

철근콘크리트보의 전단피로손상거동에 대한 수정압축장이론을 이용한 해석기법

Analysis of Shear Damage Behaviour of Reinforced Concrete Beams using Modified Compression Field Theory

한 승 환*
Han, seung hwan

오 병 환**
Oh, byung hwan

ABSTRACT

In this study, a quantitative analysis technique for the damage process of reinforced concrete beams under repeated shear loading is proposed, which can express the progressively increasing strain and stiffness reduction. The analysis technique is mainly based on the modified compression field theory and scalar damage concept, which describe the strain and stress configuration in the shear zone by considering the 2-dimensional effect, and express the degradation of principal compressive strut by cyclic strain increment, secant modulus decrement, and modifying the parabolic stress strain relationship. The analysis of the response of RC beams under repeated shear-flexure loading has been carried out and compared with the experimental results. The present theory may efficiently be used to evaluate the deflection and strain accumulation under repeated loadings.

1. 서론

보 요소에서의 작용 전단력은 보요소의 급작스러운 파괴를 일으키는 원인이 되며, 전단철근이 배근 되어 있다 할지라도 순간적인 균열의 발생이 일어나 구조요소의 거동에 많은 영향을 미치는 요인이 된다. 그러나 아직 이 분야에 대한 연구결과가 단순 시험체에 국한된 것이 많아 구조요소로서 철근 콘크리트 구조물에 적용하는데는 많은 어려움이 있는 것으로 판단된다.¹⁾

따라서, 본 연구에서는 콘크리트 보의 작용하중에 대한 손상을 고려할 수 있는 방법에 대해 검토해 보기로 한다. 즉 전단력을 반복해서 받는 보의 경우, 기존의 전단모델을 사용하여 반복재하에 따른 고려하여 보의 반복되는 횟수에 따른 거동을 분석해 보았다.

1) * 정희원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

2) ** 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수

2. 철근 콘크리트 보의 전단거동 분석모델

철근콘크리트보의 경우 휨과 전단력에 의해 사인장 응력이 유발되며, 이로 인해 사인장 균열이 유발된다. 균열의 발생후 철근 콘크리트보는 탄성거동특성을 갖는 연속체와는 상이한 거동을 하게된다. 따라서 이러한 균열후 거동 및 보의 저항력을 예측하기 위한 여러 가지 모델들이 제시되어 왔다.

본 연구에서는 설계를 위한 극한모델뿐만 아니라 사용성 분석에도 적절한 것으로 판단되는 수정압축장 이론(modified compression field theory)^{2),3)}을 이용하여 반복하중에 의한 손상거동을 표현할 수 있는 모델을 제시하고자 한다.

3. 응력-변형도 관계

3.1 콘크리트의 응력-변형도 관계

콘크리트 응력장에서 평균응력-변형도의 관계는 표준 물성 실험에서 얻어지는 국부응력과 국부변형도관계와는 상이하고, 이러한 평균의 개념은 단면내에서 국부적인 변동성을 포함하는 것이 된다. 실제적으로 철근과 콘크리트의 응력-변형도 관계가 독립적이지는 않지만 평균의 개념으로 해서 서로 독립적이라는 가정하에 평균응력-평균변형도관계를 가정한다.

Vecchio⁴⁾의 제안에 의한 다음의 식 (1)과 같은 주압축대의 평균응력-변형도관계를 사용한다.

$$f_d = f_c' \left[2 \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_o} \right) - \beta \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, f_d' : 주압축평균응력, ϵ_d : 주압축변형도, f_c' : 표준 실린더 공시체의 압축강도,

ϵ_o : 공시체 최대응력(f_c')에서의 변형도, β : 주압축변형도와 주인장변형도비(ϵ_{dt}/ϵ_d)의 함수.

β 를 결정하기 위하여 2축응력상태의 실험결과로 최대응력과 주압축변형도와 주인장변형도비의 관계로부터 Vecchio는 다음 식 (2)과 같은 관계를 얻을 수 있었다.

$$\beta = 0.85 + 0.27 \epsilon_{dt}/\epsilon_d \quad (2)$$

3.2 철근의 응력-변형도 관계

콘크리트에서와 마찬가지로 철근에서도 평균응력-변형도의 관계가 적용된다. 철근에서의 국부응력의 변화를 알 수 없으므로 다음의 식 (3), (4)와 같은 평균응력-평균변형도의 관계를 사용한다.

$$f_{sl} = E_s \cdot \epsilon_l \leq f_{yl} \quad (3)$$

$$f_{st} = E_s \cdot \epsilon_t \leq f_{yt} \quad (4)$$

4. 적합조건 및 평형조건

콘크리트와 철근의 변형도는 다음의 그림 1과 같은 평균변형도의 Mohr원에 의해 결정되며, 적합조건도 이의 관계에 의해 구성되어진다. 그리고, 평형조건은 철근의 응력, 콘크리트의 응력, 그리고 각 보의 분할 층에서 응력-변형도 관계에 의해 결정되어지며, 다음의 그림 2와 같은 응력의 Mohr원과 같은 상호관계를 갖는다.

