

# 보조보강재가 있는 콘크리트 충전 강교각의 내진성능 평가

## Seismic Evaluation of Concrete-Filled Steel Piers with Secondary Reinforcement

박병기\*  
Park, Byoung-Ki

조창빈\*\*  
Joh, Changbin

장승필\*\*\*  
Chang, Sung-Pil

### ABSTRACT

Strength and ductility are major factors in the aseismic design of a bridge pier. In spite of good performance in both, steel piers have not been used widely due to high cost. But with the filled-in concrete, the steel pier have advantages compare to the steel pier only such as improved strength, ductility, fast construction, small section, and reasonable cost. In this paper, concrete-filled steel piers are tested using quasi-static cyclic lateral load with constant axial load to evaluate the performance. The secondary reinforcement devices such as bolts, corner plate, and turn buckle are used inside of the piers to improve the ductility with minimum additional cost. Test results shows filled-in concrete and secondary reinforcement devices increase the strength and the ductility of the steel pier.

### 1.서론

지진시의 교량의 거동은 자중의 대부분을 차지하는 교량의 상부구조가 지진의 가속도에 의해서 하중으로 작용하고 하부 구조인 교각이 이 하중에 따라서 진동하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 교각의 내진성능을 결정하는 중요한 요소인 강성과 연성은 교량의 거동을 결정 짓는 가장 중요한 요인들이라고 할 수 있다.

교각은 강교각, 콘크리트 교각 및 두 재료의 장점을 활용한 합성교각으로 크게 구분할 수 있다. 강교각은 가격은 상대적으로 고가이나 강성 및 연성이 우수하며 교각 자체의 무게가 가볍고 건설기간이 짧다는 장점이 있으며 콘크리트 교각의 경우 비교적 연성이 적고 건설기간이 길지만 경제적인 장점이 있다. 합성 교각의 경우 강성, 연성 및 신속한 건설이라는 두 교각의 장점을 모두 가지고 있다. 이러한 장점들로 인해 도시내의 교량의 경우 그 필요성이 점차 증대되고 있다.

합성교각의 일종인 콘크리트 충전 강교각(이하 충전 강교각)의 연구도 이와 같은 장점을 활용하고자 활발히 진행되어 왔다. 특히 일본의 경우 강진지역이라는 지역적 특성으로 인하여 내진성능이 우수한 충전 강교각에 대한 상당한 연구가 축적되어 설계지침에 반영되고 있다(Kitada, 1998).

이 논문에서는 현재까지의 국내외의 연구성과를 반영한 충전 강교각과 이들의 파괴형상을 고려해서 고안한 볼트, 코너플레이트(Corner Plate) 및 턴버클(Turn Buckle) 같은 보조보강재를 사용한 충전 강교각의 내진성능을 실험적으로 비교한다.

\* 석산엔지니어링, 학생회원

\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 조빙조교수, 정회원

\*\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

## 2. 콘크리트 충전 강교각 (Concrete-Filled Steel Pier) 및 연성도

### 2.1 콘크리트 충전 강교각

강교각은 일반적으로 극한내하력에 비해 재하하중이 작고 교각을 구성하는 판의 두께에 비해 폭이 큰 특징을 가지고 있다. 이러한 특징 때문에 지진시 국부좌굴에 취약한 면을 가지게 된다. 이에 대한 보강으로 강교각내에 콘크리트를 채운 충전 강교각이 내진설계에 효과적인 구조형식으로 대두되었다. 충전 강교각은 충전 콘크리트의 내하력과 강판의 국부좌굴 방지 효과로 인해 단면의 증가 없이 내하력이 증가되고 기존 콘크리트교각에 비해서 사하중이 현저히 작으며 연성 즉 소성변형능력이 월등히 우수하다.

