

고강도, 고유동 Belite 콘크리트의 부착성능

Bond Strength of Reinforcing Steel to High Strength, High Flow Belite Concrete

김 상 준^{*} 조 필 규^{*} 이 세 응^{**} 최 완 철^{***}
Kim, Sang-Jun Cho, Pil-Kyu Lee, Sae-Ung Choi, Oan-Chul

Abstract

Bond strength of reinforcing bar to high-performance concrete using belite cement is explored using beam end test specimen. The key parameters for the bond test are slump of concrete, top bar effect, and strength of concrete in addition to concrete covers.

Specimen failed in the typical brittle bond failure splitting the concrete cover as the wedging action. The test results show that the specimens with belite cement concrete show higher bond strength than those with portland cement concrete. Bond strength of the top bar is less than bond strength of bottom bar, but the top bar factor satisfies the modification factor for top reinforcement. The results also show that the bond strength is function of the square root of concrete compressive strength and cover thickness. The recently developed high-strength and high-slump concrete with belite cement performs well in terms of bond strength to reinforcing steel.

1. 서론

최근 건설시장의 개방과 더불어 건축, 토목 분야의 기술이 꾸준히 발전되고 있다. 합리적이며 경제적인 구조시스템의 개발과 함께 이에 상응하여 콘크리트 구조재료의 성능에 대한 요구도 다양화, 고급화되고 있다. 고유동, 고강도의 콘크리트 특성을 얻기 위하여 시멘트에 플라이애쉬, 슬래그, 실리카폼 등 혼합재 첨가를 시도하고 있지만 시멘트 이외에 다른 재료를 혼합사용하는 데에 따른 설비, 품질관리 및 시공상의 부담이 가중되고 있는 실정이다.

최근 S사가 개발한 Belite시멘트는 시멘트를 형성하는 구성광물 자체의 함량을 조절하여 제조한 시멘트로서 실리카폼, 플라이애쉬, 슬래그 등 혼합재의 사용이 필요없어 품질관리가 용이하고 안정된 포틀란트계 시멘트이다. Belite 시멘트는 C_3S 에 비해 C_2S 의 함량을 많게 함으로서 고유동, 저발열, 고강도 특성이 발현되어 고성능 콘크리트로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 구조재로서 Belite 시멘트 개발에 따라 철근 콘크리트 구조의 기본 특성중의 하나인 철근과 콘크리트 사이의 부착특성을 평가하고자 한다. 부착에 대한 주요 영향요인인 콘크리트의 강도(압축, 인장), 유동성(슬럼프), 배근위치(상/하부철근) 등 재료관련 성능의 변수로 부착강도를 측정한다.

* 숭실대학교 대학원 석사과정

** 쌍용건설 기술연구소, 소장

*** 정회원, 숭실대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

콘크리트의 고성능에 따른 부착강도의 영향을 1종 포틀랜드 시멘트의 실험결과와 비교 평가한다. 보다 상세한 연구결과는 참고문헌 (1)에 기술되어 있다.

2. 부착실험

본 연구는 크게 3가지 그룹으로 나누어 각각 그룹에 대해서 보단부시험체 및 이음길이 보시험체의 2종류를 만들어 실험하고자 한다.

- 1그룹 : 1종 포틀랜드 시멘트를 이용한 보통강도의 시험체
- 2그룹 : 1종 포틀랜드 시멘트와 같은 강도조건인 Belite 시멘트를 이용한 시험체
- 3그룹 : Belite 시멘트를 이용한 고강도 시험체

2.1 실험계획 및 재료

본 연구에서는 철근 콘크리트 보의 응력분포와 동일하며 그 크기를 줄이고 보다 많은 데이터를 얻을 수 있는 보단부 부착시험체를 사용하였다(3). 보단부 시험체의 크기는 단면의 폭이 22cm, 높이가 39cm, 길이는 49cm이다. 재하되는 철근은 D16, D19의 2가지 종류를 사용하였고, 철근의 위치에 따른 부착강도의 변화를 관찰하기 위하여 상/하부 철근을 배치하였다. 또한 콘크리트의 활열강도에 직접적인 관계가 있는 콘크리트의 피복두께는 0.5, 1, 2, 3d_b로 계획하였다. 정착길이는 ACI 318-95 표준과 기존의 연구에 의하여 D16 및 D19 철근에서 각각 8cm 및 10cm로 계획하였다.

