

세그멘탈 합성보의 휨 실험

Flexural Tests on Post-Tensioned Segmental Composite Beam

김인규^{*} 설동재^{**} 유승룡^{***}
Kim, In Gyu Seol, Dong Jae Yu, Sung Yong

ABSTRACT

The interior portion of Gerber's beam are constructed with post-tensioned segmental composite beams in this study. A precast concrete member which is larger than the limits of domestic transportation regulation in weight, length, and volume is divided into three parts, transported separately, and erected with a composite member by post-tensioning in site. Static flexural loading tests are performed on Gerber's type frames which are consisted with 2.5m overhangs and 5m interior beams composited from three pieces. The connection of overhang to interior composite beam and beam to beam, and flexural performance of interior portion of Gerber's beam are examined thoroughly. All of the tests are ended with a compression failure of the interior composite beams over the design strength of homogeneous beams. The brittle connection failures or tensile failures with the failure of lower strand was not observed in any test frames.

1. 서론

본 연구에서는 게르버보형식 내부 합성보 시스템을 실험하였다. 이 합성보 시스템은 국내 PC부재운송을 위한 무게, 길이, 부피제한을 극복할 수 있는 유일한 대안으로, 그림 1과 같이 30m 스패의 골조 프레임의 경우, 중앙 단순보 부재의 길이가 17.32m로 국내 도로법에서 운송 가능 제한치를 초과하므로, 이런 부재의 경우 3개로 분재하여 운송후 현장에서 포스트텐션에 의하여 결합하여 후 기둥에 상량하는 방법으로 고려하였다. 이를 위하여 그림 2와 같이 3개의 분재를 합성한 길이 5m 내민보와 길이 2.5m의 내민보로 이루어진 게르버 보 형식의 골조 구조체의 정적하중 실험으로 내민보-단순보 연결부위와 보-보 연결부위, 중앙부 보의 휨거동에 대해 그 안전성 검토하였다.

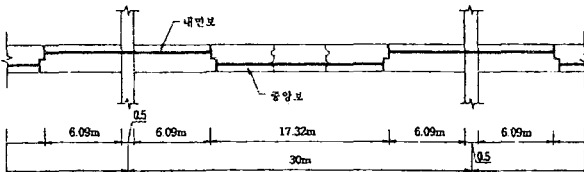


그림 1 제안된 게르버보 형식의 구조 시스템

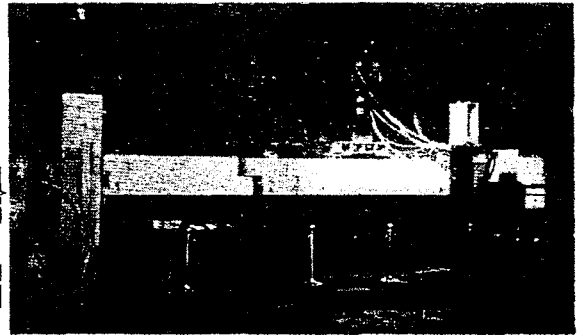


그림 2 시험체 전경 사진

- * 정회원, 동국대 대학원 석사과정
- ** 정회원, 동국대 대학원 석사과정
- *** 정회원, 동국대학교 부교수, 공학박사

※ 본 연구는 (주)삼성물산, 삼연PCE, 건설교통부의 연구비 지원과 대전기계연구소 장소협찬으로 수행 되었습니다.

2. 실험 방법

2.1. 게르버 보 형식의 중앙 보 부위 휨실험

시험체의 수는 총 4개로 변수는 전단기 면적비와 강선 긴장력으로 하였다. 전단기 면적비는 ACI와 PCI에서 제한한 0.2 ~ 0.5의 면적비에서, 전단기 면적비가 최소 면적비 0.2이하일 경우, 접합부 주위에 큰 집중하중이 작용할 때 접합부가 일체화 거동을 하는지 판별하기 위해 0.1, 0.2의 2가지 값으로 설계하였다. 표 1에서 각각의 조건에서 하나의 동질한 실험체(Homogeneous Specimen)로 타설된 시험체의 휨내력(1), 전단 내력(2), 접합부 전단 내력(3)과 예상 파괴모드(6)등을 나열하였다. 실험의 주안점은 포스트텐션에 의하여 분재화된 시험체가 동질한 하나의 시험체로 계산된 휨내력(1)과 캠버, 중국하중시의 처짐, 그리고 파괴모드를 만족시키는가에 있다.

