

# 매시브 콘크리트에 배근된 주철근의 부착특성에 관한 해석적 연구

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

장 일 영\*    이 호 범\*    이 승 훈\*\*    변 근 주\*\*\*  
Jang, Il Young    Lee, Ho Beom    Lee, Seung Hoon    Byun, Keun Joo

## ABSTRACT

Description of the behavior of the R.C. structural members fixed on massive concrete is not normally generalizations of recognized configuration for regular R.C. design guidances. This can be due to the complexity of evaluation of internal resistancy and deflection changes of the members subjected to the various external forces. On the base of axially loaded member fixed on footing, however, the estimation of deflection changes due to flecxural force, shear force and rotational force is to be carried out in ways of specifying the bond characteristics of axial bars embedded in massive concrete. This work is to quantify adhesion of steel-concrete, initial concrete cracking stress near bar rib, maximum bond stress and residual stress in concrete respectively. In addition to quantification of them for particulate behavior, the suggestions of multy-linear bond stress-slip diagram made in carrying out finite element analyses for adhesion failure, examining concrete cracking status and reviewing existing experimental data lead to alternatively constructed relationship between bond stress and slip for a axial bars embedded massive concrete.

## 1. 서론

철근콘크리트 기둥 및 교각이 지진력과 같은 동적 하중을 받을 때에는 기둥부분의 휨력 및 전단력에 의한 변형외에 기둥부분의 회전변형이 발생한다. 회전변형은 확대기초와 연결된 축방향 주철근의 뿔 힘현상에 따른 기둥부분의 회전으로 생기는 수평변형을 말한다. 이러한 회전변형으로 인한 기둥 상단부의 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 확대기초부로부터의 축방향 주철근 뿔 힘현상을 해석적으로 파악하는 것은 매우 중요하며, 결국 매시브 콘크리트에 배근된 철근의 부착특성을 파악하지 않으면 안된다(3).

철근과 콘크리트와의 부착특성은 재료의 응력-변형률 관계와 마찬가지로  $\tau$ -s(부착응력-슬립량) 관계로 나타낼 수 있다. 그러나  $\tau$ -s 관계는 콘크리

트 강도, 철근직경, 철근형상, 부착길이, 정착방법, 축정위치 등의 많은 변동인자의 영향으로 변화하기 때문에 철근 또는 콘크리트의 응력-변형률 관계같이 모델화로서 일반성을 갖는 것은 쉽지 않다(4).

본 연구에서는 매시브 콘크리트에 배근된 철근을 대상으로 하고 있으며 이경우 부착길이는 충분히 길고 콘크리트의 활열파괴는 발생하지 않으므로 변동인자는 적어진다. 島(5)의 연구결과에 따르면 매시브 콘크리트 속의 철근 부착특성은 콘크리트 강도와 철근 직경의 영향을 적절히 고려함으로써 일반성을 갖는  $\tau$ -s 관계 모델화가 가능하다. Fig.1은 매시브 콘크리트 속의 철근 부착특성을  $\tau$ -s 관계로서 개념적으로 표현한 것이며 여기에서 철근과 콘크리트와의 접촉력이 없어지는 한계치를 C점, 철근주위 콘크리트에 내부균열이 발생하는 한계치를 A점, 최대 부착응력을 Y점, 그리고 잔류 부착강도가 시작되는 점을 R점으로 나타냈다. 이와 같이 본연구에서는 철근콘크리트 기둥 및 교각의 확대기초부로부터

\* 삼성종합건설 기술연구소 선임연구원

\*\* 삼성종합건설 기술연구소 연구원

\*\*\* 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

축방향 주철근 뽑힘량을 해석적으로 구할 때 유리한 (3) 다절선형의  $\tau$ -s 관계로 모델화 하였다. 다절선형  $\tau$ -s 관계의 모델화는 실험결과를 이용하는 것이 일반적인 방법(4)이나 한계치로 표현되는 부착기구의 변화를 정확히 파악하는 것은 쉽지 않다. 즉  $\tau$ -s 관계의 구배 변화가 큰 Y점 및 R점의 한계치 결정에는 매시브 콘크리트 속에 묻힌 철근 인발실험 결과로서 구할 수 있지만 구배 변화가 작고 예민한 C점 및 A점의 한계치 결정은 실험결과만으로는 매우 어렵다.

이러한 부착특성의 한계점인 C, A, Y, R의 결정에 있어서 본연구에서는 유한요소법(6)에 의한 해석결과(실험으로는 구할 수 없는 콘크리트 주응력 등을 구하기 위해 이용했다)와 정착부의 인발 실험결과(3)를 이용하였다.

