

사점재하 보시험에 의한 국내산 7연강선의 전체정착길이 실험

An Experimental Test for the Development Length of Domestic Seven-wire Prestressing Strands

김대훈* 유 승룡**
Kim, Dae Hoon Yu, Sung Yong

Abstract

The main objective of this project is to define the ultimate bond performance of domestic prestressing strands in the precast prestensioned concrete beams. Eight specimens from four different companies were fabricated and tested in this study. Four-point loading tests were performed on the beams of domestic strands with an arbitrary anchorage length.

The research has shown, that all seven specimens except one failed in bond are capable of developing their full flexural capacity and the strands within them are fully anchored even with the sudden transfer of frame cutting. Following results are summarized from the tests conducted. 1) All of the specimens are tested at an embedment lengths much shorter than those required by the ACI code, failed in flexure except one failed in bond. 2) It seems that the beam depth can not be an effective variable to estimate the bond length within these sections and length of specimens on this tests. 3) The development length with the stirrup space which are considered for correction factors in the equations of Russel and Paulsgrove, is fully accurate to determine the required length for the beam tested in this research.

1. 서론

PS 강선의 전체정착길이(development length)는 프리스트레스트 콘크리트보의 강선용력이 설계강선용력(f_{ps})에 도달할 때까지 정착구파괴가 발생되지 않기 위한 최소한의 정착길이를 말하며, 프리스트레스트 콘크리트보의 최대 휨·전단강도에 대한 강도설계기준은 정착구의 부착파괴가 일어나지 않는다는 가정 하에서 규정되었다. 프리스트레스트 콘크리트 부재가 정착구 파괴를 일으킨다면 취성파괴의 양상을 띄므로 올바른 강도예측과 안전한 설계를 위하여, 먼저 사용 강선의 초기정착길이와 전체정착길이에 대한 실질적인 예상치가 먼저 규정되어야 한다.

본 연구의 주 목적은 강도설계기준¹⁾(ACI 318-95)에서 요구되는 전체정착부착길이에 근접하여 하중을 적용하여, 그 파괴형태를 규명함으로써 국내강선의 강도설계기준에 대한 적합성과 최근의 Russell과 Paulsgrove²⁾에 의한 연구결과에서 주장되는 전체정착부착길이에 대한 타당성을 확인하려 한다.

* 정회원, 동국대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 동국대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구는 한국 과학기술평가원(Kistep) 과 삼성물산 주택개발부문 PC 설계팀의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

2. 극한 강도설계 제안식과 Russell 등의 제안식

2.1 개요

ACI 318-95 규준¹⁾의 전체정착길이 식은 다음과 같다.

$$L_d = C \left(\frac{f_{se}}{3} d_b + (f_{ps} - f_{se}) d_b \right) = C \left(f_{ps} - \frac{2}{3} f_{se} \right) d_b \quad (1)$$

여기서, f_{ps} =보파괴 시 강선응력(kg/cm²) f_{se} =유효 강선응력(kg/cm²)
 d_b =강선 공칭지름(cm) C=단위 환산계수, 0.014223

1963년 ACI와 AASHTO에서 제안된 (1)식의 처음 $(f_{se}/3)d_b$ 는 초기정착길이를 말하고, $(f_{ps} - f_{se})d_b$ 는 휨부착 길이를 말한다. 강도설계규준¹⁾의 전체정착길이 산정식은 Hanson과 Karr³⁾의 휨부착길이에 대한 실험을 근거로 하고 있다. 초기정착길이는 강선 긴장력이 콘크리트로 완전히 전달되는데 필요한 길이이며, 휨부착길이는 외부하중으로 인하여 부재가 변형을 일으킬 때 강선이 콘크리트로부터 미끄러지지 않기 위하여 요구되는 거리이다. 근래의 많은 연구에서 강선의 전체정착길이를 추정하는 ACI 규준의 식(1)은 너무 보수적인 결과가 산출된다는 주장과 더불어 최근에 Russell & Paulsgrove²⁾는 실험에서 도출된 초기정착길이를 적용하여 전체정착부착길이 산정식(2)을 선형 탄성해법에 의하여 제시하였다. 식 (3)과 (4)는 안전률을 고려하여, 스트립간격과 유효춤을 각각 고려하였다. Russell 과 Paulsgrove²⁾는 두 값중 작은 값의 적용을 권장하였고 또한, 설계를 위하여, 12cm 추가 안전률을 권장하였다.

