

내부 구속 중공 R.C 교각의 연성도 평가

Ductility Evaluations of Internally Confined Hollow R.C Piers

한택희¹⁾ 조인석²⁾ 강영종³⁾ 이명섭⁴⁾
Han, Taek Hee Cho, In Seuck Kang, Young Jong Lee, Myeong Sub

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 Pier may have poor ductility because of the brittle failure at the inner face of the hollow R.C Pier. This brittle failure results from the absence of the confinement at the inner face of the hollow R.C Pier. To avoid this brittle failure an internally confined hollow R.C Pier was developed. Test results show that the energy ductility ratio of an internally confined hollow R.C Pier has a superior energy ductility ratio to a general hollow R.C Pier.

1. 서론

우리나라는 전 국토의 70%가 산악지역이며, 특히 행정구역은 총면적의 62%가 산지로 되어 있다. 따라서 국내의 도로망은 산악지역을 관통하거나, 우회하는 형식이 많다. 이러한 경우, 산악지역을 대규모로 성토 또는 절토하여야 하는 경우가 많이 발생하여 환경훼손의 주범이 되고 있다. 따라서 교량의 장대화와 함께 도로망에 건설되는 교량교각의 구체 높이를 상당히 높이고, 시공에 소요되는 범위와 절토량을 감소시킴으로써 환경훼손을 최소화시킬 수 있는 교각구조의 개발이 필요하게 되었다. 또한 교량이 장대화 되고, 교각의 높이가 높아짐에 따라 발생하는 자중증가에 따른 과도한 설계지진력을 감소시킬 수 있는 교각의 필요성이 대두되었다. 이러한 필요에 의해 개발된 교각구조가 바로 중공 안쪽 면에 강관이 삽입된 원형 중공 R.C 고교각이다.

현재 설계·시공되고 있는 고교각의 구조는 R.C 구조가 대부분이다. R.C 구조의 경우, 단면 최소화에 따라 발생된 강성부족은 철근이 담당하도록 되어 있다. 이 때문에 결과적으로 이러한 교각은 철근량이 많은 구조물이 된다. 1996년도에 개정된 일본의 도로교시방서는 교각의 띠철근 및 중간띠철근을 조밀하게 배근하여 충분한 강성을 갖도록 하는 규정을 포함하고 있다. 그러므로 일반 중공 R.C 고교각의 경우 조밀한 철근배근이 필수적이다. 또한 전단에 취약하며 높은 축력비에

1) 고려대학교 사회환경시스템공학과, 박사과정
2) 고려대학교 사회환경시스템공학과, 석사과정
3) 고려대학교 사회환경시스템공학과, 교수
4) 삼성물산 건설부문, 부장

서 중공 안쪽면의 압괴로 취성거동을 보임으로써, 연성증가를 위한 기술개발이 요구되었다.

중공교각의 이러한 단점은 원형강관을 중공면 내부에 삽입함으로써 심부 콘크리트에 대한 구속효과의 발현으로 해결할 수 있다. 과밀한 철근배근을 피함과 동시에 시공성을 확보할 수 있으며, 강관에 의한 축력분담과 연성증가를 기대할 수 있다. 이런 관점에서 강관이 삽입된 중공교각은 연성이나 강도 측면에서 매우 효율적인 구조라 할 수 있다. 일반 중공단면의 기둥은 역학적으로 모멘트 저항 능력이 충실단면의 기둥에 비해 떨어지지 않아 그 활용가치가 큰 것으로 평가되어왔다. 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 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⁾ 해석적⁴⁾으로 강관삽입 중공기둥의 우수한 연성능력을 검증하였으며, 이의 결과는 그림 1과 같다. 본 연구에서는 내부구속 중공 R.C 교각과 일반 중공 R.C 교각의 준정적 실험을 수행하여, 변위연성도와 에너지연성도를 비교하여 각 기둥의 연성도를 평가하였다.

