

강합성교각의 내진성능평가 Part II : 유사동적실험 및 잔류내진성능 평가

Seismic Performance of Concrete-Filled Steel Piers Part II : Pseudo-Dynamic Test and Residual Seismic Capacity

조 창 빈^{*} 서 진 환^{**} 장 승 필^{***}
Joh, Chang Bin Seo, Jin Hwan Chang, Sung Pil

국문요약

강합성교각의 내진성능은 주로 준정적 반복재하실험을 통해서 확인되어 왔으나, 이것은 단계적으로 증가하는 반복적인 변위에 대한 것으로 지진하중의 동적인 효과 및 무작위적인 특성이 무시된 것이다. 그러므로 강합성교각과 강교각의 지진시 거동을 진동대실험이나 유사동적실험을 통해서 검증할 필요가 있다. 또한, 지진후의 보수 보강이나 재사용을 위해 강합성교각과 강교각의 잔류내진성능을 평가할 필요가 있다. 이 논문은 강합성교각의 내진성능평가에 관한 연속된 논문으로서 "강합성교각의 내진성능평가 Part I : 준정적 반복재하실험"에 이어서 두 번째로, 유사동적실험을 통해 강합성교각의 실제 지진시의 거동을 조사하고 지진후의 준정적 반복재하실험을 통해 잔류내진성능을 평가하였다. 도시내의 전형적인 오버패스구간의 교각을 모델로하여 수행한 실험결과, 잘 알려진 El Centro 지진에 대해서 강합성교각 및 강교각 모두 최대변위 및 잔류변형량에서 우수한 거동을 보여주었다. 지진후의 잔류내진성능도 두 교각형식 모두 처음 지진시의 내진성능과 거의 동등한 성능을 보유했으므로 평가되었다.

주요어 : 강교각, 강합성교각, 내진거동, 유사동적실험

ABSTRACT

Ductile behavior and strength of concrete-filled steel(CFS) piers was supported by many quasi-static cyclic loading tests. This test method, however, only estimates the member's deformation capacity under escalating and repetitive displacement and ignores dynamic and random aspects of an earthquake load. Therefore, to understand complete seismic behavior of the structure against an earthquake, dynamic tests such as shaking table test and pseudo-dynamic tests are required as well as quasi-static tests. In this paper, following "Seismic Performance of Concrete-Filled Steel Piers Part I : Quasi-Static Cyclic Loading Test", the seismic behavior of CFS and steel piers designed for I-Soo overpass in Seoul is investigated by the pseudo-dynamic test. In addition, the residual strength of both piers after an earthquake is estimated by the quasi-static test. The results show that both piers have satisfactory ductility and strength against well-known El Centro earthquake although the CFS pier has better strength and energy dissipation than the steel pier.

Key words : concrete-filled steel pier, steel pier, seismic behavior, pseudo-dynamic test

1. 서 론

강합성교각은 강교각의 내부에 콘크리트를 전부 또는 일부 채운 것으로 강교각의 국부좌굴로 인한 내진성능 감소를 채움콘크리트로 완화시키고 합성효과로 인해서 내진성능이 증가하도록 만든 교각형식이다. 콘크리트 교각에 비해서 고가이나 우수한 내진성능과 작은 단면 및 짧은 건설기간으로 인해서 이와 같은 조건들이 필수적인 도시내의 교량의 교각으로 점차 그 필요성이 커지고 있으며 이에 따라 강합성교각의 내진성능을 평가하고 지진시의 거동을 개선하기 위한 연구가 진행되어 왔다.

그러나, 지금까지 강합성교각과 강교각에 대한 내진성능이나 지진시 거동에 대한 연구는 주로 준정적 반복재하실험

에 의하거나 수치해석에 의한 것이었다. 준정적 반복재하실험의 결과는 내진성능, 즉 강도와 연성도를 평가하는 것으로 이 실험의 결과를 바탕으로 실제 지진시의 강합성교각의 거동을 평가하는 것은 어려움이 있어왔다(Usami and Kumar⁽¹⁾). 수치해석에 의한 연구 역시 아직까지는 실험적인 연구에 대한 보완적인 역할을 하고 있는 실정이다.

이에 대한 대안으로, 실제 지진시의 강합성교각과 강교각의 거동을 연구하기 위해서 진동대(shaking table)를 이용하는 방법과 유사동적실험(pseudo-dynamic test)을 이용하는 방법이 있다. 그러나, 진동대를 이용하는 방법은 일반적으로 실험비용이 고가일 뿐만 아니라 실험의 대상이 작고, 가볍고, 그리고 상대적으로 약한 구조물로 제한되는 약점이 있다. 이에 비해서 유사동적실험은 물리적인 실험과 수치계산의 장점을 이용하여 복잡한 구조물의 지진시의 비탄성 거동을 분석할 수 있으며, 실험이 준정적상태로 진행되기 때문에 시험체의 응답을 여러 각도에서 상세하게 관찰할 수 있는 장점이 있다(Mahin et al.⁽²⁾ and Takanashi and Nakashima⁽³⁾). 특히 구조물의 질량이 집중되어 몇 개의 자유도로서 거동을

* 정회원 · University of Hawaii at Manoa, Research Associate
(대표저자 : joh@wiliki.eng.hawaii.edu)

** 학생회원 · 근화엔지니어링

*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 10. 19 / 심사종료일 : 2002. 4. 10)

표현하는 것이 가능한 교량의 교각과 같은 경우 특히 유용한 방법이다.

유사동적실험에 의한 실제 지진시의 거동의 파악은 그 자체로서도 구조물의 내진성능에 대한 가장 중요한 사항일 뿐만 아니라 실험후에 사용된 실험장치와 시험체를 그대로 이용하여 준정적 반복재하실험을 수행하여 지진후에 구조물의 잔류내진성능을 측정할 수 있는 장점이 있다. 구조물의 잔류내진성능에 대한 평가는 지진후에 구조물에 대한 보수 보강 및 철거의 결정여부에 대한 중요한 정보를 제공한다.

