

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 · Han, Taek Hee · Kang, Young Jong

Abstract

The hollow RC(Reinforced concrete) pier has the merit of lightweight pier compared with 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. As a result of parameters study, the usage of a minimum necessary thickness of the internal steel tube is the most effective.

Key words : Steel tube, Parameter study, Hollow pier, Hollow ratio, Confinement, Ductility

요 지

중공 RC 교각은 중실 RC 교각에 비해 자중의 감소 및 재료 절감에 대한 장점을 가진다. 그러나 중공 RC 교각은 안쪽면의 취성파괴로 인하여 낮은 연성 거동을 할 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 중공 부재 내의 콘크리트 3축 구속 상태로 존재하게 하는 내부 구속 중공 RC 교각이 개발되었다. 본 연구에서는 내부 구속 중공 RC 교각의 매개변수(중공비, 내부강관두께, 횡방향 철근 간격, 종방향 철근 개수, 콘크리트 강도)변화에 따른 안전율, 연성도, 재료비 및 교각 총 중량에 대한 거동 특성을 파악하였다. 매개변수 변화에 따른 내부 구속 RC 교각의 거동 특성 결과 내부 강관 두께는 최소한의 내부 강관 두께를 적용하는 것이 효과 적인 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 내부 강관, 매개변수, 중공 교각, 중공비, 구속효과, 연성도

1. 서 론

오늘날 교각은 보편적으로 중실 RC 교각(Solid Reinforced Concrete Piers, 이하 Solid RC 교각)에 대한 연구가 활발히 진행되어 전체 교각의 대부분에 적용되었다. Solid RC 교각의 경우 상부 구조물에 의해 교각의 능력보다 외경을 증가시켜 불필요한 교각 내부의 콘크리트가 사용된다. 그리하여 교각의 자중의 감소나 재료의 절감을 위하여 중공 RC 교각(Hollow RC Piers)이 사용되고 있다. 그러나 중공 RC 교각은 중공 내면의 취성 파괴 거동으로 낮은 연성 거동을 보인다.(Zahn 등, 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 Mander, Priestly와 Park(1988), 한승룡 등(2003),

Han(2005), 한택희 등(2006a, 2006b, 2007) 등에 의해 연구되었다. Park(1988)은 실험에 의한 연구논문에서 일반 중공 단면의 기둥은 바깥쪽으로 횡방향 철근의 구속을 받지만, 안쪽 면에서 콘크리트가 구속 받지 못한다고 하였고, Han(2005)은 실험적, 해석적 연구에서 의하여 ICH RC 교각의 연성능력 및 내부강관에 의한 콘크리트 구속효과의 우수성을 검증하였다.

이와 같이 ICH RC 교각에 대한 연구가 많은 연구자들에 진행되어 왔지만, ICH RC 교각의 연성능력에 대한 연구 및 내부구속효과에 대한 연구에 국한되어 있다. 본 연구에서는 다양한 매개변수에 따른 ICH RC 교각의 거동특성을 파악하여 효율적인 ICH RC 교각을 산정하고자 하였다. 따라서 Solid RC 교각을 Prototype으로 하여 매개변수 변화에 대한 ICH RC 교각의 거동을 비교하였다. ICH RC 교각의 거동 특성을 파악하기 위한 매개변수로는 중공비, 내부강관두께, 횡

* (주)이산 상하수도부 주임(E-mail : cruse1991@hotmail.com)

**정회원 · 선문대학교 토목공학과 교수(교신저자)

***정회원 · 서울메트로 기술연구소 전문위원

****정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

방향 철근 간격, 종방향 철근 개수 및 콘크리트 강도를 선정하였으며, 각각의 매개변수 변화에 따른 교각의 안전율, 연성도, 재료비 및 교각 총 중량에 특성을 파악하였다. 본 연구에서 매개변수 변화에 대한 교각가의 거동특성을 파악하기 위해 사용된 프로그램은 Han(2005)가 실험적, 해석적 연구를 통해 개발하여 검증한 프로그램으로 Material Model Program, Axial Force-Moment Interaction Analysis Program, Force-Displacement Analysis Program을 사용하였다.

2. 거동 분석을 위한 기본 이론

2.1 내부 구속 중공 RC 교각의 재료 모델

황구속된 철근 콘크리트의 거동은 여러 연구자들에 의해 연구되어왔다. Mander 등(1988)은 구속된 콘크리트의 강도에 대해 다음과 같은 관계식을 제안하였고, 제안된 식에 의해 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_c = \frac{f_{cc} x^r}{r-1+x^r} \quad (1)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \quad (2)$$

$$r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})} \quad (3)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (4)$$

여기서, f_c : 콘크리트의 응력, ε : 축방향 변형률
 f_{cc} : 구속된 콘크리트의 최대 강도
 ε_{cc} : 구속된 콘크리트가 최대 강도를 발휘할 때의 변형률

비구속 콘크리트의 접선 계수(E_c : tangent modulus)는 $5000\sqrt{f_{cc}}$ (MPa)로 산정되며, 구속된 콘크리트의 최대 강도 (f_{cc})는 식(5)에 의해서 구할 수 있다.

