

비부착식 단일 강연선용 원형 정착구를 적용한 포스트텐션 정착 구역의 보강

Anchorage Zone Reinforcement for Unbonded Post-Tensioned Circular Anchorage for Single Tendon

김민숙*
Kim, Min Sook

노경민**
Ro, Kyong Min

이영학***
Lee, Young Hak

Abstract

In the post-tensioned concrete member, additional reinforcement is required to prevent failure in the anchorage zone. In this study, the details of reinforcement suitable for the anchorage zone of the post-tensioned concrete member using circular anchorage was proposed based on the experimental results. The tests were conducted with the compressive strength of concrete and reinforcement types as variables. The experimental results indicated that the additional reinforcement for the anchorage zone is required when the compressive strength of concrete is less than 17.5 MPa. U-shaped reinforcement shows most effective performance in terms of maximum strength and cracks patterns.

Keywords : Unbonded, Post-tension, Circular anchorage, Anchorage zone

1. 서론

포스트텐션(Post-tension, PT) 부재의 정착 구역에는 매우 큰 압축 응력이 작용한다. 이러한 압축 응력이 콘크리트의 압축 강도를 초과하는 경우 정착 구역에서 균열 및 파괴가 발생할 수 있다. 정착 구역의 국부적인 강도를 향상시키고 균열 발생을 방지하기 위해 횡방향으로 철근을 보강하거나 정착판 앞에 와이어 메쉬 등을 보강하는 방법을 사용한다¹⁾. 국내의 건축구조기준(KBC 2016)²⁾에서는 <Fig. 1>과 같이 정착 구역에 발생하는 좌회력, 활력 및 종방향 단부 인장력에 저항할 수 있도록 헤어핀 철근 및 폐쇄 스테럽 등을 사용하여 보강하도록 규정하고 있다.

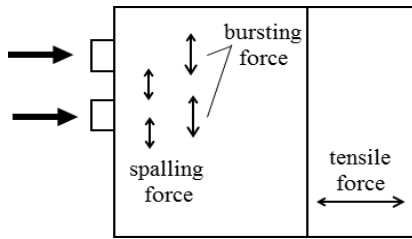
정착 구역에서의 균열 및 파괴는 포스트텐션 구

조물의 거동 및 구조 성능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 정착 구역의 효과적인 보강에 관한 연구가 다수 수행되었다. Haroon, Yazdani & Tawfiq(2006)는 강섬유 보강 콘크리트를 사용하여 정착 구역의 보강 철근량을 감소시키는 방안에 대해 연구하였다³⁾. 이를 위해 강섬유 혼입률과 보강 철근량을 변수로 실험을 수행하였다. 실험 결과 Hooked-end 타입의 강섬유를 1% 혼입한 경우 별도의 보강 철근 없이 정착 구역의 안전성을 확보할 수 있었다. Axson(2008)은 경량 콘크리트 프리스트레스트 부재에서 정착 구역의 보강 철근 유무, 부재의 형상을 변수로 하중 가력 실험을 수행하였다⁴⁾. 실험 결과를 통해 콘크리트 부재의 면적에 대한 정착구 면적의 비, 횡방향 구속 철근을 고려한 경량 콘크리트 부재의 정착 구역 보강 방법을 제시하였다. Cho & Kang(2017)은 시공성이 부족한 기존 U자형 철근 보강 방법을 개선하고자 나선형 원형 철근을 통한 정착 구역 보강 방법을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다⁵⁾.

AASHTO⁶⁾에서는 특정 범위에 있는 직사각형 정착구를 사용하지 않은 경우 정착구 제조사의 시험 및 성능 평가 결과에 따라 철근 보강 등을 설계하도록 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구⁷⁾⁸⁾를

* 정회원, 경희대학교 건축공학과 학술연구교수
Architectural Engineering, Kyung Hee University
** 학생회원, 경희대학교 건축공학과, 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

통해 개발된 원형 정착구를 적용한 포스트텐션 콘크리트 부재의 정착 구역 보강 방법을 제안하고자 한다. 정착 구역이 보강되지 않은 콘크리트 강도를 변수로 한 시험체와 정착 구역의 보강 상세를 변수로 한 시험체의 구조 성능 시험을 통하여 선행 연구를 통해 개발된 원형 정착구에 적합한 정착 구역의 보강 상세를 제시하였다.



