

PS 강선의 정착부착성능에 관한 해석 모델

Analytical Model for Transfer Bond Performance of Prestressing Strands

유승룡*

Yu, Sung Yong

요 약

PS 강선의 정착부착성능에 대한 새로운 해석방법을 소개하였다. 이 모델에서, 정착부착 길이는 탄성 영역과 소성영역으로 구분되었다. 탄성영역에서 부착응력은 최대 부착응력에 도달될 때까지 슬립과 비례하여 증가하고, 소성영역에선 최대 부착응력으로 균일하게 분포됨을 가정하였다. 정착부착 길이 내에서 부착응력, 슬립, 강선응력, 콘크리트응력 분포를 결과로 얻을 수 있었고, 전체 정착부착 길이와 자유단에서 슬립에 대한 결과치는 최근 Cousins et al.의 실험 결과치와 유사하였다.

Abstract

A new analytical model is proposed to better understand the transfer bond performance in a prestressed pretensioned concrete beam. The transfer length is divided into an elastic and a plastic zones in this model. The bond stress is assumed to increase proportionally with the slip to the limit of maximum bond stress within the elastic zone and remains at a constant maximum value within the plastic zone. Four main stress patterns: bond stress, slip, steel stress, and concrete stress distributions within the transfer length are obtained precisely. The total transfer length and free-end slip obtained here give a close comparison to the test results by Cousins et al.

keywords : transfer bond, slip, transfer length, elastic zone, plasticzone, prestressed beam

1. 서 론

PS 강선의 정착부착성능에 대한 새로운 해석방법을 소개하였다. 이 모델에서 정착부착 길이는 탄성영역과 소성영역으로 구분되었다. 탄성영역에서 부착응력은 최대 부착응력에 도달될 때까지 슬립과 선형비례하여 증가하고, 소성영역에서는 최대 부착응력으로 균일하게 분포됨을 가정하였다. 최대 정착부착응력과 그에 대한 슬립의 비율

은 제안된 실험에 대한 선형회기분석법(linear regression analysis)으로 추정되었다.

프리텐션 보에서 부착응력과 슬립은 전달길이(transfer length)의 끝 부분에서 0으로부터 증가되므로, 좌표 중심축을 그곳으로 하여 탄성영역을 먼저 구하도록 고려하였다. 아울러, 전달길이 내에서 부착응력, 슬립, 강선응력, 콘크리트응력 분포를 변수로 하여 고찰하였다.

* 정회원, 동국대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 1994년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

2. 연구현황

2.1 지금까지의 전달길이 해석 모델

Janney[1]는 프리텐손 보에서는 강선과 콘크리트사이의 마찰력이 전체 전달길이를 결정하는 주된 요인이므로, 이에 대한 해석을 위하여 탄성해석만으로는 부족하다고 주장하였다. Guyon[2]은 전달길이내의 강선응력의 분포를 해석하려고, 전달길이를 탄성, 탄소성, 소성, 부착과괴 영역으로 나누어 해석하였다. 탄성영역에서 슬립이 미소한 경우 부착응력은 슬립과 선형비례하여 증가되었고, 탄소성 영역은 매우 작았으며, 소성영역에서는 최대 부착응력으로 균등하게 적용됨을 가정하였다.

Zia와 Mostafa[3]는 1977년 이전에 실험된 모든 자료에 대하여 회기분석법에 의한 해석을 하여 전체 정착길이에 대한 방정식을 제안하였다. 그들은 ACI 기준[4]의 정착부착 길이에 관한 식에서 사용된 강선직경, 유효 강선응력에 더하여, 강선을 풀 때의(release) 콘크리트 초기 강도와 초기 긴장 강선응력도 함께 고려하였다. 직경이 작은 강선에서 ACI 기준식과 유사한 결과를 보였으나 콘크리트 강도가 작을 때는 보수적인 결과치를 나타냈다. 그들은 ACI 기준의 휨부착길이는 25%가량 증가되어야 한다고 주장하였다.

