초고강도 섬유보강 콘크리트 분절형 박스 거더의 휨거동

귀청용^{1,2)} · 한상묵^{1)*}

¹⁾금오공과대학교 토목환경공학부 ²⁾하얼빈공정대학교 건축공학부

Flexural Behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete Segmental Box Girder

Qingyong Guo^{1,2)} and Sang-Mook Han^{1)*}

¹⁾School of Civil and Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 730-701, Korea

²⁾School of Architecture Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

ABSTRACT The flexural behavior test of UHPC segmental box girder which has 160 MPa compressive strength and 15.4 m length was carried out. The effect of steel fibers in combination with reinforcing bars on improving the ductile performance of UHPC box girder was evaluated by comparing the flexural behavior of the UHPC segmental box girders made by the two kinds of mixing portion. The test variables are volume fraction of steel fibers and the arrangement of reinforcing bars. The behavior of UHPC box girder BF2 composed of 1% volume fraction of steel fibers and longitudinal reinforcing bars in web and upper flange with stirrup showed the similar ductile behavior with the girder BF1 composed of 2% volume fraction without stirrup in elastic stress region. But BF1 had the better stiffness and showed the more ductile behavior in inelastic stress region. Segmental interfaces of UHPC box girder have not any crack and slide until the final flexural collapse load.

Keywords : ultra high performance concrete (UHPC), segment box girder, flexural behavior, reinforced bars, steel fiber

1. 서 론

초고강도 섬유보강 콘크리트(ultra high performance fiber reinforced concrete)는 보통 또는 고강도 콘크리트에 비해 매우 높은 압축강도와 인장강도를 가지고 있으며 최적충전밀도 배합으로 인한 우수한 내구성을 가지고 있다. 초고강도 콘크리트로 시공된 구조물은 단면적 및 형고를 줄일 수 있으며, 자중 감소 효과로 인해 수월한 시공 및 신속을 요하는 긴급한 공사에 적용될 수 있다. 초고강도 콘크리트로 시공된 구조물은 형고 대비 긴 경간을 가지고 있어 형하 공간을 크게 확보할 수 있는 장점이 있다. 초고강도로 인한 상부구조의 경량화로 교각 및 기초에 재하되는 하중의 경감으로 교각과 기초에서 경제적인 시공이 수반되는 효과를 가진다. 또한 최적충전밀도이론에 의해 구성된 분체콘크리트는 염화칼슘침투, 중성화, 동결융해 저항성 및 수밀성 부분에서 월등한 내구성을 가지고 있어 기존 콘크리트보다 장수명의 이점을 가지고 있다.¹⁾

초고강도 섬유보강 콘크리트에서 강섬유의 역할은 최적충전밀도에 따른 취성과파괴특성을 강섬유로 구속하면서 압축 및 인장응력 구역에서 연성파괴 거동으로 유도하는데 있다.²⁾ 콘크리트 내의 섬유는 균열의 진전을 억제하고, 전단철근 대신 전단력을 부담하는 역할을 한다. 이러한 초고강도 섬유보강 콘크리트를 사용하여 1997년에 처음 보도교량에 적용된 후 현재 여러 나라에서 보도교량과 차량교량에 그 적용 예가 증가하고 있다. 1997년 캐나다 Sherbrooke Ultra High Performance Concrete(이하 UHPC) 보도교량이 처음 시공되었으며, 2002년에는 한국의 UHPC 선유교, 일본의 사카다-미라이 UHPC보도교량이 시공되었고, 현재까지 뉴질랜드, 캐나다, 독일 등에서 파이형 거더, 박스형 거더, I형 거더의 UHPC 보도교량이 다수 시공되었다. 또한 2002년도 프랑스에 최초의 UHPC 차량교량인 Bourg-Les-Valence 교량이 시공되었고, 이후 2009년까지 호주, 미국 등에서 총 7개의 UHPC 차량교량이 시공되어, 이 새로운 재료와 형태에 대한 적용성을 계속 시도하고 있다.³⁾

그러나 UHPC 구조물을 실무적으로 적용하는데 많은 걸림돌이 있다. 기존의 프리스트레스 콘크리트 구조물에 비해 구조거동이 잘 알려지지 않았고, UHPC 구조물 실

*Corresponding author E-mail : smhan@kumoh.ac.kr
Received August 19, 2013, Revised December 17, 2013,
Accepted January 3, 2014
©2014 by Korea Concrete Institute

