

# 유한요소해석을 통한 포스트텐션 정착구 형상 변수의 정착부 극한강도 영향 분석

권양수<sup>1</sup> · 김진국<sup>2</sup> · 곽효경<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술원 건설 및 환경공학과, <sup>2</sup>POSCO 철강솔루션센터

## Ultimate Strength of Anchorage Zone according to Geometric Parameters of Post-Tensioning Anchorage using a Finite Element Method

Yangsu Kwon<sup>1</sup>, Jin-Kook Kim<sup>2</sup> and Hyo-Gyoung Kwak<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701, Korea

<sup>2</sup>Steel Solution Marketing Department, POSCO, Incheon, 406-840, Korea

### Abstract

The design of anchorage zone in a post-tensioned member has been started from the evaluation of the ultimate resisting capacity as well as the maximum bursting stress developed, and a lot of design codes including AASHTO and PTI describe their design equations to determine the bearing strength of concrete at the anchorage zone. However, these equations usually give conservative results because their derivation is based on the simple anchorage with a wide bearing plate in the surface without any additional consideration for the load transfer mechanism through transverse ribs on the anchorage. To assess the influence of geometric parameters related to the transverse ribs on the resisting capacity of anchorage block, experiments and analysis are conducted. After verifying the validity of numerical model conducted through correlation studies between experimental and analytical results, parametric studies with changes in the transverse ribs are followed and design recommendations for the anchorage block are suggested from the numerical results obtained.

**Keywords** : prestressed concrete, post-tensioning anchorage, anchorage zone, ultimate strength

### 1. 서론

포스트텐션 방식 프리스트레스 콘크리트(PSC) 구조물에서 정착부는 정착구를 통해 전달되는 긴장력의 도입에 따라 높은 수준의 압축응력 및 인장응력이 발생하는 부분이며 크게 국소 구역(local zone)과 일반 구역(general zone)으로 구분될 수 있다. 정착부에서는 크게 3가지 종류의 응력장(stress field)이 발생하게 되는데 지압응력(bearing stress), 파열 응력(bursting stress), 박리응력(spalling stress)이 그것이다(Guyon, 1953). 특히, 지압응력이 작용하는 정착구 하부 콘크리트의 영역에 대한 보강을 위해 구속효과(confine-

ment effect)로 인한 콘크리트 강도 증가를 목적으로 설치되는 보강철근 및 직접적인 표면 균열을 야기할 수 있는 파열응력으로 인한 파열력(bursting force)은 인장에 약한 콘크리트의 특성에 따라 균열의 발생 등 구조물의 성능 및 파괴거동에 중요한 영향을 미치므로 적절한 응력 및 강도예측에 대한 실험적, 이론적 연구가 수행되어 왔다(Breen *et al.*, 1994; Roberts-Wollmann, 2000; PTI, 2006; Kang *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2014).

이를 통해, PSC 구조의 정착부 균열발생 등 사용성 및 안전성에 영향을 미치는 요인들의 적절한 기준과 보강설계에 대한 기준이 국내외 설계기준에서 구조물의 지압성능과 보강

\* Corresponding author:

Tel: +82-42-350-3621; E-mail: kwakhg@kaist.ac.kr

Received April 16 2015; Revised May 2 2015

Accepted May 6 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

철근의 구속효과 등을 고려한 극한하중 관계식 및 횡방향 보강철근 배근기준 등이 이용되고 있다(AASHTO 1996, PTI 2006, KCI 2012). 그러나 정착구의 형상을 사각형 형태의 강성판으로 가정하고 지압판의 크기와 콘크리트 단면비 만을 변수로 고려했다는 약점이 있으며 콘크리트 및 강재의 재료 물성을 선형탄성으로 가정하는 등의 약점이 있다(Breen *et al.*, 1994; Roberts-Wollmann, 2000).

따라서 실제 사용되고 있는 특수형태 정착구(special anchorage) 사용이 기존 가정인 사각형 형태의 지압판만 존재하는 단순화된 정착구가 아닌 가이드 파이프 및 리브 등 추가 형상 요소들이 설치된 정착구의 형상에 따른 구조물의 거동특성에 미치는 영향에 대한 연구가 충분하지 않다. 특히 PSC 부재의 극한강도 예측식에서는 지압 강도와 나선철근과 같은 횡방향 보강철근의 구속효과에 따른 강도증가 영향을 모두 고려하고 있으므로(Breen *et al.*, 1994) 극한강도 예측에 있어서 정착구의 형상 변수에 대한 고려가 필요하다.