표 2 휨 시험체 예상 하중 및 처짐

시험체 명	강선수 (개)	전단기 면적비	받침점 거리(m)	(1)예상 휨강도		(2)예상 전단강도(tf)	(3)예상 접합부강도(tf)	(4)예상 초기균열		(5)예상 캠버(mm)	(6)예상파괴모드
				(tf)	(tf·m)			하중(tf)	처짐(mm)		
I-1	13	0.1	5.0	34.35	105.23	66.35	44.04	22.30	0.352	-1.87	상부압괴에 의한 휨파괴
I-2		0.2		34.29	104.54	66.16	55.90	22.26	0.349	-1.88	상부압괴에 의한 휨파괴
I-3	0.1	47.75		115.36	66.35	50.96	43.35	0.747	-2.37	상부압괴에 의한 휨파괴	
I-4	0.2	42.76		111.85	65.50	49.63	42.56	0.722	-2.47	상부압괴에 의한 휨파괴	

2.1.1 실험 방법

(1) 실험체 개요

실험체는 길이 2.1m 단부 실험체 2개와 길이 0.8m 중앙부 실험체로 구성되며, 3개의 분재화된 부재를 포스트텐션으로 일체화시킨 실험체를 제작하였다. 가력점은 내부스팬 게르버 연결부위에서 1.2m에서 가력스팬 0.7m로 실험하였다. 이 경우 가력스팬 0.8m 사이에 중앙부 실험체의 접합부가 위치하여 접합부 주위에 작용하는 집중하중에 대한 접합부의 거동 및 휨내력을 파악하려 하였다.

본 연구의 실험은 중앙 단순보의 보-보 접합부에 집중하중이 작용하였을 때의 접합부 거동을 관찰하기 위하여 중앙부 분재의 접합부를 2점 가력포인트 사이에 위치하게 하였다. 본 연구에서 전단이나 비틀림에 대한 고려는 포함되지 않았고, 상세한 철근의 배근이나 보의 극한거동에 대한 검증은 포함되지 않았다. 설계에서 허용응력은 ACI 318-95 시방서의 기준에 따랐으며, 콘크리트의 압축강도, $f_{ck}=350 \text{ kgf/cm}^2$ 를 사용하였고, 긴장재는 극한강도, $f_{pu}=18,900 \text{ kgf/cm}^2$ 인 7연강선을 사용하였다. 긴장력 도입시의 초기 콘크리트의 강도, $f_{ck}=300 \text{ kgf/cm}^2$ 를 사용하였다. 강선 배열은 제작시의 경제성과 편리를 고려하여 직선형인 경우를 택하였다. 긴장력의 손실은 전체 긴장력에 대해 4~6tf의 차이를 보여 평균 5tf를 적용하여 전체 긴장력에 대해 -5tf로 간주하였다.

(2) 시험체 제작

시험체는 삼성물산 음성 PC 공장에서 제작하였다. 실험체 제작 몰드는 10mm철판을 사용하여 제작하였고, 콘크리트는 자동화 배치플랜트 설비의 회전식 믹서에 의해 배합된 콘크리트를 진동기를 사용하여 타설하였다. 강선의 긴장력은 초기 2~3tf만큼 긴장시킨 후 시험체의 위치를 정확히 재 교정한 후 정해진 13.5tf만큼 강선을 긴장하였다.

(3) 재료

PS 강선은 저이완율 직경 12.7mm-Gr.270, 7연강선을 사용하였으며 일반철근은 항복강도 $4,000 \text{ kg/cm}^2$ 이형철근을 사용하였고, 사용된 프리캐스트 콘크리트의 배합표는 다음의 표 2와 표 3과 같다.

표 3 힘 시험체 콘크리트 배합설계(1)

설계기준강도(kg/cm ²)	골재최대입경(mm)	슬럼프(cm)	공기량(%)	잔골재비율(%)	물시멘트비(%)	단위F/A량(kg/m ³)
350	25	10	1.8	41	36	43.3

표 4 힘 시험체 콘크리트 배합설계(2)

단위수량(W)(kg/m ³)	단위시멘트(C)(kg/m ³)	단위 굵은골재량(kg/m ³)	단위 잔골재량(kg/m ³)	단위혼화제량(kg/m ³)
156	433	1,056	793	4.3

(4) 전단키 형상

전단키의 형상은 직사각형으로 하며 전단키 면적비에 따라 그림 3, 그림 4와 같이 돌출형 홈을 1, 2개로 한다.

