

벨라이트시멘트를 이용한 고강도콘크리트의 구조부재 성능에 관한 고찰

A Study on the Structural Members Performance of High Strength Concrete Using the Belite Cement

김동석 * 하재담 ** 김기수 *** 박춘근**** 강지훈 ***** 최 롱 *****
Kim, Dong-Seuk Ha, Jae-Dam Kim, Ki-Soo Park, Chun Keun Kang, Ji-Hun Choi, Long

ABSTRACT

Recently, the Belite cement having the high fluidity, high strength, and low heat properties, was developed, and is being promoted the efforts for application on the real structures. Accordingly, for the purpose of practical use of high strength concrete using the Belite cement, was carried out the performance evaluation experiments about the structural members(column, beam, column-beam joint, steel bond strength etc.). Specimens were made in three types of concrete(Belite:350, 600kg/cm², OPC:350kg/cm²) by taking into account the key parameters. In this paper, were summarized the comparative experimental results on the material properties and structural performance of Belite concrete.

1. 서론

최근 건설시장의 개방과 함께 SOC 사업 등 사회기반시설 확충으로 콘크리트의 사용범위가 다양해짐에 따라 건설의 기본재료인 콘크리트의 고품질화 및 고기능화에 대한 요구가 점증하고 있다. 이러한 시대적 요구에 부응하고자 사용 재료측면에서 고강도, 고유동성 및 저발열 특성을 가지는 고기능성(이하 Belite) 시멘트를 개발하였으며, 점차 이러한 고유특성을 활용한 대형 실 구조물 적용이 가시화됨에 따라 신재료의 실용화를 위한 구조성능 검증과 함께 설계반영을 위한 기초자료 확보를 위해 고강도콘크리트의 구조적 특성 규명이 필요하게 되었다.

따라서 본고에서는 Belite시멘트를 이용하여 실제 레미콘공장의 현장 Batcher Plant에서 고강도콘크리트 제조 및 제반 재료특성 평가와 아울러 이를 사용한 휨 및 전단부재, 압축부재, 보-기둥 접합부, 철근부착 등 각 단위부재별 고강도콘크리트 시험체(350, 600kg/cm²)를 제작하여 1종시멘트를 사용한 일반강도 시험체(350kg/cm²)와의 구조성능 비교실험을 산·학공동연구의 일환으로 수행하였으며, 이러한 세부과제별 연구결과를 종합적으로 고찰하여 고강도, 고유동 Belite콘크리트의 구조부재에 대한 사용성을 평가하였다.

* 정희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원

** 정희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원

*** 정희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실장

**** 정희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 시멘트연구실 책임연구원

***** 정희원, 쌍용건설(주) 기술연구소 연구원

***** 정희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소장

2. 실험개요

본 실험은 Belite 시멘트의 고유특성을 활용한 고강도콘크리트의 실용화를 위해 당사에서 수행한 재료적 특성 검증을 바탕으로 각 단위부재별 주요 실험변수를 고려하여 구조 성능검토를 산학공동연구의 일환으로 수행하였으며, 일부는 현재 진행중에 있으나 이미 검토가 완료된 결과를 중심으로 세부과제별 보고와는 별도로 시험체 제작 등 재료적 측면에서 종합 고찰하여 Belite콘크리트의 사용성을 검토하였다.

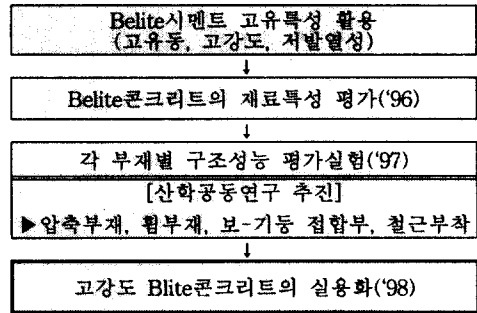


그림1. 연구 추진 Flow

3. 콘크리트 제조실험

3.1 사용재료

고성능감수제는 주성분에 따라 크게 4종류(나프타린계, 멜라민계, 폴리카본산계, 아미노 슬폰산계)로 구분되나 Belite의 구성광물과 적합성이 뛰어난 것으로 알려진 폴리카본산계의 고성능AE감수제(상품명: SP-8N, 표준형)를 사용하였으며, 골재는 레미콘 현장골재로써 굵은골재 비중이 2.59인 대전산 25mm쇄석이며, 잔골재는 비중이 2.57, 조립율이 2.49인 공주산 하천사를 사용하였다.

