현상으로 여겨지며 수직균열의 발생으로 인접한 주철근의 Slip 현상이 초래되는 것이다. 파복콘크리트의 박리나 주철근의 좌굴은 관찰되지 않았다.

### 2) 연성도 및 내진성능

항복변위는 28(mm)이었고, 최대 수평력은 변위가 42(mm)일 때 258(kN)으로  $P_f$ 의 97.40(%)의 성능을 나타내었다. 최대 연성도는  $\mu_m=1.5$ 이었으며 파괴 연성도도  $\mu_f=1.5$ 로 매우 급작스런

파괴가 일어남을 알 수 있다.

그림 5는 단경간 및 4, 8경간 연속교에 대한 내진성능을 나타낸다. 단경간교를 제외한 4, 8경간 연속교에서는 기능수행수준과 붕괴방지수준의 내진성능을 모두 만족하지 않는 것으로 평가되었다. 특히, 붕괴방지수준을 만족하지 않는 것은 대상교각의 연성도의 부족으로 연성도 확보를 위한 보강작업이 필요함을 시사하고 있다.

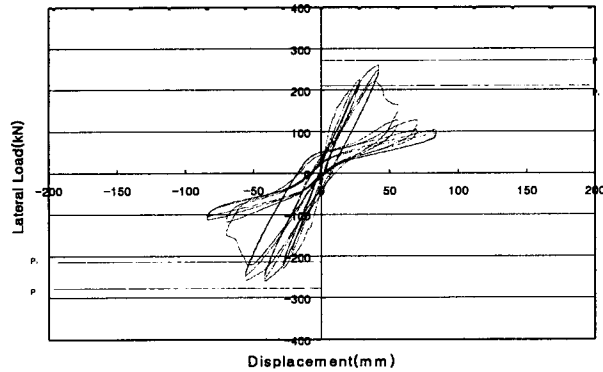


그림 4. 중실원형교각의 하중-변위 곡선

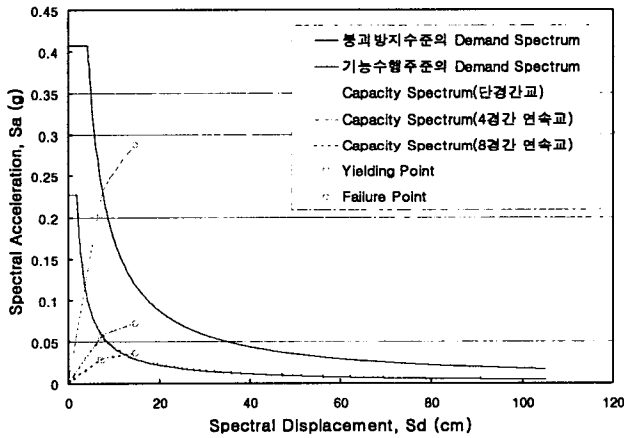


그림 5. 중실원형교각의 역량스펙트럼

### 4.3 중공구형교각

#### 1) 파괴패턴

중실원형교각과 유사하게 주철근 겹침이음부인 기초부에서 높이 0~30cm에서 부착파괴가 나타났다. 단, 균열발생순서 중 수직균열의 생성을 보면 중실원형교각과는 달리 먼저 주철근의 겹침이음이 끝나는 높이 30cm를 기준으로 상향의 수직균열이 높이 30~50cm에서 생성되었다가 어느 정도의 하중재하가 진행된 후 다시 주철근의 겹침이음부인 0~30cm에서 형성되었다. 이때, 높이 30cm를 기준으로 위에 생긴 수직균열은 Spalling과 연관된 것으로 보이며 주철근의 겹침이음이

존재하는 아래에 생긴 수직균열은 부착파괴와 연관된 것이다. 이는 Spalling이 일어나기 직전에 더 취약한 주철근의 겹침이음부에서 부착파괴가 일어났다는 것을 의미한다. 즉, 콘크리트 피복의 Spalling과 연관된 주철근의 좌굴 직전에 주철근의 부착파괴에 의한 뿔힘 현상으로 먼저 교각의 성능저하가 일어났으며 이는 중공구형교각은 중실원형교각에 비해 상당한 연성거동을 보인다는 사실과 일치한다.

## 2) 연성도 및 내진성능

그림 6에서 볼 수 있는 것처럼 연성도  $\mu_d=5.0$ 까지는 안정적인 이력곡선의 특성을 보이다가 그 후로 갑작스러운 수평 내하력의 저하로 성능이 저하되는 것을 알 수 있다. 먼저  $\mu_d=3.0\sim 4.0$ 에서 주철근의 겹침이음이 끝나는 높이 30cm를 기준으로 상향의 수직균열이 높이 30~50cm에서 생성되었다가  $\mu_d=4.0\sim 5.0$ 에서 어느 정도의 하중재하가 진행된 후 다시 하향의 수직균열이 발생하여 파괴에 이르렀다.

항복변위는 40(mm)이었고, 최대 수평력은 변위가 200(mm)일 때 136(kN)으로 이는  $P_i$ 의 106.13(%)의 성능을 나타내었다. 최대 연성도는  $\mu_m=5.0$ 이었으며 파괴 연성도는  $\mu_f=6.0$ 이었다.