$$f'_{cc} = f'_c \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c} - \frac{2 f'_l}{f'_c}} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

$$f'_l = k_e f_l \quad (7)$$

여기서 f'_c 는 비구속된 콘크리트의 최대 강도이며, f_l 는 유효 구속응력이다. 구속된 콘크리트의 최대 강도에서의 변형률 ε_{cc} 는 식(6)과 같이 비구속된 콘크리트의 최대 강도에 해당하는 변형률 ε_{co} 의 함수로서 정의되며, ε_{co} 는 일반적으로 0.002로 알려져 있다.

$$f_l = \frac{2 f_s A_{sp}}{s d_s} \quad (8)$$

원형 후프 철근에 의해 구속된 콘크리트를 고려하면, 콘크리트에 작용하는 구속압에 의해 후프철근에 등분포의 인장력이 작용 때 황구속 응력은 식 (8)에 의해 계산된다. 여기서, A_{sp} 는 후프철근의 단면적, s 는 후프철근의 배근 간격이며, d_s 는 후프철근의 지름이다. 나선철근이나 후프철근의 경우에는 전체 콘크리트를 완전히 구속할 수 없으므로, 최초 발생된 구속응력(f_l)은 식 (7)과 같이 감소계수 k_e 를 적용하여 사용된다. 원형 후프 철근으로 구속된 경우 감소계수는 0.95를 사용한다.

내부 강관의 좌굴강도와 항복강도는 강관의 두께에 큰 영향을 받으므로, ICH RC 교각의 파괴 모드는 내부 강관의 두께를 변화시킴으로써 조절될 수 있다. 내부 강관의 항복 이전에 바깥쪽 횡방향 철근의 파괴를 유발하기 위해서는 내부 강관에 작용하는 응력이 내부 강관의 항복강도 보다 작아야 한다. 이러한 조건에 의해 식 (9)는 내부 강관의 항복과 파괴 일어나지 않기 위한 최소의 두께 조건이다. 여기서 t_y 는 이를 만족하는 최소의 두께이며, 는 내부 강관의 두께이다. (Han, 2005)

$$t > \frac{D_i \cdot f_{yh} \cdot A_{sp}}{D' \cdot s \cdot f_{yt}} = t_y \quad (9)$$

여기서, D' 은 구속된 콘크리트의 직경, D_i 는 중공의 직경, f_{yh} 는 후프철근의 항복강도, A_{sp} 는 후프철근의 단면적, s 는 후프철근의 배근 간격, f_{yt} 는 내부 강관의 항복강도이며, t_y 는 내부 튜브의 항복 파괴가 발생하지 않기 위한 튜브의 최소 두께이다.

ICH RC 교각의 내부 강관은 콘크리트에 의해 강관의 내측 방향으로의 변위 발생은 가능하나, 외측 방향으로 콘크리트에 의해 구속되어 변위 발생이 불가능한 일방향 구속 상태가 된다. 이러한 경계 조건으로 인하여, 내부 강관은 일반적으로 아치나 링의 분기(bifurcation)좌굴과는 다른, 얇은 아치의 스냅스루(snap-through)좌굴과 같은 형상을 보인다. 이때의 좌굴 강도(f_{bk})는 식 (10)와 같이 나타낼 수 있다. (Hafika and Nachbar, 1970) 여기서, R 은 강관의 반지름, E 는 탄성계수, I 는 튜브의 단면이차모멘트이다. 좌굴 파괴가

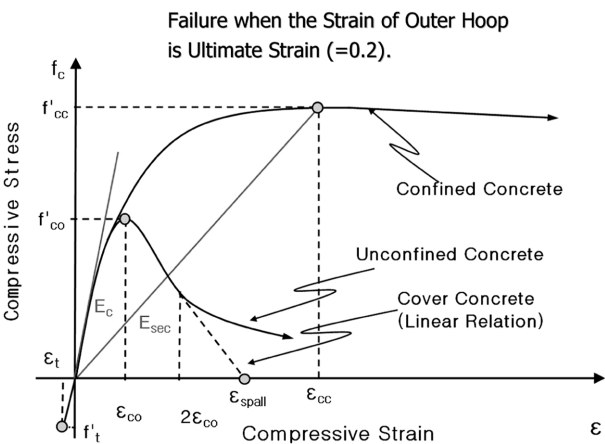


그림 1. 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트의 응력-변형률 곡선

발생하지 않을 조건은 식 (11)과 같으며, 이를 정리하면 식 (12)와 같은 좌굴파괴 방지를 위한 최소 두께(t_c)와 좌굴 파괴가 발생하지 않을 최소 두께(t_{bk}) 중, 큰 값을 t_{lim} 라 정의하면 내부 강관에 의한 교각의 파괴 형태는 식 (13)과 같다. (한택희 등, 2006a)

$$f_{bk} = 2.27 \frac{EI}{R^2 t} = \frac{2.27 t^2 E}{3 D_i^2} \left(I = \frac{t^3}{12}, R = \frac{D_i}{4} \right) \quad (10)$$

$$\frac{2.27 t^2 E}{3 D_i^2} > \frac{2 f_{yh} A_{sp}}{D's} \quad (11)$$

$$t > \sqrt{\frac{6 D_i^2 f_{yh} A_{sp}}{2.27 D's}} = t_{bk} \quad (12)$$

$$t < t_{lim} : \text{강관 파괴} \quad (13-1)$$

$$t < t_{lim} : \text{횡철근 파괴} \quad (13-2)$$

$$t = t_{lim} : \text{강관과 횡철근이 동시에 파괴} \quad (13-3)$$

2.2 거동 분석을 위한 평가 방법

매개변수 변화에 따른 각 해석 모델들은 도로교설계기준 (2005)에 제시 되어 있는 종방향 철근비, 종방향 철근의 최소 순간격, 횡방향 철근의 최소 순간격, 횡방향 철근비등의 규정을 만족해야 한다.