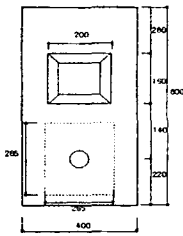


그림 3 전단키 면적비 0.1 힘 시험체

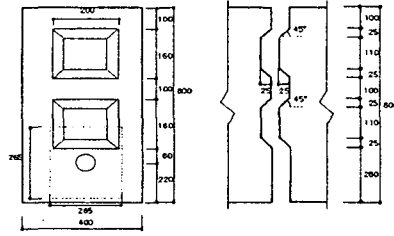


그림 4 전단키 면적비 0.2 힘 시험체

2.1.2 실험결과 및 분석

(1) 강도

본 시험체를 합성보가 아닌 동일한 단면의 일반 포스트텐션 보(Homogeneous Post-tensioned Beam)로 가정하여 그 설계를 하였고 그 강도를 예측하였다. 이 보의 설계 시 상부 콘크리트의 압축력과 유사한 유효 강선 긴장력을 도입하여 설계하였다(표 4 (7)참조). 일반보에서는 표 4의 I-1과 I-2시험체 (7)항의 값이 (-)이므로 이 보의 모두 하부 강선 인장파괴를 하여야 한다. 그러나 포스트텐션에 의한 합성보 힘실험에서 연결부의 신축적 거동으로 인하여 모든 합성보는 압축파괴로 종국파괴하였다.

상부 압괴에 의한 파괴의 원인은 1)불균질 접합면 지압에 의한 균열 영향, 2)일반 보의 하단 휨균열대신 발생하는 합성보 연결부 하단 이격거리 증가에 의하여 휨에 대응하므로, 이에 따른 빠른 중립축의 이동, 3)전단키의 피복역할에 따른 응력 집중 등으로 인한 보 상부의 압축균열 등으로 인하여 합성보는 일반보 실험체와는 다른 파괴거동을 보여주었다.

표 5 일반 포스트텐션 보로 가정한 설계방법 판별식

시험체명	β_1	w_p	ρ_p	$A_p(\text{cm}^2)$	b(cm)	$d_p(\text{cm})$	a(cm)	(7)인장 · 압축파괴 판별식	예측 파괴방법
I-1	0.79	0.257	0.00553	12.831	40	58	17.57	-0.025	하부 인장파괴
I-2	0.80	0.260					17.73	-0.024	
I-3	0.80	0.328	0.00681	15.792			22.41	0.042	상부 압축파괴
I-4	0.80	0.370					25.25	0.074	

주 : (7) $0.85 a/d_p - 0.36 \beta_1$

실험체를 일반보 시험체로 가정하여 인장파괴와 압축파괴일 경우에 대하여 표 5의 ③와 ④같이 공칭강도를 강도설계에 의하여 계산할 수 있다. 실험결과는 ⑦항과 같이 모두 상단 콘크리트 압괴로 파괴되었으나, 예상 인장강도 ③을 모두 상회하였고 평균 61%를 상회한 휨내력을 보여주었다. 예상 압축강도 ④에 비교하여도 평균 44%를 상회하는 휨 내력을 보여주었다.

강선이 16개인 시험체 I-3와 I-4 시험체는 동일한 처짐상태에서 강선이 13개인 시험체 I-1과 I-2보다 높은 강도를 보이며 거동하다 상부 콘크리트 압축파괴로 종국파괴되었다. 이론상 동일한 콘크리트 강도를 가지는 시험체에서 상부 압축파괴로 종국 파괴될 경우 하부 긴장력이 증가하여도 동일한 강도를 가져야 한다. 그러나, 본 연구에서는 강선 13개를 활용한 I-1과 I-2시험

체보다 강선 16개를 활용한 I-3와 I-4 실험체가 표 5의 ⑦항과 같이 약 20%가량 증가된 압축 휨내력을 보여주었다. 강선 13개를 활용한 시험체는 중국 강도에서 강선 16개를 활용한 시험체보다 더욱 큰 처짐이 발생하므로 더욱 빠른 압축 파괴를 초래하므로 강선 16개를 활용한 시험체의 강도 증가가 초래된 것으로 사료된다.