보단부 부착시험체의 결과를 확인하기 위하여 최소개수의 이음길이 부착시험체를 제작하였다. 이음길이 보시험체는 단면치수 18×25cm, 인장철근 2-D16, 압축철근 2-D10, 길이 2.4m의 장방형 복근보로 제작되었고, 피복두께는 보단부 시험체와 같이 0.5, 1, 2, 3d_b로 계획하였다. 인장철근의 이음길이는 ACI 318-95 규준에 의한 값의 약 1/2인 16cm가 되도록 계획하였다.

본 실험에서 사용한 1종 포틀랜드 시멘트계 콘크리트 설계강도는 350 kg/cm², Belite 시멘트 콘크리트의 설계강도는 350kg/cm²과 600kg/cm²로 설계된 레미콘제품을 사용하였다. 콘크리트의 배합비와 재령별 강도측정 결과는 표 2-1, 2-2와 같다(2).

표 2-1 콘크리트 배합비

Cement Type	Design Str. (kg/cm ²)	Air Content (%)	W/C Ratio (%)	S/A (%)	Unit Weight(kg/m ³)				
					Water	Cement	Sand	Aggr.	Admixture (%)
Type 1 Portland Cement	350	4.5	39.8	41.0	197	495	646	973	*0.15
Belite Cement	350	5.4	41.8	45.0	167	400	808	995	**1.0
	600	6.0	32.4	48.0	170	525	809	883	**1.2

* 사용혼화제 종류 : Neomix (AE 감수제)

** SP-8N (KMB사 고성능 AE 감수제)

표 2-2 재령별 콘크리트 강도 (kg/cm²)

Cement Type	Curing Type	Slump (cm)	*Test Type	4 days	7 days	11 days	14 days	17 days	28 days	56 days		
Type 1 Portland Cement (350kg/cm ³)	Field Curing	11.5	Comp. Str.	210	257	283	346	362	401	-		
			Elastic Mod.	-	2.06×10 ⁹	-	-	-	2.21×10 ⁹	-		
			Tens. Str.	-	23	-	-	30	34	-		
		19	Comp. Str.	193	266	280	312	314	398	-		
			Elastic Mod.	-	2.03×10 ⁹	-	-	-	2.15×10 ⁹	-		
			Tens. Str.	-	24	-	-	29	35	-		
	Moist Curing	11.5	Comp. Str.	-	261	-	-	-	393	-		
			Tens. Str.	-	-	-	-	-	34	-		
		19	Comp. Str.	-	253	-	-	-	384	-		
			Tens. Str.	-	-	-	-	-	33	-		
		Belite Cement (350kg/cm ³)	Field Curing	24	Comp. Str.	119	181	-	209	-	326	347
					Elastic Mod.	-	-	-	-	-	2.27×10 ⁹	-
Tens. Str.	-				-	-	-	-	23.9	-		
Moist Curing	24		Comp. Str.	-	182	-	-	-	330	354		
			Elastic Mod.	-	-	-	-	-	2.53×10 ⁹	-		
			Tens. Str.	-	-	-	-	-	27.1	-		
Belite Cement (600kg/cm ³)	Field Curing	19.2	Comp. Str.	256	345	-	421	-	556	603		
			Elastic Mod.	-	-	-	-	-	2.99×10 ⁹	-		
			Tens. Str.	-	-	-	-	-	33.4	-		
	Moist Curing	19.2	Comp. Str.	-	357	-	-	-	568	630		
			Elastic Mod.	-	-	-	-	-	3.12×10 ⁹	-		
			Tens. Str.	-	-	-	-	-	38.2	-		

2.2 시험체 제작

보단부 시험체는 길이 110cm의 D16 및 D19의 이형철근을 시험체의 상/하부 각각에 설치하고 D10의 수평보강근을 상/하부 양쪽 모서리에 설치하였다. 상/하부 각각의 철근에는 정착길이를 정확하게 유지하기 위하여 상/하부 철근 양단부에 PVC 파이프를 삽입하였다.

이음길이 보시험체는 상부근 2-D10과 하부근 2-D16을 사용하여, 하부근에서만 중앙부에서 양쪽으로 각 8cm씩 전체 이음길이가 16cm가 되도록 하였고, 이음이 끝나는 곳에 strain gauge를 철근 하부에 각각 1개씩 붙여 최단부의 응력상태를 측정하고자 하였다. 전단보강근은 보 중앙에서 양쪽으로 50cm 되는 구간을 제외하고 나머지 구간에서 D10 @100간격으로 배근 하였다.

