

규격별 비부착 긴장재의 극한응력식에 대한 비교 연구

A Comparative Study on the Ultimate Tendon Stress of Unbonded Tendon According to Various Codes

유 성 원* 서 정 인*
Yoo, Sung Won Suh, Jeong In

ABSTRACT

The unbonded prestressed concrete(PSC) members exhibit very different structural behavior from that of bonded PSC members because of having different tendon stress increment. Recently, AASHTO changed the provision of ultimate tendon stress with unbonded tendons, because some researches tried to improve the provision of ultimate tendon stress with unbonded tendons. The purpose of the present study is to compare various Codes with the ultimate failure stresses of prestressing(PS) steels for the unbonded PSC members. To this end, Some national Codes have been collected and analyzed. A series of major influencing variables have been included in the analysis. It was found that the span-depth ratio, neutral axis depth-effective depth ratio, concrete compressive strength, effective prestress, and prestressing steel ratio have great influence on the ultimate failure stress of PS steel in unbonded PSC members. The Comparison indicates that existing formulas including ACI and domestic Code's equations shows some unwarranties. The present study allows more realistic analysis and design of prestressed concrete structures with internal unbonded tendons.

1. 서 론

최근에 AASHTO⁴⁾에서는 비부착 강선의 극한응력 값에 대한 규정을 완전히 새로운 개념으로 개정하여 미국의 ACI318³⁾ 규정에 근간을 둔 국내의 콘크리트구조설계기준¹⁾과 상당한 안전여유를 가지고 있는 것으로 알려진 도로교설계기준²⁾ 및 그리고 ACI 규정들의 비부착 강선 극한응력 값에 대한 새로운 연구 활동이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 이러한 비부착 강선의 극한응력 규정에 대한 개정 분위기에 맞춰 세계 각국의 비부착 강선의 극한응력 값에 대한 규정들을 취합하여 분석하고, 각 규정별 주요 변수에 대한 고찰을 수행하고 각 규격의 특성을 비교 평가하고자 하였다.

* 정회원, 우석대학교 토목공학과 조교수

2. 각 규격별 비부착 강선 극한응력 식(f_{ps})

2.1 ACI 318 규정

내부 비부착 강선의 극한응력 증가량을 결정하기 위해서 1971년 ACI규정에서는 다음 식 (1)을 제안하였다. 식 (1)은 1971년의 Mattock⁶⁾이 수행한 단순지지 부재의 실험결과에 의해 제안하였으나, 1978년 Gamble과 Mojtahedi⁷⁾는 트러스요소를 이용한 이론적 접근에 의해 식 (1)의 변수인 f_c'/ρ_p 외에 지간길이-유효깊이비(L/d_p)에도 영향을 받는 것으로 발표하였다.

$$f_{ps} = f_{se} + 10,000 + \frac{f_c'}{100 \rho_p} \leq f_{py}$$

or ($f_{se} + 60,000$) (psi) (1)

여기서, f_{se} = 유효프리스트레스이며, f_{py} = 강선의 항복강도, f_c' = 콘크리트 압축강도이다.

Gamble과 Mojtahedi의 연구결과에 의해 1983년에 ACI규정은 식 (1)은 지간길이-유효깊이비가 35 이하의 경우로 제한함과 동시에 지간길이-유효깊이비가 35를 초과하는 경우는 다음 식 (2)를 규정하여 현재에 이르고 있다.

$$f_{ps} = f_{se} + 10,000 + \frac{f_c'}{300 \rho_p} \leq f_{py}$$

or ($f_{se} + 30,000$) (psi) (2)

2.2 AASHTO 규정

1983년의 AASHTO규정 역시 ACI와 유사하였으나, 1994년의 규정에서는 지간길이-유효깊이비와 부착 감소계수(Bond Reduction Factor) 및 작용하중형태를 변수로 하여 다음 식 (3a)과 같이 개정하였다.

