

# 지하층 HCS 구조시스템의 거동에 따른 설계방법의 고찰

## Consideration of the Design Methods for Underground HCS System

김혜민\*      김승훈\*\*      김종수\*\*\*      이리형\*\*\*\*  
Kim, Hye-Min   Kim, Seung-Hun   Kim, Jong-Soo   Lee, Li-Hyung

### ABSTRACT

This paper presents the consideration of design guideline for underground HCS system, composite spancrete slab, under axial and bending force. Serviceability design requirements for continuous composite spancrete slab subjected axial force, which are allowable stress and deflection, are compared. Flexural strengths are evaluated by design guideline using strain-compatibility method. The results showed that stresses of spancrete and topping concrete, especially at the ends of beam, have much effect on design loads. Maximum service loads for tested specimens are proposed by allowable stress.

#### 1. 서론

스판크리트 합성판 (composit spancrete slab)은 HCS(Hollow Core Slab)의 일종인 I형 Girder가 연속적으로 배치된 형상의 스파크리트 표면에 원형 또는 사각형 커터 (cotter)로 수평전단키를 설치하여 현장 타설 콘크리트가 타설되면 일체가 되어 합성단면으로 사용하중에 저항하는 합성형 PC HCS이다. 이러한 스파크리트 합성판은 일반 스파크리트와는 달리 현장 타설부위에 상부 인장철근을 배근하여 단부 지점을 강절점으로 할 수 있기 때문에 장경간이 가능하고 특히, 처짐, 진동 제어 성능이 좋다. 따라서 스파크리트 합성판은 장스팬, 고하중을 받는 대형 구조물과 아파트 지하 주차장, 처짐 및 진동 등에 주의를 요하는 구조물 등에 사용이 확대되고 있다.

스판크리트 합성판은 94% 이상의 용력을 1방향으로만 전달하는 1방향 슬래브로서 길이방향으로는 보가 설치되지 않고 있다. 그러므로 지하층에 스파크리트 합성판을 적용할 경우 토압 및 수압에 의한 압축력이 직접 슬래브에 전달되게 된다. 압축력이 커질 경우 길이 방향으로 보가 없고 상대적으로 얇은 스파크리트 합성판은 압축력에 의한 좌굴 및 취성파괴 등 구조적으로 불리할 수 있다.

미국 및 일본을 중심으로 HCS에 대한 연구가 많이 이루어졌으며, 지하층의 압축력을 고려한 플랫 슬래브 거동에 대한 연구도 최근 진행되고 있는 실정이다. 하지만 HCS의 지하층 적용에 관한 연구는 본 연구자들이 최근 진행한 압축력에 따른 스파크리트 합성판의 휨성능 실험결과<sup>1)</sup>만 있는 상태로 아직 미비한 편이다.

\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정  
\*\*\* 정회원, (주)CS구조 엔지니어링 대표이사

\*\* 정회원, LG건설(주) 기술본부 과장  
\*\*\*\* 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

이에 본 연구에서는 스파크리트 합성판을 사용한 지하층 HCS 구조시스템을 대상으로 실험결과를 토대로 압축력, 부재 종류, 부재 양단의 구속 조건 등에 따른 내력 및 변형에 관한 설계기준과 비교·고찰함으로써 지하층 적용을 위한 HCS 구조시스템의 설계방법 및 유의점을 제시하고자 한다.

## 2. 휨 실험 개요

압축력을 받는 스파크리트 합성판의 휨 성능 평가를 위해 진행하였던 실험체의 일람을 표 1에 나타내었다. 스파크리트 합성판의 폭 및 순경간은 각각 1.2 m와 8 m이다. 표 2는 실험체에 사용된 철근 및 강선의 재료 실험결과이다. 실험체에 사용된 콘크리트의 압축강도는 재료시험결과, 스파크리트의 경우 53.75MPa로 나타났으며, 덧침콘크리트는 26.52MPa로 평가되었다. 실험은 실험체의 양단에 압축력을 가하는 축방향을 제외한 수직방향으로 고정된 후 일정 압축력을 주고 보를 5등분하여 4점 수직하중을 점중 가력하였다. 수직하중이 가력됨에 따라 대부분의 실험체가 먼저 양단부에서 수직 휨균열이 발생하여 진행되다가 상부 인장철근이 항복하였고 이후 중앙부에서도 휨파괴가 진행되면서 최종 파괴되었다.

