

박스형 강합성 교각의 내진 성능 평가를 위한 실험적 연구

An Experimental Study on the Seismic Behavior of Box Type Concrete-Filled Steel Piers

서진환*
Seo, Jinhwan

조창빈**
Joh, Changbin

장승필***
Chang, Sung-Pil

ABSTRACT

The steel piers and the concrete-filled steel piers, in spite of reasonable strength, high ductility, small section, and fast construction, have not been considered as the alternatives to the RC piers even in the highly populated urban area where aseismic safety, limited space and fast construction are indispensably required. In this paper, a steel pier and 4 box type concrete-filled steel piers were tested with the quasi-static cyclic loading to estimate the ductility and the strength. Additional devices such as base rib, turn-buckle, and anchor bolted added at the to increase the ductility with minimum additional cost. The result showed that the concrete filled-in steel piers had higher energy absorbtion and strength than steel piers had, but also showed that slight overlooking in the design and fabrication could lead to the abrupt fracture just after small local buckling at the bottom.

1. 서론

교량 구조물은 사하중의 대부분을 차지하는 교량의 상부구조와 그것을 지지하고 있는 하부구조인 교각으로 나뉘게 되고, 지진시의 교량의 거동은 지진 가속도에 의한 상부구조의 관성력과 그것을 지지하고 있는 교각에 결정된다고 볼 수 있다. 이에 따라, 교각의 내진 성능, 즉 교각의 강도와 연성도 특성은 교량 구조물의 내진 성능에 직접적으로 연관된다고 말할 수 있다.

교각의 형태는 크게 강교각, 콘크리트 교각, 및 합성형식의 교각으로 나뉘어 질 수 있다. 강교각의 경우 비용면에서는 콘크리트 교각에 비해 상대적으로 고가이나 강성 및 연성도가 우수하며 교각 자체의 무게가 가볍고, 건설기간이 짧다는 장점이 있다. 콘크리트 교각은 경제성은 뛰어나지만 교각 자중이 많이 나가고, 시공속도가 느린 단점이 있다. 반면에 합성교각의 한 형태인 콘크리트 충전강교각(이하 '강합성 교각')의 경우 합성효과로 인해 단면이 작아지고, 외측 강판이 콘크리트의 영구거푸집 역할을 해주어 시공 속도가 빠르고, 그 강도와 연성도 특성이 강교각 이나 콘크리트 교각보다 월등히 우수하다. 이에 따라 뛰어난 내진성, 제한된 공간 및 건설기간이 요구되는 도심내의 교각과 같은 곳에 강합성 교각을 적용하기 위한 연구가 일본을 중심으로 진행되고 있다.

이 논문에서는 현재까지 축적된 강합성 교각에 대한 연구결과를 기초로 하여 강교각 및 강합성 교각의 강도 및 연성도 실험적으로 검증하고 또한 최소한의 비용으로 연성도를 증가 시킬 수 있는 보강재를 고안하여 그 성능에 대해서 실험적 검증을 시도해 보고자 한다.

* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 학생회원

** 포항산업과학연구원, 강구조연구소, 정회원

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

2. 강합성 교각과 내진성능

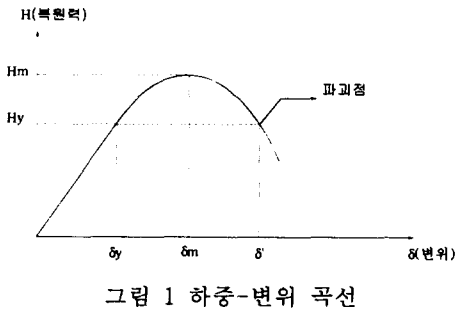
2.1 강합성 교각

일반적으로 강교각은 극한 하중에 비해서 재하하중이 작고, 교각을 구성하는 판의 두께에 비해서 크기 때문에 지진 시 국부좌굴에 취약한 면이 있다. 이 같은 단점을 보완하기 위해 강교각의 내부에 콘크리트를 충전하여 교각의 좌굴모드를 바꾸어 줌으로써 단면을 증가시키지 않고 내하력과 연성의 증가하는 도모할 수 있는 강합성교각이 고안되었다. 1980년대 후반과 1990년대를 거치면서 강진지역에 속한 일본을 중심으로 강합성 교각에 대한 연구가 활발히 진행되어, 강합성교각의 준정적 실험(quasi-static test) 통해서 강합성 교각의 강도와 연성도 특성에 영향을 미치는 변수들이 대부분 밝혀졌고, 강합성교각의 성능을 개선시키고자하는 노력 또한 지속적으로 이루어져 왔다(Kitada, 1998 and Usami, 1994, 1996). 이들의 연구결과를 검토해 보면, 콘크리트는 교각 높이의 1/2이상 충전시키고, 충전 콘크리트 상·하면은 강고한 격벽판(Diaphragm)으로 구속시켜 주는 것이 강도와 연성도 측면에서 우수한 양식으로 제안되고 있다.