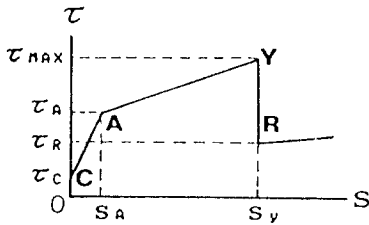


Fig. 1 매시브 콘크리트에 배근된 축방향 주철근의  $\tau$ -s 관계 모델

## 2. 점착력 ( $\tau_c$ )

Taylor(7)는 암석(골재)과 모르타르와의 점착력을 구하기 위해 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 암석 절편을 사이에 끼운 모르타르 시험체로서 일축압축시험을 하였다. 이때에 절편의 각도( $\theta_1$ )를 변화시켜 시험한 결과와 Mohr-Coulomb 파괴식을 이용하여 점착력을 구했다. 이것은 성질이 틀린 재료 간의 점착력을 구하기 위한 방법의 일종으로서 철근과 콘크리트와의 점착력( $\tau_c$ )을 구할 때에도 적용 가능하다고 생각된다.

본연구에서는 Taylor의 실험방법 개념과 유한요소 해석법을 이용 수치실험을 실시하여 점착력을 구했다. 우선 Taylor의 시험체를 대상으로 유한요소 해석을 하여 실험결과와 맞추는 Trial and Error 해석 방법에 의해서 파괴기준 및 유한요소 크기 등을 정했다. 재료 경계면의 응력상태로서 1축 선요소를 도입하였으며 파괴기준은 선형탄성 모델로서 한계응력은  $30\text{kgf/cm}^2$ , 한계변형율은  $5.6 \times 10^{-5}$  그리고 요소면적은  $5.08\text{cm}^2$ 로 하였다. 유한요소 분할도를 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 폭  $5.08\text{cm}$ , 높이는  $12.7\text{cm}$ 을 중심으로  $\theta$ 에 따라서 좌우 높이를 변화시켰으며 요소 수는 35개로서 선요소에 가까울 수록

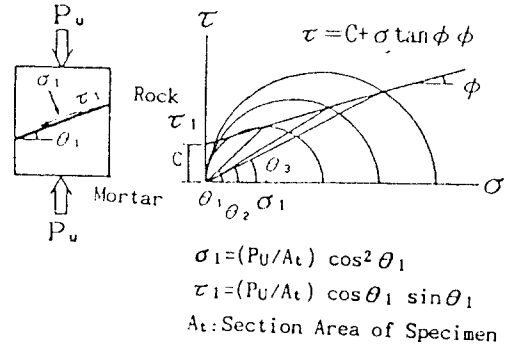


Fig. 2 Taylor의 일축압축시험체와 파괴포락선

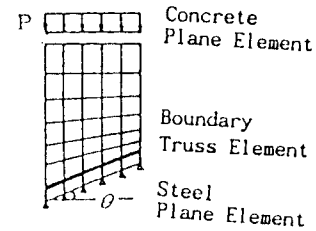


Fig. 3 점착력 해석의 요소분할도

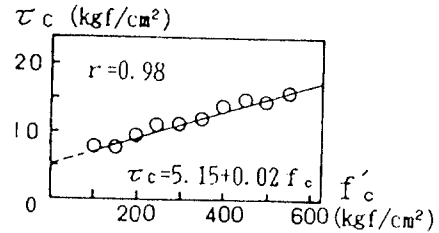


Fig. 4  $\tau_c$ 와  $f'_c$ 와의 관계

요소 크기는 작게 하였다. 이러한 조건과 각 재료 특성을 고려하여 실험방법과 같은 수법으로 해석을 하였다. 또한 콘크리트 압축강도를 변수로 하여 해석을 실시하였다. Fig. 4에는 해석결과로서 콘크리트 압축강도( $f'_c$ )와 점착력( $\tau_c$ )과의 관계를 나타낸다. 이것을 회귀분석한 결과 다음의 식이 구해졌다.

$$\tau_c = 5.15 + 0.02 f'_c \quad (1)$$

점착력이 파괴될 때의 슬립량은 철근과 콘크리트와의 상대변위가 발생할 때이므로 0로 가정한다.

## 3. 내부균열 발생응력 ( $\tau_A$ )

점착력이 파괴된 후 더 큰 하중이 가해지면 이형 철근 마디로 부터 전달되는 압축력에 의해 콘크리트 내부에 인장응력이 생기며 이것이 콘크리트의 인장

강도보다 커지면 마디 끝부분으로부터 원추형의 내부균열이 발생한다. 본연구에서는 내부균열이 발생하는 상태를 유한요소 해석을 하여 내부균열 발생응력( $\tau_A$ )을 구한다.

