

P.C 구조물 정착부의 구조 안전성 해석

한석규, 안세희, 박종철, 김두환

서울산업대학교 구조공학과

1. 서론

Post-Tensioning System은 강선(Strand)을 긴장하여 콘크리트 부재에 미리 압축력을 주어 응력을 도입시키기 위한 텐던(Tendon)과 정착구(Anchorage)의 조합체로서 이루어진다. 여기서 텐던이란 와이어, 스트랜드, 바아등의 긴장재의 하나 혹은 여러개의 묶음을 의미하며, 정착구란 긴장된 텐던에 발생된 힘을 지탱하여 그 힘을 콘크리트에 전달해 주는 기계적 장치를 말하며 콘과 Wedge로 구성된다.

Post-Tensioning System에 있어서 공학적 관심은 긴장시 텐던과 정착구 사이의 거동으로서 제작시 정적 긴장력과 긴장 상태에서 피로하중에 의한 텐던과 Wedge, 그리고 Wedge와 콘 사이에 발생하는 Slip에 대한 적합성 판정이다. Post-Tensioning System에서의 역학적 거동은 Wedge와 콘의 재질, 형상, 투입압력, 강연선의 종류, 구성요소간의 마찰계수, 긴장력, 피로하중 등의 변수가 작용하므로 본 연구에서는 현재 국내에서 사용중인 Wedge와 자체 개발한 Wedge와의 정적하중에 대한 구조해석과 그 역학적 거동을 비교, 검토하여 최적의 모델과 신뢰성을 고찰하였다.

2. 유한요소해석 방법

2.1 유한요소해석을 위한 기하학적 모델링

Wedge의 형상은 도면을 근거로 꼭지점의 좌표를 입력하여, SOLID 모델을 구성하고, 자동 요소분할 기능을 이용하여 요소를 생성시켰다. 이 때 각 부품의 성격과 중요도에 맞추어 위치마다 요소의 조밀도를 각기 달리하여 충분히 정확도를 유지할 수 있게 하였다.

여기에 사용된 요소는 8 절점을 가진 육면체요소 (요소Type : SOLID 45)로 절점당 x , y , z 방향의 병진 자유도를 가진 요소이다. 2 Piece Wedge는 좌우대칭성을 살려, 절반만 모델에 포함하고, 절단면에는 대칭 경계조건을

부여하였다. 3 Piece Wedge는 120도의 반복대칭모델로 가정할 수 있으므로 1/3만 모델에 포함하고, 절단면에는 원주방향으로 대칭 경계조건을 부여하였다. 해석에 사용된 모델별 절점과 요소의 개수는 표 2. 1과 같다.

표 2. 1 비 선형 유한요소 해석시 사용된 절점수와 요소 개수

| 구 분 | 총절점수 | 요 소 개 수 | | | | | 총요소개수 |
|----------------------------|------|---------|-------|-----|------|------|-------|
| | | 강연선 | Wedge | 헤드 | 접촉 | | |
| 2 Piece Wedge(Single) Type | 3422 | 924 | 1232 | 360 | 1440 | 3956 | |
| 2 Piece Wedge(Double) Type | 3382 | 924 | 1168 | 360 | 1440 | 3892 | |
| 3 Piece Wedge(Single) Type | 3374 | 792 | 1120 | 300 | 1200 | 3412 | |
| 2 Piece Wedge(Double) Type | 3374 | 792 | 944 | 300 | 1200 | 3236 | |

2.2 유한요소해석을 위한 물성 모델링

Wedge의 재질은 균질 등방성으로 가정하고, 항복강도 이상의 하중에 대해 소성거동을 보이는 탄소성을 고려하기 위해 재료 비 선형을 도입하였다. 재료의 항복여부를 판단하는 항복 조건식은 Von-Mises의 항복 조건식을 따르는 것으로 하였으며 재료의 물성치는 표 2. 2와 같다.

표 2. 2 강연선, Wedge, Head에 대한 재료의 물성치

| 재료물성 위치 | 영률 [kgf/mm ²] | 항복 응력 [kgf/mm ²] | 소성영역 영률 [kgf/mm ²] | 포아송 비 |
|------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------|
| 강연선 | 45,000 | 18,700 | 5,000 | 0.3 |
| Wedge | 30,000 | 88.4 | 3,000 | 0.3 |
| 헤드 | 25,000 | 50.0 | 2,500 | 0.3 |

2.3 유한요소해석을 위한 접촉 및 마찰 모델링

Wedge는 내측면에서는 강연선과의 접촉이, 외측면에서는 Head와의 접촉이 발생하게 된다. Head와 Wedge간의 접촉은 비교적 거친 면끼리의 접촉으로 마찰이 발생하고 있고, 강연선과 Wedge와의 접촉은 Wedge 내측면의 나선선으로 인해 거의 Slip이 발생하지 않는 구조로 되어 있다. 강연선과 Wedge의 마찰은 Slip이 일어나지 않는 상태이므로 두 접촉면에 존재하는 절점들을 서로 연결시켜 그 효과가 나타나게 하였다.

