

프리텐션 PSC부재의 전달길이 해석 및 예측에 관한 연구

오병환^{1)*} · 임시내²⁾ · 최영철³⁾

¹⁾ 서울대학교 토목공학과

(2003년 1월 21일 원고접수, 2004년 5월 21일 심사완료)

Finite Element Analysis of Transfer Length in Pretensioned Prestressed Concrete Members

Byung-Hwan Oh^{1)*}, Si-Nae Lim²⁾, and Young-Cheol Choi³⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

(Received January 21, 2003, Accepted May 21, 2004)

ABSTRACT

The transfer of prestress force in pretensioned prestressed concrete (PSC) members is of great concern because it affects directly the distribution of stress around the transfer zone. The design provision of current design code on the transfer length considers only the prestress intensity and the diameter of prestressing steels. However, other factors such as concrete compressive strength and concrete cover may affect greatly the transfer length. The purpose of the present paper is to explore the various factors that affect the transfer length in pretensioned PSC members. The bond stress-slip relation between prestressing steel and concrete was modeled first from experimental data and then this model was incorporated into the interface element. The interface element was used to perform the finite element analysis for pretensioned PSC members. The results indicate that the compressive strength and concrete cover are also very important parameters which affect the transfer length greatly. This means that the current design code, which considers only the effective prestress and diameter of prestressing steel, must be improved to take into account the other important variables of compressive strength and concrete cover. The present study allows more realistic analysis and design of pretensioned PSC members.

Keywords : transfer length, pretensioned prestressed concrete member, bond-slip relationship, finite element analysis, compressive strength

1. 서 론

국내외의 건설공사에 프리텐션 방식을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 구조물이 폭넓게 활용됨에 따라 프리텐션부재 단부에서의 응력전달에 관한 관심이 증가되고 있다. 프리텐션 PSC부재는 강연선의 긴장력이 콘크리트와 강연선 사이의 부착을 통해 콘크리트에 전달되는 부재이다. 이때 강연선의 프리스트레스 힘을 강연선과 콘크리트의 부착에 의해서 유효프리스트레스 응력까지 콘크리트에 전달시키는데 필요한 길이를 전달길이라 한다. 전달길이에 대한 현행 기준에서는 프리스트레스 힘의 크기와 PS 강재의 직경만을 고려하고 있으나 최근 진행되고 있는 연구들에 따르면 프리스트레스를 도입할 때의 콘크리트의 압축강도 및 콘크리트 피복두께 등을 포함한 다양한 인자들이 전달길이에 영향을 미치는 것으로 밝혀지고 있다¹⁻⁵⁾.

그러나 대부분의 연구들이 실험을 통해 나온 데이터를 종합하여 도출한 식을 제안하는 정도이다⁵⁻¹³⁾. 이렇게 실험을 하는 경우 시편을 제작하는 데에 많은 비용과 시간이 소비되는 문제가 발생하고 또한 경제적인 이유로 다양한 인자를 고려하는 것 역시 많은 어려움이 따르게 된다.

따라서 본 연구의 목적은 강연선의 직경과 유효프리스트레스의 크기뿐만 아니라 콘크리트의 압축강도와 콘크리트의 피복두께 등이 PSC부재의 전달길이에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고, 이 영향 인자들을 고려한 합리적인 전달길이 식을 제안하는데 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 실험으로부터 콘크리트와 강연선 사이의 부착응력-슬립 관계식을 도출하였고, 이 관계식을 계면요소(interface element)에 도입하여 유한요소해석을 실시하였다.

즉, 다양한 설계변수에 대하여 각각 유한요소해석을 실시하여 각 변수가 전달길이에 미치는 영향을 분석하고 이를 바탕으로 설계시 사용할 수 있는 전달길이의 예측식을 유도하여 제안하였다.

* Corresponding author

Tel : 02-880-7350 Fax : 02-887-0349

E-mail : civilcon@gong.snu.ac.kr

2. 기존 연구 및 현행 설계기준에서의 전달길이 기준

2.1 기존 연구의 전달길이

Martin and Scott는 ACI규정으로는 적용할 수 없는 공간이 짧은 보에 대한 대안을 제시하였다¹³⁾. 그들은 Hanson과 Kaar가 실시한 실험결과를 재해석함으로써 bilinear 형태의 전달길이 식을 제안하였다.

Zia and Mostafa는 과거 실험한 자료들을 종합 분석하여 회귀분석을 통해 전달길이에 대한 식을 제시하였다⁶⁾. 그들은 기존 ACI규정의 전달길이에 대한 식과는 달리 사용된 강선의 직경(d_b)과 초기프리스트레스 응력(f_{si}), 전달시의 콘크리트 강도 f_{ci}' 를 추가로 고려하였다. 또한 순간 전달(sudden release)과 점진적 전달(gradual release)로 나누어 각각 식을 제시하였다.

$$\text{sudden release : } L_t = 1.5 \frac{f_{si}}{f_{ci}} d_b - 4.6 \quad (1)$$

$$\text{gradual release : } L_t = 1.3 \frac{f_{si}}{f_{ci}} d_b - 2.3 \quad (2)$$

이들의 결과는 직경이 작은 강선에 대해서는 ACI규정과 비슷한 결과를 보이지만 콘크리트 강도가 작을 때는 보수적인 결과를 보인다.

Hom은 1964년 Anderdon, Rider, Sozen이 실험한 결과를 통해 전달길이를 유효프리스트레스 응력(f_{se})과 강선 단면적(A_p)의 함수로 제안한 것을 바탕으로 다음과 같은 전달길이 식을 제시하였다¹²⁾.

$$L_t = 2.40 f_{se} A_p (1.40 - 0.90 d_b) \quad (3)$$

Cousins 등은 최대 부착응력 (U_t)을 콘크리트 강도의 제곱근으로 나눈 값 U_t' 와 탄성영역 내의 부착계수 B로 전달길이 식을 나타내었다⁸⁾.

$$L_t = 0.5 \frac{U_t' \sqrt{f_{ci}'}}{B} + \frac{f_{se} A_{ps}}{\pi d_b U_t' \sqrt{f_{ci}'}} \quad (4)$$

2.2 현행 설계기준의 전달길이 기준

(1) 국내 규정

현행 프리텐션 부재의 전달길이를 규정하고 있는 국내 시방서에서는 ACI규정과 마찬가지로 강선의 유효프리스트레스 응력과 강선 직경의 함수로만 전달길이를 나타내고 있다.

