

국내산 7연강선의 트랜스퍼 정착부착 실험

Transfer Bond test on Domestic Sevenwire Prestressing Strands

김 승 옥 * 김대훈* 유 재천** 유 승룡***
Kim Seung Wook Kim, Dae Hoon Ryu, Jae Chon Yu, Sung Yong

ABSTRACT

The bond performance of prestressing strands is still not well understood and is still in controversy on the validity of the test results up to today, although it is a basic information to design the prestressed pretensioned concrete beams. Different transfer length has been found for a product of the same company, but of the different production methods and factories in the United States. It is necessary to determine optimum transfer bond length of the domestic strands because the ultimate flexural and shear capacity in a section of prestressed concrete beams are evaluated under the assumption that the anchorage bond failure shall not happen.

The transfer length of low-relaxation, Gr 270, and 1/2" seven-wire prestressing strands from four domestic companies will be evaluated by the concrete strain method. The recent concept of the 95 % Maximum Average Strain Method suggested by Russel et al. will be considered to obtain the transfer length of domestic strands. It will be also evaluated if the domestic strands are conform to ACI 318-95.

1. 서론

프리스트레스트 구조는 자중을 포함한 외력으로부터 발생하는 콘크리트의 인장응력을 감소시키기 위하여, 구조물에 외력을 적용하기 전에 미리 긴장력을 가하여 그 내력을 강화시킨 구조체이다. PS 부재에서는 강선의 긴장력이 콘크리트로의 전달을 필요로 하는데, 프리텐션 부재의 경우 강선의 긴장력 전달은 콘크리트와 강선 사이의 정착부착력(anchorage bond strength)에 의하여 이루어진다. 강선의 초기긴장력(initial prestressing force)이 콘크리트로 유효하게 전달되는데 요구되는 거리를 초기정착길이(transfer length)라 한다.

Hoyer¹⁾ 이론에 따르면 프리텐션부재는 포스트텐션과는 달리 강선과 콘크리트의 정착부착력으로 그 긴장력을 유지하며, 이 정착부착력은 강선의 거칠기와 강선단면적의 응력 차이로 인한 증대에 기인한다.

이 정착 부착력은 강선의 초기정착길이(transfer length)와 전체정착길이(development length)를 결정하며, 전체정착길이 안에 가해진 집중하중은 조기 정착구파괴(premature bond failure)를 일으키며, 정착구파괴는 주로 취성파괴의 양상을 띄게 된다. 프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트 보의 위험단면에서 최대 휨·전단강도에 대한 강도설계규준은 정착부착파괴가 일어나지 않는다는 가정 하에서 규정

* 정회원, 동국대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 삼성물산 주택개발부문 PC설계팀 전무

*** 정회원, 동국대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구는 과학기술정책관리 연구소 (Stepi)와 삼성물산 건설부문의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

되었으므로, 올바른 강도예측을 위하여, 초기정착길이와 전체정착길이에 대한 실질적인 예상치가 먼저 규정되어야 한다.

기존의 국외에서 진행된 트랜스퍼 실험의 결과에 따르면 강선의 초기정착길이는 많은 변수들에 의하여 영향을 받는 것으로 밝혀졌으며 강선의 표면조건이 가장 큰 변수로 알려져 있다. 또한 갑작스러운 강선의 절단은 서서히 절단된 경우보다 더 길게 측정이 된 것으로 알려져 있다. 이러한 변수들로 인한 폭넓은 초기정착길이가 측정치에도 불구하고 최근의 연구들에서는 다음과 같은 분명한 관점들을 정립하였다.

1. 강선의 초기정착길이는 0.6in 강선 까지는 강선의 직경에 비례하여서 증가한다.
2. 강선의 초기정착길이는 강선절단후에 바로 성립이 되며 시간에 관계없이 불변으로 남아 있다.

본 연구에서는 국내에서 생산되는 4개사의 지름 12.7mm, 270Gr 7연 강선 들의 초기정착길이를 강선의 표면조건과 직경을 일정하게 하여 측정하였다. 실험은 강선 절단 전과 후, 강선위치의 콘크리트의 표면 변형치에 의한다. 실험결과로 얻어진 콘크리트 변형률에 최근 Russel과 Paulsgrove²⁾에 의하여 제안된 95% 최대 평균 변형률방법(95% Maximum Average Strain Method)에 근거하여 강선의 초기정착길이를 구하고, 강도설계규준(ACI 318-95)³⁾ 적용의 적합성 여부를 판별하게된다.

