

포스트텐션 슬래브의 비선형 수치해석 방법의 개발

Nonlinear Numerical Analysis of Post-tension Slab

김유니* 박홍근***
Kim, You Ni Park Hong Gun

1. 서론

포스트 텐션 공법은 부재의 두께를 증가시키지 않으면서 구조물의 강성과 전단내력을 증가시킬수 있으며 접합부의 성능이 강화되므로, 무량판 슬래브에 포스트 텐션을 적절히 도입시키면 효과적인 시스템을 얻을 수 있다. 그러나 접합부의 성능이 취약하여 갑작스런 전단 파괴가 일어 날 수 있으며 시공상 고려되는 다양한 변수들에 의해 거동의 예측이 쉽지 않으며 실험 데이터의 부족으로 충분한 연구가 되어 있지 않다.

본 연구에서는 포스트 텐션 슬래브의 정확한 해석을 위하여 텐던의 배치, 긴장력의 도입등을 실제 시공과정과 동일한 방법으로 접근한 수치해석 방법을 제안하였다. 긴장력의 도입 방법으로는 텐던의 초기 상대 변위로 입력하였고 슬래브의 해석에 적당한 smeared model을 사용하여 텐던을 모델링 하였다. 비부착 텐던의 효과를 고려하기 위해 콘크리트와 별도로 거동하는 독립된 자유도를 추가하였으며, 비보존적인 프리스트레스의 특성을 그대로 해석 모델에 반영하였다. 또한 가상의 스프링을 도입하여 텐던과 쉬스판 사이의 마찰에 의한 프리스트레스의 손실도 예측하였다. 그리고 기존의 포스트텐션 슬래브와 보 실험 연구와의 비교를 통하여 프로그램의 유효성을 검증하였다.

2. 유한요소의 구성

포스트 텐션시 텐던과 콘크리트 사이의 마찰저항에 의해 발생하는 프리스트레스의 손실과 하중 재하시의 비부착 효과를 고려하기 위해 철근콘크리트 슬래브와 텐던을 분리하였다. 콘크리트 셸은 콘크리트와 철근을 포함하고 있고, 텐던 셸은 비부착 혹은 부착 텐던을 포함하고 있다. 프리스트레스 콘크리트슬래브는 이 두 셸의 조합으로 구성된다.

콘크리트 셸은 9개의 절점을 가진 isoparametric 셸 요소가 사용되었고 각 절점은 $u, v, w, \theta_u,$

θ_v 의 자유도를 가지며 각 절점에서의 방향 벡터의 입력으로 곡면 셸의 해석을 가능하게 하였다.

텐던 셸은 9개의 절점을 가진 isoparametric membrane 요소가 사용되었고 각 절점은 : u^p, v^p, w^p

의 자유도를 갖는다. 비부착 효과를 나타내기 위하여 텐던의 면내 자유도 u^p, v^p 는 콘크리트 셸의 자유도 $u, v, w, \theta_u, \theta_v$ 와 분리하였다. 이중 서로 독립된 자유도만 고려하면 한 개의 절점은 $u, v, w, \theta_u, \theta_v$ 과 u^p, v^p 7개의 자유도를 갖는다. w^p 는 콘크리트의 거동에 영향을 받는 텐던의 자유도 이므로 w, θ_u, θ_v 와 종속되어 있다.

$u, v, w, \theta_u, \theta_v$ 과 u^p, v^p 는 텐던의 양단부 중 정착부에서는 변위가 종속, 긴장부에서는 긴장변위에 의하여 종속되어 있지만 그 이외의 정점에서는 독립적으로 거동을 한다. $u, v, w, \theta_u, \theta_v$ 는 전체 좌표계를 사용하여 나타내며 u^p, v^p 는 요소 좌표계를 사용하여 텐던의 방향에 따르는 값을 갖는다. 각 절점에서의 텐던의 높이와 기울기를 입력하면 다양한 텐던 형상의 표현이 가능하다.

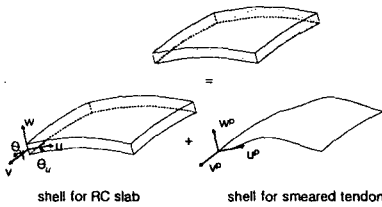


그림 1 콘크리트와 텐던셸

3. 프리스트레스의 도입과 손실

실제 시공과정을 해석과정에 실제와 동일하게 도입하기 위해 긴장부에서 텐던 셸의 자유도에 초기 상대변위 Δ_0 를 입력하는 변위입력 방식으로 텐던에 긴장력을 가하고, 긴장 후에도 이 Δ_0 를 콘크리트와 텐던의 상대 변위로 고정시킨다. 상대 변위의 고정으로 텐던의 변형률은 구조물의 변위의 영향을 받으므로, 추가 하중에 의해 슬래브에 변형이 발생하면 텐던도 함께 변형하여 프리스트레스의 크기가 달라지는 비 보존력을 표현할 수 있다. 긴장부 반대편의 정착부에서는 이 상대변위가 0으로 고정되고 그 외의 절점에서는 텐던과 콘크리트의 자유도가 서로 분리되어 있으므로 미끄러짐이 발생한다. 텐던과 쉬스관의 마찰의 영향도 받는다.

