

### 3.4 프리스트레스에 의한 응력 계산

$$\text{tonf} := 1000\text{kgf}$$

$$L := 14.835\text{m} \times 2 = 29.67\text{m}$$

### 【 설계 입력 변수값 】

PS강연선의  
항복강도

$$f_{py} := 1440\text{MPa}$$

PS강연선의  
탄성계수

$$E_p := 200000\text{MPa}$$

PS강연선의  
단면적

$$A_p := 0.001185\text{m}^2$$

PS강연선의  
설치 개수

$$n_p := 4$$

$$f_{ci} := 32\text{MPa}$$

### 【 순단면에 대한 단면특성 】

$$A_{c2} := 0.6577\text{m}^2$$

$$e_{p2} := 0.867\text{m}$$

$$Z_{p2} := 0.369583\text{m}^3$$

### 【 PS강연선 환산단면에 대한 단면특성 】

$$Z_{p3} := 0.413618\text{m}^3$$

### 【 합성단면에 대한 단면특성 】

$$Z_{p4\_외측} := 0.572382\text{m}^3$$

$$Z_{p4\_내측} := 0.575141\text{m}^3$$

### 【 설계 단면력 】

거더 자중에 의한  
설계 단면력

$$M_{d1} := 1837\text{kN} \times \text{m} = 187.322 \times \text{tonf} \times \text{m}$$

합성 전 고정하중  
(바닥판 하중)

$$M_{d2\_외측} := 2072.9\text{kN} \times \text{m}$$

$$M_{d2\_내측} := 2001\text{kN} \times \text{m}$$

합성 후 고정하중  
(포장 및 방호벽 하중)

$$M_{d3\_외측} := 742.6\text{kN} \times \text{m}$$

$$M_{d3\_내측} := 742.6\text{kN} \times \text{m}$$

### 3.4.1 단면내에서의 긴장재의 위치 결정

#### 1) PS강연선의 배치

【 PS강연선의 포물선 배치 자원 계산 】

【 PS강연선 No. 1 】

$$H_{\text{end}} := 1.5\text{m}$$

$$H_{\text{middle}} := 0.2\text{m}$$

$$H := H_{\text{end}} - H_{\text{middle}} = 1.3\text{ m}$$

$$l := 29.6\text{m}$$

$$a := \frac{H}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} = 0.005934989 \frac{1}{\text{m}}$$

$$\alpha := \text{atan}(l \times a) = 0.174$$

$$L := l + \left(\frac{8}{3}\right) \times \left(\frac{H^2}{l} - \frac{32}{5} \times \frac{H^4}{l^3}\right) = 29.750373\text{ m}$$

$$L_1 := L = 29.75\text{ m}$$

## 2) 거더 하단에서 강연선까지의 높이 산출

### 3.4.2 긴장재의 긴장응력 가정

$$A_p = 1185 \times \text{mm}^2$$

$$n_p = 4$$

$$P_{\text{jacking1}} := 1606 \text{ kN}$$

$$f_{j1} := \frac{P_{\text{jacking1}}}{A_p} = 1355.274 \times \text{MPa}$$

$$P_{\text{jacking2}} := 1564 \text{ kN}$$

$$f_{j2} := \frac{P_{\text{jacking2}}}{A_p} = 1319.831 \times \text{MPa}$$

$$P_{\text{jacking3}} := 1518 \text{ kN}$$

$$f_{j3} := \frac{P_{\text{jacking3}}}{A_p} = 1281.013 \times \text{MPa}$$

$$P_{\text{jacking4}} := 1470 \text{ kN}$$

$$f_{j4} := \frac{P_{\text{jacking4}}}{A_p} = 1240.506 \times \text{MPa}$$

$$f_{\text{jacking\_avg}} := \frac{f_{j1} + f_{j2} + f_{j3} + f_{j4}}{4} = 1299.156 \times \text{MPa}$$

