

고성능 중공슬래브의 휨 실험

Flexural Tests of High Performance Hollow Core Slabs

박 현 석* 김 인 규* 조 영 모** 유 승 룡***
Park, Hyun Suk* Kim, In Gyu* Jo, Young Mo** Yu, Sung Yong***

ABSTRACT

Hollow core slabs generally have not been used for a bridge slab or a parking in Korea. In this study, high performance hollow core slabs, which has been the most thick one in domestic are re-designed and examined for practical use. Flexural tests were performed on four 315mm deep hollow core slabs to investigate adaptability for high vehicle live loadings and composite action with topping concrete. The precast slabs were reinforced with 10-1/2 inch dia-strands at the lower of slab and 4-1/2 inch dia-strands at the upper of slab, and cast with 80mm deep topping concrete. Those tested hollow core slabs showed ductile failure behaviors which were conform to the current Ultimate Strength Design Method for a span of 10m up to the live load of 1,000 kg/m².

1. 서 론

중공슬래브는 국내에서 교량이나 주차장 슬래브용으로 활용된 적은 거의 없었다. 본 연구에서는 국내 생산성이 있는 고성능 중공슬래브를 설계하고, 차량하중 등에 대한 적용성을 실험하였다. 중공슬래브의 경우 비용 등으로 인한 이유로 정해진 물드를 하중에 따라 변경하는 것은 불가능하므로 강선수를 조절하여 생산하게 된다. 이 경우 캠버에 의한 상부 인장균열을 제어하기 위하여 상부강선을 삽입하는 경우가 일반적이다.

국내규준의 주차장 활하중 1,000kgf/m²을 고려하여 설계하였고, 국내 최대 깊이 315mm 고성능 중공슬래브에 대하여 12.7mm 직경 하부강선 10개와 상부강선을 4개 배근한 중공슬래브에 80mm 토폰콘크리트를 타설한 실물크기 중공 슬래브에 대한 휨실험을 실시하여, 휨강도의 적정치를 실험하였다.

프리캐스트 중공슬래브는 일반적으로 강도 400kgf/cm²이상의 제로 슬럼프 콘크리트를 사용하는 관 계로 타설 직후 굳어버린다. 따라서, 프리캐스트와 토폰콘크리트의 일체화된 합성작용을 위하여 슬래브 상부에 기계적 전단키를 타설과 동시에 생성시킨다. 이 전단키의 모양은 생산의 효율성과 사용하중 하의 합성작용을 위하여 주요한 구조적 변수로 생각할 수 있다. 본 연구에서 생산성과 기능성을 고려하여 기존의 원형 전단키를 변형한 직사각형 전단키를 적용하였다(그림 1 참조). 실험에서 휨 파괴시 보 단부 수평접합부에서 미세균열 발생 여부로 이 전단키의 성능을 파악하였다.

2. 변형률 적합조건에 의한 휨설계

2.1 개 요

변형률 적합조건(Strain Compatibility Method)은 Bernoulli의 평면 보전의 법칙에서 변형도는 중립축으로부터 거리에 비례한다는 원리와 철근과 콘크리트의 변형도는 같다는 가정에서 시작하여, 철근콘

* 정회원, 동국대학교 대학원 석사과정
** 정회원, (주) 강남건영 부장
*** 정회원, 동국대학교 건축공학과 교수

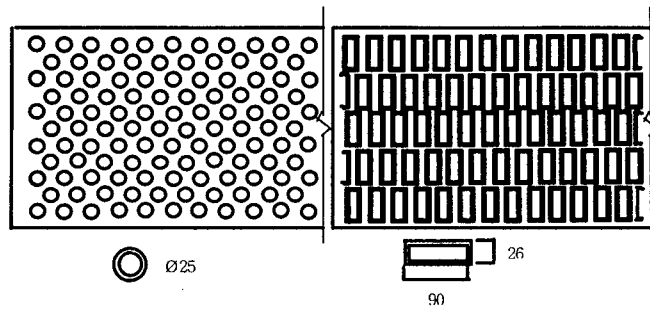


그림 1 원형 전단키와 직사각형 전단키(단위 : mm)

