

비부착식 단일 강연선용 원형 정착구의 일방향 슬래브 적용에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Performance of One-Way Slab Using Unbonded Post-Tensioned Anchorage for Single Tendon

김민숙*
Min Sook Kim

노경민**
Kyong Min Ro

이영학***
Young Hak Lee

Abstract

In this study, the static load test and the load transfer test were carried out to evaluate the structural performance of the circular anchorage proposed by the previous study. Specimens were fabricated according to KCI-PS101 and ETAG 013. As a result of the static load test, it was verified that the displacement of the wedge and the strand was kept constant when the tensile force of 80% of the nominal strength of the strand was applied. In the load transfer test, it was confirmed that all the specimens satisfied the stabilization formula of KCI-PS101 and ETAG 013. Post-tensioned one-way slab with circular anchorage were fabricated to evaluate the flexural behavior. All specimens exhibited the same flexural behavior and maximum load. However, the specimen with circular anchorage were advantageous than the rectangular anchorage one in terms of crack control of the anchorage zone.

Keywords : Unbonded, Single-strand tendon, Post-tension, Anchorage, One-way slab

1. 서론

포스트텐션 공법이 적용된 콘크리트 부재에서 긴장력은 정착구를 통하여 부재에 집중 하중으로 전달된다. 이 때 정착구가 설치되는 정착 구역에서는 집중 하중으로 인하여 파열력이 발생하게 되는데 적절한 보강 설계가 이루어지지 않을 경우 균열 발생으로 구조적 문제를 초래할 수 있다.

Park & Lim(1994)은 Precast-prestressed concrete 교량의 정착 구역에 발생하는 국부 집중 응력의 분포 특성 및 보강 형태에 따른 국부 응력 효과를 규명하여 개선된 정착 구역 설계 개념을 제시하였다¹⁾. Lee & Kim(2009)은 비부착 긴장재를 적용한 프리스트레스트 휨 부재의 강도 예측식에 대한 선행 연

구 분석을 통해 개선된 휨 강도 산정식을 제안하고 해석을 통해 타당성을 검증하였다²⁾. Cho et al.(2015)은 직사각형 형태의 단일 강연선용 정착구 형상을 제안하고 구조 실험을 수행하여 성능을 평가하였다³⁾. Kim & Kim(2018)은 ETAG 013에서 명시하는 하중 전달 시험에 관한 가이드라인을 고찰하고 해당 기준을 만족하기 위해서는 보강 철근량을 증가시키는 것보다 시험체의 크기를 증가시키는 방법이 효과적임을 실험을 통해 규명하였다⁴⁾.

건축 구조물에서 주로 사용되는 정착구는 구조 부재 크기 등의 이유로 다중 강연선이 아닌 단일 강연선이며, 콘크리트 내 매립되는 정착구 부분이 크지 않다는 특징이 있다. 단일 강연선용 정착구는 다중 강연선용 정착구와 응력 분포가 상이하나 기존 연구는 토목 분야에서 사용되는 다중 강연선 정착구의 구조 성능에 국한되어 주로 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 Lee, Cho & Kim(2018)⁵⁾에 의해 제안된 단일 강연선용 원형 정착구에 대하여 한국 콘크리트학회 제 규격의 PSC 텐던 정착구 및 접속 장치의 성능 시험 방법(이하 KCI-PS101)⁶⁾과 Guideline

* 정회원, 경희대학교 건축공학과 학술연구교수
Architectural Engineering, Kyung Hee University
** 학생회원, 경희대학교 건축공학과 대학원, 박사과정
Architectural Engineering, Kyung Hee University
*** 교신저자, 정회원, 경희대학교 건축공학과 교수
Architectural Engineering, Kyung Hee University
Tel: 031-201-3815 Fax: 031-204-3815
E-mail: leeyh@khu.ac.kr

for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures(이하 ETAG 013)⁷⁾에서 요구하는 정하중 시험, 하중 전달 시험을 수행하여 구조적 성능을 검증하고자 하였다. 또한 성능이 검증된 원형 정착구를 포스트텐션된 콘크리트 일방향 슬래브에 적용하여 유효성을 평가하고자 하였다.

