

Belite시멘트를 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 실험연구

An Experimental Study on the Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Beams with Belite Cement

한 상 훈* 구 봉 근* 김 기 수** 윤 상 문*** 조 홍 동**** 전 체 만*****
Han, Sang Hoon Koo, Bong Kuen Kim, Gee Soo Youn, Sang Moon Cho, Hong Dong Jun, Chea Man

ABSTRACT

Objective of this study is to investigate experimentally the flexural behavior of reinforced high-strength concrete beams with Belite cement by comparing with those of normal reinforced concrete beams. The flexural tests are conducted on fourteen specimens having concrete compressive strength of 350 and 600kg/cm². The main experimental variables are compressive strength of concrete and reinforcement ratios. The load-displacement relationships, the section behavior of beam as a function of the location neutral axis, and ductility capacity are investigated. From the test results, the flexural behavior of reinforced high-strength concrete beams with Belite cement are similar to the behavior of normal reinforced concrete beams.

1. 서 론

최근 급격한 경제 성장과 건설 시장의 개방, 그리고 대규모 건설사업의 증가 등으로 인해 건설 기초 재료인 시멘트의 수요가 연간 5,000만톤 이상에 달하고 있다. 이러한 추세는 콘크리트의 고강도화, 고유동화, 고내구성화에 관한 연구를 촉진시켰으며, 최근들어 고강도·고유동 콘크리트에 관한 연구가 관심 있게 등장하는 것으로 보아, 앞으로 고강도·고유동 콘크리트의 수요가 급증할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 보통 포틀랜드 시멘트와 성분이 같으면서도 규산2석회(C₂S)의 함량은 높으나, 혼화제의 첨가 없이 유사한 성능과 저발열, 고유동 그리고 고강도의 특성을 발휘하는 Belite 시멘트를 콘크리트 보에 적용하여 휨 거동 양상을 관찰하였다. 기존 규준에 의거한 성능평가, 하중 단계별 콘크리트와 철근의 응력 분포 및 변화 양상 평가, 그리고 Belite 시멘트를 휨부재에 사용할 때 안전성에 큰 영향을 미치는 연성에 대한 평가를 하였으며, 비교를 위하여 1종 보통 포틀랜드 시멘트로 기준 시험체를 제작하여 선행 실험을 실시하였다.

2. 실험개요 및 방법

2.1 사용재료 및 배합설계

본 연구에 사용한 시멘트는 S사가 개발한 저발열, 고유동 및 고강도를 발휘하는 Belite 시멘트와 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며 그 물리적 성질은 표 1.과 같다. 골재는 레미콘 공장에서 사용 중인 현장골재를 사용하였고, 그 물리적 성질은 표 2.와 같다. 콘크리트 제조는 기준 시험체의 경우 S사의 레미콘 출하제품을 사용하였고, Belite 시멘트 시험체는 레미콘 공장의 현장 batch plant에서 생산된 Belite 콘크리트를 사용하였다. 배합조건은 표 3.과 같다.

* 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수
** 정희원, 쌍용양회(주) 중앙연구소 콘크리트연구실장
*** 정희원, 쌍용건설(주) 기술연구소 주임연구원
**** 정희원, 충북대학교 토목공학과 박사과정수료
***** 충북대학교 토목공학과 석사과정

표 1. 시멘트의 물리적 성질

구 분	비 중	Blaine (cm ² /g)	44 μm 잔사(%)	응결 시간		W/C (%)	flow (%)	압축강도(kg/cm ²)		
				초결(h:m)	종결(h:m)			3일	7일	28일
1종시멘트	3.15	3,240	12.5	3:40	6:20	48.5	101.8	261	323	413
Belite	3.20	4,250	5.5	6:45	10:00	48.5	110.5	203	263	429

표 2. 골재의 물리적 성질

구 분	비 중	흡수율 (%)	단위중량 (kg/m ³)	실적율 (%)	조립율
굵은골재	2.59	1.2	1529	59	7.64
잔 골 재	2.57	1.5	1627	-	2.49

표 3. 콘크리트 배합

구 분	목표 강도	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/cm ³)				
				시멘트	물	모래	자갈	혼화제
1종	350	39.8	41.0	495	197	646	973	0.15*
	350	32.4	48.0	525	170	809	995	1.0**
Belite	600	41.8	45.0	400	167	808	883	1.2**

* Neo-mix (AE 감수제) ** SP-8N (고성능 AE 감수제)

2.2 시험체의 상세

본 실험에서는 콘크리트 강도와 주인장철근 비를 변수로 고려하여 시험체를 제작하였으며 그림 1에 그 형상과 치수를 나타내었다. 시험체의 재령은 28일을 기준으로 노천습윤양생하였다. 시험체의 상세한 제원은 표 4와 같다.