2.3 실험 결과

보단부 시험체 및 이음길이 보시험체에서의 각각 시험체별 부착강도 실험결과는 참고문헌 1에 기술되어 있다.

3. 부착강도 평가

3.1 Belite 시멘트와 포틀랜드 시멘트 콘크리트 부착강도 비교

개발된 Belite시멘트를 사용한 콘크리트 부착강도를 평가하기 위하여 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 부착강도를 비교한다. Belite시멘트, 포틀랜드 시멘트를 사용한 각각의 콘크리트 압축강도 350kg/cm²의 실험결과를 비교한다. 부착실험시의 재령 71일을 고려하여 압축강도를 375kg/cm²를 추정하고 압축강도 증가량을 재령 56일에 표준화하여 수정하면 그림 3-1와 같이 나타난다. 부착강도 표준화는 부착강도가 $\sqrt{f_c}$ 에 비례한다고 가정하고 부착강도에 $\sqrt{350}/\sqrt{375}$ 를 곱하여 얻는다. 그림 3-1에서 보듯이

Belite 시멘트 콘크리트의 부착강도는 동일한 설계강도의 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 부착강도에 비해 대체로 높게 나타나고 있다. 부착강도가 철근과 콘크리트 계면의 시멘트 매트릭스 치밀성에 크게 영향을 받는다. Belite 시멘트가 장기 재령에 따라 C_2S 의 조성으로부터 더욱 치밀한 콘크리트를 생성시킴으로 보여지고 있다.

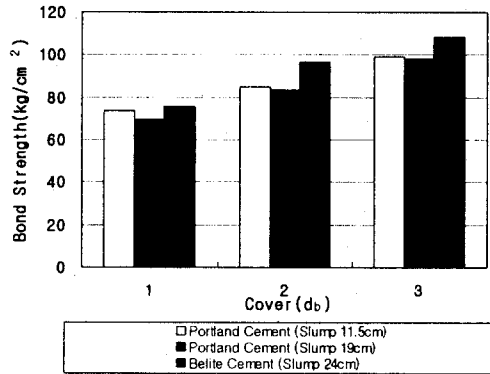


그림 3-1 Belite와 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 부착강도 비교

3.2 콘크리트 압축강도와 인장강도

부착파괴는 주로 콘크리트의 할열인장파괴로서 부착강도는 콘크리트의 할열인장강도에 비례하는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 기존의 연구결과에 따르면 부착파괴는 콘크리트의 할열인장파괴에 기인하게 되며, 따라서 부착력은 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있다(4).

그림 3-2은 콘크리트 압축강도의 제곱근에 대한 부착강도의 비(압축강도 375kg/cm^2 을 기준으로 하였을 때)를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보듯이 Belite 시멘트 콘크리트는 대체로 기존 이론인 부착강도가 $\sqrt{f'_c}$ 에 비례하고 있음을 보여주고 있다. 압축강도 650kg/cm^2 정도의 고강도 Belite 콘크리트 구조물에서 구조설계시 부착강도가 $\sqrt{f'_c}$ 에 비례함을 적용할 수 있겠다.

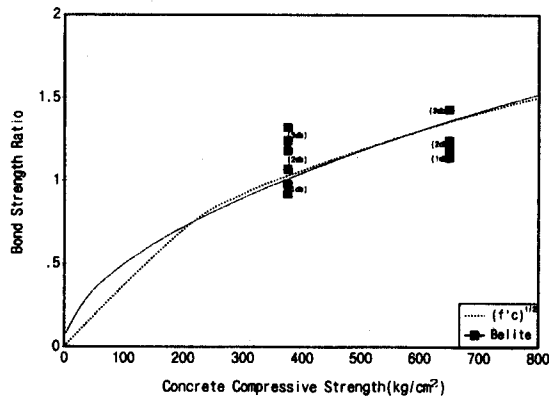


그림 3-2 콘크리트의 압축강도에 대한 부착강도비

3.3 슬럼프 및 상단근계수

콘크리트는 그 시공성의 확보를 위하여 일정 슬럼프치를 유지하여야 한다. 높은 슬럼프치는 시공성의 확보라는 측면에서 유리하나 깊은 단면을 갖는 일반적인 구조체의 경우에는 골재분리현상과 불리딩에 의해 상부 콘크리트의 강도 약화로 인한 상/하부 콘크리트의 강도 차이를 유발하게 되어 구조적으로 불리한 측면을 가지게 된다. 그래서 현 기준에서는 정착길이 설계시 상부근계수 1.3의 할증계수를 제시하고 있다.

