

## 철근 콘크리트 부재의 주근좌굴에 관한 수치해석

Numerical Analysis on the Buckling of a Longitudinal  
Bar in Reinforced Concrete Members

○ 이 용 택\*   박 재 형\*\*   이 원 호\*\*\*   이 리 형\*\*\*\*  
Lee, Y. T.   Bark, J. H.   Yi, W. H.   Lee, L. H.

---

### Abstract

The study summarized in this paper is concerned with the buckling of a longitudinal bar in reinforced concrete members by numerical analysis method.

The objectives of this study are to investigate the stress transfer mechanism between concrete and reinforcement and to propose a modeling equation.

The result gives an acceptable agreement between the proposed modeling equation and the computer package as follows:

- (1) the proposed equation is a possible prediction of the strain softening of concrete and reinforcement buckling.
- (2) the buckling of longitudinal bars is mainly influenced by the spacing of hoops and the location of the bar.

---

### 1. 서 론

일반적으로 내진 구조물은 보의 항복을 선행시키므로써 기둥에서 소성힌지가 발생되지 않도록 하며, 가능한 한 기둥은 탄성거동을 하도록 설계된다. 또한, 횡보강근으로 코아 콘크리트를 구속하므로써 기둥의 연성 및 강도를 증대시킬 수 있다는 것은 기존의 많은 연구로부터 알 수 있다. 그러나 충분한 횡보강근으로 코아 콘크리트를 구속시키더라도 주근에는 좌굴이 발생되며, 이것은 부재의 최종 파괴를 결정하는 중요한 요인의 하나이나 최근 까지 이와 같은 주근 좌굴에 관한 명확한 연구가 수행되지 않고 있어 이에 대한 연구가 필요하다.

고축력하에서 반복 휨 및 전단력을 받는 철근 콘크리트 기둥실험으로부터 주근 좌굴이 부재의 최종적인 내력저하의 원인이라고 보고되고 있으며<sup>1)</sup>, 따라서 철근 콘크리트 구조물의 기둥 또는 보에 충분한 강도 및 변형 능력을 확보시키기 위한 하나의 방법은 주근의 좌굴을 방지하는 것이라 할 수 있다.

---

\* 정회원, 한양대 건축공학과 박사과정

\*\* 정회원, Carnegie Mellon대 박사과정

\*\*\* 정회원, 광운대 건축공학과 조교수

\*\*\*\* 정회원, 한양대 건축공학과 교수

주근좌굴은 피복 콘크리트 박리 후, 횡보강근의 간격에 크게 영향을 받으므로 주근좌굴을 방지하기 위한 횡보강근의 간격을 주근 직경의 8배이하 또는 6배이하로 규정하고 있으며, 또한 그 배근상세도를 제시하고 있지만, 주근의 좌굴현상에 대한 해석적인 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 변형연화(Strain Softening) 및 철근의 대변형(Large Deformation)을 고려하고, 철근과 콘크리트 경계면에서의 응력전달 기구 및 횡보강근의 면외 변형을 고려한 수치해석법을 제안함과 동시에, 이 해석법을 이용하여 철근콘크리트 부재를 유한요소법에 의하여 해석함으로써 주근의 좌굴성상을 조사하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 수치 해석법

### 2.1 철근콘크리트 부재의 모델링 및 해석상의 가정

- ① 콘크리트는 평면응력, 철근은 축방향 및 축 직교방향으로 변형을 일으키는 것으로 간주하여 철근콘크리트 부재를 모델링 한다.
- ② 피복 콘크리트는 박리되는 것으로 가정한다.
- ③ 콘크리트의 응력-변형도 관계는 그림 1과 같다.
- ④ 콘크리트는 3각형 요소를 사용하며, 응력-변형도는 요소내에서 일정한 것으로 한다.
- ⑤ 철근은 선재로 취급하며, 응력-변형도는 그림 2와 같다.
- ⑥ 철근의 단면은 단위요소로 분할하여 각각의 단위 요소내에서 응력-변형도는 일정한 것으로 한다.
- ⑦ 철근의 좌굴 현상을 고려하기 위하여 길이방향 변형도 증분에 기하학적 비선형을 고려한다.
- ⑧ 철근과 콘크리트 경계면에 스프링을 설치하여 철근과 콘크리트 사이의 응력 전달 기구를 고려한다.
- ⑨ 횡보강근의 면외 변형을 고려한다.

