

# 횡방향철근에 의하여 구속된 콘크리트 기둥의 거동해석

## Analysis of Concrete Columns Confined with Lateral Reinforcement

송 하 원\*  
Song, Ha-Won

최 동 휴\*\*  
Choi, Dong-Hue

변 근 주\*\*\*  
Byun, Keun-Joo

### ABSTRACT

Objectives of this study is to investigate the behaviors of the confined concrete columns having different core sizes, lateral reinforcement ratios and spacing ratios by using the 3-dimensional analysis of confined concrete columns. In this paper, analyses are done by 3-D nonlinear finite element analysis considering continuum fracture and plasticity and then analysis results are compared with those of model tests. From the comparison, it is shown that the technique in this paper can be used effectively for the analysis of confined concrete columns.

#### 1. 서 론

횡방향철근에 의하여 구속된 콘크리트 기둥은 횡방향철근의 구속정도에 따라 최대하중의 증가와 연성의 확보면에서 이점을 가져올 수 있다. 콘크리트 기둥의 구속효과는 콘크리트의 압축강도, 횡방향철근의 간격비, 체적철근비, 배근형태, 항복강도 등의 여러 변수에 따라 다양하게 나타나며, 콘크리트 기둥의 거동을 변화시킬 수 있어, 이에 대한 구속된 콘크리트 기둥의 거동예측은 매우 중요하다. 또한 올바르게 예측된 기둥의 거동은 기둥의 효과적인 구속철근 설계에 유용하게 이용될 수 있다.

본 연구에서는 횡방향철근에 의하여 구속된 콘크리트 기둥에 대해 코아크기와 횡방향철근의 체적철근비 및 간격비를 변화시킨 콘크리트 기둥모형의 압축실험을 통하여 구속차이에 따른 콘크리트 기둥의 거동을 분석하였다. 또한 대상 콘크리트 기둥에 대해 연속체적 파괴와 소성을 고려한 3차원 비선형 유한요소해석을 실시하였으며, 실험결과와 비교하여 콘크리트 기둥의 거동을 해석적으로 재현하였다.

#### 2. 구속된 콘크리트 기둥의 구속효과

횡방향철근에 의하여 구속된 콘크리트 기둥의 구속효과는 압축을 받는 기둥의 횡변위의 증가와 직접적인 관계가 있다. 일반적으로 콘크리트의 압축강도가 두 배로 증가할 경우 기둥중상부의 횡변위는 약 25% 감소하며,<sup>1)</sup> 이에 따라 횡방향철근에 의한 구속효과를 현저히 감소시킨다. 또한 횡방향철근의 항복강도는 콘크리트 기둥의 구속효과에 영향을 미치는 요소로서 콘크리트 코아에 작용하는 구속용력의

\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사

\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

상한치를 나타낸다. 횡방향철근의 체적철근비와 간격비(콘크리트 코아크기에 대한 횡방향철근 간격의 비)는 구속효과에 가장 큰 영향을 미치는 요소로서 일반적으로 일정한 콘크리트 코아크기에 대해 횡방향철근의 간격이 줄어들 경우 강도 및 연성이 증가한다.<sup>2)</sup> 횡방향철근에 의하여 구속된 콘크리트 기둥의 구속효과는 콘크리트 코아의 강도와 연성의 증가를 비교함으로써 평가될 수 있다. 콘크리트 기둥의 최대구속응력에 대한 실제 기둥이 받고 있는 구속응력의 비로 나타낼 수 있는 구속효과계수는 콘크리트 기둥의 실제적인 구속의 크기를 나타내는 계수로서 구속된 콘크리트 기둥의 구속효과 평가에 유용하게 이용된다. 본 논문에서는 축하중을 받고있는 구속된 콘크리트 기둥의 응력-변형을 관계와 횡방향철근의 구속응력을 실험적으로 측정하였으며, 콘크리트 코아와 횡방향철근의 3차원 모델링을 통한 유한요소해석을 통하여 구속된 기둥의 거동을 해석하였다.

