

매시브 콘크리트에 배근된 축방향 주철근의 인발특성에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on the Pullout Properties of Axial Bars
Embedded in Massive Concrete

장 일 영*
Jang, Il Young

송 재 호**
Song, Jae Ho

변 근 주***
Byun, Keun Joo

ABSTRACT

The objective of this study is to clarify analytically the pullout behavior of axial bars from a footing. The bond stress-slip model obtained from the results by the finite element method as well as the pullout tests in massive concrete was used in order to evaluate the slip of bars from the footing. Also, the process of bond mechanism was taken into consideration in order to express the deterioration of bond stress along bars. The shape and magnitude of bond stress distribution depends upon each loading steps. Using equilibrium equation of axial force, τ - S relationship and σ_s - ϵ_s relationship, the differential equations of each loading steps are derived. Applying both boundary and equilibrium conditions to the equations, the amount of slip could be determined. Calculated values on the basis of proposed method evaluation of the slip of bars have a good agreement with the experimental results.

1. 서론

철근콘크리트 기둥 및 교각이 지진력과 같은 동적 하중을 받을 때에는 상부구조의 휨력 및 전단력에 의한 변형외에 기둥부재의 회전변형이 발생한다. 회전변형은 그림-1에서와 같이 확대기초와 연결된 축방향 주철근의 뽐힘현상(Δ)에 따른 기둥부분의 회전(θ)으로 생기는 수평변형(δ_0)을 말한다. 이러한 회전변형으로 인한 상부구조의 변위는 전체 수평변위(휨변위, 전단변위 및 회전변위가 중첩된 최종변위량, 즉 각변위 성분들을 직렬관계로 가정)에서 매우 큰 부분을 차지하는 것으로 알려져 있다(1,2). 따라서 철근콘크리트 기둥 및 교각의 확대

기초부로 부터의 축방향 주철근 뽐힘량을 해석적으로 파악하는 것은 매우 중요하다. 그러나 이러한 회전변위의 평가는 연구결과마다 상당한 차이(1,2)를 나타내는등 명확한 해석평가법이 확립되어 있지 않다.

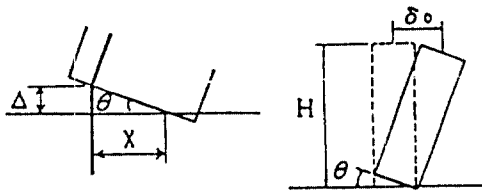
여기서 본연구는 기둥부재의 정부방향 반복재하시의 뽐힘량을 실용적이며 정확히 해석하는 방법을 제안하는 것을 목적으로 한다.

본연구의 특징은 매시브 콘크리트 내부로 진행되는 부착 손실과정을 부착응력 분포에 의해서 표현하여, 철근축방향의 힘의 평형조건, 재료간의 부착특성(τ - S 관계) 및 철근의 재료특성(σ_s - ϵ_s 관계)등을 이용 비교적 간단히 뽐힘양을 해석할 수 있다는 것이다.

* 금오공과대학교 토목공학과 전임강사

** 금오공과대학교 토목공학과 부교수

*** 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수



$\delta_0 = \theta \cdot H = (\Delta / X) \cdot H = \Delta \cdot H / X$
 여기서, X_0 : 인장축철근에서 중립축까지 거리
 H : 기둥부재 높이
 θ : 회전각
 Δ : 축방향 주철근의 뽐힘량

그림-1 회전변형에 의한 수평변위

2. 매시브콘크리트에 정착된 주철근의 부착응력-슬립 관계 모델

그림-2는 매시브 콘크리트 속에서의 단조재하시의 철근 부착특성을 부착응력-슬립 관계(τ - S)로서 모델화한 것이다(3). 여기에서 철근과 콘크리트와의 점착력이 없어지는 한계치를 C점, 철근주위 콘크리트에 내부균열이 발생하는 한계치를 A점, 최대 부착응력을 Y점, 그리고 잔류 부착강도가 시작되는 점을 R점으로 나타냈다. 이러한 부착특성의 한계점인 C, A, Y, R의 결정에 있어서 본연구에서는 유한요소법(4)에 의한 해석결과(실험으로는 구할 수 없는 콘크리트 주응력 등을 구하기 위해 이용했다)와 정착부의 인발 실험결과들(3)을 이용하였다.