2.2 내진성능방법

내진성능에서 중요한 기준은 연성도와 에너지 소산능력이다. 이 논문에서는 연성도와 에너지 소산능력을 평가하기 위해 다음의 방법을 이용하였다.

2.2.1 μ_m 을 이용한 연성도 평가



μ_m 은 최대 복원력이 생길 때의 변위(δ_m)와 항복시의 변위의 비(ratio)이다. 이 방법의 경우 개념적으로는 명료하지만 하중-변위관계가 완전히 반영되지 않는다는 단점이 있다.

$$\mu_m = \frac{\delta_m}{\delta_y} \quad (1)$$

2.2.2 μ 변수를 이용하는 방법

μ 변수는 부재가 파괴될 때(δ')의 소산된 에너지와 등가의 에너지를 가지는 elastic-perfect plastic model을 상정하고 그 때의 최대 변위(δ_u)와 항복시의 변위(δ_y)의 비로 연성도를 평가한다.

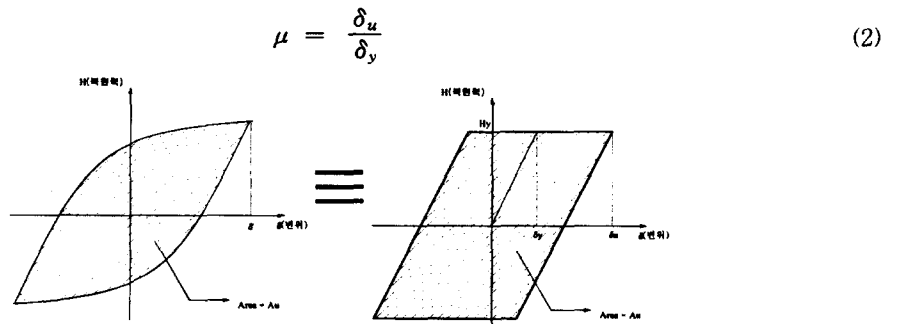


그림 2 δ_u 의 정의

2.2.3 에너지 소산능력 평가

에너지 소산은 최대복원력 이후의 이력상에서 소산되는 에너지를 항복 시 소산되는 에너지로 나눈 무차원 변수(\hat{E})를 이용하여 산정 하였다. 이 무차원 변수는 다음과 같은 식으로 정의한다. 위의 식 (3)에서 n 은 최대 복원력에서 복원력이 H_y 로 감소할 때(파괴시점,그림 1 참조) 까지의 반복된 사이클의 횟수이다.

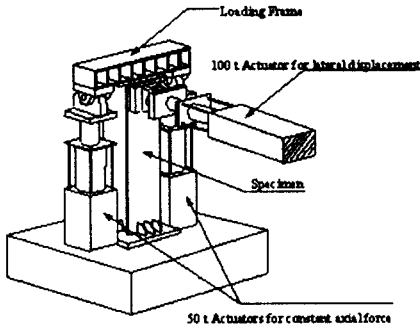
$$\hat{E} = \frac{1}{E_e} \sum_{i=1}^n E_i \quad (3)$$

$$E_e = \frac{1}{2} H_y \delta_y \quad (4)$$

3. 강합성 교각의 반복 재하실험

3.1 실험개요

강합성교각의 준정적 실험을 하기 위한 실험장치는 그림 3과 같다. 부재 양측의 기진기(25 ton actuator × 2 EA)로 강재의 완전소성하중의 20 %에 해당하는 축방향 압축력을 일정하게 유지시키고, 부재 상단의 기진기(100 ton actuator × 1 EA)로 횡방향 변위를 재하한다. 그 변위 재하 단계는 그림 3와 같다. 횡방향 변위는 지진하중을 모사하기 위해 진폭당 3 사이클씩 반복재하한다.



