

# 프리스트레스 콘크리트 구조물의 마찰손실을 고려한 긴장력 산정에 관한 연구

## A Study on the Determination of Prestressing Force Considering Frictional Loss in Prestressed Concrete Structures

조 병 완\*, 이 재 형\*\*, 태 기 호\*\*\*  
Jo, Byung Wan Lee, Jae Hyung Tae, Ghi Ho

### ABSTRACT

In the prestressed concrete structures, the effective prestressing force of tendon is basically most important item for structural safety and serviceability. The frictional loss is one of the major items for determinating the effective prestressing force and depend on the construction accuracy of the structures. In this thesis, it will be analyzed and found through measured hydraulic jack pressure, tendon elongation and prestressing control system that the tendency of apparent curvature friction coefficient, the ratio of jacking force and required prestressing force, the ratio of initial jacking force and required prestressing force and compatibility of specified friction loss coefficient. The specified control limit for curvature friction coefficient of prestressing control system is about 0.25 and wobble friction coefficient 0.005. Thus, the control limit should be modified according to changed value of friction coefficient.

### 1. 서 론

프리스트레스 콘크리트 구조물에서 긴장정착구가 있는 구조물 단부에서는 필요로 하는 프리스트레스 힘이 충분히 도입되면 도입되는 긴장력을 유압계에 의하여 확인할 수 있다. 그러나, 큰 휨모멘트가 발생하는 PS강선 중간 부분에서는 설계치의 도입 프리스트레스가 확보되지 않고는 구조물의 내하력이 충분히 확보되지 않는데 도입 프리스트레스 힘을 확인하기 위한 장치가 없으므로 도입 프리스트레스 힘의 확인이 곤란하다.

PS강선 중간 부분에서 설계치의 도입 프리스트레스가 확보되지 않는 이유는 주로 PS강선의 이론적인 선형이 시공시에 정확히 유지되지 않고, 긴장시 강선과 쉬스사이의 마찰계수가 설계시 적용값과 실제값이 상이하여 마찰에 의한 손실량에 있어서 설계값과 실제값의 차이가 발생하게 될 수 있다. 또한 설계시 적용되는 마찰계수도 설계기준에 따라 다른 것도 한 요인이다.

\* 정회원, 한양대학교 도시환경건설공학부, 부교수

\*\* 정회원, 세이엘 컨설팅연구소 부소장, 공학박사

\*\*\* 정회원, 한양대학교 토목공학과, 박사과정

간혹 쉬스가 파손되는 사고로 인하여 마찰 손실이 발생된 후 잔류되는 프리스트레스 힘은 구조물의 내하력에 많은 영향을 미치며 정착후 크리프로 인한 소성변형에 따른 손실량에도 많은 영향을 미친다. 따라서 설계시의 도입 프리스트레스가 시공시 정확하게 확보될 수 있어야 한다

따라서 본 연구에서는 포스트텐션공법에서 구조물의 사용성과 안전성을 결정하는데 절대적인 영향을 미치는 유효 프리스트레스를 결정하는 마찰계수의 경향, PS강재의 항복응력과의 관계로 인한 프리스트레스 도입 효율, 마찰손실에 크게 영향을 미치는 요소, 현재 적용하는 마찰손실의 설계기준의 적합성에 대하여 현장 긴장관리 기록을 이용하여 규명하고자 한다.

## 2. 결보기 마찰계수와 소요 긴장력

### 2.1 결보기 곡률마찰계수와 소요 긴장력 산정

PS강선의 긴장시 결보기 곡률마찰계수를 다음과 같은 방법에 의하여 측정한다.

① 설계 긴장장치 긴장력( $P_{\mu s}$ )으로부터 설계기준 곡률마찰계수  $\mu_s$  에 의하여 최대 마찰손실 발생점에서의 PS강선 긴장력  $P_n$  과 PS강선의 늘임량  $\Delta l_{\mu s}$  을 계산한다.

② 위에서 계산된 최대 마찰손실 발생점에서의 PS강선 긴장력  $P_n$  에 하한 곡률마찰계수  $\mu_L$  일 때 발생하는 마찰손실을 보정한 긴장장치 긴장력  $P_{\mu L}$  과 PS강선의 늘임량  $\Delta l_{\mu L}$  을 계산한다.

③ PS강선을 긴장하면서 단계 별로 긴장력과 PS강선의 늘임량을 측정한다. 예를 들면 설계 긴장력이 유압계 압력으로  $537\text{kg/cm}^2$  라면 단계별 긴장력은  $100\text{kg/cm}^2$ ,  $200\text{kg/cm}^2$ ,  $300\text{kg/cm}^2$ ,  $400\text{kg/cm}^2$ 로 하기로 하고 각 각의 긴장력에 대한 늘임량을 측정한다.

