

ETAG 013 규정에 따른 원형 정착구의 하중전달실험

김범준¹, 김현기^{2*}

¹건국대학교 사회환경플랜트공학과
²가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과

Load transfer test of circular anchorage system according to ETAG 013

Bum-Joon Kim¹, Hyun-Gi Kim^{2*}

¹Department of Civil and Environmental Plant Engineering, Konkuk University

²Department of Energy Plant Engineering, Catholic Kwandong University

요약 정착구의 성능 평가를 위한 대부분의 기존연구와 성능실험들이 ETAG 013 규정에 따라 실험체를 제작하고 실험을 수행한 것으로 명시해오고 있다. 하지만 실험체에 사용된 파열력 보강 철근이나 보조보강철근이 ETAG 013에서 규정된 별도의 승인이 불필요한 최소 철근량을 초과 배치하여 실험이 수행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ETAG 013 규정에 대한 올바른 이해와 실험을 위해 ETAG 013 규정에서 명시하는 하중전달실험 방법과 성능기준에 대해 고찰하고, 상용화된 PT정착구 시스템을 적용하여 고강도 콘크리트, 고장력 강연선을 변수로 한 실험체를 제작하고 하중전달실험을 수행하여 원형 정착구 시스템의 성능과 보조보강철근의 상관성을 평가하였다. 실험 결과, ETAG 013 규정이 적절한 크기 및 강도의 실험체와 파열력 보강철근을 사용하지 않으면 성능을 만족하지 않는 매우 엄격한 규정임이 확인되었으며, 보조보강철근의 양을 증가시키는 것이 아니라 실험체의 크기를 최소치수로 한정짓지 않고 규정에 따라 15%크게 적용하는 방법으로 실험을 수행하는 것이 바람직한 것으로 평가되었다.

Abstract Load transfer experiments have been carried out to evaluate the performance of the anchorage and it has been stated that the specimens were manufactured and tested according to ETAG 013. On the other hand, the amount of spiral reinforcement and auxiliary reinforcement exceeded the amount specified in ETAG 013. In this study, the load transfer test method and the criteria specified in ETAG 013 were considered and the PT anchorage system was applied to manufacture specimens with high strength concrete and a high tensile prestressing strand. A load transfer test according to ETAG 013 was performed to evaluate the performance of the circular anchorage. As a result, it was confirmed that ETAG 013 is a very strict specification that does not satisfy the performance of an anchorage unless the specimens of an appropriate size and spiral reinforcement are used. To assess the stability of the specimens, increasing the size of the specimen by 15%, rather than increasing the amount of auxiliary reinforcement, is considered to be the correct method in accordance with ETAG 013.

Keywords : Auxiliary reinforcement, Circular anchorage, ETAG 013, Load transfer test, Spiral reinforcement

1. 서론

콘크리트의 인장강도는 압축강도에 비해 매우 작으며, 이를 보완하기 위해 인장 측에 철근으로 보강한 철근

콘크리트를 사용하나 콘크리트에서 발생하는 균열은 피할 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위해 콘크리트에서 발생하는 인장응력을 상쇄할 수 있도록 강선에 긴장력을 도입하여 미리 압축응력을 준 프리스트레스트 콘크리트

*Corresponding Author : Hyun-Gi Kim(Catholic Kwandong Univ.)

Tel: +82-33-649-7374 email: hyunky@cku.ac.kr

Received February 12, 2018

Revised March 8, 2018

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

를 사용 할 수 있다. 정착구는 긴장력 도입 방법 중 하나인 포스트텐션 공법 시 강선을 콘크리트에 정착시키기 위한 구조적 장치로, 기구에 따라 쉘기식, 나사식 등이 있으며, 모양에 따라 사각형 및 원형 정착구 등이 있다.