$$L_1 = L_t \times \frac{M_n}{M_{cr}} \quad (2) \quad , \quad L_{2s} = (L_t + L_{ms}) \times \frac{M_n}{M_{cr}} \quad (3) \quad , \quad L_{2d} = (L_t + L_{md}) \times \frac{M_n}{M_{cr}} \quad (4)$$

여기서, L_1 L_{2s} L_{2d} = 전체정착부착길이 L_t = 트랜스퍼 실험에서 측정된 초기정착길이
 L_{ms} = 늑근간격 으로 계산되는 기계적 마찰 저항길이 L_{md} = 유효춤으로 계산되는 기계적 마찰 저항길이
 M_{cr} = 계산된 균열 휨강도 M_n = 공칭 휨강도

식(2)의 사용을 위한 제한은 다음과 같다.

1. 단순보 시험체에 근거한 예측식.
2. 집중 하중에 근거한 예측식.
3. 완전 정착 부착된 직선 강선에 대한 예측식.

3. 실험

3.1 시험체 생산

시험체는 동국대학교 UTM 구조실험실에서 생산되었다. 프리스트레스 실험 거푸집은 3mm두께 C-형강을 이용 반복 사용할 수 있도록 조립되었으며, 그 지지부는 I형강에 PS 지지부를 용접함으로써 만들었다.

한 강선 회사당 단면 10 x 20 cm, 길이 4.3 m의 두개의 시험체를 함께 생산하였으며, 각 시험체 단부에서 정착길이를 구하였다(그림1 참조).

3.2 재료

3.2.1 강재

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

일반 철근은 항복강도 $3,000 \text{ kg/cm}^2$ 의 HD- 10 철근 두 개를 압축철근으로 사용하였고, 늑근으로 항복강도 $3,000 \text{ kg/cm}^2$, 지름 6mm 원형철근을 사용하였다(그림1 참조).

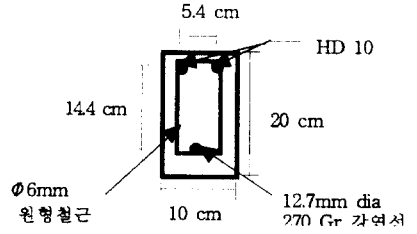


그림1. 시험체 단면 상세

3.2.2 콘크리트

28일 설계강도 500 kg/cm^2 의 콘크리트 배합설계와 각 시험체당 4개씩의 콘크리트 평균 압축강도는 그림 2, 3과 같다.

