



인장연화거동을 고려한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 바닥판과 역T형 강재 합성보의 휨거동 해석

유성원¹⁾ · 양인환²⁾ · 정상화^{3)*}

¹⁾우석대학교 토목환경공학과 ²⁾군산대학교 토목공학과 ³⁾한국건설생활환경시험연구원

Analysis of Flexural Behavior of Composite Beam with Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete Deck and Inverted-T Shaped Steel with Tension Softening Behavior

Sung-Won Yoo,¹⁾ In-Hwan Yang,²⁾ and Sang-Hwa Jung^{3)*}

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, Jinchon 365-803, Korea

²⁾Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

³⁾Department of Preceding Research, Korea Conformity Laboratories, Seoul 137-707, Korea

ABSTRACT Ultra high performance concrete (UHPC) has been developed to overcome the low tensile strengths and brittleness of conventional concrete. Considering that UHPC, owing to its composition and the use of steel fibers, develops a compressive strength of 180 MPa as well as high stiffness, the top flange of the steel girder may be superfluous in the composite beam combining a slab made of UHPC and the steel girder. In such composite beam, the steel girder takes the form of an inverted-T shaped structure without top flange in which the studs needed for the composition of the steel girder with the UHPC slab are disposed in the web of the steel girder. This study investigates experimentally and analytically the flexural behavior of this new type of composite beam to propose details like stud spacing and slab thickness for further design recommendations. To that goal, eight composite beams with varying stud spacing and slab thickness were fabricated and tested. The test results indicated that stud spacing running from 100 mm to 2 to 3 times the slab thickness can be recommended. In view of the relative characteristic slip limit of Eurocode-4, the results showed that the composite beam developed ductile behavior. Moreover, except for the members with thin slab and large stud spacing, most of the specimens exhibited results different to those predicted by AASHTO LRFD and Eurocode-4 because of the high performance developed by UHPC.

Keywords : composite beam, UHPC deck, inverted-T shaped steel girder, flexural behavior, tension softening

1. 서 론

최근에는 일반 콘크리트의 낮은 인장강도, 취성 등의 단점을 극복하기 위해 강섬유를 혼입한 강섬유 보강 콘크리트의 적용이 증가하고 있다. 또한 최근에 요구되는 콘크리트는 구조물의 장대화 및 대형화로 인하여 고강도, 고성능 및 고내구성 등의 성능을 요구하고 있다. 이러한 이유로 압축강도가 180 MPa 이상인 고성능 콘크리트에 강섬유를 혼입한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트(UHPC)에 대한 연구^{1,2)}가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 이리

한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트는 콘크리트의 처짐, 휨강도 및 균열 이후의 연성거동 특성을 향상시키는 것으로 알려진 바 있다. 또한, 높은 압축강도, 인장강도 및 내구성으로 인하여 UHPC를 교량 바닥판에 적용^{3,4)}함으로써 바닥판의 자중 감소 및 바닥판 수명의 획기적인 연장 등의 효과가 있을 것으로 예상된다.

특히 UHPC 바닥판과 강재 거더를 이용하여 합성보를 구성할 때, UHPC 바닥판의 높은 강도와 강성으로 인하여 강재거더 상부 플랜지의 역할이 거의 불필요할 것으로 예상된다. 이러한 점을 착안하여 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 합성보 구성 시에 강재 거더의 상부 플랜지를 없앤 역T형 거더⁵⁻⁷⁾를 적용하였다.

Fig. 1과 같은 역T형 거더에 UHPC 바닥판을 합성하여 합성보를 구성할 경우, 상부플랜지가 없는 이유로 전단연

*Corresponding author E-mail : jsh2593@kcl.re.kr

Received November 12, 2014, Revised November 20, 2014,

Accepted November 20, 2014

©2015 by Korea Concrete Institute

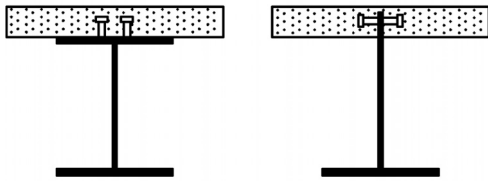


Fig. 1 Schematic diagram of conventional and inverted-T composite girder

결재의 설치 위치가 상부플랜지 대신에 강재 거더 복부에 설치해야하는 문제점이 발생된다.

또한, 강재 복부에 설치되는 전단연결재에 대한 거동, 역T형 강거더 합성보의 휨거동 특성 등은 현재까지 실험 및 이론적으로 평가된 적이 거의 없는 실정인 이유로 이에 대한 연구가 절실하다.

이를 위하여 본 연구진은 전단연결재 간격, 바닥판 두께 등을 변수로 하여 역T형 거더와 UHPC 바닥판을 합성한 합성보를 8개 제작하여 전단연결재의 거동, 휨거동 실험을 수행하였으며, 본 논문에서는 이러한 실험 결과를 바탕으로 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 인장연화 거동을 모델링하는 기법과 변형을 적합조건에 의한 해석기법을 제시하였다. 또한 제시된 재료모델링을 적용하여 기존의 실험 부재들에 대하여 해석을 수행한 후, 해석결과와 실험결과의 비교·분석을 통하여 제안된 기법의 효용성을 고찰하였다.

2. 인장연화거동 모델링

콘크리트의 인장연화곡선을 구하기 위한 대표적인 실험방법으로는 직접인장실험방법과 노치가 있는 보의 3점재하 휨인장실험 방법 등이 있다. 직접인장실험을 수행하기 위해서는 특별한 실험장비가 필요하며, 실험수행 중에 안정적인 하중조건을 유지하기가 힘들다. 반면에, 노치가 있는 보의 3점재하 휨인장실험은 RILEM (2002), JCI (2003) 등의 표준 실험방법이며, 강섬유보강 콘크리트의 인성, 에너지 해방률과 같은 파괴역학 인자를 구하는데 용이한 실험방법으로 알려져 있어 본 연구에서는 후자의 방법을 적용하였으며 인장연화거동의 모델링 방법을 개략적으로 기술하였다.

