

팽창제를 이용한 지하 PC콘크리트 박스구조물의 성능개선 연구

조 병 완 (한양대학교 도시건설환경공학부 교수)

1. 개요

국가 경제의 발전으로 지하철이나 고속철도와 같은 사회기반시설이 확대됨에 따라 직사각형 라멘 형식의 지하 콘크리트 구조물의 건설이 점차 활기를 띠고 있다. 하지만 지하박스 구조물의 대부분은 지하 깊은 곳에 위치함에 따라 시공시 콘크리트의 품질관리가 어려우며, 콘크리트의 타설방법, 타설간격, 수화열 문제 등에 의해 심각한 균열이 초래되어 구조물의 내구성과 방수성에 큰 문제가 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 지중 매설구조물에 팽창콘크리트를 사용할 경우, 수밀성의 증대로 초기 균열제어 및 내구성이 향상되며 수축균열로 인한 지하누수의 방지에 효과가 큰 것으로 알려져 있으며, 화학적 프리스트레싱에 의하여 휨인장 강도가 증가하여 제품의 경량화로 경제적인 단면을 제작할 수 있는 점이 있다.

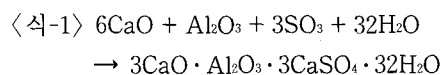
따라서 본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 지하박스 구조물에 팽창제의 효과를 얻기 위하여 보 실험을 통해 팽창 구속에 따른 화학적 프리스트레싱 효과를 분석하고 프리캐스트 박스암거의 실물 재하 실험을 실시하는 한편 접합부의 강도를 향상시킬 수 있는 대안으로서 박스 암거의 접합에 사용되는 PC 강선을 일반적인 형태의 직선이 아닌 절곡으로 배치하여 팽창콘크리트와 함께 이에 대한 현장적용 가능성 및 기존 박스암거의 성능개선을 위한 기초적인 자료를 제시하였다.

2. 팽창시멘트

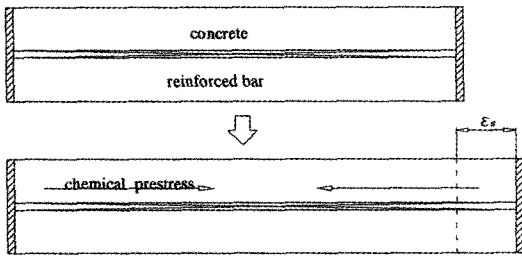
팽창시멘트는 타설 후 수화과정 초기에 팽창하는 수경성시멘트(Hydraulic Cements)이다. 구속되지 않은 시멘트풀에서 발생하는 과도한 팽창은 균열을 유발하지만, 팽창이 적절히 구속된 경우 팽창의 크기가 감소하는 대신 프리스트레스가 발생하게 된다.

콘크리트에서 발생하는 프리스트레스의 크기가 0.2~0.7MPa 정도로 작고 건조수축으로 인한 인장응력을 상쇄시킬 만큼의 팽창이 발생하는 시멘트를 수축보상(Shrinkage Compensating)시멘트라 하며, 프리스트레스 강도가 6.9MPa 정도의 큰 팽창이 발생하는 시멘트를 응력발생(Self-Stressing) 시멘트라 하고 화학적 프리스트레스 콘크리트의 생산에 이용된다.

이중 Sulfoaluminate 크링카는 시멘트의 성분인 $3CaO \cdot SiO_2$, $2CaO \cdot SiO_2$, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot F_2O_3$ 에 상당한 양의 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SO_3$ 와 $CaSO_4$ 를 첨가한 개량 포틀랜드 시멘트 크링카이며, 이를 분쇄하여 만든 시멘트를 팽창시멘트라 한다. 팽창 시멘트의 팽창반응식은 <식-1>과 같다.