이 논문에서는 “강합성교각의 내진성능평가 Part I : 준정적 반복재하실험(이하 Part I)”에 이어 강합성교각 및 강교각의 지진시 거동과 지진이후의 잔류 내진성능을 파악하기 위해서 실험적인 연구를 수행하였다. 이를 위해 서울특별시 동작구에 건설중인 실제 교량의 교각을 강교각 및 강합성교각으로 설계한 시험체를 대상으로 유사동적실험을 수행하여 지진시의 실제거동을 파악하였다. 또한, 잔류내진성능을 구하기 위해서 유사동적실험에 사용한 시험체를 다시 준정적 반복재하실험을 통하여 지진후의 연성과 강성을 평가하여 잔류내진성능을 평가하였다.

2. 유사동적실험 및 잔류내진성능평가

많은 경우 유사동적실험은 시험체에 파괴가 일어날 때까지 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA)를 점증시키며 유사동적실험을 수행하고 그 결과와 준정적 반복재하실험 결과를 비교한다. 그러나 실제 상황에 이를 반영하여 보면 한 구조물에 같은 시간이력을 가지는 지진이 최대지반가속도가 점증되며 연달아 발생하는 것에 해당하므로 현실적으로 일어나기 매우 어려운 경우에 대한 시간이력해석 및 손상평가가 된다. 또한 구조물에 계속하여 손상이 누적되게 되므로 파괴시의 최대지반가속도가 현실적인 지진의 경우보다 낮게 평가될 가능성이 있고 잔류내진성도 역시 낮게 평가될 가능성이 높다고 판단된다.

따라서, 이 논문에서 고찰하고자 한 강합성교각과 강교각의 실제 지진시의 시간이력 거동과 이후의 잔류내진성능 평가를 고려할 때 위의 일반적인 실험방법을 직접 적용하기에는 어려움이 있다고 판단되어 단 1회의 지진 가력에서 구조물에 손상이 비록 적게 발생한다 하더라도 이것이 실제 지진시에 강합성교각과 강교각에 발생할 상황이라고 판단하고 더 이상 유사동적실험을 수행하지 않고 잔류내진성능 평가를 위한 준정적 반복재하실험을 수행하였다.

2.1 실험방법 및 실험장치

유사동적실험은 물리적인 실험과 해석기법을 결합한 실험방법으로 하이브리드실험(hybrid test)이나 온라인실험(on-line test)등으로 불리기도 한다. 구체적인 실험방법을 교량의 교각을 예로 들어 설명하면 다음과 같다.

그림 1과 같이 교량은 유사동적실험을 위해서 단일 자유도

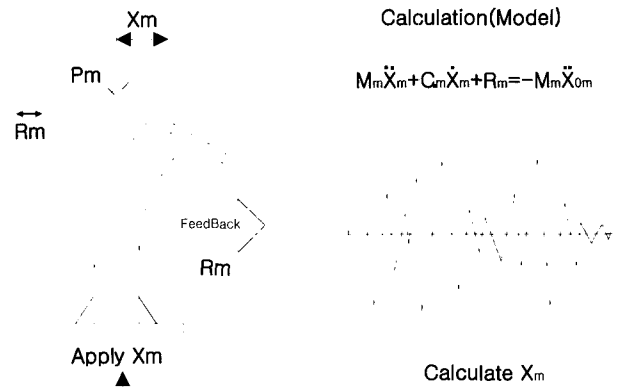


그림 1 유사동적실험 개념도

(single-degree-of-freedom)를 지니는 모델로 이상화된다. 즉 교량은 교각을 나타내는 스프링과 교각상부에 해당하는 집중질량으로 이상화된다. 교량의 경우 대부분의 질량이 상부 구조에 집중해 있기 때문에 단일 자유도계로 이상화하기에 적합한 구조물이다. 이 단일 자유도계의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + R_m = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서, M 은 시스템의 질량이고 R_m 은 교각의 복원력을 나타낸다. \ddot{x}_g 는 지반가속도를 나타내며 C 는 감쇠계수를 나타낸다. 유사동적실험에서는 M 은 해석적으로 결정되며 교량의 경우 한 개의 교각이 부담하는 상부구조의 질량과 교각자체의 질량중 일부가 포함된다. 일반적으로 C 값은 R_m 항에 포함되어 있는 이력감쇠에 비해서 매우 작기 때문에 교각의 유사동적실험에는 무시한다. 그림 1의 P_m 은 교각에 작용하는 수직하중을 나타낸다.

유사동적실험은 연속적인 시간단계(time step)으로 이루어져 있다. 각 단계에서 수치적으로 계산된 변위인 x_i 를 가진기(actuator)를 사용하여 준정적으로 시험체에 가력한다. 이 변위에 의하여 시험체에는 복원력 R_{mi} 가 발생하고 이를 측정하여 다음 스텝의 변위인 x_{i+1} 을 계산하는데 사용한다. 이때 식 (1)의 운동방정식의 해를 구하기 위해 유한차분법같은 수치적분법을 이용한다(Mahin et al.⁽²⁾). 이렇게 구한 x_{i+1} 을 다음 스텝에서 시험체에 가력한다. 이와 같은 시간단계를 입력지진이 끝날 때까지 반복한다.

상사율이 적용된 모델을 실험하는 경우는 여러 가지 가능한 경우의 수가 있으나 이 논문에서는 유사동적실험의 특징인 가상시간에서의 실험인 것을 활용하고 응력에 대한 상사율이 1이 되도록 상사율을 정하여 실험하였다. 구체적인 상사율은 표 1에 나타나 있다. 다른 연구자의 유사동적실험의 상사율에 대한 연구결과를 보면 시험결과가 어떤 방법으로 상사율을 적용하든 간에 큰 차이가 없는 것으로 밝혀졌다(Kumar et al.⁽⁴⁾).

