

Belite시멘트를 사용한 고강도 콘크리트 기둥의 거동특성

Behaviors of High-Strength Concrete Columns made with Belite Cement

변근주* 김기수** 송하원*** 최동휴**** 김동석***** 하재담*****
Byun, Keun-Joo Kim, Gee-Soo Song, Ha-Won Choi, Dong-Hue Kim, Dong-Seok Ha, Jae-Dam

ABSTRACT

Objectives of this study is to investigate experimentally the behaviors of high strength concrete columns made with Belite cement by comparing with those of normal concrete columns. For the Belite high strength concrete columns and normal concrete columns having different core sizes, lateral reinforcement ratios and spacings, the experiment are performed and the behaviors of the columns like the confining effect are analyzed and discussed.

1. 서 론

현대의 토목 및 건축공사에서 시공되는 구조물의 용도와 규모가 갈수록 다양화되고, 대형화되는 경향을 보이면서 고층빌딩 뿐만아니라 일반구조물의 기둥부재에 고강도 콘크리트의 사용이 증가하고 있다. 고강도 콘크리트의 사용은 기둥단면의 크기를 감소할 수 있으며, 횡방향 강성을 증가시킬 수 있으므로 경제적인 측면에서 큰 이익을 가져올 수 있다. 현재 대부분의 설계코드들은 고강도 콘크리트에는 적용되지 않은 부분이 많으며, 고강도 콘크리트에 대해 정확히 이해할 수 있는 실험적인 연구가 필요시 되고 있다. 이에 따라 콘크리트의 기본재료인 시멘트의 특성을 한층 개발한 고강도, 저발열의 특수 시멘트의 개발에 많은 노력이 경주되고 있다.

본 연구의 목적은 Belite시멘트를 사용하여 제작된 고강도 콘크리트 기둥모형의 실험을 통하여 횡방향철근으로 구속된 고강도 콘크리트 기둥의 거동특성을 실험적으로 규명하고, 보통 포틀랜드 시멘트로 제작된 보통 콘크리트 기둥의 실험으로 부터 얻어진 거동특성과 비교·분석하는데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 콘크리트 코아크기, 횡방향철근의 간격비 및 체적철근비를 변수로 하여 Belite 고강도 콘크리트 기둥과 보통강도의 일반 콘크리트 기둥모형을 제작하여 축하중재하실험을 수행하였으며, 구속철근의 구속효과 및 파괴거동을 분석하였다.

- * 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수
- ** 정희원, 쌍용중앙연구소 건설재료연구실 책임연구원
- *** 정희원, 연세대학교 토목공학과 부교수
- **** 정희원, 연세대학교 토목공학과 석사
- ***** 정호원, 쌍용중앙연구소 건설재료연구실 선임연구원
- ***** 정희원, 쌍용중앙연구소 시멘트콘크리트연구실 선임연구원

2. 콘크리트의 제조 및 실험

본 연구에서 사용된 Belite시멘트는 시멘트의 구성광물중 C₂S의 함량을 높여 고유동, 저발열특성을 갖고, 장기강도가 우수하여 고성능콘크리트로서 적합한 재료로 알려져 있으며, 일본에서는 고강도, 저발열 콘크리트용으로 사용되어왔다.¹⁾

2.1 사용재료

본 연구에서 일반 콘크리트 및 Belite 콘크리트 기둥모형의 제작을 위하여 타설된 콘크리트의 기본 물성치는 다음과 같다.

2.1.1 시멘트

시멘트는 국내 S사 제품의 1종 보통포틀랜드시멘트와 Belite시멘트를 사용하였으며, 물성치는 표 1과 같다.

표1. 시멘트의 물리적 성질

Cement	Specific Gravity	Blaine (cm ² /g)	44 μ m on Residue (%)	Congelation Time		W/C (%)	Flow (%)	Comp. Strength(kg/cm ²)		
				Initial	Final			3 day	7 day	28day
Belite	3.20	4,250	5.5	6:45	10:00	48.5	110.5	203	263	429
OPC (type I)	3.15	3,240	12.5	3:40	6:20	48.5	101.8	261	323	413

2.1.2 골재

잔골재는 비중 2.57, 흡수율 1.5%, 조립율 2.49인 모래를 사용하였으며, 굵은골재는 비중 2.59, 흡수율 1.2, 조립율 7.64인 25mm쇄석을 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 표 2와 같다.

