

외적 비부착강선을 가진 프리스트레스트 콘크리트 보의 극한휨거동 해석

Study on the Ultimate Flexural Behavior Analysis of Prestressed Concrete Beam with External Unbonded Tendons

오 병 환* 유 성 원** 신 정 성***
Oh, Byung Hwan Yoo, Sung Won Shin, Jung Sung

ABSTRACT

Recently, the using of PSC with external unbonded tendons is increased. However, the behavior of external unbonded tendons is different with that of bonded internal tendon at ultimate state by compatibility condition, the slip with friction at deviator and the change of tendon eccentricity e.t.c.. So, the analytical research considered the effect of these inherent characters was performed and the tendency of external unbonded tendons was estimated by numerical examples.

By the analytical results, load-deflection relationship and stress increment of external unbonded tendons were similar to those of internal bonded tendon at initial elastic behavior state. Those characters were, however, smaller than those character of internal bonded tendons.

For external unbonded tendons, if the 1 deviator which is positioned at maximum moment point and more 2 deviators which are position between maximum moment point and support are existed, the flexural behavior is similar to internal bonded tendons.

1. 서론

내적 부착 강선을 가지는 프리스트레스트 콘크리트의 경우, 부재 내부에 강선을 배치하여 설계·시공하는데 이로 인해 부재의 단면높이 및 두께 증가 현상과 시공상의 어려움을 초래하는데 반해 외적 비부착 강선을 가지는 프리스트레스트 콘크리트의 경우, 상대적으로 시공이 간편하고 유지관리가 손쉬운 장점이 있기 때문에 최근들어 장대교량의 신설, 기존 교량의 보강공사 등에 외적 비부착 강선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트의 이용이 빈번해지고 있으나, 내적 부착강선과 외적 비부착 강선의 구조적 극한거동의 차이(1,2) 즉, 하중증가에 따른 강선의 응력증가량, 편심량 감소현상 및 Deviator에서의 마찰에 의한 슬립(Slip) 등에 대한 규명과 해석기법은 아직까지는 크게 발전되지 않고 있다.

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사수료

*** 서울대학교 토목공학과 석사과정

2. 외적 비부착 강선의 극한거동 및 해석

2.1 외적 비부착 강선의 응력증가량($\Delta\sigma_{ps}$)

내적 부착 강선은 콘크리트와 전단면에서 일체적으로 거동하므로 전지간, 전단면에서 강선과 콘크리트의 변형도 적합조건이 일치하므로 강선의 변형도를 손쉽게 계산하여 외력 등에 의한 강선의 응력증가량을 구할 수 있다.

반면에, 외적 비부착 강선은 정착부와 Deviator에서만 콘크리트와의 변형도 적합조건이 일치하므로 강선의 응력증가량($\Delta\sigma_{ps}$)는 각 단면에서 독립적으로 계산되기 보다는 구조물 전체의 거동을 해석한 후 적합조건이 적용되는 위치에서의 변형도값으로 구하여야 한다.

본 연구에서는 다음과 같은 과정으로 외적 비부착 강선의 응력증가량을 계산하였다.

- ① 임의의 활하중에 대해 강선의 강성을 제외시킨 뼈대요소를 해석한다.
- ② 이때, 강선의 평균변형도 $\Delta\varepsilon_1$ 은 각 강재요소의 합으로써 $\Delta\varepsilon_1 = \frac{\sum \Delta L}{\sum L}$ 이며, 이에 대응하는 응력증가량 $\Delta\sigma_{ps1} = E_s \Delta\varepsilon_1$ 이다.
- ③ $-\Delta P_1 = -\Delta\sigma_{ps1} A_s$ 의 압축력을 강재위치에 작용시켜 뼈대요소를 해석하여 $\Delta\varepsilon_2$ 를 얻는다.
- ④ 다시 $-\Delta P_2 = -\Delta\sigma_{ps2} A_s$ 의 압축력을 강재위치에 작용시켜 뼈대 해석후 $\Delta\varepsilon_3$ 를 얻는다.
- ⑤ $\Delta\varepsilon_n \leq$ 수렴값 까지 해석하여 $\Delta\sigma_{ps}$ 를 계산한다.

$$\Delta\sigma_{ps} = \Delta\sigma_{ps1} - \Delta\sigma_{ps2} + \Delta\sigma_{ps3} - \dots \dots \dots \quad (1)$$

2.2 편심량 변화에 따른 2차 효과

외적 비부착 강선을 가지는 부재는 외부하중에 의한 처짐이 발생하는 경우, 정착부와 Deviator에서만 강선의 변위와 부재의 변위가 일치하며, 부재와 일치되지 않는 강선의 나머지 부위는 직선으로 존재하기 때문에 결과적으로 변위가 발생할수록 편심량이 변화하여 편심량 변화로 인한 2차 효과가 발생하는데 이러한 현상은 그림. 1에 나타내었다.