Table 1 The value of K in JSCE

Strand type	K
Plain or indented wire	100
Deformed wire or multi-wire strands	65

$$l_t = 0.015 \frac{f_{pe} d_b}{3} \quad (5)$$

여기서, l_t : 전달길이(cm), d_b : 강선의 직경(cm)

f_{pe} : 유효프리스트레스 응력(kgf/cm²)

(2) 미국 ACI 규정

$$l_t = \frac{1}{3} f_{pe} d_b \quad (6)$$

여기서, l_t : 전달길이(in), d_b : 강선의 직경(in)

f_{pe} : 유효프리스트레스 응력(ksi)

이 식은 1963년 ACI Code에 처음 제안되어 설계에 기본으로 사용되고 있으며 AASHTO에서도 채택하여 사용하고 있다. 현재 우리나라에서도 미국 ACI규정을 채택하고 있다.

(3) 일본 토목학회(JSCE) 규정

$$l_t = K d_b \quad (7)$$

여기서, K: 강선의 종류에 따라 결정되는 상수

3. 전달길이 실험 및 콘크리트와 강선 사이의 부착응력-슬립 관계

3.1 실험변수 및 측정

다음은 실험에 사용된 콘크리트부재의 실험 변수이다.

- ① 강선 직경 ($\phi 12.7$ mm, $\phi 15.2$ mm)
- ② 콘크리트 피복두께 (30 mm, 40 mm, 50 mm)
- ③ 콘크리트 압축강도 (35 MPa, 50 MPa)

전달길이는 부재 길이 방향의 콘크리트 변형률 또는 강연선 변형률 분포 모두를 통해 결정할 수 있지만 강연선과 콘크리트와의 경계면의 중요성을 고려하여 경계면에서의 부착성능을 저해하지 않는 방법이 선호되어, 측정된 콘크리트 변형률 분포를 전달길이 결정의 기준으로 삼았다.

콘크리트의 변형률 분포는 Demec 게이지를 이용한 기계적 변형계로 측정하였다.

3.2 전달길이 실험결과

전달길이는 프리스트레스 힘을 정착한 후 보의 길이방향으로 강선 위치에서의 콘크리트 변형률을 측정하여 도시한 후 이로부터 전달길이를 결정하였다.

실험 결과는 다음 Fig. 1과 같다.

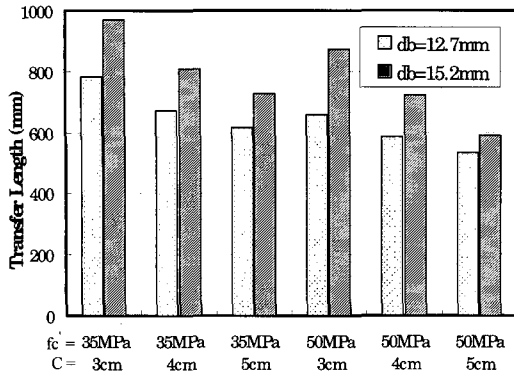


Fig. 1 Test results of transfer length

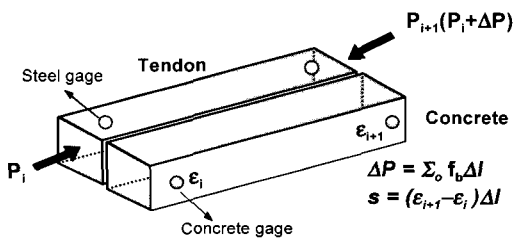


Fig. 2 Calculation of bond strand and slip

3.3 콘크리트와 강선 사이의 부착응력과 슬립과의 관계

강선과 콘크리트 사이의 부착응력-슬립의 관계는 정착 시에 강선의 증가된 응력과 콘크리트의 표면에서 측정된 변형률 결과 값으로부터 얻는다. 강선의 증가된 응력은 Fig. 2와 같이 철근 게이지로부터 산정하며 강선의 증가된 응력은 부착응력에 의해서 콘크리트에 전달되기 때문에 식 (8)에 의해 부착응력을 구할 수 있다. 그리고 콘크리트 표면에서 측정된 변형률 결과로부터 식 (9)에 의해 이에 해당하는 슬립을 얻을 수 있다.

$$f_b = \frac{P_{i+1} - P_i}{\sum_o \Delta l} = \frac{\Delta P}{\sum_o \Delta l} \quad (8)$$

$$s = (\epsilon_{i+1} - \epsilon_i) \Delta l \quad (9)$$

여기서, Δl = 측정 단위길이, s = 슬립, f_b = 부착응력

상기 식 (8)과 (9)를 이용하여 실제 측정된 변형률을 이용하여 직경 12.7mm와 15.2mm 강연선의 부착응력과 슬립을 구할 수 있다. 이렇게 하여 측정된 값들을 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3 과 4이다. 이 부착응력과 슬립관계를 가장 잘 표현할 수 있는 식은 지수형태의 함수로서 본 연구에서는 다음 식 (10)의 형태를 선정하였다.

$$f_b(x) = \alpha_0 \left(\frac{s(x)}{d_b} \right)^\beta \quad (10)$$

여기서, d_b = 텐던의 직경, α_0 와 β = 실험 상수

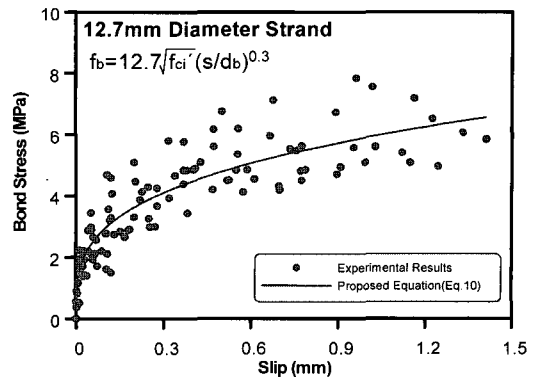


Fig. 3 Bond stress-slip relation (12.7 mm strand)

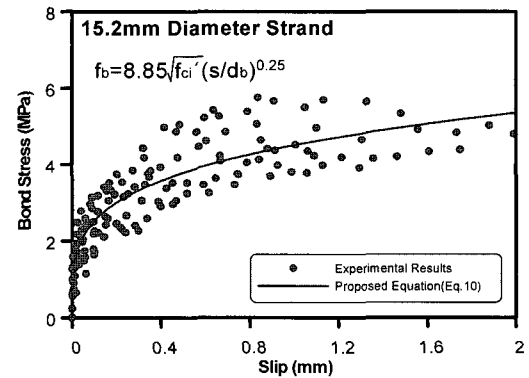


Fig. 4 Bond stress-slip relation (15.2 mm strand)

