

180MPa 초고성능 콘크리트의 압축 부재에의 적용성에 대한 연구

민경환^{*}, 최홍식²

¹충청대학교 공학기술연구원, ²충청대학교 토목과

A Study for Application of 180 MPa Ultra High Performance Concrete to Compressive Members

Kyung-Hwan Min^{1*}, Hong-Shik Choi²

¹Research Institute for Engineering & Technology, Chungcheong University

²Department of Civil Engineering, Chungcheong University

요약 180MPa급 초고성능 콘크리트는 높은 압축강도로 인해 압축 부재에 대한 연구 결과가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 UHPC의 적용성 향상을 위해 트윈 샤프트 믹서 배치 플랜트에서 생산성을 평가하였다. 또한 설계 방안을 제시하기 위한 기초 자료를 획득하기 위해 사각 기둥과 원형 기둥에 대한 중심축하중 실험을 수행하여 파괴 형태와 거동을 평가하였다.

Abstract In the actual research fields, the studies for applications of 180 MPa ultra high performance concrete (UHFRCC) to compressive members are limited due to its very high compressive strength. In this study, in order to find its practical use, UHPC was produced by using twin-shaft mixer batch plant. Also, to get basic research data for the design specification of UHPC compressive members, a series of draft experiments, including short columns with square and circular sections, were performed and its failure modes and behaviors were assessed.

Keywords : Batch plant, Compressive performance, Concentrated load, Short column, Ultra high performance concrete

1. 서론

국내에서는 건축구조물의 압축부재에 적용하기 위한 초고강도 콘크리트(ultra high-strength concrete)에 대한 연구가 1990년대 중반부터 이루어져왔다. 또한 교량 구조물의 상부에 적용하기 위한 노력의 일환으로 한국건설기술연구원을 필두로 한 180MPa급 초고성능 콘크리트(UHPC, ultra high performance concrete)의 실용화에 대한 연구가 2000년대 중후반부터 이루어지고 있다.[1] 초고성능 콘크리트(UHPC)를 압축 구조물에 적용하기 위한 연구는 국내외 모두 어느 정도 한계를 가지고 있는 실정이다. 국내외의 많은 연구에도 불구하고 특히 압축 부재로써 사용하기 위한 설계기준은 프랑스나 일본 모두

포함하지 못하고 있는 실정이다.[2] 이에 본 연구에서는 180MPa급 초고성능 콘크리트의 압축부재에의 적용성을 향상시키기 위한 연구로써, 배치 플랜트(batch plant)에서의 생산성을 검토하고, 압축부재를 제작하여 중심축하중 재하 실험을 수행하여, 파괴 형태와 거동을 평가하였다.

2. B/P 생산 및 역학적 특성

2.1 재료 특성 및 배합

UHPC의 대량 생산을 위해 실험용 배치 플랜트에서의 적용성을 평가하였다. 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 지르코늄 실리카폼(Zr-SF), SiO₂를 포함하는 입경 2 μ m

본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화지원 사업의 연구비지원(14AUDP-B069364-02)에 의해 수행되었음

*Corresponding Author : Kyung Hwan Min(Chungcheong University)

Tel: +82-43-230-2678 email: alskh@ok.ac.kr

Received June 2, 2015

Revised June 8, 2015

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

의 충전재(Filler)를 분체로 사용하였고, CSA계 팽창제(EA)와 글루콜계 수축저감제(SRA), 폴리카본산계 고성능감수제(SP)를 혼화제로 사용하였다.[3,4] 모래는 입경 0.5mm 이하의 규사를 적용하였고, 사용한 재료에 따른 배합표는 Table 1과 같다.

UHPC의 제조에는 인장강도 향상을 위해서 대량의 강섬유가 투입된다. 본 연구에서는 직경 0.2mm, 인장강도 2,500MPa의 고인성 강섬유를 사용하였다. B/P 시험 생산에서는 길이 16mm와 19mm의 강섬유를 동시에 혼합하여 1.5%를 적용하였다.

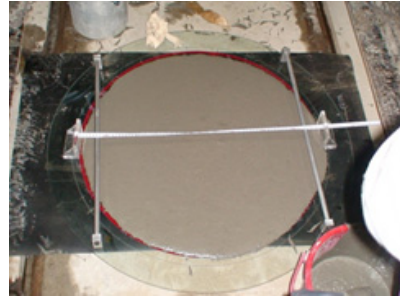


Fig. 2. Slump flow test

Table 1. Mix proportions (ratio in weight)

W/B	Cement	Zr-SF	Filler
20%	1	0.25	0.30
Sand	EA	SRA	SP
1.10	0.075	0.01	0.03

2.2 역학적 특성 결과

1m³ 용량의 트윈 샤프트 믹서를 사용하는 배치 플랜트(Fig.1)에서 0.5m³의 시험 생산을 하였고, 굳지 않은 콘크리트의 실험 결과, 슬럼프 플로우(Fig.2)는 740mm, t₅₀₀은 4.6초, 공기량은 3.2%로 측정되었다. UHPC의 증기양생은 90°C에서 72시간 동안 실시하였고, 이에 따른 역학적 특성 실험 결과는 Table 2와 같다.



