

부착특성을고려한 휨모멘트 - 곡률 관계에 관한 연구

Study on the Relationships of Bending Moment - Curvature
Based on Bond Property

* 장 일 영 (Il Young Jang)

Abstract

The object of this study is to propose the bending moment-curvature relationships based on the bond properties between concrete and steel for noncracking zone, and evaluate the flexural displacement of reinforced concrete members. The bond-slip relationship and the strain hardening effect of steel were taken into account in order to evaluate the spacing of the cracks and the curvature distribution. Calculated curvature distribution along the longitudinal axis was transformed into equivalent curvature distribution.

The flexural displacement was calculated by means of double integral of the equivalent curvature. Calculated values are in good agreement with the experimental data.

1. 序 論

철근콘크리트(RC) 구조물의 해석 및 설계에 있어서는 강도의 평가만이 아니고, 하중-처짐 관계로서 표현되는 변형특성을 정확하게 파악하는 것도 중요한 과제중의 하나이다. 그러나 RC 구조물은 철근과 콘크리트와의 복합구조로서 두 재료특성이 같은 탄성역에 있는 경우의全體變形舉動은 종래의 탄성理論에 의해서 간단하게 구해지지만, 콘크리트龜裂 및 철근의 降伏등에 의해 材料特性이 非彈性역에 들어가면全體變形舉動을 정확히 파악하는 것은 쉽지 않다.

本 研究은, 특히 휨모멘트를 받는 RC部材의 短期처짐量(Shrinkage, creep등에 의한 長期처짐은 고려안함)을 解析的으로 評價하는 방법을 提案한다.

일반적으로, 휨모멘트를 받는 RC部材의 하중-처짐 관계는, 斷面의 Euler-Bernoulli 보 理論, 휨의 평

衡條件 및 철근과 콘크리트의 應力-變形率(Stress-strain) 관계를 이용해서 휨모멘트-曲率關係를 구하고, 이 관계를 部材全長에 이르는 斷面에 적용함으로써 算定할 수 있다.

이 解析法에 의해서 구하여진 휨모멘트-曲率 關係는 휨균열이 발생하는 斷面에 대한 것으로, 따라서 이 방법은 部材全體를 휨균열단면으로서 취급하는 것이 된다(圖-1의 從來 曲率). 그러나, 實際 RC部材의 휨균열은 어느 정도 간격을 두고 발생하며, 그 간격 사이의 引張應力을 받는 區間에서는 철근과 콘크리트와의 附着作用에 의해 콘크리트는 引張應力을 負擔하게 된다. 따라서, 龜裂發生斷面만큼의 剛性低下는 생기지 않는다. 즉, 龜裂과 龜裂사이의 斷面의 曲率은 龜裂發生斷面의 曲率보다 작아, 그 결과 部材의 휨耐力는 上昇될 것이 예상된다.

實際, 附着性이 양호한 異形鐵筋을 軸方向主鐵筋으로 配筋한 RC部材에 대해서, 前述한 從來方法에 의해 구한 龜裂發生後의 처짐량은 實驗值보다 큰 값을 보이고, 게다가 計算된 降伏耐力는 實際의 값보다 작은

* 正會員

三星綜合建設 技術研究所 前任研究員 工學博士

값을 나타내는 것으로 알려져 있다¹⁾ (부착성이 나쁜 원형철근의 경우에는, 종래 수법을 이용하면 실험치와 좋은 대응을 보인다),

이러한 문제점을 해결하기 위해서,從來 研究에서는 다음과 같은 방법들이 擧論되어 왔다.

① 有效斷面 2次모멘트 또는 휨剛性を 利用해 휨모멘트-曲率關係를 모델化하는 방법¹⁾²⁾

② 部材中の 철근 또는 콘크리트(引張側)의 變形率分布(또는 應力分布)를 平均化하여, 철근 또는 콘크리트의 應力-變形率 關係를 修正모델化하는 방법¹⁾³⁾

① 및 ②의 방법은 철근과 콘크리트와의 附着特性에 의한 콘크리트의 引張應力分擔效果를 實驗結果 등의 經驗을 根據로 平均的으로 評價하는 방법이라 할수 있다.