험에 대한 충분한 자료가 없으며, 재료비용이 고가인 점이 적용확대의 문제점으로 인식되고 있다.⁴⁾

압축강도 150 MPa급 UHPC를 사용하여 구조물의 형고 및 자중감소를 도모한 구조물은 압축강도 40~50 MPa 범위의 고강도 콘크리트 구조물보다 구조적인 여러 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로는 최적충전밀도를 가진 분체콘크리트로 인한 내구성 증진효과, 강섬유 혼입으로 초고강도임에도 콘크리트의 연성거동 특성 부여, 형고 감소로 인한 강구조물과 같은 날렵한 형상의 구조물 구현, 구조물의 자중 감소 효과로 인한 시공성의 향상 그리고 자중 감소로 인한 교각 및 기초의 연쇄적인 설계하중의 감소효과 등을 들 수 있겠다.⁵⁾

이 논문은 압축강도 150 MPa의 초고강도 섬유보강 콘크리트로 제작된 15.4 m의 프리스트레스트 3분절 박스형 거더의 강섬유 혼입률과 종방향 철근 배근 형태를 실험 변수로 하여 휨 실험을 수행하였다. 강박스와 비슷한 형상의 초고강도 섬유보강 콘크리트 박스거더에 대한 하중과 처짐관계, 하중에 따른 중립축의 변화, 분절면에서 균열 및 변형상태, 거더의 연성거동 등을 실험변수에 따라 파악하고, 구조체로서 안정성을 검증하는데 이 논문의 목표로 두고 있다. 즉, 하나의 셀 또는 두 개의 셀로 구성된 기존의 큰 규모의 고강도 콘크리트 박스거더 대신 작은 규모의 독립적인 다수의 셀로 구성된 초고강도 콘크리트 박스 거더의 구조체로서의 거동을 파악하고자 한다.

2. 실험

실험체는 3분절 초고강도 섬유보강 콘크리트 박스 거더로써 강섬유 혼합비율과 종방향 철근 배근에 따라 2가지의 실험체 즉, BF1, BF2로 분류하며 Table 1과 같은 실험체 특성을 가지고 있다. BF1의 경우, PS강선과 강섬유 혼입률 2%의 UHPC로 구성되었다. 복부와 상부 플랜지에 종방향 철근은 배근되지 않았으며 하부 플랜지에만 종방향 철근이 배근되었다. 강섬유는 직경 0.2 mm 길이 13 mm 강섬유를 사용하였다. BF2의 경우, PS강선, 상하부 플랜지와 복부에 종방향 철근이 배근되었으며 강섬유 혼입률 1%의 UHPC로 구성되었다.

2.1 실험부재의 재료 및 압축강도

실험체의 UHPC 배합비는 시멘트 중량대비 물시멘트

비 0.23, 실리카폼 0.23, 실리카플로우 0.3로써 전형적인 RPC⁶⁾에 가까운 배합을 사용하였으며 자세한 배합비는 Table 2와 같다.

잔골재는 0.4 mm이하의 SiO₂성분이 높은 모래를 사용하였고, 실리카폼은 분말도 0.1 μ m 이상의 초미립자를 사용하였고, 실리카플로우는 평균 직경 10~15 μ m의 SiO₂성분이 99.5%이상인 규사 분말을 사용하였다. 강섬유는 직경 0.2 mm 길이 13 mm의 강섬유를 사용하였다.

Table 3과 같이 BF1, BF2 부재의 공시체 압축응력은 각각 167 MPa, 160 MPa이며, 직접 인장응력은 각각 9.2 MPa, 6.5 MPa로 측정되었다.

Fig. 1의 UHPC 응력-변형률 관계는 최대응력까지 선형 증가형태를 보이는데 이는 공극이 적은 분체콘크리트의 특성이 반영된 것으로 본다. 최대응력에 대한 변형률은 BF1의 압축공시체의 경우 0.0031, BF2는 0.0026로서 보통강도 콘크리트 또는 고강도 콘크리트의 최대응력에 대한 변형률보다 크며, 이런 특성으로 인해 파괴 시 휨부재의 수직방향 처짐이 큰 특성을 보이고 있다.

강섬유 혼입률이 2%인 BF1과 1%인 BF2의 압축응력의 비는 1.043이고, 최대응력에 대한 변형률의 비는 1.19로서 강섬유의 구속효과로 인한 차이로 판단된다.