따라서 이 논문에서는 정착구 및 콘크리트 구조물의 유한요소해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 상용 정착구 및 하중전달 시험체를 모델링하여 비선형 해석을 수행하였고 실제 하중전달 시험결과와 비교하여 정착구의 형상 변수에 따른 구조물의 거동특성 변화와 극한하중에 미치는 영향을 분석하여 정착구의 설계변수 변화에 따른 정착부의 거동특성을 파악하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 하중전달시험 및 유한요소해석

### 2.1 하중전달시험(Load Transfer Test)

포스트텐션 방식 PSC구조물에 사용되는 정착구는 Fig. 1과 같이 지압판만 존재하는 기본 형태(basic anchorage)와 지압판과 하부 가이드 트립렛 구조 및 리브 등이 함께 존재하는 특수 형태(special anchorage)가 존재한다. 기본 형태의 경우 기존연구 및 설계시방서 등에서 제안한 비교적 단순한 형태의 식을 사용할 수 있지만 특수 정착 장치의 경우 상대적으로 형상이 복잡하고 높은 지압응력이 발생할 뿐만 아니라 보강철근이 더 많이 배근되기 때문에 제안된 식을 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 특수 정착 장치가 긴장력을 구조물 전체로 적절하게 전달시키는지 여부를 확인하기 위해 AASHTO, PTI 등에서는 하중전달시험(load transfer test)을 포함한 성능검증시험을 수행하는 것을 권장하고 있다.

하중전달시험은 정착구의 성능검증시험 방법 중의 하나로 긴장력이 정착구로부터 콘크리트 전반으로 효율적으로 전달되

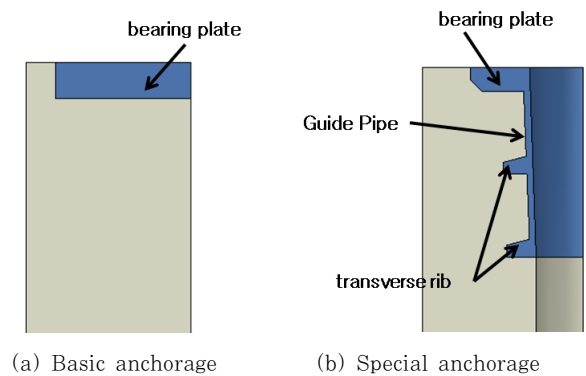


Fig. 1 Shape of basic and special Anchorage

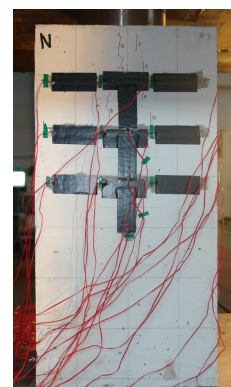


Fig. 2 Load transfer test specimen

는지를 평가하기 위하여 실시한다. 초기 하중재하 시 긴장재(tendon) 인장강도( $F_{pk}$ )의 20%, 40%, 60%, 80%까지 단계적으로 증가시키고 다시 12%까지 줄인 다음 12%~80% 범위로 10회 이상 응력과 균열진전이 안정화될 때까지 계속해서 반복하중을 재하하게 되며 그 이후 파괴 상태에 이르기까지 하중을 점진적으로 증가시키는 것으로 규정되어 있다(EOTA, 2002).

본 연구에서 활용된 하중전달 시험체의 대표적인 형상을 Fig. 2에 나타내었으며, 총 12개 시험체의 기본 제원을 Table 1에 나타내었다. 여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도,  $D_a$ 는 상부 정착판의 지름,  $B=H$ 는 시험체의 너비이며,  $L$ 은 시험체의 높이이다.

본 연구에서는 특수 형태 정착구의 크기( $D_a$ )에 따라서 최소로 요구되는 단면 크기를 설정하였으며, 국부적인 파괴를 방지하기 위해 보강철근 또한 ETAG013(EOTA, 2002)의 규정에 따라 배근하여 시험체를 구성하였다. 이를 통해 수행된 하중전달 실험을 통해 얻어진 극한강도( $P_{ult,exp}$ , Table 2)를 정착부의 극한강도로 정의하였으며 각 하중전달 시험체에 대한 유한요소해석 또한 함께 수행하여 정착부의 극한거동을 분석하였다.

**Table 1** Variables of load transfer test specimens

No.	$f_{ck}$ (MPa)	$D_u$ (mm)	$B(=H)$ (mm)	$L$ (mm)	Spiral diameter (mm)	Spiral pitch (mm)
1	36	190	270	540	208	45
2	36	190	270	540	208	55
3	36	250	360	720	298	50
4	36	250	360	720	298	50
5	36	275	390	780	328	50
6	36	275	390	780	328	55
7	36	310	455	910	365	50
8	36	310	455	910	365	55
9	36	360	515	1030	445	50
10	36	360	515	1030	445	50
11	36	390	550	1100	480	50
12	36	390	550	1100	480	55