교각의 연성능력 평가 방법으로는 변위 연성도, 곡률 연성도, 에너지 연성도 등이 있다. 본 연구에서는 Park(1988)이 제안한 변위 연성도 및 에너지 연성도를 이용하였으며, 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{변위 연성도 } \mu_{\Delta} = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (14)$$

$$\text{에너지 연성도 } \mu_E = \frac{E u}{E y} \quad (15)$$

여기서, Δy : 최대 응답 변위

Δu : 파괴상태까지 나타난 최대응답변위

$E u$: 극한상태까지 분석된 총 입력 에너지

$E y$: 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 정의하였다.

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

3. Solid RC 교각의 해석모델

Prototype 선정을 위해 외경이 2100 mm인 Solid RC 교각의 단면으로 종방향 철근에 대하여 1단배치 할 수 있는 철

근의 지름과 개수를 달리 하여 4가지 종류의 해석모델을 선정하였다. 해석모델들의 종방향 철근비 및 최소 순간격에 대한 검토를 한 결과 표 1과 같이 도로교설계기준(2005)에 제시되어 있는 규정을 모두 만족하였다.

횡방향 철근에 대한 규정은 횡방향 철근의 순간격과 나선 철근비에 대한 규정이 있다. 4가지 해석모델들의 나선철근 두께를 22 mm로 사용하면 횡방향 철근의 중심 사이 거리는 25+22=47 mm이상, 75+22=97 mm이하가 되어야 한다. 표 2는 횡방향 철근 간격을 50~95 mm까지 5 mm간격 변화시켜 내진 설계 시 만족되는 나선철근비에 대한 검토 결과이다. 그 결과, 최대 80 mm 까지 늘릴 수 있으며, 다음 절의 매개변수 변화를 위해 횡방향 철근 직경은 22 mm, 횡방향 철근 간격은 65 mm로 해석 모델을 선정하였다.

앞에서 선정한 4가지 종방향 철근 변화에 따른 해석모델의 작용하중에 대한 안전율 검토를 위해 Han(2005)가 개발한 Axial Force-Moment Interaction Analysis 프로그램을 사용하여 P-M상관도를 작성하여 작용하중에 대한 안전율을 검토 하였다. 이때의 작용하중은 확대 계수를 고려한 작용하중으로 축하중(P_u) = 13,008(kN)이며, 확대모멘트(δM_u) = 13,450(kN-m)을 적용하였다. 그림 2는 4가지 종방향 철근 변화에 따른 해석모델들의 P-M상관도 이며, 표 3은 작용하중에 따른 Solid RC 교각의 단면력 및 안전율이다. 표 3에와 같이 4가지 종류의 해석모델들은 모두 작용하중에 대하여 충분한 안전율을 확보하고 있으며, 파괴구간은 모두 인장파괴 구간에서 나타나고 있다.

지금까지 Solid RC 교각의 종방향 철근 및 횡방향 철근 변화에 따른 해석모델들을 비교검토하였다. 매개변수 변화를 위해 적절한 안전율을 확보하고 있는 D35-54의 모델을 prototype으로 선정하였으며, 그림 3은 prototype인 Solid RC 교각의 단면 및 제원이다.

표 1. Solid RC 교각의 종방향 철근비 및 최소 순간격

SPECIMEN	D29-80	D32-70	D35-54	D35-56
외경(mm)	2100	2100	2100	2100
철근 직경(mm)	29	32	35	35
수량(EA)	80	70	54	56
심부지름 D'(mm)	1900	1900	1900	1900
종방향 철근 단면적(mm ²)	52,842	56,297	51,954	53,878
입축부재 단면적 (mm ²)	3,463,600	3,463,600	3,463,600	3,463,600
철근 (%)	1.5256	1.6254	1.5000	1.5556
철근비 검토	OK	OK	OK	OK
종방향 철근 순간격(mm)	45.61	53.27	75.54	71.59
얇은골재 최대치수(mm)	25	25	25	25
최소 규정	얇은골재 최대치수* (4/3)(mm)	33.33	33.33	33.33
	40 mm 이상(mm)	40	40	40
	지름의 1.5배(mm)	43.5	48.0	52.5
최소 순간격(mm)	43.5	48.0	52.5	52.5
최소 순간격 검토	OK	OK	OK	OK