Table 2 Mixing proportion (weight ratio) of UHPC

	W/C	Binder		Sand	Silica flow	Steel fiber (%)
		C	Silica fume			
BF1	0.23	1	0.23	1.1	0.3	2
BF2	0.23	1	0.23	1.1	0.3	1

Table 3 Yield stress of UHPC

	f_c (MPa)	f_t (MPa)
BF1	167	9.2
BF2	160	6.5

Fig. 1 Compressive stress-strain relationship of UHPC

Table 1 Kinds of UHPC box girder

Specimen	Volume fraction of steel fiber	Longitudinal steel reinforcement		
		Upper flange	Web	Lower flange
BF1	$V_f = 2.0\%$	×	×	○
BF2	$V_f = 1.0\%$	○	○	○

2.2 실험 부재 제작

초고강도 섬유보강 콘크리트 분절형 박스거더는 Fig. 2와 같이 길이 15.4 M 3분절로 제작하였다. 단부분절은 5.2 M이고 중앙분절은 5.0 M로서 박스단면을 형성하기 위해 내부에 스티로폼을 넣었고, 각 분절의 양단부에 통단면이 형성되도록 Fig. 2의 측면도와 같이 각 분절의 스티로폼의 길이를 각 분절길이보다 작게 제작하여 양단부에 간격을 띄우도록 배치하였다.

일반적으로 UHPC거더는 압축강도 150 MPa 이상, 강섬유 혼입률 2%를 가진 분체콘크리트로 구성되어 있어 휨철근 및 전단철근을 설치하지 않고, UHPC압축력의 우력과 프리스트레스 힘의 인장력으로 내하력을 형성할 수 있는 구조물이다. UHPC 구조물은 내구성이 월등하고 시간대비 형고를 강구조물 만큼 줄일 수 있으며, 자중을 기존 콘크리트보의 1/2정도로 줄일 수 있다. 그러나 UHPC 구조물은 강섬유의 가격비중이 커서 기존의 프리스트레

Fig. 2 The ground plan and front view of segmental UHPC box girder (unit: mm)

Fig. 3 Section of BF1 (unit: mm)

스트 콘크리트보다 많은 장점이 있음에도 그 적용성의 한계를 가지고 있다. 경제적인 제작단가를 구현하기 위해 강섬유의 혼입률을 1%로 줄이고 상하부 플랜지 및 복부에 항복강도 $f_y=400$ MPa인 D13의 종방향 철근을 배근한 BF2와 강섬유를 체적대비 2% 혼입하고 하부 종방향 철근만 배근한 BF1과의 거동을 비교하여 경제적인 제작단가를 가진 BF2의 구조물로서의 거동의 유효성을 검증하려한다.

Fig. 3(a)는 BF1 단부분절부재의 지점부분에서의 단면을 표시하였으며, 하부에 철근을 배근하고 단부에 정착구를 배치하기 위해 중앙부보다 큰 단면을 가지고 있다. Fig. 3(b)의 중앙분절 중앙단면에서 보듯이 하부플랜지의 철근, 포스트텐션 텐던의 위치 및 박스내부 공간의 형태를 도시하였다.

Fig. 4(a)는 BF2 거더 단부분절부재의 지점단면으로서 복부 및 상하부플랜지에 철근을 배근한 형태를 보여주고 있다. Fig. 4(b)는 BF2의 중앙분절부재 분절단면으로서 상하부플랜지, 양복부에 종방향철근을 배근하고 포스트텐션 텐던을 배치한 단면이다.

하부 텐던은 15.2 mm 7연선 16개씩 2개의 텐던에 배치하여 총 32개의 강연선을 사용하였고, 상부 텐던은 15.2 mm 7연선 7개씩 2개의 텐던에 배치하여 총 14개의 강연선을 사용하였다. 하부 포스트텐션은 6400 kN으로 긴장하였으며, 상부 포스트텐션은 2800 kN을 도입하였다.

분절면은 Fig. 5와 같이 직사각형 전단키 9개로 구성되었고, 상하부 플랜지에 설치된 전단키는 두께가 20 mm, 복부에 설치된 전단키는 두께가 35 mm가 되도록 제작하였다. 박스거더 강재폼은 3개의 분절폼으로 제작되었으

Fig. 4 Section of BF2 (unit: mm)

며, 분절면과 분절면 사이에 Fig. 5의 전단키가 성형되어 있는 강재품을 Fig. 6과 같이 배치하였다.