정착구가 설치되는 정착구역에는 긴장력에 의해 높은 수준의 압축력 및 인장력이 가해진다. 이에 따라 정착구역에는 좌열응력, 지압응력 그리고 활렬응력 등이 발생하게 되며, 이 응력들에 대한 정착구역 내의 보강 및 정착구의 성능검증을 위해 AASHTO [1]에서는 하중전달 실험을 수행할 것을 권장하고 있다. 하중전달실험은 강선에 가해진 긴장력이 정착구를 통해 콘크리트 구조물로 적절히 전달되는 지를 평가하는 실험으로, 유한요소해석과 함께 정착구와 정착구역의 거동분석과 평가를 위해 수행되고 있다. 2014년 Kim 등 [2]은 유한요소해석과 하중전달실험을 통해 직사각형 모양의 정착구를 적용한 바닥판 정착부의 거동 특성을 분석하였다. 지압응력 및 좌열응력의 영향을 받는 국소구역의 철근배근 및 후프철근 추가 보강에 따른 영향을 검토하고, 일반구역의 철근배근 변화에 따라 국소구역에 미치는 영향을 검토하였다. Kwon [3]등은 원형 정착판 직경, 횡방향 리브 설치 위치와 같은 정착구의 형상 변수 및 나선철근 보강에 따른 정착부의 거동특성을 하중전달실험과 유한요소해석을 통해 평가하였다. 국부 파괴의 방지를 위해 ETAG 013[4]규정에 따라 보강철근을 배근하였다고 명시하고 있으며, 횡방향 리브의 설치로 정착구의 하중전달성능이 개선됨을 확인하였다. 정착부 보강철근에 따른 정착부의 극한거동 연구를 위해 Kwon [5]등은 정착구 크기, 나선철근 지름 및 띠철근 배근 간격에 따른 14개의 실험체를 제작하여 ETAG 013 규정에 따라 하중전달실험을 실시하였다. 띠철근의 구속영향에 따른 정착부의 극한강도 산정식을 제안하여 기존 강도식 및 실험결과와 비교 분석하였고, 정착부 강도 극대화를 위한 나선철근 및 띠철근 배근안을 제안하였다. 포스트텐션 정착구의 개발을 위해 Cho [6]등은 유한요소해석에 따라 단일 비부착 강연선의 고정이 가능한 1구 정착구를 개발하고, 개발된 정착구의 성능 평가를 위해 정착중 실험과 하중전달실험을 수행하였다. 하중전달실험을 위해, ETAG 013 및 KCI-PS101[7]규정에 따라 주근은 총 단면적이 $0.003A_c$ 를 넘지 않도록 SD400 D16을 사용하였고, 스테리프는 콘크리트 $1m^3$ 당 50kg을 초과하지 않도록 SD400 D10을 사용하여 정착부 극한인장강도가 강연선 공칭인장강도

의 1.64배임을 확인하였다. 정착구역 파괴의 주원인인 좌열력에 관한 연구를 위해 Choi 등[8]와 Kim 등[9]은 좌열력 산정식을 분석하고 평가하였다. Choi 등은 하중경로 모델에 의한 원형 정착구의 좌열력 계산식을 제안하였고, 제안식의 검토 및 수정을 위해, ETAG 013 규정에 의한 하중전달실험과 수치해석 결과를 비교·분석하였다. Kim 등은 기존에 제안된 좌열력 산정식들과 설계기준을 분석하고, 정착구 형상에 따른 변수를 설정하여 수치해석을 통한 산정식들의 타당성 평가를 수행하였다.

국내의 연구들은 VSL Korea, 대한 PC, 한국 PCS 및 KTA 등과 같이 현업에서 강연선 및 정착구의 납품·개발·실험을 수행하는 기업과의 협업을 통해 이루어지고 있으며, 대부분 시험성적서를 발급받아 공급승인을 받고 있다. 발주처에서 관련된 사항에 대해 정확하게 이해하고 평가할 수 있는 시스템이 없으므로 시험성적서에 의존하고 있는 것이 현실임을 감안할 때 실험에 대한 고찰이 불가결하다.

기 수행된 연구내용들은 정착구의 성능평가를 위해 대부분 유한요소해석 및 하중전달실험을 수행하고 있으며, 하중전달실험의 경우 KCI-PS101 혹은 ETAG 013의 규정에 따라 실험체를 제작하고 실험을 수행한 것으로 명시하고 있다. 또한, 시험성적서에 ‘ETAG 013 규정에 따름’이라고 표기하고 있으나, 제작된 실험체에 사용된 좌열력 보강 철근(나선철근)이나 보조보강철근을 ETAG 013 규정에서 명시한 최소의 철근량을 초과 배치하여 실험이 수행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ETAG 013 규정의 하중전달실험에 대한 고찰을 통해 정확한 실험체 제작과 보조철근량에 대한 검토를 수행하였으며, 고강도콘크리트나 고장력강선 적용시의 영향에 대해서도 실험을 통해 평가하였다. 실험체의 원형정착구 시스템은 상용화된 제품의 제원을 사용하였다.

