

콘크리트 충전 강교각의 내진 성능 평가

The Evaluation of Seismic Performance for Concrete-filled Steel Piers

정 지 만^{*} 장 승 필^{**} 인 성 빈^{***}
Zung, Zi Man Chang, Sung Pil In, Sung Bin

국문요약

최근, 콘크리트 충전 강교각은 신속한 시공과 뛰어난 연성능력으로 인해 도심지에서 철근 콘크리트 교각의 대안이 되고 있다. 이러한 콘크리트 충전 강교각은 내진 설계에서도 훌륭한 성능을 발휘할 수 있으나 내진 설계의 가이드가 없어 내진 설계시 그 성능을 모두 반영하지 못하고 있는 상황이다. 이에 실제 적용을 위해 콘크리트 충전 강교각 실험으로부터 얻어진 실험치로부터 내진 설계에 지침이 될 수 있는 가이드를 제시하고자 한다. 콘크리트 충전 강교각과 일반 강교각의 연성 능력을 평가하기 위해 준 정적 반복 재하 실험을 수행하고, 지진 거동을 검증하기 위해 고배 지진을 입력 데이터로 한 유사 동적 실험을 수행한다. 콘크리트 충전 강교각은 일반 강교각에 비해 만족할 만한 연성도와 강도를 보이고, 동적 거동은 상대적으로 큰 이력감쇠를 증명한다. 실험으로 얻어진 데이터를 근거로 하여 콘크리트 충전 강교각의 내진 성능을 정량화 하고, 탄성응답 스펙트럼에 의한 지진응답 수정계수법과 유효 점성 감쇠를 이용한 성능 곡선 및 요구 스펙트럼에 의한 성능기초 설계법의 비교를 통하여, 콘크리트 충전 강교각과 일반 강교각의 내진 성능을 평가한다. 이러한 내진 성능 평가를 기초로 하여, 일반 강교각과 더불어 내진 설계에 적용할 수 있는 콘크리트 충전 강교각의 지진응답 수정계수를 제시한다.

주요어 : 콘크리트 충전 강교각, 준 정적 실험, 유사 동적 실험, 연성도, 지진응답 수정계수

ABSTRACT

A recent development, a concrete-filled steel(CFS) pier is an alternative to a reinforced concrete bridge pier in an urban area, because of its fast construction and excellent ductility against earthquakes. The capacity of CFS piers has not been used to a practical design, because there is no guide of a seismic design for CFS piers. Therefore, the guide of a seismic design value is derived from tests of CFS piers in order to apply it to a practical seismic design. Steel piers and concrete-filled steel piers are tested with constant axial load using quasi-static cyclic lateral load to check ductile capacity and using the real Kobe ground motion of pseudo-dynamic test to verify seismic performance. The results prove that CFS piers have more satisfactory ductility and strength than steel piers and relatively large hysteretic damping in dynamic behaviors. The seismic performance of steel and CFS piers is quantified on the basis of the test results. These results are evaluated through comparison of both the response modification factor method by elastic response spectrum and the performance-based design method by capacity spectrum and demand spectrum using effective viscous damping. The response modification factor of CFS piers is presented to apply in seismic design on a basis of this evaluation for a seismic performance.

Key words : concrete-filled steel pier, quasi-static test, pseudo-dynamic test, ductility, response modification factor

1. 서 론

콘크리트 충전 강교각의 내부 충전재인 콘크리트는 외부 강판의 내부 방향으로의 좌굴을 막아, 좌굴 하중을 증가시키는 효과가 있다. 반면 외부 강판은 내부 콘크리트의 변형을 구속하여 내부 콘크리트가 삼축 응력하에 있게 하고 그 강도를 증가시킨다. 이로 인해 콘크리트 충전 강교각은 강과 콘크리트 강도의 단순 누계 합 이상의 성능을 보이게 되고 강교각이나 RC교각에 비해 우수한 연성도를 보여준다(Kitada⁽¹⁾). 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 설계에 대한 연구는 80-90년대에 한국과 일본에서 활발하게 수행되어 왔다(Nakanishi et al.⁽²⁾, Usami, Ge.⁽³⁾, 권영봉외⁽⁴⁾). 이러한 연구들은 대부분 지진 위험 지역에서 강교각이나 콘크리트 충전 강교각의 적절한 강도와 연성도를 보장하는 설계 방법에 초점을 맞추고 있다. 그 결과 사각 단면에 수직 보강재와 수평방향 다이어