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

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

Ω_u (부착감소계수) = $\frac{1.5}{L/d_p}$: 1점 집중하중 경우, $\frac{3.0}{L/d_p}$: 2점 집중하중 또는 등분포하중 경우

L/d_p = 지간길이-강선의 유효깊이비, L_1 = 하중을 받는 지간길이, L_2 = 강선의 길이

ϵ_{cu} = 콘크리트 압축연단의 극한변형률(=0.003), E_p = 강선의 탄성계수,

d_p = 강선의 유효깊이, A_s' 와 f_y' = 압축철근의 면적과 항복강도, b = 플랜지의 유효폭,

b_w = 복부 폭 및 h_f = 플랜지의 두께이다.

이러한 AASHTO의 개정은 Naaman과 Alkhairi⁵⁾의 연구결과에 근거한 것으로 그들은 내부 비부착 강선의 응력증가량은 f_c' / ρ_p 보다는 c / d_p , L / d_p 및 작용 하중형태에 의존하는 것으로 주장하였다.

한편, 1998년에 AASHTO는 다시 1994년 식의 단순화를 위해 $\epsilon_{cu} = 0.003$, $\Omega_u = 3/2(d_p/L)$, $E_p = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$, $L_1/L_2 = L/L_i$, $d_p/c = 10$, $3/2L_i = (2 + N_s)/(2L_i) = 1/l_e$ 값을 이용하여 다음 식 (3b)와 같이 개정하였다.

$$f_{ps} = f_{se} + 6300 \left(\frac{d_p - c}{l_e} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (3b)$$

2.3 도로교 설계기준

1999년 도로교 설계기준²⁾의 비부착 강선의 극한 응력 예측식은 식 (4)와 같이 규정되어 있다.

$$f_{ps} = f_{se} + 1,050 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4)$$

2.4 콘크리트 구조 설계기준

1999년에 개정된 콘크리트 구조 설계기준¹⁾의 비부착 강선의 극한 응력 예측식은 다음 식 (5)와 같으며, 또한 식 (5)는 ACI 318-95를 준용하고 있다.

지간/높이 ≤ 35 인 경우

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f_{ck}}{100 P_p} \leq f_{py}$$

$$\text{or } (f_{se} + 4,000) \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

지간/높이 > 35 인 경우

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f_{ck}}{300 P_p} \leq f_{py}$$

$$\text{or } (f_{se} + 2,100) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (5)$$

2.5 캐나다 규격(1984)

1984년에 개정되어 현재까지 사용되고 있는 캐나다의 규격은 AASHTO 1998과 거의 유사함을 알 수 있다.

$$f_{ps} = f_{se} + \frac{725}{L_e} (d_p - c_y) \quad \text{ksi} \quad (6)$$

여기서, $c_y = \frac{\phi_p A_p f_{py} + \phi_s A_s f_y}{0.85 \phi_c \beta_1 f_c' b}$, ϕ_p, ϕ_s, ϕ_c : 강도감소계수

2.6 독일 규격(1980/1984)

2.6.1 1980년 규정

$$\begin{aligned} f_{ps} &= f_{se} + \Delta f_{ps} < f_{py} \\ \Delta f_{ps} &= E_{ps}(\Delta L/L) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\Delta L = d_p/17$, L : 강선의 길이

2.6.2 1984년 규정

1984년에 개정되어 현재까지 사용되고 있는 독일의 규격은 소성 한계에 의한 해석 결과를 사용하도록 권하며, 실용적으로는 다음 식 (8)의 사용도 가능한 것으로 규정하고 있다. 식 (7)은 현재 국내의 도로교 설계기준과 유사한 의미를 가지고 있는 식이다.

$$f_{ps} = 1.05 f_{se} \quad (8)$$

2.7 프랑스 규격(1983)

프랑스에서는 비부착 강선의 극한 응력 예측식을 별도로 규정하고 있지 않다. 왜냐하면, 허용응력설계법에 의한 설계가 주이기 때문이다. 다만, 일반적으로 비부착 강선의 극한 응력 값은 유효 프리스트레스 응력과 동일한 것으로 취급된다.