Martin과 Scott[5]은 Hanson 과 Kaar[6]에 의하여 시행된 실험결과를 재 해석하여 ACI 기준을 적용할 수 없는 스패이 짧은 보를 위한 대안을 제시하였다. 그들은 또한, ACI 보다 훨씬 보수적인 80배의 강선직경을 모든 강선의 전달길이에 제시하였다. 한편, 기계적 부착력(mechanical interlock)은 실험치에 대한 해석상의 신뢰도가 떨어지므로 이에 대한 영향을 무시하는 것이 올바른 것으로 주장하였다.

Cousins, Johnston, Zia[7]는 최대 부착응력을 콘크리트 강도 제곱근으로 나눈 값 $-U_t$ 를 소성영역을 위하여, 부착강비를 탄성영역을 위하여 적용, 해석하였다.

2.2 단부 슬립을 위한 해석

단부 슬립은 정착부착 길이를 결정하는 또다른 결정요인으로 여러 연구를 통하여 고려되어 왔다. Krishnamurthy[8]는 전달길이를 구하기 위하여 단부 슬립을 변수로 사용하였다. 여기서, 단부 슬립은 다른 연구결과로부터 얻은 자료로부터 분석되어 구하여졌다.

Anderson과 Anderson[9]은 36개 중공 슬라브(Hollow Core Slab)의 휨부착 실험을 실시 하였는데, 전달부착응력과 휨부착응력은 단부 슬립에 직접 연관이 있음을 제안하였다. 단부 슬립, Δ_s 에 영향을 주는 평균 강선응력은 초기 긴장응력의 50%임을 가정하였으므로, 응력 변형률의 관계에서 $L_t = 2 \Delta_s E_{ps} / f_{si}$ 를 얻었고, 이 방정식에서 전달 길이는 $\Delta_s / L_t = f_{si} / 2 E_{ps}$ 이 되었다. ACI 전달길이가 $L_t = f_{se} d_b / 3$ 임으로, 단부 슬립은 $\Delta_s = f_{se} d_b f_{si} / (6 E_{ps})$ 이 된다. 일반적으로, 허용 최대 슬립은 0.031인치에서 0.094인치로 계산 되었다.

Brooks, Gerstle, Logan[10]은 Anderson과 Anderson에 의한 쌍일차 전달 부착응력(Bilinear Transfer Stress)과 Robert Mast[11]에 의한 쌍일차 강선응력도(Bilinear Strand Development Diagram)를 병합하여 “슬립 이론 (Slip Theory)”이란 발표를 하였는데, 이 해석에서는 초기 단부 슬립에 직접 연관이 되는 콘크리트의 부착성능에 대하여 해석하였다.

3. 해석 모델

3.1 탄성영역에서의 응력해석

슬립과 세개의 응력은 탄성영역안에서 서로 연관되므로 아래의 네 방정식을 이용하여 네개의 미지수들을 해석하는데 사용하였다. 부착응력과 슬립이 0이 되는 지점을 그림 1에서와 같이 좌표중심으로 택하였다.

Table 1 Results of regression analysis for bond stiffness, K.

Specimen	U'_k (psi)
1/2" Bare Strands	1779

식 (3)을 식 (4)에 대입하면,

$$\frac{d(S_x)}{dX} = -\frac{f_{si}}{E_{ps}} + MA_{ps} F_{sx} \quad (7)$$

여기에서 M은

$$M = \frac{1}{E_{ps}A_{ps}} + \frac{1}{E_cA_c} \quad (8)$$

방정식 (2), (3), (4), (5)를 만족시키기 위하여 방정식 (2)와 (5)를 식(7)에 대입하면 다음과 같은 2차 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2(S_x)}{dX^2} - K_1^2 S_x = 0 \quad (9)$$

K_1 은,

$$K_1 = \sqrt{K\phi M} \quad (10)$$

2차 미분방정식 (9)의 일반해는 다음과 같다.

$$S_x = -A_1 \sinh(K_1 X) - B_1 \cosh(K_1 X) \quad (11)$$

방정식 (11)의 미지수 A_1 과 B_1 을 위하여 초기 경계조건은 다음과 같다.

