

포스트텐션된 3연속 스패 슬래브의 실험연구

Experimental Study on Post-tensioned 3-Continuous Span Slabs

임재형* 문정호** 이리형***
Lim Jae-Hyung Moon Jeong-Ho Lee Li-Hyung

ABSTRACT

The specimen of current study has the same type with the 3-span slabs of Burns et al used in the study by Mojtahedi/Gamble, which laid a ground for the revision of the ACI 318-77 code to the ACI 318-83 code. But those specimens was failed prematurely before it reached the ultimate strength which the specimen had. The reason is that bonded reinforcements were cut off where there is no need for the flexural reinforcement. As results, the slabs failed ultimately where the reinforcements was cut off. Thus, the tendon stresses of failure may have been much smaller than the values which could reach if the bonded reinforcements were extended beyond the theoretical cut off points. On the based on the fact mentioned above, the specimens which had the same conditions as the specimens of Burns et al were used in the current study, but in which the reinforcements were distributed in a sequence for the reinforcements not to be cut anywhere in the 3-span. As a results, it was known that the current ACI code, revised by the result of Mojtahedi/Gamble's study, overestimated the effect of span/depth ratio on the members with high span/depth ratio. Thus it was concluded that the effect of span/depth ratio on the ultimate stress of unbonded tendon regulated by the current ACI code must be reconsidered and reevaluated.

1. 서론

Mojtahedi/Gamble⁽⁴⁾은 Tie 모델에 의한 해석으로 스패/춤 비가 큰 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 ACI 318-77 규준에 의한 비부착 긴장재의 극한응력 평가방법은 긴장재의 응력을 과대평가할 수 있는 것으로 주장하였으며, ACI 318-77 규준식을 수정하는데 영향을 미쳤다. 그러나 본 연구자들이 제시한 수정된 Tie 모델의 해석결과⁽⁵⁾에서는 Mojtahedi/Gamble이 주장한 결과가 큰 스패/춤 비를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력을 과소평가할 수 있다는 사실을 알았다. 즉, 스패/춤 비의 효과가 과대평가되고 있음을 알 수 있었다. 또한 Mojtahedi/Gamble이 분석에 사용한 Burns 등의 실험결과⁽³⁾는 인장철근을 절단한 위치에서 조기에 파괴되었기 때문에 실험결과중에서 Δf_{ps} 가 과소평가되었을 가능성이 있다고 Burns 등이 보고하고 있다. 이에 대해 본 연구에서는 Mojtahedi/Gamble이 분석한 실험체중에서 Burns 등⁽³⁾이 실험한 3연속 스패의 슬래브 실험체에서 조기에 파괴된 원인을 제거하여 실험체를 제작하고 실험을 실시하여 Burns 등의 실험결과와 비교하고 스패/춤 비가 큰 경우에 대한 비부착 긴장재의 응력평가에 대해 분석하고자 한다.

* 정회원, (주) ALT구조 이사, 공박

** 정회원, 한남대 건축공학과 조교수, 공박

*** 정회원, 한양대 건축공학부 교수, 공박

2. 실험체 계획 및 제작

2.1 실험체 개요 및 설계

실험체로의 모델링을 위한 실제 대상건물 슬래브의 개요는 1개의 스패인 6m인 3연속 스패인의 슬래브로써 슬래브의 두께는 14cm이고, 슬래브의 폭은 2.8m이다. Prototype-A는 일반철근의 비가 현행 ACI 규준에서 규정하고 있는 0.2%보다 작은 0.12%로 배근되어 있고, 사용하중상태에서 콘크리트의 응력이 $0.53\sqrt{f'_c}$ kg/cm² ($6\sqrt{f'_c}$ psi)이며, Prototype-B는 일반철근의 비가 현행 ACI 규준에서 규정하고 있는 0.2%보다 큰 0.23%로 배근되어 있고, 사용하중상태에서 콘크리트의 응력이 $0.75\sqrt{f'_c}$ kg/cm² ($9\sqrt{f'_c}$ psi)이다.

