
피로하중을 받는 철근콘크리트 보의 전단손상누적 및 해석기법연구

Analysis of Shear Damage Accumulation of Reinforced Concrete Beams under Fatigue Loads



한승환*

Han, Seung-hwan



오병환**

Oh, Byung-hwan

ABSTRACT

Plain concrete and reinforced concrete, when subjected to repeated loads, may exhibit excessive cracking and then eventually fail after a number of load repetitions. A quantitative analysis of cyclic behaviour of reinforced concrete beams is important to understand safety and serviceability problems under repeated loading conditions especially in shear behaviour which has a brittle nature. This study has proposed a quantitatively analytic technique for the damage process of reinforced concrete beams under repeated shear loading, which can express the progressively increasing strain and stiffness reduction. This analytic 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 fatigue damages. The present theory may efficiently be used to evaluate the deflections and strains of beams under repeated loadings.

Keywords : Reinforced concrete beam, fatigue load, shear, cumulative damage, modified compression field theory, diagonal crack

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 1998년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

콘크리트 구조물에 반복하중이 작용할 때 그 크기가 구조물이 저항할 수 있는 강도보다 작다고 할지라도 구조물의 파괴를 일으킬 수 있다. 따라서 이러한 반복하중이 구조물에 미치는 영향에 대한 평가가 지속적으로 연구되어왔다. 그러나 기존 콘크리트보의 반복피로하중에 대한 연구는 반복횟수에 대한 파괴하중, 일정하중에 대한 파괴반복횟수 즉 피로한계에 대한 실험적 연구가 주로 수행되어왔다.

특히 보 요소에서의 작용 전단력은 보요소의 급작스러운 파괴를 일으키는 원인이 되며, 전단철근이 배근되어 있다 할지라도 취성적인 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 적용하는 데는 많은 어려움이 있는 것으로 판단된다.¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

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

2. 철근콘크리트 보의 전단거동분석을 위한 모델

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

일찍이 E. Morsch⁵⁾가 이러한 문제에 접근하기 위한 모델을 제시한 이후로 Bresler⁶⁾, Nielsen⁷⁾ 그리고 McGregor⁸⁾에 의해 전단균열거동분석을 위한 체계적인 모델들이 제시되어 왔으며, 최근들어서는 Collins⁹⁾, Mitchell¹⁰⁾, Schlaich와 Schafer¹¹⁾, Hus¹²⁾ 그리고 Vecchio¹³⁾ 등에 의해 활발히 연구되어 오고 있다. 이들이 제시한 모델들을 간단히 정리

하면 45° Truss Model, Variable Angle Truss Model과 Strut-and-Tie Model, Compression Field Theory Model, Softened Truss Model 등이 있다. 그러나 이러한 모델들의 특징은 반복하중이 아니라 단조증가하중의 극한강도 계산에 관한 모델이라는 것이다.

본 연구에서는 설계를 위한 극한모델뿐만 아니라 사용성 분석에의 적용에도 적절한 것으로 판단되는 수정압축장 이론(modified compression field theory)을 이용하여 반복하중에 의한 손상거동을 표현할 수 있는 모델을 제시하고자 한다.

3. 해석모델

3.1 응력-변형도 관계

3.1.1 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. 단면내에서의 국부적인 변동은 철근과 콘크리트의 부착, 콘크리트내의 철근배근 등에 의해 달라지게 된다.

실제적으로 철근과 콘크리트의 응력-변형도관계가 독립적이지는 않지만 평균의 개념으로 해서 서로 독립적이라는 가정하에 평균응력-평균변형도관계를 가정한다. Vecchio의 제안에 의한 다음의 식 (1)과 같은 주압축대의 평균응력-변형도관계를 사용한다.

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

여기서, σ_d 는 주압축평균응력, ϵ_d 는 주압축변형도, σ_{ck}' 는 표준 실린더 공시체의 압축강도, ϵ_o 는 공시체 최대응력(σ_{ck}')에서의 변형도, 그리고 β 는 주압축변형도와 주인장변형도비(ϵ_{dt}/ϵ_d)의 함수이다.