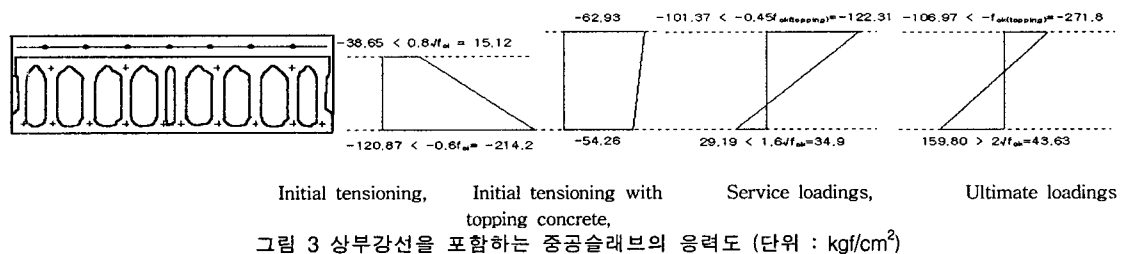
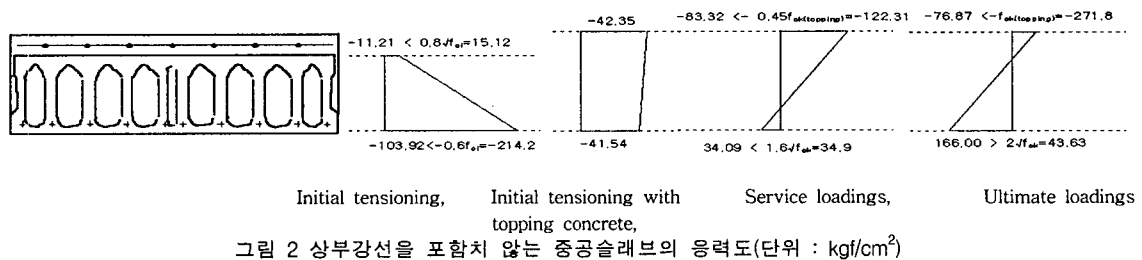
크리트 구조물의 허용응력 설계와 극한강도 설계에 기본 원리로 적용되었다. 프리스트레스트 구조물에서도 동일한 원리에 의하여 적용되며, 중립축의 깊이산정에 효율적으로 활용될 수 있다.

2.2 설계과정

압축강선을 동반한 중공슬래브의 강도산정을 위하여, 먼저 중립축 위치를 구하는 것이 요구된다. 따라서 변형을 적합조건에 의한 중립축 산정절차는, 1)중립축의 위치를 가정하고 이 가정을 통해 압축영역과 인장영역을 구분한다. 2)압축영역에 존재하는 모든 힘에 대한 변형과 인장영역에 존재하는 모든 힘에 대한 변형을 각각 산정해 이 변형으로부터 압축영역의 힘을 합산하고 마찬가지로 인장영역의 힘을 합산한다. 이렇게 산정한 압축과 인장영역에 가해지는 힘이 같다면 최종적인 3)공칭강도를 산정하고, 다르다면 중립축의 위치를 재 가정하여 2)의 과정을 반복한다.