본 연구의 실험체는 Prototype-A의 실험체로써 총 2개의 1방향 3연속 스패인의 슬래브이다. 실험을 위한 실험체는 대상건물의 유효프리스트레스에 의한 콘크리트의 응력과 긴장재 비, 일반철근 비에 대한 특성과 실험실 여건을 고려하여 약 1/2로 축소하였다. 긴장재는 1개 지름이 2.9mm인 강연선을 3가닥으로 꼬아서 만든 3연선 단일강연선(3-wire mono strand)으로 하였으며, 일반철근은 D6의 철근을 사용하였다. 본 연구의 실험체 일람과 상세를 표 1과 그림 1에 나타내었다.

2.2 Burns 등과 본 연구의 실험체의 차이

본 연구에서 사용된 실험체는 ACI 318-77 규준이 ACI 318-83 규준으로 수정될 수 있는 근거를 제시한 Mojtahedi/Gamble의 연구에 사용된 Burns 등의 3연속 스패인의 슬래브 실험체와 동일한 조건의 실험체이다. 그러나 Burns 등에 의해 실험된 실험체는 실험체가 보유하고 있는 극한내력에 도달하기 전에 조기에 파괴된 실험체라 할 수 있다. 이유는 그림 2에 나타난 바와 같이 이론적으로 인장철근이 더 이상 필요하지 않은 부분에서 인장철근을 절단하였기 때문이며, 그 결과로 실험체는 인장철근이 절단된 위치에서 콘크리트의 균열발생과 함께 최종파괴되는 결과를 보였다. 결과적으로 최대 휨모멘트가 발생하는 지점에서 최종파괴되지 않고 인장철근이 절단된 위치에서 파괴되었을 경우보다 긴장재의 응력이 더 작게 평가될 수 있다.

2.3 실험체 제작

실험체의 제작은 먼저 인장철근과 압축철근으로 사용되어질 철근의 소정위치에 철근용 2mm-WSG를 부착하였고 VM 테이프를 방수처리하였으며,

Table 1 Specimen lists

	b x D cm	L cm	Loading type	f_{se} MPa	f'_c MPa	ρ_p	ρ_s	L/ d_b
S-1 S-2	140x7.0	300	Uniform	0.5 f_{pu}	23.5	0.00174	0.00142	53.3

* NOTE : Tendon profile = Parabolic
 $f_{pu} = 1860$ MPa Grade $f_y = 420$ MPa Grade
 $\phi 6 = 0.1982$ cm² HD6 = 0.2826 cm²

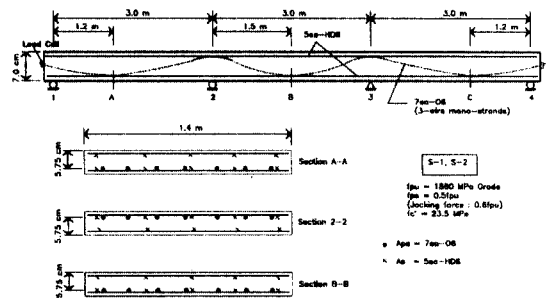


Fig. 1 Specimen details

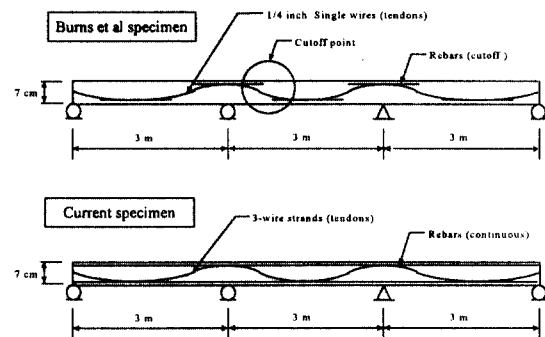


Fig. 2 Difference between the specimens of Burns et al and of current study

긴장재에는 소정의 위치에 철근용 1mm-WSG를 부착하였는데, 부착방법은 WSG가 부착될 위치에 PE관을 길이 8cm로 절단하였으며, 긴장재의 표면을 사포로 표면처리하고 WSG를 부착한 후 방수용 페이스트로 도포하였다. 그런 후, 내경이 PE관보다 1mm정도 큰 알루미늄관을 사용하여 실험시 긴장재의 이동을 원활하게 하면서 WSG가 손상을 받지 않도록 조치하였다.