표 1 실험체 일람

실험체명	두께(mm)		스판크리트 내 강선 배근	덧침 콘크리트 내 상부 배근	축력 (kN)	비고
	스판크리트	덧침콘크리트				
H200-T100-C0	200	100	4-9.3mm 7연선, 6-12.7mm 7연선	7-D13@200	0	지상층
H200-T100-C1	200	100	4-9.3mm 7연선, 6-12.7mm 7연선	7-D13@200	911.4	지하4층
H200-T100-C2	200	100	4-9.3mm 7연선, 6-12.7mm 7연선	7-D13@200	1313.2	지하7층
H200-T100-C3	200	100	4-9.3mm 7연선, 6-12.7mm 7연선	7-D13@200	1640.5	지하4층(계수하중)
H200-T150-C0	200	150	4-9.3mm 7연선, 6-12.7mm 7연선	7-D13@200	0	지상층
H200-T150-C1	200	150	4-9.3mm 7연선, 6-12.7mm 7연선	7-D13@200	911.4	지하4층
H200-T150-C2	200	150	4-9.3mm 7연선, 6-12.7mm 7연선	7-D13@200	1313.2	지하7층
H200-T150-C3	200	150	4-9.3mm 7연선, 6-12.7mm 7연선	7-D13@200	1640.5	지하4층(계수하중)

표 2 철근 및 강선의 재료적 성질

구분	종류	공칭단면적 (mm <sup>2</sup> )	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
SWPR7A	9.3mm-7연선	51.61	2205.8	2005.2	2.00 × 10 <sup>5</sup>
SWPR7B	12.7mm-7연선	98.71	2402.05	2120.15	2.11 × 10 <sup>5</sup>
SD40	D13	126.7	530.2	860.2	2.02 × 10 <sup>5</sup>

## 3. 압축력에 따른 스파크리트 합성판 설계기준 검토

### 3.1 허용응력

스판크리트 합성판은 단부와 중앙부의 스파크리트와 덧침콘크리트의 연단에 작용하는 응력이 틀려지게 된다. 특히, 연단 연속지지된 슬래브. 단부의 경우, 프리스트레스에 의한 응력 외에 덧침콘크리트가 양생된 이후의 고정하중과 활하중, 압축력에 의한 횡하중에 의해서 추가적인 응력을 받게 되므로 이에 따른 기준의 허용응력을 검토할 필요가 있다. 표 3은 각 실험체에 대해서 사용하중시의 허용압축응력을 만족하기 위한 수직하중(덧침콘크리트가 양생된 이후의 고정하중과 활하중)을 나타내었다. 여기에서 허용응력은 ACI318 기준<sup>2)</sup>을 적용하였으며,  $\sigma_{cs}$ ,  $\sigma_{cs}$ 는 각각 덧침콘크리트의 허용압축응력과 허용인장응력을 나타낸 것이고,  $\sigma_{cs}$ ,  $\sigma_{cs}$ 는 각각 스파크리트의 허용압축응력과 허용인장응력을 나타낸 것이다. 표에서 압축력이 커질 수록 허용수직하중이 커짐을 알 수 있으며, 허용수직하중이 지하 4층 의

압축력에 대해서는 스판크리트 상부면의 허용인장응력에 의해 결정되었고 지하 7층 및 지하 4층 하중 계수를 적용한 압축력에 대해서는 스판크리트 하부면의 허용압축응력에 의해 결정되었다.

표 3 허용응력을 만족하기 위한 수직하중

실험체명	${}_{ac}\sigma_t$ (MPa)	${}_{at}\sigma_t$ (MPa)	${}_{ac}\sigma_s$ (MPa)	${}_{at}\sigma_s$ (MPa)	$\sigma_{\#}$ (MPa)	$\sigma_{tb}$ (MPa)	$\sigma_{at}$ (MPa)	$\sigma_{ab}$ (MPa)	수직하중 (kN/m <sup>2</sup> )	비고
H200-T100-C0	-11.93	5.15	-24.19	7.33	0.00	0.00	3.83	-13.08	11.47	스판크리트 인장
H200-T100-C1	-11.93	5.15	-24.19	7.33	-3.34	-3.34	0.49	-16.42	22.4	스판크리트 인장
H200-T100-C2	-11.93	5.15	-24.19	7.33	-4.81	-4.81	-0.98	-17.89	20.62	스판크리트 압축
H200-T100-C3	-11.93	5.15	-24.19	7.33	-6.01	-6.01	-2.18	-19.09	16.70	스판크리트 압축
H200-T150-C0	-11.93	5.15	-24.19	7.33	0.00	0.00	3.83	-13.08	15.71	스판크리트 인장
H200-T150-C1	-11.93	5.15	-24.19	7.33	-2.79	-2.79	1.04	-15.87	28.22	스판크리트 인장
H200-T150-C2	-11.93	5.15	-24.19	7.33	-4.02	-4.02	-0.19	-17.10	31.81	스판크리트 압축
H200-T150-C3	-11.93	5.15	-24.19	7.33	-5.02	-5.02	-1.19	-18.10	27.31	스판크리트 압축

### 3.2 면내전단

양단 연속된 스판크리트 합성판은 슬래브 단부에 작용하는 휨모멘트 및 전단력이 매우 크기 때문에 최종 파괴시 면내전단이 발생하지 않도록 유의해야 한다. 사각커터를 사용한 수평전단기에 대하여 기존의 직접 전단실험에 의한 부착전단강도는 2.58~2.97 MPa로 평가되고 있다. 모든 실험체에 대한 실험 최대내력시 접합면에서의 전단응력을 평가한 결과 최대 전단응력이 1.04 MPa로 나타나 부착전단 강도에 비해 적게 평가되어 면내전단파괴가 일어나지 않는다.