접합부 전단기가 2개인 시험체 I-2과 I-4는 전단기가 하나인 I-1과 I-3 시험체와 별다른 차이를 보이지 않았다. 중국 파괴시 까지 모든 시험체는 접합부 전단기의 파괴를 보이지 않았으며, 휨에 의한 상부 콘크리트 압축파괴로 중국 파괴하였다. 즉, 외력에 대하여 대응할 수 있는 전단내력만 보장된다면 전단기 면적비율은 휨강도에 영향을 없음을 알 수 있었다. 그림 5에서 그림 8은 시험체의 하중-변위곡선을 나타낸다.

표 6 휨 시험체 실험 강도

시험체명	PC 압축강도 (kg/cm ²)	초기균열하중			최종파괴시				
		①계산 초기균열강도 (tf·m)	②실험 초기균열강도 (tf·m)	②실험/①이론	③계산 인장공칭강도 (tf·m)	④계산 압축공칭강도 (tf·m)	⑤실험강도 (tf·m)	⑥실험/③이론	⑦실험/③이론
I-1	372.3	47.32	54.32	1.48	98.51	105.23	132.97	1.35	1.26
I-2	369.0	47.24	52.84	1.19	98.35	104.54	154.67	1.57	1.48
I-3	359.5	54.18	57.60	1.06	102.52	115.36	162.12	1.58	1.41
I-4	319.0	53.24	47.64	0.89	93.50	111.85	180.77	1.93	1.62
평균	354.9	50.49	53.10	1.16	98.22	109.25	157.63	1.61	1.44

$\textcircled{1} M_{cr} = 2\sqrt{f_{ck}}S_2 + P_e(r^2/C_2 + e)$
 $\textcircled{2} M_{cr} = 0.85 f_{ck}S_2 - P_e(r^2/C_2 - e)$
 $\textcircled{3} M_u = A_p f_{ps}(d_p - a/2)$

여기서, $f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \frac{\rho_p f_{ps}}{f_{ck}}\right)$

$\textcircled{4} M_u = f'_{c} b d_p^2 (0.36 \beta_1 - 0.08 \beta_1^2)$

여기서, $f_{ps} = f_{pu} + f_{ck}/100\rho_p$, 콘크리트 강도는 실험 당일 강도임. 실험초기균열강도②와 실험결과⑤는 실험체에 자중에 의한 모멘트를 합산한 결과치임.

(2) 하중 - 처짐 곡선

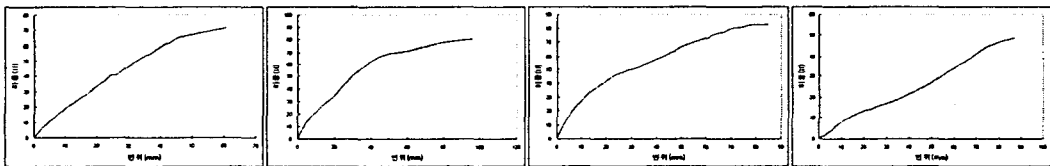


그림 5 I-1 하중-변위 곡선 그림 6 I-2 하중-변위 곡선 그림 7 I-3 하중-변위 곡선 그림 8 I-4 하중-변위 곡선

(3) 거동

본 연구에서는 강선수와 전단기 수를 변수로 하여 접합부 면에 편심 하중을 적용하여 실험한 결과 전단기와는 무관하게 동일한 거동을 보였다. 이것은 편심 하중으로 인하여 하중을 크게 받는 접합부의 하부가 벌어지고 상부가 점차 좁아지면서 그 부분의 응력이 집중하면서 동일한 거동을 보인 것으로 판단된다.

따라서 설계시 접합부의 위치는 접합부 주위에 큰 집중하중을 받지 않는 곳을 택하는 것이 바람직하다. 강선의 긴장력 크기에 따른 시험체의 거동은 최종 파괴시 시험체의 강도가 미소하게 증가한 것을 제외하고는 하부 접합부 부분의 이격거리와 균열 양상의 별다른 변화가 없었다. 시험체별 중국 파괴모습을 그림 9에서 그림 12에 정리하였다.

