

# 콘크리트 충전 강관을 갖는 프리스트레스트 합성형 거더의 강-콘크리트 계면 거동

## Nonlinear Finite Element Analysis of Composite Girder with Concrete Infilled Tube

신동훈\*                      김영훈\*                      이타\*\*                      강병수\*\*\*                      이용학\*\*\*\*  
Shin, Dong Hun      Kim, Young Hoon      Lee, Ta      Kang, Byeong Su      Lee, Yong Hak

### ABSTRACT

Prestressed composite girder bridges with concrete infilled steel tube at negative flexural moment region takes the advantages of enhancing local buckling and flexural resistances resulting from the lateral confining effect of concrete due to the interactive reaction in the interface layer of steel tube and concrete. The interface behavior in concrete infilled tube of the test composite girder is analyzed by 8-node zero thickness interface finite element combined with 3-D. elastoplastic concrete constitutive model and 3-D. elastoplastic Mindlin shell element. The interface effects between infilled concrete and steel tube are investigated through the comparison of the experimental and numerical results.

### 1. 서 론

본 연구에서는 콘크리트와 강재, PS 강재를 합성한 형식의 콘크리트 충전 강관을 갖는 프리스트레스트 합성형교(Prestressed Composite Girder Bridges with Concrete Infilled Steel Tubes ; 이하 PCFT 합성형교)의 부모멘트 구간의 휨 거동에 대한 실험결과를 계면요소를 포함한 비선형 유한요소 해석을 통해 거동특성을 파악하였다. 부모멘트를 받는 PCFT 합성형교는 하부 강관에 콘크리트를 충전하여 큰 압축력을 콘크리트가 부담하고, 콘크리트 바닥판의 인장응력을 감소시키기 위해서 바닥판 콘크리트의 타설 후 상부 플랜지에 프리스트레스트를 도입하는 구조형식으로, 지점부의 큰 압축력으로 인한 하부 강관의 좌굴을 방지, 강관의 구속으로 인한 콘크리트의 구속효과로 극한 내력이 증가하는 장점이 있다. PCFT 합성형교의 전단연결재가 없는 강관내부의 합성거동은 강관과 콘크리트 계면에 발생하는 부착력과 전단력이 일체화작용의 역할을 한다. 초기 하중상태에서는 계면에 슬립이 발생하지 않고 완전한 합성거동을 보이나 하중 증가에 따라 계면 파괴상태에 도달하면 콘크리트와 강관의 계면에 슬립이 발생하며 구조적으로 불완전한 합성거동이 발생한다. 실험을 통하여 PCFT 합성형교의 휨

\* 정회원, 건국대학교 토목공학과 대학원

\*\* 정회원, (주)삼립엔지니어링 부장

\*\*\* 정회원, SK건설, 공학박사

\*\*\*\* 정회원, 건국대학교 토목공학과 부교수

거동을 관찰하고, 계면요소의 유무에 따른 비선형 유한요소해석을 통하여 PCFT 합성형교의 휨 거동을 예측하고, 수치해석결과와 실험결과를 비교 검토하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험체

실험체는 지간장이 3.6 m이고, 상부 콘크리트 바닥판은 상부 플랜지에 전단연결재로 합성되어있고, 하부는 콘크리트로 충전된 강관으로 구성된다. 콘크리트 바닥판은 700 mm의 폭과 100 mm의 두께를 가진다. 상부 플랜지는 250 mm의 폭과 14 mm의 두께를 가진다. 하부 강관은  $\phi 165.2$  mm의 외경과 6.8 mm의 두께를 가진다. 실험체의 상세는 Fig. 1과 같다.

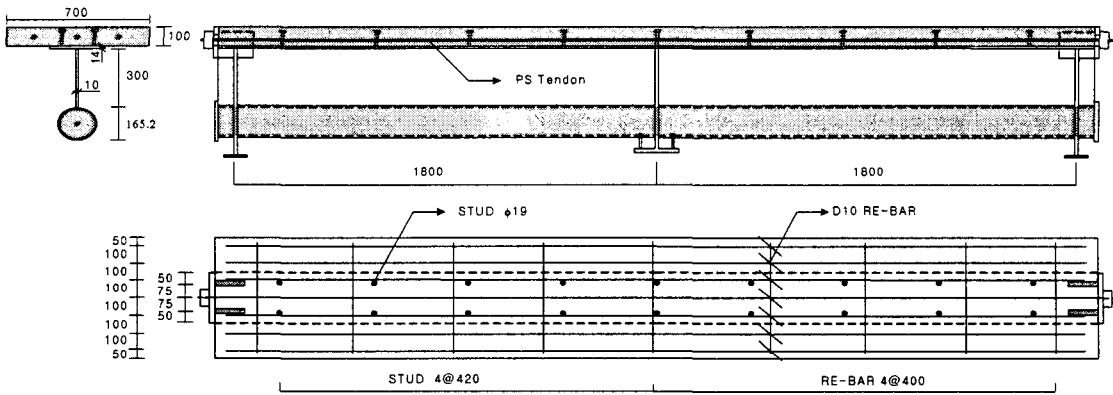


Fig. 1 Detail of specimen (Unit : mm)

