CFT를 이용한 모듈러 교각 기둥-기초 연결부의 내진성능

김지영* · 김기도** · 마향욱*** · 정철현****

Kim, Ji Young*, Kim, Ki Doo**, Ma, Hyang Wook***, Chung, Chul-Hun****

Seismic Performance of Column-Footing Connection of Modular Pier using CFT

ABSTRACT

The CFT (Concrete Filled steel Tubes) column-footing connection is cast-in-place embedded type which provides simple construction procedure, low cost, and superior structural performance. In this study, CFT column-footing connection of modular pier is proposed and structural performance is evaluated by experimental tests. To evaluate structural performance of the CFT column-footing connection, a series of experimental tests were performed for the 4 specimens with different embedded depth. As a result of the quasi-static test, the specimen with 0.6D (0.6 times the outside diameter of steel tube) embedded depth showed relatively low ductility than other specimens with larger embedded depth due to cone failure of base concrete occurred during the lower loading step. On the contrary, cone failure of the base concrete was not observed in the specimens with larger embedded depth than 0.9D, but typical flexural failure in lower part of CFT column was observed. With the analyses of force-displacement curve, displacement ductility, and energy dissipation capacity, it is concluded that the rational range of embedded depth of the CFT column-footing connection is from 0.9D to 1.2D in view of good seismic performance.

Key words : Modular pier, CFT column-footing connection, Embedded depth, Cone failure, Flexural failure, Ductility

초 록

CFT 기둥은 시공이 간단하고 경제적이며 구조성능이 우수한 현장타설 매입형 연결 형식이다. 본 연구에서는 모듈러 교각에 적용되는 CFT 기둥-기초 연결부 형식을 제안하고, 실험을 통하여 구조성능을 평가하였다. 기둥-기초 연결부의 구조성능을 평가하기 위해서 기초부 콘크리트에 매입되는 CFT 기둥의 매입깊이를 변수로 총 4개의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 준정적 실험결과, 매입깊이가 0.6D인 실험체에서는 낮은 하중단계에서 기초부의 콘파괴로 인하여 상대적으로 낮은 연성능력을 보였다. 그러나 매입깊이가 0.9D 이상인 실험체에서는 기초부의 콘파괴가 방지되고 CFT 기둥 하단부에서 전형적인 휨파괴 거동을 보이며 높은 연성능력을 발휘하였다. 하중-변위 이력곡선, 변위 연성도 및 에너지 소산능력 등을 분석한 결과, 제안된 CFT 기둥-기초 연결부의 매입깊이는 0.9D~1.2D 수준이 내진성능을 발휘하는 합리적인 수준인 것으로 평가되었다.

검색어 : 모듈러 교각, CFT 기둥-기초 연결부, 매입깊이, 콘파괴, 휨파괴, 연성도

* 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (youmoon@kopec-enc.com)

** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (k701jry@kins.re.kr)

*** 대우건설기술연구원 토목연구팀 선임연구원 (hyangwook.ma@daewooenc.com)

**** 정회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Dankook University · chchung5@dankook.ac.kr)

Received September 27, 2013/ revised October 30, 2013/ accepted November 11, 2013

1. 서론

대부분의 하부구조는 철근콘크리트 교각으로 사공하고 있지만 내진성능 향상을 위해 경제적으로 우수하면서 급속시공이 가능한 콘크리트로 충전한 원형 충전강관을 이용한 CFT (Concrete Filled steel Tubes) 교각에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. CFT는 원형이나 사각형 단면을 적용할 수 있는데, 원형 단면이 콘크리트를 구속하는 효과가 크고, 강재와 콘크리트 사이의 부착응력을 증가시키고 국부좌굴을 지연시키기 때문에 사각형 단면보다 우수한 성능을 발현한다. 그러나 사각형 단면은 다른 구조부나 보강재와의 연결이 쉽고, 원형 단면은 제한적이다(Roeder and Lehman, 2009).

