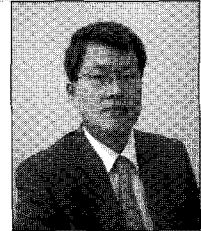


포스트텐션 합성보를 활용한 장스팬 구조의 설계

Long-span Structure Design using Post-Tensioned Composite Beam



정 광 량*

*(주)동양구조안전기술 대표이사

1. 서 론

1.1 배경

장스팬 구조는 제한된 영역 내에서 보다 넓은 공간을 확보해야 하는 주차장, 집회시설, 물류 창고 등에서 주로 사용된다.

건축 구조에서 장스팬을 구현하는 방안으로는 철골조가 가장 일반적으로 사용되고 있다. 일반 H형강으로 지지할 수 없는 장스팬인 경우는 Built-up 부재가 사용되고 이보다 더 넓은 공간은 트러스 구조가 적용된다.

철골 구조는 RC 구조에 비해 보다 작고 가벼운 부재로 장스팬을 구현할 수 있는 장점이 있지만, 진동 등 사용성 측면에서 문제점이 발생하는 경우가 빈번하다. 그리고 과도한 트러스 크기 등으로 인해 층고 등에 문제가 발생하기도 한다. 또한 상대적으로 높은 자재비와 내화 피복의 필요성 등이 경제적인 측면에서 단점으로 작용한다. 더군다나 최근 국제적인 원자재 가격 상승으로 인해 강재의 가격 또한 급등하면서 철골 구조의 경제성은 더욱 악화되고 있다.

이와 같은 철골 구조의 한계점을 극복하기 위해 다양한 대안들이 제시되고 있다. 여기에서는 그 중에서도 철골 구

조와 현장타설 포스트텐션 구조의 장점을 혼합한 포스트텐션 합성보(post-tensioned composite beam)에 대해 살펴보고자 한다.

1.2 포스트텐션 합성보의 개념

포스트텐션 시스템(post-tension system)은 긴장력(prestressing force)을 도입하여 단면에 축방향 압축력을 가함으로써 인장력을 감소시켜 부재 크기를 감소시키는 시스템이다. 사용하중하에서도 압축력에 의해 유효 단면이 증가하여 처짐 및 진동에 저항하는 능력이 타 구조시스템에 비해 크게 증가한다. 반면 콘크리트 현장타설을 위한 거푸집 및 서포트가 요구되어 층고가 높은 장스팬 구조에서는 적용이 어려운 단점이 존재한다.

현재 건축시장에서는 일반 강합성 구조의 개념을 발전시킨 층고 절감 또는 무지주 강합성보가 각광을 받고 있다. 그러나 이러한 시스템들은 비교적 짧은 스패에 초점이 맞추어져 있으며, 장스팬에 적용 시 경제성이 저하된다.

포스트텐션 합성보는 포스트텐션 시스템과 강합성보의 장점을 융합한 새로운 개념의 합성구조로 상기 구조형식에 비해 장스팬 적용에 많은 장점을 가지고 있다.

2. Precom Girder

2.1 개요

Prestressed Composite(이하 Precom) 거더는 역 T형 또는 H형 강재 단면 하부에 포스트텐션 콘크리트(이하 케이싱 콘크리트)를 합성시킨 공법이다.

기본 형상은 그림 1과 같이 강재 단면, 콘크리트, 강연선으로 구성되어 있다. 부재 설치 전 제작 단계에서 케이싱 콘크리트를 통해 긴장력이 도입되며 합성 후 강재와 케이싱 콘크리트가 함께 외부하중에 대해 저항하게 된다.

기존 대표적인 장스팬용 강합성보인 프리플렉스(Preflex)는 대형 작업대를 사용하여 부재 자체에 변형을 주는 *preflexion & release* 작업이 필요하기 때문에 경제성이 저하되고 제작 시 위험성이 존재한다. 그러나 Precom 거더는 강연선에 의한 긴장력이 *preflexion & release* 작업의 역할을 하기 때문에 큰 규모의 작업대가 필요하지 않다. 단부는 H형강 형태로 제작되기 때문에 일반 철골 구조와 동일한 접합 방식이 적용된다.

2.2 Precom 거더의 특징

Precom 거더의 제작 과정을 살펴보면 표 1과 같다.