④ 그림1 과 같이 ②항에서 계산된 긴장장치 긴장력  $P_{\mu L}$  과 PS강선의 늘임량  $\Delta l_{\mu L}$  에 의하여 L점을 그리고 ③항에서 계산된 긴장장치 긴장력  $P_{\mu U}$  과 PS강선의 늘임량  $\Delta l_{\mu U}$  에 의하여 U점을 그린 다음 L점과 U점을 직선으로 연결하여 직선  $\overline{LU}$  를 그리고 이 직선을 인장정지선이라 한다

⑤ ④항에서 그려진 직선  $\overline{LU}$  는 PS강선의 탄성계수가  $E_p$  일 때이므로 결보기 탄성계수  $E_p'$  (계측이 없는 경우  $1900000 \text{ kg/cm}^2$ ) 에 대하여 수정  $E_p'$ 선(수정 인장정지선)으로 보정한다 보정방법은 강선의 늘임량이 탄성계수에 반비례하므로

$$\begin{aligned} L' \text{ 점} &: \text{수정된 } \Delta l_{\mu L} = \Delta l_{\mu L} \times E_p/E_p' \\ U' \text{ 점} &: \text{수정된 } \Delta l_{\mu U} = \Delta l_{\mu U} \times E_p/E_p' \end{aligned} \quad (1)$$

⑥ ④항에서 측정된 압력계 지시값과 PS강선의 늘임량과의 관계로부터 직선 O'D를 그린다

⑦ ⑥항에서 그려진 직선 O'D에서 O'점을 O점으로 평행 이동하면 직선 OC'가 되며 C'점이 긴장 정지점이 된다. 따라서 C'점에 의하여 긴장장치 긴장력과 그 때의 늘임량을 얻는다.

⑧ 결보기 곡률마찰계수는 직선  $\overline{L'U'}$  에서 L'점은  $\mu_L$  에 대한 값이고 U'점은  $\mu_U$  에 대한 값으로 C'점에서의 값은 보간법으로 구한다.

## 3. 실측교량 예제

### 3.1 개요

PS강선의 늘임량에 대한 측정은 국내 4개 교량에 대하여 이루어졌으며 대상 교량의 형식은 프리스트레스트 콘크리트 상자형 교량과 프리스트레스트 콘크리트 빔교의 2종류이며, 교량에 적용된 시공법

은 연속압출공법(Incremental Launching Method, ILM)과 동바리공법(Full Staging Method, FSM)이다. ILM교량의 경우 크게 2종류의 강선이 사용되고 있다. 하나는 교량의 상부슬라브와 하부슬라브에 교량 진행방향으로 배치되어 압출 시공 도중의 가설 사하중에 주로 저항하는 1차강선(Central Tendon)으로, 대체로 강선의 길이가 짧고 직선이며 다른 하나는 경간 중앙에서는 벽체의 하단에 교각 부에서는 벽체 상단에 위치하여 완공 후 포장 등의 부대 사하중과 활하중에 저항하는 2차강선(Continuity Tendon)으로 대체로 강선길이가 길고 만곡이 심하여 각 변화량이 크다. 본 연구에서 PS강선의 긴장력과 늘음량 측정에 이용된 강선은 현장 여건상 2차 강선으로 제한하였다. 측정에 이용된 교량의 제원은 표 1 에 나타난 바와 같다.

### 3.2 실측결과

#### 3.2.1 결보기 곡률마찰계수

PS강선의 인장관리시 결보기 곡률마찰계수의 강선길이와 설계 파상마찰계수 변화에 대한 최대·최소치, 평균치, 표준편차에 대한 통계자료는 표3 과 같으며, 강선 길이에 대한 결보기 곡률마찰계수의 분포도를 그림3~4 에 나타내었다.

통계자료에 의하면 파상마찰계수가 증가함에 따라 결보기 곡률마찰계수의 평균치는 증가하여  $k=0.003$  일 때 최대치를 나타내고 더 증가하면 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

각 길이별 강선의 영향을 보면 곡률마찰계수의 경우와 마찬가지로 긴 강선에서 결보기 곡률마찰계수가 적어지는 것으로 나타났다.