2. 하중전달실험 기준

고강도 PS강연선이 구조물에 적용되기 위해서는 그에 적합한 정착시스템이 사용되어야 하며, 평가 기준에 따라 성능이 평가되어야 한다. 정착장치의 성능평가기준으로 미국의 PTI [10], AASHTO 및 ACI 기준 [11]과 유럽의 ETAG 013 및 FIP 기준 [12], 그리고 일본의 프리스트레스 콘크리트공법 설계시공지침 [13] 등이 있다. 정

착시스템에 대한 평가는 대부분 ETAG 규정에 따라 평가하고 있으며, 국내에서도 이를 바탕으로 콘크리트 표준시방서에 KCI-PS101을 제정하였다.

정착시스템은 Fig. 1과 같이 썰기, 앵커헤드, 쉬스관 및 정착구 등으로 구성되며, 강연선의 정착효율은 썰기와 앵커헤드의 상호관계에 의해 결정되는 것으로 정착중과 피로하중실험을 통해 평가하고 있다.

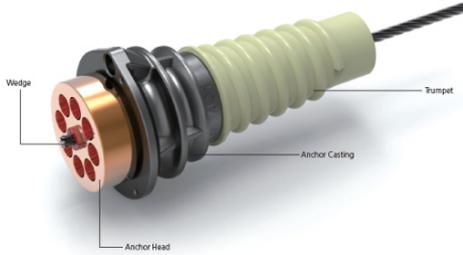


Fig. 1. Circular anchorage system (KTA[14])

ETAG 013 규정에서는 기계적 정착구(mechanical anchorage)와 접착식 정착구(bond anchorage)의 실험방법에 대해 자세히 명시하고 있다. 하중전달실험을 위해 제시하고 있는 실험체는 Fig. 2와 같이 콘크리트 기둥, 정착구, 파열력 보강철근, 보조 보강철근 및 덕트로 구성된다.

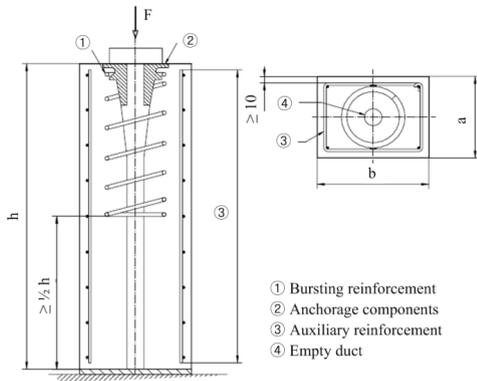


Fig. 2. Test specimen for load transfer test

콘크리트의 단면은 가로 a 와 세로 b 의 크기를 가지며, 단면적 A_c 는 긴장재와 콘크리트 강도 등급에 따른 축방향 압축에서의 최소 단면적에 부합하여야 한다. 이 단면 크기에 따라 단면 내 수평방향인 x 축과 y 축 방향으로의 최소 정착구 중심 간격 x, y 및 최소 연단 거리가 산정되

며, 별도의 특정 실험에 따른 경우 이외에는 Eq.(1)과 같이 정의되고, 구조물에서의 실제 간격, 중심 거리 및 연단 거리는 Eq.(2)를 따라야 한다.

$$A_c = x \cdot y = a \cdot b \quad (1)$$

$$x \geq 0.85a, \quad y \leq 1.15b \quad (2)$$

실험체 높이(h)는 콘크리트의 가로길이 a 와 세로길이 b 중 긴 것의 두 배 이상, 최하단 파열력 보강철근이 배치되는 높이는 Fig. 2와 같이 실험체 하단부로부터 $0.5h$ 이상 되어야 한다. 배치되는 철근의 피복 두께는 보통 10 mm 이나, 이보다 클 경우 최대 균열폭에 대한 허용기준이 변경되어야 한다.