실제로 부착응력은 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있으며⁹⁾, 따라서 식 (10)에 압축강도 항을 포함하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$f_b(x) = \alpha \sqrt{f_{ci}'} \left(\frac{s(x)}{d_b} \right)^\beta \quad (11)$$

상기 측정값들로부터 식 (11)을 회귀분석하여 도출된 예측식은 아래와 같으며 Fig. 3 과 4에 실선으로 도시되어 있다.

$$f_b(x) = 12.7 \sqrt{f_{ci}'} \left(\frac{s(x)}{d_b} \right)^{0.3} \text{ for 12.7 mm strand} \quad (12)$$

$$f_b(x) = 8.85 \sqrt{f_{ci}'} \left(\frac{s(x)}{d_b} \right)^{0.25} \text{ for 15.2 mm strand} \quad (13)$$

상기 식들이 다음 절에서 수행되는 유한요소해석에서 강선과 콘크리트사이의 계면요소의 특성으로 그대로 이용되어 실제적인 해석이 이루어지게 된다.

4. 유한요소해석을 통한 전달길이 산정

4.1 해석 개요

본 연구에서는 실험 결과로부터 도출된 콘크리트와 강선의 부착-슬립관계를 통해 구한 부착응력-슬립의 관계식

을 이용하여 전달길이를 구하고자 한다. 비선형 유한요소 해석을 위하여 범용 프로그램인 DIANA를 사용하였다. 3차원 해석을 수행하였고, 부착과 슬립의 관계를 모델링하기 위해 콘크리트와 강선 사이에 계면요소를 도입하였다.

콘크리트는 20절점의 solid요소를 사용하였고, 강선은 20절점의 solid요소를 사용하였다. 콘크리트 압축 파괴기준으로 Drucker-Prager model을 사용하였고, 균열거동을 모델링하기 위하여 분산 균열모델(smearred crack model)을 사용하였다. 콘크리트의 인장응력-변형도의 관계는 최대응력 이후의 거동을 선형으로 모델하여 선형인장연화(linear tension softening) 모델을 사용하였다(Fig. 6참조). 콘크리트와 강선 사이의 계면에는 16절점의 면계면 요소를 사용하였다. 비선형 해석에는 Newton-Rapson method를 사용하였다. 해석에 사용된 모든 상수들은 부착응력-슬립 실험에서 도출된 값을 사용하였다.

4.2 해석모델의 구성 및 해석방법

4.2.1 강선의 모델

강선은 아래 Fig. 5에서 보는 바와 같이 선형거동을 보인 이후에 비선형 거동을 한다.

이 연구에서 사용된 강선의 극한강도는 1862MPa이고 항복강도 이상으로 재킹하지 않고 유효프리스트레스응력이 선형구간에 존재한다는 가정 하에 선형해석을 하였다. 강선을 모델링하기 위해서 20절점의 solid요소를 사용하였고 탄성계수 $E_p=196$ GPa, 푸아송비 $\nu=0.3$ 을 사용하였다.

4.2.2 콘크리트의 모델

콘크리트를 모델링하기 위해서 20절점의 solid요소를 사용하였고, 재료성질은 부착-슬립 실험에서 얻은 값을 사용하였다. 콘크리트 압축 파괴기준으로 Drucker-Prager model을 따르고 인장파괴기준은 다음 Fig. 6과 같이 선형의 인장연화로 모델하였다.

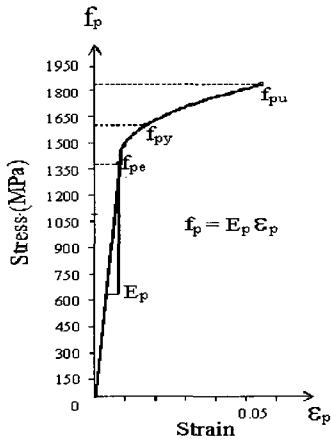


Fig. 5 Stress-strain relationship of strand

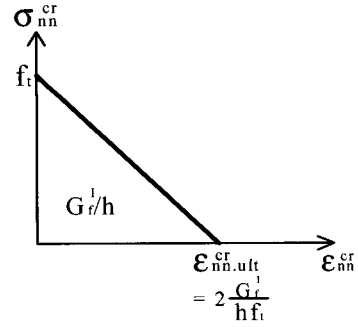


Fig. 6 Tension softening model

4.2.3 강선과 콘크리트의 계면요소

본 연구에서는 콘크리트와 강선 사이의 부착특성을 모델링하기 위하여 계면요소를 도입하였다. 계면요소는 부착면에서의 법선방향 힘과 변위 그리고 전단방향의 힘과 변위거동을 모델링한다. 이러한 계면요소는 연결방법에 따라 절점계면요소, 선계면요소, 그리고 면계면요소 등으로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 좀 더 실제에 가까운 면계면요소를 사용하였다. 즉 Fig. 7에서 보는 바와 같이 한 면이 8절점인 면계면 요소를 도입하였으며 변위와 traction 성분을 보여주고 있다.

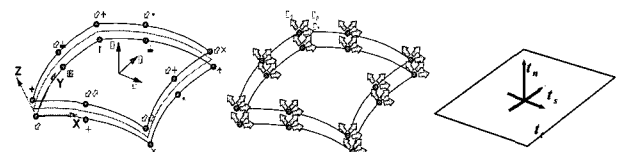
Fig. 7에서 보는 바와 같이 본 요소의 기본변수는 절점 변위 \mathbf{u} , 상대변위 $\Delta\mathbf{u}$, 그리고 traction \mathbf{t} 이다.

$$\mathbf{u}_e = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \quad \Delta\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_s \\ \Delta u_t \end{Bmatrix} \quad \mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} \quad (14)$$

서로 마주보는 절점, 즉 절점 1과 9, 2와 10, 3과 11, 4와 12, 5와 13, 6과 14, 7과 15 그리고 절점 8과 16은 절점 번호는 서로 다르지만 같은 좌표를 공유한다. 즉, 한 좌표에 대해서 두 개의 절점이 존재한다. 이들 두 절점사이의 상대변위 $\Delta\mathbf{u}$ 에 의해서 다음 식 (15)와 같이 계면에서의 힘이 결정된다.

