

# 면외 변형률 분포의 비선형성을 고려한 RC 기둥의 2차원 해석에 관한 연구

## 2-dimensional analytical method of RC column considering nonlinearity of strain distribution in out-of-plane direction

김 익 현\*      이 종 석\*\*      정 혁 창\*\*\*  
Kim, Ick Hyun   Lee, Jong Seok   Jeong, Hyeok Chang

### ABSTRACT

The columns with large widths in out-of-plane direction fail showing the high nonlinearity of strain distribution. In order to predict the nonlinear behavior with reasonable accuracy in 2 dimensional analysis the material models taking this characteristic into account are indispensable. In this study equivalent softening model is developed which releases the same amount of energy at failure as that of 3-D analysis. Its validity is confirmed by comparing the analysis result with that of 3-D.

#### 1. 서론

RC 기둥의 경우 주철근이 단면 주위에 집중적으로 배근되어 있어 횡방향 하중(지진하중)이 재하되면 전단이 지배적인 기둥의 경우에는 면외방향으로 응력(변형도)의 분포가 강한 비선형성을 나타내게 된다. 그러나 2차원 해석에서는 3차원 해석에서와 같이 면외방향에 대한 비선형성을 고려할 수가 없어 해석결과에서 많은 차이를 보이게 된다. 따라서, 2차원 해석을 수행하는 경우에는 이러한 면외방향의 응력 및 변형도의 비선형 특성을 대표할 수 있는 특별한 재료 구성모형을 고려하지 않으면 강도 및 연성을 과대 평가할 우려가 있다. 이에 본 연구에서는 2차원 해석에서도 3차원 해석시에서와 같이 면외방향의 변형(응력도) 분포의 비선형성을 고려할 수 있는 해석방법을 제안하였다.

#### 2. 3차원 비선형 거동해석

##### 2.1. 재료모형

RC(Reinforced Concrete)의 재료구성모형은 콘크리트와 철근의 구성방정식으로 구성되며 콘크리트는 압축, 인장 및 전단모형으로 구성된다. 콘크리트의 압축모형은 탄소성파괴(Elasto-Plastic Fracture)모

\* 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 조교수

\*\* 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 교수

\*\*\* 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 석사과정

델을 적용하였다.<sup>(1)</sup> 인장모델의 경우 주철근에 가까운 영역(RC영역)에서는 콘크리트와 철근의 부착특성에 의해 균열 이후에도 작용하중을 균열이 발생하지 않는 이웃 단면으로 전달하게 되므로 인장경화(Tension Stiffening)모델을 적용하고 주철근에서 멀리 떨어진 영역(PL영역)에서는 균열 후 응력감소가 급격하게 일어나므로 인장연화(Tension Softening)모델을 적용하였다.<sup>(2)</sup> 전단모델은 접촉밀도 함수를 가정한 모델(Contact Density Model)<sup>(3)</sup>을 채용하였으며 인장모델과 마찬가지로 PL영역에서는 균열에 연직인 방향의 변형도의 증가에 따라 전단강성을 감소시킨 전단연화(Shear Softening)모델을 사용하였다. 철근모델은 콘크리트내에 묻힌 철근의 평균적인 응력특성을 고려할 수 있도록 평균응력-평균변형도 관계<sup>(4)</sup>를 적용하였다.

## 2.2. RC기둥의 거동특성 및 수치해석

면내방향으로 매우 유사한 설계특성을 지닌 기둥의 비선형거동특성을 파악하기 위하여 정적재하실험을 수행하였다. 실험모델은 모두 3기로 중실사각단면이다. 하중재하방향(면내방향)의 단면크기는 30cm, 교각의 높이는 80cm로 동일하며 주철근비도 동일하다. 그러나 하중직각방향(면외방향)의 단면크기(이하 “폭”으로 정의)는 각각 20, 40, 60cm이다. 횡철근의 직경과 설치간격은 동일하다. 그림 1, 2는 폭이 20cm, 60cm인 실험체의 하중-변위곡선이다. 폭이 작은 모델이 큰 모델에 비하여 보다 연성적인 거동특성을 나타내고 있다. 그림에는 3차원 해석결과도 함께 나타내었다. 해석에 있어서 단면은 면내 및 면외방향으로 RC영역과 PL영역으로 영역화하였다. 실험과 해석에서의 초기강성의 차이로 인하여 변위에 다소 차이가 있지만 전체적으로 거동특성을 유사하게 모사할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 2차원 해석에 있어서는 3차원 해석과 달리 단면을 면외방향으로 RC영역과 PL영역을 동시에 모델화할 수 없어 동일한 재료모델을 채택하게 된다. 기둥주위에 주철근이 배근된 것을 고려하여 인장경화 및 전단경화모델을 적용하여 해석결과도 그림 1, 2에 함께 나타내었다(유사2차원 해석). 실험결과 보다 내하력 및 연성도를 과대평가(특히 폭이 큰 모델에서)하게 되는 것을 알 수 있다.