정부방향 반복재하시의 부착응력-슬립 관계 모델은 그림-3에 나타낸 바와 같이張의 실험결과(3)와 野口(4), 森田의 모델(5)을 이용하여 모델화 하였다.

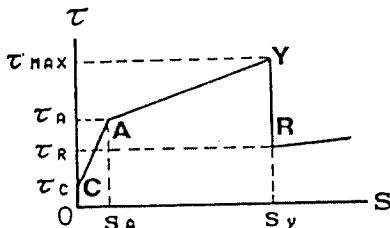


그림-2 단조재하시의 τ - S 모델

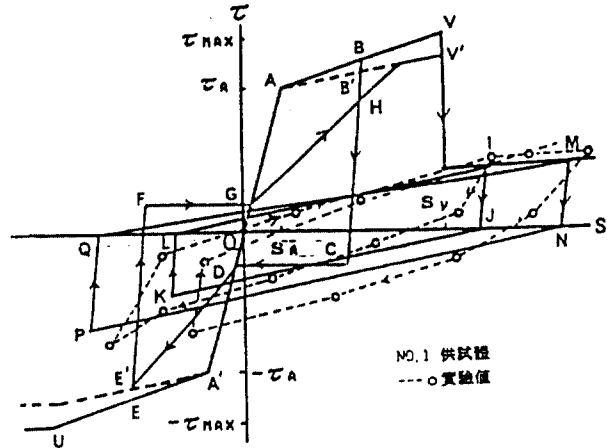


그림-3 정부방향 반복재하시의 τ - S 모델

3. 단조재하시의 뽐힘량 해석방법

매시브 콘크리트에 배근된 축방향 주철근의 뽐힘 현상은 철근과 콘크리트와의 부착 손실에 의해서 발생하는 것으로써, 양 재료간의 부착특성(τ - S 관계) 및 철근의 재료특성(σ_s - ϵ_s 관계)에 많은 영향을 받는다. 본연구에서는 이러한 뽐힘량을 해석적으로 구하기 위해서 재하단(기둥구조물의 경우는 확대기초와 상부부재와의 경계면)에서 매시브 콘크리트 내부로 진행되는 부착 손실과정을 부착응력 분포에 의해서 표현하였다. 부착응력분포의 형상 및 크기는 하중단계에 따라서 틀리며, 철근축방향의 힘의 평형조건(3-1)식에 τ - s 관계 및 σ_s - ϵ_s 관계를 이용함으로써 하중단계마다의 부착응력 미분방정식이 유도된다. 이것을 경계조건 및 하중과의 평형조건에 따라서 풀면 뽐힘량을 구할 수 있다.

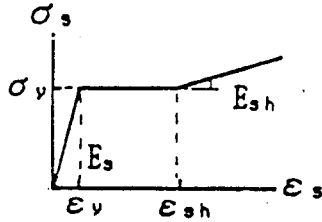
콘크리트 속의 철근 미소요소에 대한 축방향력의 평형방정식은 다음 식과 같다.

$$\tau = \frac{A_s \cdot dx}{U \cdot dx} \quad (3-1)$$

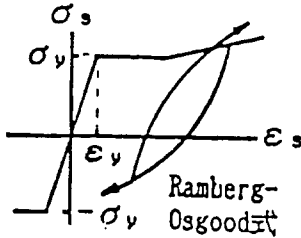
여기서 τ : 부착응력, σ : 철근응력, A_s : 철근의 단면적, U : 철근의 원주길이

3.1 철근의 응력-변형을 관계

단조재하시의 철근 응력-변형율(σ_s - ϵ_s) 관계는 그림-4(a)와 같으며 변형율의 구간별 철근의 응력은 다음과 같은 (3-2)식으로 나타낼 수 있다.



(a) 단조재하시



(b) 반복재하시

그림-4 철근의 응력-변형률 관계

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad : (\varepsilon_s < \varepsilon_y) \quad (3-2a)$$

$$\sigma_s = \sigma_y \quad : (\varepsilon_y < \varepsilon_s < \varepsilon_{sh}) \quad (3-2b)$$

$$\sigma_s = \sigma_y + E_{sh}(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) \quad : (\varepsilon_{sh} < \varepsilon_s) \quad (3-2c)$$

정부방향 반복재하시의 $\sigma_s - \varepsilon_s$ 관계는 그림-4(b)와 같으며 철근항복후의 제하(除荷) 및 재재하(再載荷)는 Ramberg-Osgood 식에 따른다.

