

비부착 긴장재의 응력 변화에 영향을 미치는 변수에 관한 고찰

Parametric study for influential factors on unbonded tendon stress increase

이선화*** 문정호* 임재형**

Lee, Sun-Hwa Moon, Jeong-Ho Lim, Jae-Hyung

ABSTRACT

The strain compatibility analysis shows that the influential parameters of loading type, reinforcing ratio, and span-depth ratio affect on the tendon stress in unbonded prestresses concrete member significantly. However, existing test results did not comply exactly with the analytical results. In consequence, the present study was planned to examine the parameters in order to complete Moon/Lim's design equation. The test variables with 12 specimens were loading type, reinforcing ratio, and span-depth ratio. As results, the effects of influential parameters were examined throughly and Moon/Lim's design equation was proven to be accurate.

1. 서론

본 연구는 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 변수에 관한 일련의 연구로서 경간/깊이 비, 일반 철근의 양, 작용하중 형태 등의 변수에 관한 실험결과를 분석한 것이다.

기존 연구에 따르면 경간/깊이 비가 증가할수록 긴장재의 응력증가율은 감소하는 경향을 보인다. 특히 경간/깊이 비가 15 이상이 되면 긴장재의 응력은 급격히 감소하고, 그 이후에는 거의 일정한 분포를 보인다고 밝히고 있다.⁽¹⁾ 그러나 이 결과는 경간/깊이 비에 따라 부재의 단면적도 변화하였으므로, 경간/깊이 비 이외에 단면적에 의한 영향까지 고려된 결과였다. 따라서, 경간/깊이 비의 효과만을 고려하기 위하여 모든 실험체가 동일 단면적을 가질 때 경간/깊이 비를 변수로 한 실험적 연구를 실시하기로 하였다.

일반철근의 영향에 관한 기존 연구는 주로 ACI 318-99에 정의하고 있는 최소 철근비 0.4%를 기준으로 한 실험체들과 최대 철근비 0.36 β_1 근처의 실험체들에 관한 것으로서, 일반철근의 양이 긴장재의 극한 응력 산정시 적지 않은 영향을 미치는 것으로 나타났다.⁽¹⁾ 특히 철근비가 클 경우 ACI 규준식에 의한 긴장재의 극한 응력은 과대평가되는 것으로 나타났다.⁽²⁾ 그러나, 최소 철근비와 최대 철근비 사이

* 정회원, 한남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 우송공업대학 건축과 교수, 공학박사

*** 정회원, 한남대학교 대학원 석사과정

의 보강비를 가진 부분에 대한 명확한 실험적 규명이 없으므로, 일반철근에 관한 연속된 연구로서 최소 철근비와 최대 철근비 사이의 보강비를 가진 부분에 대한 실험적 연구를 실시하기로 하였다.

작용하중의 형태에 관한 기존연구로는 1점 집중하중, 2점 집중하중, 등분포 하중이 작용할 경우에 대한 실험적 연구가 수행되었다. 실험결과에 의하면, 2점 집중하중과 등분포 하중에 의한 긴장재의 응력 및 파괴형상은 거의 비슷한 양상을 나타내었으며, Moon/Lim의 설계식과 AASHTO LRFD규준식에 서와 같이 2점 집중하중과 등분포 하중에 대하여 작용하중의 형태에 관한 계수를 동일하게 평가하는 것은 적절한 판단임을 증명할 수 있었다. 반면 실험체의 단면 형태가 동일함에도 불구하고, 1점 집중 하중에 의한 긴장재의 응력증가량은 2점 집중하중 및 등분포 하중에 의한 긴장재의 응력 증가량보다 적게 나타나는 경향을 볼 수 있었다.⁽¹⁾ 그러나, 참고문헌(3)에 의하면 1점 집중 하중일 경우에도 일반 철근의 양이 많은 경우에는 소성현지가 길어짐에 따라 2점 집중하중 및 등분포 하중과 같은 긴장재의 응력 증가량을 나타내었으므로, 일반철근의 양의 변화에 따른 작용하중 형태에 관하여 실험적 연구를 실시하기로 하였다.