실험체의 거푸집은 프리캐스트 제품을 생산하는 생산라인에서 철판에 의한 몰드(Mold)로 제작하였으며, 실험체의 조립은 철근과 긴장재를 실험실에서 프리캐스트 부재를 생산하는 생산라인으로 이동하여 몰드에서 직접 조립하였다. 긴장재를 조립할때는 연속스팬에서의 외단스팬과 내단스팬의 고정단 모멘트의 공식을 이용하여 연속스팬이라는 연속성을 고려하여 곡선배치를 하였다.

3. 실험방법

3.1 긴장방법

예비 긴장실험의 결과에 의해 정착후의 소정의 유효프리스트레스를 얻기 위한 잭킹력(Jacking force)을 결정하고, 그 자료를 토대로 소정의 유효프리스트레스에 도달할 때까지 긴장력을 도입하였다. 각각의 실험체에 도입되는 유효프리스트레스는 예비긴장실험을 통한 프리스트레싱 자료를 근거로 소정의 유효프리스트레스가 각각의 실험체에 작용할 수 있도록 양단부에서 반복적으로 소량씩 긴장력을 수회에 걸쳐 도입하였다. 초기에는 긴장재에 부착된 WSG의 리드선이 끊어지지 않도록 양단부에서 반복적으로 긴장재가 10mm씩 늘어날 때까지 도입하였으며, 소정의 유효프리스트레스에 도달되었을때는 로드셀과 긴장장치에서 측정된 긴장력의 크기를 관찰하고 정착될 때 손실될 긴장력의 크기를 고려하면서 긴장작업을 중단하였다. 긴장재에 도입되는 소정의 긴장력의 크기는 양단부에 각각 2개씩 설치되어 있는 긴장력 측정용 로드셀 값의 평균크기로 결정하였다.

이와 같이 소정의 유효프리스트레스에 도달하게 하기 위한 긴장작업은 긴장재의 곡선배치에 의해 프리스트레스의 손실이 발생한다는 이론적인 해석을 근거로 실시하였다.

3.2 하중가력방법

실험체는 슬래브 실험체이므로 등분포하중이 작용하도록 실험을 실시하여야 한다. 그러나 실험실에서는 등분포하중으로 가력할 수 없기 때문에 등분포하중과 유사한 하중가력장치를 설계하여 실험을 실시하여야 한다. 즉 집중하중의 형태를 여러개 조합하여 최대응력의 크기가 등분포하중에 의한 최대응력의 크기와 동일하도록 하면 된다. 먼저 등분포하중에 의한 응력의 크기가 동일하도록 역학적 산술을 실시하여 스펜내에서의 집중하중의 위치를 결정하였

