

콘크리트 충전 강교각의 내진 성능

The 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

ABSTRACT

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.

*정회원 서울대학교 지진 공학 연구센터, 연구원(대표저자:Fax82-2-872-3775:ziem@korea.com)

**정회원 서울대학교 지구환경시스템 공학부, 정교수(Fax82-2-885-0554:changsp@plaza.snu.ac.kr)

***서울대학교 지구환경시스템 공학부, 박사과정 (Fax82-2-872-3775:bini77@snu.ac.kr)

1. 서론

콘크리트 충전 강교각의 내부 충전재인 콘크리트는 강판의 내부 방향으로의 좌굴을 막아주어, 좌굴 하중을 증가 시켜주는 효과가 있다. 또한 외부 강판은 내부 콘크리트의 변형을 구속하여 내부 콘크리트가 삼축 응력하에 있게 하고 그 강도를 증가시켜 준다. 이로 인해 콘크리트 충전 강교각은 강과 콘크리트 강도의 단순 누계 합 이상의 성능을 보이게 되고 강교각이나 RC교각에 비해 우수한 연성도를 보여준다. 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 설계에 대한 연구는 80-90년대에 한국과 일본에서 활발하게 수행되어 왔다(Nakanishi et al.⁽¹⁾, Usami, Ge.⁽²⁾, 권영봉외⁽³⁾). 그 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 다이어프램을 보강하는 콘크리트 충전 강교각의 전형적인 상세가 개발되었고 판-폭비, 충전 길이 등에 따라 실험도 상당한 성과를 이루고 있다(Usami, Ge⁽²⁾). 이러한 연구들은 강교각에 비해 상대적으로 우수한 콘크리트 충전 강교각에 대한 내진설계에 대해서 실제 적용할 수 있는 명확한 지침까지 연결되지 못하고 있는 상황이다.

내진 설계에서의 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 능력 곡선과 요구 스펙트럼에 의해 성능 스펙트럼을 작성하는 성능기초 설계법으로 지진응답을 평가하는 방법이다(ATC-40⁽⁴⁾). 지진응답 수정계수법을 사용하는 국가의 시방규정에는, 강교각이나 콘크리트교각과는 달리 콘크리트 충전 강교각의 값은 제시되지 않고 있다. 내진 설계에서 강교각보다 연성도가 우수한 콘크리트 충전 강교각의 지진응답 수정계수를 제시하기 위해, 강교각과 콘크리트 충전 강교각에 대한 준 정적 실험에서 구한 연성도를 정량적으로 산정하고, 지진시의 동적 거동과 이력 감쇠를 검증하기 위해서 실제 고베 지진을 입력 데이터로 하는 유사 동적 실험을 수행한다. 실험에 의해 정량화된 수치결과를 통해, 연성도에 의한 지진응답 수정계수법에서의 비교와 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 및 실험 결과

실험시 수직 하중 재하는 50톤 가진기 2개로 하였고, 교각이 받치고 있는 상부 구조의 하중을 묘사하기 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. RC교각인 원형 구조물을 그림 1(a), (b) 처럼 1/4 축소하고, 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, CSP 등 8개의 시편은 모두 SS400 강판으로 제작되었으며, 사용된 강판의 항복 강도는 303 MPa 이다. 내부 콘크리트의 압축 강도는 CSP 시편의 경우 39.6 MPa, 36.1 MPa, 30.2 MPa 이다. 모든 강재 시편은 동일한 치수와 상세로 제작하였다.