1. 전달길이 끝에서 슬립이 0이므로, 경계조건 $X=0$ 에서 $S_x=0$ 이 된다.

$$B_1 = 0 \quad (12)$$

그러므로, 탄성영역안에서 강선의 슬립은 식 (13)과 같다.

$$S_x = -A_1 \sinh(K_1 X) \quad (13)$$

2. 방정식 (7)과 (13)으로부터, 탄성영역 끝에서 슬립에 대한 미분을 구하면,

$$\begin{aligned} \frac{dS_x}{dX} &= -\frac{f_{si}}{E_{ps}} + MA_{ps} f_{st} \quad \text{at } x=L_{te} \\ &= -A_1 K_1 \cosh(K_1 L_{te}) \end{aligned} \quad (14)$$

탄성영역 끝에서 강선응력, f_{st} 는 강선내력과 부착력의 평형조건 (1)식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{st} &= f_{se} - \frac{K\phi A_1}{A_{ps}} \int_0^{L_{te}} \sinh(K_1 X) dx \\ &= f_{se} - \frac{K\phi A_1}{A_{ps} K_1} [\cosh(K_1 L_{te}) - 1] \end{aligned} \quad (15)$$

방정식 (15)를 방정식 (14)에 대입하면, 미지수 A_1 을 해결할 수 있다.

$$A_1 = \frac{f_{si}}{E_{ps} K_1} - \frac{MA_{ps} f_{se}}{K_1} \quad (16)$$

탄성영역의 길이, L_{te} 는 방정식 (13), (5), (16)을 이용 $X=L_{te}$, $T_x=T_{max}$ 로 적용하면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$0 = T_{max} - A_1 K \sinh(K_1 L_{te}) \quad (17)$$

횡축으로 탄성영역안에서의 응력과 슬립 분포는 다음과 같다.

3.1.1 슬립

방정식 (13)과 (16)에서 이미 구하여진 탄성영역안에서 슬립은,

$$S_x = -A_1 \sinh(K_1 X) \quad \text{for } 0 < X < L_{te} \quad (18)$$

강선응력에만 의존한 슬립은,

$$S_{xs} = -A_{1s} \sinh(K_1 X) \quad \text{for } 0 < X < L_{te} \quad (19)$$

A_{1s} 는

$$A_{1s} = \frac{f_{si}}{E_{ps} K_1} - \frac{f_{se}}{K_1 E_{ps}} \quad (20)$$

콘크리트의 압축응력으로 인한 슬립의 감소는 식 (21)과 같다.

$$S_{xc} = -A_{1c} \sinh(K_1 X) \quad \text{for } 0 < X < L_{te} \quad (21)$$

A_{1c} 는

$$A_{1c} = -\frac{A_{ps} f_{se}}{K_1 E_c A_c} \quad (22)$$

3.1.2 부착응력

방정식 (5)의 부착응력 슬립의 관계로부터, $-K$ 를 식 (18)에 곱해줌으로 방정식 (23)을 얻을 수 있다.

$$T_x = A_2 \sinh(K_1 X) \quad \text{for } 0 < X < L_{te} \quad (23)$$

여기에서 A_2 는

$$A_2 = A_1 K \quad (24)$$

3.1.3 강선응력

방정식 (23)을 (1)에 대입하면,

$$F_{sx} = f_{se} - A_3 [\cosh(K_1 X) - 1] \quad \text{for } 0 < X < L_{te} \quad (25)$$

A_3 는

$$A_3 = (A_2 \phi) / (A_{ps} K_1) \quad (26)$$

3.1.4 콘크리트 압축응력

탄성영역내의 임의의 단면에서 강선응력과 콘크리트응력의 평형조건 (3)으로부터 콘크리트 압축응력을 위한 식 (27)을 구할 수 있다.

$$F_{cx} = -f_{se} \frac{A_{ps}}{A_c} + A_4 [\cosh(K_1 X) - 1] \quad \text{for } 0 < X < L_{te} \quad (27)$$

A_4 는

$$A_4 = A_3 (A_{ps} / A_c) \quad (28)$$

3.2 소성영역에서의 응력해석

소성영역에서는 세개의 응력과 슬립은 서로 연관관계 없이, 최대 부착응력만이 모든 응력을 결정한다. 강선응력과 콘크리트응력은 최대 부착응력에 의하여 감소되므로, 전체 전달길이와 응력 및 슬립은 강선응력이 0이 되는 곳을 결정함으로써 구할 수 있다.