이러한 팽창콘크리트의 팽창을 억제하여 콘크리트에 압축력을 가하는 방법을 화학적 프리스트레싱



〈그림-1〉 화학적 프리스트레싱 모델

(Chemical Prestressing)이라 한다. 프리스트레싱을 가하려는 방향으로 철근을 배치하면 철근과 콘크리트의 부착에 의하여 철근에는 인장력, 콘크리트에는 같은 크기의 압축력이 작용하며 프리텐션방식의 부재와 유사한 거동을 보인다. 이때의 팽창시멘트 혼입량은 40~85kg/m³(단위시멘트량의 10~15%) 정도이며 팽창률은 200~1000 × 10⁻⁶ 정도이다.

다음의 〈그림-1〉은 화학적 프리스트레싱의 모델을 나타낸 것이며 효과 응력은 〈식-2〉과 같이 주어진다.

$$\langle \text{식-2} \rangle f_{cp} = \epsilon_s E_s A_s / A_c$$

여기서, f_{cp} 는 화학적 프리스트레싱에 의한 응력, E_s 는 구속강재의 탄성계수, ϵ_s 는 구속강재의 변형률,

A_c 와 A_s 는 각각 콘크리트와 구속강재의 단면적이다.

3. 팽창콘크리트 실험

팽창콘크리트의 재료적 특성과 화학적 프리스트레싱 효과를 분석하기 위하여, 인장철근량, 단면의 크기, 팽창제의 사용 유무 등의 변수에 따라 단순보 실험과 팽창콘크리트의 사용유무와 포스트텐션에 의한 상향력의 도입을 변수로 한 내부제원 1.5m × 1.5m의 박스 실험실험을 실시하였다. 실험에 사용된 콘크리트는 400kg/cm²로 설계된 레미콘 제품을 사용하였으며, 배근된 철근은 설계항복강도가 4000kg/m²인 SD40A를 사용하였으며, 철근에 대한 재료실험을 실시한 결과는 〈표-2〉와 같다.

가. 설계 및 방법

단순보 실험을 위한 철근콘크리트 보는 15cm × 20cm × 150cm(순지간 1.2m)의 재원에 인장철근 2-D19 및 압축철근 2-D13을 배근한 시험체를 표준 시험체로 하여 팽창제의 사용유무, 인장철근량, 콘크리트 단면적을 변수로 실험을 수행하였다.

팽창제의 양은 화학적 프리스트레싱 효과를 고려하여 시멘트 대비 치환율 13%로 결정하였으며 화

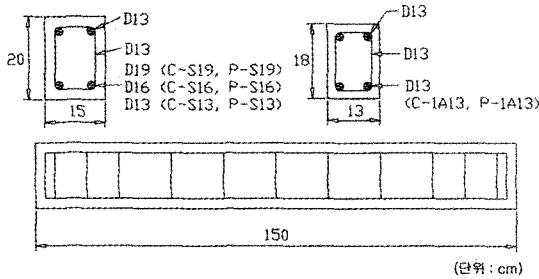
〈표-1〉 콘크리트의 배합표

Type	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위량 (kg/m ³)						비 고
						W	C	S	G	혼화재료 (%)		
										팽창제	혼화제	
Type-A	25	8 ± 2	4 ± 1	36	42.0	144	400	755	1,051	0	4.0	AE 0.04
Type-B	25			348			52			AE 0.04		

Type-A : 보통콘크리트, Type-B : 팽창콘크리트

〈표-2〉 철근의 재료적 성질

종 류	항복강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)	연신률 (%)	Bending Property	
					Angle of Bending	Ratio of Bending Radius
철 근 (SD40A)	4000	4500 ~ 6100	2.0 × 10 ⁶	16 이상	180°	1.5배 (D16까지) 2.0배 (D16초과)

