

파형강관으로 내부구속된 중공 R.C 교각의 연성도

Ductility Characteristics of a Hollow R.C Pier Internally Confined by a Corrugated Steel Tube

한택희¹⁾
Han, Taek Hee

김성남²⁾
Kim, Sung Nam

강영종³⁾
Kang, Young Jong

정부식⁴⁾
Jung, Doo-Suk

ABSTRACT

When the weight of a concrete member makes problems, or when the cost of the concrete is relatively high, it may be economical to use a hollow concrete member. But a hollow R.C column may have poor ductility because of the brittle failure at the inner face of the hollow R.C column. This brittle failure results from the absence of the confinement at the inner face of the hollow R.C column. To avoid this brittle failure an internally confined hollow R.C column by a steel tube was developed before. In this study, a hollow R.C column is internally confined by a corrugated steel tube instead of a general flat steel tube. And a column ductility is performed. Test results show that the energy ductility ratio of an internally confined hollow R.C column by a corrugated steel tube corresponds to 80% of the energy ductility ratio of a general solid R.C column.

1. 서론

교각이 강대화 되고, 교각의 높이가 높아짐에 따라 발생하는 자중증가에 따른 과도한 설계치 전력의 감소와 횡방향력의 증대를 위하여, 교각 내부를 중공으로 만들어 자중을 감소시키고, 효율적인 단면을 사용할 수 있는 중공 R.C 교각의 사용이 증대하고 있는 실정이다. 하지만 이러한 구조는 중공면 안쪽면의 구속력의 부족으로 인하여 중공교각 안쪽면에서 취성 파괴가 발생할 수 있어, 교각의 연성도 감소를 초래하기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 개발된 교각구조가 바로 중공 안쪽 면에 강관이 삽입된 원형 중공 R.C 교각이다. 현재 설계·시공되고 있는 교각의 구조는 R.C 구조가 대부분이다. R.C 구조의 경우, 단면 최소화에 따라 발생된 강성부족은 원인이 상당하도록 되어 있다. 이 때문에 결과적으로 이러한 교각은 절단량어 많은 구조물이 된다. 1996년도에 개정된 도로교시방서는 교각의 떠있근 및 중간떠있근을 조밀하게 배근하여 충분한 강성을 갖도록 하는 규정을 포함하고 있다. 그러므로 일반 중공 R.C 교각의 경우 조밀한 절단배근이 필수적이다. 또한 절단에 취약하며 높은 축력비에서 중공 안쪽면의 약화로 취성파괴를 보일으로써, 연성증가를 위한 기술개발이 요구되었다. 중공교각의 이러한 단점은 원형강관을 중공면 내부에 삽입함으로써 심부 콘크리트에 대한 구속효과의 발현으로 해결할 수 있다. 최밀한 절단배근을 피함과 동시에 시공성을 확보할 수 있으며, 강관에 의한 축력분담과 연성증가를 기대할 수 있다. 이러한 관점에서 강관이 삽입된 중공교각은 연성이나 강도 측면에서 매우 효율적인 구조라 할 수

1) 고려대학교 사회환경시스템공학과, 석사과정

2) 고려대학교 사회환경시스템공학과, 석사과정

3) 고려대학교 사회환경시스템공학과, 교수

4) (주)대우건설 도록기술 1팀 부장

있다. 일반 중공단면의 기둥은 역학적으로 모멘트 저항 능력이 충실단면의 기둥에 비해 떨어지지 않아 그 활용가치가 큰 것으로 평가 되어왔다. 그러나 충실단면의 기둥이 갖고 있는 콘크리트 구속효과를 기대할 수 없기 때문에, 그 연성능력에 대해서는 의심을 받고 있다. M.J.N. Priestley는 실험에 의한 그의 연구논문¹⁾²⁾에서, 중공단면의 기둥은 바깥쪽으로는 횡철근의 구속을 받지만, 안쪽 면에서 콘크리트가 구속받지 못하여 일반 충실단면의 콘크리트 기둥과 같은 삼축 압축조건을 콘크리트를 만들지 못한다고 하였다. 또한 중공기둥의 연성은 단면의 중립축의 위치에 따라 큰 영향을 받으며, 횡철근의 영향은 상대적으로 미비하다고 하였다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해 강관을 중공면에 삽입한 중공교각에 관한 연구가 이루어 졌으며, 실험적³⁾⁴⁾ 해석적⁵⁾으로 강관 삽입 중공기둥의 연성능력을 검증하였다.