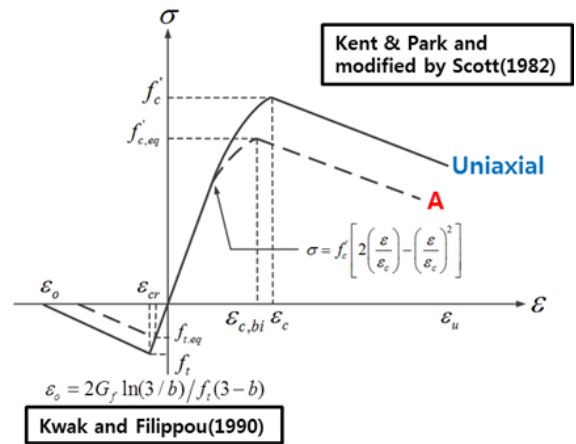
**2.2 유한요소해석 모델**

**2.2.1 콘크리트 재료특성**

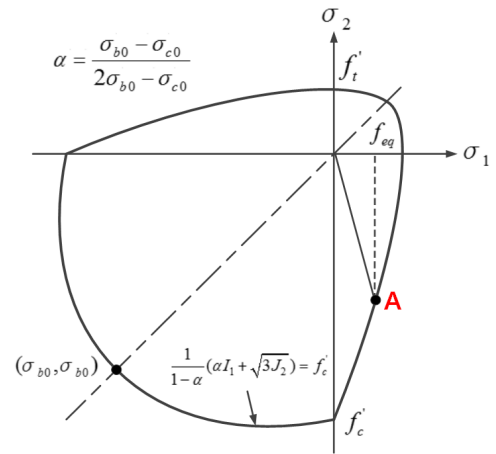
콘크리트 재료는 압축영역에서 응력이 증가함에 따라 소성 변형이 증가하고, 압축강도를 넘어서면 파쇄(crushing)되어 더 이상의 압축응력을 부담하지 못한다. 또한 인장력을 받게 되면 인장영역에서 인장강도 이상의 인장응력이 작용하면 균열이 발생하게 된다. 일반적으로 콘크리트는 압축거동 보다는 인장거동에 상대적으로 민감하므로 콘크리트의 비선형 특성 묘사를 위해서는 압축 측 응력-변형을 관계 정의뿐만 아니라 균열발생 이후의 거동에 있어서 응력-변형을 관계의 적절한 정의 또한 필요하다.

콘크리트의 압축 측 응력-변형을 관계는 기존 해석에서 널리 사용되는 Scott(1982)가 수정한 Kent 등(1972)의 식에 따라 적용하였다. 또한 콘크리트 인장 측 응력-변형을 관계는 인장증강효과(tension stiffening effect)를 고려하여 본 논문에서는 Kwak 등(1990)이 제안한 요소크기에 대한 파괴에너지로 정의되는 모델 식을 사용하여 콘크리트 균열 발생 이후의 응력-변형을 곡선을 정의하였다(Fig. 3). 이 때, 콘크리트 탄성계수( $E_c$ )는 실험에서 얻어진 값을 사용하였으며, 또한 프아송 비( $\nu_c$ )는 0.18을 사용하였다.

다축 응력 상태의 콘크리트는 프아송 효과(Poisson's effect)와 내부 미세균열 등의 영향으로 인하여 일축응력 상태의 콘크리트와 다른 구조거동을 나타내게 되는데 일반적으로 이축응력 상태에서는 압축-압축 응력 상태에서는 압축강도가 일축 압축 강도에 비해 크게는 25%까지 증가 하지만, 인장-압축 상태에서는 일축 상태에 비해 압축 및 인장강도가 감소하게 된다(Point A, Fig. 4). 콘크리트의 비탄성 거동을 모델링하기 위하여 본 연구에서는 ABAQUS(2013)에서 제공하는 Concrete



**Fig. 3** Uniaxial stress-strain relation of concrete



**Fig. 4** Bi-axial concrete strength envelope (Lee et al., 1987)

damaged plasticity 모델을 적용하였다. 이 모델은 기타 모델에 비해 다축 응력상태에 놓인 콘크리트의 비탄성 거동을 모델링하는데 적합하며 인장, 압축 소성이론을 채택하여 콘크리트 인장균열 및 압축파괴 모두 반영할 수 있다는 장점이 있다. Concrete damaged plasticity 모델은 비상관 소성 흐름 법칙(non-associated flow rule)을 적용하고 팽창각(dilation angle)의 함수인 유동 포텐셜(flow potential)과 콘크리트의 경우 형상계수( $K_c$ ) 0.667(=2/3)에 따라 항복면이 정의되는 특성이 있다. 본 연구에서는 콘크리트의 팽창각( $\psi$ )을 35°를 사용하였다(Fig. 4)

**2.2.2 강제 재료특성**

한편 강재는 콘크리트와는 달리 재료의 특성을 정의함에 있어서 단일 응력-변형을 관계를 통해 정의할 수 있고, 압축 영역과 인장영역에서 동일한 응력-변형을 곡선을 갖는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 응력변화에 따른 재료 성질의 변화는 수치적인 안정성과 계산상의 이점 등을 고려하여,

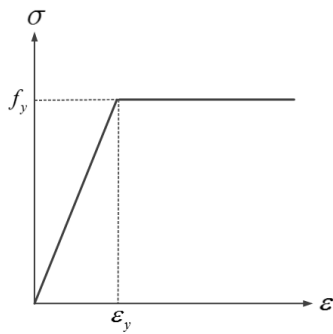


Fig. 5 Uniaxial stress-strain relation of steel

항복응력 도달( $f_y$ )까지 선형탄성 거동 이후 항복응력 도달 시 완전소성(perfect plastic) 거동을 하는 재료로 정의하여 유한요소해석을 수행하였다(Fig. 5). 이 때, 강재의 탄성계수( $E_s$ ) 및 프아송 비( $\nu_s$ )는 각각 200GPa, 0.3으로 정의하였다.