3.2 단조재하시의 해석방법

매시브 콘크리트에 배근된 철근이 축방향력을 받는 경우, 철근축방향(χ)에 연하는 부착응력분포를 그림-5 (a), (b)에 나타낸다. 그림-5(a)는 철근항복전, 그림-5(b)는 철근항복후의 부착응력분포의 일례로서 I, II, III, IV의 4영역으로 나누어 표현하였다. 여기서 단계 I은 점착력 파괴로부터 내부균열 발생까지, 단계 II는 내부균열 발생으로부터 철근항복까지, 그리고 단계 III은 철근항복 이후의 잔류부착 거동을 나타내고 있다(각영역의 길이 L_1, L_2, L_3 는 재하단 작용하중과의 평형조건에 의해서 구할 수 있다).

IV의 영역은 재하단의 방추형균열에 의한 부착손실을 고려한 것으로 재하단에 대해서는 부착응력이 0이 되도록 직선적으로 감소시켰다. 영역 IV의 길

이 L_4 에 관해서 Eibl(7)은 부착인장 실험결과로서 2D(D:철근직경)를 제안하고 있다. 또한 長友(8)는 철근마디 1개만의 인발실험(사용철근의 직경은 22mm)결과로서 4.5cm를 제안하고 있다. 이러한 실험결과들로부터 L_4 는 2D정도에서 3D정도의 범위에 있으며 또한 이 영역은 하중단계가 커짐에 따라 길어질 것이 예상된다. 본연구에서는 단계 II의 τ 값이 τ_{MAX} 와 τ_A 의 중간치가 될 때에는 IV의 영역을 재하단으로부터 2D의 구간으로 하여 I, II의 영역과 조합하였다. 하중단계가 커져서 철근항복에 의해 잔류부착응력이 발생하면 IV의 영역은 3D로 하여 I, II, III영역과 조합하였다. 즉 L_1, L_2, L_3 를 구하는 방법과는 별도로 L_4 를 가정하였다.

이하에 단계별의 부착응력분포, 철근응력분포 및 각영역 길이(L_1, L_2 및 L_3)에 대한 해석과정을 설명한다.

3.2.1 내부균열 발생전의 상태(단계 I)

그림-5와 같이 단계 I에서 τ_c 는 철근과 콘크리트와의 점착력 파괴점을 τ_A 는 내부균열 발생점을 나타낸다. 여기서 τ_c 까지의 극부적 슬립량은 0 이므로(그림-2 참조), τ_c 보다 작은 부착응력은 무시할 수 있다.

철근축방향의 평형조건은 (3-1)식으로 부터

$$\tau_1(\chi_1) = \frac{\pi D^2 / 4}{\pi D} \frac{d\sigma_1(\chi_1)}{d\chi_1}$$

$\tau - S$ 관계는 그림-2로 부터 다음과 같이 표시된다.

$$\tau_1(\chi_1) = \tau_c + k_1 \cdot S_1(\chi_1)$$

여기서 k_1 은 τ_c 부터 τ_A 까지의 강성을 나타낸다.

$$S_1(\chi_1) = \int_0^{\chi_1} \varepsilon_1(\chi) d\chi = \int_0^{\chi_1} \frac{\sigma_1(\chi)}{E_s} d\chi$$

상식들로 부터

$$\frac{D}{4} \frac{d\sigma_1(\chi_1)}{d\chi_1} = \tau_c + k_1 \int_0^{\chi_1} \frac{\sigma_1(\chi)}{E_s} d\chi$$

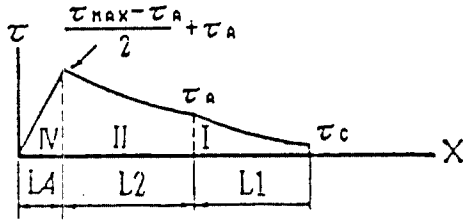
미분하면

$$\frac{d^2 \sigma_1(\chi_1)}{d\chi_1^2} = \frac{4k_1}{DE_s} \sigma_1(\chi_1)$$

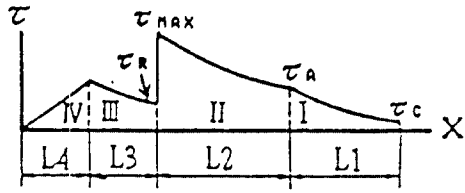
$$K_1^2 = \frac{4k_1}{DE_s} \text{ 으로 놓고 미분방정식을 풀면}$$

단계 I에 있어서의 철근응력 및 부착응력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

3.2.2 내부균열 발생후의 상태(단계II)



(a) 철근 항복전



(b) 철근 항복후

그림-5 단조재하시의 부착응력분포

단계 I의 상태에서 하중이 증가하여 부착손실이 진행되면, 재하단으로부터 거리 L_2 의 위치까지 내부 균열이 발생하며 철근축에 따르는 부착응력분포는 2개의 영역으로 구분되어 진다.