표 2. Solid RC 교각의 나선철근비

설계된 단면				설계 기준				만족여부
횡철근 간격 s(mm)	횡철근 단면적 $a_s(\text{mm}^2)$	심부지름 D'(mm)	ρ_s	전체 단면적 $A_g(\text{mm}^2)$	심부 단면적 $A_c(\text{mm}^2)$	ρ_{s1}	ρ_{s2}	
95	380.1	1900	0.008327	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	NG
90	380.1	1900	0.008789	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	NG
85	380.1	1900	0.009306	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	NG
80	380.1	1900	0.009888	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	OK
75	380.1	1900	0.010547	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	OK
70	380.1	1900	0.011300	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	OK
65	380.1	1900	0.012169	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	OK
60	380.1	1900	0.013184	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	OK
55	380.1	1900	0.014382	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	OK
50	380.1	1900	0.015820	3,463,600	2,835,200	0.007978	0.0096	OK

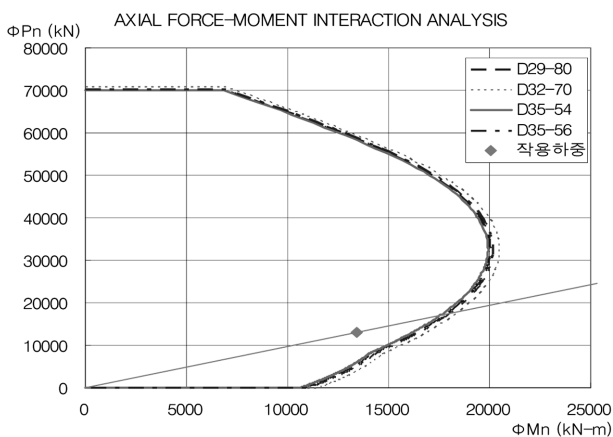


그림 2. 종방향 철근 변화에 따른 Solid RC 교각의 P-M 상관도

표 3. 작용하중에 따른 Solid RC 교각의 단면력 및 안전율

SPECIMEN	D29-80	D32-70	D35-54	D35-56
$\Phi P_b(\text{kN})$	32690.063	32280.065	32226.443	33151.371
$\Phi M_b(\text{kN-m})$	20028.397	20457.029	19922.971	20158.897
$e_b(\text{kN})$	0.613	0.634	0.618	0.608
파괴구간	인장파괴	인장파괴	인장파괴	인장파괴
$\Phi P_n(\text{kN})$	17121.708	17739.633	16524.233	17311.727
$\Phi M_n(\text{kN-m})$	17702.761	18349.408	17085.011	17899.229
S.F	1.316	1.364	1.270	1.331

4. 매개변수에 따른 ICH RC 교각의 거동 특성

교각의 설계·시공 시 교각 상부로부터의 제한으로 인하여 설계에 따른 최적 단면의 외경보다 크게 시공되는 경향이 있다. 외경이 증가함에 따라 중공단면 내부의 불필요한 콘크리트를 제거할 수 있을 것이다. 이때, ICH RC 교각의 장점인 중공부재 내의 콘크리트를 3축 구속 상태로 존재하게 하여 중공비를 어느 적정수준까지 키울 수 있으므로 중공 단면에 대한 장점은 더욱 부각될 것이다. 또한 내부 콘크리트를 감싸고 있는 내부 강관의 두께에 따라 내부 강관이 콘크리트

Material Property
 교각 높이 : 15m,
 콘크리트 : $F_{ck}=24(\text{MPa})$, $E_c=26100(\text{MPa})$
 철근 : $F_y=300(\text{MPa})$, $E_s=200,000(\text{MPa})$

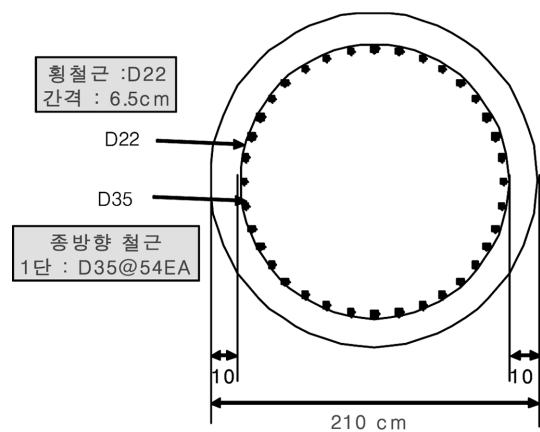


그림 3. Solid RC 교각의 해석모델

보다 먼저 파괴되어 불안한 거동을 보일 것이며, 종방향 철근 및 횡방향 철근, 재료의 강도에 따라 교각의 거동은 틀려질 수 있다.

이러한 매개변수에 대한 교각의 거동 특성을 파악하여 ICH RC 교각에 적용시킨다면 사용 재료의 감소로 인한 재료비 절감과 교각 총 중량의 감소, 내진 설계 시 만족해야 하는 횡철근 간격의 감소 등 여러 가지 효과를 볼 수 있을 것이다.

그리하여 본 절은 Prototype으로 결정된 Solid RC 교각을 대상으로 ICH RC 교각의 중공비, 내부강관두께, 종방향 철근 간격, 종방향 철근 개수 및 콘크리트 강도에 따른 거동을 파악하였으며, ICH RC 교각의 단면은 그림 4와 같다. 또한, 매개변수에 따른 ICH RC 교각의 작용하중에 대한 안전율 및 연성능력에 대한 거동 특성, 교각에 사용되는 순수 재료비와 교각의 총 중량에 대해서도 파악하였다. 이때 내부강관은 SM490 강재를 사용하였다.