$$f_{\text{pt1}} := 0.9 \times f_{\text{py}} = 1296 \times \text{MPa}$$

### 3.4.3 프리스트레스의 즉시손실 및 긴장재의 초기응력 결정

## 1) PS강연선과 쉬스 사이의 마찰에 의한 손실량

PS강연선의  
평균길이

$$L := 29.670\text{m}$$

정착단에서 거더 중심까지의  
강연선의 평균길이

$$x := \frac{L}{2} = 14.835\text{ m}$$

곡률 마찰 계수

$$\mu := 0.25$$

파상 마찰 계수

$$k := 0.005 \times \frac{1}{\text{m}}$$

경사각

$$\alpha := 0.10538$$

PS강연선의  
긴장응력 (가정치)

$$f_{pt1} := 1299.16\text{MPa}$$

$$f_{pf} := f_{pt1} \times \left[ 1 - e^{-(k \times x + \mu \times \alpha)} \right] = 124.243 \times \text{MPa}$$

## 2) 정착장치의 활동량에 의한 손실

PS강연선의 배치 개수	$n_p = 4$
PS강연선의 단면적	$A_p = 0.001185 \text{ m}^2$
PS강연선의 탄성계수	$E_p = 200000000000 \text{ Pa}$
PS강연선의 정착장치에서의 활동량	$\Delta := 0.006 \text{ m}$

$$A_{EP} := \Delta \times A_p \times n_p \times E_p = 5688 \times \text{kN} \times \text{m}$$

PS강연선의 Jacking Force	$P_j := 1299.16 \text{ MPa}$
-------------------------	------------------------------

$$P_t := P_j \times (A_p \times n_p) = 6158.018 \times \text{kN}$$

PS강연선과 쉬스 사이의 마찰에 의한 손실량	$f_{pf} = 124.243 \times \text{MPa}$
-----------------------------	--------------------------------------

$$P_B := (P_j - f_{pf}) \times (A_p \times n_p) = 5569.109 \times \text{kN}$$

$$\Delta_t := P_t - P_B = 588.91 \times \text{kN}$$

### 【 PS강연선의 정착 활동에 의한 손실 적용 범위 】

$$l_1 := \sqrt{\frac{2 \times A_{EP} \times \frac{L}{2}}{2 \times \Delta_t}} = 11.97 \text{ m}$$

정착장치의 활동에 의한 손실의 작용 범위는 중앙단면에는 영향을 미치지 않는다.



### 3) 콘크리트 탄성수축에 의한 손실

#### 【 긴장재의 마찰손실을 고려한 긴장력 】

긴장재의 긴장응력의 가정치	$f_{pt1} := 1299.16 \text{ MPa}$
PS강연선과 쉬스 사이의 마찰에 의한 손실량	$f_{pf} = 124.243 \times \text{MPa}$
건조수축에 의한 손실량	$f_{ps} := 0 \text{ MPa}$
긴장재의 마찰손실을 고려한 긴장응력	$f_{pt}$

$$f_{pt} := f_{pt1} - (f_{pf} + f_{ps}) = 1174.917 \times \text{MPa}$$

긴장재의 마찰손실을 고려한 긴장력	$P'_t$
PS강연선의 단면적	$A_p = 0.001 \text{ m}^2$
PS강연선의 배치 개수	$n_p = 4$

$$P'_t := f_{pt} \times (A_p \times n_p) = 5569.109 \times \text{kN}$$

$$P'_t = 567.891 \times \text{tonf}$$

#### 【 PS강연선 도심위치에서의 응력 】

순단면에서 프리스트레스에 의한 PS강연선 도심위치에서의 응력	$f_{ctg}$
순단면에 대한 단면적	$A_{c2} = 0.658 \text{ m}^2$
순단면에 대한 편심거리	$e_{p2} = 0.867 \text{ m}$
순단면에 대한 PS강연선 위치의 단면계수	$Z_{p2} = 0.37 \times \text{m}^3$
긴장재의 마찰손실을 고려한 긴장력	$P'_t = 5569.109 \times \text{kN}$

$$f_{ctg} := \frac{P'_t}{A_{c2}} + \frac{P'_t \times e_{p2}}{Z_{p2}} = 21.532 \times \text{MPa}$$

$$f_{ctg} = 219.566 \times \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

