

# 고로슬래그 미분말을 혼입한 프리캐스트 박스 암거의 휨 강도에 관한 연구

태기호 · 김두환<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 공과대학 건설공학부  
(2011. 3. 22. 접수 / 2012. 1. 4. 채택)

## A Study on Flexural Behavior of Precast Box Culvert with Blast Slag

Ghi-Ho Tae · Doo-Hwan Kim<sup>†</sup>

School of Civil-Engineering, Seoul National University of Science and Technology  
(Received March 22, 2011 / Accepted January 4, 2012)

**Abstract :** In this study, the effect of blast furnace slag on precast concrete culvert was assessed by measuring the flexural strength using to full scaled box culvert. As a result, the initial cracking load and yield load of reinforced concrete box converts are increased in comparison with those of the normal concrete box culvert, but the ultimate load is decreased slightly. It can be concluded that use of blast furnace slag induce to flexural strength in precast concrete box culvert greatly improved the serviceability.

**Key Words :** blast furnace slag, bending behavior, box culverts, precast concrete

### 1. 서 론

프리캐스트 세그먼트에 의한 암거의 가설은 현장 타설식 암거에 비해 많은 장점과 경제적인 효율성에 힘입어 그 동안 활발한 연구와 개발이 이루어져 왔다. 우선 프리캐스트 박스 암거는 공기를 줄일 뿐만 아니라 콘크리트 품질의 우수성, 그리고 도심지와 같이 복잡하고 협소한 작업공간에서 우수한 시공성을 인정받고 있으며 요즘 사회적인 문제로 대두되고 있는 각종 오염, 소음, 분진 등의 환경적인 요인 등에서도 탁월한 효과가 있는 것으로 나타난다.

그러나 도로 밑 지중에 매설하는 암거는 교통량의 증가에 따른 교통하중의 증대와 내부공간의 증가에 따라 외압강도가 커짐으로 이를 수용할 수 있는 고품질의 암거를 시대의 요구에 맞춰 만족하여야 한다. 특히, 해양성 환경에 접하는 지하 공간에 박스 암거의 경우, 염해와 중성화로 인하여 콘크리트가 가지고 있는 기능을 상실하게 되므로 조기에 부식으로 인한 균열진전으로 구조물이 붕괴되는 현상이 발생할 수 있다<sup>1)</sup>.

이에 일반적인 콘크리트의 강도증진 뿐 만 아니라 내구성도 요구되는 박스 암거가 향후 필요한 실정이다. 전 세계적으로 콘크리트의 고성능화는 나날이 증가되고 있는 추세이며, 콘크리트의 고성능화는 콘크리트 재료인 시멘트, 혼화재료의 특성을 고려하여 다각적으로 연구되고 있으며, 최근 고강도, 고내구성, 고유동성의 성질을 모두 갖는 고성능 콘크리트의 개발 및 실용화가 활발히 이루어지고 있다<sup>2)</sup>.

본 연구에서는 특수 환경에 축조되는 콘크리트 구조물의 제물성 및 내구성을 향상, 개선시키기 위한 대책으로 시멘트 경화체의 수화열을 저감시킬 뿐만 아니라 장기강도 증진, 내구성 향상에도 큰 효과가 있다고 널리 알려진 고로슬래그 미분말의 적정량을 혼입한 시멘트의 특성을 고찰하였으며, 향후 프리캐스트 박스 암거에 적용하기 위한 배합비를 설정하고자 하였다<sup>3)</sup>.

일반적으로 콘크리트용 혼화재료로 이용되고 있는 고로슬래그 미분말은 경제적, 환경적 이점뿐만 아니라, 고강도, 내해수성, 내화화성과 같은 성능개선의 효과가 있다고 발표되고 있다. 그러나, 초기 강도의 저하로 인한 거푸집의 해체 및 순환의 문제로 공사기간이 지연되어 공사비의 증가 등의 단점이 있

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kdh6504@seoultech.ac.kr

는 것으로 알려져 건설현장에서 적용된 사례는 그리 많지 않은 실정이다<sup>4,8,9)</sup>.

프리캐스트 박스암거는 지하에 매설되는 구조물로서 단기간의 증기양생으로 조기의 강도를 확보하고 있으므로 고로슬래그 미분말의 함유량이 지하박스의 외압강도에 미치는 영향을 확인하고, 일반 프리캐스트 박스암거와 비교하여 휨 성능을 비교함으로써 향후 고로슬래그의 시멘트 대체 활용성을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 재료적 실험

### 2.1. 실험개요

고로슬래그 미분말을 혼입한 프리캐스트 콘크리트를 제작하기 위하여 콘크리트 재료적인 실험을 통하여 배합비를 설정하고자 하였으며, 이를 토대로 재료적인 성능인 압축강도, 휨 강도를 살펴보았다. 일반적으로 고로슬래그의 내구성은 좋은 것으로 평가되고 있으므로, 본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 프리캐스트 박스 암거 적용하여 증기양생을 이용한 향후 구조물로서의 이용가능성을 고찰하고자 구조실험을 실시하였다.