β 를 결정하기 위하여 2축응력상태의 실험결과로 최대응력과 주압축변형도와 주인장변형도비의 관계로부터 Vecchio는 다음 식(2), (3)과 같은 관계를 얻을 수 있었다.

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{ck}'} = \frac{1}{0.85 + 0.27 \varepsilon_{dt} / \varepsilon_d} \quad (2)$$

$$\beta = 0.85 + 0.27 \varepsilon_{dt} / \varepsilon_d \quad (3)$$

여러 번의 실험에 의한 결과에 의하면 균열이후에도 콘크리트의 평균인장응력이 존재한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 인장경화로 언급되며 부착응력을 통하여 철근에서 콘크리트로 전달되는 응력에 의해 발생한다. 여러 가지 모델이 콘크리트의 인장응력-변형도 관계를 나타내기 위하여 제시되었다. 여기서는 균열전과 후로 나누어서 평균인장응력-평균변형도의 관계를 설정한다.

균열전 ($\varepsilon_{dt} < \varepsilon_{cr}$)에는 선형 관계의 응력 변형도 관계를 사용한다. 그리고 균열후 ($\varepsilon_{dt} > \varepsilon_{cr}$)의 경우, 실험적 결과에 의하면 주인장응력은 전단철근과 주인장철근이 항복하는 경우에 0에 가까워 짐을 알 수 있었다. 따라서 일축응력상태에서와 마찬가지로 작용력을 철근과 콘크리트가 분담하는 형식으로 다음식(4)와 같이 관계를 설정할 수 있다.

$$\sigma_{nt} = \sigma_{dt} + \rho_l \sigma_{st} \quad (4)$$

여기서, σ_{dt} 는 콘크리트에 의해 부담되는 인장력이고, $\rho_l \sigma_{st}$ 은 철근에 의해 분담되는 인장력이다.

만약 철근의 응력-변형도 관계를 완전탄소성으로 가정하면 작용되는 인장력 σ_{nt} 은 $\rho_l \sigma_{st}$ 을 넘을 수 없다. 따라서 다음 식(5)와 같은 조건이 설정된다.

$$\sigma_{dt} \leq \rho_l \sigma_{st} - \rho_l \sigma_{st} \quad (5)$$

3.1.2 콘크리트의 균열응력

콘크리트의 균열응력은 식(6)과 같은 균열이 처음 발생되는 하중에 대응하는 주인장응력으로 설정되고, 이때 철근에 의한 영향은 무시한다.

$$\sigma_{cr} = 0.33 \sqrt{\sigma_{c'}'}, \quad (MPa) \quad (6)$$

3.1.3 철근의 응력-변형도 관계

콘크리트에서와 마찬가지로 철근에서도 평균응력-변형도의 관계가 적용된다.

따라서 철근에서의 국부응력의 변화를 알 수 없으므로 다음의 식(7), (8)과 같은 평균응력-평균변형도의 관계를 사용한다.

$$\sigma_{st} = E_s \cdot \varepsilon_t \leq \sigma_{yt} \quad (7)$$

$$\sigma_{st} = E_s \cdot \varepsilon_t \leq \sigma_{yt} \quad (8)$$

3.2 적합조건

콘크리트와 철근의 변형도는 다음의 Fig. 1과 같은 평균변형도의 Mohr원에 의해 결정되며, 적합조건도 이의 관계에 의해 구성되어진다.

3.3 평형조건

평형조건은 철근의 응력, 콘크리트의 응력, 그리고 각 보의 분할 층에서 응력-변형도 관계에 의해 결정되어지며, 다음의 Fig. 2와 같은 응력의 Mohr원과 같은 상호관계를 갖는다. 즉, 다음 식(9), (10), (11)과 같은 관계를 갖는다.

