

프리텐션 프리스트레스트

콘크리트 부재의 정착길이 평가

Article

04

Experimental study on development length of prestressing strand in pretensioned prestressed concrete members

김 의 성 *

현대산업개발 토목개발팀 부장

Abstract

By bond mechanism between the prestressing strand and the concrete surrounding it, the effective force of prestressing must be transferred to the concrete entirely. The distance required to transfer the effective force of prestressing is called the transfer length, and the development length is the bond length required to anchor the strand as it resists external loads on the member. Transfer length was determined from the concrete strain profile at the level of the strands at transfer and development length was determined from various external loading lengths and compared with current code equation. Through the test results, bond failure is predicted based on the distress caused by cracks when they propagate within the transfer zone of prestressing strand. The current code equation was found to be conservative in comparison with the measured value.

Keywords : bond, prestressing strand, transfer length, development length, bond failure, flexural failure

1. 서 론)

프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재(PSC)는 토목, 건축 분야 구조물 전반에 걸쳐 다양하게 사용되고 있으며 그 부착특성에 대한 연구들이 지속적으로 수행되고 있다³⁻¹¹⁾.

프리텐션 PSC 부재는 강연선의 유효 긴장력을 강연선과 이를 둘러싸고 있는 콘크리트의 부착응력에 의해 콘크리트에 전달함으로써 콘크리트 부재의 단점인 인장응력의 발생을 감소시키고자 하는 부재이다. 전달길이(transfer length)는 이러한 강연선의 유효 긴장력을 콘크리트로 전달시키는데 필요한 최소한의 길이이며, 정

* eskim@hyundai-dvp.com

착길이(development length)는 전달길이와 휨부착길이의 합으로써 외부에서 주어지는 하중에 의해 부착파괴를 일으키지 않는 최소한의 길이이다. 프리텐션 PSC 부재 단부에 외부하중이 작용할 때 그 작용거리가 정착길이보다 짧게 되면, 강연선이 부담하여야할 긴장력을 전달할 충분한 정착길이가 확보되지 못하기 때문에 강연선은 콘크리트 내부로 슬립이 발생하게 되며, 이로 인해 긴장력 손실이 발생하게 되어 부재의 취성파괴로 이어진다.

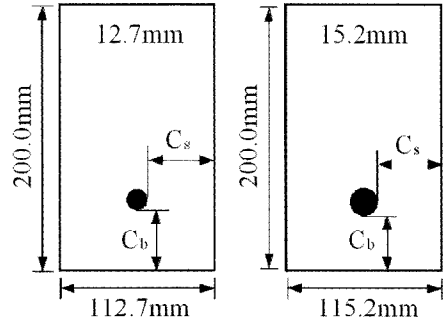
따라서 PSC구조물의 안전성 확보를 위한 정착길이의 정확한 산정과 그 영향 요인의 파악은 매우 중요하다 할 수 있으며, 이를 위해 본 연구에서는 PSC 부재 부착메커니즘의 실험적 이해와 이를 통한 전달길이의 산정, 그리고 외부하중에 의한 휨 및 부착파괴 거동분석을 통한 정착길이 평가를 실시하였다.

