직사각형 정착장치 적용 바닥판 정착부의 거동특성 분석 Anchorage Zone Behavior in the Slab with Flat Anchorage

김진국* · 권양수** · 곽효경***

Kim, Jin-Kook*, Kwon, Yangsu**, Kwak, Hyo-Gyoung***

Abstract

In this paper, the behavior of anchorage zone was investigated based on the experiment and analysis results. The geometric shape of anchorage, details of reinforcement in local anchorage zone and general anchorage zone, that are major components of anchorage zone, were chosen as test variables. Three specimens among six used the anchorage with the transverse rib for additional bearing area, and the others have no rib in their anchorage. Among them, two specimens have additional hoop reinforcement in the local anchorage zone and other two specimens have additional hoop reinforcement in the general zone. It was found that the transverse rib of anchorage and additional local reinforcement could increase the ultimate strength of anchorage zone by enhancing stress distribution in the local zone around the anchorage. For the efficient design of the anchorage zone, it is proposed that not only additional reinforcement around the anchorage with the length of 60% anchorage zone width but also the anchorage with transverse rib should be used.

Key words : Flat anchorage, Anchorage zone, Deck slab, Transverse rib, Anchorage zone reinforcement

요 지

이 연구에서는 직사각형 정착구를 사용하는 정착부에 대해 주요 구성요소인 정착장치의 형상과 정착구 주위 국소구역의 철근배근, 그리고 일반구역의 철근배근 변화에 따른 정착부의 거동 특성을 분석하였다. 정착구의 형상과 관련해서 지압면적에 영향을 주는 횡리브의 유무에 대한 영향을 검토하였다. 국소구역에서는 후프철근 추가 보강에 따른 영향을 검토하였다. 일반구역에 대해서는 국소구역 밖의 일반구역에 의한 구속정도가 국소구역에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과 정착구의 횡리브와 국소구역에 설치되는 추가 철근보강은 정착구 주위 집중응력을 분산하고 구속효과에 의한 콘크리트 강도 보강으로 정착부의 강도를 증가시켰다. 플랫 정착구의 효율적인 슬림화 정착부 설계를 위해서는, 정착부 가로길이의 약 60%에 해당하는 구간에 집중적으로 철근보강을 하고 정착부 응력분산을 위해 정착구에 횡리브를 설치하는게 효과적이다.

핵심용어 : 직사각형 정착구, 정착부, 바닥판, 횡리브, 정착부 철근보강

1. 서 론

콘크리트는 인장에 취약한 재료로 이를 보강하기 위해 철근과 함께 사용되고 있으며, 콘크리트 구조물의 장기간화를 위해 고강도 강연선을 이용한 프리스트레스(Prestress) 공법이 일반적으로 사용되고 있다. 프리스트레스 공법은 강연선을 미리 긴장해 놓고 강연선에 직접 콘크리트가 닿도록 타설하여 구조물을 구성하는 프리텐션(Pre-tension) 공법과 콘크리트가 다 굳은 후 미리 매설해놓은 덕트에 강연선을 삽입한 후 강연

선을 긴장하여 콘크리트에 프리스트레스를 도입하는 포스트텐션(Post-tension) 공법으로 구분된다. 현장에서의 제작 편의성 때문에 국내에서는 포스트텐션 공법이 보편적으로 사용되고 있다.

포스트텐션공법에서는 고강도 강연선 다발을 하나의 정착장치에 고정하기 때문에 정착장치가 매립되어있는 정착부 콘크리트에 높은 수준의 집중응력인 지압응력(Bearing stress)과 파열응력(Bursting stress)이 발생하며, 이렇게 정착구 주위 집중응력에 영향을 받는 부분을 국소구역(local anchorage zone)

*(재)포항산업과학연구원, 책임연구원(E-mail: jinkook.kim@gmail.com)
Ph.D, Senior Researcher, RIST

**한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정
Ph.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

***교신저자. 정회원. 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수(Tel: +82-42-350-3621, Fax: +82-42-350-4546, E-mail: khg@kaist.ac.kr)
Corresponding Author: Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

이라고 한다(PTI 2000; TRB 1994). 이 국소구역에 대한 연구는 1950년대 작은 무근 콘크리트 블록과 지압판을 이용한 시험연구를 수행하여 정착부의 지압강도에 대한 설계식의 기반을 마련한데(Komendant 1952)이어, 이후 Niyogi(1974), Suzuki *et al.*(1982), Robert(1990) 등에 의한 추가적인 실험연구 등을 통해 정착부에 대한 거동분석과 설계식에 대한 보완 및 검증이 이루어졌다.