이 논문에서는 그림 2와 같은 실험장치를 사용하였다. 이 장치는 “Part I”에서 준정적 반복재하실험을 위해 사용하였

표 1 유사동적실험에 적용된 상사율

물리량	차원	상사율
길이	L	(S)
질량	M	S
시간	T	(I)
응력	$ML^{-1}T^{-2}$	1
가속도	LT^{-1}	S
힘	MLT^{-2}	(S ²)
강성	MT^{-2}	S
고유주기	T^{-1}	1

* : 괄호가 있는 상사율은 미리 정해진 상사율이다

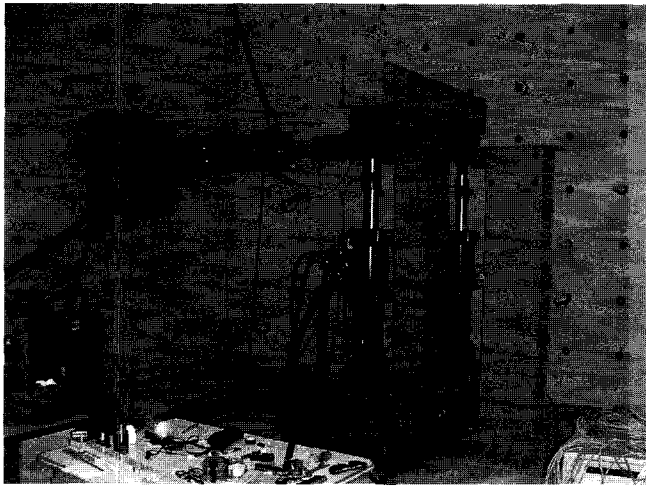


그림 2 유사동적실험 셋업

던 것과 같은 것으로 유사동적실험의 경우 실제 가력은 준정적으로 진행되기 때문에 동일한 실험장치가 사용될 수 있다.

이미 시험장치에 대해서는 "Part I"에서 설명하였기 때문에 여기서는 간략히 언급한다. 시험장치의 기본적인 구성은 수평변위를 가력하는 한 대의 가진기와 교량의 수직하중을 일정하게 유지하기 위해 수직방향으로 배치된 2개의 작은 가진기로 구성된다. 여기서 가진기들은 조정실의 컴퓨터와 연결되어 있고 이 컴퓨터들이 각 시간대의 변위를 계산하여 가진기를 통하여 가력하게 된다.

입력지진은 잘 알려진 El Centro 지진(1940)의 시간이력이 사용되었다(그림 3). 사용된 시간이력의 데이터는 pacific earthquake engineering research center(PEERC)의 데이터베이스에서 구한 것을 사용하였다(<http://peer.berkeley.edu/smcat/>). 이 El Centro 지진의 최대지반가속도는 0.313g이다. El Centro 지진이 사용된 이유는 다음과 같다. 유사동적 실험은 특정한 지진의 시간이력기록을 시험체에 가하는 실험이므로 어떤 지진기록이 사용되는가에 따라 시험체의 거동이 달라질 수 있다. 따라서 일본과 미국같은 경우 자국내에서 일어났던 지진을 시험의 입력지진으로 하여 실험하는 경우가 많다. 일본의 경우 최근에는 1995년에 일어난 효고현 남부지진이 주로 사용되고⁽⁵⁾ 미국의 경우 많은 기록이 있으므로 실제 대상구조물의 위치나 역할에 따라 적절한 것이 사용되고 있다.⁽²⁾ 그러나 우리나라의 경우 이와 같은 지진의

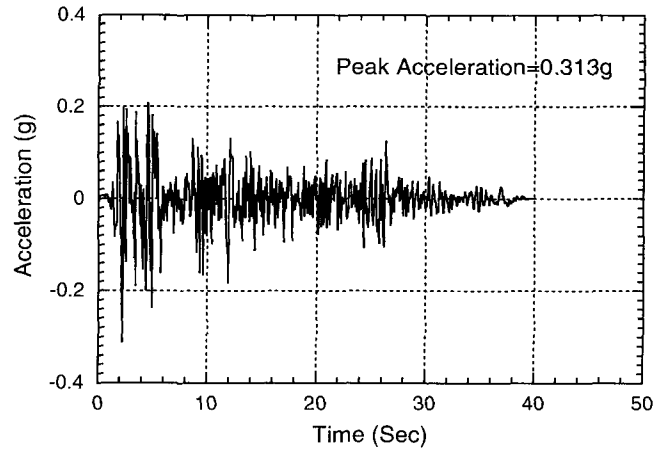


그림 3 El Centro 지진(Imperial Valley, 1940/05/19 04:37)

기록이 없는 실정이고 미국과 일본의 지진기록을 바로 우리나라에 적용하는 것은 우리나라가 중약진지역에 속해 있는 점을 고려할 때 적절한 선택이 아닌 것으로 판단된다. 이러한 이유로 많은 연구자들에 의해서 일반적인 지진의 특성을 대부분 가지고 있는 것으로 알려져 있는 El Centro 지진이 이 논문에서 입력지진으로 사용하게 되었다.

2.2 시험체

일반적으로 유사동적실험은 실제 지진하중이 입력하중으로 주어지기 때문에 준정적 반복재하실험에 비해 그 분석의 대상이 되는 구조시스템에 대한 많은 정보가 필요하게 된다. 즉 준정적실험의 경우 교각의 상부하중과 같은 구조시스템의 특성을 무시하고 시험체의 제작이나 시험이 가능하나, 유사동적실험의 경우 이러한 정보가 필수적이어서 시험체도 실제 상황과 유사하게 설계하여야 한다.

이 논문에서는 서울특별시 동작구의 이수교차로의 오버패스 구간의 교량을 대상으로 시험체를 설계하였다. 1999년 현재 건설중인 교량은 곡선구간이고 교각은 콘크리트교각으로 되어있으나 그림 4와 같이 직선으로 가정하고 교각중 고정단을 선택하여 강교각 및 강합성교각으로 설계하였다. 이 교량을 선택한 이유는 서론에서 언급했듯이 도시내의 오버패스 구간의 교량이 강합성교각과 강교각이 추후 활용될 경우 장점을 최대화 할 수 있는 교량일 것으로 판단되기 때문이다.