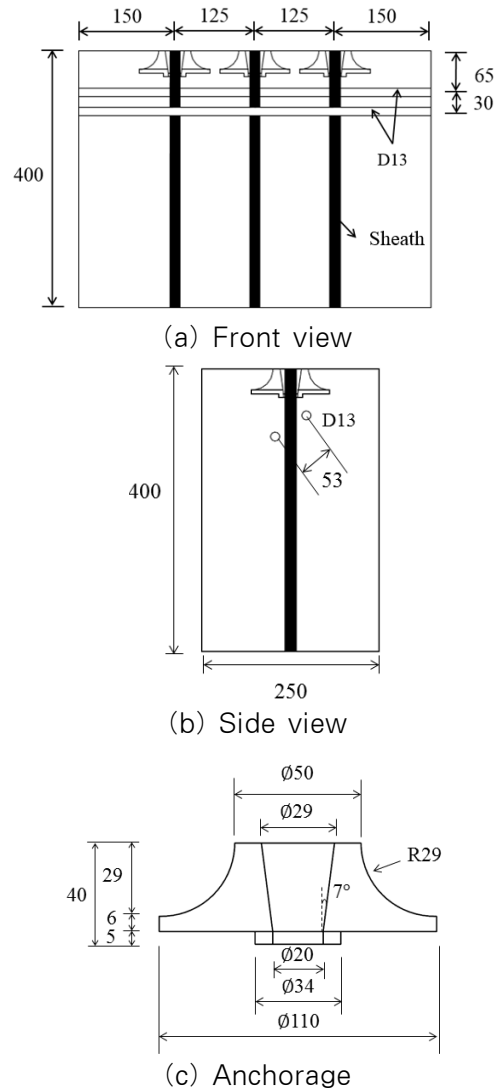
<Fig. 1> Tension stress in anchorage zone (KBC 2016)

2. 콘크리트 강도 제안 실험

2.1 실험 개요

일반적으로 포스트텐션 부재에서는 강연선 긴장 이후 정착 장치를 통해 콘크리트 부재에 전달되는 압축력이 콘크리트의 지압 강도보다 클 경우 정착 구역에 균열이 발생하기 때문에 정착 장치의 면적을 증가시키거나 철근을 보강하여야 한다. 본 연구에서는 선행 연구에서 개발한 원형 정착구를 적용할 경우 정착 구역에 철근 보강이 필요한 콘크리트 압축 강도의 기준을 제시하기 위하여 콘크리트 강도를 변수로 한 구조 성능 시험을 수행하였다. 원형 정착구 3개가 설치된 5개의 콘크리트 시험체를 제작하였다. 콘크리트 압축 강도의 영향만을 평가하기 위하여 설계 기준에서 제시하고 있는 기본적인 철근 보강을 제외하고 정착 구역에 철근 보강은 하지 않았다. KBC 2016에서는 단일 강연선의 정착 구역 설계 시 각 정착 장치 앞쪽에 시험체 바닥면으로부터의 높이 1/2의 위치 안에 최소한 2개의 D13 철근을 슬래브 끝단에 평행하게 배치하도록 제시하고 있다. 이때 철근은 각 정착 장치의 외측 면으로 150mm 이상 연장하여야 한다. <Fig. 2>에 시험체의 상세를 나타내었다. 시험체에 사용된 원형 정착구의 항복 강도는 490MPa이며, 수평 철근은 항복 강도 400MPa인 D13 이형 철근을 사용하였다. 각

시험체의 콘크리트 압축 강도는 공시체의 압축 강도 시험을 통해 확인하였다. 시험체 일람을 <Table 1>에 정리하였다.



<Fig. 2> Dimension of specimens (mm)

<Table 1> Details of specimen with variable compressive strength of concrete

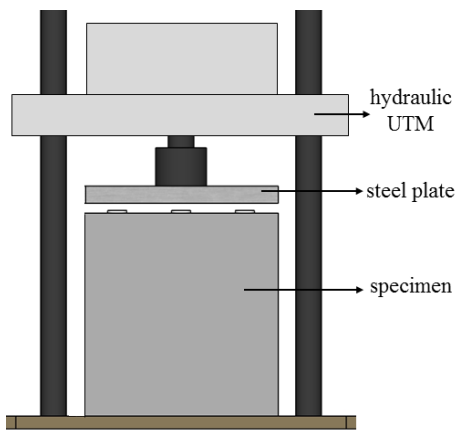
Specimen	f_{ck} (MPa)	Dimension (mm)	n (EA)
C1	14	500×210×400	3
C2	17.5		
C3	18		
C4	21		
C5	22		