기존 연구에 따르면 보통강도의 콘크리트의 경우에 철근의 위치에 따른 부착강도 변화가 콘크리트의 슬럼프와 밀접한 관계를 갖으며 슬럼프 증가에 따라 부착강도가 감소하는 것으로 알려져 있다.(5) 본 연구에서는 이러한 상/하부 콘크리트의 강도차에 의한 부착강도의 영향을 고려하기 위하여 상/하단근에 대한 부착강도의 차이를 시험하였으며 그 결과는 표 3-1과 같다.

표 3-1 철근의 위치별 부착강도

Cement Type	Cover (mm)	Conc. Str. (kg/cm ²)	Slump (cm)	Ult. Bond Force(ton)		Bot./Top
				Top	Bot.	
Type 1 Portland Cement	16	355	11.5	3.85	4.41	1.14
	32			4.64	5.09	1.1
	48			5.21	5.96	1.14
	16	313	19	3.99	4.17	1.05
	32			4.62	4.99	1.08
	48			4.89	5.88	1.20
Belite Cement	8	375	24	3.49	4.41	1.26
	16			4.66	4.71	1.01
	32			5.66	5.99	1.06
	48			6.25	6.72	1.08
	8	650	19.2	3.95	5.19	1.31
	16			5.26	5.81	1.10
	32			5.79	6.10	1.05
	48			7.02	7.27	1.04

그림 3-3은 슬럼프에 따른 하/상단근 부착강도비를 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 보듯이 Belite 콘크리트에서 슬럼프가 24cm와 19.2cm인 경우 상단근 부착강도비는 각각 평균 1.10, 1.13으로 나타나고 있다. Belite 시멘트를 이용한 각각의 높은 슬럼프를 가지는 시험체에 대해서 상단근 계수는 ACI 기준인 상부근 보정계수 1.3 이내의 값을 모두 만족하고 있다는 것을 알 수 있다. 이같은 원인은 유동화제에 의하여 콘크리트의 점성이 높아졌으며 Belite 시멘트의 경우 슬럼프가 높더라도 시멘트 매트릭스가 치밀하여져서 부착손상을 억제하는 것으로 판단된다.

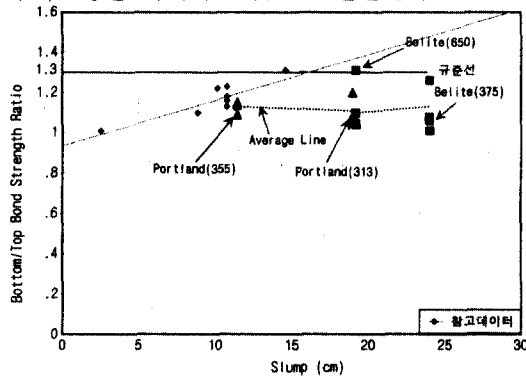


그림 3-3 슬럼프에 따른 하/상단근의 부착강도비

3.4 횡구속 효과

부착할열파괴는 이형철근의 마디에 의해 콘크리트가 썩기 작용에 의해 파단될 때 발생하며 횡구속력이 커질수록 부착파괴가 억제되고 부착강도가 증가한다. 횡구속 효과의 하나인 피복두께의 변화에 따른 철근과 콘크리트 사이의 부착강도의 변화를 관찰하기 위하여 1종 포틀랜드시멘트 및 Belite시멘트에서는 철근의 직경과 관계하여 1~3d_b로 피복두께를 변화시켜 그 결과를 관찰하였다. 시멘트 종류와 관계없이 다소 강도차이를 보이지만 전체적으로 피복두께가 증가할수록 부착강도가 증가하는 비례관계에 있었다.

그림 3-4은 각각의 시험체에 대해서 측정된 피복두께에 따른 부착강도를 Orangun의 식, Zsutty의 식, ACI318-95 기준식의 이론적인 부착강도와 비교한 그래프이며 여기서 모든 이론식이 0.5d_b, 1d_b에서 현행규준을 너무 과소평가 되고 있다는 것을 알 수 있다.