소성영역길이, L_{tp} 는 부착력과 강선내력의 평형 조건으로부터 얻을 수 있다.

$$L_{tp} = \frac{f_{st} A_{ps}}{T_{max} \phi} \quad (29)$$

그러므로, 전체 전달길이는 식 (30)과 같다.

$$L_t = L_{te} + L_{tp} \quad (30)$$

최대 부착응력과 부착강비는 해석을 위한 가장 중요한 두 요소이다. 최대 부착응력을 위한 회기 분석법의 해석 결과는 표 2에 인용되었다.

Table 2 Results of regression analysis maximum bond stress.

Specimen	U'_k (psi)
1 / 2" Bare Strands	6.185

$$T_{max} = U'_k \sqrt{f_{ci}} \quad (31)$$

3.2.1 부착응력

소성영역에서 부착응력은 최대부착응력으로 균일하게 분포됨을 가정하였으므로, 부착응력은 식 (32)와 같다.

$$T_x = T_{max} \quad \text{for } L_{te} \leq X < L_t \quad (32)$$

3.2.2 강선응력

부착력과 강선내력의 평형조건 (1)식으로부터

(33)식을 얻을 수 있다.

$$F_{sx} = f_{st} - \frac{T_{\max} \phi}{A_{ps}} (X - L_{te}) \text{ for } L_{te} \leq X < L_t \quad (33)$$

3.2.3 콘크리트 압축응력

방정식(33)의 첫 항, f_{st} 는 식 (15)에 주어졌다. 콘크리트 압축응력은 $-A_{ps}/A_c$ 를 식 (33)에 곱하여 줌으로 구할 수 있다.

$$F_{cx} = -f_{st} \frac{A_{ps}}{A_c} + \frac{T_{\max} \phi}{A_c} (X - L_{te}) \text{ for } L_{te} \leq X < L_t \quad (34)$$

3.2.4 슬립

식 (18)에 탄성영역 부분 끝, $X=L_{te}$ 에서 식 (35)의 첫 항을 구할 수 있다. 식 (35)의 다른 항은 식 (7)을 적분한 후 식 (33)에 있는 F_{sx} 를 대입함으로 구할 수 있다.

$$S_x = -A_1 \text{Sinh}(K_1 L_{te}) - \frac{f_{st}}{E_{ps}} (X - L_{te}) + M A_{ps} f_{st} (X - L_{te}) - \frac{T_{\max} \phi M}{2} (X^2 - 2L_{te}X + L_{te}^2) \text{ for } L_{te} \leq X < L_t \quad (35)$$

식 (35)로부터 강선응력에 의한 슬립은,

$$S_{xs} = -A_{1s} \text{Sinh}(K_1 L_{te}) - \frac{f_{st}}{E_{ps}} (X - L_{te}) + \frac{f_{st}}{E_{ps}} (X - L_{te}) - \frac{T_{\max} \phi}{2E_{ps}A_{ps}} (X^2 - 2L_{te}X + L_{te}^2) \text{ for } L_{te} \leq X < L_t \quad (36)$$

식 (35)로부터 콘크리트 압축응력에 의한 슬립의 감소는,

$$S_{xc} = -A_{1c} \text{Sinh}(K_1 L_{te}) + \frac{A_{ps} f_{st}}{E_c A_c} (X - L_{te})$$

$$- \frac{T_{\max} \phi}{2E_c A_c} (X^2 - 2L_{te}X + L_{te}^2) \text{ for } L_{te} \leq X < L_t \quad (37)$$

