



콘크리트 충전 강관을 갖는 프리스트레스트 합성거더의 부모멘트 구간 거동

강병수¹⁾·주영태²⁾·이용학^{1)*}

¹⁾건국대학교 토목공학과 ²⁾마이다스아이티

(2005년 5월 2일 원고접수, 2006년 1월 16일 심사완료)

Flexural Behaviors of PSC Composite Girders in Negative Moment Regions

Byeong-Su Kang¹⁾, Young-Tae Ju²⁾, and Yong-Hak Lee^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

²⁾MIDAS IT, 258-1, Seohyeon-dong, Bundang-gu, Seongnam 463-824, Korea

(Received May 2, 2005, Accepted January 16, 2006)

ABSTRACT

Prestressed composite girder with concrete infilled steel tubes(PSC-CFT girder) is new type of bridge girder which enhances the resisting capacities due to the double composite action of PSC composite girder and concrete infilled tube. The flexural behaviors of PSC-CFT girder in the negative moment regions are investigated based on the experimental observations recently performed on two of 3.6m long specimens. The mechanical and structural roles and failure mechanism of the composite action are discussed through comparing the test results with those numerically predicted by the three methods of one and three-dimensional nonlinear finite element analysis, and section analysis method.

Keywords : concrete infilled tube, prestressed composite girder, negative flexural behavior, nonlinear finite element analysis

1. 서 론

최근 강재와 콘크리트의 단점을 보완하고 그 장점들을 극대화한 뛰어난 구조적 성능을 가진 콘크리트 충전 강관(CFT : concrete-filled steel tube)을 이용한 합성교량의 시공이 늘고 있다. 콘크리트 충전 강관을 이용한 합성거더는 강관 측면에서 보면 강관의 국부좌굴이 충전된 콘크리트에 의해 억제되며, 콘크리트 측면에서 보면 콘크리트가 강관에 의해 구속되므로 콘크리트의 연성을 증가시켜 콘크리트의 변형 능력을 향상시키는 장점을 갖고 있다. 또한, 부모멘트를 받는 교량의 하부에 콘크리트를 타설하여 부모멘트 구간을 보강한 구조형식으로는 Saul¹⁾에 의해 개발·제안된 콘크리트와 강재의 이중합성작용을 이용한 이중합성형교가 있다.

본 연구에서는 강관에 콘크리트를 충전하여 콘크리트와 강관의 이중합성작용을 이용한 콘크리트 충전 강관을 갖는 프리스트레스트 합성거더(PSC-CFT girder)의 역학적 및 구조적 거동 특성을 실험과 수치해석을 통해 분석하였다. 부모멘트를 받는 PSC-CFT 거더의 거동 특성을 파악하기

위해서 거더 하부에 콘크리트를 충전한 강관을 설치하고, 상부에는 콘크리트 바닥판의 큰 인장력으로 인한 균열을 방지하기 위해 상부 콘크리트 바닥판에 Post-tensioning 방식으로 프리스트레스트를 도입한 지간장이 3.6m인 2개의 실험체를 제작하여 휨 거동 실험을 수행하였다. 수치해석적 측면에서 보 요소를 사용한 비선형 유한요소해석과 3차원 비선형 유한요소해석을 통해 PSC-CFT 거더의 하중-변위 관계, 하중-변형률 관계, 단계별 하중에 따른 중립축 변화 및 모멘트-곡률 관계를 예측하고 그 결과를 실험 결과와 비교함으로써 거동 특성을 분석하였다. 하부 강관의 콘크리트 충전 유무에 따른 강성증가의 정도를 평가하기 위해 별도의 수치해석을 수행하여 콘크리트 충전에 따른 콘크리트의 구속효과가 구조체의 강성에 미치는 영향 정도를 분석하였다.

부모멘트를 받는 PSC-CFT 거더의 상부 콘크리트 바닥판에 발생하는 인장응력은 Post-tensioning 방식으로 프리스트레스트를 도입한 PS강재가 부담하고, 하부의 압축응력은 강관에 충전된 콘크리트가 부담함으로써 경간의 장대화, 처짐의 감소 및 내하력의 증가와 같은 장점이 있음을 확인하였다.

* Corresponding author

E-mail : leeyo@konkuk.ac.kr

©2006 by Korea Concrete Institute

2. 콘크리트 충전 강관 구조의 역학적 거동

2.1 횡구속된 콘크리트의 역학적 특성

강관으로 구속된 콘크리트의 응력은 삼축 압축 상태이며, 콘크리트의 구속으로 인한 삼축 압축 상태의 콘크리트 파괴거동은 Mohr-Coulomb이론으로써 일반적으로 수식화할 수 있다. Fig. 1에 보여진 바와 같이 Mohr-Coulomb 파괴포락선은 최대 및 최소 주응력으로써 파괴를 정의하며, 이때 최대 주응력은 횡구속된 콘크리트의 압축강도를 최소 주응력은 횡구속응력으로 볼 수 있으며, 이를 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} f_{cc}' &= \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} f_{rp} \\ &= f_c' + m f_{rp} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, f_c' 는 구속하지 않은 콘크리트의 압축강도, f_{cc}' 는 구속된 콘크리트의 압축강도, f_{rp} 는 콘크리트에 대한 최대 횡구속응력, m 은 콘크리트의 구속계수를 의미한다. 많은 연구자들의 실험 결과들로부터 보통 콘크리트의 구속계수(m)는 4-6정도의 범위를 갖는 것으로 보고가 되고 있다^{2,3)}. 본 연구에서는 콘크리트의 구속계수를 4.0으로 가정하였다.