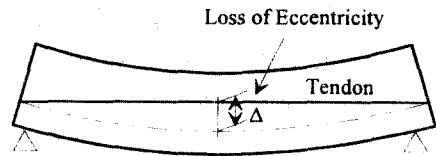


그림. 1 편심량 변화현상

그림. 1에서 알 수 있듯이 외적 비부착 강선을 가진 부재의 해석에서는 외적하중 및 콘크리트 재료 특성에 의한 비역학적 변형도 등에 의한 강선의 편심량 변화효과는 하중효과가 클수록 크게 발생하는 것을 쉽게 예상할 수 있으며, 이는 외적 비부착 강선을 가지는 부재의 큰 특징이다.

따라서 본 연구에서는 편심량 변화효과를 고려하기 위해서 하중효과 증가에 따른 구조물 전체의 변위를 계산한 후 강선의 편심량 변화량을 재계산하여 변화된 강선의 편심량에 의한 구조물 내적 저항력을 계산하여 PS강선의 효과를 고려하였다.

2.3 Deviator에서의 마찰과 슬립현상의 고려

Deviator는 외적 비부착 강선의 방향전환 역할을 수행하며 낮은 하중효과에서는 고정단처럼 거동하

나, Virlogeux, Rao 등에 의하면 하중효과가 증가하여 마찰력을 초과하면 Deviator에서 슬립현상이 발생하여 강선의 이동 및 프리스트레스 효과가 급격히 감소하는 현상을 유발하는 것으로 연구되어지고 있다.(2,3) Virlogeux 등의 초기 연구자들은 Cawley식을 이용하여 강선의 길이를 따라 콘크리트와 접하는 마찰손실을 계산하였으나(4), 계산이 복잡하고 정확도가 결여되어 본 연구에서는 Rao(3)등이 제안한 방법을 일부 수정하여 슬립현상에 따른 마찰력변화를 감안하여 슬립현상을 고려하였다.

본 연구에서 이용한 슬립효과와 계산개념은 다음 그림. 2과 같다.