### 2.2. 사용재료 및 콘크리트 배합

실험에 사용된 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC로 약칭함), 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag, BFS로 약칭함)의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

굵은 골재는 최대치수 25 mm인 부순자갈을 사용하였으며, 잔골재는 바다모래를 세척하여 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

콘크리트 배합은 Table 3에서와 같이 설계기준강도는 재령 28일에서 압축강도 35 MPa이며, 목표로 하는 슬럼프는 120 ± 15 mm이고, 공기량은 4.5 ± 0.5 %이다. 한편, 고성능 프리캐스트 콘크리트를 제조하기 위하여 OPC, OPC + 40% BFS(BFS 40으로 약함), OPC + 50% BFS(BFS 50으로 약함), OPC + 60% BFS(BFS 60으로 약함)로 정한 4배합의 콘크리트를 제조하였다.

Table 1. Physical properties of cement and blast furnace slag

Item Types	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /kg)
OPC	20.2	5.8	3.0	63.3	3.4	3.15	3,112
BFS	33.2	2.87	0.33	44.3	4.8	2.90	6,741

Table 2. Physical properties of aggregates

Types	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Fine Aggregate	2.60	0.94	2.80	1,475
Coarse Aggregate	2.68	0.78	6.97	1,552

Table 3. Concrete Mix Table

Type	Gmax (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Ad (g/m <sup>3</sup> )
						W	C	BFS	S	G	
OPC	25	120	4.5	38	38.4	160	421	0	664	1,063	2,900
BFS 40	25	120	4.5	38	38.4	160	252.6	168.4	659	1,056	3,200
BFS 50	25	120	4.5	38	38.4	160	210.5	210.5	658	1,055	3,300
BFS 60	25	120	4.5	38	38.4	160	168.4	252.6	657	1,054	3,600

## 3. 프리캐스트 박스 암거 외압강도 실험

### 3.1. 개요

고로슬래그 미분말이 혼입된 콘크리트를 프리캐스트 콘크리트로 이용하기 위한 실험의 일환으로 실제 현장에서 사용되고 있는 박스암거를 제작하여 외압강도에 대한 성능을 살펴보고자 하였으며, 이에 대한 결과를 보통시멘트를 이용한 콘크리트 박스암거와 비교함으로써 향후 그 타당성을 확인하고자 하였다.

### 3.2. 시험체 제작

고로 슬래그를 혼입한 프리캐스트 박스 암거의 외압강도 실험을 수행하기 위하여 재료적 실험결과인 치환율 50%를 기준으로 고로슬래그 미분말의 분말도를 변수로 Table 4와 같이 일반 OPC 콘크리트와 고로슬래그 미분말의 분말도 4,000, 6,000을 사용하여 총 3 개의 시험체를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 제작에 사용된 배합비는 Table 3에서와 같이 설계강도 35 MPa를 기준으로 하였으며, 프리캐스트 박스암거 제작에 사용된 철근의 재료적 특징은 Table 5와 같다.

Table 4. Types and characteristics of the real specimen

No.	Test	Property	
OPC	Bending	Non-connection	Plain
GFSC4	Bending	Non-connection	Blast Slag(4000)
GFSC6	Bending	Non-connection	Blast Slag(6000)

Table 5. Material properties of steel

종류	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	극한강도 (MPa)
철근(SD40A)	400	450~610	2.0×10 <sup>5</sup>	660

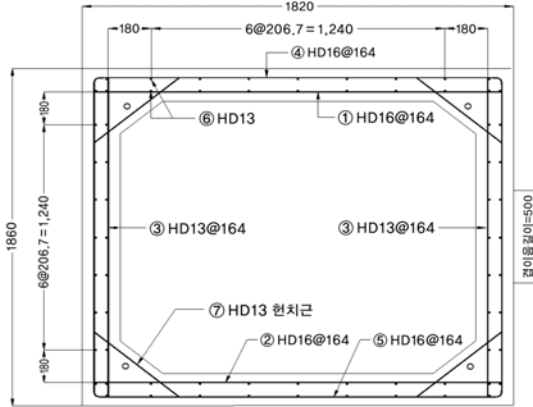


Fig. 1. Actual specimen cross-section and dimensions.

3.3. 재하방법

박스암거의 경우, 그 특성 상 지하에 매립되는 것이 일반적이므로, 이에 대한 거동을 파악할 경우, 또는 그 성능을 평가할 경우, 지하에 매립되는 조건을 고려하여야 한다. 국외의 일본에서는 이러한 박스성능 평가를 일본 콘크리트 공업협회에서 제시한 외압강도실험으로 실시하여 평가하고 있으나, 국내에서는 현행 시방서나 관련문헌에 제시되어 있는 실험기준이 없는 실정이므로 제작된 박스 암거를 Fig. 3과 같이 휨 실험을 통해 성능을 평가하고자 하였다<sup>5)</sup>.