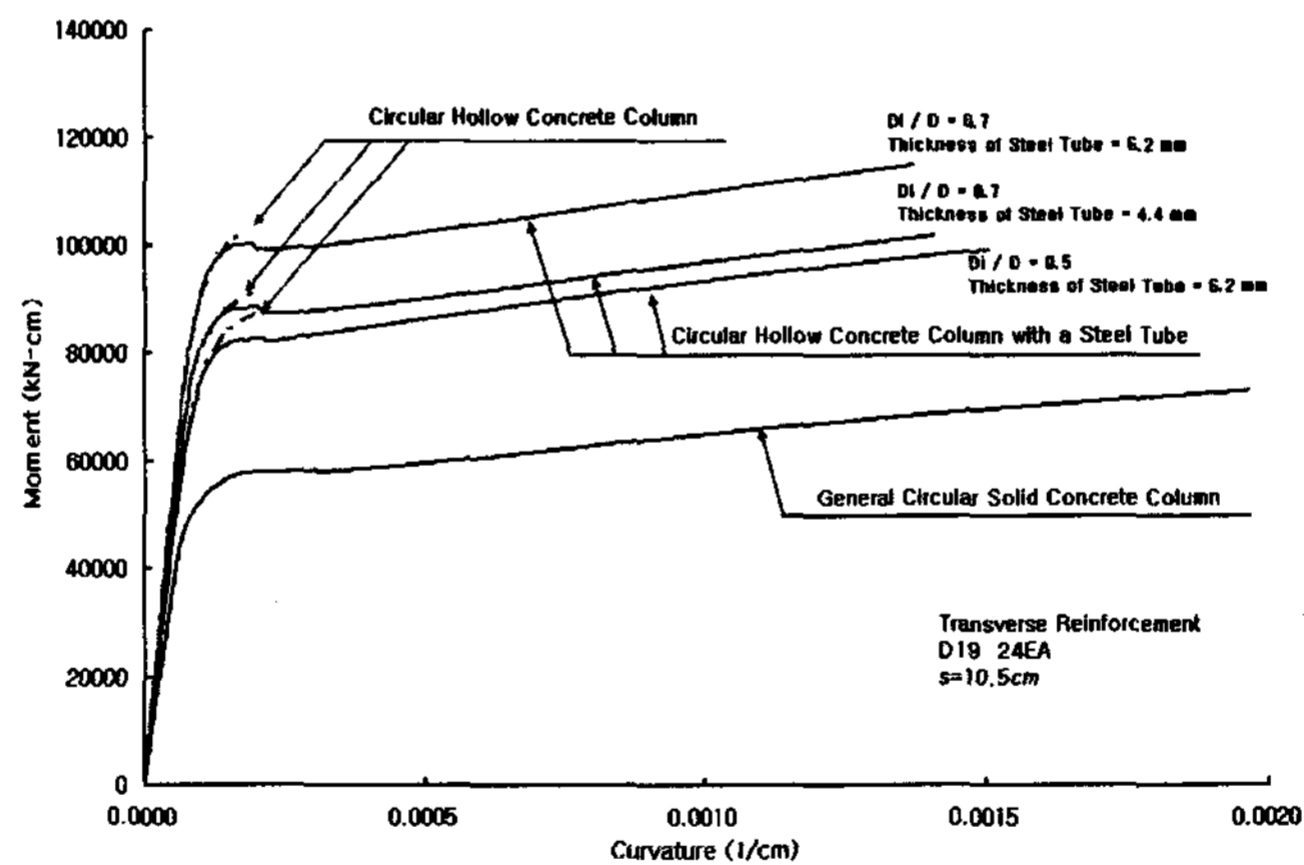


그림 1. 강관 삽입 중공 기둥의 모멘트-곡률 해석

2. 시험체의 설계

본 연구에서는 일반 중공 R.C 교각(IUH Pier)과 강관을 삽입하여 내부를 구속한 중공 R.C 교각(ICH Pier), 2개 기둥에 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 결정하였다. 삽입 강관으로는 전기저항용접 강관 파일(ERW, KSF 4602)로 외경이 406.4mm인 강관을 사용하였다. 설계시 적용된 물성치는 표 1과 같다. IUH Pier의 경우, 외경(D)은 700mm, 내경(Di)은 406.4mm로 설계를 하였다. 종방향 철근비의 경우에는 콘크리트 구조설계 기준에서 제시하는 규정에서 가장 최소의 값에 근접하도록 설계하였다. ICH Pier는 IUH Pier와 같은 제원에 강관을 추가하여 설계하였다. 각 설계 과정은 다음과 같다.

표 1. 사용 재료의 물성치

| 재료 종류 | 단위중량 | 파괴강도 또는 항복강도 |
|-----------|------------------------|--|
| 콘크리트 | 2.7ton/m ³ | 151.467 kgf/cm ² |
| 강관(SM400) | 7.85ton/m ³ | 2551.020408 kgf/cm ² (250MPa) |
| 철근 | 7.85ton/m ³ | 3000 kgf/cm ² |

(1) 단면 형상에 따른 기본 계산

외경 : 700mm, 내경 : Di = 406.4 mm,

$$\text{전체 단면적} : A_g = \frac{\pi}{4}(700^2 - 406.4^2) = 255127.9854 \text{ mm}^2 \quad (\text{식 1})$$

$$\text{종방향 철근 면적} : A_s = \frac{\pi}{4} \times 19^2 \times 12 = 283.529 \times 12 = 3402.345 \text{ mm}^2 \quad (\text{식 2})$$

$$\text{순수 Concrete 단면적} : A_c = A_g - A_s = 251725.6406 \text{ mm}^2 \quad (\text{식 3})$$

(2) 종방향 철근비

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

$$0.1 < \rho < 0.08 \quad (\text{식 4})$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_g} = \frac{3402.345 \text{ mm}^2}{255127.9854 \text{ mm}^2} = 0.0133 = 1.33\% \quad (\text{식 5})$$

(3) 횡방향 철근비

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 5와 같다.

$$\rho_s \geq 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \quad , \quad f_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2 \quad , \quad f_y = 3000 \text{ kgf/cm}^2 \quad (\text{식 3.8-5})$$

이를 적용하여 대입하면, 식 3.8-6과 같다.

$$\rho_s \geq 0.45 \left(\frac{255127.9854}{251725.6406} - 1 \right) \times \frac{240}{3000} = 0.000486579 = 0.0486579 \% \quad (\text{식 6})$$

시험체의 횡철근비는 아래와 같이 계산된다.

$$D_c = 406.4 + 187.6 = 594 \text{ mm} \quad (\text{식 7})$$

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{D_c \cdot s} = \frac{4 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2}{594 \times 67} = 0.01334 > 0.0001424 \quad \text{O. K} \quad (\text{식 8})$$

(4) 강관의 설계

강관과 횡철근의 평형 조건 : $2f_{yh} \cdot A_{sp} = f_l \cdot D_c \cdot s$ (식 9)