강재 단면 제작시(①) 상부 플랜지는 활하중 재하 시의 압축력을, 하부 플랜지는 자중 및 케이싱 콘크리트의 무게를 견딜 수 있어야 한다.

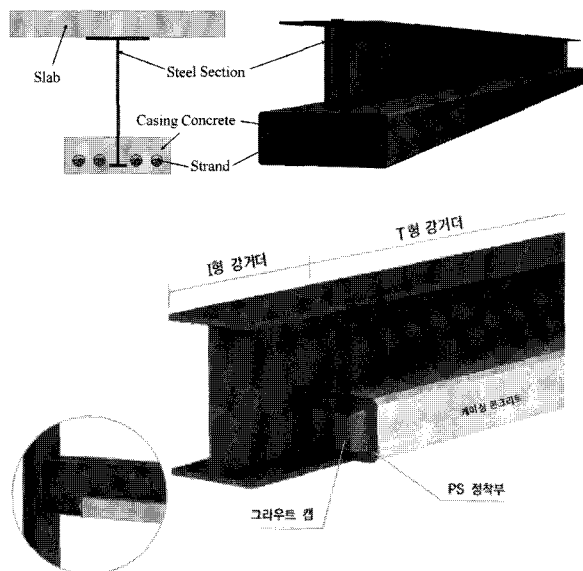


그림 1 Precom 시스템 개요

표 1 Precom 거더 제작 개념

	제작과정	응력
①		
②		
③		
④		

케이싱 콘크리트를 타설하게 되면 강재 하부 플랜지에는 인장응력이 작용한다(②). 이때 강재 단면이 케이싱 콘크리트의 자중을 견디기 때문에 제작 시 콘크리트 발생하는 인장응력은 최소화된다.

콘크리트 경화 후 긴장력을 가하면 케이싱 콘크리트에는 압축력이 도입되며 강재의 인장응력은 감소한다(③).

부재를 설치한 후 마감하중, 활하중 등이 작용하면 케이싱 콘크리트에는 인장응력이 작용하고, 이는 긴장력에 의한 압축응력과 상쇄되어 최종적으로 콘크리트에는 인장응력이 발생하지 않는다(④).

Precom 거더의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 부재 크기를 절감할 수 있어 장스팬 구현 시 층고 절감 효과가 크다.
- 단면의 효율적인 사용으로 강재량을 최소화할 수 있다.
- 강연선량, 재료강도 등의 조절에 따라 다양한 형상의 단면을 계획할 수 있다.
- 케이싱 콘크리트에 의해 피복이 확보되어 내화 작업량을 줄일 수 있다.
- 보의 무게중심이 낮아 전도 위험성이 낮다.

2.3 Precom 거더의 시공

Precom 거더는 토목 교량에서는 이미 상당량의 실적을 보유하고 있다. 대표적인 건축 구조물 적용사례는 광명에 위치한 물류창고로 제작 및 시공과정은 아래와 같다.

상기 건물은 경기도 광명에 위치한 L 물류센터로 현재 사용 중에 있다. 지하 1층, 지상 6층, 연면적 52,827.02m²의 규모를 가지고 있으며, 그림 3에서와 같이 21.5m 장스팬 구

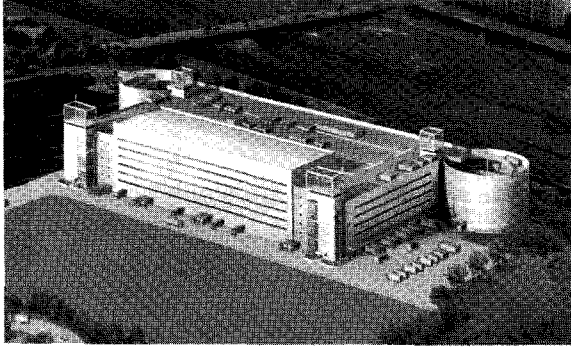


그림 2 광명 L 물류센터

간이 존재한다. 해당 구간은 그림 3에 표시된 바와 같이 차량이 통행하는 구간으로 높은 활하중(12kN/m²)이 작용한다. 이 때문에 일반 철골 구조를 적용할 경우 비효율적으로 큰 Built-up 부재 또는 큰 춤의 트러스가 요구되어 경제성이 저하된다.