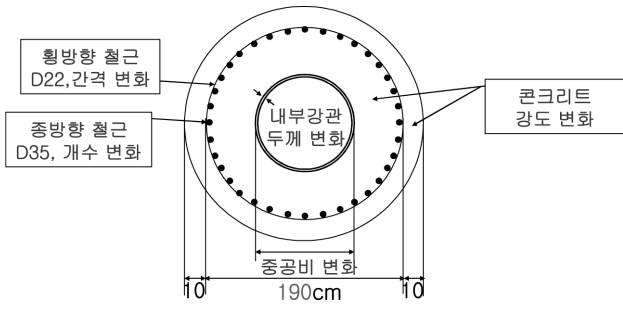


그림 4. ICH RC 교각의 해석모델

4.1 매개변수에 따른 해석모델

ICH RC 교각의 매개변수에 따른 각각의 해석모델은 다음과 같다. ICH RC 교각의 외경은 2100 mm로 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(2005)에 제시되어 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 변화시 내부강관 최소 필요두께를 적용시켰으며 최소필요두께 결정시 강관두께를 mm단위로 소수 첫째자리 올림하여 산정하였다.

② 내부강관두께에 따른 해석모델 : 내부강관두께를 3 mm~10 mm까지 1 mm씩 변화시켰으며, 외경 2100 mm이고,

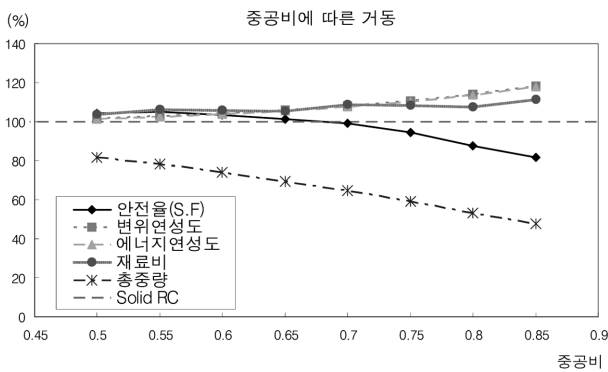


그림 5. ICH RC교각의 중공비에 따른 거동

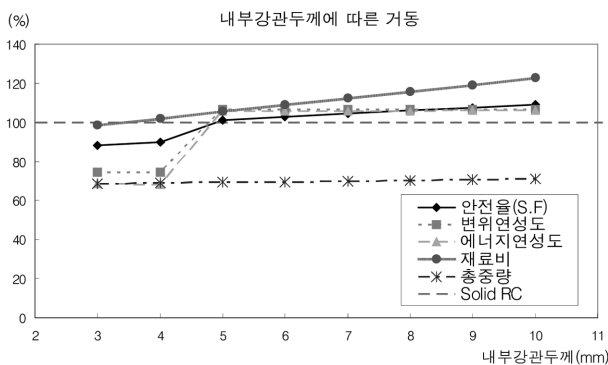


그림 6. ICH RC교각의 내부 강관 두께에 따른 거동

중공비 0.65일때의 ICH RC 교각의 내부강관 최소필요두께는 5 mm이다.

③ 횡방향 철근 간격에 따른 해석모델 : 횡철근 간격을 50 mm~80 mm까지 5 mm 간격으로 변화시켰다.

④ 종방향 철근 개수에 따른 해석모델 : 종방향 철근 개수를 변화시키기 위해 종방향 철근 직경이 36 mm를 사용했을 때의 종방향 철근비 및 종방향 철근의 최소 순간격 검토 결과 4개 이상 8개 이하이면 만족하므로 종방향 철근 개수 54개를 기준으로 종방향 철근 개수를 4개 간격으로 38~66개까지 변화시켰다.

⑤ 콘크리트 강도에 따른 해석모델 : 콘크리트 간격을 18 MPa~30 MPa까지 3 MPa 간격으로 변화시켰다.

