

내부 구속 중공 RC 교각의 매개변수 연구

A Parameter Study of Internally Confined Hollow Reinforced Concrete Piers

최준호^{*} · 윤기용^{**} · 한택희^{***} · 강영종^{****}

Choi, Jun Ho · Yoon, Ki Yong · Taek, Hee Han · Kang, Young Jong

Abstract

The hollow RC(Reinforced concrete) pier has decrease of weight and reduced of materials compared to solid RC pier. However, the hollow RC pier shows a low ductile behavior due to brittle failure of inside concrete. To overcome this problem, the internally confined hollow reinforced concrete column has been developed. In this study, the behavior of internally confined hollow RC piers were evaluated with safety ratio, ductility, total material cost, the total weight of the pier, etc. The chosen parameters for the study are hollow ratio, thickness of internal steel tube, intervals between vertical re-bars, numbers of horizontal re-bars, and strength of concrete.

key words : Steel tube, Parameter study, Hollow piers, Confinement

1. 서론

오늘날 교각은 보편적으로 중실 RC 교각(Solid Reinforced Concrete Piers, 이하 Solid RC Piers)에 대한 연구가 활발히 진행되어 전체 교각의 대부분에 적용되었다. 교각의 자중의 감소나 재료의 절감의 장점으로 중공 RC 교각(Hollow RC Piers)이 사용되고 있다. 그러나 중공 RC 교각(Hollow RC Piers)은 중공 내면의 취성 파괴 거동으로 낮은 연성 거동을 보인다(F.A.Zahn, 1990). 이러한 중공 RC 교각의 문제점을 해결하기 위하여, 중공부재 내의 콘크리트를 3축 구속 상태로 존재하게 하는 내부 구속 중공 RC 교각(Internally Confined Hollow Reinforced Concrete Piers, 이하 ICH RC 교각)이 강영종, 한택희(2005) 등에 의해 개발되었다. 많은 연구자들에 의해 ICH RC 교각의 연구가 활발히 진행되어 왔지만, ICH RC 교각의 연성능력에 대한 연구 및 내부구속효과에 대한 연구에 국한되어 있다. 그리하여 본 연구에서는 ICH RC 교각의 특성을 파악하기 위해 중공비, 내부강관두께, 횡방향 철근 간격, 종방향 철근 개수 및 콘크리트 강도를 매개변수로 선정하였으며, Prototype으로 Solid RC 교각을 선택하여 매개변수에 따른 ICH RC 교각과 비교·분석하였다. ICH RC 교각의 거동 특성 파악을 위해 사용된 프로그램은 한택희(2005)가 개발하여 검증한 프로그램으로 Material Model Program, Axial Force-Moment Interaction Analysis Program, Force-Displacement Analysis Program을 사용하였으며, 그는 실험적·해석적 연구를 통해 개발된 프로그램을 검증하였다.

2. 거동 분석을 위한 기본 이론 및 평가방법

구속된 콘크리트의 강도에 대해 Mander et al.(1988)은 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트의 응력-변형률 관계식을 제안하였고, 한택희(2005)는 ICH RC 교각의 내부강관 필요두께를 실험적·해석적 연구를 통해 제안하였다.

* 선문대학교 토목공학과·석사과정·E-mail: cruse1991@hotmail.com

** 정회원·선문대학교 토목공학과·교수

*** 정회원·고려대학교 공학기술 연구소

**** 정회원·고려대학교 사회환경시스템공학과·교수

연성도 평가 방법으로는 변위 연성도, 곡률연성도, 에너지 연성도 등이 있으며, 변위 연성도 및 에너지 연성도에 대해서는 다음과 같이 정의한다(R.Park. 1988).

$$\text{변위연성도 } \mu_{\Delta} = \frac{\Delta u}{\Delta y}, \quad \text{에너지연성도 } \mu_E = \frac{Eu}{Ey} \quad (1)$$

여기서, Δy : 최대 응답 변위, Δu : 파괴상태까지 나타난 최대응답변위

Eu : 극한상태까지 분석된 총 입력 에너지, Ey : 항복상태까지 분석된 총 입력 에너지

단면력 검토 시 작용 하중에 대한 안전율(Safety Factor, S.F)은 원점으로부터 작용 하중 시까지의 길이와 원점으로부터 작용 하중 시까지의 연장선과 P-M 상관도와 만나는 점까지의 거리비로 구하였다.