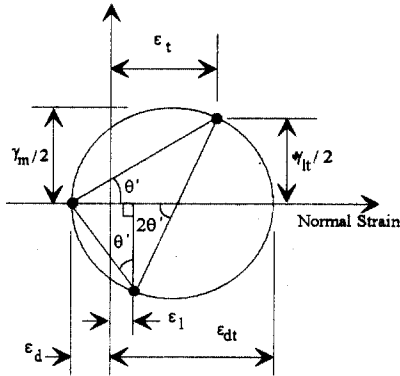


Fig. 1 콘크리트 변형도의 Mohr's circle

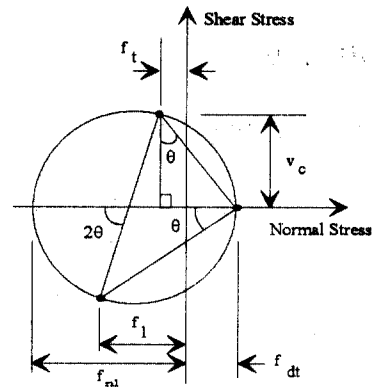


Fig. 2 콘크리트 응력의 Mohr's circle

5. 손상모델

균열하중을 초과하여 작용되는 하중에 의하여 발생되는 사인장 균열이 특성상 반복하중에 의한 철근 콘크리트 부재의 변형증가는 다음과 같은 원인에 의해 진행되어지는 것으로 판단된다.

- (i) 콘크리트 압축대의 반복하중에 의한 변형도변화(Cyclic creep)
- (ii) 콘크리트와 철근의 부착손실과 인장영역에서의 균열확대로 인한 강성감소(Stiffness reduction)
- (iii) 철근의 변형연화(Strain softening)

반복하중을 받는 콘크리트의 변형도 증가는 Whaley 와 Neville⁵⁾에 의해 보고된 바 있다. 이러한 콘크리트 압축응력으로 인한 변형도 변화가 부재의 처짐 및 변형도 증가를 유발하는 주요한 원인이 되는 것으로 판단된다. 그들은 실험결과로부터 이러한 반복하중에 의한 변형도 변화를 콘크리트에 작용되는 평균 압축응력 $\sigma_m = [\sigma_{max} + \sigma_{min}]/2$ 과 작용응력범위 $\Delta = (\sigma_{max} - \sigma_{min})$ 를 사용하여 다음의 식 (5)와 같은 관계를 도출하였다.

$$\epsilon_c = 129\sigma_m t^{1/3} + 17.8\sigma_m \Delta N^{1/3} \quad (5)$$

여기서, ϵ_c 는 반복재하에 의한 변형도 증가량(mm/mm), Δ 는 압축강도비로 표현한 작용응력범위, σ_m 은 압축강도비로 표현한 평균응력 그리고, t 는 재하시간 (hours)을 나타낸다.

콘크리트의 단면에 작용되는 최대, 최소응력을 알면 식 (5)로부터 변형도 증가량을 구할 수 있게 된다. 그러나 이 식(5)는 Whaley 와 Neville이 지적한대로 $\sigma_m < 0.45$ 인 조건에서 사용할 수 있으나 대부분의 경우 압축응력이 이 조건의 범주를 벗어나지는 않는다.

앞서 언급된 방법에 의해 콘크리트 층의 주응력대에 발생하는 변형도의 증가를 구할 수 있고 이로부터 사이컨트 모듈러스 개념을 이용하여 강성의 감소 즉 손상을 다음의 그림 3, 4와 식 (6)과 같이 모사할 수 있다.

$$E_N = \frac{\sigma_{max}}{\frac{\sigma_{max}}{E_0} + \epsilon_c} \quad (6)$$

여기서, E_0 는 초기 사이컨트 탄성계수이고,
 E_N 는 N번의 반복재하후 사이컨트 탄성계수이다.