### 3.3 최대휨강도

프리스트레스 콘크리트 휨부재의 설계휨강도는 철근콘크리트 부재와 유사한 강도식을 사용하여 구하고 있으며, 단지 프리스트레싱 긴장재의 응력을 항복강도 대신 공칭강도  $f_p$  발휘시 프리스트레스 보강재의 인장응력  $f_{ps}$ 으로 사용하고 있다.  $f_{ps}$ 는 변형도 적합조건을 기초로 계산될 수 있다. 표 4는 변형도 적합조건을 사용하여 단부의 공칭휨강도  ${}_mM_n$ 와 중앙부 공칭휨강도  ${}_mM_n$ 를 구하고 단부가 휨항복에 의한 소성힌지가 발생한 후 중앙부가 휨파괴될 시의 실험 휨강도  ${}_mM_u$ 등을 비교하여 나타내었다. 표에서 나타나듯이 공칭휨강도가 실험휨강도를 안전측으로 평가하고 있기는 하지만 축력 효과가 휨강도에 미치는 영향을 명확히 예측하지 못하고 있는 것으로 나타나 이에 관한 추가적인 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

### 3.4 처짐

각 실험체에서 허용응력을 만족하는 최대 활하중시의 처짐, 그 하중에서 측정된 실험 처짐값, 최대 허용처짐 등을 비교하여 표 5에 나타내었다. 더불어 표 5에는 실험에서 단부의 휨항복시 실험처짐과 최대내력시의 처짐이 나타나있다. 압축력이 작용하는 실험체에 대하여 최대 사용하중시의 실험처짐값이 이론처짐에 비해 크게 나타나, 처짐의 평가에 압축력을 고려할 필요가 있는 것으로 나타났다. 하지만 기준의 최대허용처짐에 대해서는 모두 만족하고 있는 것으로 나타났다.

표 4 단면의 이론 휨강도와 실험 휨강도의 비교

실험체명	$P_y$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	프레임 자중 (kN)	실험체자중 (kN)	$M_n$ (kN·m)	${}_mM_n$ (kN·m)	${}_mM_t$ (kN·m)	${}_mM_t/{}_mM_n$
H200-T100-C0	309.4	309.4	54.2	55.6	-26.2	281.3	394.6	1.40
H200-T100-C1	356.4	356.4	54.2	55.6	-134.12	357.8	395.1	1.10
H200-T100-C2	378.3	378.3	54.2	55.6	-181.6	390.6	393.3	1.00
H200-T100-C3	407.9	407.9	54.2	55.6	-219.9	411.9	390.8	0.95
H200-T150-C0	434.8	434.8	54.2	66.9	-24.7	337.3	629.6	1.87
H200-T150-C1	486.8	486.8	54.2	66.9	-149.9	434.4	566.5	1.30
H200-T150-C2	556.4	556.4	54.2	66.9	-205.0	474.9	595.4	1.25
H200-T150-C3	592.6	592.6	54.2	66.9	-249.5	504.5	574.7	1.14

표 5 이론 처짐과 실험처짐의 비교

(단위 : mm)

실험체명	최대 사용하중시			단부 상부철근 항복시 실험처짐	최대실험하중시 처짐
	이론처짐	실험처짐	최대허용처짐		
H200-T100-C0	-0.2	1.7	22.2	28.6	155.61
H200-T100-C1	4.4	11.7	22.2	30.6	102.6
H200-T100-C2	3.7	10.7	22.2	31.3	84.3
H200-T100-C3	2.0	8.7	22.2	31.6	86.1
H200-T150-C0	9.4	10.7	22.2	21.8	141.8
H200-T150-C1	12.8	16.0	22.2	24.8	97.8
H200-T150-C2	13.8	18.0	22.2	26.8	95.8
H200-T150-C3	12.5	19.0	22.2	29.1	85.8

#### 4. 결론 및 향후 계획

본 연구는 스판크리트 합성판을 사용한 지하층에 적용하기 위하여 실험결과에 의한 압축력과 양단 연속지지에 따른 설계기준의 허용응력, 처짐, 내력 등을 비교 평가하였다. 연구결과, 압축력 및 양단연속지지를 고려할 경우 보 단부에서의 스판크리트와 덧침콘크리트의 허용응력이 사용하중 결정에 매우 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타나, 설계시에 유의하여야 할 것으로 나타났다. 사용하중시의 처짐과 극한하중시의 면내전단은 기준을 만족하고 있는 것으로 평가되었다. 향후, 추가적인 연구로 압축력에 따른 휨내력 및 처짐, 양단지지조건 및 단부의 휨성능이 미치는 영향 등에 따른 효율적인 설계 및 검토방법을 고찰하여, 경간에 따른 설계사용하중을 제시할 것이다.

#### 참고문헌

1. 강원석, 김승훈, 이리형, 김용남, 김종수, "압축력과 휨을 받는 Hollow Core Slab의 구조적 거동에 관한 연구", 대한건축학회추계학술발표대회논문집, Vol. 23, No. 2, 2003. 10, pp. 43-46.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", American Concrete Institute, 2002.
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준해설", 2003.