f_{ck} : Compressive strength of concrete

n : The number of anchorages

2.2 실험 방법

본 연구의 실험에서는 강연선 삽입 후 긴장하여 콘크리트에 압축력을 가하는 방법 대신 정착구에 직접 압축력을 가하는 방법을 선택하였다. 정착구에 균일한 하중이 재하될 수 있도록 시험체 상부에 강판을 설치하였으며, 1,000kN 용량의 유압식 UTM을 사용하여 60kN/min의 속도로 정적 하중을 가력하였다<Fig. 3>.



(a) Test setup



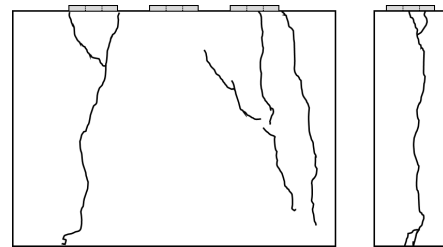
(b) Photograph of test setup

<Fig. 3> Test set-up

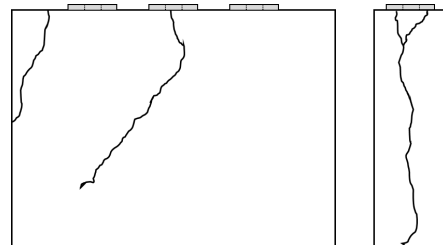
2.3 실험 결과

<Fig. 4>에 시험체의 균열 및 파괴 양상을 나타내었다. 콘크리트 압축 강도 22MPa인 C5 시험체는 가력 장치인 UTM의 최대 용량에 도달할 때까지 육안으로 균열을 확인할 수 없었으나 안전상의 이유로 파괴를 확인하기 전에 실험을 중단하였다. C5 시험체를 제외한 나머지 시험체는 최대 하중의 약

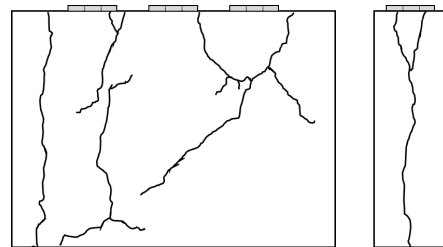
72%에 도달하였을 때 정착구 위치에서 균열을 확인하였다. 압축 강도가 가장 낮은 C1 시험체는 약 430kN에 도달했을 때 정착구 주변에서 균열을 확인할 수 있었으며, 압축 강도가 유사한 C2 시험체와 C3 시험체는 각각 약 630kN, 약 618kN의 하중에서



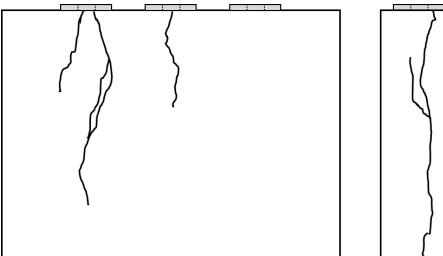
(a) C1



(b) C2



(c) C3



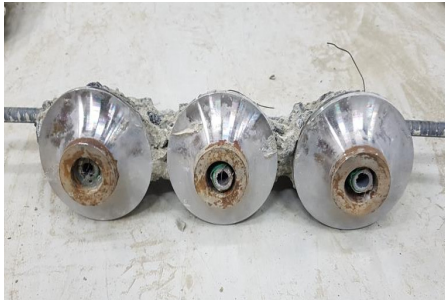
(d) C4



(e) Failure of C2

<Fig. 4> Crack patterns and failure of specimens

정착구 주변의 균열이 관찰되었다. 정착구 주변에 발생한 균열이 쉬스 방향으로 진전되다가 최대 하중에 도달하면서 부채꼴 모양으로 퍼지며 취성적으로 파괴되는 양상을 보였다. 이는 재하 하중이 증가하면서 콘크리트 변형률이 극한 변형률에 도달하였으나 시험체의 횡방향으로 구속력을 가할 수 있는 철근이 보강되지 않았기 때문에 취성적으로 파괴된 것으로 판단된다. 시험체 파괴 시 <Fig. 5>와 같이 정착구 변형은 발생하지 않았으며 시험체 파괴 시 최대 변위가 유사한 것으로 보아 하중이 시험체에 고르게 가력되었음을 확인할 수 있다.