### 3. 구속된 콘크리트 기둥의 해석모델

#### 3.1 연속체적 파괴와 소성모델

구속되어 있는 콘크리트의 최대응력 이전의 구성방정식을 도출하기 위한 콘크리트의 3차원 거동모델은 연속체적 파괴(continuum fracture)모델과 소성(plasticity)모델로 구성될 수 있다. 연속체적 파괴는 콘크리트 내부의 전체손상에 의한 탄성 변형률에너지의 흡수와 방출에 의해 조절되는 탄성손상으로서 정의되며, 소성은 콘크리트에 작용하는 모든 응력의 제거 후에도 회복되지 않는 변형으로 정의된다. 구속된 기둥해석에 사용한 구성모델은 콘크리트를 탄소성을 갖는 손상된 연속체로 가정한 모델<sup>3)</sup>로서 그림 1과 같이 모형화되었다. 즉 콘크리트의 탄성은 스프링으로, 소성은 dashpot으로 모델화 되며, 스프링의 점진적인 파괴로서 콘크리트의 손상은 모형화되었다. 총응력(total stress)은 구성체의 손상되지 않은 요소인 내부응력정도(internal stress intensity)와 연속체적 파괴 이론으로 예측되는 손상정도의 총합으로 간주될 수 있다.

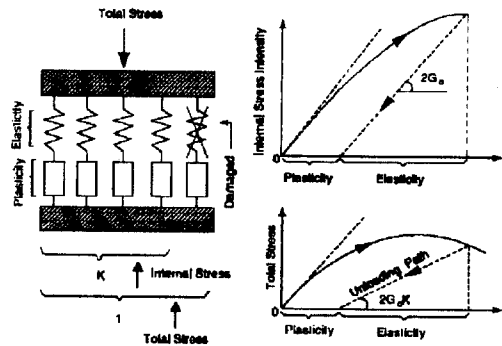


그림 1. 탄-소성과 연속체적 파괴체계의 모형

콘크리트의 파괴모델은 횡방향철근으로 구속된 콘크리트 기둥에서 발생하는 구속의 정도를 나타내는 정수압 불변량  $I_1$  과 탄성변형률  $\epsilon_{eij}$  의 제1차 불변량  $I_{1e}$  를 이용한 정수압에 의한 파괴모델과 전단응력에 저항할 수 있는 남아있는 스프링의 비로 나타낼 수 있는 파괴계수  $K$  를 도입하여 편차응력텐서  $s_{ij}$  의 제2차 불변량  $J_2$  와 탄성편차변형률  $e_{eij}$  의 제2차 불변량  $J_{2e}$  의 관계로 나타낸 전단에 의한 파괴모델로 나누어 모델링되었다. 파괴모델에 의한 응력-변형률 관계식은 (1)과 같고, 이를 증분형태로 표시하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \delta_{ij}I_1 + s_{ij} = 3K_0I_{1e}\delta_{ij} + 2G_0Ke_{eij} \\ d\sigma_{ij} &= dI_1\delta_{ij} + ds_{ij} \\ &= 3K_0\delta_{ij} d\left(\frac{\epsilon_{ekk}}{3}\right) + 2G_0K de_{eij} + 2G_0e_{eij} dK \end{aligned} \quad (1)$$

$$= M_{ijkl} d\epsilon_{ekl} \quad (2)$$

콘크리트의 소성은 응력경로에 의존하며, 비손상 영역에 작용하는 단위 체적에 대한 표면 전단소성 에너지를 고려하여 정식화되었다. 콘크리트의 소성모델도 전단에 의한 소성모델과 체적변화에 의한 소성모델로 나누어 모델링되었다. 탄성변형을 제2차 불변량  $J_{2e}$  로 표시되는 편차응력의 제2차 소성불변량  $J_{2p}$  는 콘크리트의 전단에 의한 잔류변형을 의미하는 것으로 소성경화함수  $H$  로 표시하면 식 (3)과 같다.

$$J_{2p} = H(J_{2e, \max}) \quad (3)$$

여기서,  $J_{2e, \max}$  는  $J_{2e}$  의 최대값을 의미하며, 최대구속상태에서의 탄성편차변형률의 제2차 불변량을 의미한다. 한편 체적소성변형률 불변량  $I_{1p}$  는  $I_{1e}$  로 나타낼 수 있는 구속의 크기에 영향을 받는 함수로서 전단에 의한 체적변화는 Dilatancy derivative  $D$  를 사용하여 다음 식 (4)로 표현된다.