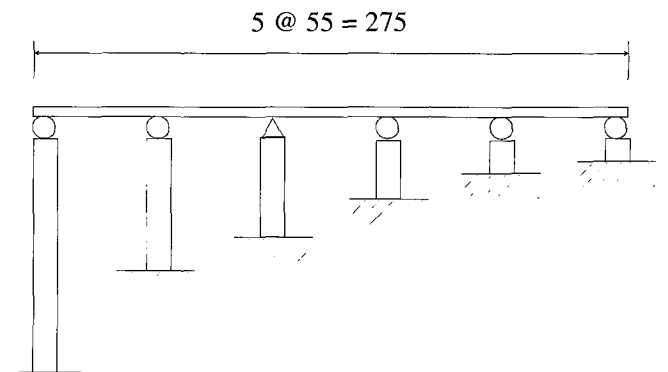


그림 4 시험체 설계를 위한 교량(이수교 C-라인)

그림 5는 강합성교각 및 강교각 시험체의 단면을 보여주고 있다. 이들의 설계에는 상사율 4가 적용되었다. 이들 단면은 "Part I"에서와 같은 단면으로 일본의 합성교각 설계안에 따라 설계한 것이다.^{(6),(7)} 이 논문에서 C000, C500 및 C5BR의 3개의 시험체가 사용되었다. C000은 전형적인 강교각을 나타내고, C500은 자중을 최소화하면서 최대의 합성효과를 위해 C000의 교각의 높이 50%까지 채움콘크리트를 넣은 강합성교각이다. 그리고 C500에 짧은 수직보강재를 교각 하단의 수직 보강재 사이에 배치하여 최대모멘트가 발생하는 위험단면을 교각의 하단에서 200mm 상승시킨 C5BR이 있다.

강교각 및 강합성교각의 플랜지와 웨브의 연결부를 사실적으로 묘사하기 위하여 완전관입용접이 사용되었다. 수직보강재 및 다이어프램과 플랜지와 웨브의 연결을 위해서는 필렛용접이 사용되었다. 모든 시험체는 SS400이 사용되었고 이의 극한응력은 485.2MPa이고 항복응력은 323.5MPa가 표준시편실험으로부터 얻어져 사용되었다. 채움콘크리트의 강도는 400kgf/cm²로 설계되었고 시험당일의 콘크리트강도는 393.8kgf/cm²이다(표 2).

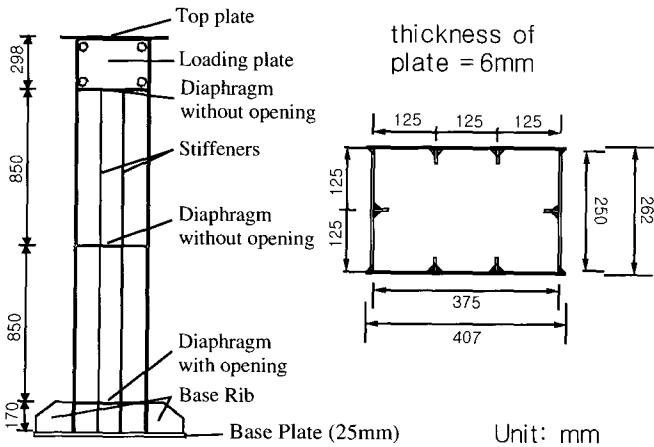


그림 5 유사동적실험을 위한 시험체

표 2 시험체에 사용된 재료의 성질(평균값)

	강재(MPa)			콘크리트(kgf/cm ²)
	탄성계수	항복응력	인장강도	강도
유사동적실험	170012.8	323.5	485.2	393.8

2.3 잔류내진성능평가

유사동적실험후 잔류내진성능 평가를 위해서 준정적 반복재하실험이 실시되었다. 실험장치는 유사동적실험과 같고 "Part I"에서 설명한 방법과 동일한 방법으로 실험이 수행되었으므로 여기서는 간단히 설명한다. 가력하는 교각상단의 변위는 δ_{y0} 의 배수로 조절하였다. 여기서 사용된 δ_{y0} 는 10mm로 시험의 일정상 시편의 재료시험의 결과가 나오지 않아 SS400강판의 일반적인 항복응력과 강재의 일반적인 탄성계수 $E=200GPa$ 를 사용해서 계산한 값을 참고하여 제어하기 편리한 값으로 정한 것이다. 후에 에너지소산의 분석을 위하여 쓰인 δ_{y0} 와는 같은 방법으로 계산한 것이나 이때는 시편의 재료실험에서 얻은 값을 사용하여 $\delta_{y0}=15.2mm$ 가 된다. 자세한 사항은 "Part I"을 참조하기 바란다.

한 사항은 "Part I"을 참조하기 바란다.

잔류내진성능평가의 기준이 되는 강합성교각의 내진성능의 평가는 "Part I"에서 설명한 평가기법을 사용하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 지진시의 거동

그림 6은 C000과 C500, 그림 7은 C500과 C5BR의 El Centro 지진에 대한 시간이력 곡선을 보여주고 있다. 강교각인 C000의 경우 $\delta_{y0}(=15.2mm)$ 의 약 3배 정도인 50mm정도의 최대 변형이 발생하였다. 이는 상사율이 4인 것을 고려하면 실제 교각의 경우 200mm정도의 변위가 발생하는 것으로 상부구조의 안전에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한, 지진하중하에서 소성변형이 발생하여 변형이 한쪽으로 약간 치우쳐 일어났다. 그 결과 지진후에 남아 있는 잔류변형은 10mm이고 실제교각의 경우 40mm정도의 잔류변형을 보일 것으로 판단되며 교각 높이(6.8m)와 잔류변형(0.04m)의 비인 draft ratio는 0.59%가 된다. 국내에는 지진후의 교각의 잔류변형량에 대한 명확한 규정이 없으나 일본의 도로교시방서⁽⁸⁾에 따르면 허용 draft ratio가 1% 미만이므로 C000의 경우 지진후에도 안전에 문제가 없는 것으로 판단된다.