일반적으로 기둥-기초 연결부는 외부에 노출되는 방식과 기초 내부에 매입되는 방식으로 설계가 가능하다. 외부에 노출되는 연결부는 제작이 매입되는 방식보다 설치가 간편하다. 그러나 외부에 노출되는 연결부는 연결부의 강성이 앵커볼트의 성능에만 의존하기 때문에 신뢰도가 떨어지는 것이 일반적인 현상이다. 이 경우 앵커볼트가 항복되면 연결부의 강성(rigidity)이 약화되기 쉽다. 앵커볼트 개수를 증가시키고, 단부 끝단에 상대적으로 두꺼운 플레이트가 설치되면 지진하중에 대한 기둥-기초 연결부의 성능은 확보할 수 있지만 시공비의 증가가 예상된다. 매입되는 방식의 경우에는 매입깊이내 콘크리트의 추가 저항으로 기초 연결부의 강성이 크게 향상된다. 앵커볼트 주변에서 발생하는 큰 응력은 설계에서 완회시킬 수는 있지만, 연결부 상세가 불합리하면 CFT 기둥과 이를 둘러싼 기초 콘크리트 사이 접합부 콘크리트에서 집중응력이 발생하기 쉽다. 접합면 콘크리트가 큰 응력으로 압쇄되면 연결부의 강성은 감소되고 이로 인해 시스템의 구조성능도 감소하게 된다. 따라서 모듈러 교각 CFT 기둥-기초 연결부의 강성 및 구조성능을 확보하기 위한 단순하면서 효율적인 연결부 상세의 개발이 필요하다.

모멘트 저항능력이 요구되는 교각구조에서 기둥-기초 연결부는 큰 모멘트와 지지하중 작용시 회전이 작용하게 된다. 따라서 기둥-기초 연결부는 기둥의 하중을 기초로 전달할 수 있는 충분한 강도와 지지하중으로 인해 기둥에서 요구되는 비탄성 변형능력을 보유하여야 한다. 강재 및 CFT 기둥-기초 연결부에 대한 선행 연구자들의 연구에서는 다양한 연결부 형식이 사용되었고, 요구 내진성능의 만족 여부를 검증하기 위한 실험이 수행되었다. 기존에 제안된 연결부 형식은 크게 Fig. 1과 같이 4가지 형태로 분류할 수 있다(Kingsley, 2005).

Portold et al.(2000)은 강재 기둥을 기초부에 매입하여 기둥-기초부를 일체화시키는 시스템을 제안하였는데, 사전에 제작된 기초부 콘크리트에 강재 기둥을 매입한 이후에 콘크리트를 충전하여 일체화시키는 방법이다. Marson and Bruneau (2004)는 기둥-기초 연결부의 완전 고정과 완전합성효과를 발휘하도록 Fig. 2와 같이

기둥-기초 연결부를 제안하였다. CFT 기둥 하단부에 10mm 두께의 강재 플레이트를 용접하고, 이를 30mm 두께의 하부 플레이트에 용접된 두 개의 π 형강에 용접한 이후에 기초부 콘크리트를 타설하여 기둥-기초 연결부를 일체화시킨다.

Fig. 3(a)는 프리캐스트 매입방법(Kingsley, 2005)으로 기둥 부재의 직경보다 일정 수준 큰 홀을 기초부에 사전에 설치하고 기초부 콘크리트를 타설한다. 기초부에 설치된 홀에 모듈러 기둥 부재가 설치되면 홀의 남은 공간에 화이버 보강 고강도 무수축 모르터를 타설하여 기둥과 기초부를 접합한다. (b)는 절곡 다웰바를 이용한 현장타설 기둥-기초 연결방법(Roeder et al., 2005)으로 기초부에 설치되는 모듈러 충전강관 첫 번째 CFT 기둥 부재 제작시 하단부에 사전에 절곡 다웰바를 설치하여 모듈러 부재를 제작한다.

Fig. 1. Types of Column Base Connections for Steel and CFT Sections

Fig. 2. Encased Structural Steel Column Base Connection (Marson and Bruneau, 2004)

Fig. 3. Types of Column-Base Connections

Fig. 4. CFT Base Connection (Hsu and Lin, 2006)

Fig. 5. Assembly Method (Ou et al., 2010)