또한, 국내 도로교 시방서를 고려하여 사용하중 상태에 대한 평가로 DB-24의 표준트럭 하중의 가운데 바퀴 하중의 2배에 해당하는 20 kN를 기준으로 Reloading을 실시하고, 그 후 부터는 파괴하중까

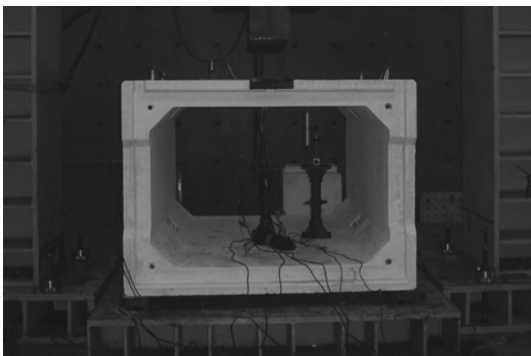


Fig. 2. Precast box culverts pressure stress test.

지 재하 하였다. 콘크리트 타설전·후에 철근 및 콘크리트 게이지를 설치하였으며, 실험 시 처짐 측정기를 설치하여 그 거동을 살펴보았다<sup>6,7)</sup>.

4. 실험결과 및 분석

4.1. 재료적 실험 결과

보통포틀랜드 시멘트와 보통포틀랜드 시멘트에 고로슬래그 미분말 혼입률을 각각 40, 50 및 60% 달리하여 제조한 공시체를 수중양생하여 측정된 압축강도 및 인장강도를 나타낸 것이 Fig. 3과 Fig. 4 이다.

Fig. 3에서 재령 28일에서의 OPC, BFGS40, BFGS50 및 BFGS60 시험체의 압축강도는 각각 36.7, 42.1, 45.8 및 47 MPa를 나타내었으며, 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도는 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트보다 상당히 크게 나타났다. 또한, 고로슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수

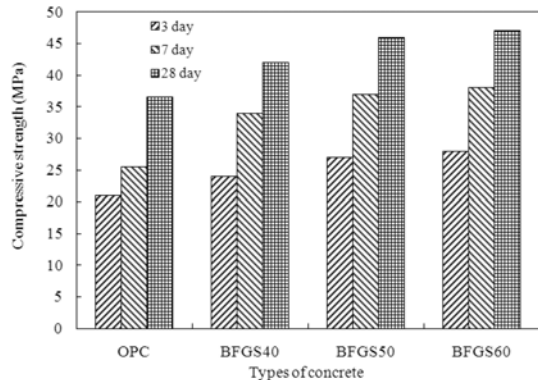


Fig. 3. Compressive strength of concrete type.

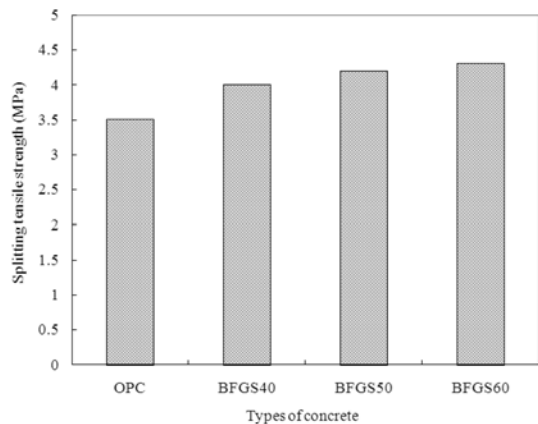


Fig. 4. Splitting tensile strength of concrete type.

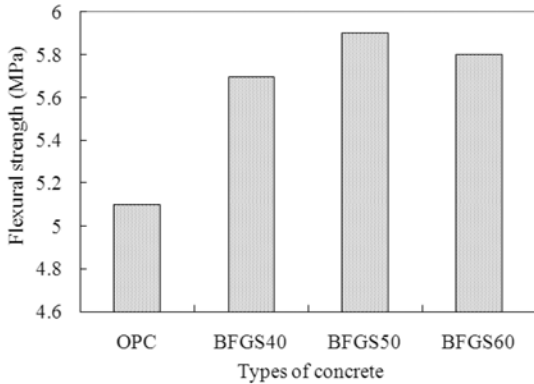


Fig. 5. Concrete flexural type.

록 콘크리트의 압축강도는 조금씩 증가하는 경향을 나타내었다.