본 연구에서의 적용한 인장연화곡선은 Fig. 2와 같이 Hillerborg⁸⁾의 가상균열모델에 근거한 해석을 통해 구하며, 곡선의 형상은 Fig. 3과 같이 다중의 선분으로 구성되는 다중 선형 인장연화곡선으로 표현⁹⁾한다.

Fig. 2의 가상균열모델에서 응집응력 $\sigma(a,x)$ 는 균열개구변위 $\delta(a,x)$ 의 다중선형함수로 나타낸다. k 번째 단계 (δ_{k1})에서 균열개구변위와 인장연화곡선의 기울기는 실험하중과 균열방정식에서 구한 하중의 최적화에 의해 결정한다. 각 해석단계마다 모든 균열변위에 대한 구성방정식을 구성하여 최적의 인장연화곡선을 산정하며, 해석과정을 Fig. 4에 정리하여 나타내었다.

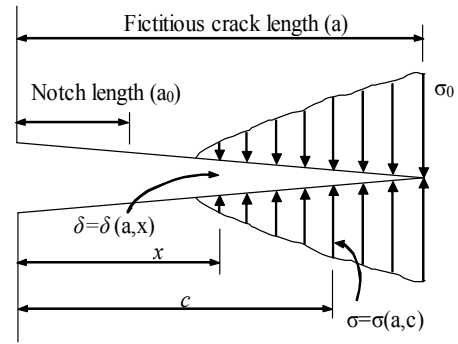


Fig. 2 Schematic diagram of virtual crack model⁸⁾

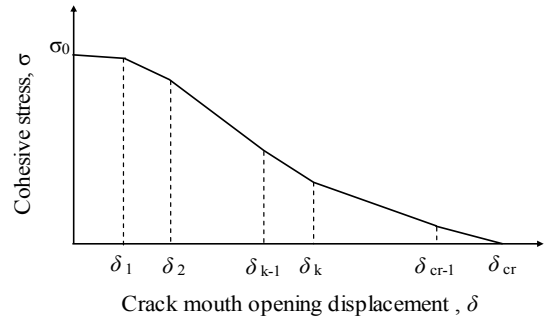


Fig. 3 Multi-linear tension softening curve

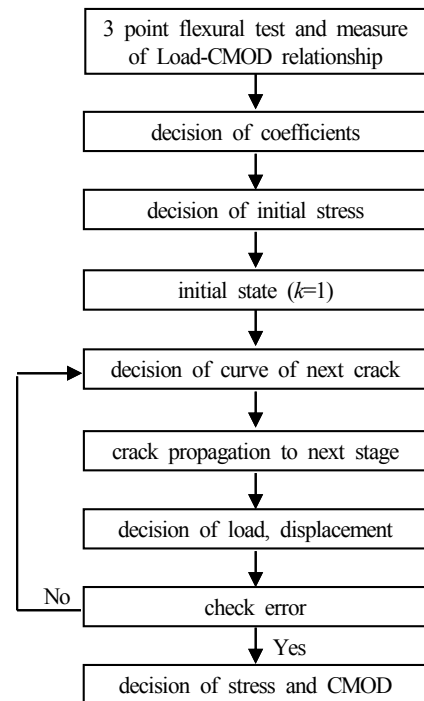


Fig. 4 Flow chart of modeling of tension softening curve

3. 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 재료모델링

3.1 배합 및 섬유재 특성, 실험제원

실험 부재를 제작할 때 타설되는 강섬유 보강 콘크리트를 이용하여 압축 및 인장 재료실험을 수행하였으며,

Table 1 Physical properties of steel fiber

density (kg/m ³)	length (mm)	yield strength (MPa)	ratio to concrete (volume %)	diameter (mix ratio)	
				19.5	16.3
7,800	13	2,500	2.0	2	1
				19.5	16.3

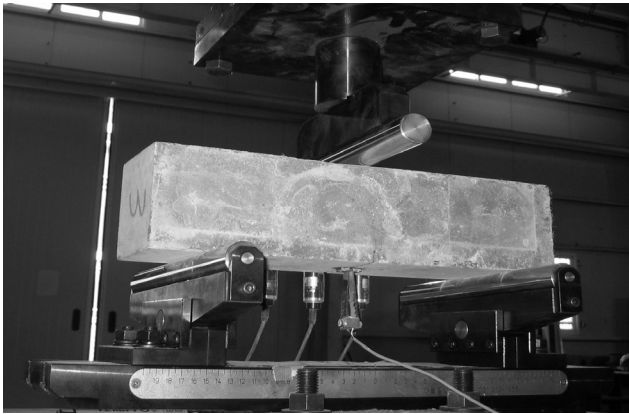


Fig. 5 Flexural tensile test by 3 point loading

실험결과를 재료모델링에 활용하였다. 사용된 강섬유의 물리적 성능을 Table 1에 나타내었다

제작된 공시체를 이용하여 압축강도 재료실험을 수행할 때 측정된 하중-변위 관계를 바탕으로 압축응력-변형률 관계 곡선을 획득하였으며 이로 부터 압축강도와 탄성계수를 산정하였다. 또한, 휨인장 거동을 파악하기 위하여 Fig. 5와 같이 노치(notch)를 갖는 휨인장 실험용 시편을 제작하여 3점 하중재하법에 의해 휨인장 실험을 수행하였다. 휨인장시편은 100 mm(가로) × 100 mm(세로) × 400 mm(길이)의 사각 프리즘 형상으로 제작하였다. 노치는 지간 중앙에 10 mm 깊이로 내었다. 클립 게이지를 설치하여 하중 재하 단계별로 노치의 균열개구변위(CMOD)를 측정하였으며, 이로부터 하중-CMOD 곡선을 획득하였다.

