

모노 텐던 앵커 헤드의 변형 추정을 위한 수치해석

박장호[†] · 양현주 · 조정래^{*}

아주대학교 건설시스템공학과, ^{*}한국건설기술연구원
(2013. 10. 29. 접수 / 2014. 1. 6. 채택)

Numerical Analysis for the Deformation of a Mono Tendon Anchor Head

Jang Ho Park[†] · Hyun Joo Yang · Jeong-Rae Cho^{*}

Department of Civil System Engineering, Ajou University

^{*}Korea Institute of Construction Technology

(Received October 29, 2013 / Accepted January 6, 2014)

Abstract : This paper deals with a numerical study on the deformation of a mono tendon anchor head. The anchor head is used to introduce the compression to concrete, and consists of wedges and a head. All kinematics, material and contact nonlinearity are included in the precise analysis of a mono tendon anchor head. A numerical study on a mono tendon anchor head is performed to investigate effects of friction and eccentricity of load by ABAQUS. From the numerical results, it is verified that the deformation of a mono tendon anchor head is affected by characteristics of materials, boundary condition between wedge and anchor head, eccentricity of load, etc.

Key Words : mono tendon anchor head, wedge, tendon, deformation, friction, eccentricity

1. 서론

콘크리트 구조물이 장경견화됨에 따라서 프리스트레스트 콘크리트의 사용이 지속적으로 증가하고 있다. 프리스트레싱을 하는 방법은 크게 두 가지로 나뉘는데 콘크리트를 타설하기 전에 미리 강선을 긴장 시키고 콘크리트가 굳은 후 강선의 긴장력 도입장치를 제거하는 프리텐션 공법과 콘크리트가 굳은 다음 강선을 긴장시켜 프리스트레싱을 가하는 포스트텐션 공법이 있다. 현장에서 제작되어 사용되는 부재의 경우에는 포스트텐션 공법이 주로 사용되고 있다.

프리스트레스트 콘크리트 구조물의 유지관리를 위해서는 구조물에 도입된 긴장력의 상태를 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 텐던의 장력을 정확하게 측정하는 것이 가장 확실한 방법이나, 현실적인 제약조건으로 인하여 텐던의 장력을 직접 측정하기 어려운 실정이다. 이에 대한 대안으로 텐던의 장력을 다양한 방법으로 추정하고자 하는 연구들이 진행되고 있으며, 본 연구에서는 앵커 헤드의 변형을 측정하여 텐던의 장력을 추정하기 위한 기초 연구로서 앵커 헤드에 작용하는 하중과 앵커 헤드의 변형 관계를 수치적으로 파악하여 계측을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

텐던을 정착시키는 포스트텐션용 정착장치는 썬치와 앵커 헤드 등으로 구성된다. 국내에서의 포스트텐션용 정착장치는 외국계 기업들에 의해 도입되기 시작하였으며, 현재 국내에서는 외국계 시스템들과 함께 2~3개의 국내 시스템이 개발되어 사용되고 있다. 하지만 프리스트레싱 강연선과 정착장치에 대한 기술은 초기 기술과 비교하였을 때 많은 발전이 이루어지지 않았다. 이에 따라 정착장치에 대한 성능 평가는 10여년 전 방법에 의존하는 실정이고^{1,2)}, 앵커 헤드와 썬치의 구조적 특성에 대한 상세한 해석적 연구는 많지 않은 실정이다. 외국의 경우 Bastien 등에 의해 모노 텐던 및 멀티 텐던용 앵커 헤드에 대한 해석적 연구가 이루어졌으며^{3,4)}, CFRP 텐던의 개발과 더불어 연구가 증가하고 있다⁵⁾. 국내에서는 현수교 및 사장교와 같은 장대교량에 적용되는 강선을 썬치에 고정하여 정착장치에 고정하는 방식에 대한 실험적 연구가 수행되었으며⁶⁾, 고강도 강연선을 이용하는 앵커 헤드의 기하학적 형상에 따른 비선형 거동 특성에 대한 연구가 이루어지기도 하였다⁷⁾. 그러나 대부분의 연구가 앵커 헤드에 발생하는 응력의 상태에 초점이 맞추어져 있고 앵커 헤드의 변형에 대한 분석은 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 긴장력 도입에 따른 긴장력과 모노 텐던 앵커 헤드의 변형 관계를 파악하여 계측을 위한 기초