### 2.2.3 유한요소해석 모델

이 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 3차원 비선형 유한요소해석이 이루어졌으며, 해석을 위해 사용한 해석모델은 크게 2가지 부분으로써 강재로 이루어진 정착구와 콘크리트 부분인 나머지 하중전달 시험체 부분이다. 기본적인 해석형상은 하중전달시험의 시험체를 기본으로 하였으며 내부에 사용할 수 있는 강연선의 크기에 따라 6가지의 정착구로 구분한 후 각각의 정착구에 대해서 보강철근 배근에 따라 2가지씩 총 12가지의 모델에 대해서 해석 하였다(Table 1).

또한 절점(node)과 요소(element)를 정의하는데 적절한 요소망(element network) 구성을 위해 다음과 같은 사항을 적용하였다. 정착구를 편이상 원형으로 가정하였으며 하중전달 시험체의 대칭성을 이용하여 전체 1/4을 모델링하였다. 정착구와 콘크리트는 모두 8절점 Solid 요소를 사용하였고 나선철근 및 띠철근은 Truss 요소를 사용하였다. 또한 실제 구조물과 물리적 거동이 일치하도록 경계조건 및 하중조건을 적용하기 위하여 시험체의 하단은 종방향으로 변위가 없는 것으로 설정하였고, 정착구의 형상을 원형으로 가정하여 하중전달 시험체의 대칭성을 고려하여 Fig. 6과 같이 1/4 모델링을 사용하였다. 또한 하중전달 시험체에 작용하는 하중은 하중전달시험과 유사하게 정착구 상부면에 하중 띠를 만들어 등분포 하중으로 작용하는 것으로 모델링하여 정착부가 극한 상태에 도달할 때 까지 선형으로 증가시키는 것으로 모델링하였다.

정착구와 콘크리트, 보강철근과 콘크리트 간의 접촉(contact) 문제를 완전부착으로 가정할 경우, 실제 시험체의 거동에 비해

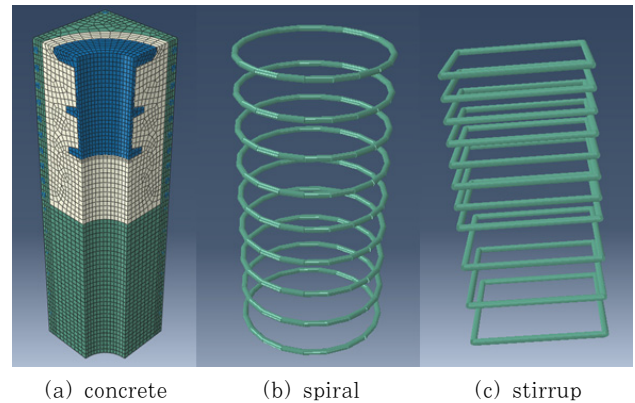


Fig. 6 Finite element model

강성보다 더 크게 나타날 가능성이 있다. 따라서 정착구와 콘크리트간에서는 ABAQUS의 interaction 옵션을 사용하여 surface to surface contact으로 가정하여 수직 및 수평 방향의 Baltay 등(1990)의 연구 결과에 따라 마찰계수(0.47)를 적용하였다. 또한 보강철근의 경우, 콘크리트 요소 내부에 embedded region 옵션을 사용하여 내부에 매립된 것으로 모델링 하였다.

### 2.3 유한요소해석 모델 검증

Fig. 7에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 실험 및 해석을 통해 얻은 시험체의 극한하중 값이 실험치와 유사하게 나타났고 전체적으로 해석을 통해 얻은 극한하중 값이 실험을 통해 얻은 극한하중의 값보다 5%가량 크게 나타남을 알 수 있다(Table 2). 이는 횡방향 보강철근으로 인한 구속 효과가 실제 거동 보다 다소 과다하게 반영된 것으로 판단된다. 그러나 실험 및 해석에서 얻어진 하중-변위 곡선의 기울기 및 전반적인 거동이 유사하므로 구조물의 강성(Stiffness)을 유한요소해석

Table 2 Ultimate strength of load transfer test and design equation

No.	$P_{ult,exp}$ (kN)	$P_{ult,FEM}$ (kN)	$P_{ult,AAASHTO}$ (kN)	$P_{ult,PTI}$ (kN)	$1.1F_{pk}$ (kN)
1	-	2245	1815	1848	2310
2	2332	2578	1716	1750	2310
3	4092	4236	3628	3672	3960
4	4334	4429	3628	3672	3960
5	4829	4926	4206	4259	4620
6	4909	5013	3815	3872	4620
7	6813	6878	6137	6178	6270
8	6838	6948	5783	5831	6270
9	8900	8997	7881	7949	7920
10	9078	9175	7303	7378	7920
11	9993	9648	8691	8767	8910
12	9884	9678	7886	7970	8910