(c)는 T형 다웰바를 이용한 현장타설 기둥-기초 연결방법(Roeder et al., 2005)으로 기초부에 설치되는 모듈러 충전강관 기둥 부재 제작시 하단부에 사전에 T형 다웰바를 설치한다. CFT 기둥이 매입되는 방식의 경우에는 매입깊이내 콘크리트의 추가 저항으로 기둥-기초 연결부의 강성이 크게 향상된다. 앵커볼트 주변에서 발생하는 큰 응력은 설계에서 완화시킬 수는 있지만, 연결부 상세가 불합리하면 CFT 기둥과 이를 둘러싼 기초부 콘크리트 사이 접합부 콘크리트에서 집중응력이 발생하기 쉽다. Hsu and Lin (2006)은 이를 보완하기 위해서는 Fig. 4와 같이 매입된 CFT 구형 강관과 주변 콘크리트의 합성효과를 발휘하도록 보강재를 설치하는 방법을 제시하였다. Kingsley (2005)는 원형단면을 갖는 CFT 기둥-기초 연결부의 접합방법을 제시하고, 이를 적용한 CFT 기둥의 기초부내 매입깊이 변수로 실험체를 제작하여 반복수평가력 실험을 수행하였으며, 실험결과를 통해서 제시된 접합상세의 경우 적정 매입깊이를 0.9D로 제안하였다. 여기서 제시된 기둥-기초 연결부 상세에서는 기초콘크리트에 매입되는 강관과 콘크리트, 강관 하단부와 콘크리트의 합성효과를 높이기 위한 상세가 부족하여 제안된 모델에 대한 해석결과에서 이들 접합면에서 벌어짐이 발생하는 것으로 나타났다. Ou et al.(2010)은 내진지역에 적용하기 위한 비부착 포스트텐션닝을 통해 일체화시키는 프리캐스트 세그멘탈 콘크리트

교각의 기둥-기초 연결부를 매입철근으로 접합시키도록 Fig. 5와 같이 제안하였는데, 이 기둥-기초 연결부는 기초부에 매입철근 삽입을 위해 파형 형상의 덕트를 갖는 홀을 설치하고, 매입철근을 삽입한 후에 그라우팅으로 일체화시키는 방법이다.

Lim and Lee(2009)는 강재 기둥이 앵커에 의해서 콘크리트에 구조에 대해 수치해석 결과를 이용하여 앵커 부착모델을 제안하였다. Won et al.(2013)은 내부 구속 중공 CFT 기둥과 기초와의 연결을 위해 베이스 플레이트와 앵커프레임으로 구성되는 접합방식을 제안하고, 실험을 통해 구조성능을 검증하였다.

본 연구에서 제안한 CFT 기둥을 이용한 모듈러 교각에서는 기둥-기초 연결부가 존재하는데 연성 및 내진성능이 향상될 수 있도록 접합부 상세 및 적정 매입깊이가 확보되어야 한다. 또한, 접합부 상세에서는 기초콘크리트에 매입되는 강관과 콘크리트의 합성효과를 높일 수 있는 방안이 고려되어야 한다. 본 연구는 모듈러 교각을 구성하는 여러 연결부 중에서 CFT 기둥 부재와 기초부를 연결하는 연결부 상세 및 시공법을 제안하였고, 이를 적용한 기둥-기초콘크리트 접합부 실험체에 대한 반복수평가력실험을 수행하였다. 실험결과를 통해 CFT 기둥의 기초콘크리트내 매입깊이 변화에 따른 구조거동 및 내진성능, 합성거동 등을 평가하였다.

2. 모듈러 교각의 CFT 기둥-기초 연결부 시스템

CFT 모듈러 교각의 강도(strength) 및 연성(ductility)이 충분히 발휘되기 위해서는 기초-기둥 연결부가 조기 파괴가 발생되지 않도록 충분한 강도와 강성을 보유하여야 한다. 따라서 기둥-기초 연결부가 내진성능을 보유할 수 있는 합리적인 연결부를 결정하는 것이 CFT 모듈러 교각 시스템의 내진성능을 확보하는데 매우 중요하다.