정착부의 강도 향상을 위해 실험체에는 파열응력 저항을 위한 파열력 보강철근이 배치되어야 하며, 이와 함께 보조 보강철근이 사용 될 수 있다. 사용된 종방향 철근의 총 단면적이 $0.003A_c$ 이하, 스테럽의 철근량이 콘크리트 1 m^3 당 50 kg 을 초과하지 않도록 실험체의 높이에 따라 균등 배치한 경우에는 별도의 기술 승인이 필요 없음을 명시하고 있다. 즉, 이 조건을 만족하여 하중전달실험을 수행한 결과, 실험체가 안정하다면, 이는 계획된 실험체의 크기나 보강철근에 기반하여 정착구 성능을 확보한 것을 의미하며, 상기 조건을 만족하지 못하는 철근과 스테럽을 배치하여 결과를 얻는다면, 이는 계획된 실험체의 크기 및 파열력 보강철근에 따른 정착부의 성능을 보장할 수 없으므로 별도의 기술 승인이 필요하다는 의미로 볼 수 있다.

하중은 긴장재의 공칭인장강도 F_{pk} 를 기준으로 가력하고, Fig. 3과 같이 $0.2 F_{pk}$, $0.4 F_{pk}$, $0.6 F_{pk}$ 그리고 $0.8 F_{pk}$ 의 크기로 단계적으로 수행된다. $0.8 F_{pk}$ 의 하중 재하 후에는 $0.12 F_{pk}$ 와 $0.8 F_{pk}$ 의 크기로 최소 10번의 반복하중을 가해야 하며, 변형률과 균열폭의 크기가 Eq.(3)과 Eq.(4)의 안정 기준을 넘어서는 때 까지 반복하중을 가하여 콘크리트의 균열폭과 압축강도를 측정해야 한다.

$$W_n - W_{n-4} \leq 1/3(W_{n-4} - W_0) \quad (3)$$

$$\epsilon_n - \epsilon_{n-4} \leq 1/3(\epsilon_{n-4} - \epsilon_0) \quad (4)$$

여기서, W 는 균열폭을, ϵ 는 변형률을, n 은 반복하중 횟수를 의미하며, n 은 10이상이어야 한다.

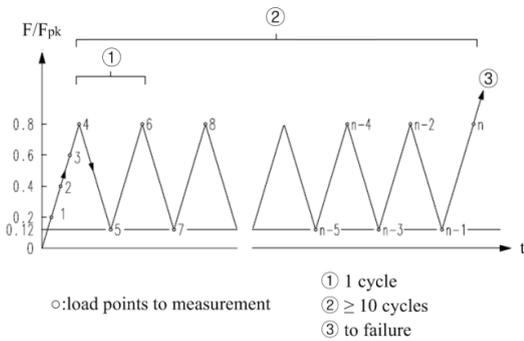


Fig. 3. Loading curve for test

콘크리트의 균열, 횡방향 및 종방향 변형률의 측정을 위한 게이지는 Fig. 4와 같이 실험체의 최소 두 측면에 설치하여야 하며 반복하중에 의한 최대 파열 효과가 발생하는 구역 내 설치된다.

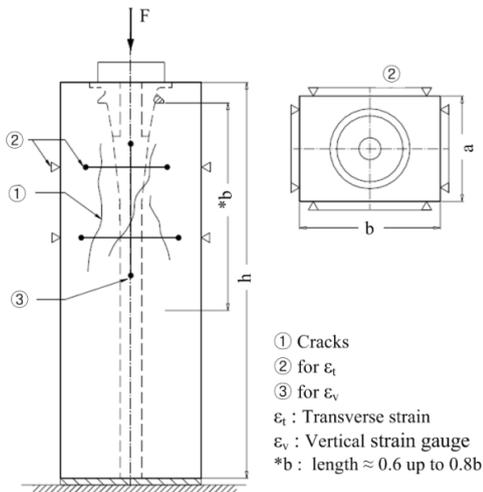


Fig. 4. Measuring set-up

정착구의 성능 평가를 위한 최대 균열폭의 허용 기준은 하중이 처음 0.8 F_{pk}와 0.12 F_{pk}의 크기에 도달하였을 때, 최대 균열폭이 0.15 mm를 초과하지 않아야하며, 마지막 0.8 F_{pk}의 크기에 도달하였을 때, 0.25 mm 보다 작아야 한다.