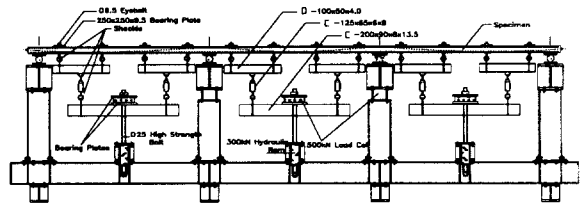
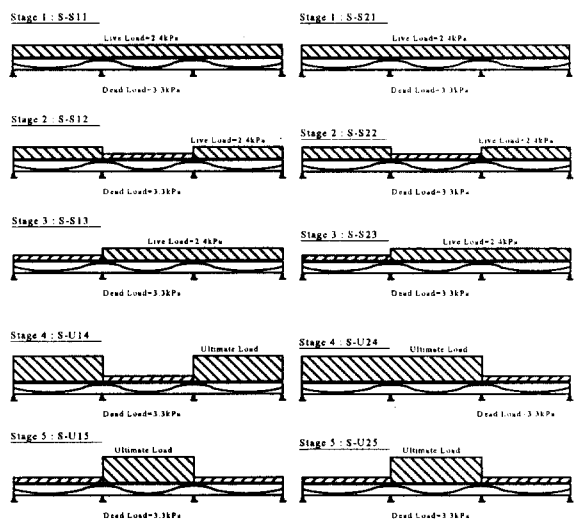


Fig. 3 Loading system



(a) S-1 specimen (b) S-2 specimen

Fig. 4 Orders of the applied pattern load

다. 그리고 9.0m길이의 실험체에 가력할 수 있는 하중가력장치를 만들기 위하여 형강을 이용하여 제작하였다. 제작된 하중가력장치는 그림 3에서와 같이 하부의 프레임에 설치되어 있는 오일잭을 사용하여 아래로 당기는 원리로 설계하였다.

실험은 실제 대상건물의 슬래브 자중에서 실험체의 자중을 감한 크기의 하중을 오일잭에 의해 추가로 3개의 스패에 동시에 가력한 후, 그림 4에 나타낸 순서와 같이 패턴하중을 단계적으로 작용시켰다. 최초 각 실험체의 3번째 가력하중까지는 사용하중상태에 대한 실험으로써 변위 및 균열의 상태 등으로 구조물의 거동을 파악하고, Burns 등에 의해 실험된 실험체의 상태와 비교하기 위한 자료를 얻기 위한 실험이다. 그리고 그이후 4번째, 5번째의 가력하중은 극한하중상태에 도달할 때까지 실험을 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

실험체는 계획된 실험방법에 의하여 실험되었고 실험이 진행되는 동안 가력하중, 실험체의 중앙부 변위, 긴장재의 응력증가량, 균열발생 및 파괴상황 등의 자료들이 습득되었다. 실험에 의한 일반적인 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2에 나타낸 F_{ps} 는 하중-변위 곡선에서 최대하중점에 도달하였을 때의 긴장재 1가닥에 나타나는 응력이다. 또한 표 2에서 A, C는 실험체의 외부스팬 양쪽 끝마구리에 긴장재의 응력을 측정하기 위하여 설치된 로드셀을 표시한 것으로서 A는 실험체의 좌측, C는 실험체의 우측에 설치된 로드셀의 값을 표시한다.

본 연구의 파괴형태를 Burns 등에 의해 실험된 실험체의 파괴형태와 비교하기 위하여 극한하중의 상태에 대한 파괴형태만을 정리하여 그림 5에 간략화된 그림으로 나타내었다. 그림에서 ●는 최종파괴시 실험체에 발생한 소성힌지의 위치를 표시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Burns 등에 의해 실험된 실험체는 인장철근이 절단된 위치에서 파괴된 양상을 나타내고 있으나, 본 연구에서 실험된 실험체는 인장철근을 연속적으로 배근하였기 때문에 모멘트가 최대인 지점에서 최종파괴된 양상을 나타내고 있다. 따라서 Burns 등의 실험체가 조기에 파괴되지 않았다면, 비부착 긴장재의 극한응력이 더 증가할 수 있는 가능성과 부재 전체의 내력이 상승할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단된다. 그리고 Burns 등의 110 실험체에서는 중앙부 스패의 스패 중앙부에서만 소성힌지가 발생하는 최종파괴의 형태를 나타내고 있으나, 본 연구의 S-U15, S-U25 실험체는 스패의 중앙부와 2, 3번 지지부에서 소성힌지가 발생하는 최종파괴의 형태를 나타내고 있다. 왜냐하면, Burns 등의 110 실험체에서는 이전의 하중이력에 의해 2, 3번 지지부에 소성힌지가 발생되었기 때문에 최종파괴시 스패의 중앙부에서만 소성힌지가 발생된 것으로 나타났다.

