

내부 구속 중공 CFT 교각의 내진성능에 대한 매개변수 연구

Parametric Study on Seismic Performance of Internally Confined Hollow CFT Column

김현종* · 염응준** · 한택희*** · 강영종****

Kim, Hyun Jong · Yeom, Eung Jun · Han, Taek Hee · Kang, Young Jong

Abstract

Internally Confined Hollow-Concrete Filled Tube(ICH-CFT) column which has two tubes on both side of concrete, inner tube and outer tube perform great seismic abilities, ductility and absorption of energy, by the tubes and the hollow part. So this study does qualitative analysis about seismic capacities depending on parameters - diameter of column, hollow ratio, thickness of tubes - by moment-curvature analysis.

key words : ICH-CFT, Seismic performance, Ductility

1. 서 론

교통의 수요와 지형적인 제약을 해결하기 위해 현재 국내외적으로 장대교량 및 고교각의 필요와 그에 따른 시공이 늘어나고 있다. 교각의 높이가 높으며, 세장비가 큰 고교각의 경우 교각 자체의 중량을 줄이기 위해 단면을 최소화하게 되고, 그것은 주로 중공 단면의 사용으로 이어지게 된다. 고교각의 경우 일반 교각에 비하여 지진하중이나 풍하중의 영향을 많이 받게 되는데, 이러한 중공 단면의 사용으로 인한 교각의 연성과 내진 성능 항상 효과도 볼 수 있다. 하지만 단면이 작아짐으로 인한 콘크리트의 면적 감소는 교각 자체의 강성 감소를 일으키며, 발생된 강성 부족을 해결하기 위해 철근의 사용량을 늘리게 된다. 철근량이 많은 교각은 시공성 및 유지 보수에 있어서 불리한 구조물이 된다. 또한 중공단면의 경우 교각의 콘크리트 안쪽 면은 이축 압축상태로서 구속력이 부족하여 콘크리트 자체 강성이 저하되고, 높은 하중에서 취성적 파괴를 일으킬 수도 있다. 이러한 중공 R/C 교각의 단점을 보완하기 위한 많은 연구가 진행되어왔다. 한승룡(2002), 조인석(2005) 등에 의해 교각의 중공 부분에 강관을 삽입하는 구조인 내부 구속 중공(Internally Confined Hollow - ICH) 단면이 연구되었고, 한택희(2006)에 의해 뛰어난 내진 성능을 발휘하고 시공성의 장점을 가진 ICH-CFT 단면이 연구되었다. ICH-CFT 단면의 경우 콘크리트의 외부와 내부에 강관을 삽입함으로써 강관 안에 위치한 콘크리트는 완전한 삼축 구속 상태에 놓이게 되며, 그로인한 콘크리트 강성의 증대 효과를 얻을 수 있다. 또한 중공단면의 사용과 스틸 튜브의 사용으로 인해 증가된 연성 및 모멘트 저항력을 통해 뛰어난 내진 성능을 발휘한다. 본 논문에서는 중공 단면의 효과와 내부 구속 효과, 그리고 강관의 사용으로 인해 뛰어난 성능을 발휘하는 ICH-CFT 교각의 내진 성능에 대해 연구하고자 한다.

* 비회원 · 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 석사과정 · E-mail:ohdoni@korea.ac.kr