4.2 매개변수에 따른 해석 결과

각 매개변수에 따른 ICH RC 교각의 거동 특성에 대하여 파악한 결과 그림 5~9와 같으며 다음과 같이 정리할 수 있

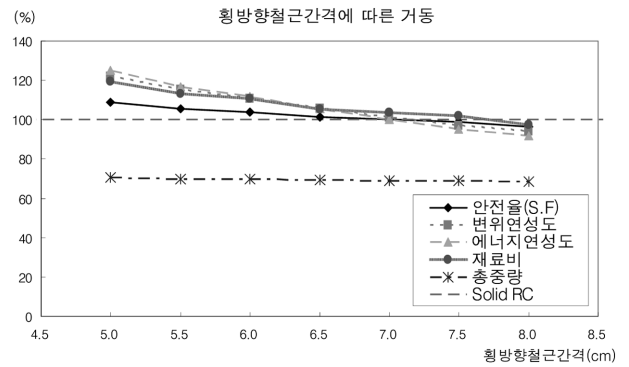


그림 7. ICH RC교각의 횡방향 철근 간격에 따른 거동

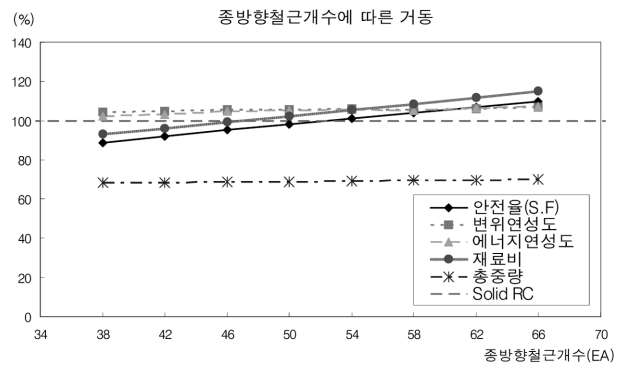


그림 8. ICH RC교각의 종방향 철근 개수에 따른 거동

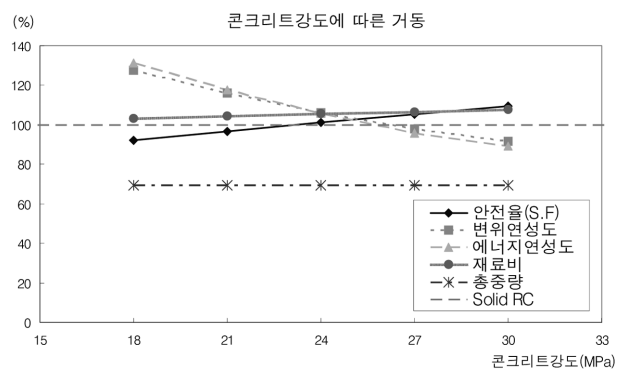


그림 9. ICH RC교각의 콘크리트 강도에 따른 거동

다. 그림 5-9는 prototype인 Solid RC 교각의 거동을 기준으로 ICH RC 교각의 각 거동 특성에 대한 상대그래프이다.

4.2.1 중공비에 따른 거동 특성

중공 단면을 가진 교각이라면 중공비가 증가함에 따라 중공 교각의 장점을 더욱 부각시킬 수 있을 것이다. 하지만 중공비가 증가함에 따라 콘크리트량이 줄어들어 콘크리트가 부담해야 하는 능력은 커지게 된다. 이에 따라 ICH RC 교각에선 내부 강관의 역할로 심부콘크리트의 압괴를 방지하고 있다. 따라서 중공비가 커짐에 따라 내부강관의 두께는 증가하게 된다.

중공비 변화에 따른 해석모델에선 중공비가 증가함에 따라 교각에 사용되는 콘크리트량의 감소율이 강관의 증가율보다 커서 그림 5에서와 같이 중공단면에 대한 중량감소 효과를 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구는 재료비 평가 시 2006년 11월 기준으로 산정되어 그 당시 강관의 재료비 단가가 콘크리트 단가에 비하여 크게 산정되어 있었다. 그리하여 교각의 총 재료비 측면으로 보면 중공비가 증가함에 따라 재료비는 증가였다. 하지만 교각의 중량감소 효과를 같이 비교하여 본다면 재료비 증가율 4~12% 증가한 반면 중량 감소율은 18~52%까지 감소되어 하부 구조물에 대한 부담을 줄일 수 효과적인 역할을 할 수 있을 것이다. 또한, 본 해석모델에서 중공비 0.65이하이면 Solid RC 교각 보다 큰 안전율을 확보할 수 있었고, 중공비 0.70이상일 때는 안전율이 선형적으로 감소하여 그 감소율은 중공비 0.05증가할 때 마다 약 2%씩 감소함을 보였다.

중공비 증가에 따른 안전율은 감소하였지만, prototype로 선정한 Solid RC 교각이 설계하중에 대해 충분한 안전율을 확보하고 있어 ICH RC 교각의 중공비를 증가시켜도 안전율 1.0이상을 확보하고 있음을 확인할 수 있었다.

중공비가 증가함에 있어서 내부 강관의 두께가 같이 증가하여 연성능력은 중공비가 증가함에 따라 크게 증가함을 보였고, 그 증가율은 중공비 0.05증가할 때 마다 더 큰 증가율을 보였다.

4.2.2 내부 강관 두께에 따른 거동 특성

외경이 2100 mm이고 중공비 0.65일 때의 ICH RC 교각의 내부 강관 최소 필요 두께는 5 mm이다. 해석 모델 중 내부 강관 최소 두께를 적용하지 않은 3 mm와 4 mm를 적용한 경우 심부콘크리트가 3축 응력상태에 도달하였을 때, 내부 강관이 횡 철근보다 먼저 항복하여 심부콘크리트는 2축 응력상태가 되고 교각의 안쪽으로 파괴가 일어난다. 이러한 이유로 내부 강관 최소 필요 두께를 사용하지 않은 ICH RC 교각은 최대압축응력과 최대변형률이 작아지게 되어 그림 6에서와 같이 내부 강관 두께 4 mm 이하일 때 변곡점이 생기게 된다.

본 해석 모델에서는 교각에 사용되는 내부 강관을 제외한 모든 재료가 동일하므로 재료비는 내부 강관 두께의 증가율에 따라 선형적으로 증가하였다. 내부 강관 두께가 증가함에 따라 축하중-모멘트 능력은 상대적으로 비례하게 증가되어 안

전율은 선형적으로 내부 강관 두께 1 mm 증가 시 약 1.6% 증가함을 보였다. 그러나 내부 강관 두께 증가 시 연성능력은 다소 증가하였지만, 그 증가율은 미미한 것으로 나타났다.