이에 대한 대안으로 Precom 거더가 적용되었으며, 단면형상은 표 2와 같다. 각 부재는 케이싱 콘크리트에 인장응력이 발생하지 않는 full prestressing으로 설계되었다.

Precom 거더의 제작 및 설치 전경은 사진 1과 같다. 부재 제작 후 적정 콘크리트 강도 발현 뒤 공장에서 긴장력이 도입된 이후 현장으로 운반된다. pSG1 무게는 27톤으로 크롤러 크레인을 사용하여 설치되었다.

Precom 거더는 사진 2와 같이 일반 철골과 동일한 접합 방식을 사용하기 때문에 시공성 측면에서 유리하다.

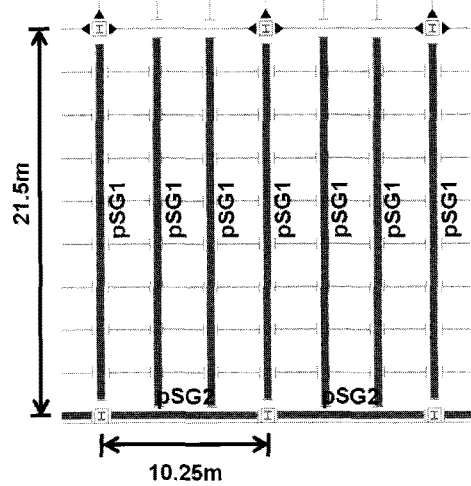


그림 4 구조평면

표 1 Precom 거더 단면형상

	pSG1	pSG2
Section		
Depth	1.8m	1.8m
Strand	ø15.2mm×12EA×4	ø15.2mm×9EA×4

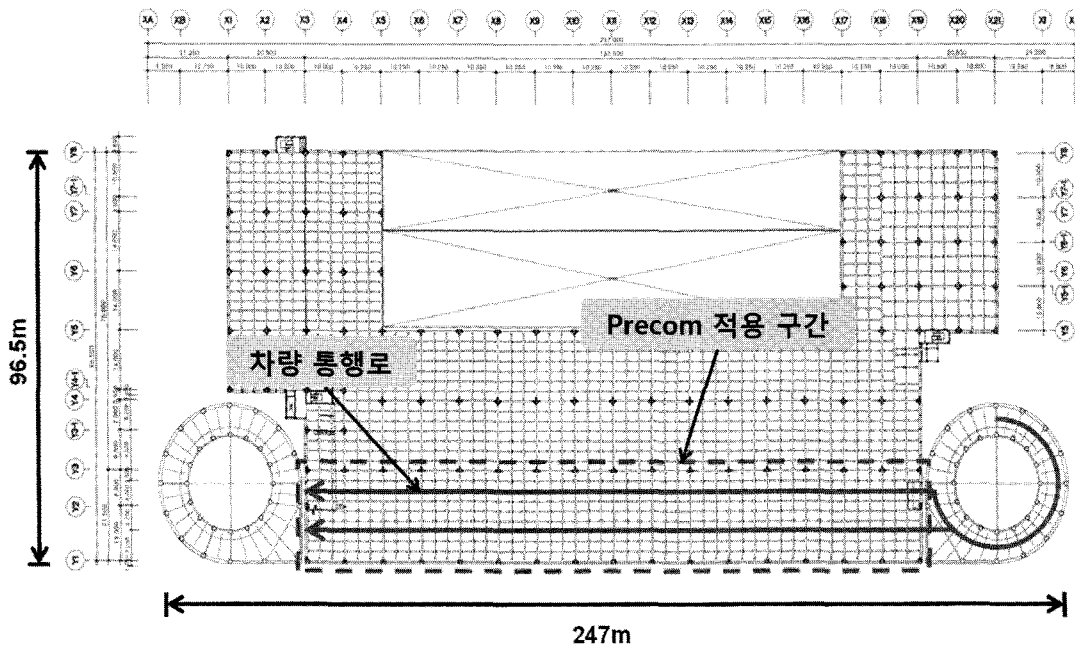


그림 3 Precom 적용구간

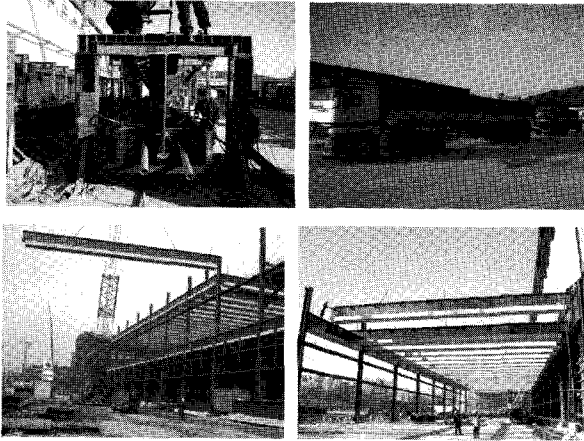


사진 1 Precom 거더의 제작 및 설치

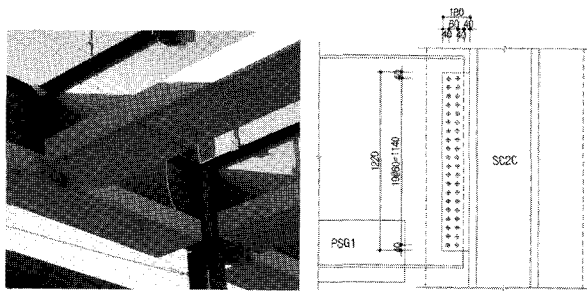


사진 2 Precom 거더의 전단 접합 상세



사진 3 시공 전경

3. MFD 합성거더

3.1 개요

Multi-Functional Diaphragm (이하 MFD) 합성거더는 교량에 적용되던 기존 SCP(Steel Confined Prestressed Concrete Girder) 합성거더를 건축용으로 발전시킨 시스템이다.