본 연구는 이와 같은 기존 연구결과를 바탕으로 Moon/Lim의 제안식을 완성하기 위한 일련의 실험적 연구로서, 경간/깊이 비, 일반철근의 양, 작용하중의 형태 등의 변수를 중심으로 비부착 긴장재의 응력변화를 보다 적절하게 분석·과악하는데 궁극적인 목적이 있다.

2. 기존연구 결과의 분석

2.1 경간/깊이 비에 따른 긴장재의 응력

그림 1은 경간/깊이 비의 변화에 따른 비부착 긴장재의 응력 증가량에 관한 그래프이다. 참고문헌 (1)은 최소 철근비 0.4%근처의 실험체로서 2가지 뚜렷한 경향을 나타내었다. 첫째, 경간/깊이 비가 증가하면서 긴장재의 응력증가량은 점차 감소한다. 둘째, 경간/깊이 비가 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 미소한 변화를 보인다. 이는 경간/깊이 비의 변화가 긴장재의 응력증가에 중요한 변수이며, 경간/깊이 비가 15이상이 되면 긴장재의 응력증가에 큰 영향을 미치지 못한다는 결론을 나타내고 있다. 그러나, 앞서 설명한 바와 같이 참고문헌(1)의 실험결과는 단면조건이 동일한 상태에서 경간/경간 비만을 변수로 한 것이 아니라, 경간/깊이 비가 증가하면서 단면적 또한 증가하도록 설계된 실험체의 실험 결과이다. 따라서, 경간/깊이 비의 영향을 고려하기 위하여 조건들을 동일하게 설정하여야 한다.

2.2 일반철근 양에 따른 긴장재의 응력

그림 2는 인장철근의 양(ρ)의 변화에 따른 긴장재의 응력 변화에 관해 나타난 그래프이다. 이는 최소 철근비 0.4%근처의 실험체와 최대 보강비 0.36 β_1 근처의 실험체로서 다음의 결과를 나타내고 있다. 최소 철근비 근처의 실험체는 인장철근의 양이 증가하면서 긴장재의 응력증가량이 점차 감소하는 경향을 보였다. 그러나 현 ACI 규준식에서 비부착 긴장재의 응력 산정시 일반철근의 양에 대해 고려하고 있지 않았다. 또한 최대 보강비 근처의 실험체에서는 ACI 규준식과 비교하여 본 결과 인장철근양이 많은 경우 긴장재의 응력을 과대평가하는 것으로 나타났다. 이는 비부착 긴장재의 응력산정시 인장 철근의 양이 중요한 영향을 미치고 있음을 나타내는 것이다. 그러나, 아직까지 최소 철근비와 최대 보강비 사이의 일반철근의 양을 가진 부재에 대한 실험적 규명이 밝혀지지 않았으므로, 이에 관한 상세한 연구를 실시하고자 하였다.

2.3 작용하중의 형태에 따른 긴장재의 응력

그림3은 작용하중 형태에 따른 긴장재의 응력 증가에 관한 그래프로서, 이는 참고문헌(1)에서 작용하중의 형태를 1점 집중하중, 2점 집중하중, 등분포 하중으로 분류하여 실험한 결과이다. 그래프에 따르면 작용하중이 2점 집중하중인 것과 등분포 하중인 것은 소성힌지 길이와 긴장재의 응력 증가율이 비슷한 결과를 나타내고 있으며, 1점 집중하중의 경우 긴장재의 응력증가량이 비교적 적게 나타나고 있다. 이는 긴장재의 응력 변화에 작용하중의 형태가 변수로서 작용하고 있음을 나타내는 것이다. 또한 Moon/Lim의 설계식과 AASHTO LFRD규준식에서와 같이 작용하중의 형태를 고려하고 있는 식에서 2점 집중하중과 등분포 하중의 계수를 동일하게 사용하는 것이 적절한 판단임을 입증하는 것이다. 그러나, 참고문헌(3)에 따르면 일반 철근량이 많아질수록 소성힌지 길이가 길어짐에 따라 2점 집중하중이나 등분포 하중과 같은 응력 증가량을 나타냈다. 이에 따라 본 연구에서는 일반철근의 양이 증가할 때 작용하중의 형태에 따른 변화를 규명하고자 하였다.