①의 방법은, 計算法이 간단하고 實用的이므로 우리나라를 비롯한 각국의 示方書에 채용되고 있다. 그러나, 理論的 根據가 不確切한점이 있고, 軸力作用이 있는 경우에는 別途의 手法이 필요한 문제점이 있다.

②의 방법은, 附着特性에 의한 콘크리트의 應力分擔效果를 적절히 評價하는 모델이 많이 提案되고 있다. 그러나, 材料固有性質인 應力-變形率 關係를 한정된 實驗結果 및 條件을 根據로 修正하여 모델化함으로써 一般性을 만족시키지 못하는 경우도 많으리라 생각된다. 즉, 모델化의 對象이 된 實驗結果에는 適合性이 좋아도 斷面크기 및 材料의 性質이 틀리는 다른 實驗結果에는 맞지않는 경우가 있다고 생각된다.

以上과 같이 從來研究에서는 理論的根據, 一般性 및 實用性의 面에서 문제점이 있고, 이 분야의 연구에는 아직 개선의 여지가 많다고 생각된다.

여기서, 本 研究는 RC部材의 처짐량計算을 實用的이며, 동시에 철근과 콘크리트와의 附着特性을 直接的으로 考慮할 수 있는 解析手法을 提案하는 것을 目的으로 한다.

本 研究의 特徵은, 처짐량을 精度 좋게 구하기 위해서, 휨龜裂이 생긴 RC部材의 철근과 콘크리트와의 附着特性을 考慮한 휨모멘트-等價曲率 關係를 提案한 것이다.

2. 휨모멘트-等價曲率關係

圖-1에 나타낸것 같이, 보의 部材軸에 따라 생기는

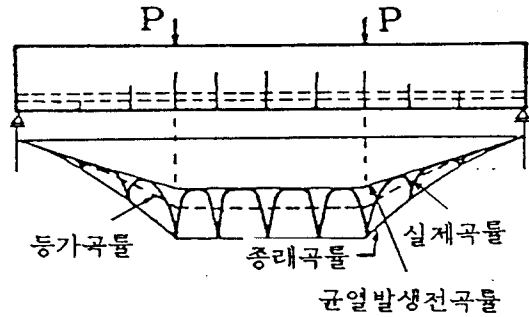


圖-1 휨부재의 曲率分布

實際 曲率分布는 龜裂發生 斷面에 의해 波狀分布가 되며, 이 曲率分布를 精確하게 구할 수 있다면 처짐量은 曲率의 2重積分이므로 처짐량을 精確하게 구할 수 있다.

本 研究에서는, 다음과 같은 順序에 의해 휨모멘트-等價曲率 關係를 提案한다.

① 휨모멘트-曲率關係가 휨龜裂發生時에 不連續이 되는 것에 注目하여, 龜裂의 定常 狀態(荷重이 增加해도 새로운 휨龜裂이 더이상 發生하지 않는 狀態)에 있어서의 平均龜裂 間隔을 解析的으로 구한다. 또한, 이 것을 曲率分布型의 1區間 길이로 看做한다.

② 언어친 龜裂間區間에 철근의 bond stress-slip-strain 關係를 適用해서, 철근의 變形率 分布를 구하고, 철근의 變形率과 콘크리트의 壓縮緣 變形率로부터 새로운 曲率을 定義하며, 이 區間의 曲率分布를 구한다.

③ 曲率分布가 구해지면, 그 것을 平均化하여 처짐量 算定用的 等價曲率을 구한다 (圖-1의 점선이 等價曲率으로, 波狀의 실선으로 나타낸 實際 曲率分布로부터 얻는 面積과 等價曲率으로부터 얻는 面積은 同一하다). 이것과 휨모멘트에 의해서 휨모멘트-等價曲率 關係를 구한다.