2.2 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계

콘크리트가 강재로 외부가 둘러싸여 구속을 받을 때, 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Fig. 2와 같이 정의할 수 있으며, 콘크리트의 응력-변형률 곡선에 대한 수식은 Popovics⁴⁾에 의해 제안되어, 후에 Mander 등⁵⁾에 의해 수정된 식 (2)~(5)의 관계를 사용하였다.

$$f_c = f_{cc}' \frac{xr}{r-1+xr} \quad (2)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} \quad (3)$$

$$r = \frac{E_{ct}}{(E_{ct} - f_{cc}'/\epsilon_{cc})} \quad (4)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_c \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}'}{f_c'} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

여기서, f_c 는 콘크리트의 일축압축응력, ϵ_c 는 구속되지 않은 콘크리트의 최대응력에서의 변형률, ϵ 는 콘크리트의 일축 압축변형률, ϵ_{cc} 는 구속된 콘크리트의 최대응력에서의 변형률, E_{ct} 는 콘크리트의 접선탄성계수를 의미한다.

2.3 원형 단면에서의 구속응력 평가

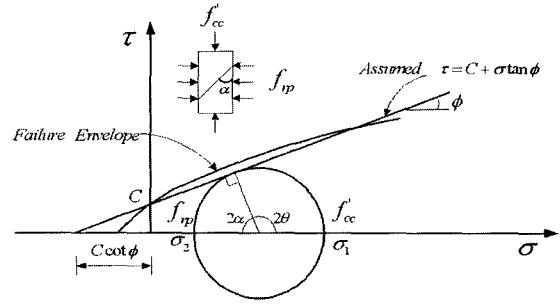


Fig. 1 Mohr-Coulomb failure envelope

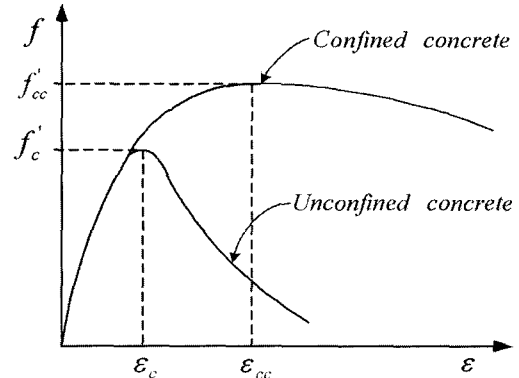


Fig. 2 General stress-strain curves

원형강관으로 구속된 콘크리트의 횡방향 구속응력평가는 Tang 등⁶⁾이 제안한 원형강관의 구속응력 평가식을 사용하였으며, Tang 등⁶⁾이 제안한 방법은 기둥에 작용하는 하중에 따른 콘크리트와 강재의 푸아송비의 변화를 조사하여 경험적인 계수 β 를 결정하였으며, 최대하중에서 횡압력 f_{rp} 은 재료 특성과 기하학적 형상에 의존하며 다음과 같다.

$$f_{rp} = \beta \frac{2t_{tu}}{D - 2t_{tu}} f_y, \quad \beta = \nu_c - \nu_s \quad (6)$$

여기서, t_{tu} 는 강관의 두께, D 는 강관의 외경, f_y 는 강재의 항복강도를 의미하며, 최대강도에서 ν_s 는 0.5이며 식 (6)의 ν_c 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nu_c &= 0.2312 + 0.3582 \nu_e' - 0.1524 \left[\frac{f_c'}{f_y} \right] \\ &\quad + 4.843 \nu_e' \left[\frac{f_c'}{f_y} \right] - 9.169 \left[\frac{f_c'}{f_y} \right]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \nu_e' &= 0.881 \times 10^{-6} \left(\frac{D}{t_{tu}} \right)^3 - 2.58 \times 10^{-4} \left(\frac{D}{t_{tu}} \right)^2 \\ &\quad + 1.953 \times 10^{-2} \left(\frac{D}{t_{tu}} \right) + 0.4011 \end{aligned} \quad (8)$$

결과적으로, 콘크리트가 구속응력을 받을 때, 구속응력에

의해 증가되는 압축강도 f'_{cr} 는 식 (6)을 식 (1)에 대입하여 확정적 형태로 계산할 수 있다.

3. 실험 계획

3.1 실험체 제작

실험체의 형상은 PSC-CFT 연속 합성형교에 대한 부모멘트 구간의 휨 거동 분석을 목적으로 Fig. 3에 보여진 2경간 연속교의 내부지점을 포함하는 부모멘트 구간 모멘트도를 모사하도록 결정하였다. Fig. 4의 실험체는 3.6m의 지간장을 갖고, 폭 700mm, 두께 100mm의 상부 콘크리트 바닥판과 폭 250mm, 두께 14mm의 상부플랜지와 폭 300mm, 두께 10mm의 복부판과 외경 $\phi 165.2$ mm, 두께 6.8mm의 하부 강관으로 구성되었다. 전단스터드는 기성제품을 $\phi 19 \sim 70$ mm 크기로 가공하여 하중작용점과 지점 사이에 2열로 400mm 간격으로 배치하였다. PS강재는 실험체 1개당 3가닥씩 배치하였으며, 실험체에 도입된 긴장력은 PS강재 항복강도의 70%까지 긴장하였다. PS강재의 유효