변위재하순서

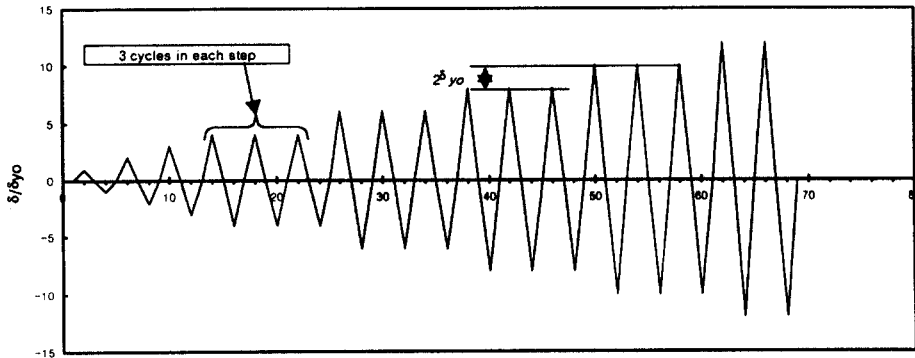


그림 3 실험셋업 및 변위 재하 사이클

3.2 시험체

시험하게될 시편은 총 5개로 이중 2개는 강교각과 50% 콘크리트가 충전된 강합성교각이고, 나머지 3개는 연성도 증가를 위해 각기 다른 종류의 보조 보강재가 설치된 시험체이다. 강재는 SS400이고, 채움 콘크리트는 배합강도 400 kg/cm²(실제강도 393.75 kg/cm²), 최대 골재 치수 25 mm, 슬럼프 12 cm 의 콘크리트를 사용하였다.

시험체 이름	C0-OO	C5-OO	C5-AB	C5-BR	C5-TB	합 계
개 수	1	1	1	1	1	5

그림 4 시험체 이름과 형상

실험 변수인 보조보강재는 플랜지 플레이트의 국부좌굴을 방지하여 연성도를 향상시키는데 그 목적이 있다. 베이스리브(C5BR)는 강판의 좌굴길이를 변화시키고 좌굴모드를 변화시켜 파괴를 지연 시키는 효과를 기대하고 설치하였고 턴버클과 앵커볼트의 경우도 마찬가지로 강판의 단면 외측으로 일어나는 좌굴을 방지해 줌으로써 연성도에 긍정적인 변화를 기대하고 설치하였다.

4. 실험결과

4.1 파괴모드

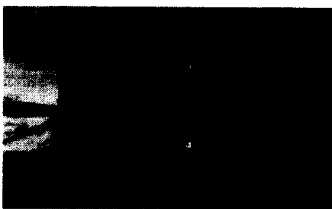


그림 5 C000의 파괴형상

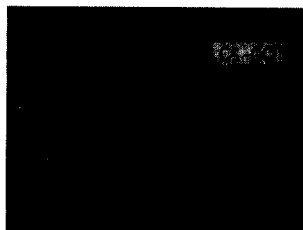


그림 6 C500의 파괴모드

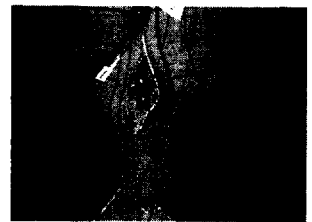


그림 7 C5BR의 파괴모드

그림 5는 콘크리트 충전이 없는 강교각(C000)의 국부좌굴에 의한 파괴모드를 보여주고 있다. 이는 내부 채움이 없는 강교각의 전형적인 파괴형상으로 단면 내측으로 발생한 국부 좌굴로 인해 내하력을 완전히 상실했음을 알 수 있다. 그림 6은 합성 교각의 파괴모드를 보여주고 있다. 강교각 시험체(C000)의 경우 예상되었던 파괴모드와 정확히 일치하였으나, 강합성 교각(C500)의 파

피는 약간 다른 양상으로 진전되었다. 초기변위(0 mm~80 mm)에는 단면 외측 방향으로 국부좌굴 현상이 일어나는 듯 했으나, 하단 리브 부근의 강판이 찢어짐으로 인해서 복원력을 상실하여 부재가 파괴에 도달하였다. 그림 6에서도 확인할 수 있듯이 등골게 도장면이 일어난 부분이 국부좌굴이 일어났던 흔적이다. 이때 국부좌굴과 동시에 하단 양측 리브 상단 모서리 부근에 균열이 전파되어 다음 사이클에서 판단이 발생하여 파괴되었다. 이러한 파괴모드는 강합성 시험체 중 C5BR 부재만 제외하고 모두 공통적인 현상이다. C5BR부재의 경우, 하단에 위치한 짧은 세로보강재로 인해서 좌굴이 하단에서 약 200 mm 떨어진 지점에서 발생하였다(그림 7).