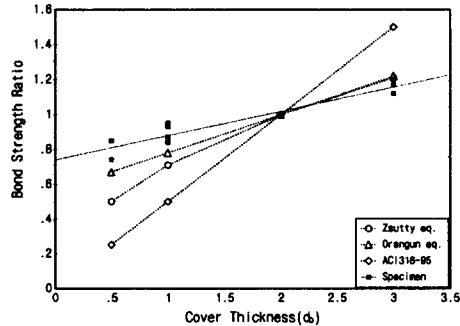


그림 3-4 피복두께에 따른 부착강도비

4. 기존 추정식과 비교

부착강도에 관한 추정식은 그 동안 많은 연구가 수행되었고 각 변수에 따른 실험결과로부터 통계처리되어 제시되었다. Orangun Jirsa and Breen (6)에 의해 이형철근의 겹침이음강도의 계산을 위하여 횡보강이 없는 보의 시험결과로부터 제시된 식은

$$U = (1.2 + \frac{3C}{d_b} + \frac{50d_b}{l_b}) \times \sqrt{f_c'} \quad (1)$$

이며, 여기서 U : 철근의 부착강도 (psi)

C : 콘크리트 최소피복두께 (in)

하중으로 변환하면

$$A_b f_s = (3 \pi l_d (C + 0.4d_b) + 200A_b) \sqrt{f_c'} \quad (2)$$

가 된다

David Darwin et al.(7)에 의해 정착과 이음강도의 좀더 정확한 표현을 위해 다음식이 제시되었다.

$$\frac{A_b f_s}{\sqrt{f_c'}} = 6.67 l_d (C + 0.5d_b) (0.92 + 0.08 \frac{C_{max}}{C_{min}}) + 300 A_b \quad (3)$$

여기서, C : 측면 피복(C_s)과 피복두께(C_b)중 작은 피복

C_{max}, C_{min} : C_s 와 C_b 중 큰값과 작은값

정착과 이음길이 철근직경, 콘크리트 강도, 피복두께, 철근간격의 작용으로 정착과 이음강도의 정확한 표현을 하기 위한 식을 세운 결과 횡보강없는 철근에 대한 ACI318-89의 부착과 정착의 규준의 사용에 대한 단순화된 기준을 세우고 평가하기 위한 식의 사용성에 대하여 목적을 두었다.

이음길이 보시험체에서 부착강도는 전체 이음길이에 대해 평균 부착응력으로 구할 수 있다. 즉, 전체 이음길이에 대해서 철근의 정착력을 철근의 표면적으로 나눈값을 말한다. 따라서

$$T = f_s A_s = U \times \pi d_b \times l_s \quad (4)$$

이며 이때 $U = \frac{f_s d_b}{4l_s}$ 로 나타낼 수 있다.

본 연구에서 실험결과와 추정식의 부착강도 비교는 표 4-1와 같다. 그림 4-1, 그림 4-2는 1종 포틀랜드 시멘트 및 Belite 시멘트를 이용한 이음길이 보시험체의 경우에 압축강도에 대한 철근과 콘크리트 사이의 부착강도를 Orangun의 식, Darwin의 식의 이론적인 부착강도와 비교한 그래프이다. 그림에서 보듯이 실험결과 부착강도는 추정식보다 다소 높게 나타나고 있으며 경향은 대체로 일치되고 있다. Darwin식이 실험값에 근접하며 이는 최소, 최대 피복두께를 모두 고려한 결과로 추정된다.

표 4-1 이음길이 보시험체 실험결과와 추정식의 부착강도

Cement Type	Bar Size	Conc. Str. (kg/cm ²)	Cover (db)	P (ton)	M ₀ (t·m)	f _s (t/cm ²)	Ult. Bond Force (ton)	Orangun (ton)	Darwin (ton)
Portland Cement	D16	355	2	4.56	2.34	3.27	6.51	4.21	4.68
		313		4.44	2.28	3.19	6.35	3.95	4.41
Belite Cement	360	360	0.5	4.26	2.19	2.67	5.31	3.10	4.00
			1	4.55	2.34	3.01	5.98	3.70	4.34
			2	4.79	2.46	3.44	6.85	4.24	4.73
			3	4.58	2.35	3.30	6.57	4.24	4.82
	603	603	0.5	5.24	2.18	2.66	5.29	4.01	5.18
			1	5.93	3.03	3.90	7.76	4.79	5.62
			2	6.10	3.11	4.35	8.66	5.49	6.12
			3	5.05	2.59	3.64	7.24	5.49	6.24