모듈러 교각 CFT 기둥-기초 연결부는 제작 및 시공방법이 단순하면서 급속시공이 가능하고, 지진하중 작용시 조기파괴나 저항력의 큰 손실 없이 충분한 비탄성 변형능력을 확보할 수 있어야 한다. 또한 시공단계 간소화를 위해 표준화 된 부재제작이 가능하여야 한다. 따라서 모듈러 교각 시스템에 적용되는 기둥-기초 연결부는 요구 강성 및 구조성능의 확보뿐만 아니라 시공성이 단순화되는 시스템이 필요하다. CFT 기둥과 기초의 연결부는 조립식 공법과 현장타설 공법으로 시공이 가능하며, CFT 기둥과 기초의 접합방식은 CFT 기둥을 기초내에 매입하는 방법과 접합부를 외부로 노출시키는 방법이 가능하다. 최종적으로는 모듈러 기둥-기초 연결부는 구조성능이 확보되면서 급속시공이 가능하여야 하며, 표준화 된 시공을 위해 연결방법이 단순하고 또한 경제성이 확보되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 요구조건을 만족할 수 있는 모듈러 교각 시스템의 기둥-기초 연결부의 연결방법을 다음과 같이 제안하였다.

CFT 합성단면을 이용한 모듈러 교각 시스템을 구성하는 단위부재는 Fig. 6과 같으며, CFT 기둥을 갖는 모듈러 교각 시스템 중에서 기초콘크리트에 접합되는 첫 번째 기둥 블록과 기초콘크리트의 시공과정은 Fig. 7과 같다.

Fig. 8은 현장타설 매입방식으로 본 연구에서 제안하는 모듈러 CFT 기둥-기초 연결부의 상세로 모듈러 CFT 기둥 부재 하단부에 강관의 직경보다 큰 직경을 갖는 원형 플레이트를 설치하고, 원형 플레이트에 앵커볼트를 설치하여 기초부와 일체화 시킨다. 기초부와의 완전합성효과와 편칭전단에 대한 저항능력을 향상시키기 위해 기초부에 매입되는 충전강관 표면부에 스티드 전단연결재를 수평으로 부착시킨다. Fig. 9에서 CFT 기둥 하단에 용접으로 접합되는 링 플레이트(ring plate)는 기초 콘크리트 내에서 CFT 기둥의 접착력을 증가시키고 기둥에서의 하중을 연결부로 전달시켜주는 역할을 한다. 링 플레이트의 폭은 강관의 외경(D)의 0.3, 두께는 CFT 강관의 두께와 동일하게 결정된다. 링 플레이트는 기초부 콘크리트 하단에 정착된 갈고리 형상을 갖는 앵커에 의해서 볼트 접합한다. 기초부에 매입되는 강관 외면에 전단연결재를 접합시키는데 전단연결재는 CFT 기둥과 기초 콘크리트의 경계면에서의

Fig. 6. Elements of Segmental CFT Column

Fig. 7. Erection Sequence of Proposed CFT Column-Footing Connection

Fig. 8. Detail of Modular CFT Column-Footing Connection

벌어짐을 억제하고 합성효과를 증가시키는 역할을 한다. 전단연결재는 기초 상부면에서 합성효과를 발휘하게 일정한 덮개를 확보하고, 교각 높이방향으로 전단연결재 지름의 5배 또는 100mm의 최소간격을 확보한다(KHBDC, 2010). 기초 콘크리트는 일반 교각

기초 설계에서 요구되는 휨 및 전단철근을 동일한 방법으로 보강하며, 2단계로 구분하여 기초부 콘크리트를 타설한다. 1단계에서는 기초부에 설치되는 철근을 배근하고, CFT 기둥 하단에 접합되는 링 플레이트의 하단 위치까지 1차 콘크리트를 타설한다(Fig. 9(a)). 이때 링 플레이트 하단에서 볼트 접합되는 하단의 깔고리 형상의 앵커는 1차 타설 콘크리트 구간에 매입된다. 2단계에서는 1차 콘크리트의 양생이 완료되면 링 플레이트가 접합된 CFT 기둥을 설치하는데, 1단계에서 기초 콘크리트에 매입된 앵커와 CFT 기둥 하단에 접합된 링 플레이트를 조립한 후 볼트로 접합을 실시한다(Fig. 9(b)). 이어서 기초부의 나머지 콘크리트를 타설함으로써 기둥-기초 접합부 시공이 완료된다(Fig. 9(c)).