2.8 영국 규격(1985)

영국의 1985년 규격은 Pannell(1969)의 연구에 기초하여 제정되었으며, 그 내용은 다음 식 (9)와 같다.

$$f_{ps} = f_{se} + \frac{1020}{L/d_p} \left(1 - \frac{1.7 f_{pu} A_{ps}}{f_{cu} b d_p} \right) \text{ ksi} \quad (9)$$

여기서, f_{cu} : 콘크리트의 큐브(Cube) 강도, L : 강선의 길이

3. 각 규격의 비교

식 (1) ~ (9)에 나타난 각 규격들에서 사용하고 있는 주요 변수들은 크게 구분하면 L/d_p , ρ_p/f_{ck} , c 및 f_{se} 로 볼 수 있으며, 주요 변수들에 대한 비교·분석 결과는 다음 절에 나타내었다.

3.1 지간길이-유효깊이비(L/d_p)의 효과

각 규격에서 가장 큰 변수인 지간길이-유효깊이비(L/d_p)를 5 ~ 50 으로 변화시킨 결과를 그림 1에 나

타내었다. 그림 1에서 알 수 있듯이 금번에 새로이 개정된 AASHTO 규정에 의한 강선 응력 값은 지간길이-유효깊이비(L/d_p)가 35 이하인 경우에는 ACI 값보다 상당히 크나, 그 이후에는 약간 작게 평가되고 있음을 알 수 있다. 또한 BS 규정의 변화폭이 가장 크며, 도로교 설계기준, 독일 그리고 프랑스의 규정은 지간길이-유효깊이비(L/d_p)에 무관한 값으로 지간길이-유효깊이비(L/d_p)가 작은 경우에는 매우 보수적인 값이나, 지간길이-유효깊이비(L/d_p)가 큰 경우에는 반대의 결과를 보여주고 있다.

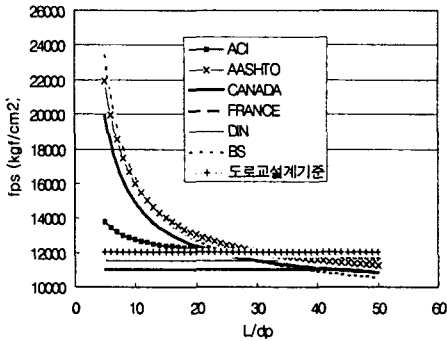


Fig. 1 $f_{ps} - L/d_p$ according to various Codes

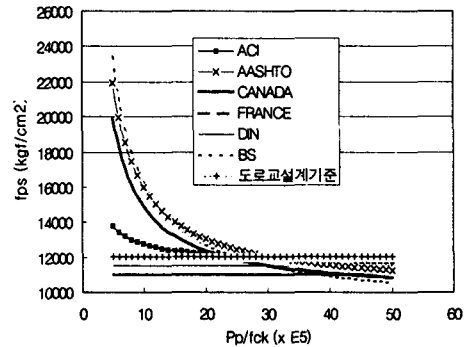


Fig. 2 $f_{ps} - \rho_p/f_{ck}$ according to various Codes

3.2 강재비-콘크리트 강도비(ρ_p/f_{ck})의 효과

ACI 318-95 규정에서 가장 큰 변수인 강재비-콘크리트 강도비(ρ_p/f_{ck})를 5 ~ 50으로 변화시킨 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 금번에 새로이 개정된 AASHTO 규정에 의한 강선 응력 값은 BS 및 캐나다 규정과 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 또한 ACI 규정과는 경향은 거의 같으나, 그 값이 상당히 작게 나타나고 있다. 즉, 강재비-콘크리트 강도비(ρ_p/f_{ck})와 강선 응력 값은 반비례의 관계를 보이거나, 강재비-콘크리트 강도비(ρ_p/f_{ck})보다는 다른 변수가 더 주요 변수임을 의미하는 것을 알 수 있다.