정착구의 극한인장강도 F_u 또한 정착구의 성능을 평가하기 위한 요소 중의 하나이며, 정착구의 극한 인장강도 F_u가 Eq.(5)를 만족할 때 정착구가 안정하다고 할 수 있다.

$$F_u \geq 1.1F_{pk}(f_{cm,e}/f_{cm,o}) \quad (5)$$

여기서, $f_{cm,e}$ 는 실험 종료 시 콘크리트 압축강도이며, $f_{cm,o}$ 는 설계기준에서 정하는 프리스트레스 도입 시 요구되는 콘크리트 압축강도를 의미한다.

3. 실험체 구성 및 제작

하중전달실험을 위한 실험체는 사각기둥 형태로 제작하였고, 콘크리트 공시체의 압축강도가 PS강연선 긴장시의 압축강도와 동일한 강도에 도달할 때 실험을 실시하였다. 원형 정착구는 사각 정착구에 비해 분산된 지압 효과로 표면 지압판의 면적이 줄어 콘크리트 강도를 높여 부재단면을 줄여야 하는 구조물에 유용하게 적용될 수 있다. Fig. 5는 본 실험에 적용된 상용제품의 원형 정착구 캐스팅을 나타낸다.



Fig. 5. Anchor casting

Table 1. Specimens of load transfer test

Specimens no.	Strength of concrete	Size		Strand 15.2 mm		Anchorage			
		Side length	Height	Tens. strength	Nominal tens. strength	Hole	Weight	Dia.	Spacing
		fck	mm	mm	MPa	(kN)	hole	ton	D
#1	40	300	600	1860	1806	7	186.2	180	300
#2		300	600		2322	9	239.4	190	300
#3		350	700		3096	12	319.2	220	350
#4	70	400	800	1860	3870	15	399.0	250	400
#5		325	650		3870	15	399.0	250	325
#6	40	325	650	2400	2996	9	306.0	230	325
#7		380	760		3995	12	408.0	268	380

Table 1과 같이 콘크리트 압축강도, 강선의 인장강도, 실험체의 가로, 세로 크기 및 정착구 직경 등을 실험체 변수로 설정하여 총 7개의 실험체를 ETAG 013 규정에

하중전달실험은 계명대학교 첨단건설재료 실험센터의 500톤급 UTM (Universal test machine)을 이용하여 실시하였다.

하중재하는 먼저 0.8 F_{pk} 의 크기까지 가력되었고, 그 후에는 0.12 F_{pk} 와 0.8 F_{pk} 의 크기로 최소 10번의 반복하중을 가력하여 안정화 기준을 넘어설 때까지 가력하였다. 수평 및 수직 변형률과 균열의 측정을 위한 게이지는 두 측면에 설치하였고, 실험 전경은 Fig. 9와 같다.



Fig. 9. Test set-up of specimen

4. 실험 결과 및 분석

4.1 압축강도실험

하중전달실험에 사용될 설계강도 40 MPa 및 70 MPa의 콘크리트 압축강도 검사를 위해, Table 4와 같이 각 설계 강도 별로 3개의 공시체에 대한 압축강도실험을 압축시험기를 이용하여 실시하였다. 실험결과, 평균 압축강도는 31.5 MPa, 70 MPa로 각각 측정되어, 이를 기준으로 하중전달실험을 수행하였다.

Table 4. Results of compressive strength test

Design strength	Specimens	Compressive strength (MPa)
40MPa	#40-1	31.6
	#40-2	29.4
	#40-3	33.5
	Average	31.5
70MPa	#70-1	64.2
	#70-2	79.0
	#70-3	66.9
	Average	70.0

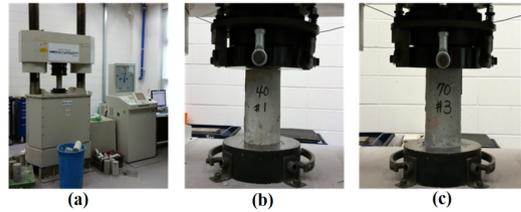


Fig. 10. Compressive strength test
(a) View (b) 40 MPa (c) 70 MPa

4.2 하중전달실험

반복 하중이 가력되는 동안 발생한 실험체 별 최대 균열폭과 균열발생하중은 Table 5와 같고, 대표적인 하중-시간 곡선 및 하중-변형률 곡선을 Fig. 11 과 Fig. 12에 나타내었다.

