
부착특성을 고려한 RC구조물의 유한요소 해석

Finite Element Analysis of RC Structures considering Bond Characteristics



한상호*

Han, Sang Ho

ABSTRACT

Commonly used finite element procedures for representing the concrete-steel interface do not account for changes in bonding behavior induced by nearby cracking. This results in an over stiffness of bond near such cracks, adversely affecting local deformations and further crack development.

In this research, a nonlinear bond stress-slip model, which accounts for changes in bonding behavior induced by nearby cracking in reinforced concrete structures, is proposed. Link elements are used to represent the concrete-steel interface. Link properties are modified as cracking forms transverse to the reinforcing steel. A nonlocal measure of damage is used to quantify crack formation and to transition bond behavior between two envelopes : 1) an outer envelope modeling bond conditions sufficiently far from cracking, and 2) an inner envelope modeling bond conditions at the face of a transverse crack.

To investigate the effectiveness of this method, experimental and analytical results of a T-shape reinforced concrete bridge pier under eccentric loadings are presented. Results

* 정회원, 순천대학교 토목공학과 강사

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

from the proposed model compare well with experimental results.

Keywords : interface modeling, bond-slip, smeared cracking, nonlocal damage

1. 서론

콘크리트의 인장강도는 압축강도에 비해 매우 작기 때문에, 철근콘크리트 구조물의 종국강도해석 및 설계에 있어서 콘크리트의 인장영역은 보통 무시된다. 그러나, 인장균열이 발생한 콘크리트도 구조 전체의 비선형 거동에 큰 영향을 미치기 때문에, FEM 해석에서는 균열의 모델화가 중요하다. 본 연구에서는 균열이 발생한 요소를 직교 이방성 연속체로서 취급하는 분포균열모델(smeared crack model)을 이용하였다. 최근, 콘크리트 구조의 열화 방지와 내구성 향상을 위해 균열제어기술에 관심이 높아지고 있지만, 실무구조물에 이산적으로 발생하는 균열의 간격이나 균열폭을 분포균열모델에 의해 정도 높게 재현하는 것은 상당히 어렵다.

철근콘크리트 부재에 있어서는, 콘크리트 자신의 인장강도나 파괴역학적 특성 뿐만 아니라, 철근과 콘크리트와의 부착작용이 균열의 성장과 철근의 응력에 중요한 영향을 미치는 것은 말할 필요도 없다. 그러나, 분포균열모델을 이용한 종전의 비선형 FEM 해석은 완전부착(철근과 콘크리트와의 상대미끄럼이 발생하지 않음)을 가정한 것이 많다. 본 논문에서는 철근콘크리트 부재의 균열의 발생에 따라, 균열 부근에서 일어나는 부착열화를 고려한 새로운 부착응력-미끄럼 모델을 제안하였다. 균열 부근에 있어서 이형 철근과 콘크리트의 부착성상에 관해서는 林 등¹⁾이 인발시험과 보의 휨전단시험을 통하여 균열 부근에서의 부착열화와 그 영향범위를 명확히 하였다. 동시에 林 등은 실험에 의해 균열패턴 및 부착열화 특성을 알고 있는 보 공시체에 대하여, 부착응력-미끄럼 관계를 균열로부터 거리에 따라 미리 변화시킨 이산 균열모델(discrete crack model)에 의한 FEM 해석 결과를 실험결과와 비교하였다. 이것에 반하여, 본 연구는 분포균열모델을 이용해 이산적인 균열패턴, 부착응력분포, 철근의 응력분포 등을 재현하는

것을 주목적으로 하였다. 그때, 비국소적 손상도(nonlocal measure of damage)의 개념을 도입해 균열의 형성상태와 부착열화 특성을 정량화하였다. 또한, 압축응력하의 콘크리트의 항복조건, 파괴조건 등 비선형성의 취급은 소성이론²⁾에 준하였다.

본 모델과 해석방법의 타당성을 나타내기 위해 편재하중을 받는 철근콘크리트 T형 교각의 모형실험과 2차원 비선형 FEM해석을 하여 균열성장, 주철근의 응력분포 등에 관해서 실험 및 해석결과를 비교·검토하였다. 또한, 완전부착모델에 의한 해석결과도 함께 비교하여 본 모델의 유효성을 검증하였다.