그림 3, 4는 극한시 기둥파괴면에서의 전단변형률 분포를 나타낸 것이다. 폭이 작은 모델의 경우 면외방향으로 균일한 분포특성을 나타내는 것에 하여 폭이 큰 모델에서는 매우 큰 비선형분포특성을 나타내고 있다. 그림 5는 폭이 큰 모델의 하중단계별 전단변형률의 진전형태를 나타낸 것이다. 작은 하중단계에서 균일하게 분포되어 진전되던 전단변형률이 PL영역의 중앙부에서 급작스럽게 큰 비선형특성을 나타내면서 파괴에 이르는 것을 알 수 있다. 따라서, 2차원영역의 해석에서도 거동특성을 모사하기 위해서는 이러한 응력(변형률)의 분포특성을 고려할 수 있는 새로운 재료모델을 적용하지 않으면 안된다.

## 3. 등가연화모델을 적용한 비선형해석

### 3.1. 등가연화모델

하중의 직각방향(out-of-plane)으로 각기 다른 영역을 설정할 수 있는 3차원해석의 경우와 달리 2차원해석의 경우는 RC영역과 PL영역이 혼합되게 된다. 이러한 혼합영역의 재료모델의 특성은 RC영역과 PL영역의 재료모델 특성의 중간적인 특성을 띄게 된다. 그림5는 해석모델의 파괴위치에서의 변형률의 분포로 곡선 하부의 면적이 파괴시 소산되는 에너지의 양이 된다. 본 연구에서는 2차원 해석에서도 이와 동일한 소산에너지가 얻어지도록 등가 인장/전단 연화모델을 개발하였다. 그림6는 등가연화모델을 도출하기 위한 개념도로서 파괴시 RC영역과 PL영역에서 동시에 극한변형률에 도달한다면 소산에너지는 식(1)과 같이 산정된다. 그러나 그림5에서와 같이 PL영역에서 극한변형률에 도달할 때 RC영

역은 이 보다 작은 변형률 수준에 머무르게 된다(그림6의 아래쪽 원내 참조). 즉 기둥의 파괴시 RC영역에서는 에너지소산이 부분적으로 일어나게 되고 그 크기는 기둥단면의 면의 PL영역의 크기에 크게 의존하게 된다. 따라서, 등가연화모델의 산정에는 식(2)와 같이 RC영역에서의 에너지 소산량을 고려하여야 한다.

$$\int_0^t [G_F]_{MIX} d\tau \times t = \int_0^{t_{RC}} [G_F(\tau)]_{RC} d\tau \times t_{RC} + \int_0^{t_{PL}} [G_F(\tau)]_{PL} d\tau \times t_{PL} \quad (1)$$

$$\int_0^t [G_F]_{MIX} d\tau \times t = \alpha \int_0^{t_{RC}} [G_F(\tau)]_{RC} d\tau \times t_{RC} + \int_0^{t_{PL}} [G_F(\tau)]_{PL} d\tau \times t_{PL} \quad (2)$$

그림7은 면의PL영역의 크기에 따른 RC영역의 에너지 소산량을 비로 나타낸 것이다(식(2)에서  $\alpha$ 값). 면의 PL영역의 크기가 커질수록 RC영역의 에너지 소산량은 크게 감소한다. 즉 변형률의 강한 비선형 분포 특성으로 극한변형률 보다 훨씬 작은 변형률에 머무르게 된다.

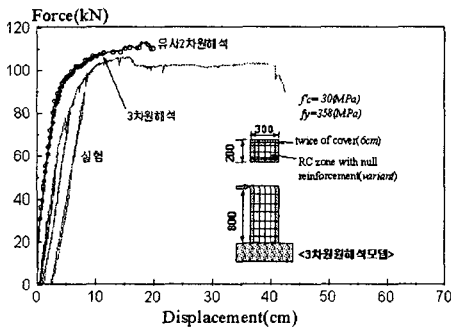


그림 1 하중-변위곡선(모델의 폭=20cm)

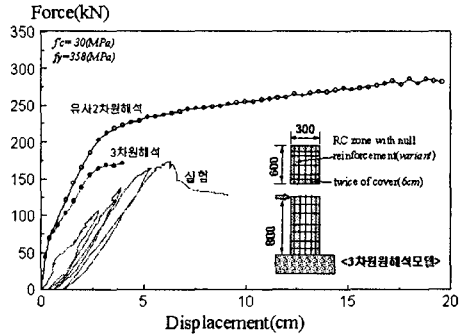


그림 2 하중-변위곡선(모델의 폭=60cm)

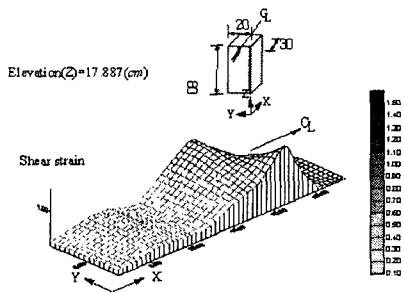


그림 3 전단변형률 분포(모델의 폭=20cm)