프램을 보강하는 콘크리트 충전 강교각의 전형적인 상세가 개발되었고 판-폭비, 충전 길이 등에 따라 실험도 상당한 성과를 이루고 있다(Usami, Ge⁽³⁾). 이러한 연구들은 강교각에 비해 상대적으로 우수한 콘크리트 충전 강교각에 대한 내진 설계에 대해서 실제 적용할 수 있는 명확한 지침까지 연결되지 못하고 있는 상황이다(건교부⁽⁵⁾, AASHTO⁽⁶⁾, Euro Code⁽⁷⁾). 구조물의 실제 거동에 대한 목표를 명백하게 규정하고 설계 대상 지진이 발생시 구조물의 거동이 목표에 도달하게 구조물을 설계하는 성능에 기초한 설계 개념이 내진설계에 도입되고 있다(ATC-40⁽⁸⁾). 내진 설계에서 지진하중을 결정하는 방법중의 하나는 연성도에 근거하여 지진응답 수정계수를 산정하고, 탄성 해석법에 의해서 계산된 지진응답을 이 계수로 나누어서 비탄성 거동의 구조물에서 발생할 수 있는 지진력의 크기를 평가하는 지진응답 수정계수법이다. 다른 방법은 성능 곡선과 내진 요구 스펙트럼에 의해 성능 스펙트럼을 작성하는 성능기초 설계법으로 지진응답을 평가하는 것이다. 성능기초 설계법은 구조물의 유효강성과 이력감쇠를 이용하여 구조물의 성능에 따라 설계하고, 지진응답 수정계수법은 연성도에 따라 지진응답 수정계수를 시방규정에

* 정회원 · 서울대학교 지진 공학 연구센터, 연구원(대표저자 : ziem@korea.com)
** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템 공학부, 정교수
*** 서울대학교 지구환경시스템 공학부, 박사과정
본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 8. 27 / 심사종료일 : 2002. 9. 25)

명시하여 설계한다. 지진응답 수정계수법을 사용하는 국가의 시방규정은, 강교각과 콘크리트 교각의 지진응답 수정계수는 명시하고 있으나 콘크리트 충전 강교각의 값은 제시하지 않고 있다. 내진 설계에서 강교각보다 연성도가 우수한 콘크리트 충전 강교각의 지진응답 수정계수를 제시하기 위해 강교각과의 상대비교와 더불어 다음과 같은 절차를 밟는다.

강교각과 콘크리트 충전 강교각의 성능은 준 정적 실험에서 구한 연성도를 정의하여 정량적으로 산정하고, 지진시의 동적 거동과 이력감쇠를 검증하기 위해서 실제 고배 지진을 입력 데이터로 하는 유사 동적 실험을 수행한다. 준 정적 실험에 의해 정량화된 수치로부터 내진 설계시 적용되는 지진응답 수정계수를 상대 비교한다. 실험결과에 의한 성능 곡선과 유효강성 표현으로 제시되는 내진 요구 스펙트럼과 성능 수행점을 상대 비교한다. 연성도와 지진응답 수정계수에 의한 지진응답 수정계수법에서의 비교와 성능 수행점과 요구 스펙트럼에 의한 성능기초 설계법의 비교를 통하여, 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 내진 성능을 평가하고 콘크리트 충전 강교각에 적용할 수 있는 합리적인 지진응답 수정계수를 제시한다.

2. 실험

실험시 수직 하중 재하는 그림 1에서의 50톤 가진기 2개로 하였고, 교각이 받치고 있는 상부 구조의 하중을 모사하기 위해 실험시 시편의 양 옆에 가진기를 이용하여 일정 축하중을 재하한다. 수평하중은 100톤 가진기를 이용하여 준 정적 실험의 특정 변위 제어와 유사 동적 실험의 실제 지진 하중을 재하한다. 원형 구조물로 서울에 있는 이수교차로의 고가 도로 중 한 교각을 선정하여, 상사 법칙에 따라 실험 모델을 제작하였다. 원형 구조물은 콘크리트 충전 강교각이 아니고 RC교각이다. 그림 2의 제작 시편의 치수는 1/4 축소 모델이며, 교각의 모멘트 분배와 자중을 줄이기 위해 교각하부에서부터 중간까지 교각길이의 1/2에만 콘크리트를 충전 하였다. ESP 시편은 콘크리트를 충전하지 않은 강교각이고, CSP 시편들은 콘크리트를 충전한 강교각이다.

ESP 2개와 CSP 6개의 시편은 모두 SS400 강판으로 제작되었으며, 사용된 강판의 극한 강도는 평균 380MPa이고, 항복 강도는 303MPa이다. 내부 콘크리트의 압축 강도는 CSP

