

주기하중을 받는 세장한 철근콘크리트 보의 길이방향 인장변형

Longitudinal Elongation of Slender Reinforced Concrete Beams Subjected to Cyclic Loading

엄 태 성* 박 홍 근** 강 수 민***
Eom, Tae Sung Park, Hong Gun Kang, Su Min

ABSTRACT

Longitudinal elongation develops in reinforced concrete beams that exhibit flexural yielding during cyclic loading. The longitudinal elongation can decrease the shear strength and deformation capacity of the beams. In the present study, nonlinear truss model analysis was performed to study the elongation mechanism of reinforced concrete beams. The results showed that residual tensile plastic strain of the longitudinal reinforcing bar in the plastic hinge is the primary factor causing the member elongation, and that the shear-force transfer mechanism of diagonal concrete struts has a substantial effect on the magnitude of the elongation. Based on the analysis results, a simplified method for evaluating member elongation was developed. The proposed method was applied to test specimens with various design parameters and loading conditions..

요 약

휨항복 이후 주기하중을 받는 철근콘크리트 부재(보와 전단벽)에서는 길이방향의 인장변형이 누적된다. 이러한 길이방향 인장변형은 철근 콘크리트 부재의 강도 및 변형능력을 저하시킬 수 있다. 본 연구에서는 비선형 트러스 모델해석을 통하여 철근콘크리트 부재에 발생하는 길이방향 인장변형의 메커니즘을 분석하였다. 그 결과, 길이방향 인장변형은 소성힌지의 길이방향 철근에 발생하는 잔류인장소성변형으로 인하여 발생되고, 대각 콘크리트 스트럿의 전단력 전달 메커니즘이 길이방향 인장변형의 크기에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 분석결과를 토대로 주기거동 동안 철근콘크리트 부재에 누적되는 길이방향 인장변형을 평가할 수 있는 간단한 평가식을 제안하고, 다양한 재하이력을 갖는 보 실험결과와 비교되었다.

* 정회원, 대구가톨릭대학교, 건축학과, 전임강사
** 정회원, 서울대학교, 건축학과, 부교수
*** 정회원, (주)대림산업, 기술연구소, 공학박사

1. 서론

지진과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재에서는 비탄성 거동에 의하여 부재의 길이방향 인장변형(longitudinal elongation)이 발생된다(그림 1). 이러한 길이방향 인장변형에 의하여 모멘트 골조의 비탄성 하중(전단력, 휨모멘트)과 소성변형이 크게 증가시킬 수 있고(Paulay 1996), 또한 벽체 및 보 부재의 복부압축파괴(web crushing)를 조기에 일으키거나(Lee and Watanabe 2003) 미끄러짐 파괴(sliding failure)를 발생시킬 우려가 있다.(Brown and Jirsa 1971, Paulay and Priestley 1992)

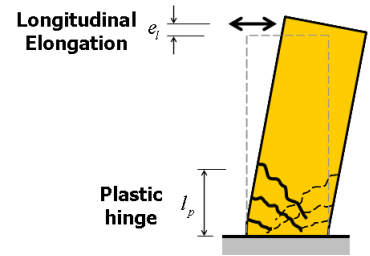


그림 1 길이방향 인장변형

이러한 주기하중을 받는 철근콘크리트 부재와 구조물의 손상을 정확히 파악하기 위해서는 우선, 부재의 길이방향 인장변형을 예측하여야 한다. 본 연구에서는 해석 결과의 분석이 용이한 비선형 트러스 모델(Park and Eom 2007)을 이용하여 주기하중을 받는 철근콘크리트 보에 대한 비선형 해석을 수행하고, 주기거동시 길이방향 인장변형의 메커니즘을 분석하였다. 분석결과를 토대로 전단경간비, 재하이력, 압축력의 크기, 단면배근상세 등에 따라 변하는 길이방향 인장변형의 크기를 구할 수 있는 간략화된 평가식을 개발하였다.