SCP 합성거더는 강판으로 I형 거더 형상을 제작한 후 내

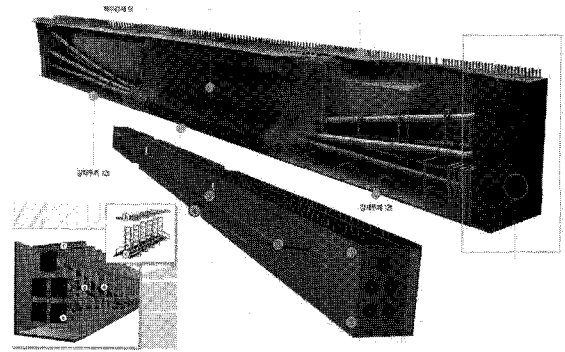


그림 5 SCP 합성거더

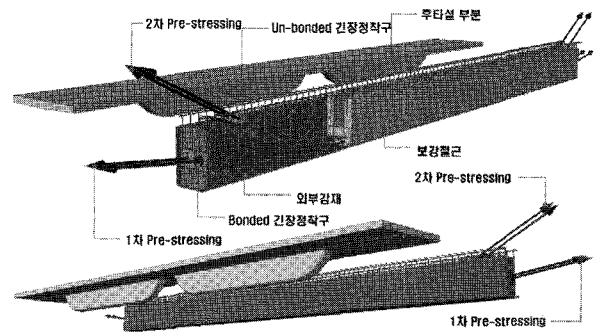


그림 6 MFD 합성거더

부에 쉬스관을 배치하고 콘크리트를 타설 한 후 긴장력을 가하는 시스템이다. 강재와 콘크리트가 합성됨으로써 타 공법에 비해 장스팬 구현이 유리하며 철근 및 거푸집 작업량이 절감되어 시공성과 경제성이 향상된다.

MFD 합성거더는 위와 같은 특성을 그대로 살려 건축 현장에 적합하게 변형한 시스템으로 기본 형상은 그림 6과 같다.

3.2 MFD 합성거더의 특징

MFD 합성거더의 구성과 특징을 살펴보면 그림 7과 같다. 이러한 공장 제작 부재는 운반과 양증이 시공성에 중요한 요소로 작용한다. 운반 및 양중 중량을 최소화하기 위해 공장 제작 부분을 U형 단면으로 제작하고 후타설 부분과는 전단 철근으로 일체화시킨다. 또한 초기에 필요 긴장력 전체가 도입될 경우 지나친 수축이 발생하여 비경제적인 단면으로 설계되기 때문에 긴장재를 2단계로 나누어서 1차 긴장재는 U형 단면 경화후, 2차 긴장재는 슬래브 타설 후 긴장하는 방식이 적용되었다. 이와 같이 시공단계에 따라 긴장력을 구분하여 작용시킬 수 있기 때문에 보다 효율적인 단면 설계가 가능하다. 외부 강판은 거푸집 역할을 함과 동시에 전단 및 휨내력에도 기여한다.

