

인장강성효과를 고려한 중공단면 교각의 모멘트-곡률 관계에 대한 연구

A Study on the Moment-Curvature Relation of Hollow RC piers considering Tension Stiffening Effect

박 영 호* 김 세 훈** 최 승 원*** 오 병 환****
Park, Young Ho Kim, Se Hun Choi, Seung Won Oh, Byung Hwan

_ABSTRACT

Moment-curvature relation of RC pier is influenced greatly in occurrence form of crack and difference is happened according to consideration existence and nonexistence of tension stiffening effect. However, studies considering these is very insufficient misgovernment. Also, it is sometimes unavoidable lap splice of axial reinforcement in plastic hinge region of RC piers. However, specific design standard about lap splice of axial reinforcement is unprepared real condition and study about effect that lap splice of axial reinforcement get in occurrence form of crack is insufficient misgovernment. Therefore, in this paper, experiments are performed with hollow RC piers that do lap splice of axial reinforcement by main variable. And this study present analytical method about moment-curvature relation of hollow RC pier that consider tension stiffening effect and analyze effect that lap splice of axial reinforcement gets in occurrence form of crack. Analytic method of moment-curvature relation of RC pier that present in this study shows very similar motion with experiment result and crack interval of RC pier is suffering dominate impact in the augmented reinforcement amount by lap splice and average crack interval decreases as lap splice ratio increases. *Keywords : tension stiffening effect, hollow RC pier, lap splice, bond stress-slip, moment-curvature relation, transfer length*

1. 서 론

1960년대 경부고속도로가 개통된 이후 산업화 및 공업화로 인해 물류량이 증가하고 국토의 균형발전을 위해 많은 고속도로가 건설되었거나 건설공사가 활발하게 전개되고 있다. 이러한 고속도로에는 산이 많은 우리나라의 국토 현실을 비추어볼 때 많은 교량이 건설될 수밖에 없는 실정이다. 이러한 교각의 연성도를 평가하는 대표적인 방법 중 하나가 바로 교각의 모멘트-곡률 관계이다. 이러한 교각의 하중에 따른 모멘트-곡률 관계에 대한 연구는 많이 수행되어 왔다. 하지만 교각의 모멘트-곡률 관계는 균열의 발생형태에 크게 좌우되며 인장강성 효과의 고려 유무에 따라 차이가 발생하게 되는데 이러한 점들을 고려한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한 국내의 교각이 높아지는 추세로 인해 소성힌지영역 구간에서 종방향 철근을 겹침이음하여 시공하는 경우가 많다. 하지만 현재 도로교 설계기준에서 제시하고 있는 축방향 철근의 겹침이음에 대한 구체적인 설계기준은 미비한 실정이며 이러한 축방향 철근의 겹침이음이 교각의 거동, 특히 균열의 발생형태에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 부족하다고 판단된다.

* 정회원, 주) 마이다스아이티 (yhpark@midasit.com)

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사

*** 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

**** 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

따라서 본 연구에서는 겹침이음된 중공단면 교각의 실험을 수행하여 인장강성 효과를 고려한 모멘트-곡률 관계에 대한 해석법을 제시하고 겹침이음이 교각의 균열발생 형태에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 이론적 고찰

균열이 간 콘크리트 구조물에서 인장력은 모두 철근이 저항한다 균열이 발생한 직후 부착응력에 의해 주변의 콘크리트로 옮겨간다. 균열 사이의 콘크리트의 역할은 인장보강부의 강성의 증가라 여겨지며 이 효과를 "tention stiffening effect", 즉 인장강성 효과라 한다.