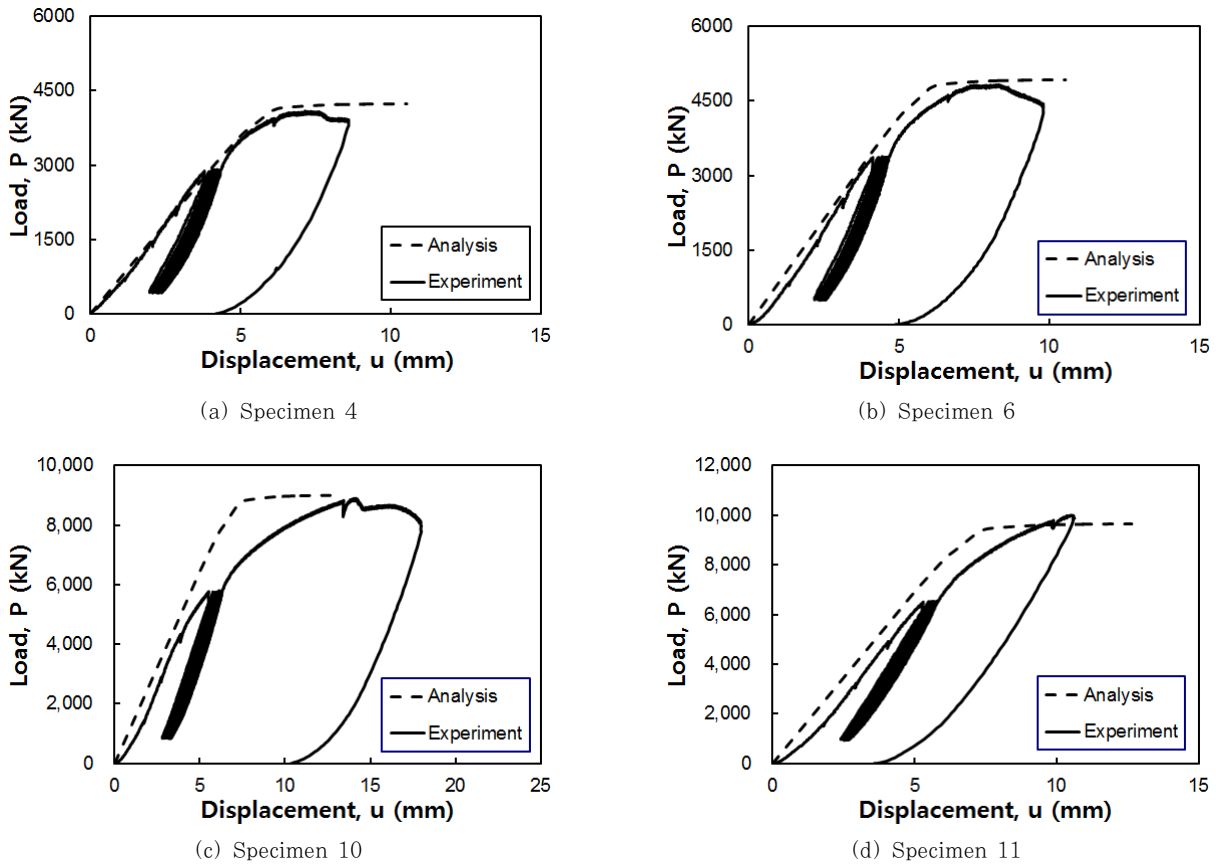


Fig. 7 Load-displacement curve of load transfer test and FEM results

모델에서 적절하게 반영하고 있는 것으로 보인다.

1번에서 12번 까지의 시험체는 6가지 다른 크기의 정착구가 설치된 시험체에 각각 2가지 경우의 나선철근 및 띠철근의 배근간격을 변수로 하여 총 배근길이가 달라짐에 따라 시험체에 사용된 전체 철근량이 차이가 나도록 구성되어 있다. 이 경우, Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이 극한 저항력은 전체 배근길이가 더 길게 배근된 시험체에서 더 크게 나타났으나 6개의 비교군에서 평균적으로 2%의 차이로 보이며 실험 및 해석에서 동일한 경향성을 보이고 있다.

### 3. 정착구 형상 변수에 따른 구조거동 분석

#### 3.1 정착구의 형상변수

앞에서 살펴본 바와 같이 정착구의 거동은 다양한 영향인자에 의해 지배를 받게 된다. 따라서 정착구의 형상 변화가 정착부의 거동특성 변화에 미치는 영향을 비교, 검토하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 기존의 Guyon 등의 논문에서 지압판과 지압면의 넓이비를 기준으로 파열력의 변화 등에 대한 연구가 수행되었으나 이는 사각형 형태의 강성판

(Rigid Plate)를 바탕으로한 선형 스트럿-타이 모델 등 선형해석을 토대로 도출된 것으로 현재 사용되고 있는 특수형태 정착구와는 차이가 있다.