$$\sigma_d = V_c \cdot \left(\tan \theta + \frac{1}{\tan \theta} \right) - \sigma_{dt} \quad (9)$$

$$\sigma_t = V_c / \tan \theta - \sigma_{dt} \quad (10)$$

$$\sigma_t = V_c / \tan \theta - \sigma_{dt} \quad (11)$$

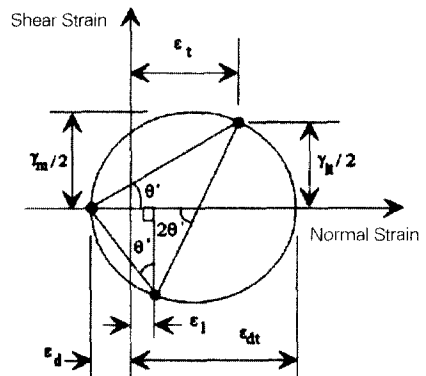


Fig. 1 Mohr's circle of strains in concrete

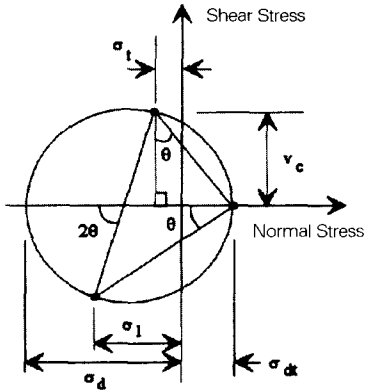


Fig. 2 Mohr's circle of stresses in concrete

4. 손상모델

본 연구에서는 반복하중에 의한 처짐, 변형도 변화를 고려하는 방법에 대한 모델을 적용하고자 하였다. 대부분의 반복하중에 대한 연구가 철근콘크리트 보를 구성하는 콘크리트와 철근의 피로한계를 결정하기 위한 목적으로 수행되었고, 반복피로하중을 받는 부재의 사용성 분석을 위한 측면에서의 연구가 미흡한 실정이다. 게다가 전단거동에 대한 고찰은 거의 없다.

균열하중을 초과하여 작용되는 하중에 의하여 발생하는 사인장 균열의 특성상 반복하중에 의한 철근콘크리트 부재의 변형증가는 다음과 같은 원인에 의해 진행되어지는 것으로 판단된다.

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

반복하중을 받는 콘크리트의 변형도 증가는 Whaley 와 Neville에 의해 보고된 바 있다. 이러한 콘크리트 압축응력으로 인한 변형도 변화가 부재의 처짐 및 변형도 증가를 유발하는 주요한 원인이 되는 것으로 판단된다. 그들은 실험결과로부터 이러한 반

복하중에 의한 변형도 변화를 콘크리트에 작용되는 평균 압축응력 $\sigma_m = [\sigma_{max} - \sigma_{min}] / 2\sigma_{ck}'$ 과 작용응력범위 $\Delta = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / \sigma_{ck}'$ 를 사용하여 다음의 식 (12)와 같은 관계를 도출하였다.

$$\epsilon_c = 129\sigma_m t^{1/3} + 17.8\sigma_m \Delta N^{1/3} \quad (12)$$

여기서, ϵ_c 는 반복재하에 의한 변형도 증가량 (mm/mm),

Δ 는 압축강도에 대한 작용응력범위의 비율,

σ_m 은 압축강도에 대한 평균응력의 비율, 그리고, t는 재하시간 (hours)을 나타낸다.

콘크리트의 단면에 작용되는 최대, 최소응력을 알면 식 (12)로부터 변형도 증가량을 구할 수 있게 된다. 그러나 이 식(12)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 활선 탄성계수 개념을 이용하여 강성의 감소 즉 손상을 다음의 Fig. 3, 4와 식 (13)과 같이 모사할 수 있다.

$$E_N = \frac{\sigma_{max}}{\frac{\sigma_{max}}{E_o} + \epsilon_c} \quad (13)$$

여기서, E_o 는 초기 시이컨트 탄성계수이고, E_N 는 N번의 반복재하후 활선 탄성계수이다.