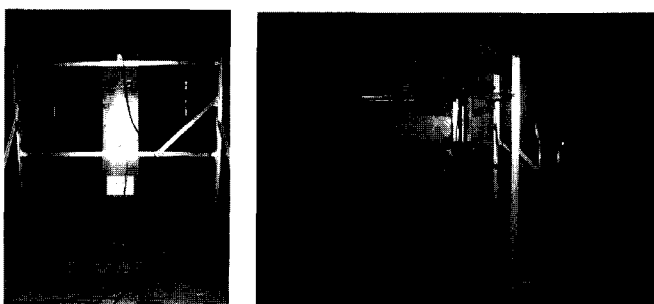


그림 1 실험 시편 세팅 모습

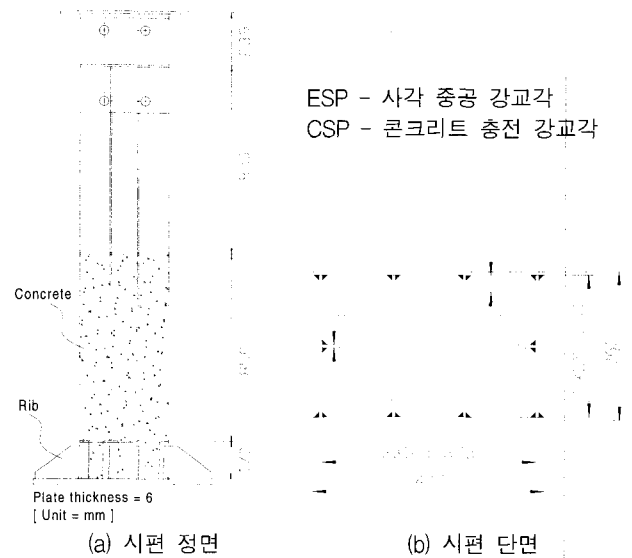


그림 2 시편 제작 치수

1시편의 경우 39.6MPa, CSP 2시편의 경우 36.1MPa, CSP 3 시편의 경우 30.2MPa 이다. 모든 강재 시편은 동일한 치수와, 상세로 제작하고, 4개의 시편을 각각 2조씩 제작하여 준 정적 실험과 유사 동적 실험에 적용한다.

그림 3에서와 같이 준 정적 반복 하중 재하 실험에서, 단계에 따라 재하하는 변위는 초기의 3단계는 하중의 반복이 없고 이 후 단계는 3번의 반복 재하를 하고 있다. 유사 동적 실험에서 교각은 1자유도 시스템으로 모사한다. 다음 방정식 (1)은 1 자유도 시스템의 운동방정식이다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + R_m = -M\ddot{x}_0 \quad (1)$$

M 과 C 는 구조계의 질량과 감쇠계수이고, R_m 은 구조계의 복원력이며, \ddot{x}_0 는 지반 가속도이다. 일반 동적 운동방정식과 상이한 점은, 변위 제어로 인해 각 단계에서 측정된 복원력 R_m 은 다음 단계의 변위를 계산하는데 사용된다는 것이다. 이는 재료의 비선형성을 정확하게 전달할 수 있는 장점이 있지만 측정오차는 계속 누적된다는 단점이 있다. 사용된 지진기록은 그림 4에 나타난 1995년에 발생한 일본 고베 지진이다.

