

실측값을 활용한 긴장재 마찰계수의 산정

Evaluation of Friction Coefficients of Prestressing Tendon Using Field Data

전 세 진* 박 인 교** 김 광 수*** 이 만 섭**** 조 재 열***** 박 찬 민*****

Jeon, Se Jin Park, In Kyo Kim, Kwang Soo Lee, Man Seop Cho, Jae Yeol Park, Chan Min

ABSTRACT

Friction coefficients of the prestressing tendon are the basic information required to control the prestressing force introduced to PSC structure during jacking. However, the friction coefficients show considerable differences depending on the specifications, causing much confusion to designers. In this study, a procedure is proposed that can be used to estimate the wobble and curvature friction coefficients from field data and classical theory related to the friction. The procedure is applied to two PSC girder bridges with various tendon profiles. The resulting values are compared with those presented in some specifications and assumed in jacking. The resulting wobble friction coefficients are not as small as those presented in AASHTO specifications but are more or less similar to the lower limit of domestic standards, while the curvature friction coefficients approach or slightly exceed the upper limit of the same standards.

요 약

PSC 구조물에 사용되는 긴장재의 마찰계수는 긴장작업시 긴장력 관리를 위한 기본적인 정보가 된다. 그러나, 마찰계수는 국내외 설계기준별로 큰 차이가 있어 실무자들에게 혼란을 주어 왔다. 이 연구에서는 먼저 국내외의 관련 설계기준을 비교분석하여 현재 통용되고 있는 마찰계수의 범위를 파악해 보았다. 그리고 긴장시의 신장량과 긴장력과 같은 실측값과 마찰계수에 대한 이론식을 조합하여 파상 및 곡률 마찰계수값을 역으로 유추할 수 있는 절차를 제안하였다. 예제로서 국내 PSC 교량을 2개 선정하여 다양한 형상을 가진 텐던들에 제안된 절차를 적용하여 마찰계수값들을 계산하고 국내외 설계기준의 값들과 비교하였으며, 이를 바탕으로 합리적인 마찰계수값의 범위에 대해 논하였다. 파상 마찰계수의 경우 AASHTO 기준을 비롯한 해외의 몇몇 기준에서 국내에서 통용되는 값보다 매우 작은 값을 제시하고 있어 국내 기준이 파상 마찰계수를 과대평가하고 있다는 지적이 있어 왔지만, 분석 대상 교량에서 도출한 값들은 국내 기준의 하한치에 가까운 정도였다. 한편, 곡률 마찰계수는 국내 기준의 상한치에 가깝거나 이를 다소 상회하는 것으로 나타났다.

*정회원 · 대우건설기술연구원 토목연구팀 책임연구원

**정회원 · COWI Korea 부장

***정회원 · 현대건설 화명대교현장 공무부장

****정회원 · COWI Korea 대표이사

*****정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수

*****정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 구조지반연구팀 팀장

1. 서 론

PSC 구조물에 삽입되는 긴장재의 긴장작업시 신장량 및 긴장력의 계산과 관리는 핵심적인 사항이며, 이 때 마찰계수는 계산 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 그러나, 실무에서 적용했던 마찰계수는 그 간 많은 변동이 있었으며, 국내외 설계기준에 제시되거나 각 프리스트레싱 관련 업체에서 자체적으로 사용하던 마찰계수도 서로간에 차이가 클 뿐더러 범위로 표현된 경우가 많아 실무자들에게 혼란을 주어 왔다. 예를들어 파상 마찰계수의 경우 국내 기준^{1,2)}과 미국 AASHTO 기준^{3,4)}을 비교해 보면 최대 10배까지도 차이가 발생하고 있다. 추정된 마찰계수값이 실제 값보다 크건 작건 이러한 차이는 실제 도입된 긴장력과 계산된 긴장력의 차이를 가져오고 이는 결국 계산된 응력의 오차에 의해 긴장시 또는 사용시 균열 발생 등의 문제를 일으키거나 강연선의 개수가 실제 필요량보다 과다 또는 과소할 여지를 발생시킨다. 이러한 문제점에 대응하고자 그 간 국내에서도 몇몇 관련 연구가 수행되어 왔으나⁵⁻⁸⁾ 아직까지 일관성 있는 결과를 얻지는 못한 상태이다.

이 연구⁹⁾에서는 먼저 국내외의 관련 설계기준을 비교분석하여 현재 통용되고 있는 마찰계수의 범위를 파악해 보았다. 그리고 긴장시의 실측값과 마찰계수에 대한 이론식을 조합하여 파상 및 곡률 마찰계수값을 역으로 유추할 수 있는 절차를 제안하였다. 이러한 절차를 국내 PSC 교량에 배치된 다양한 유형의 텐던들에 적용하여 마찰계수값들을 계산하고 이를 국내외 설계기준의 값들과 비교하였으며, 이를 바탕으로 합리적인 마찰계수값의 범위에 대해 논하였다.