2. 초기정착길이 예측식

PS강선의 초기정착부착길이는 ACI 318-95³⁾에서 식(1)을 사용하여 예측할 수 있다.

$$L_t = C \frac{f_{se}}{3} d_b \quad (1)$$

여기서, f_{se} = 유효 강선응력(kg/cm²) d_b = 공칭 강선 직경(cm) $C = 0.014223$; 단위 환산치 Zia 와 Mostafa⁴⁾는 위의 식에서 3이라는 숫자를 콘크리트의 보수적인 평균강도(ksi)라고 규정하였고 그 간의 초기정착길이에 대한 연구들을 총괄하여서 식 (2)와 같은 추정식을 제안하였다.

$$L_t = 0.59 \frac{f_{si}}{f'_{ci}} d_b - 1.8 \quad (2)$$

여기서, f_{si} = 초기긴장 강선응력(kg/cm²) f'_{ci} = 강선 절단 시 콘크리트강도(kg/cm²)
 d_b = 공칭 강선 직경(cm)

위의 식은 다양한 초기콘크리트강도, f'_{ci} (140kg/cm²-560kg/cm²)를 강선의 초기정착길이 예측에 적용하였다는데 의미가 있다. 특히, 콘크리트의 강도가 낮을 경우, 더욱 유용하게 활용된다고 평가되었다.

3. 실험

3.1 재료

3.1.1 강선 & 철근

PS 강선은 가장 일반적으로 적용되는 저이완률(low-relaxation), 270 Gr. 7연 강선으로, 국내 4개 제조업체(M사, D사, K사, Y사)의 것을 하나씩 사용하였다. 강선은 공장생산 후 3일 안에 바로 실험하였다.

일반 철근은 항복강도 4,000 kg/cm²의 HD- 10 철근 두 개를 압축철근으로 사용하였고, 늑근으로 항복강도 3,000 kg/cm², 지름 6mm 원형철근을 사용하였다. 시험체의 상세와 각부의 명칭은 그림1, 2와 같다.

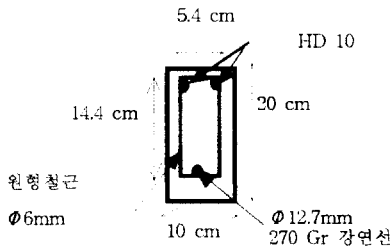


그림 1. 시험체 단면 상세

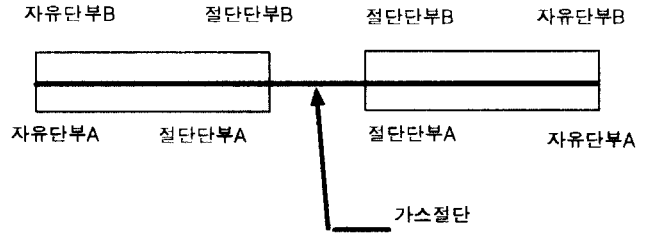


그림 2. 시험체 단부 이름

3.2.2 콘크리트

설계기준강도 500 kg/cm^2 의 콘크리트 배합설계는 그림 3과 같다. 콘크리트 배합 표에 나온 재료무게를 계량하여, 건 비빔 후 수평 회전믹서기로 비빔을 하였다.

수평 회전믹서기로 비벼진 고강도 콘크리트를 거푸집 안에 타설하면서 막대 진동기로 다져주었고, 상부의 표면은 흙손으로 마감하였다. 콘크리트가 응결된 후, 콘크리트는 젖은 포목으로 약 16시간정도 습윤 양생시킨 후 탈형 하였다. 강선 절단시의 콘크리트강도는 그림4와 같다.