표2. 골재의 물리적 성질

Aggregate	Specific Gravity	Absorption (%)	Unit Weight (kg/m ³)	Percentage of Solids (%)	F.M
Coarse Aggre.	2.59	1.2	1529	59	7.64
Fine Aggre.	2.57	1.5	1627	-	2.49

2.1.3 혼화제

Belite 콘크리트에 사용된 혼화제는 KMB사의 고성능 AE감수제인 SP-8N을 사용하였으며, 일반 콘크리트는 Neomix를 사용하였다.

2.1.4 콘크리트 배합

Belite 콘크리트 및 일반 콘크리트는 목표강도 600kg/cm², 350kg/cm²로 배합설계되었으나, 표준공시체에 의한 압축시험결과 압축용력이 각각 450kg/cm², 320kg/cm²이었다.

표3. 콘크리트 배합표

Mix Design	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kg/m ³)				
				W	C	s	G	a(%)
Belite	30.9	48.0	5.4	170	550	799	873	1.2
OPC	39.8	41.0	4.5 \pm 1.5	197	495	646	973	4.95

2.2 실험

2.2.1 실험모형의 제작

배합설계된 일반 콘크리트와 Belite 콘크리트를 사용하여 그림 1과 같이 횡방향철근으로 구속된 콘크리트 기둥의 거동을 평가하기 위하여 사각형단면의 기둥모형을 제작하였다. 거푸집은 목재거푸집을 사용하였으며, 횡방향철근의 구속효과는 실질적으로 콘크리트 덮개의 파괴후 발휘되므로 덮개없이 기둥을 제작하였다. 횡방향철근은 부착을 무시하기 위하여 항복강도 3000 kg/cm², 직경이 $\phi 6, \phi 9, \phi 12, \phi 16$ 인 원형철근을 사용하였으며, 사각형의 모양으로 절

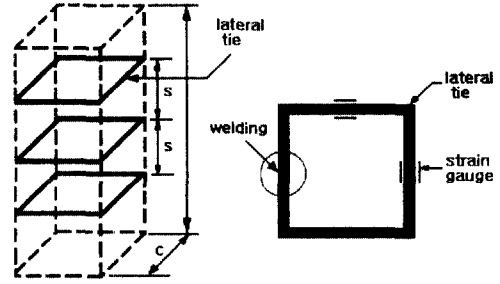


그림1. 모형의 제작도

곡한 후 중간부분은 횡방향철근에 의한 최대구속효과를 얻기위해 용접하였다. 또한 만능시험기의 용량을 고려하고, 횡방향의 구속만을 엄밀하게 관찰하기 위하여 종방향철근은 생략하였다. 한편 횡방향철근의 구속능력을 측정하기 위하여 모형 중앙부에 위치한 횡방향철근 중앙부의 내부와 외부에 두 쌍씩의 변형률게이지를 부착하였다. 그림 1에서 c는 콘크리트 코어의 크기, s는 횡방향철근의 간격이다.

본 연구의 모형제작의 변수는 콘크리트 압축강도, 시멘트의 종류, 횡방향철근의 체적철근비 ρ_v 및 간격비s/c이다. 본 연구를 위해 설계된 모형의 설계상세는 표 4와 같다.