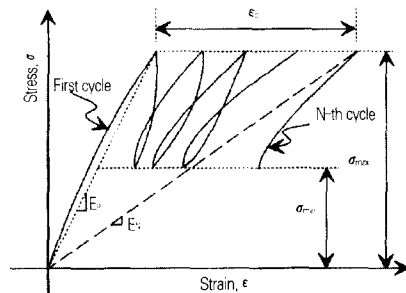


Fig. 3 Cyclic secant modulus of elasticity⁽¹⁵⁾

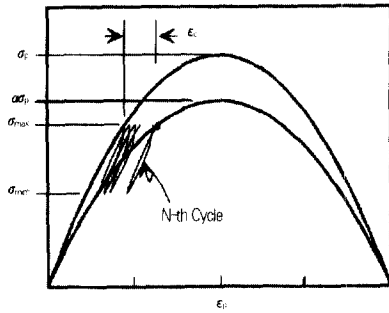


Fig. 4 Principal stress-strain relationship considering the cyclic effects

앞서의 평균응력-평균변형도 관계에서 기술된 바와 같이 주압축대의 응력-변형도 관계인 식(1)은 반복하중에 의한 변형도 증가량을 고려하여 다음의 식(14)와 같이 변형되어 고려될 수 있다. 이때 고려되는 계수 α 가 반복하중에 의한 강성의 감소를 고려하는 스칼라 손상계수가 된다.

$$\sigma_d = \alpha \sigma_{ck}' \left[2 \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_o} \right) - \beta \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \quad (14)$$

여기서, σ_{ck}' 는 실린더 공시체의 압축강도이고, ϵ_o 는 실린더 공시체의 최대하중(σ_{ck}')에서의 변형도, β 는 변형도비(ϵ_d/ϵ_o)의 함수인 2축응력 보정 계수이고, σ_p , ϵ_p 는 각각 최대평균압축응력, 최대평균변형도이다. 그리고 α 는 반복하중에 의한 변형도 증가의 함수로 표현되는 스칼라 손상계수이다.

5. 해석절차

앞서 기술된 모델을 통하여 철근 콘크리트 보의 반복하중의 작용에 의한 손상을 표현하기 위하여 철근 콘크리트 보를 다음의 Fig. 5와 같이 여러개의 층으로 분할한다. 각 콘크리트 층은 폭(b), 깊이(d), 전단철근량(ρ_t), 그리고 보의 상단으로부터 콘크리트 각 층의 중심 위치(y_d)에 의해 규정되어 진다. 주인장철근은 주철근의 단면적(A_s), 항복강도(σ_w), 그리고 보 상단으로부터의 위치(y_s)에 의해 정의된다. 콘크리트와 전단철근의 물성은 처음 전체 층에

동일하게 적용되며 콘크리트의 압축강도(σ_{ck}'), 콘크리트 최대응력에서의 변형도(ϵ_o), 전단철근의 항

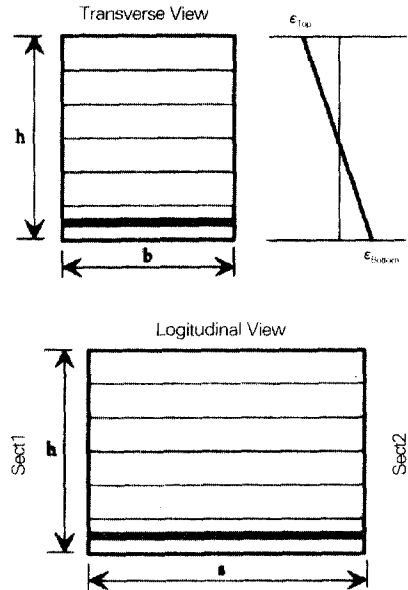


Fig. 5 Layers of RC beam for analysis

복강도(σ_w), 그리고 철근의 탄성계수(E_s)에 의해 정의된다.

각 층은 변형후에도 평면을 유지하고 층별 평형조건을 만족하도록 각기 개별적으로 정의 된다.

각 콘크리트층의 응력 수준은 앞서 기술된 방법에 의해 결정되고, 작용반복하중에 의한 변형도 증가와 새로운 응력-변형도 관계를 고려하여 반복계산하는 방법에 의해 해석이 수행된다. 해석 절차를 요약하면 다음의 Fig. 6과 같다. 해석은 대상 보의 최대 전단을 받는 단면을 기준으로 각 층의 종방향 변형도로 부터 각 분할 층의 평균응력과 평균 변형도를 계산하고 주어진 전단응력분포와 각 층의 평형조건을 수렴조건으로 하여 이를 만족하도록 반복계산하게 작성되었다. 그리고 수렴된 각 층의 평균응력은 반복하중에 의한 손상을 결정하고, 이는 다시 콘크리트 층에서의 압축 주응력 응력-변형도 관계를 재설정하여 다시 단면내의 응력분포를 결정하도록 작성되었다.