Fig. 5는 마디 끝부분으로부터 생기는 내부균열 발생상태 및 철근주변 콘크리트의 응력상태를 미소요소로서 개념적으로 나타낸 것이다. 내부균열이 발생하는 파괴기준( $\sigma_1$ )은 콘크리트 인장강도( $f'_{ci}$ )이므로 Mohr 원의 역학관계로부터  $\tau_A$ 를 구할 수 있다.

$$\tau_A^2 = ((\sigma_x - \sigma_y)/2 + \sigma_1)^2 - ((\sigma_x + \sigma_y)/2)^2 = (\sigma_1 + \sigma_x) \cdot (\sigma_1 + \sigma_y)$$

이식에서 필요로 하는  $\sigma_x, \sigma_y$ 는 콘크리트 압축강도를 변동인자로 하는 유한요소법에 의해 구한다. 2차원 콘크리트 요소의 재료모델은 직교이방성 아탄성 모델과 Darwin 및 野口의 등가 일축변형을 이룬 (8.9)을 이용하였고 철근은 복합경화하는 2차원 모델(10)을 이용하였다. 해석은 정착부 철근의 인발 실험 공시체<sup>3)</sup>를 대상으로 하였다. Fig. 6에 구성요소도의 일례 그리고 평면응력 문제를 축대칭요소(11)로 간주하기 위한 두께분할도(단면의 1/4만 생각하며 여기서  $A_s$ 는 철근단면적을 나타낸다)를 나타낸다. 철근과 콘크리트와의 경계면에 있어서는 압축력을 받는 철근마디 앞면의 2개 요소점만을 공유 접점번호로 하여 점착력이 파괴된 상태를 표현하였다. 유한요소는 8절점 서브파라메트릭 요소로서 적분차수 2x2의 가우스적분법을 사용하였다. 내부균열 발생판정은 철근마디로부터 제일 가까운 콘크리트 요소 적분점의 인장주응력도가 콘크리트 인장강도를 초과할 때이며 이때의  $\sigma_x$  및  $\sigma_y$ 를 구한다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이 해석결과를 회귀분석한 결과 다음식이 구해졌다.

$$\tau_A = 3.2 f'_{ci}{}^{1/2} \quad (2)$$

鳥<sup>(5)</sup>등의 많은 연구결과에 따르면 슬릿양은 철근 직경(D)에 비례한다. 본연구에서는 내부균열이 발생할 때의 슬릿양( $S_A$ )을 정착부 철근의 인발실험 결과

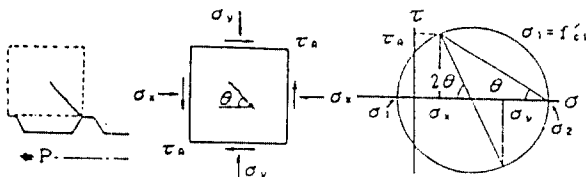


Fig. 5 내부균열 발생시의 콘크리트 응력상태 및 Mohr 원

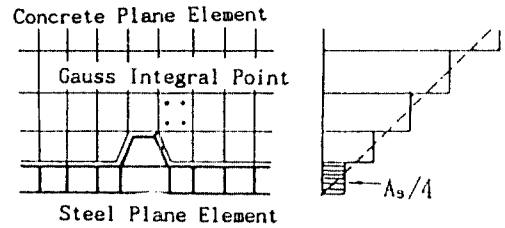


Fig. 6 내부균열 해석의 요소분할도 및 두께분할도의 일례

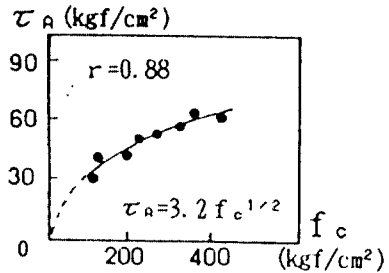


Fig. 7  $\tau_A$ 와  $f'_{ci}$ 와의 관계

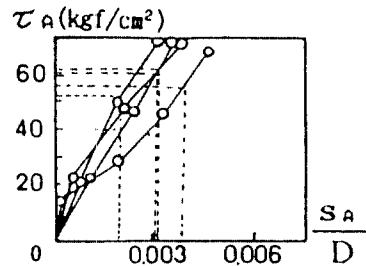


Fig. 8  $\tau_A$ 와  $S_A/D$ 와의 관계

를 이용해서  $S_A = 0.003 D$ 로 하였다. 즉 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 4개 공시체에서 실험적으로 구한  $\tau-s$  관계<sup>(3)</sup>를 이용하여 (2)식의  $\tau_A$ 에 상응하는  $S_A$ 를 구하고 4개치를 평균화하여 구한다.