3.2 압축거동 모델링

실험에 사용된 콘크리트 배합은 Table 2에 나타내었으며, 압축강도 실험결과를 Table 3에 나타내었다.

평균압축강도(f'_c)는 183 MPa로 평가되었으며, 평균탄성계수(E_c)는 45,000 MPa로 나타났다. 압축거동은 압축 파괴가 일어나기까지 거의 선형거동을 나타내며, 압축강도에 도달한 이후에는 급격한 파괴형태로 보인다. 압축강도에 도달했을 때의 극한변형률(ϵ_u)은 약 0.00406 (4060 μ)의 값으로 나타났다.

기존의 연구결과¹⁰⁾는 강섬유 보강 초고성능 콘크리트가 보통강도 또는 고강도 콘크리트에 비해 응력-변형률 관계에서 극한변형률까지 거의 선형관계를 나타내는 것으로 보고되어지고 있으며, 본 논문의 실험에서도 동일하게 나타났다. 따라서, 콘크리트의 압축응력-변형률 관

Table 2 Concrete mix proportion

C	Zr	S	F	E	SR	P	W	A	steel fiber (mm)	
									19.5	16.3
1	0.25	1.10	0.30	0.075	0.01	0.03	0.23	0.001	0.10	0.05

C : cement, Zr : zirconium, S : sand, F : filler, A : antifoaming agent, P : plasticizer, W : water, E : expansion agent, SR : reduction agent of shrinkage

Table 3 Results of concrete compressive strength

ID	f'_c (MPa)	E_c (MPa)	ϵ_u	slump flow (mm)	air (%)
1	187	45,385	0.00400	765	2.9
2	186	45,124	0.00402		
3	176	44,491	0.00416		
average	183	45,000	0.00406		

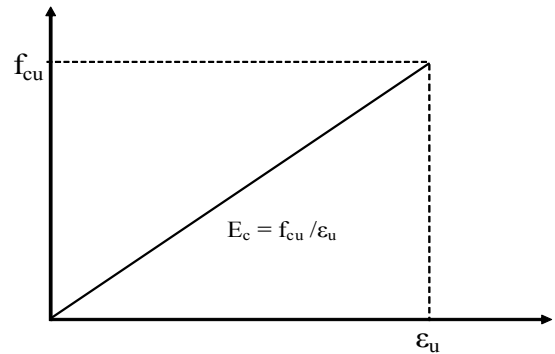


Fig. 6 Modelling of compressive stress-strain

계를 Fig. 6과 같이 극한변형률 ϵ_u 와 압축강도 f_{cu} 에 의한 선형관계의 응력-변형률 관계로 모델링하였다.

3.3 인장거동 모델링

휨을 받는 단면의 단면력과 변형과의 관계는 단면의 곡률과 균열개구변위와의 관계에 근거하여 산정한다. 이는 실질적으로 응력-CMOD 관계를 균열단면에서의 응력-변형률 관계로 변환하는 개념에 상응한다. AFGC 2002¹¹⁾는 노치를 낸 시편의 3점 재하 휨인장 실험을 통해 측정된 하중-CMOD 관계를 이용하여 역해석을 수행한 후, 이로부터 인장응력-CMOD 관계를 산정할 것을 제안하고 있다. 따라서, 본 연구에서도 단면해석에 사용되는 인장응력-변형률 관계 곡선을 산정하기 위해 우선 3점 휨인장 실험으로부터 측정된 하중-CMOD 관계를 이용하여 역해석을 수행한 후, 인장응력-CMOD 곡선을 산정하였다. 하중-CMOD 곡선은 전술한 바와 같이 10 mm 깊이의 노치를 갖는 휨인장 실험 측정 결과를 사용하였다. 대표적으로 네 번째 배치 콘크리트에서의 하중-CMOD 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다.

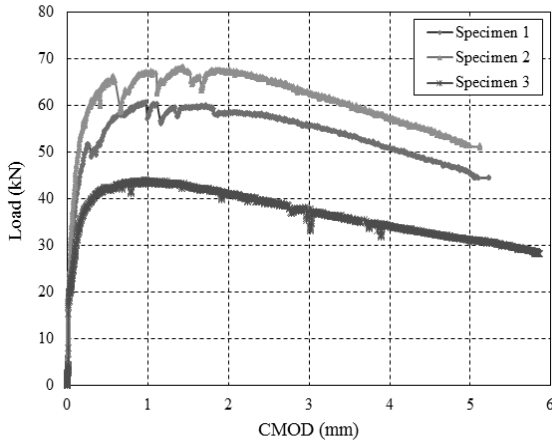


Fig. 7 Measurement result of load-CMOD

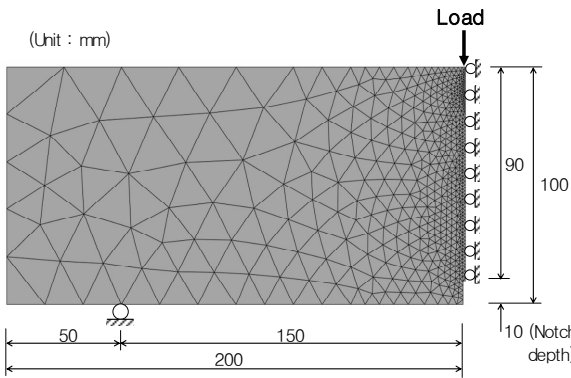


Fig. 8 Numerical analysis model of flexural tensile specimen for inverse analysis