τ -S관계는 τ_A 부터 τ_{MAX} 까지의 강성을 k_2 로 하여 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_2(\lambda_2) = \tau_c + k_1 S_A + k_2 S_2(\lambda_2) - k_2 S_A$$

단계 I과 동일한 방법에 의해서

$$K_2^2 = \frac{4 k_2}{D E_s} \quad \text{으로 놓고 미분방정식을 풀면}$$

$$\sigma_2(\lambda_2) = a_2 \cdot \exp(K_2 \lambda_2) + b_2 \cdot \exp(-K_2 \lambda_2) \quad (3-7)$$

$$\tau_2(\lambda_2) = \frac{DK_2}{4} \{a_2 \cdot \exp(K_2 \lambda_2) - b_2 \cdot \exp(-K_2 \lambda_2)\} \quad (3-8)$$

단계II의 경계조건은 다음식과 같다.

$$\sigma_1(0) = \sigma_c \quad (3-9a), \quad \sigma_2(0) = \sigma_1(L_1) \quad (3-9b)$$

$$\tau_1(0) = \tau_c \quad (3-9c), \quad \tau_2(0) = \tau_A \quad (3-9d)$$

$$\tau_1(L_1) = \tau_A \quad (3-9e), \quad \sigma_2(L_2) = P/A_s \quad (3-9f)$$

전절과 동일한 방법에 의해서 각영역의 a_1, b_1 이

구해지며 L_1, L_2 는 다음 식과 같다.

$$L_1 = \frac{1}{K_1} \ln \frac{\frac{4 \tau_A}{DK_1} + \sqrt{\left(\frac{4 \tau_A}{DK_1}\right)^2 + 4a_1 b_1}}{2 a_1} \quad (3-10)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \{a_1 \cdot \exp(K_1 \lambda_1) + b_1 \cdot \exp(-K_1 \lambda_1) + \frac{4 \tau_A}{DK_2}\}$$

$$b_2 = \frac{1}{2} \{a_1 \cdot \exp(K_1 \lambda_1) + b_1 \cdot \exp(-K_1 \lambda_1) - \frac{4 \tau_A}{DK_2}\}$$

$$L_2 = \frac{1}{K_2} \ln \frac{\frac{P}{A_s} + \sqrt{\frac{P^2}{A_s^2} - 4a_2 b_2}}{2 a_2} \quad (3-11)$$

$$\sigma_1(\lambda_1) = a_1 \cdot \exp(K_1 \lambda_1) + b_1 \cdot \exp(-K_1 \lambda_1) \quad (3-3)$$

$$\tau_1(\lambda_1) = \frac{DK_1}{4} \{a_1 \exp(K_1 \lambda_1) - b_1 \cdot \exp(-K_1 \lambda_1)\} \quad (3-4)$$

단계 I의 경계조건은 다음식과 같다.

$$\sigma_1(0) = \sigma_c \quad (3-5a)$$

$$\tau_1(0) = \tau_c \quad (3-5b)$$

$$\sigma_1(L_1) = P/A_s \quad (3-5c)$$

여기서 철근마디 간격을 $0.5D$ 로 하면 σ_c 는 다음과 같다.

$$\sigma_c = \frac{0.5 \pi D^2 \tau_c}{\pi D^2 / 4} = 2 \tau_c$$

(3-5)식의 경계조건에 따라서 a_1, b_1 이 구해지며 이것을 (3-3)식과 (3-5c)식에 대입하면 L_1 이 구해진다.

$$a_1 = \frac{1}{2} \left(\sigma_c - \frac{4 \tau_c}{DK_1} \right), \quad b_1 = \frac{1}{2} \left(\sigma_c - \frac{4 \tau_c}{DK_1} \right)$$

$$L_1 = \frac{1}{K_1} \ln \frac{\frac{P}{A_s} + \sqrt{\frac{P^2}{A_s^2} - 4a_1 b_1}}{2 a_1} \quad (3-6)$$