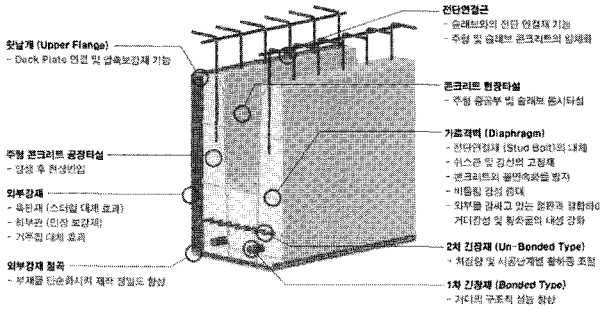


그림 7 MFD 합성거더의 구성

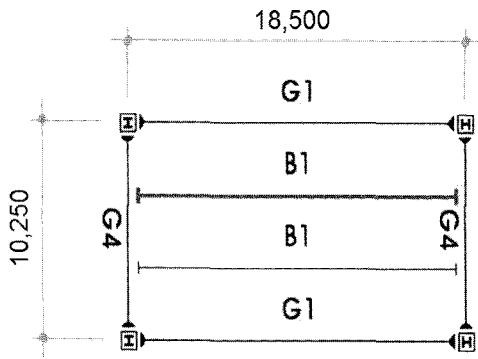


그림 8 휨 실험체 설계 대상 평면

3.3 MFD 합성거더의 구조 실험

MFD 합성거더는 외부 강재의 구속 효과에 의해 내력이 상승하게 된다. 이 효과를 검증하기 위해 휨내력 실험을 수행하였다.

강재에 의한 효과를 알아보기 위해 동일한 크기의 부재를 대상으로 강재 유무와 압축철근의 양을 변수로 3개의 실험체를 제작하였다. 실험체 1번은 건축설계기준에 따라 휨철근이 배근되었으며 실험체 2, 3번은 인장 철근이 배근되지 않았다.

외부 강재 중 하부 플랜지에 해당하는 부분은 휨내력에 기여하는 것으로 설계하였으며, 강재와 콘크리트의 일체화는 강연선을 지지하는 간격재 및 재료 간의 마찰 등으로 이루어지는 것으로 가정하였다.

표 3 MFD 합성거더 휨 실험체

	No. 1	No. 2	No. 3
부재크기	650mm × 1,200mm		
강재유무	무	유	유
압축철근	50%	100%	50%
강연선	$\phi 15.2\text{mm} \times 8\text{EA}$ (Unbonded) $\phi 15.2\text{mm} \times 7\text{EA} \times 2$ (Bonded)		
콘크리트	30MPa(거더), 24MPa(슬래브)		
강재	SS400 (t=6mm)		
슬래브	150mm		
설계하중	SDL=7.11kN/m ² , LL=10.0kN/m ²		

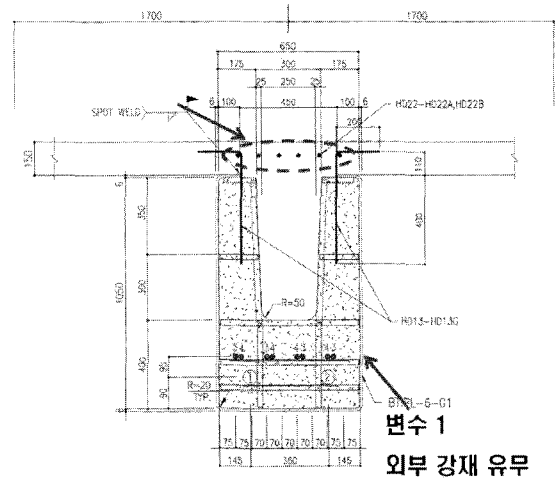


그림 9 휨 실험체 형상

표 4 MFD 합성거더 휨 실험체 내력

(단위 : kN·m)

	No. 1	No. 2	No. 3
Mu	4,203	4,281	4,281
ϕMn	4,465	5,083	4,928
응력비	0.94	0.84	0.87

각 실험체의 휨내력은 표 4와 같다.