2. 정착구 성능 시험

콘크리트 표준시방서에서 프리스트레스트 공법에 사용되는 정착 장치의 성능은 KCI-PS101을 따르도록 명시하고 있다. KCI-PS101은 유럽의 ETAG 013을 기반으로 하였으며 정하중 시험, 하중 전달 시험, 피로 하중 시험을 성능 평가 항목으로 제시하고 있다. 그러나 일반적인 프리스트레스트 콘크리트 휨부재에서는 활하중으로 인해 강연선의 항복 강도에 비하여 매우 낮은 응력이 발생하므로 피로 하중에 의해 파괴되는 경우는 극히 드문 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 원형 정착구의 성능 평가 항목으로 정하중 시험과 하중 전달 시험을 선택하였다. 시험에 사용된 재료의 물성치는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Material properties for static and load transfer test

Concrete	f_c (MPa)	
	30	
	f_y (MPa)	E_s (GPa)
Reinforcement(D13)	400	200
Anchorage	500	

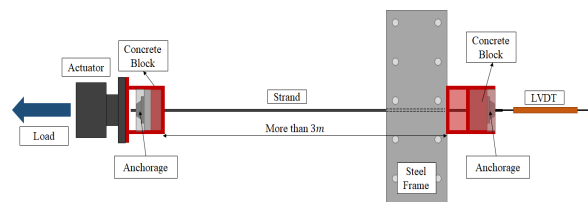
2.1 정하중 시험

2.1.1 실험 개요

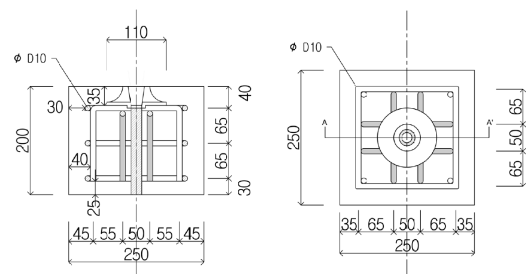
KCI-PS101과 ETAG 013의 정하중 시험은 정착구에 강연선의 긴장력에 의한 정하중을 작용할 때 강연선의 인장 거동 및 하중 지지 능력 등의 지표 확인을 목적으로 한다. 이를 위한 실험 조건으로 강연선 자유단의 길이, 변위 측정 대상 등을 요구하고 있다. 콘크리트 시험체를 고정할 수 있는 강프레임

을 제작하여 Actuator에 연결하였으며 반대쪽도 프레임에 이용하여 콘크리트 시험체를 고정하였다. 기준에서 요구하는 조건을 만족시키기 위하여 3m 이상의 강연선 자유장 길이를 확보할 수 있도록 <Fig. 1>과 같은 실험 계획을 수립하였다. 콘크리트 시험체는 250×250×200mm의 크기로 정착구를 콘크리트 블록에 매립하여 제작하였다. ETAG 013에서는 5회 이상의 실험을 요구하고 있으므로 동일한 배근 상세를 가지는 5세트의 시험체를 제작하였다. 지압 응력 및 파열 응력에 의한 시험체의 파괴를 방지하기 위하여 충분한 양의 보강근을 배근하였으며, 시험체 상세는 <Fig. 2>와 같다. 시험체는 각각 SL-A, SL-B, SL-C, SL-D, SL-E로 명명하였다.

썩기 및 강연선의 변위를 측정하기 위하여 단부에 LVDT를 설치하였다. ETAG에서는 썩기 및 7연선의 중심 강연선과 이를 둘러싼 6연선 중 1개를 선택하여 최소한 3개의 변위를 측정하도록 제시하고 있다. Actuator를 이용하여 강연선 극한 강도의 80%까지 100MPa/min 속도로 인장 후 1시간 동안 유지하면서 썩기 및 강연선의 변위를 측정하였다. 이후 강연선의 파단까지 가력하여 극한 강도와 총 신장량을 측정하였다.