Burns 등의 실험결과와 본 연구의 실험결과에서 각각의 실험체별, 각각의 실험단계별로 하

Table 2 Test results

Specimen	F_{se} (kN)		F_{ps} (kN)		ΔF_{ps} (kN)		P_{cr} (kN)	P_{max} (kN)	$\frac{P_{max}}{P_{cr}}$	δ_{max} (mm)
	A	C	A	C	A	C				
S-U14	19.40	17.59	25.24	26.26	5.84	8.67	13.93	46.26	3.32	97.95
S-U15	19.40	17.59	25.19	25.19	5.79	7.60	15.62	64.97	4.15	122.3
S-U24	19.60	17.30	24.26	20.68	4.66	3.37	15.35	38.61	2.51	85.38
S-U25	19.60	17.30	23.77	23.08	4.16	5.77	19.83	60.07	3.03	75.02

F_{se} : Effective prestress/lea P_{max} : Maximum load
 F_{ps} : Ultimate tendon stress/lea P_{cr} : Initial cracking load
 ΔF_{ps} : Tendon stress increase/lea δ_{max} : Maximum deflection

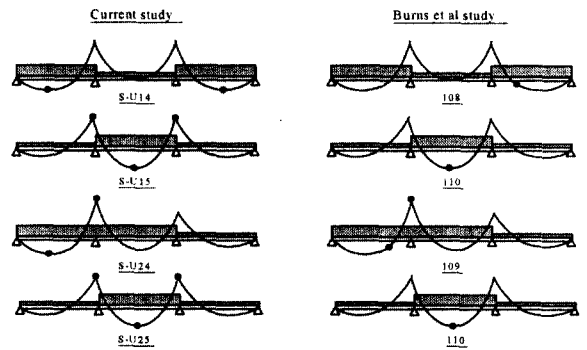


Fig. 5 Comparison of failure patterns

중-변위 곡선과 하중-긴장재의 응력증가량 곡선을 비교하여 그 결과를 표 3에 나타내었다. 표 3에서는 Burns 등의 실험체와 본 연구의 실험체의 각각에 대한 ACI 기준, AASHTO LRFD 기준, 본 연구자들의 설계식에 의한 비부착 긴장재의 응력의 정도를 나타내었다. 하중-변위 곡선과 하중-긴장재의 응력증가량 곡선들에서는 Burns 등의 실험체

Table 3 Comparison of tendon stress increase

Specimen		Δf_{ps} MPa							
		Experiment		ACI		AASHTO		Authors' Eq.	
Burns	Current	Burns	Current	Burns	Current	Burns	Current	Burns	Current
108	S-U14	107.48	366	137	114	177	199	170	258
110	S-U15	73.03	338	137	114	133	109	199	226
109	S-U24	134.36	235	137	114	177	199	221	190
110	S-U25	73.03	250	137	114	133	109	199	226

와 본 연구의 실험체의 재료적인 특성, 사용재료의 구성비율의 차이에 의해 절대적인 값으로 비교할 수 없지만, 사용하중의 상태에 대해 Burns 등과 본 연구의 실험체에 대한 거동특성을 비교하였는데 그 결과가 매우 유사하였기 때문에 전체적인 실험결과의 경향을 비교하는데 문제가 없는 것으로 판단하였다.