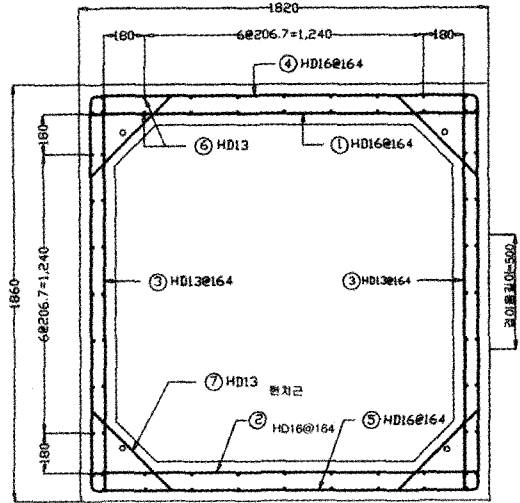


〈그림-2〉 휨시험체의 재원

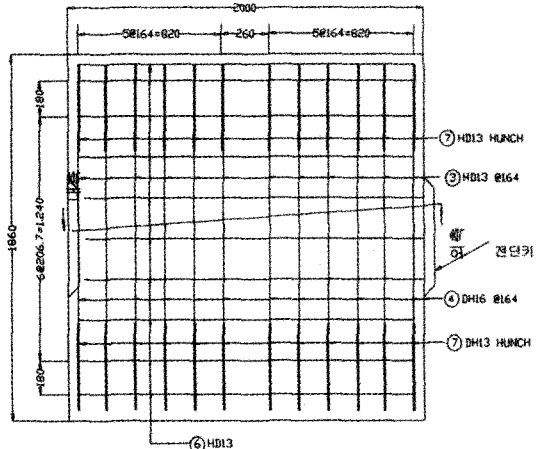
학적 프리스트레싱에 따른 역학적 성능을 검증하기 위하여 모든 시험체에 2-D13의 압축철근을 배치하고 인장철근만을 표준시험체의 85.4%, 70.9%로 감소시킨 시험체를 제작하였다. 또한, 콘크리트 단면을 표준시험체의 78%로 감소시킨 시험체를 제작하여 화학적 프리스트레싱의 적절한 도입을 위한 콘크리트 단면적의 유효범위를 규명하고자 하였다.

휨시험체의 재원은 〈그림-2〉와 같으며, 시험체의 종류는 〈표-3〉과 같다. 하중 재하는 100톤 용량의 만능시험기를 이용한 4점 휨재하(4-Point Bending Test) 방법을 이용하여 수행되었으며 인장철근과 압축철근의 지간 중앙부에는 각각 타설 전에 철근게이지를 설치하였다.

박스압거 시험체는 철근콘크리트 구조설계기준 및 도로교 표준시방서에 따라 내부공간 1.5m × 1.5m, 길이 2m 재원의 박스압거를 강도설계법으로 설계하였다. 실물시험체의 재원을 〈그림-3〉과 〈그



〈그림-3〉 실물시험체 단면재원



〈그림-4〉 실물시험체 측벽 재원

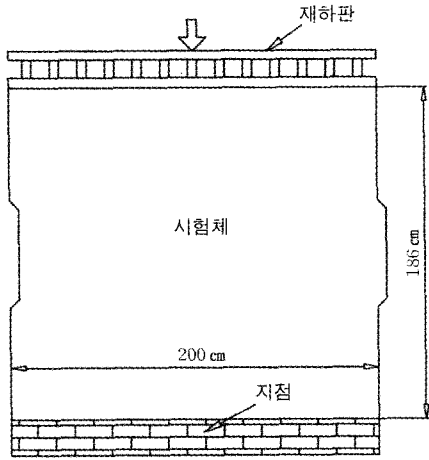
〈표-3〉 휨시험체의 변수에 따른 종류

시험체	팽창제 (%)	사 용 인장철근	재원 (cm)	철근비교 (%)	단면비교 (%)	수 량
P-S19	0	D19×2	15×20×150	100	100	2EA
C-S19	13	D19×2	15×20×150	100	100	2EA
P-S16	0	D16×2	15×20×150	85.4	100	1EA
C-S16	13	D16×2	15×20×150	85.4	100	1EA
P-S13	0	D13×2	15×20×150	70.9	100	1EA
C-S13	13	D13×2	15×20×150	70.9	100	1EA
P-1A13	0	D13×2	13×18×150	70.9	78	1EA
C-1A13	13	D13×2	13×18×150	70.9	78	1EA

림-4)에 나타내었으며, 시험체의 종류와 특징은 〈표-4〉와 같다.