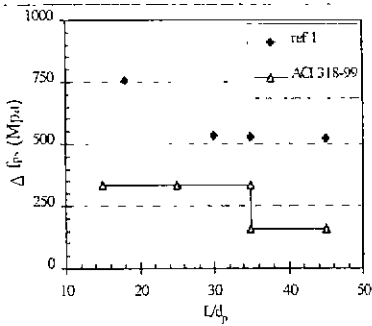


그림 1 경간/깊이 비에 따른 Δf_{ps} 값의 변화

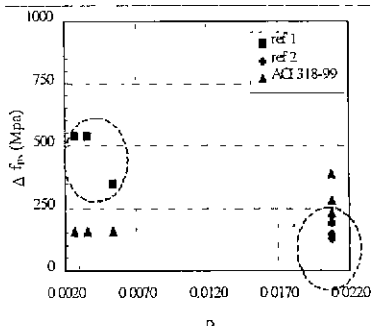


그림 2 인장철근 양에 따른 Δf_{ps} 값의 변화

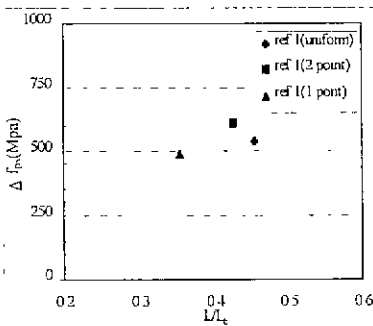


그림 3 작용하중의 형태에 따른 소성힌지 길이비와 Δf_{ps} 값의 변화

3. 실험

3.1 실험체 계획

기존 연구의 분석을 통하여 일반철근의 양, 작용하중의 형태, 경간/깊이 비 등의 변수가 비부착 긴장재의 극한 응력과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 이상의 사실은보다 정량적으로 검증하기 위하여 실험을 실시하였다. 실험체 수는 총 12개이며, 경간/깊이 비, 일반철근 양을 변수로 하였다. 또한 기존의 1점 집중하중이 작용하는 실험체와 함께 작용하중의 형태에 대한 비부착 긴장재의 응력을 비교하기 위하여 전체 실험체의 작용하중 형태는 2점 집중하중으로 계획하였다. 실험체는 경간/깊이 비를 변수로 한 4, 5, 6, 7계열의 실험체로서 4개로 그룹화되었으며, 일반 철근비를 변수로 한 J, K, L계열의 실험체들로서 3개로 그룹화하였다. 기존의 연구결과에 따르면 경간/깊이 비가 15이상이면 경간 길이에 의한 긴장재의 응력 증가량은 미소한 변화를 보인다고 밝히고 있다 따라서 경간/깊이 비가 15이하인 실험체를 계획하였으나, 경간/깊이 비가 15이하인 실험체는 층이 큰 보(Deep beam)에 가까우므로 15이하의 실험체는 제외하기로 하였다. 이상의 실험체에 관한 일람은 표1에 나타내었다.