** 정회원 · 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 박사과정 · E-mail:tiger56@korea.ac.kr

*** 정회원 · 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 연구교수 · E-mail:taekie@korea.ac.kr

**** 정회원 · 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수 · E-mail:yjkang@korea.ac.kr

2. 내진 성능

지진발생시 기둥의 횡하중-횡변위 관계가 탄성거동을 보이도록 설계하는 것을 탄성설계라고 한다. 일반적으로 교각에 대한 탄성설계는 기둥의 소성변형이 요구되지 않으므로 시공 상의 장점이 있으나, 설계 지진력이 과도하게 되므로 기둥의 소요단면적이 증가하여 비경제적인 설계결과를 유발할 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 모멘트-횡변위 관계에 따라 지진발생시 작용 모멘트가 기둥단면의 최대저항모멘트에 도달하면 소성힌지가 발생하여 소성거동을 보이도록 설계하는 것을 소성설계라 하며, 일반적으로 탄성설계에 비하여 경제적인 결과를 얻을 수 있다. 소성설계 시 구조해석방법으로 선형탄성해석을 사용하는 경우에는, 실제의 소성거동을 예측하기 위하여 응답수정계수(R) 개념을 도입한다. 응답 수정 계수에 영향을 주는 인자는 감쇠(Damping), 연성(Ductility), 여유력(Overstrength), 리던던시(Redundancy) 등이 있으며, 일반적인 교각의 경우 여러 가지 인자 중 연성이 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 연성, 그중에서도 곡률 연성도를 통한 내진 성능을 평가하고자 한다.

2.1 곡률 연성도

곡률 연성도는 주어진 최대 응답곡률과 항복 곡률의 비로 나타내며 계산을 비교적 간단하게 할 수 있어 내진 성능과 거동특성을 파악하기 위해 널리 이용되고 있다. 또한 곡률 연성도는 구조물 전체의 응답 나타내고 안전한 소성곡률을 정의하는데 중요한 지표한 지표이다. 항복 및 파괴상태에 따라 항복시점까지 나타난 최대 응답 곡률을 ϕ_y , 파괴상태까지 나타난 최대응답곡률을 ϕ_u 이라 한다면 다음의 식과 같이 곡률 연성도를 정의한다.

$$\text{곡률 연성도 } \mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$$

서로 다른 교각 구조물의 극한 곡률이 동일하더라도 항복 곡률이 다르면 연성도가 달라지므로 곡률 연성을 정의하는데 있어서 먼저 항복 곡률 및 극한 곡률을 명확히 정의할 필요가 있다.

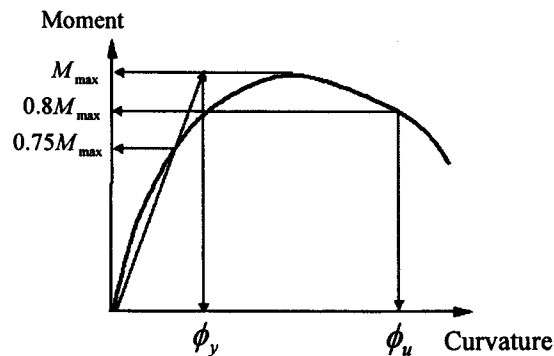


그림 1. 모멘트-곡률 곡선에서의 항복 곡률(ϕ_y)과 극한 곡률(ϕ_u)

본 연구에서는 교각의 곡률 연성도를 구하기 위해 항복 곡률(ϕ_y)과 극한 곡률(ϕ_u)의 값을 Park R.(1989)이 제안한 방법에 따라 정의 하였다. Park는 그림 1과 같이 항복 곡률을 최대 모멘트 하중의 75%점에 대한 할선과 최대 모멘트에 대한 수평선의 교점에 대한 곡률을 항복 곡률로 정의하였다. 또한 극한 곡률에 대해서는 곡률-모멘트 곡선 상에서 하중이 $0.8M_{max}$ 이하로 떨어지지 않았음에도 불구하고 기둥이 파괴에 도달하였을 때는 파괴시점까지 경험한 최대 곡률을 극한 곡률로 정의하였고, 기둥이 파괴에 도달하지 않았음에도 불구하고 하중이 $0.8M_{max}$ 이하로 저하되었을 때는 $0.8M_{max}$ 까지 경험한 최대 곡률을 극한 곡률로 정의하였다.

2.2 에너지 연성도

곡률 연성도와 유사한 개념으로 구조물의 연성능력을 평가하는 한 방법으로 에너지 연성도(μ_E)가 있다.