강관과 횡철근이 동시에 파괴 될 때의 강관의 강도 :

$$f_l = \frac{2f_{yh} \cdot A_{sp}}{D_c \cdot s} = \frac{\rho_s}{2} f_{th} = \frac{0.0133}{2} \times 3000 = 19.95 \text{ kgf/cm}^2$$
 (식 10)

강관보다 횡철근이 먼저 파괴될 조건 :

$$f_{cr} > f_l, \quad \frac{3 \times 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 \times \frac{t^3}{12}}{\left(\frac{406.4 \text{ mm}}{2}\right)^3} > 19.95 \text{ kgf/cm}^2$$
 (식 11)

$$t^3 > \frac{19.95 \text{ kgf/cm}^2}{3 \times 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2} \times 12 \times \left(\frac{406.4 \text{ mm}}{2}\right)^3 = 309.9571 \text{ mm}^3, \quad t > 6.7676 \text{ mm}$$
 (식 12)

따라서 삽입 강관의 두께는 6.7676mm 보다 크면 조건을 만족하며, 안전율과 기성제품의 제원에 맞춰 강관의 두께를 9mm로 결정하였다.

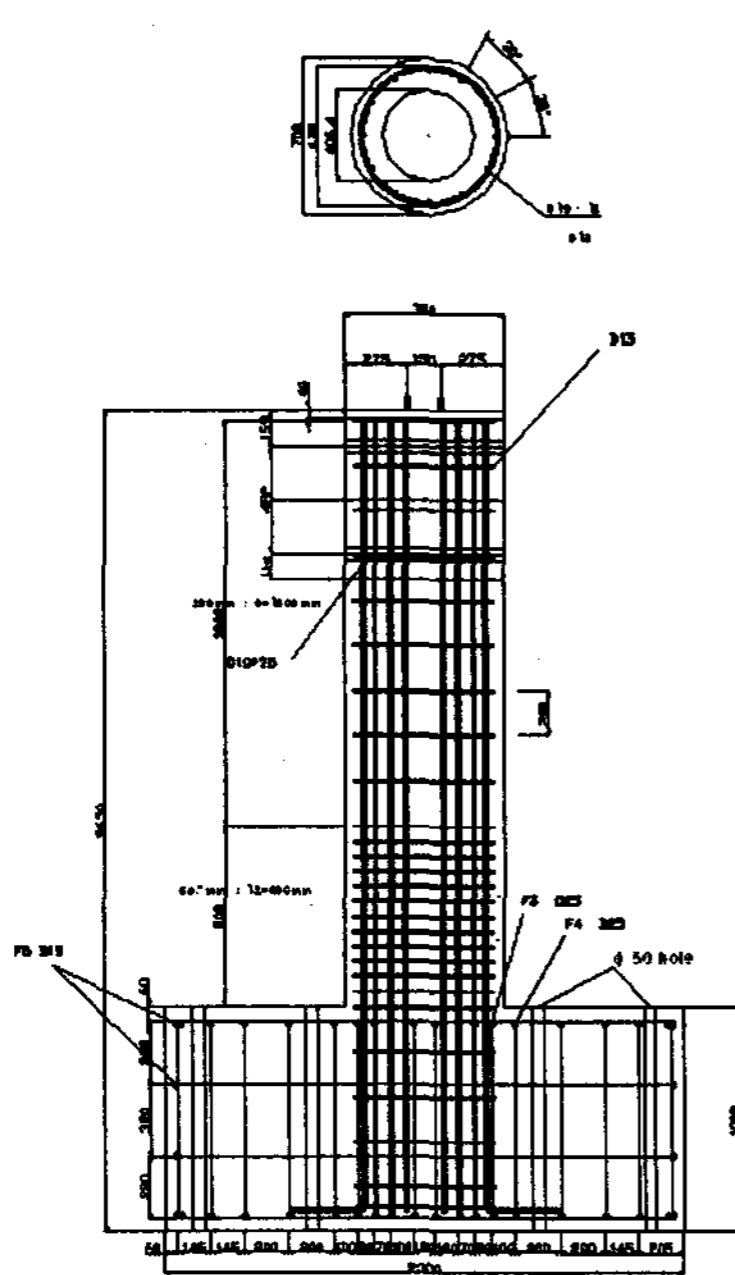


그림 2. IUH Pier 설계도면

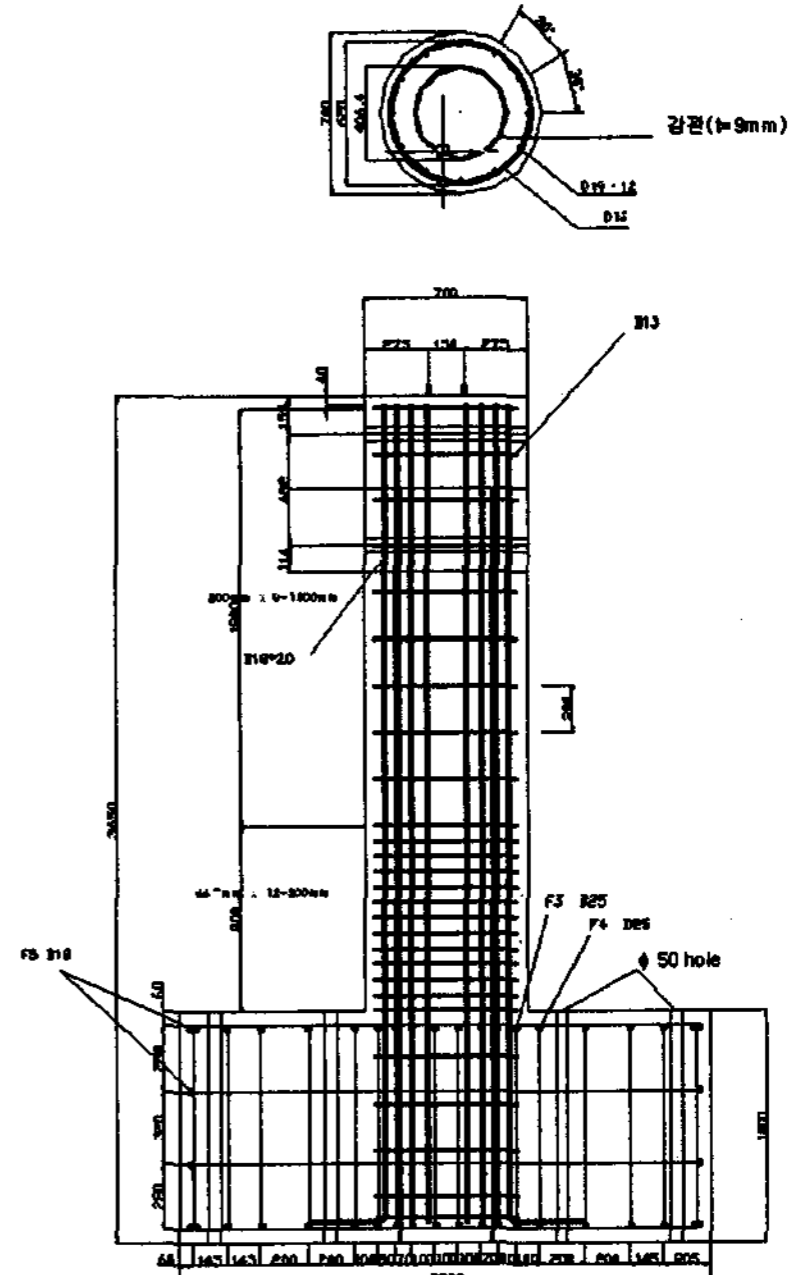


그림 3. ICH Pier 설계도면

3. 실험 방법

구조물의 비탄성 거동은 여러 해석 방법에 의해 비탄성 응답을 예측하더라도 구조물이 수학적 이상화로 단순화 되거나, 비탄성 부재물성에 의해 그 결과는 불확실성의 한계가 있다. 따라서 실험에 의한 연구가 구조물의 비탄성 거동을 평가하는데 가장 실제적인 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 실행되어진 준정적 실험은 서로 다르게 설계된 구조물의 비탄성 에너지 소산능력과 파괴상태를 평가 비교하기

에 가장 경제적이고 유용한 실험 방법으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 이러한 준정적 실험을 수행하여 각 기둥의 연성도를 평가하였다.