2. 실험

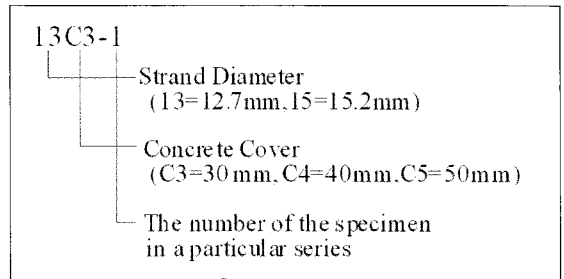
2.1 시험체 제작

본 연구에서는 극한강도 1,900MPa의 저응력이완 프리스트레싱 강연선(seven-wire strand)을 사용하였으며, 강연선 극한강도의 75%로 긴장하였다. 콘크리트의 압축강도는 긴장력 도입시 35MPa, 28일 설계강도 50MPa로 배합 설계하였으며, 부재의 길이는 3m로 휨 및 전단 파괴를 모두 유도할 수 있도록 하였다. 부재의 단면은 [Fig. 1]에서 보는 바와 같이 강연선 직경 12.7mm, 15.2mm에 대해 측면 피복두께(Cs)를 50mm로 일정하게 하고, 하면 피복두께(Cb)는 30, 40, 50mm로 변화시켜 이에 대한 영향을 평가하였다 시험 부재의 구분은 강연선의 직경과 콘크리트 피복두께를 변수로

하며 [Fig.2]와 같다.



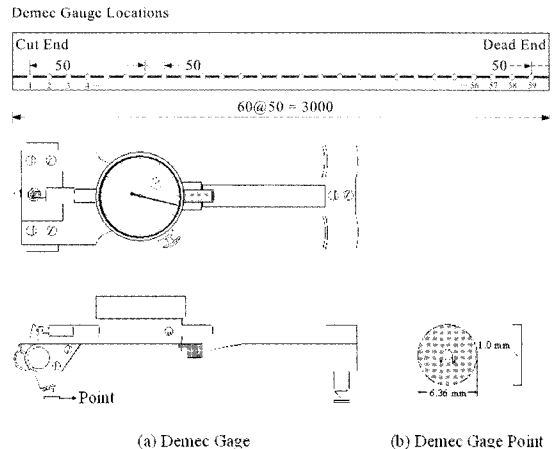
[Fig. 1] Cross sections of test specimens



[Fig. 2] Labelling of test specimens

2.2 전달길이 평가

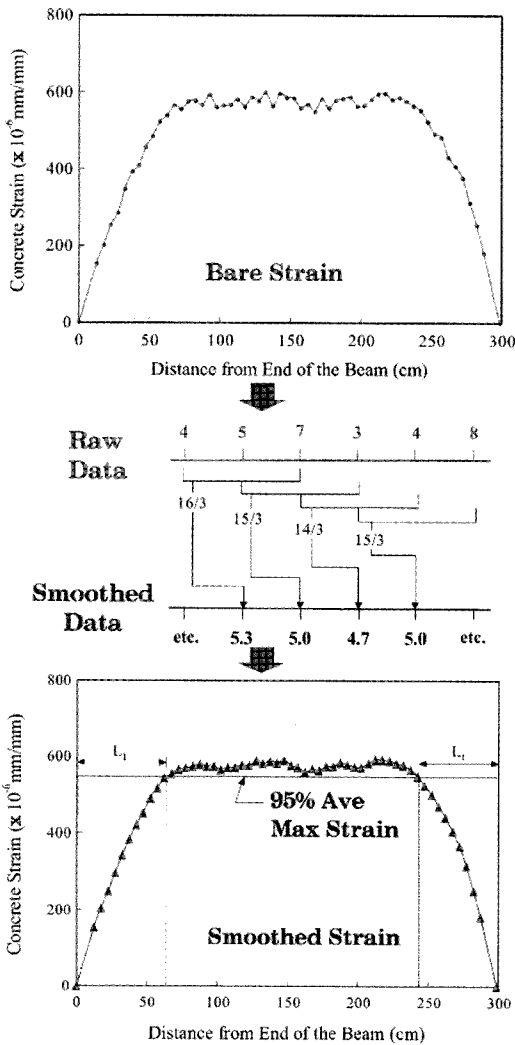
[Fig. 3]과 같이 부재 측면에 50mm 간격으로 변형률



[Fig. 3] Details of Demec gage and Demec gage point

측정센서(Demec gage point)를 부착한 후, 측정기기(Demec gage)를 이용하여 긴장력을 도입한 직후의 부재 길이방향 콘크리트 변형률을 측정하였다.

