

횡방향 프리스트레스트 박스거더의 균열거동 연구

Cracking behavior of transversely prestressed concrete box girder bridges

오병환* 최영철**
Oh, Byung Hwan Choi, Young Choel

ABSTRACT

The cracking behavior of prestressed concrete members is important for the rational design of prestressed concrete structures. However, the test data on the cracking behavior of prestressed concrete structures are very limited. The purpose of the present study is to investigate the crack spacing and crack width in transversely post-tensioned decks of concrete box girder bridges under applied loading. For this purpose, large scale test members of concrete box girder segments were fabricated and tested. The crack widths, crack spacings and crack patterns were investigated for various load levels. The crack widths and steel strains were continuously monitored during the loading process. To derive a rational prediction equation for crack width, the bond characteristics of post-tensioned steel and nonprestressed rebar in the PSC members were explored first. This was done by measuring the strains of prestressing steel and nonprestressed rebar in the test members under loading. A simple equation for the prediction of maximum crack width in transversely post-tensioned concrete one-way slabs is proposed by considering bond characteristic of prestressing steel and nonprestressed reinforcement. The comparison of proposed equation with experimental data shows good correlation. The present study indicates that ACI and CEB-FIP code equations exhibit rather large deviation from test data on prestressed concrete members.

1. 서론

프리스트레스트 콘크리트 박스거더의 상부 바닥판 하면의 종방향 균열 발생이 다수 보고되고 있다. 이러한 균열은 박스거더 상부 바닥판의 사용성 및 내구성에 큰 영향을 미쳐 전체적인 구조물의 안정성을 저하시키다. 상부 바닥판의 횡방향 프리스트레싱은 이러한 종방향 균열의 발생을 억제시키거나 균열을 제어할 수 있다. 하지만 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 균열은 텐던의 부식을 유발시켜 전체적인 구조물의 강성을 크게 저하시킬 수 있으므로 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 균열거동에 대한 심도 있는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 포스트 텐션닝된 콘크리트 박스거더의 상부 바닥판의

*정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

**정회원, 서울대학교 대학원 박사과정

균열거동을 평가하기 위해서 실 교량부재 크기의 부재를 제작하여 정적재하실험을 수행하였다. 하중단계 별 균열폭과 균열간격 및 텐던과 철근의 변형률을 측정하였다. 실험결과로부터 포스트 텐션닝 텐던의 부착특성을 고려한 최대균열폭 예측식을 제안하였으며, 이는 실제 프리스트레스트 콘크리트 부재의 설계 및 해석에 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 정적재하실험

2.1. 실험변수

본 연구에서 콘크리트 박스거더의 상부 바닥판의 균열거동을 평가하기 위해서 Fig. 1과 같이 박스거더 시험체를 제작하였으며, 각 시험체의 상부 박스거더의 단면 특성은 Table 1. 에 나타내었다. 실험변수는 철근의 직경, 철근 비 및 프리스트레싱 철근 비를 포함하고 있다. 시험체 크기는 모든 시험체에 대해 종방향으로 2.5m, 횡방향으로 6.5m 이며 높이는 1.6m이다. 콘크리트 박스거더 강도는 32.9MPa이며 사용된 철근의 항복강도는 398MPa, 프리스트레싱 스트랜드의 극한강도는 1,892MPa이다.

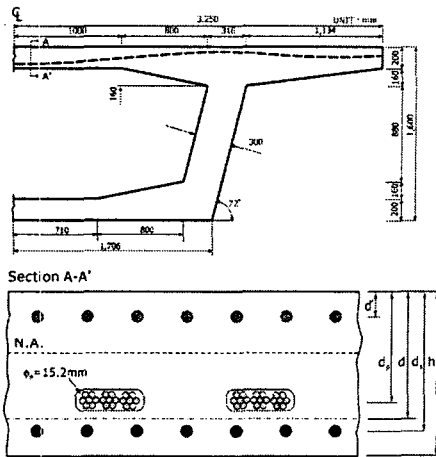


Fig. 1 Schematic diagram for cross section

Table 1. Description of test specimens

Specimen	Tensile steel			Compressive steel			Strand		
	ϕ_s , mm	number	d_s , mm	ϕ'_s , mm	number	d'_s , mm	ϕ_p , mm	Number	d_p , mm
LP0	16	25	162.0	19	25	38.0	-	-	-
LP1	13	13	163.5	16	13	36.5	15.2	3×2	141-153
LP2	13	13	163.5	16	13	36.5	15.2	3×3	141-153
LP3	10	13	165.0	13	13	35	15.2	3×4	142-153

2.2. 재하실험 및 측정

본 시험체는 모노 하이드로잭을 이용하여 프리스트레싱 스트랜드의 극한강도의 75%로 횡방향 포스트 텐션닝을 수행하였으며, Fig. 2와 같이 정적재하실험을 수행하였다. 상부 바닥판 하면에 균열폭을 측정하기 위해서 크랙폭 게이지(crack width gage)를 설치하였으며, 철근 및 텐던에 철근 변형률 게이지를 설치하여 균열에 따른 균열폭과 철근과 텐던의 응력변화를 측정하였다. 또한 하중 단계에 대해서 균열간격을 측정하였다.