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{Bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{여기서, } D_{22} = \frac{D_{11}}{2(1+\nu)} \quad (16)$$



(a) topology (b) displacement (c) tractions

Fig. 7 Interface element configuration and variables

4.2.4 프리텐션 부재의 모델링 및 해석 방법

프리텐션 부재의 경우 강선은 재킹이 될 때 단면적이 피아송비 만큼 줄어들었다가 프리스트레스 힘이 도입되면 초기의 응력이 방출되면서 횡적으로 확대되면서 초기모양으로 회복하려고 하는 특징이 있다. 이 때 강선의 횡적 팽창을 콘크리트가 제어하게 되는데 강선에 접하고 있는 콘크리트에는 강선의 둘레방향으로 인장응력이 발생하게 되고 이로 인해 Fig. 8과 같이 주변에 미세한 균열이 발생할 수 있다. 이런 영향을 제어하는 것이 콘크리트의 피복두께이다. 그런데 이러한 현상을 2차원 모델로는 표현할 수 없어 Fig. 9에서 보이는 바와 같이 3차원 모델을 사용하였다. Fig. 10은 해석에 사용된 경계조건으로 전달면이 아닌 1/4단면만으로 대칭조건을 이용하였다. 강선에 작용하는 프리스트레스힘은 강선요소에 initial stress의 형태로 도입하여 하중을 제어하는 해석방법을 이용하였다.

4.3 전달길이 해석결과와 실험결과와의 비교

앞 절의 실험결과와 해석을 통해 구한 전달길이를 비교하였다. Fig. 11 과 12는 직경 12.7mm일 때의 전달길이와 직경 15.2mm일 때의 전달길이를 각각 실험결과와 해석결과 그리고 현재의 시방서 규정과 비교한 것이다.

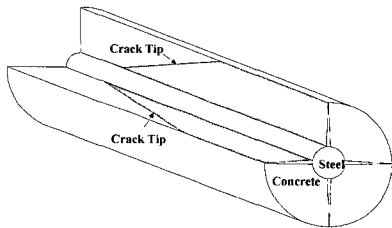


Fig. 8 Concrete crack pattern by prestressing

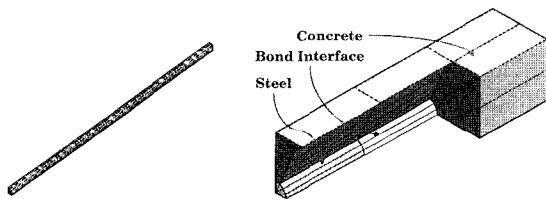


Fig. 9 Three-dimensional modeling of PSC beam

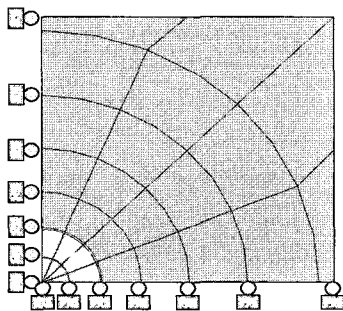


Fig. 10 Boundary condition for PSC beam

Table 2에서 보는 바와 같이 실험결과와 해석결과가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 즉, 강선과 콘크리트 사이의 부착-슬립관계를 실제 부착실험으로부터 구하고 이로부터 계면요소를 구성하여 3차원 해석을 수행한 전달길이 해석결과가 실험에서 얻어진 전달길이와 잘 맞고 있음을 보여주고 있어 해석의 적정성을 입증하고 있다.

따라서 이러한 합리적인 해석을 바탕으로 피복두께와 콘크리트 압축강도 등을 포함한 다양한 설계변수들에 대한 전달길이의 영향을 알아보기 위해 포괄적인 매개변수 해석을 실시하였다.

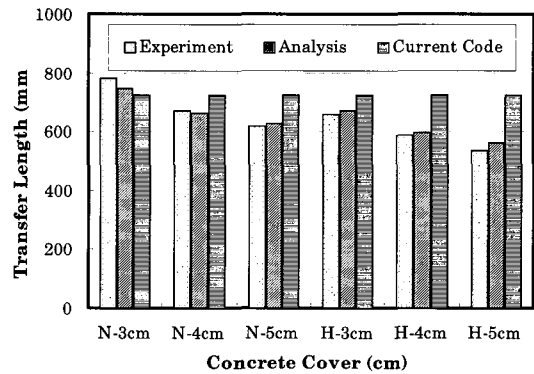


Fig. 11 Transfer length of 12.7 mm strand

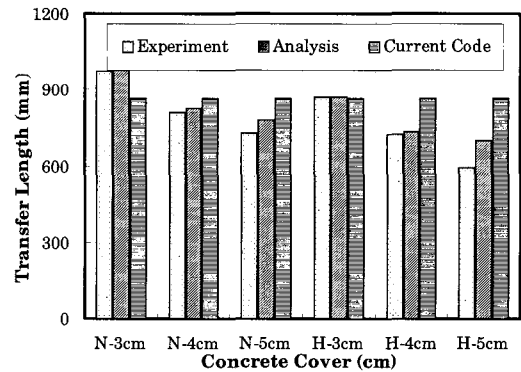


Fig. 12 Transfer length of 15.2 mm strand

Table 2 Comparison of transfer length

d _b	f _{ci}	Transfer length		Current code (mm)
		Analysis (mm)	Experiment (mm)	
12.7 mm	N-3cm(35MPa)	747	781	724
	N-4cm(35MPa)	661	669	
	N-5cm(35MPa)	627	617	
	H-3cm(50MPa)	669	658	
	H-4cm(50MPa)	596	587	
	H-5cm(50MPa)	562	533	
15.2 mm	N-3cm(35MPa)	975	971	866
	N-4cm(35MPa)	823	809	
	N-5cm(35MPa)	779	727	
	H-3cm(50MPa)	873	872	
	H-4cm(50MPa)	735	722	
	H-5cm(50MPa)	697	591	

4.4 각 설계 변수가 전달길이에 미치는 영향 분석

4.4.1 해석변수 및 해석수행

본 연구에서는 전달길이에 가장 영향을 미치는 강선의 직경과 유효프리스트레스 크기, 콘크리트 피복두께, 콘크리트 압축강도의 네 가지 변수를 바탕으로 해석을 수행하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강선 직경(d_b): 12.7mm, 15.2mm
- (2) 유효프리스트레스 크기(f_{pe}): $f_{pe}=0.40f_{pu}$, $f_{pe}=0.45f_{pu}$, $f_{pe}=0.50f_{pu}$, $f_{pe}=0.55f_{pu}$, $f_{pe}=0.60f_{pu}$, $f_{pe}=0.65f_{pu}$, $f_{pe}=0.70f_{pu}$, $f_{pe}=0.75f_{pu}$
- (3) 콘크리트 피복두께(C): 30mm, 40mm, 50mm, 60mm
- (4) 콘크리트 압축강도(f_{ci}): 35MPa, 40MPa, 50MPa, 60MPa