이와 같이 내부 강관 두께에 따른 ICH RC 교각에 대한 거동 분석 결과 재료비 증가율이 안전율 증가율보다 약 2배 크게 나타났고 연성에 대한 효과는 미미함을 확인할 수 있었다. 또한 내부 강관 최소 필요 두께보다 작은 경우에는 취성 파괴와 같은 거동을 보였으므로 ICH RC 교각의 내부 강관 두께는 최소 내부 강관 두께를 적용하는 것이 가장 효과적으로 나타났다.

4.2.3 횡방향 철근 간격에 따른 거동 특성

횡방향 철근 간격이 좁을수록 횡방향 철근비가 증가하여 연성능력이 좋아질 뿐만 아니라 콘크리트에 대한 횡구속능력이 증가될 것이다. 그러므로 콘크리트의 3축 압축능력은 증가하게 되어 ICH RC 교각의 내부 강관 두께는 증가할 것이다. 이에 따른 교각의 축하중-모멘트 능력은 상대적으로 증가하게 되어 그림 7에서와 같이 안전율은 횡방향 철근이 좁을수록 증가함을 보였다. 그 증가율은 횡방향 철근간격 5 mm 증가 시 평균 2% 증가함을 보였다. 또한 횡방향 철근 간격이 좁을수록 연성능력은 선형적으로 증가하며 그 증가율은 5 mm 증가 시 평균 5% 증가함을 보였다.

4.2.4 종방향 철근 개수에 따른 거동 특성

종방향 철근 개수가 증가하게 되면 종방향 철근비가 증가하여 교각의 축하중-모멘트 능력은 증가하게 된다. 이에 따라 그림 8에서와 같이 종방향 철근 개수가 증가할수록 따른 안전율은 선형 적으로 증가하며 그 증가율은 종방향 철근개수가 4개 증가할 때 마다 약 3% 증가함을 보였다.

종방향 철근은 외부 하중에 대한 교각의 단면력 및 휨모멘트에 영향을 줄 뿐 콘크리트 횡구속능력에는 아무런 영향을 주진 않는다. 그리하여 종방향 철근 개수가 변화 하여도 ICH RC 교각의 내부 강관 최소 필요 두께는 동일하게 적용된다. 그러므로 종방향 철근 개수 사용량에 따라 재료비 및 총중량은 선형적으로 증가하게 된다. 그러나 본 모델에선 그 증가량은 안전율 증가량에 비해 미소함을 볼 수 있었다. 또한, 본 모델에선 종방향 철근 개수는 증가하였지만 내부 강관 두께를 동일하게 적용되었다. 이에 따라 교각이 견딜 수 있는 횡방향 최대 하중은 증가한다. 하지만, 횡방향 최대 하중에 대한 변위증가량이 작아 교각의 연성능력의 증가효과는 미소함을 볼 수 있었다.

4.2.5 콘크리트 강도에 따른 거동 특성

ICH R.C 교각에서 콘크리트 강도가 증가함에 따라 횡철근이 부담해야 하는 횡구속력은 줄어들 것이다. 이에 따라 콘크리트 강도가 변화여도 내부 강관 최소 필요 두께는 동일하게 사용된다.

콘크리트 강도의 증가에 따른 교각의 축하중에 대한 능력은 증가하지만 동일한 횡방향 철근비 및 내부 강관을 사용하므로 모멘트 증가효과는 동일하게 나타나 그림 9에서와 같이

작용하중에 대한 안전율은 선형적으로 증가함을 볼 수 있었고 그 증가량은 콘크리트 강도가 3 MPa 증가할 때 마다 약 4.3% 증가함을 보였다.

그러나, 콘크리트 강도가 증가함에 따라 동일한 철근량을 사용한 교각은 횡방향 하중과 변위는 콘크리트가 지배하게 된다. 그러므로 콘크리트 강도가 커짐에 따라 횡방향 최대 하중 능력은 증가하지만 그에 따른 횡방향 최대 변위감소량이 증가하여 취성 파괴 거동과 같은 현상을 보인다. 따라서 연성능력은 감소함을 확인할 수 있었다.

4.3 매개변수 변화에 대한 비교 분석

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. 내부 강관 최소 필요두께 이하를 적용시킨 ICH RC 교각에 있어선 교각의 거동 능력을 발휘하지 못함을 확인할 수 있었다.

교각의 상부 구조물로부터의 제한으로 설계에 따른 최적단면 보다 외경을 크게 적용시킨 경우 최소한의 안전율을 확보하는 중공비를 찾아 내부 강관 최소 필요두께를 적용시킨 다면 중공교각의 장점인 중량 감소효과의 우수성을 부각시킬 수 있을뿐더러 동일한 외경을 갖는 Solid RC 교각보다 큰 연성능력을 확보할 수 있을 것이다. 또한, 횡방향 철근 간격을 증가시킴으로서 연성능력을 증가시킬 수 있지만 내부 강관 두께가 같이 증가하여 재료비 측면에서 최대한의 횡철근 간격을 적용시키는 것이 효과적임 확인할 수 있었다.