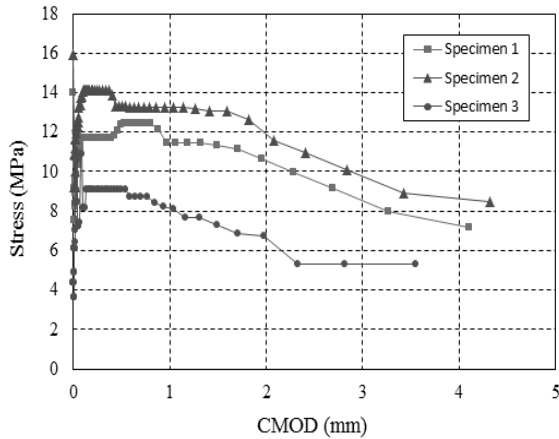


Fig. 9 Tension softening curve obtained by inverse analysis

휨인장 시편의 역해석을 위한 수치해석모델을 Fig. 8에 나타내었다. 수치해석모델은 1,076개의 삼각형 요소망으로 구성하였으며, 시간중양을 중심으로 좌우대칭형상으로 모델링하였다. Fig. 9에 실험 부재에 콘크리트를 타설할 때 제작한 3개 시편의 휨인장 실험으로부터 측정된 하중-CMOD 곡선을 이용한 역해석 결과를 나타내었다. 또한, Table 4에 역해석에 의해서 얻어진 인장강도, 변형률 등의 평균값을 나타내었다. 수치해석에 의한 평균 인장강

Table 4 Tensile data obtained by inverse analysis

ID	f_{tj} (MPa)	ϵ_e	$\epsilon_{0.3}$	$\epsilon_{1\%}$	ϵ_{lim}	σ_{bt} (MPa)	$\sigma_{1\%}$ (MPa)
1	11.7	0.00026	0.00206	0.00626	0.02625	11.7	11.3
2	14.1	0.00031	0.00211	0.00631	0.02625	14.1	13.2
3	9.1	0.00020	0.00200	0.00620	0.02625	9.1	8.1
Average	11.7	0.00026	0.00206	0.00626	0.02625	11.7	10.9

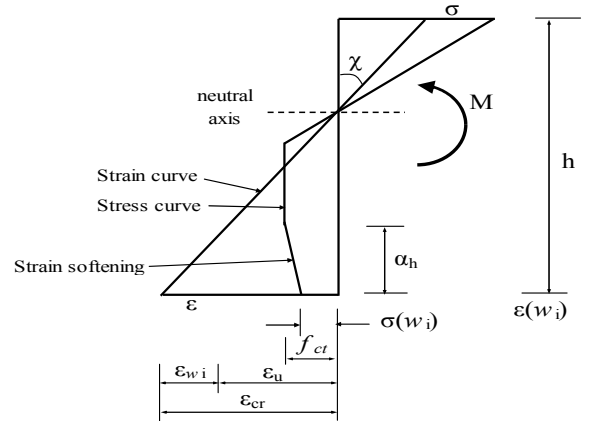


Fig. 10 Stress and strain distribution at flexural crack section¹²⁾

도(f_{tj})값은 11.7 MPa로 나타났다.

한편, Fig. 10에 나타낸 바와 같이 균열개구변위(w_i)와 가상의 평면변형률(ϵ_{wi})과의 관계는 다음과 같다.

$$w_i = l_w \epsilon_{wi} \quad (1)$$

여기서, l_w 는 단면 크기에 영향을 받는 인자이며, 보의 단면 높이의 함수(βh)로 나타낸다. 또한, Fig. 10에 나타낸 곡률(χ) 및 변형률 관계를 이용하면 식 (2)와 같으며, 변형률과 균열개구변위와의 관계는 식 (3)과 같다.

$$w_i = (\beta h) \cdot \epsilon_{wi} = \beta \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot \chi \quad (2)$$

$$\epsilon_{cr} = \epsilon_u + w_i / \beta h \quad (3)$$

식 (3)의 인장변형률-균열개구변위 관계는 AFGC¹¹⁾ 2002에 반영되어 있는 이유로 본 논문에서는 AFGC 2002에서 제안한 강섬유보강 초고성능 콘크리트의 인장응력-변형률 관계 모델을 반영하였다. 인장응력-변형률 관계 곡선은 Fig. 11과 같으며, 곡선을 결정하기 위해서는 인장거동 특성을 나타내는 변형률 특성값을 산정하여야 한다. 인장응력-변형률 관계는 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\epsilon = f_{tj} / E_{ij} + w / l_c \quad (4)$$

여기서, f_{tj} 는 인장강도, E_{ij} 는 탄성계수, w 는 균열개구변위, l_c 는 콘크리트의 특성길이로써 직사각형 또는 T형 단

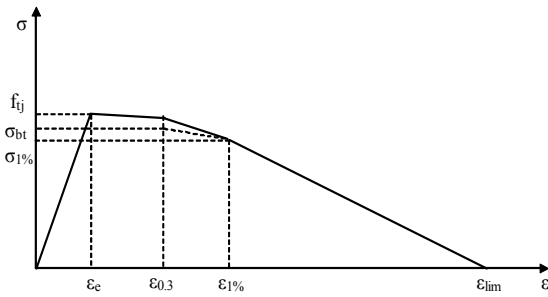


Fig. 11 Typical tensile stress-strain relationship

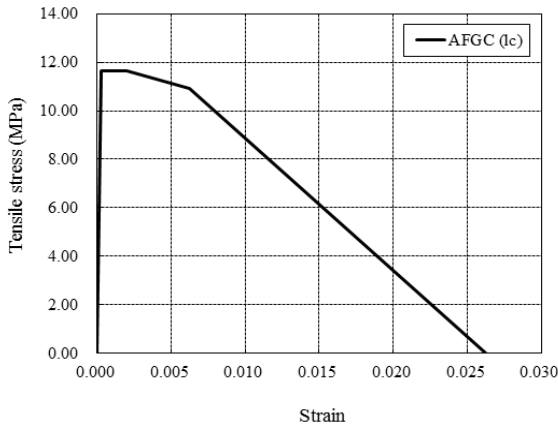


Fig. 12 Modelling of tensile stress-strain relationship

면에 대해 $l_c = 2/3h$ (단면높이)의 관계를 갖는다.