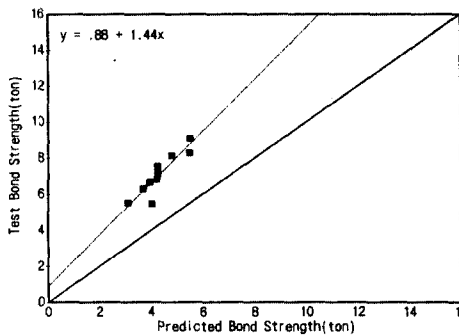


그림 4-1 Orangun추정식과 실험치와 비교

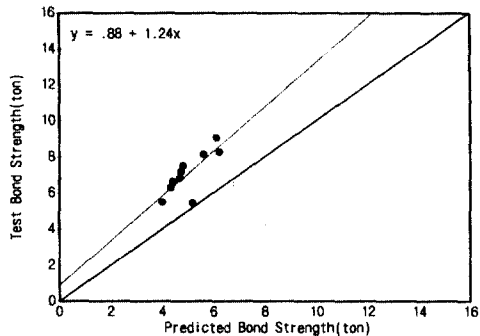


그림 4-2 Darwin추정식과 실험치와 비교

5. 결론

개발된 Belite 시멘트를 사용한 콘크리트와 철근의 부착성능을 연구한 결과, 주요 결론은 다음과 같다.

1. Belite 시멘트와 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 각각의 콘크리트 압축강도 350kg/cm²의 실험 결과 Belite 콘크리트의 부착강도가 다소 높게 나타났다.

2. 압축강도 650kg/cm²의 고강도 Belite 콘크리트 구조물에서 부착설계시 부착강도가 $\sqrt{f'_c}$ 에 비례함을 적용할 수 있겠다.
3. Belite 시멘트 콘크리트의 상부근 부착시험체에서 부착강도는 적게 손상 받았고, 압축강도 375kg/cm² 슬럼프 24cm와 압축강도 650kg/cm² 슬럼프 19.2cm 시험체에서 상부근 계수는 각각 평균 1.10, 1.13으로 나타났으며 규준에서 제시하고 있는 상부근 계수(1.3)이하의 범위에 있었다.
4. Belite 콘크리트 높은 슬럼프로 유동성이 컸으나 상부근 계수가 낮은 것으로 나타나 블리이딩이나 골재분리가 적은 것으로 보여진다.
5. 부착강도는 피복두께에 대체로 선형으로 비례하며 현 ACI규준은 피복두께가 클때(3d_b) 과대평가, 피복두께가 적을때(0.5d_b, 1d_b)는 과소평가함을 보이고 있다.
6. Belite 시멘트 콘크리트의 이음길이 보시험체에서 부착강도는 기존 예측식의 값보다 다소 높게 나타나며 보단부시험체에서와 유사한 경향의 결과를 보였다.
7. 개발된 Belite 시멘트 콘크리트는 고유동, 고강도 콘크리트로 부착성능이 만족되며 활용성이 높다고 하겠다.

● 참 고 문 헌 ●

1. 최완철 외 “고강도, 고유동 Belite콘크리트 부착성능 평가시험”, 숭실대학교 생산기술연구소, 1998. 2. 14, page 62
2. 문한영, 문대중, 하상욱, 김기수, “벨라이트시멘트를 사용한 콘크리트의 강도특성에 대한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 가을학술발표, 1997, pp. 61-64
3. 조필규, 김상준, 강지훈, 김영식, 최완철, “Belite 시멘트를 이용한 고성능 콘크리트의 철근부착성능 실험연구,” 한국콘크리트학회 가을학술발표, 1997, pp. 408-415
4. 홍건호, “고강도 콘크리트의 부착강도 특성을 고려한 이형철근의 정착에 관한 연구,” 서울대학교 건축학과 박사학위논문, 1996
5. Choi et al., “Bond Strength of Epoxy Coated Reinforcing Steel: Cover, Casting Position, Slump and Consolidation”, ACI Structural Journal, Jan.-Feb., 1994, pp. 59-68
6. Darwin, D., McCabe, S. L., Idun, E. K., and Schoenekase, S. P., “Development Length Criteria: Bars Not Confined by Transverse Reinforcement,” ACI Structural Journal, V.89, No.6, Nov.-Dec. 1992, pp. 709-720
7. Orangun, C.O., Jirsa, J.O., and Breen, J.E., “A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices,” ACI Journal, Vol.74, No.3, Mar., 1977, pp. 114-122