2.3 설계결과 분석

그림 2에서 상부 강선을 포함치않은 10개의 하부 강선 긴장력에 의한 캠버가 발생할 때, 초기 긴장력과 자중에 의한 프리캐스트 슬래브에 응력상태를 해석결과로 표현하였다. 이 경우 긴장력 편심에 의한 휨모멘트는 슬래브 상부에 인장응력을 발생하게 되어, 프리캐스트 슬래브 자중과 긴장력에 의한 캠버는 발생하지만 슬래브 상단에 여전히 압축응력 11.21kgf/cm²이 발생하므로 12.7mm직경 하부강선 10개 배근으로 인한 과도 긴장력으로 생산시 상부 인장균열은 발생하지 않는 것으로 해석되었다. 토핑콘크리트를 타설 후 부재 조립단계(election)에서 하부 압축응력은 정모멘트에 의하여 더욱 완화되며, 1tonf/m²의 적재하중 적용시, 그림 3의 상부강선을 포함치 않는 합성슬래브의 사용하중하의 응력도에



서 하부인장강도가 $1.6\sqrt{f_{ck}} = 34.9 \text{ kgf/cm}^2$ 에 근사한 34.09kgf/cm^2 로 발생하므로 콘크리트 강도의 미소한 부실이라도 사용하중하에서 균열이 발생할 수 있으며, 이 단면으로서는 하부 강선 10개가 담당할 수 있는 최대의 긴장력이라 할 수 있다. 그림 3의 상부 강선을 포함할 경우 합성슬래브의 사용하중하의 응력도에서는 상부 강선을 사용하여 하부 인장강도를 $29.19\text{kgf/cm}^2 < 1.6\sqrt{f_{ck}}=34.9\text{kgf/cm}^2$ 와 같이 저하시킬 수 있으므로 상부강선을 사용하는 것은 이러한 관점에서 활용될 수 있다. 중국강도면에서, 해석결과와 휨내력은 상부에 강선이 배근되지 않은 부재에 비해 $1\text{tonf}\cdot\text{m}$ 정도의 미세한 내력 상승을 보일 뿐이다. 본 연구에서 변형도 적합방식에 의하여 상부 압축력의 합과 하부 인장력의 합이 일치되는 점에서 중립축 C를 추적하였다. 중국 하중하에서 그림 2와 그림 3을 참조하면 중립축은 하부 콘크리트의 파괴로 상단으로 이동되며, 상부강선은 여전히 압축존에 위치하지만 팔길이가 거의 미소하므로 미소한 강도 증가만 기대할 수 있다.

3. 실험체 제작

3.1 재료

3.1.1 강재

PS강선은 국내생산 저이완률(Low-relaxation)의, 직경 12.7mm 270 Gr. 7연강선으로, 국내 제조업체 K사의 것을 사용하여 유공 유압잭으로 12.5tonf을 긴장하였다. 토핑콘크리트에 사용되는 일반 철근은 항복강도 $2,800 \text{ kgf/cm}^2$ D10 이형철근을 사용하였다.

3.1.2 콘크리트

본 실험에서 프리캐스트 중공슬래브 콘크리트는 400kgf/cm^2 , 토핑 콘크리트는 270kgf/cm^2 의 목표강도에 도달 할 때, 실험을 실시하였다. 프리캐스트 시험체와 토핑콘크리트의 배합표는 표 1, 2와 같다. 프리캐스트 시험체와 토핑콘크리트 시험체는 각각 10개의 표준 공시체를 제작하였다. 공시체는 실험체와 동일한 조건에서 양생되었으며, 실험당일 2개씩 사용하여 그 평균값을 표 3과 같이 기입하였다. 중공슬래브와 토핑콘크리트의 압축강도는 평균 475.25kgf/cm^2 와 272kgf/cm^2 으로 초기 목표강도를 상회하여 실험되었다.

3.2 프리캐스트 시험체 제작

각 시험체 표기와 강선배근 전단키는 표 4와 같다. 프리캐스트 콘크리트가 일정강도로 경화한 후, 프리캐스트 슬래브 상부에는 장변방향으로 D10 철근을 15cm 간격으로 배근하였고, 단변방향은 D10 철근을 30cm 간격으로 배근한 후 토핑콘크리트를 타설하여 일체화시켰다. 시험체 단면은 그림 4와 같고, 철근 스트레인 게이지는 그림 5와 같이 토핑콘크리트 중앙부 철근에 ①,②,③과 같이 부착하였다.