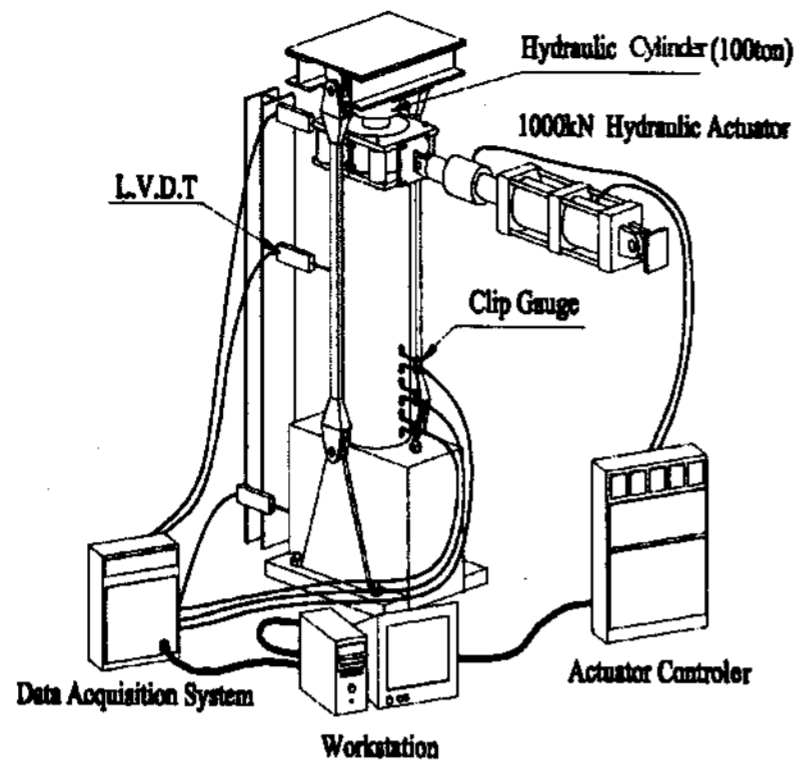


그림 4. 준정적 실험 구성 개요도

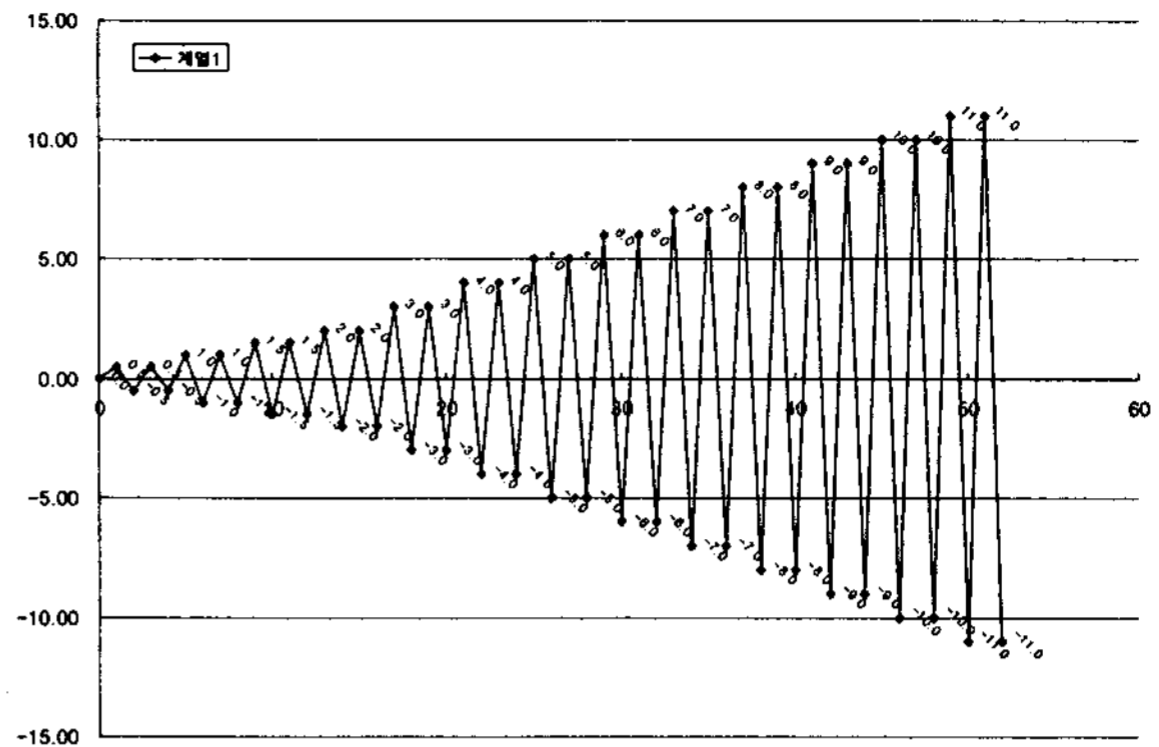


그림 5. 시험체의 가력 Drift Level

횡방향 하중의 재하는 교각 시험체의 높이에 대한 수평방향 변위의 비로 나타내는 Drift Level로 하중을 재하하는 방법을 사용하였다. 본 실험에서는 Quasi Static loading을 이용하여 각 단계별 Drift Level은 그림 5와 같이 2cycle로 파괴 시까지 재하함으로써 거동특성과 파괴양상을 살펴보고자 하였다. 또한 실험중 Drift level의 증가에 따라 발생된 균열 및 파괴양상이 진전되는 것을 각 Drift단계마다 조사하였다. 실험에서 가력장치는 기초 상단에서 2.25m 위치에 설치하였다. 가력장치의 stroke는 $\pm 250\text{mm}$ 로 최대횡하중은 200tonf 인 가력장치를 사용하여 시험체의 예상 파괴변위와 내력을 상회하도록 하였다. 그림 6은 횡하중 재하를 위해 시험체를 설치한 사진이다.