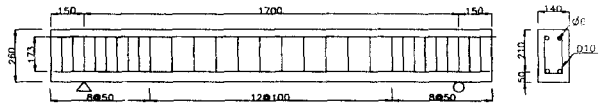


그림 1. 시험체의 형상 및 치수 (단위 : mm)

표 4. 휨 시험체 제원

시험체명	σ_{ck} (kg/cm ²)	주인장철근		전단 철근	균형철근비 ρ_b	ρ/ρ_b	비 고
		사용철근	철근비(ρ)				
CM-N1	350	2D13	0.0086	D10	0.036	0.24	C : 기준 시험체 B : Belite 시험체 M : 휨 시험체 N : 보통강도(350kg/cm ²) H : 고강도 (600kg/cm ²) 1 : 2D13 2 : 2D16 3 : 2D19 4 : 2D22 5 : 2D25
CM-N2		2D16	0.0135			0.38	
CM-N3		2D19	0.0195			0.54	
CM-N4		2D22	0.0260			0.72	
BM-N1	350	2D13	0.0086	D10	0.036	0.24	
BM-N2		2D16	0.0135			0.38	
BM-N3		2D19	0.0195			0.54	
BM-N4		2D22	0.0260			0.72	
BM-N5		2D25	0.0345			0.96	
BM-H1	600	2D13	0.0086	D10	0.048	0.18	
BM-H2		2D16	0.0135			0.28	
BM-H3		2D19	0.0195			0.40	
BM-H4		2D22	0.0260			0.54	
BM-H5		2D25	0.0345			0.72	

2.3 실험 방법

제작한 시험체는 100톤 UTM을 이용하여 최대하중의 50%까지 하중제어 방식으로, 그 이후는 변위 제어 방식으로 3점 재하를 실시하였다. 하중 측정은 로드셀을 이용하였으며, 변위계를 중앙점과 양 지점으로부터 35cm떨어진 위치에 설치하여 변위를 측정하였고, 콘크리트 표면과 인장철근에는 스트레인 게이지를 붙여서 변형률을 측정하였다. 위의 모든 측정값들은 데이터 로거를 이용하여 기록하였다.

3. 실험 결과 및 분석

고강도·고유동 Belite 콘크리트를 사용한 본 실험의 경우, 전반적인 휨 거동은 1종 콘크리트의 휨 거동 특성과 비슷한 경향을 보였다. 본 실험에서 최대내력시의 압축연의 변형률은 파괴 형태에 따라 압축연에서 변형률 게이지가 손상되어 측정이 불가능한 경우가 있었으므로, 가능한 한도 내에서 결과치를 기술하였다. 본 실험에 대한 실험 결과는 표 5와 같다.