6. 해석결과

본 절에서는 반복하중을 받는 철근콘크리트 보의 해석결과를 실험 결과^[16, 17]와 비교한다. 반복하중은 같은 최대하중과 최소하중의 범위에서 재하되는데 이러한 반복하중에 의한 손상에 의해 철근콘크리트 보의 처짐 및 변형도가 증가하게 된다.

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

다음의 Fig. 7, 8은 반복하중의 재하횟수에 따른 최대하중에서의 처짐과 곡률의 변화를 보여주는 것이다. Fig. 7, 9에서 보는 바와 같이 처음 재하시의 처짐량의 약 14% 정도가 더 106번째 재하에서 증가하여 발생하는 것을 알 수 있다. 하중범위가 증가함에 따라 처짐 및 곡률의 증가는 더욱 커진다. 곡률의 경우 약 15% 정도가 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 전단철근량에 따른 피로손상효과를 분석하기 위해 수행한 전단계의 연구의 실험결과와 비교하였다. 다음의 Fig. 9, 10, 11, 12에서 보는 바와 같이 해석결과와 실험결과와 같은 경향을 보였고, 하중재하횟수가 증가할수록 실험결과에 상당히 근접하는 결과를 보였다.

그리고 전단철근의 변형도 변화에 대한 비교도 수행되었는데, 전단철근의 경우 균열경로의 영향으로 인하여 처짐이나 곡률변화에 비해 상대적으로 큰 분산성을 보이거나 곡률이나 처짐보다 반복재하에 따른 영향이 매우 크게 나타났다.

다음의 Fig. 13, 14, 15, 16은 각각 하중 반복횟수에 따른 콘크리트 최대 압축변형도의 변화, 콘크리트 최대 주압축대의 변형도 변화, 전단철근의 변형도 변화, 그리고 주인장철근의 변형도 변화를 나타낸 것이다. 경사 주압축대의 변형도는 106번째 재하에서 처음 재하보다 최대 50% 까지 변형도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 반복하중에 의한 손상이 심각할

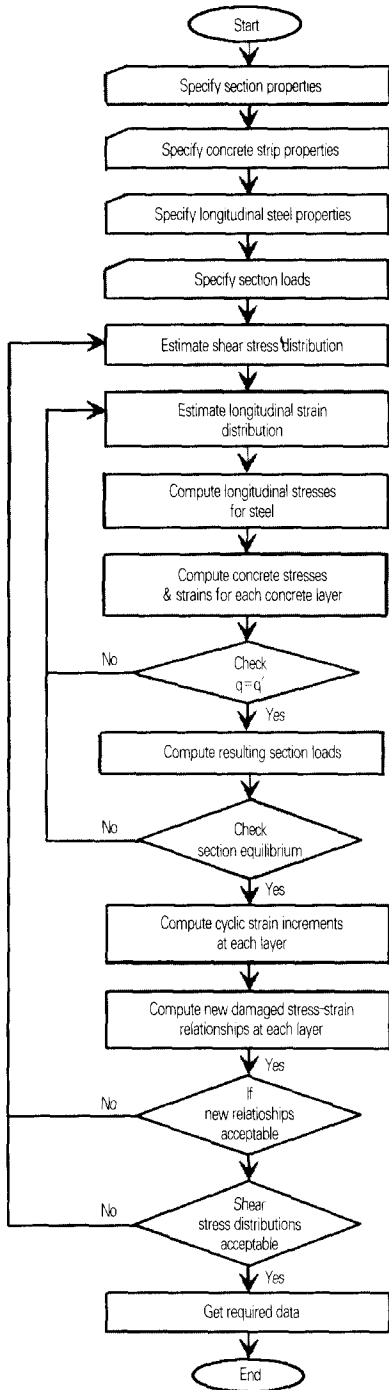


Fig. 6 Analysis procedures of a beam section

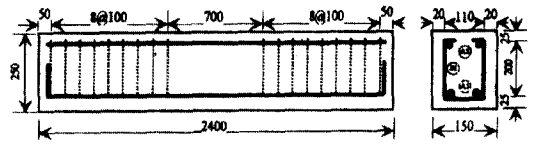
수도 있음을 의미한다.

