

강관 코아 합성 중공 기둥의 연성 거동 연구

Ductility of Circular Hollow Columns with Internal Steel Tube

강영종¹⁾ 한승룡²⁾ 박남희³⁾
Kang, Young-Jong Han, Seung-Ryong Park, Nam-Hoi

Abstract

In locations where the cost of concrete is relatively high, or in situations where the weight of concrete members is to be kept to a minimum, it may be economical to use hollow reinforced concrete vertical members. Hollow reinforced concrete columns with low axial load, moderate longitudinal steel percentage, and a reasonably thick wall were found to perform in a ductile manner at the flexural strength, similar to solid columns. However, hollow reinforced concrete columns with high axial load, high longitudinal steel percentage, and a thin wall were found to behave in a brittle manner at the flexural strength, since the neutral axis is forced to occur away from the inside face of the tube towards the section centroid and, as a result, crushing of concrete occurs near the unconfined inside face of the section. If, however, a steel tube is placed near the inside face of a circular hollow column, the column can be expected not to fail in a brittle manner by disintegration of the concrete in the compression zone. Design recommendation and example by moment-curvature analysis program for curvature ductility are presented. Theoretical moment-curvature analysis for reinforced concrete columns, indicating the available flexural strength and ductility, can be conducted providing the stress-strain relation for the concrete and steel are known. In this paper, a unified stress-strain model for confined concrete by Mander is developed for members with circular sections.

1. 서 론

교량의 내진설계에 있어서 많은 부분은 차지하는 교각에 있어서 중공 기둥은 싼 재료비와 낮은 중량으로 많은 이점이 가진다. 하지만 큰 하중하에서 구속받지 못한 중공 안쪽 면에서의 압괴는 교각의 취성적인 거동을 야기한다. 이런 거동은 중공교각의 휨강도에 큰 영향을 끼치는 중립축의 위치에 따라 결정되며 적은 축하중과 종방향 철근비에서만 연성적인 거동을 보일 수 있다. 중공교각의 장점을 이용하고 중공 단면 안쪽 면에서의 파괴를 막기 위해 중공교각의 안쪽면에 원형 강관을 삽입한다. 그 결과 구속받지 못한 중공 단면 안쪽면의 구속효과 증대로 중공 교각의 연성 증가를 가져올 수 있다. 교각의 소성 한지부의 곡률 연성을 산정하는 이론적인 방법으로는 모멘트-곡률 해석(Moment-Curvature Analysis)이 있다. 현재 많은 상용 해석 프로그램이 나와 있지만 강관의 삽입 효과를 나타낼 수 있는 해석 프로그램은 존재하지 않으므로 직접 해석 프로그램을 개발하고 상용 프로

1 고려대학교 교수, 정회원
2 동성엔지니어링 사원, 정회원
3 고려대학교 박사과정, 정회원

그림의 원형기둥과 중공기둥 해석치와 비교하여 그 타당성을 입증한다. 그 결과를 토대로 하여 매개 변수 해석을 수행하고 강관 코아 합성 중공 기둥의 거동특성을 연구한다.

2. Moment-Curvature Analysis

연성을 평가하기 위하여 가장 흔히 사용되는 방법이 모멘트-곡률해석이다. 모멘트-곡률해석은 정적 하중하에서 재료의 비선형성을 고려한 해석법이며, 곡률 연성을 산정하며 연성 계수를 구하는 방법이다. 본 연구에서는 모멘트-곡률 해석 방법을 통해 강관 코아 합성 중공 기둥과 원형 R.C 기둥의 연성 능력을 비교하고 연성을 향상 시킬 수 있는 적절한 횡철근비 규정을 제안하고 강관 코아 합성 중공 기둥이 가지는 응답수정계수를 제시할 것이다.

콘크리트 기둥에 있어서 강도의 평가에만 국한되지 않고, 응력-변형도 관계에 따른 연성의 확보에 대한 문제를 규명하기 위해 횡방향으로 구속된 콘크리트 기둥의 응력-변형률 곡선에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 실험적으로, 혹은 해석적으로 이루어졌는데 응력-변형률 곡선의 모델화 방법에 있어서는 여러 가지가 있다. 본 연구에서 콘크리트 모델은 선형과 비선형의 통합된 모델을 제시한 Mander의 콘크리트 모델을 사용하였다.