특히 정착구가 설치된 구조에서 주요한 파괴메커니즘은 정착구의 썩기현상으로 인한 구조부재 전반의 파괴이며 정착구의 하부구조에 리브가 있을 경우 이 썩기현상이 완화되므로 구조의 극한하중을 10~20%가량 증가시킨다는 연구결과가 있다. 따라서 정착구에 설치된 리브의 구조에 따른 하중 저항력의 변화가 상대적으로 클 것으로 예상되므로 이 논문에서는 리브의 설치위치, 설치개수 및 리브의 길이를 조절하여 리브가 정착부의 거동에 미치는 영향을 판단하고자 하였다.

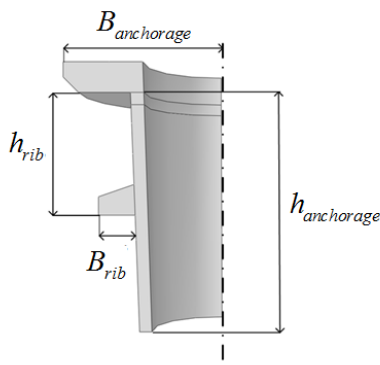
각 형상 변수별 설정된 정착구의 모델링은 Table 3와 같이 구분하였다. 정착구 및 설치된 리브의 기본적인 형상은 앞선 하중전달시험에서 14번 시험체에서 이용한 14 Hole 정착구 및 시험체의 치수와 나선철근의 배근을 사용하였고 띠철근은 배근되지 않은 것으로 가정하였다. 해석모델에서 이용한 정착구의 상세도 또한 Fig. 8에서 볼 수 있다.

리브의 설치 위치(Fig. 8의  $h_{rib}$ )는 상부 면을 기준으로 전체 하부구조의 길이(Fig. 8의  $h_{anchorage}$ )의 1/4, 1/2, 3/4 위치와 가장 밑 면에 설치하는 것을 기준으로 하였고, 리브의 개



**Table 3** Geometric parameter of anchorage model

No.	Name	Number of Rib	Relative Location ( $\frac{h_{rib}}{h_{anchorage}}$ )	
			Rib 1	Rib 2
1	Plate	-	-	-
2	R0	0	-	-
3	R1	1	1/4	-
4	R2	1	1/2	-
5	R3	1	3/4	-
6	R4	1	1	-
7	R12	2	1/4	1/2
8	R13	2	1/4	3/4
9	R14	2	1/4	1
10	R23	2	1/2	3/4
11	R24	2	1/2	1
12	R34	2	3/4	1



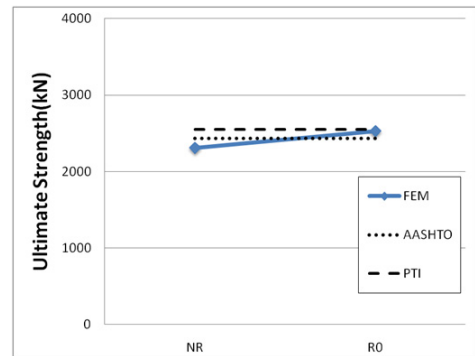
**Fig. 8** Basic shape of anchorage

수는 0개, 1개, 2개에 대하여 조합할 수 있는 모든 위치에 설치하여 검토하였다. 또한 설치되는 모든 리브에 대하여 리브의 횡방향 길이(Fig. 8의  $B_{rib}$ )를 변수로 설정하여, 20mm, 30mm, 40mm로 변화시켜 총 32가지 경우에 대하여 유한요소해석을 수행하였다.

### 3.2 변수 해석결과

#### 3.2.1 리브가 설치되지 않은 경우의 극한 하중

극한하중은 지압판만 존재하는 경우(Plate)와 지압판과 가이드 트랩렛이 존재하는 경우(R0)에서 모두 AASHTO 및 PTI 제안식과 5% 정도의 차이를 보였다. 지압판만 존재하는 NR 모델에 비해 R0 모델에서 극한하중이 좀 더 크게 나타났는데, 이는 탄성계수가 큰 강재로 이루어진 부분이 증가하여 지압응력에 대한 강성이 증가되어 나타난 결과로 판단된다. 기존의 제안식은 정착구의 형상을 기본 정착구, 즉 지압판만 존재하는 형상으로 가정하여 유도된 것이다. 이 해석 결과에 따르면 가정에 기존의 제안식은 기본 정착구에 대해서는 극한 하중값을 매우 근접하게 예측할 수 있는 것으로



**Fig. 9** Ultimate strength of non-rib anchorage cases

판단되며 이를 근거로 리브의 설치 및 리브의 강성에 대해서 형상 변수에 따른 거동 비교 또한 가능할 것으로 판단된다.