그림 7에서 볼 수 있는 것처럼 대상 교량모델 모두에 대해 붕괴방지수준을 모두 만족하는 것으로 조사되어 상당한 내진성능을 확보하고 있다는 것을 알 수 있다.

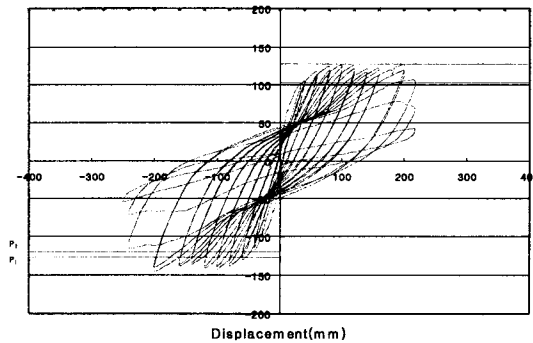


그림 6. 중공구형교각 하중-변위곡선

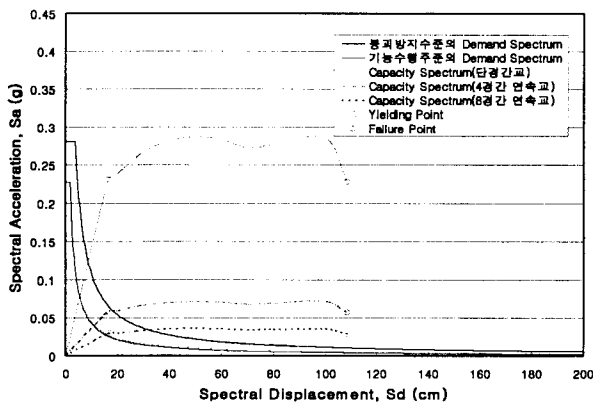


그림 7. 중공구형교각의 역랑스펙트럼

## 5. 결론 및 향후연구과제

자료조사와 현장조사를 통하여 비내진 상세 기존교각의 구조적 특성을 조사하고 이에 유념하여 중실원형교각과 중공구형교각의 축소모형을 제작하여 준정적 반복하중 재하실험을 실시하여 거동 특성, 연성도 및 역량 스펙트럼 방법 등을 이용하여 내진성능을 평가하였다.

소성힌지영역 내에 주철근 겹침이음이 있는 비내진 상세 철근콘크리트 교각의 경우, 외형적인 파괴모드가 휨파괴임에도 불구하고 콘크리트의 피복 박리, 주철근 좌굴 등은 발생하지 않았고 주철근 겹침이음부에 걸쳐 발생한 수직균열의 급격한 진전에 의한 주철근 부착파괴의 특성을 보여 주었다.

중실원형교각은 파괴연성도가 1.5인데 반해 중공구형교각의 경우는 6.5로 상당히 큰 연성도를 보여 주었다. 역량스펙트럼을 이용한 내진성능의 조사에서도 중실원형교각이 단경간교를 제외한 4경간연속교, 8경간 연속교에서 기능수행수준과 붕괴방지수준의 내진성능을 만족하지 못하는 것에 반해 중공구형교각의 경우 모두 붕괴방지 수준을 만족하여 상당한 내진성능을 보유하는 것으로 조사되었다.

이는 중공구형교각(중횡비 8.33)이 원형교각(중횡비 5.0)에 비하여 훨씬 유연한 구조물이어서 연성도가 상대적으로 크게 평가될 수 있다. 이를 실교각에 적용시키기 위해서는 다양한 재료의 강도 및 형상 특성에 대한 연성의 검토가 필요할 것으로 사료된다.

기존교각의 비선형 거동특성을 알더라도 교량전체의 내진성능을 평가하기 위해서는 전체 구조시스템의 진동특성, 구조물의 지지조건, 지반조건 등 여러 요인에 의해 내진성능에는 차이가 있다. 또한, 기존교각의 거동특성도 재료특성, 교각의 높이, 단면치수, 철근량 등의 제원에 따라 크게 영향을 받을 수 있다. 따라서, 다양한 매개변수 연구를 통하여 교량의 구조특성에 따른 내진성능을 사전에 확인해 두는 것이 기존교량의 내진성능을 합리적으로 평가하는데 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 시설안전기술공단의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. 또한, 실험에 많은 도움을 주신 현대건설기술연구소 관계자 여러분께도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Applied Technology Council and California Seismic Safety Commission, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1, SSC96-1, California, Nov. 1996.
2. 이재훈, 정원기, "철근콘크리트 교각의 기존 철근상세 현황", 한국콘크리트학회 소위원회 발표집, 서울, 1999, pp. 166-175.
3. 전귀현, 이지훈, "기존 철근콘크리트 교각의 내진성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4회, 서울, 1998. 12., pp. 155-168.
4. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, Inc., 1996, 686 pp.
5. 건설교통부, 내진설계기준연구(Ⅱ): 내진설계성능기준과 경제성평가, 1997