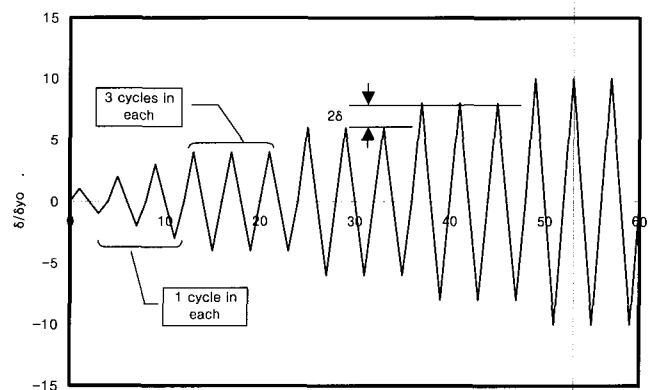


그림 3 준 정적 실험 하중 재하 순서

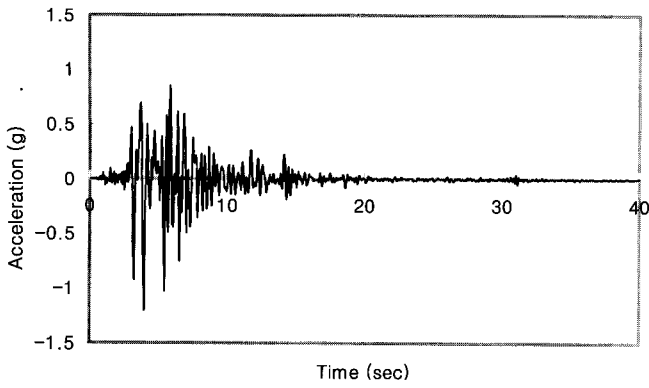


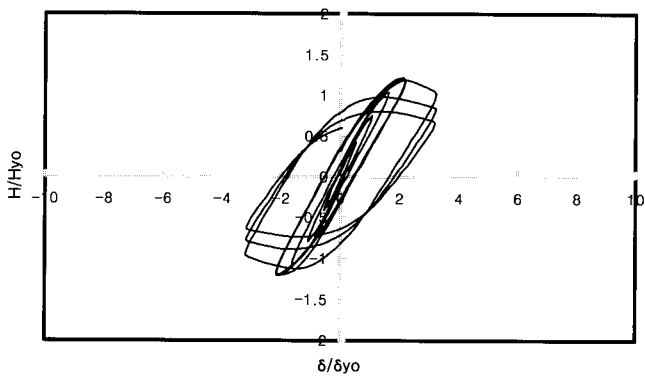
그림 4 고베 지진 기록 1995

3. 실험 결과

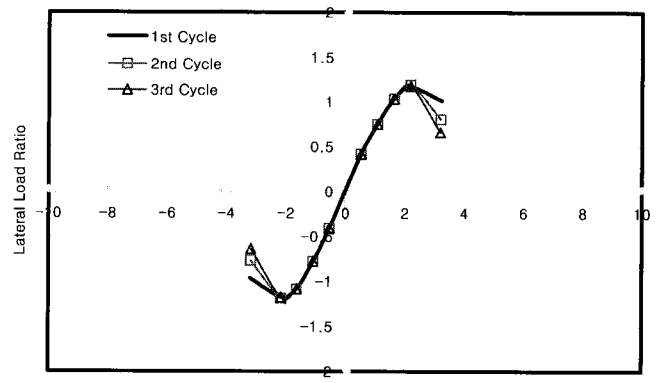
강교각 ESP 시편의 실험결과, 파괴모드는 예상한대로 플랜지 판에서는 외부 방향 좌굴이 발생하고 웹판에서는 내부 방향의 좌굴이 발생하여 강교각의 파괴모드의 전형을 보였다. 콘크리트 충전 강교각 CSP 시편들은 모든 강판에서 외부 방향으로 좌굴이 일어나는 파괴 모드를 보여주었다. 준정적 실험에 대한 각 시편의 이력 곡선과 포락 곡선을 그림 5, 그림 6에서 볼 수 있다. 콘크리트 충전 강교각들은 비슷한 형태를 보이고 있어, CSP1 시편만을 도시하였다.

이력 곡선과 포락 곡선에서 X축은 변위와 계산된 항복변위(δ_{y0})의 비로 무차원 항으로 나타냈고, Y축은 각 단계의

하중과 계산된 항복하중(H_{y0})의 비로 역시 무차원 항으로 표현하였다. 포락 곡선의 각 단계에서 하중 재하를 반복함에 따라 복원력의 크기가 작아지는 경향을 알 수 있다. 콘크리트 충전 강교각은 수평방향 변위가 120mm(변위비 7.14)에 도달할 때 복원력이 감소한 반면, 강교각은 수평 방향변위가 50mm(변위비 2.98)를 초과하면서 급속히 복원력이 감소하는 불안정한 모습을 보여준다. 이런 현상은 CSP 시편의 이력 곡선에서 쉽게 볼 수 있다. CSP 시편의 이력 곡선을 보면 복원력의 감소가 수평 방향 변위 120mm(변위비 7.14) 근처에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 물론 국부 좌굴의 위치 차이나 이력 곡선의 대칭성 특징에 따라서 약간의 차이는 있지만 기본적으로 내부 콘크리트가 큰 소성 변형을 겪는 동안 이력 곡선의 폭은 좁아지게 된다. 콘크리트 충전 강교각의 포락 곡선들은 내부 콘크리트의 재료 성질의 차이에도 불구하고 초기 강성은 대동소이한 결과를 보인다. 이것은 콘크리트 강성 자체의 변화가, 콘크리트를 충전한 교각과 충전하지 않은 교각의 차이만큼 큰 변수가 되지 않음을 알 수 있다. 그림 7은 준 정적 실험과 유사 동적 실험 후의 파괴 모드 모습을 나타낸 것이며 기본적으로 좌굴점의 위치 등이 같은 경향을 나타내고 있다. 유사 동적 실험에 대한 콘크리트 충전 강교각의 파괴모드는, 실험 종료 후에도 손상되지 않은 시편에 고베 지진 가속도의 2.5배 값을 사용하여 추가로 관찰한 것이다.

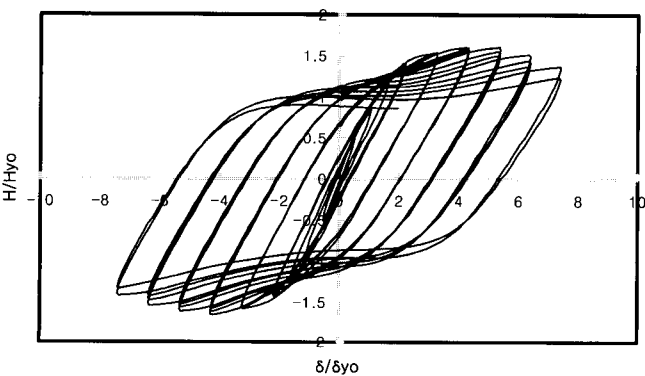


(a) 이력 곡선

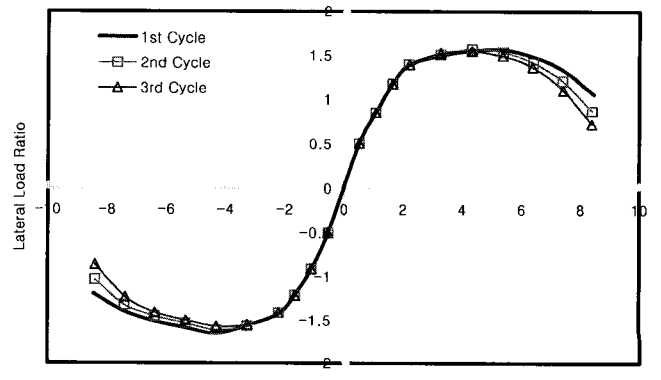


(b) 포락 곡선

그림 5 강교각(ESP)