표4. 실험모형의 설계상세

Set	Specimen No.	Concrete	Specimen Size (cm)	Core Size (c) (cm)	Tie Spacing (s) (cm)	Spacing Ratio (s/c)	Volume Reinforcement Ratio (ρ_v)(%)	Lateral Reinforcement	Remark
a	1	OPC	20×20×80	19.4	3.2	0.16	1.82	$\phi 6$	$\rho_v = 1.9\%$
	2		20×20×80	19.1	7	0.37	1.90	$\phi 9$	
	3		20×20×80	18.7	13	0.70	1.86	$\phi 12$	
	4		20×20×80	18.4	23	1.25	1.90	$\phi 16$	
	A		20×20×80	-	-	-	0.00	no lateral reinforcement	
b	5	Belite Cement	15×15×90	14.4	4	0.28	1.96	$\phi 6$	$\rho_v = 2.0\%$
	6		15×15×90	14.1	9	0.64	2.01	$\phi 9$	
	7		15×15×90	13.8	16	1.16	2.05	$\phi 12$	
	8		15×15×90	13.4	29	2.16	2.07	$\phi 16$	
c	9	Belite Cement	15×15×90	14.4	2.3	0.16	3.41	$\phi 6$	$\rho_v = 3.4\%$
	10		15×15×90	14.1	5.3	0.38	3.41	$\phi 9$	
	11		15×15×90	13.8	9.5	0.69	3.45	$\phi 12$	
	12		15×15×90	13.4	17.5	1.31	3.43	$\phi 16$	
d	13	Belite Cement	15×15×90	14.1	4	0.28	4.51	$\phi 9$	$\rho_v = 4.5\%$
	14		15×15×90	13.8	7.3	0.53	4.49	$\phi 12$	
	15		15×15×90	13.4	13.5	1.01	4.45	$\phi 16$	
	B		15×15×90	-	-	-	0.00	no lateral reinforcement	

2.2.2 실험방법

제작된 기둥모형을 그림 2와 같이 250ton 만능시험기에 거치시킨후 변위제어를 통한 압축실험을 실시하였다. 만능시험기에 의하여 측정된 하중-처짐 관계로부터 각 모형에 대한 응력-변형률 관계를 측정하였으며, 동시에 횡방향철근의 변형률이 정적변형률 측정기에 의하여 측정하였다. 횡방향철근의 구속에 의한 콘크리트의 유효구속응력은 기둥모형의 최대강도에서의 철근의 변형률값으로 측정되었으며, 구속되지 않은 무근 콘크리트 기둥을 포함하여 횡방향철근의 체적철근비 및 간격비 변화가 다른 각 기둥이 파괴에 이를 때 까지의 압축응력 및 변형률이 측정되었다.

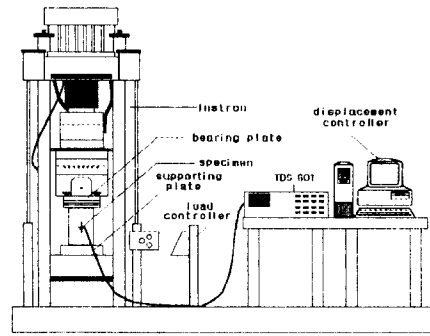


그림2. 모형의 압축재하실험 과정

3. 실험결과 및 분석

표 5는 실험결과로서 표에서 σ_{cc} 는 구속된 콘크리트의 최대응력, ϵ_{cc} 는 최대응력에서의 변형률이고, σ_v 는 유효구속응력으로서 횡방향철근의 구속응력을 재하방향의 콘크리트 응력으로 환산된 값이며, $\sigma_{v,lim}$ 는 횡방향철근이 항복상태에 도달할 때의 최대유효구속응력이다. 이때, α 는 구속효과계수로서 $\sigma_{v,lim}$ 에 대한 σ_v 의 비로 정의한다.²⁾ 또한 각 기둥set에 대한 실험결과는 그림 3과 같다.