표 1 콘크리트 배합표 (I)

콘크리트	골재 최대 입경(mm)	슬럼프 (cm)	간골재 비율(%)	물시멘트 비(%)
중공슬래브	19	non	61.1	34.4
토핑콘크리트	19	8	40	48

표 2 콘크리트 배합표 (II)

콘크리트	단위수 량 (kgf/m^3)	단위시 멘트 (kgf/m^3)	단위굵은 골재량 (kgf/m^3)	단위잔 골재량 (kgf/m^3)	단위 혼화재량 (kgf/m^3)
중공슬래브	156	453	700	1,100	4
토핑콘크리트	160	333	1,155	743	0

표 4 휨 시험체 배근

시험체	배근	스팬	전단키
H-1	상부 4-7×12.7mm dia, 하부 10-7×12.7mm dia,	10m	원형
H-2	상부 4-7×12.7mm dia, 하부 10-7×12.7mm dia,	10m	직사각형
H-3	상부 4-7×12.7mm dia, 하부 10-7×12.7mm dia,	10m	원형
H-4	상부 4-7×12.7mm dia, 하부 10-7×12.7mm dia,	10m	직사각형

표 3 중공 슬래브와 토핑콘크리트 압축강도

시험체	H-1	H-2	H-3	H-4	평균
중공슬래브 $f_{ck}(\text{kgf/cm}^2)$	472	476	481	472	475.25
토핑콘크리트 $f_{ck}(\text{kgf/cm}^2)$	267	271	279	271	272

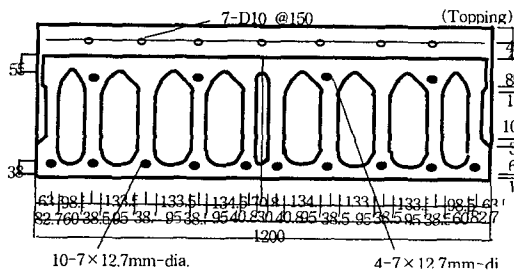


그림 4 시험체 단면(4-12.7mm, 강선 상부배근, 10-12.7mm, 강선 하부배근)

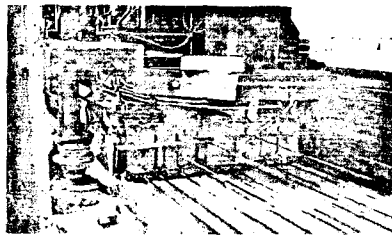


그림 6 중공슬래브의 타설시 강선배근

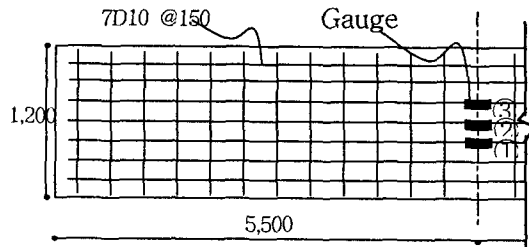


그림 5 휨 시험체 토평 배근 및 게이지 부착도

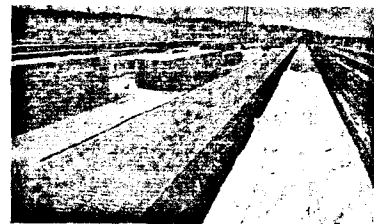


그림 7 콘크리트 타설후 수평전단키

시험체는 10m Span, 깊이 315mm의 중공슬래브에 80mm의 토평콘크리트를 타설한 시험체 4개를 제작하였다. Long Line Method에 의한 중공슬래브의 타설과 수평전단키 생산은 그림 6, 7과 같다.