대부분의 포스트텐션 공법은 교량 거더나 사일로와 같은 대형 구조물에 적용되기 때문에 여유 있는 정착부 면적을 보유하고 있고 Fig. 1(a)와 같은 형태로 여러개의 강연선을 한번에 정착할 수 있는 원형 또는 사각형 형태의 정착장치를 일반적으로 사용한다. 그러한 이유로 기존 대부분의 연구 또한 단순 정착판(지압판) 또는 원형/사각 정착장치를 사용하고, 정착부의 면적, 정착판의 면적, 그리고 나선철근에 의한 구속효과를 고려하여 설계강도식을 예측하고 평가하는데 중점을 두고 있다. 그러나 이 또한 기성 정착구를 사용하거나 또는 단순 정착판(지압판)을 사용하여 시험체를 제작해야하는 한계로 인하여 다양한 연구가 이뤄지지 못한 실정이다. 한편, Breen 등에 의해 저술된 NCHRP 356(1994)에서는 교량 바닥판 슬래브에 사용되는 Fig. 1(b)와 같은 직사각형 단면의 정착장치를 사용하여 슬래브 시험체를 제작하고 정착구 주위 철근 보강 방법에 따른 극한강도 변화를 분석하였다. 이 시험은 또한 지압면적 증가를 위한 횡리브가 포함되지 않은 1,860 MPa 강연선 4개용 VSL 정착장치를 사용하여 수행되었다. 철근 보강 효과 분석을 위해서 백업 바(Back-up bar), 헤어핀(Hairpin), 크로스타이(Cross tie) 및 후프철근(Hoop) 등이 검토되었으며, 검토결과에 따르면 정착부 내부에 설치된 보강철근이 전반적으로 시험체의 강도 증가에 큰 기여를 하는 것으로 평가되었다.

최근 강연선과 콘크리트의 고강도화가 급속히 이루어지면서 정착부의 슬림화도 함께 요구되고 있다(Kim *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012). 그러나 앞서 언급한 바와 같이 정착부를 구성하는 요소들에 대한 분석이 아직 미흡한 실정이고 특히 슬래브의 정착부에 대해서는 매우 제한적인 연구결과만 공개되어 있다.

이 연구에서는 실제 하중전달실험 및 유한요소 해석을 통해 직사각형 정착구를 사용하는 정착부에 대해 주요 구성요소인

정착장치의 형상과 정착구 주위 국소구역의 철근배근, 그리고 일반구역의 철근배근 변화에 따른 정착부의 거동 특성을 분석하였다. 정착구의 형상과 관련해서 지압면적에 영향을 주는 횡리브의 유무에 따른 거동 영향을 검토하였다. 국소구역에서는 후프철근 추가 보강에 따른 영향을 검토하였다. 일반구역에 대해서는 국소구역과 일반구역 간 상호 작용으로 인하여 발생하는 구속영향이 국소구역에 미치는 영향을 검토하였다. 각각의 변수에 따른 구조 거동 영향 분석을 위하여 시험체의 극한강도와 더불어 시험체 표면 및 표면 부근 철근에서 발생한 횡방향 변형률과 종방향 변형률의 분포 영향을 함께 검토하였다. 나아가 이러한 결과를 종합하여 슬림화 정착부 설계를 위한 방안을 제시하였다.

2. 정착장치 및 정착부 형상에 따른 응력 분포

앞서 언급한 바와 같이 정착부에 대한 연구는 콘크리트 블록에 지압판을 올려놓은 단순화한 모델을 기반으로 해석 또는 실험을 수행하여 응력의 흐름을 분석하고 이를 설계에 활용하였다. 이 경우 정착부 내에서 종방향 응력은 Fig. 2(a)와 같이 지압판 아래에서 바로 집중응력을 받고 이후 점차적으로 응력이 분산되는 구조가 된다. 반면, 정착부 콘크리트 블록의 표면에서 발생하는 횡방향 응력은 지압판 바로 밑에서는 국부적인 압축응력이 발생하고 이후 최대 파열력 발생점까지 점차적으로 인장응력이 증가한 이후 다시 인장응력이 0으로 수렴하는 양상을 띠게 된다(Fig. 2(b)).