강교각 및 충전 강교각의 내진설계에 관한 연구는 지진 다발지역인 일본에서 활발히 진행되어 왔다. 1980년대와 90년대, Nakai, Kitaka, Yoshikawa 및 Usami 등에 의해 강교각 및 충전 강교각에 대한 폭 넓고 다양한 연구 및 실험이 수행되었다(Usami and Ge, 1994; Ge and Usami, 1996; Kitaka, 1988). 이들의 연구는 주로 준정적실험(Quasi-Static Test)를 이용하여 적절한 강성 및 연성을 확보할 수 있는 강교각 및 충전 강교각을 설계하는 방법과 기존의 강교각을 적절히 보강하는 방법을 개발하는 것이었다. 주요한 설계변수로는 폭-두께비, 다이아프램의 유무, 보강재(Stiffener)의 사용, 콘크리트 충전유무 및 충전길이 등이다. 이 들의 결과를 종합하면 합리적인 충전 강교각의 형식은 종방향 보강재와 횡방향 다이아프램이 있으며 교각의 하부에 콘크리트가 1/2이상 충전되어 있는 양식이다.

### 2.2 연성도

횡방향 반복재하 실험의 결과로부터 연성도를 평가하는 방법은 여러 가지로 정의할 수 있으나 강교각 및 충전 강교각에서 사용되는 다음 두 가지 방법을 사용하였다. 먼저 그림 1에서와 같이 항복시의 변위  $\delta_y$  와 최대하중시의 변위  $\delta_m$ 간의 관계로 정의하는 방법이다. 이 방법은 개념은 명료하지만 하중-변위관계가 완전히 반영되지 않는 단점이 있다.

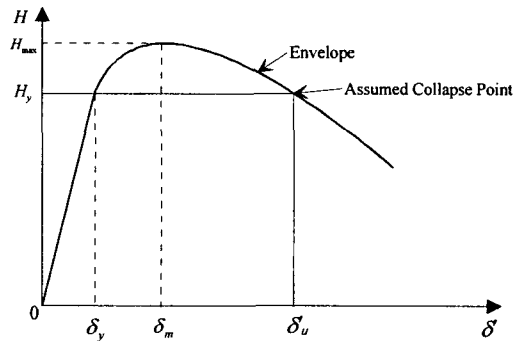


그림 1 P- $\delta$  곡선

이 연성도( $\mu_m$ )를 식으로 나타내면 다음과 같다.

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

두 번째 방법은 그림 1에 나타난 바와 같이, 좌굴 이후 항복하중과 동일한 하중 상태에서의 변

위를 부재의 붕괴점(Assumed Collapse Point)로 가정한다. 이 붕괴점이 실제 부재의 붕괴위치는 아니지만, 시편의 손상 상태를 나타내는 지표로 삼을 수 있다. 이를 이용한 연성 평가는 식(2)와 같다. 이 방법은 이력곡선의 에너지 소산능력을 완벽히 반영하지는 못하는 단점이 있으나 산정이 간편하고 물리적인 의미도 분명하기 때문에 이번 연구의 연성도 평가 지표로 사용하였다.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2)$$