3.3 유효 프리스트레스 응력(f_{se})의 효과

모든 규격에서 초기 변수로 사용하고 있는 유효 프리스트레스 응력(f_{se})를 6,500 ~ 15,000으로 변화시킨 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 모든 규정은 유효 프리스트레스 응력을 초기 변수로 사용하고 있어 동일한 효과를 나타내고 있다. 즉, 유효 프리스트레스가 클수록 강선의 응력을 커지나, 강선의 응력 증가량에는 변화를 주지 못하는 것으로 나타나고 있다.

3.4 중립축 깊이(c)의 효과

ACI 318-95 규정에서 가장 큰 변수인 강재비-콘크리트 강도비(ρ_p/f_{ck})를 5 ~ 220으로 변화시킨 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 금번에 새로이 개정된 AASHTO 규정에 의한 강선 응력 값은 BS 및 캐나다 규정과 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 또한 ACI 규정과는 경향은 거의 같으나, 그 값에서 차이를 나타내고 있다. 즉, 중립축 깊이에 대해서 AASHTO, BS 및 캐나다 규정은 직선 반비례 관계를 보이고 있는데, ACI 규정은 반비례 관계로 중립축 깊이가 작은 경우에는 강선의 응력을 매우 크게 평가하지 못하는 결과 즉, 극한 상태에 접근할수록 안전하지 못한 결과를 나타내고 있다.

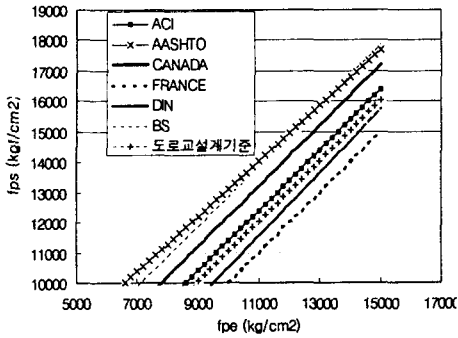


Fig. 3 $f_{ps} - f_{se}$ according to various Codes

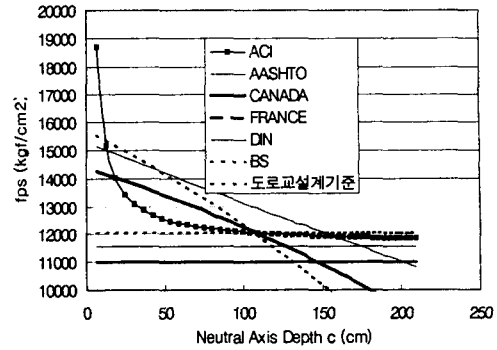


Fig. 4 $f_{ps} - c$ according to various Codes

8. 결론

본 연구에서는 각 규격별 비부착 강선의 극한 응력 식을 주요 변수별로 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 거의 모든 규격에서 L/d_p 가 가장 큰 변수인 것으로 나타나고 있다.
- (2) ACI 318 식의 주변수인 f'_c/ρ_p 보다는 AASHTO 등의 c/d_p 가 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (3) 국내 도로교 설계기준의 경우, 유효 프리스트레스 외에는 영향인자가 없고, L/d_p 및 중립축 깊이가 큰 경우에는 안전하지 못한 값을 나타내고 있다.

참고 문헌

1. 건설교통부, 콘크리트 구조 설계기준, 1999.
2. 건설교통부, 도로교 설계기준, 1999.
3. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95)," 1995.
4. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, 1st Edition, 1994, 1998.
5. 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.
6. Mattok, A. H., and Yamazaki, Journal, and Katula, B., "Comparative Study of prestressed Concrete Beams, With and Without Bond," ACI Journal, Proceedings, V. 68, No.2, February, pp.116-125, 1971.
7. Mojtahedi, S., and Gamble, W., "Ultimate Steel Stress in Unbonded Prestressed Concrete," Journal of Structural Division, ASCE, V.104, No. .ST7, July, pp. 1159-1165, 1978.