정착장치와 정착부 형상에 따른 응력 분포 변화를 분석하기 위해 상용 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용한 구조해석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 3과 4에 나타내었다. 유한요소 해석 모델에서 플레이트 정착구 시편은 통상적으로 정착판의 크기가 정착부 제원의 1/2 수준인 점을 감안하여 가로×세로×높이를 400×400×800(mm)으로 하고 정착판의 크기는 200×200×2(mm)로 하였다. 플랫 정착구 시편의 경우 이 연구에서

Fig. 1. Anchorages (www.ktas.kr).

Fig. 2. Flow of Forces in Concentrically Loaded Anchorage Zone.

(a) Vertical stresses

(b) Quarter model with bearing plate

(c) Lateral stresses

(d) Quarter model with ribbed anchorage

Fig. 3. Stresses on Surface of Plate Anchorage Specimen.

수행한 하중전달시험체와 같은 $250 \times 500 \times 1000(\text{mm})$ 크기의 콘크리트 블록과 정착구에 대해 모델링 하였다. 해석의 효율성을 위하여 시편의 1/4만 모델링 하였다. 또한 정착구 또한 본 연구에서 사용한 정착구 형태를 모델링하여 해석을 수행하였다. 경향성의 차이를 도출하기 위하여 재료물성을 선형 탄성으로 가정하여 해석을 수행하였으며 선형 고체 요소 (solid element, C3D8)를 사용하였다. Fig. 3에 단순 지압판, 횡리브가 없는 플레이트 정착구(Plate anchorage), 횡리브가 추가된 플레이트 정착구를 적용한 각각의 경우에 대한 종방향, 횡방향 표면응력 분포를 나타내었다. Fig. 4는 동일한 변수 조건에 대해 플랫 정착구(Flat anchorage)를 적용한 경우에 대한 종방향, 횡방향 표면응력 분포를 보여준다. Fig. 3과 4의 그래프에서 X축은 응력, Y축은 시험체 상면으로 부터 거리를 무차원화하여 나타내었다.

Fig. 3에서 횡리브가 없는 플레이트 정착구 정착부의 경우 지압판만 설치되는 경우 대비 정착구와 덕트 설치에 따른 단면손실이 비교적 커 최대값이 크게 나타날 뿐만 아니라 발생 위치도 상부 지압판 측으로 이동하는 것으로 나타났다. 횡리브를 설치하는 경우 설치하지 않는 경우와 비교하여 최대응력은 종방향, 횡방향 각각에 대해 13%, 59% 작아지고 발생위

(a) Vertical stresses

(b) Quarter model with bearing plate

(c) Lateral stresses

(d) Quarter model with ribbed anchorage

Fig. 4. Stresses on Surface of Flat Anchorage Specimen.

치는 약간 하부 측으로 내려가는 것으로 나타났다. 이러한 경향성은 플랫 정착구 정착부에도 동일하게 나타났으나 플레이트 정착구 정착부와는 달리 가로세로의 비율의 비교적 커 응력분포 형상에 있어서 차이가 있으며, 정착구와 덕트에 의한 단면손실 영향이 비교적 작아 지압판과 횡리브가 없는 플랫 정착구 정착부 간의 차이는 거의 나타나지 않았다. 한편, 횡리브를 설치하는 경우 설치하지 않는 경우와 비교하여 최대응력은 종방향, 횡방향 각각에 대해 11%, 9% 작아지고 발생 위치는 약간 밑으로 내려가는 것으로 나타났다. 따라서 지압판 또는 플레이트 정착구 정착부 시험결과를 플랫 정착구 정착부로 확대적용하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