<Fig. 1> Static load test



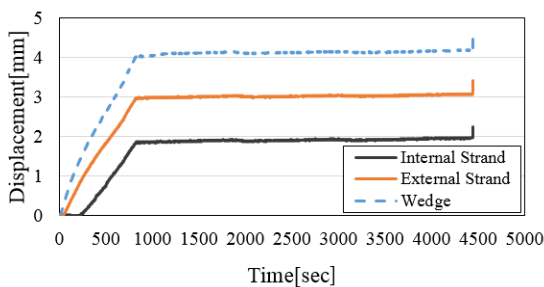
(a) Section (b) Plan

<Fig. 2> Static load test specimens (mm)

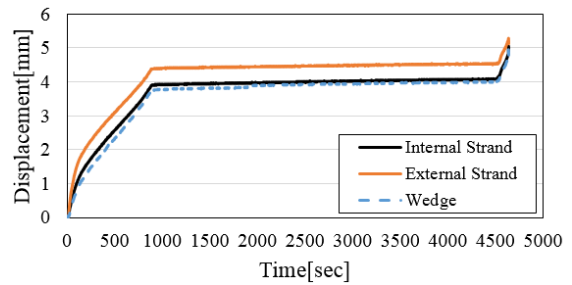
2.1.2 실험 결과

정하중 시험 결과, Actuator를 통해 강연선에 가해지는 긴장력이 강연선 공칭 강도의 80%로 유지될 때 모든 시험체에 대하여 썸기 및 강연선의 변위는 <Fig. 3>과 같이 최초 30분 내에 안정되었음을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 강연선은 웨지(Wedge)에, 웨지는 정착구에 안정적으로 고정된 것으로 판단된다. 시험체 SL-C를 제외한 모든 시험체는 강연선 인장 강도의 95%인 245kN 수준의 하중에서 강연선 파단이 발생하였다. ETAG 013에서는 정하중 시험을 통해 측정된 최대 하중이 $0.95F_{pk}$ 이상이어야 함을 규정하고 있으므로 SL-C 시험체를 제외한 모든 시험체는 성능 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 SL-C 시험체의 경우에도 강연선 인장 강도의 91%인 235kN의 하중에서 강연선 파단이 발생하였으며, 콘크리트 블록의 시공 및 제작 오차 등을 감안하면 성능 기준을 크게 벗어나는 수준은 아닌 것으로 판단된다.

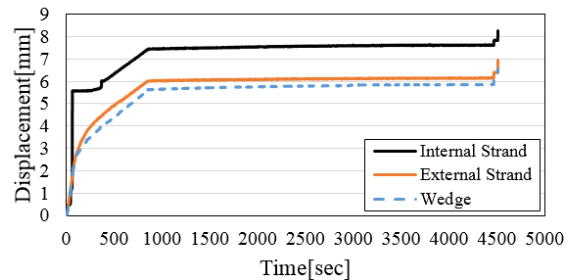
KCI-PS101에서는 시험체 파괴 시 정착구의 구성 요소가 아닌 강연선의 파단에 의한 것이어야 한다고 규정하고 있는데, 모든 시험체는 정착구의 구성 요소의 파괴가 아닌 강연선의 파단에 의해 실험이 종료되었다. 따라서 원형 정착구의 하중 지지 능력이 검증된 것으로 판단된다. 시험체별 파괴 하중과 총 신장량은 <Table 2>에 정리하였다. ETAG 013에서는 정하중 시험 결과, 강연선의 총 신장량이 2% 이상일 때 강연선이 충분한 인장 거동을 하는 것으로 보고 있다. SL-C 시험체를 제외한 모든 시험체의 신장량은 2% 이상으로 나타났다.