표5. 구속된 콘크리트 기둥모형의 압축실험결과

Set	Specimen No.	ρ_v (%)	s/c	σ_{cc} (kg/cm ²)	Strength Gain(kg/cm ²)	ϵ_{cc}	$\sigma_{v,lim}$ (kg/cm ²)	σ_v (kg/cm ²)	α
a	1	1.9	0.16	332	89	0.0050	27.3	9.2	0.34
	2		0.37	335	92	0.0046	28.5	11.3	0.40
	3		0.70	332	89	0.0042	27.9	9.3	0.33
	4		1.25	326	83	0.0038	28.5	3.7	0.13
	A	0.0	-	243	-	0.0028	-	-	-
b	5	2.0	0.28	505	127	0.0039	29.4	3.7	0.13
	6		0.64	540	162	0.0035	30.2	3.6	0.12
	7		1.16	487	109	0.0032	30.8	4.1	0.14
	8		2.16	428	50	0.0029	31.1	2.9	0.10
c	9	3.4	0.16	594	216	0.0043	50.2	11.3	0.22
	10		0.38	562	184	0.0039	50.2	7.1	0.14
	11		0.69	549	171	0.0041	51.8	5.7	0.11
	12		1.31	535	157	0.0037	51.5	2.2	0.04
d	13	4.5	0.28	659	281	0.0042	67.7	15.6	0.23
	14		0.53	551	173	0.0045	67.4	12.8	0.19
	15		1.01	549	171	0.0031	66.8	10.1	0.15
B	0.0	-	387	-	0.0027	-	-	-	

그림 3은 각 시편의 응력-변형률 관계를 나타내었으며, 모형실험 set a는 일반 콘크리트로 제작된 체적철근비 1.90%, 간격비가 각각 0.16, 0.37, 0.70, 1.25인 기둥으로서 Set a에서 횡방향철근으로 구속되

지 않은 콘크리트 기둥A의 최대응력은 243kg/cm²이며, 그림 3의 (a)에서 보듯이 간격비가 가장 큰 모형 4의 강도증가량이 약간 작게 나타났으나, 대체적으로 비슷한 강도증가를 보였다. 최대하중에서의 변형률은 간격비가 작을수록 큰 변형률값을 나타냈다. 최대하중 이후의 거동은 체적철근비가 클에 따라 완만한 하중감소를 나타냈다. Set b, c, d와 같은 크기의 구속되지 않은 콘크리트 기둥B의 최대응력은 387kg/cm²이며, 그림 3의 (b)는 Belite 콘크리트로 제작된 모형으로서 체적철근비가 2.0%이며, 간격비가 각각 0.28, 0.64, 1.16, 2.16인 Set b의 응력-변형률 관계를 나타내었다. 간격비의 감소에 따라 강도증가가 큰 값을 보였으나, 간격비가 모형 6보다 작은 모형 5의 최대응력이 모형 6의 최대응력보다 작게 나타난 것은 모형 1에서와 마찬가지로 체적철근비가 작을 경우 $\phi 6$ 의 가능직경의 철근을 사용하면 간격비가 작더라도 충분한 구속효과를 얻지 못함으로 판단된다. 최대하중 이후의 파괴는 고강도인 set b, c, d가 급격한 응력감소를 나타내고 있으며, 이는 콘크리트의 강도가 고강도이기 때문으로 판단된다.³⁾ 그림 3의 (c)는 체적철근비 3.4%, 간격비가 각각 0.16, 0.38, 0.69, 1.31인 Set c의 응력-변형률 관계이다. Set c의 경우도 간격비의 감소에 따라 강도증가의 크기가 매우 크게 나타났다. 특히 간격비가 매우 큰 모형 12의 경우 최대하중 이후의 거동이 급격한 취성을 나타냈다. 그림 3의 (d)는 체적철근비 4.5%이며, 간격비가 각각 0.28, 0.53, 1.01인 Set d의 응력-변형률 곡선이다. 체적철근비가 큰 경우, 강도증가가 가장 크게 나타났으며, 간격비의 변화에 따른 강도증가의 폭이 크게 나타났다. 간격비가 큰 모형 14, 15의 최대하중 이후의 거동은 매우 순간적인 취성파괴를 나타냈다. 이는 큰 체적철근비임에도 불구하고 취성파괴를 보이는 것은 최대하중 이후의 거동은 콘크리트의 최대응력에 더 많은 영향을 받을 수 있었다.⁴⁾