[†] Corresponding Author : Jang Ho Park, Tel : +82-31-219-2506, E-mail : jangho@ajou.ac.kr

Department of Civil System Engineering, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 443-749, Korea

자료를 제공하고자 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 모노 텐던 앵커 헤드에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석 변수로는 앵커 헤드와 썸기와의 접촉 마찰계수 및 작용하중의 편심을 선정하였으며, 변위제어법을 사용한 비선형 수치해석을 수행하였다. 해석결과로부터 작용하중과 모노 텐던 앵커 헤드의 변형과의 관계를 확인하였으며, 마찰계수 및 하중의 편심이 앵커 헤드의 변형에 미치는 영향을 확인하였다.

2. 수치해석 이론 및 해석 모델

2.1 수치해석 이론

유한요소법을 이용한 구조물의 비선형 해석방법으로는 크게 하중제어법과 변위제어법이 있다. 하중제어법은 하중을 단계적으로 증가시켜 해석하는 방법으로 응력-변형을 곡선이 변형경화(strain hardening)현상을 보이는 구조물 해석에는 적합한 방법이다. 하지만 응력-변형을 곡선이 변형연화(strain softening)현상을 보이는 구조물 해석에서는 최대하중으로부터 파괴하중까지의 거동에 관한 해석을 할 수 없어 파괴까지의 거동을 예측하는데 있어서는 적합하지 않으며 해가 수렴하지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 일정한 지점의 변위를 단계적으로 증가시켜 해석을 수행하는 변위제어법이 사용될 수 있다.

변위제어법은 Fig. 1과 같이 평형방정식을 만족시키는 하중 증분값 Δf^E 값을 변위 증분값 Δu_1 에 대해서 반복계산을 통해서 해를 구하는 방법이다. 반복 계산마다 변위 증분값 Δu_1 을 계속 유지하면서 이를 위해 필요한 외부하중 증분값 Δf_i^E 을 계산하고 최종단계 전 단계까지 총 절점 하중 f_{i-1}^E 을 합하여 총 절점하중 f_i^E 를 계산한다. 여기서 총 절점하중 f_i^E 에서 내부지지하중 f_i^U 값의 차를 불평형력 f_i^U 이라 하고, 이를 다음 반복계산에의 하중으로 가정하고 수렴조건을 만족할 때까지 반복계산을 수행하면서 해를 구하는 방법이다⁸⁾.

정착장치에서는 앵커 헤드와 썸기 사이에서 국부적인 응력 집중 현상이 발생할 수 있기 때문에 접촉문제가 중요하다. 접촉문제를 해결하기 위해서는 크게 벌칙법