부착응력은 콘크리트에 대한 철근의 상대변위의 함수이며 부착응력-슬립, 즉 τ - s 관계는 1990 CEB-FIP Model Code에서 제안된 다음의 비선형관계식이 비교적 적절한 것으로 평가되고 있다.

$$\tau_b = \tau_{\max} \left(\frac{s_x}{s_1} \right)^\alpha$$

여기서, τ_{\max} : 부착강도 ($2.5 \sqrt{f_{ck}}$ (for confined concrete), $2.0 \sqrt{f_{ck}}$ (for unconfined concrete)), α : 0.7 사이의 값으로 보통

0.4

s_1 : 부착강도에 해당되는 슬립 (1.0mm (for confined concrete), 0.5mm (for unconfined concrete))

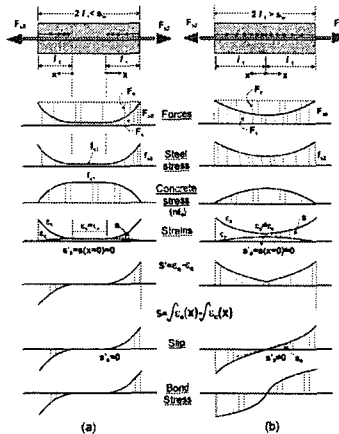


그림 1. 균열 사이의 힘, 응력, 부착응력, 슬립 분포

(a) initial crack formation (b) stabilized crack formation)

콘크리트의 인장응력이 인장강도를 초과하게 되면 초기균열이 생기게 된다. 이 때 인장강성 효과에 의해 인장력은 철근에서 콘크리트로 전달되며 철근에서 콘크리트로 인장응력이 전달되는 구간을 전달길이 l_t 라 한다. 철근과 콘크리트의 변형률이 같은 구간, 즉 부착응력과 슬립이 발생하지 않는 구간이 존재할 때 이를 initial crack formation 단계라 한다. 이 때, 균열 간격은 l_t 의 2배를 초과하며 부착응력이 발생하는 시작점에서 슬립과 슬립의 변화율이 0이 된다. 또한 다음 균열은 최소 l_t 이상의 거리에서 생성되는데 이는 균열이 전달길이 구간사이, 즉 $\pm l_t$ 사이의 콘크리트의 응력을 인장강도 이하로 떨어뜨리기 때문이다. 균열이 완전히 진전되었을 때, 즉 균열 간격이 l_t 에서 $2l_t$ 가 되었을 때를 stabilized crack formation 단계라 한다. 이 때 슬립이 0이 되는 곳에서 철근의 응력이 최소가 되며 슬립의 변화율은 0이 아니다. 슬립되는 면의 지배방정식은 다음과 같다.

$$s_x'' - \frac{4(1 + n_e \rho_{s,ef})}{\phi E_s} \tau_{bx} = 0$$

여기서, $\rho_{s,ef}$: 유효인장면적 대비 철근량 ($= \frac{A_s}{A_{c,ef}}$), $A_{c,ef} = b \times h_{ef}$, $h_{ef} = 2.5(h - d) < \frac{h - x_2}{3}$

x_2 : 균열면에서의 중립축의 위치, $n_e = \frac{E_c}{E_s}$

3. 시험체 제작 및 실험

본 논문에서는 인장강성 효과를 고려한 교각의 모멘트-곡률 관계를 제시하고 주철근의 겹침이음이 미치는 영향을 분석하기 위해 실제 교각을 축소모델한 700×450mm의 직사각형 중공단면 시험체를 3개 제작하였다. 주요 실험 변수는 주철근의 겹침이음 비율이며 각각 0%, 50%, 100% 이다. 단면의 두께는 모두 100mm로 일정하게 유지하였으며, 교각의 높이는 기초상단부터 가력점까지 3500mm로 하였고, 기초의 높이는 750mm로 하였다. 콘크리트의 압축강도는 모두 40MPa이며 주철근은 SD500의 D10 철근을 사용하였고 횡구속 철근에는 SD300의 D6 철근을 사용하였다. 소성힌지구간은 기초 상단에서부터 700mm 까지의 구간으로 설정하여, 이 구간에는 도로교 설계기준의 내진설계에 따른 횡철근 보강을 실시하였다. 또한, 소성힌지구간에는 내·외측 후프(Hoop)철근 사이에 보강철근(cross-tie)을 설치하였고, 보강철근은 단면에 대칭형상으로 설치하였다. 본 실험에서는 교각 상부의 자중 등 사하중을 고려하기 위하여 교각의 단면 축강도($A_g f_{ck}$)의 6%에 해당하는 일정 축하중을 재하하였으며, 축하중은 유압펌프에 일정하중 유지장치를 설정하여 실험도중 축력의 변화없이 일정하게 재하되도록 하였다. 실제 실험 중 오차는 평균 $\pm 0.5\%$ 이내에 불과하였다.