### 3. 최대 부착응력( $\tau_{MAX}$ )

내부균열이 발전하면 콘크리트 강성은 탄성상태에 비해 감소하지만  $\tau-s$  관계는 여전히 상승한다. 그러나 최대 부착응력에 도달한 직후에는 급격히 하강한다. 일반적으로 확대기초 같은 매시브 콘크리트에 배근된 축방향 주철근은 정착장이 매우 길거나 후크에 의해서 정착되어 있기 때문에 철근 자유단의 슬릿은 발생하지 않으며 활열 균열도 발생하기 어렵

다. 따라서 최대 부착응력( $\tau_{MAX}$ )은 철근이 항복할 때에 발생한다. 본연구에서는 정착부 철근의 인발 실험 결과(3)를 부착인화하여  $\tau_{MAX}$ 와  $f'_c$ 의 관계로서 다음 식을 구했다.

$$\tau_{MAX} = 6.0 f'_c{}^{1/2} \quad (3)$$

(3)식은 Fig.9(a)에 나타난 바와 같이 島(12) 등의 실험결과와도 일치하고 있으며 콘크리트 압축강도 200 - 400kgf/cm<sup>2</sup> 범위에서 유용하다고 생각된다.

최대 부착응력에 상응하는 슬립양( $S_y$ )은 Fig.9(b)에 나타난 바와 같이 같은 방법에 의해 구할 수 있으며  $S_y = 0.019 D$ 로 하였다.

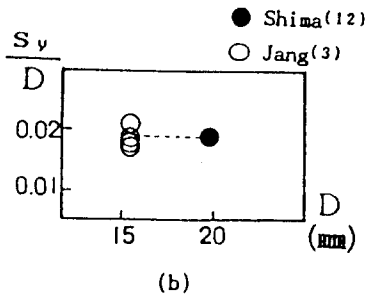
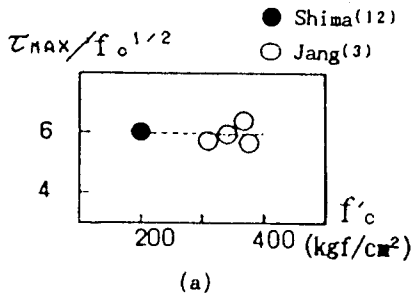


Fig.9 (a)  $\tau_{MAX} / f'_c{}^{1/2}$ 와  $f'_c$ 와의 관계  
(b)  $S_y / D$ 와  $D$ 와의 관계

#### 4. 잔류 부착응력 ( $\tau_R$ )

철근이 항복하면 변형율은 급격히 증가하여 포아손 비에 의해 철근단면적은 감소한다. 따라서 철근 마디와 콘크리트와의 맞물림작용이 약해지며 부착응력은 급격히 감소하지만 0는 되지 않고 얼마간의 부착응력( $\tau_R$ )은 존재한다. 또한 이  $\tau_R$ 은 변형율 경화현상에 의해 일정치가 아닌 약간 상승하는 경향이 있다. 철근항복 후의  $\tau$ - $s$  관계를 측정하는 것은 島(12), 村山(13) 및 角(14)의 실험이 알려져 있으며 본연구에서는 이러한 실험결과를 바탕으로 하여  $\tau_R$ 을  $0.3 \tau_{MAX}$ 로 가정한다.

$$\tau_R = 0.3 \tau_{MAX} = 1.8 f'_c{}^{1/2} \quad (4)$$

그리고 Fig.1에 나타난 R점 이후의 상승구배는 1/100(kgf/cm<sup>3</sup>)로 하였다.