이와 같은 파괴모드가 발생한 이유는 다음과 같이 추정하고 있다. 그림 8(a)와 같이 횡하중시 최대 모멘트가 발생하는 곳의 채움 콘크리트의 단면이 하부 다이아프램 단면이 줄고 다이어프램과 상하면의 콘크리트가 기계적인 장치 없이 매우 약하게 부착되어 있다. 이에 따라, 비교적 초기 소성변위 근처에서 그림 8(b)와 같이 부착이 분리되고 균열이 발생하게 될 가능성이 매우 높다. 이렇게 되면 추가 반복 재하시 채움 콘크리트가 분리된 부분의 강재에 변형이 집중하게 되나 변형을 부담할 영역이 매우 제한적임으로 이 부근의 변형율이 국부적으로 매우 크게 되고(그림 8c, 그림 6), 또 반복재하에 의한 초기변형이나 제작상의 오차로 인한 결함에 의해 파괴인성이 감소한 이 부근의 강재가 추가적인 변형을 견디지 못하고 파단에 이르게 된 것으로 추정하고 있다. 반면, 강교각의 경우 교각하부에 국부좌굴이 발생하여도 그 좌굴이 일어난 길이가 길고 그림 5에서 보듯이 폭이 넓어 이 부근의 강재의 변형률은 강합성의 경우에 비해 상대적으로 작아 파단에 까지 이르지 않았다고 추정된다.

특기할 점은 시험체의 제작과정에서 완전고정의 경계조건을 위해 외측 리브와 하부의 다이어프램의 높이를 정확히 일치하도록 하였는데 이때 외측 리브 선단부의 돌림용접에 의해 용접의 선단부(Weld Toe의 끝부근)가 하부의 다이어프램의 높이보다 높아 결과적으로 주변의 다른 프랜지의 하부 다이어프램과 만나는 지점보다 약간 올라오게 되었다. 이 부근은 열영향부(Heat Affected Zone)여서 변형에 상대적으로 취약하게 되는데, 강합성교각의 프랜지가 반복하중을 받을 때 기하학적인 불연속 때문에 인장과 압축변형이 반복적으로 집중되게 되고, 대개의 경우 균열이 시작하는 지점이 되는 것으로 관찰되었다. 이와 같은 점이 위에서 추정한 파괴모드를 촉진시킨 것으로 판단된다.

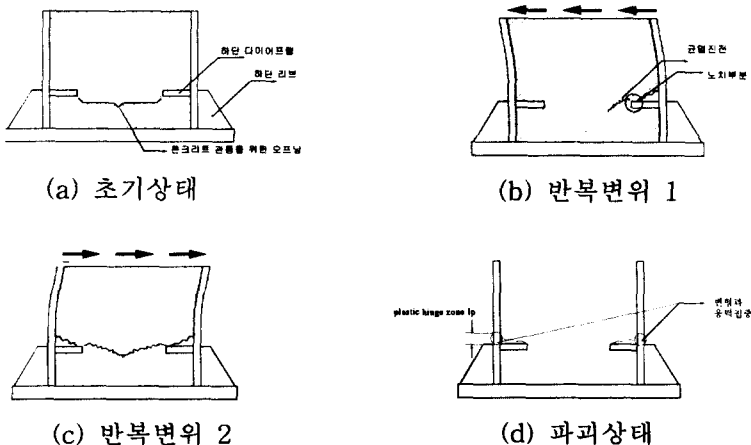


그림 8 강합성교각의 파괴 메커니즘

4.2 이력곡선 및 내진성능 평가

다음의 그래프는 각 시험체들의 이력 곡선을 보여주고 있다. 가로축은 교각 상단의 횡방향 변위

(범위 ± 150 mm)이고, 세로축은 복원력(범위 ± 400 kN)을 나타낸다.