### 2.2 실험체의 재료 물성값

실험체에 사용된 콘크리트는 상부 콘크리트 바닥판과 하부 강관 충전 콘크리트가 있으며, 강재는 강관(SS 400), 강판(SPPH 42), 철근(SD 35)과 PS강선(SWPC 7B)이 사용되었다. 각 재료의 물성값은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of concrete and steel (Unit : MPa)

강재					콘크리트				
시험편	$f_y$	$f_u$	$E_s$	$\nu$	시험편	$f'_c$	$f'_t$	$E_c$	$\nu$
SS400-10mm	313	469	193,100	0.30	바닥판콘크리트	28.0	2.8	23,100	0.19
SS400-14mm	308	465	196,200	0.30	충전콘크리트	33.3	3.2	21,200	0.19
SPPH 42-6.8mm	358	415	175,300	0.30	-	-	-	-	-
SD35-D10	364	539	197,700	-	-	-	-	-	-
SWPC 7B	1,721	1,923	202,400	-	-	-	-	-	-

### 2.3 실험방법

실험은 2942 kN 용량 MTS를 이용하여 1점 가력을 하였으며, 처짐량을 측정하기 위해서 가력점 하부와 가력부에서 양 지점으로 200 mm 떨어진 위치에 변위계를 설치하였고, 강관 마구리 변위를 측정하기 위하여 마구리중앙에 변위계를 설치하였다. 하중재하는 0.02 mm/sec의 변위제어로 수행하였다.

## 3. 수치해석

### 3.1 수치해석 모델링

본 연구에 적용한 3차원 유한요소 모델은 종·횡방향으로 각각 대칭을 이루므로 Fig. 2와 같이 1/4모델링으로 하였으며, 모델의 물성치는 Table 3과 같다.

#### 3.1.1 콘크리트의 비선형 구성모델

실험체의 콘크리트에 대한 3차원 재료 비선형 거동예측은 탄성영역 및 경화·연화영역을 포괄하는 네 계수 파괴포락선<sup>6)</sup>에 근거한 절점당 3개의 변위 자유도를 가지는 8절점 3차원 육면체 요소를 사용하였고, 콘크리트구성모델을 구성하는 네 개의 계수는 Mode II 파괴를 정의하는 두 마찰계수  $k_a$ 와  $k_c$ , Mode I 파괴를 정의하는 점착 혹은 탈점착계수  $k_b$  및 편차응력축과 등압축에서 파괴포락선의 cap영역을 정의하는 cap계수  $k_n$ 으로 구성되어 있으며, 모델의 물성치는 Table 3과 같다.

#### 3.1.2 강재의 탄-소성 구성모델

강재의 3차원 비선형 거동을 예측하기 위하여 연성재료에 일반적으로 적용되는 von Mises 파괴규준을 사용한 절점당 6개의 자유도를 가지는 4절점 3차원 Mindlin shell 요소를 사용하였다.

#### 3.1.3 계면 탄-소성 구성모델

실험체의 강관과 충전콘크리트 계면에 대한 비선형 거동의 예측은 Mohr-Coulomb 파괴규준에 근거한 세 계수 계면파괴포락선모델을 사용하였고, 계면구성모델을 구성하는 아홉 개의 계면구성계수는 비부착마찰계수 ( $\phi^{max}$ ), 잔류마찰계수 ( $\phi^{res}$ ), 부착강도 ( $\nu^{max}$ ), 곡률계수 ( $k^{max}$ ), 마찰각 구분계수( $\eta$ ), Mode I 에너지방출률 ( $G_f^I$ ), Mode II 파괴 에너지 방출률 ( $G_{fu}^{II}$ ,  $G_{fb}^{II}$ )과 소성흐름 변환계수 ( $I_p$ )이며 모델에 적용한 값은 Table 3과 같다. 요소의 형태는 Fig. 3과 같이 3차원 8절점 요소로써 요소의 두께를 0로 가정하였다.