$$dI_{1p} = D(I_{1e}, K) dJ_{2p} \quad (4)$$

소성흐름법칙을 이용하여  $J_{2p}$  의 증분량을 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dJ_{2p} = \frac{e_{aij} e_{aij}}{2 J_{2e}} dg = J_{2e} dg \quad (5)$$

식 (5)를 통하여 탄성변형률텐서의 증분을 의미하는  $d\epsilon_{aij}$  을 이용하여 손상된 연속체에 대한 소성의 구성방정식을 나타내면 식 (6)과 같다.

$$d\epsilon_{pij} = L_{ijkl} d\epsilon_{ekl} \quad (6)$$

여기서,  $L_{ijkl}$  은 식 (7)과 같다.

$$L_{ijkl} = \left( \frac{e_{aij}}{J_{2e}} + D\delta_{ij} \right) \left( \frac{dH}{dJ_{2e}} \right) \frac{e_{akl}}{2J_{2e}} \quad (7)$$

손상과 소성의 구성방정식을 나타내는 식 (2)와 식 (6)으로부터 총응력텐서  $\sigma$  및 총변형률텐서  $\epsilon$  을 파괴와 소성을 의미하는  $M_{ijkl}$ ,  $L_{ijkl}$  의 행렬  $M$ ,  $L$  로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$d\epsilon = M^{-1} d\sigma + M^{-1} L d\sigma \quad (8)$$

식 (8)을 횡방향으로 구속된 콘크리트 기둥의 구성방정식으로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$d\sigma = M(I + L)^{-1} d\epsilon \quad (9)$$

여기서,  $I$  는 단위텐서를 의미한다.

### 3.2 유한요소해석을 위한 모델링

구속된 콘크리트 기둥의 연속체적 파괴와 소성을 이용한 유한요소해석을 위하여 그림 2와 같이 3차원 모델링을 하였다. 콘크리트 기둥코아(c)의 단면이 사각형의 대칭단면이므로 전체단면의 1/4, 높이는 횡방향 철근간격(s)의 2배를 모델링하였다. 구속된 기둥의 해석을 위해 횡방향철근의 응력-변형률 관계는 탄성과 완전소성의 특성을 띠는 것으로 가정하였으며, 휨과 전단을 받는 beam요소를 이용하여 모델링하였다. 콘크리트의 모델은 횡방향의 불균등성을 나타내기 위하여 각 층마다 네개의 solid요소를 사용하였다. 경계조건으로서 밀표면 및 대칭면의 경계조건은 모두 고정시켰으며, 변위제어에 의한 해석을 실시하였다.

### 3.3 유한요소해석 결과

본 연구에서는 구속된 콘크리트 기둥의 거동을 규명하기 위하여 무근 콘크리트 기둥모형 및 콘크리트 코아크기(횡방향철근의 중심간 간격)가 다르며, 횡방향철근의 체적철근비 및 간격비가 각기 다른 9개의 구속된 기둥모형을 제작하였으며, 구속된 기둥모형(No.1~9)과 무근 콘크리트 모형(No.10)에 대한 유한요소해석을 실시하였으며, 대상기둥모형의 실험결과와 비교하였다. 표 1은 대상기둥에 대한 설계상세를 나타냈다. set a는 콘크리트 코아의 크기변화에 대한 구속효과의 차이를 비교하기 위하여 체적철근비 및 간격비가 같으며, 코아의 크기만을 변화시킨 모형이다. set b는 체적철근비는 1.9%, set c는 체적철근비가 3.5%이면서 간격비가 모두 다른 기둥모형이다.