2. 길이방향 인장변형 메커니즘 분석

길이방향 인장변형의 메커니즘을 파악하기 위하여, 주기하중을 받는 철근콘크리트 보에 대하여 비선형트러스모델을 사용하여 비선형해석을 수행하였다. 그림 2(a)와 (b)에 나타난 바와 같이, 비선형트러스모델 해석은 핀칭 및 강성저하로 복잡한 보의 주기곡선 및 길이방향 인장변형 이력을 비교적 정확히 예측하였다. 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 부재 길이방향 인장변형은 보의 최대 횡변형의 증가를 수반하는 초기재하(그림 2(b)의 1st loading)에서는 횡변형의 크기에 비례하여 증가한다. 하지만 동일한 횡변형에서 주기거동이 반복되는 이후의 반복재하(그림 2(b)의 subsequent loadings)에서는 길이방향 인장변형 증가량이 크지 않고 누적된 길이방향 인장변형은 특정값에 수렴되는 양상을 나타낸다. 이러한 길이방향 인장변형의 메커니즘은 다음과 같다.

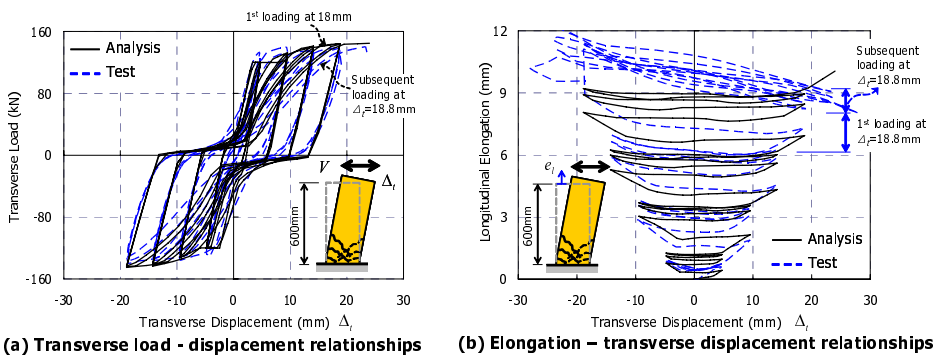


그림 2 철근콘크리트 보의 비선형트러스모델 해석결과

철근콘크리트 부재에서 휨모멘트는 단면에서 압축과 인장의 힘의 평형을 발생시키는데, 인장측에서는 콘크리트가 인장력을 거의 받지 못하므로 큰 소성 인장변형이 발생하고, 반면 압축측에서는 콘크리트와 철근이 협력하여 압축력을 발휘하므로 상대적으로 작은 압축변형이 발생한다. 길이방향 인장변형은 압축측과 인장측 변형의 평균값으로 정의할 수 있으므로, 철근콘크리트 보의 휨작용에서는 기본적으로 길이방향 인장변형이 발생한다. 그러나 그림 2(b)에서 보면, 주기하중이 반복되면서 지속적으로

길이방향 인장변형이 증가한다. 그림 3은 이러한 주기거동 동안 누적되는 길이방향 인장변형의 메커니즘을 보여준다. 전단력 없이 순수 휨을 받는 부재 단면에서는 길이방향 인장변형이 발생한 경우 콘크리트의 도움 없이 휨모멘트에 의한 단면 인장력 및 압축력의 평형을 만족하여야 하므로 단면의 압축 및 인장 철근이 동시에 항복하고, 따라서 제하거동에 의하여 비교적 큰 압축 소성변형이 발생된다.(그림 3(a)의 OA구간) 하지만, 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 휨과 전단을 동시에 받는 쉐어레버모의 경우 대각방향 콘크리트 스트럿의 압축력($F_D \cos \alpha$)에 의하여 전단력이 전달되며, 이때 대각스트럿은 전단력 뿐만 아니라 부재 길이방향 압축력($F_D \cos \alpha$)을 함께 전달한다. 따라서 길이방향 압축력(F_C)의 크기가 인장력(F_T)보다 작으며, 그 결과 제하거동에 의하여 인장철근이 항복하더라도 압축철근은 항복강도에 도달하지 못하고 인장 소성변형이 크게 남는다.(그림 3(a) OB구간) 후속되는 반대방향 제하에서는 미회복된 잔류변형의 영향으로 인하여 길이방향 인장변형이 추가적으로 발생된다.(그림 3(a) BB'구간)