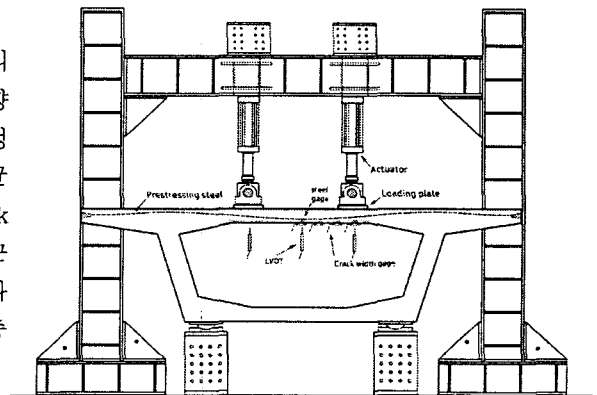


Fig. 2 Schematic diagram for test specimen

3. 실험 결과 및 분석

3.1. 포스트 텐션닝 텐던의 부착특성

프리스트레스트 콘크리트 부재에 대해서 CEB-FIP Model Code에서는 초기 균열 단계에서 대해서 다음 식 (1)과 같이 철근과 프리스트레싱 텐던의 다른 응력증가에 대해 기술하고 있다. 하지만 이는 하나의 덕트안에 멀티 스트랜드(Multi-strands)의 영향과 텐던과 덕트의 접촉에 의한 텐던의 부착에 대한 유효 윤변에 대해서는 고려를 하지 못하고 있다. 따라서 식 (1)은 텐던의 부착에 대한 유효 윤변을 고려한 식 (2)와 같이 되어야 하며 박스거더 상부슬래브의 횡방향 포스트 텐션닝에 일반적으로 사용되는 플랫 덕트에 대해서는 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$\Delta f_p = \sqrt{\frac{\tau_{ap} \phi_s}{\tau_{as} \phi_p}} f_s \quad (1)$$

여기서, Δf_p , f_s 는 감압(decompression)이후의 콘크리트 균열에 의한 텐던과 철근의 응력 증가이며, t_s , t_p 는 각각 사용된 스트랜드와 철근의 직경이다. 그리고 t_{ap} , t_{as} 는 평균 부착응력이다.

$$\Delta f_p = \sqrt{\frac{\tau_{ap} \sum_{op} \phi_s}{\tau_{as} A_p} \frac{f_s}{4}} = \sqrt{\frac{\tau_{ap} \pi + (n-1) \phi_s}{\tau_{as} n\pi} \frac{f_s}{\phi_p}} \quad (2)$$

여기서, S_o , A_p , n 은 한 덕트의 텐던의 유효 윤변, 스트랜드 단면적의 합, 스트랜드의 개수이다.

Fig. 3은 각 부재의 동일한 위치의 철근과 텐던의 철근 게이지로부터 산정된 변형률을 비교하고 있으며 Fig. 4는 한 덕트안의 텐던의 총면적과 유효윤변사이의 관계를 나타낸 그래프이다. CEB-FIP는 프리스트레싱 텐던의 부착에 대한 유효 윤변을 과대평가하고 있음을 알 수 있으며, 식 (2)는 실험결과와 잘 일치하였다. 평균 부착응력의 비(τ_{ap} / τ_{as})는 CEB-FIP Model Code에서 제안한 0.4를 사용하였다.

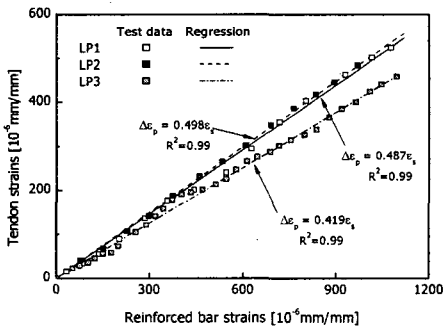


Fig. 3 Relationship between tendon and reinforcing steel strain after decompression

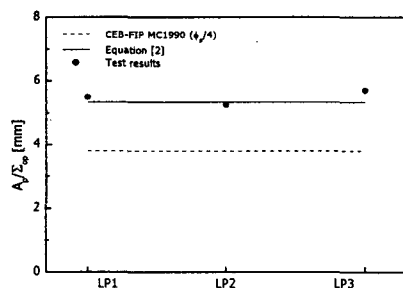


Fig. 4 Comparison of tendon area-circumference ratio in a flat duct

3.3. 균열패턴 및 균열간격

모든 시험체에 대해서 약 500kN의 하중에 대해서 횡방향 균열이 발생한 뒤 각 시편 LP0, LP1, LP2, LP3에 대해서 550kN, 564kN, 643kN, 916kN에 대해서 종방향 균열이 발생하였다. 상부 바닥판의 균열 간격은 철근량의 증가에 따라 감소하는 양상을 보였으며, 동일 철근량에 대해 프리스트레싱 텐던의 양이 증가할수록 균열간격에 약간 감소하는 것으로 나타났다.