2. 균열에 의한 콘크리트의 인장파괴의 모델링

인장변형률 연화영역에 있어서, 평면응력 상태에 있는 콘크리트의 균열과 그것에 직교하는 국소 좌표계에 관한 응력-변형률 관계는 다음 식으로 주어진다³⁾.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon^f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E(1-\omega)} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, E는 영계수, G는 전단탄성계수, ν 는 포아송비, ϵ^f 는 파괴변형률(fracture strain), β 는 전단강성저감계수이다. 또한, $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$ 및 $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \gamma_{12}$ 는 균열면에 수직한 방향을 1로 하는 응력 및 변형률을 나타낸다. ω 는 콘크리트의 인장변형률 연화 특성을 나타내기 위해 도입한 손상도변수로 $\omega = 0$ (부손상)부터 $\omega = 1$ (완전손상)까지의 임의의 값을 취한다. 손상도 ω 와 식 (1)의 파괴변형률 ϵ^f 의 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\epsilon^f = \frac{\omega}{1-\omega} \frac{\sigma_{11}}{E} \quad (2)$$

손상도 ω 는 균열면에 수직한 응력 σ_{11} 에 대응하여 Fig. 1과 같이 조정된다. 즉,

$$\omega = 0 \quad (\varepsilon_{11} < \varepsilon_t)$$

$$\omega = 1 - \frac{f_t}{E\varepsilon_{11}} \exp\left[-\frac{a}{\varepsilon_0}(\varepsilon_{11} - \varepsilon_t)\right] \quad (3)$$

$$(\varepsilon_{11} \geq \varepsilon_t)$$

여기서, ε_t 와 f_t 는 인장연화 시점에서의 변형률과 응력, ε_0 는 연화곡선에 있어서 응력을 0으로 볼 수 있는 변형률, 또한 a 는 지수곡선에서 변형률 연화의 정도를 조정하는 변수로써 $a = -5$ 에 의해 직접 인장 시험에서 관찰되는 변형률 연화를 근사화하였다.

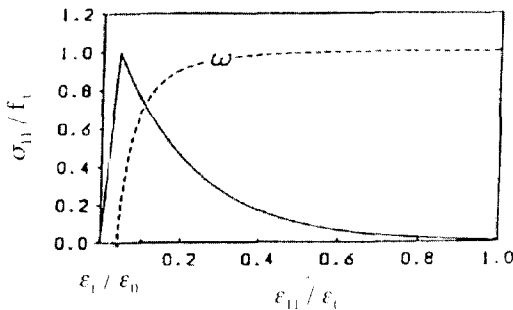


Fig. 1 Exponential strain softening model

본 연구에서는 재료의 인장연화 곡선을 유한요소의 크기에 따라 조정함으로써, 적당한 파괴에너지가 소비되어지도록 하였다¹⁾.

3. 콘크리트와 철근간의 부착응력-미끄럼의 모델링

철근콘크리트 부재에 있어서는, 콘크리트와 철근간의 부착작용이 균열성상과 철근의 응력분포에 중

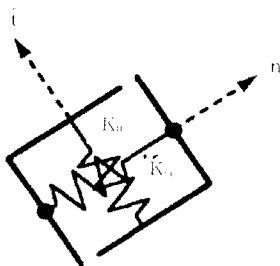


Fig. 2 Bond link element

요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 부착링크요소를 이용해 콘크리트와 철근간의 부착작용을 모델화하였다. 철근축에 수직방향에는 상대변위가 발생하지 않도록 링크강성 K_n 에 큰 값을 주었다. 철근축방향의 링크강성 K_t 는 이하에 설명하는 비선형의 부착응력-미끄럼 관계에 의해 조정하였다.