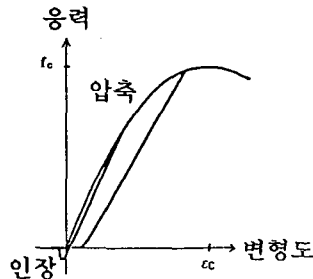


그림 1 콘크리트의 응력-변형도 곡선

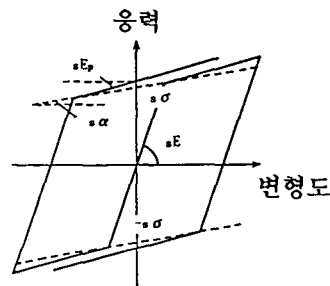


그림 2 철근의 응력-변형도 관계

### 2.2 평면응력에 대한 콘크리트의 구성방정식

평면응력하에서 콘크리트의 응력-변형도 관계식은 前川<sup>2)</sup>이 제안한 식(1) 및 (2)로 정의되는 등가응력  $S$ 와 등가 탄성변형도  $E_e$ 의 2가지 불변량에 관하여 식(3)의 선형 관계식을 이용하였으며, 특히 (2)식에서  $\epsilon_0$  및  $\gamma_0$ 의 계수에 대하여 前川은 0.62 및 0.98을 사용하고 있으나, 본 연구에서는 그림 3에서와 같이 0.53 및 1.04로 수정제안하였다.

$$S = S(\sigma_0, \tau_0) = \sqrt{\left(\frac{0.6\sigma_0}{f'_c}\right)^2 + \left(\frac{1.3\tau_0}{f'_c}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{2} \cdot \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}, \quad \tau_0 = \sqrt{2\left\{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2\right\}}$$

$$Ee = F(\varepsilon_0, \gamma_0) = \sqrt{\left(\frac{0.53\varepsilon_0}{\varepsilon_c}\right)^2 + \left(\frac{1.04\gamma_0}{\varepsilon_c}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon_0 = \sqrt{2} \frac{\varepsilon_{exx} + \varepsilon_{eyy}}{2}, \quad \gamma_0 = \sqrt{2\left\{\left(\frac{\varepsilon_{exx} - \varepsilon_{eyy}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{exy}}{2}\right)^2\right\}}$$

$$S = E_0 \times K \times Ee \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $f'_c$  = 콘크리트 압축강도,  
 $\varepsilon_c$  =  $f'_c$ 에 대한 변형도

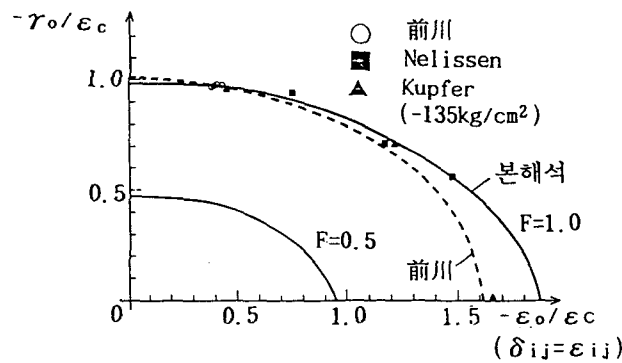


그림 3 변형도 곡선

### 2.3 콘크리트의 균열 판정기준

콘크리트의 균열에 대해서는 Smearred Crack Model을 적용하였으며, 균열의 판정기준은 변형도 경로를 고려하여 다음과 같은 식을 이용한다.

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 < S_c \quad \quad \quad : \text{균열없음} \\ \sigma_1 = S_c \text{ 이고 } \varepsilon_1 = \varepsilon_{p1} \quad : \text{균열개시} \\ S_c = 0.13(1-0.73E_{\max}) \cdot f_t \quad : \text{균열에너지} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$\sigma_1$ 은 균열 해제응력을 무시하고 변형이력과 콘크리트의 구성방정식으로 부터 구한 최대 주응력이며,  $\varepsilon_1$ 은 최대 주변형도,  $\varepsilon_{p1}$ 은 최대 주소성 변형도이다. 또한,  $f_t$ 는 인장강도이다.