4.4.2 해석결과

(1) 강선의 직경에 따른 전달길이의 변화

Fig. 13은 직경의 변화에 따른 거리별 슬립의 변화를 보이고 있다. 이 그림에서 보듯이 강선의 직경이 클수록 단부 슬립이 커지는 것을 알 수 있다. Table 3은 직경 12.7mm와 직경 15.2mm의 강선에 대한 전달길이를 비교한 것이다. 이에 따르면 직경 15.2mm 강선의 전달길이가 직경 12.7mm 강선의 전달길이에 비해 31%가량 큰 것을 알 수 있다. Fig. 14는 직경의 변화와 전달길이와의 상관관계를 보여주고 있다.

(2) 유효프리스트레스 크기에 따른 전달길이의 변화

Fig. 15는 유효프리스트레스 크기의 변화에 따른 거리별 슬립의 변화를 보이고 있다. 이 그림에서 보듯이 유효프리스트레스 f_{pe} 가 클수록 단부 슬립의 양이 커지는 것을 알 수 있다. 다음의 Table 4는 유효프리스트레스가 인장강도

Table 3 Transfer length by strand diameter

Concrete cover 30 mm		Transfer length (mm)		$l_t(d_b=15.2)$ $/l_t(d_b=12.7)$
f_{ci}	f_{pe}/f_{pu}	$d_b=15.2\text{mm}$	$d_b=12.7\text{mm}$	
40MPa	0.50	847.54	656.25	1.29
	0.55	893.13	686.37	1.30
	0.60	939.63	716.33	1.31
	0.65	979.11	743.03	1.32
	0.70	1013.45	774.58	1.31
50MPa	0.50	790.78	609.53	1.30
	0.55	830.92	642.82	1.29
	0.60	872.99	669.16	1.30
	0.65	913.52	694.06	1.32
	0.70	951.62	719.33	1.32
60MPa	0.75	989.72	744.13	1.33
	0.50	748.16	572.93	1.31
	0.55	787.46	600.88	1.31
	0.60	825.18	628.71	1.31
	0.65	860.23	655.71	1.31
	0.70	896.76	681.11	1.32
	0.75	933.74	703.46	1.33
Average				1.31

f_{pu} 의 50%에서 70%까지 변화함에 따라 전달길이가 변화하는 것을 나타낸 것이다. 이에 따르면 유효프리스트레스 응력이 50%에서 5%씩 증가함에 따라 전달길어도 약 5%씩 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 16은 유효프리스트레스 크기의 변화와 전달길이와의 상관관계를 보여주고 있다.