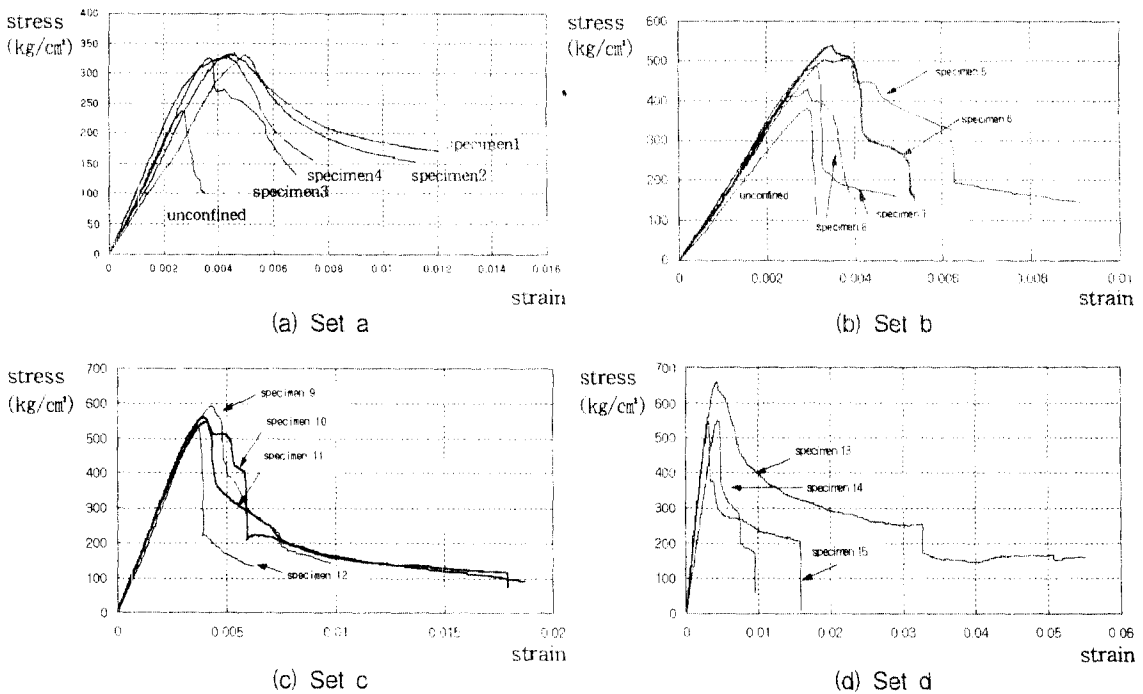


그림3. 각 모형의 응력-변형률 관계

그림 4는 Set a와 b의 간격비와 강도증가의 관계를 나타낸 것으로 Set b는 Set a와 비슷한 체적철근비를 가졌으나, 고강도인 set b는 간격비 증가에 의한 강도감소가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

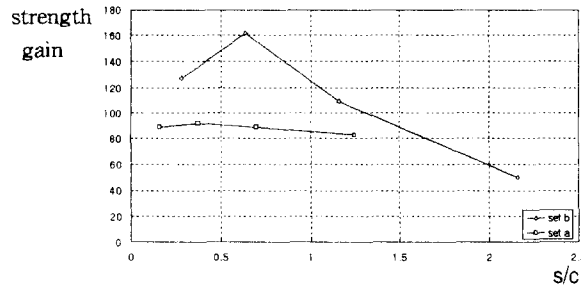


그림4. Set a와 b의 강도증가와 간격비의 관계

그림 5는 본 연구에서 나타난 모든 모형의 유효구속응력 σ_c 와 간격비의 관계를 나타낸 그림이다. 체적철근비가 크고, 간격비가 작을수록 유효구속응력이 크게 나타났으나, 체적철근비가 작은 Set b는 간격비 변화에 따른 유효구속응력의 변화가 거의 나타나지 않았다. 그림 6은 구속효과계수 α 와 간격비의 관계를 나타내며, Set a가 Set b에 비하여 구속효과계수가 큰 값이며, 또한 간격비가 1이상에서는 구속효과계수가 0.15미만으로 매우 낮은 값이었다. Set b, c, d의 Belite 콘크리트 기둥모형들은 체적철근비에 관계없이 구속효과계수의 변동이 작음을 알 수 있다.