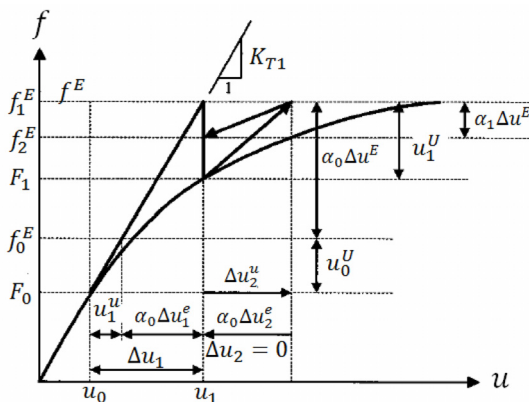


Fig. 1. Displacement Control Method

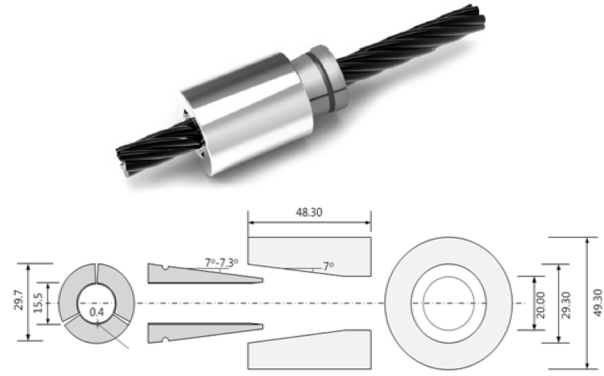


Fig. 2. Mono tendon anchor head

(Penalty Method)과 라그랑지 승수법(Lagrange multiplier method)이 사용된다. 벌칙법은 계산량이 적은 장점이 있고 라그랑지 승수법은 안정적인 수렴성을 가지는 장점이 있다. 본 연구에서는 앵커 헤드와 썸기와의 접촉 문제에 벌칙법을 적용하여 해석을 수행하였다.

2.2 해석모델

1) 해석모델의 제원

Fig. 2와 같은 모노 텐던 정착장치에 대하여 수치해석을 수행하였다. 모노 텐던 정착장치는 앵커 헤드(Anchor Head)와 썸기(Wedge) 및 7연선(tendon)로 구성되어 있다.

2) 재료의 물성치

현재 국내에서 사용되고 있는 정착장치 앵커 헤드의 소재로는 기계구조용 탄소강(SM35C~SM50C)이, 썸기의 소재로는 크롬몰리브덴강(SCM) 또는 니켈크롬몰리브덴강(SNCM)이 사용하고 있다. 본 연구에서는 제조사가 제시한 Table 1과 같은 재료의 물성을 사용하였다.

7연선의 경우 단면적은 138.7mm²이고, PCI Manual에서 제시되어 있는 비선형 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon_{ps} \leq 0.0086 \quad f_{ps} = 196,500\epsilon_{ps} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

$$\epsilon_{ps} > 0.0086 \quad f_{ps} = \alpha(270 - \frac{0.04}{\epsilon_{ps} - 0.007}) \text{ [MPa]} \quad (2)$$

그러나 7연선을 각각 모델링하고 앵커 헤드와 결합하여 해석을 수행할 경우 해석시간이 과다하고 결과의 수렴이 좋지 않아 7연선을 원형의 솔리드 단면으로 가정하였다. 솔리드 단면으로 가정한 7연선은 원래와 동일한 15.2mm의 직경을 가지지만 단면적은 181.45mm²가 되며, 원래의

Table 1. Material properties of head, wedge and tendon

	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio	Yield stress(MPa)
head	200.0	0.3	600
wedge	200.0	0.3	560

단면적과 변화된 단면적의 비($\beta=0.76436$)를 이용하여 비선형 응력-변형률 관계를 다음과 같이 구하였다⁹⁾.

$$\epsilon_{ps} \leq 0.0086 \quad f_{ps} = 150,197.2\epsilon_{ps} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

$$\epsilon_{ps} > 0.0086 \quad f_{ps} = \alpha\beta(270 - \frac{0.04}{\epsilon_{ps} - 0.007}) \text{ [MPa]} \quad (4)$$

솔리드 단면으로 환산한 7연선의 응력-변형률 곡선은 Fig. 3과 같으며, 앵커 헤드와 썬기는 해석 시 수렴성을 고려하여 완전 탄소성(Elasto-Perfect Plastic)으로 가정하였다.

3) 앵커 헤드와 썬기의 경계조건

강재와 강재가 접할 경우 마찰계수는 통상적으로 건조한 상태에서 0.3~0.7 정도로, 유막이 형성된 경우에는 0.09~0.12 정도로 평가되고 있다. 앵커 헤드의 경우는 재료의 가공과정에서 약간의 유막이 형성되지만 표면을 갈아내는 과정을 통해서 거친 표면을 형성하게 된다. 본 연구에서는 마찰계수 0.3을 기준으로 하였다.

Fig. 4는 위의 조건들을 고려한 모노 텐던 정착장치의 유한요소모델이다.