3.4 프리스트레스트 콘크리트 부재의 균열폭 예측식

본 연구에서는 기존의 연구를 바탕으로 균열폭이 감압(decompression) 이후 철근의 응력 증가에 비례한다고, 또한 철근의 직경에 비례한다고 가정하였다. CEB-FIP Model Code에서 제시한 콘크리트의 유효

인장 면적을 적용하였다. Fig. 5는 철근과 프리스트레싱 텐던의 다른 부착특성에 따른 부재의 인장부의 철근량에 따른 균열폭과의 관계를 나타낸 것이다. 균열 폭과 철근의 응력은 본 실험 부재에서 측정된 값을 사용하였다. 본 연구에서는 이러한 결과를 이용하여 프리스트레스트 콘크리트 부재의 균열폭 예측식을 다음과 같이 제안하였다. Fig. 6은 본 실험부재에 대해서 제안된 식 (3)과 Gergely-Lutz 방정식과 CEB-FIP Model Code(1990)에서 제안된 균열폭식을 비교한 것이다. 실험결과와 비교할 때 CEB-FIP Code는 LP0 시험체 대해서는 잘 일치하나 프리스트레싱 부재(LP1, LP2, LP3)에 대해서는 다소 과소평가하는 경향을 보였으며, Gergely-Lutz 방정식에 의한 균열폭은 본 실험체에 대해서는 다소 과대평가하는 것으로 나타났다.

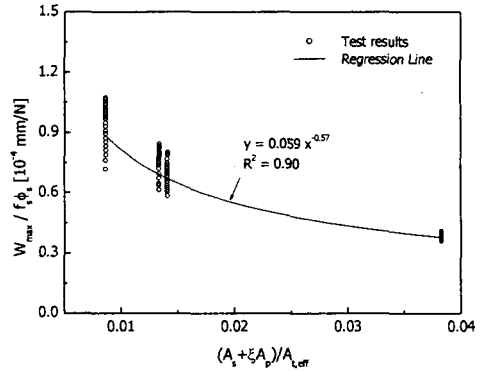


Fig. 5 Correlation between reinforcement ratios and observed crack width

$$w_{max} = 5.9 \times 10^{-6} f_s \phi_s \left(\frac{A_{r,eff}}{A_s + \zeta A_p} \right)^{0.57} \frac{h-x}{d-x}, \quad \zeta = \frac{\tau_{ap} \pi + (n-1) \phi_s}{\tau_{as} n \pi \phi_p} \quad (3)$$

4. 결론

횡방향 프리스트레스트 박스거더의 균열거동에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 포스트 텐션닝된 부재의 균열 폭 산정시 프리스트레싱 텐던의 부착에 대한 유효 윤변(effective circumference)산정시 멀티 스트랜트 및 덕트와의 접촉면을 고려하여야 정확한 균열폭 산정이 될 것으로 사료된다.

(2) 본 연구에서 제안된 최대 균열폭 예측식은 프리스트레싱 텐던과 철근과의 서로 다른 부착특성을 고려하여 산정된 식으로 실제 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 균열에 대한 설계 및 해석에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

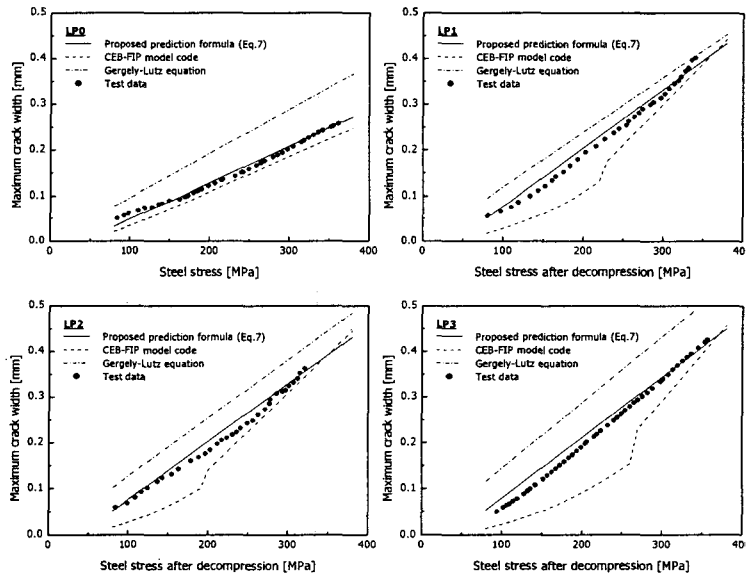


Fig. 6 Comparison of proposed crack width equation with experimental data

참고문헌

1. Bažant, Zdenek P., and Oh, Byung H., "Spacing of Cracks in Reinforced Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 109, No. 9, Sept. 1983, pp. 2066-2085.
2. CEB-FIP, "CEB-FIP Model Code 1990," Comite-Euro international du Beton/Federation Internationale de la Precontrainte, Thomas Telford, London.