최대 균열폭을 ETAG 013의 균열폭 허용기준과 비교해 보면, 실험체 #1과 #2만 허용기준을 만족하였고 나머지는 허용기준을 초과하여 균열이 발생하였다. 변형률의 경우, 수평 및 수직 방향에 대해 하중이 증가함에 따라 증가하다가 균열 발생 후에는 급격히 감소하는 양상을 보이며, 균열 발생 후 각 실험체 별 최대 균열 형상은 Fig. 13과 같다.

Table 5. Results of crack measurement

Specimens	Max. crack width (mm)	Cracking load (kN)
#1	first-0.80Fpk : 0.10 (F1) [*] last-0.12Fpk : 0.02 (F2) last-0.80Fpk : 0.11 (F2)	0.64 F_{pk}
#2	first-0.80Fpk : 0.05 (F1) last-0.12Fpk : 0.04 (F1) last-0.80Fpk : 0.13 (F1)	0.77 F_{pk}
#3	first-0.80Fpk : 0.04 (F1) last-0.12Fpk : 2.71 (F1) last-0.80Fpk : 2.71 (F1)	0.72 F_{pk}
#4	first-0.80Fpk : 0.25 (F1) last-0.12Fpk : 0.23 (F1) last-0.80Fpk : 0.30 (F1)	0.55 F_{pk}
#5	first-0.80Fpk : 0.20 (F2) last-0.12Fpk : 0.60 (F2) last-0.80Fpk : 0.84 (F1)	0.40 F_{pk}
#6	first-0.80Fpk : 0.41 (F1) last-0.12Fpk : 0.30 (F1) last-0.80Fpk : 0.53 (F1)	0.40 F_{pk}
#7	first-0.80Fpk : 0.20 (F2) last-0.12Fpk : 0.18 (F2) last-0.80Fpk : 0.29 (F2)	0.59 F_{pk}