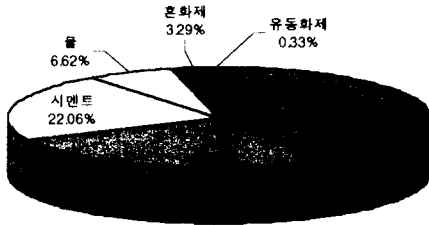


그림 3. 콘크리트 배합설계

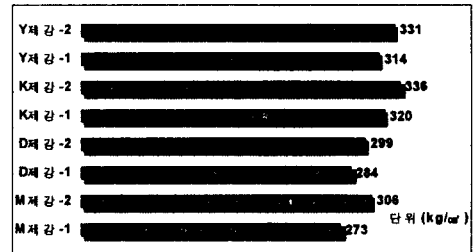


그림 4. 콘크리트 압축강도

3.3 실험절차

- 1) PS 강선은 거푸집을 통과하여 설치되었고, 늑근 위에 놓이도록 설치하였다. PS 강선은 50 ton 용량 유공 유압잭을 사용, 전동펌프로 긴장시켰다.
- 2) 초기에 약 2-3ton 정도의 긴장력을 강선에 가한 후 강선 중심선과 좌우 끝높이를 조절하여 강선의 위치를 재 교정시켜 주었다. 위치가 교정된 강선을 종국강도의 80%, 약 14.5-15.5ton까지 긴장시켰다.
- 3) 콘크리트 타설후 약 16시간 경과 후 거푸집을 탈형하고 강선 위치에서 먹줄로 콘크리트 표면에 표시한 후, 게이지포인트를 5cm(오차 0.1mm) 간격으로 접착시켰다(그림6 참조).
- 5) 강선을 자르기 전, 초기 게이지포인트 값을 보 양면에서 디지털 다이얼게이지(오차 $\pm 2/1,000\text{mm}$)를 이용하여 측정하였다.
- 6) 보 단부에서의 강선 슬립을 측정하기 위하여 LVDT와 다이얼게이지를 설치하였다.
- 7) 초기콘크리트강도(f'_{ci})가 $300 \pm 35\text{kg/cm}^2$ 에 도달하면, 아세틸렌 가스로 강선을 절단하였다. 강선의 절단속도가 초기정착길이에 영향을 줄 수 있으므로 서서히 가열하였다. 절단후, 자유단 단부에서 강선 잔여길이는 보 단부로 부터 30cm 정도 남겨놓고 전기톱을 사용하여 잘라내었다.
- 8) 강선 절단 후 단부슬립을 측정하고 게이지 포인트 사이의 거리를 디지털 게이지를 사용하여 긴장력전달에 의한 콘크리트 표면수축량을 측정하여 기록한 후 변형률을 계산하였다.

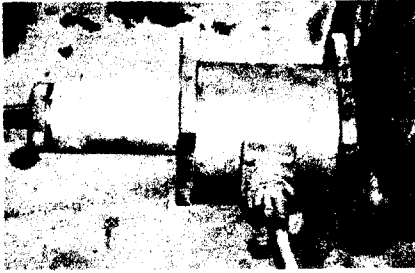


그림 5. 유공 로드셀 설치

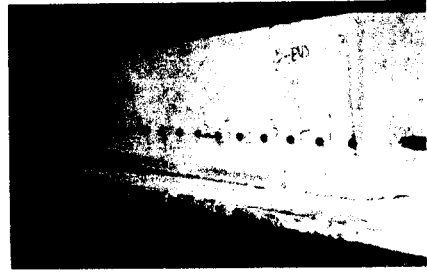


그림 6. 게이지포인트 부착

3. 실험결과

3.1 개요

콘크리트의 변형률곡선은 세 부분으로 구분할 수 있다. 보 단부에서 선형적으로 증가하는 직선 영역, 즉 초기정착길이의 영역을 볼 수 있고, 연결되어 곡선으로 변하여 최대 변형률 영역에 도달되는 전이영역이 존재하며, 그후 일정한 값의 최대 변형률 영역으로 구분할 수 있다.

전이영역에서 초기정착길이에 포함되는 길이를 규정하기 위하여, 최근 Russell과 Paulsgrove²⁾가 제안한 95% 최대 평균 변형률방법(95% Maximum Average Strain Method)을 적용하였다. 변형률 곡선이 직선영역 끝, 직선으로부터 벗어나는 지점에서부터 유효 강선응력이 콘크리트 압축응력으로 완전히 전달된 것으로 볼 수 있으므로, 그 지점까지의 거리를 초기정착길이로 하였다. 이 지점은 평균 최대 변형률의 95%되는 직선과 일정 기울기의 선형적 증가 직선이 만나는 곳에서 일어난다.