식 (4)에서 콘크리트 특성길이 l_c 는 본질적으로 식 (3)의 βh 와 유사한 개념이다. 또한, Fig. 11과 Table 3에서의 탄성변형률 ϵ_c 는 초기균열이 발생하는 시점에서의 변형률을 나타내고, $\epsilon_{0.3}$ 은 균열개구변위가 0.3 mm일 때의 변형률을 의미하며, $\epsilon_{1\%}$ 는 균열개구변위가 시편 높이의 1%에 해당할 때의 변형률을 나타낸다. ϵ_{lim} 은 인장응력이 0이 될 때의 한계변형률을 의미하며, σ_{bt} 와 $\sigma_{1\%}$ 는 각각 $\epsilon_{0.3}$ 과 $\epsilon_{1\%}$ 에 대응하는 인장응력을 나타낸다.

Fig. 12에 콘크리트의 인장응력-CMOD 곡선으로부터 산정한 인장응력-변형률 모델링 결과를 나타내었다.

4. 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 합성보의 휨실험¹³⁾

4.1 실험변수 및 부재 형상

본 연구진은 UHPC 역T형 강합성보의 휨거동 실험에 대하여 이미 연구결과¹³⁾를 발표하였으므로 본 논문에서는 해석에 필요한 실험 내용만을 기술하고자 한다.

실험변수로는 UHPC 바닥판 두께 50, 100 mm 인 2 수준과 전단연결재 간격 50, 100, 200 및 400 mm 인 4 수준이다. 이러한 실험변수를 가진 실험부재는 총 8개이다.

실험 변수 및 부재 명칭은 Table 5에 나타내었으며, 실험 부재들의 제원은 Fig. 13에 나타냈다.

Table 5 Test variables

ID	Slab thickness (mm)	Stud spacing (mm)
50-50	50	50
50-100	50	100
50-200	50	200
50-400	50	400
100-50	100	50
100-100	100	100
100-200	100	200
100-400	100	400

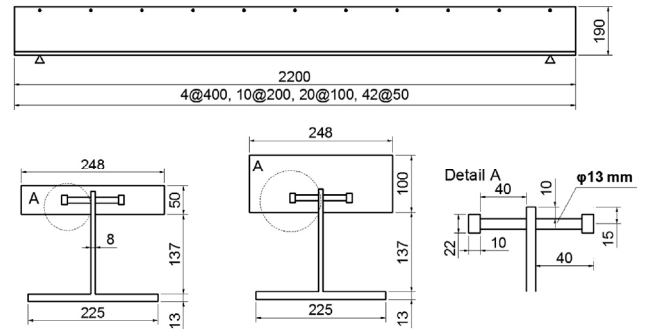


Fig. 13 Sectional dimension of test members

4.2 전단연결재 및 강제 거더

실험 부재에 사용된 전단연결재는 직경[D] 13 mm, 전단연결재 머리 직경 22 mm, 높이[H] 50 mm 이고, 직접인장 실험을 수행한 결과, 항복강도는 370 MPa, 극한강도 470 MPa인 것으로 나타났다. 한편 강제 거더는 SM490 재질을 사용하였으며, 제조사에서 제시한 시험성적서에 의하면 항복강도는 396 MPa, 극한강도는 554 MPa 이었다.

5. 변형률 적합조건에 의한 해석

5.1 단면해석기법

부재의 하중-처짐(모멘트-곡률) 등의 해석을 수행하기 위해 단면해석기법을 적용하였으며, 단면은 적층단면(multi-layer)으로 모델링하였다. 단면해석기법 개념은 Thomas 등¹⁴⁾과 Yuguang 등¹⁵⁾이 강섬유 보강 콘크리트의 구조성능평가를 위한 연구에 응용한 바 있다. 또한, 적층단면을 적용한 단면해석기법은 강섬유 보강 콘크리트 보의 휨거동을 파악하는데 있어서 해석기법의 간편성으로 인하여 선호되고 있다.¹⁶⁾ 해석 목적상 부재 단면은 여러 개의 층(layer)으로 분할되며, 부재 단면에 걸쳐 변형률은 선형으로 분포한다고 가정하였다. Fig. 14에 단면의 변형률 및 응력분포 형태를 나타내었다. 단면 내의 변형률 분포 즉, 단면 상연 및 하연 변형은 곡률 및 중립축 깊이를 이용하여 결정할 수 있다. 곡률은 부재의 단위길이당 기울기의

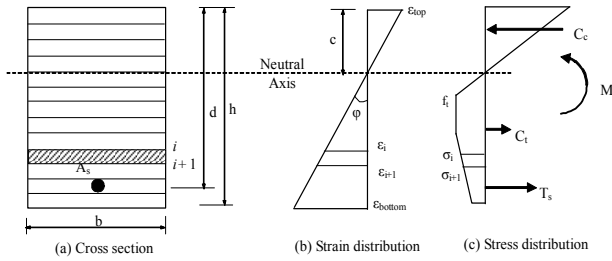


Fig. 14 Distributions of stress and strain

변화이며, 이는 단면에서의 변형을 경사와 동일하다고 가정한다. 해석단계마다 단면 내의 곡률을 일정하게 증분시킨다. 또한, 곡률 단계마다 중립축 위치를 가정하여 단면 내의 변형을 분포를 산정한다. 변형을 적합조건에 의한 보 단면 상연 및 하연의 변형률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{top} &= c \phi \\ \epsilon_{bot} &= (h - c) \phi \end{aligned} \quad (5)$$

변형을 분포를 결정한 후, 재료모델링에서 획득한 강섬유보강 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 관계로부터 각 층에서의 응력을 산정한다. 각 단면 층의 응력을 산정한 후 층에서의 단면력을 산정할 수 있으며, 모든 층에서 단면력의 합은 평형상태를 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} C_c + C_t + T_s &= 0 \\ \int_{A_c} \sigma_c dA_c + \int_{A_s} \sigma_s dA_s &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, C_c , C_t 및 T_s 는 각각 콘크리트가 부담하는 압축력, 인장력 및 강재가 부담하는 인장력이다.