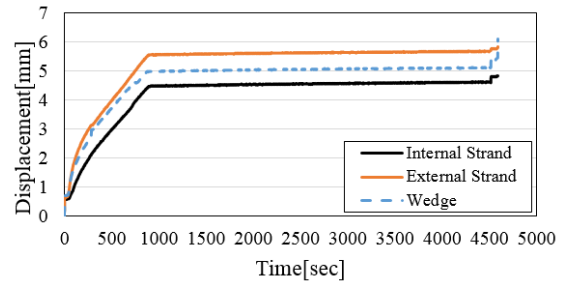
(a) SL-A



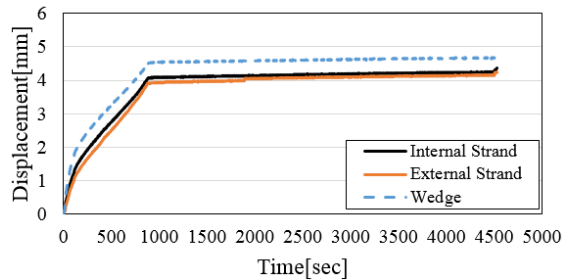
(b) SL-B



(c) SL-C



(d) SL-D



(e) SL-E

<Fig. 3> Static load test time-displacement graph

<Table 2> Static load test result

Specimen	$0.95F_{pk}$ (kN)	F (kN)	ε_{TU} (%)	Failure	Stability
SL-A		250	2.14		
SL-B		243	2.10		
SL-C	245	221	1.81	Strand break	OK
SL-D		247	2.08		
SL-E		243	2.12		

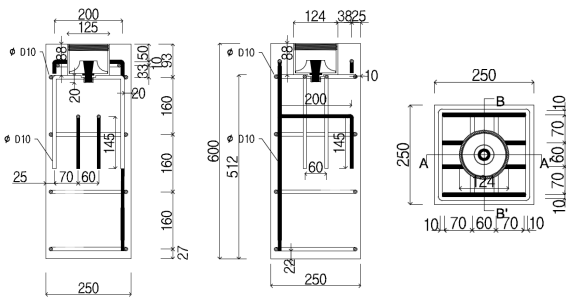
2.2 하중 전달 시험

2.2.1 실험 개요

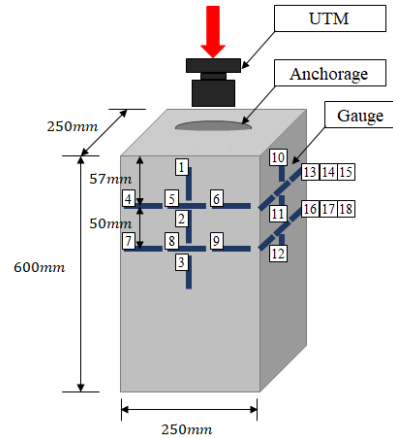
KCI-PS101과 ETAG 013에서 요구하는 조건을 만족하기 위하여 정착구가 매립된 250×250×600mm 크기의 콘크리트 시험체 4개(LT-A, LT-B, LT-C, LT-D)를 제작하였다. 기준에서 요구하는 종방향 철근 및 스트립 철근의 최대량(종방향 : $0.003A_c$ 이하, 스트립 : 50kg/m^3 이하)을 만족하기 위하여 D10 종방향 철근 2개와 스트립 4대를 배근하였다. 또한 좌열력에 저항하기 위하여 각 시험체마다 4개의 U자형 보강 철근을 배근하였다. 시험체의 상세는 <Fig. 4>, 시험체 세팅은 <Fig. 5>에 나타내었다. 가력 방법은 최소 $0.12F_{pk}$, 최대 $0.8F_{pk}$ 의 하중을 ETAG 013의 안정화 공식(식 (1))을 만족시킬 때까지 최소 10회 반복 가력하였다. 또한 시험체의 최소 2개면에 부착된 변형률 게이지를 통해 콘크리트의 균열폭 및 변형률을 측정하여 안정화 공식을 만족하는지 여부를 확인하였다.

$$\varepsilon_n - \varepsilon_{n-4} \leq 1/3(\varepsilon_{n-4} - \varepsilon_0) , n \geq 10 \quad (1)$$

여기서, ε_n 은 n회 가력 시 측정된 콘크리트 변형률이다.