또한, 파형 구조물은 그 기하형태가 갖는 특징으로 인하여 더 일반 평판 구조물에 비해 더 더 큰 전단 강성과 휨 저항 강성을 갖는다.⁶⁾⁷⁾ 이러한 특성을 이용하여 중공 R.C 구조물에 파형강관을 삽입한다면, 일반 강관을 사용하였을 때 보다 더 얇은 단면의 강관으로 충분한 내부 구속력의 발현이 가능할 것이다. 하지만 파형강관의 특성인 주름 구조 때문에 교각의 휨 저항력 증강에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 이러한 파형강관을 삽입한 R.C 부재에 대해서는 임정순⁸⁾ 등에 의해 연구되어 연성이 증가됨을 확인한 바 있다. 본 연구에서는 기존에 연구된 강관 삽입 중공 R.C 교각을 개량하여 일반 강관 대신 파형강관으로 중공 교각의 내부를 구속하여 교각의 연성을 증가시킨 파형 강관 삽입 중공 R.C 교각을 개발하였다. 개발된 파형강관 삽입 중공 교각과 일반 충실교각에 대해 준정적 실험을 실시하여 변위연성도와 에너지연성도를 실험적으로 평가하였다.

2. 시험체의 설계

본 연구에서는 일반 충실 R.C 교각(Solid Pier)과 파형 강관을 삽입하여 내부를 구속한 중공 R.C 교각(Internally Confined Hollow Pier by Corrugated Steel Tube : ICH-CT Pier), 2개 교각에 대해 실험을 수행하였다. 각 시험체의 설계 과정 및 해석과정은 다음과 같다. 시험체의 설계 시 단면의 직경은 사용가능한 거푸집의 크기 및 피복 두께, 사용 가능한 삽입강관의 크기를 고려하여 700mm로 결정하였으며, 삽입 파형강관은 두께 2mm의 1RS, 외경이 406.4mm인 파형강관을 사용하여, 중공비를 0.58로 하였다. 종방향 철근비의 경우에는 콘크리트 구조설계 기준에서 제시하는 규정에서 가장 최소의 값에 근접하도록 설계하였다.

2.1 충실 R.C 교각의 설계

충실 단면 R.C 교각에서는 종방향 철근으로서, 직경 19mm 이형철근 16개를 사용하였으며, 종방향 철근비는 설계 기준을 만족한다. 횡방향 철근은 중공단면과 동일하게 적용하여, 13mm 이형철근을 사용하며, 소성힌지구간은 67mm 간격으로 설치하며, 비 소성힌지구간은 200mm 간격으로 설치하였다. 이 또한 콘크리트 구조설계 기준의 횡철근비 기준을 만족한다.

$$\text{기둥 전체 단면적} : A_g = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} \times 700^2 = 384845.1001 \text{mm}^2 \quad (\text{식 1})$$

$$\text{총방향 철근 단면적} : A_s = \frac{\pi}{4} \times 19^2 \times 16 = 283.529 \times 16 = 4536.4598 \text{mm}^2 \quad (\text{식 } 2)$$

$$\text{총방향 철근비} : \rho_s = \frac{A_s}{A_g} = \frac{\frac{\pi}{4} \times 19^2 \times 16}{\frac{\pi}{4} \times 700^2} = \frac{19^2 \times 16}{700^2} = 0.011787755 = 1.18\% \quad (\text{식 } 3)$$

$$\text{콘크리트 순수 단면적} : A_c = A_g - A_s = 380308.6403 \text{mm}^2 \quad (\text{식 } 4)$$

$$\text{횡방향 철근비} : \rho_s = \frac{4A_{sp}}{D_c \cdot s} = \frac{4 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2}{594 \times 67} = 0.01334 \quad (\text{식 } 5)$$

횡방향 철근비 설계기준 만족 조건 :

$$\rho_s \geq 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} = 0.45 \left(\frac{\frac{\pi}{4} \times 700^2}{380308.6403} - 1 \right) \times \frac{240}{3000} = 0.000429421 \quad (\text{식 } 6)$$

2.2 파형강판 삽입 중공 R.C 교각

총방향 철근은 19mm 이형 철근을 12개 배열하였다. 콘크리트 구조설계 기준 6.4.2절에 따라, 철근비를 계산하면 1.3%로서 설계 기준을 만족한다.

$$\rho = \frac{A_s}{A_g} = \frac{3402.345 \text{mm}^2}{255127.9854 \text{mm}^2} = 0.0133 = 1.33\% \quad (\text{식 } 7)$$