한편, 4종류(OPC, BFGS40, BFGS50 및 BFGS60) 콘크리트의 할렬 인장강도는 각각 3.3, 3.6, 3.9 및 3.9 MPa 정도의 값을 나타내었으며, 이 값은 압축강도의 약 0.83~0.9% 정도이다(Fig. 4).

이러한 결과는 고로슬래그 미분말의 분말도의 영향이 큰 것으로 판단되며, 또한 고로슬래그미분말의 잠재수경성에 의하여 콘크리트의 조직이 치밀해졌기 때문으로 생각된다.

고로슬래그 미분말을 3단계[40, 50 및 60%]로 혼합한 콘크리트의 휨강도 시험체를 제작하여 3등분점 재하방법에 의하여 휨강도실험 결과를 정리한 것이 Fig. 5이다.

그 결과, 고로슬래그 미분말을 혼합한 콘크리트의 휨강도가 OPC 콘크리트보다 큰 값을 나타내었으며, 고로슬래그 미분말을 50% 혼합한 콘크리트의 휨강도가 6.0 MPa로 가장 큰 값을 나타내었다. 일반적으로 콘크리트의 휨강도는 압축강도의 약 1/5~1/8 정도의 값을 나타내는 결과와 유사하였으나, 고로슬래그 미분말의 혼입률을 증가할수록 휨강도 증진률은 크지 않았다.

#### 4.2. 외압강도 실험 결과

외압강도 실험결과, 일반적인 보의 파괴형태와 유사한 휨 파괴가 나타났으며, 슬래그 미분말을 혼합한 박스 압거의 파괴 양상은 Fig. 6과 Fig. 7에 나타났듯이 일반 콘크리트와 거의 유사한 파괴양상을 보이는 것으로 나타났다. 초기 균열은 박스 상부 슬래브에서 발생하는 것이 아니라 박스 벽체 내부에서 발생하였으며, 일정 시간 후에 박스 상부슬래브 인장부분에서 발생하였다. 그 후 DB-24 하중인

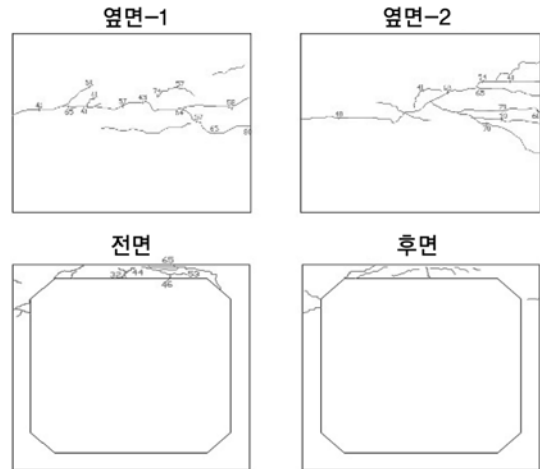


Fig. 6. The fracture of specimens OPC.

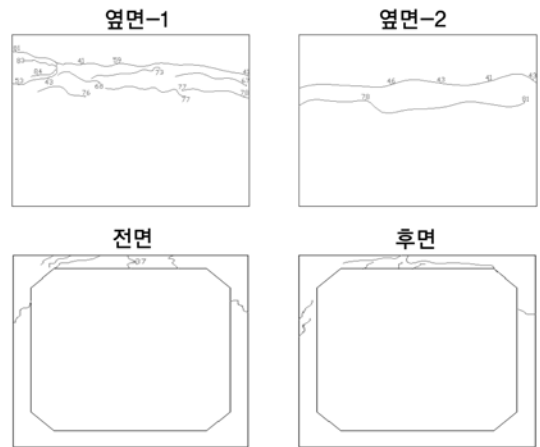


Fig. 7. The fracture of specimens GFSC6.

4320 kN 이후에 균열의 진전은 미비하였으며, 800 kN 이후에 균열 폭은 작고, 여러 수의 균열들이 발생하였다.

슬래그 미분말을 혼합한 박스의 파괴양상은 휨 거동을 보임에 따라 휨 파괴로 나타났으며, 파괴 양상만을 고려해 볼 때 일반 보통 시멘트를 사용한 프리캐스트 박스압거로 대체하여 시공하여도 큰 무리가 없을 것으로 생각된다.

일반 프리캐스트 콘크리트 압거의 경우, 지중에 매설되어 공용 중 벽체 높이(H) 상단부분에 균열이 발생, 종방향으로 진전되는 경우가 나타나고 있다. 박스에 나타나는 균열은 그 균열의 폭이 커지게 되면, 곧 박스의 누수와 철근부식, 증성화 등으로 이어지므로 균열 폭의 문제가 된다.