C500의 경우 최대 변형은 C000과 비슷한 수준이나 C000에 비해서 대칭적인 분포를 보여주고 있다. 잔류변형도 거의

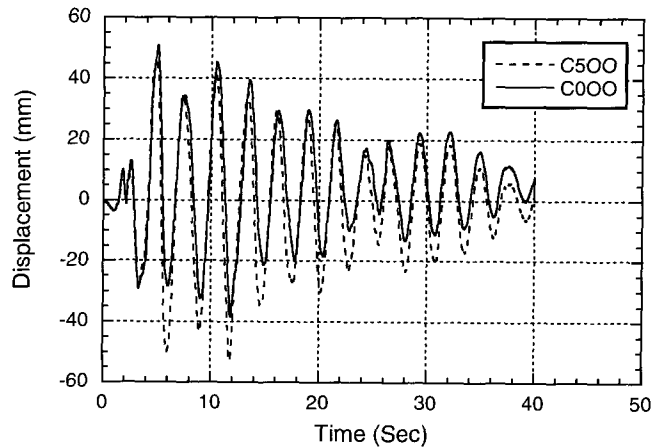


그림 6 C000과 C500의 지진응답

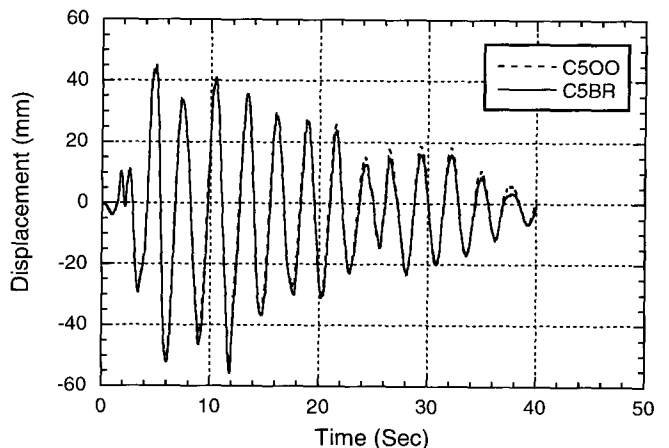


그림 7 C500과 C5BR의 지진응답

없는 것으로 나타났다. 이 결과를 볼 때 강합성교각이 실제 교량에 사용된다면 El Centro 지진과 비슷한 특성을 갖는 지진에 대해서 안정적인 거동을 보는 것은 물론 지진후에도 안전에 문제가 없을 것으로 판단된다.

C500의 결과를 실제 교각과 관련지어 보면, El Centro 지진의 0.313g의 최대지반가속도에도 위와 같은 거동을 보였으므로 실제 교각에서는 단면을 더 작게 할 수 있다. 다만, 이 논문에서는 강교각과 강합성교각의 비교가 목적이므로 강교각과 강합성교각을 따로 따로 설계하중에 대해서 최적화하지 않고, 먼저 강교각을 국내 내진규정에 따른 지진하중과 일본의 합성교각 설계안의 설계기준에 따라 설계하고 강합성교각은 강교각에 채움콘크리트를 추가하는 것으로 설계하였다.

C5BR의 경우 본래의 설계 목적이 최소한의 추가 비용으로 C500의 최대복원력과 그 이후의 거동을 개선시키는 것이었으나, 입력지진에 대한 C5BR의 복원력($1.6 H_{yo}$)이 "Part I"에서 얻은 최대복원력($2.2 H_{yo}$)의 72%에 밖에 되지 않아 입력지진에 대한 시간이력에서는 C500과 거의 같은 거동을 보였다. 다만 후반부의 변위의 최대값에서 약간의 차이를 보였다. 여기서 H_{yo} 는 항복복원력(136.1kN)으로 "Part I"에서 사용된 것과 같은 것이다(그림 7).

그림 8은 C000의 입력지진에 대한 이력곡선을 나타내고 있다. C000의 경우 상당한 지진에너지가 교각의 소성변형을 통해서 소산된 것을 알 수 있다. 그림 9와 10은 강합성교각인 C500과 C5BR의 입력지진에 대한 이력곡선을 나타내고 있다. C000에 비해서는 상대적으로 작은 양이지만 소성변형에 의해서 입력지진에너지가 소산된 것을 알 수 있다. 이는 C500과 C5BR이 입력지진에 대한 잔류변형은 없었지만 이력곡선에서 보면 소성변형이 발생했으므로 복원력이 최대로 발생하는 교각하부에 잔류변형 남았거나 내부의 채움콘크리트에 손상이 생겼을 가능성이 있다.

3.2 잔류내진성능평가

일반적으로 유사동적실험에서 소성거동이 두드러지지 않은 시험체는 손상을 거의 받지 않아 지진후의 내진성능이 지진전과 비교하여 큰 차이가 없다. 그러나, 이 논문에서 수행한 유사동적실험의 경우 시간이력결과나 입력지진에 따른 이력곡선을 보면 다소나마 소성영역에 해당하는 변위가 발생하였으며 이에 따라서 교각내부의 채움콘크리트도 손상되었을 가능성이 있으며, 최대모멘트가 발생하는 교각 하부에 잔류변형이 발생하였다. 이 같은 잔류변형은 초기변형에 해당하고 강교각 및 강합성교각의 국부좌굴하중에 변화를 주어 내진성능에 변화가 발생했을 가능성이 있다. 이 때문에 비록 소성거동이 작아서 손상이 적었다 하더라도 잔류내진성능을 평가할 필요가 있다고 판단되어 준정적 반복재하실험을 수행하였다.

그림 11과 12는 C000의 이력곡선과 파괴모드를 보여주고 있다. 이력곡선의 경우 지진전의 경우인 "Part I"와 비교하여 거의 차이를 찾을 수 없을 정도의 이력곡선을 보여주고 있다. 이는 비록 소성변형은 발생하였지만 지진시에 피해

가 최소화되어 지진후에도 지진전의 내진성능을 보유하고 있는 것을 의미한다. 지진전후의 연성도와 에너지소산도 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(표 3). 그림 12의 파괴모드도 지진전의 것과 동일한 것으로 나타났다.