3.1 부착응력-미끄럼 관계

Fig. 4는 이형철근의 인발시험에 준하여 이상화된, 2개의 극단적인 부착응력-미끄럼 관계의 포락선을 나타낸 것이다²⁾. 먼저, Fig. 3과 같이 콘크리트의 횡방향 구속이 충분한 경우, 부착응력-미끄럼 관계는 Fig. 4의 곡선 C(외연 포락선)로 이상화 된다. 한편, 시험체의 횡방향 철근에 의한 구속이 불충분한 경우에는, 곡선 C의 최대부착응력 τ_{max} 에 도달하기 전에 철근축방향의 활렬이 발생한다든지, 또는 부착부가 부재의 단부에서 가까우면 콘크리트가 콘(cone)모양으로 빠져나와, Fig. 4의 곡선 U(내연 포락선)와 같이 부착응력이 급속히 저하한다.

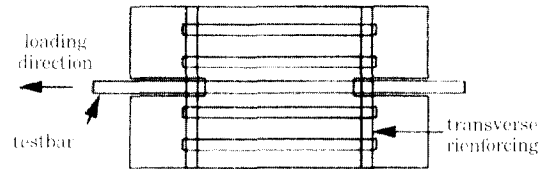


Fig. 3 Pull-out type test setup

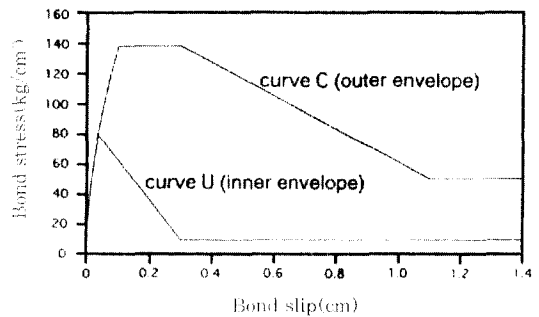


Fig. 4 Idealized bond stress-slip relations

Fig. 5와 같이 시험체에 매설한 이형철근을 부재의 단부에서 인발할 경우에는 단부로부터의 거리 d 에 의해 부착성상이 달라져, 단부에서 가까울수록 부

착응력이 작고, 단부로부터 철근경 d_b 의 4~5배 떨어진 지면 일정한 최대부착응력 τ_{max} 에 도달하는 것으로 알려져 있다¹⁾.

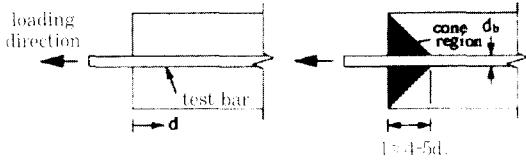


Fig. 5 Formation of damage region near concrete surface

3.2 비국소적 손상도에 의한 부착특성의 제어

철근콘크리트 부재에 있어서 철근에 교차하는 인장균열이 발생할 때는, 식 (3)의 손상도 변수 ω 가 점차 증대하여 균열면 부근은 Fig. 5의 상태에 근접된다고 생각된다. 즉, 균열면 부근에 철근을 중심으로 하는 콘모양의 손상영역이 형성되어, 이 영역외($d > l$)의 부착특성은 Fig. 4의 외연 포락선을 유지하지만, 손상영역내($d \leq l$)의 부착특성은 콘크리트의 인장연화의 정도 ω 에 따라 외연포락선과 내연포락선간을 연속적으로 변이하는 것으로 가정하였다. 본 논문에서 제안하는 균열 부근의 부착열화에 대한 메카니즘은 다음과 같다(Fig. 6참조).

1) 분포균열모델에 의한 FEM해석에 있어서, 균열은 하나의 요소폭의 균열대(crack band)에 국소

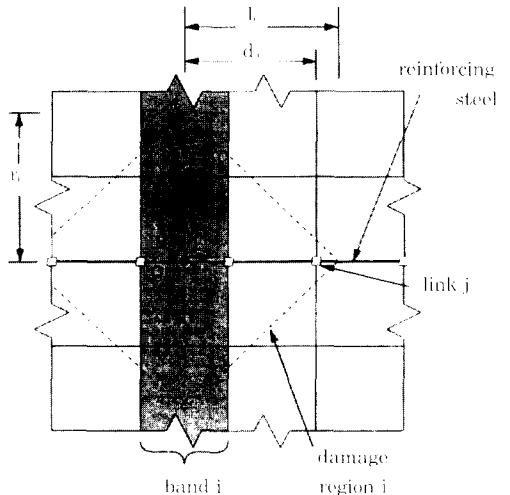


Fig. 6 Portion of finite element mesh local to a reinforcing bar

화하여 진전한다. 철근에 교차하는 임의의 균열대 band i에 있어서, band i의 중심선과 철근축과의 교점 O_i 에 관한 비국소적 손상도 $\hat{\omega}_i$ 를 계산한다. $\hat{\omega}_i$ 는 band i의 전체적에 걸친 콘크리트의 손상도변수 ω 의 평균치로써 다음의 식으로 얻어진다.