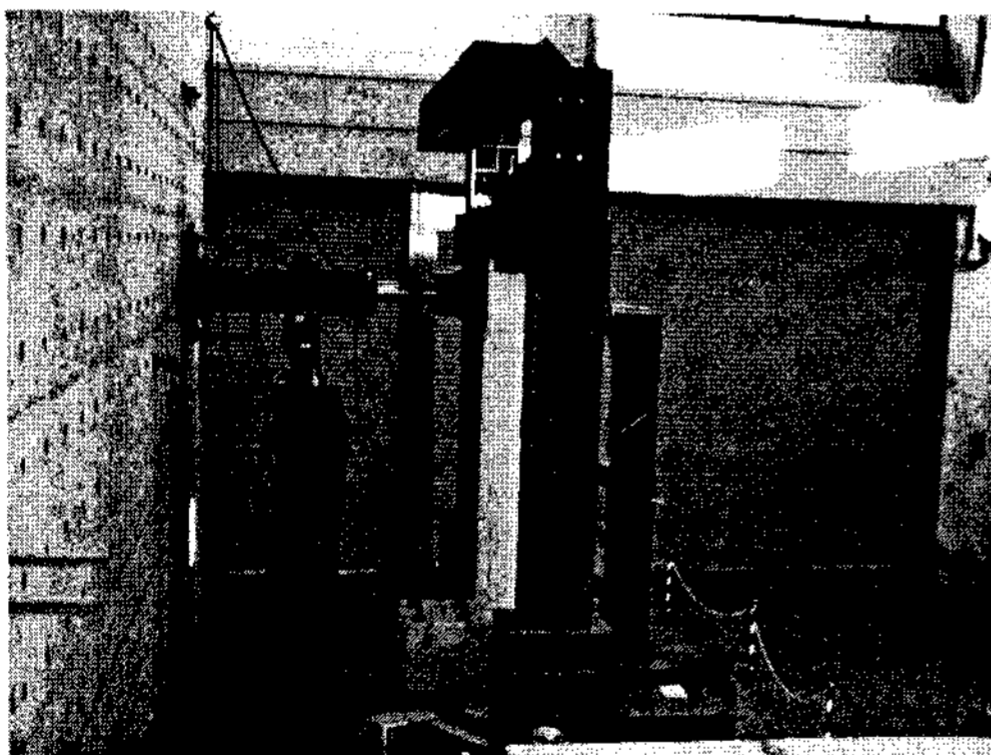


그림 6. 하중 재하를 위해 설치된 시험체

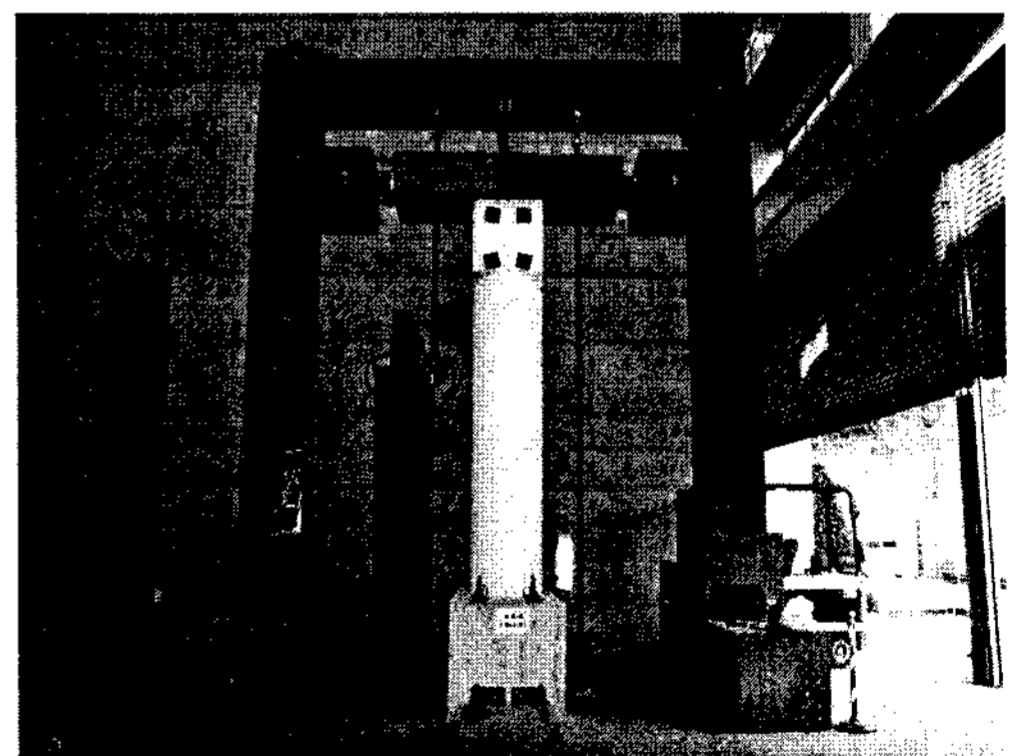


그림 7. 축력 재하를 위해 설치한 시험체

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 쉬스관을 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 7은 축력 재하를 위해 시험체를 설치한 모습이다.

4. 실험 결과

실험 결과 모든 시험체에서 첫 번째 하중 사이클인 Drift Level= ± 0.5 에서 기초 상단으로부터 120cm 지점까지 수평균열이 발생하였다. 이후 Drift Level= ± 1.5 까지 균열이 추가되고, 기존의 균열이 추가로 진행되었으며, Drift Level= ± 3.0 부터 균열폭이 확대되고 피복 박리가 시작되었다. 이때부터는 더 이상의 균열은 발생하지 않고, 수직균열이 발생하여 기둥 하단부가 파손되는 경향을 보였다. ICH Pier의 경우에는 큰 수평균열 이후에 추가되는 균열이 많지 않고, 기존의 균열이 계속 진행되고, 폭이 확대되는 경향을 보인 반면, IUH Pier의 경우에는 균열폭의 확대보다는 계속해서 다른 위치에 균열이 추가로 발생하는 경향을 보였다. 피복 콘크리트의 박리 후 주철근의 파단이 발생하는 전형적인 휨과괴의 특성을 나타내었다. 모든 시험체에서 Drift Ratio가 Drift Level= ± 8.0 정도에서 종방향 철근이 파단되었으며, 종방향 철근의 파단 전까지는 비교적 안정적인 이력곡선의 특성을 보이다가 종방향 철근의 파단 이후 급격한 하중 저하현상을 관찰할 수 있었다. ICH Pier의 경우에는 큰 강성을 나타내었는데, 이는 삽입된 강관이 콘크리트를 내부에서 구속할 뿐만 아니라, 휨강성에도 기여를 하기 때문으로 판단된다. 또한 횡방향 반복하중을 기둥 시험체에 재하하는 경우에는 먼저 +방향으로 가력하고 동일한 변위를 -방향으로 가력하기 때문에 +방향이 -방향보다 더 큰 강성을 나타내게 된다. 이는 동일한 변위를 재하하더라도 -방향의 경우 이미 +방향으로 하중을 경험한 상태로서 콘크리트 균열과 잔류변형이 누적된 상태에서 재하하기 때문이다. 따라서 최대하중도 +방향보다 -방향에서 다소 작게 나오는 것이 일반적이라 할 수 있다. IUH Pier의 경우에는 내부에 거푸집 대응으로 삽입된 PVC관이 내부 콘크리트의 박리 및 탈락을 방지하고, 구속효과를 어느 정도 발휘함으로써, 예상보다 높은 강도와 연성을 나타내었다.