그림 13과 14는 C500의 지진전후의 이력곡선을 보여주고 있다. 지진후의 이력곡선의 경우 지진전의 응답보다 오히려 최대변위가 약간 증가하는 현상을 보여주었으나 최대변위이후의 거동에서 급격한 강성의 감소가 나타났다. 연성도와 에너지소산에서도 지진후에 오히려 증가하는 것으로 나타났다(표 3).

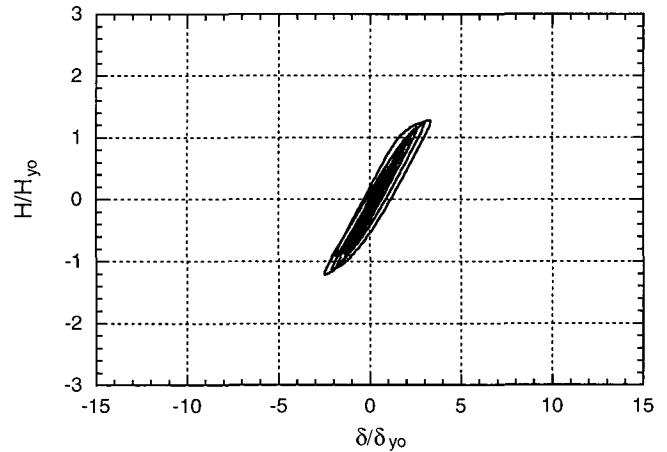


그림 8 C000의 입력지진에 따른 이력곡선

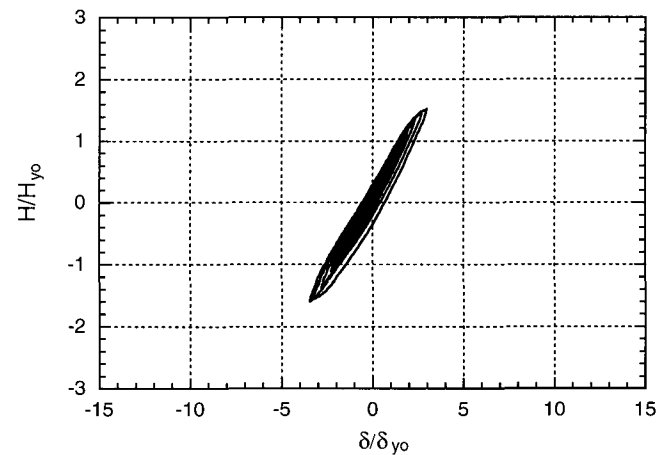


그림 9 C500의 입력지진에 따른 이력곡선

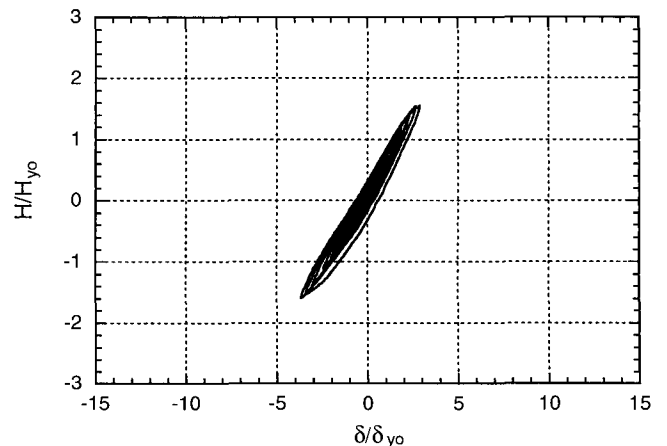


그림 10 C5BR의 입력지진에 따른 이력곡선

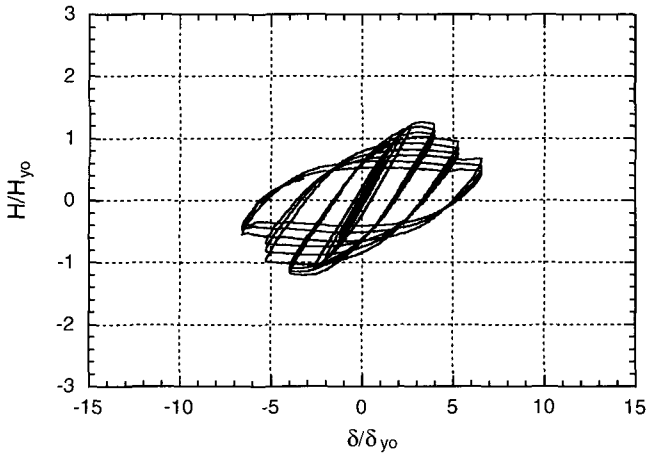


그림 11 C000의 이력곡선(지진후)

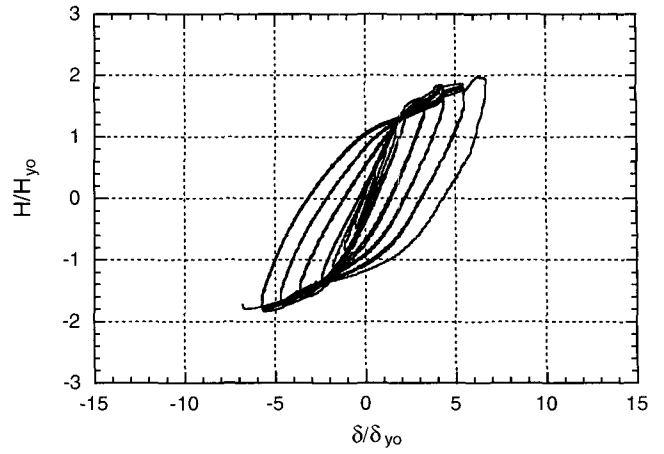


그림 13 C500의 이력곡선(지진전)