Fig. 1. Twin mixer batch plant

Table 2. Mechanical properties

Compression (at 9 days)			
Ultimate load (kN)	1699	1717	1591
Compressive strength (MPa)	216.3	218.2	202.6
	Average: 212.4		
Flexure (at 8 days)			
Ultimate load (kN)	93.66	86.85	116.28
Flexural strength(MPa)	28.1	26.1	34.9
	Average: 29.7		

3. 사각 기둥의 중심축하중 재하 실험

3.1 실험 변수 및 상세

선행 연구[5,6,7]와 실제 실험을 수행할 수 있는 장비의 규모를 고려하여, 부재가 지지할 수 있는 최대 하중을 약 8MN으로 산정하였고, 이에 따라 부재 중앙의 단면을 200×200mm로 결정하였다. 기둥 실험의 변수는 Table 3과 같이 주철근의 종류와 띠철근의 간격으로 하여 부재를 제작하였다. 주철근이 배근된 경우에 띠철근은 모두 SD500급 D10 철근을 사용하였다. 띠철근의 간격은 40mm를 기본으로 하여, UHPC의 높은 인장강도에 의한 구속효과를 고려하여 60mm와 80mm로 달리하여 배근하였다.

Table 3. Test variables of square columns

Specimen ID	Longitudinal rebar			Transverse reinforcement			
	Dia.	Grade	ρ _l (%)	Dia.	Grade	Spacing s (mm)	ρ _s (Vol.%)
SS1	-	-	-	-	-	-	-
SS2	4-D25	SD400	5.065	D10	SD500	40	3.040
SS3	4-D19	SD600	2.865	D10	SD500	40	3.040
SS4	4-D19	SD600	2.865	D10	SD500	60	2.027
SS5	4-D19	SD600	2.865	D10	SD500	80	1.520

180MPa급 UHPC는 부재의 단면이 작고 이에 따라 철근이 밀집되어 있는 상황을 고려하여 16mm와 19mm 강섬유를 하이브리드로 혼합하여 1.5%를 적용한 배합과 13mm의 강섬유를 2% 적용한 배합을 각각 사용하였다. 또한 Fig. 3과 같이 부재 전체의 길이는 1000mm로 하고, 부재 중앙의 파괴를 유도하기 위해 부재 상하부에 200×300mm의 두부와 50mm의 현치를 적용하였다. 부재 중앙의 주철근과 띠철근에는 철근 변형률 게이지를 부착하였고, 부재의 중앙부의 표면에는 콘크리트 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다.

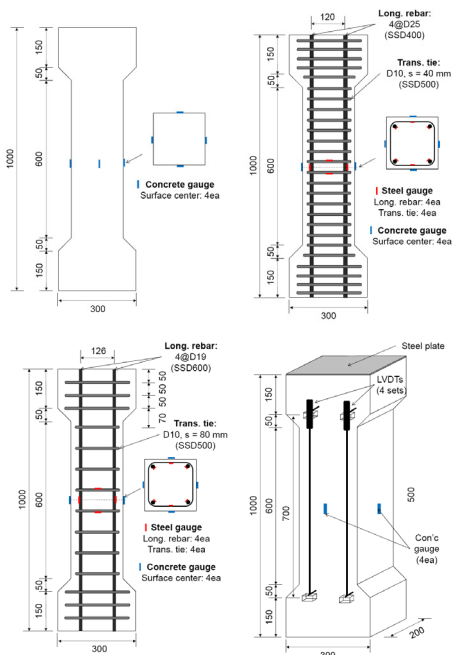


Fig. 3. Details of square column specimens

3.2 중심축하중 재하 실험 결과

180MPa급 UHPC는 전술한 바와 같이 대량의 강섬유가 투입되어, 일반적인 고강도 콘크리트와 달리 높은 인장강도를 발휘하게 된다. 이에 따라 횡보강근에 따른 연성 효과 및 내진설계 규정을 반영하기 위해서는 매우 많은 양의 띠철근을 배근해야 하고, 이는 현실적이지 못한 방법이 될 수 있다. 또한 국내 실험 장비의 여건 등을 반영하여, 본 연구에서는 압축 부재에의 적용성과 거동에 대한 초기 실험의 일환으로 하중 제어 실험을 실시하였다.

