

인장 겹침이음에서 프라이 거동의 영향

Prying Action of Spliced Reinforcements in Tension

천 성 철* 최 동 욱** 하 상 수*** 오 보 환****
Chun, Sung Chul Choi, Dong Uk Ha, Sang Su Oh, Bohwan

ABSTRACT

Splice of reinforcement is inevitable in reinforced concrete structures and, generally, lap splices are used. Lap length for tension splice is determined from development length in tension. The development length is calculated from an experimental model which was based on data of tests on anchorage and splice. Longitudinal reinforcements in flexural members are deformed and, therefore, prying action happens in spliced reinforcements unlike anchored reinforcements. The prying action induces tensile stress in cover concrete and this tensile stress plays the same role to a circumferential tensile stress caused by bond. Because splitting failure is assumed to occur when the summation of tensile stresses caused by the prying action and the bond is equal to the tensile strength of the concrete, the prying action reduces the bond strength of spliced reinforcements. A theoretical model for the prying action is developed and effects of the prying action on the bond strength are assessed. The tensile stress by the prying action is proportional to tensile strength and modulus of elasticity of reinforcements. In addition, the tensile stress is inversely proportional to spacing of reinforcements. Consequently, longer splice length is required for spliced reinforcements with small spacing in flexible members.

요 약

철근공사에서 이음은 필연적으로 발생되며, 일반적으로 겹침이음을 통해 이음강도를 확보한다. 인장이음길이는 인장 정착길이를 기준으로 산정되며, 정착길이는 실험적으로 도출된 부착강도 모델을 기반으로 결정된다. 인장이음은 휨을 받는 경우에 발생되므로 부재의 휨변형이 반드시 발생된다. 휨변형에 의해 프라이(Prying) 거동이 발생되어, 철근이 피복콘크리트를 밀어내는 힘이 발생된다. 이러한 힘은 부착응력에 의해 발생하는 인장응력과 동일한 역할을 한다. 프라이 거동에 의해 발생된 인장응력과 부착응력에 의해 발생된 인장응력의 합이 콘크리트 인장강도에 도달하면 이음부가 파괴되므로, 프라이 거동의 존재는 부착강도를 저하시키게 된다. 역학적 모델을 구성하여 휨부재의 인장이음에서 프라이 거동이 이음강도에 미치는 영향을 분석하였다. 프라이 거동에 의한 인장응력은 보강근의 인장강도와 탄성계수에 비례하며, 휨부재의 휨강성에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 이음되는 보강근의 간격에 반비례하여 인장응력이 유발된다. 따라서 슬래브와 같이 휨강성이 작은 부재에 촘촘하게 이음된 경우에는 현행 설계기준보다 긴 이음길이를 확보할 필요가 있다.

*정회원, (주)대우건설 기술연구원 책임연구원

**정회원, 한경대학교 건축학부 교수

**정회원, 한경대학교 건축학부 학술연구교수

***정회원, (주)대우건설 기술연구원 수석연구원

1. 서론

철근공사에서 이음은 필연적으로 발생되며, 일반적으로 겹침이음을 통해 이음강도를 확보한다. 인장 이음길이는 인장 정착길이를 기준으로 산정되며, 정착길이는 실험적으로 도출된 부착강도 모델을 기반으로 결정된다. 인장이음은 휨을 받는 경우에 필요하므로 부재의 휨변형이 반드시 발생된다. 이때 휨 변형에 의해 프라이(Prying) 거동이 발생되어, 철근이 피복콘크리트를 밀어내는 힘이 발생된다. 이러한 힘은 부착에 의해 발생하는 인장응력과 동일한 역할을 한다. 프라이 거동에 의해 발생한 인장응력과 부착응력에 의해 발생한 인장응력의 합이 콘크리트 인장강도에 도달하면 이음부가 파괴되므로, 프라이 거동의 존재는 부착강도를 저하시키게 된다. 본 연구에서는 프라이 거동에 대한 역학적 모델을 구성하여 휨부재의 인장이음에서 프라이 거동이 이음강도에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 부착실험방법 고찰

이음길이 산정의 기본이 되는 부착강도를 평가하는 일반적인 실험방법은 Fig. 1과 같이 4가지로 분류된다.¹ Fig. 1(a)의 인발실험(Pullout test)은 가장 쉬운 방법이지만, 실제 구조물의 거동과 상이하게 인장을 받는 인장재 주변 콘크리트에 압축력이 작용된다. 더욱이 그 압축력은 인장재와 콘크리트의 상대 변위로 인해 발생된 것이 아니라 지점부 반력에 의해 형성된 것으로 실제 구조물에서의 부착거동과 매우 상이하다. 다만 예폭시 도막철근과 FRP바와 같이 인장재의 표면 물성이나 표면 강도가 중요한 경우에는 부착강도 평가에 유효한 방법이다. Fig. 1(b)의 보 단부실험은 실제 거동을 가장 손쉽게 묘사할 수 있는 방법으로 많은 연구에 사용되었다. 보 정착과 보 이음실험은 실험체가 크고 제작과 실험 비용이 많이 들지만, 실제 거동을 가장 정확하게 재현할 수 있다. 특히 보 휨에 의해 인장재에 인장력이 가해지기 때문에 인장력에 의한 부착응력 발생 외에도 휨 변형에 따른 프라이 거동에 의한 인장응력도 발생하게 된다. 따라서 보 단부실험은 실제 현상에 비해 높은 부착강도를 제공할 우려가 있다.