포틀랜드 시멘트는 Alite(C_3S)와 Belite(C_2S) 등의 규산칼슘화합물과 Aluminate상(C_3A) 및 Ferrite상(C_4AF) 등의 4가지 화합물로 구성되어 있으며, 시멘트의 강도발현성, 수화발열성, 내구성 등의 성질은 이들 시멘트를 구성하는 화합물의 양 및 성질에 의해 결정되어진다. 본실험에 사용된 Belite시멘트는 시멘트를 구성하는 화합물중 C_3A 와 C_4AF 를 최소한으로 억제하고 C_2S 의 구성비율을 증가시켜 고성능 AE감수제 사용과 함께 물시멘트비가 25~35%정도의 범위에서도 고유동성을 가지는 시멘트로써 실리카흄 등 별도의 혼합재 사용없이 장기 강도발현성이 양호하여 설계기준강도 600~800kg/cm²의 고유동·고강도콘크리트 제조가 가능하다. 또한 Belite시멘트는 C_3A 의 함량이 적기 때문에 수화발열 속도가 낮고 물시멘트비 30% 수준에서 콘크리트의 최종 단일온도상승량이 보통시멘트에 비해 약10℃ 정도 낮아 특히 고강도 매스콘크리트 구조물 등에 적용이 유리하며, 1종시멘트 대비 그 광물조성 및 물리특성을 표1.에 나타내었다.

표1. 시멘트의 광물조성 및 물리적 성질

시멘트 종류	광물 조성비(%)				비중	Blaine (cm ² /g)	용결(h:m)				압축강도(kg/cm ²)				KS수화열(Cal/g)		
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			초결	중결	3일	7일	28일	91일	7일	28일	91일		
Belite	35	46	3	9	3.20	4,250	6:45	10:00	203	263	429	635	61.5	72.1	80.8		
1종시멘트	49	23	10	9	3.15	3,240	4:30	6:50	261	323	413	516	81.3	92.8	99.1		

3.2 콘크리트 배합 및 재료특성

일반강도 시험체는 1종시멘트를 사용한 레미콘 출하제품(25-350-12)을 사용하였으며, Belite시멘트는 실험실적 시험배합을 거쳐 쌍용양회 레미콘공장의 현장 Batcher Plant에서 현장제조를 통해 레미콘 생산성 평가와 함께 Belite콘크리트 시험체(350, 600kg/cm²)를 제작하였다. 레미콘 운반 및 타설에는 약 90분이 소요되었으며, 배합조건을 표2.에 나타내었다. 시험체 제작시 각 목표강도별로 Ø10×20cm 공시체를 별도로 제작하여 시험체와 동일한 현장양생 및 표준양생조건에서 재령에 따른 물성을 측정하였고, 그 결과를 표3.에 나타내었다.

표2. 콘크리트 배합

시멘트종류	목표강도 (kg/cm ²)	W/C (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m ³)				
				시멘트	물	모래	자갈	혼화제(%)
1종시멘트	350	39.8	41.0	495	197	646	973	*0.15
Belite	350	41.8	45.0	400	167	808	995	**1.0
	600	32.4	48.0	525	170	809	883	**1.2

* Neo-mix(AE감수제)

** SP-8N(고성능 AE감수제)

표3. 콘크리트 물성

시멘트종류	목표강도 (kg/cm ²)	Slump (cm)	공기량 (%)	양생 구분	압축강도(kg/cm ²)			탄성계수 (kg/cm ²) (28일)	포아송비 (28일)
					7일	28일	56일		
1종시멘트	350	11.5	4.5	현장	257	401	-	2.21×10 ⁹	0.13
				표준	261	393	-	-	-
Belite	350	24.0	5.4	현장	181	326	347	2.27×10 ⁹	0.18
				표준	182	330	354	2.53×10 ⁹	0.17
	600	19.2	6.0	현장	345	556	603	2.99×10 ⁹	0.15
				표준	357	568	630	3.12×10 ⁹	0.14

4. 부재실험

4.1 시험체 계획 및 제작

각 구조부재별 시험체의 설계는 1종시멘트를 사용한 일반강도 시험체 대비 Belite콘크리트 구조성능 평가에 부합되는 주요 실험변수를 고려하여 각 연구 수행기관별로 실시하였으며, 시험체 제작은 이를 종합하여 산·학공동으로 쌍용양회 중앙연구소에서 1차(1종) 및 2차(Belite)로 나누어 일괄 제작하였으며, 각 시험체별 상세 및 실험변수를 종합하여 각각 표4.~표8에 나타내었다.