$$\hat{\omega}_i = \frac{1}{V_i} \int_V \alpha(x_i) \omega(x_i) dV \quad (4)$$

단,

$$V_i = \int_V \alpha(x_i) dV \quad (5)$$

여기서, x_i 는 원점 O_i 에 관한 공간좌표벡터, $\alpha(x_i)$ 는 원점 O 부터 거리가 멀어질수록 직선적으로 0에 가까워지는 함수로 band i의 밖에서는 $\alpha(x_i) = 0$ 으로 한다. 균열의 발생위치가 철근에 가까울수록 부착성상에 미치는 영향이 클 것이므로, O_i 에 가까운 손상일수록 큰 $\alpha(x_i)$ 가 주어진다. 비국소적 손상도 $\hat{\omega}_i$ 는 원점 O 를 시점으로 band i에 있어서 균열상태를 정량화한 척도가 된다.

2) 각 링크 j에 대해, 식 (4)의 $\hat{\omega}_i$ 를 특성장 l의 콘모양 손상영역 i내의 링크위치 d_{ij} 에 따라 선형보간함으로써, 링크 j의 손상도 ω_j^* 를 계산한다. 즉,

$$\omega_j^* = \sum (1 - \frac{d_{ij}}{l_i}) \hat{\omega}_i \leq 1 \quad (6)$$

윗식에서 $\omega_j^* \leq 1$ 의 조건을 붙인 것은, 균열이 근접해서 발생한 경우에는 링크 j가 2개 이상의 콘모양 손상영역의 영향을 동시에 받을 가능성이 있기 때문이다.

3) 식 (6)의 ω_j^* 를 이용하여, 링크 j의 부착특성을 Fig. 4의 2개의 비선형 부착응력-미끄러움관계, 즉 균열로부터 충분히 떨어진 위치에서의 부착특성을 나타내는 외연포락선 및 완전히 개구된 균열면에 있어서 부착특성을 나타내는 내연포락선의 사이에 연속적으로 변이시킨다. 본 연구에서는 Fig. 7에 나타내는 것과 같이 부착응력-미끄러움 곡선상의 3점(s, τ)을 지정함으로써, 두 포락선 및 링크손상도 ω^* 를 이용하여 각 링크의 부착특성을 결정하였다. 즉,

$$\left. \begin{aligned} s_q &= s_q^0 - \omega^* (s_q^0 - s_q^i) \\ \tau_q &= \tau_q^0 - \omega^* (\tau_q^0 - \tau_q^i) \end{aligned} \right\} \text{for } q = 1, 2, 3 \quad (7)$$

여기서, 윗첨자 0와 i는 각각 외연 및 내연포락선

을 나타낸다. 그리고, 두 포락선은 콘크리트의 강도, 철근의 직경, 콘크리트의 덮개 등의 영향을 고려한 실험결과에 준하여 근사시킨 것이다⁵⁾.