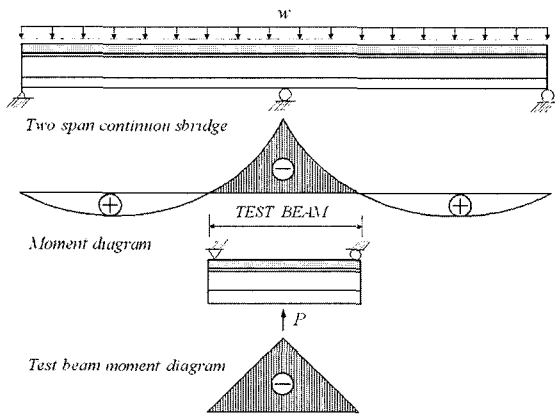


Fig. 3 Schematic description of specimen B

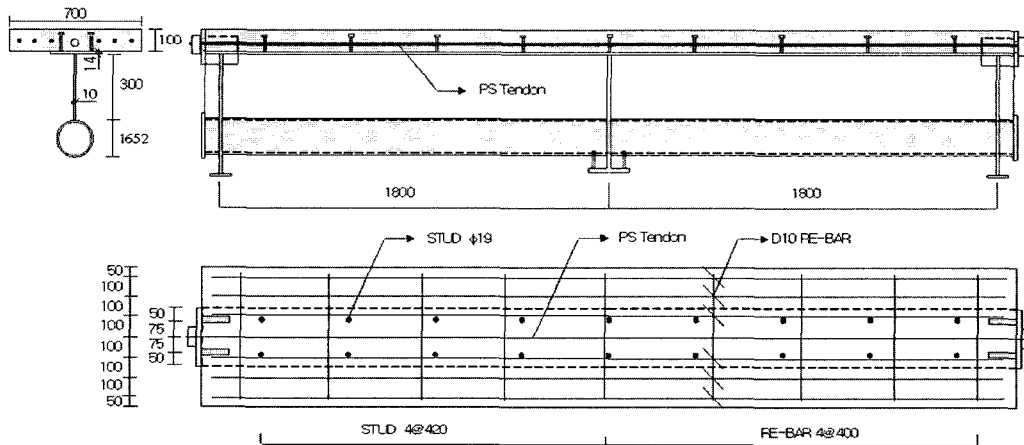


Fig. 4 Details of specimen B(unit : mm)

콘크리트 충전 강관을 갖는 프리스트레스트 합성거더의 부모멘트 구간 거동

Table 1 Design of mix proportion(w/c=0.42 %)

Specimen	Cement (N/m ³)	Water (N/m ³)	Fine aggregate (N/m ³)	Coarse aggregate (N/m ³)	Slump (mm)
Concrete slab	4670	1966	7290	8450	150
Concrete filled tube	4920	2075	7070	8190	200

Table 2 Mechanical properties of concrete

Types of specimen	Age at test (days)	Compressive strength f'_c (MPa)	Tensile strength f'_t (MPa)	Modulus of elasticity E_c (MPa)
Slab concrete	30	28.0	2.8	23,100
Concrete filled tube	50	33.3	3.2	21,200

프리스트레스트력은 정착장치의 활동으로 인해 발생한 3mm 활동량만을 고려하였다.

3.2 재료

3.2.1 콘크리트

Table 1은 압축강도 29.4MPa인 강관 충전용 콘크리트와 상부 바닥판용 콘크리트에 대한 배합설계 결과를 보여준다. 콘크리트 공시체는 상부 바닥판 콘크리트의 강도 측정과 하부 강관 충전 콘크리트의 강도 측정을 위해 각 20개씩 총 40개의 $\phi 150 \times 300$ mm 공시체를 제작하였다. 콘크리트 압축 및 인장강도 시험은 각각 KS F 2405와 KS F 2423의 규정에 따라 수행하였다. 공시체에 부착된 변형률계지를 통해 측정된 콘크리트 재료 물성값은 Table 2와 같다.

3.2.2 강재

Table 3은 실험체 제작에 사용된 강판, 강관, 철근 및 PS강재의 물성값을 보여준다. 강판은 KS D 3503 규격의 강종 SS400인 강재로 두께 10mm 와 14mm인 강판을 사

Table 3 Mechanical properties of steel

Specimen	Yield stress f_y (MPa)	Tensile strength f_u (MPa)	Modulus of elasticity E_s (MPa)	Yield ratio (%)
SS400 (10mm thick)	313	469	193,100	66.7
SS400 (14mm thick)	308	465	196,200	66.3
SPPH 42 (6.8mm thick)	358	415	175,300	85.9
SD35-D10	364	539	197,700	67.6
SWPC B PS $\phi 12.7$ mm	1721	1923	202,400	89.5

용하였다. 강관은 KS D 3562 규격의 강종 SPPH42인 두께 6.8mm 압력용 배관강관을 사용하였으며, KS B 0801의 규정에 따라 인장시험편을 제작하여 인장강도 시험을 수행하였다. 철근은 KS D 3504 규격의 이형철근 SD35인 호칭 D10의 철근을 사용하였다. PS강재는 KS D 7002 규격의 직경 $\phi 12.7$ mm인 SWPC 7B 강연선을 사용하였으며, 7연선의 가운데 있는 PS강선을 추출하여 PS강재의 인장강도 시험을 수행하였다.