평형상태를 만족시키는 단면내 응력 분포에 근거하여 단면력, 즉 모멘트를 계산할 수 있다.

$$M = \int_{A_c} \sigma_c y dA_c + \int_{A_s} \sigma_s y dA_s \quad (7)$$

여기서, σ_c 는 콘크리트 응력이며, σ_s 는 강재 응력이다.

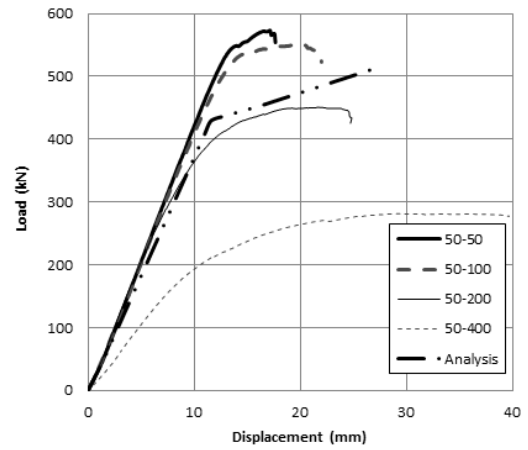
식 (7)에서 구해진 모멘트 M과 곡률 ϕ 은 다음과 같은 관계를 이용하여 지간길이가 L인 부재에 작용하는 하중 P와 지간 중앙에서의 처짐 δ 으로 치환할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta &= \sin^{-1}(L/2 \times \phi) \\ \delta &= (1 - \cos \theta) / \phi \\ P &= 4M/L \end{aligned} \quad (8)$$

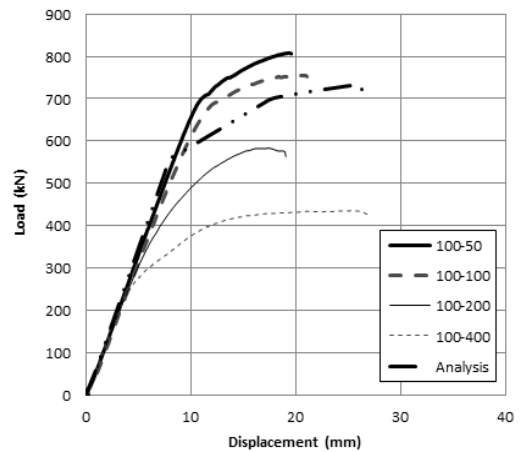
5.2 해석결과

5.2.1 하중-처짐 관계

단면해석에 의한 각 부재의 하중-처짐 해석결과를 Fig.



(a) slab thickness = 50 mm



(b) slab thickness = 100 mm

Fig. 15 Load-displacement relationship

15에 나타내었다. 또한, 실험에서의 하중-처짐 관계 측정값을 함께 나타내었다.

실험결과를 고찰해 보면, 바닥판두께가 증가할수록 구조 성능이 증대하는 것으로 나타났으며, 전단연결재의 간격은 감소할수록 구조성능이 증대하는 것으로 나타났다.

실험 합성부재가 안정적으로 합성거동을 하려면 이 실험의 경우 전단연결재의 간격이 바닥판 두께의 2배 이내 그리고 100 mm 이하인 경우로 판단된다. 또한 바닥판 UHPC 콘크리트가 재료성능을 충분히 발휘할 수 있는 조건은 대략 전단연결재의 간격이 100 mm 이하인 경우로 평가되었다.

해석결과는 콘크리트와 강재가 완전히 일체거동을 하는 것으로 가정한 결과임을 감안할 때 실험결과와 해석결과는 비교적 유사한 거동을 하는 것으로 나타났으나, 전단연결재 간격이 좁아 콘크리트와 강재가 완전 일체거동을 하는 경우에는 해석결과보다는 실험결과가 크게 나타났다. 이는 강재의 재료모델이 항복이후 변형경화현상을 반영하지 않은 것과 콘크리트의 재료모델링 오차가 어느 정도 나타난 현상으로 추정된다. 또한 전단연결재 간격이 넓어서 전단연결재 탈락 후 비합성 거동을 하는 실험 부재와 해석결과의 차이는 전단연결재 간격이 넓을

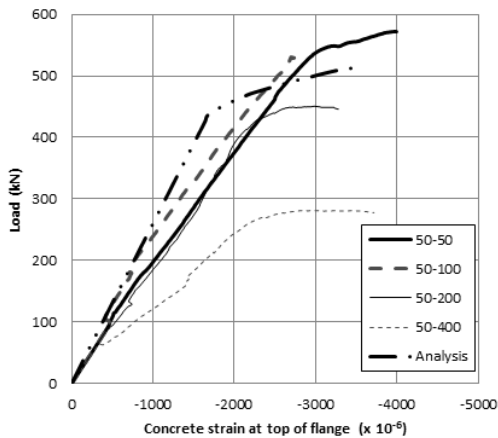
수록 더 크게 나타났다.

바닥판 두께에 관계없이 전단연결재의 간격이 100 mm 이내인 경우는 해석결과보다 실험결과가 약간 크게 나타났다. 또한 바닥판 두께가 50 mm인 경우에는 전단연결재 간격이 200 mm인 경우의 부재의 휨성능이 해석결과에 근접하는 것으로 나타났다.