실험체 제작 과정은 표 5와 같으며 모든 실험체는 공장에서 제작되어 운반되었다.

슬래브를 제외한 사각형 단면의 무게(강재 포함)는 약

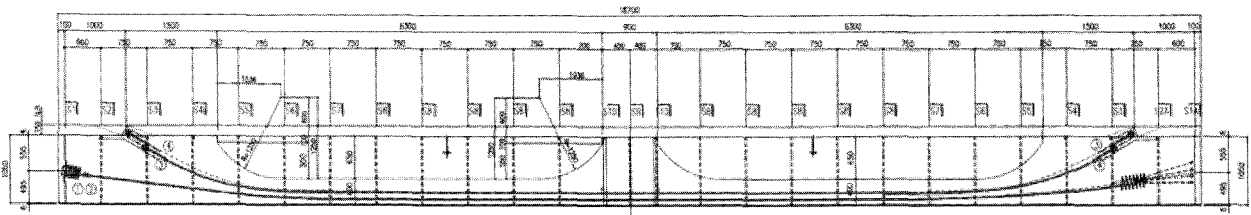


그림 10 휨 실험체 단면도

표 5 실험체 제작 과정

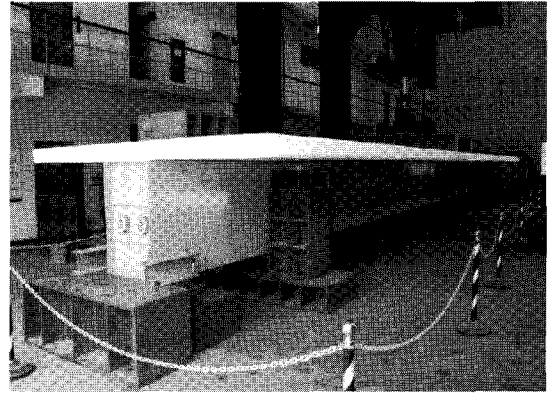


사진 4 힘 실험체 전경

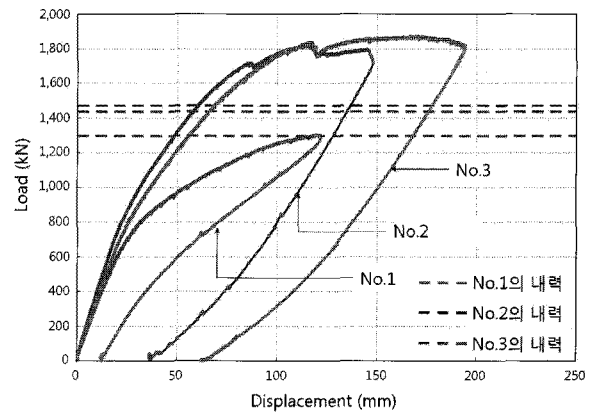


그림 11 힘 실험체 하중-변위 곡선

표 6 MFD 합성거더 힘 실험체 내력

(단위 : kN,mm)

No	실험 결과		설계 내력 (B)	A/B
	최대 하중(A)	처짐		
1	1,298.8	120.0	1,295.3	1.00
2	1,819.2	114.5	1,470.0	1.24
3	1,868.0	171.0	1,434.8	1.30

28.7톤이며 U형 단면에 의해 감소되는 무게는 약 4.3톤이다. U형 단면은 운반 시 자중 절감뿐만 아니라 콘크리트 간의 일체화 거동에도 긍정적인 영향을 끼친다. 향후 추가적인 연구를 통해 최적의 U형 단면 비율을 도출해 낼 예정이다.

하중은 사진 4와 같이 스패 중앙에서 집중하중으로 2점 가력하였고, 이에 대한 각 실험체의 하중-변위 곡선은 그림 11과 같다.