측정된 콘크리트 변형률로부터 [Fig. 4]에서 보는 바와 같이 95% AMSI 방법을 이용하여 부재의 전달길이를 산정하였다.

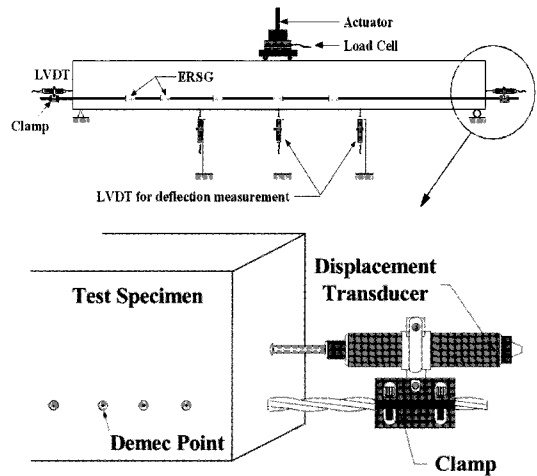


[Fig. 4] Calculation method of transfer length (95%AMS)

2.3. 정착길이 평가

정착길이는 재하위치에 따른 프리텐션 PSC 콘크리트 부재의 파괴거동에 의해 결정된다. 본 연구에서는 동일한 조건의 시험체를 대상으로 하중재하위치에 따른 부재거동을 분석함으로써 휨파괴와 부착파괴의 경계점을 평가하였다.

즉, 1개 실험 series당 4개의 시험 부재를 제작하여 순차적으로 하중재하를 실시하되 휨파괴가 발생하면 하중재하위치를 다시 조정하는 일련의 과정을 반복함으로써 부착파괴가 유도되는 경계 재하위치를 평가하였다(Fig. 5). 또한 부재 단부에 [Fig. 5]와 같은 길이변화 측정기를 설치하여 하중 재하시 강연선의 슬립 양을 측정하였다.



[Fig. 5] Instruments for evaluating development length

3. 실험결과 분석

3.1. 부착응력과 슬립과의 관계

강연선 변형률로부터의 응력과 콘크리트 변형률 값을 통한 강연선과 콘크리트의 상대 변형률 차로부터 슬립

을 산정하여 부착응력-슬립 관계를 도출하였다. 부착응력-슬립 그래프는 직경 12.7mm, 15.2mm 강연선에 대해 [Fig. 6], [Fig. 7]과 같다.

[Fig. 6], [Fig. 7]로부터 도출된 콘크리트와 강연선의 상대적인 부착응력-슬립 관계식은 다음과 같다.

직경 12.7mm 강연선의 부착응력-슬립 관계식

$$[\text{식 1}] \quad \tau = 13.797 \frac{(s)^{0.3301}}{d_b}$$

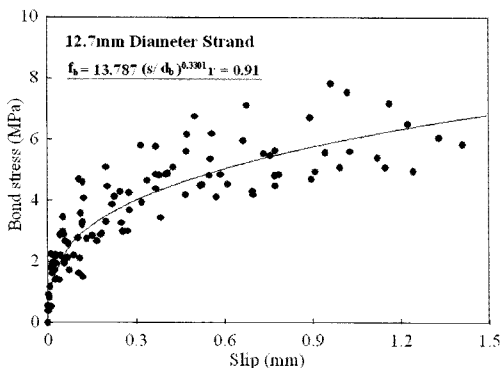
직경 15.2mm 강연선의 부착응력-슬립 관계식

$$[\text{식 2}] \quad \tau = 9.331 \frac{(s)^{0.2888}}{d_b}$$

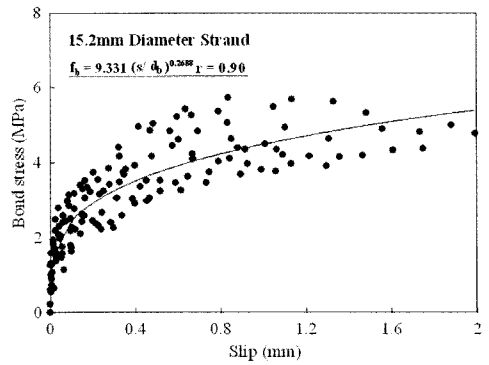
여기서, τ = 부착응력(MPa), s = 슬립(mm), d_b = 강연선의 직경(mm)