以下, 具體的인 解析手法 및 解析結果에 관해서 說明한다.

2.1 平均휨龜裂 間隔의 算定

龜裂斷面에 대한 휨모멘트-曲率關係는 圖-2의 실선과 같으며(여기에 龜裂發生 휨모멘트: M_c , 龜裂發生 直前의 曲率: ϕ_0 , 이 때의 引張鐵筋變形率을 ϵ_{s0} ,

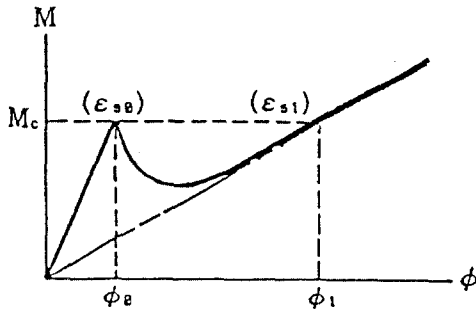


圖-2 龜裂發生斷面에서의 휨모멘트-곡률관계

龜裂發生直後の 曲率: ϕ_1 , 이 때의 引張鐵筋變形率을 ϵ_{s1} , 일점좌선은 콘크리트의 引張抵抗을 무시한 휨모멘트-曲率關係를 나타낸다. 여기에서, 龜裂發生後에 휨모멘트의 低下現狀이 보이며, 이 같은 不連續의 인 휨모멘트-曲率關係는 힘의 平衡條件을 만족하지 못하게 된다. 그러나, 龜裂發生휨모멘트 M_c 가 작용할 때, 龜裂은 發生과 동시에 순간적으로 어느정도까지 發展하며, 曲率도 ϕ_0 부터 ϕ_1 까지 순간적을 증가하여, 힘의 平衡條件을 만족하게 된다.

本 研究에서는 部材中에 존재하는 콘크리트強度分布를 均질하다고 가정하고, 部材軸方向의 鐵筋變形率分布를 이용하여 平均龜裂間隔을 解析的으로 구했다.

즉, 部材中의 콘크리트強度分布가 均질하므로 휨部材의 순수 휨區間에 發生하는 휨모멘트는 M_c 가 똑같이 작용하게 되며, 이 때의 龜裂 定常狀態가 되기 위한 鐵筋變形率分布(ϵ_{s0} 부터 ϵ_{s1} 까지)를 이용하면, 平均龜裂間隔을 구할 수 있다. 왜냐하면, 이러한 鐵筋變形率分布의 差異는 철근과 콘크리트와의 附着應力作用이 존재하기 때문이며, 平均龜裂間隔은 철근의 bond stress-slip-strain 關係로부터 구할 수 있다고 생각되기 때문이다.

여기서, bond stress-slip-strain 關係는 철근의 降伏後에도 適用可能한 Shima¹⁾의 關係式을 이용했다. 이 式은 다음과 같다.

$$\tau / f_c' = 0.73 \{ \ln(1+5s) \}^3 / (1 + \epsilon_s \times 10^5) \dots (1)$$

여기에서,

$$s = 1000 S/D$$

τ : 附着應力

f_c' : 콘크리트壓縮強度

S : slip量

ϵ_s : 鐵筋變形率

그런데, 式(1)로부터 附着應力을 구하기 위해서는 鐵筋의 變形率分布를 알 필요가 있다. 여기에서는, 鐵筋의 變形率分布를 간단한 函數式(式(2))으로 假定하고, 鐵筋上의 임의점에 대한 變形率과 Slip量을 구할 수 있도록 했다.

$$\epsilon_s = (\epsilon_{s1} - \epsilon_{s0})(X/a_s)^2 + \epsilon_{s0} \dots (2)$$

$$S = \int_0^{a_s} \epsilon_s dx = (\epsilon_{s1} - \epsilon_{s0})(X^3/a_s^2)/3 + \epsilon_{s0} \cdot X \dots (3)$$

$$T_0 = (\epsilon_{s1} - \epsilon_{s0}) E_s \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \dots (4)$$