(1) IUH Pier

IUH Pier는 첫 번째 하중 사이클에서 Front Side에 5개의 수평균열이 발생하였고, Rear Side에도 마찬가지로 5개의 수평균열이 발생하였다. 이 후 추가적인 수평균열과 균열의 확대가 이루어졌으며, Drift Level= ± 3.0 에서 피복 박리가 시작되었고, Level= ± 4.0 에서부터 내측면의 콘크리트가 분리되는 듯 한 소리가 계속 발생하였다. 또한 Drift Level= ± 5.0 에서 피복 콘크리트 탈락이 시작되었으며, Drift Level= ± 7.0 에서 종방향 철근이 1개 파단되고, Drift Level= ± 8.0 과 Drift Level= ± 9.0 에서 종방향 철근이 각각 추가로 1개씩 파단되면서 실험이 종료되었다. IUH Pier의 경우에는 내부에 거푸집 대응으로 삽입된 PVC관이 내부 콘크리트의 박리 및 탈락을 방지하고, 구속효과를 어느 정도 발휘함으로써, 예상보다 높은 강도와 연성을 나타내었다.

(2) ICH Pier

ICH Pier은 첫 번째 하중 사이클에서 Front Side에 4개의 수평균열이 발생하였고, Rear Side

에도 마찬가지로 4개의 수평균열이 발생하였다. 이 후 추가적인 수평균열과 균열의 확대가 이루어졌으며, Drift Level=±3.0에서 피복 박리가 시작되었다. 또한 Drift Level=±4.0에서 경사균열의 발생과 피복의 박리가 시작되었으며, Drift Level=±6.0에서 피복 콘크리트 탈락이 시작되었다. Drift Level=±7.0에서 주철근이 2개 파단되고, 횡철근이 2개 파단되었다. Drift Level=±8.0에서 종방향 철근이 3개와 횡방향 철근 1개가 추가로 파단되면서 실험이 종료되었다.