3. 모노 텐던 앵커 헤드의 거동

범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 모노 텐던 앵커 헤드의 거동을 해석하였다. 앵커 헤드와 썬기 사이의 접촉조건은 마찰을 고려하기 위해 앵커 헤드와

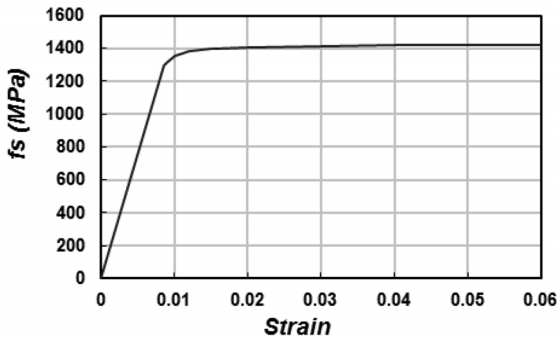


Fig. 3. Modified stress-strain relationship of tendon

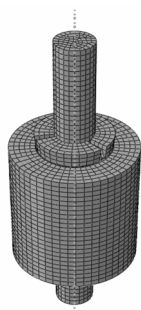


Fig. 4. Finite element model of a mono tendon anchor

썬기와의 상대적인 거동을 허용하는 벌칙법을 사용하였고, 앵커 헤드 하부의 텐던에서 10mm 변위가 발생할 때까지 변위제어법을 이용하여 비선형해석을 수행하였다. 이로부터 앵커 헤드와 썬기 사이의 마찰계수 및 하중의 편심 등에 따른 모노 텐던 앵커 헤드 변형의 공간적 분포와 작용하중과의 관계를 살펴보았다.

3.1 마찰계수에 따른 앵커 헤드의 거동

Fig. 5는 마찰계수에 따른 정착장치의 변형 형상을 나타낸 것이며, Fig. 6은 마찰계수에 따른 앵커 헤드 하부 텐던에서의 변위와 썬기의 slip의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 마찰계수가 0.2인 경우에 썬기의 Slip Failure가 발생하였음을 확인할 수 있다. 현장에서는 이러한 Slip Failure가 발생하지 않아야 하므로 해석시에도 Slip Failure가 발생하지 않도록 재료의 특성을 고려하여 적절한 마찰계수가 결정되어야 할 것이다.

Fig. 7은 앵커 헤드 하부의 텐던에서 10mm 변위가 발생할 때의 앵커 헤드의 변형 형상이다. 앵커 헤드에서 발생하는 변형은 앵커 헤드와 썬기와의 접촉 조건에 의하여 썬기의 상부 중앙과 접촉하는 앵커 헤드부분에서 가장 크게 발생하고 있다.