^{*}F1 and F2 are the side number of specimens

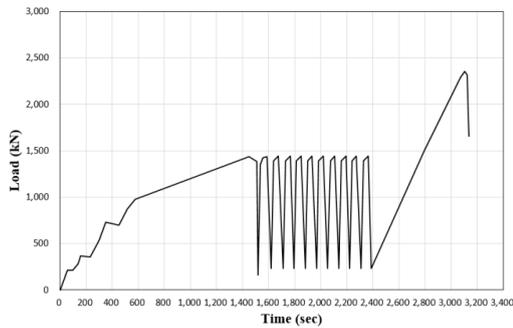


Fig. 11. Load-time curve of specimen #1

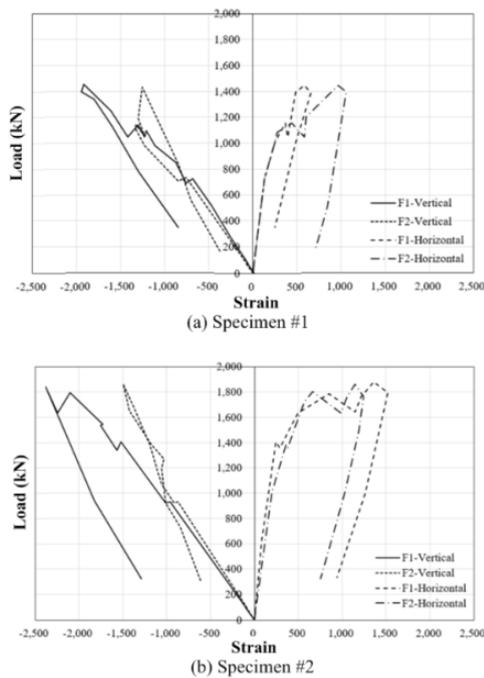


Fig. 12. Load-strain curve

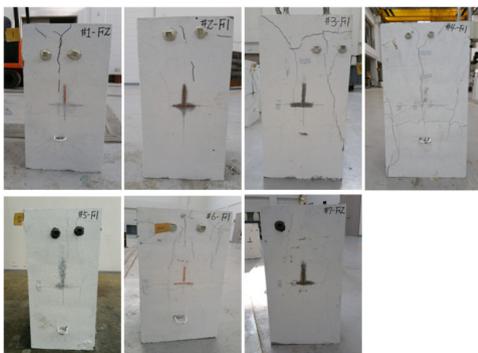


Fig. 13. Crack on specimens

Table 6. Results of maximum load

Specimen	F_{pk} (kN)	$1.1F_{pk}$ (kN)	Max. Load (kN)	
#1	1,806	1,986	2,368.4	$1.30F_{pk}$
#2	2,322	2,554	2,348.3	$1.00F_{pk}$
#3	3,096	3,405	3,216.7	$1.04F_{pk}$
#4	3,870	4,257	3,096	$0.80F_{pk}$
#5	3,870	4,257	3,369.5	$0.87F_{pk}$
#6	2,996	3,296	3,036.2	$1.01F_{pk}$
#7	3,995	4,394	3,992.3	$1.00F_{pk}$

각 실험체 별 긴장재의 극한인장강도 및 측정된 극한 하중은 Table 6과 같다. 실험체 #1은 ETAG 013 규정에 따른 정착구의 극한인장강도 $1.1 F_{pk}$ 를 넘어섰고, 나머지 실험체는 $1.1 F_{pk}$ 의 72-90% 정도의 결과를 나타내었다. 15홀 정착구인 실험체 #4와 #5가 가장 작은 크기의 극한하중을 보였으며, 콘크리트 압축강도가 40 MPa로 동일한 실험체 #1-4의 경우에는 실험체의 크기나 긴장력이 증가하더라도 극한하중의 크기가 비례적으로 증가하지는 않았다.

실험체 #1과 #2는 같은 양의 좌역력 보강철근과 보조 보강철근을 갖는 동일한 크기의 실험체이나, #2의 긴장력이 #1보다 크기 때문에, #2의 극한하중이 #1보다 작고 $1.1 F_{pk}$ 의 90%정도 수준으로 나타났다. 보조 보강철근은 이미 철근량 규정에 따라 배근되었으므로, #2의 극한강도를 증가시키기 위해서는, 보조 보강철근량 규정을 준수하면서 실험체의 크기를 규정과 같이 15% 증가시키는 것이 바람직한 실험방법으로 평가되었다.

즉, 현재 상용제품에서 제시하고 있는 정착구간 간격의 최소치를 그대로 적용할 수 있는 최소한의 실험체 크기를 설정하여 단위면적당 응력을 감소시키는 방법으로 실험을 수행할 수 있다.

실험결과, 균열폭 및 극한인장강도에 대해, 실험체 #1은 ETAG 013에서 규정하는 기준에 부합하는 성능을 나타내었으나, 다른 실험체들은 규정에서 제안하는 허용값을 만족하지 못하고 있다. 따라서, 통상적으로 제한된 보조 보강철근량을 따르지 않는 실험에서는 실험성적서 발급 시 ‘ETAG 013 규정에 따름’이라고 명시할 수 없음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 ETAG 013 규정에서 명시하는 하중전

달실험 방법과 성능기준에 대해 고찰하고, 실험체 변수에 따른 원형 정착구의 하중전달실험을 수행하여 정착구의 성능을 평가하였다. 실험결과, 실험체 #1은 규정의 허용치를 만족하였으나, 나머지 실험체는 극한강도 허용값의 72-90% 수준의 결과를 보였다. PT정착구 상용제품을 사용하고, ETAG 013 규정에 따른 최소 보조보강철근을 배치하여 실험을 수행하였음에도 허용기준을 만족하지 못한 것은 ETAG 013 규정이 적절한 크기와 강도의 콘크리트와 파열력 보강철근을 사용하지 않으면 성능을 만족시키지 못하는 매우 엄격한 규정임을 의미한다. 또한, 허용규정치의 만족을 위해 보조 보강철근량을 증가시키는 방법으로 실험이 수행되었다면 ETAG 013 규정에 따른 하중전달실험이 아니라고 할 수 있다.