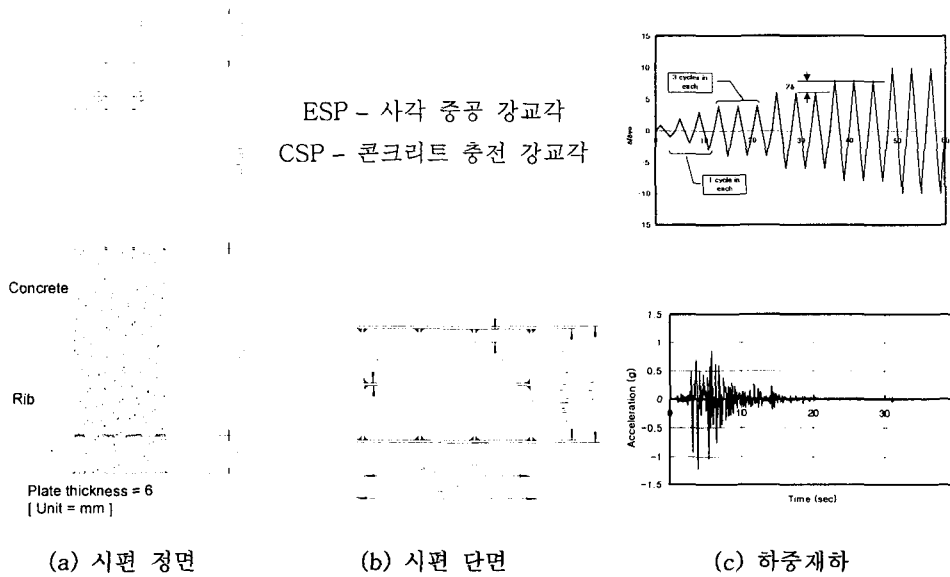


그림 1. 시편 제작 치수 및 하중재하

준 정적 반복 하중 재하 실험은, 그림 1 (c)의 위 그림처럼 단계에 따라 재하하는 변위는 초기의 3단계는 하중의 반복이 없고 이 후 단계는 3번의 반복 재하를 하고 있다. 유사동적 실험에서 교각은 식 (1)처럼 1 자유도 시스템의 운동방정식으로 묘사한다.

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

M 은 구조계의 질량이고, R_m 은 구조계의 복원력이고, \ddot{x}_0 는 지반 가속도이다. 일반 동적 운동방정식과 특이한 점은, 변위 제어로 인해 각 단계에서 측정된 복원력 R_m 은 다음 단계의 변위계산에 사용되는 것이다. 이는 재료의 비선형성을 정확하게 전달할 수 있는 장점이 있지만 측정오차는 계속 누적된다는 단점이 있다. 사용된 지진 기록은 1995년에 발생한 일본 고베 지진기록 이다.

준 정적 실험에 대한 각 시편의 이력 곡선과 포락곡선을 그림 2,3 에서 볼 수 있다. 이력곡선과 포락곡선에서 X축은 변위와 계산된 항복변위의 비로 무차원 항으로써 나타냈고, Y축은 각 단계의 하중과 계산된 항복하중의 비로 역시 무차원 항으로 표현하였다. 콘크리트 충전 강교각은 수평방향 변위가 120 mm에 도달할 때까지 상당히 안정적인 모습을 보여준 반면 강교각은 수평 방향변위가 50mm를 초과하면서 급속히 복원력이 감소하는 불안정한 모습을 보여준다. CSP 시편의 이력곡선을 보면 복원력의 감소가 수평 방향 변위 120mm근처에서 발생하고 있음을 알 수 있다.

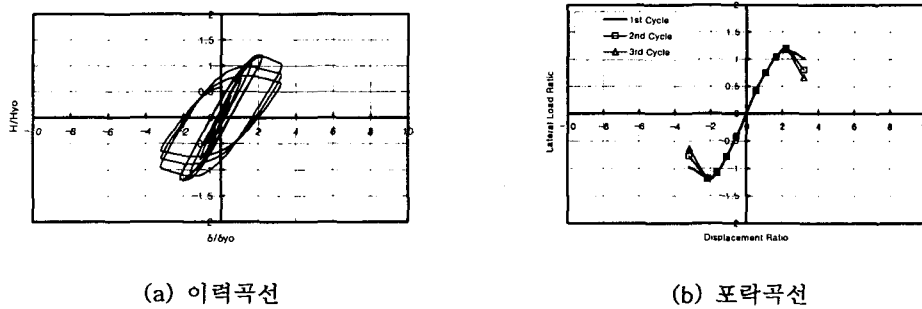


그림 2. 강교각 (ESP)

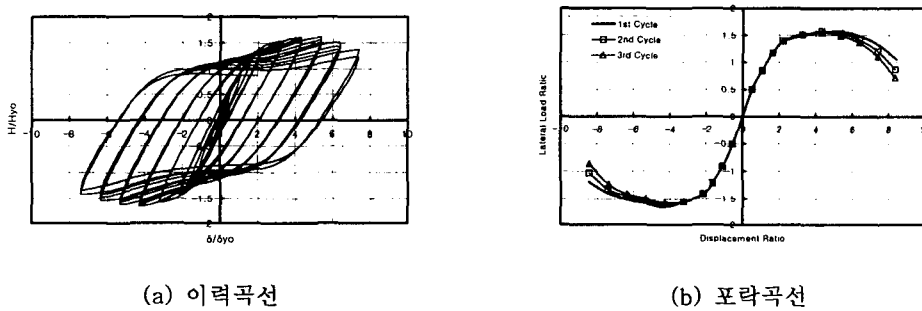
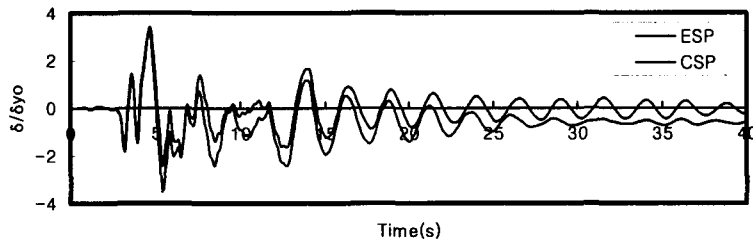