직경 15.2mm의 강연선의 경우 직경 12.7mm의 강연선에 비해 동일한 슬립에 의해 발생하는 부착응력의 크기가 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 부착응력-슬립의 관계식은 외부하중에 의해



[Fig. 6] Bond stress-slip relationship for Ø12.7mm strand



[Fig. 7] Bond stress-slip relationship for Ø15.2mm strand

프리텐션 PSC 부재에 의해 발생하는 균열 폭 및 간격을 예측하는데 유용하게 적용될 수 있다.

3.2. 전달길이 측정결과

긴장력 도입 직후 전달길이 측정 결과는 [Table 1]과 같다. 전달길이는 프리스트레싱 강연선의 직경이 클수록 커지는 양상을 나타내었으며, 콘크리트의 하부 피복

[Table 1] Test results of transfer length

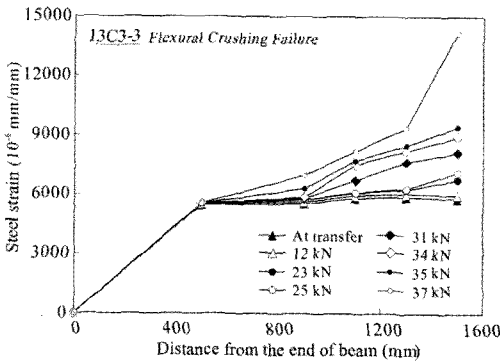
| 구분 | Ø12.7mm Strand | | Ø15.2mm Strand | | 평균 (mm) |
|--------|----------------|---------|----------------|-----------|---------|
| | 전달길이 (mm) | 평균 (mm) | 구분 | 전달길이 (mm) | |
| 13C3-1 | 753 | 737.5 | 15C3-1 | 897 | 874.8 |
| 13C3-2 | 724 | | 15C3-2 | 887 | |
| 13C3-3 | 732 | | 15C3-3 | 875 | |
| 13C3-4 | 741 | | 15C3-4 | 840 | |
| 13C3-1 | 675 | 668.5 | 15C4-1 | 712 | 730.0 |
| 13C3-2 | 680 | | 15C4-2 | 732 | |
| 13C3-3 | 665 | | 15C4-3 | 725 | |
| 13C3-4 | 654 | | 15C4-4 | 751 | |
| 13C5-1 | 620 | 623.5 | 15C5-1 | 690 | 674.8 |
| 13C5-2 | 634 | | 15C5-2 | 675 | |
| 13C5-3 | 615 | | 15C5-3 | 654 | |
| 13C5-4 | 625 | | 15C5-4 | 680 | |

두께가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

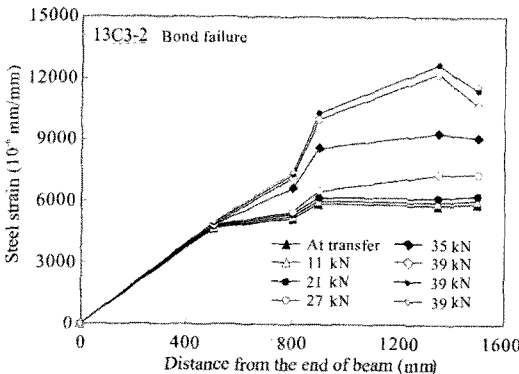
콘크리트 피복두께의 영향을 살펴보면, 피복두께 40mm, 50mm의 경우, Ø15.2mm의 강연선을 사용한 부재에서 Ø12.7mm를 사용한 부재에 비해 전달길이가 평균 8.5%정도 증가하였으나, 피복두께가 30mm인 경우에는 약 2배 정도인 18.6%가 증가하였다.