구조실험은 대우건설기술연구소에서 보유하고 있는 10MN급 하중 가력 장비를 사용하여 정적하중을 재하하였다. Fig. 4와 같이 부재의 상부에 10MN급 유압 셀이 하중을 재하하고, 부재의 하부에 위치한 로드 셀을 통해서 하중을 측정하였다. 부재의 종방향 변형을 측정하기 위해서 전후면에 각각 2개씩의 LVDT를 설치하고, 700mm 사이의 변형을 측정하였다. 실험은 하중 제어로 재하하고, 파괴 시까지 재하한 후 종료하였다.

시험체의 극한 하중 및 극한 변형률은 Table 4와 같으며, 6.0~7.5MN의 최대하중과 0.0032~0.004mm/mm의 변형률이 측정되었다. 하중-변형률 관계는 Figs. 5~6의 그래프와 같고, 파괴 형상은 Fig. 7과 같다. 최대 하중 이후에는 하중 제어의 실험 조건상 극한 하중 이후의 변

형 연화 구간은 관측하기 어려웠으며, 향후 연구에서는 변형 제어의 실험을 수행할 필요가 있다고 판단된다.

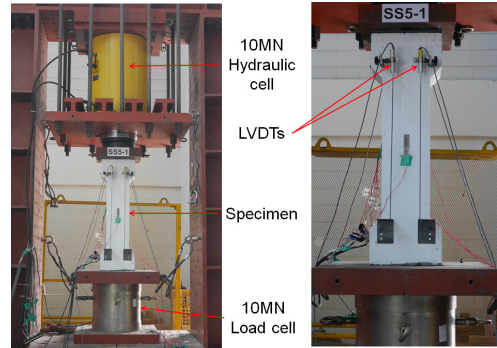


Fig. 4. Test set-up

Table 4. Test results of square columns

Specimen ID	19, 16mm fiber vf = 1.5%		13 mm fiber vf = 2.0%	
	Ultimate load (kN)	Ultimate strain (mm/mm)	Ultimate load (kN)	Ultimate strain (mm/mm)
SS1	6,220	0.0038	6,014	0.0032
SS2	7,260	0.0048	7,212	0.0043
SS3	6,787	0.0035	7,196	0.0043
SS4	7,026	0.0037	7,447	0.0037
SS5	7,111	0.0035	7,556	0.0037

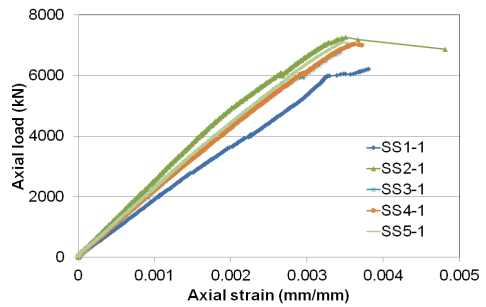


Fig. 5. Relationships between axial load and axial strain of square columns with 1.5% volume fraction mixture

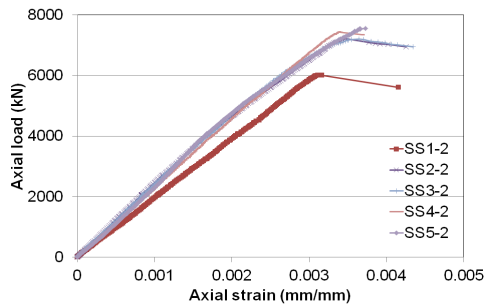


Fig. 6. Relationships between axial load and axial strain of square columns with 2% volume fraction mixture



Fig. 7. Failure patterns of square columns

4. 원형 기둥의 중심축하중 재하 실험

4.1 실험 변수 및 상세

원형 기둥 역시 실제 실험을 수행할 수 있는 장비의 규모를 고려하여 부재 단면의 면적을 $40,000\text{mm}^2$ 이내로 하고, Table 5와 같이 단면의 형상을 변수로 하여 부재를 제작하였다. 주철근은 UHPC와의 적합성을 위해 SD600급의 고강도 철근을 적용하였고, 나선철근은 SD500급의 D10철근을 사용하여 제작하였다. 나선 철근은 모든 부재에 80mm 간격으로 제작하여 조립하였다.