본 연구에서는 실험체가 각 제품에서 제시하는 최소 크기로 제작되었기 때문에, ETAG 013 규정을 만족시키는 성능을 확보하기 위해서는 보조보강철근의 최소량을 준수하면서 실험체의 크기를 규정에서 제시하는 치수로 적용되어야 하고, 이에 따라 수직하중에 대한 응력이 감소될 것으로 예상된다. PT정착구 시스템이 적용되는 각각의 구조체는 실물실험과 같이 별도의 실험을 통해 안정성 검증이 수행된다면, ETAG 013 규정의 보조보강철근의 양과는 무관할 수 있다. 따라서, 파열력 보강을 위한 보조보강 철근량을 증가시킬 경우에는 별도의 성능 실험·인증 후 제품이 사용되어야 한다.

References

- [1] American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) Standard Specifications for Highway Bridges, 5th ed. USA, 2010.
- [2] J.K., Kim, Y., Kwon, and H.G., Kwak, Anchorage Zone Behavior in the Slab with Flat Anchorage. J. Korean Soc. Hazard Mitig., vol. 14, no. 1, pp. 67-76, 2014. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.1.67>
- [3] Y., Kwon, J.K., Kim, and H.G., Kwak, Ultimate Strength of Anchorage Zone according to Geometric Parameters of ost-Tensioning Anchorage Using a Finite Element Method. J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea, vol. 28, no. 3, pp. 317-324, 2015. DOI: <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2015.28.3.317>
- [4] EOTA, Guideline for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures (ETAG 013), 2002.
- [5] Y., Kwon, J.M, Yang and J.K., Kim, Experimental Study on the Ultimate Bearing Strength of Post-Tensioning Anchorage Zone. J. Korean Soc. Hazard, 16(4), 175-183, 2016. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.4.175>
- [6] A.S., Jo, Y.W., Jo, B.G., Jeon and H.G. Kang, Development and Performance Test for Unbonded Post-Tensioned Anchor, Korea Concrete Institute, 27(1), 11-20, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.1.011>
- [7] Korea Concrete Institute (KCI), Concrete Design Code and Commentary. Korea, 2012.
- [8] K.H., Choi, B.C. Lho, Study on Bursting Stress in Anchorage Zone of Prestressed Concrete using Circular Anchorages, Korea institute of structural maintenance and inspection, 19(1), 3-12, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.1.003>
- [9] M.S., Kim, C.H., Yoon and Y.K. Lee, Comparative Study of Bursting force Equations for Post-tensioned Anchorage Zones. Korean association for spatial structures 17(4), 69-76, 2017. DOI: <https://doi.org/10.9712/KASS.2017.17.4.069>
- [10] PTI, Post-tensioning manual, Post-tensioning institute, 6th edition, 2006.
- [11] American Concrete Institute (ACI), ACI 318-11 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. USA, 2011.
- [12] CEB-FIP, M, Design of concrete structures. CEB-FIP-Model-Code 1990. London : British Standard Institution, 1993.
- [13] JSCE, Design and construction guidelines of prestressed concrete, Japan Society of Civil Engineers, 2011.
- [14] KTA, Korea Total Anchorage System, www.ktas.kr, 2007.
- [15] P.Y., Song, K.B., Han, State and Developed Technologies of Super Long-span Bridge. Korea Concrete Institute, 26(2), 14-19, 2014.
- [16] Dachan P.C construction, www.dachanpconstruction.com, 1998.

김 범 준(Bum-Joon Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 건국대학교 일반대학원 사회환경시스템공학과(공학석사)
- 2017년 2월 : 건국대학교 일반대학원 사회환경시스템공학과(공학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 건국대학교 아시아시설물연구센터 박사후연구원

<관심분야>

토목구조

김 현 기(Hyun-Gi Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 9월 : 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2005년 10월 ~ 2012년 11월 : (주) 동호 기술연구소/구조부 부장
- 2016년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 해상풍력발전, 교량공학