횡방향 철근은 13mm 이형철근을 사용하며, 소성힌지구간은 67mm 간격으로 설치하며, 비 소성힌지구간은 200mm 간격으로 설치한다. 소성힌지 구간은 기초 상단부에서 0.8m지점까지로 결정하였다. 여기서는 겹침 길이에 의한 횡철근량의 증가는 고려하지 않기로 하며, 띠철근에 대해서는 명확한 규정이 없으므로 나선철근에 대한 규정을 적용하였다. 횡철근비 규정은 콘크리트 구조설계 기준 6.4.2절의 식(6.4.1)인 나선철근의 규정을 적용하였으며, 이는 식 8과 같다. 이를 적용하여 대입하면, 식 9와 같으며, 시험체의 횡철근비는 식 11과 같이 계산 된다. 본 연구에서는 횡철근이 파형강판보다 먼저 파괴가 되도록 설계를 함이 원칙이나, 국내에서 생산되는 파형강판 중 이 기준을 만족하는 제품이 생산되지 않아 적용하지 못하였다. 파형강판의 경우, 주름에 의한 강성의 증대 효과로 인해, 일반 강판에 비해 외압에 대해 상당히 큰 좌굴 강도를 갖는다. 기존 연구⁷⁾에 의하면 1RS와 3RS의 파형강판은 일반 원형 강판에 비해 큰 좌굴강도를 갖는다. 계산 결과, t는 6.48mm 이상을 요하나, 현재 생산되는 최대 두께는 2mm로서, 2mm 파형강판(1RS)을 적용하여 설계를 하였다.

$$\rho_s \geq 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y}, \quad f_{ck} = 240 \text{kgf/cm}^2, \quad f_y = 3000 \text{kgf/cm}^2 \quad (\text{식 } 8)$$

$$\rho_s \geq 0.45 \left(\frac{255127.9854}{251725.6406} - 1 \right) \times \frac{240}{3000} = 0.000486579 = 0.0486579\% \quad (\text{식 } 9)$$

$$D_c = 406.4 + 187.6 = 594 \text{mm} \quad (\text{식 } 10)$$

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{D_c \cdot s} = \frac{4 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2}{594 \times 67} = 0.01334 > 0.0001424 \quad \text{O. K} \quad (\text{식 } 11)$$

$$\text{파형강판과 횡철근의 평형 조건} : 2f_{yh} \cdot A_{sp} = f_t \cdot D_c \cdot s \quad (\text{식 } 12)$$

파형강관과 평원근이 동시에 파괴된 배의 강관의 강도 :

$$f_t = \frac{2f_{gt} \cdot A_{sg}}{D_{cs}} = \frac{\rho_s}{2} f_{th} = \frac{0.0133}{2} \times 3000 = 19.95 \text{ kgf/cm}^2 \quad (\text{식 13})$$

파형강관보다 평원근이 먼저 파괴될 조건 :

$$f_{cr} = \frac{3 \times 21000 \times \frac{t^2}{12}}{203.2^2} \left[1.03 \left(\frac{13}{406.4} \right)^{-0.005} - 0.11 \left(\frac{13}{406.4} \right)^{-0.24} \left(\frac{t}{13} \right) \right] > 0.1995 \text{ kgf/mm}^2 \quad (\text{식 14})$$