〈표-4〉 실물시험체의 종류 및 특징

시험체 No.	시험 종류	특 징	비 고
PS	접합부 강도시험	접 합	압축력 (PC Strand 개당 7.8ton)
CS	접합부 강도시험	접 합	압축력+상향력(1.6ton/m)
P1	강도시험	비접합	보통콘크리트
C1	강도시험	비접합	팽창콘크리트



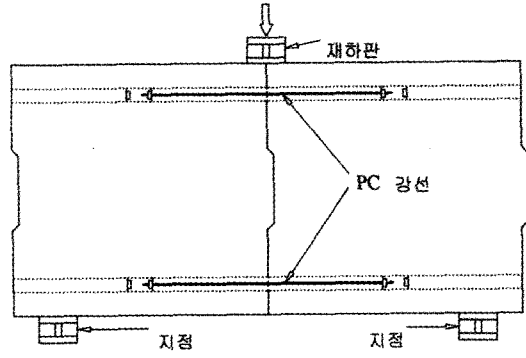
〈그림-5〉 단일세그먼트 재하방법

〈그림-5〉와 〈그림-6〉에 각각 단일 세그먼트 강도시험과 접합부 강도시험의 하중 재하방법을 단순화하여 나타내었다.

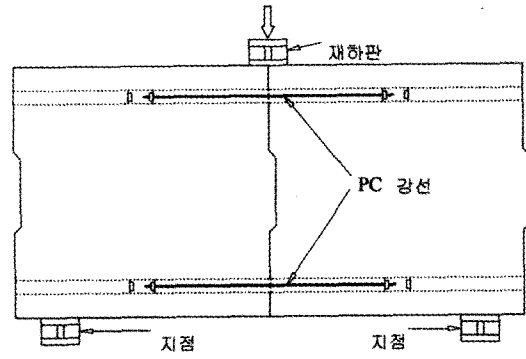
4. 결과 및 고찰

가. 휨시험

표준단면(15cm × 20cm)에 2-D19의 인장철근을 배치한 보통콘크리트 시험체(P-S19)의 경우 초기 변형률은 122×10^{-6} 인 반면, 같은 재원의 팽창콘크리트 시험체(C-S19)의 초기변형률은 312×10^{-6} 으