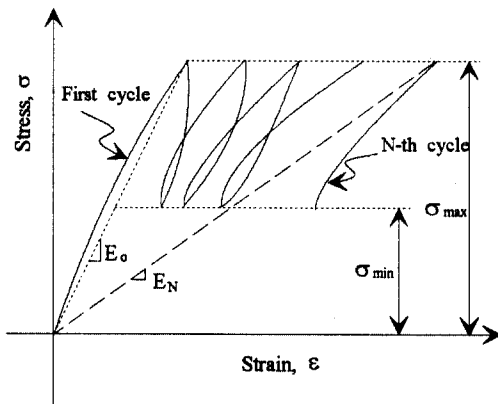


Fig. 3 Cycle dependent secant modulus of elasticity.⁶⁾

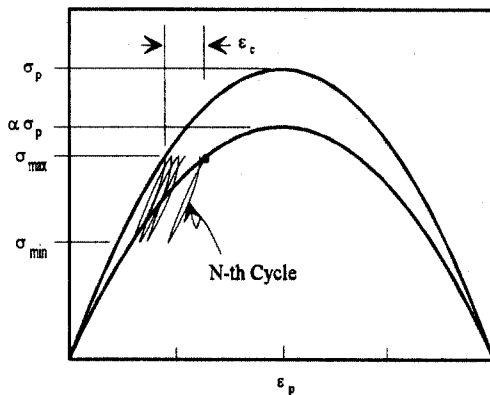


Fig. 4 Principal compressive stress-strain relationships considering the cyclic effect.

앞서의 평균응력-평균변형도 관계에서 기술된 바와 같이 주압축대의 응력-변형도 관계에 반복하중에 의한 변형도 증가량을 고려하여 다음의 식(7)과 같이 변형되어 고려될 수 있다. 이때 고려되는 계수 α 가 반복하중에 의한 강성의 감소를 고려하는 스칼라 손상계수가 된다.

$$f_d = \alpha f_c' \left[2 \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_o} \right) - \beta \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \quad (7)$$

여기서, f_c' 는 실린더 공시체의 압축강도이고, ϵ_o 실린더 공시체 최대하중(f_c')에서의 변형도, β 는 변형도비(ϵ_{sk}/ϵ_d)의 함수인 2축응력 보정계수이고, α 는 반복하중에 의한 변형도 증가의 함수로 표현되는 스칼라 손상계수이다.

6. 해석절차

앞서 기술된 모델을 통하여 철근 콘크리트 보의 반복하중의 작용에 의한 손상을 표현하기 위하여 철근 콘크리트 보를 여러개의 층으로 분할 한다. 각 콘크리트 층은 폭(b), 깊이(d), 전단철근량(ρ_v), 그리고 보 상단으로 부터 콘크리트 층의 위치(y_c)에 의해 규정되어 진다. 주인장철근은 주철근의 단면적(A_s), 항복강도(f_{yt}), 그리고 보 상단으로 부터의 위치(y_s)에 의해 정의된다. 콘크리트와 전단철근의 물성은 처음 전체 층에 동일하게 적용되며 콘크리트의 압축강도(f_c'), 콘크리트 최대응력에서의 변형도(ϵ_o), 전단철근의 항복강도(f_{yt}), 그리고 철근의 탄성계수(E_s)에 의해 정의 된다.

7. 해석결과

반복하중을 받는 철근 콘크리트 보의 해석결과를 시굴하고 이를 실험 결과와 비교하기로 한다. 반복하중은 같은 최대하중과 최소하중의 범위에서 재하되는데 이러한 반복하중에 의한 손상에 의해 철근 콘크리트보의 처짐 및 변형도가 증가하게 된다.

이러한 처짐 및 변형도의 증가는 강성의 감소, 반복재하에 의한 크리프, 부착 슬립, 발생된 균열의 확장 등의 원인에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 실험결과들에 의하면 사인장 균열하중의 경우, 균열하중을 초과하면서 인장철근과 압축철근 사이에서 균열이 짧은 순간에 발생하고, 전단철근의 배근으로 인해 여러개의 균열을 형성한다. 이러한 균열의 성상은 압축응력장의 효율성과 손상의 점진적 표현을 가능하게 하여준다.