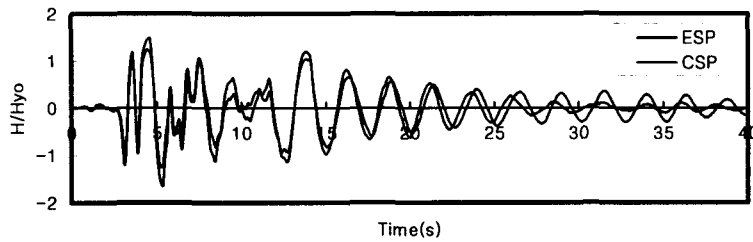
그림 3. 콘크리트 충전 강교각 (CSP)

유사동적 실험에서, 강교각인 ESP 시편의 경우 시간 영역의 5초 경과 정도에서 좌굴 형상을 육안으로 관찰하였다. 이는 유사동적 실험의 변위 응답과 준 정적 실험의 포락곡선의 비교에서도 알 수 있다. 강교각은 극한 변위비인 2를 초과하는 응답을 보인 반면, 콘크리트 충전 강교각인 CSP

는 시간 영역의 5초 경과 정도에서 극한 변위비 5에 못 미치고 있음을 확인 할 수 있다. 즉, 고베 지진하중에 대한 변위 응답 및 복원력 응답의 결과를 보면, 강교각의 최대응답은 이미 포락곡선의 극한점(약 2,1.2)을 초과하고 있으나 콘크리트 충전 강교각인 CSP의 최대응답은 포락곡선의 극한점(약 5,1.6)을 초과하지 않고 있다. 그림4은 강교각과 콘크리트 충전 강 교각의 변위 응답과 복원력 응답의 비교를 나타낸 것이다.



(a) 변위 응답



(b) 복원력응답

그림 4. 각 시편의 변위 응답 및 복원력 응답 비교

시간 영역에서의 변위 응답을 보면, 후반부 응답에서 콘크리트 충전 강교각의 진폭은 강교각의 진폭에 비해 작다. 이는 콘크리트 충전 강교각의 이력감쇠가 강교각의 이력감쇠에 비해 크기 때문이며, 이것으로 콘크리트 충전 강교각은 강교각에 비해 지진 거동 시 보다 효율적이라는 것을 알 수 있다. 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, 구조물

의 성능에 따라서도 역시 마찬가지이다. 지진하중을 결정하는 지진응답 수정계수법과 성능 기초 설계법의 고찰을 통해 지진 하중에 대한 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 내진 성능을 정량적으로 평가한다. 지진응답 수정계수법은 탄성해석법에 의해서 계산된 지진응답을 계수로 나누어서 비탄성 거동을 하는 구조물에서 발생할 수 있는 지진력의 크기를 결정하는 방법이다. 최대 하중 이후 95% 하중에 대응하는 변위(δ_{95})와 항복 변위(δ_y)의 비로서 나타내는 연성도(μ_{95})는 최대 하중 발생시의 변위(δ_m)와 항복 변위(δ_y)의 비인 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, 지진응답 수정계수는 가속도 민감 영역에서 산정되어 표1에 정리하였다.

표 1. 지진 응답 수정 계수

	μ_m	R_y	μ_{95}	R_y	비고
ESP	3.44	2.42	4.27	2.75	가속도 민감 영역에서 산출 $R_y = \sqrt{2\mu - 1}$
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	

콘크리트 충전 강교각의 지진응답 수정계수는 강교각의 1.9~2.4배에 이르고 있다. 시방서에 따르면 강교각의 지진응답 수정계수는 3.0으로 사용하고 있다. 따라서 지진응답 수정계수법의 관점에서, 콘크리트 충전 강교각의 내진 설계시 연성도 요구치는 6.0, 지진응답 수정계수는 6을 사용하는 것을 제안하는 것이 가능하다. 이의 검증을 위해 성능에 기초한 설계 개념을 도입하여 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 성능을 비교, 평가한다.