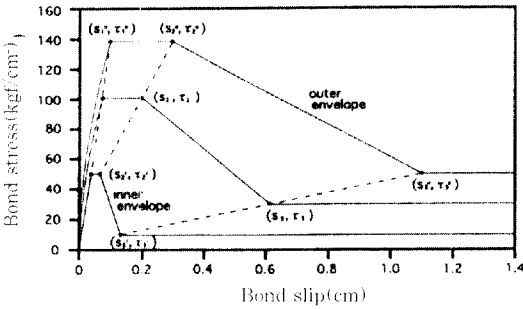


Fig. 7 Bond stress-slip relations used for numerical analysis

4. 편재하중을 받는 철근콘크리트 T형 교각의 모형실험과 FEM해석

4.1 실험개요

구조물을 약 1/10로 축소시켜 제작한 T형 교각 공시체의 크기 및 배근상태를 Fig. 8에 나타냈다. 본 공시체는 사인장응력이 발생하는 절점부의 설계법을 확립하기 위해 제작된 총 18개의 실험용 공시체중 하나이다. 실험결과와 일부⁶⁾는 이미 발표했지만, 여기서 다루는 Fig. 8의 공시체만은 균열의 발생과 진전에 따른 부착열화상태를 철근의 변형률분포의 변화로부터 측정할 목적으로, 철근의 변형률 게이지를 조밀하게 부착하려고 하였으나, 그렇게 하기 위해서는 이형철근의 마다를 많은 부분 잘라낼 필요가 있었다. 그로인한 부착특성의 변화를 피하기 위해, Fig. 9와 같이 기둥부재의 주철근(D16, 3개)중 중간의 1

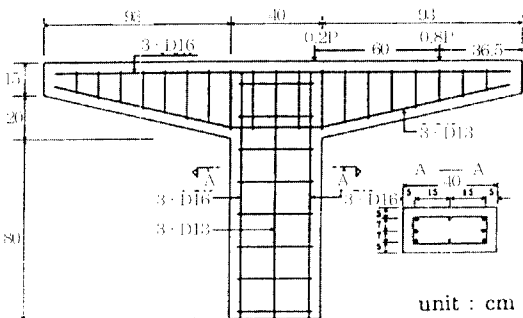


Fig. 8 Dimensions and reinforcing details of the specimen

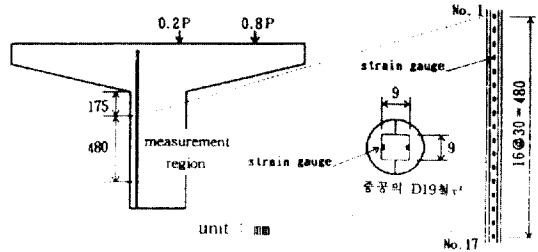


Fig. 9 Processing of steel in column member

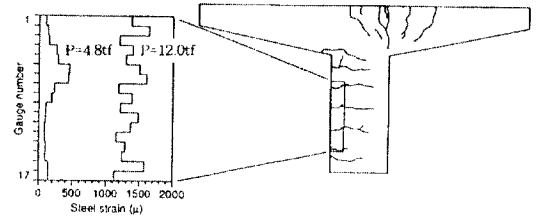


Fig. 10 Experimental steel strains and cracking pattern

개를 D16과 동일한 단면적을 갖는 D19의 철근으로 바꾸었다. 즉, D19의 철근을 축방향으로 나누어 폭 9mm, 깊이 4.5mm의 홈을 파고, 기둥부재 중앙부 48cm의 측정구간에 게이지 17개를 3cm간격으로 부착시켰다.

실험결과와 일례로서, Fig. 10에 최종 파괴시의 균열패턴 및 P=4.8tf(설계하중)과 P=12.0tf에서의 기둥부 측정구간 17개의 변형률 게이지로부터 얻어낸 주철근의 변형률분포를 나타냈다. 기둥부재는 축압축응력과 등가의 휨모멘트를 받으므로, 주철근의 변형률은 설계계산상 일정하지만, 사실은 균열이 발생한 곳에서 변형률이 급증하는 것을 알 수 있었다. 또한, 균열의 수가 증가하는 P=12.0tf에서도, 주철근의 변형률분포의 기울은 상당히 큰 것을 알 수 있었다.

4.2 이차원 비선형 FEM해석

Fig. 11에 공시체의 유한요소 분할을 나타냈다. 콘크리트에는 삼각형 평면응력요소, 철근에는 일차원 트러스요소를 이용하였다. 부착링크요소는 기둥 및 상단보의 주철근 전 절점에 삽입하였다. 또한, 분포균열모델에 의한 이산적인 균열패턴을 얻고, 균열부근의 부착응력, 철근의 변형률분포를 높은 정도로 재현 하기 위해, 요소를 세분하였다.