Fig. 6은 BF2 단부분절부재와 중앙분절부재의 분절 연결부분으로서 Fig. 5와 같은 분절면 강재품으로 철근과 콘크리트는 단절되어있기 때문에 콘크리트 타설 후 거푸집을 탈형하면 박스거더는 분리되어진다. 쉬스는 분절면 강재품을 통과하여 연결시켜 포스트텐션을 할 수 있는 공간이 형성되어 있다. BF1은 하부 플랜지철근과 포스트텐션 텐던을 배치한 후 2% 강섬유를 혼입한 UHPC를 타설하였고, BF2는 상하부 플랜지철근, 양쪽복부의 철근, 스티럽 및 포스트텐션 텐던을 배치한 후 강섬유 혼입률 1%의 UHPC를 타설하여 제작하였다. Fig. 7(a)는 박스 거더 내부의 하부 철근과 쉬스가 배치된 이후 BF1 박스 거더의 내부 공간을 만들기 위한 스티로폼과 상부 쉬스가 배치된 모습이다. Fig. 7(b)는 BF2 단부분절부재의 지점 단부 거푸집 내부로서 하부플랜지 철근, 복부 양측의 철근, 상부플랜지 철근 및 포스트텐션 쉬스가 배치된 상태를 보여주고 있다. UHPC는 배합 후 점성이 있음에도 워커빌리티가 양호하며, 자기충전 기능이 있으나 매끄러운 표면 상태를 가지기 위해서는 거푸집 표면의 진동 다짐이 요구된다. Fig. 8은 BF1의 단부분절부재 거푸집에 점성이 있으면서 워커빌리티가 좋은 UHPC를 타설하는 모습이다.

분절 박스거더는 분체재료 계량이 가능한 전용 배치플랜트가 있는 프리캐스트 콘크리트 공장에서 제작되었다. 타설된 콘크리트는 24시간의 공기 양생 이후, 48시간동

안 90℃ 증기 양생을 수행하였다.

분절면의 양면에 프라이머리를 칠하고 하루 경과한 후 에폭시를 도포한 후 결합시켰다. 프라이머리는 표면의 코팅제로써 에폭시와 연결단면의 부착을 돕고 분절면의 부착단면에 공극을 메꿔 부착강도를 증진시키는 역할을 한다. 에폭시는 경화 시 강도가 100 MPa로써 전단키와 더불어 분절면 사이의 전단 내력과 축방향 내력을 보조하는 역할을 한다.

분절 거더는 양단면의 수직과 수평 위치가 정확하게 맞도록 조정한 후 에폭시가 양 단면에 0.5~1.0 mm 도포된 상태에서 20 MPa이하의 프리스트레스트 힘으로 연결하였다. 에폭시가 경화하는 시간인 24시간이 지난 이후

Fig. 5 Shear key of segmental section (unit: mm)

(a) BF1

(b) BF2

Fig. 7 Arrangement of bar

Fig. 6 Segmental section of BF2

Fig. 8 The flow of UHPC

프리스트레싱으로 인한 편심을 방지하기 위해 상하부의 프리스트레싱 힘을 여러번 나누어서 긴장하였다. Fig. 9 와 10에서 연결부의 연결 전 모습과 연결이 완료된 이후 모습을 볼 수 있다.

2.3 실험 방법

Fig. 11과 같이 단순지지 경계조건으로 UHPC 박스거더에 대한 3점 휨 실험을 수행하였다. 용량 1000 kN 액추에이터를 사용하여 하중을 가하였다. 단면의 변형을 변화와 중립축의 변동을 측정하기 위하여 보의 중앙단면의 양면에 5개씩 10개의 전기저항식 변형률게이지를 Fig. 12

Fig. 9 Before connection of the UHPC box

Fig. 10 After connection of the UHPC box

Fig. 11 Loading conditions and support

Fig. 12 Arrangement of strain gauges and LVDTs (unit: mm)