(3) 콘크리트 피복두께에 따른 전달길이의 변화

Fig. 17은 콘크리트 피복두께에 따른 거리별 슬립의 변화를 보이고 있다. 이 그림에서 보듯이 피복두께 C가

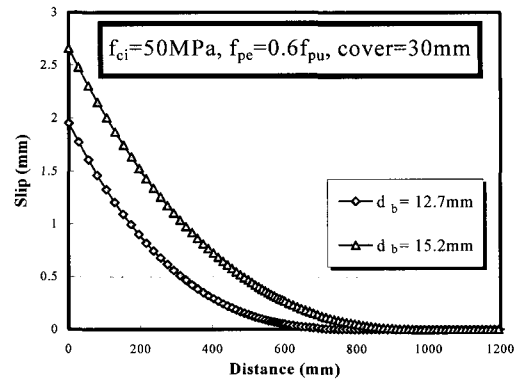


Fig. 13 Influence of strand diameter on slip

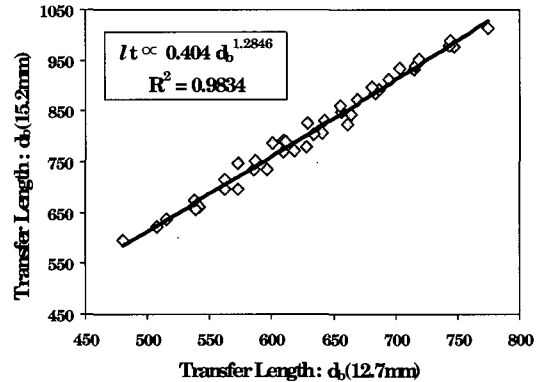


Fig. 14 Influence of strand diameter on L_t

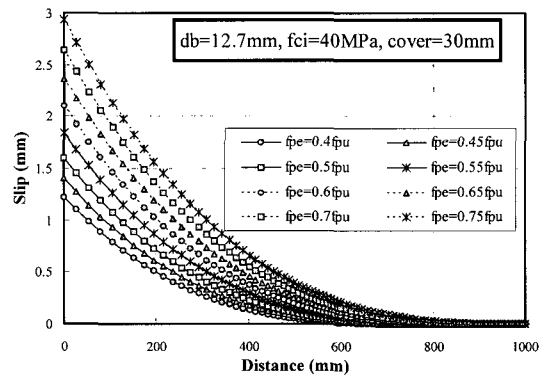


Fig. 15 Influence of effective prestress on slip

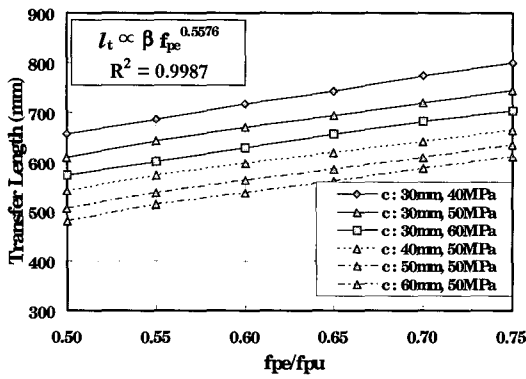


Fig. 16 Influence of effective prestress on L_t

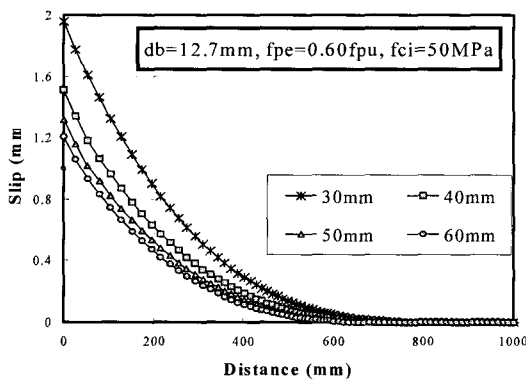


Fig. 17 Influence of concrete cover on slip

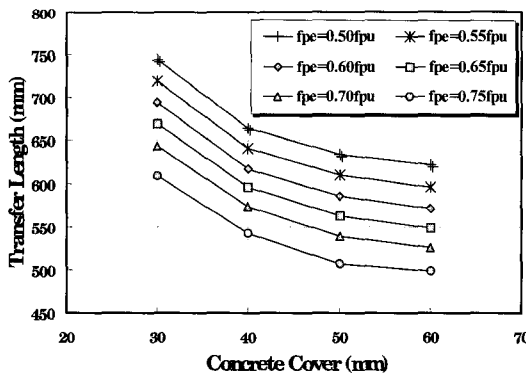


Fig. 18 Influence of concrete cover on L_t

얇아질수록 단부 슬립의 양은 크게 증가하는 것을 알 수 있다. Table 5는 콘크리트 피복두께가 30mm에서 60mm 까지 증가함에 따라 전달길이가 변화하는 것을 나타낸 것이다. 이에 따르면 콘크리트 피복두께가 증가함에 따라 전달길이가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 피복두께가 3cm에서 4cm로 증가할 때는 전달길이가 급격히 감소하지만 5cm, 6cm로 증가할 때에는 감소 폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 일정 피복두께이상이면 피복두께의 변화가 전달길이에 미치는 영향이 작아지는 것을 보여주는 것이다.

Table 4 Transfer length by different effective prestress

Concrete cover 30mm		Transfer length (mm)				
d_b	f_{ci}	f_{pe}/f_{pu} 0.50	f_{pe}/f_{pu} 0.55	f_{pe}/f_{pu} 0.60	f_{pe}/f_{pu} 0.65	f_{pe}/f_{pu} 0.70
15.2 mm	40MPa	847.54	893.13	939.63	979.11	1013.45
	50MPa	790.78	830.92	872.99	913.52	951.62
	60MPa	748.16	787.46	825.18	860.23	896.76
Average		1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
12.7 mm	40MPa	656.25	686.37	716.33	743.03	774.58
	50MPa	609.53	642.82	669.16	694.06	719.33
	60MPa	572.93	600.88	628.71	655.71	681.11
Average		1.00	1.05	1.10	1.14	1.18

Table 5 Transfer length by concrete cover size

$f_{ci} = 50MPa$		Transfer length (mm)				
d_b	f_{pe}/f_{pu}	Cover 30mm	Cover 40mm	Cover 50mm	Cover 60mm	Current code
15.2 mm	0.50	790.78	661.22	621.21	596.06	721.71
	0.55	830.92	696.21	656.81	636.34	793.88
	0.60	872.99	734.56	696.56	674.91	866.05
	0.65	913.52	771.19	734.55	715.72	938.22
	0.70	951.62	806.85	770.46	753.40	1010.40
	0.75	989.72	843.07	805.24	788.76	1082.57
Average		1.00	0.84	0.80	0.78	-
12.7 mm	0.50	609.53	542.04	507.50	480.73	603.01
	0.55	642.82	573.63	538.79	515.10	663.31
	0.60	669.16	596.22	562.83	537.88	723.61
	0.65	694.06	617.83	585.43	562.59	783.91
	0.70	719.33	640.90	609.63	587.28	844.21
	0.75	744.13	664.35	633.63	611.34	904.51
Average		1.00	0.89	0.84	0.80	-

Fig. 18은 콘크리트 피복두께의 변화와 전달길이의 상관관계를 보여주고 있다. 이처럼 콘크리트 피복두께의 변화가 전달길이에 큰 영향을 미치고 있음에도 불구하고 현 시방서 규정에는 피복두께의 항이 없어 이러한 영향이 무시되고 있다. 즉 피복두께의 변화에 상관없이 일정한 전달길이 값을 규정하고 있어 불합리한 면을 가지고 있다.

(4) 콘크리트 압축강도에 따른 전달길이의 변화

Fig. 19는 콘크리트 압축강도에 따른 거리별 슬립의 변화를 보이고 있다. 이 그림에서 보듯이 콘크리트 압축강도가 증가할수록 단부 슬립의 양이 감소하고 있다. 다음의 Table 6은 콘크리트 강도가 35MPa에서 60MPa까지 증가함에 따라 전달길이가 변화하는 것을 나타낸 것이다. 이에 따르면 콘크리트 강도가 증가함에 따라 전달길이가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 고강도 부재의 전달길이가 저강도 부재의 전달길이보다 확연히 작게 나타나 프리스트레스 힘의 전달 면에서 고강도콘크리트가 더 유리하다는 것을 보여주고 있다. Fig. 20은 콘크리트 압축강도의 변화와 전달길이의 상관관계를 보여주고 있다.

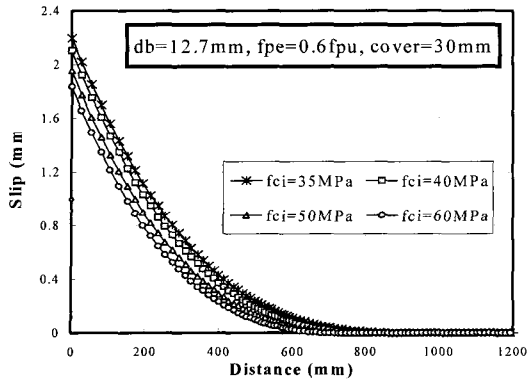


Fig. 19 Influence of concrete strength on slip

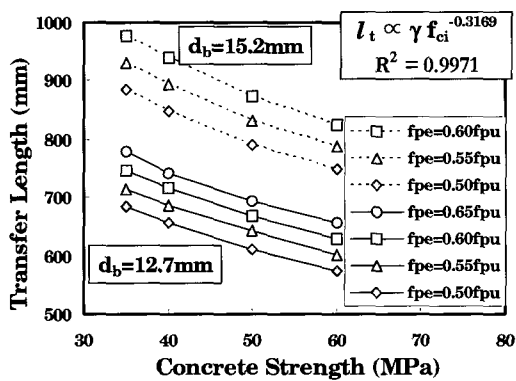


Fig. 20 Influence of concrete strength on L_t

이처럼 콘크리트 압축강도의 변화가 전달길이에 현저하게 영향을 미치고 있음에도 불구하고 현 시방서 규정에는 콘크리트 압축강도에 대한 항이 없어 이러한 영향이 무시되고 있다. 즉 현행 기준이 콘크리트 압축강도의 변화에 상관없이 일정한 전달길이 값을 주고 있어 실제 거동과 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