3. 플랫 정착구 정착부 시험체 설계

정착구 횡리브의 유무, 국소구역 철근 보강, 일반구역 철근 보강의 영향을 분석하기 위해 하중전달시험을 수행하였다. 시험에서 3가지 변수에 대한 완전요인분석을 위해서는 총 8개의 시험체에 대해 시험을 실시해야하나 시험체 제작비용의 제약으로 부분요인 분석을 할 수 있는 수준인 6개 시험체 (Table 1)에 대해 시험을 실시하였다. 기존의 연구에서 플랫

Table 1. Test Specimens

No.	Rib	Local zone reinforcement	General zone reinforcement
#1	-	-	-
#2	O	-	-
#3	-	-	O
#4	O	-	O
#5	-	O	-
#6	O	O	-

정착구에 해당하지는 않지만 철근비에 따른 구속효과 증가효과와 연구가 수행된 바 있으므로 철근비를 변수로 검토하지 않았다.

시험체의 가로, 세로 길이는 교량 바닥판에서 정착구의 설치 간격과 바닥판 두께, 즉, 정착부의 가로/세로 길이를 고려해서 500 mm, 250 mm로 설정하였고, 시험체의 높이는 ETAG013(2002)과 KCI-PS101(2009)에 따라 가로 길이의 두 배인 1,000 mm로 하였다. 또한 시험체에 정착구로부터 시험체 하면 100 mm 위치까지 쉬스관을 설치하여 시험체를 제작하였다. 일반적으로 정착부 보강을 위해 철근간격 50 mm로 보강철근을 배근함에 따라 시험체 #1, #3에 대해서는 D13철근을 50 mm 간격으로 국소구역에 추가 보강을 하여 그 영향을 검토하고자 하였다.

대표적인 시험체 도면 및 게이지 부착도 및 정착구의 형태를 Fig. 5에서 나타내었다. 시험체 #1과 #2, #3과 #4, #5와 #6은 각각 같은 철근 배근을 적용하였기에 각 그룹의 대표도면 1개만을 나타내었다.

시험은 EOTA(2002)와 KCI(2009)에서 규정한 하중전달시험방법에 따라 정착구 공칭강도의 12%~80%(200~1,332 kN)에 해당하는 하중으로 10회 반복가력한 후 극한하중까지 가력하는 방법으로 시험을 실시하였다. 시험에는 10 MN UTM(Universal Test Machine)이 사용되었다. 시험체에 사용된 콘크리트의 압축강도는 35 MPa이었으며, 철근의 공칭 항복강도와 정착구의 공칭 인장강도는 모두 400 MPa인 제품을 사용하였다.

4. 시험결과 분석

4.1 하중-변위 관계 분석

Table 2에서 시험체 별 극한하중을 나타내었으며 각각에 대한 하중-변위곡선은 Fig. 6과 같다. Table 2의 결과를 보면 횡방향 리브가 있는 정착구가 사용되고 2단 철근이 배근된 경우인 #6에서 가장 큰 극한 하중값이 나타났으며, 반대로 리브가 없고 철근배근을 1단으로 한 것 중에 일반구역(general zone)을 추가로 보강한 #3 시험체에서 가장 작은 극한하중 값을 갖는 것으로 나타났다. 철근의 보강정도로 판단할 때 가장 적은

(b) Specimen #2 (single reinforcement 1)

(c) Specimen #4 (single reinforcement 2)

(a) Specimen #5 (double reinforcement)

(d) Flat anchorage with the transverse rib

Fig. 5. Specimen Geometry and Gage Plan.

보강철근이 배근된 #1 시험체에 가장 작은 결과를 줄 것으로 예상하였으나 일반구역의 보강효과가 비교적 크지 않고 상대적으로 시험체 제작오차가 크게 나타나 #3 시험체에서 더 작은

Table 2. Maximum Loads

No.	Max. load (kN)	Rib effect	Reinforcement effect			
			No rib		Rib	
#1	1,231.7	#2/#1=120%	#5/#1=125%		#6/#2=119%	
#2	1,478.3					
#3	1,146.6	#4/#3=124%	#5/#3=134%		#6/#4=124%	
#4	1,418.5					
#5	1,535.6	#6/#5=114%	#5/#1=125%	#5/#3=134%	#6/#2=119%	#6/#4=124%
#6	1,756.3

(a) All specimens

(b) Reinforcement effect in no-rib anchorage

(c) Reinforcement effect in rib anchorage

(d) Rib effect in double reinforcement

(e) Rib effect in single reinforcement 1

(f) Rib effect in single reinforcement 2

Fig. 6. Load-displacement Curves.