Fig. 5. Deformation of anchor with respect to friction coefficient

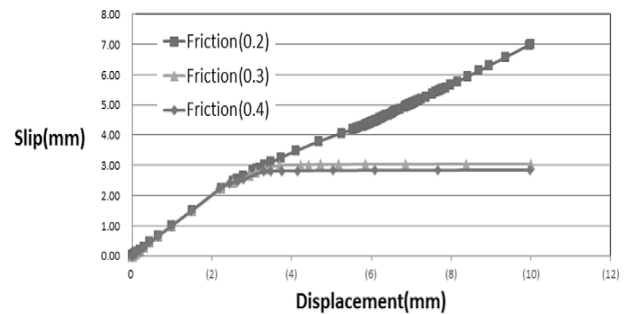


Fig. 6. Slip-displacement relationship with respect to friction coefficient

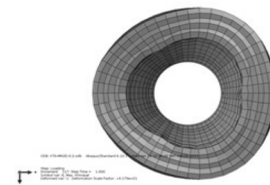


Fig. 7. Deformation of anchor head

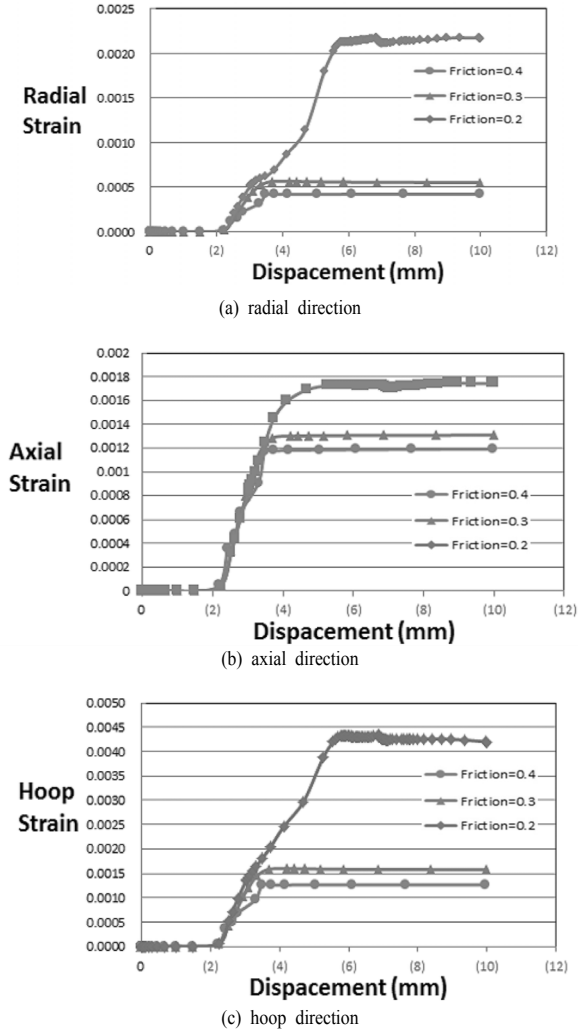


Fig. 8. Strain–displacement relationship with respect to friction coefficient

Fig. 8은 마찰계수에 따른 앵커 헤드 하부의 텐션 변위와 앵커 헤드에서 발생하는 최대변형률의 관계를 도시한 것이고, Fig. 9, 10, 11은 각각 마찰계수가 0.2, 0.3, 0.4인 경우에서의 앵커 헤드에 발생하는 변위를 나타낸 것이다. 해석결과들을 살펴보면 마찰계수가 0.2인 경우 Slip

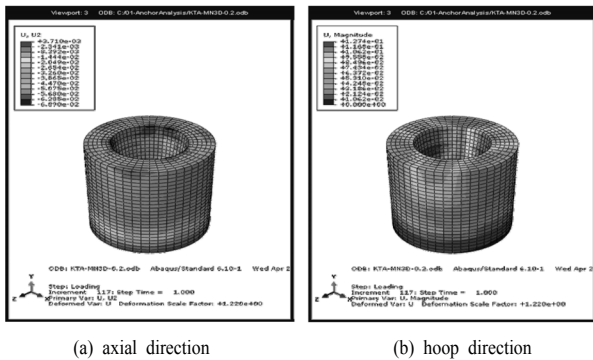


Fig. 9. Displacement of anchor head (friction coefficient=0.2)

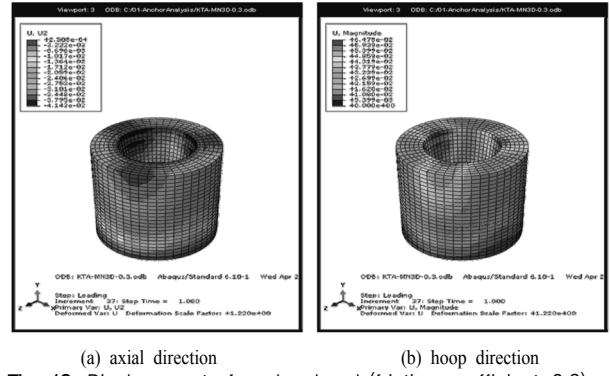


Fig. 10. Displacement of anchor head (friction coefficient=0.3)