### 【 거더 자중에 의한 PS강연선 도심 위치에서의 응력 】

거더 자중에 의한  
PS강연선 도심위치에서의 응력

$$f_{dog}$$

거더 자중에 의한  
절점5의 모멘트

$$M_{d1} = 1837 \times \text{kN} \times \text{m}$$

순단면에 대한  
PS강연선 위치의 단면계수

$$Z_{p2} = 0.37 \times \text{m}^3$$

$$f_{dog} := \frac{-M_{d1}}{Z_{p2}} = -4.97 \times \text{MPa}$$

### 【 프리스트레스 도입 직후 긴장재 도심에서 콘크리트 평균 압축응력 】

프리스트레스 도입 직후  
거더의 고정하중과  
프리스트레스 힘에 의해 발생하는  
긴장재 도심에서의  
콘크리트의 평균압축응력

$$f_{cir}$$

긴장재  
배치 갯수

$$N := n_p = 4$$

순단면에서  
프리스트레스에 의한  
PS강연선 도심위치에서의 응력

$$f_{ctg} = 21.532 \times \text{MPa}$$

거더 자중에 의한  
PS강연선 도심위치에서의 응력

$$f_{dog} = -4.97 \times \text{MPa}$$

$$f_{cir} := \frac{N-1}{N} \times f_{ctg} + f_{dog} = 11.179 \times \text{MPa}$$

### 【 콘크리트 탄성수축에 의한 손실량 】

콘크리트 탄성수축에 의한  
손실량

$$f_{pel}$$

$$f_{ci} = 32 \times \text{MPa}$$

PS강연선의  
탄성계수

$$E_p = 200000 \times \text{MPa}$$

프리스트레스 도입 시의  
콘크리트 압축강도

$$E_{ci}$$

$$E_{ci} := 8500 \text{MPa}^{\frac{2}{3}} \times \sqrt[3]{f_{ci} + 8 \text{MPa}} = 29069.591 \times \text{MPa}$$

$$8500 \times \sqrt[3]{32 + 8} = 29069.591$$

순단면에서  
프리스트레스에 의한  
PS강연선 도심위치에서의 응력

$$f_{\text{cir}} = 11.179 \times \text{MPa}$$

$$f_{\text{pel}} := 0.5 \times \frac{E_p}{E_{ci}} \times f_{\text{cir}} = 38.455 \times \text{MPa}$$

$$f_{\text{pel}} = 392.127 \times \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

#### 4) PS강연선의 초기 긴장응력

$$f_{pt} := f_{pt1} - f_{pf} - f_{ps} - f_{pel} = 1136.463 \times \text{MPa}$$

#### 3.4.4 프리스트레스의 시간적 손실 및 긴장재의 유효응력 결정

- 1) 콘크리트 크리프에 의한 손실량
- 2) 콘크리트의 건조수축에 의한 손실량
- 3) PS강연선의 릴렉сей션에 의한 손실량
- 4) PS강연선의 유효응력

## 1) 콘크리트의 크리프에 의한 손실량

### (1) 외측 거더

PS강연선의 초기 긴장응력

$$f_{pt} = 1136.463 \times \text{MPa}$$

$$A_p = 0.001 \text{ m}^2$$

$$n_p = 4$$

$$P_t := f_{pt} \times (A_p \times n_p) = 5386.834 \times \text{kN}$$

$$P_t = 5386.834 \times \text{kN}$$

$$A_{c2} = 0.658 \text{ m}^2$$

$$e_{p2} = 0.867 \text{ m}$$

$$Z_{p2} = 0.37 \times \text{m}^3$$

$$M_{d1} = 1837 \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$\frac{P_t}{A_{c2}} = 8.19 \times \text{MPa}$$

$$\frac{P_t \times e_{p2}}{Z_{p2}} = 12.637 \times \text{MPa}$$

$$\frac{M_{d1}}{Z_{p2}} = 4.97 \times \text{MPa}$$

$$f_{cir1} := \frac{P_t}{A_{c2}} + \frac{P_t \times e_{p2}}{Z_{p2}} - \frac{M_{d1}}{Z_{p2}} = 15.857 \times \text{MPa}$$