#### 3.2.2 리브가 1개 설치된 경우의 극한하중

정착구의 하단부에 설치되는 리브의 위치에 따라 극한하중이 R0 모델의 극한하중과 비교하여 크게 20%까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 정착부의 최하단에 설치된 리브가 상부에 설치된 리브보다 정착부의 극한하중을 증가시킨다는 것을 확인할 수 있다. 이는 리브의 설치길이가 20mm, 30mm, 40mm로 증가했을 때도 동일한 경향성을 지니고 있으며 설치길이가 긴 리브의 경우에 가장 극한하중의 증가 효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 기존의 설계식에 비교하여 리브가 설치되지 않은 경우보다 전반적으로 유한요소해석으로 얻어진 극한하중 값이 큰 것으로 나타났으며 특히 리브의 길이가 20mm인 경우, R1-20, R2-20 모델에서 AASHTO 및 PTI의 극한하중 산정식으로 얻어진 값에 비해 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 이는 설치길이가 짧은 리브의 경우에는 리브의 설치로 인한 하중분산 효과가 상대적으로 작게 작용하며 지압판에 근접하여 설치된 리브의 경우 정착부의 거동특성에 큰 효과가 없는 것으로 보인다. 따라서 리브 설치에 따른 극한강도 증가를 위해서는 리브를 지압판과 R3에 설치한 리브와 같이 전체 하부구조 길이( $h_{anchorage}$ )의 3/4 이상 충분한 거리를 두고 설치할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 3.2.3 리브가 2개 설치된 경우의 극한하중

2개의 리브가 설치된 경우 전반적으로 1개의 리브가 설치된 경우보다 극한하중이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 리브가 설치되지 않았을 경우(R0)에 비하여 R24-40 모델에서 최대 43% 큰 극한하중 값을 얻을 수 있다. 1개의 리브가 설치된 경우와 마찬가지로 리브의 설치길이가 증가할수록 같은 위치에서 보다 큰 극한하중이 얻어지는 것을 확인할 수 있다. 1개의 리브가 설치된 경우에서 하부에 설치된 리브에서 보다 좋은 거동을 보이는 것으로 결과가 나왔는데

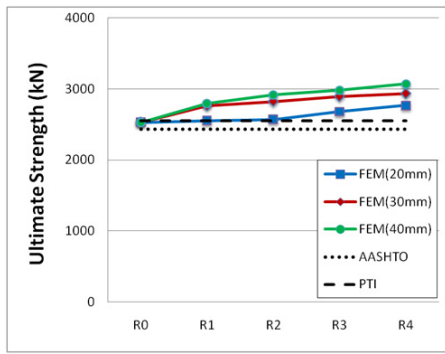


Fig. 10 Ultimate strength of 1-Rib anchorage cases

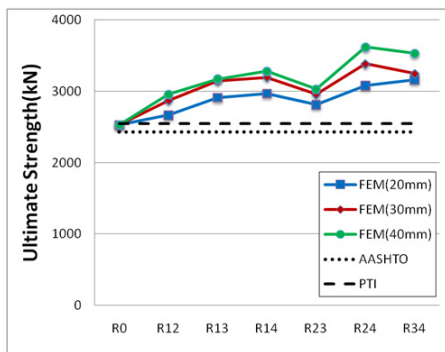


Fig. 11 Ultimate strength of 2-Rib anchorage cases

2개의 리브가 설치된 경우도 마찬가지로 정착구 하부 부분에 2개의 리브가 설치된 경우에서 보다 극한하중이 증가되는 경향을 볼 수가 있다. 또한 근접하여 설치된 경우(R12, R23, R34)와 보다 넓은 간격으로 설치된 경우(R13, R14, R24)로 나누어 고려할 수 있는데 보다 넓은 간격으로 설치된 경우에서 더 큰 극한하중 값을 갖는다. 이는 충분한 간격을 두고 설치되지 않는 리브는 하중전달 성능을 뚜렷하게 개선시키지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 2개의 리브가 설치되는 경우 그 간격이 최소 정착구 하부구조의 길이 ( $h_{anchorage}$ )의 1/4 이상을 확보하여 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 결과 고찰

정착구의 형상 변수에 대한 유한요소해석 결과에서 다음의 사항을 확인할 수가 있었다.

- (1) 단순형태정착구(지압판만 존재하는 정착구, Plate)와 리브가 설치되지 않는 정착구(R0)의 경우에 기존의 AASHTO 및 PTI의 제안식을 이용한 극한하중 값과 해석을 통해 얻어진 값의 차이가 10%이내로 나타난다. 따라서 기존의 설계식은 리브가 설치되지 않는 정착구의 경우에는 충분히 적용될 수 있다는 것으로

판단할 수 있다. 그러나 리브가 설치된 경우의 해석결과에서는 차이가 발생하여 크기는 25%이상 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

- (2) 정착구에 설치된 리브의 조건을 바꾸어 해석을 수행한 결과, 1개의 리브가 설치된 경우 극한하중은 리브의 설치위치 및 설치길이에 영향을 받는다. 하단부에 설치될수록 극한하중 값이 증가하였으며, 길이가 긴 리브를 설치할수록 극한하중이 증가하였다.
- (3) 또한 2개의 리브가 설치된 경우에는 하단부에 리브가 설치된 경우에 더 큰 극한하중 값을 갖는 것으로 나타났다. 특히 2개의 리브가 충분한 간격을 가지고 설치되었을 때의 극한하중 값이 더 큰 결과가 나왔으며, 이는 리브가 충분한 간격을 가지고 설치되지 않았을 경우에는 중첩 효과로 인한 하중분담 효과가 감소함에 따라 나타나는 결과로 생각된다. 따라서 리브의 성능을 개선하기 위해서는 각각의 리브의 간격뿐만 아니라 지압판과 리브 사이의 간격도 충분히 확보하는 것이 중요하다.