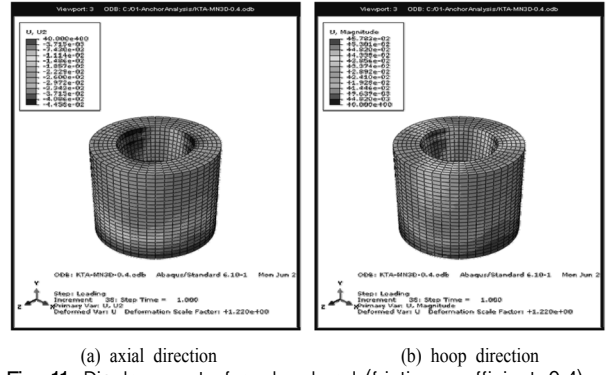
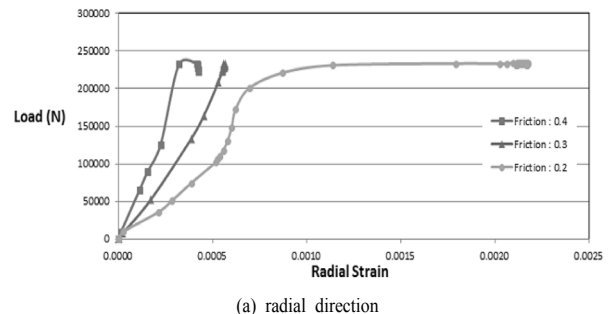


Fig. 11. Displacement of anchor head (friction coefficient=0.4)

Failure로 인하여 모든 방향으로 변형률이 가장 크게 나타났다. 그에 비하여 마찰계수가 0.3인 경우와 0.4인 경우에는 변형률에서 큰 차이를 보이지 않고 있다. 방향별 변형률의 경우에는 Slip Failure가 발생하지 않을 경우에는 모든 경우에서 hoop 방향의 변형률이 가장 크게 나타났으며, radial 방향의 변형률이 상대적으로 작게 나타났다.

Fig. 12는 마찰계수에 따른 작용하중과 앵커 헤드에서 발생하는 최대변형률의 관계를 도시한 것이다. 이 경우에도 Slip Failure가 발생하지 않을 경우에는 모든 경우에서 hoop 방향의 변형률이 가장 크게 나타났으며, radial 방향의 변형률이 가장 작게 나타났다. 따라서 앵커 헤드의 변형을 측정하여 텐션의 장력을 추정하고자 할 경우에는 radial 방향의 변형률 측정은 적절하지 않으며, hoop 방향의 변형률은 가장 큰 값을 가지므로 측정에 유리하나 위치에 따른 변화가 심한 점을 고려하여야 할 것이다.



(a) radial direction

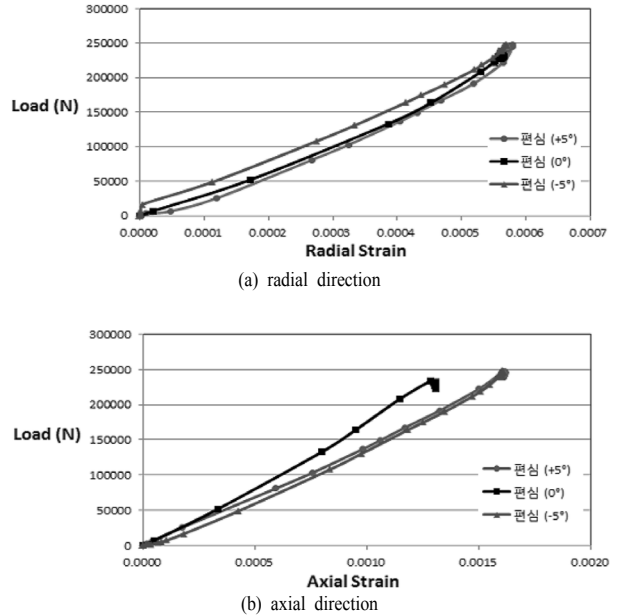
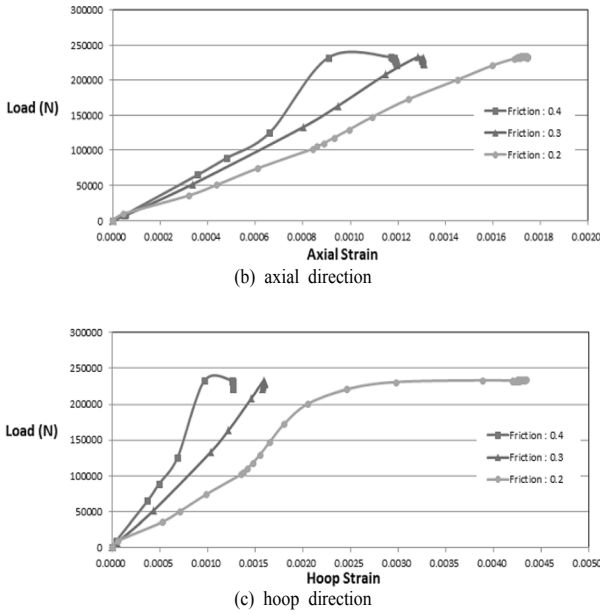