경제성 평가 방법은 다양한 방법이 있지만 본 논문에서는 교각을 만들기 위한 순수 재료비만을 가지고 경제성 평가를 수행하였다. 재료비 산출 단가는 2006년 정부 구매물자 가격을 기준으로 하였다. 또한, 교각의 총 중량은 교각에 사용되는 순수 재료만을 가지고 총 중량을 계산 하였다.

3. Solid RC 교각의 해석모델

Prototype 선정을 위해 외경이 210cm인 Solid RC 교각의 단면으로 종방향 철근에 대하여 1단배치 할 수 있는 철근의 지름과 개수를 달리 하여 4가지 종류의 철근비 및 최소 순간격에 대한 검토를 하였다. 횡방향 철근의 간격을 5cm로 시작하여 1cm씩 늘려 10cm까지 나선철근비에 대한 검토를 하였고, 강도감소계수를 고려한 P-M상관도를 작성하여 안전율에 대한 검토를 하였다. 검토 결과, 그림 1과 같은 Solid RC 교각의 해석 모델을 선정하게 되었다. 작용하중에 대한 안전율 검토 시 작용하중은 확대 계수를 고려한 작용하중으로 축하중(P_u)=726(kN)이며, 확대모멘트(δM_u)=1171(kN-m)을 적용하였다. 이때 선정된 prototype인 Solid RC 교각의 작용하중에 대한 안전율은 약 1.3이다.

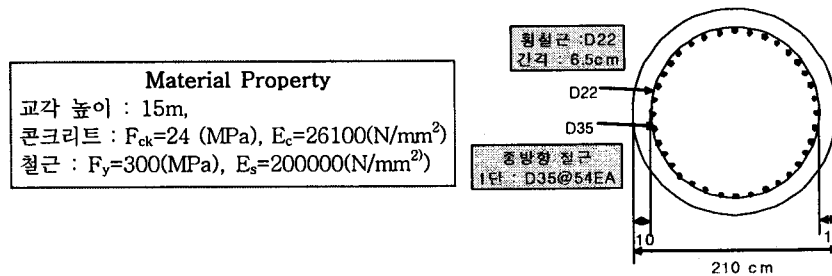


그림 1. Solid RC 교각의 해석모델

4. 매개변수에 따른 ICH RC 교각의 거동 특성

해석모델로 결정된 Solid RC 교각을 대상으로 ICH RC 교각의 중공비, 내부강관두께, 횡방향 철근 간격, 종방향 철근 개수 및 콘크리트 강도에 따른 거동을 파악하였으며, ICH RC 교각의 단면은 그림 2와 같다. 또한, 매개변수에 따른 ICH RC 교각의 작용하중에 대한 안전율 및 연성능력에 대한 거동 특성, 교각에 사용되는 순수 재료비와 교각의 총 중량에 대해서도 파악하였다.

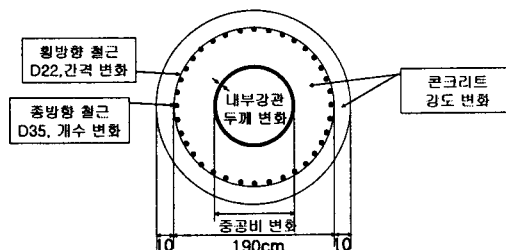


그림 2. ICH RC 교각의 단면

4.1 매개변수에 따른 해석모델

ICH RC 교각의 매개변수에 따른 각각의 해석모델은 다음과 같다. ICH RC 교각의 외경은 210cm로 고정시켰다. 중공비에 따른 해석모델을 제외한 다른 해석모델은 매개변수 변화에 대한 일관성을 위해 중공비를 0.65로 고정시켰으며 또한, 내부강관두께에 따른 해석모델을 제외한 다른 해석모델의 내부강관두께는 최소필요두께로 적용시켰다. 각 매개변수에 따른 해석모델은 도로교설계기준(2006)에 제시 되어 있는 종방향 철근비, 종방향 철근의 최소 순간격, 횡방향 철근의 최소 순간격, 횡방향 철근비를 검토한 결과 모두 만족하였다.