$$t > 6.48552 \text{ mm} \quad (\text{식 15})$$

3. 실험 방법

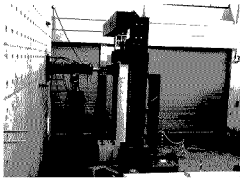


그림 1. 하중 재하를 위해 설치된 시험체

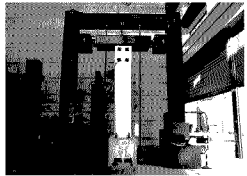


그림 2. 축력 재하를 위해 설치된 시험체

구조물의 비탄성 거동은 여러 해석 방법에 의해 비탄성 응답을 예측하더라도 구조물이 수학적 이상화로 단순화 되거나, 비탄성 문제물상에 의해 그 결과는 불확실성의 한계가 있다. 따라서 실험에 의한 연구가 구조물의 비탄성 거동을 평가하는데 가장 신뢰적인 방법이며 이러한 실험 방법으로는 진동대 실험(Shaking Table Test), 진동력 실험(Forced-Vibration Test), 준정적 실험(Quasi Static Test), 유사 동적 실험(Pseudo-Dynamic Test) 등이 있다. 현재까지 실험되어진 준정적 실험은 서로 다르게 설계된 구조물의 비탄성 에너지 소산능력과 파괴상태를 평가 비교하기에 가장 경제적이고 유용한 실험 방법으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 이러한 준정적 실험을 수행하여 각 거동의 연성도를 평가하였다. 평방향 하중의 재하는 교각 시험체의 높이에 대한 수평 방향 변위의 비로 나타내는 Drift Level로 하중을 재하하는 방법을 사용하였다. 본 실험에서는 Quasi Static loading을 이용하여 각 단계별 Drift Level은 0.5%에서 7.0%까지 2cycle로 파괴 시까지 재하함으로써 거동특성과 파괴양상을 살펴보고자 하였다. 또한 실험중 Drift level의 증가에 따라 발생한 균열 및 파괴양상이 진전되는 것을 각 Drift단계마다 조사하였다. 실험에서 가력장치는 기초 상단에서 2.25m 위치에 설치하였다. 가력장치의 stroke는 $\pm 250\text{mm}$ 로 최대평하중은 200tonf 인 가력장치를 사용하여 시험체의 예상 파괴변위와 내력을 상회하도록 하였다. 그림 1은 평하중 재하를 위해 시험체를 설치한 사진이다. 교각의 준정적 실험에 있어서 중요한 부분 중 하나가 축력을 일정하게 재하하는 것이다. 실험 도중에 축력이 변하게 되면 시험체의 거동에 영향을 미칠 수 있으므로 실험동안 축력을 일정하게 재하하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 축력을 재하하는 방법에는 시험체 제작 시 본체에 스위관을 매설하고 강선으로 후긴장을 주는 방법, 상단 또는 연결부에 별도로 가력장치를 설치하여 하중을 가하는 방법, 시험체 상단에 유압 실린더와

Load Cell을 이용한 방법 등이 있다. 본 실험에서는 부수장치를 제작하여 유압펌프에 일정하중 유지 장치를 설치한 후 실험도중 축력의 변화가 없도록 하였다. 축력의 재하는 국내에서 시공된 교각 상부의 사하중을 고려하여 교각 단면 축강도의 10%에 해당하는 일정 축하중을 재하하였다. 또한 Loading Frame 및 바닥 힌지부는 축력재하시 인장력을 충분히 견딜 수 있도록 제작하였고, 횡방향 가력 시 회전이 가능하도록 양단에 힌지를 두고 연결부를 핀으로 정착하였다. 그림 2는 축력 재하를 위해 시험체를 설치한 모습이다.

4. 실험 결과

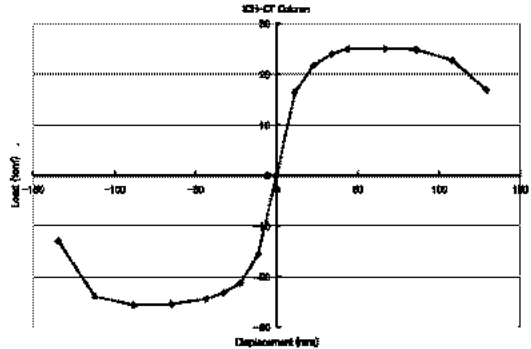
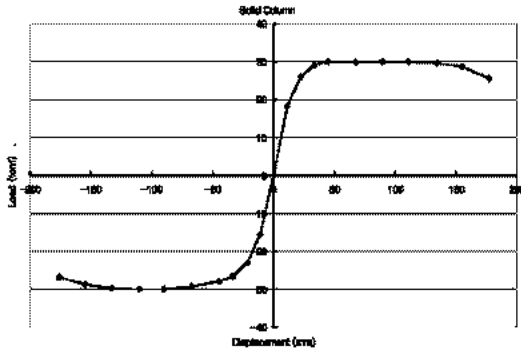