5. 전달길이 예측식의 유도

5.1 슬립을 이용한 간편식

다음 Fig. 21은 전달길이와 슬립과의 상관관계를 나타낸 것이다. 이를 통해서 식 (17)과 같은 간편식을 제안할 수 있다. 이는 강선의 직경이나 콘크리트의 피복두께, 콘크리트 압축강도, 유효프리스트레스의 크기 등의 정보가 없고 단지 끝단의 슬립량만을 알고 있을 때 간단히 전달길이를 추정하는데 이용할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 21에서 보듯이 이 식이 실제의 전달길이를 잘 예측하고 있음을 보여주고 있다.

$$l_t = 183.1 \Delta + 340.6 \quad (17)$$

여기서, l_t : 전달길이 (mm), Δ : end slip(mm)

Table 6 Transfer length by concrete strength

Concrete cover 30mm		Transfer length (mm)				Current code
d_b	f_{pe}/f_{pu}	f_{ci} 35MPa	f_{ci} 40MPa	f_{ci} 50MPa	f_{ci} 60MPa	
15.2mm	0.50	884.77	847.54	790.78	748.16	721.71
	0.55	930.84	893.13	830.92	787.46	793.88
	0.60	975.88	939.63	872.99	825.18	866.05
Average		1.00	0.96	0.89	0.85	-
12.7mm	0.50	683.33	656.25	609.53	572.93	603.01
	0.55	714.91	686.37	642.82	600.88	663.31
	0.60	747.46	716.33	669.16	628.71	723.61
	0.65	777.90	743.03	694.06	655.71	783.91
Average		1.00	0.96	0.89	0.84	-

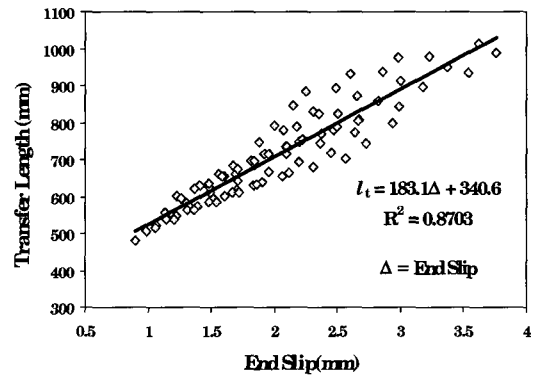


Fig. 21 Relationship between transfer length and end-slip

5.2 전달길이 예측식

Fig. 14, 16, 20을 보면 강선 직경 d_b , 유효프리스트레스 f_{pe} 그리고 콘크리트 압축강도 f_{ci} 가 전달길이에 미치는 영향을 정량적으로 알 수 있다. 따라서 위에서 수행한 많은 해석결과들을 바탕으로 다음 식 (18)과 같은 전달길이 예측식을 제안하였다. 이는 강선의 직경과 콘크리트의 피복두께, 콘크리트 압축강도, 유효프리스트레스의 크기 등의 다양한 인자를 고려하고 있으며 Fig. 22에서 보는 바와 같이 해석결과와도 거의 일치하여 매우 높은 신뢰도를 가지는 것을 볼 수 있다. 즉, Fig. 22는 정밀 유한요소해석에서 산정한 전달길이와 식 (18)을 이용하여 예측한 전달길이를 보여주고 있는데 아주 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 식 (18)은 현행 설계기준에서 고려하고 있지 않는 콘크리트 압축강도 및 콘크리트 피복두께까지 고려하고 있어, 앞으로 프리텐션 콘크리트 부재의 합리적인 전달길이 산정과 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

$$l_t = 7.95 \cdot \sqrt{f_{pe}} \cdot \left(\frac{1}{f_{ci}}\right)^{1/3} \cdot d_b^{1.3} \cdot \left(\frac{1}{C-19.69} + 0.25\right) \quad (18)$$

여기서, l_t : 전달길이 (mm), d_b : 강선의 직경(mm)

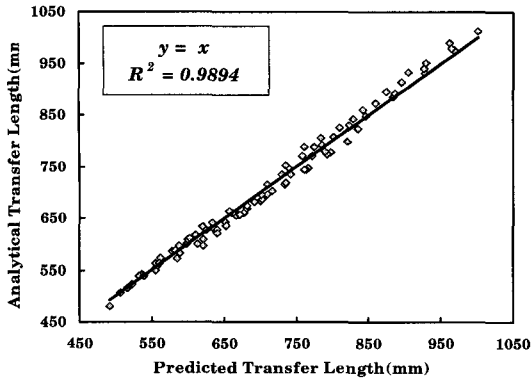


Fig. 22 Analysis results vs. predicted values

- f_{pe} : 유효프리스트레스 응력 (MPa)
- f_{ci} : 콘크리트 압축강도 (MPa)
- C : 콘크리트 피복두께(mm)

6. 결 론

전달길이에 대한 현행 설계 기준에서는 프리스트레스 힘의 크기와 PS 강재의 직경만을 고려하고 있으나 최근 진행되고 있는 연구들에 따르면 프리스트레스를 도입할 때의 콘크리트의 압축강도 및 콘크리트 피복두께 등을 포함한 다양한 인자들이 전달길이에 영향을 미치는 것으로 밝혀지고 있다. 그러나 대부분의 연구들이 제한된 시간과 비용의 문제로 단순한 실험연구에 그치고 있으며 실제로 다양한 영향 인자를 고려하지 못하고 있다. 본 연구에서는 강선의 직경과 유효프리스트레스의 크기뿐만 아니라 콘크리트의 압축강도와 콘크리트의 피복두께 등이 PSC부재의 전달길이에 미치는 영향을 정량적으로 구명하고, 이 영향 인자들을 고려한 합리적인 전달길이 식을 제안하고자 다양한 설계변수에 대하여 각각 실험결과에 바탕을 둔 유한요소해석을 실시하여 각 변수가 전달길이에 미치는 영향을 분석하고 이를 바탕으로 프리텐션 콘크리트 부재 설계시 사용할 수 있는 전달길이의 예측식을 제안하였다. 본 연구결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 강선의 직경이 증가함에 따라 전달길어도 증가하였다. 직경 15.2mm 강선의 전달길이가 직경 12.7mm 강선의 전달길이에 비해 약 30%가량 큰 것으로 나타나고 있다.
- 2) 유효프리스트레스 크기가 증가함에 따라 전달길어도 증가하였다. 전달길이의 증가는 유효프리스트레스 응력의 제곱근에 비례하는 것으로 나타났다.
- 3) 콘크리트 피복두께가 증가함에 따라 전달길이가 감소하였다. 그러나 피복두께가 30mm에서 40mm로 증가할 때는 전달길이가 급격히 감소하나 50mm, 60mm로