실험에서 구한 성능곡선으로부터 감소된 스펙트럼을 구하기 위한 예제를 위하여, 지진하중의 크기를 상세하게 나눈 UBC 시방서에 따라 지진종류나 부지 종류 등의 조건을 동일하게 하고 가속도 크기만을 변화($Z=0.15, 0.4$)시켜 지진계수를($C_A=0.22, 0.44, C_v=0.32, 0.64$) 산정한다. 각각의 요구 스펙트럼을 보인 그림 5에서, 콘크리트 충전 강교각에 대한 강교각의 최대 스펙트럼 가속도 비는 1.461이다. 이 값은 가속도 민감 영역에서 콘크리트 충전 강교각의 최대 스펙트럼 가속도를

강교각의 최대 스펙트럼 가속도로 감소시켰을 때의 지진응답 수정계수이다. 이를 속도와 변위 민감영역에서의 지진응답 수정 계수로 환산하면 1.567의 값을 갖는다. 이는 강교각의 지진응답 수정계수의 절대값과는 관계없이 콘크리트 충전 강교각과 강교각의 상대비교에 따라 평가한 것이다. 따라서 지진응답 수정계수도 1.5배의 차이를 가져야 하는 것이 타당하겠다. 표2는 강교각과 콘크리트 충전 강교각에 적용된 스펙트럼 비를 산정하여 환산한 지진응답 수정계수를 정리한 것이다.

결론적으로, 두 방법에서 각 시편의 비교로부터, 콘크리트충전 강교각의 지진응답 수정계수는 강교각의 1.5배를 사용하는 것이 타당하겠다. 이에 따라 강교각의 지진응답 수정계수가 3일때, 콘크리트 충전 강교각의 지진응답 수정계수는 4.5를 사용하는 것이 적절하다. 지진응답 수정계수의 근거가 되는 연성도의 비교결과와 성능 기초 설계법에서 정해진 강교각과 콘크리트 충전 강교각의 요구 스펙트럼의 비교 결과로부터, 콘크리트 충전 강교각의 지진응답 수정계수 4.5를 제시한다

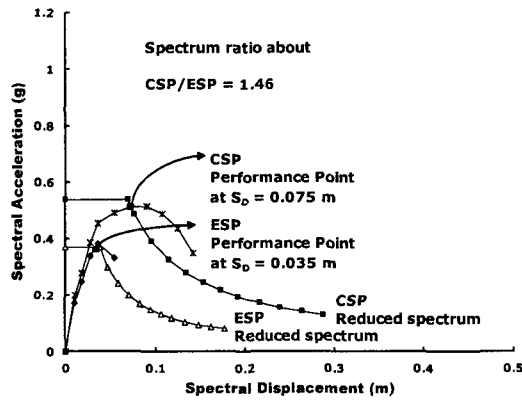


그림 5. 요구 스펙트럼 비교

표 2. 지진 응답 수정 계수 비교

	강교각	충전 강교각	비 고
최대 스펙트럼 가속도.	0.367	0.537	
비		1.461	
환산 R.M.F.		1.567	$R = \sqrt{2\mu - 1}$
제안 R.M.F.	3	4.5	

5. 결론

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, 유사동적 실험에서는 강교각에 비해 큰 이력감쇠를 확인하였다. 성능 기초 설계법에서 비교한 강교각에 대한 콘크리트 충전 강교각의 환산 지진응답 수정계수는 1.5배의 값을 보였다. 실험 결과를 근거로 지진응답 수정계수법과 성능기초 설계법으로 콘크리트 충전 강교각의 내진성능을 평가하였으며, 콘크리트의 충전 강교각의 지진응답 수정계수는 강교각 값의 1.5배의 값 즉 4.5로 사용하는 것을 제안하였다.

REFERENCES

1. K. Nakanishi, T. Kitada, 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.
2. T. Usami, H. B. Ge., "Cyclic behavior of thin-walled steel structures-Numerical analysis", *Thin-walled structures*, No.32, 1998, pp.41-80.
3. 권 영봉외, "콘크리트 충전 합성 기둥의 거동에 관한 실험적 연구", 대한 토목학회, 2000, pp.107-114.
4. ATC-40, *Seismic evaluation and retrofit of concrete building*, Engineering Structures, 1996, 14-7pp.