여기에서,

X : 龜裂斷面으로부터 鐵筋軸方向의 임의斷面까지의 거리

a_s : 龜裂間거리

T_0 : 龜裂間의 鐵筋에 작용하는 附着應力의 合力

D : 鐵筋直徑

E_s : 鐵筋의 영係數

從來의 휨모멘트-曲率關係 解析에서 ϵ_{s0} 와 ϵ_{s1} 가 구해지면, 鐵筋軸方向의 힘의 平衡條件式(式(4))으로부터 필요로 하는 附着應力의 合力이 구해지며, 그 合力을 發生시키는 附着長(平均龜裂間隔 a_s)을 漸近計算을 利用하여 구할 수 있다.

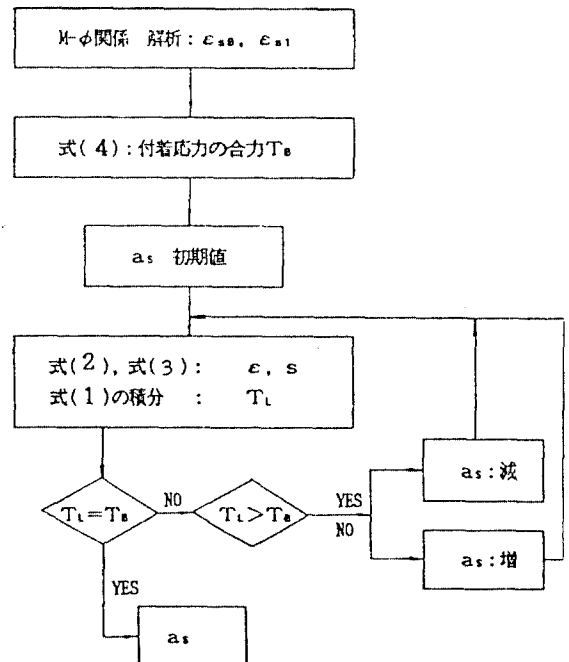


圖-3 龜裂間隔을 구하는 플로우차트

收斂條件은, 式(2)와 式(3)으로부터 鐵筋의 變形率과 Slip量을 구해, 式(1)의 積分에 의한 附着應力의 合力(T_L)이 T_0 에 충분히 가까와질 때로 한다.

圖-3에 平均龜裂間隔을 구하기 위한 計算 flow chart를 나타낸다.

2-2 曲率分布의 算定

曲率은, 斷面의 變形率分布가 Euler-Bernoulli 보理論에 의해 直線으로 나타낼때의 기울기로 假定한다(式(5)).

$$\Phi = (\epsilon_s - \epsilon_c)/d \quad \dots\dots(5)$$

여기에서,

- Φ : 임의점의 曲率
- ϵ_s : 引張鐵筋變形率
- ϵ_c : 콘크리트壓縮緣의 變形率
- d : 斷面의 有效높이

① 引張鐵筋의 變形率分布

引張鐵筋의 變形率分布는, 前述한 平均龜裂間隔의 계산방법과 같은 생각으로 구할 수 있다. 鐵筋附着長 l_0 는 龜裂間隔 a_s 의 1/2로서 주어지며, Slip量이 0인 區間中央의 鐵筋變形率 ϵ_{s0} 를 설정하면, $\epsilon_{s0} \approx \epsilon_{s1}$ 인 條件을 이용 ϵ_{s1} 을 변동시킴으로써(附着應力의 合力과 철근에 걸리는 引張力과의 힘의 平衡條件을 收斂條件으로 한다), 鐵筋降伏進展長 및 龜裂斷面의 鐵筋變形率 ϵ_{s1} 이 구해지며, 彎모멘트-曲率解析으로부터 ϵ_{s1} 에 대응하는 彎모멘트를 구할 수 있다. 이 경우에 있어서도, 鐵筋變形率分布를 精確하게 表現하는 函數가 필요하게되며, 本研究에서는 鐵筋降伏까지의 變形率分布 ϵ_s 를 以下의 式으로 表現했다.