4. 결 과

4.1 일반

이 해석을 기존의 트랜스퍼 실험결과와 비교하기 위하여 표 3의 Cousins et al.[7, 13]의 실험 자료를 사용하였다. 강선이 콘크리트 중심을 벗어난 시험체의 경우 휨이나 비틀림의 영향을 받을 수 있다. 1.25인치 편심 시험체, S 시리즈의 경우 편심이 없는 시험체 보다 미소하게 적은 최대 부작응력을 보여줄 수 있으나, 보다 큰 콘크리트 단면, 40 in²를 사용하였으므로 함께 고려하였다. 한편으로 강선이 콘크리트 중심에 있는 시험체, T 시리즈는 16 in²의 콘크리트 단면을 사용하였다.

0.5인치 직경 철연선의 원주는 사실(4/3 d_b π)이다. 이 해석은 d_b π에 바탕을 둔 실험결과[12]에 근거하였고 다른 해석결과와 혼란을 피하기 위하여 d_b π를 원주로 사용하였다.

Table 3 Input data obtained form previous transfer test data.

Specimen (No. of tests)	E _{rs} (Ksi)	A _r (in ²)	A _{px} (in ²)	f' _{ci} (Ksi)	f _{si} (Ksi)	f' _{sei} (Ksi)
T5una-d(4) G	28,400	4×4	0.153	4.11	208.3	181.1
T5une-h(4) S	28,400	4×4	0.153	4.11	204.6	179.7
S5una-b(2) S	28,400	5×8	0.153	4.41	210.5	199.1
S5uni-j(2) S	28,400	5×8	0.153	4.81	204.6	194.7

Source : cousins et. al [7, 13]

Note : T5un - 1/2" diameter, concentrated, and uncoated specimens,

S5un - 1/2" diameter, eccentric (1.25"), and uncoated specimens,

S - sudden release specimens,

G - gradual release specimens,

4.2 탄성영역길이

표 4의 탄성영역의 길이는 T 시리즈 시험체에서 6.05 인치로(전체 전달길이의 12.7%), S 시리즈 시험체에서 10.05인치로(전체 전달길이의 19.8%) 나타났다. T시리즈 경우 Cousins et al의 실험 결과(전체 전달길이의 13%)와 유사한 값을 보여주고 있다. 한편, Cousins et al의 해석치는 그들의 실험치보다 훨씬 큰 값을 보여 주었다. 편심의 S시리즈 시험체와 편심이 없는 T시리즈 시험체와의 탄성영역 길이에서 큰 차이를 보이는 것은 초기 강선긴장응력과 유효 강선응력의 크기에 그 원인이 있다(표 4).

Table 4 Comparison with transfer test data by cousins et al.

Specimen (No. of tests)	1 day, measured L _t by Cousins et al. (in)	(1) L _{te} Calc. (in)	(2) L _{tp} Calc. (in)	(1)+(2) L _t Calc. (in)
T5una-d (3) G	N/A	5.70	41.97	47.67
T5une-h (3) S	62.5	6.40	41.40	47.80
S5una-b (2) S	48.0	11.95	45.55	57.50
S5unc-h (6) S	53.7	9.55	43.62	53.17
S5uni-j (2) S	45.0	10.45	40.48	50.93
Average measured /calculated				1.01
Standard deviation				0.21

4.3 전달길이와 슬립

표 5의 결과에서 알 수 있듯이, Cousins et al의 트랜스퍼 실험으로 구한 전달길이는 이 모델에서 계산한 길이와 유사하게 비교되었다. 평균 계측된 전달길이는 계산된 길이의 101%였으며, 표준편차는 0.21이었다. 한편, ACI[4](163%)와 Zia와 Mostafa[3](180%)는 코팅처리 않은 0.5인치 철연선의 정착길이를 작게 예측한 것으로 생각되었다(표 5).

단부에서 슬립도 계측한 값과 유사하였으며 계측한 단부슬립은 계산된 값의 115%로 비교적 정확하였다(표 6).

Table 5 Summary of comparison on calculated transfer length with those of other equations.