$$M_{d2\_외측} = 2072.9 \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$M_{d3\_외측} = 742.6 \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$Z_{p3} = 0.414 \times \text{m}^3$$

$$Z_{p4\_외측} = 0.572 \times \text{m}^3$$

$$f_{cds} := \frac{M_{d2\_외측}}{Z_{p3}} + \frac{M_{d3\_외측}}{Z_{p4\_외측}} = 6.309 \times \text{MPa}$$

$$f_{cir1} = 15.857 \times \text{MPa}$$

$$f_{cds} = 6.309 \times \text{MPa}$$

$$12 \times 15.86 - 7 \times 6.31 = 146.1$$

$$\Delta_{per} := 12 \times f_{cir1} - 7 \times f_{cds} = 146.119 \times \text{MPa}$$

$$\Delta_{per\_외측} := \Delta_{per} = 146.119 \times \text{MPa}$$

## (2) 내측거더

$$\Delta_{\text{pcr\_내측}} := 12 \times f_{\text{cir1}} - 7 \times f_{\text{cds}} = 146.119 \times \text{MPa}$$

## 2) 콘크리트 건조수축에 의한 손실량

$$H_r := 70$$

$$\Delta_{\text{psh}} := 0.8\text{MPa} \times (119 - 1.05 \times H_r) = 36.4 \times \text{MPa}$$



### 3) PS강연선의 릴렉세이션에 의한 손실량

저질렉세이션 강연선 사용

$$\Delta_{pr} = 35 - 0.07 \times \Delta_{pf} - 0.1 \times \Delta_{pel} - 0.05 \times (\Delta_{pcr} + \Delta_{psh})$$

PS강연선의 릴렉세이션에  
의한 손실량

#### (1) 외측 거더

마찰손실에 의한  
응력감소량

$$\Delta_{pf} := f_{pf} = 124.243 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
탄성수축에 의한 손실량

$$\Delta_{pel} := f_{pel} = 38.455 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
크리프에 의한 손실량

$$\Delta_{pcr} := \Delta_{pcr\_외측} = 146.119 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
건조수축에 의한 손실량

$$\Delta_{psh} = 36.4 \times \text{MPa}$$

$$\Delta_{pr} := 35\text{MPa} - 0.07 \times \Delta_{pf} - 0.1 \times \Delta_{pel} - 0.05 \times (\Delta_{pcr} + \Delta_{psh}) = 13.332 \times \text{MPa}$$

$$\Delta_{pr\_외측} := \Delta_{pr} = 13.332 \times \text{MPa}$$

#### (2) 내측 거더

마찰손실에 의한  
응력감소량

$$\Delta_{pf} := f_{pf} = 124.243 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
탄성수축에 의한 손실량

$$\Delta_{pel} := f_{pel} = 38.455 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
크리프에 의한 손실량

$$\Delta_{pcr} := \Delta_{pcr\_내측} = 146.119 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
건조수축에 의한 손실량

$$\Delta_{psh} = 36.4 \times \text{MPa}$$

$$\Delta_{pr} := 35\text{MPa} - 0.07 \times \Delta_{pf} - 0.1 \times \Delta_{pel} - 0.05 \times (\Delta_{pcr} + \Delta_{psh}) = 13.332 \times \text{MPa}$$

$$\Delta_{pr\_내측} := \Delta_{pr} = 13.332 \times \text{MPa}$$

#### 4) PS강연선의 유효응력

$$f_{pe} = f_{pt} - (\Delta_{per} + \Delta_{psh} + \Delta_{pr})$$

PS강연선의  
유효인장응력

$f_{pe}$

##### (1) 외측 거더

PS강연선의  
초기 긴장응력

$$f_{pt} = 1136.463 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
크리프에 의한 손실량

$$\Delta_{per} = 146.119 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
건조수축에 의한 손실량