3.3 하중재하 및 측정 방법

실험체는 Fig. 3과 같은 모멘트 구간을 가지도록 Fig. 4와 같이 제작된 실험체를 180° 상하 회전하여 실험장비의 지지대에 거치하여 1점 가력으로 실험을 수행하였다. Fig. 5는

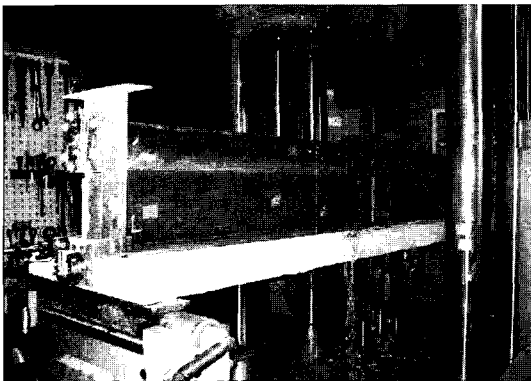


Fig. 5 Installation of specimen B

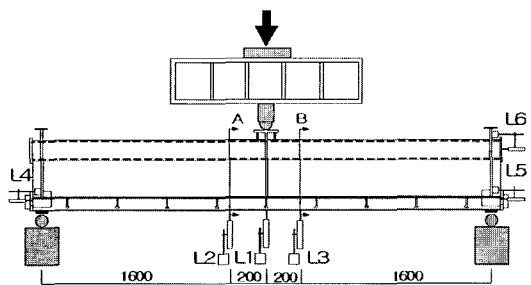


Fig. 6 Locations of LVDTs(unit : mm)

실험수행 과정을 보여주며, 하중재하는 변위제어를 통해 0.02 mm/sec의 속도로 재하하였다.

Fig. 6과 같이 하중 재하점과 중앙부에서 좌우로 200 mm 떨어져 위치한 단면에서의 처짐을 측정하기 위해 실험체 하부에 3개의 변위계(LVDT 300 mm : L1, L2, L3)를 설치하였다. 강재보와 콘크리트 바닥판의 경계면에서 발생하는 전단슬립의 양을 측정하기 위해 양단부에 2개의 변위계(LVDT 50 mm : L4, L5)를 추가로 설치하였고, 충전된 콘크리트와 강관의 계면에서의 슬립으로 인한 양을 측정하기 위해 1개의 변위계(LVDT 50 mm : L6)를 추가로 설치하였다.

상부 콘크리트 바닥판과 강재보에서의 변형률을 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 실험체 중앙부에서 좌우로 200 mm 떨어져 위치한 단면에 변형률게이지를 부착하여 하중에 따른 변형률을 측정하였다.

4. 극한 휨 저항 능력

완전합성형보의 극한 휨 저항 능력은 LRFD(미국, 하중 저항계수법)에 근거하여 콘크리트의 압축부에서 유효폭 전체에 대해 콘크리트의 압축응력분포를 $0.85f_{ck}$ 의 응력사각형분포로 가정하고 철근과 강재 및 PS강재의 응력 분포가 전단면에 대해 완전히 항복한 것으로 가정하여 수행하였다.

Fig. 8은 부모멘트를 받는 합성단면의 극한하중상태에서 발생된 응력분포를 보여주며, 소성중립축이 복부판 내부에

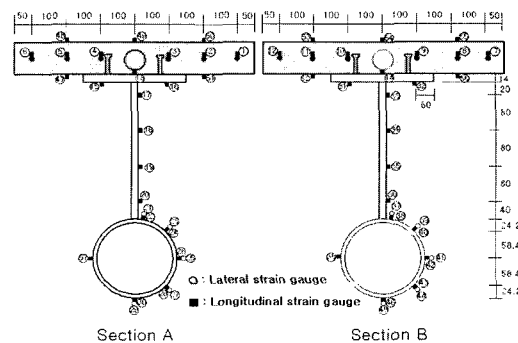


Fig. 7 Locations of strain gauges for cross section A and B(unit : mm)

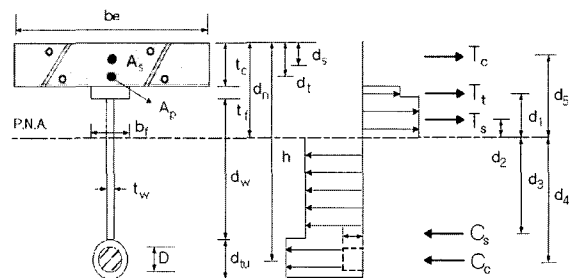


Fig. 8 Stress distribution of composite section under ultimate loads

위치할 경우, 압축력 C 는 식 (9)과 같이 소성중립축 하단의 강관에 충전된 콘크리트의 압축력 C_c 와 강관 및 복부판에 작용하는 압축력의 합력 C_s 의 합력과 같다.

$$C = C_c + C_s \quad (9)$$

인장력 T 는 소성중립축 상단의 철근의 인장력 T_c 와 PS강재의 인장력 T_p 및 플랜지와 복부판에 작용하는 인장력의 합력 T_s 의 합으로서 다음과 같이 계산한다.

$$T = T_c + T_p + T_s \quad (10)$$

정역학적 평형조건($\sum F=0$)으로부터 상부 콘크리트 바닥판 상면에서 소성중립축까지의 거리 d_n 을 계산하면 다음과 같다.