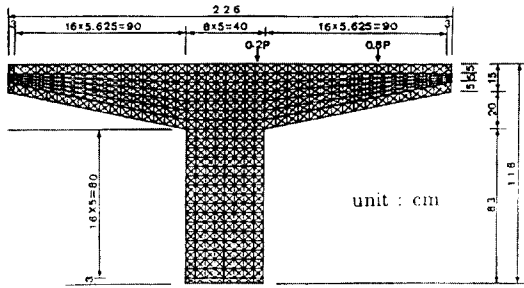


Fig. 11 Finite element mesh of the specimen

Table 1 Material parameters of concrete

Compressive strength	239 (kgf/cm ²)
Split tensile strength	21.4 (kgf/cm ²)
Young's modulus	2.2 × 10 ⁴ (kgf/cm ²)
Poisson's ratio	0.18

콘크리트의 재료정수는 Table 1의 실측치를 이용하였고, 철근의 재료정수도 실측치로부터 영계수는 $E_s = 2.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$, 항복점 강도는 $\sigma_s = 3600 \text{ kgf/cm}^2$ 를 이용하였다.

4.3 해석 · 실험결과와의 비교 및 고찰

철근과 콘크리트간의 부착의 취급이 전혀 다른 2개의 FEM해석을 하였다. 본 연구에서는 미끄럼이 없는 완전부착을 가정한 해석을 PB(Perfect Bond), 링크손상도 ω^* 에 대응하여 부착특성을 고려한 해석을 VB(Variable Bond)라고 약칭한다.

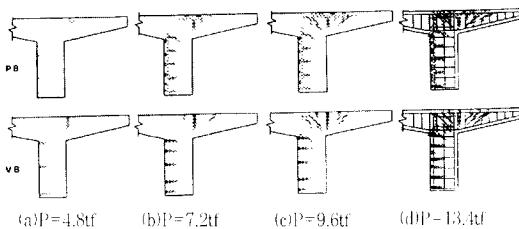


Fig. 12 Numerical cracking patterns by PB and VB model

Fig. 12는 하중이 $P=4.8, 7.2, 9.6$ 및 13.4tf 일 때, PB와 VB의 해석결과에서 얻어진 균열패턴에 관해서 비교한 것이다. 그림 안에는, 식 (2)에서 얻어진 파괴변형률 ϵ^f 의 크기와 방향이 각 적분점에서 벡터로 표시되었다.

철근의 부근에서 PB와 VB에 의한 균열패턴을 상

세히 비교 · 관찰하면, 양 해석결과에 명료한 차이를 알 수 있다. 완전부착을 가정한 PB에서는, 보와 기둥부에서 파괴변형률 ϵ^f 가 주철근을 따라 일정하게 분포되어 있는데 반해, 부착미끄럼을 가정한 VB에서는 하중의 증가에 따라 가이산적(국소적)으로 진전하여 실험의 균열패턴(Fig. 10)과 유사하고 실제의 균열간격과도 잘 대응되고 있다.

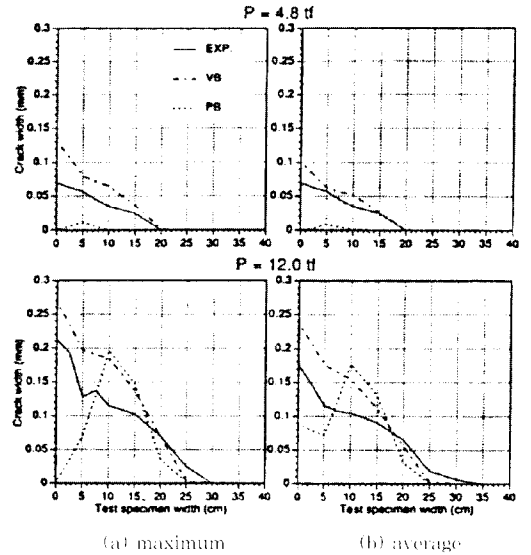


Fig. 13 Maximum and average crack width

본 실험에서는 기둥부의 측정구간에 생긴 4개의 균열에 대하여, 각 하중 단계에서 콘크리트 표면의 균열폭을 측정하였다. 한편, 기둥부의 휘균열은 항상 수평으로 진전하므로, FEM해석에 의한 균열폭 W_c 는 식 (2)의 ϵ^f 를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$W_c = \epsilon^f \cdot h \quad (8)$$

여기서, h 는 기둥부재의 수직방향의 요소폭을 나타낸다.