(1) 강선 직선 배치



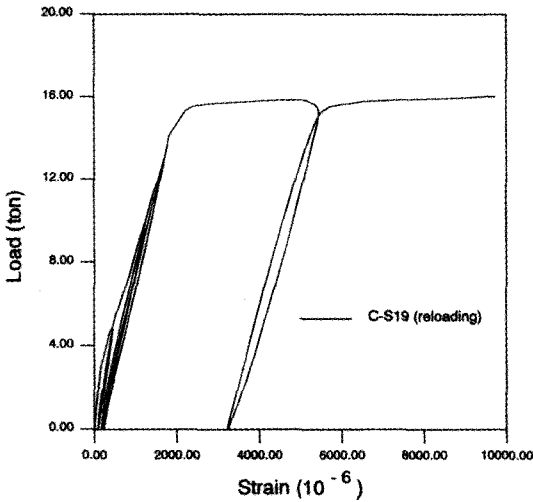
(2) 강선 곡률 배치

〈그림-6〉 접합 시험체의 하중 재하방법

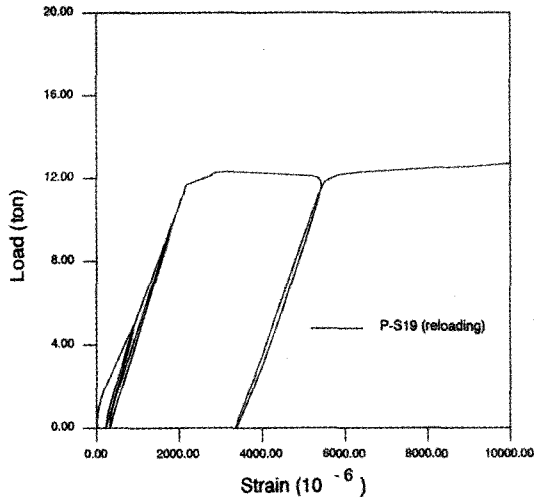
로 약 388 kg/cm^2 의 응력차가 발생하며 이것이 팽창제에 의해 도입되는 화학적 프리스트레싱 양이다. 〈표-5〉에 정리된 휨시험 결과에서 알 수 있는 바와

〈표-5〉 휨시험 결과

시험체	초기변형률 ($\times 10^{-6}$)	화학적 프리스트레싱 (kg/cm^2)	설계하중 (ton)	항복하중 (ton)	최대하중 (ton)	초기균열 하중 (ton)	항복하중시 처짐 (mm)	최대하중시 처짐 (mm)	연성비
C-S19	312	388	10.89	13.46	15.95	8.0	4.29	12.11	2.82
P-S19	122	-	10.89	11.72	14.62	3.5	4.63	12.51	2.70
C-S16	491	708	7.91	13.00	13.89	6.7	3.43	13.49	3.93
P-S16	144	-	7.91	10.23	12.32	3.5	4.29	13.49	3.14
C-S13	754	949	5.24	8.59	10.30	4.0	2.91	15.77	5.42
P-S13	289	-	5.24	6.79	9.56	3.2	3.43	16.00	4.66
C-1A13	171	277	4.50	6.73	8.94	3.5	3.66	15.20	4.15
P-1A13	35	-	4.50	6.09	7.93	2.1	4.40	13.49	3.07



(1) 팽창콘크리트 시험체



(2) 보통콘크리트 시험체

〈그림-7〉 하중-철근변형률 선도

같이 이러한 화학적 프리스트레싱은 콘크리트 단면이 동일한 경우 인장철근비가 작을수록, 철근량이 일정한 경우에는 콘크리트의 단면이 클수록 더 크게 발생하였다.

〈그림-7〉에서 알 수 있듯이 팽창콘크리트를 사용한 경우, 하중 제거시 측정된 잔류변형률이 보통 콘크리트를 사용한 경우보다 미소하였으며 특히 13톤에서의 Reloading에서는 일반 콘크리트의 인장철근이 항복한 반면, 팽창콘크리트는 약간의 잔류변형률 증가만 발생할 뿐 항복은 일어나지 않았다. 이는 화학적 프리스트레싱의 도입으로 인한 철근의 항복하중이 증가하였음을 보여주고 있다.

초기 균열하중은 전 시험체에서 팽창콘크리트 시험체가 보통콘크리트 시험체에 비해 우수한 결과를 보였다. 항복하중시의 처짐과 최대하중시의 처짐을 비교한 연성비는 철근량이 감소함에 따라 증가하였으며 팽창콘크리트를 사용한 시험체가 보통콘크리트 시험체에 비해 4~35% 정도 높게 나타났다.

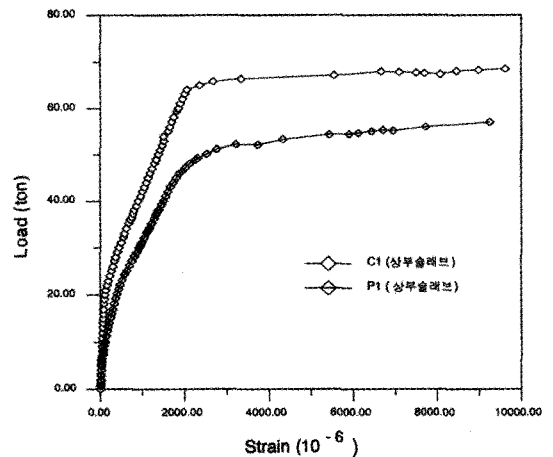
이상의 결과는 팽창제에 의한 화학적 프리스트레싱이 철근과 콘크리트의 강성을 높이는데 유효하며 이것이 철근량과 단면의 감소에 기여할 수 있음을

보여준다.