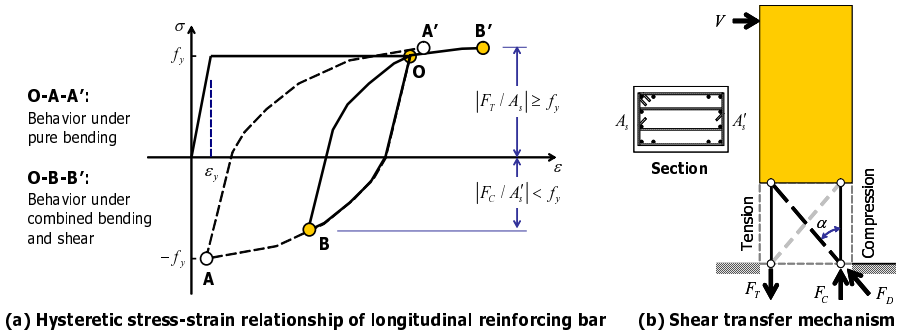


그림 3 철근콘크리트 부재의 길이방향 인장변형 메커니즘

3. 길이방향 인장변형 평가

변형률적합조건과 하중평형조건을 사용하여 철근콘크리트 부재의 길이방향 인장변형을 평가하였다. 자세한 유도과정은 참고문헌(엄태성, 박홍근 2008)에 나타나 있다.

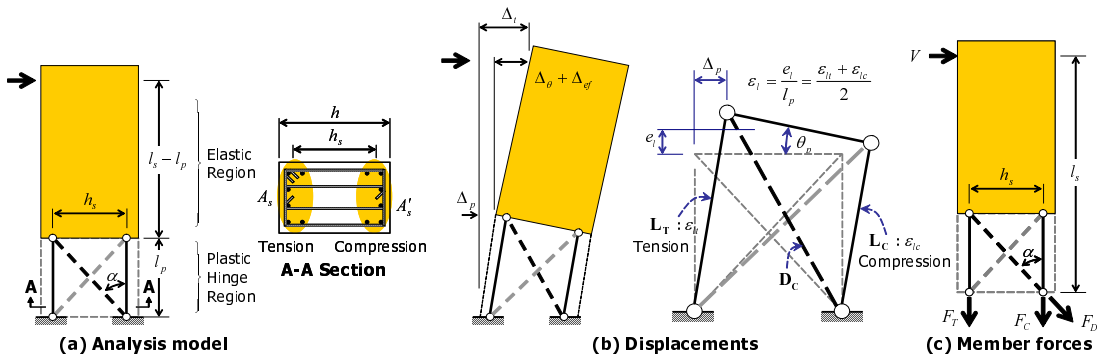


그림 4 길이방향 인장변형 평가를 위한 트러스모델

그림 5(a)에 나타난 바와 같이 단면의 양단부에 동일한 철근이 배치되고($A_s = A_s'$) 동일한 크기의 정·부 방향 휨변형 $\pm \Delta$ 에서 주기거동을 무한히 반복하는 경우에는, 부재의 길이방향 인장변형률이 최종적으로 다음과 같은 ϵ_l 로 수렴된다.

$$A_s = A_s' \text{ and } \sigma_{ic} \geq -f_y \text{ 인 경우, } \epsilon_l = \left[\frac{(\Delta_l - \Delta_{ef})h_s}{l_p l_s} \left(1 + \frac{\eta}{2} \frac{\sigma_{ic}}{f_y} \right) - \left(1 - \frac{l_p}{2l_s} \right) \epsilon_y \right] / \left[1 - \left(1 + \eta \frac{\sigma_{ic}}{f_y} \right) \left(1 - \frac{l_p}{l_s} \right) \right] \quad (1)$$

여기서, $\sigma_{ic} = -\sigma_{tt}(A_s/A_s')(1 - l_p/l_s) \approx -f_y(A_s/A_s')(1 - l_p/l_s) \geq -f_y$ 이다.