4.1.1 기둥 시험체

표4. 기둥 시험체(17×2EA) 상세

콘크리트 (강도)	시편 크기 (cm)	코아크기 (c) (cm)	보강근 간격(s) (cm)	보강근 간격비 (s/c)	보강근 체적비 (ρ _t %)	사용철근 (SR30)	비 고
1종 (350)	20×20×80	-	-	-	-	-	횡보강근 無
		19.7	3.2	0.16	1.82	∅6	ρ _t = 1.9%
		19.1	7.0	0.37	1.90	∅9	
		18.7	13.0	0.70	1.86	∅12	
		18.4	23.0	1.25	1.90	∅16	
Belite (600)	15×15×90	-	-	-	-	-	횡보강근 無
		14.4	4.0	0.28	1.96	∅6	ρ _t = 2.0%
		14.1	9.0	0.64	2.01	∅9	
		13.8	16.0	1.16	2.05	∅12	
		13.4	29.0	2.16	2.07	∅16	
		14.4	2.3	0.16	3.41	∅6	ρ _t = 3.4%
		14.1	5.3	0.38	3.41	∅9	
		13.8	9.5	0.69	3.45	∅12	
		13.4	17.5	1.31	3.43	∅16	
		14.1	4.0	0.28	4.51	∅9	ρ _t = 4.5%
		13.8	7.3	0.53	4.49	∅12	
		13.4	13.5	1.01	4.45	∅16	

4.1.2 휨 및 전단 시험체

표5. 휨 시험체(14EA) 상세

콘크리트 (강도)	시편크기 (b×d×L) (cm)	인장 주철근		ρ/ρ_b
		사용철근 (SD40)	철근비 (ρ)	
1종 (350)	14×21×200	2D13	0.0086	0.24
		2D16	0.0135	0.38
		2D19	0.0195	0.54
		2D22	0.0260	0.72
Belite (350)	14×21×200	2D13	0.0086	0.24
		2D16	0.0135	0.38
		2D19	0.0195	0.54
		2D22	0.0260	0.72
Belite (600)	14×21×200	2D13	0.0086	0.18
		2D16	0.0135	0.28
		2D19	0.0195	0.40
		2D22	0.0260	0.54
		2D25	0.0345	0.72

*사용 Stirrup : D10(SD40)

표6. 전단 시험체(32EA) 상세

콘크리트 (강도)	시편크기 (b×d×L) (cm)	전단 스팬비 (a/d)	전단보강비 (SD40) (%)	인장철근 (SD40)
1종 (350)	14×21×123	1.5	0, 50	2-D19 ($\rho=0.0195$)
	14×21×144	2.0	0, 50	
	14×21×165	2.5	0, 50	
	14×21×186	3.0	0, 50	
Belite (350)	14×21×123	1.5	0, 25, 50	
	14×21×144	2.0	0, 25, 50	
	14×21×165	2.5	0, 25, 50	
	14×21×186	3.0	0, 25, 50	
Belite (600)	14×21×123	1.5	0, 25, 50	
	14×21×144	2.0	0, 25, 50	
	14×21×165	2.5	0, 25, 50	
	14×21×186	3.0	0, 25, 50	

4.1.3 철근부착 시험체

표7. 보단부 시험체(16×2EA) 상세

콘크리트 (강도)	시편크기 (b×h×L) (cm)	사용 철근 (SD40)	피복 두께 (d_b)	Slump (cm)	철근 위치
1종 (350)	22×39×49	D16	1 d_b	12,18	상부근 하부근
			2 d_b	12,18	
			3 d_b	12,18	
Belite (350)	22×39×49	D16	0.5 d_b	18	상부근 하부근
			1 d_b	18	
			2 d_b	18	
			3 d_b	18	
		D19	2 d_b	18	
Belite (600)	22×39×49	D16	0.5 d_b	18	상부근 하부근
			1 d_b	18	
			2 d_b	18	
			3 d_b	18	
		D19	2 d_b	18	

표8. 이음길이 보 시험체(10×2EA) 상세

콘크리트 (강도)	시편크기 (b×h×L) (cm)	사용철근 (SD40)	피복두께 (d_b)	Slump (cm)
1종 (350)	18×25×144	D16	2 d_b	12
				18
Belite (350)	18×25×144	D16	2 d_b	0.5 d_b
				1 d_b
				2 d_b
				3 d_b
Belite (600)	18×25×144	D16	2 d_b	0.5 d_b
				1 d_b
				2 d_b
				3 d_b