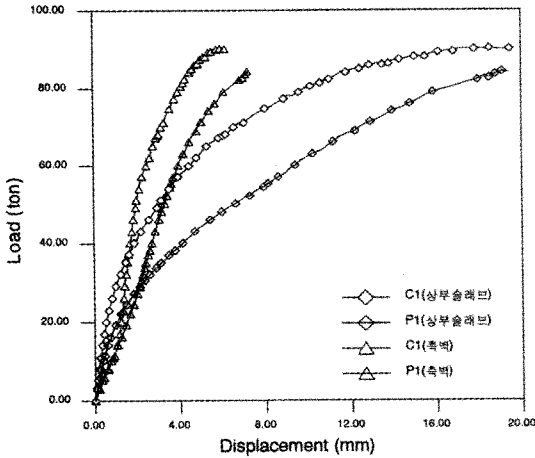
나. 실물실험

(1) 단일시험체의 강도실험

〈그림-8〉과 〈그림-9〉는 단일시험체의 결과를 나타낸 것이다. C1 시험체와 P1 시험체의 초기변형률



〈그림-8〉 하중-변형률선도(실물시험체)



〈그림-9〉 하중-처짐선도(실물시험체)

은 각각 884×10^{-6} 과 680×10^{-6} 으로 C1 시험체에 도입되는 프리스트레스의 양은 $416\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 추정된다. 상부슬래브와 측벽 모두 팽창콘크리트를 사용한 시험체의 처짐이 작았으며 하중이 직접 재하되는 상부슬래브에서 그 차이가 두드러졌다. 처짐의 차이는 철근이 항복하기 전까지 증가하였으나 철근이 항복한 뒤 감소하였다. C1 시험체는 P1 시험체와 비교하여 초기균열하중, 항복하중, 최대하중에서 각각 47.2%, 35.5%, 6.6% 각각 더 큰 것으로 나타났으며 처짐의 제어에서도 상대적인 우수성을 보여주었다. 이상의 결과를 통해 실물시험체의 경우에도 팽창제에 의한 화학적 프리스트레스가 유효하게 도입됨을 알 수 있다.

(2) 접합시험체의 강도실험

접합부에서는 하중이 증가함에 따라 상부슬래브 하부의 인장측에서 초기균열이 발생하였으며 접합면을 따라 진전하였다. 시험체의 정점에서 1/3 지점까지 진전한 균열은 전단키가 설치된 측벽중앙에서 억제되었으며 하중을 지속적으로 증가시키기에 따라 균열은 접합면이 아닌 전단키를 관통하여 진전하였다. 실물실험에서 팽창콘크리트를 사용하고 강선을 절곡으로 배치한 시험체(CS)와 보통콘크리트를 사

〈표-6〉 접합부 강도시험 결과

시험체	최대하중	연직처짐 (mm)	인장부 균열폭 (mm)	비고
CS	81.66	19.4	10.93	압축력 상향력
PS	77	25.41	9.24	압축력

용하고 강선을 직선으로 배치한 시험체(PS) 모두 전단키의 지배 파괴양상은 지압파괴나 슬립에 의한 수평분리가 아니라 전단키 저면부의 Shear Off였으며 긴장재를 직선 배치한 시험체가 상대적으로 낮은 하중에서 Shear Off가 발생하였다. 이는 포스트텐션의 강선을 절곡으로 배치하는 것이 시험체의 변위를 감소시켜 결과적으로 접합부의 구속응력을 크게 하여 접합부의 전단강도를 증가시킬 수 있음을 보여준다. 각 실험체의 시험결과를 〈표-6〉에 요약하였으며, 이 결과에 따르면 팽창제를 사용하고 상향력이 작용하도록 강선을 절곡으로 배치한 CS 시험체가 최대하중에서는 5.7%, 연직처짐에서는 23.7%로 우수한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