콘크리트는 부재의 형상을 고려하여 13mm의 강섬유를 2% 적용한 배합으로 타설하였고, 부재의 길이는 1000mm로 하였다. 또한 Fig. 8과 같이 실험 시 부재 단부의 보강을 위해 CFRP 시트를 에폭시로 부착하였는데, 응력집중을 줄이기 위해 폭 200mm의 시트를 1겹을 부착하고, 그 위에 폭 150mm의 시트를 2겹을 부착하였다.

실험은 하중 제어로 재하하고, 파괴 시까지 재하한 후 종료하였다. 부재의 전후좌우면에 길이 방향으로 변형률계이치를 부착하여 종방향 변형률을 측정하고, 원주방향으로 2개의 변형률계이치를 부착하여 횡방향 변형률 측정하였다.

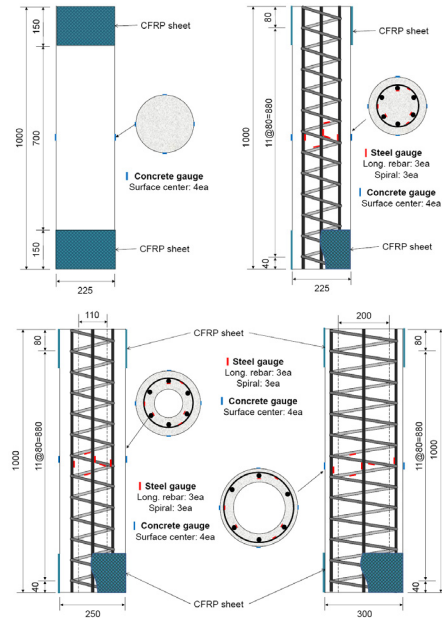


Fig. 8. Details of circular column specimens

4.2 중심축하중 재하 실험 결과

각 시험체의 극한 하중 및 극한 변형률은 Table 6과 같으며, 3.57~7.44MN의 최대하중이 측정되었고, 최대 변형률은 표면의 손상 진행에 따라 높은 변형률에서는 신뢰도가 줄었고, 따라서 향후 LVDT를 활용하여 축방향 변형률을 측정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

하중-변형률 관계는 Fig. 9와 같으며, 하중 제어의 실험 조건상 극한 하중 이후에는 급격히 하중이 감소하여 변형 연화 구간은 관측하기 어려웠으며, 향후 연구에서

Table 5. Test variables of circular columns

Specimen ID	Section				Longitudinal rebar			Transverse reinforcement				
	Outer dia.(mm)	Inner dia.(mm)	Thickness(mm)	Area (mm ²)	Dia.	Grade	ρ_l (%)	Dia	Grade	Spacing s (mm)	ρ_s (vol. %)	Spiral dia. (mm)
HC1	225	0	-	39,761	-	-	-	-	-	-	-	-
HC2	225	0	-	39,761	6-D19	SD600	4.323	D10	SD500	80	2.824	200
HC3	250	110	70	39,584	6-D19	SD600	4.343	D10	SD500	80	2.272	160
HC4	300	200	50	39,270	6-D19	SD600	4.377	D10	SD500	80	3.429	240
HC5	300	200	50	39,270	8-D19	SD600	5.837	D10	SD500	80	3.429	240

는 변형 제어의 실험을 수행할 필요가 있다고 판단된다. HC1 부재와 같이 내부 철근이 없고, 본 실험에서와 같이 하중 제어로 실험이 수행될 경우 최대 하중 이후에 매우 급작스런 파괴를 나타내었다. HC2 부재의 경우 하중이 증가하면서 부재 중앙에서 일부 균열이 발생하였으나, CFRP로 보강한 단부에서 파괴가 발생하여, 나선철근의 구속효과를 충분히 발휘하기 이전에 파괴된 것으로 판단된다.