Fig. 17, 18은 해석결과를 실험결과와 비교한 것으로 실제 실험결과가 더 많은 손상을 나타내는 것을 알 수 있었다.

7. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 보의 반복하중에 의한 손상거동을 분석하기 위하여 하중재하횟수에 따른 처짐 및 변형도의 변화 등에 대한 거동분석을 수행하였으며 이를 해석할 수 있는 이론모델과 해석절차를 제시하였다. 본 연구는 사인장 균열에 의한 보 부재의 균열후 반복하중에 대한 거동변화를 대상으로 하였으며 하중반복에 의한 변형도 증가를 통한 콘크리트의 강성감소로서 반복하중에 의한 손상을 표현하였다. 본 연구에서 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수직압축장이론과 콘크리트 주압축대의 변형도 증가를 통해 철근 콘크리트보의 전단영역 내에서의 반복하중에 의한 손상을 표현함으로써 해석적인 방법으로 반복하중에 따른 거동분석을 합리적으로 수행할 수 있는 방안을 제시하였다.
2. 전단철근이 요구량 만큼 배근된 경우라 할지라도 사인장 균열하중을 초과하는 106번의 하중반복에 의해 처짐의 경우 약 14%, 곡률의 경우 약 15%, 전단철근의 변형은 50% 이상까지도 증가하는 것으로 나타났다. 즉 설계하중보다 작은 하중이 작용한다 할지라도 하중반복 작용으로 인해 전단철근의 항복이 발생할 수도 있음을 나타낸다. 이러한 결과는 전단철근의 전단강도에 기여에 의해 극한전단강도는 상대적으로 커지나 사인장 균열하중은 콘크리트의 전단 강도에 지배되는 것으로 전단철근에 양에 의해 크게 증가되지 않으므로 이러한 경우 사용하중 상태에서 전단균열이 발생하고 이러한 전단균열이 발생된 단면에서 반복하중에 의한 손상은 매우 심화될 가능성이 큰 것으로 사료된다.
3. 사인장균열에 의한 철근콘크리트보의 전단피로 손상은 초기재하시에 형성된 균열의 확대와 콘크리트의 변형도 증가, 강성의 감소 등에 점진적으로 발생하는 것으로 나타나고 있다.



Bar type	Length
(A1) SD40(HB) D22	2.65m
(A2) SD40(HB) D16	2.35m
(S1) SD30 D10	0.59m

Fig. 7 Beam section for analysis

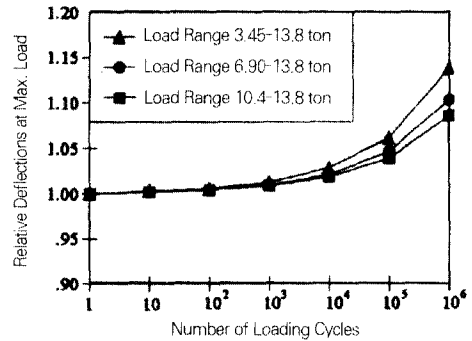


Fig. 8 Analysis result of max, deflections to cycle number

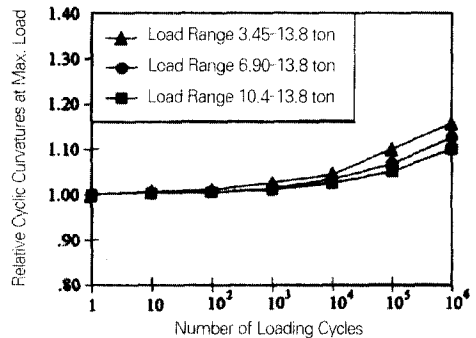


Fig. 9 Analysis result of max, curvatures to cycle number

4. 반복피로하중에 의한 철근콘크리트보의 점진적 손상은 안전성은 물론 공용중의 사용성 평가에 아주 중요하며 본 연구의 이론적 방법이 반복하중하의 처짐 및 변형도 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