그림 9(a)~(e)의 이력곡선에서 각 사이클의 최대 복원력 값을 이용하여 하중-변위 관계 그래프를 그려보면 그림 9(f)와 같다. 강합성 교각의 경우에 강교각의 비해서 최대복원력은 약 1.5배 수준이었으나, 최대강성 이후의 거동(post-peak behavior)은 베이스리부가 있는 C5BR 시험체를 제외하고는 앞서 설명한 초기 소성변위에서 채움 콘크리트와 하부다이아프램의 분리에 따르는 변형률집중과 반복재하에 의한 결함의 결함으로 하단부 강재의 찢어짐 현상에 의해서 취성적인 파괴양상을 나타내었다.

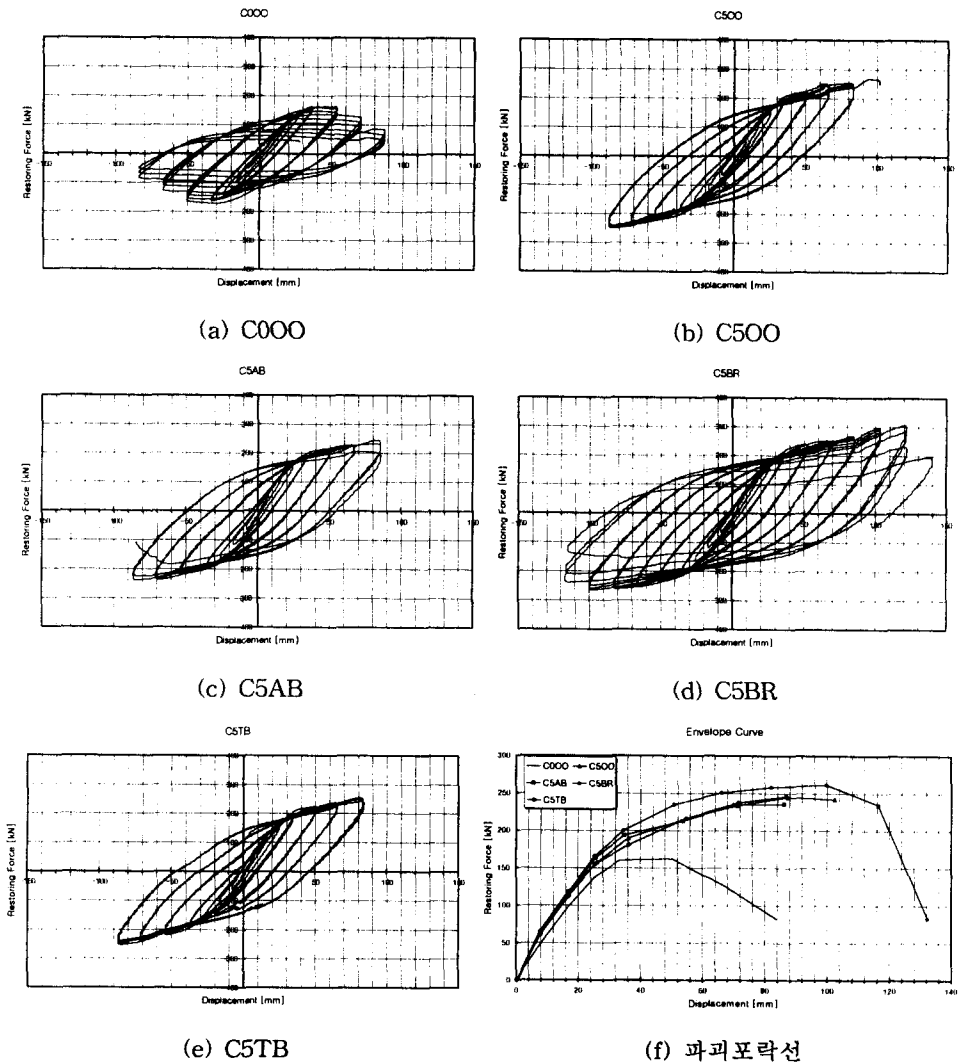


그림 9 각 부재별 이력 곡선 및 파괴포락선

표1에서는 2절에서 제시한 연성도 변수 및 에너지 소산 변수를 각 부재 별로 정리한 것이다. μ_m 변수의 경우 최대 복원력의 결정이 모든 실험 결과에서 가능하기 때문에 실험 결과에서 계산하는 것은 어렵지 않았으나 다른 연성도 변수(μ)와 에너지 소산 변수(\bar{E})는 실험에서 부재의 복원력이 H_y 로 감소하는 점(파괴점)의 정의가 현실적으로 불가능한 실험 부재에 대해서는 평가를 하지 못하였다.