4. 인장강성효과를 고려한 모멘트-곡률 관계

4.1. 교각에서의 균열발생 메커니즘

교각에 작용하는 모멘트가 증가하여 특정단면에서의 콘크리트의 인장응력이 인장강도를 초과하게 되면, 즉 $M_x = M_{cr}$ 일 때 첫 번째 균열이 발생하게 된다. 여기서 M_{cr} 를 균열모멘트이다. 그림 2에서 보듯이 외부모멘트의 증가 시 콘크리트의 인장응력이 가장 높은 곳은 전달길이(l_t)위치라는 것을 알 수 있다. 따라서 두 번째 균열은 전달길이 위치에서 $M_{li} = M_{cr}$ 일 때 발생하게 된다.

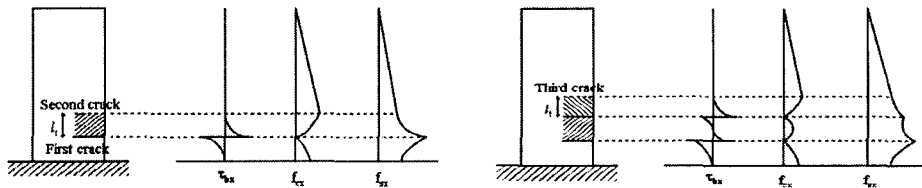


그림 2 첫 번째 균열시 부착응력, 콘크리트응력, 철근응력분포
그림 3 두 번째 균열시 부착응력, 콘크리트응력, 철근응력 분포
이와 같이 교각의 단면특성이 교각높이에 상관없이 같다면, 균열모멘트와 철근응력은 동일하다. 또한 철근응력이 동일하기 때문에 각 균열면에서의 전달길이 또한 동일한 값이 얻어지게 된다. 따라서 교각에서는 전달길이 크기만큼의 등간격의 균열이 발생하게 된다.

4.2. 교각의 모멘트-곡률 해석법

본 연구에서 수행한 교각의 모멘트-곡률 해석 순서는 다음과 같다.

- 1) 균열이 발생하기 전의 작용모멘트에 대한 교각 단면의 응력 및 변형을 계산
- 2) 외부 작용모멘트에 의해 특정단면에서 콘크리트의 인장응력이 인장강도를 초과하면 균열 발생
- 3) 균열단면에서의 철근응력 및 콘크리트응력, 전달길이등을 계산 (initial crack formation stage)
- 4) 균열위치부터 전달길이 구간내의 철근응력 및 콘크리트응력 계산
- 5) 외부 작용모멘트가 증가하여 전달길이 위치의 콘크리트의 인장응력이 인장강도를 초과하면 새로운 균열이 발생
- 6) 두 균열 사이는 stabilized crack formation 단계이므로 상미분방정식의 수치적분인 Fourth order Runge-Kutta method와 iteration을 병행한 수치해석을 수행하여 슬립, 부착응력, 철근의 인장응력, 콘크리트의 인장응력을 계산
- 7) 철근이 항복하는 M_y 까지 모멘트를 증가시키면서 모멘트-곡률 계산
- 8) 곡률과 모멘트는 균열사이의 평균값을 적용 : $\frac{1}{r} = \frac{1}{l_t} \int_0^{l_t} \frac{\epsilon_s - \epsilon_{cc}}{d} dx$

4.3. 실험결과와 비교분석

교각에서의 균열발생 메커니즘에 따르면 교각의 균열간격은 전달길이와 동일한 값을 갖게 된다. 따라서 겹침이음이 균열간격에 미치는 영향을 분석하기 위해서 겹침이음에 따른 전달길이의 변화를 분석하였다. 표 1은 각 시험체별 평균균열간격과 전달

길이를 비교한 것으로 겹침이음 비율이 높아질수록 전달길이는 점점 감소하며 이는 실험을 통해 얻은 평균균열간격과 매우 유사한 값을 보이는 것을 알 수 있다. 겹침이음이 전달길이에 미치는 영향은 철근의 단면적의 변화로 인한 f_{s2} , $\rho_{s,ef}$ 의 변화를 고려함으로써 알 수 있다. 이는 철근의 항복 전까지는 겹침이음된 주철근의 구속상태가 양호하기 때문에 겹침이음을 철근의 단면적의 변화, 즉 겹침이음에 의한 강성변화로 고려하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