3. 모듈러 CFT 기둥-기초 연결부의 반복수평가력 구조실험

본 실험에서는 모듈러 CFT 기둥과 기초 연결부를 모사한 실험체에 대한 반복수평가력실험을 수행하였다. 실험을 통해서 연결부의 파괴모드 및 내진성능을 평가하였다. 실험이 수행된 실험체는 기초부에 매입되는 모듈러 CFT 강관의 매입깊이(l_e)를 변수로 제작되었으며, 매입깊이는 CFT 강관 직경(D)의 변수로 나타내었다. 실험 결과를 통해서 매입깊이가 파괴모드, 구조내력 및 내진성능에 미치는 영향을 평가하고 이를 통해서 설계시 요구되는 모듈러 CFT 강관의 적정 매입깊이를 결정하였다. 실험체는 매입깊이가 0.6D~1.5D 범위에서 총 4개가 제작하였으며, 각 실험체의 주요 변수별 특징은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental Variables

Specimen	l_e (mm)	l_e/D	D (mm)
0.6D	100	0.6	165.2
0.9D	149	0.9	
1.2D	198	1.2	
1.5D	248	1.5

Fig. 9. Fabrication of CFT Column-Footing Connection

3.1 실험체의 설계 및 제작

모듈러 CFT 기둥에 사용된 강관의 직경 D는 165.2mm이며, 강관의 두께 t는 6mm로서 모든 실험체에 동일하게 적용하였다.

Fig. 10. Section Detail for Ring Plate

Fig. 11. Section Details for Anchor Bolts

Fig. 12. Section Details for CFT Column

기초부 콘크리트와의 합성을 위해 적용되는 스티드 전단연결재 및 갈고리 앵커의 배근형태는 Fig. 10과 같다. 기초부에 매입되는 CFT 강관 하단에는 Fig. 8과 같이 링 플레이트가 용접으로 접합되었다. CFT 강관 하단에 부착되는 링 플레이트는 기초콘크리트에 매입되는 CFT 합성강관의 인발성능 및 합성효과를 향상시키고, CFT 강관 하단에 설치되는 앵커와 볼트접합을 통해서 일체화시키는 역할을 한다. CFT 기둥 하단에 용접된 링 플레이트는 사공단면에 서 기초부 콘크리트가 1차 타설시 설치된 앵커볼트와 접합된다(Fig. 9). CFT 강관의 인발성능 및 내진성능을 향상시키고, 기초부 콘크리트와의 합성을 위해 CFT 강관 하단에는 8개의 앵커볼트가 설치된다. 8개의 앵커 중에서 4개는 갈고리 형상의 앵커이고, 4개는 기초부 콘크리트를 타설하기 전에 자립을 위해서 수직의 형상을 갖는 앵커가 적용되었다(Fig. 11). 모듈러 CFT 강관의 형상 및 기초부 콘크리트와의 합성을 위해 강관에 설치되는 스티드 전단연결재와 앵커의 배근형태는 Fig. 12와 같다.

수평가력 실험체는 CFT 강관의 기초부내 매입깊이별로 Fig.

Fig. 13. Geometry of Specimens

Fig. 14. Major Design Details of Footing

13에서와 같이 4개가 제작되었다. 수평가력 실험을 통해서 매입깊이 변수에 따른 모듈러 CFT 기둥과 기초 접합부의 파괴모드, 내진성능 및 내진성능을 평가하고, 설계에서 요구되는 내진성능을 만족하는 최적의 매입깊이를 결정하기 위해서 4개의 매입깊이를 변수로 실험체가 제작되었다. 기초부의 단면형상 및 배근도는 Fig. 14와 같다.

3.2 재료특성

모듈러 CFT 기둥-기초 연결부 실험체의 충전콘크리트 및 기초부 콘크리트의 설계압축강도는 40MPa이며, 실린더 공시체의 28일 압축강도는 평균 37.5MPa로 평가되었으며, 주요 강재의 재료특성은 Table 2와 같다.

3.3 수평가력실험

수평가력실험 전경은 Fig. 15로서 변위비(drift ratio)를 증가시키면서 변위제어로 수평하중을 가하였다. 변위제어는 Fig. 16과 같이 기둥유효길이에 대한 비율(drift ratio)로써 각 단계별로 2회씩 반복 재하하여 동일 하중 진폭에 대한 거동특성의 차이를 평가하였

다. Drift ratio는 기둥의 유효길이에 대한 가력된 변위의 퍼센트(%)로 기둥 높이의 $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$ 까지 재하하고, 2.0% 이후에는 1.0%씩 증가시켰다. 수평가력실험시 매입깊이 변수별로 제작된 각 실험체에서 수평변위 및 강재변형을 측정위치는 Fig. 17과 같다.