(a) 이력 곡선



(b) 포락 곡선

그림 6 콘크리트 충전 강교각(CSP)

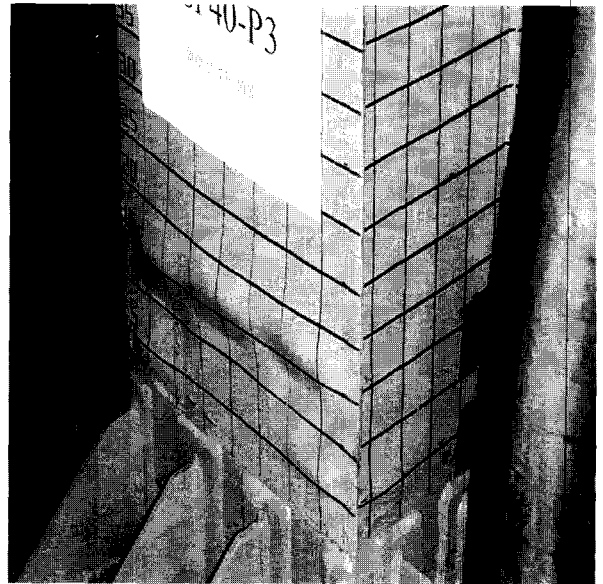
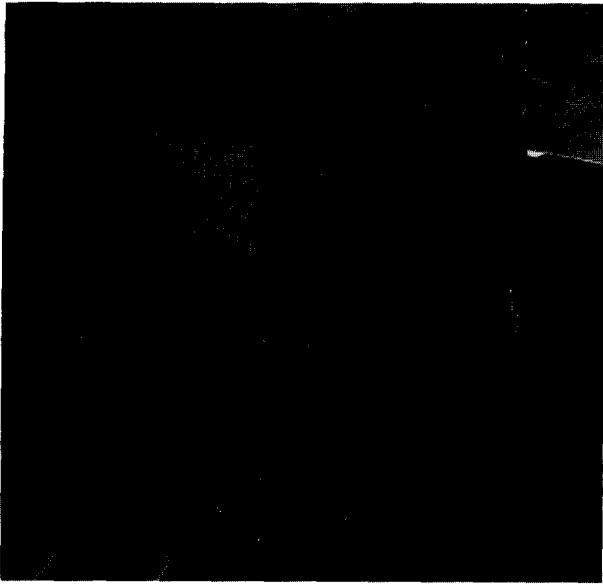


그림 7 CSP 시편의 준 정적 실험과 유사 동적 실험 후의 파괴 모습

유사 동적 실험은 정해진 실험 기법으로 고베 지진시 가속도 값을 사용하여, 그에 따른 교각의 비선형 거동을 검증하기 위한 것으로, 그림 8은 유사 동적 실험에서 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 변위 응답과 복원력 응답의 비교를 나타낸 것이다. 강교각인 ESP 시편의 경우 시간 영역의 5초 경과 정도에서 좌굴 형상을 육안으로 관찰하였다. 이는 유사 동적 실험의 변위 응답과 준 정적 실험의 포락 곡선의 비교에서도 알 수 있다. 강교각은 극한 변위비인 2(그림 5의 (b) 포락 곡선)를 초과하는 응답을 보인 반면, 콘크리트 충전 강교각인 CSP는 시간 영역의 5초 경과 정도에서 극한 변위비 5(그림 6의 (b)포락 곡선)에 못 미치고 있음을 확인 할 수 있다. 즉, 고베 지진하중에 대한 변위 응답 및 복원력 응답의 결과를 보면, 강교각의 최대응답은 이미 포락 곡선의 극한점(약 2.1.2)을 초과하고 있으나 콘크리트 충전 강교각인 CSP의 최대응답은 포락 곡선의 극한점(약 5.1.6)을 초과하지 않고 있다. 다른 연구자에 의하면 강교각의 잔류변형이 콘크리트 충전 강교각의 잔류 변형보다 크다는 것을 언급하면서, 이러한 잔류변형의 차이가 콘크리트 충전 강교각의 효과라고 결론을 내린다(Nakanishi et al.⁽²⁾). 그러나 그것보다 중점을 둘 수 있는 것은, 콘크리트 충전 강교각이 강교각에 비해 훨씬 더 뛰어난 이력감쇠를 가진다는 것이다.

시간 영역에서의 변위 응답을 보면, 후반부 응답에서 콘크리트 충전 강교각의 진폭은 강교각의 진폭에 비해 작음을 볼 수 있다. 이는 콘크리트 충전 강교각의 이력감쇠가 강교

각의 이력감쇠에 비해 크기 때문이며, 이것으로 콘크리트 충전 강교각은 강교각에 비해 지진 거동 시 보다 효율적이라는 것을 알 수 있다. 이로써 유사 동적 실험에서 이력감쇠의 비교, 확인을 통해 콘크리트 충전 강교각의 내진 성능을 검증하였다. 이제 정량적인 분석으로 콘크리트 충전 강교각의 내진 성능을 평가한다.