2.1 Mander의 콘크리트 모델

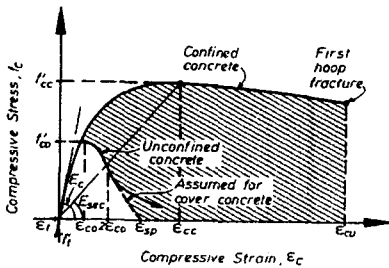


그림 1. 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계

의해 제안된 다음의 제안식은 어떤 단면 형상에 대해서도 적용이 가능하고 구속조건의 변화를 잘 표현할 수 있고, 통합된 응력-변형률 관계를 제시하여 준다. 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트의 관계는 식 2-1과 식 2-2로 나타낼 수 있으며 또한 강관 삽입 중공 원형 R.C기둥의 구속응력은 Fig 2의 자유 물체도로부터 유도 될 수 있다. 원형 R.C 기둥과 동일한 콘크리트의 구속 응력을 갖도록 하기 위하여 중공면에 강관을 삽입했다는 점이 일반 중공 단면의 기둥과 다른 점이다. 따라서 콘크리트의 구속응력이 강관을 따라 균일하게 작용한다는 가정하에서 아치의 반력으로써 구속응력을 계산하였다. 강관과 횡방향 철근에 의한 콘크리트의 구속응력은 식 2-3과 같다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = (-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_i}{f'_c}} - \frac{2f'_i}{f'_c}) \quad (2-1)$$

$$\epsilon'_{ccc} = 0.002[1 + 5(f'_{cc}/f'_c - 1)] \quad (2-2)$$

2.1.1. 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계

횡방향철근의 목적은 구속효과를 발휘하여 콘크리트의 압축 강도와 종국변형을 증대시키는 것이다. 그 관계를 Fig 1과 같고 압축강도와 종국변형의 증가가 확연히 드러나 있다. 이러한 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 나타내기 위해 여러 가지 콘크리트의 응력-변형률 관계가 제안되어 왔다. 이들의 대부분은 선형부분과 비선형부분이 분리되어 통합된 콘크리트 응력-변형률 관계를 제안하지 못했다. 그래서 콘크리트 모델들을 그대로 구속조건이 다른 강관 코아 합성 중공 기둥에 적용하기에는 무리가 있었다. 하지만 Mander에

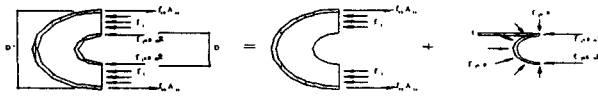


그림 2. 강관 코아 합성 중공 기둥의 자유물체도

$$f_l = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{[(D'-D)+2R]s} \approx \frac{2f_{yh}A_{sp}}{D's}$$

2.1.2 콘크리트 극한변형률(ϵ_{cu})의 관계

콘크리트의 극한변형률은 횡구속철근이 파괴시 콘크리트 종방향 변형률로 정의되며, 이것은 횡구속 철근이 최대 응력까지 인장되었을때의 최대변형에너지량과 구속됨으로써 콘크리트에 흡수되는 에너지의 증가량이 같게 놓음으로써 구할 수 있다. 이러한 정의에 따라 Mander et al(1984)는 극한 변형률 공식을 강관 코아 합성 기둥에 관한 식을 변환하여 다음 식을 도출하였다.

$$U_{sh} = U_{cc} + U_{sc} - U_{co}$$

U_{sc} : 주철근과 강관의 변형 에너지

U_{sh} : 구속 콘크리트 체적당 횡철근의 극한 변형률 에너지

U_{cc} : 구속 콘크리트의 극한 변형 에너지

U_{co} : 콘크리트의 변형 에너지

$$\rho_s A_{cc} \cdot \int_0^{\epsilon_{sh}} f_s d\epsilon_s = A_{cc} \cdot \int_0^{\epsilon_{cu}} f_c d\epsilon_c + \rho_{sc} A_{cc} \cdot \int_0^{\epsilon_{cu}} f_{sl} d\epsilon_c - A_{cc} \cdot \int_0^{\epsilon_{cu}} f_s d\epsilon_s$$