팽창제의 구속효과에 의한 화학적 프리스트레싱과 PC강선의 절곡에 의한 박스암거의 성능개선을 위한 4점 휨 재하실험과 실물모형실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 팽창콘크리트에 의해 부재에 도입되는 화학적 프리스트레스의 양은 콘크리트의 단면이 일정할 경우 철근비가 낮을수록 증가하였으며 철근비가 일정한 경우에는 단면이 클수록 증가하였다.
- (2) 보 시험체의 경우 팽창콘크리트를 사용한 모든 시험체가 같은 재료의 보통콘크리트 시험체에 비해 초기 균열하중, 항복하중, 최대하중이 높았으며 복원력과 연성비의 증가가 확인되었다. 특히 초기 균열하중과 항복하중의 증가율은 도입된 화학적 프리스트레스의 증

- 가량과 일정한 관계가 있음을 알 수 있다.
- (3) 단일 세그먼트에 대한 강도시험에서 팽창콘크리트를 사용한 시험체가 화학적 프리스트레스에 의한 수축보상 작용으로 균열수와 폭이 크게 감소하였다. 그리고 초기균열하중 최대하중 및 인장철근의 항복하중은 보통콘크리트를 사용한 경우보다 각각 47.2%, 6.6%, 35.5% 정도 큰 것으로 나타나 박스구조물에서도 화학적 프리스트레스를 적용하는 것이 가능하였다.
 - (4) 접합부 강도시험에서 전단력과 압축력을 전

달하기 위해 설치된 전단키는 접합부의 균열을 제어하는 역할을 하였으나 일정하중 이상에서는 저부가 파괴되며 끝단에서 사인장균열이 진행되는 Shear Off가 발생하였으며, 강선을 절곡으로 배치한 시험체의 Shear Off의 발생하중 값이 높게 나타났다. 이는 강선의 절곡배치로 도입된 상향력으로 인해 처짐이 감소하였으며 결과적으로 전단력의 감소로 이어져 강선을 직선배치한 시험체에 비해 상대적인 접합강도의 증가가 발생한 것으로 판단된다. ▲

▶▶▶ 시사 용어 해설 ◀◀◀

▶ 허브공항

3월에 개항한 인천국제공항은 허브공항을 추구한다. 허브(Hub)란 바퀴의 중심이란 뜻. 허브공항이란 그 공항을 바퀴의 중심으로 보고 이 중심에서 퍼져나간 항공노선이 바퀴살처럼 형태를 이루고 있는 것을 일컫는 말이다. 허브공항은 항공사들이 어느 특정공항을 중심으로 승객이나 화물을 집결시키고 분산시키는 방식으로 방사선 개념의 운송구조를 형성할 때 그 중계지 역할을 하는 공항을 말한다.

예를 들어 동북아시아의 허브공항이라면, 미국이나 유럽에서 대형 항공기로 타고 온 여객들이 이 공항에서 다시 다른 비행기로 갈아타고 일본이나 중국으로 가게 된다. 승객과 화물을 집결시키고 분산시키는 중계지 역할을 하는 허브공항은 교통량과 연계수요가 상당한 규모에 이르러야 가능하다. 이러한 조건을 충족하려면 공항을 중심으로 노선이 잘 발달돼 있고 노선당 운항편수가 많아 효율성 측면에서 상당한 경쟁력을 확보해야 한다. 그 밖에 허브공항이 되기 위해서는 지리적 위치에 따른 환승의 편의성과 다른 교통수단과의 연계등이 필수적이며 저렴한 공항사용료, 핵심 항공사의 존재도 허브공항의 요건이다.