3.2 초기정착길이 실험결과

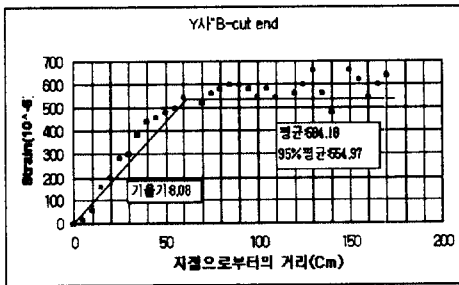


그림 7. 초기정착길이 실험결과와의 예
(YA B절단 단부)

9.5%정도 더 길게 측정되었다. 국내 강선 제조회사중 Y제강과 M제강이 비교적 우수한 초기정착길이를 보여주고 있다. 또한, 절단단부(cut-end)가 자유단부(free-end)보다 약 9.5%정도 더 길게 측정되었다.

강선긴장력 전달로 인한 콘크리트 변형률을 각 게이지 포인트 5cm마다 강선 절단 전 초기 측정(initial reading)과 절단 후 후기측정(final reading)의 차이로 측정하였다. 강선 절단 전과 후의 강선 위치 콘크리트 표면변형률 차이를 측정된 결과 그림 7과 같은 변형률분포를 보였다.

측정된 콘크리트 변형률에 근거하여 95% 최대 평균 변형률 방법(95% Maximum Average Strain Method)으로 각 시험체의 초기정착길이를 산정하여 표4와 같이 정리하였다. 표4를보면 국내 강선 제조회사중 Y제강과 M제강이 비교적 우수한 초기정착길이를 보여주고 있고, 또한 절단단부(cut-end)가 자유단부(free-end)보다 약

표 4. 초기정착길이 실험 결과

시험체 No.	초기정착길이						강선의 초기 긴장력 P_1 (ton)	콘크리트강도 f'_{ca} (kg/cm ²)	Zia 등의 추정식(2) L_t (cm)	ACI의 추정식(1)	
	A자유단부 (Cm)	B자유단부 (Cm)	평균 (Cm)	A절단단부 (Cm)	B절단단부 (Cm)	평균 (Cm)				fse(kg/cm ²)	L_t (cm)
M제강-1	52	64	58	N/A	73	73	15.07	273	101.54	11839.27	71.29
M제강-2	N/A	58	58	73	72	73	15.07	306	90.13	11898.33	71.64
D제강-1	61	77	69	66	73	69	15.05	284	97.55	11860.37	71.41
D제강-2	69	64	66	78	82	80	15.05	298	92.76	11912.4	71.73
K제강-1	75	66	70	82	65	73	15.82	320	90.67	12675.95	76.32
K제강-2	65	68	66	68	70	69	15.82	336	85.99	12727.27	76.63
Y제강-1	67	69	68	68	64	66	14.92	314	86.75	11897.63	71.64
Y제강-2	56	N/A	56	57	55	56	14.92	331	82.29	11908.18	71.69
평균	64	67	64	71	69	69	15.21	307	90.96	12069.925	72.79

위의 표4에서 보는 것과 같이 초기정착길이는 프레임 컷 절단단부에서는 55cm에서 82cm사이의 값으로 평균 69cm이며, 자유단부에서는 52cm에서 77cm 사이의 값으로 평균 64cm를 산출하였다.

프레임 컷 단부에서의 값은 자유단부에서 관찰된 값보다 더 일정치 않았는데 그 이유는 강선절단방법에서 기인된 것으로서 사료가 된다. 또한 각 초기정착길이는 강선 초기 긴장력이 클수록 길게 측정이 되었으나 강선 절단시의 콘크리트강도와는 무관하게 측정되었다. 국내 강선 제조회사중 Y제강과 M제강이 비교적 우수한 초기정착길이를 보여주고 있다. 또한, 절단단부(cut-end)가 자유단부(free-end)보다 약 9.5%정도 더 길게 측정되었다.

표4에서 보면 각 시험체의 초기정착길이를 강도설계 추정식(1)³⁾과 Zia 등의 추정식(2)⁴⁾를 적용하여 산출하였다. 강도설계의 추정식 결과를 도출하기 위하여 PCI제안 설계방법에 의하여 긴장력 손실을 계산하여 유효 강선응력을 구한 다음 식(2)에 의하여 표4와 같이 비교 검토되었다. 또한, Zia 와 Mostafa⁴⁾의 초기정착길이 추정식에 이 실험 데이터를 입력하여 비교하였다.