## 2.4 유한 변형을 고려한 철근의 해석방법

축방향에 대해서는 1차, 축직교방향에 대해서는 3차 다항식의 중분 변위 함수를 이용한다. 철근단면은 원형으로 하며, 이형 철근의 형상은 고려하지 않는다. 응력-변형도의 탄소성 성상 및 유한 변형을 고려한 해석법은 기존의 연구를 이용 하며, 여기서는 요소내의 축방향 변형도 중분만을 유도한다. 이형철근을 원형단면으로 치환하여 단면을 20개의 미소단면으로 분할 한다.

## 2.5 접촉 스프링과 부착 스프링

철근과 콘크리트의 경계면에는 그림 4와 같은 접촉 스프링과 부착 스프링을 설치하며, 접촉 스프링은 그림 5(a)와 같이 철근과 콘크리트가 접촉 될 때는 높은 탄성 강성을 보이며, 분리될 때는 무저항으로 되는 특성을 나타낸다.

철근과 콘크리트가 접촉하고 있을 때는 미끄러짐 마찰에 의하여 그림 5(b)와 같은 전단력이 발생되고, 철근과 콘크리트가 분리되어 있을 때는 전단력이 작용하지 않는 것으로 한다.

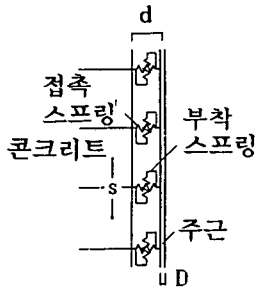


그림 4 콘크리트와 철근 경계면의 부착 스프링과 접촉 스프링

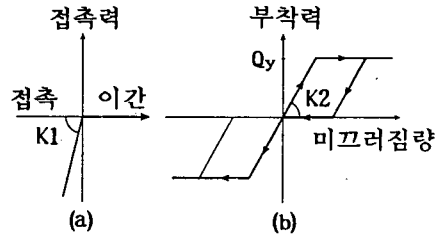


그림 5 접촉 스프링 및 부착 스프링의 복원력 특성

## 2.6 등가 변위

주근이 횡보강근의 한변 중간에 접하고 있는 경우의 해석을 위하여 다음 그림 6과 같은 모델을 사용하므로써 입체효과를 고려할 수 있도록 한다. 즉, 면외의 변형을 고려할 경우, 상호 교차되는 두 철근의 교점에서 선재(주근)의 축방향과 직교하는 방향으로 변형량을 증가시키며, 콘크리트와 횡보강근 사이에는 횡보강근의 축방향과 직교하는 방향으로 변위를 증가시키도록 한다.

## 2.7 해석의 흐름도

이상과 같은 콘크리트 및 철근에 대한 해석의 흐름도는 그림 7과 같다. 또한, 단면이 소성화 되거나 변형이 커짐에 따라 내력과 외력은 항상 일치하지 않으므로 동일조건하에서 반복 계산을 수행한다.

## 3. 수치 해석 예

### 3.1 해석대상 부재와 해석 모델

해석대상 부재는 그림 8, 해석모델은 그림 9, 해석단면은 그림 10과 같으며, 해석에 사용된 재료성질은 표 1과 같다.

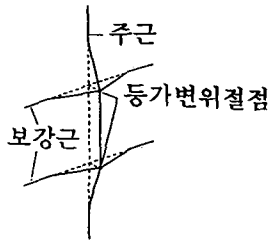


그림 6 주근과 횡보강근의 등가변위

표 1 재료의 성질

종 류	특 징
철근(D25)	$sE = 2100.0 \text{ ton/cm}^2$ $sE_p = 10.0 \text{ ton/cm}^2$ $s\sigma = 5.0 \text{ ton/cm}^2$ $s\sigma_y = 3.5 \text{ ton/cm}^2$ $a_t = 4.91 \text{ cm}^2$
횡보강근	$a_w = 0.785 \text{ cm}^2$
콘크리트	$cE = 285 \text{ ton/cm}^2$ $c f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$ $c f_t = 30 \text{ kg/cm}^2$ $c \epsilon_c = 0.0022$
접촉 스프링	$K_1 = 98000 \text{ ton/cm}$
부착 스프링	$K_2 = 34400 \text{ ton/cm/절점}$ $Q_y = 344 \text{ kg/절점}$