8. 결론

1. 수정압축장 이론과 콘크리트 주압축대의 변형도 증가를 통해 철근 콘크리트보의 전단영역 내에서의 반복하중에 의한 손상을 표현함으로써 해석적인 방법으로 반복하중에 따른 거동분석을 수행하였다.
2. 전단철근이 요구량 만큼 배근된 경우라 할지라도 사인장 균열하중을 초과하는 10^6 번의 하중반복에 의해 처짐의 경우 약 14%, 곡률의 경우 약 15%, 전단철근의 경우 50% 이상까지도 증가하는 것으로 나타났다.
3. 반복피로하중에 의한 철근콘크리트보의 점진적 손상은 안전성 측면에서 뿐만아니라 사용성의 측면에서 검토되어야 하며, 특히 취성적 발생양태를 보이는 사인장전단균열의 경우 더욱 많은 연구를 통해 충분한 주의가 기울어져야 할 필요성이 요구된다고 할 수 있다.

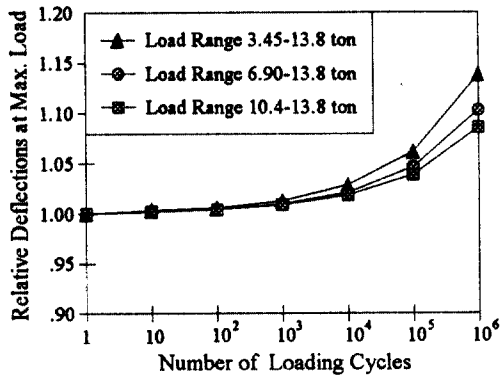


Fig 5 Analysis result of max deflections to cycle number

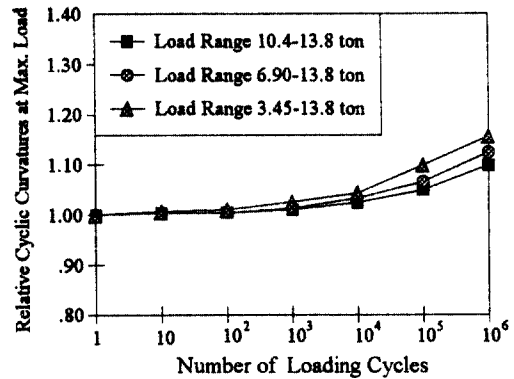


Fig 6 Analysis result of max curvatures to cycle number

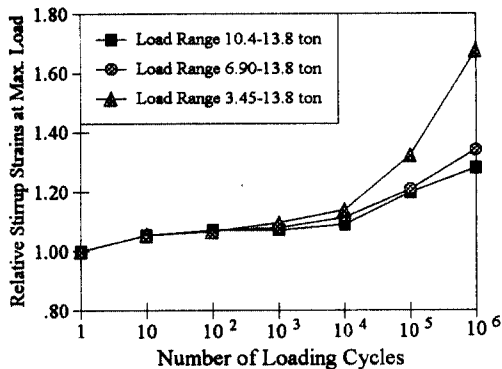


Fig 7 Analysis result of max stirrup strains to cycle number

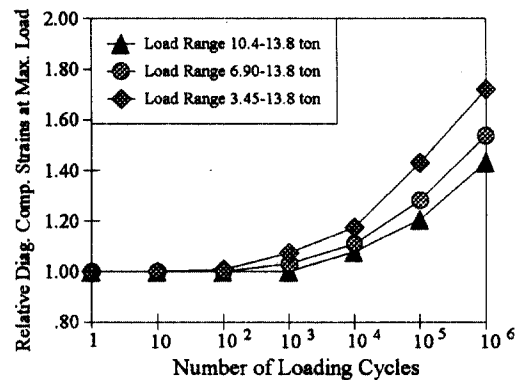


Fig 8 Analysis result of max diagonal strains to cycle number

참고 문헌

1. Hilsdorf, Hubert K., and Kesler, Clyde E., "Fatigue Strength of Concrete Under Varying Flexural Stresses," ACI Journal, Proceedings V.63, No.10, Oct. 1966, pp.1059-1076.
2. Collins, M. P., "Toward a Rational Theory for RC Members in Shear," Journal of Structural Division, ASCE, Vol.104, Apr. 1978, pp.649-666.
3. Mitchell, D., and Collins, M. P., "Diagonal Compression Field Theory - A Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion," ACI Journal, Vol. 71, Aug. 1974, pp.396-408.
4. Vecchio, F. J., and Collins, M. P., "The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses," Publication No. 82-03, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Mar. 1982.
5. Whaley, C. P., and Neville, A. M., "Non-Elastic Deformation of Concrete Under Cyclic Compression," Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.84, Sep. 1973, pp.145-154.
6. Balaguru P., and Shah S. P., "A Method of Predicting Crack Widths and Deflections for Fatigue Loading," ACI SP 75-7, ACI Committee 215, 1982, pp.153-175.