4. 실험

10m 스패ن 4개의 시험체에 대하여 각각 휨시험 1회를 실시하였다. 순수 휨강도를 산출하기 위하여, 4포인트 하중시험을 실시하여 전단력이 0이 되는 지역에서 일정한 최대 휨응력 값을 구할 수 있도록 실시하였다. 시험체는 타워크레인을 사용하여, 양단 단순지지로 놓여졌고, 양단 플랜지 상부에, 수평레벨을 맞추어, 오차 ±5mm이하가 되도록 조절하였다. 단부 끝에서 50cm 들어온 지점에 지지점을 위치시켰다. UTM의 하중 면에 로드셀을 설치하여 데이터로거로 하중을 기록하였고 로드셀 아래의 가력보는 단순지지되어, 시험체위 2개의 H-형강 중심간격이 150cm가 되게 설치하였다.

5. 실험결과 및 분석

5.1 실험개요

본 연구에서, 압축강선의 배근에 따른 시험체의 휨거동을 분석하려하며, 제안된 전단키에 대하여 그 적정성을 평가하려하였다.

표 5 중공슬래브의 휨강도

시험체명	중공슬래브 압축강도 $f_{ck}(kgf/cm^2)$	토평콘크리트 $f_{ck}(kgf/cm^2)$	사용하중작용시			최종파괴시		
			①이론 $M_c(tf \cdot m)$	②실험초기 균열강도($tf \cdot m$)	②실험/ ①이론	③공칭강도 ($tf \cdot m$)	④실험결과 ($tf \cdot m$)	④실험/ ③이론
H-1	472	267	31.12	32.62	1.05	55.09	62.40	1.13
H-2	476	271	31.12	32.83	1.05	55.09	63.49	1.15
H-3	481	279	31.60	33.47	1.06	56.03	61.32	1.09
H-4	472	271	31.60	34.32	1.09	56.03	63.85	1.14
평균	475.25	272	31.36	33.31	1.06	55.56	62.76	1.13

주) ①과 ③의 이론치는 Mathcad프로그램 부록1에 의하여 계산된 결과임
실험초기균열강도②와 실험결과④는 실험치에 자중에 의한 모멘트 9.237tf·m를 합산한 결과치임.

5.2 휨성능

슬래브 중국파괴시 강도설계 기준 공칭 휨강도 산정방법의 예측강도③에 대한 실험결과④의 비율은 표 5와 같이 그 비율이 평균 1.13으로 공칭강도를 13% 이상을 상회하여 파괴되었다. 실험 초기 균열강도는 평균 33.31 tonf·m로 설계 사용하중 1,000 kgf/m²일 때 보중앙 정모멘트는 18.14 tonf·m로, 이 슬래브는 설계 사용하중 1,000 kgf/m²에 대하여 충분히 적합한 것으로 평가할 수 있다. 초기균열 M_{cr}에 대한 실험치는 1.06으로 매우 근사한 예상치를 보여준다. 시험체는 중국하중까지 취성 파괴되지는 않았고, 처짐 증가시 하중이 증가되지 않거나 감소되는 시점을 표 5-④의 실험결과로 하였다.

5.3 처짐

강선절단시 실측한 보중앙 캠버는 표 6의 ②와 같고, 합성단면의 보중앙 캠버는 ④와 같다. 초기균열시 처짐⑥과 최종파괴시 실측처짐⑧은 ④의 캠버를 기준으로 실험에서 LVDT로 측정한 값이다. 이 과정에서, 실측한 캠버 ②와④는 강선을 긴장하여 측정하였으나 전장 11m에 대하여 몇 mm 정도의 미소한 실험오차가 발생 가능한 것으로 판단된다. 그러나, 초기 균열시 처짐⑥은 평균 2.422cm로 ACI 기준 최대허용처짐⑦ 3.968cm보다 작은 값에서 균열이 발생하였고, 균열 모멘트에 의한 예상치⑤ 4.459cm보다도 작은 값에서 초기 균열이 발생하였다. 실험과정에서 폭넓게 분포된 휨균열과 19.6cm이상의 처짐을 발생하며 슬래브는 중국 하중에 도달되었다. 처짐 증가시 하중이 증가되지 않거나 감소되는 시점⑧을 중국하중시 실측처짐으로 하였다. 모멘트-변위 곡선은 그림 8과 같다. 그림 8에서 보는바와 같이 일반적으로 보중앙에서 시험체의 처짐은 초기 균열발생 모멘트 32.62tonf·m에서 34.32tonf·m에 도달하기까지 매우 선형적인 양상을 보이나, 이 하중에서 균열이 발생한 후 처짐 양상은 비선형으로 급격한 증가를 보여주었다.