Specimen (No. of tests)	(1) L _t Ave. Meas. (in)	(2) L _t Zia (in)	(3) L _t ACI (in)	(4) L _t Cousins (in)	Ave. L _t this work (in)
T5una-d (3) G	N/A	33.4	30.2	N/A	47.67
T5une-h (3) S	62.5	32.7	30.0	41.4	47.80
S5una-b (2) S	48.0	34.2	33.5	46.5	57.50
S5unc-h (6) S	53.7	31.2			53.17
S5uni-j (2) S	45.0	27.3	32.5	43.3	50.93
Average measured/calculated		1.80	1.63	1.20	1.01
Standard deviation					0.21

source : (1) experimental study by cousins et. al[13, 14]

(2) zia and mostafa[3],

(3) ACI provision[4],

(4) analytical study by cousin et., al[7]

Table 6 Comparison of slip at free-end with test results by cousins et al.

Specimen (No. of tests)	1-day measured slip by Cousins(in)	Slip calculated in this study (in)
T5una-d (3) G	N/A	-0.1758
T5une-h (3) S	-0.252	-0.1699
S5una-b (2) S	-0.167	-0.1885
S5unc-h (6) S	-0.232	-0.1816
S5uni-j (2) S	-0.155	-0.1647
Average measured /calculated		1.15
Standard deviation		0.28

Source : cousins et. al [7, 13]

4.4 응력과 슬립

탄성영역은 방정식 (17)로부터 계산되었다. 표 3 입력 자료의 결과로 그림 3을 얻을 수 있었다. 정착 부착응력, 강선응력, 콘크리트응력 과 슬립의 X축에 대한 분포는 그림 4에서 7에 제시되었다. 강선, 콘크리트, 부착응력과 슬립에 대한 분포도는 Cousins et al과 유사한 모양을 하였으나 그 값의 정확도에서 차이를 보였다.

슬립 분포는 강선인장 변형률에 의한 슬립에서 콘크리트 압축 변형률에 의한 슬립을 뺀 값으로 그림 8에 표현되었다.

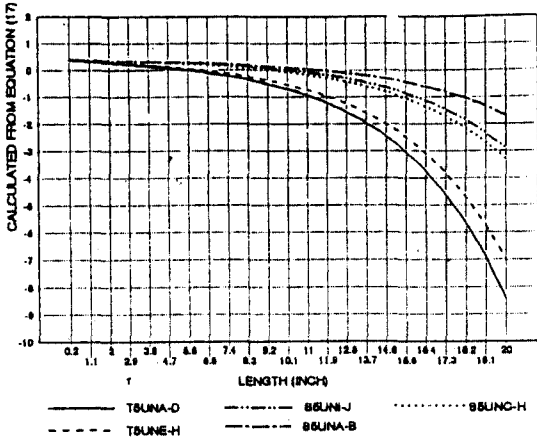


Fig. 3 Analytical prediction for elastic zone within transfer length.

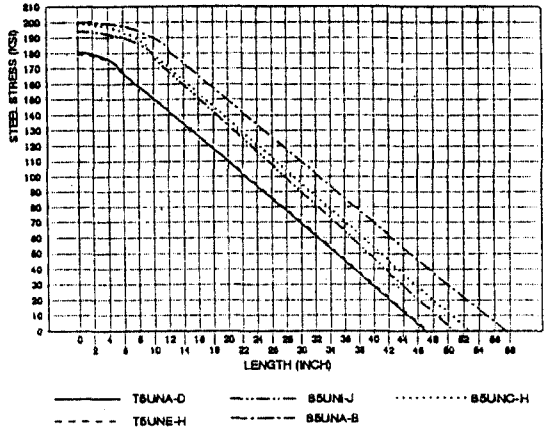


Fig. 6 Analytical prediction for steel stress.