$$\Delta_{psh} = 36.4 \times \text{MPa}$$

PS강연선의  
릴렉세이션에 의한 손실량

$$\Delta_{pr} := \Delta_{pr\_외측} = 13.332 \times \text{MPa}$$

$$f_{pe} := f_{pt} - (\Delta_{per} + \Delta_{psh} + \Delta_{pr}) = 940.612 \times \text{MPa}$$

$$f_{pt} = 1136.463 \times \text{MPa}$$

$$f_{pe\_외측} := f_{pe} = 940.612 \times \text{MPa}$$

$$\eta := \frac{f_{pe}}{f_{pt}} = 0.828$$

$$\eta_{외측} := \eta = 0.828$$

## (2) 내측 거더

PS강연선의  
초기 긴장응력

$$f_{pt} = 1136.463 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
크리프에 의한 손실량

$$\Delta_{per} = 146.119 \times \text{MPa}$$

콘크리트의  
건조수축에 의한 손실량

$$\Delta_{psh} = 36.4 \times \text{MPa}$$

PS강연선의  
릴렉세이션에 의한 손실량

$$\Delta_{pr} := \Delta_{pr\_내측} = 13.332 \times \text{MPa}$$

$$f_{pe} := f_{pt} - (\Delta_{per} + \Delta_{psh} + \Delta_{pr}) = 940.612 \times \text{MPa}$$

$$f_{pt} = 1136.463 \times \text{MPa}$$

$$f_{pe\_내측} := f_{pe} = 940.612 \times \text{MPa}$$

$$\eta := \frac{f_{pe}}{f_{pt}} = 0.828$$

$$\eta_{내측} := \eta = 0.828$$

### 3.4.5 긴장재의 신축량 계산

$$\Delta = \frac{P_t + P_{t1}}{A_p \times E_p}$$

$\Delta$  긴장재의 신축량

$P_t$  긴 장 력

$P_{t1}$  PS강연선과 쉬스 사이의  
마찰에 의한 손실량을 고려한 긴장력

$$P_{t1} = P_t \times e^{-(\mu \times \alpha + k \times x)}$$

#### 【 입력 변수 】

$L_{strand1} := 29.751m$     $\alpha_{strand1} := 0.17390rad$     $P_{t\_strand1} := 1606kN$

$L_{strand2} := 29.691m$     $\alpha_{strand2} := 0.13512rad$     $P_{t\_strand2} := 1564kN$

$L_{strand3} := 29.635m$     $\alpha_{strand3} := 0.08359rad$     $P_{t\_strand3} := 1518kN$

$L_{strand4} := 29.604m$     $\alpha_{strand4} := 0.02891rad$     $P_{t\_strand4} := 1470kN$

## 【 Strand No. 1 】

### 【 입력 변수 】

$$A_p = 11.85 \times \text{cm}^2$$

PS강연선 단면적

$$E_p = 200000 \times \text{MPa}$$

PS강연선 탄성계수

$$P_t := P_{t\_strand1} = 1606000 \text{ N}$$

긴장력

$$L := L_{strand1} = 29.751 \text{ m}$$

PS강연선의 길이

$$\alpha := \alpha_{strand1} = 0.174$$

$$\mu := 0.25$$

곡률 마찰 계수

$$k := 0.005 \frac{1}{\text{m}}$$

파상 마찰 계수

$$x := \frac{L}{2} = 14.876 \text{ m}$$

정착단에서  
거더 중심까지의 강연선 평균길이

---

$$P_{t1} := P_t \times e^{-(\mu \times \alpha + k \times x)} = 1427.456 \times \text{kN}$$

$$\Delta := \frac{P_t + P_{t1}}{A_p \times E_p} \times \frac{L}{2} = 0.19 \times \text{m}$$