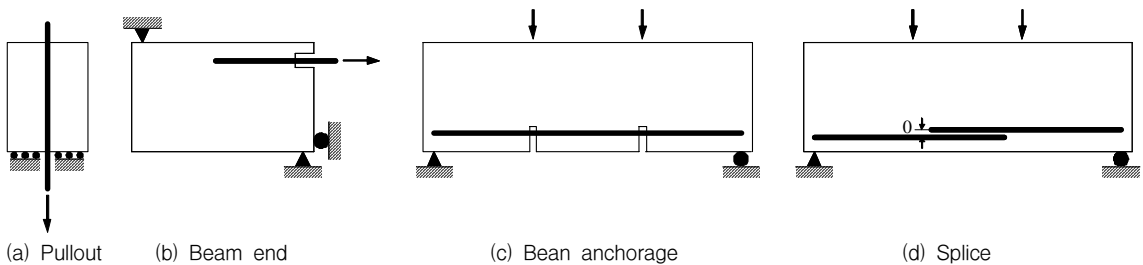


Fig. 1 Schematic of tests for bond behavior

3. 프라이 거동에 의한 부착응력 평가

부재의 휨변형에 의해 인장재가 변형하게 되면, 인장재에 작용되는 인장력이 동일 선상에 존재하지 않기 때문에 인장재에 직각방향의 분력이 발생한다. 또한 인장재 자체의 휨강성(flexural stiffness)에 의해서도 인장재를 원래 직선 상태로 회복하려는 힘이 발생된다. 이 2가지 힘이 피복콘크리트를 탈락시키는 힘으로 작용하여 부착강도를 저하시키게 된다.

3.1 보강근에 작용되는 인장력에 의한 인장응력

순수휨을 받는 부재의 미소구간 dx 를 Fig. 2에 나타내었다. 빗금친 보강근은 하부에 배근되어 있으며 의도적으로 크게 표현하였다. 명료한 표현을 위해 피복콘크리트는 나타내지 않았다. 양단 A와 B에 동일한 인장력 T 가 작용되지만, 일직선 위에 위치하지 않기 때문에 모멘트 평형을 위해 보강근의 표면에서 피복콘크리트를 미는 힘이 작용한다. 이 힘은 A점에서부터 B점에 작용되는 인장력 T 까지의 팔 길이 Δ 을 알면 산정할 수 있다.

순수휨을 받으므로 곡률은 ϕ 로 일정하다. 미소구간 dx 에서 회전각 $d\theta$ 와 보강근 중심에서 보강근의 길이 dl 은 각각 식(1), (2)로 산정된다. 점A로부터 인장력 T 까지의 거리 Δ 은 보강근의 길이와 회전각을 이용하여 식(3)과 같이 구할 수 있다. 보강근 표면에서 피복콘크리트를 밀어내는 힘이 균등하게 분포한다고 가정하면, 그 합력은 dx 구간 중앙에서 V_1 으로 작용한다. 양단에 작용되는 인장력 T 의 편심에 대한 모멘트 평형조건을 이용하여 V_1 을 식(4)와 같이 구할 수 있다.

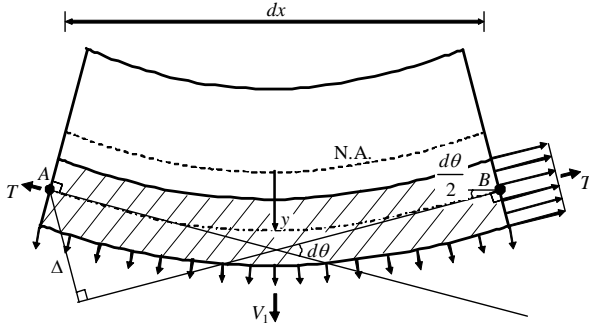


Fig. 2 Free-body diagram for infinitesimal element of flexural member under pure bending