#### 3.2.2 소요율의 영향

PS강선의 인장관리시 실측된 결과로부터 곡률마찰계수 변화에 대한 소요율의 최대·최소치, 평균치, 표준편차에 대한 통계치는 표5와 같으며, 또한 강선 길이에 대한 소요율의 분포도는 그림7~ 12와 같다. 표5에 의하면 소요율의 평균치는 95%를 하회하고 있으며 기준 곡률마찰계수가 증가함에 따라 소요율의 분산정도는 적어지는 경향을 나타내고 있다. 곡률마찰계수가 적은 경우는 긴 강선에서 소요 긴장력을 상회하는 긴장 하한값에 지배되는 것을 알 수 있다.

곡률마찰계수가 크게되는 경우에 소요율이 강선의 길이에 관계없이 일정하게 되는 것으로 나타났으며, 소요율의 평균치는 95%를 넘지 않는 것으로 나타났다.

### 결 론

이 상의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 긴장력의 상한값이  $0.8\sigma_{pu}$  이고 설계긴장력의 기준을  $0.8\sigma_{pu}$  로 하는 경우 소요율( $P_f/P_R$ )의 평균은 90~95% 정도 인 것으로 나타났다. 따라서 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서 설계긴장력의 기준을  $0.75\sigma_{pu}$  정도로 낮추어 5% 정도 초과 긴장할 수 있도록 확보하는 것이 바람직하다고 생각된다.
2. 현재 국내시방서 상의 관리한계가 강선의 경우  $\pm 0.4$  인데 이는  $\mu_s$  가 0.25 일 때  $k$  값은 0.005 정도가 적당하며, 외국시방서에 따른  $\mu_s$  와  $k$  값을 채택하는 경우는 현재 규정되어 있는 관리한계의 수정이 필요한 것으로 생각된다.

- 곡률마찰계수가 0.25 이고 파상마찰계수가 0.003 이하로 적어지는 경우도 역시 결보기 곡률마찰계수의 평균값에 대한 편차가 적어져서 국내 시방서상의 관리한계로 근접하는 경향을 보였다
- 곡률마찰계수와 파상마찰계수 중 마찰손실에 미치는 영향이 보다 더 큰 것은 파상마찰계수인 것으로 나타났으며, 결보기 곡률마찰계수는 길이가 긴 강선에서 더 적은 값을 나타내었다.

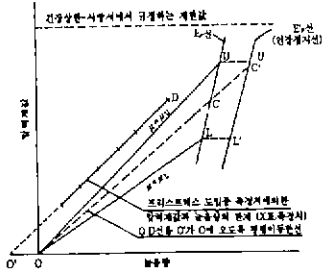
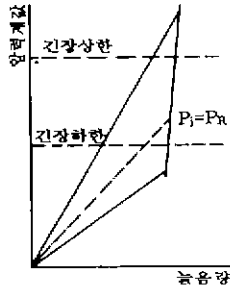
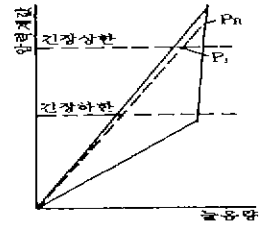


그림. 1 결보기 곡률마찰계수를 고려한 긴장력



a) CASE I



b) CASE II

그림. 2 결보기 곡률마찰계수를 고려한 긴장력 관리도상에서 P<sub>1</sub> 와 P<sub>R</sub> 과의 관계

표1 대상교량제원

구분 \ 교량명	광양대교	서장대교	히포교
교량형식	PS 콘크리트 Box Girder 교	PS 콘크리트 Box Girder 교	PS 콘크리트빔교
교량연장	14@50m =700m	16@60m =700m	13@25m = 325m
교폭	9.25×2=18.5m	13.9×2=27.8m	24 m
시공방법	ILM	ILM	P.S.C 빔교
사용강선	강연선16φ12.7 AP=15.7936 cm <sup>2</sup>	강연선19φ12.7 AP=18.755 cm <sup>2</sup>	강연선12φ12.7 AP=11.8452 cm <sup>2</sup>
강선항복강도	152 kg/mm <sup>2</sup>	152 kg/mm <sup>2</sup>	152 kg/mm <sup>2</sup>
강선인장강도	190 kg/mm <sup>2</sup>	190 kg/mm <sup>2</sup>	190 kg/mm <sup>2</sup>
설계긴장력(c)	240.0(0.808Pu)	241.8(0.676Pu)	152.0(0.675Pu)
각변화량(°)	120~20	149.9~30	25.5~3.3
강선길이(m)	92.0~41.4	178.2~47.2	29.8~24.6
위스형태	아연도금 금속	아연도금 금속	아연도금 금속
위스경(mm)	87	87	72
적/정착구손실	4%	4%	4%
Ram 단면적	426 cm <sup>2</sup>	895 cm <sup>2</sup>	308 cm <sup>2</sup>
측정강선(본)	288	24	7