그림 3. 중실 단면 R.C 교각의 포락곡선

그림 4. 파형강관 삽입 중공 R.C 교각의 포락곡선

중실 단면 교각은 첫 번째 하중 사이클에서 Front Side에 4개의 수평균열이 발생하였고, Rear Side에도 마찬가지로 4개의 수평균열과 1개의 경사균열이 발생하였다. 이 후 추가적인 수평 균열과 균열의 확대가 이루어 졌으며, Drift Level=±3.0에서 피복 박리가 시작되었다. 또한 Drift Level=±5.0에서 피복 콘크리트 탈락이 시작되었으며, Drift Level=±8.0에서 종방향 철근이 4개 파단되고, Drift Level=±9.0에서 종방향 철근이 추가로 파단되면서 실험이 종료되었다. 파형강관 삽입 중공 교각은 첫 번째 하중 사이클에서 Front Side에 3개의 수평균열이 발생하였고, Rear Side에도 마찬가지로 4개의 수평균열이 발생하였다. 이 후 추가적인 수평균열과 균열의 확대가 이루어 졌으며, Drift Level=±3.0에서 피복 박리가 시작되었다. 또한 Drift Level=±4.0에서 경사 균열의 발생과 피복의 박리가 시작되었으며, Drift Level=±6.0에서 피복 콘크리트 탈락이 시작되었다. Drift Level=±5.0에서 횡철근의 연결부 용접이음이 파단되면서 기능을 상실하여, 주철근이 좌굴되어 Drift Level=±5.0 주철근이 6개 파단되고, 횡철근이 3개 파단되어, 실험이 종료되었다. 연성을 평가하는 방법으로는 변위 연성도, 곡률 연성도, 에너지 연성도 등이 있다. 본 연구에서는 연성도의 평가 방법으로 변위연성도와 에너지 연성도를 사용하였다. 에너지 연성도는 중실 교각의 경우 11.4, 파형강관 삽입 중공교각은 9.1로 나타났으며, 변위 연성도는 중실 교각은 6.8, 파형강관 삽입 중공교각은 5.6으로 나타났다. 같은 제원의 중공 R.C 교각의 에너지 연성도와 변위 연성도가 각각 7.5와 4.9인 점을 비교할 때⁸⁾, 파형강관의 삽입으로 중공 R.C 교각의 연성이 증가하였음을 알 수 있다.

5. 결론

중실 단면 R.C 교각과 파형강관으로 내부 구속된 중공 R.C 교각의 준정적 실험 수행 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 중공 R.C 교각의 내부를 파형강관으로 구속하면, 내부 구속력의 증대로 인하여 연성의 증대를 기대할 수 있으며, 중공 R.C 교각 대비 약 21%의 에너지 연성도 증가를 기대할 수 있다.
- (2) 파형강관으로 내부 구속된 중공 R.C 교각은 일반 중실 단면 R.C 교각에 비해 약 80%의 에너지 연성도를 가지며, 삼입 파형강관의 두께를 증가 시킨다면 거의 동일한 연성도를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 산·학·연 공동연구개발사업[건설교통기술혁신사업] 과제 연구의 일부로서, 『건설교통기술평가원』의 지원과, 『(주)대우건설』의 부분지원으로 이루어졌으며, 지원기관에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

- 1) Mander, J. B., Priestly, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 114, No. 8, Aug. 1988, pp. 1804-1826
- 2) Scott, B. D., Park, R., and Priestley, M. J. N., "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates," *ACI Journal*, Proceedings V. 79, No. 1, Jan.-Feb. 1982, pp. 13-27.
- 3) 한택희, 조인석, 강영중, 이명섭, "내부 구속 중공 R.C 교각의 연성도 평가", 한국지진공학회 학술발표 논문집, Vol. 9, No. 1, 2005, pp353~360
- 4) Kang, Y. J., Kim, D. Y., Lee, S. G., Han, T. H. and Kim, Y. J., "Ductility of Circular Hollow Reinforced Concrete Piers Internally Confined by a Steel Tube", *Proceedings of The First International Conference on Steel and Composite Structures*, Vol. 2, January 2001, pp. 1301-1310.
- 5) 한승룡, 임남형, 강영중, 이규세, "강관보강 중공 R.C 기둥의 연성 평가 해석", 한국강구조학회 논문집, 제15권 1호, 2003, pp. 1-8.
- 6) 한택희, 임남형, 박남희, 강영중, "원형파형 관의 탄성전단좌굴 특성", 한국강구조학회 논문집, 제14권 제4호, 2002, pp 529-538
- 7) 안우철, 한택희, 임남형, 강영중, "등분포하중을 받는 파형강관의 좌굴거동", 한국강구조학회 논문집, 제15권 1호, 2003, pp 33-40
- 8) 임정순, 김성칠, 조재병, 이수근, "파형강관을 삼입한 중공원형단면 철근콘크리트 부재의 거동에 관한 연구", 한국도시방재학회 논문집, Vol.3 No.1, 2003, pp. 123-131