$$d_n = t_c + t_f + \frac{(T_s - A_f f_{fy}) d_w}{A_w f_{wy}} \quad (11)$$

완전합성 단면의 극한 휨 모멘트는 소성중립축에 대한 각각의 모멘트의 합으로서 다음과 같이 계산한다.

$$M_n = T_c d_1 + T_s d_2 + T_c d_3 + C_s d_3 + C_c d_4 \quad (12)$$

여기서, $d_1 = d_n - d_t$

$$d_2 = [A_f f_{fy} (d_n - t_c - \frac{t_f}{2}) + \frac{1}{2} (d_n - t_c - t_f)^2 t_w f_{wy}] \frac{1}{T_s}$$

$$d_3 = [A_{tw} f_{twy} (h - d_n) + (A_w f_{wy} - (d_n - t_c - t_f) t_w f_{wy}) + \frac{1}{2} (t_c + t_f + d_w - d_n)] \frac{1}{C_s}$$

$$d_4 = h - d_n, \quad d_5 = d_n - d_s$$

여기서, A_f , A_{tw} , A_w 는 각각 플랜지, 강관 및 복부판의 단면적이며, f_{fy} , f_{twy} , f_{wy} 는 각각 플랜지, 강관 및 복부판의 항복강도를 나타내고, b_c , t_c , t_f 는 각각 콘크리트 바닥판의 유효폭, 콘크리트 바닥판의 두께 및 플랜지의 두께를 나타낸다.

5. 유한요소해석

철근과 PS강재 및 콘크리트의 재료비선형성을 고려한 보 요소를 사용한 유한요소해석과 3차원 유한요소해석은 다음과 같은 가정 하에서 수행하였다.

- 1) 변형 전에 수직인 PSC-CFT 거더 단면은 변형 후에도 수직인 단면을 유지하는 평면보존의 법칙이 적용된다.

- 2) 강재와 콘크리트는 두 재료의 계면에서 부착슬립이 발생하지 않는 완전부착으로 가정한다.
- 3) 프리스트레스의 손실은 정착구에서의 활동에 의한 즉시 손실만을 고려하며 PS강재의 긴장력 도입으로부터 실험까지의 시간이 비교적 짧아 PS강재의 시간에 따른 손실은 무시한다.
- 4) 유한요소해석은 재료 비선형성만을 고려하며 기하학적 비선형성은 고려하지 않으므로 해석 결과는 좌굴 이전 단계의 거동에 유효하다.

5.1 보요소를 사용한 유한요소해석

보 요소를 사용한 비선형 유한요소해석은 부재의 단면을 분할하여 분할된 단면의 위치에 대응하는 응력-변형률 관계로부터 재료 비선형 특성을 부여하는 방법으로 수행하였다. 유한요소 모델링은 Fig. 9와 같으며 절점 당 3개의 자유도를 갖는 평면 보 요소를 사용하였다. 압축에 대한 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Popovics⁴⁾에 의해 제안되어, 후에 Mander 등⁵⁾에 의해 수정된 식을 이용하였으며, 인장에 대한 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Lodygowski and Szumigala⁷⁾가 제안한 식을 사용하였다. 강관의 구속으로 인한 콘크리트의 횡방향 구속응력평가는 Tang 등⁶⁾이 제안한 원형강관에서의 구속응력을 평가하는 방법을 사용하였으며, 구속계수는 4.0을 사용하였다. 철근과 강재의 응력-변형률 관계는 탄성-완전소성거동으로 가정하였다. PS강재의 응력-변형률 관계는 Mattock⁸⁾에 의해 제안된 Modified Ramberg-Osgood 함수를 사용하였다. PS강재는 요소 내에서 직선으로 배치된 것으로 가정하며, PS 긴장력은 하중 평형법에 의한 등가절점하중을 절점에 작용하는 방법으로 모델링하였다.

5.2 3차원 비선형 유한요소해석

3차원 비선형 유한요소해석은 건국대학교 콘크리트 구조 연구실에서 콘크리트 비선형 거동해석과 구성모델링 연구를 목적으로 개발·사용 중인 New-MICROFEM을 사용하여 수행하였다. 콘크리트 구성모델은 콘크리트의 탄성영역, 경화 및 연화영역을 포괄하는 3차원 콘크리트 거동을 예측하기 위한 Willam and Warnke⁹⁾의 편차평면 근사식을 이용하여 개발된 네 계수 파괴포락선¹⁰⁾을 사용하였으며, 강

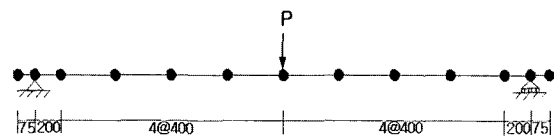


Fig. 9 Modeling for 1-D. FEM(unit : mm)