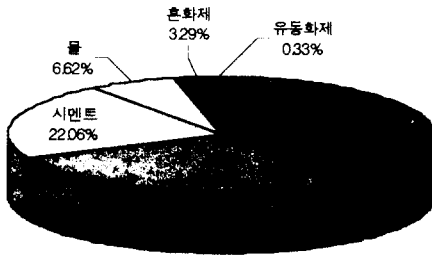


그림 2. 콘크리트 배합설계

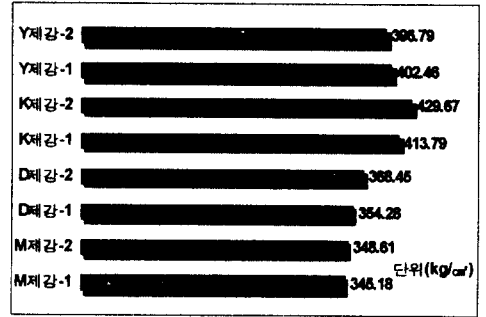


그림 3. 콘크리트 압축강도

3.3 실험방법

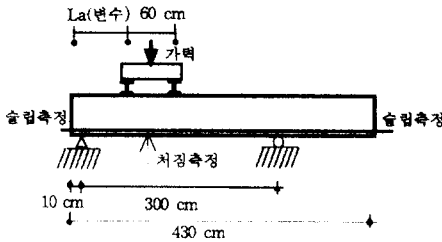


그림 4. 전체정착길이 실험 개요



그림 5. 전체정착길이 실험 프레임

시험체는 그림 4와 같이 지지대 위에 단순지지 형태로 놓여지며, 좌측 단부에서 첫 번째 지점은 시험

체 단부에서 10cm 떨어진 곳에 위치시킨다. 지지점 간의 거리는 300cm이고 H형강 가력보 정중앙에 가력 접을 위치시켰으며 가력보는 60cm간격의 두 개의 로울러 지지점에 의해 단순지지 되었다. 그림 4, 5와 같이 가용정착길이- L_a (available bond length)를 변화시켜 좌측의 슬립측정이 일정 하중재하 하에서 하중-슬립 관계가 비선형으로 증가되는 하중이 존재하면 그 하중을 정착부 파괴의 종국하중으로 간주하였다. 가용정착길이, L_a (available bond length)는 다음과 같이 구성하여 적용하였다.

1) 지지점으로 부터 첫 번째 하중은 보 단부로부터 Russell & Paulsgrove²⁾식으로 예측된 L_e 의 위치에 위치시켰다. L_{ms} 는 유효춤(d_b), 또는 늑근간격을 적용시킬수 있으나, 이 실험에서는 유효춤 15.5cm를 고려치 않고, 5~15cm의 늑근간격 효과를 확인하기 위하여, 늑근값을 L_{ms} 로 적용하였다.

2) Russell & Paulsgrove²⁾의 설계 정착길이를 L_e 에 12cm를 더한 설계 길이로 적용할 것을 권장하였으나, 본 실험에서는 이 안전률이 너무 보수적이어서 다음의 3)과 같이 고려하였다.

3) M사-1(L_e+12cm), M사-2(L_e), D사-1(L_e+6cm), D사-2(L_e+3cm), K사와 Y사는 모두 L_e 만을 적용시켜서 실험을 하였다. 시험체의 단부와 하중지지에는 LVDT를 설치하여 슬립과 처짐을 기록하였고, 이 데이터는 로드셀로부터의 하중데이터와 함께 기록되었다.

4. 실험결과

4.1 전체정착길이 결과 분석

본 연구 프로그램의 주목적은 프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트보의 극한 상태에서 PS 강선의 거동을 연구하는 것이다. 이를 위하여, 요구되는 전체 정착부착길이에 근접하여 하중을 적용하여, 그 한계상태의 파괴형태를 규명함으로써 국내강선의 강도설계 기준과 최근의 합리적인 연구결과에서 요구되는 전체정착부착길이에 대한 적합성을 확인하려 한다. 실험에 의하여 측정된 초기정착길이는 표 1의 ①항에 기술되어있다. 식 (3), (4)중 큰 값을 채택하도록 Russell과 Paulsgrove²⁾는 추천하고 있으나, 본 연구에서는 식(3)을 기초로 L_e 를 구하여서 실제 실험에서는 ②항과 같이 구성하여 실험에 적용하였다.

표 1. 시험체의 전단스팬과 파괴양상

시험체	① L_e , (cm)	Russell et al.			ACI 식(1),(cm)	실험에적용한 가용정착길이 ② L_e , (cm)	최종 파괴 방법
		L_{1s} 식(2), (cm)	L_{2s} 식(3), (cm)	L_{2a} 식(4), (cm)			
M제강-1	73.89	124.7	133.1	150.8	166.6	L_e+12 145.1	휨파괴
M제강-2	73.04	122.7	139.5	148.7	166.1	L_e 139.5	정착파괴
D제강-1	69.93	117.9	134.7	144.0	166.8	L_e+6 140.7	휨파괴
D제강-2	66.89	112.4	137.5	139.0	167.0	L_e+3 140.5	휨파괴
K제강-1	73.87	117.7	133.6	142.4	159.9	L_e 133.6	휨파괴
K제강-2	69.46	110.3	134.1	134.9	159.8	L_e 134.1	휨파괴
Y제강-1	68.61	115.5	132.3	141.5	168.8	L_e 132.3	휨파괴
Y제강-2	56.70	95.3	120.6	121.4	168.4	L_e 120.6	휨파괴