MFD 합성거더인 실험체 2, 3번이 순수 PSC인 실험체 1번의 내력에 비해 약 1.4배 이상 우수한 것으로 나타났다(표 6). 다만 실험체 1번은 안전상의 이유로 실험을 조기에 종료하였기 때문에 최대 하중이 부재 내력에 비해 약간 여유가 있는 것으로 판단된다. 이는 하중-변위 곡선의 복원양상이 탄성적인 거동을 보이고, 영구변위가 12.35mm로 전체 변위의 10.29%에 불과한 것으로 판단할 때 대부분의 강연

선들은 극한상태까지 도달하지 않은 것으로 사료되기 때문이다. 실험체 1번은 하중이 956.4kN 작용 시 하부 인장 철근이 항복하였으며, 실험체 2, 3번은 각각 1,503.0kN, 1618.6N에서 하부 강재가 항복하였다.

실험체 2, 3번은 압축 철근비를 각각 100%, 50% 적용한 것으로 실험체 2번이 더 높은 내력을 보일 것으로 예상되었다. 그러나 슬래브 콘크리트 강도가 예상보다 높았고 내력산정 시 고려하지 않은 외부 강재의 구속효과 등에 의해 압축철근의 유무의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 해석 결과 산정내력에 비하여 1.24배 ~ 1.30배의 우수한 휨성능을 보였다.

휨 실험 결과를 분석한 결과 MFD 합성거더는 일반 PSC(Prestressed Concrete)에 비해 높은 성능을 보이며, 외부

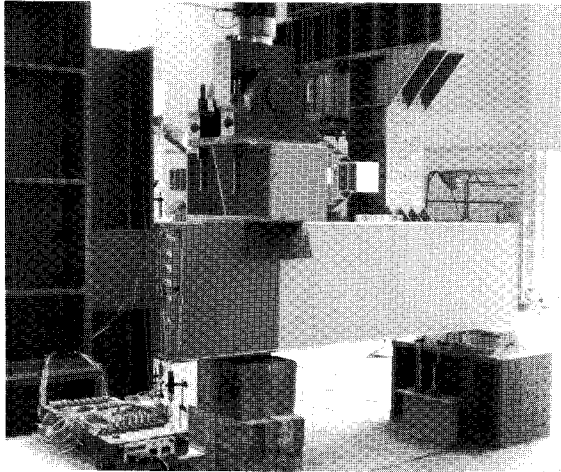


사진 5 전단 접합 실험체 전경

강재에 의한 콘크리트 구속 효과에 의해 구조계산 결과보다 높은 강도를 나타낸다.

현재 전단 접합부 실험을 수행하였으며, 시험 시공을 통해 시공성 및 경제성을 검증할 예정이다.


4. 결 언

최근 건축구조에서도 평면의 다변화 및 공간 활용도의 향상을 위해 장스팬의 구조물을 요구하는 경우가 증가하고 있는데, 기존 철골 구조는 적용 시 경제성, 시공성 및 사용성 측면에서 한계가 있다. 이러한 배경 하에 토목구조에 적용되던 여러 공법들이 점차적으로 건축구조에도 적용되고 있지만 건축구조에 최적화된 장스팬 합성보 공법은 전무한 상태이다.

여기에서는 최근 주목을 받고 있는 건축 장스팬 구조용 합성 거더들을 소개하였다. 해당 시스템들은 모두 토목구조에서 활용되는 공법을 건축현장에 적합하도록 변형시킨 것으로 이와 같이 검증된 시스템을 수정하여 건축시장에 적용하는 것이 시간적·경제적으로 효율적이라고 볼 수 있다.

앞의 공법들이 앞으로도 지속적인 연구·개발을 통해 보다 최적화된 시스템으로 발전하여 건축 장스팬 구조의 효과적인 대안으로 자리매김하길 기대한다.

참 고 문 헌

1. 김정호 외 3인, 강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 정적 및 피로거동, 한국강구조학회지 논문집 제16권 6호, pp.725~736. 2004. 12
2. 김정호 외 4인, 강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 개발을 위한 실험연구, 한국강구조학회지 논문집 제14권 5호, pp.593~602. 2002. 10
3. 엄영호 외 4인, I형상의 강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더 시공기술(SCP합성거더), 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집 Vol.15 No.1, pp.601~608. 2003.
4. 김충언 외 2인, Precom거더(강재거더의 역할을 중심으로), 한국강구조학회지 제20권 3호, pp.33~37. 2008. 9 

[담당 : 김명한, 편집위원]