### 3. 콘크리트 충전 강교각의 반복재하실험(Cyclic Load Test of Concrete-Filled Steel Pier)

#### 3.1 실험

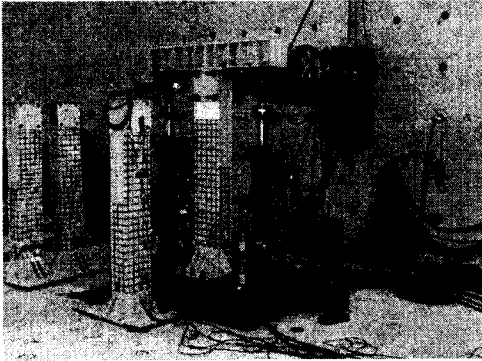


그림 2. 실험장치

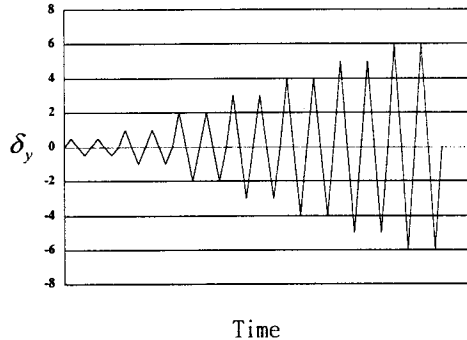


그림 3. 하중 재하 사이클

이 실험은 준정적 시험(Quasi-Static Test)으로 일반적으로 교각 실험에 있어서 문제점으로 지적된 일정한 축방향력을 유지하지 못하는 단점을 개선한 실험장치를 사용하였다. 그림 2에서 알 수 있듯이 교각의 상단부에 H-Beam을 연결하고 H-Beam의 양단에 축방향력을 주는 가력기를 연결하였다. 이 경우에도 수평변위 발생하면 가력기가 동시에 회전하게 되어 축방향력에 변화가 생기지만 최대 변위를  $15\delta_y$  정도로 예상하여 변화량을 산정해보면 0.3% 이하인 것으로 예상이 되므로 횡방향하중 재하시 축방향력은 일정하게 유지되는 장치라고 생각된다. 축방향력은 강재만 있는 경우 단면의 완전소성하중의 10%를 재하하였다. 횡방향력을 가력하기 위해서 15 ton 액추에이터를 설치하였다. 하중 재하 곡선은 그림 3에서 나타내었다. 동일하중에 대한 하중 반복회수는 2번으로 하였는데 이유는 실제 지진시에 같은 방향과 변위가 2번이상 발생할 확률이 매우 낮아서 그 이상 반복하는 것은 실제상황과는 거리가 있다고 판단되기 때문이다.

#### 3.2 시편

이 실험에서 사용된 시편은 5개로 모두 직사각형 단면이다(그림 4, 그림 5, 그림 6). 구체적인 시편의 변수들은 표 1과 표 2에 나타나 있다. 강재는 일반적인 구조용 강재인 SS400을 이용하였고 충전 콘크리트는 강도가  $200 \text{ kg/cm}^2$  인 것을 사용하였다.

특기 할 것은 3개의 충전 강교각의 시편에 볼트, 코너플레이트, 및 턴버클 같은 보조 보강재가 부착된 것이다. 이는 충전 강교각의 파괴거동이 하부에 국부좌굴이 발생하는 것이므로(Usami and Ge, 1994; Ge and Usami, 1996) 최소한의 추가비용이 소요되는 보조 보강재를 사용하여 이를 지연시키거나 좌굴모드를 변화시켜 내진성능을 향상시키기 위함이다.

표 1. 시편의 변수

Specimen	Filled-in Concrete	Stud Bolts	Corner Plate	Turn Buckle
SP0N	X	X	X	X
SP5N	O	X	X	X
SP5S	O	O	X	X
SP5C	O	X	O	X
SP5T	O	X	X	O

먼저 교각 하단의 강판이 충전 콘크리트와 분리되면서 국부좌굴이 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해 앵커(Anchor)역할을 할 수 있는 충분히 긴 볼트나 두 판을 이어주는 강봉인 턴버클을 부착하였다. 또한 기존 실험들의 파괴 양상이 강판의 연결부가 파단되는 것에 착안하여 이 곳에 코너플레이트를 부착하여 이를 지연시켜 교각의 내진성능을 향상시키려 시도하였다.

표 2. 콘크리트 채움 및 단면변수

변수	변수 표시	변수 설명
콘크리트 채움 높이	0	콘크리트 채움 없음
	5	콘크리트 채움 50%
단면 보강 변수	N	보강 없음
	S	Stud Bolt 보강
	C	Corner Plate 보강
	T	Turn Buckle 보강