<Fig. 5> Anchorage after testing

정착 구역 보강이 요구되는 콘크리트 최소 강도를 제안하기 위하여 시험체별 파괴 하중과 강연선의 허용 응력을 비교하였다. KBC 2016에서 긴장재의 허용 응력은 긴장재의 극한 강도(f_{pu})의 80% 또는 항복 강도(f_{py})의 94% 중 작은 값 이하로 제시하고 있다. 건축 구조물에 일반적으로 사용되는 SWPC-7-B 강연선(공칭 단면적 138.7mm^2)의 극한 강도는 $1,860\text{MPa}$, 항복 강도는 $1,674\text{MPa}$ 이므로 긴장재의 허용 응력을 $1,488\text{MPa}$ 으로 산정할 수 있다. 따라서 $1,488\text{MPa}$ 의 하중이 정착 장치를 통해 콘크리트 부재에 전달되므로 해당 응력 이상의 응력을 견딜 수 있어야 하며 그렇지 않을 경우 정착 구역의 추가적인 보강이 필요한 것으로 볼 수 있다. <Table 2>에서 보는 바와 같이, C1 시험체를 제외한 나머지 시험체는 긴장재의 허용 응력보다 높은 하중에 도달한 이후에 정착 구역에서의 균열이 관찰되었다. 최대 하중을 기준으로 보면, 긴장재의 허용 응력보다 약 26~42% 정도 큰 하중을 보여 본 연구의 원형 정착구를 사용했을 경우 콘크리트 압축 강도가 17.5MPa 이상이면 정착 구역에 기본 보강을 제외하

고 추가적인 철근 보강 없이도 허용 응력 수준 이상의 응력에 저항할 수 있는 것으로 판단된다.

<Table 2> Experimental results with variable compressive strength of concrete

Specimen	$0.8F_{pu}$ (kN)	P_{cr} (kN)	P_{max} (kN)	$\frac{P_{cr}}{0.8F_{pu}}$	δ_{max} (mm)
C1		431.8	619.1	0.70	4.37
C2		632.2	784.1	1.02	3.96
C3	619.2	618.3	779.7	1.00	4.61
C4		666.4	882.2	1.08	4.01
C5		-	881.6	-	4.74

F_{pu} : Tensile strength of strand

P_{cr} : The first crack load

P_{max} : The maximum load

δ_{max} : Displacement at maximum load

3. 정착 구역 보강 상세 제안 실험

3.1 시험 개요 및 사용 재료

본 연구에서는 비부착식 단일 강연선용 원형 정착구를 적용한 PT부재의 정착 구역 보강 상세에 따른 성능을 평가하고자 보강 상세를 변수로 총 8개의 시험체를 제작하여 하중 가력 실험을 수행하였다. 하중 가력 방법은 정착 구역의 보강이 필요한 콘크리트 압축 강도 기준을 결정하기 위한 시험 방법과 동일하게 수행하였다. 시험체 제작에 사용된 콘크리트 압축 강도는 17MPa 이며, 원형 정착구의 항복 강도는 490MPa , 정착 구역 보강에는 항복 강도 400MPa 인 D13 이형 철근을 사용하였다. 실험에 사용된 재료의 물성치를 <Table 3>에 나타내었다.

<Table 3> Material properties

	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
Concrete	17	-	-
Rebar(D13)	-	400	200
Circular anchorage	-	490	200