- ① 중공비에 따른 해석모델 : 중공비를 0.50~0.85까지 0.05간격으로 변화 시켰으며 ICH RC 교각의 중공비 변화 시 내부강관 최소 필요두께를 적용시켰으며 최소필요두께 결정시 강관두께를 mm단위로 소수 첫째자리 올림하여 산정하였다.
- ② 내부강관두께에 따른 해석모델 : 내부강관두께를 3mm~10mm까지 1mm씩 변화시켰으며, 외경 210cm 이고, 중공비 0.65일때의 ICH RC 교각의 내부강관 최소필요두께는 5mm이다.
- ③ 횡방향 철근 간격에 따른 해석모델 : 횡철근 간격을 5.0cm~8.0cm까지 0.5cm 간격으로 변화시켰다.
- ④ 종방향 철근 개수에 따른 해 모델 : 종방향 철근 개수를 변화시키기 위해 종방향 철근 직경이 36mm를 사용 했을 때의 종방향 철근비 및 종방향 철근의 최소 순간격 검토 결과 4개 이상 8개 이하여만 만족하므로 종방향 철근 개수 54개를 기준으로 종방향 철근 개수를 4개 간격으로 38~66개까지 변화시켰다.
- ⑤ 콘크리트 강도에 따른 해석모델 : 콘크리트 간격을 18MPa~30MPa까지 3MPa 간격으로 변화시켰다.

4.2 매개변수에 따른 거동 특성

각 매개변수에 따른 ICH RC 교각의 거동 특성에 대하여 파악한 결과 그림 3~그림 7과 같으며 다음과 같이 정리할 수 있다. 그림 3~그림 7은 prototype인 Solid RC 교각을 100%로 보았을 때 각 거동 특성에 대한 ICH RC 교각의 상대그래프이다.

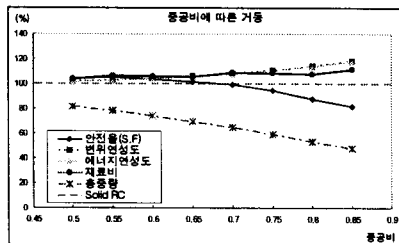


그림 3. 중공비에 따른 거동

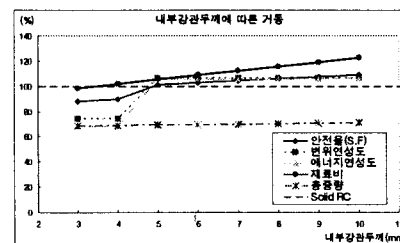


그림 4. 내부강관두께에 따른 거동

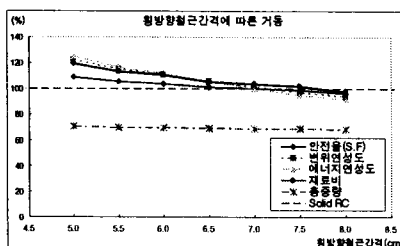


그림 5. 횡방향 철근 간격에 따른 거동

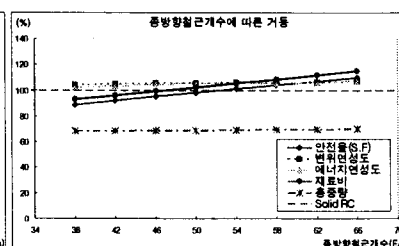


그림 6. 종방향 철근 개수에 따른 거동

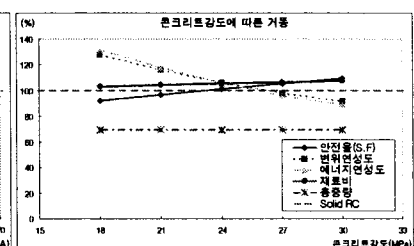


그림 7. 콘크리트강도에 따른 거동

① 중공비에 따른 거동 특성 : 중공비 0.65이상이면 Solid RC 교각 보다 큰 안전율을 확보할 수 있었고, 중공비 0.70이하일 때는 안전율이 선형적으로 감소하여 그 감소율은 중공비 0.05증가할 때 마다 약 2%씩 감소함을 보였다. 해석모델로 선정한 Solid RC 교각이 설계하중에 대해 충분한 안전율을 확보하고 있어 ICH RC 교각의 중공비를 증가시켜도 안전율은 확보되고 있었다. 연성능력은 중공비가 증가함에 있어서 중공비 0.05증가할 때 마다 연성도 증가율은 더 크게 증가함을 보였다.