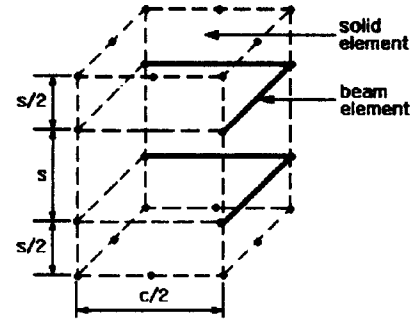


그림2. 대상기둥 및 유한요소해석 모델링

표1. 기둥모형의 설계상세

Set	Specimen No.	Specimen Size (cm)	Core Size (c) (cm)	Tie Spacing (s) (cm)	Spacing Ratio (s/c)	Volume Reinforcement Ratio ( $\rho_v$ )(%)	Lateral Reinforcement	Remark
a	1	15×15×60	14.1	7	0.53	2.58	$\phi$ 9	Size Effect of Core
	2	20×20×80	18.7	9.5	0.51	2.55	$\phi$ 12	
b	3	20×20×80	19.4	3.2	0.16	1.82	$\phi$ 6	$\rho_v = 1.9\%$ Effect of Spacing
	4	20×20×80	19.1	7	0.37	1.90	$\phi$ 9	
	5	20×20×80	18.7	13	0.70	1.86	$\phi$ 12	
	6	20×20×80	18.4	23	1.25	1.90	$\phi$ 16	
c	7	20×20×80	19.1	3.8	0.20	3.51	$\phi$ 9	$\rho_v = 3.5\%$
	8	20×20×80	18.7	7	0.37	3.46	$\phi$ 12	
	9	20×20×80	18.4	12.3	0.67	3.55	$\phi$ 16	
	10	20×20×80	-	-	-	Plain Concrete		

그림 3은 콘크리트 코아의 크기가 다른 set a와 무근 콘크리트 기둥모형의 유한요소해석의 결과이다. 그림 3에서 보듯이 콘크리트 코아크기를 변화시킬 때 거의 동일한 용력-변형률 관계를 얻을 수 있으며, 코아크기가 대상기둥의 거동에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 또한 무근 콘크리트 기둥에 비하여 최대용력 및 최대용력에서의 변형률이 크게 나타나고 있다.

그림 4는 체적철근비가 1.9%이며, 간격비가 각기다른 set b와 무근 콘크리트 기둥모형의 해석결과이다. 결과에서 보듯이 간격비가 작을수록 최대용력 및 최대용력에서의 변형률이 큰 값을 나타냈다.

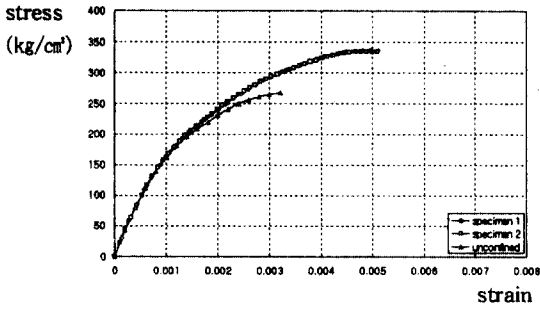


그림3. set a의 응력-변형률 관계

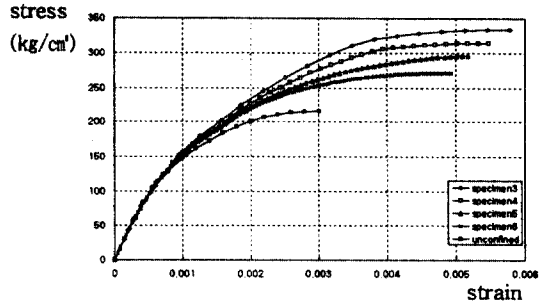


그림4. set b의 응력-변형률 관계

그림 5는 체적철근비가 3.5%이며, 다른 간격비를 가진 set c와 무근 콘크리트 기둥모형의 최대하중 이전까지의 유한요소해석 결과이다. 무근 콘크리트 기둥의 최대응력에 비하여 최대응력이 매우 크게 나타나며, set b와 같이 간격비가 작을수록 최대하중 및 최대하중에서의 변형률이 크게 나타났다. 체적철근비가 1.9%인 set b에 비하여 체적철근비가 3.5%인 set c가 동일한 간격비인 경우 최대응력이 더 커졌으며, 간격비변화에 의한 최대응력증가가 더 크게 나타났다.