---

$$\Delta_{strand1} := \Delta = 0.19 \text{ m}$$

## 【 Strand No. 2 】

### 【 입력 변수 】

$$A_p = 11.85 \times \text{cm}^2$$

PS강연선 단면적

$$E_p = 200000 \times \text{MPa}$$

PS강연선 탄성계수

$$P_t := P_{t\_strand2} = 1564000 \text{ N}$$

긴장력

$$L := L_{strand2} = 29.691 \text{ m}$$

PS강연선의 길이

$$\alpha := \alpha_{strand2} = 0.135$$

$$\mu := 0.25$$

곡률 마찰 계수

$$k := 0.005 \frac{1}{\text{m}}$$

파상 마찰 계수

$$x := \frac{L}{2} = 14.845 \text{ m}$$

정착단에서  
거더 중심까지의 강연선 평균길이

---

$$P_{t1} := P_t \times e^{-(\mu \times \alpha + k \times x)} = 1403.879 \times \text{kN}$$

$$\Delta := \frac{P_t + P_{t1}}{A_p \times E_p} \times \frac{L}{2} = 0.186 \times \text{m}$$

---

$$\Delta_{strand2} := \Delta = 0.186 \text{ m}$$

### 【 Strand No. 3 】

#### 【 입력 변수 】

$$A_p = 11.85 \times \text{cm}^2$$

PS강연선 단면적

$$E_p = 200000 \times \text{MPa}$$

PS강연선 탄성계수

$$P_t := P_{t\_strand3} = 1518000 \text{ N}$$

긴장력

$$L := L_{strand3} = 29.635 \text{ m}$$

PS강연선의 길이

$$\alpha := \alpha_{strand3} = 0.084$$

$$\mu := 0.25$$

곡률 마찰 계수

$$k := 0.005 \frac{1}{\text{m}}$$

파상 마찰 계수

$$x := \frac{L}{2} = 14.818 \text{ m}$$

정착단에서  
거더 중심까지의 강연선 평균길이

---

$$P_{t1} := P_t \times e^{-(\mu \times \alpha + k \times x)} = 1380.449 \times \text{kN}$$

$$\Delta := \frac{P_t + P_{t1}}{A_p \times E_p} \times \frac{L}{2} = 0.181 \times \text{m}$$

---

$$\Delta_{strand3} := \Delta = 0.181 \text{ m}$$

#### 【 Strand No. 4 】

##### 【 입력 변수 】

$$A_p = 11.85 \times \text{cm}^2 \quad \text{PS강연선 단면적}$$

$$E_p = 200000 \times \text{MPa} \quad \text{PS강연선 탄성계수}$$

$$P_t := P_{t\_strand4} = 1470000 \text{ N} \quad \text{긴장력}$$

$$L := L_{strand4} = 29.604 \text{ m} \quad \text{PS강연선의 길이}$$

$$\alpha := \alpha_{strand4} = 0.029$$

$$\mu := 0.25 \quad \text{곡률 마찰 계수}$$

$$k := 0.005 \frac{1}{\text{m}} \quad \text{파상 마찰 계수}$$

$$x := \frac{L}{2} = 14.802 \text{ m} \quad \begin{array}{l} \text{정착단에서} \\ \text{거더 중심까지의 강연선 평균길이} \end{array}$$

---

$$P_{t1} := P_t \times e^{-(\mu \times \alpha + k \times x)} = 1355.303 \times \text{kN}$$

$$\Delta := \frac{P_t + P_{t1}}{A_p \times E_p} \times \frac{L}{2} = 0.176 \times \text{m}$$

---

$$\Delta_{strand4} := \Delta = 0.176 \text{ m}$$



$$\Delta_{\text{strand1}} = 190.397 \times \text{mm}$$

$$\Delta_{\text{strand2}} = 185.906 \times \text{mm}$$

$$\Delta_{\text{strand3}} = 181.214 \times \text{mm}$$

$$\Delta_{\text{strand4}} = 176.456 \times \text{mm}$$

### 3.4.6 프리스트레스의 영향을 고려한 재하단계별 응력 계산

- 1) 프리스트레스 도입 직후의 콘크리트 응력
- 2) 유효 프리스트레스
- 3) 설계 하중 작용시의 휨응력

## 1) 프리스트레스 도입 직후의 콘크리트 응력

## 2) 유효 프리스트레스

### 3) 설계 하중 작용시의 휨응력