f_y : Yield stress, E_s : Elastic modulus

3.2 시험체 상세

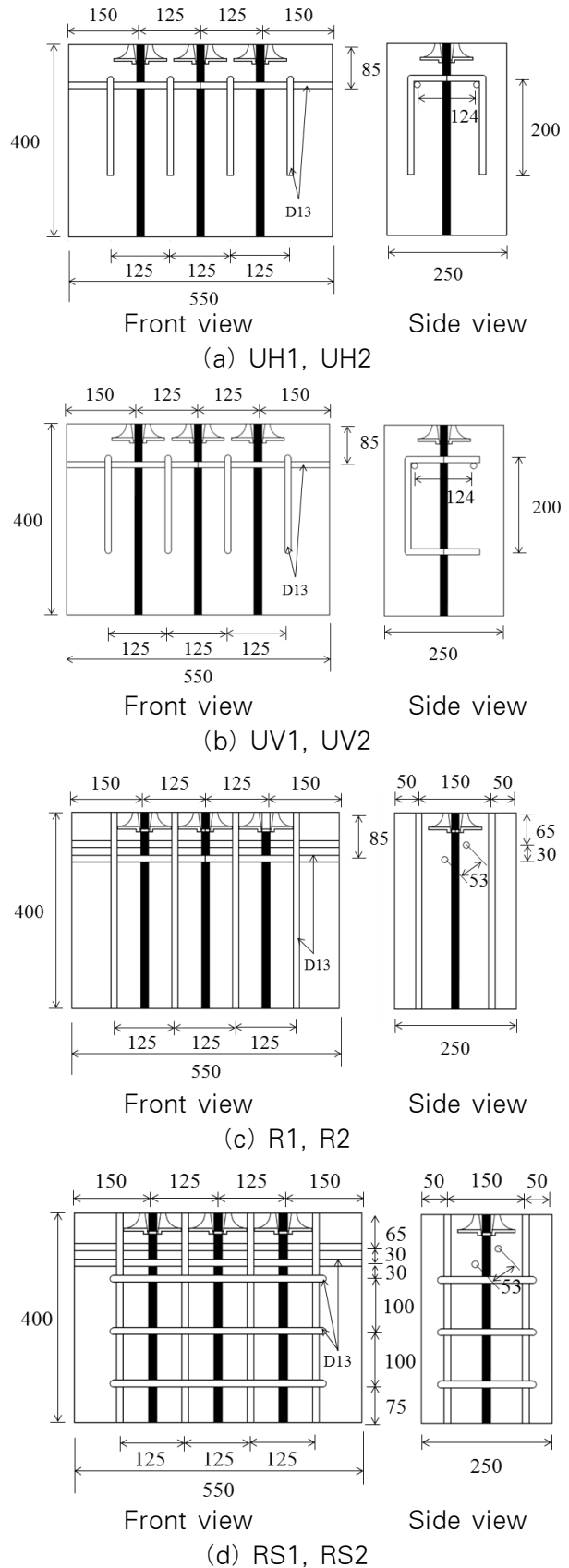
건축구조기준(KBC 2016)에서는 단일 강연선의 경우 6개 이상의 정착 장치 각 그룹에 대해서 n+1 개의 헤어핀 철근 또는 폐쇄 스테럽이 D10 이상으로 배치되어야 하며, 이때 헤어핀 철근 또는 스테럽은 부재에 연장된 다리를 가지고 단부에 수직으로 배치하도록 규정하고 있다. 여기서 정착 장치의 중심 간격이 300mm 이하이면 정착 장치는 그룹으로 간주되며, n은 정착 장치의 개수이다. 본 연구에서는 KBC 2016의 정착 구역 보강에 관한 가이드라인을 고려하여 U자형 철근이 부재 방향과 수평으로 배치된 시험체 2개와 수직 방향으로 배치된 시험체 2개를 제작하였다. 또한 기본적인 정착 구역의 보강 상세가 미치는 영향을 확인하기 위하여 종방향 철근만으로 보강된 시험체 2개, 종방향 철근 및 폐쇄 스테럽으로 보강된 시험체 2개를 제작하였다. 콘크리트 시험체는 3개의 정착구가 매립된 형태로 모두 550×250×400mm의 크기로 동일하게 설계되었다. 시험체 일람을 <Table 4>에 정리하였으며, <Fig. 6>에 시험체의 상세를 나타내었다.

<Table 4> Details of test specimens with variable reinforcement type

Specimen	Reinforcement	Dimension (mm)	n (EA)
UH1	Horizontal	550×250×400	3
UH2	U-shaped bars		
UV1	Vertical		
UV2	U-shaped bars	(b×t×h)	
R1	Horizontal bars		
R2	Horizontal bars and stirrups		