하중-변위 곡선의 결과에서 초기의 탄성구배는 모든 실험체에서 Burns 등의 실험결과와 본 연구의 실험결과가 약간 상이하게 나타났으나, 항복하중이후의 부재전체에 대한 거동특성은 그 경향이 비슷하였다. S-U14와 108 실험체에 대한 결과에서 108 실험체는 하중-변위 곡선이나 하중-긴장재의 응력증가량 곡선에서 탄성범위를 지나서 항복하중을 통과한 즉시 실험이 중단된 상태를 나타내고 있는데, 이는 모멘트가 최대인 지점에서 소성힌지가 발생되지 않고 인장철근이 절단된 위치, 즉 우측 외부스팬의 3번 지지부쪽 1/4지점에 인장철근이 절단된 위치에서 조기의 파괴현상인 소성힌지가 발생되었고(그림 5참조), 2차 소성힌지의 확산에 대한 지속적인 실험을 실시하지 않고 다음단계의 실험을 실시하였기 때문에 더 이상의 내력상승을 기대하지 못하였다. 그러나 본 연구의 실험에서는 모멘트가 최대인 스팬의 중앙부에서 소성힌지가 발생되었는데, 좌측 외부스팬에서 1차 소성힌지가 발생한 후에도 계속적으로 하중을 가력하여 우측 외부스팬의 중앙부에서 2차 소성힌지가 발생하도록 실험을 실시할 수 있었다. 따라서, 본 실험결과로부터 Burns 등의 실험은 인장철근의 배근형태를 수정하여 실험이 시행되었다면, 충분한 내력상승의 효과를 얻을 수 있다는 확신을 가질 수 있었다.

표 3의 결과에서, Burns 등의 실험체에 대한 ACI 기준, AASHTO LRFD 기준, 본 연구자들의 설계식에 의한 예측결과는 실험결과보다 더 큰 값으로 나타나고 있지만, 본 연구의 실험결과에서는 ACI 기준, AASHTO LRFD 기준, 본 연구자들의 설계식에 의한 결과보다 실험결과가 더 큰 값으로 나타나고 있었다. 109와 S-U24의 하중-변위 곡선결과에서는 항복하중을 지나서 소성구간의 중간까지 부재의 거동특성이 비슷한 양상으로 나타났으나, Burns 등의 실험체는 중도에서 실험이 중단된 양상을 나타내었다. 이는 그림 5에서와 같이 1차 소성힌지의 발생위치가 두 실험체 모두 2번 지지부에서 발생하고 있지만, 2차 소성힌지가 본 연구의 실험체에서는 외부스팬의 최대휨모멘트가 발생하는 위치에서 발생되었고, Burns 등의 실험체에서는 인장철근이 절단된 위치인 2번 지지부에 가까운 위치에서 발생되어 더 이상의 내력상승은 없었던 것으로 사료된다. 또한, 109 실험체에서 긴장재의 극한응력이라고 예측되는 위치에 대해서 Burns 등의 실험체에 대한 ACI 기준의 결과는 실험결과와 거의 비슷한 값을 나타내고 있지만, AASHTO LRFD 기준, 본 연구자들의 설계식에 의한 결과보다는 낮은 값을 나타내고 있으며, 본 연구의 실험체는 모든 설계식의 값보다 실험값이 더 우수하게 평가되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 109와 S-U24의 경우에서 1차 소성힌지의 발생까지는 인장철근의 절단위치에 무관하게 부재가 거동한 것으로 판단되며, 2차 소성힌지의 발생까지는 인장철근의 절단위치가 부재 전체내력을 지배한 것으로 판단된다. 그리고 S-U24 실험체의 경우에는 실험값이 모든 설계식의 결과보다 높게 나타나고 있으나, 안전율이 다른 실험체의 경우와 같이 충분히 확보되지 못하는 양상을 나타내고 있다. 왜냐하면, 사용된 인장철근의 연신율이 일반적으로 사용된 이형철근의 연신율보다 70% 정도 낮은 철근을 사용하였기 때문에 나타난 현상으로 부재전체의 충분한 변형능력이 확보되기 이전에 소성힌지 부위에서 철근의 절단에 의한 최종파괴가 발생하였기 때문이다. 만약,

일반적인 이형철근과 동일한 조건의 연신율을 확보하고 있는 인장철근을 사용하였다면, 본 연구의 실험결과보다 더 높은 긴장재의 용력을 확보하였을 것으로 사료된다.