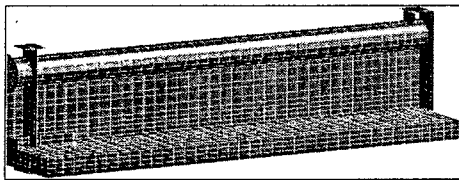


Fig. 2 3-D. Finite Element Discretization

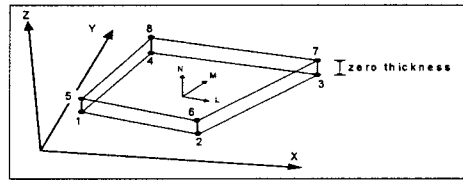


Fig. 3 8-node zero thickness interface element

### 3.2 수치해석 결과

#### 3.2.1 구성모델 계수값

Table 3 Parameters of constitutive model (Unit : MPa)

Interface	$\phi^{max}$	$\phi^{res}$	$\nu^{max}$ (MPa)	$k^{max}$ (MPa)	$\eta$ (MPa <sup>-1</sup> )	$G_f^I$ (N/mm)	$G_{fu}^{II}$ (N/mm)	$G_{fb}^{II}$ (N/mm)	$I_p$ (MPa)
	0.70	0.57	0.10	0.03	6.50	0.20	0.32	10.00	0.25
Concrete	$f_c$	$f_t$	$E_c$	$\nu$	-	-	-	-	-
	28	2.8	23,100	0.19	-	-	-	-	-
Steel	$f_y$	$E_s$	$\nu$	-	-	-	-	-	-
	313	193,100	0.30	-	-	-	-	-	-

### 3.2.2 수치해석 결과의 비교

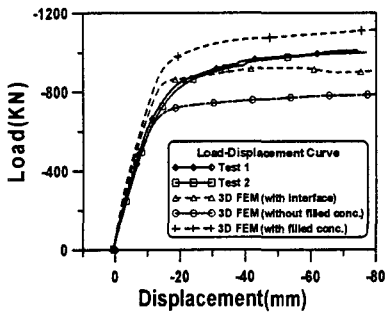


Fig.4 Load-deflection curves

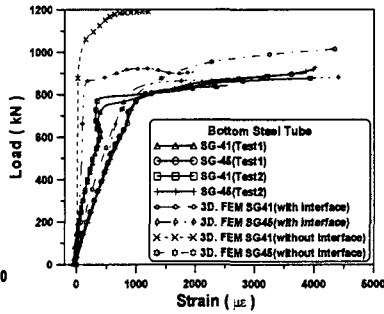


Fig.5 Load-lateral strain of steel tube

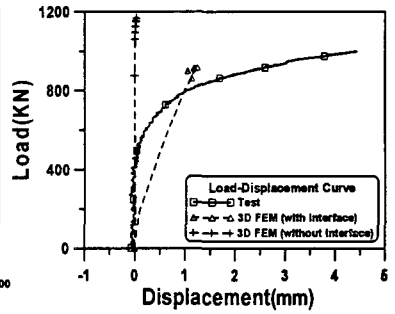


Fig.6 Load-Displacement of steel cap

## 4. 결론

부모멘트를 받는 PCFT 합성형교의 휨 거동을 분석하기 위해 수행된 실험결과를 계면유한요소를 고려한 3차원 비선형 유한요소해석을 통해 예측하고 두 결과의 비교를 통해 전체 구조물 거동에 대한 계면거동효과를 분석하였다. 이 과정을 통해 계면파괴로 인한 계면슬립발생과 구조물에 미치는 영향을 실험결과와 비교함으로써 검토하였다. 계면요소의 유무에 따른 3차원 비선형 유한요소해석 결과는 계면요소가 있는 모델이 없을 경우보다 극한하중이 17% 정도 감소함을 보여주었다. 이러한 수치해석상의 결과는 계면의 파괴 거동이 구조물의 극한 하중저항에 불리하게 작용한다는 것을 보여주며 강관 양단의 변위를 고려하는 계면요소가 있는 해석의 경우가 없는 경우보다 실제 거동에 근사한 변위 결과를 보여줌을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Barnes, R. A. and Mays, G. C. (2001). "The Transfer of Stress through a Steel to Concrete Adhesive bond", International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 21, pp. 495-502.
2. Carol, I., Lopez, C. M. and Roa, O. (2001). "Micromechanical analysis of Quasi-Brittle Materials using Fracture-based Interface Elements", Int. J. Numer. Meth. Engng, Vol. 52, pp.193-215.
3. Chiew, S. P., Dong, Y. X. and Sho, C. K. (1999). "Concrete-Steel Plate Interface Characteristics for Composite Construction", Computing Developments in Civil and Structural Engineering, pp.35-40.
4. Lotfi, H. R. and Shing, P. B. (1994). "Interface Model Applied to Fracture of Masonry Structures", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 1, January, pp.63-79.
5. Willam, K. and Warnke, P., "Constitutive Model for Triaxial Behavior of Concrete", Seminar Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, ISMES, Bergamo, Italy, May 1974, IABSE-Report No.III, 1974, pp. 1-30.
6. 주영태, 이용학, "콘크리트 3차원 구성모델을 위한 네 계수 파괴포락선의 개발", 대한토목학회 논문집, Vol.19, No.I-1, 1999, pp. 79-88.