와 같이 부착하였으며, 지점에서 1/4지점, 3/4지점의 전면 부에만 3개씩 6개의 변형률게이지를 부착하였다. 실험체 제작 시 하부 플랜지의 철근 중앙부와 1/4지점, 3/4지점의 철근의 양옆에 변형률게이지 설치하여 종방향의 철근 변형률을 측정하였다. 또한 하중과 처짐 간의 관계를 파악하기 위하여 중앙부와 1/4 및 3/4지점에 LVDT를 설치하였다. 하중 증가에 따른 최초균열, 균열의 전이 양상을 측정하였으며, 측정된 LVDT 변형과 변형률게이지의 변형 데이터를 분석하여 UHPC 분절형 박스거더의 거동 특성을 파악하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 하중과 처짐 간의 관계

강섬유 혼입률이 체적대비 2%인 UHPC박스단면의 하부플랜지에만 종방향 철근이 배근된 BF1과 강섬유 혼입률이 체적대비 1%인 UHPC박스단면의 상하부플랜지, 양복부에 종방향 철근이 배근된 BF2의 하중-처짐관계를 Fig. 13에 도시하였다. 400 kN까지 BF1과 BF2의 하중-처짐관계는 선형거동을 보인다. 430 kN에서 BF2가 BF1보다 상대적으로 강성이 약간 강한 상태를 보이다가 522 kN 이후의 하중에서는 BF1보다 강성이 상대적으로 저하되는 것을 볼 수 있다. 670 kN에서 BF2의 처짐은 171 mm 로써 BF1의 160 mm보다 7% 더 많은 처짐을 보였다. 즉, 비선형 거동영역에서 BF1 UHPC의 향상된 인장강도 효과는 BF2 UHPC와 양복부 및 상부플랜지에 배근된 종방향 철근의 조합 효과보다 강성이 약간 큰 것을 볼 수 있다. BF1의 최초균열은 470 kN에서 발생하였고, BF2의 최초균열은 420 kN에서 발생한 것으로 볼 때, BF2의 종방향 철근보강보다는 BF1 UHPC의 인장강도 특성이 최초균열 하중 증대 효과가 있음을 볼 수 있다. 동일한 내하력에서 BF2의 처짐이 크며 BF1의 극한하중이 BF2보다 7% 큼을 볼 수 있다.

Fig. 13 Loading-deflection relationship

3.2 중앙단면에서 변형률과 중립축의 변화

중앙단면 전면부와 후면부에 각각 5개씩 10개의 변형률게이지를 설치하였고, 중앙단면 5개 변형률게이지의 하중에 따른 변형률을 전면부와 후면부 변형률게이지 변형률의 평균값으로 Fig. 14(a), (b)에 도시하였다.

Fig. 14(a)에서 BF1의 경우 400 kN전까지 인장과 압축 변형률이 선형적으로 증가됨을 볼 수 있다. 400 kN이후 즉, 철근의 인장변형률이 988 μm 이후부터 비선형적으로 증가하였고 460 kN 이후 하단부에 균열이 최초 발생하였다. 이후 하중이 증가함에 따라서 균열폭이 증가하였고 460 kN이후에 중립축도 상승함을 볼 수 있다. 하중 668 kN에서 압축변형률은 1913 μm 만큼 진행되었다.

Fig. 14(b)의 BF2 경우 350kN전까지 인장과 압축변형률이 선형적으로 증가되었고, 350 kN 이후 즉, 이때의 철근의 인장변형률 887 μm 이후부터 비선형적으로 증가하였다. 410 kN 이후 하단부에 균열이 최초 발생하였으며 이후 하중이 증가함에 따라서 균열폭이 증가하면서 중립

(a) BF1

(b) BF2

Fig. 14 Strain of the central cross-section

축도 상승함을 볼 수 있다. 하중 718 kN에서 압축변형률은 2244 μm 만큼 진행되었다.

Fig. 15(a)와 (b)와 같이 BF1은 415 kN에서 BF2는 400 kN에서 중립축 상승이 시작되었다. BF1의 경우, 강섬유 혼입률이 체적대비 2%로 UHPC 인장응력이 큰 효과로 인해 400 kN 이후 파괴하중까지의 중립축 상승이 강섬유 혼입률이 체적대비 1%인 BF2보다 적음을 알 수 있다. 하중 650 kN에서의 BF1의 중립축 상승값은 100 mm로서 BF2의 120 mm보다 20 mm만큼 작게 상승되었다.