2.4 경계조건 및 하중조건

지압 판은 강체로 가정할 수 있으므로 지압 판으로 지지되어 있는 Head

의 바닥 면은 구속하였다. 절단면에 적용되는 대칭조건은 2 Piece Wedge의 경우 좌우대칭을 만족하도록 Z방향의 변위를 구속하였고, 3 Piece Wedge는 120도 마다 반복되는 형상에 대한조건이므로 X축에 대해 120도와 240도 위치에 있는 절단면에서 원주방향으로 절점 좌표계를 원통 좌표계로 변경한 다음 원주방향으로 자유도를 구속하였다. Wedge는 강연선과 Head의 접촉마찰에 의해서만 지지되어 있는 상태이며 자중의 효과는 고려하지 않았다.

하중조건은 강연선에 걸리는 인장력을 변위량으로 환산하여 하중을 조절하는 방법을 사용하였는데, 이는 하중을 변위로 가하는 편이 더 수렴이 잘되기 때문이다. 먼저 강연선에 걸리는 최대하중하에서 예측되는 변위량을 강제 변위값으로 정하고 무하중 상태에서부터 최대변위까지 선형적으로 강제 변위값을 증가시키면서 구조물에 대한 해석을 하였다.

그 다음, 강제 변위를 가한 절점(강연선의 단면)에서 발생한 절점 반력이 최대하중과 동일한 크기로 나타날 때의 결과를 최대 인장력에서의 해석결과로 하였다.

3. 구조해석 결과 및 분석

Wedge 각 모델별로 비교한 응력의 성분은 주응력 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 와 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 그리고 σ_{eqv} 이다. Von-Mises응력 또는 조합 응력 이라고 부르는 응력 σ_{eqv} 의 정의는 $\sigma_{eqv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ 으로 표시된다. Von-Mises항복 조건식에 따라 탄소성의 구분이 나누어지므로, 본 해석과 같은 3축 응력 상태의 응력의 평가에 있어서는 이 σ_{eqv} 값을 기준으로 재료의 항복여부를 판단하게 된다.

Wedge 모델의 경우는 2 Piece Wedge에서 Single Type과 Double Type의 차이가 나타나는데, Single Type보다 Double Type이 응력 값이 상대적으로 더 크게 나타났다. Wedge의 항복 응력이 88.4(Kgf/mm²)에 반하여 3 Piece Wedge(Single) Type과 2 Piece Wedge(Double) Type에서 최대 응력이 각각 90.388(Kgf/mm²), 93.508(Kgf/mm²)로 나타났다.

2 Piece Wedge(Double) Type의 값이 가장 크게 나온 이유는 강연선에서의 변위와도 관계가 있다. 즉 동일한 하중에서 2 Piece Wedge(Double) Type의 변위가 가장 크고, 변형률, 응력 또한 큰 값을 보이는데, 이는 Wedge의 형상에 따른 특성으로 판단된다. 2 Piece Wedge에서 접촉면적을 넓히기 위해 Wedge에 홈을 가공하여 Double Type을 만들었지만, 실제로는

접촉면적이 증가하지 않아 응력의 분산이 제대로 이루어지지 않은 것으로 보인다. 나머지 세 가지 모델에서는 모두 비슷한 크기를 보였으며 이 값들은 Wedge의 항복 응력을 약간 상회하는 크기이나 그 부위가 아주 미소한 모서리 부에 국한되어있고, Wedge 표면의 칩탄 열처리로 인한 표면강도의 상승을 고려한다면 필요한 강도를 확보하고 있다고 보여진다. 표 2. 3은 Wedge 모델에서의 최대 σ_{eq} 이며, 표 2. 4와 2. 5는 각 모델별 σ_1 크기와 최대 σ_x 의 값이다.