② 내부 강관 두께에 따른 거동 특성 : 내부 강관 두께가 증가함에 따라 안전율은 선형적으로 증가하여 그 증가율은 내부 강관 두께 1mm 증가 시 약 1.6%증가함을 보였다. 그러나 연성능력의 증가효과는 없는 것으로

나타났다. 그러므로 내부 강관 두께는 최소한의 필요 두께를 사용하는 것이 가장 효과 적인 것으로 파악되었다.

③ 횡방향 철근간격에 따른 거동 특성 : 횡방향 철근간격이 좁을수록 횡방향 철근의 횡 구속능력은 증가하여 내부 강관 최소 필요 두께는 증가한다. 그에 따른 안전율은 증가하며 증가율은 횡방향 철근간격 0.5cm 증가 시 평균 2% 증가함을 보였다. 또한 횡방향 철근간격 이 좁을수록 연성능력은 선형적으로 증가하며 그 증가율은 0.5cm 증가 시 평균 5% 증가함을 보였다.

④ 종방향 철근 개수에 따른 거동 특성 : 종방향 철근개수가 변화 하여도 내부강관 최소필요두께는 변화 하지 않는다. 그러므로 종방향 철근 개수가 증가할수록 따른 안전율은 선형 적으로 증가하며 그 증가율은 종방향 철근 개수가 4개 증가할 때 마다 약 3% 증가함을 보였다. 그러나 연성능력의 증가효과는 미소한 것으로 나타났다.

⑤ 콘크리트 강도에 따른 거동 특성 : 콘크리트 강도가 증가함에 따라 안전율은 선형적으로 증가하였지만 연성능력은 비선형적으로 감소하였다. 콘크리트 강도가 3MPa 증가할 때 마다 안전율은 약 4.3% 상승함을 보였고, 연성도는 점점 작아짐을 확인할 수 있었다.

모든 매개변수에 있어서 재료비는 그 당시 재료 단가의 영향을 받으며 재료비 산출 시 내부 강관의 단가가 높아 내부 강관을 최소한으로 사용하는 ICH RC 교각이 재료비가 작음을 확인할 수 있었다. 또한, ICH RC 교각은 Solid RC 교각에 비해 큰 연성능력을 가지며, 특히 중량 감소효과의 우수성을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

지금까지의 ICH RC 교각에 대한 연구는 연성능력 및 내부구속효과에 관한 연구만 되어 있어 ICH RC 교각의 거동 특성에 대하여 파악하기 힘들었다. 그리하여 본 논문에서는 중공비, 내부 강관 두께, 횡방향 철근 간격, 종방향 철근 개수, 콘크리트강도를 매개변수로 선정하여 ICH RC 교각의 하중에 대한 안전율 및 연성 능력에 대한 거동 특성을 파악하였으며, 매개변수 변화에 따른 ICH RC 교각에 사용되는 재료비 및 교각의 총 중량에 대하여 파악하였다. 그 결과, ICH RC 교각의 중공 교각의 장점인 교각 총 중량 감소 효과가 뛰어난 것을 확인할 수 있었고, 각 매개변수에 따른 거동 특성을 파악할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술평가원에서 시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: D02-01)의 연구비 지원에 의하여 수행되었기에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한승룡, 임남형, 강영중, 이규세. (2003). 강관 보강 중공 R.C 기둥의 연성 평가 해석. 한국강구조학회 논문집, 제15권, 1호(통권 62호), pp. 1-8
2. 한택희, 김홍중, 김영중, 강영중. (2006). 원형 강관 삽입 중공 RC 기둥의 내부구속 효과 연구. 한국토목학회논문집, 제26권, 제4호, pp. 565-575.
3. 한택희, 박종섭, 윤기용, 강영중. (2006). 콘크리트의 재료 비선형과 구속효과를 고려한 내부 구속 중공 RC 기둥의 축력-모멘트 상관도 작성. 대한토목학회 2006년도 정기 학술대회 논문집, pp. 654-657.
4. Taek-Hee Han, (2005). Development of Enhanced Ductile Hollow Columns with Internal Confinement. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Korea University,
5. F.A.Zahn, R.Park, and M.J.N.Priestly. (1990). Flexural Strength and Ductility of Circular Hollow Reinforced Concrete Columns without Confinement on inside face, ACI, 3-4, 156-166
6. Mander, J.B., Priestly, M.J.N., Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, no. 8, pp. 1804~1826.
7. R. Park. (1988). Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing, Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol.8