표 6 중공슬래브의 처짐

실험체명	f _{ci} (kgf/cm ²)	f _{ck} (kgf/cm ²)	강선절단시 보중앙캠버 (mm)		합성단면의 보중앙캠버 (mm)		초기 균열시처짐 shown(mm)		최대허용처짐⑦ L/360+△camber② (mm)	중국하중시 실측처짐⑧ (mm)
			이론①	실험②	이론③	실험④	이론⑤	실험⑥		
H-1	357	472	-9.12	-10	-7.74	-16	44.59	21.53	39.68	153.23
H-2	357	476	-9.12	-18	-7.74	-16	44.59	26.95	39.68	206.93
H-3	357	481	-9.12	-11	-7.74	-10	44.59	23	39.68	215.22
H-4	357	472	-9.12	-12	-7.74	-8	44.59	26.96	39.68	199.51
평균	357.00	475.25	-9.12	-12.75	-7.74	-12.5	44.59	24.22	39.68	196.35

5.4 실험체의 하중-철근 변형률 관계

그림 9의 H-1~H-4 시험체의 휨실험 결과에서 대부분의 철근이 항복 변형률 $1,400 \times 10^{-6}$ 을 상회하여 변형하였다. 단, H-4 시험체는 게이지 오류로 측정하지 못하였다. 1번과 3번 게이지의 변형률은 일정한 속도로 증가하여 철근의 거동을 확인할 수 있었다. 일반적으로, 중앙부 2번 게이지가 가장 많은 변형을 하는 것으로 측정되었다.

5.5 중공슬래브의 거동요약

이 실험에서 모든 시험체의 초기균열은 보중앙 가력부 하부에서 순수 휨균열로 시작되었다. H-1, H-2시험체의 가력 모멘트는 각각 32.62tonf·m, 32.83tonf·m에서, 그리고 H-3, H-4 시험체는 각각 33.47tonf·m, 34.32tonf·m에서 초기 균열이 시작되었으며 계산된 초기 균열강도를 상회하여 발생되었다. 초기균열시의 처짐은 21.53~26.96mm로 평균 24.22mm로 계측되었다. 모든 보의 균열확산방법은 유사하였으며, 평균 약 30cm간격으로 중앙에서 단부방향으로 폭넓은 새로운 휨균열이 계속 발생되었고, 가력을 증가시키자 단부부근의 휨균열은 휨·전단균열로 가력위치 방향으로 경사지게 발달하였다.

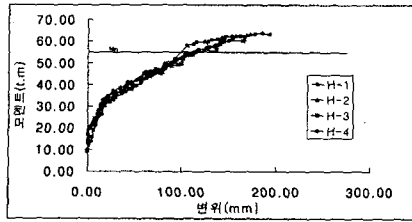


그림 8 시험체의 모멘트-변위 곡선

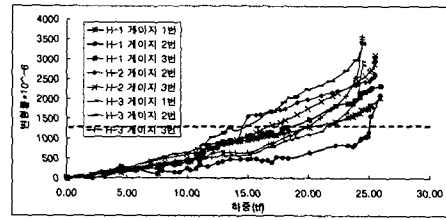


그림 9 시험체의 하중-변형률 곡선

하중계수 적용하중인 설계하중을 넘어서부터, 처음균열의 사이로 새로운 균열이 계속 발생되어 평균 균열간격은 약 15cm정도가 되며, 보 전체스팬에 넓게 분포되었다. 4개의 슬래브는 양 단부 지점근처 50cm 정도 거리까지 확산된 수십 개의 휨균열을 만들어낸 후 순수 인장파괴를 초래하였다. 프리스트레스트 콘크리트 중공슬래브는 철근콘크리트보 보다 매우 연성적이므로, 중국강도에서는 일반적으로 높은 처짐을 유발하며 파괴하였다.