표 2. 3 Wedge 모델에서의 최대 σ_{eq}

| 구분 | 2 Piece Wedge(Single) Type | 2 Piece Wedge(Double) Type | 3 Piece Wedge(Single) Type | 3 Piece Wedge(Double) Type |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 최대 σ_{eq} (Kgf/mm ²) | 90.965 | 93.508 | 90.388 | 90.420 |

표 2. 4 Wedge 모델에서의 최대 σ_1

| 구분 | 2 Piece Wedge(Single) Type | 2 Piece Wedge(Double) Type | 3 Piece Wedge(Single) Type | 3 Piece Wedge(Double) Type |
|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 최대 σ_1 (Kgf/mm ²) | 71.595 | 73.374 | 72.348 | 71.918 |

표 2. 5 Wedge 모델에서의 최대 σ_x

| 구분 | 2 Piece Wedge(Single) Type | 2 Piece Wedge(Double) Type | 3 Piece Wedge(Single) Type | 3 Piece Wedge(Double) Type |
|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 최대 σ_x (Kgf/mm ²) | 48.943 | 51.720 | 52.108 | 51.733 |

변위는 강연선에 걸리는 하중으로 인한 축 방향 변위값이 가장 크며, 강연선과 Wedge의 마찰로 인해 Wedge의 이동과 Wedge의 내·외경면에서 발생하는 전단력에 의한 변형 등이 그 주된 성분으로 Wedge 모델에서의 x 방향 변위는 표 2. 6와 같다.

표 2. 6 Wedge 모델에서의 최대 δx

| 구 분 | 2 Piece Wedge(Single) Type | 2 Piece Wedge(Double) Type | 3 Piece Wedge(Single) Type | 3 Piece Wedge(Double) Type |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 최대 δx (mm) | 0.0863 | 0.0874 | 0.0837 | 0.0846 |

변형률은 하중으로 인한 구조물의 직접적인 변형정도를 나타내는 값으로 형상의 변형을 예측할 수 있는 값이다.

표 2. 7에서 보면 3 Piece Wedge (Single) Type이 가장 적다. 이는 동일한 최대하중에서 고르게 변형이 발생하였음을 의미하며 2 Piece Wedge (Double) Type에서 가장 큰 값이 나타났다.

표 2. 7 Wedge 모델에서의 최대 ϵ_{eqv}

| 구 분 | 2 Piece Wedge(Single) Type | 2 Piece Wedge(Double) Type | 3 Piece Wedge(Single) Type | 3 Piece Wedge(Double) Type |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 최대 ϵ_{eqv} (mm) | 0.005166 | 0.005273 | 0.004831 | 0.004880 |

Wedge 모델의 x 방향의 변형률인 ϵ_x 값은 표 2. 8과 같이 Wedge 모델 모두 3 Piece Wedge(Single) Type과 3 Piece Wedge (Double) Type이 같은 값을 보였으며, 2 Piece Wedge(Double) Type이 가장 큰 값을 보였다.

표 2. 8 Wedge 모델에서의 최대 ϵ_x

| 구분 | 2 Piece Wedge(Single) Type | 2 Piece Wedge(Double) Type | 3 Piece Wedge(Single) Type | 3 Piece Wedge(Double) Type |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 최대 ϵ_x (mm) | 0.001648 | 0.001669 | 0.001625 | 0.001625 |

3. 결 론

유한 요소법을 이용한 4가지 Wedge 모델에 대한 응력, 변형률, 변위에 대한 구조해석 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

Wedge의 모델의 경우, 응력은 전반적으로 2 Piece Wedge(Double) Type이 크게 나타났다. 이는 접촉면적을 넓히기 위해 Wedge의 홈을 가공하여 Double Type으로 만드는 것이 큰 효과가 없음을 알 수 있었다.

Wedge의 Slip현상은 2 Piece Wedge(Double) Type이 크게 나타났으며 3 Piece Wedge(Single) Type이 가장 작게 나타나 마찰력이 가장 크게 작용하고 있음을 알 수 있었으며 동일한 최대하중에서 균등한 변형이 일어났음을 알 수 있었다.

구조해석 결과 Wedge의 Single Type에서 Double Type으로 바꾸는 것은 거의 효과가 없으며 Piece의 수를 늘리는 편이 효과적인 것으로 나타났다.

모델별 최대응력은 큰 차이가 없이 항복응력을 약간 상회하고 있으나 이는 그 부위가 미소한 모서리 부에 국한되어 있고, Wedge 표면의 침탄 열처리로 인한 표면강도의 상승을 고려한다면 필요한 강도를 충분히 확보하고 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Stone, W.C., and Breen, J.E., "Design of Post-Tensioned Girder Anchorage Zones," Research Report No.208-3F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, August 1980.
2. Paes-Filho, W.F., "The Behavior of Post-Tensioned Anchorage Zone Models of Thin Web Sections," Masters Thesis, University of Texas at Austin, January 1980.
3. 신현목, "프리스트레스트 콘크리트", 동명사, 1986.
4. 문제길, "PS 콘크리트공학", 경문출판사, 1980.
5. Kohnke, P., 1997., "ANSYS Theory Reference," 8th Ed., SAS IP, Inc.
6. Michael P. Collins, Denis Mitchell, "Prestressed Concrete Structures," Prentice Hall, 1991.
7. T.Y. Lin, Ned. H. Burns, "Design of Prestressed Concrete Structures," 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1981.