3.2.3 철근항복후의 강성 증가상태(단계III)

단계II의 상태에 이어서 하중이 다시 증가하면 재하단에서부터 철근항복이 시작된다. 철근항복이 L_3 의 길이까지 진행된 경우 철근축에 따른 부착응력 분포는 3개의 영역으로 구분된다. 그림-5(b)에 나타난 바와 같이 철근이 항복하면 부착응력은 급격히 감소하지만, 그후의 부착응력 강성은 철근경화 현상

에 의해서 약간 증가한다⁽³⁾(그림-2 참조).

철근항복후의 강성을 K_3 로 하면 τ -S 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_3(\lambda_3) = \tau_R + k_3(S_1 - S_y) = \tau_R + k_3 S_3(\lambda_3) - k_3 S_y$$

$$\frac{D}{4} \frac{d\sigma_3(\lambda_3)}{d\lambda_3} = \tau_R - k_3 S_y + k_3 \int_0^{\lambda_3} \left(\frac{\sigma_3(\lambda) - \sigma_y}{E_{sh}} + \epsilon_{sh} \right) d\lambda$$

$$K_3^2 = \frac{4 k_3}{D E_s} \text{ 으로 놓고 미분방정식을 풀면}$$

$$\frac{d^2 \sigma_3(\lambda_3)}{d\lambda_3^2} = K_3^2 \sigma_3(\lambda_3) + K_3^2 (E_{sh} \epsilon_{sh} - \sigma_y)$$

$$\sigma_3(\lambda_3) = a_3 \exp(K_3 \lambda_3) + b_3 \exp(-K_3 \lambda_3) + (\sigma_y - E_{sh} \epsilon_{sh}) \quad (3-12)$$

$$\tau_3(\lambda_3) = \frac{DK_3}{4} \{ a_3 \cdot \exp(K_3 \lambda_3) - b_3 \cdot \exp(-K_3 \lambda_3) \} \quad (3-13)$$

단계 III의 경계조건은 다음과 같다.

$$\sigma_1(0) = \sigma_c \quad (3-14a), \quad \sigma_2(0) = \sigma_1(L_1) \quad (3-14b)$$

$$\sigma_3(0) = \sigma_y \quad (3-14c), \quad \tau_1(0) = \tau_c \quad (3-14d)$$

$$\tau_2(0) = \tau_A \quad (3-14e), \quad \tau_3(0) = \tau_R = 0.3 \tau_2(L_2) \quad (3-14f)$$

$$\tau_1(L_1) = \tau_A \quad (3-14g), \quad \sigma_2(L_2) = \sigma_y \quad (3-14h)$$

$$\sigma_3(L_3) = P/A_s \quad (3-14i), \quad \tau_2(L_2) = \tau_y \quad (3-14j)$$

$$L_1 = \frac{1}{K_1} \ln \frac{\frac{4\tau_A}{DK_1} + \sqrt{\left(\frac{4\tau_A}{DK_1}\right)^2 + 4a_1 b_1}}{2 a_1} \quad (3-15)$$

$$L_2 = \frac{1}{K_2} \ln \frac{\sigma_y + \sqrt{\sigma_y^2 - 4a_2 b_2}}{2 a_2} \quad (3-16)$$

$$a_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{4\tau_R}{DK_3} + E_{sh} \epsilon_{sh} \right)$$

$$b_3 = \frac{1}{2} \left(-\frac{4\tau_R}{DK_3} + E_{sh} \epsilon_{sh} \right)$$

$$L_3 = \frac{1}{K_3} \ln \frac{-q_1 + \sqrt{q_1^2 - 4a_3 b_3}}{2 a_3} \quad (3-17)$$

여기서, $q_1 = \sigma_y - E_{sh} \epsilon_{sh} - P/A_s$

4. 정부방향 반복재하시의 뽀힘량 해석방법

전절의 단조재하시 부착응력 분포를 이용하며, 제하(除荷) 및 재재하(再載荷)시의 부착응력 분포를 규칙적으로 증감시키므로써 정부방향 반복 재하시의 뽀힘량을 해석할 수 있다.