표 5. 실험 결과 일람표

시험체명	초기균열 발생시			철근항복시			최대내력시			균열간격		파괴형태
	하중 (ton)	중량 변위 (mm)	압축 변형률 (μ)	하중 (ton)	중량 변위 (mm)	압축 변형률 (μ)	하중 (ton)	중량 변위 (mm)	압축 변형률 (μ)	최대 (cm)	평균 (cm)	
CM-N1	1.75	2.36	316	5.02	7.61	1182	7.27	38.18	-	22.0	12.3	휨 파괴
CM-N2	2.25	1.04	361	8.24	5.23	1495	9.75	17.04	2394	13.0	9.5	휨 파괴
CM-N3	2.20	0.74	301	11.08	6.82	1599	12.19	12.44	2687	15.4	11.4	휨 파괴
CM-N4	2.05	0.99	326	16.57	8.51	1640	16.57	8.51	-	14.3	8.1	휨 압축 파괴
BM-N1	1.68	1.11	275	4.06	4.21	974	6.94	26.14	-	16.5	9.4	휨 파괴
BM-N2	1.66	1.09	290	7.09	5.08	1375	8.52	16.77	-	15.5	7.4	휨 파괴
BM-N3	1.75	0.76	286	10.64	5.97	1544	12.47	18.12	-	16.2	8.6	압축 파괴
BM-N4	1.77	1.03	292	14.84	8.88	2820	15.79	12.17	-	16.9	7.8	휨 압축 파괴
BM-N5	1.74	0.79	273	-	-	-	17.09	9.05	-	20.0	10.9	폭발적 압축 파괴
BM-H1	1.56	1.14	172	4.61	3.51	715	7.48	29.61	-	17.5	10.4	휨 파괴
BM-H2	1.54	0.48	170	7.78	4.64	942	10.09	25.65	-	13.5	9.0	압축 파괴
BM-H3	1.50	0.61	155	11.62	6.31	-	12.71	15.17	-	18.5	10.0	압축 파괴
BM-H4	1.61	0.44	168	14.13	6.73	-	15.99	12.18	-	12.3	10.9	폭발적 압축 파괴
BM-H5	1.47	0.60	140	-	-	-	18.28	12.16	-	23.0	13.3	폭발적 압축 파괴

3.1 하중-처짐 관계

그림 2는 시험체의 하중-처짐 관계를 CM-N, BM-N 그리고, BM-H 계열 시험체별로 구분하여 나타낸 것이다. 본 연구에서 고강도·고유동 Belite 콘크리트를 사용한 시험체의 전반적인 하중-처짐 관계는 보통 강도 콘크리트 시험체의 휨 거동에서 나타나는 하중-처짐 관계 특성과 비슷한 경향을 보였다. 즉, 인장 철근비가 증가할수록 휨 내력은 증가하였지만 최대내력 도달 직후 급격한 압축 파괴가 발생하여 처짐은 작게 나타났다. 그림 2. (a)와 (b)를 비교해 보면, 철근보강이 $\rho=0.24\rho_b$, $0.38\rho_b$, $0.54\rho_b$ 인 시험체는 공통적으로 최대하중 이후 완만한 하강곡선을 보였으나, $\rho=0.72\rho_b$, $0.96\rho_b$ (단, 철근보강 $\rho=0.96\rho_b$ 은 BM-N5 시험체의 경우임)인 시험체는 급격한 하강곡선을 보였다. 철근 항복 이후 연성구간의 길이는 동일한 철근비(ρ/ρ_b)일 경우 BM-N 계열이 CM-N 계열 시험체에 비해 상대적으로 길게 나타났고, BM-N과 BM-H 계열 시험체의 경우는 동일한 철근비일 때 콘크리트 강도가 높은 BM-H 계열 시험체가 철근 항복이후 처짐 구간은 짧고, 강성은 높게 나타났다.