본 실험에서의 측정된 초기정착길이 실험결과는 강도설계 추정치 보다 절단 단부에서는 2.28cm, 자유 단 단부에서는 8.4cm 짧게 산출되었으나 일반적으로 유사한 결과를 보여주었고, Zia 등의 추정식(2)⁴⁾은 평균 22.96cm가 더 길게 산출이 되었다. 그러므로 Zia 등의 추정식(2)⁴⁾이 강도설계 추정식(1)보다 보수적임을 알 수 있다. 근래 외국에서 실시된 저이완률(Low-relaxation), 270 Gr. 일반 칠연강선의 트랜스퍼 실험 결과치와 본 연구에서의 비교를 표5와 같이 정리하였다.

표 5. 근래의 국외연구 결과치와의 비교

연구자	강선 절단 시 콘크리트의 강도(kg/cm ²)	초기정착길이(cm)
Counsins 등 (1990)	303.8	126.24
Shahawy 등 (1992)	357.7	76.45
Deatherage 등 (1994)	347.2	60.19
Russell & Burns (1996)	306.6	76.2
Russell & Burns (1997)	250.6	106.68
본 연구 평균	308.18	67.59

3.3 강선 슬립

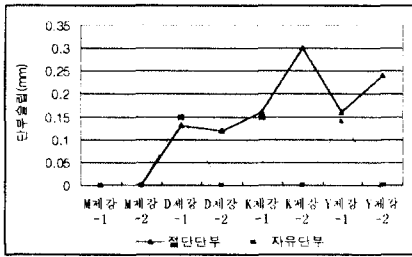


그림 8. 강선 절단시 단부슬립

Russell과 Rose⁵⁾는 그들의 연구 데이터를 근거로 강선 절단시에 생기는 단부의 강선 슬립은 또한 초기정착길이를 추정하는데 좋은 자료가 될 수 있다고 주장하였다. 그러나 강선 절단시에 생기는 단부의 강선 슬립은 강선절단시 생기는 시험체의 요동으로 인하여 그 측정이 매우 어려울뿐 아니라 다른 연구의 데이터와는 잘 맞지 않는 경향이 있다. 본 연구에서 단부 강선 슬립은 0.12에서 0.3mm 분포로 측정되었다. 그림 8에서 M제강-1, 2, D제강-2의 자유단부, K제강-2의 자유단부, Y제강-2의 자유단부는 강선절단시 시험체의 요동이 심하여서 바르게 측정되지 않았으므로 삭제하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 Russell과 Paulsgrove²⁾에 의하여 제안된 95% 최대 평균 변형률 방법을 실험결과로 얻어진 콘크리트 변형률에 적용하여 강선의 초기정착길이를 구할 수 있었다. 이 결과치로 국내 강선에 강도설계 정착부착 규준(ACI 318-95)³⁾적용의 적합성 여부를 판별하였다. 기존의 실험데이터와 본 연구에서의 실험 데이터를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 측정된 콘크리트 변형률에 근거한 초기정착길이는 프레임 컷 절단 단부에서는 56cm에서 80cm사이의 값으로 평균 70cm이며, 자유단부에서는 56cm에서 70cm사이의 값으로 평균 64cm를 산출하였다. 프레임 컷 단부에서의 값은 자유단부에서 관찰된 값보다 더 일정치 않았다.

2) 본 실험에서 사용된 강선 들의 초기정착길이는 극한강도 설계, 초기정착길이 규준 추정치 보다 절단 단부에서는 2cm, 자유단 단부에서는 8cm 짧게 산출되었다. 강도설계 규준 규준 치와 일반적으로 유사한 결과를 산출함으로써, 극한강도 설계에서 요구되는 초기정착길이의 규준에 충분히 적합한 것으로 판단된다.

3) 초기정착길이는 강선 초기긴장력 크기에 직접적인 영향을 받으나, 강선 절단시의 콘크리트 강도에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

5.참고문헌

- Hoyer, E. and Friedrich, E., "Beitrag zur Frage der Hafspannung in Eisenbeton-bauteinten," Beton und Eisen, Vol. 38, No.6, Berlin, 1939, pp. 107-110.
- Russell, B. W. and Paulsgrove, G. A., "Fundamental Mechanism for the Development of Prestensioned Strands," University of Oklahoma, July.
- ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-95), American Concrete Institute, Detroit, MI, 1995.
- Zia, P. and Mostafa, T., "Development Length of Prestressing Strands," PCI Journal, Vol. 22, No. 5, September-October 1977, pp. 54-65.
- Russell, B. W. and Rose, D. R., "Investigation of Prestressing Strand," University of Oklahoma, July, 1996. 21. ACI commitee 423.