(a) A-A' section (b) B-B' section (c) Plan
 <Fig. 4> Load transfer test specimen



<Fig. 5> Load transfer test

2.2.2 실험 결과

KCI-PS101과 ETAG 013에서 요구하는 변형률 안정화 공식을 만족할 때까지 반복 가력하고, 이후 시험체가 파괴될 때까지 하중을 가력하는 방식으로 실험을 진행하였다. 단, LT-A 시험체는 가력 장치의 오작동으로 인해 파괴 시까지 하중을 가력하지 못하였다. 각 시험체의 상단 중앙에서 최대 변형률이 발생하였으며, 측정된 변형률은 11~14회의 가력 Cycle에서 안정화 공식을 만족하는 것으로 나타났다. 파괴 하중은 최소 686kN, 최대 833kN으로 ETAG 013 기준인 $1.1F_{pk}$ 의 값을 크게 상회하는 것을 확인하였다. 각 시험체의 파괴 하중 및 콘크리트 변형률은 <Table 3>과 같다.

3. 원형 정착구가 적용된 일방향 슬래브의 성능 평가

3.1 실험 개요

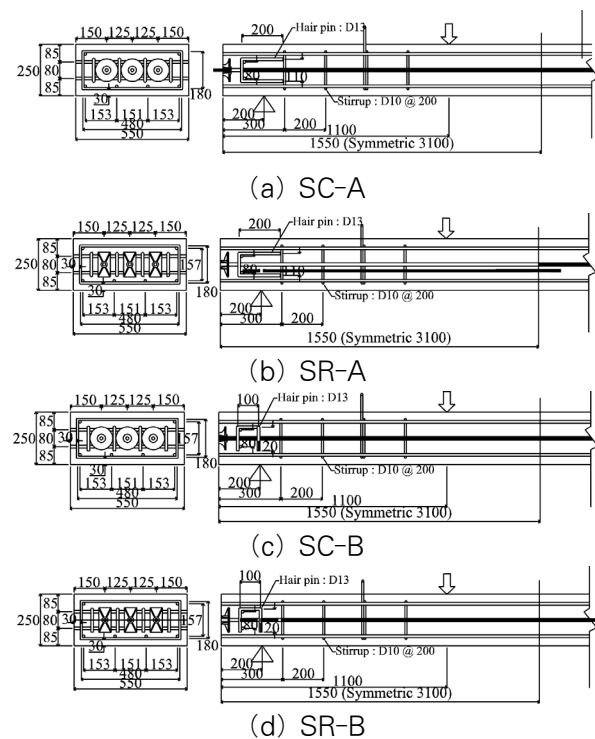
포스트텐션이 적용된 총 길이 3,100mm(순 경간 2,700mm)를 갖는 일방향 슬래브 시험체 4개를 제

<Table 3> Load transfer test result

Specimen	$1.1F_{pk}$ (kN)	F_u (kN)	Loading cycle (n)	Gauge number of maximum strain	$\varepsilon_n - \varepsilon_{n-4}$ (μ)	$1/3(\varepsilon_{n-4} - \varepsilon_0)$ (μ)	Stability
LT-A		N.A.	11	14	5.89	6.30	OK
LT-B	284	881	14	14	1.89	3.47	
LT-C		784	12	14	0.95	4.10	
LT-D		833	11	5	4.73	5.69	

작하여 하중 지지 능력 및 하중 전달 능력이 검증된 원형 정착구의 성능이 휨 부재에서 유효한지 검증하고자 하였다. 이를 위해 정착구의 종류와 정착 구역의 보강 방법을 변수로 하여 부재의 휨 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 정착구 종류는 기존 건축 구조물에 주로 사용되는 직사각형 정착구와 성능 시험을 수행한 원형 정착구로 하였다. 정착 구역의 보강 방법은 U자형 헤어핀을 부재 길이 방향과 수직 또는 수평으로 나누어 배근하였다. 정착 구역은 KBC 2016의 설계 기준에 따라 설계하였다. 시험체 상세는 <Fig. 6>과 같다.