3.3. 정착길이 측정결과

정착길이 산정 시에는 재하시험 후 부재의 파괴모드를 평가하여야 한다. PSC 부재의 휨파괴시에는 일반적으로 상부 콘크리트의 변형률이 0.003을 초과하고, 단부



[Fig. 8] Strain distributions of prestressing strand(flexural failure)



[Fig. 9] Strain distributions of prestressing strand(bond failure)

의 강연선과 콘크리트 사이의 슬립이 발생하지 않는다.

또한 부재 단부에서 전달길이 사이 구간의 강연선 변형률이 하중에 의해 큰 변화를 보이지 않으며(Fig. 8) 하중 재하 위치 하면에서 상면으로 휨균열이 진행 된다.

부착파괴의 경우 외부하중에 의해 증가되는 강연선의 응력 증가분이 강연선과 콘크리트 사이의 부착력에 의해 평형상태를 이루지 못하고 슬립이 발생하여 강연선의 유효 프리스트레스가 손실된다. 이러한 급격한 유효 프리스트레스 손실로 인해 외부하중을 콘크리트가 전부 부담하게 되어 취성파괴가 발생하게 된다(4,8). 부착파괴 시에는 재하위치에서 단부 방향으로 사인장 균열 혹은 전단균열이 발생하며, 이러한 균열 발생 후 급격히 부재가 파괴되었다(Fig. 9).

시험부재별 재하위치에 따른 균열양상과 파괴모드는 [Fig. 10]과 같다.

[Table 2] Test results of development lengths

| 구분 | 재하 길이 (mm) | 파괴 모드 | 정착 길이 (mm) | 구분 | 재하 길이 (mm) | 파괴 모드 | 정착 길이 (mm) |
|--------|------------|-------|------------|--------|------------|-------|------------|
| 13C3-1 | 1350 | F | | 15C3-1 | 1200 | B | |
| 13C3-2 | 1300 | B | 1350 | 15C3-2 | 1550 | F | 1500 |
| 13C3-3 | 1425 | F | | 15C3-3 | 1400 | B | |
| 13C3-4 | 1200 | B | | 15C3-4 | 1430 | B | |
| 13C4-1 | 1400 | F | | 15C4-1 | 1425 | S/B | |
| 13C4-2 | 1200 | B | 1312 | 15C4-2 | 1275 | F | 1320 |
| 13C4-3 | 1275 | B | | 15C4-3 | 1200 | B | |
| 13C4-4 | 1350 | F | | 15C4-4 | 1350 | F | |
| 13C5-1 | 1200 | B | | 15C5-1 | 1200 | B | |
| 13C5-2 | 1300 | F | 1275 | 15C5-2 | 1300 | F | 1280 |
| 13C5-3 | 1400 | F | | 15C5-3 | 1400 | F | |
| 13C5-4 | 1250 | B | | 15C5-4 | 1250 | B | |