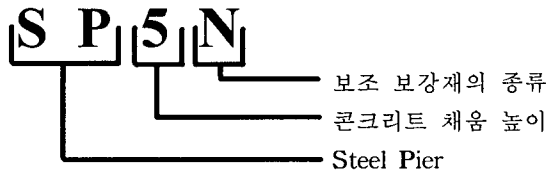


그림 4. 시편의 명명규칙

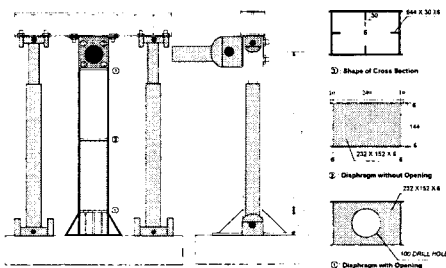


그림 5. 실험체의 전체 형상

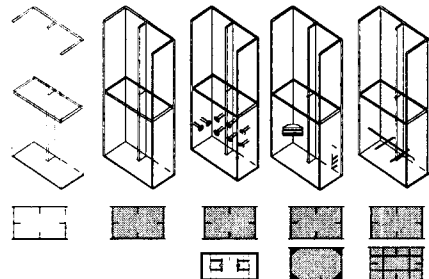


그림 6. 시편 종류

#### 4. 실험결과

##### 4.1 파괴 모드

그림 7(a)는 콘크리트 충전이 없는 모델, 즉 SPON 모델의 재하실험후의 파괴된 모습을 보여주고 있다. 이 파괴 모드는 교각의 하부에서 국부좌굴로 인해서 파괴에 이르는 전형적인 콘크리트 충전이 없는 모델의 경우를 나타낸다. 그 파괴 모드를 단면에 대해 그려보면 그림 7(b)와 같다.

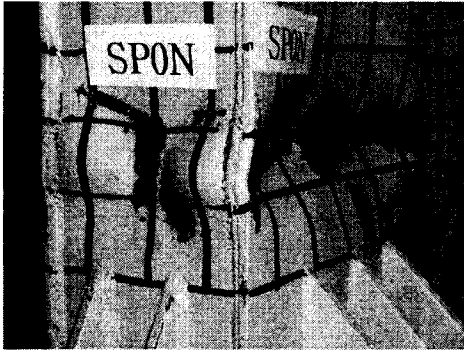


그림 7(a) 비충전 강교각의 파괴모드

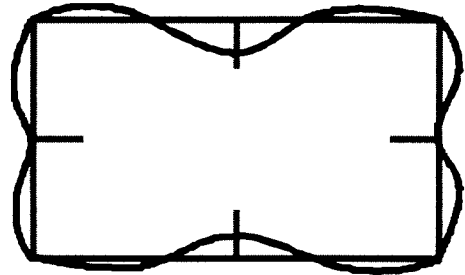


그림 7(b) 파괴모드의 단면

콘크리트 충전 강교각 시편의 경우 그 파괴 모드는 다음의 두가지의 경우로 요약할 수 있다 첫째 파괴 모드인 기대 했던 대로의 국부좌굴에 의한 파괴이다. 이 형상은 그림 8(a)와 같고, 이를 단면 방향에 대해 단순화한 것이 그림은 8(b)이다. 보강재가 고정단처럼 거동하는 것을 볼 수 있다. 또한 충전 콘크리트가 강판이 안쪽으로 좌굴을 일으키는 것을 막아서 국부좌굴 형상이 모두 강교각의 바깥쪽으로 생기는 것을 알 수 있다. 따라서 강도와 연성도가 비충전 강교각에 비해서 증가하게 된다.

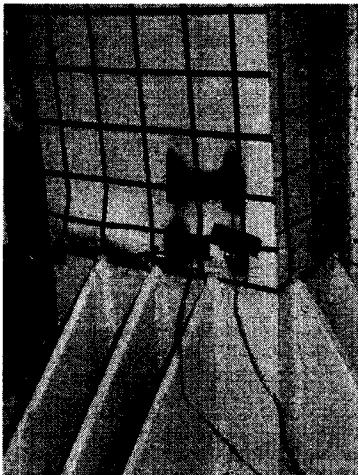


그림 8(a) 충전강교각의 파괴

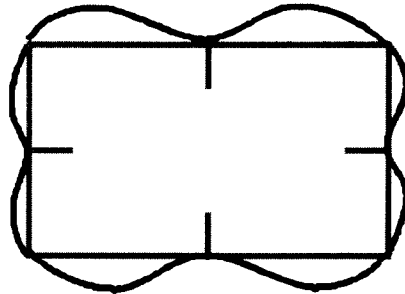


그림 8(b) 파괴모드의 단면

콘크리트 충전이 있는 시편의 또 다른 파괴 모드는 Low Cycle Fatigue의한 파괴로 추정되며, 이에 대한 파괴 형상은 그림 9과 같다. 이는 시편의 하단부의 고정단역할을 하는 리브의 상단부와

다이아프램이 만나는 지점에 용접량이 많아 큰 잔류응력이 있기 때문인 것으로 판단된다. 실제 강교각의 제작시에는 시편과는 크기가 다르므로 시편의 제작과는 다를 것으로 판단되지만 설계시에 용접량의 적절한 분산등을 고려하여 설계하는 것이 필요하다고 판단된다. 아울러 리브의 위치도 중앙에 집중할 것이 아니라 측면에 가능한 한 넓게 배치하여 가능한 한 용접의 집중되는 것을 막아야 한다고 판단된다.