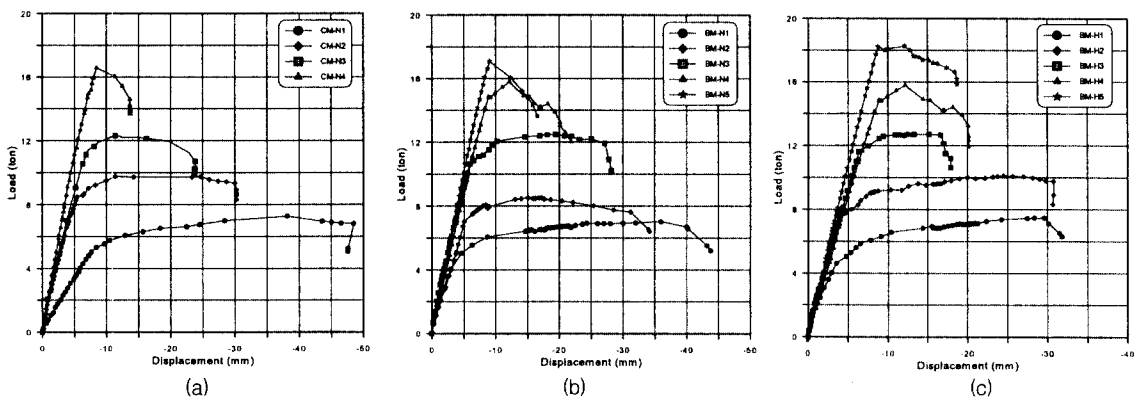


그림 2. 각 시험체의 계열별 하중-처짐 관계

3.2 변형률 분포 및 중립축의 이동

각 계열별 시험체의 변형률 분포는 공통적으로 철근항복 이전까지 거의 선형적인 증가를 하므로 콘

크리트의 압축응력 분포가 거의 삼각형에 가까운 선형적인 분포를 보였다. BM-N과 BM-H 계열의 경우 동일한 철근비일 때 철근 항복시의 압축연 콘크리트 변형률 분포는 BM-H 계열 시험체가 더욱 급한 기울기를 보였다. 이는 '고강도일수록 응력-변형률 곡선은 보통강도 콘크리트에 비해 초기에 매우 가파른 상향곡선을 나타낸다.'는 일반적인 고강도 콘크리트 압축강도 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 사료된다. 각 시험체의 중립축 이동 상황은 그림 3.에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 계열별로 철근비가 작은 시험체일수록 중립축 상승속도가 빠르고 상승 높이가 크게 나타났다. BM-H와 BM-N 계열 시험체를 비교해 보면, 동일한 철근비일 경우, 콘크리트의 압축강도가 높을수록 중립축이 더 상승하는 경향을 알 수 있었다.

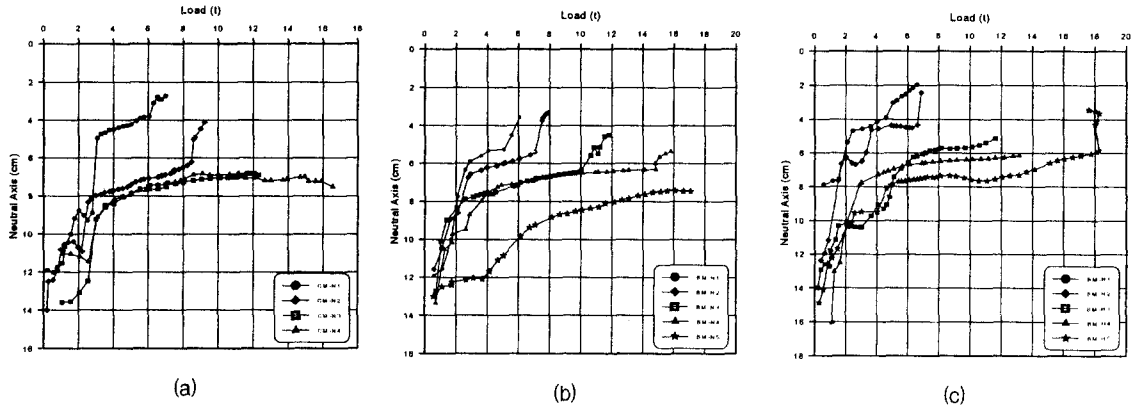


그림 3. 각 계열별 시험체의 중립축의 이동 (상단 기준)

3.3 연성 거동

일반적으로 부재의 연성은 처짐에 의해 가장 잘 표현되므로, 연성 평가를 위해 ACI-363의 처짐연성에 관한 식 (1)²⁾과 최대하중의 80%에 해당하는 부재의 처짐을 고려한 식 (2)³⁾를 사용하였다. 평가 결과는 표 6.과 같다.

표 6. 연성 평가 및 휨강도에 대한 규준식과의 비교 결과

(EXP. : 실험값 ACI : ACI 규준식 값 AVE. : 평균값)