모든 시험체는 슬래브 하부에 항복 강도 400MPa 인 D13철근 4개, 상부에 2개를 배치하여 최소 부착 철근량을 만족시켰으며, 전단 파괴를 방지하고자 전단력이 발생하는 구역에 스테럽(D10)을 200mm 간격으로 배근하였다. 긴장재는 중앙부에서 90mm의 편심이 발생하도록 곡선 배치하였다. 긴장력은 200kN으로 콘크리트 압축 강도가 20MPa일 때 유압잭을 이용하여 긴장하였다. 실험에 사용된 재료의 물성은 <Table 4>에 정리하였다. 시험체는 <Fig. 7>과 같이 50ton 용량의 Actuator를 이용하여 하중 재하 속도 2mm/min로 2점 가력하였다.



<Fig. 6> PT one-way slab specimen (mm)

<Table 4> Properties of materials

	f_{ci} (MPa)	f_c (MPa)		
Concrete	20	30		
	f_y (MPa)	E_s (GPa)		
Reinforcement(D13)	400	200		
Anchorage	500			
	f_{pu} (MPa)	f_{py} (MPa)	d_p (mm)	A_{ps} (mm ²)
Strand (SWPC-7B)	1890	1610	15.2	138.7

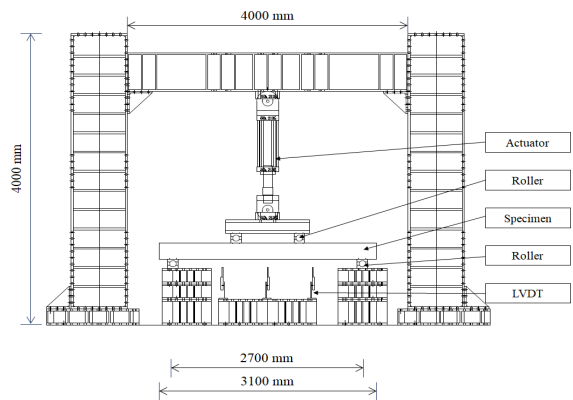
f_{ci} : Compressive strength of concrete at jacking

f_{pu} : Tensile strength of strand

f_{py} : Yield strength of strand

d_p : Diameter of strand

A_{ps} : Area of strand



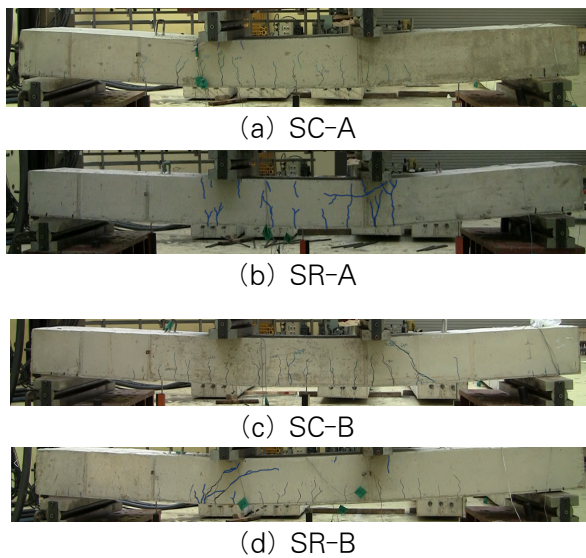
<Fig. 7> One way slab test setup

3.2 실험 결과

모든 시험체의 중앙 인장축부터 휨 균열이 시작되었으며 하중이 증가함에 따라 균열의 크기와 수가 증가하며 압축축으로 진전되었다. 균열 양상은 <Fig. 8>과 같다. 각 시험체별 최대 하중과 그에 따른 변위를 <Table 5>에 나타내었으며, <Fig. 9>는 시험체별 하중-변위 그래프이다. 정착구 종류에 따른 시험체별 최대 하중은 헤어핀 철근의 다리가 부재의 수평 방향으로 배치된 SC-A, SR-A 시험체는 각각 318kN, 327kN으로 측정되었으며, 헤어핀 철근의 다리가 부재의 수직 방향으로 배치된 SC-B, SR-B 시험체는 각각 343kN, 327kN으로 측정되었다. 모든 시험체는 설계 하중인 314kN을 만족하였다. 각 보강 방법의 최대 하중 평균을 비교하였을 때 Lee,

Cho & Kim(2018)⁵⁾에 의해 개발된 원형 정착구를 사용한 일방향 슬래브는 기존 직사각형 정착구를 사용한 경우와 동등하거나 그 이상의 최대 하중을 보이는 것을 확인하였다.