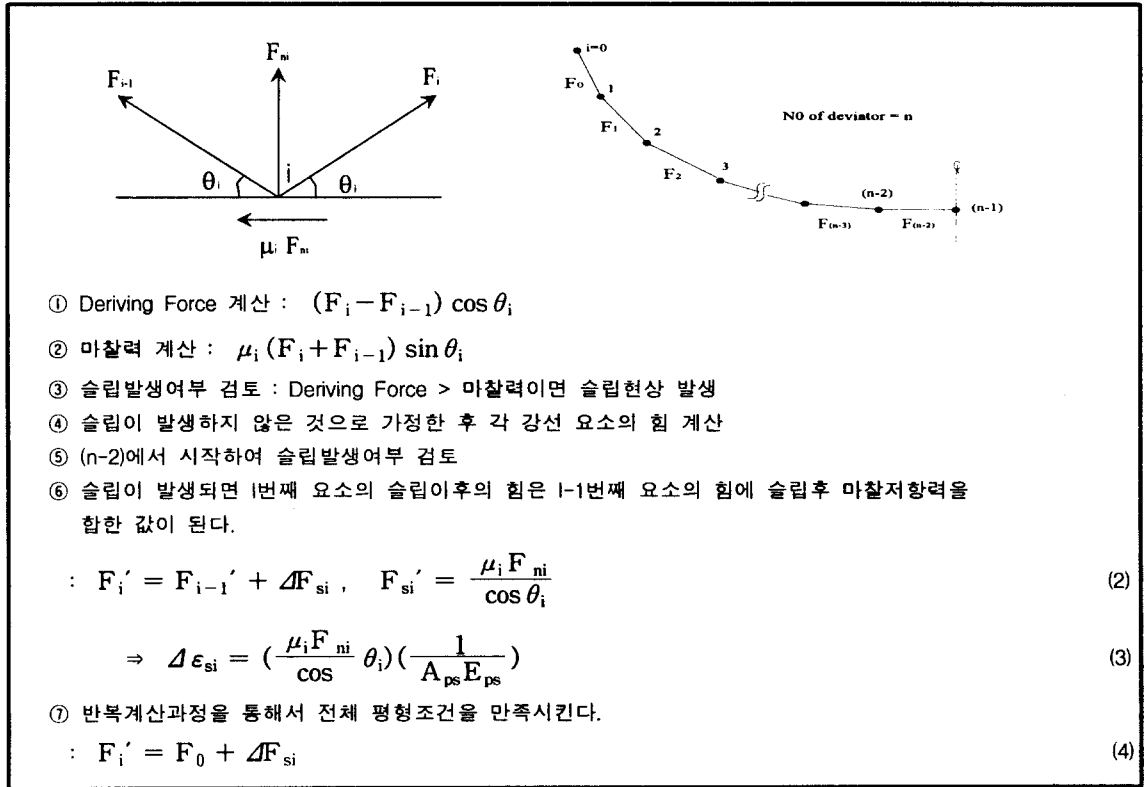


그림. 2 Deviator에서의 마찰력과 슬립현상의 계산 개념

3. 유한요소 정식화

3.1 철근콘크리트 뼈대의 정식화

철근콘크리트 뼈대의 정식화는 뼈대요소(frame element)를 사용하였으며 이때 각 요소는 그림. 3(a)와 같이 여러개의 콘크리트 층과 철근 층으로 구성된 것으로 고려하였다. 철근콘크리트 뼈대요소는 그림. 3(b)에서처럼 각 절점당 x축, y축의 축방향 변위와 회전각 등 3개의 자유도를 가지는 것으로 정하였다. 절점변위의 모든 성분은 \vec{u} , \vec{v} 및 $\vec{\theta}$ 로 나타내었다.

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}, \quad \vec{\theta} = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}, \quad \vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서, u_3 : 요소강성행렬 형성시 응축하므로 전체구조물의 평형방정식에는 미포함

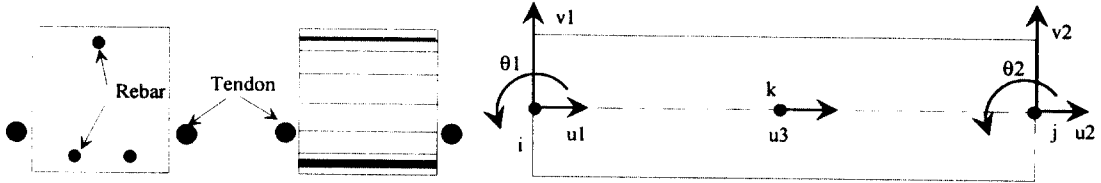


그림.3 철근콘크리트 뼈대요소의 기하형상

접선평형방정식은 식 (6), (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$d\vec{R} = \vec{K}_t d\vec{r} \quad (6) \quad \vec{K}_t = \vec{K}_e + \vec{K}_g \quad (7)$$

여기서, \vec{R} : 외력벡터, \vec{K}_t : 접선강성행렬, \vec{K}_e : 탄성강성행렬, \vec{K}_g : 기하강성행렬

변형도-변위 관계행렬 (\vec{B})은 식(8)과 같이 축력에 관계되는 부분과 휨에 관계되는 부분으로 나누어 나타낼 수 있으며 탄성강성행렬 \vec{K}_e 역시 식(9)와 같이 나타내어 계산되어질 수 있다.

$$\vec{B} = [\vec{\phi}_{,x}, -y\vec{\phi}_{,xx}] = [\vec{B}_a, -y\vec{B}_b] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \vec{K}_e &= \int_V \vec{B}^T \vec{E}_t \vec{B} dV \\ &= \int_V \begin{bmatrix} \vec{B}_a^T \vec{E}_t \vec{B}_a & -y \vec{B}_a^T \vec{E}_t \vec{B}_b \\ -y \vec{B}_b^T \vec{E}_t \vec{B}_a & y^2 \vec{B}_b^T \vec{E}_t \vec{B}_b \end{bmatrix} dV = \begin{bmatrix} \vec{K}_{aa} & \vec{K}_{ab} \\ \vec{K}_{ba} & \vec{K}_{bb} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)의 부피적분중에서 면적에 관한 적분은 요소길이의 중간점에서 총적분에 의해 계산되며, 길이에 대한 적분은 형상함수의 적분에 의해서 형상함수의 적분에 의해서 계산될 수 있다.