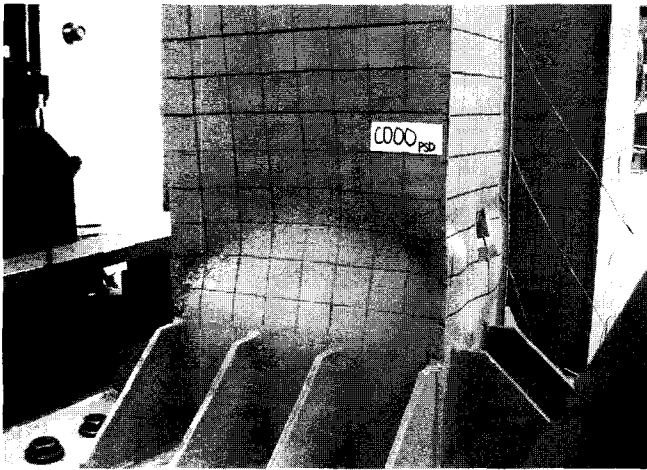


그림 12 C000의 파괴모드(잔류내진성능실험)

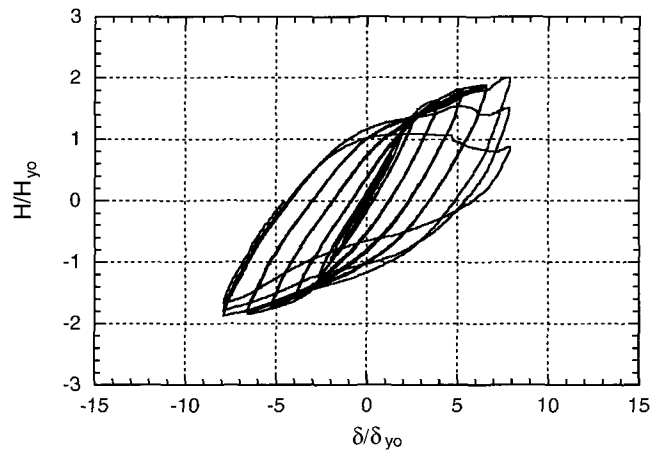


그림 14 C500의 이력곡선(지진후)

표 3 El Centro 지진 전후의 내진성능의 변화

		연성도 (μ_m)		에너지소산 (\hat{E})	
		전	후	전	후
주실험	C000	3.3	2.7	165.5	178.5
	C500	5.8	7.9	220.9	309.7
	C5BR	6.6	7.9	553.2	321.8

이것은 지진후에 내진성능이 증가한 것은 아니고 같은 작업자가 동일한 제작방법과 재료를 가지고 제작한 공칭적으로 동일한 시험체(nominally identical specimen)들 사이의 극한하중 부근의 성능차이 때문인 것으로 판단된다. 즉, 그림 15의 C500의 파괴모드처럼 교각하단의 외측리브 용접부에서 발생한 균열로 인해 파단이 일어나게 되면, 공칭적으로 동일한 C500 시험체라 해도 용접결함 같은 거의 불가피한 제작상의 미세한 차이가 균열발생의 시기와 균열의 전파에 상당한 영향을 미치기 때문이다.

그러므로, 지진전과 후의 이력곡선을 비교하면 비록 파괴시의 거동은 다르지만 초기 거동에서 최대복원력에 도달하기까지의 거동이 매우 유사함으로 입력지진에 의한 내진성능의 감소가 크지 않을 것으로 판단된다.

그림 16과 17은 C5BR의 지진전후의 이력곡선을 보여주고 있다. 지진전의 최대 변위는 δ_{yo} 에 비해서 9배를 넘는 수준

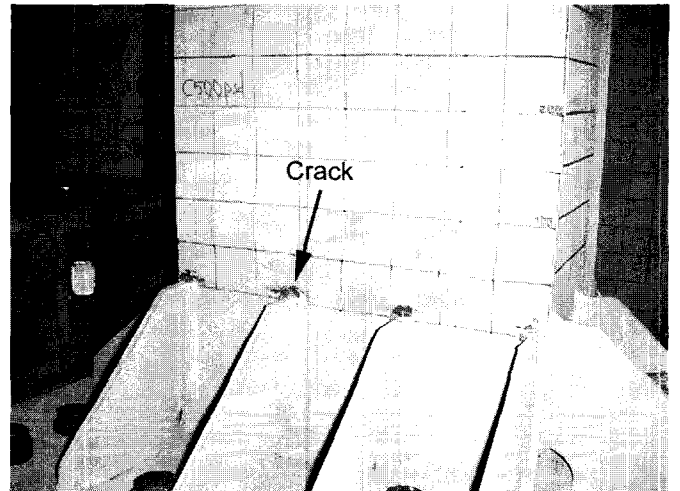


그림 15 C500의 파괴모드(잔류내진성능실험)

이었으나 지진후에는 8배정도에서 급격히 강도를 잃고 있다. 또한 지진전의 경우는 δ_{yo} 의 8배에 처음 도달한 후 두 번째와 세 번째 변위에서 상당히 강도가 저하되었으나 지진후의 거동에서는 δ_{yo} 의 8배에 도달할 때까지 강도가 유지되다가 갑자기 강도가 저하되는 것을 알 수 있다. 에너지 소산을 통한 연성도 평가에서도 지진후에 급격히 감소한 것으로 나타났다(표 3). 이것은 지진전의 경우 파괴모드가 짧은 수직보 강재부근에서 국부좌굴이 발생하고 이어 균열이 진전되어

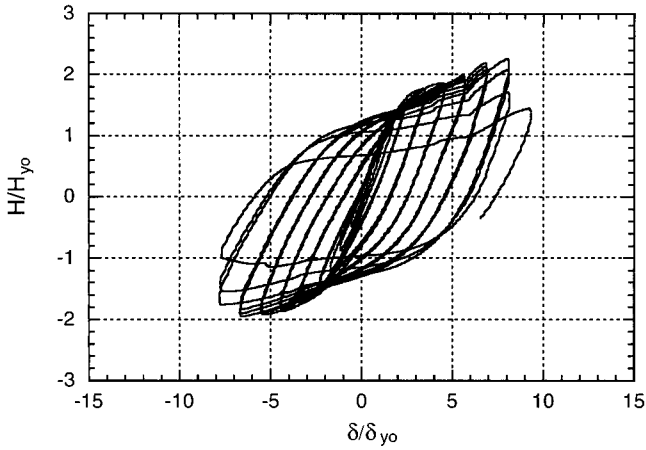


그림 16 C5BR의 이력곡선(지진전)