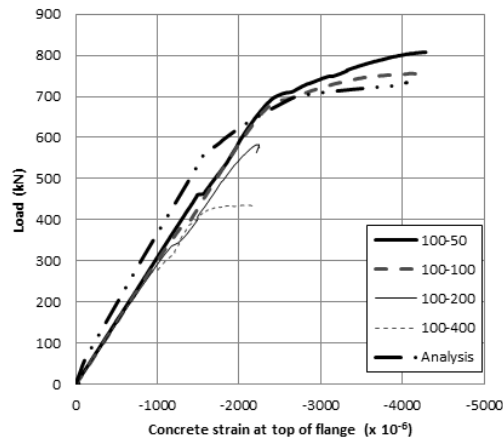
한편, 도로교설계기준¹¹⁾에서는 다음과 같은 전단연결재의 간격 제한을 두고 있다.

- ① 전단연결재 형상비 $L/d \geq 4$
- ② 전단연결재 최대 간격 $\leq (2 \sim 3) \times$ 바닥판 두께, 600 mm
- ③ 최소간격 $\leq 5d, 100$ mm

여기서, L = 전단연결재 길이; d = 전단연결재 몸통 지름. 실험결과, 해석결과 및 도로교설계기준을 비교해 보면, 실험에 사용된 전단연결재의 형상비(L/d)는 약 3.85이므로 거의 규정을 만족하며, 전단연결재의 최대 간격은 150(300) mm이며, 전단연결재의 최소간격은 65 mm로 규정되어져 있다. 따라서 실험 및 해석결과를 기준으로 볼 때, UHPC 콘크리트의 경우 전단연결재의 간격은 100 mm ~ (2 ~ 3)*바닥판 두께 사이가 적절한 것으로 나타났다.



(a) slab thickness = 50 mm



(b) slab thickness = 100 mm

Fig. 16 Load-concrete strain relationship

5.2.2 하중-콘크리트 압축 변형률 관계

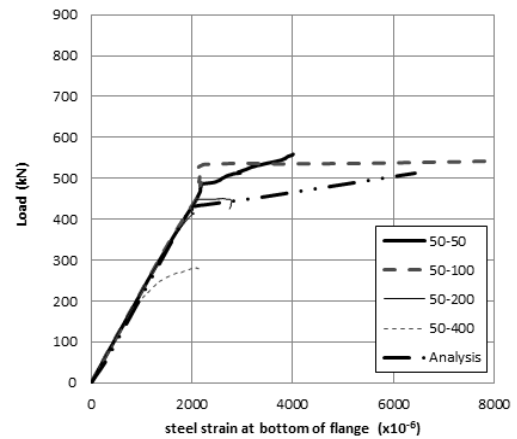
단면해석 및 실험에 의한 각 부재의 하중-콘크리트 압축 변형률 관계를 Fig. 16에 나타내었다.

하중-콘크리트 압축 변형률 관계 역시 하중-처짐 관계와 유사한 결과를 나타내고 있다. 다만, 바닥판 두께에 따른 콘크리트 변형률 증가현상이 실험과 해석결과에서 약간 차이가 나타나는데 이는 콘크리트 재료 모델링 시 콘크리트 타설 배치의 평균값을 사용한데서 기인된 오차로 판단된다.

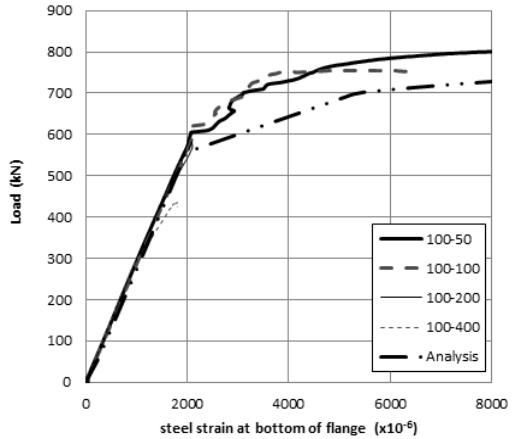
5.2.3 하중-강재 인장 변형률 관계

단면해석 및 실험에 의한 각 부재의 하중-강재 인장 변형률 관계를 Fig. 17에 나타내었다.

하중-강재 인장 변형률 관계 역시 하중-처짐 관계와 유사한 결과를 나타내고 있다. 특히 강재는 콘크리트보다 변동성이 적은 재료인 이유로 실험에서 전단연결재 간격이 400 mm인 경우를 제외하고는 거의 동일한 변형률에서 항복하는 것으로 나타났으나, 해석결과를 이용하여 판단하면 강재의 실제 항복강도는 제조사에서 제시한 396 MPa보다는 약간 클 것으로 추정된다. 또한 강재의 재료모델이 항복이후 변형경화현상을 반영하지 않아 항복이후 해석결과와 실험결과와의 차이가 커지는 것으로 나타났다.



(a) slab thickness = 50 mm



(b) slab thickness = 100 mm

Fig. 17 Load-steel girder strain relationship

실험결과와 해석결과를 종합적으로 비교하면, 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 합성부의 모멘트-곡률 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하고 있으므로 재료 실험으로부터 산정된 인장연화곡선은 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 실제 거동을 합리적으로 반영한다고 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 전단연결재 간격, 바닥판 두께 등을 변수로 하여 역T형 거더와 UHPC바닥판을 합성한 합성부를 8개 제작하여 전단연결재의 거동, 휨거동 특성 등을 파악함과 동시에 해석기법을 제시하고자 하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 인장연화거동을 고려한 재료모델링 및 이를 적용한 보 부재 단면의 모멘트-곡률 해석기법을 제시하였다.
- 2) 역해석에 의한 인장연화곡선에서 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도는 11.7 MPa를 나타내고 있으며, 이는 일반 콘크리트의 인장강도에 비해 현저히 큰 값을 나타낸다.
- 3) 실험결과, 해석결과 및 도로교설계기준을 기준으로 볼 때, UHPC 콘크리트의 경우 전단연결재의 간격은 100 mm에서 바닥판 두께의 2~3배 사이가 적절한 것으로 나타났다.
- 4) 실험결과와 해석결과를 종합적으로 비교하면, 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 합성부의 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하고 있으므로 재료 실험으로부터 산정된 인장연화곡선은 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 실제 거동을 합리적으로 반영한다고 판단된다.
- 5) 따라서, 본 연구에서 제시한 인장연화거동 특성을 반영한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 재료모델링 및 휨거동 해석기법은 적절하며, 제시기법에 의해 강섬유보강 초고성능 콘크리트 합성 부재의 휨내력을 합리적으로 예측할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. John, H. and George, S., *The Implementation of Full Depth UHPC Waffle Bridge Deck Panels*, Federal Highway Administration Highways for LIFE Technology Partnerships Program, 2010.
2. Naaman, A. E. and Chandrangsu, K., "Innovative Bridge