3.2 실험결과 및 고찰

실험결과를 토대로 균열 및 파괴양상, 변수별 분석결과, 다른 제안식과의 비교 등을 기술하였다. 추가

표1 실험체 일람

Specimen	b x D cm	L cm	Loading type	f_{sc} MPa	f'_c MPa	A_{ps} (ρ_p)	A_s (ρ)	A'_s (ρ')	d_p cm	d cm	e cm	L/d_p
J-4	20 x 35.05	400	2-point	0.6 f_{pu}	39.24	4- ϕ 6 (0.00149)	2-D13 (0.00405)	2-D10 (0.0023)	26.7	31.40	9.18	15
J-5	33.4 x 22.45								16.0	18.80	4.78	25
J-6	46.8 x 17.06								11.4	13.41	2.87	35
J-7	60 x 14.12								8.9	10.47	1.84	45
K-4	20 x 35.05								26.7	31.40	9.18	15
K-5	33.4 x 22.45								16.0	18.80	4.78	25
K-6	46.8 x 17.06								11.4	13.41	2.87	35
K-7	60 x 14.12								8.9	10.47	1.84	45
L-4	20 x 35.05								26.7	31.40	9.18	15
L-5	33.4 x 22.45								16.0	18.80	4.78	25
L-6	46.8 x 17.06								11.4	13.41	2.87	35
L-7	60 x 14.12								8.9	10.47	1.84	45

*Note. Tendon profile = straight $f_s = 420$ MPa Grade
 $f_{pu} = 1860$ MPa Grade D10 = 0.71 cm² (Deformed bar)
 $\phi 6 = 0.1982$ cm² (3-wire mono-strand) D13 = 1.27 cm² (Deformed bar)

적으로 분석에 사용된 기존 연구의 실험결과는 참고문헌(1),(2),(3)에 명시되어 있다.

3.2.1 균열 및 파괴양상

실험체의 최종파괴형상은 전체적으로 거의 동일한 형상으로 파괴되었다. 그러나 소성현저 길이에 있어서는 일반철근의 양을 변수로 한 실험체에 따라 차이를 나타내었다. 일반철근의 양을 변수로 한 실험체는 각 J, K, L계열로 구분되는데, 일반철근 양이 많아질수록 균열이 폭넓게 퍼지는 경향이 나타났다. 소성현저 길이는 부재 전체의 변형에 대하여 고려할 수 있는 변수로서 비부착 긴장재의 응력을 파악하는데 중요한 역할을 한다. 따라서, 일반철근의 양은 비부착 긴장재의 응력 산정시 중요한 변수임을 예측할 수 있다.

3.2.2 경간/깊이 비에 따른 비부착 긴장재의 응력

그림 4는 경간/깊이 비가 각각 15, 25, 35, 45인 실험체에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 실험체 J, K, L계열은 각각 일반철근 비가 $\rho = 0.00405, 0.00809, 0.01214$ 로 실험체를 구분하고 있는데, 일반철근 양이 비교적 적은 실험체 즉, J, K 계열의 경우에 경간/깊이 비가 변화함에 따라 긴장재의 응력변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 반면, 일반철근 양이 비교적 많은 L계열 실험체($\rho = 0.01214$)에서는 경간/깊이 비가 증가할수록 긴장재의 응력증가량이 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 특히, 경간/깊이 비가 25에서 35로 증가할 때 긴장재의 응력은 약 50%정도 감소하고 있음을 알 수 있다.

이는 비부착 긴장재의 응력산정시 경간/깊이 비에 의한 응력 변화가 보강비와 밀접한 관계가 있음을 나타내고 있다. 즉, 최대보강비 $0.36\beta_1$ 의 60~70% 근처에 있을 경우, 경간/깊이 비에 따라 긴장재의 응력 변화가 나타나고 있고 있는 것이다. 따라서, ACI 318-99와 같이 일반철근에 의한 영향을 고려하지 않고, 일관적으로 경간/깊이 비가 35인 점을 기준으로 하여 비부착 긴장재의 극한응력을 산정하는 것은 적절치 못한 것으로 사료된다.

3.2.3 인장철근 양에 따른 비부착 긴장재의 응력

그림 5는 2점 집중하중이 작용할 경우에 인장철근량의 변화에 따른 비부착 긴장재의 응력증가량을 나타낸 것이다. 기존의 연구분석에서 살펴본 바와 같이 인장철근 양이 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 감소하는 경향을 보인다. 따라서 일반 철근의 양은 긴장재의 극한응력 산정시 중요한 변수가 되고 있음을 알 수 있다.