$$\epsilon_s = (S_1 - S_2)(X/l_0)^4 + 2S_1(S_1 - S_2)(X/l_0)^2 + \epsilon_{s0} \quad \dots\dots(6)$$

$$S = (S_1 - S_2)(X^5/l_0^4)/5 + 2S_1(S_1 - S_2)(X^3/l_0^2)/3 + \epsilon_{s0} \cdot X \quad \dots\dots(7)$$

여기에서,

$$S_1 = \sqrt{(\epsilon_{sy}' - \epsilon_{s0})}$$

$$S_2 = \sqrt{(\epsilon_{sy}' - \epsilon_{s1})}$$

$$\epsilon_{sy}' = (256 \epsilon_{sy} - 49 \epsilon_{s0})/207$$

ϵ_{sy} : 鐵筋降伏點變形率

龜裂과 龜裂사이의 區間內에서 鐵筋變形率은, 彈性域에는 式(6)을 적용하고, 降伏變形率부터 龜裂發生斷面의 鐵筋變形率까지를 直線으로 近似하였다.

圖-4에 引張鐵筋變形率分布를 구하기 위한 flow chart를 나타낸다.

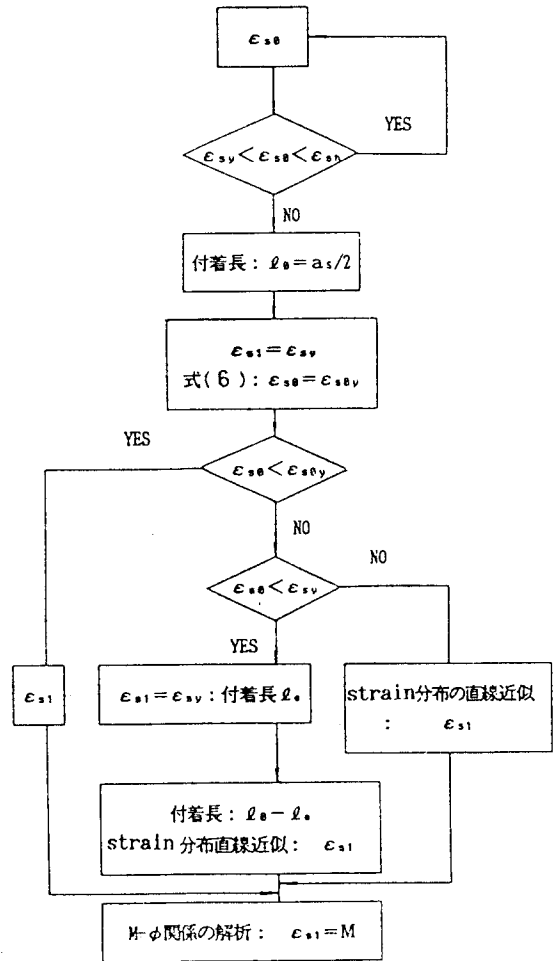


圖-4 引張鐵筋變形率을 구하는 플로우차트

② 콘크리트 壓縮緣의 變形率分布는, 龜裂區間內의 中央斷面이 前述한 條件을 만족해서 Euler-Bernoulli 보理論을 회복하고 있다고 생각되는 斷面에 彎모멘트-曲率解析을 하여 콘크리트壓縮緣變形率을 구한다. 또한 龜裂發生斷面의 콘크리트壓縮緣變形率과 直線보간하여, 콘크리트壓縮緣의 變形率分布를 구한다.

2-3 等價曲率 및 材料의 모델化

等價曲率은 龜裂에 의해 나뉘는 구간의 個數에 의존하지 않으므로, 平均龜裂 間격 1구간의 曲率分布는 面積平均으로 구할 수 있다(圖-1). 또한, 처짐量은 等價曲率을 部材全長에 대해 2重積分함으로써 구할 수 있다.