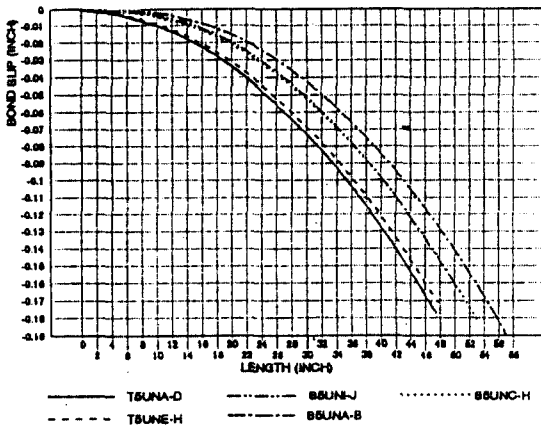


Fig. 4 Analytical prediction for bond-slip.

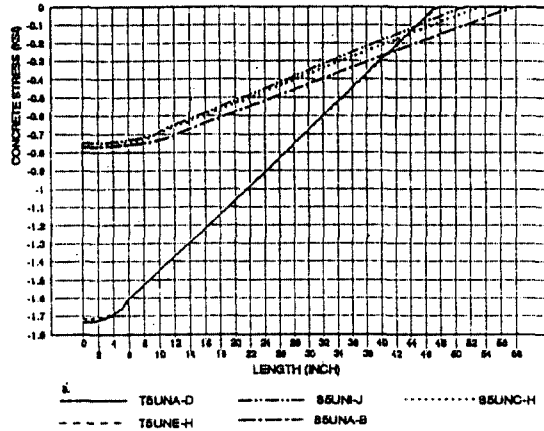


Fig. 7 Analytical prediction for concrete stress.

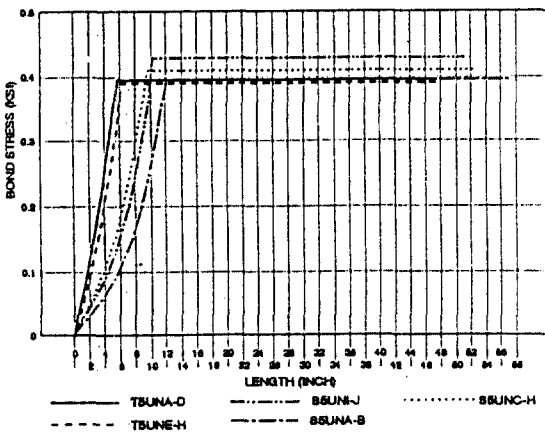


Fig. 5 Analytical prediction for bond stress.

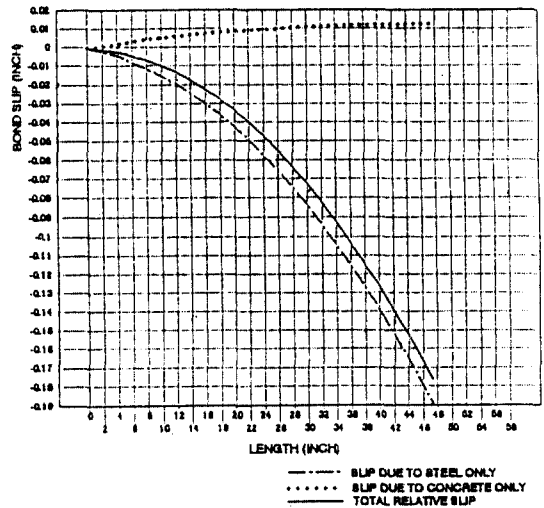


Fig. 8 Typical analytical prediction for bond-slip due to steel and concrete strain effect (sample #T5UNA-D)

5. 결 론

이 연구의 목적은 프리스트레스 프리텐션 콘크리트 보의 전달길이 내에서 정착부착력의 역학적 특성을 이해하고 일반화시키기 위하여 새로운 해석방법을 제시하는데 그 초점을 두었다. 또한 정착부착응력, 강선응력, 콘크리트응력과 슬립의 분포도 제시할 수 있었다. 이 해석의 타당성을 위하여 Cousins et al[7, 13, 14]의 최근 실험결과와 비교 검토하였다. 0.5인치 직경 코팅처리 않은 철연 강선의 부착정착 응력 해석에서 다음과 같은 결론을 내리게 되었다.