시험체명	σ_{ck} (kg/cm ²)	ρ/ρ_b	Δ_y	Δ_{cu}	Δ_l	μ_{cu}	μ_l	M_n (t · m)		EXP. /ACI.	AVE.	P_{max} (ton)
								ACI	EXP.			
CM-N1	350	0.24	7.61	38.10	48.46	5.00	6.37	2.021	3.094	1.531	1.344	7.28
CM-N2		0.38	5.23	17.04	31.00	3.26	5.90	3.072	4.148	1.350		9.76
CM-N3		0.54	6.82	12.44	23.71	1.82	3.50	4.263	5.181	1.215		12.19
CM-N4		0.72	8.51	8.51	13.85	1.00	2.60	5.498	7.042	1.281		16.57
BM-N1	350	0.24	4.21	26.14	43.24	6.21	10.27	1.996	2.949	1.478	1.274	6.94
BM-N2		0.38	5.08	16.77	34.01	3.30	6.69	3.011	3.621	1.203		8.52
BM-N3		0.54	5.97	18.12	28.18	3.04	4.27	4.136	5.299	1.281		12.47
BM-N4		0.72	8.88	12.17	20.14	1.37	2.27	5.267	6.711	1.274		15.79
BM-N5		0.96	9.05	9.05	16.58	1	1.83	6.394	7.263	1.136		17.09
BM-H1	600	0.18	3.51	29.61	32.80	8.44	9.34	2.051	3.179	1.549	1.276	7.48
BM-H2		0.28	4.64	25.65	31.25	5.53	6.73	3.146	4.288	1.363		10.09
BM-H3		0.40	6.31	15.17	17.87	2.40	2.83	4.416	5.402	1.223		12.71
BM-H4		0.54	6.73	12.18	20.24	1.81	3.01	5.778	6.796	1.176		15.99
BM-H5		0.72	12.16	12.16	19.62	1	1.61	7.271	7.679	1.068		18.28

$$\mu_{cu} = \Delta_{cu} / \Delta_y \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\mu_f = \Delta_f / \Delta_y \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, μ_{cu} = Δ_{cu} 에 의한 연성 지수 μ_f 에 의한 연성 지수
 Δ_y = 보 중앙부 인장철근 항복 시의 처짐 Δ_{cu} = 파괴시의 처짐
 Δ_f = 최대 하중 이후 최대 하중의 80%에서의 처짐

본 연구에서는 연성에 영향을 미치는 주요 요인 중 콘크리트의 강도와 주철근비만을 고려하여 연성을 평가하였다. 철근 콘크리트 보의 연성에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 철근비와 연성지수의 관계는 그림 4와 5에 나타내었다.

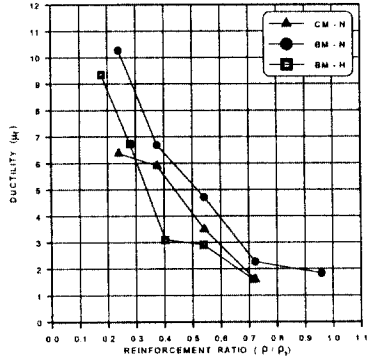
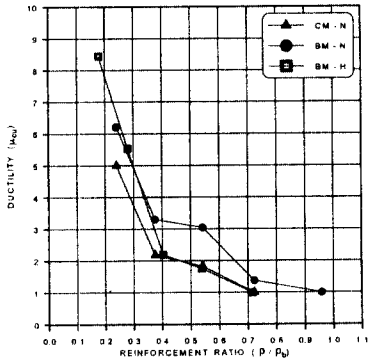


그림 4. 철근비에 따른 연성관계 (μ_{cu}) 그림 5. 철근비에 따른 연성관계 (μ_f)

BM-N 계열의 연성지수는 CM-N 계열에 비해 μ_{cu} 의 경우 약 32%, μ_f 의 경우 약 37%의 증가를 보여 연성능력에 있어 BM-N 계열이 우수한 것으로 나타났다. 콘크리트 압축강도에 따른 각 부재의 연성을 비교하면, BM-N과 BM-H 계열 시험체의 경우 동일한 철근비일 때, 콘크리트 강도가 높은 BM-H 계열의 연성이 작게 나타났으며, 이는 콘크리트 압축강도가 클수록 평형철근비(ρ_b)가 커지기 때문으로 사료되며 일반적인 고강도 콘크리트 실험과 같은 경향을 나타내고 있다⁵⁾. 본 실험을 통하여 철근콘크리트 보의 최대 철근비 기준($\rho_{max} = 0.75 \rho_b$)을 검토한 결과, 연성지수 μ_f 를 철근 콘크리트 휨부재의 안전을 위해 최소한 3이상 확보하도록 설계하기 위해서는 CM-N 계열의 경우 최대 철근비 기준을 $\rho_{max} = 0.58 \rho_b$ 이하로 하고, BM-N 계열의 경우 최대 철근비 기준을 $\rho_{max} = 0.65 \rho_b$ 이하로 하며, BM-H 계열의 경우는 $\rho_{max} = 0.53 \rho_b$ 이하로 규정하는 것이 타당하다고 판단된다.