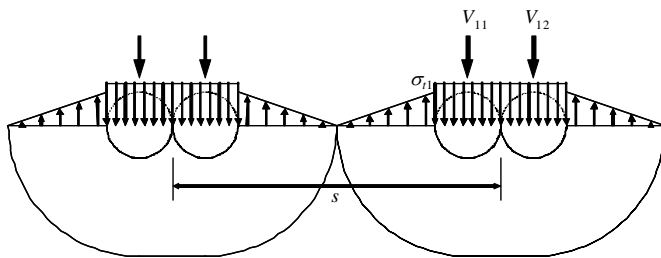


Fig. 3 Stresses in cover concrete

산정된 V_1 으로부터 피복콘크리트를 밀어내는 힘이 보강근에서 등분포로 작용한다면 피복콘크리트에 작용되는 인장응력은 Fig. 3과 같다. 보강근 표면에 작용하는 V_1 과 힘의 평형을 이루기 위해, 보강근 사이의 콘크리트에 인장응력이 발생된다. 부착응력에 의해 발생하는 인장응력과 유사하게, 인장응력의 분포를 삼각형으로 가정할 수 있다. 이음되는 보강근의 중심간 간격을 s 라고 하고, 이음되는 2분의 인장력의 합이 T 이므로 $V_1 = V_{11} + V_{12}$ 가 된다. 이음되는 보강근 사이의 콘크리트에 작용되는 인장응력 σ_{t1} 은 식(5)와 같다. 콘크리트에 작용되는 인장응력은 보강근의 설계강도(T)에 비례하고 곡률에 비례(실제로는 부착의 휨강성에 반비례)한다. 또한 보강근의 순간격이 줄어들수록 높은 인장응력이 발생된다.

3.2 보강근 휨강성에 의한 인장응력

보강근 자체의 휨강성($E_s I_s$)에 의해서도 피복콘크리트를 밀어내는 힘이 발생된다. Fig. 4(a)와 같이 이음된 보강근에서 점A에는 힘이 0이며, 점B에서는 설계인장력이 작용되므로 주변 콘크리트와 완전 일체 거동을 하게 된다. 보강근에 작용되는 모멘트를 분리해서 살펴보면 Fig. 4(b)처럼 B점에서 최대 모멘트($\phi E_s I_s$)가 작용되는 분포로 가정할 수 있다. 이러한 모멘트 분포는 이음길이 전 구간(l_s)에서 등분포 하중이 작용하는 것으로 모사할 수 있으며, 그 합력 V_2 가 이음길이 중앙에 작용하는 것으로 치환할 수 있다. V_2 는 모멘트 평형조건에 의해 식(6)과 같이 산정된다.

Fig. 3 및 식(5)와 같은 방법으로 V_2 를 등분포 응력으로 치환하면 식(7)과 같이 표현할 수 있다. 보강근에 작용되는 인장력에 의한 인장응력(σ_{t1})과 보강근 휨강성에 의한 인장응력(σ_{t2})을 합하면 프라이 거동에 의해 피복콘크리트를 밀어내는 인장응력(σ)을 식(8)과 같이 구할 수 있다.

3.3 프라이 거동이 부착강도에 미치는 영향

부착파괴는 부착에 의해 발생하는 콘크리트의 인장응력이 콘크리트 인장강도에 도달하면 발생된다. 프라이 거동에 의해 발생하는 콘크리트의 인장강도를 산정하였으므로, 이 응력과 콘크리트 인장강도의 비율을 산정하면 프라이 거동이 부착강도에 미치는 영향을 알 수 있다. 콘크리트 인장강도는 배합조건 및 구성재료의 특성에 따라 분산이 매우 큰 것으로 알려져 있으며, $\sqrt{f_{ck}}/2$ 로 계산할 수 있다.²