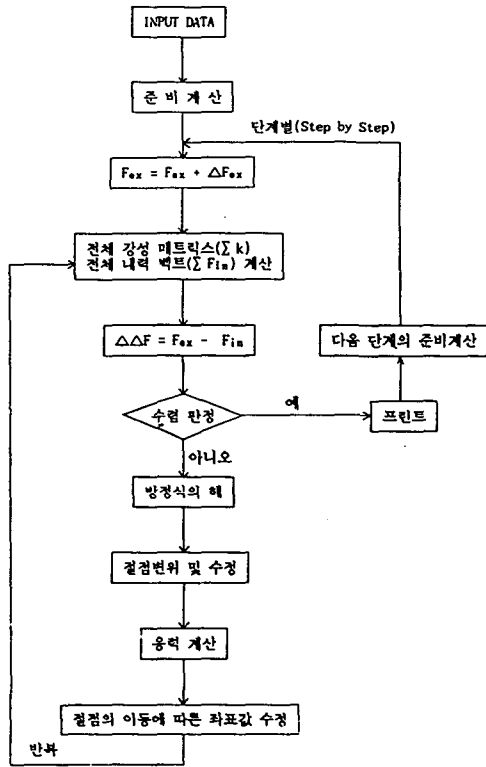


그림 7 해석의 흐름도

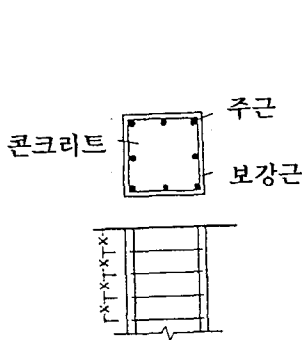


그림 8 해석 대상 부재

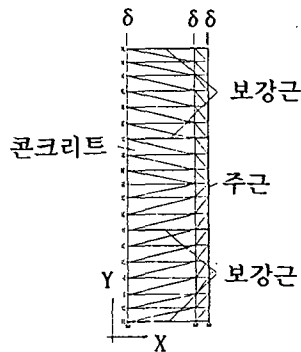


그림 9 해석 모델링

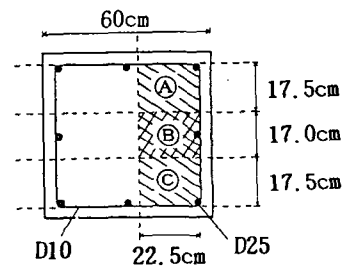


그림 10 해석 단면

### 3.2 해석

그림 9에서 보는 것과 같이, 콘크리트 및 철근의 상단면에 강제변위를 가하며, 또한 콘크리트가 변형도 연화를 시작할 때의 불안정을 방지하기 위하여 각 단계에 강제 변위를 분배하여 적용시킨다.

주근은 횡보강근에 의하여 3등분되는 것으로 하며, 이중 상·하단부에서는 콘크리트쪽으로 횡보강근 간격(s)의 1/1000에 해당하는 초기 횡변위를 주근 중앙에, 중간부에서는 상·하단부와 반대쪽(외측)으로 s/100의 초기 횡변위를 주근 중앙에 사인(sin)곡선으로 가한다. 또한, 기둥의 단면은 그림 10과 같이, 3부분으로 분할하여 주근이 모서리에 있는 경우(Case A)와 중앙부에 있는 경우(Case B)로 나누어서 해석하였으며, 여기에서는 Case A에 대한 횡보강근 간격을 주근 직경의 8배 및 10배인 경우의 2가지와 Case B에 대한 8배의 경우 등 모두 3가지 종류에 대한 해석을 실시하여 비교·검토한다.

### 3.3 해석 결과

#### 3.3.1 하중-변위 관계

해석결과로부터 얻은 각각의 하중-변위 관계를 그림 11과 12에 나타내었다.

Case A에 대하여 횡보강근 간격이 8D인 경우에는 주근 좌굴이 항복응력의 약 95%에서 발생되고 있음을 알 수 있으며, 그 후 응력은 약간 저하되나 주근 중앙부의 횡변위가 최종적(축변위 0.7cm)으로 약 1cm정도의 좌굴진행을 방지하고 있다는 면에서 횡보강근의 구속효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

10D의 경우, 주근 좌굴이 항복응력의 약 91%에서 발생되었고, 그 후에도 내력 저하를 나타내며 횡변위가 최종적(축변위 0.8cm)으로 약 2cm정도로 나타나 8D에 비하여 좌굴진행의 방지 효과가 크게 떨어지고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 횡보강근의 간격이 8D라도 Case B의 경우에는 주근 좌굴이 항복응력의 약 58%인 상당히 낮은 응력에서 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