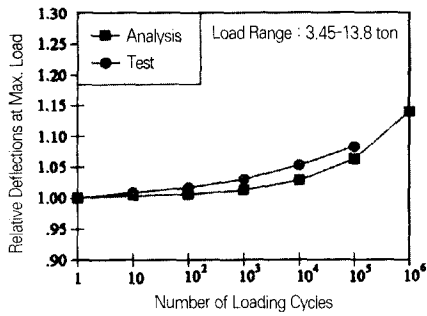


Fig. 10 Comparison of analysis and test results of max. deflections

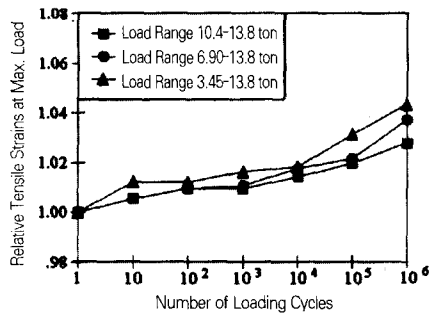


Fig. 14 Analysis result of max. tensile strains to cycle number

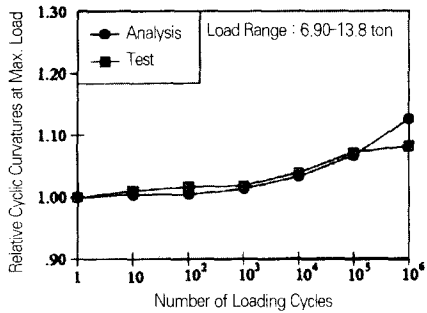


Fig. 11 Comparison of analysis and test results of max. curvatures

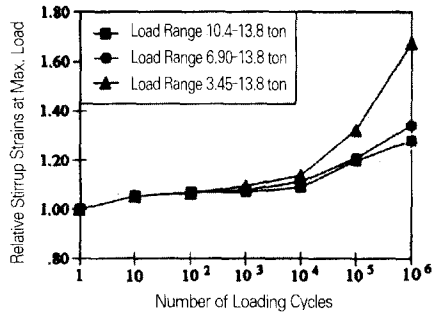


Fig. 15 Analysis result of max. stirrup strains to cycle number

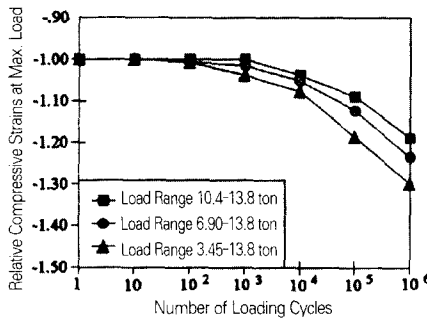


Fig. 12 Analysis result of max. compressive strains to cycle number

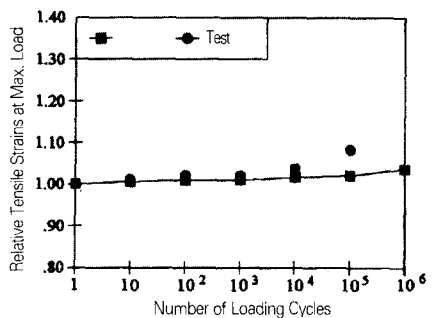


Fig. 16 Comparison of analysis and test results for tensile steel strains

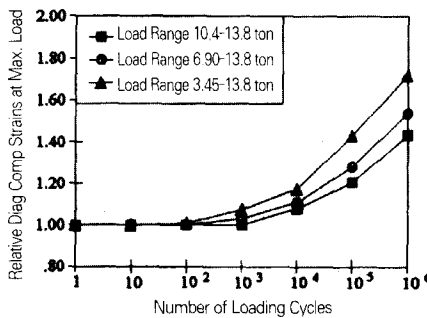


Fig. 13 Analysis result of max. diagonal strains to cycle number

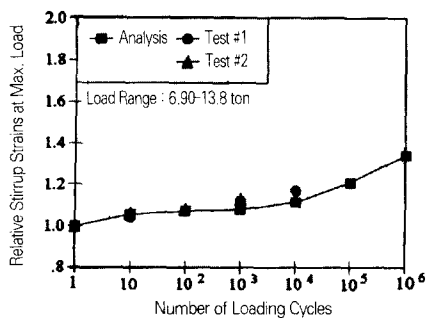


Fig. 17 Comparison of analysis and test results for stirrup steel strains

참고 문헌

1. Hilsdorf, H. K., and Kesler, C. E., "Fatigue Strength of Concrete Under Varying Flexural Stresses," ACI Journal, Proceedings V.63, No.10, Oct. 1966, pp.1059-1076.
2. Wascheidt, H., "On the Fatigue Strength of Embedded Concrete Reinforcing Steel," Doctoral Thesis, Technical University of Aachen, Germany, 1965.
3. Gronqvist, N. O., "Fatigue Strength of Reinforcing Bars," Current Paper No. CP7/71, Building Research Station, Garston, Watford, Mar. 1971, 31 pp.
4. Oh, Byung Hwan, "Fatigue-Life Distributions of Concrete for Various Stress Levels," ACI Material Journal, Vol.88, No.2, Mar-Apr. 1991, pp.122-128.
5. Morsch, E., Concrete-Steel Construction, McGraw-Hill Book Company, New York, 1909, pp. 368. (English translation by E.P. Goodrich of 3rd ed. of Der Eisenbetonbau, 1st ed., 1902.)