BF1은 최초균열발생 후 하중이 증가함에 따라 중립축이 점진적으로 증가하는데 비해 BF2는 상대적으로 작은 인장강도로 인해 최초균열 후 중립축 상승률이 BF1에 비해 급하게 상승하다가 변형이 진행되면서 철근과 조합작용이 커져 상승률이 감소하고 이후 700 kN에서 갑작스럽

(a) BF1

(b) BF2

Fig. 15 Change of neutral axis

Fig. 16 Deformation of segmental section under the 620 kN load

계 중립축이 상승함을 볼 수 있다.

3.3 균열 진행 양상과 파괴 형태

Fig. 16에서 보듯이 하중 620 kN까지 균열부 단면 표시한 그리드에 변형차이가 없음을 알 수 있다. BF1과 BF2 모두 600 kN 근처에서 분절부 단면의 미세한 수직균열이 발생하였으며, 이는 분절단면에서 전단거동이 삼분절 박스거더의 지배적인 파괴 거동이 아님을 알 수 있다.

Fig. 17(a)와 같이 BF1의 경우 460 kN에서 초기균열이 발생하였으며 하중이 증가함에 따라 균열의 깊이와 수가 증가됨을 볼 수 있다. 특히 600 kN에서 균열의 깊이는 단면의 중간 높이까지 올라왔으며 680 kN에서는 단면의 2/3 까지 올라왔으며 균열의 수도 많이 증가되었음을 볼 수 있다.

Fig. 17(b)와 같이 BF2의 경우 410 kN에서 초기균열이 발생하였으며 하중이 증가함에 따라 BF1에 비해서 더 많은 균열이 발달하고 그 깊이도 더 높게 진행되었음을 알

수 있다. 550 kN의 경우 균열이 단면 중간 이상까지 진행하였으며 그 수도 BF1에 비해서 현저하게 많음을 볼 수 있다. 660 kN의 경우 단면 상부에서 종방향으로 균열이 발생하였으며 이로 인해 복부와 상부 플랜지가 분리되는 파괴현상이 발생되었다.

420 kN 이후 하중과 처짐 관계, 중립축의 변화양상 그리고 균열의 진행 패턴으로 볼 때 강섬유 혼입률 2%의 BF1 휨 거동이 강섬유 혼입률 1%와 종방향 상부플랜지 및 복부철근의 조합을 가진 BF2보다 더 강성이 있음을 알 수 있다. 탄성영역에서 즉, 420 kN 이전의 하중구간에서는 BF1과 BF2의 강성이 비슷하여 하중에 대한 처짐이 거의 동일하나 비선형 거동 구간에서는 동일한 하중 하에서 BF2의 처짐이 더 크게 발생하며, 하중 620 kN의 경우 BF1의 처짐보다 14%가량 크게 발생하였다.

BF1의 파괴형상은 단부 분절부재는 전단변형 또는 휨변형이 발생하지 않았으며 중앙 분절부재의 중앙단면에는 휨변형에 의한 파괴가 진행되었다.

BF2의 파괴형상은 단부분절부재는 전단변형 또는 휨

Fig. 17 Crack patterns

변형이 발생하지 않았으나 중앙 분절부재의 중앙단면에는 휨변형이 진행되다가 상부 플랜지와 복부가 분리되는 파괴형태를 보였다. 즉, 강섬유 혼입률 체적대비 1%의 콘크리트 인장력이 부족하여 파괴 시 상부 플랜지와 복부가 일체화를 유지 못하고 분리됨을 볼 수 있다.

단부 분절의 경우 BF1과 BF2 모두 휨변형이나 전단변형이 발생하지 않아 강섬유 혼입률 체적대비 1%의 UHPC사용으로도 내력이 충분함을 알 수 있다. 단부분절은 1%의 강섬유 혼입률 UHPC를 사용하고 중앙분절은 2%의 강섬유 혼입률 UHPC를 사용하는 것이 비선형 거동 및 최대 하중 이후의 거동에서 연성적 특성을 확보할 수 있는 설계가 될 것이다.