F : 휨파괴, B : 부착파괴

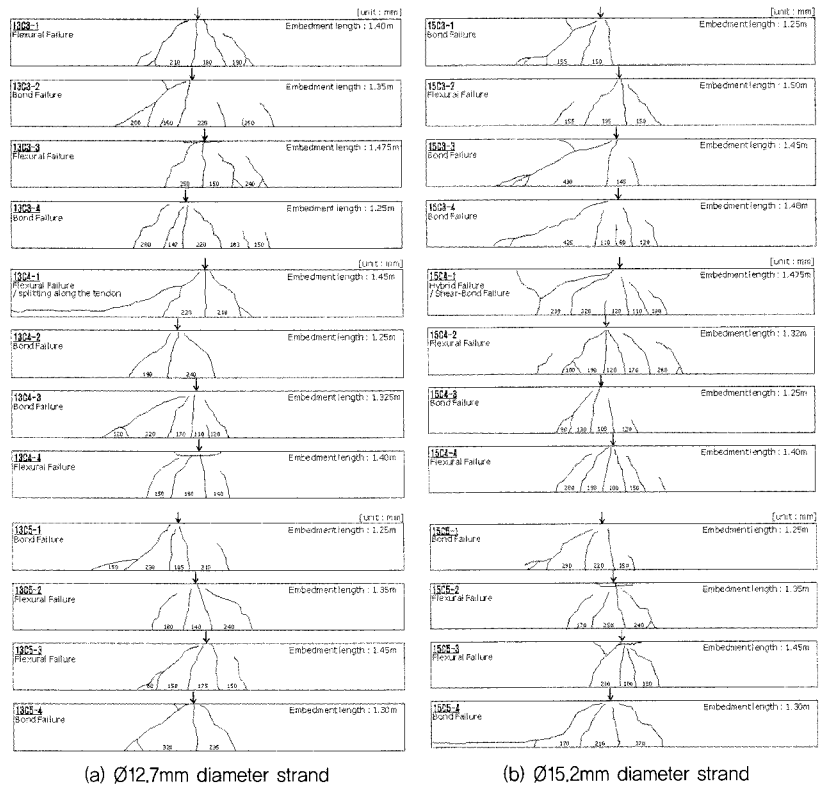
하중에 따른 시험부재의 처짐, 강연선-콘크리트 상대 슬립 그래프는 [Fig. 11]과 같다. 대부분의 경우 강연선의 슬립이 발생하는 경우는 부착파괴, 슬립이 발생하지 않는 경우는 휨파괴가 발생하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 평가된 정착길이 결과는 [Table 2], [Fig. 12]와 같다. [Fig. 12]에서 보듯 직경 15.2mm의 강연선을 적용한 경우 직경 12.7mm의 강연선을 적용한 경우보다 정착길이가 증가하는 것으로 나타났다. 12.7mm 직경의 강연선을 적용한 경우에는 콘크리트 피복두께가 증가할수록 정착길이가 선형적으로 감소하지만, 15.2mm 직경의 강연선을 적용한 경우에는 피복두께 30mm에서 정착길이의 급격한 증가를 보였다.

본 연구를 통해 도출된 정착길이 결과와 [식 3]과 같은 현 시방서 규정²⁾에 의한 정착길이를 [Fig. 13]에 비교하였다.

$$[식 3] \quad l_d = 0.145 \frac{(f_{se})}{3} + 0.145(f_{ps} - f_{se})$$

여기서, l_d = 정착길이(mm), f_{se} = 유효프리스트레싱 응력(MPa), f_{ps} = 설계시 강연선의 파괴응력(MPa)

