

외부 비부착 강선을 가진 부재의 극한 강선응력 평가

Evaluation of Ultimate Tendon Stress in Prestressed Concrete Members with External Unbonded Tendons

오 병 환*
Oh, Byung Hwan

유 성 원**
Yoo, Sung Won

ABSTRACT

The member with external unbonded tendon has two remarkable characteristics, i.e., eccentricity variation and slip by friction force at deviators, compared with internal bonded or unbonded member. An efficient numerical procedure for the nonlinear analysis of prestressed concrete beam with external unbonded tendon considering two remarkable characteristics is formulated and corresponding computer code is developed.

On the basis of statistical process of parametric study results, strain compatibility method, eccentricity variation predictor and tendon stress predictor at ultimate state are proposed and verified with test results and existing Codes, which can evaluate flexural behavior at ultimate state.

Finally, the proposed procedure and predictors can be efficiently used for the realistic and accurate analysis of prestressed concrete members with external unbonded tendons.

1. 서론

국내의 콘크리트 표준시방서, 도로교 표준 시방서, 미국의 ACI 및 AASHTO에서는 부착강선 및 비부착 강선의 극한 응력증가량 값을 규정하여 하중-저항계수 이론에 의한 극한 휨모멘트를 계산할 수 있도록 규정하고 있다. 그러나, 국내외의 관련 규격들의 비부착 강선의 극한 응력증가량 식들은 내부 (Internal) 강선과 외부 (External) 강선의 구분이 없는 실정이다.^{6,7)}

외부 비부착 강선의 경우, 내부 비부착 강선의 경우와는 달리 외력에 의한 처짐의 증가에 따른 편심량 값의 변화 특징⁴⁾과 편향부에서의 마찰력에 의한 미끄럼 현상¹⁾이 존재하는 특징을 가지고 있다. 특히 외부 강선의 편심량 변화현상은 강선의 응력 증가량에 영향을 미치기도 하지만, 극한상태에서 강선의 유효깊이 값도 변화시키므로 결과적으로 극한 저항 모멘트 값의 계산 방법도 기존의 내부 비부착 강선과는 달라질 것이다.

본 연구에서는 이러한 외부 비부착 강선의 극한 상태에서의 응력증가량값의 산정과 그에 따른 극한 휨모멘트 값의 계산에 대한 예측식을 제안하고자 하였다.

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사수료

2. 비부착 강선의 응력증가량(f_{ps}) 결정식의 배경

2.1 ACI 규정

비부착 강선의 극한 응력 증가량을 결정하기 위해서 1971년 ACI규정⁶⁾에서는 다음 식 (1)을 제안하였다. 식 (1)은 1917년의 Mattock²⁾이 수행한 단순지지 부재의 실험결과에 의해 제안되었으나, 1978년 Gamble과 Mojtahedi²⁾는 트러스요소를 이용한 이론적 접근에 의해 식 (1)의 변수인 f_c'/ρ_p 외에도 지간길이-유효깊이비(L/d_p)에도 영향을 받는 것으로 연구되었다.

$$f_{ps} = f_{pe} + 10,000 + \frac{f_c'}{100 \rho_p} \leq f_{py} \text{ or } (f_{pe} + 60,000) \quad (1)$$

Gamble과 Mojtahedi의 연구결과에 의해 1983년에 ACI규정⁶⁾은 식 (1)은 지간길이-유효깊이비가 35 이하인 경우만으로 제한함과 동시에 지간길이-유효깊이비가 35를 초과하는 경우에는 다음 식 (2)를 규정하여 현재에 이르고 있다.

$$f_{ps} = f_{pe} + 10,000 + \frac{f_c'}{300 \rho_p} \leq f_{py} \text{ or } (f_{pe} + 30,000) \quad (2)$$

2.2 AASHTO 규정

1983년의 AASHTO⁷⁾ 규정 역시 ACI와 유사하였으나, 1994년의 규정에서는 지간길이-유효깊이비와 부착감소계수 및 작용하중형태를 변수로 하여 다음 식 (3)과 같이 개정하였다.

$$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u E_p \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c} - 1 \right) \frac{L_1}{L_2} \leq 0.94 f_{py} \quad (3)$$

$$\text{이때, } c = \frac{A_p f_{ps} + A_s f_y - A_s' f_y' - 0.85 \beta_1 f_c' (b - b_w) h_f}{0.85 \beta_1 f_c' b_w}$$

이러한 AASHTO의 개정은 Harajli²⁾와 Naaman³⁾의 연구결과에 근거한 것으로 그들은 비부착 강선의 응력증가량은 f_c'/ρ_p 보다는 c/d_p , L/d_p 및 하중형태에 의존하는 것으로 주장하였다.