1. 이 해석에서 얻은 전체 전달길리와 단부 슬립은 Cousins et al의 코팅처리 않은 강선의 최근 실험결과와 매우 근접한 값을 보임으로써 납득 할만한 적용성을 보여주었다.

2. 이 해석에서의 0.5인치 코팅처리 않은 강선의 평균 전달길리는 51.4인치 였으며, 탄성영역은 8.8인치, 단부 슬립은 0.18인치로 나타났다.

기 호

x	좌표 중심에서부터의 거리
d_b	강선 단면 직경
ϕ	강선 원주
A_{ps}	강선 단면적
A_c	콘크리트 단면적
E_{ps}	강선의 탄성계수
E_c	콘크리트의 탄성계수
S_x	슬립 분포
S_{xs}	강선응력에 의한 슬립 분포
S_{xc}	콘크리트 응력에 의한 슬립 분포
T_x	부착응력 분포
F_{sx}, ϵ_{sx}	강선응력과 변형률 분포
F_{cx}, ϵ_{cx}	콘크리트응력과 변형률 분포
K	부착강비
T_{max}	최대부착응력
U'_t	$T_{max} / \sqrt{f'_{ci}}$
U'_k	$K / \sqrt{f'_{ci}}$
L_t	전달길이
L_{te}	탄성영역 길이

L_{tp}	소성영역 길이
f_{st}	탄성영역 끝에서 강선 응력
f_{si}	초기강선 응력
f_{se}	유효강선 응력
f'_{ci}	초기콘크리트 응력
M	상수
K_1	상수
A_1	상수
B_1	상수
A_{1s}	상수
A_{1c}	상수
A_2	상수
A_3	상수
A_4	상수
A_5	상수

참 고 문 헌

1. Janney, J., "Nature of Bond in Pretensioned Prestressed Concrete," ACI Journal, Vol. 50, No. 9, May 1954, pp. 717-736.
2. Guyon, Y., Prestressed Concrete, Vol. I, John Wiley & Sons, Inc., 1960.
3. Zia, P., and Mostafa, T., "Development Length of Prestressing Strands," PCI Journal, Vol. 22, No. 5, September-October 1977, pp. 54-65.
4. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89), American Concrete Institute, Detroit, MI, November 1989.
5. Martin, L., and Scott, N., "Development of Prestressing Strand in Pretensioned Member", ACI Journal, Vol. 73, No. 8, August 1976, pp. 453-456.
6. Hanson, N., and Kaar, P., "Flexural Bond Tests of Prestressed Beams," ACI Journal, Proceedings, Vol. 55, No. 7, January 1959, pp. 783-803.
7. Cousins, T., Johnston, D., and Zia, P., "Transfer and Development Length of Epoxy-Coated and Uncoated Prestressing Strand," PCI Journal, Vol. 35, No. 4, July-August 1990, pp. 92-103.
8. Krishnamurthy, D., "A Theory for Trans-

- mission Length of Prestressing Tendons," Indian Concrete Journal, February 1973, pp. 73-80.
9. 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.
 10. Brooks, M., Gerstle, K., and Logan, D., "Effect of Initial Strand Slip on the Strength of Hollow-Core Slabs," PCI Journal, Vol. 33, No. 1, January-February 1988, pp. 90-111.
 11. Mast, R., ABAM Engineers, Tacoma, WA, 1980, Unpublished Report.
 12. 유승룡, 에폭시 코팅 처리된 PS강선의 정착부착 성능 실험, 콘크리트학회지, Vol. 6, No. 1, 1994. 2, pp. 89-100.
 13. Cousins, T., Johnston, D., and Zia, P., Bond of Epoxy Coated Prestressing Strand, Center for Transportation Engineering Studies, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC, December 1986.
 14. Cousins, T., Johnston, D., and Zia, P., "Transfer Length of Epoxy-Coated Prestressing Strand," ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 3, May-June 1990, pp. 193-203.
- (접수일자 : 1993. 10. 26)