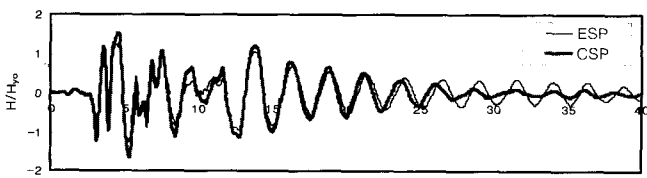
4. 내진 성능 평가

각종 구조물과 시설물을 중요도에 따라서 내진 설계 수준에 차별을 두는 것은 타당하며, 구조물의 성능에 따라서도 역시 마찬가지이다. 지진 하중에 대한 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 내진 성능을 정량적으로 평가, 비교하기 위하여, 지진응답 수정계수법과 성능기초 설계법을 이용한다. 지진응답 수정계수는 연성도에 근거한 것으로, 실험을 통해 얻은 결과로부터 각 시편들에 대해 이러한 성질을 나타낼 수 있는 계수를 정량적으로 다음과 같이 정의한다.

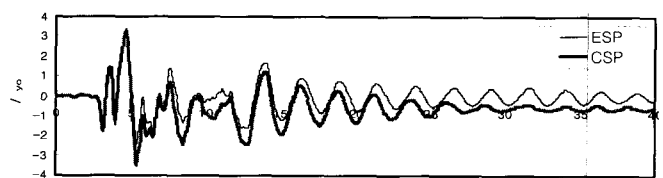
$$\mu_m = \frac{\delta_m}{\delta_y} \quad (2)$$

$$\mu_{y'} = \frac{\delta_{y'}}{\delta_y} \quad (3)$$

$$\mu_{95} = \frac{\delta_{95}}{\delta_y} \quad (4)$$



(a) 변위 응답



(b) 복원력 응답

그림 8 각 시편의 변위 응답 및 복원력 응답 비교

연성도 계수는 최대 하중 발생시의 변위(δ_m)와 항복 변위(δ_y)의 비로 식 (2)처럼 정의하는 것과 최대 하중 이후에 감소되어 만나는 항복 하중과 대응하는 변위($\delta_{y'}$)와 항복 변위(δ_y)의 비로 식 (3)처럼 정의된다. 여기서, 항복 변위(δ_y)는 실험에서 첫번째 항복이나 국부좌굴이 시작될 때의 변위를 나타내며, 그때의 하중은 실제 시편에서 발생한 항복하중(H_y)이다. 식 (2)는 후 좌굴 거동에 대한 것을 포함하지 못하고, 식 (3)은 실험에서 그 값을 얻기가 쉽지 않을 때가 있어서, 또 다른 연성도 계수로 최대 하중 이후 95% 하중에 대응하는 변위(δ_{95})와 항복 변위(δ_y)의 비로서 식 (4)처럼 정의한다. 각 시편들의 연성도를 표 1에서 볼 수 있으며, 항복 변위(δ_{y0})와 항복하중(H_{y0})은 계산에 의해 산정된 항복변위와 항복하중이다.

표 1 각 시편들의 연성도 계수

	μ_m	μ_{95}	H_y (kN)	δ_y (mm)	H_y/H_{y0}	비고
ESP	3.45	4.27	71.43	10.675	0.52	$H_{y0}=137\text{kN}$ $\delta_{y0}=16.8\text{mm}$
CSP 1	7.94	9.93	81.94	10.831	0.60	
CSP 2	6.50	8.53	81.21	11.537	0.60	
CSP 3	7.77	10.37	72.28	10.010	0.53	

연성도(μ_{95})는 연성도(μ_m)에 비해 약간 큰 값을 보임으로써 후 좌굴 거동에서 특성을 잘 나타내고 있고, 콘크리트 충전 강교각의 연성도(μ_{95})는 강교각의 연성도에 비해 2배 이상 크다. 실험에서 구해진 연성도를 이용하여 항복 감소계수, 즉 지진응답 수정계수는 응답 스펙트럼에서 가속도, 속도 그리고 변위 민감 영역에 따라 식 (5)와 같이 정의되고, 연성도와 가속도 민감 영역에서 산정된 지진응답 수정계수는 표 2에 정리하였다.

$$R_y = \begin{cases} 1 & : \text{가속도 민감 영역이전 영역} \\ \sqrt{2\mu - 1} & : \text{가속도 민감 영역} \\ \mu & : \text{속도 및 변위 민감 영역} \end{cases} \quad (5)$$

표 2 연성도와 지진응답 수정계수

	μ_m	R_y	μ_{95}	R_y	비고
ESP	3.45	2.42	4.27	2.75	가속도 민감 영역에서 산출
CSP 1	7.94	3.86	9.93	4.34	
CSP 2	6.50	3.46	8.53	4.01	
CSP 3	7.77	3.81	10.37	4.44	

현재 AASHTO 시방서 규정에 따르면 콘크리트와 강재의 구분 없이, 일반적인 중요도 범주에서 단순 기동에 대한 지진응답 수정계수는 3으로 규정하고 있다. 한국 도로교 설계 기준에도 같은 내용을 포함하고 있다(건교부⁽⁵⁾, AASHTO⁽⁶⁾).