마찰에 의한 텐던과 콘크리트의 영향을 직접적으로 고려하고 추가적인 하중에 대한 비부착작용을 해석에 반영하기 위해서 스프링 모델 (그림 2)을 도입하였다. 각 요소에서 손실되는 프리스트레스는 각 절점에서의 값으로 계산되고 이것은 그대로 스프링에 전이되며 각 절점에서 콘크리트와 텐던의 상대변위로 나누어 스프링의 강성매트릭스를 구할 수 있다.

$$k = \frac{|P_c - P_t|}{|u_c - u_t|} \quad (1)$$

이런 가상의 스프링을 사용하면 별도의 수치 해석 없이 간단하게 마찰의 영향을 해석 과정에 도입할 수 있다.

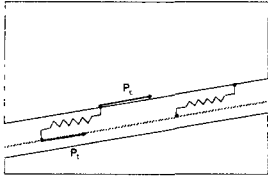


그림 2 스프링 모델

4. 강성행렬

4.1 변위의 구성

전체 셀의 변위를 q , 콘크리트 셀에서 콘크리트의 변위를 q_1 , 텐던셀에서 텐던의 변위를 q_2 라 하면 각각의 변위의 성분은 다음과 같다.

$$q = [u \ v \ w \ \theta_u \ \theta_v \ u^p \ v^p]^T, \quad q_1 = [u \ v \ w \ \theta_u \ \theta_v]^T, \quad q_2 = [u^p \ v^p \ w^p]^T$$

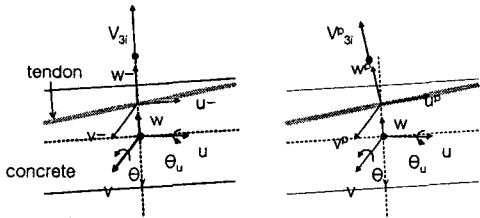


그림 3 정착부, 긴장부에서의 q - q_1 변위관계

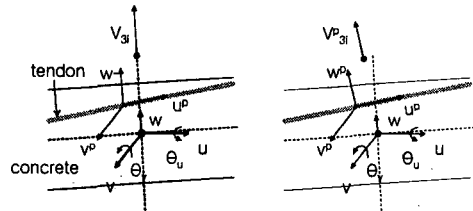


그림 4 정착부와 긴장부를 제외한 q - q_2 변위관계

4.2 변형률의 정의

포스트 텐션 슬래브는 두께가 얇기 때문에 전단에 대한 저항력이 약하여 갑작스런 펀칭파괴가 일어날 수 있는데 이러한 거동을 예측하기 위하여 셀의 두께방향에서도 전단 변형을 고려한 Mindlin theory를 사용하여 탄성변형에서의 변형률을 계산하였다. 그리하여 본 모델에서는 슬래브의 해석에 적합한 셀 요소를 사용하였지만 보의 해석도 가능하다.

4.3 강성행렬의 유도

평형방정식은 가상일법을 사용하여 외력과 내력의 관계로 나타낼 수 있고 이로부터 강성행렬은 다음과 같이 유도된다.

$$K = \int B^T E B dv$$

전체 강성행렬은 콘크리트 와 철근, 텐던, 스프링의 강성행렬의 합으로 나타낼 수 있다.

$$K = K_c + K_s + K_t + K_{sp}$$

한편, 스프링은 각 절점 내부에서 콘크리트와 텐던의 양쪽에 연결되어있고 절점에서 평형을 이루므로 내력의 산정에는 고려하지 않아도 된다.

비선형 해석시 내력과 외력의 차이인 불균형을 허용치 이내로 감소시키기 위한 수치해석 방법으로는 프리스트레스를 가할 때는 하중 제어방식을 사용하였고 그 후 자중을 재하시와 가력 단계에서는 변위 제어 방식을 사용하여 최대하중 이후의 변위를 추적하였다.

5. 재료모델

중력과 횡하중을 받는 압축-인장상태의 콘크리트의 수치 해석을 하기 위해 콘크리트의 거동을 간단하고 정확하게 예측할 수 있는 회전 스트럿-고정 균열 모델(rotating strut-fixed crack model)을 사용하였고 철근의 재료모델로는 Brown and Jirsa(1971)의 모델과 linearized kinematic hardening model을 사용하였다. 텐던은 철근과는 달리 항복점이 분명하지 않으므로 항복변형률의 0.7배까지와 항복후부터 극한변형률까지는 탄성적으로 거동을 한다하고 그 사이 구간은 곡선으로 변형률과 응력의 관계곡선을 정의하였다.

6. 프로그램의 개발

텐던에 프리스트레스를 가한 슬래브의 해석을 위하여 앞서 소개한 해석기능을, 기존의 비선형 유한요소 쉘 전용 프로그램 RCShell 에 추가하였다.

7. 결론

포스트 텐션 슬래브의 해석을 위하여 비선형 유한요소 해석 프로그램에 대한 연구를 수행하였다. 그 특징은 다음과 같다.

1. 평면상 요소 전체에 균일하게 분포되어 있는 철근 및 텐던의 해석에 적합한 smeared model을 사용하였으며 단면상 다양한 텐던의 곡선 형상을 나타낼 수 있다..
2. 마찰의 효과를 직접 spring 으로 modelling 하여 별도의 수치해석 없이 콘크리트와 텐던 사이에 발생하는 손실을 고려 하여 해석 모델에 반영하였다.
3. 포스트 텐션의 효과를 긴장부에서의 변위로 입력하여 실제의 프리스트레스 도입 방법과 동일하게 하였으며, 손실로 인한 프리스트레스의 변화를 줄이기 위한 양방향의 긴장에 대한 해석이 가능하다.
4. 전단변형을 고려한 Mindlin theory를 사용하여 punching shear 도 해석이 가능하다.