그리고 중앙부 스패에만 하중이 가력된 경우의 실험결과(110, S-U15, S-U25 실험체)에서 항복하중과 항복하중 이후의 거동의 특성이 본 연구의 실험결과와 Burns 등의 실험결과가 매우 상이한 결과를 나타내었는데 이는 그림 5에서 알 수 있듯이 Burns 등의 실험체의 소성힌지 발생위치 및 발생개소가 이전단계의 실험에 의하여 지지부에서의 하중저항능력이 상실되었기 때문에 스패의 중앙부 1개에서만 나타나고 있다고 사료된다. 그러나 본 연구의 실험에서는 스패의 중앙부와 2, 3번 지지부에서 거의 동시에 소성힌지가 발생되었기 때문에 Burns 등의 실험체보다 부재 전체의 내력상승은 당연한 결과였던 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 Mojtahedi/Gamble의 연구⁽⁴⁾에서 스패/춤 비가 큰 실험체에 대한 스패/춤 비의 효과를 분석하기 위하여 사용된 Burns 등의 실험체의 실험결과는 스패/춤 비의 효과를 정확하게 평가하지 못하고 있음이 증명되었으며, 극한하중에 도달하기 전에 인장철근이 절단된 위치에서 최종파괴되었다는 사실도 적절히 고려하지 못했음을 증명하였다. 또한 Mojtahedi/Gamble의 연구결과에 의해 수정된 현행의 ACI 규준에서 스패/춤 비가 큰 부재에 대한 스패/춤 비의 효과는 과대평가될 수 있음도 알았다.

5. 결 론

본 연구에서는 인장철근의 절단된 위치에서 조기에 최종파괴되어 비부착 긴장재의 극한용력이 현행의 ACI 규준보다 낮게 나타난 Burns 등의 실험체를 다시 모델링하고 실험을 실시하여 높은 스패/춤 비를 갖는 슬래브 형태의 프리스트레스트 콘크리트 부재에 대한 구조적인 거동을 살펴보고, 비부착 긴장재의 극한용력을 평가함에 있어서 스패/춤 비에 대한 효과를 알아보았다. 또한 Mojtahedi/Gamble이 제시한 현행의 ACI 규준에서 스패/춤 비가 35 이상인 비부착 긴장재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재에서의 비부착 긴장재의 극한용력을 평가하는 방법에 대한 타당성도 검토하여 보았다. 그 결과, Burns 등이 실험한 실험체에서의 조기파괴 원인을 제거한 본 연구의 실험체에 의한 결과는 ACI 규준보다 우수한 결과를 나타냈으며, Mojtahedi/Gamble이 제시한 높은 스패/춤 비를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한용력 평가방법은 재고되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 금호건설기술연구소와 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터와의 공동연구 결과의 일부분임.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95)." American Concrete Institute, Detroit, 1995.
2. AASHTO, AASHTO LRF D Bridge Design Specification, SI unit 1st Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, 1994.
3. Burns, N. H., Charney, F. A., and Vines, W. R., "Tests of one-way posttensioned slabs with unbonded tendons." PCI Journal, Sept.-Oct., 1978, pp 66-83.
4. Mojtahedi, S., and Gamble, W. L., "Ultimate steel stresses in unbonded prestressed concrete." Preceding, ASCE, Jul., 1978, pp 1159-1165.
5. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한용력 평가에 관한 연구 (I) - 기준연구 및 ACI 규준식의 고찰 -", 콘크리트학회 논문집 제9권 4호 1997. 8.
6. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한용력 평가에 관한 연구 (II) - 변형도 적합조건을 이용한 해석모델의 제안 -", 콘크리트학회 논문집 제9권 5호 1997. 10.