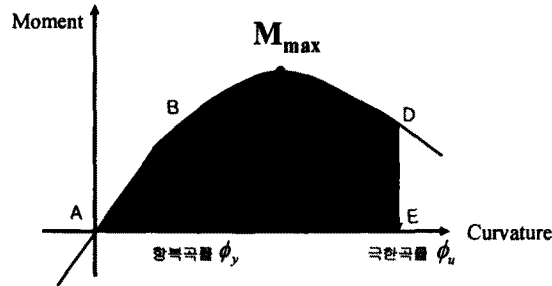


그림 2. 모멘트-곡률 곡선에서의 항복 에너지(E_y)와 극한 에너지(E_u)

$$\text{에너지 연성도 } \mu_E = \frac{E_u}{E_y}$$

여기서 극한 에너지 E_u 는 그림 2에서 보는 바와 같이 극한상태까지 분석된 총 입력 에너지 즉, 모멘트 곡률 곡선에서 극한 곡률까지의 내부면적(폐합면 ABDEC)으로 정의하였으며, 항복 에너지 E_y 는 항복상태까지 분석된 총 입력 에너지 즉, 모멘트 곡률 곡선에서 항복 곡률까지의 내부면적(폐합면 ABC)으로 정의하였다.

3. 매개변수 연구 및 결과

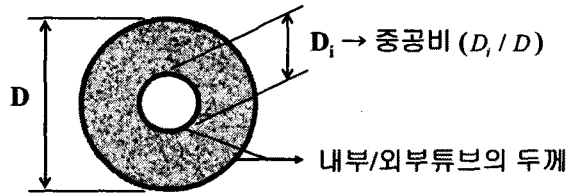


그림 3. ICH-CFT 교각의 단면

위의 그림 3에서 보는 것과 같이 ICH-CFT 교각은 두개의 튜브와 그 사이에 놓인 콘크리트로 구성되어 있다. 따라서 단면에 대한 매개변수로는 단면의 직경과 중공 부분의 직경, 그리고 두 튜브의 두께가 있다. 이 중 중공 부분의 직경의 경우 중공비(D_i/D)의 인자로 바꾸어 매개변수로 설정 하였으며, 두 튜브의 두께는 콘크리트구조설계기준과 한택희 박사논문(2006)에서 구해진 최소 요구 두께를 만족하도록 그 두께를 제한하였다. 내진 성능을 계산하기 위한 단면은 매개변수 중 단면의 외경과 외부 튜브의 두께를 우선적으로 정하고, 내부 튜브의 두께는 각각의 중공비에 대한 단면들이 동일한 모멘트 성능을 발휘하도록 계산하여 설계하였다. 또한 재료 물성치에 대해서는 매개변수 연구에 사용된 모든 단면들에 동일한 재료성질을 부여하였다. 위와 같은 방법으로 모든 매개변수 범위($D:50\sim 200\text{cm}$, 중공비: $0.5\sim 0.85$, t_{ot} :각 단면 외경에 대해 $1.0t_{req.}\sim 2.5t_{req.}$)에 대하여 단면을 설계하고 모멘트-곡률 곡선을 통해서 곡률 연성도와 에너지 연성도를 계산하였다. 본 연구에서는 단면의 외경과 외부 튜브의 두께가 같은 단면들에 대해서는 중공비가 다르더라도 동일한 모멘트 성능을 발휘하도록 내부 튜브의 두께를 정하기 때문에, 여러 매개변수 중에서도 중공비가 가장 유의미한 매개변수라 할 수 있다.

구하여진 모든 값을 가지고 분석한 결과 단면의 직경의 변화와는 관계없이 동일한 내진 성능을 발휘하는 것을 알 수 있었으며, 이것은 단면의 직경과 비례하는 외부 튜브의 두께를 사용하였기 때문이라 생각된다. 따라서 여러 단면 직경 중 $D=100\text{cm}$ 인 경우에 대해 결과를 소개하겠다.