$$d\theta = \phi dx \quad (1)$$

$$dl = dx(1 + \phi y) \quad (2)$$

$$\Delta = dx(1 + \phi y) \frac{d\theta}{2} \quad (3)$$

$$T\Delta = V_1 \frac{dx(1 + \phi y)}{2} \quad (4)$$

$$\rightarrow V_1 = \frac{2T\Delta}{dx(1 + \phi y)} = T\phi dx$$

$$\sigma_{t1} = \frac{V_1}{\frac{s - 2d_b}{2} dx(1 + \phi y)} \quad (5)$$

$$= \frac{2T\phi dx}{(s - 2d_b) dx(1 + \phi y)}$$

$$= \frac{2\phi}{(s - 2d_b)(1 + \phi y)} T$$

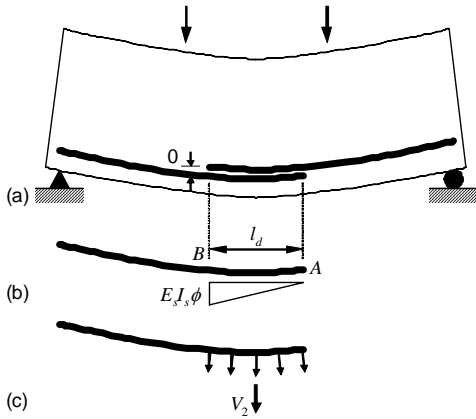


Fig. 3 Prying force developed by flexural stiffness of reinforcement

$$V_2 = \frac{M}{l_s/2} = \frac{2\phi E_s I_s}{l_s} \quad (6)$$

$$\sigma_{t2} = \frac{V_1}{\frac{1}{2} \frac{s-2d_b}{2} l_s (1+\phi y)} = \frac{8\phi E_s I_s}{(s-2d_b)(l_s)^2(1+\phi y)} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \sigma_{t1} + \sigma_{t2} \\ &= \frac{2\phi T}{(s-2d_b)(1+\phi y)} + \frac{8\phi E_s I_s}{(s-2d_b)(l_s)^2(1+\phi y)} \\ &= \frac{2\phi}{(s-2d_b)(1+\phi y)} \left(T + \frac{4E_s I_s}{(l_s)^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

4. 사례 연구

Fig. 4는 건물에 많이 사용되는 보의 치수, 배근상세 그리고 재료물성을 보여주고 있다. Case 1에서, 보강근에 작용되는 인장력에 의한 인장응력이 0.259MPa이며, 보강근 휨강성에 의한 인장응력이 0.009MPa로 나타났다. 보강근 휨강성에 의한 인장응력이 매우 작으나, 이음길이 제곱에 반비례하므로 이음길이가 짧은 경우에는 커지게 된다. 콘크리트 설계강도가 27MPa이므로 $f_t=2.598\text{MPa}$

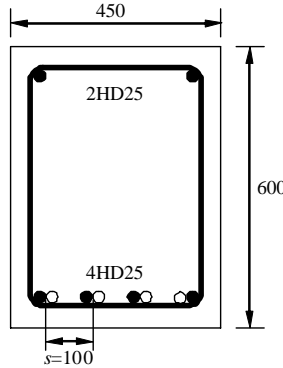


Fig. 4 Case studies

Case 1

$f_{ck}=27\text{MPa}$
 $f_y=400\text{MPa}$
 $l_s=1,510\text{mm}$ (Class B)
 $E_s=200,000\text{MPa}$
 $I_s=\pi d_b^4/64=19,175\text{mm}^2$
 $a=(A_s f_y)/(0.85 f_{ck} B)=78.5\text{mm}$
 $x=a/\beta_1=92.4\text{mm}$
 $\phi=\epsilon_{cu}/x=3.25 \times 10^{-5}\text{mm}^{-1}$
 $\sigma_{t1}=0.259\text{MPa}$
 $\sigma_{t2}=0.009\text{MPa}$
 $\sigma_t=0.268\text{MPa}$

Case 2

$f_{ck}=40\text{MPa}$
 $l_s=1,209\text{mm}$ (Class B)
 $a=(A_s f_y)/(0.85 f_{ck} B)=53.0\text{mm}$
 $x=a/\beta_1=69.3\text{mm}$
 $\phi=\epsilon_{cu}/x=4.33 \times 10^{-5}\text{mm}^{-1}$
 $\sigma_{t1}=0.343\text{MPa}$
 $\sigma_{t2}=0.018\text{MPa}$
 $\sigma_t=0.361\text{MPa}$

가 되어 프라이 거동에 의한 인장응력이 인장강도의 10.3%를 차지함을 알 수 있다. 콘크리트설계강도를 40MPa로 상향한 Case 2 경우에는 프라이 거동에 의한 인장응력이 0.361MPa로 콘크리트 인장강도 3.162MPa의 11.4%를 차지하게 된다. 콘크리트 강도가 높아질수록 인장강도의 증분은 작아지는 반면 프라이 거동에 의한 인장응력은 커지기 때문에 부착강도에 미치는 영향은 더욱 높아지게 된다.

5. 결론

휨변형에 의해 발생하는 프라이 거동은 보강근의 이음에서 부착에 의한 인장응력 발생 외에 추가적인 인장응력을 유발하게 된다. 사례연구결과 프라이 거동에 의해 발생하는 인장응력은 콘크리트 인장강도의 10%를 차지하는 것으로 나타났으며, 콘크리트강도가 높아질수록 그 효과는 더욱 커지는 것으로 조사되었다. 기준의 정착 및 이음길이를 결정하는 식에는 부재의 휨변형이 고려된 실험 외에도 보 단부 실험이 포함되어 있으며, 향후 고강도 콘크리트의 사용이 빈번해 짐을 고려할 때 프라이 거동을 고려한 보다 정밀한 설계식이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 07첨단도시개발사업(과제번호:07도시재생 B03)의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 440, "Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (ACI 440R-03)," ACI, 2003, 49 pp.
2. Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 4th edition, MacGregor J. G. and Wight J. K. 2007, 1132 pp.