결과가 나타나게 된 것으로 판단된다. 플레이트 정착구의 경우 플레이트 정착구와 이어지는 트럼펫 또는 쉬스판에 의한 단면손실이 비교적 크기 때문에 국소구역 밖의 콘크리트나 철근에 의한 구속효과에 큰 영향을 받는다. 반면, 플랫 정착구의 경우 국소구역이 비교적 작고 쉬스판이 얇은 타원형으로 형성되고 단면손실이 비교적 작아 일반구역이 국소구역의 거동에 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)와 6(c)는 정착구의 리브가 보강된 경우(Fig. 6(b))와 보강되지 않은 경우(Fig. 6(c)) 철근 보강조건 변화에 따른 하중-변위 곡선을 보여주고 있다. 리브가 없는 정착구가 사용된 시험체 중 국소구역 철근보강이 1단으로 되어있는 경우 반복하중의 가력범위 최대값인 1,332 kN에 도달하기 전에 파괴가 발생하였다. 나머지 시험체는 모두 반복하중 단계를 거치는데, 횡방향 리브가 설치된 정착구를 사용하여도 철근이 1단으로 배근된 시험체인 #2와 #4의 경우 반복하중 가력 이후 최대하중을 지나 바로 변형연화(softening)가 발생하는 것으로 나타났다. 횡방향 리브가 없는 정착구가 사용되고 철근보강이 1단으로 되어있는 시험체인 #1과 #3에서도 동일한 거동특성이 나타났는데 이는 정착구 주위의 콘크리트 국소영역에서 지압파괴가 발생하였기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 한편, 국소구역에 추가로 보강된 후프철근은 국소구역에 대해 구속효과를 발현시켜 부분적으로 콘크리트 강도를 증가시켰고, 이로 인해 추가적인 응력분산을 유도해 시험체의 파괴시점을 지연시킨 것으로 판단된다.

시험체 #5의 경우 시험체 하면에 수평면을 형성하기 위해 고무 패드를 적용하였는데 이로 인하여 초기 하중변위 곡선의 기울기가 타 시험체와 비교하여 상대적으로 작게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 6(b)와 6(c)는 동일한 정착구를 사용하더라도 응력 집중이 크게 발생하는 국소구역에 추가 철근을 배근한 영향이 강도와 연성에 있어서 그 성능이 크게 향상시킬 수 있는 것을 보여주고 있다. 국소구역에 2단 철근을 배근한 시험체는 1단 철근 배근을 한 경우와 비교할 때, 리브가 없는 정착구 시험체의 경우 25~34%의 강도 증분이 나타났으며, 리브가 있는 정착구 시험체의 경우 19~24% 강도 증분이 나타났다. 리브가 있는 정착구가 사용된 시험체의 경우 리브로 인한 면적증가로 인하여 전체 강도 증가 영향이 있기 때문에 철근에 의한 효과가 상대적으로 작게 나타난 것으로 추정된다.

그러나 철근 보강에 따른 하중-변위 곡선에서의 초기 기울기로 확인할 수 있는 시험체 강성에 대해서는 전반적으로 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 이는 보통 철근에 의해 콘크리트가 구속될 경우 강도와 강성의 증가가 나타나는 것과는 상반되는 결과이나 이는 하중변위 곡선은 전체 거동을 기반으로 나타나는 결과인 반면, 2중 철근보강 등의 효과는 배근 영역에서 국부적으로만 나타나는 현상이기 때문인 것으로 판단된다. 최대 극한하중에 있어서 작은 차이가 나

는 하지만 시험체 #1, #2와 시험체 #3, #4를 비교해보면 하중변위 곡선 형상에 있어서는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 일반구역의 추가 보강철근이 국소구역의 거동에는 영향을 거의 미치지 않았기 때문에 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 6(d)~6(f)는 각각의 철근배근 조건에서 정착구의 횡방향 리브 유무에 따른 거동차이를 보여주고 있다. Fig. 6(d)에서 두 그래프의 초기 기울기 차이는 #5 시험체의 하면 고무패드 때문에 나타난 것이고, 그 이외 부분에서는 강도를 제외하고 거의 유사한 거동을 보여주고 있다. Fig. 6(e)~6(f)에서는 강도를 제외하고 초기 기울기와 최대하중 이후의 기울기 모두 거의 유사하게 나타났다. 즉, 앞의 철근배근의 영향과는 달리 리브의 유무는 거동 특성에 대한 영향은 작지만 시험체의 강도에 대한 영향은 매우 큰 것으로 평가된다.