4.1 인장축의 제하

(1) 철근을 몇개의 요소로 분할한다. 재하단으로부터 제하가 진행된 위치까지의 길이 L_a 를 가정하며 여기에 위치한 요소를 i 번 요소로 정한다.

(2) L_a 위치의 요소에 대하여 부착응력을 5%정도 감소 시킨다.

$$\tau_i = \tau_k - 0.05 \times \tau_k \quad (3-18)$$

여기서 τ_i : i 번 요소에 해당하는 제하후의 부착응력

τ_k : i 번 요소에 해당하는 제하전의 부착응력

(3) τ -S 관계로부터 τ_i 에 상당하는 슬립양 S_i 를 구한다.

$$\tau_i = f(S_i), \quad (f: \tau\text{-S관계})$$

(4) 구해진 τ_i , S_i 및 다음식들을 이용하여 철근응력 및 변형율을 구한다.

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \frac{\tau_i \cdot \Delta L_i \cdot U}{A_s} \quad (3-19a)$$

여기서 ΔL_i 는 i 번 요소의 길이

$$\epsilon_i = g \left(\frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \right), \quad (g: \sigma\text{-}\epsilon\text{관계}) \quad (3-19b)$$

$$S_{i+1} = S_i + \epsilon_i \cdot \Delta L_i \quad (3-19c)$$

이러한 작업을 재하단까지의 전 요소에 걸쳐서 실시한다.

(5) 다음식과 같이 재하단의 하중과 변위를 산정하여 당초에 주어진 제하하중과 일치할 때까지 L_a 위치를 조정하여 축차 계산한다.

$$P = \sigma_B \cdot A_s \quad (3-20)$$

$$\Delta_B = S_B \quad (3-21)$$

여기서 첨자 B는 재하단에 위치한 요소를 의미한다.

4.2 압축축의 재하

3장의 단조재하시 부착응력 분포를 이용한다. 단 압축철근에 있어서는 철근항복후의 급격한 부착손실은 거의 발생하지 않으므로 철근항복후의 부착응력 분포는 일정치로 한다. 이러한 부착응력 분포와 전술한 해석방법들을 이용하면 인장에서 압축으로의 과정, 반대로 압축에서 인장으로의 과정을 표현할 수 있으므로 정부방향 반복재하시의 뽐힘양을 해석할 수 있다.

단조재하시의 해석방법을 포함한 전체적인 해석방법을 그림-6의 플로우차트로 나타낸다.