실험 결과에서 연성도는 콘크리트를 충전한 합성 모델이 일반 강교각 보다 약 2배정도 크다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 그림 9(f)와 비교해 보면, 이는 이력곡선상의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있음을 알 수 있다. 에너지 소산측면에서는 최대하중이후의 거동의 영향이 뚜렷이 나타났다고 생각된다. 또한, 연성도 변수에서 2배 정도의 차이가 에너지 소산 측면에서는 1.3 배정도로 줄어들었는데 이는 최대하중 이후의 거동이 강합성 교각의 경우가 상대적으로 취성임이기 때문에 나타난 현상이다. 그러나 이번 연구에서 수행한 실험이 예상했던 좌굴위치에서 원하는 파괴모드가 발생하지 않음으로 인해 정확한 연성도와 보조보강재의 효과에 대한 평가가 하기에는 어려움이 있다.

	μ_m	μ	\hat{E}
C000	3.33	4.93	34.65
C500	5.76	-	11.51
C5AB	5.69	-	-
C5BR	6.59	10.34	43.98
C5TB	5.73	-	-

표 1 연성도 및 에너지 소산

5. 결론

이 연구에서는 강교각과 강합성교각의 연성도와 횡방향 강도를 준정적 반복재하 실험을 통해서 평가해 보았다. 또한 최소의 비용으로 기존의 강합성교각의 내진성능을 개선시키기 위해, 베이스리브, 턴버클, 및 앵커볼트를 추가하여 제작한 강합성교각의 내진성능을 평가하여 보았다.

강교각의 경우 교각하부의 국부좌굴로 인해서 파괴되었고 내진성능을 나타내는 강도와 연성도에서 우수한 결과를 보여주었다. 베이스리브가 장치된 강합성교각의 경우 강교각에 비해서 연성도 변수에서는 2배, 에너지 소산에서는 1.3배의 성능을 보여주었다. 그러나 다른 연구자들의 결과에서 예측되었던 교각하부 강재의 외측 국부좌굴로 인한 비교적 안정적인 파괴모드는 베이스리브를 장착한 시험체에서 볼 수 있었지만 그 외의 강합성교각 시험체에서는 국부좌굴의 초기 모습이 교각하부에 발생하였으나 추가적인 반복변위에 좀 더 발전하지 못하고 외측 리브와 교각의 플랜지가 만나는 곳에서 균열이 발생하여 강재가 파단 되었다. 파괴모드는 연성적이라기 보다는 급격한 양상을 보였다. 이에 따라 국부좌굴의 발생과 추가적인 반복 변위시 파단 없이 국부좌굴이 점점 확대될 것을 염두에 두고 설치한 보조보강재의 효과는 검증하기 어려웠다.

이러한 파괴모드는 시험체에 최대 모멘트가 발생하는 지점의 내부의 콘크리트와 하부의 다이어프램이 초기에 서로 분리되고 균열이 발생하고, 이에 따라 이 부근에 강재의 변형률이 집중해서 발생한 것으로 추정된다. 또한, 이 지점의 외측 리브 선단의 용접부의 기하학적인 불연속으로 인한 응력의 집중은 이와 같은 파괴모드를 촉진시킨 것으로 판단된다. 그러므로, 제작 및 설계시의 작은 착오, 특히, 응력 집중부의 기하학적인 불연속과 변형능력을 제한하는 설계나 시공은 예상치 못한 파괴모드를 발생시킬 수도 있으므로 세심한 주의가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

연구에 사용된 시험체를 제작하는데 도움을 준 동아건설 관계자 여러분과 실험을 수행한 현대건

설기술연구소의 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Kitada, T.(1998), Ultimate Strength and Ductility of State-Of-Art Concrete-Filled Steel Bridge Piers in Japan, Engineering Structures, v20, n4-6, pp. 347-354
2. Ge, H. and Usami, T. (1996), Cyclic tests of Concrete-Filled Steel Box Columns, Journal Of Structural Engineering, ASCE, v122, n10, pp. 1169-1177
3. Usami, T. and Ge, H. (1994), Ductility of Concrete Filled Steel Box Columns Under Cyclic Loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, v120, n7, pp2021-2039