3.3 실험 결과

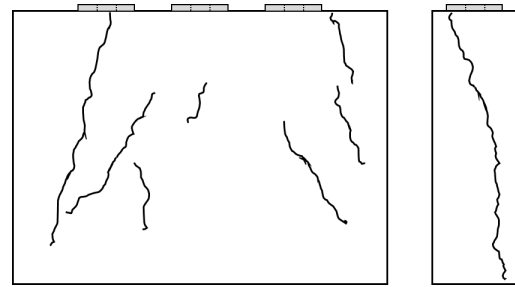
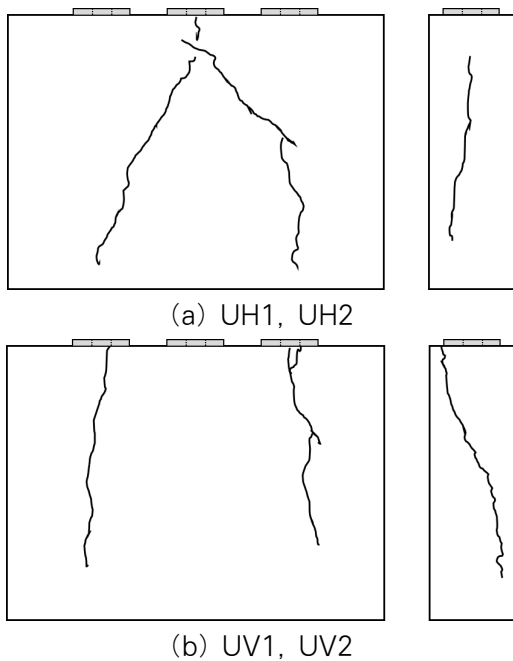
정착 구역 보강 상세를 변수로 한 시험체의 균열 및 파괴 양상을 <Fig. 7>에 나타내었다. 안전상의 문제로 시험체의 최대 하중이 UTM 최대 용량의 90%인 약 900kN까지 도달하면 파괴가 발생하지 않



<Fig. 6> Details of specimens

아도 실험을 중단하였다. 따라서 U자형 철근으로 보강한 UH1, UV1, UV2와 종방향 철근 및 폐쇄 스테럽으로 보강한 RS2 시험체의 최종 파괴는 확인할 수 없었다.

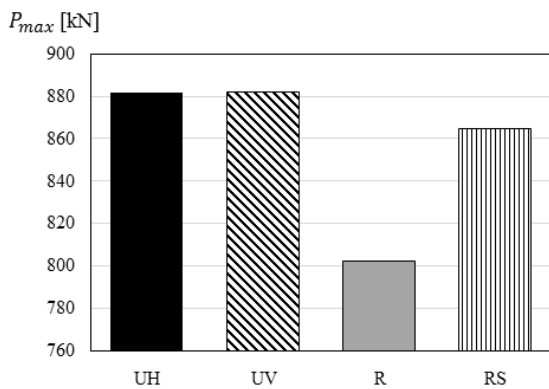
모든 시험체는 쉬스 방향을 따라 균열이 진전되다가 부채꼴 모양으로 균열이 진전되는 양상을 보였다. 정착구 주변에서 초기 균열이 발생한 이후 쉬스의 수직 방향으로 작용하는 인장 응력으로 인하여 쉬스 방향으로 균열이 진전되는 것으로 판단된다. UH2 시험체의 경우 U자형 철근이 보강된 위치의 하부 방향으로 균열 폭이 증가하며 파괴되었다. 종방향 철근 및 폐쇄 스테럽으로 보강한 RS1 시험체는 <Fig. 7 (f)>와 같이 시험체 상부에서 정착구를 따라 균열이 진전되다가 파괴되었다. 종방향 철근만으로 보강된 R1, R2 시험체는 <Fig. 7 (g)>와 같이 쉬스 방향으로 균열이 진전되다가 시험체가 쪼개지며 취성적으로 파괴되었다. 종방향 철근으로만 정착 구역을 보강할 경우 정착 구역에서 발생하는 균열 제어에 효과적이지 않은 것으로 판단된다.



<Fig. 7> Crack and failure of test specimens

비부착식 강연선용 원형 정착구의 정착 구역 보강 상세를 제안하기 위하여 <Fig. 8>에 보강 상세에 따른 최대 하중을 비교하였다. 종방향 철근으로만 보강된 R1, R2 시험체의 경우 최대 하중이 평균 802.1kN으로 U자형 철근으로 보강된 시험체의 최

대 하중의 90% 수준인 것으로 나타났다. 이를 통해 종방향 철근으로 정착 구역을 보강하는 것보다는 U자형 철근으로 보강하는 것이 정착 구역의 성능 향상에 더 효과적인 것으로 판단된다. U자형 철근으로 보강된 시험체의 경우 U자형 철근의 배치 방향에 관계없이 유사한 최대 하중을 보였다. 이를 통해 U자형 철근으로 정착 구역을 보강하는 경우 철근 배치 방향의 유연한 선택이 가능할 것으로 판단된다. UH2 시험체는 동일한 보강 상세를 가지는 UH1 시험체 최대 하중의 약 90% 수준일 때 변위는 1.03배 크게 측정되었다. 이는 UH2 시험체 가력 시 정착구에 균일한 하중이 도입되지 않은 것으로 판단되어 실험 결과 분석 시 UH2 시험체는 고려하지 않았다. 실험 결과를 <Table 5>에 정리하였다.