실험결과, 설계하중 DB-24에 대한 축하중(약 200

Table 6. Maximum load and fracture load of the upper slab

TYPES	Initial Crack load (kN)	Max. load (kN)	Crack Width at Service load (mm)	Crack Width at Max. load (mm)
OPC	350	1,200	0.096	0.5
GFSC4	180	800	0.2	2.8
GFSC6	360	1,120	0.062	0.5

kN) 시 발생하는 균열 폭과 최대하중 시 균열 폭을 정리하여 Table 6에 나타내었으며, 설계하중 시 축하중에 대한 균열은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

또한, 최대하중 시 발생하는 균열 폭은 0.5 mm로 크게 나타났지만, 휨 파괴가 발생한 후에 발생하는 균열 폭은 의미가 없기 때문에, 고로슬래그 미분말을 혼입한 프리캐스트 박스 암거에 있어서 균열폭도 허용균열폭 이내인 것으로 생각되어진다.

GFSC4의 경우, 고로슬래그 미분말의 분말도가 4,000인 경우로 6,000인 것과 비교한 결과, 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 우선 최대하중의 경우, 800 kN으로 OPC에 비해 상당부분 못 미치는 것으로 나타났으며, 균열 폭과 균열 양상도 상당부분 차이를 보이는 것으로 나타났다.

재료적인 시험의 경우도 분말도가 4,000인 경우는 6,000과 비교하여 상당부분 정결이 떨어지고, 실물 크기로 제작된 박스의 경우도 실험 결과, 성능이 현저히 떨어지는 것으로 나타났다(Fig. 8).

GFSC4의 경우, 하중-처짐이나 다른 결과가 OPC와 GFSC6의 경우와 비교하여 많은 차이를 보임에 따라 결과정리가 어려운 점이 있었다.

본 연구에서는 고로슬래그의 치환에 따라 보통 콘 크리트를 이용한 프리캐스트 박스암거와의 비교를 주 목적으로 하고 있고, 향후 일반 시멘트의 대체 여부가 주된 관심사항이다. 따라서, 분말도가 6,000인

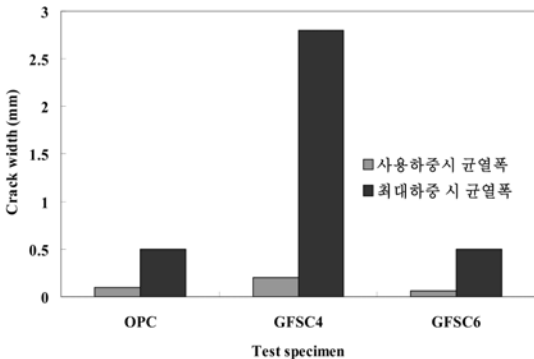


Fig. 8. Load and maximum load of specimens for use by crack width.

경우와 일반 OPC와의 비교 및 검토를 주로 실시하였다.

#### 4.2.1. 하중- 처짐 결과

본 연구에서는 사용하중 상태를 평가하기 위하여 DB-24 하중의 중간 축하중인 100 kN의 두배에 해당하는 200 kN를 기준으로 Reloading을 실시하여, 처짐 특성을 고찰하였으며, 그 이후 하중을 증가시켜 파괴 시까지 고찰하였다.

사용하중인 200 kN까지 하중을 증가시키고, 다시 하중을 초기상태로 reloading한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그 결과, 200 kN까지 하중을 증가시킨 경우, 처짐은 0.3 mm로 두 시험체 모두 거의 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 하중을 제거한 경우도 원 상태를 회복하는 것으로 나타났다.

GFSC6의 경우, 하중 제거 시 회복되는 정도가 OPC와 비교해 볼 때 미세한 부분이지만, 뛰어나다고 말할 수 있으며, 탄성거동을 한다고 말할 수 있다. 또한 GFSC6의 경우 하중 제거 시 다시 원점으로 돌아오는데 OPC의 경우, 초기 하중 상태로 복원되지만, 약간의 잔류변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 앞에서 설명되었지만, 이는 고로슬래그 미분말의 분말도와도 상관이 있는 것으로 생각되어진다.

사용하중 상태 이후로 다시 하중을 증가시켜 파괴 시 까지 하중을 증가시키면서 시험체의 거동을 살펴본 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그 결과, 초기의 하중 증가 시 약 400 kN까지는 같은 하중에 대하여 처짐이 GFSC6의 경우가 작은 것으로 나타났고, 그 이후부터는 거의 같은 거동을 보이다 1,000 kN 이후부터 차이를 보이는 것으로 나타났다. 시험체의 최대하중은 OPC가 높게 나타났으나, 실제 박스 암거가 설치되고 공용중에 있을 경우, 1,000 kN

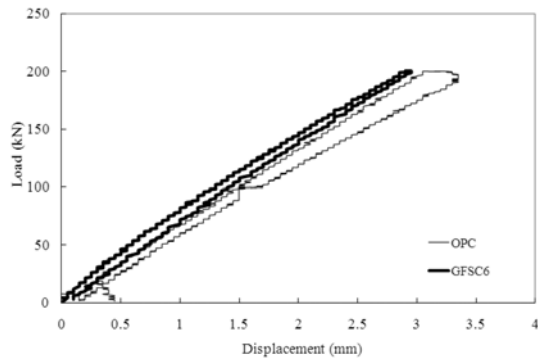


Fig. 9. Loading conditions used in the load deflection relationship.