콘크리트壓縮側의 應力-變形率關係는, e 函數式에 의해 모델化 했으며, 引張側의 應力-變形率關係는, 線形彈性으로 콘크리트引張限界變形率을 100 μ 로 했다.

鐵筋 應力-變形率關係의 모델은, 變形率 降伏點 및 變形率硬化開始點을 直線으로 連結하는 모델을 이용했다.

3. 解析結果 및 考察

圖-5는 荷重部材 供試體⁵⁾ (斷面높이 40cm, 幅 20cm, Span 432cm, 剪斷 Span比 3.5, 鐵筋比 1.61%)의 荷重모멘트-曲率關係 解析結果를 나타낸 一例이다.

曲率의 實驗值는 荷중구간의 처짐분포로부터 差分法을 이용해서 구함으로써 荷중구간의 平均曲率에 相當한다.

圖-6은 荷重- 처짐關係의 解析結果를 나타낸 一例이다.

이러한 結果들로부터, 本 研究에서 提案된 解析的 荷중모멘트-等價曲率關係는, 보의 荷중구간에 있어서의 平均적 荷중모멘트-曲率關係에 相當하며, 좋은 해석결과를 나타내고 있는 것을 확인 할 수 있다.

또, 從來의 荷중모멘트-曲率關係에 의해 계산된 荷중- 처짐關係보다, 本 研究에서 제안한 方法에 의한 荷중- 처짐關係결과가 實驗值와의 적합성이 좋고, 從來算定法에서는 표현하지 못한 降伏點부근의 耐力上昇效果도 잘 表現하고 있다.

감사의 글

本 論文은 저자의 박사학위논문 3章 내용중 일부분이며, 저자를 지도 편달하여주신 일본 東北大學 尾坂芳夫 교수님, 연세대학 황학주 교수님 및 변근주 교수님께 감사드립니다.

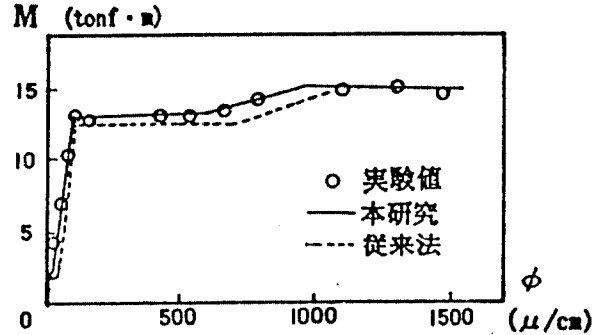


圖-5 荷중모멘트-곡률 관계

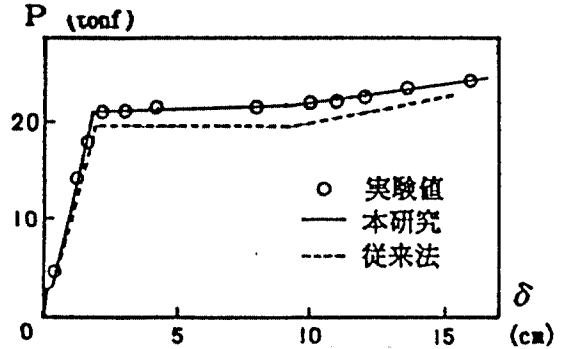


圖-6 荷중- 처짐 관계

參考文獻

- 1) Kakuta, Y. : On cracking and deformation of flexural concrete members, Proc. of JSCE, Vol. 384, pp. 21-32, Aug. 1987 (Japanese)
- 2) Building Code Requirements for reinforced Concrete, ACI 318-83, 1983
- 3) C.E.B : Manual on cracking and deformation, Bulletin D'Information, No. 158, 1985
- 4) Shima, H. and Chou, L. L. et. al. : Bond-Slip-Strain relationship of deformed bars embedded in massive concrete, Vol. 378, pp. 165-174, Feb. 1987 (Japanese)
- 5) 張 一 泳: RC 部材의 荷중-變位關係에 關する 解析的 研究, 東北大學 博士論文 1991年 3月 (Japanese)