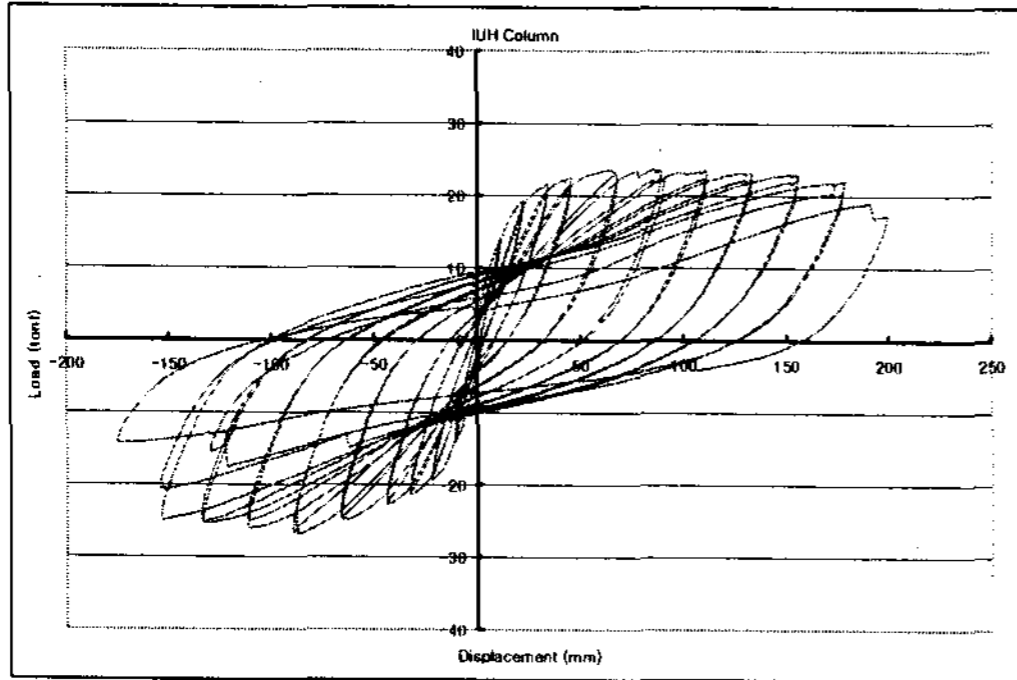


그림 8. IUH Pier의 하중-변위 이력곡선

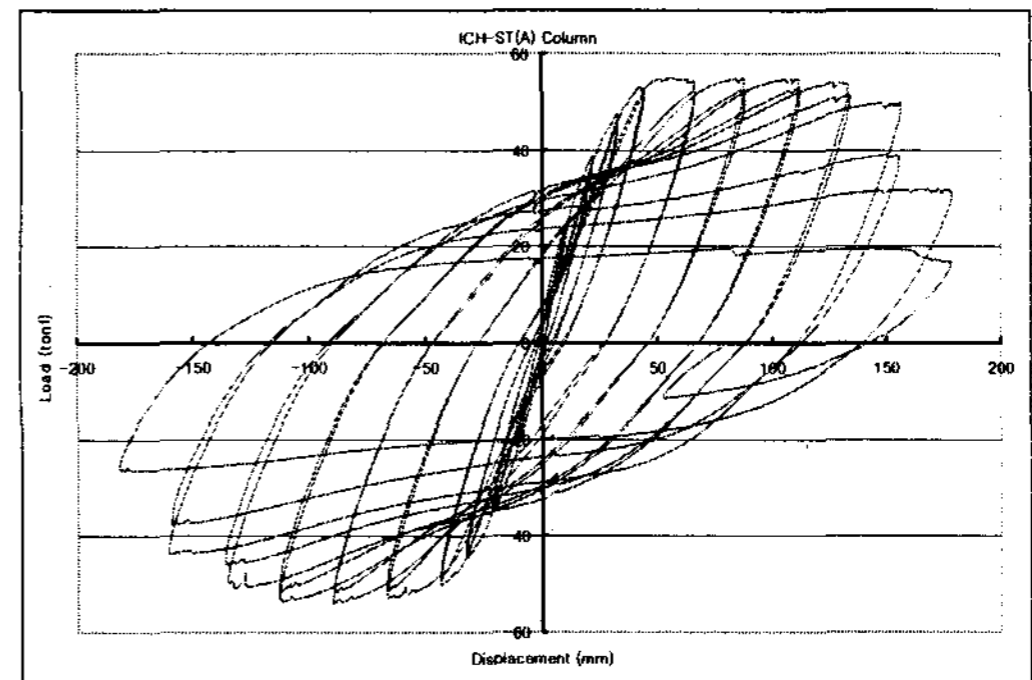


그림 9. ICH Pier의 하중-변위 이력곡선

(3) 에너지 연성도

표 2. IUH Pier의 단계별 에너지

| Displacement (mm) | Load (tonf) | Energy (tonf-mm) | Accumulated Energy (tonf-mm) |
|-------------------|-------------|------------------|------------------------------|
| 11.263 | 13.872 | 78.122 | 78.122 |
| 22.117 | 19.095 | 178.903 | 257.026 |
| 32.000 | 21.200 | 199.126 | 456.152 |
| 33.298 | 21.294 | 27.585 | 483.738 |
| 44.412 | 22.335 | 242.431 | 726.169 |
| 65.230 | 24.031 | 482.637 | 1208.806 |
| 87.338 | 24.654 | 538.170 | 1746.976 |
| 110.750 | 24.234 | 572.272 | 2319.247 |
| 132.200 | 24.045 | 517.795 | 2837.042 |
| 153.100 | 22.737 | 488.867 | 3325.909 |
| 157.000 | 20.715 | 84.730 | 3410.640 |
| 166.000 | 19.700 | 181.868 | 3592.507 |
| 178.275 | 17.010 | 225.310 | 3817.817 |

표 3. ICH Pier의 단계별 에너지

| Displacement (mm) | Load (tonf) | Energy (tonf-mm) | Accumulated Energy (tonf-mm) |
|-------------------|-------------|------------------|------------------------------|
| 11.037 | 23.548 | 129.948 | 129.948 |
| 21.955 | 36.732 | 329.082 | 459.030 |
| 32.877 | 45.912 | 451.306 | 910.336 |
| 33.000 | 46.100 | 5.674 | 916.010 |
| 43.647 | 51.278 | 518.376 | 1434.386 |
| 64.710 | 52.780 | 1095.902 | 2530.289 |