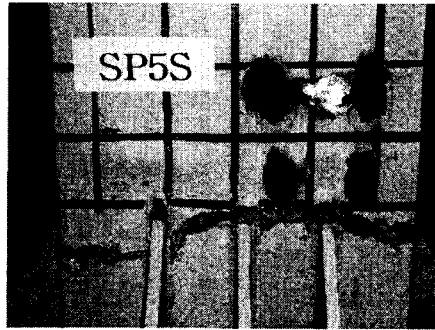
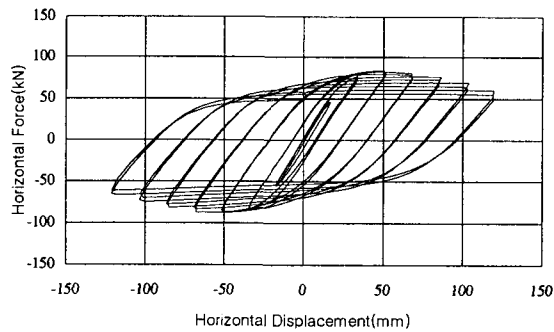


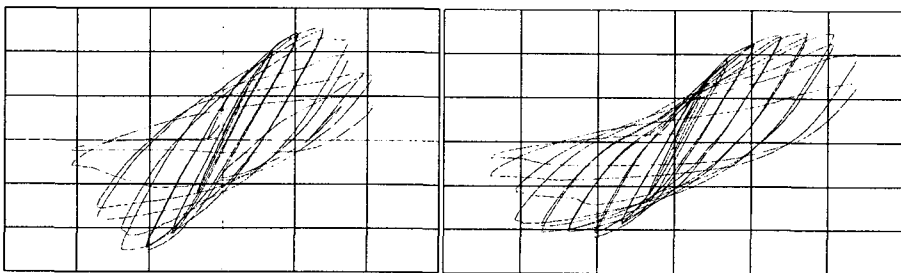
그림 9 충전 강교각의 Low Cycle Fatigue에 의한 파괴

#### 4.2 이력 곡선

그림 10은 시편들의 이력 곡선이다. 그림 10(b),(c),(d),(e)의 각 축의 값은 그림 10(a)와 같다.

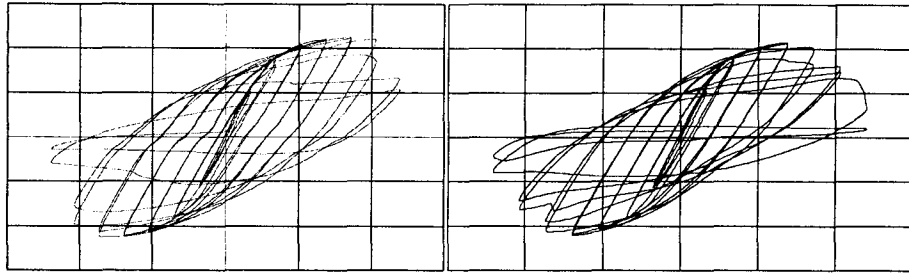


(a) SP0N



(b) SP5N

(c) SP5S



(d) SP5C

(e) SP5T

그림 10. 시험체의 이력곡선

### 4.3 하중 변위 곡선 및 연성 계수

그림 11이 나타내는 것은 각각의 시편에 대한 이력곡선으로부터 구한 하중-변위 포락곡선이다. 콘크리트 채움이 변수인 SP0N 과 SP5N을 비교하면, 30% 정도의 강도가 증가함을 알 수 있다. 하지만 파괴의 양상은 충전 강교각의 경우가 강교각에 비해서 급격한 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 이 것은 기존 실험결과와는 다른 것으로 콘크리트 충전 강교각의 시편의 파괴모드가 국부 좌굴에 의한 파괴와 함께 Low Cycle Fatigue에 의한 파괴가 함께 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 보조 보강재를 사용한 다른 충전 강교각의 경우도 비스한 경향을 나타내고 있다.