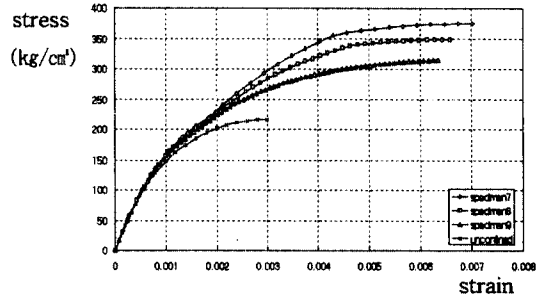


그림5. set c의 응력-변형률 관계

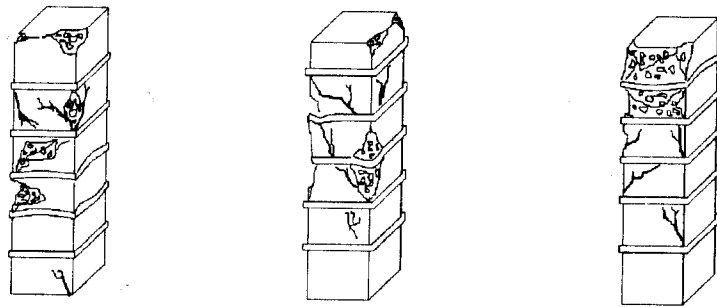
#### 4. 실험 및 해석과의 비교

해석을 수행한 대상 기둥모형 set a, b, c와 무근 콘크리트 기둥모형에 대하여 축하중 재하실험을 실시하였으며, 동시에 횡방향철근의 중심부에 변형률게이지가 부착되어 철근의 구속응력이 측정되었다. 표 2는 모형 1~9의 실험과 유한요소해석의 결과의 비교이다.

표2. 실험과 해석의 결과비교

Specimen No.	Max. Strength $\sigma_{cc}$ (kg/cm <sup>2</sup> )		Strain at Max. Strength $\epsilon_{cc}$		Strength Increase (kg/cm <sup>2</sup> )		Effective Confining Stress $\sigma_v$ (kg/cm <sup>2</sup> )		Confinement Effectiveness Index $\alpha$		
	Analysis	Exp.	Analysis	Exp.	Analysis	Exp.	Analysis	Exp.	Analysis	Exp.	
set a	1	337.0	348.5	0.00510	0.0051	94.0	105.5	13.43	9.68	0.35	0.25
	2	334.8	352.8	0.00510	0.0045	91.8	109.8	12.94	9.57	0.34	0.25
set b	3	322.3	332.5	0.00479	0.0050	79.3	89.5	9.54	9.24	0.35	0.34
	4	306.9	335.7	0.00469	0.0046	63.9	92.7	10.51	11.30	0.37	0.40
	5	287.6	332.0	0.00465	0.0042	44.6	89.0	8.21	9.28	0.29	0.33
set c	6	268.1	326.7	0.00419	0.0038	25.1	83.7	2.85	3.73	0.10	0.13
	7	355.7	340.5	0.00533	0.0043	112.7	97.5	19.79	14.10	0.38	0.27
	8	333.1	386.8	0.00517	0.0050	90.1	143.8	18.56	23.18	0.36	0.45
	9	298.0	314.3	0.00531	0.0042	55.0	71.3	13.22	12.96	0.25	0.24

콘크리트 코아의 크기가 각각 14.1, 18.7cm인 set a의 실험결과도 해석의 결과에서 처럼 콘크리트 코아의 크기변화는 기둥의 구속효과에 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 체적철근비가 1.90%, 간격비가 각각 0.16, 0.37, 0.70, 1.25인 set b의 유한요소해석의 결과가 간격비의 감소에 따라 최대용력이 크게 나타나고 있으나, 본 실험결과에서는 간격비가 가장 작은 모형 3이 모형 4보다 최대용력이 약간 작은 값이 나타났으며, 모형 3의 횡방향철근 직경이 매우 작은  $\phi 6$  을 사용하여 충분한 구속용력이 전달되지 못한 이유로 판단된다. set c는 체적철근비가 3.50%, 간격비가 각각 0.20, 0.37, 0.67이며, 유한요소해석의 결과에서 보듯이 간격비가 클수록 최대하중, 최대하중에서의 변형률 및 유효구속용력이 작게 나타남을 알 수 있다. 그림 6의 (a), (b)는 모형 4와 모형 8의 파괴형상으로 모형 중앙부에서 비스듬한 전단파괴면의 형성을 볼 수 있었다. 그러나 모형 7의 최대하중 및 유효구속용력이 실험에서 작게 나온 것은 그림 6의 (c)에서 보듯이 모형의 파괴가 끝단부에서 발생하였기 때문에 충분한 구속용력을 받기전에 단부파괴가 이루어진 결과인 것으로 판단된다.