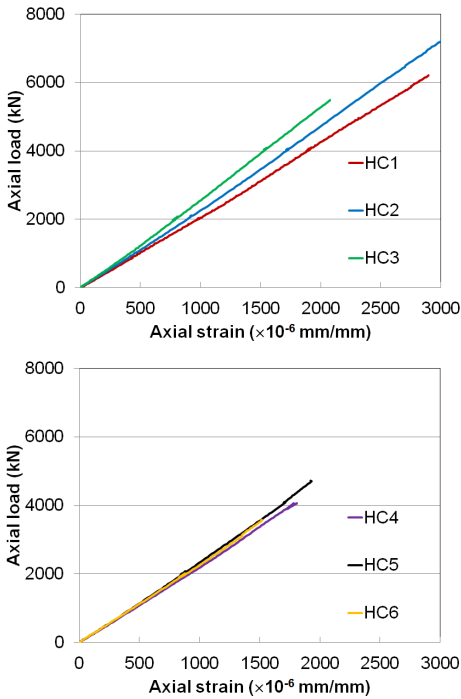


Fig. 9. Relationships between axial load and axial strain of circular columns

또한 부재 중앙의 파괴를 유도하였으나, 중공형 단면의 경우 Fig. 10과 같이 부재 상단의 편심 및 응력집중으로 인해 부재 중앙의 파괴보다는 두부에서 쪼갬 파괴의 현상이 나타났다. 특히 실제 적용한 CFRP의 양으로는 구속효과가 부족한 것으로 판단된다. 또한 파일을 UHPC 제작할 경우에, 부재 단부는 강한 충격력과 높은 하중을 부담해야 하므로 강재로 보강할 필요가 있을 것으로 판단된다. 향후 부재 상하부의 구속 조건을 보다 강화하여 부재 중앙에서의 파괴를 유도하고, 실제 압축부재의 크기를 반영할 수 있는 20MN급의 구조실험이 필요하다고 판단된다.



Fig. 10. Failure patterns of circular columns

5. 결론

본 연구에서는 180MPa급 UHPC의 배치 플랜트에서 생산하여 기둥 실험체를 제작하였으며, 중심축 하중에 대한 거동을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 180MPa급 UHPC를 배치플랜트에서 시험 생산을 하여, 적용성에 대한 평가를 수행하였고, 목표한 역학적 특성을 만족하는 것으로 나타났다.
- 2) 중실 사각 기둥에 대한 중심 축하중 재하 실험에서는 6.0~7.5MN의 최대하중과 0.0032~0.004mm/mm의 변형률이 측정되었고, 하중 제어의 실험 조건상 변형 연화 구간은 관측하기 어려웠으며, 향후 연구에서는 변위 제어의 실험을 수행할 필요가 있다고 판단된다.
- 3) 중실 및 중공 원형 기둥에 대한 중심축하중 재하 실험에서는 3.57~7.44MN의 최대하중이 측정되었고, 하중 제어 실험에 따라 변형 연화 구간은 관측하기 어려웠다.
- 4) 중공형 단면의 경우 부재 단부의 편심 및 응력 집중으로 인해 부재 중앙의 파괴보다는 두부에서 쪼갬 파괴의 현상이 나타났다.

References

- [1] B.-S. Kim, H.-K. Park, S.-Y. Park, Y.-J. Kim, W.-J. Chin, E.-S. Choi, H.-H Kim, J.-H. Kim, and W.-J. Kim, "Design and Construction of Innovative UHPC Pedestrian Cable Stayed Bridge in Korea", Proceedings of IABSE Symposium Bangkok 2009, 2009, D-document/226_07_01.pdf.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2749/222137809796088657>
- [2] AFGC Scientific and Technical Documents, Ultra High Performance Fibre- Reinforced Concretes - Interim Recommendations, 2002, French Association of Civil Engineering (Association Francaise de Genie Civil)
- [3] Droll, K., "Influence of additions on ultra high performance concretes - grain size optimization." Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2004, pp.285~301.
- [4] D.-Y. Yoo, J.-J. Park, S.-W. Kim, and Y.-S. Yoon, "Evaluating Early Age Shrinkage Behavior of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPCC) with CSA Expansive Admixture and Shrinkage Reducing Agent, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 23, No. 4, 2011, pp.441~448.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.4.441>
- [5] Empelmann, M, Teutsch, M., and Steven, G., "Load-Bearing Behaviour of Centrally Loaded UHPFRC-Column," Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008, pp.521~528.
- [6] Escobar, M., Freytag, B., Linder, J., and Sparowitz, L., "Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Beulen von dünnen Scheiben aus UHPFRC unter Druckbeanspruchung", Beton und Stahlbetonbau, Vol, 107, No 1, 2012, pp.2~14.
- [7] Voort, T.V., Suleiman, M., and Sritharan, S. Design and Performance Verification of UHPC Piles for Deep Foundations, Iowa State University, Final Report of IHRB Project TR-558, IA, 2008, United States.

민 경 환(Kyung-Hwan Min)

[정회원]



- 2007년 2월 : 고려대학교 일반대학원 구조공학 (공학석사)
- 2012년 8월 : 고려대학교 일반대학원 구조공학 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 2013년 6월 : 고려대학교부설 공학기술연구소
- 2013년 7월 ~ 현재 : 충청대학교 공학기술연구원 선임연구원

<관심분야>
콘크리트, 구조공학

최 흥 식(Hong-Sik Choi)

[정회원]



- 1983년 2월 : 연세대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1989년 8월 : 연세대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 충청대학교 토목과 교수

<관심분야>
토목구조, 구조공학