6. Bresler, B., and Pister, K. S., "strength of Concrete under Combined Stresses," ACI Journal, Proceedings Vol. 55, No. 9, Sept. 1958, pp.321-345.
7. Nielsen M. P., Brastrup, M. W. and Bach, F., "Rational Analysis of Shear in Reinforced Concrete Beams," Int. Assoc. Bridge Struct. Eng., Proc.P-15/78, May 1978, 16pp.
8. McGregor, J. G., Sozen, M. A., and Siess, C. P., "Strength of Concrete Beams with Web Reinforcement," ACI Journal, Vol. 62, No. 12, Dec. 1965, pp. 1503-1519.
9. Collins, M. P., "Toward a Rational Theory for RC Members in Shear," Journal of Structural Division, ASCE, Vol.104, Apr. 1978, pp.649-666.
10. 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.
11. Schlaich, J., Schafer, K., and Jennewein, M., "Toward a Consistent Design of Reinforced and Prestressed Concrete Structures," PCI Journal, Vol.32, No.3, pp.74-151.
12. Hsu, T T. C., "Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion," ACI Structural Journal, V.85, No.6, Nov.-Dec. 1988, pp.624-634.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Oh, B. H. and Han, S. H., "Shear Damage Behavior of Reinforced Concrete Beams under Repetitive Fatigue Loadings", KCI Journal, Vol. * , No. * , 1998.
17. Lovegrove, J. M. and Salah, E. D., "Deflection and Cracking of Reinforced Concrete under Repeated Loading and Fatigue," ACI SP75-6 Edited by Shah, 1982, pp.133-152.

요 약

반복하중을 받는 무근 및 철근 콘크리트 부재는 하중의 반복작용에 의해 과도한 균열 및 처짐을 유발하고 결과적으로 전체 구조요소의 파괴를 일으킨다. 따라서 하중반복에 의한 누적손상의 진행과정을 정량적으로 평가하여 철근콘크리트 보의 사용성과 안전성을 평가하는 것이 중요하고 특히 취성적 거동 특성을 갖는 전단거동의 경우에 더욱 의미가 있다. 본 연구에서는 반복전단하중에 의한 누적손상의 정량적 분석을 위하여 평균변형도 및 평균응력 개념에 기초한 수정압축장이론(modified compression field theory)에 의하여 누적손상 모델을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 모델을 통하여 반복전단하중에 의한 처짐과 변형도의 변화를 평가하는데 유용하게 이용될 것으로 사료된다.

(접수일자 : 1997. 8. 19)