실험결과, μ_{cu} 와 μ_f 모두, 각 계열별로 철근비가 증가함에 따라 연성지수가 감소하는 공통된 경향을 보여주고 있다. 철근비가 $\rho = 0.75 \rho_b$ 이상인 BM-N 계열의 시험체는 연성지수의 변화가 거의 없어, 과보강 이후 인장철근비의 증가는 부재의 연성에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 이는 기존의 일반 고강도 콘크리트의 실험에서 나타난 경향과 일치하는 것이다⁴⁾.

3.4 휨강도 및 최대하중 비교분석

본 연구에서는 공칭 휨강도 M_n 에 대해 실험값과 국내 기준식(ACI와 공통)에 의해 구한 값을 비교 분석하였으며, 그 결과는 표 6과 같다. 본 실험결과, 시험체 모두 실험값이 ACI 기준식 값보다 크게 나타났다. CM-N, BM-N, BM-H 계열의 실험값에 대한 ACI 기준식의 비가 각각, 1.344, 1.274, 1.276의 평균값을 나타냈으며, 각 계열별로 철근비(ρ/ρ_b)가 증가함에 따라 실험값에 대한 ACI 기준식의 비가 감소하는 공통된 경향을 보였다. 그림 6.은 결과를 도시적으로 나타낸 것이다.

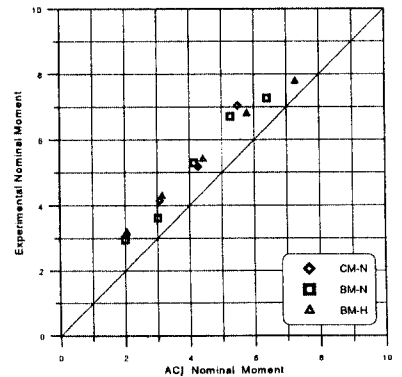


그림 6. 실험값과 ACI 기준식과의 비교

4. 결 론

- (1) 고강도, 고유동 Belite 콘크리트를 사용한 본 실험의 경우, 전반적으로 1종 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 휨 거동 특성과 비슷한 경향을 보였다.
- (2) BM-N 계열은 CM-N 계열에 비해 연성지수가 다소 크게 나타나 연성능력이 우수함을 보였다.
- (3) 철근 콘크리트 휨부재의 안전을 위해 연성지수 3이상을 확보하기 위해서는 기존 시방서의 최대철근비규준을 CM-N 계열의 경우 $\rho_{max}=0.58\rho_b$ 이하로 하고, BM-N 계열의 경우 $\rho_{max}=0.65\rho_b$ 이하로 하며, BM-H 계열의 경우는 $\rho_{max}=0.53\rho_b$ 이하로 규정하는 것이 타당하리라 판단된다.
- (4) 시험체 모두 실험에 의한 공칭 휨강도 값이 ACI 규준식에 의한 값보다 크게 나타났으며, CM-N 계열, BM-N 계열, BM-H 계열의 실험값에 대한 ACI 규준식의 비가 각각, 1.344, 1.274, 1.276의 평균값을 나타냈다. 따라서, Belite 콘크리트 부재의 설계시 ACI 규준식을 그대로 적용하여도 무리가 없음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 대한건축학회, “고강도-고성능 콘크리트 제조·시공 및 설계”, 1996, pp. 191~192.
- 2) ACI Committee 363, “State-of-the-Art Report on High Strength Concrete”, Proc., ACI Journal Vol.81, No.4, July-August, 1984, pp. 364~411.
- 3) Shin S.W., Ghosh, S.K., and Moreno, J., “Flexural Ductility of Ultra-High-Strength Concrete Members”, ACI Journal, July-August, 1989, pp. 394~400.
- 4) 신성우, 유석형, 안종문, 이광수, “고강도 철근 콘크리트 보의 휨 설계 및 연성능력”, 한국콘크리트학회논문집, 제8권, 6호, 1996, 12, pp. 141~149.
- 5) 박태규, 박기철, 정헌수, “高強度 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 휨舉動에 관한 實驗的 研究”, 大韓建築學會學術發表論文集, 제10권, 제2호, 1990년 10월, pp. 501~504.