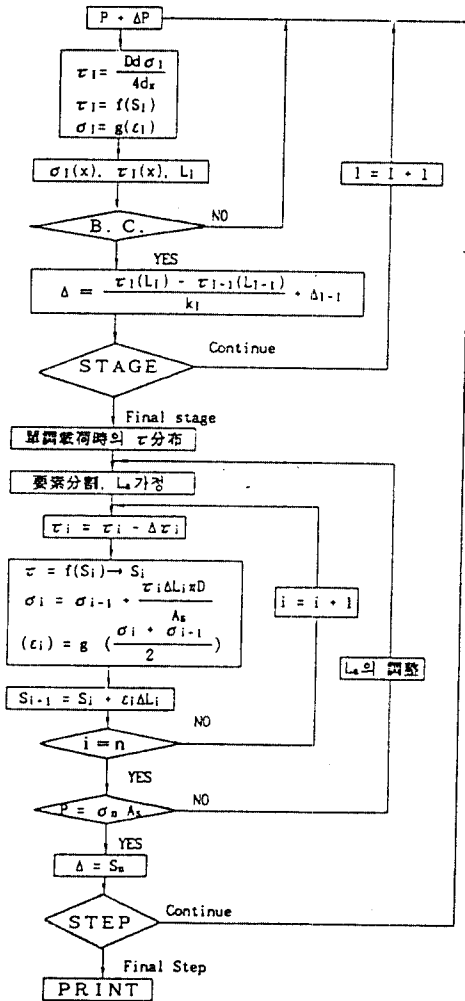


그림-6 뽐힘량 해석방법의 플로우차트

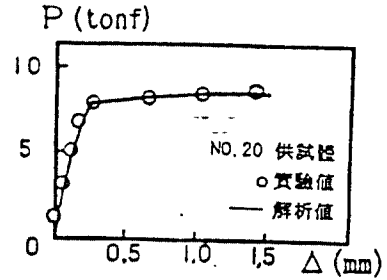


그림-7 정착부의 인장실험 및 해석 비교

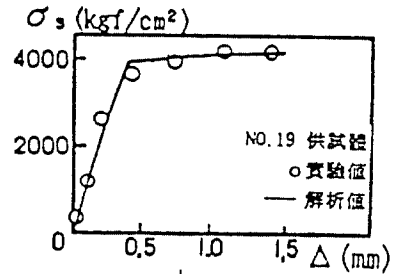


그림-8 기둥부재의 단조재하 실험 및 해석 비교

4.3 해석 결과

이상과 같은 방법으로 단조재하시 및 정부방향 반복재하시의 뽐힘량을 해석하여, 실험결과와 비교 검토한 일례가 그림-7, 8, 9이다. 그림-7은 정착부에 배근된 주철근에 축방향 인장력을 가한 실험(3)으로서 실험치와 해석치는 거의 일치하고 있다. 그림-8은 확대기초위에 놓여 있는 기둥부재의 단조재하 실험(3)으로서 실험치와 해석치는 거의 일치하고 있다. 그림-9는 확대기초위에 놓여 있는 기둥부재의 정부방향 반복재하 실험(3)으로서 실험치와 해석치는 거의 일치하고 있다. 따라서 본 해석방법은 확대기초와 상부구조와의 경계면에 있어서 철근변형을 또는 철근응력을 재하단의 하중항으로써 부여하므로써, 정부방향 반복재하시의 매시브콘크리트에 배근된 축방향주철근의 뽐힘량을 비교적 간단히 구할 수 있다.

참고 문헌

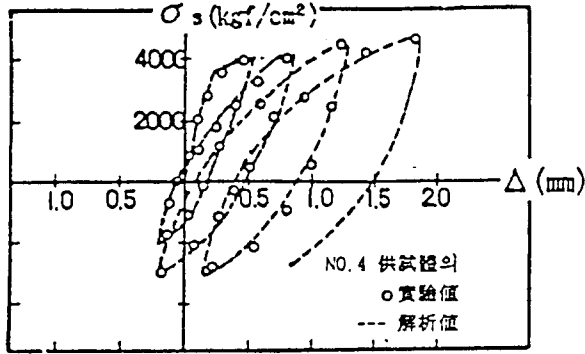


그림-9 기둥부재의 반복재하 실험 및 해석 비교

5. 결론

본연구는 매시브 콘크리트에 정착된 축방향 주철근의 뽑힘량을 해석하는 방법을 제안하였으며 얻어진 성과는 다음과 같다.

- (1) 매시브 콘크리트의 부착특성을 τ - S 관계로서 모델화하였으며 부착손실 과정을 부착응력분포로서 표현 가능하다.
- (2) 단조재하시든 물론 정부방향 반복재하시든 뽑힘량을 비교적 간단하면서 정확하게 해석할 수 있다.

- 1) 太田 實, "繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究", JSCE, 土木學會論文報告集, 第292號, 1979.12, pp. 65-74
- 2) 尾坂芳夫, 柳田 力 ほか, "鐵筋コンクリート橋脚の弾塑性應答解析と設計への應用", JSCE, 土木學會論文報告集, 第297號, 1980. 5, pp. 71-85
- 3) 張一泳, 鈴木基行 ほか, "フーチングからの軸方向主鐵筋の抜け出し量評價法に関する研究", JCI, 콘크리트工學論文集, 第3券第1號, 1992年1月, pp. 33-44
- 4) 張一泳, 尾坂芳夫 ほか, "RC部材の非線形解析について", JSCE, 土木學會第43回年次學術講演會講演概要集, V-321, 1988. 10, pp. 690-691
- 5) 野口 博, "有限要素法による鐵筋の非線形解析(第1報)", JAI, 日本建築學會論文報告集, 第252號, 1977. 2, pp. 1-11
- 6) 森田司郎, 角 徹三, "繰返し荷重下における鐵筋とコンクリート間の付着特性に関する研究", JAI, 日本建築學會論文報告集, 第229號, 1975. 3, pp. 15-24
- 7) Eibl, J. and Neuroth, U., "Why an incremental bond-slip relation", CEB, No. 178/179, March 1987, pp. 66-78
- 8) 長友克寬, 角 徹三, "横ふし1個のみをもつ異形鐵筋の付着特性に関する研究, 土木學會論文集, 第372號, 1986年8月, pp. 177-186