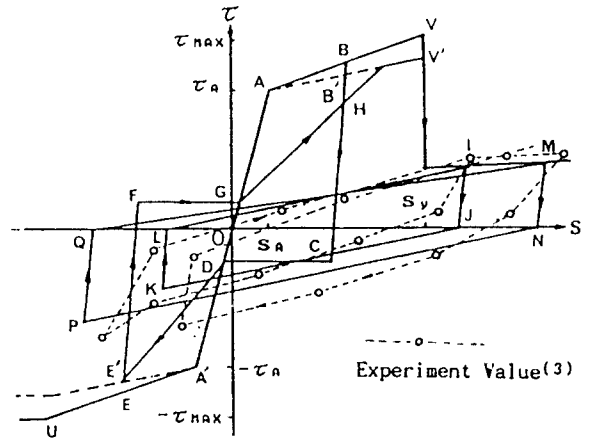


Fig.10 정부방향 반복재하시의  $\tau$ - $s$  관계 모델

#### 5. 정부방향 반복재하시의 $\tau$ - $s$ 관계 모델

Fig.10에 본연구에서 제안하는 정부방향 반복재하시의  $\tau$ - $s$  관계 모델을 나타낸다. 이것은 매시브 콘크리트에 배근된 축방향 철근이 정부방향 반복하중을 받을 때의 부착특성을 나타내기 위한 것으로 전술한 단조재하시의 모델을 근거로 森田(15)의 모델을 수정 조정한 것이다. 본모델의 특징은 다음과 같다. 포락선은 Fig.1에서 나타난 단조재하시의 모델을 이용하여 정방향의 포락선으로 이용하며, 부방향에 대해서는 철근의 압축항복에 의한 부착강성의 급격한 저하는 발생하지 않으므로 정방향과 다른 평탄한 포락선으로 가정하였다. 정부방향의 반복재하에 의해서 생기는 강성저하는  $\tau'_B = 0.9 \tau_B$ ,  $\tau'_V = 0.9 \tau_V$  및  $\tau'_E = 0.9 \tau_E$  처럼 포락선의 90% 값을 갖도록 한다. 단 철근항복후의 강성저하는 고려하지 않으며 철근항복후의 이력루프 형상은 철근 간격의 영향을 받지 않는 기동시험체의  $\tau$ - $s$  관계 측정치(3)의 형상으로 부터 모델화하였다. 또한 재하시의 강성은 森田의 이력법칙을 이용한다. 경로 OABCDE'FGH는 철근항복전의 제하 및 재재하의 일례로서 경로 IJKLMN 및 MNPQM은 철근항복후의 제하 및 재재하의 일례이다.

## 6. 결론

본연구는 확대기초를 갖는 교각 및 기둥 처럼 매시브 콘크리트에 배근된 축방향 주철근의 부착특성을  $\tau$ - $s$  관계로서 모델화한 것이다. 이러한 모델을 이용함으로써 지진하중을 받는 교각 및 기둥부의 변위 해석에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- 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, "鉄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鉄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) 藤井 榮, 森田司郎, "異形鉄筋の付着應力-すべり關係に関する考察", JCI, 第2回RC構造のせん断問題に對する解析的研究に関するコロキウム, 1983年10月, pp. 37-44
- 5) 島 弘, 周 禮郎 ほか, "マッシブなコンクリートに埋めこまれた異形鉄筋の付着應力-すべり-ひずみ關係", JSCE, 土木學會論文集, 第378號, 1987. 2, pp. 165-174
- 6) 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
- 7) Taylor, M. A., and Broms, B. B., "Shear Bond Strength between Coarse Agregate and Cement Paste or Mortar", ACI Journal, Vol. 61, No. 8, August 1964, pp. 939-957
- 8) Darwin, D., and Pecknold, D. A., "Analysis of RC Shear Panels under Cyclic Loading", Proc. of ASCE, Vol. 102, No. 2, Feb. 1976, pp. 355-369
- 9) 野口 博, "有限要素法による鉄筋の非線形解析(第1報)", JAI, 日本建築學會論文報告集, 第252號, 1977. 2, p. 1-11
- 10) Axelsson, K., and Samuelsson, A., "Finite Element Analysis of Elasto-Plastic Materials Displaying Mixed Hardening", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 14, 1979,
- 11) 角 徹三, "鐵筋近傍のコンクリートの面外變形を考慮した付着-滑り特性に関する研究", JCI, 第2回RC構造のせん断問題に對する解析的研究に関するコロキウム, 1983年10月, pp. 53-60
- 12) 島 弘, 周 禮郎 ほか, "異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性", JSCE, 土木學會論文集, 第378號, 1987. 2, pp. 213-220
- 13) 村山八洲雄, 須田久美子 ほか, "マッシブなコンクリート中に定着された鉄筋の降伏以降の拔出し特性", JCI, 第8回コンクリート工學年次講演會論文集, 1986, pp. 597-600
- 14) 角 徹三, 長友克寛 ほか, "鐵筋の降伏以後を含む異形鉄筋とコンクリート間の付着劣化に関する實驗的研究", JCI, 第4回コンクリート工學年次講演會論文集, 1982, pp. 269-272
- 15) 森田司郎, 角 徹三, "繰返し荷重下における鉄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