Fig. 12. Load-strain relationship with respect to friction coefficient

3.2 하중의 편심에 따른 앵커 헤드의 거동

마찰계수가 0.3인 경우에 대하여 하중의 편심에 따른 앵커 헤드의 변형을 살펴보았다. 하중의 편심은 중심축에 대하여 각각 5°를 췌기의 모서리방향(+5°)과 중앙방향(-5°)으로 주었다. 실제 앵커 헤드는 직경이 큰데 반하여 쉬스관은 직경이 작고 긴장재는 앵커 헤드에서 빠져 나온 후 약간의 절곡이 되므로 정착장치의 제원(앵커 헤드 크기, 앵커 헤드 내 췌기의 배치, 쉬스관 크기 및 현장조건)에 따라 작용하중의 편심이 발생할 수 있다.

Fig. 13은 앵커 헤드 하부의 텐던에서 10mm 변위가 발생할 때의 위에서 본 정착장치의 응력 및 변형현상을 나타낸 것이다. 작용하중의 편심에 따라 췌기 및 앵커 헤드의 변형현상이 다르게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14는 편심하중에 따른 작용하중과 앵커 헤드에서 발생하는 최대변형률의 관계를 도시한 것이다. radial 방향과 hoop 방향 변형률은 편심하중이 췌기 중앙방향(-5°)으로 작용했을 때 가장 크게 나타났다. 반면 축방향 변형률은 수직하중이 작용한 경우가 편심하중이 작용한 경우

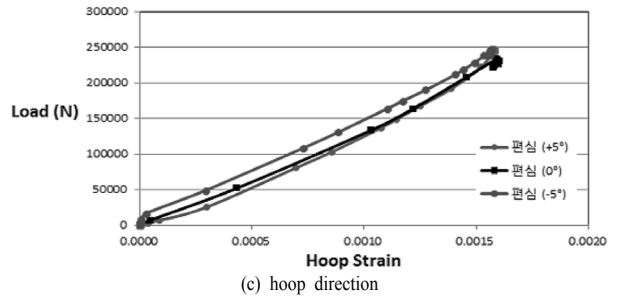


Fig. 12. Load-strain relationship with respect to friction coefficient

보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 작은 하중의 편심에 의해서도 변형률에 변화가 나타나며, 변형률이 방향별로 일정한 경향을 보이지 않아 앵커 헤드의 변형을 측정하여 텐던의 장력을 추정하고자 할 경우에는 작용하중의 편심에 대한 영향도 고려되어야함을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 모노 텐던 앵커 헤드의 하중에 의한 변형을 파악하기 위하여 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 앵커 헤드와 췌기의 접촉에 의한 마찰계수 및 하중의 편심에 대한 영향을 살펴보았으며, 앵커 헤드의 변형을 측정하여 텐던의 장력을 추정하기 위한 기초자료로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구의 수치해석에서는 앵커 헤드와 췌기의 접촉에 의한 마찰계수를 0.2로 한 경우 Slip Failure가 발생하였다. 현장에서는 Slip Failure가 발생하지 않아야 하고 마찰계수에 따라서 응력 및 변형률의 변화가 나타날 뿐만 아니라 제품에 따라서 마찰계수가 다르므로 해석시에는