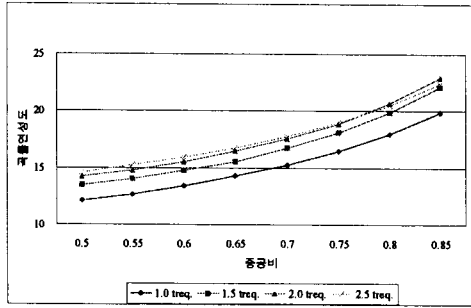


그림 4. 중공비에 따른 곡률 연성도

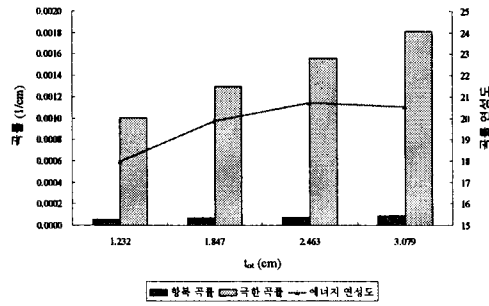


그림 5. 곡률 및 곡률 연성도

그림 4에서 보이는 것과 같이 중공비가 커질수록 내진 성능, 곡률 연성도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 에너지 연성도에서도 마찬가지로의 결과를 보였으며, 에너지 연성도가 곡률 연성도 보다 중공비에 따른 증가 폭이 더 컸다. 그림 5에서는 외부 튜브 두께의 변화에 따른 내진 성능을 분석하여 보았다. 중공비가 큰 단면의 경우 외부 튜브의 두께가 커짐에 따라 연성도가 증가하다가 일정 두께를 넘어서자 다시 줄어드는 경향을 보였는데, 이것은 외부 튜브의 과다 설계로 인한 강성의 증가가 교각 전체의 연성의 감소로 이어진 것이라 여겨진다.

4. 결론

본 논문에서는 다른 교각에 비하여 뛰어난 성능, 특히 내진 성능에 있어서 우수한 성능을 발휘하는 ICH-CFT(Internally Confined Hollow-Concrete Filled Tube) 교각의 내진 성능 - 곡률 연성도, 에너지 연성도에 대하여 Moment - Curvature Analysis를 통한 매개변수 연구를 수행하였으며, 수행 결과를 토대로 ICH-CFT 교각의 내진 성능에 대한 정성적인 분석과 CFT 교각과의 비교를 통한 경제적인 내진 성능의 평가를 하였다.

단면의 직경(D)이 증가함에 따라 동일한 비율로 두께가 증가하는 외부 튜브를 사용하였기에 같은 중공비와 같은 외부 튜브의 두께(t_{ot})에 대해서는 D 의 크기와 관계없이 동일한 크기의 연성도 값을 가진다. 대체적으로 외부 튜브의 두께(t_{ot})가 증가하면서 교각의 내진 성능은 증가하였다. 그러나 곡률 연성도와 에너지 연성도는 t_{ot} 의 계속된 증가에 따라 다시 작아진다. 중공비가 커질수록 교각은 곡률 연성도, 에너지 연성도에 있어 더 뛰어난 성능을 발휘한다. 중공비가 가장 큰 0.85인 ICH-CFT 교각의 경우 CFT 교각보다 77.5~97.8%의 증가된 연성 성능을 발휘하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Park, R.(1989). "Evaluation of ductility of structures and structural sub-assemblages from laboratory testing", Bull. of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 22(3), p155-1663
2. 한택희, 한금호, 한상윤, 김성남, 강진욱(2005. 8). "The Behavior of an Internally Confined Hollow Concrete Filled Steel Tube Column", Korea-Japan Joint Seminar
3. 한택희, 조인석, 강영중, 이명섭(2005). "내부 구속 중공 R.C 교각의 연성도 평가", 한국지진공학회 2005년도 학술대회 논문집 p353~360
4. 한택희(2005). "Development of enhanced ductile hollow columns with internal confinement", 박사학위논문, 고려대학교, 서울