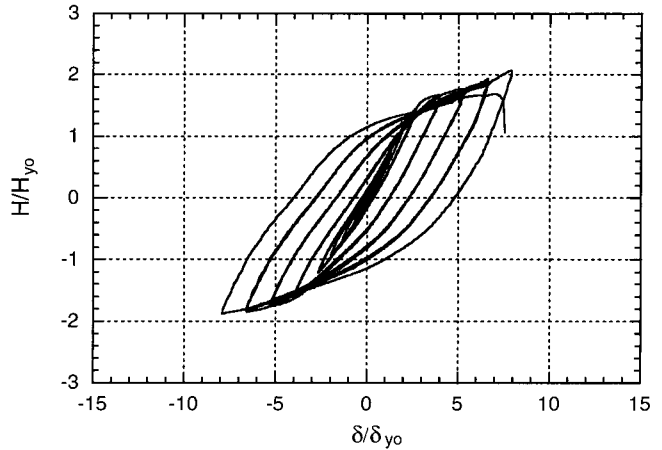


그림 17 C5BR의 이력곡선(지진후)

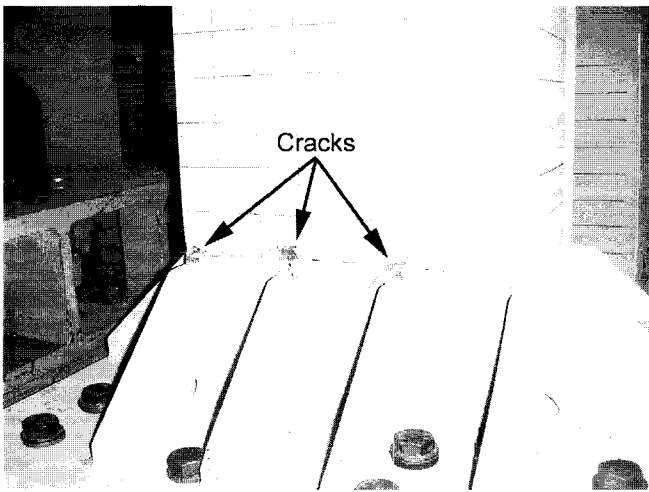


그림 18 C5BR의 파괴모드(잔류내진성능실험)

파괴된 것과 달리 지진후의 시험체는 그림 18에서의 C500 경우처럼 교각하단의 외측리브에서 균열이 진전되어 파괴되었기 때문이다. 이 때문에 파괴시까지 강도의 저하가 없었던 것으로 판단된다. 그러나 이 역시 내진성능의 특별한 감소를 의미하는 것은 아니고 공칭적으로 동일한 시험체들 사이의 극한하중 부근의 성능차이 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 강합성교각과 강교각의 실제 지진시의 거동과 지진후의 잔류내진성능을 파악하기 위해서 실제 서울 특별시에 건설중인 교량의 교각을 강교각과 강합성교각으로 설계하여 유사동적실험과 준정적 반복재하 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 입력지진은 중약진 지역에 위치한 국내의 지역적 특성과 지진기록이 없는 것을 고려하여 지진의 일반적인 특성을 보이는 것으로 알려진 El Centro 지진 기록을 사용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 시험에 사용된 강교각은 입력지진에 대해서 실제교각 기준으로 200mm의 최대변위와 40mm의 잔류변형을 보였다. 잔류변형의 경우 draft ratio가 0.59%로 일본도로교 시

방서 규정에 따르면 지진후에도 공학적으로 구조적으로 문제가 없다고 판단된다.

- 시험에 사용된 강합성교각은 입력지진에 대해서 강교각과 비슷한 최대변위를 보였으나 잔류변형은 거의 발생하지 않았다. 역시 일본도로교 시방서 규정에 따르면 지진후에도 공학적으로 구조적으로 문제가 없다고 판단된다.
- 따라서, 단면이 같은 경우라면 강교각에 비해 최소한의 추가 비용으로 건설할 수 있는 강합성교각이 내진거동이 우수하다고 판단된다.
- 유사동적실험후 수행한 잔류내진성능을 위한 준정적 반복재하실험에서도 강교각과 강합성교각 모두 지진시에 내진성능에 거의 손상을 받지 않은 것으로 조사되었다.

결국, 강교각 및 강합성교각이 중약진 지역인 국내의 도시의 실제 교량에 적용되면 대상 교량의 지진에 대한 구조적인 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구에 사용된 시험체를 제작하는데 도움을 준 동아건설 관계자 여러분과 실험을 수행한 현대건설기술연구소의 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Usami, T. and Kumar, S., "Damage evaluation in steel box column by pseudodynamic tests," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 6, 1996, pp. 635-642.
2. Mahin, S. A., Shing, P. B., Thewalt, C. R., and Hanson, R. D., "Pseudodynamic test method-Current status and future direction," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 8, 1989, pp. 2113-2128.
3. Takanashi, K. and Nakashima, M., "A note on the

- evaluation of damage in steel structures under cyclic loading," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 7, 1987, pp. 1014-1032.
4. Kumar, S., Itoh, I., Saizuka, K., and Usami, T., "Pseudo-dynamic testing of scaled models," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 4, 1997, pp. 524-526.
 5. Nakanishi, K., Kitada, T., and Nakai, H., "Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel columns under strong earthquake," *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Science, Vol. 51, 1999, pp. 297-319.
 6. Hanshin Expressway Public Corporation, "Guidelines for design and construction of steel bridge piers with concrete-filled steel columns(Draft)," Hanshin Expressway Public Corporation, Japan, 1986.
 7. Ge, H. and Usami, T., "Development of earthquake-resistance ultimate strength design method for concrete-filled steel structures," *Report*, Department of Civil Eng., Nagoya University, Japan, 1994.
 8. 일본도로협회, "도로교시방서 동하석 V 내진설계편", 1996.