정착구 상면 정착판의 순 단면적은 $37,586 \text{ mm}^2$ 이고 리브의 순 단면적은 $10,567 \text{ mm}^2$ 이다. 따라서, 리브의 설치로 인하여 약 28%의 지압면적 증가 효과가 있다. Table 2을 보면, 횡방향 리브가 있는 정착구를 사용하고 국소구역에 철근을 2단으로 배근한 경우 약 14%, 국소구역만 1단 배근한 경우 약 20%, 전 구역을 1단 배근한 경우 약 24%의 강도 증가 효과가 있는 것으로 나타났다. 즉, 철근보강이 상대적으로 더 작은 시험체에서 더 큰 강도 증분이 나타났으며, 철근보강이 충분한 경우 지압면적 증가에 의한 효과가 상대적으로 작은 것으로 평가되었다.

4.2 수평변형을 분포 분석

Fig. 7에서 하중전달시험에서 초기 하중가력단계의 하중단계별(300 kN, 700 kN, 1,000 kN, 1,300 kN) 위치에 따른 횡방향 변형률을 도식화하였다. X축 값은 횡방향 변형률을 Y축 값은 시험체 상부면으로부터의 거리를 나타낸다. 횡방향 변형률은 정착장치에 작용하는 집중하중이 분산되면서 발생하는 파열응력에 의해 유발되는 것으로 정착장치로부터 멀어지면서 일정값으로 수렴하게 된다. Fig. 7의 결과에서는 정착구로부터 약 100~200 mm 떨어진 곳에서 횡방향 변형률이 최대로 나타나고 정착구로부터 멀어질수록 감소하다가 다시 하부 바닥면에서는 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 평평한 강재면과 닿는 시험체 바닥면이 평평하지 않고 약간의 요철 부분이 있고 이로 인하여 시험체 하면에서 응력집중을 유발하여 시험체 하면에서도 파열응력이 발생했기 때문으로 판단되며 실제 거동에 있어서는 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

시험체 #1, #3, #5에서는 횡방향 최대 변형률이 정착장치로부터 약 100 mm 부근에서 나타난 반면, 시험체 #2, #4, #6에서는 약 200 mm 부근에서 최대 변형률이 나타났다. 이는 정착구에 설치된 리브가 응력을 상대적으로 아래쪽으로 분산시켰기 때문으로 판단된다. 변형률 분포형상이 보다 명확한

Fig. 7. Lateral Strains.

700 kN 이하의 데이터를 보면 시험체 #1번과 #2번의 경우 횡방향 변형률의 최대값이 비교적 명확히 나타나고 그 점을 벗어나면서 변형률 변화가 큰 것으로 나타났다. 한편, 국소구역 철근배근이 많은 시험체 #5, #6의 경우 최대 변형률이 발생하

는 구간에서의 변형률 분포가 보다 완만하게 변화하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 리브와 보강 철근이 하중 및 변형 분산을 유도하고 이로 인하여 최대강도를 증가시킨 요인인 것으로 판단된다. 한편, 철근의 보강은 국소구역에 대

한 구속효과를 유발하고 국소구역에서의 강성 및 강도 증가를 유발하지만, 시편 전체로 본다면 강성에 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 철근의 보강은 변형률의 크기 보다는 변형률의 분포에 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

4.3 수직변형률 분포 분석

Fig. 8은 하중전달시험에서 초기 하중가력단계의 하중단계별(300 kN, 700 kN, 1,000 kN, 1,300 kN)로 철근에 부착된 게이지 위치에서 계측된 종방향 변형률을 도식화 한 것이다. X

Fig. 8. Vertical Strains.