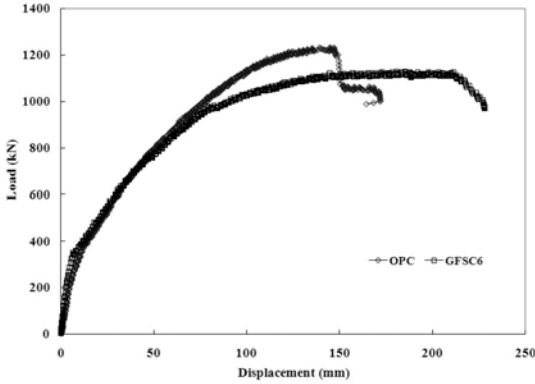


Fig. 10. Reloading Load increase after load-deflection relationship.

이후의 하중 증가는 큰 의미가 없다. 물론 OPC보다 GFSC6의 경우가 최대하중이 작게 나타났지만, 1,000 kN 이후에 하중증가에 따른 변위 증가가 GFSC6의 경우가 콘크리트의 경우이지만, 연성이 있는 것으로 나타났다.

최대하중 이후에 시험체의 거동은 변위의 증가 보다는 하중의 급격한 변화와 함께 파괴되는 전형적인 휨 파괴의 형태를 보이고 있다.

또한, 최대하중 1200 kN으로 나타난 OPC의 경우의 변위는 약 15 mm로 나타났지만, GFSC6의 경우, 최대하중 1120 kN의 경우, 변위는 15 mm에서 계속 증가하는 것을 알 수 있다.

4.2.2. 연성평가

연성은 구조물의 거동에 매우 중요하고, 연성 확보 여부가 구조물의 붕괴나 항복 여부를 판단할 수 있는 지표로 적용되고 있다. 또한 연성문제는 내진 설계 시 중요한 항목으로 발표되고 있다. 따라서, 충분한 연성의 확보는 구조물의 설계나 사용시 고려되어야 하고, 확보되어야 한다.

본 연구에서는 실험결과를 이용하여 연성을 분석하고, 평가하고자 하였다. 연성이란 재료, 구조단면, 구조부재, 또는 구조계가 심각한 저항성의 손실 없이 붕괴(collapse)하기 전까지 보여주는 비선형 변형 (inelastic deformation)을 나타내는 정성(qualitative)적인 개념이다.

연성은 정역학적 부정정 구조물에서 위험단면의 과잉 응력을 다른 단면으로 재분배 시켜 국부 파괴를 지연시키는 역할을 하는 중요한 안전도 계수라 할 수 있다. 연성을 측정하기 위한 방법으로 연성지수(ductility index) 또는 연성계수(ductility factor)가 사용되는데 곡률(curvature), 회전(rotation), 처짐(de-

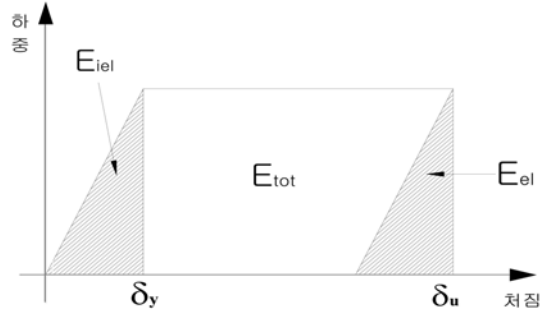


Fig. 11. Flexible assessment for load-deflection relationship.

Table 7. Evaluation of flexible beams stars

Specimen	Initial crack load (kN)	Yielding load (kN)	Failure load (kN)	Ductility Index	Failure aspects
OPC	350	993	1200	1.21	Bending
GFSC4	180	653	800	1.22	Bending
GFSC6	360	903	1120	1.24	Bending

flection)의 비로 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}, \mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}, \mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{1}$$

- 여기서,  $\mu$  = 부재의 연성지수
- $\theta$  = 부재의 곡률
- $\phi$  = 부재의 회전계수
- $\Delta$  = 부재의 처짐

위 식 (1)은 전통적인 식을 이용하는 경우, 구조 부재의 항복과 극한상태를 명확히 구분하여야만 정확한 연성지수 계산이 가능하다. 철근콘크리트 구조물의 경우 철근의 항복을 기준으로 하여 쉽게 연성지수를 계산할 수 있다.