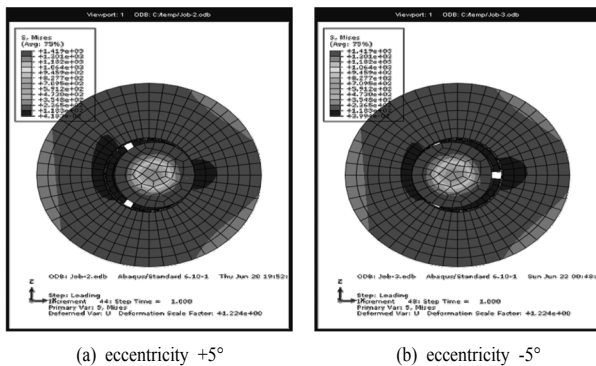


Fig. 13. Deformation of anchor head by eccentric load

앵커 헤드와 썸기 사이의 마찰계수에 대한 적절한 판단이 필요할 것으로 판단된다.

2) 앵커 헤드의 변형 형상으로부터 썸기의 상부 중앙과 접한 앵커 헤드 부분에서의 변형이 썸기의 모서리부와 접한 앵커 헤드 부분에서의 변형에 비하여 크게 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 앵커 헤드의 변형에 썸기의 형상과 배치가 반드시 고려되어야 할 것이다.

3) 하중-변형률 해석결과 Slip Failure가 발생하기 전에는 모든 경우에서 축방향 및 hoop 방향 변형률이 radial 방향 변형률에 비하여 크게 나타났으며, hoop 방향 변형률이 축방향 변형률보다 다소 크게 나타났다. 따라서 변형으로부터 텐던의 긴장력의 추정에는 hoop 방향 변형률이 유리할 것으로 예상되나 위치에 따른 변화가 심한 점에 고려하여야 할 것이다.

4) 앵커 헤드 크기, 앵커 헤드 내 썸기의 배치, 쉬스관 크기 및 현장 조건 등 다양한 상황에 따라 편심이 작용할 수 있으며, 이러한 편심은 변형률에 변화를 가져오며 방향에 따른 효과도 다르게 나타난다. 따라서 하중의 편심에 대한 적절한 예측과 고려가 필요할 것이다.

감사의 글 : 본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 (PSC 교량의 스마트 긴장력 관리 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1) PTI, "Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems", Post-Tensioning Institute, Phoenix, 1998.

2) EOTA, "Guideline for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures," EOTA, Brussels, 2002.

3) D. Marceau, J. Bastien, M. Fafard, "Experimental and Numerical Studies of Mono-strand Anchorage," Structural Engineering and Mechanics, Vol. 12, No.2, pp.119-134. 2001.

4) J. Bastien, D. Marceau, M. Fafard, H. R. Ganz, "Use of FEA for Design of Posttensioning Anchor Head," Journal of Bridge Engineering, Vol. 12, pp.194-204, 2007.

5) A. Al-Mayah, K. Soudki, A. Plumtree, "Novel Anchor System for CFRP Rod : Finite-element and Mathematical Models," Journal of Composites for Construction, Vol. 11, No. 5, pp.469-476, 2007.

6) Ju-Won Seo, Woon Jeong, Eukyung Cho, Hoon Yoo, "Parametric Analysis to Determine Optimum Geometries of PPWS Sockets in Cable-suspension Bridges," Proceedings of Steel Structure, Korean Society of Steel Construction, pp.35-36, 2010.

7) Myung-Hyun Noh, Taek-Ryong Seong, Jin-Kook Kim, "Nonlinear Analysis of Anchor Head for High Strength Steel Strand," Journal of Computational Structural Engineering, COSEIK, Vol. 25, No. 2, pp.163-173, 2012.

8) O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, "The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics", Sixth Edition, 2005.

9) Hyun Joo Yang, "The Study on Behavior Characteristics of Mono Tendon Anchor Head using Numerical Analysis Method," master's thesis, Ajou Univ., 2013.