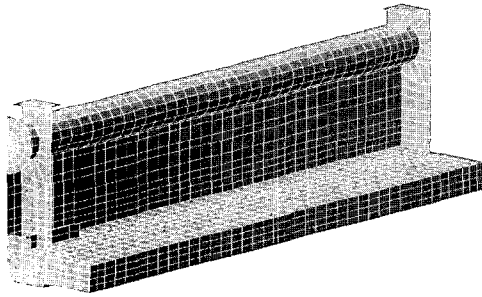


Fig. 10 Modeling for 3-D. FEM

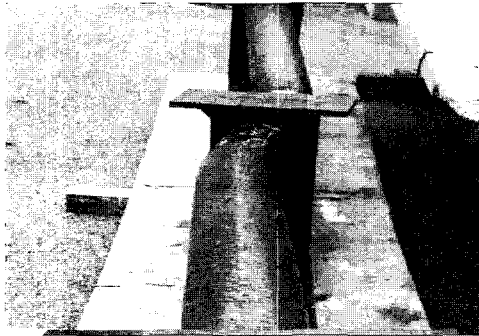


Fig. 11 Lateral-distortional buckling observed of specimen B-1

재의 구성모델은 von Mises 파괴규준을 사용하여 강재의 거동을 탄성거동과 완전소성거동으로 가정한 탄-소성모델을 사용하였다. 철근과 PS강재의 구성모델은 Rankine의 파괴규준을 사용하여 철근 및 PS강재의 거동을 탄성거동과 완전소성거동으로 가정한 탄-소성모델을 적용하였다.

실험체의 3차원 유한요소 모델링은 실험체의 기하학적 대칭성을 고려하여 Fig. 10과 같이 전체형상을 1/4로 분할하여 모델링을 하였으며, 콘크리트는 절점당 3개의 자유도를 갖는 8절점 3차원 육면체 요소를 사용하였으며, 강재는 절점당 5개의 자유도를 갖는 4절점 Mindlin 쉘요소를 사용하였고, 철근 및 PS강재는 절점당 3개의 자유도를 갖는 2절점 트러스 요소를 사용하였다. 긴장력의 도입은 2절점 트러스 요소로 모델링된 PS강재에 온도하중을 주어 등가의 프리스트레스를 도입하는 방법으로 모델링하였다.

6. 결과 및 분석

6.1 실험 결과 및 파괴 양상

Table 4는 실험체의 항복하중, 극한하중, 항복하중시 변위, 극한하중시 변위 및 프리스트레스의 도입으로 인한 수축량을 보여주며, 실험체의 항복하중의 산정 방법은 초기접선과 극한하중과 수평으로 접하는 평행선의 교차점에 대응하는 변위를 항복변위로 정의하였고 그 항복변위에 대응하는 내력을 항복하중으로 정의하였다.

Table 4 Test results of specimen B

Specimen	P_y (kN)	P_u (kN)	δ_c (mm)	δ_y (mm)	δ_u (mm)
Specimen B-1	775	1,012	0.56	-14.8	-80.7
Specimen B-2	773	1,001	0.55	-16.2	-75.4

P_y : Yield load, δ_y : Displacement under yield load

P_u : Ultimate load, δ_u : Displacement under ultimate load

δ_c : Deflection due to prestressing force

Table 5 Ultimate loads of specimen B

Specimen	P_{ue} (kN)	P_{us} (kN)	P_{u1} (kN)	P_{u3} (kN)	$\frac{P_{us}}{P_{ue}}$	$\frac{P_{u1}}{P_{ue}}$	$\frac{P_{u3}}{P_{ue}}$
Specimen B-1	1,012	928	1,116	1,095	0.92	1.10	1.08
Specimen B-2	1,001				0.93	1.11	1.09

e : Experiment, 1 : 1-D. FEM

s : Section analysis, 3 : 3-D. FEM

Table 6 Effects of concrete infilled steel tube

	Sectional analysis	1-D. FEM	3-D. FEM
P_u (kN)	928	1,116	1,095
P_u^A	656	787	790
P_u/P_u^A	1.41	1.42	1.39

P_u : concrete filled steel tube, P_u^A : only steel tube

Table 4의 처짐은 하중재하점 위치에서 측정된 L1에서의 처짐값을 사용하였다.

Table 5는 극한하중에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교한 것으로, 실험에 의한 극한하중과 수치해석 결과에 의한 극한하중은 전체적으로 7~11%로 차이를 보였다. Table 6은 실험체 하부 강관의 콘크리트 충전의 유무에 따른 극한강도의 증가효과를 수치해석으로 분석한 결과를 보여주며, 콘크리트의 충전에 따른 극한강도의 증가는 39~42%를 보였다.

B-1 및 B-2 실험체의 파괴양상은 작용하중이 극한하중에 근접하면서 복부판의 국부좌굴과 횡-뒤틀림좌굴이 발생하였으며, 극한하중 이후의 하중단계에서 Fig. 11에 보여진 바와 같이 현저한 횡-뒤틀림좌굴이 발생하였다.

Fig. 12는 B-1 및 B-2 실험체의 균열 양상을 보여주며, B-1 실험체는 하중 150 kN(처짐 1.3 mm)에서 인장응력으로 인해 하부 콘크리트 바닥판의 균열이 발생하기 시작하여, 하중의 증가에 따라 양단 지점부로 균열이 확산되어갔으며, 하부 콘크리트 바닥판의 균열의 상승으로 인해 하중 250 kN(처짐 3.0 mm)에서 콘크리트 바닥판의 전체 높이까지 균열이 발생하였고, B-2 실험체는 하중 159 kN(변위 1.9 mm)에서 하부 콘크리트 바닥판의 균열이 발생하기 시작하여, 하중의 증가에 따라 양단 지점부로 균열이 확산되어갔으며, 하중 260 kN(처짐 3.3 mm)에서 콘크리트 바닥판의 전체 높이까지 균열이 발생하였다.