Fig. 13은 하중이 4.8tf 과 12.0tf 일 때, 측정구간 내에 발생한 균열폭 W_c 의 최대치와 평균치를 각각 나타낸 것이다. 그림 중 PB와 VB는 식 (8)에 의해 얻어진 해석치이고, 이것들은 실측치와 함께 비교되고 있다. PB에 의한 해석에서는, 휘균열이 콘크리트 덮개의 외면부터 주철근을 넘어 부재 내부에 자연스럽게 진전하지 못하기 때문에, 콘크리트 표면의 균열폭이 주철근 위치나 부재 내부의 균열폭에 비해 극단적으로 작다는 부자연스러운 결과가 얻어졌다. 그

에 반하여, VB에 의한 균열폭은 기둥쪽 전길이에 걸쳐 실측결과와 잘 대응하고 있다.

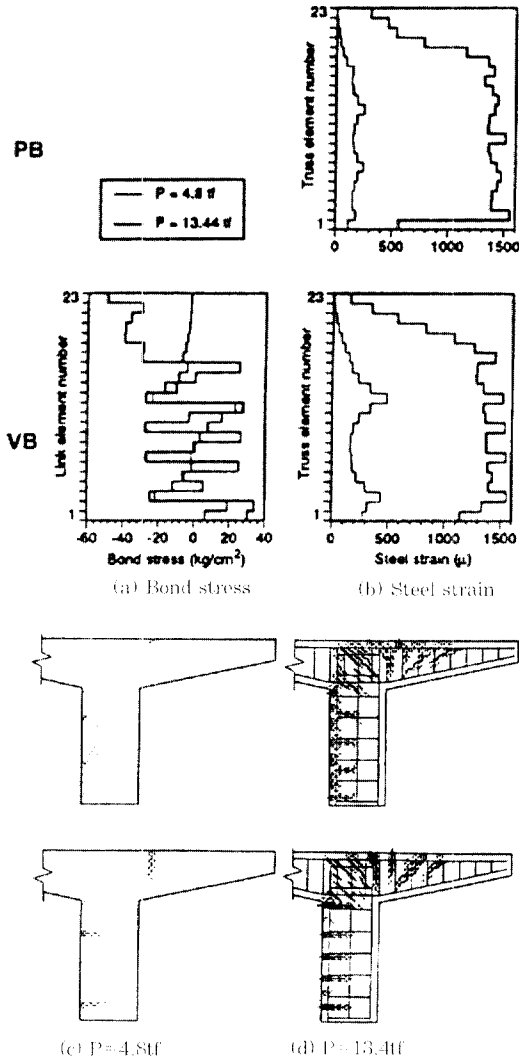


Fig. 14 Distribution of steel strains and bond stresses

Fig. 11에 나타난 것과 같이, 기둥부 주철근은 23개의 트러스 요소로 모델화 되어, VB에 의한 해석에서는 전 23개의 절점에 부착링크요소가 이용되었다. Fig. 14는 하중이 P=4.8tf과 13.4tf일 때, 23개의 트러스 요소의 철근 변형률과 링크요소의 부착응력 분포를 각각 나타낸 것이다. 이해를 돕기 위해, PB 및 VB에 의한 균열패턴의 해석 결과도 함께 나타냈다.

부착응력을 고려한 VB에서는, 휨균열이 발생하면 균열의 위치에서 철근의 변형률 및 부착응력이 급증하는 분포를 나타내고 있다. 이것은 최종파괴하중에 가까운 P=13.4tf에 있어서도 같은 경향을 나타내고 있고, Fig. 10의 실측치와 유사한 분포를 보이고 있다. 그러나, 완전부착의 PB에서는 균열이 주철근 부근에서 분산되기 때문에 철근의 변형률이 평균화되어 실험결과와는 다른 분포를 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 열화방지와 내구성 향상을 위해 균열의 제어기술에 대한 관심이 고조되고 있는 것을 감안하여, 실구조물의 균열패턴을 유한요소법으로 정도 높게 재현할 목적으로 새로운 부착응력-미끄럼 모델을 제안하였다.