2.3 Ramos와 Aparicio의 연구 결과

1996년에 Ramos와 Aparicio⁴⁾는 기존의 시방서 규정과는 달리 외부 비부착 강선의 극한 응력 증가량에 대한 연구를 수행하여 다음 식 (4)와 같이 제안하였다. 그러나 이들의 연구 결과는 기존의 변수들 즉, f_c'/ρ_p 또는 c/d_p 를 고려하지 않았으며 좁은 범위의 지간길이-유효깊이비($L/d_p=14\sim 25$)만을 고려하는 등 다소 일반적이지 못하고 또한 체계적이지 못한 단점을 가지고 있다.

$$\begin{aligned} \Delta f_{ps} &= 108 \text{ MPa} : \text{단순 박스교,} & \Delta f_{ps} &= 122.5 \text{ MPa} : \text{단순 TT교} \\ \Delta f_{ps} &= 20\sim 90 \text{ MPa} : \text{연속 일체타설 박스,} & \Delta f_{ps} &= 39 \text{ MPa} : \text{연속 분할시공 박스} \end{aligned} \quad (7)$$

3. 변수 해석(Parametric Study)

3.1 해석 모델

본 연구에서는 외부 비부착 강선의 극한 강선응력증가량을 평가하기 위해서 강선의 편심변화효과, 편향부에서의 미끌림효과, 재료·기하비선형 및 시간의존성을 고려한 유한 요소 모델을 개발하여 해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램과 그에 대한 검증내용은 참고문헌¹⁾에 제시하였다.

3.2 해석 변수

본 연구에서 수행한 해석의 변수는 6종류의 지간길이-유효깊이비, 3종류의 작용하중형태, 2종류의 콘크리트 강도, 3종류의 부분프리스트레싱비, 2종류의 인장철근비, 2종류의 유효PS응력 및 3종류의 편향부 갯수로 총 1296가지의 해석경우에 대해서 변수해석을 수행하였으며 해석 변수의 요약은 표 1에 나타내었다.

표 1 해석변수의 요약

변수	수량	내용	변수	수량	내용
지간길이-유효깊이비	6	5, 10, 15, 25, 35, 50	철근비	2	0.08, 0.24
하중작용형태	3	3점, 4점, 등분포 하중	유효PS응력	2	$0.5 f_{pu}$, $0.7 f_{pu}$
콘크리트 강도	2	5, 7 ksi	편향부 갯수	3	1($\frac{1}{2}$ 점), 2(2개 $\frac{1}{2}$ 점), 3($\frac{1}{2}$, 2개 $\frac{1}{2}$ 점)
부분PS비	3	0.4, 0.7, 1.0	-	-	-
합계	1296				
기타	유효깊이 = 16 inch, $\gamma_c = 0.25$, $f_{pu} = 270$ ksi, $f_y = 60$ ksi				

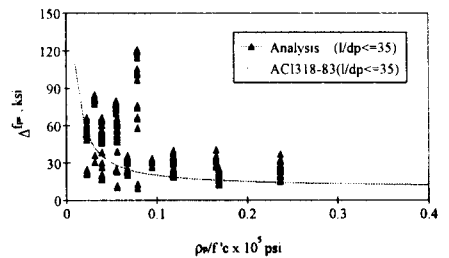
3.3 해석 결과

3.3.1 ACI 318-83과의 비교

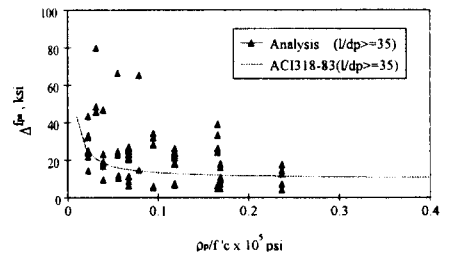
해석결과와 ACI 318-83과의 비교결과는 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 알 수 있듯이 ACI 식의 주변수인 f_c'/ρ_p 는 해석결과와 어느 정도 상관성이 있기는 하지만 절대적 영향인자는 아닌 것으로 판단된다. 특히 일부 해석결과는 ACI규정에 의하면 안전측에 있지 않은 것으로 나타나고 있다.