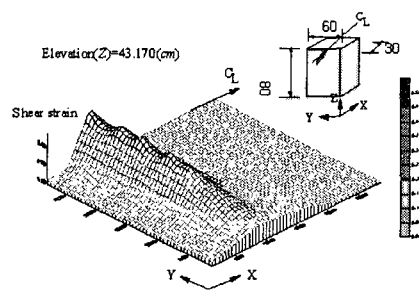


그림 4 전단변형률 분포(모델의 폭=60cm)

### 3.2 등가연화모델을 적용한 해석

그림 8은 등가연화모델을 도입하여 해석한 결과이다. 혼합영역의 등가연화계수( $C_{MIX}$ )는 1.3이다(3차원해석에서 RC영역과 PL영역의 연화계수는 각각 0.4, 2.0이다). 3차원해석 결과와 매우 유사한 결과를 보여 주고 있다. 이는 3차원 해석에서와 달리 비록 면의방향으로 동일한 모델을 적용하게 되어 변형률은 균일하게 분포되어 진전되지만 등가연화계수에 의하여 변형률의 진전속도가 빨라져 파괴시에는 3차원 해석과 매우 유사한 에너지를 소산시킨 결과이다.

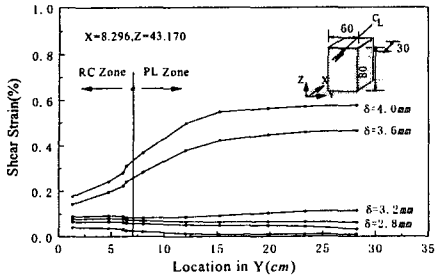


그림 5 전단변형도 진전형태(모델의 폭=60cm)

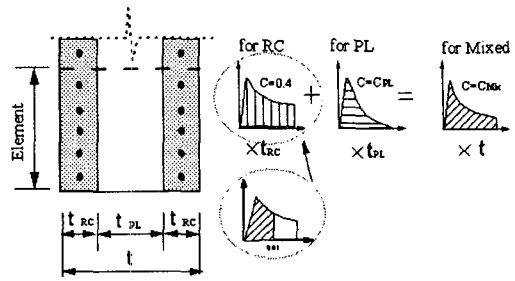


그림 6 등가연화모델의 산정개념

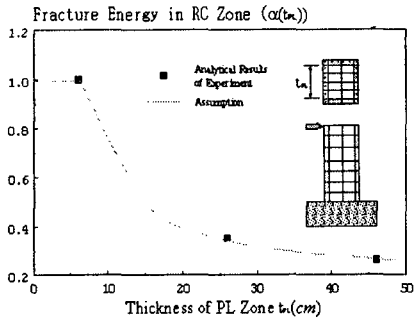


그림 7 면외PL영역 크기에 따른 소산에너지 비

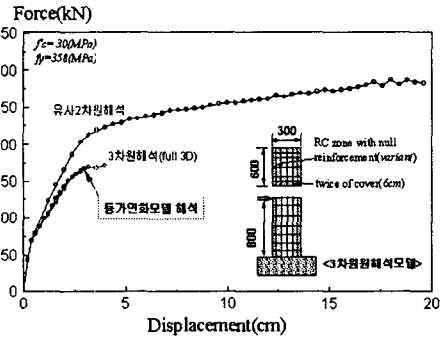


그림 8 연화계수에 의한 2차원 해석 비교(60cm)

#### 4. 결론

하중의 직각방향의 단면크기가 큰 RC기둥의 경우 변형률은 면외방향으로 강한 비선형분포를 나타내면서 파괴에 이르기 때문에 일반적으로 2차원해석에서는 기둥의 강도 및 연성도를 과대평가하게 된다. 본 연구에서는 2차원해석에서도 3차원해석에서와 유사하게 RC기둥의 비선형거동을 예측할 수 있는 재료모델(등가연화모델)을 개발하였다. 등가연화모델은 3차원해석에서 파괴시 파괴면에서 소산되는 에너지와 동일한 소산에너지를 갖는 특성을 지니고 있다. 등가연화모델을 도입한 해석결과가 3차원 해석결과 잘 일치하고 있어 등가연화모델의 타당성을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Maekawa, K., Takemura, J., Irawan, P., and Irie, M. (1993), "Triaxial-elasto-plastic and fracture model for concrete", *Proc. of JSCE*, No.460, V18, 131-138, 1993.
2. Shima, H., Chou, L. and Okamura, H., "Micro and Macro Models for Bond Behavior in Reinforced Concrete," *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B)*, Vol. 39, No. 2, 1987, pp. 134-194.
3. Li, B., Maekawa, K. and Okamura, H. (1989), "Contact density model for stress transfer cracks in concrete", *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo(B)*, Vol40, No1, pp.9-52, 1989
4. Kato, B., "Mechanical Properties of Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Actions," *CEB Bulletin D'information*, 131, 1979, pp. 7-27.