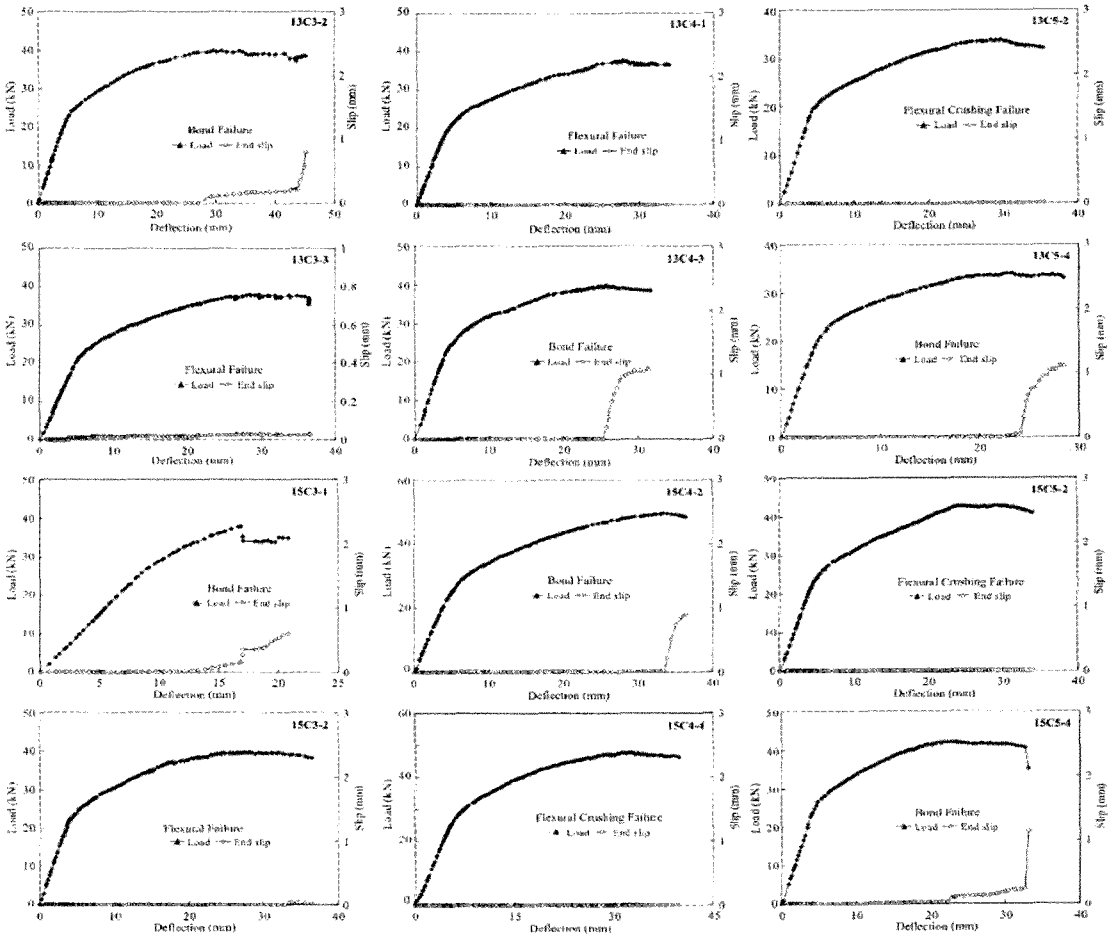


[Fig. 10] Crack patterns and failure modes of pretensioned prestressed concrete members

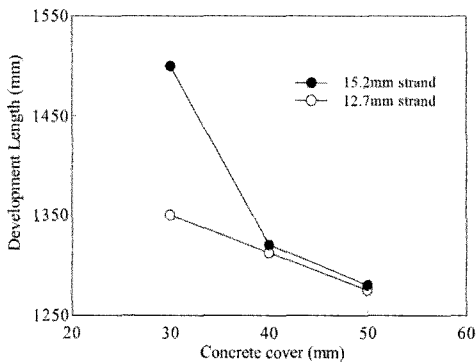
4. 결론 및 토의

본 연구에서는 프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재를 제작하여 전달길이 및 정착길이 평가를 위한 실험을 수행하였다. 실험을 통해 프리스트레싱 강연선의 콘크리트와의 부착응력-슬립 관계식을 도출하였으며, 강연선의 직경, 콘크리트 피복두께에 따른 전달길이를 평가하였다.

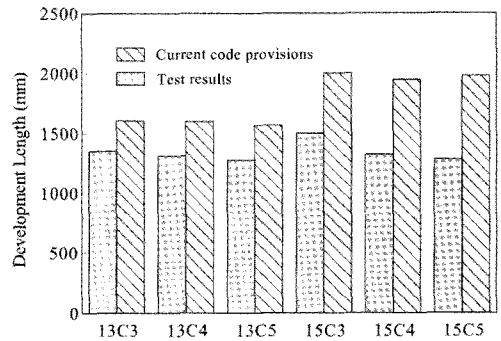
또한 하중재하 실험을 통해 부재의 파괴거동에 대한 분석을 실시하여 정착길이를 평가하였으며, 강연선의 직경 및 콘크리트 피복두께에 대한 영향을 분석하였다.