그림 5(b)는 비대칭 배근상세($A_{s1} > A_{s2}$, $A_s \neq A'_s$)를 갖는 부재의 부재 인장변형률-횡변형 관계를 보여준다. 단면이 작은 철근이 인장을 받는 경우(부방향 재하, $A_s = A_{s2}$, $A'_s = A_{s1}$) 부재의 길이방향 인장변형률은 다음과 같이 구한다.

$$A_s = A_{s2}, A'_s = A_{s1} \quad (A_{s1} > A_{s2}) \quad \text{and} \quad \sigma_{lc} \geq -f_y \quad \text{인 경우,} \quad \epsilon_l = \frac{(\Delta_l - \Delta_r)h_s}{2l_p l_p} \left[2 + \left(1 + \eta \frac{\sigma_{lc}}{f_y} \right) \left(1 - \frac{l_p}{l_s} \right) \right] - \left(1 - \frac{l_p}{2l_s} \right) \epsilon_y \quad (2)$$

식(1), (2)는 $\sigma_{lc} \geq -f_y$ 인 경우를 가정하여 구한 부재 인장변형률이다. 만약 $\sigma_{lc} < -f_y$ 인 경우에는 주기거동이 반복되더라도 부재 인장변형률이 누적되지 않으므로, ϵ_l 은 다음과 같다.

$$\sigma_{lc} < -f_y \quad \text{인 경우,} \quad \epsilon_l = \frac{(\Delta_l - \Delta_r)h_s}{2l_p l_s} \quad (3)$$

본래 식(1)~(3)은 단일의 최대 횡변형 $\pm\Delta$ 에서 주기거동이 지속적으로 반복되는 부재의 길이방향 인장변형률을 구하는 방법이지만, 그림 5에 나타난 바와 같이 여러 비탄성 횡변형 $\pm\Delta_1, \pm\Delta_2$ 에서 단계적으로 주기거동이 반복되는 경우에도 적용할 수 있다.

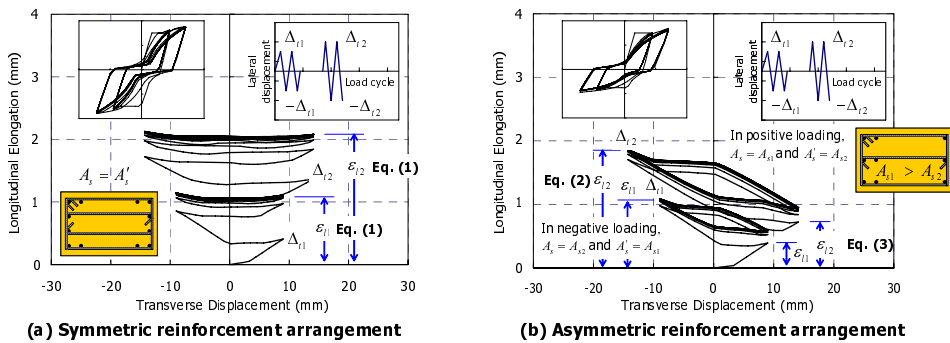


그림 5 길이방향 인장변형률의 평가

4. 결론

본 연구에서는 주기하중을 받는 철근콘크리트 부재에서 발생하는 길이방향 인장변형의 메커니즘을 분석하고, 이를 토대로 길이방향 인장변형률을 예측할 수 있는 간편한 평가방법을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 길이방향 인장변형 평가식은 추후에 지진하중을 받는 철근콘크리트 골조의 정밀한 강도 및 변형능력의 추정에 활용될 수 있고, 또한 개별 부재의 강도 및 변형능력 평가와 소성힌지에서의 균열폭을 예측하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Paulay, T., "Seismic Design of Concrete Structures: The Present Needs of Societies," Proceedings of 11th WCEE, Paper No. 2001, Acapulco, Mexico, 1996.
2. Lee, J. and Watanabe, F., "Shear Deterioration of Reinforced Concrete Beams Subjected to Reversed Cyclic Loading." ACI Structural Journal, Vol.100, No.4, 2003, p.480-489.
3. Park, H. and Eom, T., "Truss Model for Nonlinear Analysis of RC Members Subject to Cyclic Loading", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 138, No. 10, 2007, p.1351-1363
4. 엄대성, 박홍근, "기하중을 받는 세장한 철근콘크리트 보의 길이방향 인장변형", 한국콘크리트학회 논문집, 심사 중