축 값은 종방향 변형률을 Y축 값은 시험체 상부면으로부터의 거리를 나타낸다. 정착장치의 거동과 관련해서는 국부적으로 발생하는 응력을 제어하기 위한 파열응력(bursting stress)과 쪼갬응력(spalling stress)에 대한 관심이 주된 부분이었다. 그러나 지압강도 측면으로 본다면 종방향 변형률 또한 거동특성을 분석하는 주요 요소로 고려되어야 한다. 지압강도는 정착구와 직접 맞닿는 콘크리트에서의 발생응력과 압축강도에 지배되지만 그 부분에서의 계측이 어렵기 때문에 종방향 철근에서 계측한 변형률을 기준으로 분석하였다.

시험체 표면에서의 종방향 변형률은 시험체 상부면 정착구 주위에서는 쪼갬응력이 발생하고 시험체 상부면에서 멀어져가면서 하중 흐름이 단면 전체로 균등하게 퍼져나가고 일정값으로 수렴하는 형태가 된다. 특히, 플랫 정착구가 사용된 경우 응력집중이 보다 크게 나타나는 것을 해석결과(Fig. 3, Fig. 4)로부터 확인할 수 있었는데, 시험결과에서도 유사한 경향성을 Fig. 8(a), 8(c) 등에서 확인할 수 있었다. 이러한 거동 특성은 플레이트 정착구와 비교하여 정착구에 의한 단면손실량은 유사하지만 덕트에 의한 단면손실이 작아 일반구역에서 압축응력과 변형률이 대체적으로 작게 나타났기 때문으로 판단된다.

앞의 횡방향 변형률 시험결과에서와 마찬가지로, 리브가 설치된 정착구가 매립된 #2, #4, #6 시험체의 경우 #1, #3, #5와 비교하여 응력분산효과가 크게 작용하는 것으로 나타났다. 철근에 의한 영향은 #5과 #1, #3를, #6과 #2, #4를 비교해보면, 국소구역에 추가 철근을 배근한 경우 동등 하중 수준에서 변형률이 보다 완만하게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 일반구역에 보강된 철근은 정착부의 변형률 분포에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되었다. 이는 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 플랫 정착구 정착부의 경우 시험체 상면으로부터 시험체 높이의 약 30%(또는 시험체 또는 정착부 가로 길이의 60%)에 해당하는 구간 내에서 응력분포가 거의 이뤄지는데, 시험체의 경우 시험체 높이의 30%인 300 mm까지 국소구역 철근배근이 되어있기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 플랫 정착구를 사용하는 정착부에 대해 주요 구성요소인 정착구의 형상과 정착구 주위 국소구역의 철근배근, 그리고 일반구역의 철근배근 변화에 따른 정착부의 거동특성을 분석하였다. 그리고 거동분석결과를 종합하여 슬립화 정착부 설계를 위한 방안을 제시하였다.

- 1) 정착부의 응력분포는 단순히 지압판만을 사용하는 경우보다 정착구와 덕트까지 포함될 때 응력집중 현상이 보다 크게 나타났다. 또한, 이러한 현상은 플랫 정착구가 사용된 정착부의 경우 더욱 크게 나타나고 응력집중 영역이 비교적 집중적으로 나타났다.
- 2) 시험결과 플랫 정착구 정착부에서는 전체 단면으로의 하

중전달이 시험체 길이의 약 30% 이내에서 이루어지는 것으로 나타났다.