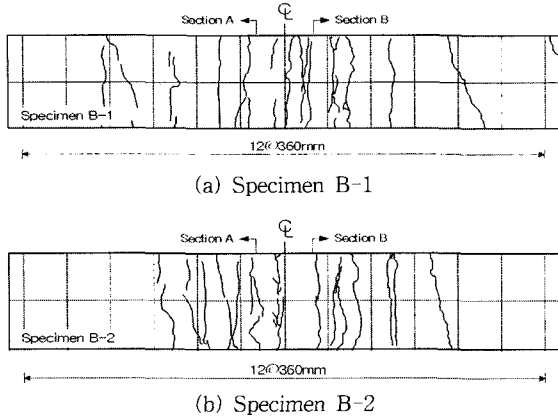


Fig. 12 Crack diagram of Specimen B

6.2 하중-처짐 곡선 및 하중-변형률 곡선

Fig. 14은 실험체의 실험 결과와 수치해석 결과에 대한 하중-처짐 곡선을 보여준다.

Fig. 13는 B-1 실험체의 단면 B에서 측정된 하중-변형률 곡선과 수치해석에 의한 하중-변형률 곡선을 보여준다. 실험체의 단면 B에서의 변형률계이지 위치는 Fig. 7과 같다. 전반적으로 하중 700 kN 이전까지는 수치해석 결과와 실험 결과는 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 하중 700 kN 이후부터는 수치해석 결과는 실험 결과와 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 실험체에서 황-뒤틀림과 굴이 발생하여 실험체의 극한하중이 감소한 것으로 생각된다.

6.3 중립축 및 모멘트-곡률 관계

Fig. 15는 모멘트-곡률 관계에 대한 B-1 실험체의 실험 결과와 수치해석결과를 보여주며, 3차원 유한요소해석에 의한 모멘트-곡률 관계가 보요소를 사용한 유한요소해석의 결과보다 실험 결과에 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 16은 하중단계에 따른 B-1 실험체의 중립축 변화와 수치해석에 의한 중립축 변화를 보여준다. 3차원 유한요소해석으로부터 구한 중립축의 위치는 B-1 실험체의 단면 B에서 측정된 중립축의 위치와 비교적 잘 일치하는 결과를 보였고,

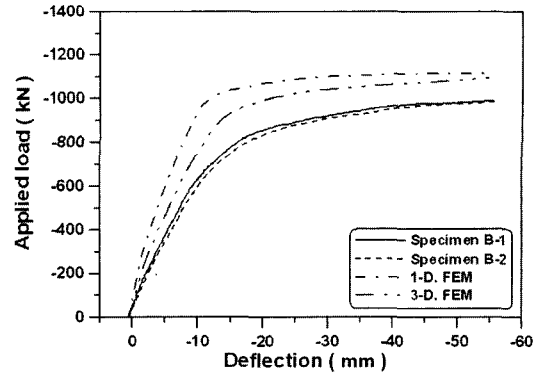


Fig. 14 Applied load vs. deflection curves

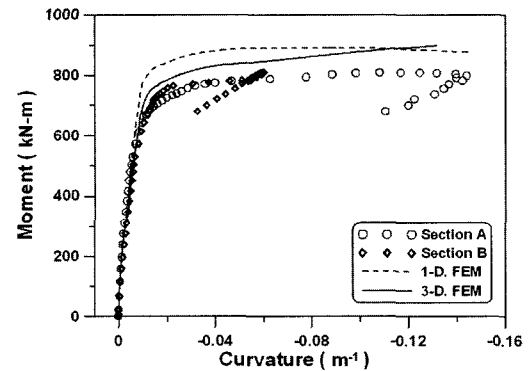


Fig. 15 Moment vs. curvature relationships of Specimen B-1A

보 요소를 사용한 유한요소해석으로부터 구한 중립축의 위치는 초기 프리스트레스를 도입한 단계를 제외하고는 실험 결과에서 측정된 중립축의 위치와 비교적 큰 차이를 보였다.

7. 결론

콘크리트 충전 강관을 갖는 프리스트레스트 합성거더의 부모멘트 구간에서의 휨 거동 특성을 규명하기 위해 실험실 실험과 실험체의 거동 예측을 위한 수치해석을 각각 수행하였다. 실험적 측면에서 콘크리트 충전 강관을 갖는 프리스트레스트 합성거더의 부모멘트 구간 형상을 모사한 2개의 실험체를 제작하여 실험체에 대한 휨 거동 실험을 수행하였다. 수