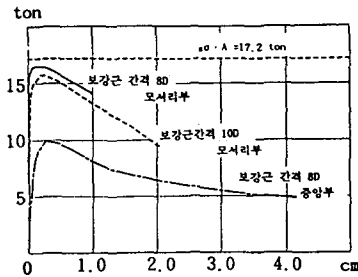
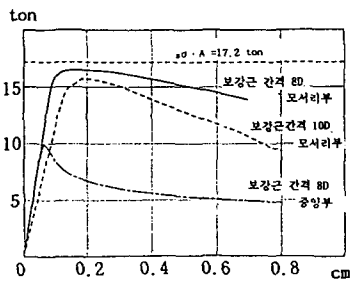


그림 11 주근의 축력 - 길이방향 변위 관계      그림 12 주근의 축력 - 횡 변위 관계

#### 3.3.2 주근의 변형모드

주근의 변형모드를 그림 13에 나타내었다. 모서리 부분의 주근 변형모드는 구속효과가 크게 나타나고 있으나, Case B의 경우는 주근이 좌굴될 때 횡보강근도 동시에 늘어나 좌굴발생시 횡보강근의 구속효과가 작다는 것을 알 수 있다.

#### 3.3.3 주근의 응력 분포

그림 14에 주근의 전단력 및 휨 모멘트의 분포를 나타내었다. 모서리 부분의 주근에 대해서는 횡보강근이 있는 곳에서 상당히 높은 응력이 발생하고 있으며, 횡보강근의 구속효과가 크게 나타나고 있다. 이에 반하여 중앙부의 주근에 대해서는 횡보강근의 효과가 극히 작고