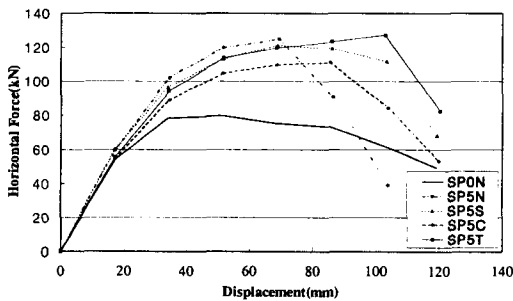


그림 11. 하중 변위 곡선

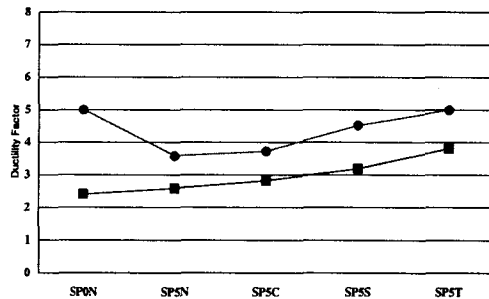


그림 12. 연성도(원:  $\mu$ ; 사각형:  $\mu_m$ )

또한 충전 강교각의 강도의 향상에 보조 보강재가 효과적인 역할을 하지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 보조보강재가 충전강교각의 일반적인 파괴모드인 교각 하단의 국부좌굴을 지연시키기 위한 것이었으므로 Low Cycle Fatigue가 파괴에 기여한 것을 고려하면 이번 실험에서의 결과만으로 결론을 내리기는 정보가 부족하다고 판단된다.

그림 12는 연성 계수 값을 나타낸 그래프이다. 먼저 식(2)에 정의에 따른  $\mu$  값을 기준으로 보면, 콘크리트 채움이 없는 경우가 오히려 높은 연성도를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 역시 시편의 파괴모드가 교각하단의 국부좌굴만이 아니라 Low Cycle Fatigue에 의한 파괴도 거의 동시에 발생하여 교각 하부에 파단이 발생하여 극한강도 이후의 상대적으로 급격한 강도저하 때문인 것으로 판단된다.

충전 강교각의 경우 보조보강재가 적용된 경우 두 가지 연성도 모두 약간 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 파괴모드가 Low Cycle Fatigue에 의해서 교란되었기 때문에 이 실험 결과만 가지고는 보조 보강재의 효과를 판단하기에는 어려움이 많다.

## 5. 결론

콘크리트 충전 강교각의 내진성능을 파악하기 위해서 축방향에 일정한 하중을 가하면서 횡방향 하중의 반복재하 실험을 수행하였다. 충전 강교각의 파괴모드인 하단부의 국부좌굴을 방지하여 연성을 향상시키기 위해서 볼트, 코너 플레이트 및 턴버클 같은 보조보강재를 사용하여 충전 강교각의 연성의 향상을 검증하기 위한 실험을 수행하였다.

실험결과 비충전 강교각은 예상대로 하부의 국부좌굴로 인해 파괴되었으며 우수한 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 충전 강교각의 경우 비충전 강교각에 비해서 강도는 증가하였으나 극한 하중후의 강도감소가 급격히 일어났다. 이는 Low Cycle Fatigue에 의한 시편의 파단이 발생하였기 때문이다. 결과적으로 내진성능은 비충전 강교각에 비해서 향상되지 않는 결과를 나타내었다. 또한, 교각의 하부의 국부좌굴을 예상하고 이의 지연을 통해서 교각의 내진성능을 도모한 보조 보강재의 효과도 판단하기 어려웠다. 이러한 Low Cycle Fatigue에 의한 파괴는 시편설계 및 제작과정에서 과도한 용접량에 기인한 잔류응력 때문인 것으로 실제 충전 강교각이나 시편제작시 설계와 제작과정에서의 세심한 주의가 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

연구에 사용된 시편을 제작하는데 도움을 준 방화대교현장 관계자분들과 실험을 수행한 현대건설 기술연구소의 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Kitada, T.(1998), Ultimate Strength and Ductility of State-Of-The-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, pp. 2021-2039.