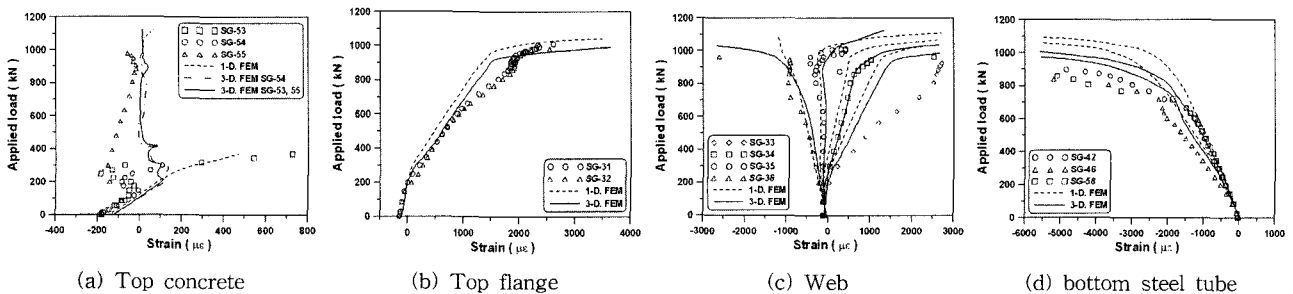


Fig. 13 Applied load vs. strain curves of Specimen B-1

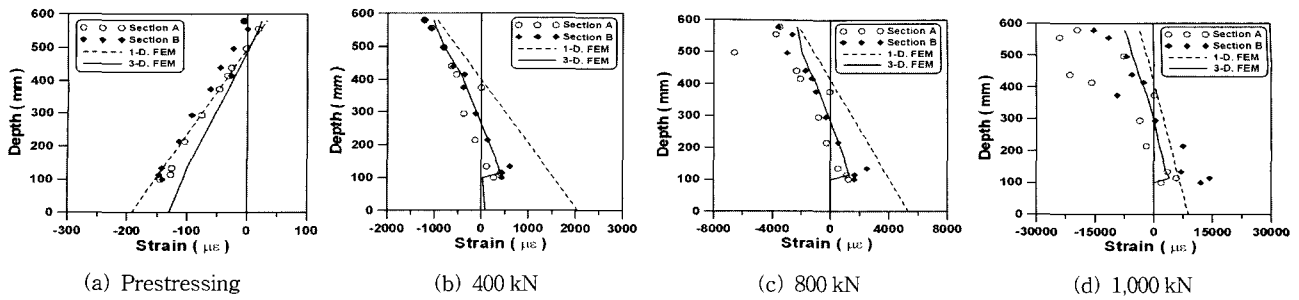


Fig. 16 Comparisons of predicted and measured N.A. of Specimen B-1

치해석적 측면에서 재료비선형성을 고려한 보 요소를 사용한 유한요소해석과 2절점 트러스, 4절점 Mindlin 쉘요소와 8절점 육면체요소를 사용한 3차원 유한요소해석을 각각 수행하여 실험 결과와 비교함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 본 실험연구는 합성 구조체의 거동 특성 파악과 수치해석 모델의 개발에 요구되는 기본 정보를 제공하였으며, 강관의 구속효과로 인한 충전 콘크리트의 강도증가가 구조적 기능의 향상 목적으로 사용될 수 있는 기초 자료를 제공하였다.
- 2) 재료비선형성을 고려한 수치해석 결과는 실험체의 실험결과와 비교적 잘 일치하였으며, 유한요소해법 및 단면해석법에 대한 거동예측방법의 정확성과 적용성을 검증하였다.
- 3) 하부 강관의 콘크리트 충전 유무에 따른 구조물의 저항 성능 증가를 유한요소해법 및 단면해석법과 같은 수치해석적 방법으로 확인하였다.

참고문헌

1. Saul, R., "Bridges with Double Composite Action", *Journal of IABSE, Structural Engineering International*, Vol.6, 1996, pp.32~36.
2. Saatcioglu, M. and Razvi, S. R., "Strength and Ductility of Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.118, No.6, 1992, pp.1590~1607.
3. Sugupta, D. P. G. and Mendis, P. A., "Design of High-Strength-Concrete-Filled Tube Column", In: *Proceedings of the Fifth East-Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Griffith University, Australia, 1995, pp.427~432.
4. Popovics, S., "A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves for Concrete", *Cement Concrete Research*, Vol.3, No.5, 1973, pp. 583~599.
5. Mander, J. B., Priestly, J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.114, No.8, 1988, pp.1804~1826.
6. Tang, J., Hino, s., Kuroda, I., and Ohta, T., "Modeling of Stress-Strain Relationships for Steel and Concrete in Concrete Filled Circular Steel Tubular Columns", *Steel Construction Engineering, JSSC*, Vol.3, No.11, 1996, pp.35~46.
7. Lodygowski, T. and Szumigala, M., "Engineering Models for Numerical Analysis of Composite Bending Members", *Mechanics of structures and machines*, Vol.20, No.3, 1992, pp.363~380.
8. Mattock, Alan H., "Flexural Strength of Prestressed Concrete Sections by Programmable Calculator", *PCI Journal*, Vol.24, No.1 Jan.-Feb., 1979, pp.32~54.
9. 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.
10. 이용학, "콘크리트 3차원 구성모델을 위한 네 계수 파괴 포락선의 개발", *대한토목학회 논문집*, Vol.19, No.1-1, 1999, pp.79~88.

요 약

콘크리트 충전 강관을 갖는 프리스트레스트 합성거더(PSC-CFT girder)는 PSC 합성거더와 콘크리트 충전 강관의 이중합성 작용으로 인하여 구조물의 저항능력을 증대시킨 새로운 개념의 교량형식이다. 부모멘트 구간에서 콘크리트 충전 강관을 갖는 합성거더의 휨 거동은 지간장 3.6m인 2개의 실험체를 제작하여 수행한 실험 결과로부터 분석하였다. 보요소를 사용한 비선형 유한요소해석, 3차원 비선형 유한요소해석 및 단면해석법에 의해 예측된 수치해석 결과와 실험 결과의 비교를 통해 PSC 합성 거더와 콘크리트 충전 강관의 합성작용에 대한 역학적 및 구조적 역할과 파괴메커니즘을 비교하였다.

핵심용어 : 콘크리트 충전 강관, PSC 합성거더, 부모멘트 구간 거동, 비선형 유한요소해석