3.3.2 지간길이-유효깊이비와 작용하중형태의 효과

ACI 변수인 $\rho_p/f_c' \times 10^5 = 0.0667, 0.1185$ 인 경우에 대해서 작용하중형태에 따른 지간길이-유효깊이비와 강선의 극한 응력증가량 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 강선의 응력 증가량은 하중의 작용형태에 가장 큰 영향을 받으며, 동일한 조건에서 중앙 1점 집중하중이 작용할 때 가장 작은 것



(a) For $L/d_p \geq 35$



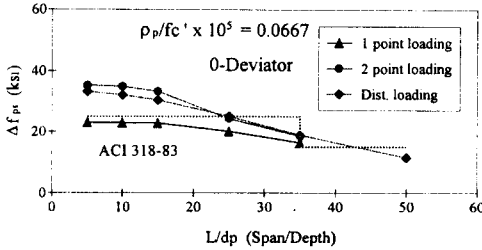
(b) For $L/d_p \leq 35$

그림 1 해석결과와 ACI318-83의 비교

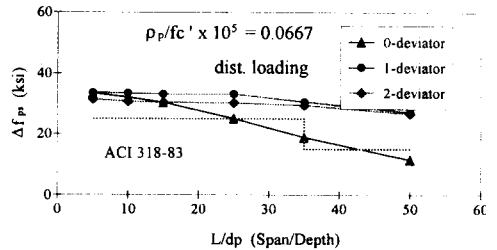
으로 나타나고 있다. 또한 지간길이-유효깊이비가 증가할수록 강선 응력증가량은 감소하는 것으로 나타나고 있으나 그 효과는 전단스팬비가 감소할수록 역시 감소하는 것으로 나타나고 있다.

3.3.3 편향부의 효과

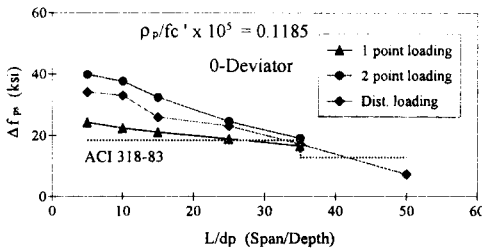
편향부의 효과에 대한 해석결과는 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 편향부의 갯수 및 위치에 대한 영향은 앞서 설명한 하중형태와 지간길이-유효깊이비에 비해 상관성이 크지 않은 것으로 나타났다. 다만, 편향부가 없는 경우의 강선응력의 하강현상은 다소 크게 나타났는데 이는 편심량 감소효과 크기 때문일 것으로 판단된다. 이러한 사실에서 볼 때, 편향부의 갯수와 위치는 강선 응력증가량보다는 편심량 감소에 의한 극한 유효깊이의 감소에 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.



(a) for $\rho_p/f_c' \times 10^5 = 0.0667$

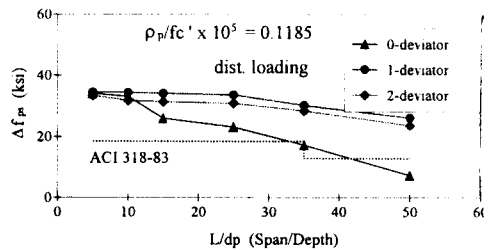


(a) for $\rho_p/f_c' \times 10^5 = 0.0667$



(b) for $\rho_p/f_c' \times 10^5 = 0.1185$

그림 2 작용하중형태의 효과



(b) for $\rho_p/f_c' \times 10^5 = 0.1185$

그림 3 편향부의 효과

3.3.4 콘크리트강도의 효과

콘크리트 압축강도가 강선의 응력증가량에 미치는 영향을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 콘크리트 강도 자체만은 강선의 응력증가량의 변수가 아님을 알 수 있다.