뼈대요소 중앙에서의 기하강도 행렬 \vec{K}_g 도 같은 방법으로 다음 식(10)과 같이 계산할 수 있다.

$$\vec{K}_g = \int_V \vec{C}^T \sigma \vec{C} dV = \int_A \sigma dA \int_0^L \vec{C}^T \vec{C} dx = p \int_0^L \vec{C}^T \vec{C} dx \quad (10)$$

여기서, p 는 뼈대요소의 축방향력이며 \vec{C} 는 비선형 변형도-변위관계 행렬이다.

3.2 PS강선의 정식화

PS강제는 정착부와 Deviator에 해당되는 뼈대요소의 절점에 강체에 의해 연결된 직선트러스 요소를 이용하였으며 그 개념도는 그림. 4와 같으며 PS힘은 등가절점력을 계산 후 철근콘크리트 뼈대에 하중으로 작용시켰으며 PS힘에 의한 하중벡터는 다음 식(11)과 같다.

$$\vec{R}_i = \{P_x, P_y, -P_x e_i\}^T \quad \vec{R}_j = \{-P_x, -P_y, P_x e_j\}^T \quad (11)$$

여기서, \vec{R}_i : i 절점에서의 하중벡터, \vec{R}_j : j 절점에서의 하중벡터

식(11)의 하중벡터에 사용되는 PS힘은 일반적인 부착 강선의 정착부, 크리프, 릴랙세이션 등의 손실을 고려하였으며 Deviator에서의 마찰력에 의한 슬립현상을 고려하였다. 또한 활하중 등에 의한 비부착 강선의 응력증가량 계산과 강선 편심값변화효과 역시 고려하였다.

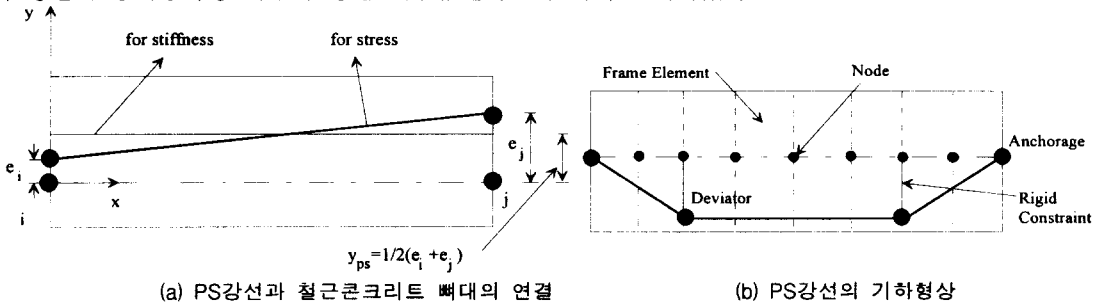


그림. 4 PS강선의 직선트러스 모델

4. 해석예제를 통한 외적 비부착 강선 프리스트레스트 보의 거동 평가

4.1 해석예제

본 연구에서 개발한 해석S/W를 통한 외적 비부착 강선 프리스트레스트 보의 거동을 평가를 위한 해석예제는 그림. 5에 나타내었다. 해석을 수행시 작용하는 하중은 PS힘과 활하중 P만을 작용시켰다.

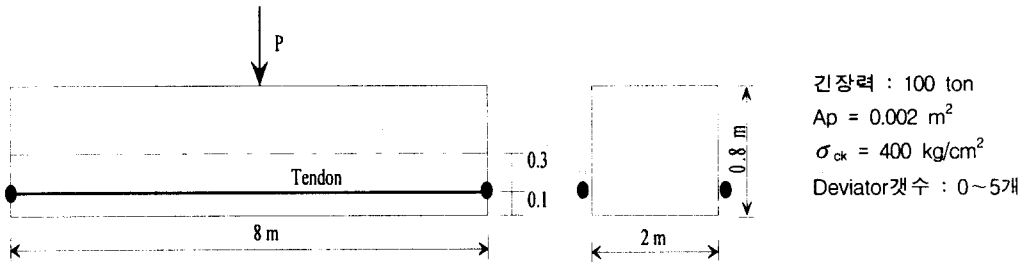


그림. 5 해석예제

4.2 해석결과

외적 비부착 강선과 내적 부착 강선의 거동을 비교 평가하기 위해서 내적 부착 강선의 경우에는 강영진이 개발한 "SPCFRAME"(5)을 이용하여 응력증가량, 중앙처짐 등의 값과 비교하였다.