현재 유로코드(EUROCODE)에는 RC교각과 강교각의 내진 거동계수로 명명되어 표시되어 있다(Euro Code⁽⁷⁾). 연성

도에 제한이 있는 경우와 그렇지 않은 경우의 구분은 있지만, 역시 콘크리트 충전 강교각에 대해서는 언급이 없다.

콘크리트 충전 강교각의 지진응답 수정계수는 강교각의 1.9~2.4배에 이르고 있다. 기존 시방서에 따르면 강교각의 지진응답 수정계수는 3으로 사용하고 있다. 지진응답 수정계수법의 관점에서, 콘크리트 충전 강교각의 내진 설계시 연성도 요구치는 6, 즉 지진응답 수정계수는 6을 사용하는 것을 제안하는 것이 가능하다. 이의 검증에 위해 성능기초 설계 개념을 도입하여 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 성능을 비교, 평가한다.

성능기초 설계 개념은 구조물의 힘-변위 관계를 나타내는 성능 곡선과 구조물의 유효 점성감쇠에 의해 감소된 요구 스펙트럼을 정의하여 그 구조물의 성능 수행 점을 명백하게 규정하는 것이다. 실험에서 구한 성능곡선으로부터 감소된 스펙트럼을 구하기 위한 예제를 위하여, 지진하중의 크기를 상세하게 나눈 UBC 시방서에 따라 지진의 세기 즉 가속도의 세기만을 변화시켜 강교각과 콘크리트 충전 강교각에 적용한다. 지진종류나 부지 종류 등의 조건을 동일하게 하고 가속도 크기만을 변화($Z=0.15, 0.4$)시켜 지진계수를($C_A=0.22, 0.44, C_v=0.32, 0.64$) 산정한 예제의 결과를 그림 9와 그림 10에 도시하였다.