표 1에서 보듯이, ACI 318-95¹⁾의 전체정착부착길이 요구는 식 (3)에서 도출된 값보다 일반적으로 훨씬 더 크게 제시되어있다. 본 실험에서는 식 (3)에서 정한 값보다 일반적으로 약 10cm가 더 길고 ACI 318-95¹⁾보다 약 43.2cm 더 짧은 평균 정착길이에에서 실험되었다. 표 1의 모든 시험체는 ACI 요구식(1)

에 의하여 계산된 값보다 훨씬 작은 가용정착길이를 적용하였으나 정착구 파괴는 M제강-2 시험체 하나만 제외하고 휨 파괴로 파괴되었다. 이는 강도설계의 정착부착식이 본 실험의 국내 강선길이 결과보다는 너무 보수적인 제한치로 판단된다. 또한, D제강-2를 제외한 모든 시험체가 Russell과 Paulsgrove²⁾의 보의 유효춤 적용에 의하여 요구된 길이에 훨씬 못 미치는 가용 정착길이를 보여주나 M제강-2 시험체에서만 정착구 파괴가 발생하였다. 즉, 단면 10x20 cm, 유효춤 15cm 시험체에서, 해당 유효춤이 정착길이를 예측하는데 효과적인 기준이 될 수 없음을 보여준다. 한편, 늑근간격을 고려한 (3)식에 의한 결과를 보면 실험결과는 M제강-1, D제강-1과 2, Y제강-2의 결과와 일치하며, M제강-2, K제강-1과 2, Y제강-2의 경우는 실험에서 적용한 가용정착길이가와 요구식이 일치하므로, 정착구 파괴 1회와 휨파괴 3회를 산출한 것으로 판단된다.

그러나 M제강-2의 경우 식(2)에 의하여 제시된 값 122.7cm 보다 14.8cm 더 긴 정착길이에서도 정착구 파괴가 발생하였다. 이는 Russell과 Paulsgrove²⁾가 권장한 늑근간격 또는 유효춤으로 보정한 안전률이 안전적인 설계를 위하여 필요한 요구치라는 것을 보여준다.

또한, M제강-1을 제외한, 모든 시험체는 L_e (Russell의 추정식)에 12cm의 안전률을 적용치 않은 상태에서 시험한 것으로서, 정착길이가와 각 요구식, 파괴양상비교에서 Russell과 Paulsgrove²⁾의 전체정착길이 추정식은 늑근간격을 그 보정치로 할 때, 그 자체가 휨파괴와 정착구파괴의 경계위치로 사료된다.

4.2 하중-처짐 및 하중-슬립거동 예

정착구 파괴된 M제강-2 실험체의 하중-처짐 간의 관계를 도시한 그래프는 다음의 그림 6과 같다. 2.85 ton에서 첫 번째 균열이 발생되기 전까지는 보의 거동은 거의 선형 거동하지만, 첫 번째 균열이 발생된 후에는 보의 처짐은 하중이 증가함에 따라 매우 빠르게 비선형으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이 첫 번째 균열은 가력점 근처(지점에서 1.38m 떨어진 위치)에서 발생하였고, 거의 동시에 첫 균열에서 지점과 반대방향으로 22cm, 26cm 떨어져서 새로운 균열이 발생되어 계속해서 압축측으로 진행되었다.