4. 결 론

강섬유 혼입률 2%의 초고강도 섬유보강 콘크리트 3분절 박스거더와 상부 플랜지와 복부에 종방향 연성보강 철근을 배근한 강섬유 혼입률 1%의 초고강도 섬유보강 콘크리트 박스거더에 대한 휨 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초고강도 섬유보강 콘크리트 박스거더 응력의 탄성영역에서 초고강도 콘크리트의 압축력과 프리스트레스 힘의 인장력에 의한 우력으로 강섬유 혼입률 2%의 박스거더와 강섬유 혼입률 1%와 종방향 연성보강 철근을 배근한 박스거더는 거의 동일한 거동을 보인다.
- 2) 초고강도 섬유보강 콘크리트 박스거더의 비선형응력 영역에서의 거동은 하중과 처짐관계, 중립축의 변화양상 그리고 균열의 진행 양상으로 볼 때 강섬유 혼입률 2%의 박스거더가 강섬유 혼입률 1%와 종방향 연성보강 철근을 배근한 박스거더 보다 더 높은 혼입률의 강섬유 인장강도 증진효과로 인해 의해 강성이 약간 더 크고, 중립축의 상승률이 점진적인 연성거동을 보이며, 더 적은 수의 균열 진전 상태를 보이고 있다.
- 3) 2% 강섬유 혼입에 의해 압축응력 구역에서 콘크리트 매트릭스의 구속력을 강화하고 인장응력이 우수한 초고강도 콘크리트의 거동특성을 1% 또는 그보다 낮은 강섬유 혼입과 종방향의 지름이 작은 연성보강 철근 배근 조합으로 압축응력 영역에서 구속력 보강 및 인장응력 영역에서 연성보강을 도모할

수 있어 초고강도 콘크리트 구조물 시공의 경제성을 기할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

- 4) 압축강도가 160 MPa인 초고강도 섬유보강 콘크리트 삼분절 박스거더의 중앙분절 부재가 휨파괴 상태에 도달하더라도 중앙분절과 단부분절 사이의 분절 면에서 슬립이나 균열이 발생하지 않았다. 이는 초고강도 콘크리트의 높은 압축강도로 인해 분절 면에서 휨응력과 전단응력의 파괴상태까지 충분한 여유를 가지고 있음을 의미하며, 초고강도 콘크리트가 분절부재 요소로서 안정적인 특성과 적합성을 가지고 있음을 보여주고 있다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 연구비로 수행되었고 이에 감사드립니다.

References

1. Chan, S. Y. N., Feng, N. Q., and Tsang, M. K. C., "Durability of High Strength Concrete Incorporating Carrier Fluidifying Agent," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 52, No. 4, 2000, pp. 235-242.
2. Hsu, L. S. and Hsu, T., "Stress-Strain Behavior of Steel-Fiber High-Strength Concrete under Compression," *ACI Journal of Structure*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 448-457.
3. Korea Institute of Construction and Transportation, "Development of Bridge Girder Using Ultra-High Performance Concrete Composites," Final Report of Development and Research of the Core Technique in Construction, Ministry of Construction and Transportation, 2005, pp. 266-297.
4. Benjamin, A. and Graybeal, B., "UHPC in the U. S. Highway Transportation System," *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2008, pp. 11-18.
5. Han, S. M. and Guo, Q. Y., "Flexural Experiment of Over Reinforced Prestressed High Performance Fiber Reinforced Concrete Girder," *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 3, 2011, pp. 9-11.
6. Pierre Richard, Marcel Cheyrezy, "Composition of Reactive Powder Concretes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, 1995, pp. 1501-1511.

요 약 압축강도 160 MPa과 길이 15.4 m를 가진 초고강도 섬유보강 콘크리트 분절박스 거더의 휨거동 실험을 수행하였다. 초고강도 섬유보강 콘크리트 분절 박스에 연성거동 특성을 보강하기 위한 강섬유와 종방향철근의 조합 효과를 두종류의 강섬유 혼입률로 제작된 초고강도 분절형 박스거더의 휨거동을 비교함으로써 평가하였다. 강섬유 혼입률이 1%이고 전단철근과 상부플랜지와 복부에 종방향철근으로 보강한 초고강도 콘크리트 박스거더 BF2의 거동은 탄성응력대에서 전단철근 없이 강섬유 혼입률 2%인 초고강도 섬유보강 콘크리트 박스거더와 유사한 연성거동을 보여준다. 그러나 비선형응력대에서는 BF1의 강성이 약간 더 크고 안정적인 연성거동 형태를 보여주고 있다. 초고강도 섬유보강 콘크리트 박스거더의 분절면은 휨파괴 시까지 균열이나 슬립이 발생하지 않았다.

핵심용어 : 초고강도 콘크리트, 분절형 박스 거더, 휨거동, 철근보강, 강섬유