2. 설계기준상의 마찰계수값

표 1은 가장 보편적으로 사용되고 있는 아연도금된 금속 시스(sheath) 내에서 부착되는 강연선에 대해 적용되는 국내외 설계기준상의 마찰계수값을 보여주고 있다. 곡률 마찰계수의 경우 일본 기준에서 0.30의 비교적 큰 값을 적용하고 있는 것을 제외하면 대체로 0.15~0.25의 범위이고 0.20 정도의 값을 추천하고 있다는 점에서 유사성이 있다. 반면, 파상 마찰계수는 설계기준별로 차이가 매우 크며, 국내 기준, ACI 318, BS 8110, 일본 기준은 값이 비교적 큰 반면 AASHTO 및 PCI는 값이 매우 작고 PTI, Eurocode, CEB-FIP Code는 그 중간 정도의 수준이다.

표 1 마찰계수값의 비교 (아연도금된 금속 시스)

	파상 마찰계수 k (/m)	곡률 마찰계수 μ (/radian)
콘크리트구조설계기준(2007) ¹⁾	0.0015~0.0066	0.15~0.25
도로교설계기준(2005) ²⁾	0.0015~0.0066	0.15~0.25
ACI 318-08(2008) ¹⁰⁾	0.0016~0.0066	0.15~0.25
AASHTO Standard Specification(2002) ³⁾	0.00066	0.15~0.25
AASHTO LRFD(2007) ⁴⁾	0.00066	0.15~0.25
PCI Bridge Design Manual(2003) ¹¹⁾	0.00066	0.20
PTI Post-Tensioning Manual(2006) ¹²⁾	0.0010~0.0023 (추천값: 0.0016)	0.14~0.22 (추천값: 0.18)
BS 8110(1997) ¹³⁾	0.0033 이상	0.20 또는 0.25 (강연선의 녹 관련)
Eurocode 2(1992) ¹⁴⁾	0.00095~0.0019	0.19
CEB-FIP Model Code(1993) ¹⁵⁾	0.00095~0.0019	0.19
일본콘크리트표준시방서 설계편(2007) ¹⁶⁾	0.004	0.30

3. 마찰계수의 추정방법 제안

제안된 식은 식 (1)과 같이 긴장단에서의 긴장력이 P_0 이고 긴장단에서 x 만큼 떨어진 곳까지의 각변화량이 α 일 때 마찰손실을 고려하여 긴장력 P_x 를 추정하는 식으로부터 유도된다.

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\alpha + kx)} \quad (1)$$

위치별로 변하는 긴장력을 고려할 때 긴장재의 신장량 Δl 은 엄밀히 말해 적분식을 통해서 구해야 하지만⁶⁾, 긴장력의 평균값 P_m 을 사용하여 식을 간략화시키면 $\Delta l = P_m l / E_p A_p$ 가 된다. 여기에서, l 은 긴장재의 길이, E_p 및 A_p 는 각각 긴장재의 탄성계수 및 단면적이다. 여기에서 긴장재 또는 텐던은 하나의 시스 안에 포함된 모든 강연선들을 통틀어 일컫는다. 또한, 긴장재의 형상이 직선 또는 포물선과 같이 긴장재를 따라 각변화가 거의 없거나 일정하고, $x=l$ 위치가 긴장작업시 임시 또는 영구적인 고정단에 해당되며, $\mu\alpha + kl$ 값이 충분히 작은 경우에는 긴장력의 분포가 선형에 가까우므로 $P_m = (P_0 + P_l)/2$ 로 가정할 수 있다. 이러한 값들을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\mu\alpha + kl = -\ln\left(\frac{2E_p A_p \Delta l}{P_0 l} - 1\right) \quad (2)$$

고려하는 교량에서 긴장재의 종류 및 표면 처리상태가 동일하고, 또한 μ 및 k 가 시스의 곡률이나 직경에 의존하지 않고 시스 재질에만 의존하는 값이라고 본다면 식 (2)에서 Δl 과 P_0 는 긴장시 기본적으로 측정하는 기지의 값이므로 식 (2)를 임의의 2개의 긴장재에 적용하면 미지수인 μ 및 k 값을 결정할 수 있다. 물론 이 경우 선택된 2개의 긴장재의 조합에 따라 미지수 값이 다르게 결정되므로 통계적인 분석을 요하게 된다.

만약 고정단에 로드셀(load cell)을 설치하여 고정단에서의 긴장력을 측정할 수 있다면 몇가지 가정이 포함되는 신장량 계산식을 배제하고 식 (1)을 직접적으로 임의의 2개 긴장재에 적용하여 마찰계수 값을 계산할 수 있으므로 정밀도가 향상될 것으로 생각된다.