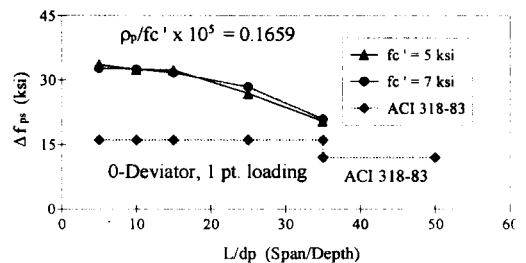
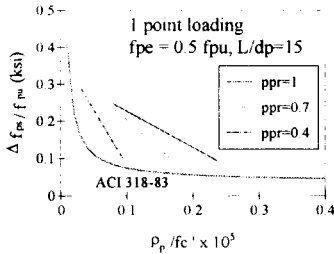


그림 4 콘크리트 강도의 효과

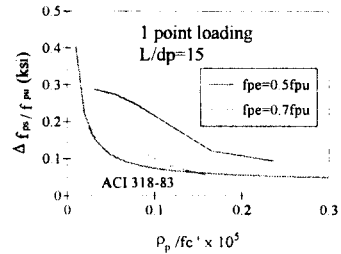
3.3.5 철근 및 강선의 영향

본 연구에서는 비부착 강선의 응력증가량의 영향변수를 찾기 위해 여러 변수를 고려한 결과, c/d_{pu} (중립축깊이/극한유효깊이)임을 알 수 있어 다음 그림 5~6에 ACI 318-83의 변수인 f_c'/ρ_p 와 비교하여 나타내었다. 그림 5에 의하면, 동일한 극한 저항능력을 가진 경우, 철근의 증가는 강선응력의 급격한 강하현상을 유발하며 c/d_{pu} 가 주 변수임을 알 수 있다.

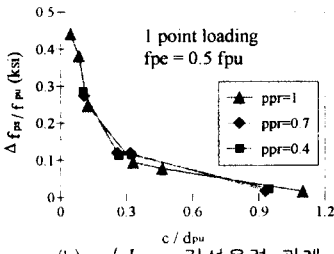
또한 그림 6에서 알 수 있듯이 유효PS의 크기 역시 큰 영향변수는 아니나 강선응력의 초기값에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이는 유효PS의 효과가 이미 c 에 포함되어 있기 때문일 것으로 추정된다.



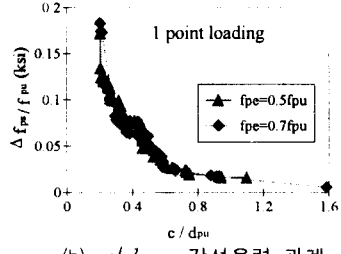
(a) ρ_p/f_c - 강선응력 관계



(a) ρ_p/f_c - 강선응력 관계



(b) c/d_{pu} - 강선응력 관계



(b) c/d_{pu} - 강선응력 관계

그림 5 부분프리스트레스 효과

그림 6 유효PS응력의 효과

4. 편심변화량 및 강선응력 예측식의 제안

4.1 편심변화량의 제안

본 연구에서는 편심변화량 Δ 를 해석적으로 구하려고 했으나, 예측식이 너무 복잡해지므로, 해석결과들의 통계처리를 통하여 다음 식 (8)과 표 2에 나타내었다.

$$\Delta = a_1 (L/d_p)^{a_2} PPR^{a_3} w_e^{a_4} \quad (\text{in}) \quad (8)$$

4.2 강선응력의 예측식

앞의 3장의 해석결과와 분석내용을 이용하여 강선응력의 예측식을 다음 식 (9)에 나타내었다. 이때, 추정식의 단순화와 안전여유를 위해 응력값이 가장 작게 평가되는 중앙 1점 집중하중이 작용하는 경우만을 통계처리하였다. 또한 연속보에도 적용할 수 있도록 연속보 적용계수 γ 를 도입하였다.^{2,3)}

$$f_{ps} = f_{pe} + \gamma f_{pu} (0.2947 - 0.5796 c/d_{pu}) \leq f_{py} \quad (9)$$

4.3 제안된 예측식의 검증

제안된 예측식의 검증을 위해 Tan과 Ng의⁵⁾ 실험결과와 비교하여 표 3에 나타내었고, 또한 기존 규정들 및 최근 타연구결과와 비교하여 표 4에 나타내었다. 표 3, 4에서 알 수 있듯이 제안된 예측식은 실험결과와 잘 일치하고 있는 것으로 나타났으며, ACI규정은 큰 경향성이 없고, AASHTO의 결과

표 2 편심변화량의 추정식 계수

편향부	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	상관계수
0개	0.022	1.479	-0.579	0.053	-0.95
중앙 1개	0	-	-	-	-
2이상,비중앙	0.0007	1.721	-0.431	-0.594	-0.98

보다는 다소 작게 평가되고 있다. 이는 AASHTO의 식은 내부 비부착 강선의 경우이어서 편심량변화 효과를 고려하지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 한편, Ramos⁴⁾의 연구결과는 다소 작게 평가되었으며 철근 등의 강도인자효과가 고려되지 않음을 알 수 있다.