실험 결과, OPC와 GFSC6에 대하여 Table 7에 시험체의 철근에 대한 항복하중과 처짐에 대해 나타내었고, 연성지수를 평가한 결과, OPC의 경우 연성지수는 1.21로 나타났고, GFSC6의 경우 1.24로 나타났으며, 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트 박스의 경우 철근의 연성은 확보한 것을 알 수 있다.

4.2.3. 하중-변형률 특성

프리캐스트 박스 암거의 상하부 슬래브와 벽체의 철근과 콘크리트에 변형률 게이지를 타설 전에 설치하여 하중에 따른 변형률을 측정하였다. 그 결과, Fig. 12~14에 각각 박스 상부 슬래브의 콘크리트 인장 및 압축 변형률, 철근의 변형률, 벽체 철근의

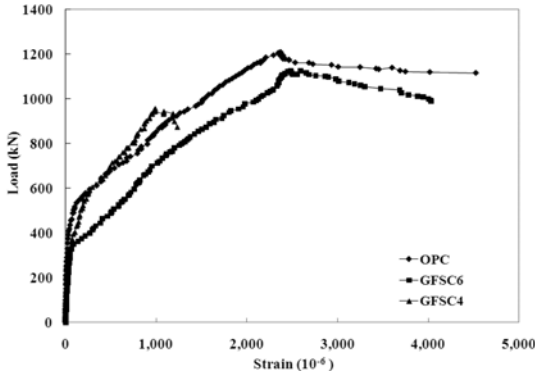


Fig. 12. Tensile specimens Stars box top slab reinforcement strain.

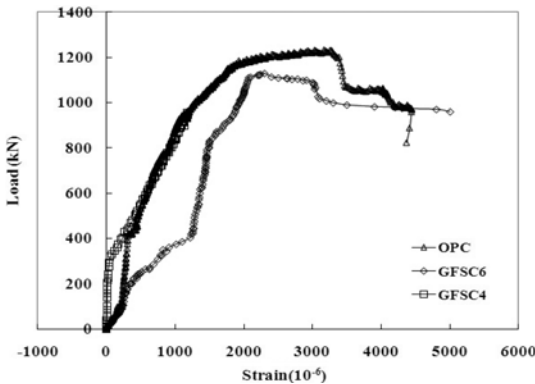


Fig. 13. Strain of steel beams Stars Box Walls.

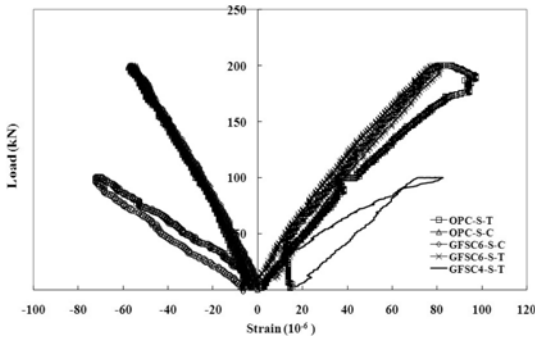


Fig. 14. Specimens by using the box in the upper slab compared strain.

변형률을 종합적으로 나타내었다.

먼저, Fig. 12는 박스 상부 슬래브 인장철근의 변형률도를 시험체를 종합하여 나타낸 것으로 철근의 항복강도를 400 MPa로 사용하였으므로, 항복 변형률이 2,000  $\mu\epsilon$ 을 기준으로 항복함을 알 수 있다. 그러나 분말도가 4,000인 경우, 철근이 다른 시험체에 비해 낮은 하중에서 항복하는 것으로 나타나 시험체

의 제작에 문제가 있는 것으로 판단된다.

또한, OPC와 GFSC6(분말도 6,000)인 경우, 실험 결과 비슷한 양상을 가지는 것으로 나타났으며, 상대적으로 OPC에 비해 크게 떨어지는 것은 아닌 것으로 생각되어진다. Fig. 13은 박스 벽체 중간높이에서의 철근 변형률을 나타내었다. 일반적으로 벽체 높이의 중간부분에서 공용 중에 균열이 발생하고 이로 인해 문제가 되고 있는 사례가 나타남에 따라 타설 전에 벽체 중간 위치에 게이지를 설치하였다.

그 결과, GFSC4인 분말도가 4,000인 경우, 측정결과가 다소 문제가 있는 것으로 나타났으며, 분말도가 6,000인 경우와 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. GFSC6의 경우, 벽체 철근 역시 항복변형률이 일반 OPC와 비슷한 거동을 보이는 것을 알 수 있으며, 하중이 급격하게 감소함에 따라 변형률 증가가 GFSC6의 경우가 연성을 확보하는 것으로 생각되어진다. 전체적으로 400 kN 근처에서 그래프의 양상이 바뀌는 것은 균열발생으로 판단되어지며, OPC 보다 뛰어난 거동을 보이지는 않지만, 현저하게 떨어지는 않는 것으로 생각된다.