4.2.1 하중-변위 관계

부착강선의 경우와 비부착강선의 경우에 대한 해석대상 보의 하중-변위(중앙처짐)관계를 그림.6에 나타내었다. 이때, 비부착 강선의 경우는 Deviator갯수를 변화시켜 Deviator갯수의 영향도 고려하였다. 그림. 6에서 알 수 있듯이 비부착강선은 초기 탄성거동구간에서는 부착강선과 거의 유사한 경향을 보이나, 비탄성구간에서는 중앙처짐의 값이 다소 크게 나타났으며 극한하중의 크기는 작게 평가되었다.

한편 비부착 강선의 경우, Deviator가 최대모멘트점에 존재하고 지점과 그 사이에 1개씩 있는 경우 즉, 3개이상의 Deviator를 가지면 부착강선의 거동과 크게 차이를 나타내지 않는 것으로 평가되었다.

4.2.2 강선의 응력증가량($\Delta \sigma_{ps}$)

부착강선의 경우와 비부착강선의 경우에 대한 해석대상 보의 강선의 응력증가량을 그림. 7에 나타내었다. 그림. 7에서 알 수 있듯이 비부착 강선의 경우 초기 탄성거동을 하는 동안은 부착강선과 거의 유사하거나 다소 작게 발생하는 경향을 보이나, 비탄성구간에서는 응력증가량값이 순간적으로 급격히 증가하며 Deviator갯수가 작을수록 비탄성구간이 짧아 순간적으로 파괴에 도달하는 것으로 나타났다. 또한 하중-변위의 관계와 마찬가지로 강선의 응력증가량도 Deviator갯수가 많을수록 부착강선과 유사한 거동을 보는 것으로 나타나고 있다.

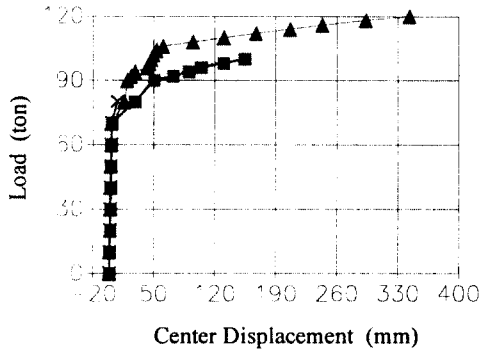


그림. 6 하중-변위 관계

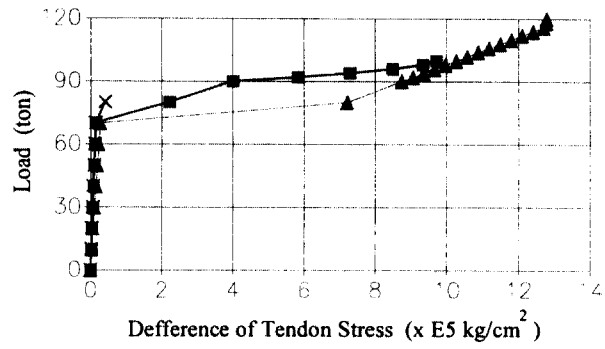


그림. 7 강선의 응력증가량

5. 결론

외적 비부착강선 보의 휨거동해석을 위해서 강선의 응력증가량, Deviator에서의 슬립 및 편심량변화 등을 고려한 해석S/W를 개발하여 예제를 통한 해석수행 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 비부착강선의 경우, 초기 탄성구간에서는 부착강선과 유사한 경향을 보이는 것으로 평가되었다.
- (2) 비부착강선은 비탄성구간에서 부착강선에 비해 극한하중이 작고, 변위는 크게 평가되었으며 응력증가량은 비탄성구간에서 급격히 증가하며 Deviator갯수가 작을수록 비탄성영역이 짧게 나타났다.
- (3) 비부착강선은 Deviator갯수가 많을수록 부착강선과 유사한 거동을 보이며, 특히 Deviator가 보의 최대모멘트점에 존재하고 그 중간지점에 추가될수록 즉, 3개이상의 Deviator를 가지면 부착강선의 거동과 크게 차이를 나타내지는 않는 것으로 평가되었다.

6. 참고문헌

1. G. Ramos, "Flexural Strength of Externally Prestressed Concrete Bridges", ACI, V.93, No.5, 1996.
2. M. P. Virlogeux, "External Prestressing", ACI SP-120, 1991.
3. P. S. Rao, "Behavior of External PS Concrete Beams with Multiple Deviators", ACI, V.93, No.4, 1996.
4. M. P. Virlogeux, "Nonlinear Analysis of External Prestressed Structures", FIP, 1988, pp.318-340.
5. Kang Y. J., "SPCFRAME", UCB/SEMM-89/07, 1989.