- 3) 플랫 정착구 정착부의 강도는 횡리브를 설치함으로써 지압면적이 약 28% 증가하였으며, 이는 정착부 국소구역 내에서 집중응력을 크게 분산하는 역할을 하였다. 이를 통해 정착부의 극한강도는 약 14~24% 증가하였다.
- 4) 플랫 정착구 정착부의 국소구역에서 콘크리트의 구속효과를 위해 추가 보강철근을 보강한 경우 정착부의 강도는 약 19~34% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 국소구역에 추가로 보강된 후프철근은 국소구역에 대해 구속효과를 발현시켜 부분적으로 콘크리트 강도를 증가시켰고, 이로 인해 추가적인 응력분산을 유도해 파괴를 지연시켰기 때문으로 판단된다.
- 5) 추가 후프철근 보강에 의해 리브가 없는 경우는 평균 29.5%, 리브가 있는 경우는 평균 21.5% 강도가 증가되며 횡방향 리브가 있는 정착구를 사용한 경우 철근보강에 의한 강도증진 효과는 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이는 횡리브에 의해 응력분산이 이미 이뤄진 경우 철근에 의한 추가 응력분산 효과가 상대적으로 작기 때문으로 판단된다.
- 6) 정착구의 크기와 정착부의 크기, 그리고 리브에 따라 국소구역의 크기가 달라질 것으로 보이나 기존의 설계 기준등에서는 정착구의 크기나, 철근 배근이 깊이를 단순화하여 국소구역으로 설정하였다. 본 연구에서 사용한 플랫 정착구가 사용된 시험체를 기준으로 할 경우 극한강도 발현 및 표면에서 파열응력으로 인한 변형률 발생으로 볼 때 가로 길이의 60% 선까지 국부적인 파괴가 발생할 수 있는 국소구역으로 구분할 수 있을 것으로 보인다. 따라서 플랫 정착구의 효율적인 슬립화 정착부 설계를 위해서는 정착부 가로길이의 약 60%에 해당하는 구간에 집중적으로 철근보강을 하고 정착부 응력분산을 위하여 정착구에 횡리브를 설치하는 것이 효과적이다.
- 7) 복잡한 철근배근을 지양하고자 하는 구조에서는 정착구에 추가적인 횡리브를 설치하는 것이 유리하고, 정착부 면적을 최소화 하고자 할 경우 추가 횡리브에 더불어 국소 구역의 철근 보강을 병행하는게 효과적이다.

실제 정착장치를 사용하고 실험규모의 하중전달시험을 하기 위해서는 많은 시간과 비용, 그리고 대형 장비가 요구된다. 그로 인해 이와 같은 실험이 일부 제약적으로 이루어져왔다. 이 결과 또한 일부 제한된 조건에서 이루어진 것이기에 일반화에는 한계가 있을 것이다. 다만, 시험에 사용된 정착장치는 실제 교량 바닥판에 사용되는 것으로 유사한 형태를 갖는 정착장치에 대해서는 이 결과를 적용할 수 있을 것이다. 차후 다양한 수치해석을 통해 보다 보편적인 결과가 제시될 수 있다면, 다양한 조건의 플랫 정착장치 개발과 효율적인 정착부 설계에 큰 기여가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설기술A01)과 건설기술혁신사업의 연구비 지원(08기술혁신E01-초장대교량사업단)에 의해 수행되었습니다.

References

- ABAQUS/Standard 6.11 (2011) *User's Manual*, Dassault Systems.
- Breen, J.E., Burdet, O., Roberts, C., Sanders, D., and Wollmann, G. (1994) *Anchorage Zone Reinforcement for Post-Tensioned Concrete Girder*, NCHRP Report 356, Transportation Research Board.
- EOTA (2002) *Guideline for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures(ETAG 013)*, EOTA.
- Kim., J.-K., Lee, P.-G., and Lee, M.-S. (2010) Development of 2,160 MPa PS Strand and Application Technology, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 5, pp. 68-70.
- Kim., J.-K., Seong, T.-R., and Lee, J.-K. (2012) Development of 2,160MPa/2,400MPa PS Strand and its Application Technology, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 3, pp. 45-50.
- Komendant, A.E. (1952) *Prestressed Concrete Structures*, McGraw-Hill, 172-173.
- Korea Concrete Institute (2009) *Standard Specification for Reinforced Concrete*, Seoul.
- Niyogi, S.K. (1974) Concrete bearing strength-support, mix, size effect, *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 100, No. 8, pp. 1685-1702.
- Post-Tensioning Institute (2006) *Post-Tensioning Manual*, Sixth Edition, PTL.
- Roberts, D.H. (1990) *Design and Behavior of Anchorage Zones in Post-tensioned Concrete Members*, Ph. D. dissertation, The Univ. of Texas, Austin, Texas.
- Suzuki, K., Nakatsuka, T. (1982) *Estimation of Bearing Strength of Reinforced Anchorage Zone in Post-Tensioned Prestressed Concrete Members*, Technology Reports of the Osaka University, Vol. 32, No. 1680, 419-428.

Received	January 8, 2014
Revised	January 9, 2014
Accepted	January 22, 2014