동일한 중공비를 갖는 ICH RC 교각에서 작용하중에 대한 안전율을 증가시키기 위해선 내부 강관 두께의 영향을 받지 않는 중방향 철근 개수나 콘크리트 강도를 증가시킴으로 안전율을 증가시킬 수 있었다. 하지만 콘크리트 강도가 증가함에 따라 ICH RC 교각의 연성능력이 감소함을 확인 하여야 한다.

5. 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, 중방향 철근 개수, 콘크리트강도를 매개변수로 선정하여 ICH RC 교각의 작용하중에 대한 안전율 및 연성능력에 대한 거동 특성을 파악하였으며, 재료비 및 교각의 총 중량에 대해서도 파악하였다. 그 결과, 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) ICH RC 교각의 중공비가 증가됨에 따라 연성능력은 증가하고 안전율은 감소함을 볼 수 있었다. 즉, 중공비를 증가시키면 교각의 총 중량은 작아지고 연성능력은 향상 된다. 충분한 안전율을 확보하고 있는 ICH RC 교각에선 필요한 안전율까지 확보되는 중공비를 찾아 중공비를 증가시킨다면 재료비의 절감과 함께 효율적인 교각의 단면을 적용시킬 수 있을 것이다.

- 2) 내부 강관 두께를 증가시킴에 따라 교각의 거동특성 능력은 향상되나 그 효과가 재료비 증가율에 비해 작으므로 최소한의 필요 두께를 사용하는 것이 가장 효과적 인 것을 볼 수 있었다.
- 3) 횡방향 철근 간격이 좁을수록 안전율 및 연성능력은 증가하여 ICH RC 교각의 필요한 안전율 및 연성능력을 가진 횡방향 철근 간격을 찾을 수 있을 것이다. 그러나 횡방향 철근 간격이 좁아질 수록 내부 강관 최소 필요 두께는 증가한다. 즉, 횡방향 철근 간격이 좁아짐에 따라 교각의 재료비가 증가하여 재료비 산출시 그 당시 재료 단가에 따라 재료증가율이 달라지므로 적정 재료비를 적용시킨 횡방향 철근 간격을 적용시키는 것을 고려해야 한다.
- 4) 중방향 철근 개수가 증가함에 따라 안전율은 증가하고 연성능력의 증가는 미소함을 볼 수 있었다. 또한, 중방향 철근 개수의 변화는 횡구속력에 영향을 미치지 않으므로 내부 강관 최소 필요두께는 변화 않으므로 안전율이 부족한 ICH RC 교각의 중방향 철근비 기준에 만족되는 중방향 철근개수를 증가시킴으로 안전율을 확보할 수 있다.
- 5) 콘크리트 강도가 증가함에 따라 안전율은 증가하지만 연성능력은 감소함을 볼 수 있었다. 또한, 콘크리트 강도가 증가함에 따라 내부 강관 최소 두께는 동일함을 확인할 수 있었다. 충분한 연성능력을 가진 ICH RC 교각에서 안전율을 증가시킬 경우 콘크리트 강도를 증가시키면 교각에 사용되는 재료비에서 효과적인 ICH RC 교각을 찾을 수 있을 것이다.

이와 같이 각 매개변수 변화에 따라 ICH RC 교각의 거동 특성 및 교각의 총 중량, 사용 재료비를 파악하였으며, 각 매개변수를 변화시킴으로 효율적인 ICH RC 교각을 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호 : R-2005-7-151)주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

- 건설교통부 (2005) 도로교설계기준, 한국도로교통협회.
- 한승룡, 임남형, 강영중, 이규세 (2003) 강관 보강 중공 RC 기둥의 연성 평가 해석, 한국강구조학회 논문집, 제15권, 제1호, pp.1-8.
- 한택희, 김홍중, 김영중, 강영중 (2006a) 원형 강관 삽입 중공 RC 기둥의 내부구속 효과 연구, 한국토목학회논문집, 제26권, 제4호, pp.565-575.
- 한택희, 박중섭, 윤기용, 강영중 (2006b) 콘크리트의 재료 비선형과 구속효과를 고려한 내부 구속 중공 RC 기둥의 축력-모멘트 상관도 작성, 대한토목학회 2006년도 정기 학술대회 논문집, pp. 654-657.
- 한택희, 한상운, 강영중 (2007) 내부 구속 중공 철근 콘크리트 부재의 비선형 재료 모델 개발, 대한토목학회논문집, 제27권, 제1호, pp.11-26.

Haftka, R. and Nachbar, W. (1970) Post buckling analysis of an elastically restrained column, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 6, pp. 1433-1449.

Han, Taek-Hee (2005) Development of Enhanced Ductile Hollow Columns with Internal Confinement, *Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy*, Korea University,

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.

Park R. (1988) State-of-the Art Report on Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing, *Proceedings of 9th World*

Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. 8, pp.605-616.

Zahn, F.A., Park, R., and Priestly, M.J.N. (1990) Flexural Strength and Ductility of Circular Hollow Reinforced Concrete Columns without Confinement on inside face, *ACI*, Vol. 3, No. 4, pp. 156-166.

◎ 논문접수일 : 09년 09월 23일
◎ 심사의뢰일 : 09년 09월 28일
◎ 심사완료일 : 09년 10월 26일