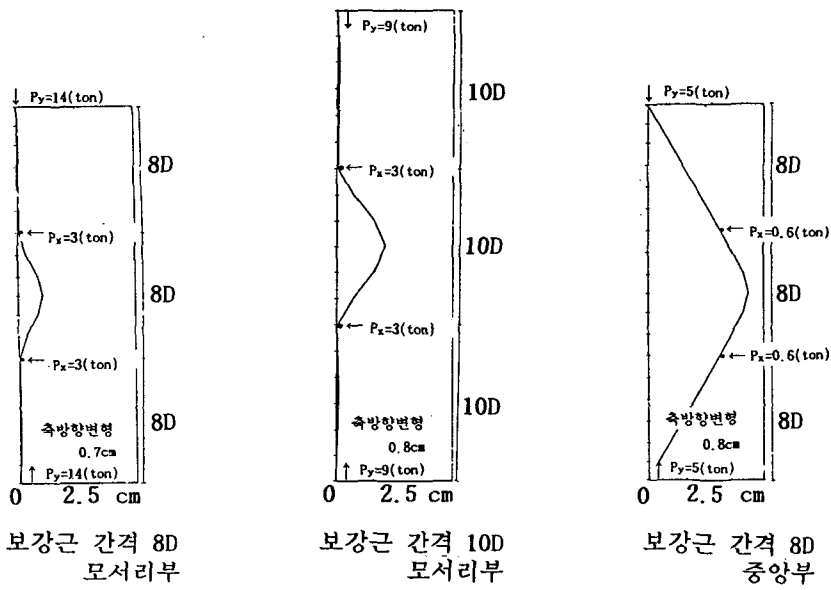


그림 13 주근 변형 모드

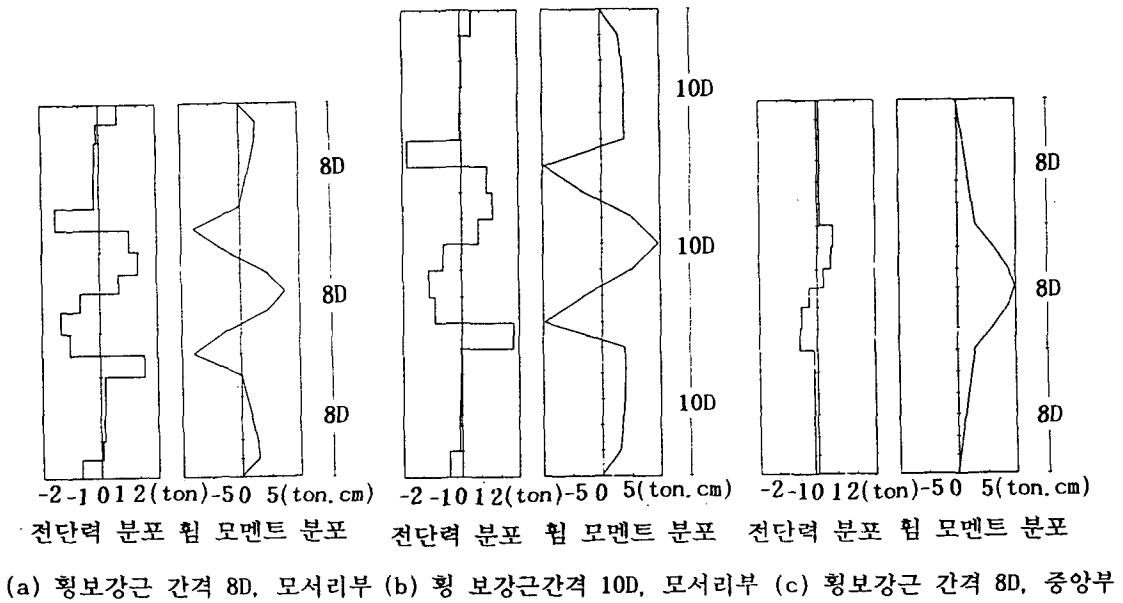


그림 14 주근의 응력분포

휨 모멘트가 반전되지 않고 있음을 알 수 있다.

### 3.3.4 경계면에서의 응력전달

그림 15에 주근과 콘크리트 사이의 부착력 및 접촉력의 분포를 나타내었다. Case A의 경우, 횡보강근이 있는 부분에서 상당히 높은 응력의 전달이 행해지고 있음을 알 수 있다. 이에 반하여 Case B의 경우, 횡보강근의 효과가 극히 작고 콘크리트와 떨어져 있어 응력의 전달이 거의 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다.

## 4. 결론

철근의 대변형을 고려한 철근콘크리트 부재의 주근좌굴 해석결과로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 해석법으로 철근콘크리트 부재에서 콘크리트, 주근 및 횡보강근에 대한 콘크리트의 변형도 연화 및 주근 좌굴을 고려한 해석이 가능한 것으로 판단된다.
- (2) 본 연구에서 사용된 배근형상에 대한 주근좌굴의 횡보강근에 의한 구속 효과는 모서리 부분보다 중앙부에서 그 효과가 적다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 모서리 부분 및 중앙부의 주근에 대한 횡보강근의 구속효과 차이는 변형 모드 및 주근의 응력분포에 나타났듯이, 모서리 부분의 주근에서는 횡보강근이 있는 부분에서 휨 모멘트 분포가 반전되는 것에 반하여 중앙부의 주근에는 주근이 좌굴할 때 횡보강근도 함께 늘어나 횡보강근의 효과가 극히 작고, 휨 모멘트의 반전도 일어나지 않는 경향을 보였다.

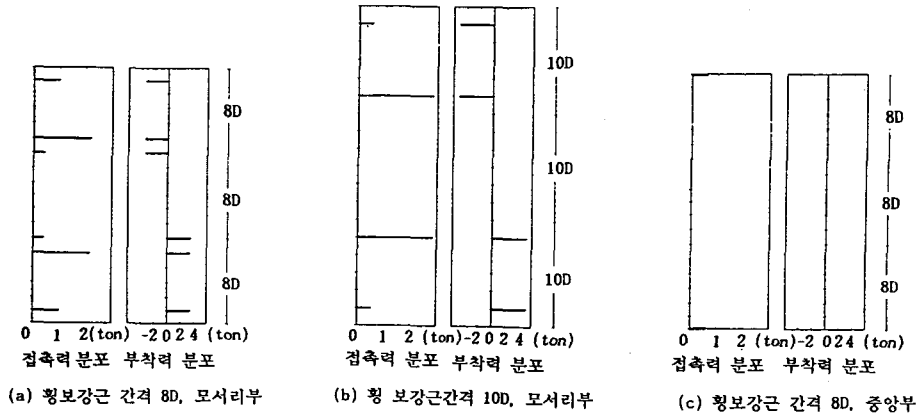


그림 15 주근의 접촉력 및 부착력 분포

## 참고 문헌

1. 黒正清治, “高軸力下における鉄筋コンクリート柱の評価に関する研究”, 昭和58年度文部省科學研究費補助金研究成果報告書
2. K. Maekawa, “The Deformational Behavior and Constitutive Equation of Concrete Based on the Elasto-Plastic and Fracture Model,” April, 1985.