3.2.4 작용하중 형태에 따른 비부착 긴장재의 응력

실험결과에 따르면 1점 집중하중이 작용할 때와 2점 집중하중이 작용할 때 긴장재의 응력 증가량은 약간 변화하거나 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 소성현저 길이비를 살펴보면 2점 집중하중이 작용할 때 1점 하중이 작용할 때보다 소성현저 길이비가 더 증가하고 있음을 발견할 수 있다. 또한 다른 변수에 의한 영향을 고려하여 볼 때 그림 6에서 보는 바와 같이 보강비가 적은 실험체들의 경우에는 작용하중의 형태에 따라 긴장재의 응력에 차이를 보이고 있으나, 보강비가 커지면서 작용하중의 형태에 의한 긴장재의 응력증가비는 거의 나타나지 않았다. 따라서, 작용하중의 형태는 보강비가 적은 경우에만 적용되는 것으로 판단된다.

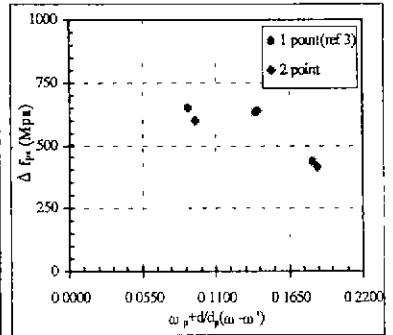
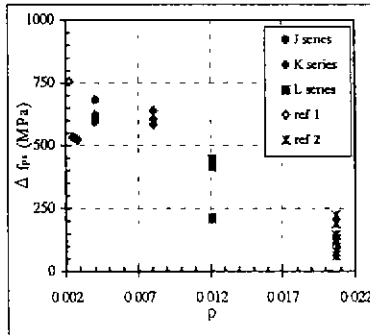
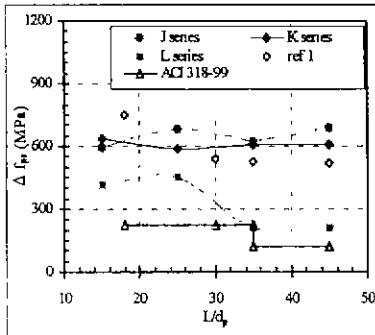


그림 4. 경간/깊이 비의 변화에 따른 Δf_{ps} 값의 변화

그림 5. 인장철근 양의 변화에 따른 Δf_{ps} 값의 변화

그림 6. 보강비에 따른 Δf_{ps} 값의 변화

3.2.5. 다른 규준식과의 비교

최근 비부착 긴장재의 극한응력을 산정하기 위한 식으로 Allouche 등에 의해 식이 제안되었다.⁽⁴⁾ 이 식은 Canada 규준식인 A23.3-94식을 수정하여 제안한 것으로서 기존의 비부착 긴장재에 관한 실험결과와 수치해석모델인 UBCPB에 의한 결과를 비교·분석하여 얻은 결과이다. 이 제안식은 일반적인 다른 변수들과 함께 패턴하중과 작용하중형태를 주요변수로서 적용하고 있다. 이에 관한 식은 다음과 같다.

$$f_{ps} = f_{se} + \frac{1160}{l_c} (d_p - c_y) \left[1 + \left(\frac{c_y}{d_p} \right)^2 \right] \quad (\text{limite : } f_{se} + 70 \leq f_{ps} \leq f_{py})$$

본 실험결과에 대해 기존의 설계식들과 상호 비교하기 위하여 설계식 중 ACI 규준식과 Moon/Lim의 설계식, Allouche 등의 설계식을 비교·분석하였다. ACI 규준식과 Moon/Lim의 설계식에 관한 자세한 내용은 참고문헌(1)에 기술되어 있다.