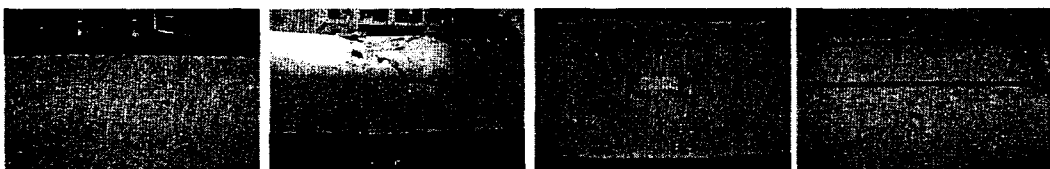


그림 9 I-1 시험체 중국파괴 그림 10 I-2 시험체 중국파괴 그림 11 I-3 시험체 중국파괴 그림 12 I-4 시험체 중국파괴

2.2 게르버 보 형식의 단순보-내민보 댄단부 실험

프리텐션 보의 경우 보단부에서 긴장력은 강선의 정착부착력으로 형성되므로 강선응력은 보 단부에서 0에서부터 증가하여 정착길이 끝에서 유효강선응력, f_{se} 에 도달한다. 단부의 임의의 단면에서 긴장력은 정착부착력을 통하여 콘크리트 단면에 그대로 전달되므로, 프리텐션의 경우 강선긴장에 의한 파열균열(Bursting Cracking)과 박리균열(Spalling Cracking)에 대한 독립된 보강을 크게 요구되지 않는다.

본 연구에서는 포스텐션에 의하여 일체화시킨 합성보의 댄단부에 대하여 부분실험을 수행하여 공칭강도를 상회하는 결과를 얻었다. 이에 본 연구에서는 게르버 보 골조 형식의 내민보-단순보의 댄단부 연결부 실험을 통하여 골조에서의 안전성 검토를 목적으로 한다.

2.2.1. 댄 전단 실험체 계획

본 연구에서는 포스텐션에 의하여 일체화시킨 합성보의 댄단부에 대하여 부분실험을 통해 안전성이 검증된 설계방법을 게르버 보 형식의 골조 구조에서 내민보-단순보 연결부위에 적용하여 골조 시스템에서 댄단부의 안전성 검토를 목적으로 변형 PCI 방법과 변형 CPCI 방법으로 아래 표 6과 같이 배근하여 실험하였다. 사용하중에 따른 설계방법별 시험체의 기타 철근의 배근량은 표 7과 같다.

표 7 길이 철근(Ash) 요구량

시험체명	댄단부 설계요구량(cm ²)	Bursting요구량(cm ²)	Spalling요구량(cm ²)	총 요구량(cm ²)	배근량(cm ²)	배근 철근
I-1	10.29	7.75	0.65	18.69	13.04	2D16+2D13 폐쇄형
I-2-1	11.89	8.00	0.65	20.54	19.90	5D16 폐쇄형
I-2-2					23.88	6D16 폐쇄형
I-3	10.29	7.75	0.65	18.69	13.04	2D16+2D13 폐쇄형
I-4	14.56	8.00	0.65	23.21	23.88	6D16 폐쇄형
평균	11.76	7.88	0.65	20.28	18.75	-

표 8 기타 철근 배근량

시험체명	Av(폐쇄형)	As	Ash(폐쇄형)	A'sh	Ash2(폐쇄형)	Ah(U-bar)	A'h	A's	설계방법	비고
I-1	2-D13	2-D22+3-D19	2-D16+2-D13	2-D22+3-D19	2-D16+2-D13	2-D13	2-D13	2-D16	CPCI수직철근	표준시험체
I-2-1	3-D13	3-D13	5-D16	2-D22	3-D16+2-D13	2-D13	4-D13	2-D16	CPCI경사60°	표준시험체
I-2-2		4-D13	6-D16							As, Ash10%보강
I-3	2-D13	2-D22+3-D19	2-D16+2-D13	2-D22+3-D19	2-D16+2-D13	2-D13	2-D13	2-D16	CPCI수직철근	표준시험체
I-4-1	3-D13	3-D13	6-D16	2-D22	3-D16+2-D13	2-D13	4-D13	2-D16	CPCI경사45°	Ash 10%보강
I-4-2		5-D13	6-D16							As 20%보강 Ash 10%보강

2.2.2. 실험결과 및 분석

(1) 강도

게르버 보 형식의 골조 구조에서 내민보-단순보의 댄단부 연결 실험을 하여 얻은 결과를 표 8에 도시 하였다. 모든 댄단부는 중앙부 단순보가 종국파괴할때까지 파괴된 모습을 보이지 않아 그 안전성이 검토되었다. 포스트 텐션에 의하여 발생하는 박리균열 및 파열 균열은 시험이 끝날 때까지 나타나지 않았다.