Fig. 15. Set up of Test Specimen

Fig. 16. Lateral Load History

Table 2. Material Properties of Steel

	Symbol	f_y (MPa)	Geometric size
CFT column	STK490	320	• diameter : 165.2mm • thickness : 6.0mm
anchor plate	SM490B	325	• thickness : 6.0mm
anchor bolt	SM45C	343	• diameter : 16.0mm
shear stud	SM10C	206	• diameter : 13.0mm • length : 70.0mm

Fig. 17. Instrumentation of LVDT and Strain Gages

Fig. 18. Failure Modes

Table 3. Behavior of specimen according to drift level

Specimen \ Drift ratio	0.25%	0.5%	1.0%	1.5%	5.0%	6.0%	10.0%	11.0%	Failure mode
0.6D			○		◇	△			cone
0.9D		○				◇, ☼			flexure
1.2D			○		☼	◇	□		
1.5D				○	☼	◇		□	

○:initial crack, ◇:maximum load, △:cone failure ☼: tube buckling, □:tube rupture

3.4 실험결과

3.4.1 파괴형상

실험종료시 각 실험체의 파괴형상은 Fig. 18에 정리하였다. 수평 가력실험시 매입깊이가 0.6D인 실험체는 drift ratio가 6.0% 수준일 때 CFT 기둥이 뽑히면서 콘파괴가 발생되었다. 매입깊이가 0.9D인 실험체는 수평하중이 증가하면서 drift ratio가 6% 수준일 때 CFT 강관 하단부에서 좌굴이 발생되고 이후 점차적으로 내력이 감소하다 11% 수준에서 휨파괴가 발생되었다. 매입깊이가 1.2D인 실험체는 수평하중이 증가하면서 drift ratio가 5%일 때 CFT 강관 하단부에서 좌굴이 발생되고 11% 수준에서 강재가 찢어지면서 휨파괴가 발생되었다. 매입깊이가 1.5D인 실험체는 CFT 강관 하단부에서 좌굴(drift ratio 5%)에 이어 강관이 찢어지면서(drift ratio 10%) 휨파괴가 발생되었다. 실험체별로 측정된 주요 손상의 발생시점 및 파괴모드를 Table 3에 정리하였다.

3.4.2 수평하중변위 관계

수평가력실험에서 측정된 수평하중과 기둥 상단의 수평변위 관계는 실험체별로 Fig. 19에 나타내었고, 최대내력은 Table 4에 정리하였다. 실험결과에서 보면, 매입깊이가 0.6D인 경우에는 CFT 기둥 하단부에서 휨파괴가 발생되지 않고 낮은 하중단계에서 콘파괴가 발생되어 상대적으로 최대내력 및 연성능력이 낮은 수준을 보였다. 그러나 매입깊이가 0.9D 이상인 실험체에서는 콘파괴가 방지되고 CFT 기둥 하단부에서 전형적인 휨파괴가 발생하는 거동을 보였으며, 최대내력 및 연성능력도 높은 수준을 보였다. Fig. 20에 나타난 하중-변위 포락곡선은 각 Cycle별 최대하중에서의 값들을 연결한 그래프이다. 하중-변위 포락곡선에는 최초균열 발생 시점, 강재의 좌굴 발생시점을 표시하였다.

교각의 손상을 평가하기 위해 부재가 파괴될 때까지 흡수 또는 소산할 수 있는 능력은 내진성능을 평가하는데 중요한 요소 중

Fig. 19. Load-Displacement Hysteresis Curves

Table 4. Maximum Load and Drift Ratio at Maximum Load

Specimen	Maximum load (kN)		Drift ratio (%)
	(+) direction	(-) direction	
0.6D	117.28	120.94	5.0
0.9D	125.94	137.95	6.0
1.2D	130.90	136.73	6.0
1.5D	134.31	138.24	6.0