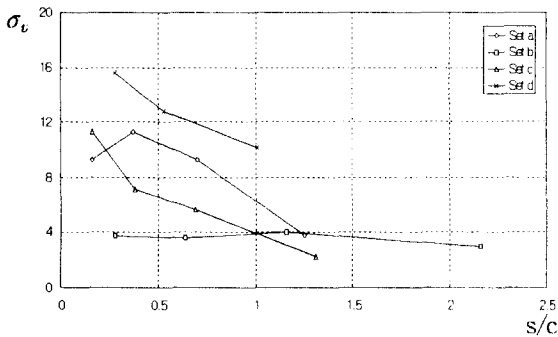


그림5. 유효구속응력과 간격비의 관계

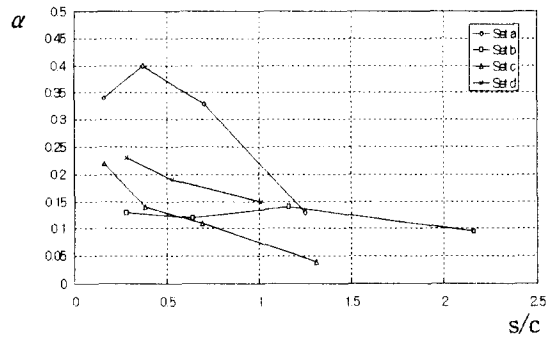


그림6. 구속효과계수와 간격비의 관계

4. 결론

일반 콘크리트와 Belite 콘크리트를 이용한 구속된 콘크리트 기둥모형에 대한 거동분석을 위한 연구를 수행한 결론은 다음과 같다.

- (1) 구속된 콘크리트의 기둥은 횡방향철근의 체적철근비가 크고, 간격비가 작을수록 강도증가 및 유효 구속응력이 크게 나타났으며, 고강도의 Belite 콘크리트 기둥모형이 보통강도의 일반 콘크리트 기둥보다 구속효과가 작았다.
- (2) 고강도 Belite 콘크리트 기둥에서 횡방향철근의 체적철근비가 작은 경우 횡방향철근의 간격비를 작게 해도 구속효과가 작았으며, 가는직경의 철근을 사용할 경우에는 기대하는 구속효과를 얻을 수 없었다. 또한 간격비가 1이상일 경우는 구속효과가 매우 낮게 평가되었다.

- (3) 고강도의 Belite 콘크리트 기둥은 보통 콘크리트 기둥보다 최대하중 이후에 급격한 응력감소를 나타냈으며, 상대적으로 체적철근비가 4.5%로 높은 모형에서도 간격비가 0.5이상일 경우는 최대하중과 동시에 순간적인 취성파괴의 양상을 보였다. 최대하중 이후의 기둥의 거동에서 취성파괴의 양상을 보이는 것은 체적철근비나 간격비보다는 콘크리트의 압축강도에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단되며, 고강도의 Belite 콘크리트 기둥모형에서 횡방향철근의 간격비를 줄임으로서 순간적인 취성파괴의 가능성은 적어질 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 쌍용중앙연구소, "고성능 Belite시멘트 개발 및 실용화 연구", 1996.
2. Pallewatta, T. M., Irawan, P. and Maekawa, K., "Confinement Effectiveness of Lateral Reinforcement Arrangements in Core Concrete", Concrete Library of ISCE, No. 27, 1996, pp. 197~223.
3. Sheikh, S. A., Shah, D. V. and Houry, S. S., "Confinement of High-Strength Concrete Columns", ACI Structural Journal, Vol 91, No. 1, 1994, pp. 100~111.
4. Cusson, D., Larrard, F., Boulay, C. and Paultre, P., "Strain Localization in Confined High-Strength Concrete Columns", ASCE Structural Engineering, Vol 122, No. 9, 1996, pp. 1055~1061.