그림 4는 실험을 통해 얻은 모멘트-곡률 관계와 해석결과를 비교한 것이다. 1과 2는 각각 initial crack formation 단계와 stabilized crack formation 단계에 접어들었음을 나타낸다. 또한 $(EI)_1$ 은 균열 발생 전의 탄성영역에서의 모멘트-곡률 관계를 나타내며 $(EI)_2$ 는 인장강성 효과를 고려하지 않은, 즉 부재의 인장력을 철근이 모두 저항한다고 했을 경우의 모멘트-곡률 관계를 나타낸다. 그림에서 보듯이 모멘트-곡률 관계 산정시 인장강성 효과를 고려하지 않는 곡률은 인장강성 효과를 고려한 것과 상당한 차이가 발생함을 알 수 있으며 인장강성 효과를 고려한 본 연구의 해석법은 인장부의 콘크리트를 무시하는 일반적인 방법에 비해 실험결과와 매우 유사한 거동을 보여주고 있다.

표 1 각 시험체별 평균균열간격과 전달길이 비교

겹침이음	0%	50%	100%
평균균열간격 (mm)	135.2	120.2	110.5
전달길이 l_t (mm)	137.59	122.23	109.66

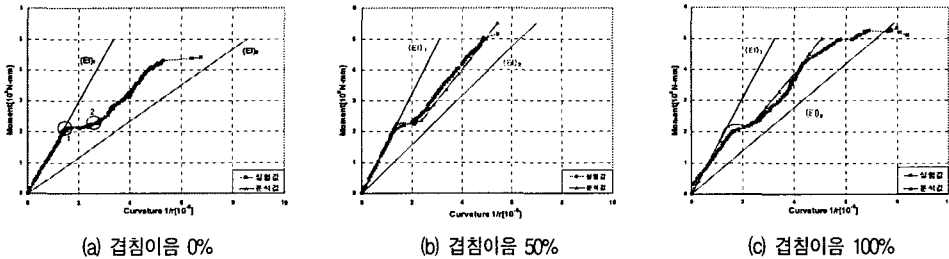


그림 4 교각의 모멘트-곡률 변화 비교분석

5. 결론

본 연구에서는 인장강성효과를 고려한 중공단면 교각의 모멘트-곡률 관계를 유도하고 겹침이음의 영향을 분석하고자 겹침이음 비율을 주요변수로 한 중공단면 교각의 포괄적인 실험연구를 수행하였다.

- 1) 교각에서 균열간격은 전달길이의 크기와 같으며 교각 단면의 특성이 교각의 높이에 상관없이 동일하다면 균열모멘트와 철근의 응력은 동일하며 이로 인해 각 균열면에서의 전달길이는 항상 같게 된다. 따라서 교각에서는 전달길이 크기만큼의 등간격의 균열이 발생한다.
- 2) 겹침이음 비율이 증가할수록 평균균열간격은 점점 작아지는 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구에서 제시하는 교각의 모멘트-곡률 계산법은 실제 거동과 유사한 결과를 보여주고 있어, 정밀한 교각 거동 해석을 위해 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, "도로교표준시방서", 2003
2. Comité Euro-International du Béton, "CEB-FIP Model Code 1990", 1993
3. György L. Balázs, "Cracking Analysis Based on Slip and Bond Stresses", ACI Materials Journal, V. 90, No. 4, July-August 1993, pp. 340-348
4. Alessandro P. Fantilli, Daniele Ferretti, Ivo Iori, and Paolo Vallini, "Flexural Deformability of Reinforced Concrete Beams", Journal of Structural Engineering, September 1998, pp. 1041-1049
5. S. Somayaji and S. P. Shah, "Bond Stress Versus Slip Relationship and Cracking Response of Tension Members", ACI Journal, 1981, pp. 217-225
6. 김세훈, "Evaluation of Cracking Width and Remaining Service Life for RC Flexural Members under Repeated Loading", 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 2004