정착 구역의 보강 방법을 변수로 하여 최대 하중을 비교한 경우, 원형 정착구를 사용한 SC-B 시험체가 343kN으로 측정되었으며 이는 SC-A 시험체의 최대 하중보다 8% 큰 것으로 확인되었다. 직사각형 정착구를 사용한 SR 계열의 경우, SR-A 시험체와 SR-B 시험체가 유사한 최대 하중을 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 헤어핀 철근의 배치 방향은 부재의 최대 하중에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.



〈Fig. 8〉 Crack pattern of specimen

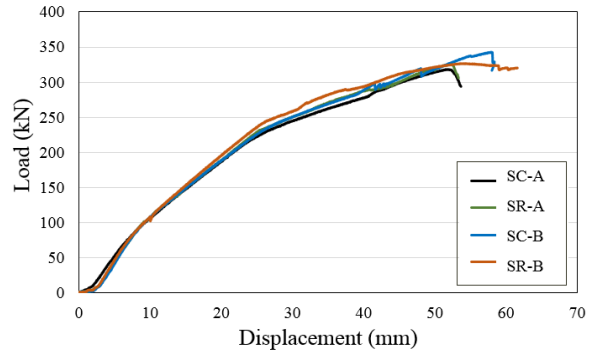
〈Table 5〉 Result of PT one-way slab test

Specimen	Anchorage	Reinforcement	P_n (kN)	P_{max} (kN)	δ (mm)
SCA			314	318	51.5
SRA				327	52.2
SCB				343	57.8
SRB				327	54.1