하나이다. 구조물 또는 어떤 부재의 총 에너지량에 있어서 지진응답 해석에 의한 변위이력으로부터 실제로 흡수 소산되는 에너지를 계산하고 총 에너지량과 비교하여 구조물의 안전성 여부를 검토할 수 있다. 에너지 소산능력을 평가하기 위하여 누적소산에너지 (Cumulative Dissipated Energy)를 분석하였다. Fig. 21은 각 실험체의 누적 소산 에너지 곡선으로서 실험결과, 0.6D 실험체의 누적 소산에너지는 비교적 작은 수준을 보였고, 매입깊이가 0.9D 이상인 실험체에서는 상대적으로 높은 수준을 보였다. Fig. 22는 각 하중단계별로 산정된 에너지 소산량을 매입깊이별로 정리한 그래프이다. 매입깊이가 증가하면 에너지 소산량이 증가하지만, 대략 1.0D 매입깊이 이상부터는 일정한 수준을 보였다. 따라서

모듈러 CFT 강관 기둥-기초 접합부에서 CFT 강관의 매입깊이는 1.0D~1.2D 수준이 내진성능이 극대화되는 합리적인 범위인 것으로 판단된다.

3.4.3 연성도 평가

구조형식, 교각길이, 교각의 구속조건에 따른 구조물의 소성변형 능력을 나타내는 변위연성도(displacement ductility, μ_{Δ})는 항복 변위(Δ_y)에 대한 극한변위(Δ_u)의 비로 정의된다. 변위연성도의 경우, 하중-변위의 관계에서 항복점이 뚜렷하지 않기 때문에 항복변위를 결정하기 위한 여러 연구자들의 다양한 정의가 있다. Fig. 23을 참조하면(Shim, et al., 2008), 항복변위는 최대 수평하중을

Fig. 20. Envelop Curves

Fig. 21. Cumulative Energy Dissipation

Fig. 22. Energy Dissipation Capacity According to l_e/D

Fig. 23. Definition of Displacement Ductility

Table 5. Displacement Ductility

Specimen	Yield displacement(Δ_y)	Ultimate displacement(Δ_u)	displacement ductility (μ_Δ)
0.6D	15.33mm	42.12mm	2.75
0.9D	15.49mm	68.57mm	4.43
1.2D	11.36mm	62.58mm	5.51
1.5D	11.79mm	63.51mm	5.39

지나는 수평선과 원점에서 최대 수평하중의 75%를 지나는 직선과의 교점에 대응하는 변위를 항복변위로 정의하였으며, 극한변위는 최대 수평하중이 15% 감소되는 값에 대응하는 변위로 정의하였다. 식(1)에 의해서 각 실험체에 대해서 평가된 변위 연성도는 Table 5와 같다. 도로교설계기준(KHBDC, 2010)을 참고하면, 매입깊이가 0.6D인 경우에는 변위연성도가 낮게 평가되었으며, 0.9D 이상부터는 충분한 연성도를 확보하는 것으로 나타났다.

3.4.4 강관의 하중-변형률 관계

강재의 변형률은 기초 콘크리트 상단부와 기초내에 매입된 강관에 기둥 높이방향으로 Fig. 17과 같이 부착하였다. Fig. 24는 가력기가 부착된 면에서의 반복가력에 의한 압축 및 인장 변형률로서 실험체의 높이에 따라 부착된 높이방향의 수직변형률 분포이다. CFT 기둥 강관에서 발생하는 최대 변형률은 매입깊이나 drift ratio와 상관없이 대부분의 경우 기초콘크리트 표면부 위로 약 50mm에 위치한 강관에서 발생되었다. 이는 기둥-기초 접합부 상에서 기초콘크리트에 매입되는 강관 하단에 설치되는 링플레이트와 앵커, 매입되는 강관에 수평으로 설치되는 전단연결재 등이 합성효과를 증가시키기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 24. Longitudinal Tube Strain Distribution

4. 결론

본 연구에서는 모듈러 CFT 교각 시스템의 기둥-기초 연결부 접합방법 및 시공법을 제안하였고, 기초콘크리트내에 매입되는 CFT 기둥의 매입깊이를 변수로 한 기둥-기초 연결부 실험체에 대한 수평반복가력실험을 수행하였다. 기둥-기초 연결부의 매입깊이에 따른 파괴모드, 최대내력, 내진성능 및 휨강성 등의 평가를 통해서 내진성능을 만족하는 적정 매입깊이를 결정하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 수평반복가력실험에서 매입깊이가 0.6D인 실험체는 drift ratio가 6.0% 수준일 때 CFT 기둥이 뒤틀리면서 콘파괴가 발생되었다. 매입깊이가 0.9D인 실험체는 수평하중이 증가하면서 drift ratio가 6% 수준일 때 CFT 강관 하단부에서 좌굴이 발생되고 이후 점차적으로 내력이 감소하다 11% 수준에서 휨파괴가 발생되었다. 매입깊이가 1.2D인 실험체는 수평하중이 증가하면서 drift ratio가 5%일 때 CFT 강관 하단부에서 좌굴이 발생되고 11% 수준에서 강재가 찢어지면서 휨파괴가