상기의 식은 실무의 적용에 어려움을 줌으로 Prestley등은 보수적인 변형률 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \epsilon_{su}}{f'_{cc}}$$

여기서 횡철근비는 $\rho_s = \frac{4DA_{sp}}{(D'^2 - D^2)} \rho_{sc}$ 이며, 주철근비(ρ_{sc})는 구속 콘크리트의 단면적(A_{cc})에 대한 주철근량(A_{sp})와 강관의 단면적(A_s)의 합으로 나타낼 수 있다.

3. 작성프로그램을 통한 매개변수 분석

(2-5)

강관 코아 합성 중공 기둥의 매개변수 연구를 수행하기에 앞서서 먼저 원형 RC 기둥의 연성에 영향을 주는 인자를 살펴보면 다음과 같다.

$$R_\phi = \frac{\theta_u}{\theta_y} = \frac{E_c I_e}{M_n} \cdot \frac{\epsilon_{cu}}{c_u}$$

식 3-1을 보면 연성에 영향을 미치는 변수는 공칭 모멘트 강도, 단면 이차 모멘트, 극한 변형률, 콘크리트 극한 변형률 때의 중립축의 위치(c_u)를 들 수 있다. 여기에서 강관 코아 합성 중공 기둥의 연성에 영향을 미치는 세부 매개변수는 중공단면비, 축력비, 종방향철근비, 횡방향철근비 등이 있다. 철근비는 전체 단면에 대한 철근비와 중공 내부 면을 제외한 단면에 대한 축력비로 나뉘서 매개변수 연구를 수행할 것이다.

3.1. 원형 중실 단면의 해석

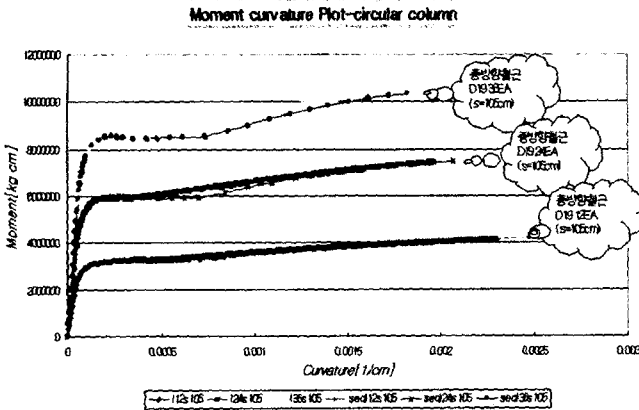


그림 3. 원형 중실 단면의 해석 결과 (s=105cm)

의하면 모멘트-곡률 해석에 있어서 극한 변형률은 보수적인 식을 사용하여도 좋다고 명시돼 있다. Mander의 극한변형률 식은 복잡한 수치계산에 의해 얻어져 계산이 복잡해 강관 코아 합성 중공 기둥에 있어서는 적용하기가 힘든 것도 사용 이유이다.

하지만 Priestly의 극한변형률 식은 중방향철근비의 영향을 고려하지 않고 있어서 중방향철근의 연성에 미치는 영향을 평가하지 않아 약간 보수적인 결과를 보인다. 중방향철근비가 커질수록 애러율이 커지며 중방향철근비가 최소한계인 1%정도에서 애러가 가장 적은 결과를 보인다. 최종적으로 곡률연성에 있어서는 중방향철근비가 미치는 영향은 미미하며 전체 모멘트-곡률 관계에 큰 영향을 미치지 않는다.