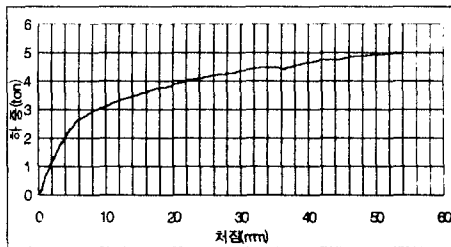


그림 6. 하중-처짐 곡선 M제강-2 절단단부

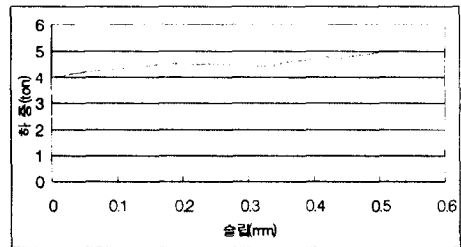


그림 7. 하중-슬립 곡선 M제강-2 단부

4.06ton에서 트랜스퍼 실험으로 확인된 초기정착길이(73cm) 부근(지점에서 75cm 위치)에서 균열이 발생됨과 동시에 단부슬립이 그림 7과 같이 시작되었다. 하중을 서서히 증가시키자 단부의 슬립이 계속 증가되어 4.5ton에서는 0.35mm까지 슬립이 증가하였다. 이후 하중증가가 멈춘 상태에서도 계속적인 슬립증가를 관찰할 수 있었다.

5. 결 론

실험결과에 의하면 각 시험체의 강선은 모두 완전히 정착부착 되었고, 정착구 파괴가 일어난 1개의 시험체를 제외한 모든 보가 충분히 휨성능을 발휘했다는 것을 보여준다. 휨강도는 변형 적합이론(strain compatibility)과 평형이론(Equilibrium theory)으로 예측한 값보다 평균 16% 더 컸다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 실험에서 사용된 모든 강선들은 극한강도설계 정착길이규준의 전체정착길이 요구식 적용에 적합하다고 사료된다.

2. 모든 시험체는 극한 강도설계 요구식에 의하여 계산된 값보다 훨씬 작은 가용 정착길이를 적용하였으나 M제강-2 시험체 하나만 제외하고 휨파괴로 파괴되었다. 이는 강도설계의 정착부착식이 본 실험의 국내 강선길이 결과보다는 너무 보수적인 제한치로 판단된다.

3. D제강-2를 제외한 모든 시험체가 Russell과 Paulsgrove¹⁾의 보의 유효춤 적용에 의하여 요구된 길이에 훨씬 못 미치는 가용 정착길이를 보여주나 M제강-2 시험체에서만 정착구파괴가 발생하였다. 즉, 단면 10x20 cm, 유효춤 15cm 시험체에서, 해당 춤이 정착길이를 예측하는데 효과적인 기준이 될 수 없음을 보여준다.

4. 늑근간격을 고려한 실험결과에서 M제강-1, D제강-1과 2, Y제강-2의 결과와 일치하며, M제강-2, K제강-1과 2, Y제강-2의 경우는 실험에서 적용한 가용 정착길이와 요구식이 일치하므로, 정착구파괴 1회와 휨파괴 3회를 산출한 것으로 판단된다. 즉, Russell과 Paulsgrove¹⁾의 전체정착길이 추정식은 늑근간격을 그 보정치로 할 때, 그 자체가 본실험의 국내강선에 대한 휨파괴와 정착구파괴의 경계위치로 사료된다.

5. 강선의 정착부착길이를 위한 Russell이론에 대한 추가적인 검토를 위하여, 다른 단면강선과 콘크리트 강도에 대한 추가적인 실험이 요망된다.

6. 참고문헌

1. ACI 318-95, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-95) and Commentary(ACI 318-95)", Detroit, Michigan.
2. Russell, B. W., and Paulsgrove, G. A., "Fundamental Mechanism for the Development of Pretensioned Strands.", University of Oklahoma, July.
3. Hanson, N., and Karr, P., "Flexure Bond Tests of Prestressed Beams," ACI Journal, Proceedings, Vol. 55, No. 7, January 1959, pp. 783-803.
4. Zia, P., and Mostafa, T., "Development Length of Prestressing Strands." PCI Journal, V.22, No. 5, September-October 1977, pp. 54-56
5. Russell, B. W., and Burns, N. A., "Design Guidelines for Transfer, Development and Bonding of Large Diameter Seven-Wire Strands in Pretensioned Concrete Girder." Research Report No. 1210-5F, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Austin, TX, 1993, 286pp
6. Buckner, C. D., "A Review of Strand Development Length for Pretensioning Concrete Members", PCI Journal, Vol. 40, No.2, March-April, 1995, pp. 84-105.