본 모델에 의한 해석결과를 모형실험과 완전부착의 해석결과와 비교·검토하여 다음과 같은 사항을 확인 하였다.

1) 여기에서 제안한 부착모델(VB)에 의하면, 분포균열모델을 이용함에도 불구하고 이산적인 균열패턴이 형성되어 균열간격, 균열폭, 철근의 변형률분포 등이 실측결과와 잘 대응되었다.

2) 등가의 휨모멘트를 받는 철근콘크리트 부재의 주철근의 응력은, 파괴하중 부근에서도 일정하게 분포되지 않고 균열의 부근에서 큰 응력차를 나타냈다.

3) 완전부착모델(PB)에 의하면, 균열의 진전을 철근이 부자연스럽게 구속하여 이산적인 균열이 형성되기 어려웠다.

본 연구에 있어서, 균열의 부근에서 부착특성이 열화하는 콘모양의 손상영역은 아직까지 미흡한 실험 데이터를 이용하여 설정하고 있으므로, 충분한 자료의 확보와 함께 주철근이 다단으로 배치되어 있는 경우의 부착응력-미끄럼 모델의 개발이 앞으로의 과제라고 말할 수 있겠다.

참고 문헌

1. 林 静雄, 吉田 弘行, 黒正 清治, "ひびわれ近傍における異形鉄筋とコンクリートの付着特性に関する実験研究", 日本建築學會構造系論文報告集, 第384, 1985年2月, pp.

2. Bolander, J. E., and Wight, J. K., "Towards realistic FE models for reinforced concrete shear wall buildings subjected to lateral loadings". The University of Michigan Department of Civil Engineering Report No. 89-2, January 1989
3. 彦坂 熙, Bolander J. E., 佐竹正行, 松下博通, "鐵筋콘크리트張出式橋脚의 偏載荷重による破壞舉動의 二次元 FEM 解析", 土木構造, 材料論文集 第8號, 1992年11月, pp. 93~103
4. Bazant, Z. P., and Oh, B. H., "Crack band theory for fracture of concrete", Materials and Structures, RILEM, 16, 1983, pp.155~177
5. Eligehausen, R., Popov, E., and Bertero, V., "Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations", Report No. UCB/EERC-83/23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of Calif., Berkeley, 1983 6.
- 彦坂 熙, 佐竹正行, 松下博通, Bolander J. E., "偏載荷重を受ける張出式コンクリート橋脚の節点部補強法に關する研究", 構造工學論文集, Vol. 38A, 1992年3月, pp. 1245~1254
7. 韓 相吳, Bolander J. E., 彦坂 熙, 松下博通, "偏載荷重を受けるT型および逆L型コンクリート橋脚の終局強度特性", 土木學會第48回年次學術講演會演義要集Ⅰ, 1993年9月

요 약

일반적으로 콘크리트와 철근간의 경계면을 나타내는 유한요소법에서는, 균열의 부근에서 발생하는 부착 열화 현상을 고려하지 않고 있다. 이것은 균열 부근에서 과도한 부착을 초래하고, 국소 변형과 균열의 진전에도 영향을 준다.

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 균열 부근에서 일어나는 부착거동의 변화를 고려한 비선형 부착 응력-미끄럼 모델을 제안하였다. 철근과 콘크리트간의 경계면에는 링크요소를 이용하였고, 링크의 특성은 철근을 가로지르는 균열의 상태에 따라 변화도록 조정하였다. 균열의 형성상태를 정량화하고, 부착거동을 두 포락선 1) 균열로부터 충분히 떨어진 위치에서의 부착상태를 모델링한 외연포락선, 2) 횡균열면에 있어서의 부착상태를 모델링한 내연포락선의 사이에 변이시키기 위하여 비국소적 손상도 개념을 도입하였다.

이 방법의 유효성을 알아보기 위하여 편재하중을 받는 T형 교각의 실험 및 해석결과를 제시하였다. 제안된 모델의 결과를 실험결과와 비교하여 본 모델의 유용성을 검증하였다.

(접수일자: 1997. 5. 26)