(a) 모형 4

(b) 모형 8

(c) 모형 7

그림6. 모형의 파괴형상

실험과 해석의 구속효과계수산정 결과로부터 횡방향철근의 체적철근비의 증가는 강도증가, 구속효과의 증가를 가져오며, 동일한 체적철근비를 사용할지라도 간격비의 감소로 강도 및 연성의 증가 뿐만 아니라 구속효과를 극대화 할 수 있음을 알 수 있다. 표 2에서 보듯이 실험과 해석의 결과는 비교적 잘 일치하였다. 그림 7과 8은 모형 4와 모형 8의 실험과 해석에 의한 기둥이 파괴에 이르기까지의 응력-변형률 관계를 나타낸 것으로 최대하중 이후의 거동해석결과는 구속된 기둥의 변형률국소화모델에 의한 해석결과로부터 얻어졌다.<sup>4)</sup>

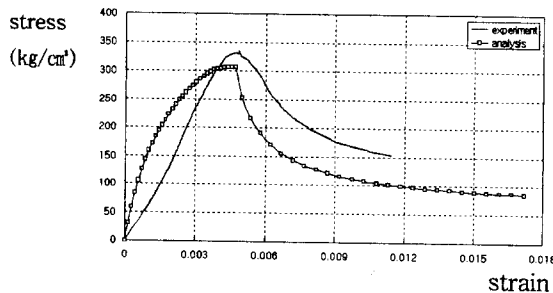


그림7. 모형 4의 실험과 해석의 비교

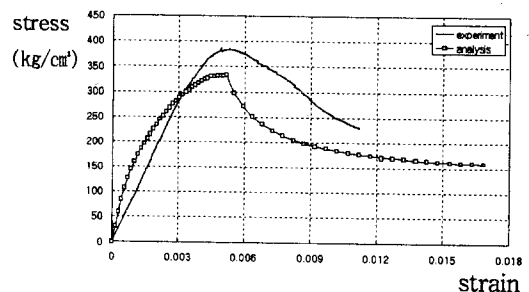


그림8. 모형 8의 실험과 해석의 비교

## 5. 결 론

본 연구에서는 횡방향철근에 의하여 구속된 콘크리트 기둥의 구속효과를 평가하기 위하여 모형실험을 하였으며, 콘크리트 기둥의 실제거동을 예측하기 위한 3차원 모델링을 통하여 유한요소해석을 실시하였다. 실험과 해석결과의 분석으로 부터 횡방향철근의 체적철근비와 간격비는 구속된 콘크리트 기둥의 구속효과에 가장 큰 영향을 미치는 요소이며, 체적철근비가 높을수록 간격비변화에 따른 구속효과의 변동이 컸으며, 동일한 체적철근비를 사용한 경우에도 횡방향철근의 간격비를 줄임으로써 구속효과를 높일수 있음을 해석과 실험을 통하여 밝혔다. 본 연구의 해석수법은 구속된 콘크리트 기둥의 거동을 비교적 잘 재현하였으며, 구속된 콘크리트 기둥의 최대하중 추정 및 연성의 추정, 그리고 구속철근 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Azizinamini, A., Kuska, S. S. B., Brungardd, P. and Hatfield, E., "Seismic Behavior of Square High-Strength Concrete Column", ACI Structural Journal, Vol 91, No. 3, 1994, pp. 336~345.
2. Cusson, D. and Paultre, P., "High-Strength Concrete Column Confined by Rectangular Ties", ASCE Structural Engineering, Vol 120, No. 3, 1994, pp. 783~804.
3. Pallewatta, T. M., Irawan, P. and Maekawa, K., "Confinement Effectiveness of Lateral Reinforcement Arrangements in Core Concrete", Concrete Library of ISCE, No. 27, 1996, pp. 197~223.
4. 송하원, 최동휴, 변근주, "구속된 콘크리트 기둥의 변형률국소화에 관한 연구", 토목학회 학술발표회 논문집, 1997.