본 실험에서 사용한 직사각형 모양의 수평 전단키와 원형 전단키는 모두 단부에서 균열이 발생하지 않았으므로(그림 10 참조), 두 종류의 키는 전단키로 충분한 내력을 발휘한 것으로 판단된다.

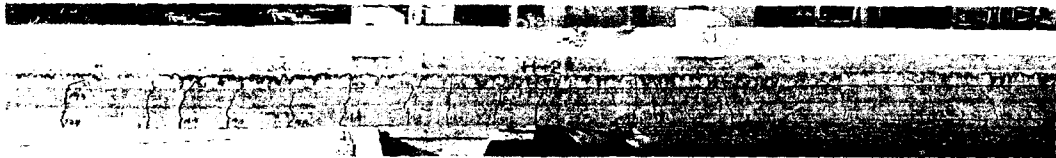


그림 10 휨 파괴 예 (H-2)

6. 결 론

본 연구에서, 국내 생산성이 있는 고성능 휨 재료써의 중공슬래브를 재 설계하고, 차량하중 등에 대한 적용성을 검토하였다. 국내 최대 깊이 315mm 고성능 중공슬래브에 대하여 12.7mm 슬래브 하부강선 10개와 상부강선을 4개 배근한 중공슬래브에 80mm 토폰콘크리트를 타설한 4개의 실험체에 휨실험을 실행하여, 차량 등을 위한 고하중에서의 활용성과 슬래브의 합성작용에 대한 검토를 병행하였다. 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 슬래브 중국파괴시 강도설계 기준 공칭 휨강도 산정방법의 예측강도에 대한 실험결과의 비율은 평균 1.13으로 공칭강도를 13% 이상 상회하여 파괴되었고, 강도설계에 적합한 연성적 파괴거동을 보여주었다. 또한, 이 슬래브는 스패น 10m에 대하여 설계활하중 1,000 kgf/m²까지 충분히 활용 가능한 것으로 판명되었다.

2. 본 연구에서 고려한 상부강선은 여전히 압축존에 위치하지만 팔길이가 거의 미소하므로 상부 강선이 배근되지 않은 슬래브 보다 1tf·m 정도의 미세한 내력 상승만 기대할 수 있다. 그러나, 상부강선을 포함치 않은 합성슬래브의 경우 1ton/m²의 적재하중 적용시, 사용하중하의 응력도에서 하부 인장강도, 34.09kgf/cm²가 강도설계기준, $1.6\sqrt{f_{ck}}=34.9\text{kgf/cm}^2$ 에 거의 유사하게 발생하므로 콘크리트 강도의 미소한 부실이라도 사용하중 하에서 균열이 발생할 수 있으며, 이 단면으로서는 하부 강선 10개가 담당할 수 있는 최대의 긴장력이라 할 수 있다. 그러나 상부 강선을 포함할 경우 하부 인장응력을 저하시킬 수 있으므로 상부강선을 사용하는 것은 이러한 관점에서 타당할 수 있다.

3. 본 실험에서 사용한 직사각형 전단키와 원형 전단키는 모두 단부에서 균열이 발생하지 않았으므로, 두 종류의 키는 전단키로 충분한 내력을 발휘한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. PCI Design Handbook, Fifth Edition, Prestressed Concrete Institut, Chicago, Illinois, 1999.
2. Tamon Ueda "Shear Strength of Precast Prestressed Hollow Slab with Concrete Topping" ACI Structural Journal, July-August 1991.