3.2 강관 코아 합성 중공 단면의 해석

강관 코아 합성 중공 단면의 연성에 영향을 미치는 변수는 중공단면비에 강관의 단면적이 추가된

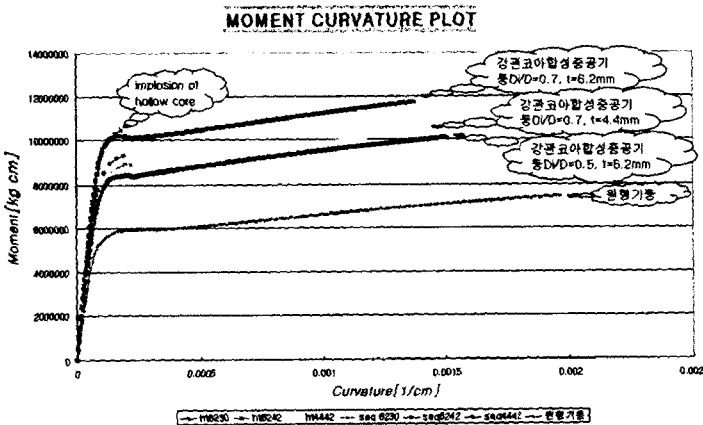


그림 4. 강관 코아 합성 중공 단면의 모멘트-곡률 해석

다. 강관의 단면적은 강관의 두께로 표현될 수 있는데 그 크기는 중공단면 안쪽에 강관이 위치하므로 중공단면비와 중복된다. Fig 4에서는 같은 중공단면비 2개와 같은 강관단면적 2개를 비교함으로써 어느 변수가 연성에 더 큰 영향을 미치는 알고자 함이다. 전반적인 매개변수 연구에서 강관의 단면적은 중공단면비에 비해 상대적으로 연성에 많은 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig 4의 윗부분의 두 개의 그래프는 같은 중공단면비에서 강관의 두께를 변화시켜 강관의 두께가 연성에 미치는 영

Fig 3은 횡방향철근비는 고정시키고 중방향철근비만을 변화시키면서 기존 모멘트-곡률 프로그램(SEQMC)과의 해석 결과와의 비교를 나타낸다. 굵은 선을 작성된 프로그램의 결과이며 가는 선이 seqmc의 해석결과이다. 단면의 항복모멘트와 극한모멘트는 거의 일치하며 그 양상에 있어서도 유사한 형태를 보인다. 극한 변형률에 있어서는 약간의 오차가 보이지만 이것은 극한변형률 계산에 있어서 Mander의 에너지 동치에 의한 극한변형률 공식보다 그 후 Priestley에 의해 제한된 보수적인 간략식을 사용했기 때문이다. Priestly의 Seismic Design and Retrofit of Bridges(1996)에

향을 알고자 했으나 거의 연성에 변화가 없는 것으로 나타난다. 이에 비해 위에서 첫 번째와 세 번째 그래프는 같은 강관 두께에 중공단면비를 변화시킨 것이다. 이는 강관의 면적으로 인한 연성에 미치는 효과보다 강관의 크기로 인한 중립축으로부터의 거리가 더 연성에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 강관 코아 합성 중공 기둥의 해석 결과로 볼 때 강관의 삽입은 연성에 있어 좋지 않은 영향을 미친다. 강관은 중방향 철근비와 같은 연성의 감소를 야기하며 강관보다 더 바깥쪽에 위치하는 중방향 철근비보다는 연성에 더 적은 영향을 미친다.

Fig 4의 결과에서 작성프로그램과 SEQMC가 거의 같은 양상을 보인다. 결과적으로는 원형단면에 비해 곡률연성은 조금 떨어진다. 하지만 구속조건의 변화에 의한 구속응력의 변화는 고려되지 않은 결과이다. 이 효과는 해석으로는 어려운 점이 있어 실험으로 검증될 것이다. 위에서 언급한 바와 같이 작성프로그램의 강관 코아 중공 합성 기둥의 해석결과는 약간 보수적인 결과를 나타낸다는 것을 밝혀둔다. 중공기둥과의 곡률연성 비교에 있어서는 약 6배 정도의 곡률연성의 증가를 보인다. 이 결과는 기둥내에서 강관이 콘크리트와 합성되어 횡철근의 파괴까지 구속응력을 발휘할 수 있다는 가정을 바탕으로 이루어진 것이다. 또, 강관 코아 합성 중공 단면의 해석 결과를 비교해 보면 같은