표3 실측 길보기 곡률마찰계수의 통계치

구 분	$k=0.002, \mu_s=0.25$					$k=0.003, \mu_s=0.25$				
	본수	최대	최소	평균	표준편차	본수	최대	최소	평균	표준편차
전체강선	335	0.99	-0.14	0.32	0.12	335	1.1	-0.11	0.37	0.16
강선길이 150m-200m	18	0.26	0.08	0.19	0.04	18	0.20	0.06	0.15	0.03
강선길이 100m-150m	4	0.35	0.16	0.27	0.08	4	0.27	0.12	0.21	0.06
강선길이 50m-100m	284	0.81	0.03	0.33	0.11	284	1.10	0.03	0.39	0.14
강선길이 25m-50m	29	0.99	-0.14	0.37	0.23	29	0.83	-0.11	0.41	0.24

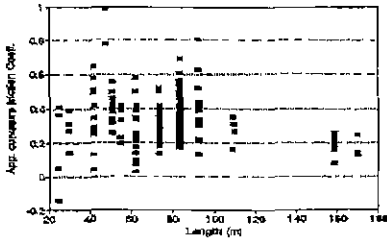


그림3 길보기 곡률마찰계수의 상관도( $k=0.002$ )

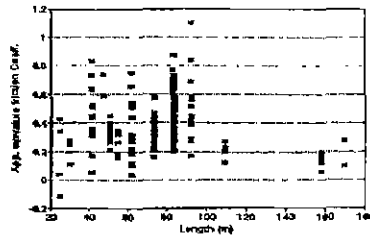


그림4 길보기 곡률마찰계수의 상관도( $k=0.003$ )

표4. 소요율의 통계치

구 분	$k=0.005, \mu_s=0.15$					$k=0.005, \mu_s=0.20$				
	본수	최대	최소	평균	표준편차	본수	최대	최소	평균	표준편차
전체 강선	335	161%	61.3%	91.0%	14.4%	335	137%	60.2%	91.7%	10.4%
강선 길이 150m-200m	18	161%	120%	134%	10.9%	18	137%	101%	113%	9.3%
강선 길이 100m-150m	4	120%	102%	110%	7.6%	4	110%	100%	102%	4.9%
강선 길이 50m-100m	284	118%	61.3%	87.4%	9.5%	284	114%	60.2%	89.7%	8.7%
강선 길이 25m-50m	29	112%	84.8%	96.6%	6.6%	29	113%	85.3%	97%	6.4%

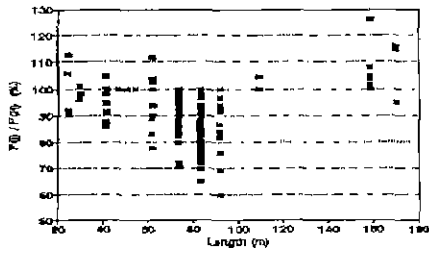


그림 7 소요율 상관도(  $k=0.005$  ,  $\mu_s=0.15$  )

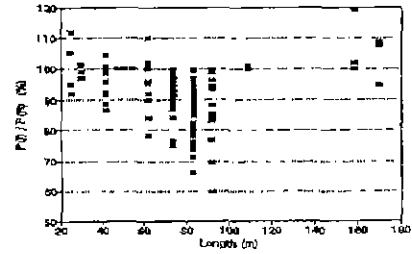


그림 8 소요율 상관도(  $k=0.005$  ,  $\mu_s=0.20$  )

### 참고문헌

1. KOREA BRIDGE SPECIFICATIONS, Korea Civil Engineering Institution, 1996.
2. KOREA CONCRETE SPECIFICATIONS, Korea Civil Engineering Institution, 1996.
3. AASHTO, "Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridge", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 1989
4. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges", Fifteenth Edition AASHTO, 1992.
5. Ned H. Burns, Todd Helwig, and Tetsuya Tsujimoto, "Effective Prestress Force in Continuous Post-Tensioned Beams with Unbonded Tendons", *ACI Structural Journal*, Vol. 88, no. 1, August. 1991
6. Clifford L. Freyermuth, "Rational Application of the Elongation Tolerance for Post-Tensioning Tendons", *ACI Structural Journal*, Vol. 88, no. 6, August, 1991
7. R. Sinno and H. L. Furr, "Computer Program for Predicting Prestress Loss and Camber", *Journal of Prestressed Conc Inst.*, Vol. 17, No. 5, September-October. 1972.