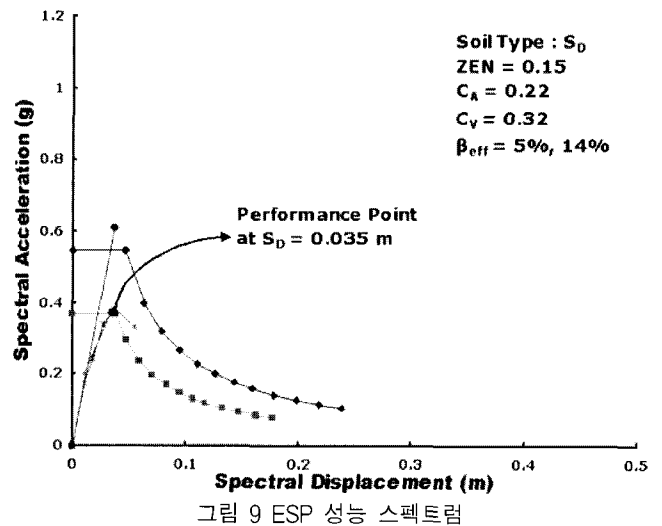


그림 9 ESP 성능 스펙트럼

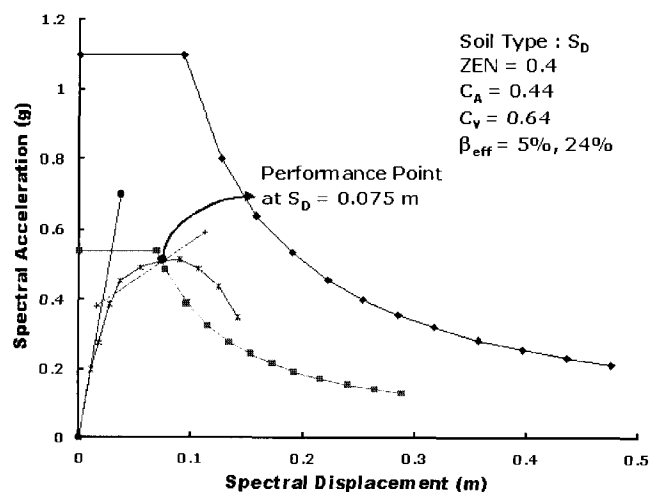


그림 10 CSP 성능 스펙트럼

그림에서와 같이 성능에 기초한 설계법에서 콘크리트 충전 강교각과 강교각의 요구 스펙트럼은 차이가 있음을 알 수 있다. 각각의 요구 스펙트럼을 보인 그림 11에서, 콘크리트 충전 강교각에 대한 강교각의 최대 스펙트럼 가속도비는 1.46이다. 이 값은 가속도 민감 영역에서 콘크리트 충전 강교각의 최대 스펙트럼 가속도를 강교각의 최대 스펙트럼 가속도로 감소시켰을 때의 지진응답 수정계수이다. 이를 속도와 변위 민감영역에서의 지진응답 수정계수로 환산하면 1.57 정도의 값을 갖는다. 이는 강교각의 지진응답 수정계수의 절대값과는 관계없이 콘크리트 충전 강교각과 강교각의 상대 비교에 따라 평가한 것이다. 따라서 콘크리트 충전 강교각의 내진 성능은, 성능기초 설계법의 관점에서 강교각의 내진 성능의 1.5배 이상이라고 할 수 있다. 이에 따라 지진응답 수정계수도 약 1.5배의 차이를 가져야 하는 것이 적절하다. 표 3은 강교각과 콘크리트 충전 강교각에 적용된 스펙트럼의 비를 산정하여 환산한 지진응답 수정계수를 나타내고 있다.

결론적으로, 두 방법에서 각 시편의 비교로부터, 콘크리트 충전 강교각의 지진응답 수정계수는 강교각의 1.5배를 사용하는 것이 타당하겠다. 따라서, 강교각의 지진응답 수정계수가 3일 때, 콘크리트 충전 강교각의 지진응답 수정계수는 안정적으로 4.5를 사용하는 것이 적절하다. 이는 지진응답 수정계수의 근거가 되는 연성도의 비교결과와 성능기초 설계

법에서 정해진 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 요구 스펙트럼의 비교 결과로부터 산정한 것이다.

5. 결 론

콘크리트 충전 강교각의 내진 성능을 강교각과 비교, 평가하기 위해 준 정적 실험 및 유사 동적 실험을 수행하였다. 준 정적 실험에서 구한 연성도 계수를 정량적으로 산출한 결과, 콘크리트 충전 강교각은 일반 강교각에 비해 2배의 연성도를 보였고, 유사 동적 실험에서는 강교각에 비해 큰 이력감쇠를 확인하였다. 성능기초 설계법에서 비교한 강교각에 대한 콘크리트 충전 강교각의 환산 지진응답 수정계수는 1.5배의 값을 보였다. 실험 결과를 근거로 지진응답 수정계수법과 성능기초 설계법으로 콘크리트 충전 강교각의 내진 성능을 평가하였으며, 콘크리트의 충전 강교각의 지진응답 수정계수는 안정적으로 강교각 값의 1.5배의 값을 제안하였다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통해 한국 과학재단의 지원으로 수행되었습니다. 연구를 지원해 준 한국 과학재단과 지진공학연구센터에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Kitada, T., "Ultimate strength and ductility of state-of-art concrete-filled steel bridge piers in Japan," *Engineering structures*, No. 20, 1997, pp. 347-354.
2. Nakanishi, K., Kitada, T., et al, "Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel columns under strong earthquake," *Journal of Constructional Steel Research*, No. 51, 1999, pp. 297-319.
3. Usami, T. and Ge, H. B., "Cyclic behavior of thin-walled steel structures-Numerical analysis," *Thin-Walled Structures*, No. 32, 1998, pp. 41-80.
4. 권영봉외, "콘크리트 충전 합성 기둥의 거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회, 2000, pp. 107-114.
5. 건설교통부, 도로교 설계기준, 2000, pp. 474.
6. AASHTO, *Standard Specification for Highway Bridges*, 16th Edition, 1996, pp. 14-65.
7. Euro code 8, *Design provisions for earthquake resistance of structures*, DD-ENV 1998-2, 1996, pp. 102.
8. ATC-40, "Seismic evaluation and retrofit of concrete building," *Engineering Structures*, 1996, pp. 14-7.

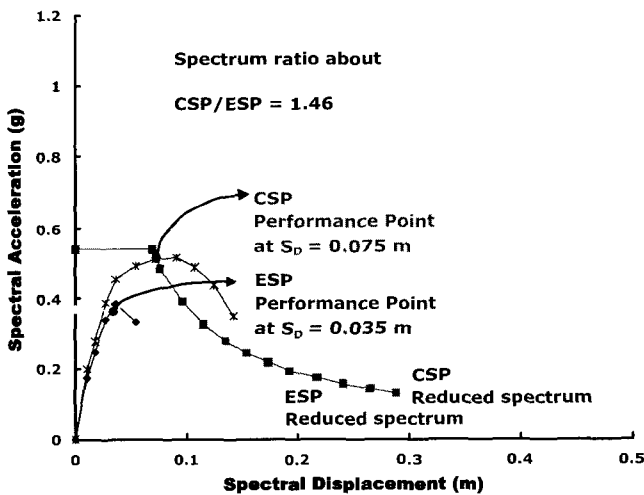


그림 11 요구 스펙트럼 비교

표 3 지진응답 수정계수 비교

	강교각	충전강교각	비 고
최대 스펙트럼 가속도	0.367	0.537	
비		1.46	
환산 지진응답 수정계수		1.57	$R = \sqrt{2\mu - 1}$
제안 지진응답 수정계수	3	4.5	