발생되었다. 매입깊이가 1.5D인 실험체는 CFT 강관 하단부에서 좌굴(drift ratio 5%)에 이어 강관이 찢어지면서(drift ratio 10%) 휨파괴가 발생되었다.

- (2) 매입깊이가 0.6D인 경우에는 CFT 기둥 하단부에서 휨파괴가 발생되기 이전에 낮은 하중단계에서 콘크리트가 발생되어 상대적으로 최대내력 및 연성능력이 낮은 수준을 보였다. 그러나 매입깊이가 0.9D 이상에서는 콘크리트가 방지되고 CFT 기둥 하단부에서 전형적인 휨파괴가 발생하는 거동을 보였으며, 최대내력 및 연성능력도 높은 수준을 보였다.
- (3) CFT 강관의 매입깊이가 0.6D인 경우에는 변위연성도가 낮게 평가되었으며, 1.2D 이상부터는 도로교설계기준에서 요구하는 5.0 이상의 충분한 연성도를 확보하는 것으로 나타났다.
- (4) 실험결과, 매입깊이가 0.6D 실험체의 누적 소산에너지는 비교적 작은 수준을 보였고, 매입깊이가 0.9D 이상인 실험체에서는 상대적으로 높은 수준을 보였다. 매입깊이가 증가하면 에너지 소산량이 증가하지만, 대략 1.0D~1.2D 범위의 매입깊이 이상부터는 일정한 수준을 보였다. 따라서 모듈러 CFT 교각 기둥-기초 접합부의 내진성능을 만족하는 적정 매입깊이는 1.2D수준인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(10기술혁신B01-직선교량의 공사기간 단축을 위한 표준모듈 활용 조립식교량 기술개발 연구단)에 의해 수행되었습니다.

References

- Hsu, H. L. and Lin, H. W. (2006). "Improving seismic performance of concrete-filled tube to base connections." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp. 1333-1340.
- KHBDC (2010). *Korean highway bridge design code*, Ministry of Land, Korean Road and Transport Association (in Korean).
- Kingsley, A. (2005). *Experimental and analytical investigation of embedded column base connections for concrete filled high strength steel tubes*, Master's Thesis, University of Washington, Seattle, WA.
- Lim, J. E. and Lee, J. H. (2009). "Nonlinear analysis of cyclically loaded concrete-steel structures using an anchor bond-slip model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 5A, pp. 495-501 (in Korean).
- Marson, J. and Bruneau, M. (2004). "Cyclic testing of concrete-filled circular steel bridge piers having encased fixed-based detail." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 9, No. 1, ASCE, pp. 14-23.
- Ou, Y. C., Wang, P. H., Tsai, M. S., Chang, K. C. and Lee, G. C. (2010). "Large-scale experimental study of precast segmental unbonded posttensioned concrete bridge columns for seismic regions." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, No. 3, ASCE, pp. 255-264.
- Portold, J., Xiao, R. Y. and Wald, F. (2000). "Embedded steel column bases I. experiments and numerical simulation." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 56, pp. 253-270.
- Roeder, C. W. and Lehman, D. E. (2009). "Research on rapidly constructed CFT bridge piers suitable for seismic design." *TCLÉE 2009, Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*, ASCE, pp. 24-34.
- Roeder, C. W., Graff, R., Soderstrom, J. and Yoo, J. H. (2005). "Seismic performance of pile-wharf connections." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 3, ASCE, pp. 428-437.
- Shim, C. S., Chung, C. H. and Kim, H. H. (2008) "Experimental evaluation of seismic performance of precast segmental bridge piers with a circular solid section." *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 3782-3792.
- Won, D. H., Han, T. H., Kim, S. J. and Kang, Y. J. (2013). "Seismic performance of fabricated internally confined hollow CFT column." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 2, p. 400 (in Korean).