4.2 평가실험

실험은 시험체별 목표강도 도달시 각 연구기관별로 보유장비를 이용하여 1차(1종 시험체) 및 2차(Belite시험체)로 나누어 구조성능 평가실험을 수행하였다. 기둥 시험체의 경우 250ton 용량의 만능시험기를 이용하여 변위제어 방식으로 각 하중단계별 실험 특성치 측정과 함께 압축 재하실험을 수행하였으며, 보실험은 휨부재(1점 재하) 및 전단부재(2점 재하)로 나누어 100ton 용량의 만능시험기에서 하중 및 변위 제어 방식으로 가력하여 시험체에 설치한 Strain Gauge, 변위계(L.V.D.T.) 및 Load Cell 등을 통해 정적 변형을 측정기(UCAM 70A)로 실험 Data를 측정하였고, 또한 각 하중단계별로 시험체 파괴유형을 비교 관찰하였다.

철근 부착성능 평가실험의 경우는 보단부 및 이음길이 보 시험체에 맞게 철골 프레임을 각각 구성하여 20ton 용량의 중공식 유압잭으로 가력하였으며, 재하단 및 자유단에 설치한 변위계 및 Strain Gauge을 통해 변형을 측정기(TDS 301)로 실험 Data를 측정하였다.

5. 실험결과 종합

5.1 압축부재 성능

일반콘크리트와 Belite콘크리트 기둥의 코아크기, 형상비, 횡방향 철근의 체적철근비 및 간격비에 따른 기둥의 거동특성을 평가하고, 또한 횡방향 철근의 각 구속변수에 따른 유효구속용력 및 구속효과 계수 산정 등 압축부재 성능에 대한 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 콘크리트 코아의 크기변화는 콘크리트 기둥의 구속효과에 거의 영향을 주지 못하며, 구속된 콘크리트의 기둥은 횡방향 철근의 체적철근비가 크고, 간격비가 작을수록 강도증가 및 유효구속용력이 크게 나타났으며, 고강도의 Belite 기둥이 보통강도의 일반 콘크리트 기둥보다 구속효과가 작았다.

(2) 고강도 Belite콘크리트 기둥에서 횡방향 철근의 체적철근비가 작은 경우 횡방향 철근의 간격비를 작게해도 구속효과가 작았으며, 가는직경의 철근을 사용할 경우에는 기대하는 구속효과를 얻을 수 없었고, 또한 간격비가 1이상일 경우는 구속효과가 매우 낮게 평가되었다.

(3) 고강도의 Belite콘크리트 기둥은 보통 콘크리트 기둥보다 극한하중 이후에 급격한 용력감소를 나타냈으며, 이는 고강도콘크리트의 특성에 기인한 것으로 극한하중 이후 기둥의 거동에서 취성파괴의 양상을 보이는 것은 체적철근비나 간격비보다는 콘크리트의 압축강도에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단되나, 고강도 Belite콘크리트 기둥에서 횡방향철근의 간격비를 줄임으로서 순간적인 취성파괴의 가능성은 적어질 것으로 판단된다.

5.2 휨 및 전단부재 성능

철근콘크리트 보의 휨 및 전단 거동에 영향을 주는 콘크리트의 압축강도, 인장 철근비, 전단보강비 및 전단스팬비를 주요 실험변수로 하여 일반 및 Belite콘크리트 보의 휨 및 전단에 대한 거동특성을 관찰하고, 또한 기존 규준에 의거한 구조성능 비교 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 일반 및 Belite콘크리트 보의 휨 및 전단에 대한 일반적 거동특성은 전반적으로 비슷한 경향을 보였으나 동일강도수준에서 Belite콘크리트 시험체가 휨에 대한 연성지수가 크게 나타나 연성능력이 다소 우수함을 보였다.

(2) 극한휨강도는 일반 콘크리트($350\text{kg}/\text{cm}^2$) 및 Belite($350, 600\text{kg}/\text{cm}^2$) 시험체 모두 ACI규준식을 상회하여 실험값/ACI식의 비가 각각 1.34, 1.27, 1.28의 평균값을 나타내었으며, 결과적으로 Belite콘크리트 부재 설계시 ACI 규준식을 그대로 적용하여도 무방할 것으로 판단된다.

(3) 전단특성의 경우 최종파괴의 주영향인자는 전단보강비보다는 전단스팬비로 나타났으며, 전단스팬비 2.5를 기준으로 2.5미만에서는 사인장 압축파괴, 2.5이상에서는 사인장 파괴가 지배적이었다.