- Deck System Using High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites", *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 1, 2004, pp. 57-64 (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/12998>).
3. Yang, I. H., Joh, C., and Kim, B. S., "Flexural Strength of Large-Scale Ultra High Performance Concrete Prestressed T-beams", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 38, 2011, pp. 1185-1195 (doi: <http://dx.doi.org/10.1139/111-078>).
4. Graybeal, B. A. "Flexural Behavior of an Ultrahigh-Performance Concrete I-Girder", *Journal of Bridge Engineering ASCE*, Vol. 13, No. 6, 2008, pp.602-610 (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702)).
5. Lee, K. C., Cho, C. B., Choi, E. S., and Kim, J. S., "Stud and Puzzle-Strip Shear Connector for Composite Beam of UHPC Deck and Inverted-T Steel Girder", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No. 2, 2014, pp. 151-157 (in Korean) (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.2.151>).
6. European Commission, *EUR 25321-Prefabricated Enduring Composit Beams Based on Innovative Shear Transmission (Preco-Beam)*, RFSR-CT-2006- 00030, Final Report, 2009.
7. Feldman, M., Hechler, O., Hegger, J., and Rauscher, S., "Fatigue Behavior of Shear Connectors in High Performance Concrete", *International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete VI*, 2008, pp. 78-91.
8. Hillerborg, A., Modeer, M, and Petersson, P. E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements", *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, No. 6, 1976, pp. 773-782.
9. Kitsutaka, Y., "Fracture Parameters by Polylinear Tension-Softening Analysis", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, No. 5, 1997, pp. 444-450.
10. Tue, N. V., Schneider, H., Simsch, G., and Schmidt, D., "Bearing Capacity of Stub Columns Made of NSC, HSC and UHPC Confined by a Steel Tube", *Proceedings of International Symposium on High Performance Concrete ; Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2004, pp. 339-350.
11. Association Française du Génie Civil (AFGC), "Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances", *Association Française du Génie Civil*, SETRA, France, 2002.
12. Spasojević A., *Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design*, Ph.D. thesis No. 4051, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2008.
13. Yoo, S. W., Ahn, Y. S., Cha, Y. D., and Cho, C. B., "Experiment of Flexural Behavior of Composite Beam with Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete Deck and Inverted-T Steel Girder", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No. 6, 2014, pp. 761-769 (in Korean) (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.6.761>).
14. Thoamas, J. and Ramaswamy, A., "Crack Width in Partially Prestressed T-Beams Having Steel Fibers", *ACI Structural*

15. Yuguang, Y., Walraven, J., and Uji, J. D., "Study on Bending Behavior of an UHPC Overlay on a Steel Orthotropic Deck", *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High*

16. Kooiman, A. G., "Modelling the Post-Cracking Behavior of Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design Purposes", *HERON*, Vol. 45, No. 4, 2004, pp. 275-307.

요 약 인장강도 및 휨강도가 낮고 취성과파괴의 특성을 가지는 일반적인 콘크리트의 단점을 극복하기 위하여 최근에는 압축강도가 180 MPa 이상인 고성능 콘크리트에 강섬유를 혼입한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트(UHPC)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. UHPC 바닥판과 강재 거더를 이용하여 합성보를 구성할 때, UHPC 바닥판의 높은 강도와 강성으로 인하여 강재거더 상부 플랜지의 역할이 거의 불필요할 것으로 예상된다. 이러한 점을 착안하여 본 논문에서는 합성보 구성 시에 강재 거더의 상부 플랜지를 없앤 역T형 거더를 적용하였다. 역T형 거더에 UHPC 바닥판을 합성하여 합성보를 구성할 경우, 상부플랜지가 없는 이유로 전단연결재의 설치 위치가 상부플랜지 대신에 강재 거더 복부에 설치해야하는 문제점이 발생되며, 강재 복부에 설치되는 전단연결재에 대한 거동, 역T형 강거더 합성보의 휨거동 특성 등은 현재까지 실험 및 이론적으로 평가된 적이 거의 없는 실정인 이유로 이에 대한 연구가 절실하다. 이를 위하여 본 논문에서는 전단연결재 간격, 바닥판 두께 등을 변수로 하여 역T형 거더와 UHPC 바닥판을 합성한 합성보를 8개 제작하여 전단연결재의 거동, 휨거동 특성 등을 파악하고자 하였다. 또한, 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 인장연화거동을 고려한 재료모델링 및 이를 적용한 보 부재 단면의 변형을 적합조건을 이용한 해석모델을 제안하였다. 실험결과 및 해석결과를 기준으로 볼 때, UHPC 콘크리트의 경우 전단연결재의 간격은 100 mm에서 바닥판 두께의 2~3배 사이로 규정함이 적절한 것으로 나타났다. 실험결과와 해석결과를 종합적으로 비교하면, 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 합성보의 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하고 있으므로 재료 실험으로부터 산정된 인장연화곡선은 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 실제 거동을 합리적으로 반영한다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서 제시한 인장연화거동 특성을 반영한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 재료모델링 및 휨거동 해석기법은 적절하며, 제시기법에 의해 강섬유보강 초고성능 콘크리트 합성 부재의 휨 내력을 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어 : 합성보, UHPC 바닥판, 역T형 강재 거더, 휨거동, 인장연화