표 3 제안식과 실험결과의 비교 (단위 : MPa, kN-m)

	Δ_{test}	$\Delta_{predicted}$	$\frac{\Delta_{predicted}}{\Delta_{test}}$	$f_{ps, test}$	$f_{ps, predicted}$	$\frac{f_{ps, predicted}}{f_{ps, test}}$	$M_{n, test}$	$M_{n, predicted}$	$\frac{M_{n, predicted}}{M_{n, test}}$
T-0	38.67	46.94	1.21	1667	1666	1.00	79.6	78.8	0.99
T-1	0	0	-	1647	1608	0.98	84.1	86.4	1.03
T-1d	0	0	-	1243	754	0.61	78.1	74.7	0.96
T-2	7.79	8.49	1.10	1665	1588	0.95	83.4	84.5	1.01

표 4 제안식과 기존 규격, 연구결과의 비교 (단위 : MPa, kN-m)

	제안 ①	ACI ②	AASHTO ③	Ramos ④	Harjli ⑤	② ①	③ ①	④ ①	⑤ ①	제안 ①	ACI ②	AASHTO ③	Ramos ④	Harjli ⑤	② ①	③ ①	④ ①	⑤ ①
T-0	1543	1555	1688	1405	1574	1.01	1.09	0.91	1.02	77.2	85.4	87.9	82.7	85.7	1.11	1.14	1.07	1.11
T-1	1526	1455	1602	1305	1480	0.95	1.05	0.86	0.97	85.0	83.6	85.9	80.8	84.0	0.98	1.01	0.95	0.99
T-1d	721	594	995	396	652	0.82	1.38	0.55	0.90	73.8	70.7	78.8	65.8	72.1	0.96	1.07	0.89	0.98
T-2	1499	1440	1590	1290	1466	0.96	1.06	0.86	0.98	83.0	83.3	85.7	80.6	83.8	1.00	1.03	0.97	1.01

5. 결론

본 연구에서는 편심변화 효과 등을 고려하여 비선형 해석을 수행하고, 외부 비부착강선의 극한 응력식을 제안하여 실험결과와 기존 규정 등과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 강선의 응력의 경우, ACI 318-83의 식의 주변수인 f_c'/ρ_p 보다는 c/d_{pu} 가 더 효과적인 변수이다.
- (2) 강선의 응력은 하중작용형태에 가장 큰 영향을 받으며, 편향부의 위치 및 갯수는 강선의 응력보다는 편심변화량을 좌우하므로 극한 유효깊이에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (3) 변수해석 결과를 통계처리하여 강선의 응력 및 편심변화량에 대한 예측식을 제안하였다.
- (4) 제안된 예측식은 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 기존 규정 등과 비교할 때 외부 비부착강선의 극한 휨거동을 평가할 때에는 편심변화효과를 고려하는 것이 타당한 것으로 나타났다.

6. 참고문헌

1. 오병환, 유성원, "외적 비부착 강선을 가진 PSC 보의 극한 휨거동 해석", 콘크리트학회 1998년 가을 학술발표회.
2. Harajli, Samir A. H., "Evaluation of the Ultimate Steel Stress in Partially Prestressed Concrete Members", *PCI, Structural Journal*, Jan.-Feb. 1991, pp. 62-82.
3. Naaman, A. E. and Alkhairi, F. M., "Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons: Part 2 - Proposed Methodology", *ACI, Structural Journal*, V.88, No.6, 1991, 11-12.
4. Ramos, G. and Aparicio, A. C., "Ultimate Analysis of Monolithic and Segmental Externally Prestressed Concrete Bridges", *ASCE, The Journal of Bridge Engineering*, V.1, No.1. 1996.
5. Tan, K. H. and Ng, K. H., "Effects of Deviators and Tendon Configuration on Behavior of Externally Prestressed Beams", *ACI, Structural Journal*, V.94, No.1, 1-2, 1997.
6. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)," 1983.
7. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*, 1st Edition, 394 pp., 1994.