<Fig. 8> Comparison of test results

<Table 5> Experimental results with variable reinforcement types

Specimen	Reinforcement	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)
UH1	Horizontal	882.0	5.19
UH2	U-shaped bars	807.0	5.35
UV1	Vertical	882.0	4.32
UV2	U-shaped bars	882.0	4.17
R1	Horizontal bars	803.3	5.41
R2		800.8	4.18
RS1	Horizontal bars and stirrups	847.6	4.54
RS2		882	5.09

4. 결론

본 연구는 선행 연구를 통해 제안된 비부착식 강연선용 원형 정착구를 적용한 포스트텐션 정착 구역 보강 상세를 제안하고자 콘크리트 강도를 변수로 한 시험체와 보강 상세를 변수로 한 시험체를 제작하여 하중 가력 실험을 수행하였다. 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

1) 건축물에서 일반적으로 사용되는 SWPC-7-B 강연선의 허용 응력과 콘크리트 강도를 변수로 한 시험체의 파괴 하중을 비교하였다. 이를 통해 콘크리트 압축 강도가 17.5MPa 이상일 경우 정착 구역에 추가적인 철근 보강 없이도 강연선의 허용 응력 이상의 응력에 저항할 수 있는 것으로 판단된다.

2) 정착 구역 보강 상세를 변수로 한 시험체의 실험 결과, 방향 철근만으로 보강된 R1, R2 시험체는 쉬스 방향으로 균열이 진전되다가 취성적으로 파괴되었으나 U자형 철근을 수평 방향으로 배치한 UH2 시험체의 경우 보강 철근이 위치한 부분의 하부 방향으로 균열 폭이 진전되며 파괴되었다. 균열 및 파괴 양상 측면에서 볼 때, 종방향 철근보다는 U자형 철근 보강 방법이 더 효과적인 것으로 판단된다.

3) 정착 구역 보강 상세를 제시하고자 보강 상세를 변수로 실험을 수행하여 시험체별 최대 하중을 비교하였다. 종방향 철근으로만 보강된 시험체의 최대 하중이 U자형 철근으로 보강된 시험체의 90%에 미치는 결과를 보였다. 이를 통해 종방향 철근은 정착 구역 보강에 효과적이지 않은 것으로 판단된다. U자형 철근과 종방향 및 폐쇄 스티럽으로 보강된 시험체의 최대 하중은 유사하게 나타났으나 철근량 및 철근의 간격 등 시공성 측면에서 볼 때 U자형 철근을 보강하는 방법이 더 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1A2B2005581).

References

1. Hou, D. W., Zhao, J. L., Shen, J. S. L., & Chen, J., "Investigation and improvement of strut-and-tie model for design of end anchorage zone in post-tensioned concrete structure", *Construction and Building Materials*, Vol.136, pp.482~494, 2017
 2. KBC, Korean building code-structural, Architectural Institute of Korea, 2016.
 3. Haroon, S., Yazdani, N., & Tawfiq, K., "Posttensioned Anchorage Zone Enhancement with Fiber-Reinforced Concrete", *Journal of Bridge Engineering*, Vol.11, No.5, pp.566~572, 2006
 4. Axson, D. P. (2008). *Ultimate Bearing Strength of Post-tensioned Local Anchorage Zone in Lightweight Concrete* (Doctoral dissertation). Virginia Tech
 5. Cho, A. S., & Kang, T. H. K., "Load Transfer Test of Spirally Reinforced Anchorage Zone for Banded Tendon Group", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.17, No.1, pp.59~67, 2017
 6. AASHTO, Standard specifications for highway bridges, Transportation Officials, 2002.
 7. Kim, M. S., Yoon, C. H., & Lee, Y. H., "Comparative Study of Bursting Force Equations for Post-Tensioned Anchorage Zones", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.17, No.4, pp.69~76, 2017
 8. 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
- Received : August 02, 2018
 - Revised : August 17, 2018
 - Accepted : August 17, 2018