## 5. 결 론

이 논문에서는 포스트텐션용 정착구가 설치된 시험체의 하중전달시험 결과와 콘크리트 비선형 유한요소해석을 이용하여 정착구의 형상에 따른 극한강도 변화를 파악하는 것을 목적으로 하였다. 특수형태 정착구에서 횡방향 리브의 설치로 인하여 증가되는 정착구 자체의 강성뿐만 아니라 지압력을 지지하는 면적이 증가하는 하중분담효과 등으로 인하여 정착구의 성능에 따라 정착부의 극한강도에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 현재 설계기준(AASHTO, PTI 등)에서 제안하고 있는 설계식에서 반영하고 있지 않는 횡방향 리브의 설치 위치 및 설치개수, 길이 등 형상을 고려하지 않으므로 정착부 강도 예측에 있어서 지나치게 보수적인 결과를 갖게 되므로 정확한 거동 예측을 위해 보완이 필요한 것으로 판단된다.

특히 해석을 통해 알 수 있는 바와 같이 리브의 설치로 인하여 정착구의 하중전달성능이 효과적으로 개선되는 것으로 판단되며 리브가 1개인 경우에는 정착구의 하부에 위치할수록 또한 2개의 리브가 설치된 경우 충분한 간격을 두고 정착구 하부부분에 설치할수록 정착구의 하중전달성능이 개선되는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 설치길이가 긴 리브를 사용할수록 정착부의 썩기파괴를 완화시켜 정착부의 강도가 증가할 수 있으며 정착구 형상 변수에 대한 반영이 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

### References

- AASHTO (1996) *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition.
- ABAQUS (2013) *ABAQUS Analysis User's Manual version 6.13*, Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Baltay, P., Gjelsvik, A. (1990) Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress. *J. Mater. Civil Eng. ASCE*, 2(1), pp.46~49.
- Breen, J.E., Burdet, O., Roberts, C., Sanders, D., Wollamnn, G. (1994) Anchorage Zone Reinforcement for Post-Tensioned Concrete Girder. NCHRP Report 356, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- CEB-FIP (1990) CEB-FIP Model Code 90, Cornite Euro International Du Beton, pp.82~87.
- EOTA (2002) Guideline for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures (ETAG 013), EOTA.
- Guyon, Y. (1953) *Prestressed Concrete*, Jonh Willy and Sons, Inc., New York.
- Kang, T.H.-K., Rha C.-S. (2011) Modeling Technologies for Unbonded Post-Tension Systems, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(1), pp.33~42.
- KCI (2012) *Concrete Design Code and Commentary*, p.600.
- Kwak, H.G., Filippou, F.C. (1990) Finite Element Analysis of Reinforcement Concrete Structures under Monotonic Loads, Report No. UCB/SEMM-90/14, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, p.120.
- Lee, J., Fenves, G.L. (1998) Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *J. Eng. Mech., ASCE*, 124(8), pp.892~900.
- Park, R., Kent, D.C., Sampton, R.A. (1972) Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading, *ASCE J. Struct. Div.*, 98(7), pp.1341~1360.
- Park, J.H., Cho, J.-R., Park J. (2014) Estimation of Initial Tensile Force Acting on Tendon using the Deformation of a Multi-tendon Anchor Head, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 27(6), pp.581~588.
- PTI (2006) Post-Tensioning Manual, Post-Tensioning Institute, 6th Edition.
- Roberts-Wollmann, C.L., Breen, J.E (2000) Design and Test Specifications for Local Tendon Anchorage Zones, *ACI Struct. J.*, 97(6) pp.867~875.
- Scott, B.D., Park, R., Priestley, M.J.N. (1982). Stress-Strain behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, *J. American Concr. Inst.*, 79, pp.13~27.

### 요 지

프리스트레스 콘크리트 정착부의 설계를 위해 AASHTO 및 PTI에서 관련 설계식을 제안하고 있다. 그러나 이러한 설계식은 구조물의 긴장력이 단순 지압판을 통해 구조 전반으로 전달된다는 가정으로 유도된 것으로 실제 구조물에 적용되는 상용 정착구의 형태와는 차이가 있다. 이 논문에서는 하중전달 시험에 의한 실험적 방법과 3차원 고체요소를 사용한 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용한 해석적 방법을 통해 정착구의 형상 변수에 따른 정착부의 거동특성 변화에 대한 연구를 수행하였다. 하중전달시험 결과에서 얻어진 하중변위 곡선 및 극한하중 값을 해석을 통해 얻은 결과와 비교하여 유한요소모델의 적합성을 확인하였다. 또한 정착구의 리브의 설치위치, 리브의 개수, 리브의 설치길이를 주요 변수로 설정하여 형상변수에 따른 매개변수 연구를 수행하였다.

**핵심용어** : 프리스트레스 콘크리트, 포스트텐션용 정착구, 정착부, 극한하중, 하중전달실험