P_n : Design load

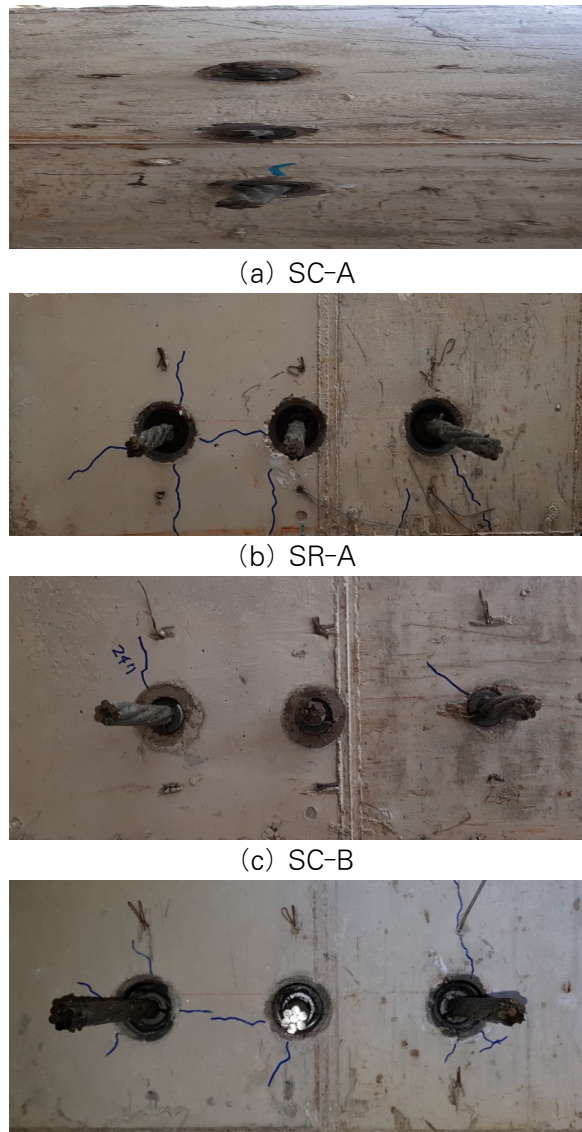
P_{max} : Maximum load

δ : Deflection at maximum load



〈Fig. 9〉 Load-displacement curve

〈Fig. 10〉에서 보는 바와 같이 기존의 직사각형 정착구를 사용한 SR-A, SR-B 시험체의 경우, 긴장



〈Fig. 10〉 Crack pattern of anchorage zone

재 긴장 시에는 일방향 슬래브의 단부에서 균열이 관찰되지 않았으나 가력 하중이 최대 하중에 도달하면서 일방향 슬래브의 단부 및 정착구 주변에 균열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 반면 SC-A, SC-B 시험체의 경우 가력 하중이 최대 하중에 도달하여도 정착 구역의 균열이 거의 발생하지 않았다. 이를 통해 원형 정착구가 적용된 일방향 슬래브의 경우 기존 정착구를 사용한 경우와 최대 하중의 측면에서는 큰 차이가 없으나 정착 구역에서의 균열 제어에 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결론

1) ETAG 013에서 요구하는 조건을 만족하는 시험체를 제작하여 정하중 시험 및 하중 전달 시험을 진행하였다. 정하중 시험의 경우, 5개의 시험체에 대하여 강연선의 공칭 강도 80%의 하중에서 썩기 및 강연선의 변위가 안정되었고, 강연선의 공칭 강도 95% 이상에서 강연선의 파단이 발생하였다.

2) 하중 전달 시험의 경우, 모든 시험체는 10회 이상의 Cycle에서 ETAG 013에서 요구하는 변형률 안정화 조건을 만족하였으며, 모든 시험체는 동일한 위치의 게이지에서 최대 변형률이 발생하였다. 파괴 하중은 최소 686kN, 최대 833kN으로 기준에서 제시하는 $1.1F_{pk}$ 이상을 만족하였다.

3) 개발된 정착구가 적용된 일방향 슬래브의 구조 성능을 평가하기 위하여 정착구의 종류와 정착 구역 헤어핀 보강근의 배치 방향을 변수로 하여 실험을 수행하였다. 모든 시험체는 강도 설계법에 의한 설계 하중을 만족하였으며 원형 정착구를 사용한 시험체는 기존 직사각형 정착구를 사용한 경우와 동등 이상의 구조 성능을 보이는 것을 확인하였다.

4) 원형 정착구를 사용한 경우, 직사각형 정착구를 사용한 경우와 달리 부재가 최대 하중에 도달하였을 때에도 정착 구역에 균열이 발생하지 않아 균열 제어에 더 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1A2B2005581).

Reference

1. Park, S. S., & Lim, D. H., "Anchorage Zone Design of Precast Prestressed Concrete Structures", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.10, No.10, pp.199~206, 1994
2. Lee, D. H., & Kim, K. S., "Ultimate Stress of Unbonded Tendons in Post-Tensioned Flexural Members", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.21, No.4, pp.489~499, 2009
3. Cho, A. S., Jo, Y. W., Jeon, B. K., & Kang, T. H. K., "Development and Performance Test for Unbonded Post-Tensioned Anchor", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.27, No.1, pp.11~20, 2015
4. Kim, B. J., & Kim, H. G., "Load transfer test of circular anchorage system according to ETAG 013", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.19, No.5, pp.167~175, 2018
5. Lee, Y. H., Cho, Y. W., & Kim, M. S., "Development and Analysis of Unbonded Post-tensioned Anchorage for Single Tendon", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.31, No.1, pp.39~46, 2018
6. Korea concrete institute, Proposed standard of Korea concrete institute, Review of Korea concrete institute, Seoul, 2016, pp.215
7. EOTA, Guideline for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures (ETAG 013), European Organisation for Technical Approvals, Belgium, 2002, pp.136

- Received : October 11, 2018
- Revised : November 09, 2018
- Accepted : November 12, 2018