| 88.672 | 53.351 | 1271.530 | 3801.819 |
| 111.650 | 53.333 | 1225.705 | 5027.524 |
| 132.050 | 50.592 | 1060.038 | 6087.562 |
| 155.550 | 42.631 | 1095.376 | 7182.938 |
| 156.000 | 42.681 | 19.195 | 7202.134 |
| 176.575 | 25.475 | 701.152 | 7903.286 |

연성을 평가하는 방법으로는 변위 연성도, 곡률 연성도, 에너지 연성도 등이 있다. 본 연구에

서는 연성도의 평가 방법으로 에너지 연성도를 사용하였다. 에너지 연성도는 IUH Pier의 경우, 7.5로 나타났으며, ICH Pier는 7.9로 나타났다. 이처럼 IUH Pier의 에너지 연성도가 크게 나타나 두 시험체간의 연성도 차이가 그리 크지 않은 것은 IUH Pier의 내부 중공을 만들기 위하여 거푸집으로 사용한 PVC Pipe($t=1\text{cm}$)의 영향으로 판단되며, 이는 작은 강성으로도 내부 구속력을 발휘할 수 있음을 의미한다. 표 2와 3에서 나타난 바와 같이, 파괴 때까지 흡수된 에너지는 ICH Pier의 경우 7903ton-mm로서, 3817tonf-mm를 갖는 IUH Pier에 비해 거의 2배의 에너지를 흡수하였음을 알 수 있다.

5. 결론

내부 구속된 중공 R.C 교각과 내부 구속되지 않은 일반 R.C 중공 교각의 준정적 실험 수행 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 중공 R.C 교각의 내부를 구속하여, 내부 구속력을 발휘시키면 교각의 연성도 증가를 유도할 수 있다.
- (2) 내부 구속력을 발휘시키기 위한 삽입관은 작은 강성으로도 충분한 강성을 발휘한다.
- (3) 강관으로 내부 구속된 중공 R.C 교각은 삽입강관의 강성으로 더 큰 모멘트에 저항하며, 파괴 때까지 더 많은 에너지를 흡수한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 산·학·연 공동연구개발사업[건설교통기술혁신사업] 과제 연구의 일부로서, 『건설교통기술평가원』의 지원과, 『삼성물산 건설부문』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) 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.
- 4) 한승룡, 임남형, 강영종, 이규세, "강관보강 중공 R.C 기둥의 연성 평가 해석", 한국강구조학회 논문집, 제15권 1호, pp. 1-8.