(4) 전단내력 실험값의 규준식에 대한 비교결과 사균열 및 극한전단력을 예측하는데 Zsutty의 제안식이 가장 적합하였고, ACI 규준식은 전단스팬비 감소에 따른 전단내력 증가의 효과를 과소평가하는 반면, EURO 규준식은 전단스팬비를 고려하지 않고 있어 전단보강근의 효과를 과대평가하는 것으로 나타났다.

5.3 철근 부착성능

철근과 콘크리트의 부착강도에 대한 주 영향인자인 콘크리트의 강도, 유동성(슬럼프), 배근위치(상/하부철근), 피복두께 및 철근직경을 고려하여 1종시멘트를 사용한 일반콘크리트 대비 고강도, 고유동

Belite(350, 600kg/cm²) 콘크리트의 부착성능 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 동일강도(350kg/cm²) 수준의 Belite 와 1종시멘트를 사용한 콘크리트의 부착강도는 Belite 콘크리트가 다소 높게 나타났으며, 본 실험범위의 고강도 Belite콘크리트 구조물에서도 부착 및 정착설계시 부착강도가 $\sqrt{f_c}$ 에 비례함을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 저강도 및 고강도 Belite콘크리트의 단부시험체에서 상부근 계수는 각각 평균 1.10, 1.13으로 나타나 규준에서 제시하고 있는 상부근 계수(1.3)이하의 범위에 있었으며, 이는 Belite콘크리트의 경우 유동성은 크나 블리딩과 골재 분리현상이 적기 때문에 상부근 계수가 낮은 것으로 판단된다.

(3) 철근과 콘크리트의 부착강도 실험값은 피복두께에 대체로 선형으로 비례하며 현 ACI규준은 피복두께가 클때(3d_b) 과대평가하고, 피복두께가 적을때(0.5d_b, 1d_b)는 과소평가함을 보였으며, 또한 Orangun의 추정식보다는 Darwin의 추정식에 근접하는 것을 알 수 있었다.

(4) 일반 및 Belite콘크리트의 이음길이 보시험체에서의 경우도 보단부 시험체에서와 같은 유사한 경향을 보였다.

6. 결론

당사에서 개발한 고강도,고유동 및 저발열특성을 발휘하는 Belite시멘트의 실용화를 위해 세부과제별 산·학공동연구의 일환으로 수행한 일반 및 고강도 Belite콘크리트의 재료특성 및 구조부재별 성능평가에 대한 실험결과를 종합하면 다음과 같다.

▶ 재료특성

Belite시멘트는 구성광물의 조성비를 변화시킨 포틀랜드계 시멘트로써 고성능AE감수제 사용과 함께 물-시멘트비 25~35%, 단위수량 165~175kg/m³의 수준에서 고유동, 저발열 특성의 고강도콘크리트(600~800kg/cm²) 제조가 가능하며, 실제 레미콘공장에서 보용골재를 이용하여 목표품질의 확보가 가능함을 확인하였다.

▶ 부재성능

동일강도(350kg/cm²) 수준에서 Belite콘크리트 시험체는 1종시멘트를 사용한 콘크리트 대비 고유의 재료특성 차이에 의해 단위부재별 동등이상의 구조성능을 발휘하였으며, 또한 고강도화됨에 따라 부재의 거동특성에는 다소 차이가 있었으나 본 실험범위(600kg/cm²)에서는 콘크리트구조물에 대한 기존 시방규준의 적용도 가능할 것으로 판단되고, 따라서 향후 대형 토목 및 건축구조물 등에 많은 활용이 기대된다.

7. 참고문헌

- 1) 田中 光男 外 3人, “高ビーライト系ポルトランドセメント”, 콘크리트工學, Vol. 31, No. 9, pp. 18~27, 1993. 9.
- 2) 변근주 外 다수, “고강도, 고유동 Belite콘크리트 압축부재 성능평가 시험연구”, 쌍용 산학공동연구 보고서(연세대), 1997. 12.
- 3) 한상훈 外 다수, “고강도, 고유동 Belite콘크리트 보부재의 성능평가 시험연구”, 쌍용 산학공동연구 보고서(충북대), 1997. 12.
- 4) 최완철 外 다수, “고강도, 고유동 Belite콘크리트 철근 부착성능 성능평가 시험연구”, 쌍용 산학공동연구보고서(숭실대), 1997. 12.