표 9 이론 및 실험 강도

시험체명	PC압축강도 (kg/cm ²)	초기균열 발생시		
		①사용하중하의 전단력(tf)	②실험전단력(tf)	②결과/①예측
I-1	372.3	25.0	9.23	0.40
I-2-L	369.0	25.0	8.26	0.33
I-2-R		25.0	3.12	0.13
I-3	359.5	25.0	8.77	0.35
I-4-L	319.0	25.0	8.42	0.34
I-4-R		25.0	5.34	0.21
평균	370.65	25.00	7.19	0.29

(2) 거동

본 연구에서는 부분시험으로 검증된 내민보-단순보 연결을 위한 댐단부를 게르버 보 골조 형식에 직접 적용하여 실험을 한 결과 그 안전성이 검증되었다. 부재에는 포스트 텐션에 의한 파열 및 박리 균열은 전혀 볼 수 없었으며, 부재 파괴시 까지 댐 단부 요각부위를 중심으로 균열이 산재 할 뿐 위험성이 전혀 나타나지 않았다. 그림 13에서 그림 18까지 댐 단부의 최종 균열 모습을 도시하였다.

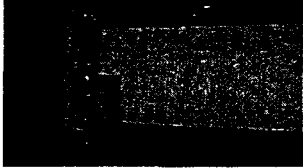


그림 13 I-1-L 시험체의 균열양상

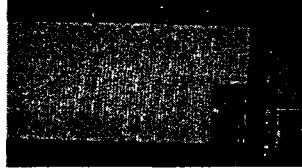


그림 14 I-1-R 시험체의 균열양상

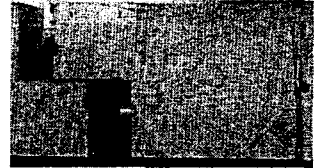


그림 15 I-2-L 시험체의 균열양상

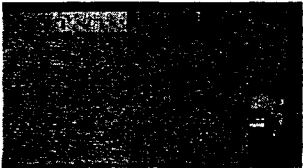


그림 16 I-2-R 시험체의 균열양상

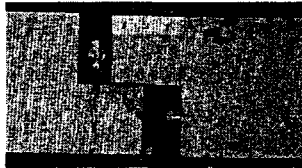


그림 17 I-3-L 시험체의 균열양상

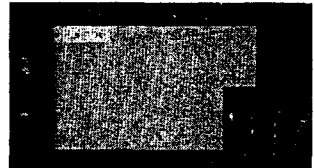


그림 18 I-3-R 시험체의 균열양상

3. 결론

본 연구에서는 부분실험을 통하여 안전성이 검증된 부재들을 게르버 보 형식의 골조 구조체로 설치하여 내민보-단순보 연결 부위와 보-보 연결부위, 중앙부 보의 휨거동에 대해 그 안전성 검토를 목적으로 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보-보 접합부는 증가하중 뿐 아니라, 접합부 부위에 작용하는 큰 집중하중에서도 충분한 내력을 발휘하여 그 안전성이 증명되었다.
- 2) 게르버 보 골조 구조형식의 내민보-단순보 연결을 위한 댐단부는 게르버 보 골조 구조체내에서의 거동이 안전한 것으로 확인되었다.
- 3) 골조 실험 결과 취성 파괴의 위험성이 내재되어 있는 연결부의 파괴가 아닌 중앙보 단순보의 휨에 의한 상부 콘크리트의 압축 파괴로 골조의 연성적인 파괴를 유도하여 골조 구조 시스템의 안전성이 입증되었다.

참고 문헌

1. PCI Design Handbook, Fifth Edition, Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, 1999.
2. G. Annamalai and Robert C. Brown Jr, "Shear-Transfer Behavior of Post-Tensioned Grouted Shear-Key Connection in Precast Concrete-Framed Structures," ACI Journal. 1987 Jan~Feb. pp 53~65.
3. Arthur H. Nilson "Design of Prestressed Concrete(Second Edition)," 1987. pp 33~373.
4. 김상식 "철근콘크리트 구조설계" 문운당, 1998.