Fig. 14는 시험체별 사용하중에 따른 박스 상부 슬래브 콘크리트의 인장 및 압축 변형률을 나타낸 것으로 압축 측 콘크리트 최대 변형률이 3,000  $\mu\epsilon$ 임을 생각해 보면, 거의 미치지 않는 것을 알 수 있다. 사용하중은 구조물의 사용성 검토 시 검토되는 하중으로 실제 박스암거가 시공될 때 중요한 항목이 될 수 있다.

따라서, 도로교 시방서에 제시하고 있는 표준트럭 하중에서 DB-24의 경우, 차량 바퀴하중 중 제일 큰 중간바퀴 하중의 2배에 해당하는 200 kN을 기준으로 하중 재하 후 다시 **Reloading** 하여 복원력을 관찰하고 다시 파괴하중까지 재하 함으로써 사용성에 대한 거동을 살펴보았다.

그 결과, 압축 변형률의 경우 OPC와 GFSC6의 경우 큰 차이가 발생하지는 않는 것으로 나타났으나, 상부 슬래브 인장의 경우, 복원성은 OPC에 비해 GFSC6의 경우가 훨씬 좋은 것으로 나타났다. GFSC4의 경우, **Reloading** 후 잔류 변형률은 다른 시험체에 비해 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있으며, 100 kN까지 재하하고 다시 제거한 것은 분말도가 작기에 콘크리트 강도도 현저히 떨어지는 재료적 성질이 좋지 않기 때문에 작은 하중으로 실험을 실시한 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 박스 압거에 내구성을 향상시키기 위해 고로슬래그 미분말을 혼입하여 재료적 실험 및 구조적 실험을 통해 향후 프리캐스트 콘크리트에 적용되기 위한 것으로 연구된 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 고로슬래그의 잠재 수경성으로 인해 혼입율 50%의 경우, 콘크리트의 압축강도와 인장강도가 각각 45.8 MPa, 3.9 MPa 가장 크게 증진되는 것으로 나타나 콘크리트 배합 시 고로슬래그의 영향을 크게 할 경우 시멘트 대비 혼입율을 50%로 하여도 무방하리라 생각된다.

2) 박스 외압강도 실험결과, 균열양상은 일반 콘크리트 박스 압거와 비슷한 양상으로 나타났으며, 초기균열발생위치는 박스의 상부 슬래브가 아니라 박스 내부 벽체 상단부인 우각부에서 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 균열 폭은 허용균열폭을 만족하는 것을 알 수 있었다.

3) 사용하중 상태의 하중으로 reloading 실험결과, 처짐은 0.3 mm 이내로 발생하였으나, 고로슬래그를 혼입한 경우, 일반 콘크리트 박스압거와 비교하여 복원성은 미미하게 증진되는 것을 알 수 있었다.

4) 연성평가결과, 일반콘크리트 박스압거와 비교하여 미미하게 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트 박스압거가 연성을 증진시키는 효과가 있는 것으로 보이나 단정하기는 어려운 정도이므로 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

5) 하중-변형률 실험결과, OPC와 비교하여 GFSC

는 비슷한 변형율의 관계를 보이고 있는 것을 알 수 있었으며, 향후 추가적인 실험이 수행된다면, 실제구조물로서의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) P. Kumar Mehta, and Paulo J. M. Monteiro Concrete-structure, properties, and material, 2nd Edition, Prentice Hall, 1997.
- 2) 문한영, 최연왕, 고로슬래그 미분말을 이용한 고강도 콘크리트의 강도특성에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, Vol. 16, No. 3, pp. 235~242, 1996.
- 3) 정계동, 고성능 콘크리트 제조에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, Vol. 5, No. 2, pp. 45~50, 1993.
- 4) Clyde E. Kesler, and Donald W. Pfeifer "Expansive Cement Concrete-Present State of Knowledge", Journal of Material, ACI Journal, Vol. 77, No. 5 684-689, 1970.
- 5) 건설교통부, 콘크리트 구조설계기준 全國 クスカルバート協會 (平成13年), 콘크리트 外壓強度 實驗方法, 2005.
- 6) 황현호, 조립식 프리캐스트 콘크리트 압거의 구조해석 및 모형실험에 관한 연구 대한토목학회지, Vol. 37, No. 1, pp. 26~32, 1989.
- 7) 한국PC 콘크리트 압거 공업협동조합, "프리캐스트 철근 콘크리트 압거 전문 시방서", 2000.
- 8) 김진근 등, "콘크리트 구조물의 균열제어 방안 지침에 관한 연구", 연구보고서, 한국과학기술원, 1996.
- 9) 이주호 등, "도로횡단 Box 압거 벽체의 초기 균열 제어에 관한 연구", 롯데건설 기술연구소, 2001.