4. 실패량의 마찰계수값 추정

제안된 식을 다양한 형상의 텐던에 대해 검증하고자 국내에서 시공된 PSC 교량을 2개 선정하여 긴장관리 자료를 확보하였다. 확보된 자료는 각 긴장재 및 시스의 제원, 길이, 각변화량, 신장량, 긴장력이다. 실제 긴장작업시에 기록되는 값은 압력값이므로 여기에 잭(피스톤)의 단면적을 곱해 긴장력을 산출하였다. 2개의 교량은 모두 ILM 방식으로 시공되었으며 긴장재는 곡률 변화가 크지 않은 1차 텐던과 포물선 형상에 가까워 곡률 변화가 큰 2차 텐던으로 이루어져 있다. 기록된 신장량과 긴장력을 식 (2)에 대입하고 분석하여 표 2와 같이 마찰계수값을 도출하였으며, 이를 실제 현장에서 적용할 긴장력을 산정할 때 고려했던 마찰계수값 및 설계기준상의 마찰계수값과 비교하였다. 교량 A에 대한 분석에는 총 34가지의 긴장재 조합이 사용되었고, 교량 B에는 총 114가지의 조합이 사용되었다.

표 2 제안식에 의한 마찰계수값

		교량 A		교량 B	
		파상 마찰계수 k (/m)	곡률 마찰계수 μ (/radian)	파상 마찰계수 k (/m)	곡률 마찰계수 μ (/radian)
제안된 식 (2)	평균	0.0014	0.30	0.0018	0.26
	변동계수	0.506	0.183	0.795	0.425
	95% 신뢰구간	0.0012~0.0016	0.28~0.32	0.0015~0.0021	0.24~0.28
현장 긴장작업시 가정한 값		0.002 (1차 텐던) 0.003 (2차 텐던)	0.25	0.0066	0.30
국내 설계기준 ^{1,2)}		0.0015~0.0066	0.15~0.25	0.0015~0.0066	0.15~0.25

표 2를 살펴보면 k 값은 비록 AASHTO 기준 상의 0.00066만큼 작지는 않았지만, 국내 설계기준의 하한치에 가까운 비교적 작은 값이 산출되었다. 이 값은 현장 긴장작업시 가정한 값, 즉, 설계 긴장력을 산출할 때 적용한 k 보다 교량 A는 30~53%, 교량 B는 73%가 작은 현저한 차이를 나타냈다. 한편,

μ 는 국내 기준의 상한치와 비슷하거나 다소 큰 값을 산출하였으며, 교량 A의 경우 현장 가정값보다 20%가 컸고, 교량 B는 반대로 15%가 작았다. 표준편차를 평균으로 나눈 변동계수로 판단해 볼 때 k 가 μ 보다 변동성이 컸다. 교량 B는 긴장시 실제 마찰계수보다 마찰계수를 과대평가한 경우에 해당되며 이 경우 실제로는 예상한 값 이상의 프리스트레스가 도입되어 긴장시의 상하연 응력이 과도할 가능성이 있음을 의미한다.

5. 결 론

이 연구에서는 긴장시 실측하는 신장량과 긴장력값을 활용하여 과상 및 곡률 마찰계수값을 역으로 유추할 수 있는 절차를 제안하였다. 제안된 식은 마찰계수에 대한 이론식, 신장량과 긴장력의 관계식, 긴장력 분포에 대한 가정으로부터 유도하였다. 실교량에 대한 분석 결과 과상 마찰계수는 국내 설계기준의 하한치에 가까운 값을 산출하였으며 이는 일반적으로 가정하는 값보다 현저히 작은 값이다. 한편, 곡률 마찰계수는 국내 설계기준의 상한치 또는 이를 다소 초과하는 값을 산출하였다. 추후 좀 더 많은 수의 교량에 대한 심층적인 분석을 통하여 합리적인 마찰계수의 범위를 추정하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 2006년도 한국도로공사의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준”, 2007.
2. 한국도로교통협회, “도로교설계기준”, 2005.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials, “Standard Specifications for Highway Bridges”, 17th Ed., 2002.
4. American Association of State Highway and Transportation Officials, “AASHTO LRFD Bridge Design Specifications”, 4th Ed., 2007.
5. 박영하, 강형택, “PS 강재의 인장관리를 위한 마찰평가법 적용 기준”, 대한토목학회 정기학술대회논문집, 대한토목학회, 2003, pp. 594-599.
6. 박영하, 길홍배, “마찰관리에 의한 PS강재 인장력 산정법의 오차 분석”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, 2004, pp. 106-111.
7. 정배근, 한경봉, 박선규, “PS 긴장재의 마찰손실량에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권, 제5-A호, 2000, pp. 797-804.
8. 문제길, 이재형, “PS 콘크리트 구조물에서 마찰손실을 고려한 긴장력 결정에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제17권, 제I-1호, 1997, pp. 89-99.
9. 한국콘크리트학회, “프리스트레싱 긴장재 마찰계수의 산정을 위한 자료조사 및 연구용역”, 2007.
10. American Concrete Institute, “Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-08)”, 2008.
11. Precast/Prestressed Concrete Institute, “Precast Prestressed Concrete Bridge Design Manual”, 2003.
12. Post-Tensioning Institute, “Post-Tensioning Manual”, 6th Ed., 2006.
13. British Standards Institution, “Structural Use of Concrete(BS 8110)”, 1997.
14. European Committee for Standardization, “Design of Concrete Structures(Eurocode 2)”, 1992.
15. Euro-International Committee for Concrete, “CEB-FIP Model Code”, 1993.
16. 日本土木學會, “コンクリート標準示方書(設計編)”, 2007.