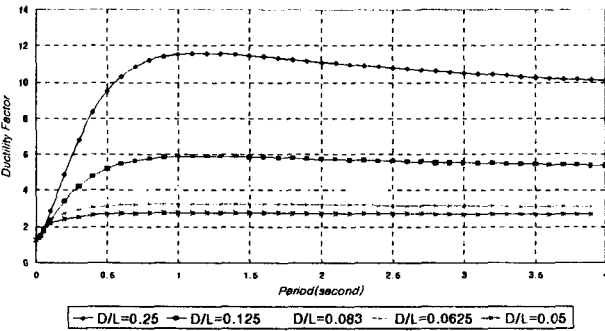


그림 5. 강관 코아 중공 합성 단면의 중공단면비 0.7에서의 응답수정계수 성계수에 영향을 받으며 그 관계를 나타낸 결과 중에서 주기의 영향을 고려할 수 있는 Krawinkler and Nassar(1992)의 연구결과를 이용하여 중공단면비 0.7에서의 강관 코아 합성 중공 기둥의 연성계수를 이끌어 냈다. 그 결과는 Fig 5와 같으며 기둥의 형상비 D/L의 함수로 나타내었다. 도로교 설계 기준의 응답수정계수에 해당하는 형상비 0.083에서는 주기가 0.5를 넘는다면 연성계수를 4를 사용해도 좋다는 결론에 이르게 되며 형상비 0.0625(=기둥의 길이가 직경의 16배) 이상에서는 도로교 설계 기준의 응답수정계수 3을 사용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

1. 중공기둥에 강관을 삽입함으로써 중공기둥의 장점인 중량감소, 이로 인한 설계지진력 감소, 전단 강도 증가 등을 얻을 수 있고 단점인 취성적인 거동을 방지할 수 있다. 또, 강관이 내부에 위치함으로써 외부에 위치한 경우보다 내화적인 장점과 좌굴, 연성에 있어서도 큰 장점을 갖는다.
2. 중공기둥은 기둥의 압축강도에 있어서 원형기둥과 차이를 보이지 않으나 연성에 있어서는 기둥 안쪽면의 파괴를 고려하지 않더라도 원형기둥에 비해 더 적은 값을 갖는다.
3. 연성은 횡철근비 외에 단면의 중립축의 위치에 많은 영향을 받으며 이에 따라 중공 단면으로 인한 콘크리트량의 감소가 클수록 중방향철근비가 클수록 연성은 감소한다.
4. 강관 코아 합성 중공 기둥의 연성은 강관의 삽입으로 인한 강관 면적의 단면비보다 강관의 크기로 인한 중립축으로부터의 거리증가에 더 큰 영향을 받는다. 따라서 강관의 두께 증가로 인한 면적비 증가보다 중공 단면비(Di/D)의 증가가 연성에 더 큰 영향을 미친다.

5. 강관을 삽입함으로써 충분한 합성효과가 발휘되어 중공기둥에 비해서 약 5배의 곡률연성의 값을 갖는다.

6. 강관 코아 합성 중공 기둥의 가장 적은 값을 보이는 중공 단면비 0.7에서 기둥의 형상비에 따라 응답수정계수를 구할 수 있으며 그 값은 주기가 1초를 넘을 경우 도로교설계기준의 형상비 $D/L=0.083$ 이상에서는 응답수정계수 4를 사용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 318(1983), "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-83)," American Concrete Institute, Detroit, pp.111
2. ACI Committee 318(1989), "Building Code Requirements for Structural Concrete (318-99) and Commentary (318R-99)," American Concrete Institute.
3. M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi(1996), "Seismic Design and Retrofit of Bridges," John Wiley & Sons, INC..
4. Mander, J. B., Priestly, M. J. N., and Park, R.(1988), "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 114, No. 8, Aug, pp. 1804-1826
5. Scott, B. D., Park, R., and Priestley, M. J. N.(1982), "Strss-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates," ACI Journal, Proceedings V. 79, No. 1, Jan.-Feb, pp. 13-27.