[Fig. 11] Load-deflection, load-end slip curves of pretensioned prestressed concrete members



[Fig. 12] Development length vs. concrete cover



[Fig. 13] Comparison between test results and code provisions

본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 직경 15.2mm 프리스트레싱 강연선의 경우 직경 12.7mm와 비교하여 동일한 슬립에 의해 발생하는 부착응력의 크기는 감소하였다.
- 2) 피복두께 40mm, 50mm의 경우, \varnothing 15.2mm의 강연선을 사용한 부재에서 \varnothing 12.7mm를 사용한 부재에 비해 전달길이가 평균 8.5%정도 증가하였으나, 피복두께가 30mm인 경우에는 약 2배 정도인 18.6%가 증가하였다.
- 3) 부착파괴의 경우 콘크리트 단부의 강연선과 콘크리트 사이의 슬립이 발생하면서 급작스러운 취성파괴가 발생하였으며, 재하위치에서 단부 방향으로 사인장 균열 혹은 전단균열이 진행되었다.
- 4) 전달길이가 비슷한 양상으로 직경 12.7mm의 강연선을 적용한 시편의 경우보다 직경 15.2mm의 강연선을 적용한 시편의 정착길이가 더 큰 값을 보였으며, 특히 15.2mm 직경의 강연선을 적용한 경우 피복두께 30mm에서 정착길이의 급격한 증가를 보였다.
- 5) 직경 12.7mm, 15.2mm를 적용한 본 실험시편의 정착길이 실험결과와는 현 시방서 규정에 의한 정착길이 산정결과 보다 다소 작게 나타났으며, 실험결과에 따르면 정착길이는 콘크리트 피복두께에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 하지만, 현행 시방서의 경우 콘크리트 피복두께의 영향을 고려하지 못하고 있어, 향후 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 김의성, 프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전달영역 해석 및 전달길이 예측, 박사학위논문, 서울대학교, 2000.
- 2) 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, p.348, 2005.
- 3) Kahn L.F. et al., "Transfer and Development Length of 15-mm Strand in High Performance Concrete Girders," Journal of structural engineering, ASCE, 128(7), 913-921, 2002.
- 4) Russell, B. W., Design Guidelines for Transfer, Development and Debonding of Large Diameter Seven-Wire Strands in Pretensioned Concrete Girders, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, TX, December 1992.
- 5) Russell, B. W., "Measurement of Transfer Lengths on Pretensioned Concrete Elements," Journal of structural engineering, ASCE, 123(5), 541-549, 1997.
- 6) Z. Lu et al., "Experimental Study of Transfer and Development Length of Fiber Reinforced Polymer Prestressing Strands," Structural Journal, ACI, 188, 781-790, 1999.
- 7) Kose M.M., "Prediction of Transfer Length of Prestressing Strands Using Neural Networks," Structural Journal, ACI, 104, 162-169, 2007.
- 8) Mitchell, D., Cook, W. D., Khan, A. A., and Tham, T., "Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioning Strand," PCI Journal, May-June, 52-66, 1993.
- 9) Abrishami, H. H., and Mitchell, D., "Bond Characteristics of Pretensioned Strand," Material Journal, ACI, May-June, 228-235, 1993.
- 10) Ujii, J.A. den., "Transfer length of prestressing strand in HPC, Progress in Concrete Research, 4, Delft, 75-90, 1995
- 11) Zia, P., and Mostafa, T., "Development Length of Prestressing Strands", PCI Journal, 22(5), September -October, 54-65, 1977.