증가할 때에는 감소 폭이 줄어들어 일정 피복두께이상 이 되면 피복두께의 영향이 작아지는 것을 보여주고 있다. 그러나 현 시방서 규정에는 콘크리트 피복두께의 영향을 고려하지 않고 무시하고 있어 합리적인 수정이 필요하다.

- 4) 콘크리트 강도가 증가함에 따라 전달길이가 현저하게 감소하였다. 그러나 현 시방서 규정에는 콘크리트 압축강도의 영향이 무시되어 콘크리트 압축강도의 변화에 상관없이 일정한 전달길이 값을 산출하게 되므로 이에 대한 수정이 필요하다.
- 5) 본 연구에서 제시한 전달길이에 대한 예측식은 보다 실제적이고 정확한 전달길이를 결정하는데 유용하게 사용될 수 있으며 프리텐션 프리스트레스 콘크리트 부재의 전달길이 설계기준을 개선하는 데에 있어 아주 유용한 자료가 될 것으로 사료된다

감사의 글

본 연구는 국가지정연구의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 오병환, 김동백, 김의성, 최영철, “압축강도 및 피복두께에 따른 프리텐션 부재의 전달길이 변화에 관한 연구”, 가을학술발표회논문집, 1999. 11, pp.355~358.
2. 오병환, 김의성, 최영철, “프리텐션 부재의 휨부착에 의한 강연선의 정착길이 연구”, 가을학술발표회논문집, 1999. 11, pp.367~370.
3. 오병환, 김의성, “프리텐션 프리스트레스 콘크리트 부재의 전달길이 평가 및 영향 인자 연구”, 대한토목학회 논문집, 20권 6-A호, 2000, pp. 945~956.
4. 오병환, 김의성, 최영철, “프리텐션 공법의 프리스트레스 콘크리트 부재의 정착길이 산정에 관한 실험 및 이론 연구”, 콘크리트학회 논문집, 12권 6호 2000, pp.3~11.
5. Buckner, C. D, “A Review of Strand Development Length for Pretensioned Concrete Members,” *PCI Journal*, Vol.2, March-April, 1995, pp.84~105.
6. Zia, P. and Mostafa, T, “Development Length of Prestressing Strands,” *PCI Journal*, Vol.22, No.5, September-October, 1977, pp.54~65.
7. Zia, P. and Mostafa, T. Nilsson, “Development Length of Prestressing Strands,” *PCI Journal*, July-August, 1978, pp.97~106.
8. Cousins, T. E., Johnston, D. W. and Zia, P, “Transfer Length of Epoxy-Coated Prestressing Strand,” *ACI Materials Journal*, Vol.87, No.3, May-June, 1990, pp. 193~203.

9. Bal z s, L. G, "Transfer Control of Prestressing Strands," *PCI Journal*, Vol.37, No.6, November-December, 1992, pp.60~71.
10. Shahawy. M. A., Issa, M., and Batchelor, B, "Strand Transfer Lengths in Full Scale AASHTO Prestressed Concrete Girders", *PCI Journal*, Vol.37, No.3, May-June, 1992, pp.84~96.
11. Abrishami, H. and Mitchell, D., "Bond Characteristics of Pretensioned Strand," *ACI Material Journal*, Vol.90, No.3, May-June, 1993, pp.228~235.
12. Horn, D. G. and Preston, H. K., "Use of Debonded Strands in Pretensioned Bridge Members," *PCI Journal*, Vol.26, No.4, July-August, 1981, pp.42~58.
13. Martin, L. and Scott, N., "Development of Prestressing Strand in Pretensioned Members," *ACI Journal*, Vol.73, No.8, August 1976, pp.453~456.
14. Hanson, N. and Kaar, P., "Flexural Bond Tests of Pretensioned Prestressed Beams," *ACI Journal*, Vol. 55, No.7, January 1959, pp.783~803.
15. Anderson, A. and Anderson, R., "An Assurance Criterion for Flexural Bond in Pretensioned Hollow Core Units," *ACI Journal*, Vol.73, No.8, August 1976, pp.457~464.
16. 건설교통부, "도로교 표준시방서", 건설교통부, 2000, pp 655~656

요 약

국내외의 건설공사에 프리텐션 방식을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 구조물이 폭넓게 활용됨에 따라 프리텐션부재 단부에서의 응력전달에 관한 관심이 증가되고 있다. 그러나 전달길이에 대한 현행 기준에서는 프리스트레스 힘의 크기와 PS 강재의 직경만을 고려하고 있으나 프리스트레스를 도입할 때의 콘크리트의 강도 및 피복두께 등의 인자들도 전달길이에 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 강선의 직경과 유효 프리스트레스의 크기뿐만 아니라 콘크리트의 압축강도와 콘크리트의 피복두께 등이 PSC부재의 전달길이에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고, 이로부터 이 영향 인자들을 고려한 합리적인 전달길이 예측식을 제안하였다. 이 식의 제안을 위하여 먼저 강선과 콘크리트 사이의 부착거동에 대한 부착응력-슬립 모델을 실험 자료로부터 도출한 후 이를 계면요소에 도입하여 다양한 설계변수에 대하여 유한요소해석을 실시하여 전달길이를 구하였다. 이로부터 각 변수가 전달길이에 미치는 영향을 분석하고 이를 바탕으로 설계시 사용할 수 있는 전달길이의 예측식을 유도하여 제안하였다. 본 연구에서 제시한 예측식은 보다 실제적이고 정확한 전달길이를 결정하는데 유용하게 사용될 수 있으며 프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전달길이에 대한 현행 설계기준을 개선하는 데에 유용한 자료를 제공할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 전달길이, 프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재, 부착응력과 슬립 관계, 유한요소해석, 콘크리트압축강도