그림 7은 설계식에 의한 응력증가량과 실험결과에 의한 응력증가량에 대해 상호 비교한 결과이다. 실험결과와 제안식에 의한 비교결과를 정확하게 분석하기 위해서 상관계수 R값으로 나타내었다. 비교결

과 ACI규준식과 Allouche등이 제안한 식은 상관계수 값이 0.3미만의 나타나는 설계식으로서 부적절한 것으로 나타나고 있으나, Moon/Lim의 의한 설계식은 상관계수가 0.8로서 부재의 극한용력을 매우 적절하게 평가하고 있음을 보여주고 있다. 이는 ACI규준식은 일반철근의 양, 경간/깊이 비등 변수에 의한 영향을 고려하지 않았기 때문이며, Allouche등의 설계식은 다양한 변수를 포함하고 있기는 하나, 변수의 조합이 적절치 않기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 Moon/Lim의 설계식은 다양한 변수를 포함하고 있고, 변수의 조합이 적절하여 실험값과 잘 일치하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

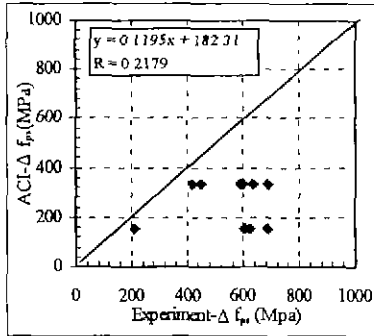


그림 7(a). ACI 318-99

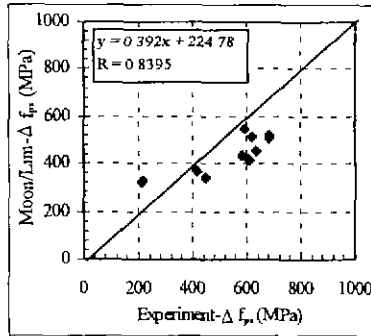


그림 7(b). Moon/Lim의 설계식

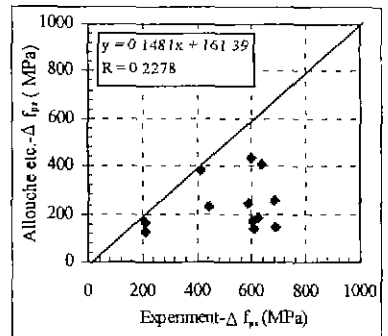


그림 7(c). Allouche etc.의 설계식

4. 결론

- (1) 실험결과에 의하면 경간/깊이 비는 비부착 긴장재의 응력 산정에 영향을 미치는 변수이지만, 일부 구간에서만 경간/깊이 비가 증가함에 따라 긴장재의 응력 증가량이 변화하는 것으로 나타났기 때문에 보다 많은 연구가 필요함을 알 수 있다.
- (2) 기존연구에서 살펴 본 바와 같이 일반철근의 양은 긴장재의 극한응력 산정시 중요한 변수임이 나타났다.
- (3) 기존 연구에서 작용하중의 형태는 긴장재의 응력 산정시 변수로서 작용하는 것으로 나타났으나, 실험결과에 따르면 보강비가 낮은 경우에는 작용하중 형태에 따라 긴장재의 응력이 영향을 받지만, 보강비가 큰 경우에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- (4) 비부착 긴장재의 극한응력에 대해 산정하고 있는 설계식 중 Moon/Lim의 설계식은 다른 설계식에 비해 긴장재의 극한응력을 적절하게 평가하고 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 중요변수에 대한 실험연구", 한국콘크리트학회 논문집 제11권 1호, 1999 2, pp 209-219
- 2 이종운, 임재형, 문정호, 신경재, "비부착 긴장재의 응력을 평가하기 위해 제안된 설계식의 타당성 검증", 한국콘크리트학회 논문집 제11권 4호, 1999 8, pp 73-81.
- 3 Moon, J-H., Shin, K-J., Lim, J-H., and Lee, S-H., "Effects of Stressed and Unstressed Reinforcements in Prestressed Concrete Members with Unbonded Tendons", International Journal of the Korea Concrete Institute, 2000, January, pp 131-138
- 4 Erez N.Allouche, EIT, T Ivan Campbell Ph.D., P.Eng, Mark F. Green, Ph D .P Eng., Khaled A Soudki Ph.D .P Eng., "Tendon Stress in Continuous Unbonded Prestressed Concrete Members - Part 2: Parametric Study" PCI Journal, 1999. 1-2, pp.60-734.