

유한요소해석을 통한 수평 및 수직볼트로 체결된 PHC 파일 연결부의 안전성 평가

김수은¹ · 김성보^{2*}

¹석사과정, 충북대학교, 토목공학부, ²교수, 충북대학교, 토목공학부

Safety Evaluation of Horizontal and Vertical Bolted Connection between PHC Piles Using Finite Element Analysis

Kim, Su Eun¹, Kim, Sung Bo^{2*}

¹MSc. Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

²Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

Abstract - The safety evaluation of horizontal and vertical bolted connection between PHC piles is presented. The numerical analysis model is constructed using the commercial finite element program, ABAQUS, in which 3D solid element is used to model all the connection devices. The actual bolted connection is idealized by the contact and tie condition given in ABAQUS. Through the finite element analysis, the compression, tensile, bending and shear behaviors of PHC pile connection were analyzed. The safety factor based on Von-Mises and yield stress was calculated for the safety evaluation of each connection devices.

Keywords - PHC pile, Connection, Horizontal and Vertical bolt, Von-Mises stress, ABAQUS

1. 서론

PHC(Pretensioned spun High strength Concrete) 파일은 원심력을 활용하여 제작된 고강도 프리스트레스 파일의 약칭이다. 콘크리트 파일에 프리스트레스를 도입하여 힘이나 인장력에 약한 콘크리트의 결점을 보완한 파일이다. PHC 파일은 기존의 PC(Prestressed Concrete) 파일을 개선한 파일로 오늘날 대부분의 현장에서 사용하고 있으며 깊은 관입량을 필요로 하는 현장에서는 다수의 PHC 파일 및 강관 파일을 연결하여 사용하고 있다. 파일의 연결부는 용접을 하거나 볼트를 체결하는 방법이 있지만 용접의 경우 시공 상의 문

제가 있어 사용하기에 어려운 점이 자주 발생한다.

강관 파일의 경우, 용접을 이용하여 파일을 연결하는데 강두원 등^[1]은 원형 강관의 압축 실험에 대한 구조적인 거동 및 설계 강도에 대해 기술하였다. 김선희 등^[2]은 HSB600 강재를 사용한 원형강관 기둥의 거동 및 내력을 분석하고 설계기준과의 적합성을 검증하였다.

PHC 파일의 연결 장치의 경우, 백규호 등^[3]은 선단금구와 두부금구, 볼트를 이용한 새로 개발된 이음방법에 대한 구조적인 안전성과 현장 시공성, 새로운 이음 방법이 말뚝의 지지력에 미치는 영향 등을 규명하기 위하여 각종 실내시험과 현장재하시험을 수행하였다. 김병철 등^[4]은 PHC 파일 중앙에 위치한 압나사 형식의 볼트를 이용한 PHC 말뚝의 이음방법을 개발하여 휨 시험을 실시해 이음부 성능을 확인하였으며 연직 및 수평 재하 시험을 통해 실 시공 상태에서의 하중-변위곡선의 특성을 비교, 분석하였다. 이용준 등^[5]은 결합너트와 볼트를 수직으로 체결한 이음부에 대해 실내 실험을 수행하여 구조적인 안전성을 조사하였다. 최원용 등^[6]은 PHC 파일의 수직형 고장력 볼트 이음부에 대한 구조적 거동을 파악하기

Note.-Discussion open until October 31, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 8, 2017; revised March 18, 2018; approved on March 22, 2018.

Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-43-261-3241 Fax. +82-43-275-2377

E-mail. sbkim@chungbuk.ac.kr

위해 실내 실험을 수행하여 이음부에 대한 요소별 거동을 파악하였다. 윤원섭 등^[7]은 수직으로 체결된 볼트식 PHC 말뚝 이음부에 작용되는 압축 및 수평하중과 휨 하중이 작용되는 경우의 수치해석을 이용하여 말뚝이음 장치의 특성에 대해 분석하였다.

본 논문에서는 수평 및 수직볼트를 사용하여 PHC 파일의 연결부를 체결한 볼트조립부의 거동에 대한 유한요소해석을 수행하였다. PHC 파일의 볼트 체결부에 대한 구조적 거동을 파악하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS^[8]를 사용하여 PHC 파일과 볼트 연결부를 3D 고체요소를 사용하여 모델링하였다. 연결부의 볼트, 너트 및 강재 연결장치는 Master/Slave surface를 적용한 Contact 조건을 부여하였다. PHC 파일 연결부에 작용하는 압축, 인장, 휨과 전단력에 대한 응력 해석을 통해 PHC 파일의 연결부에 대한 안전성 검토를 수행하였다.

2. PHC 파일 연결부

Fig. 1은 본 논문에서 해석한 PHC 파일 연결부의 형태이다. Fig. 1(a)는 PHC 파일 한쪽단부에 수직볼트로 체결되는 L형 단면판이다. Fig. 1(b)는 다른 쪽 PHC 파일 단부에 수직볼트로 체결되는 원형판과 원형판에 용접된 사각너트를 보여 준다. 사각너트는 원형판에 맞닿은 모서리가 필렛용접되어 있다. Fig. 1(c)는 L형판과 원형판이 체결된 것이고 Fig. 1(d)는 Fig. 1(c)에 수평볼트와 수직볼트가 체결된 연결부의 모습이다.

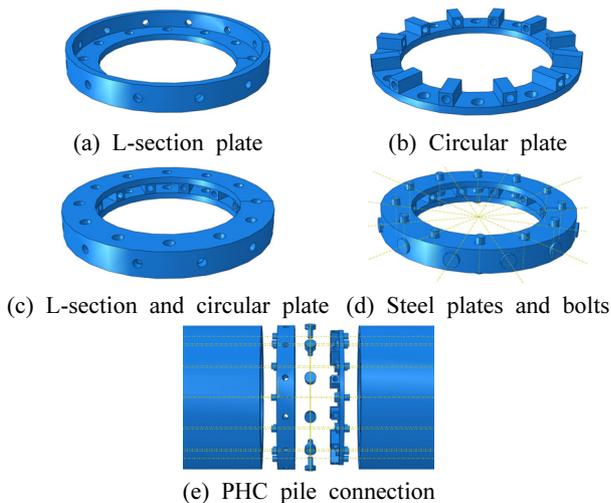


Fig. 1. Analysis models of PHC pile connection

Fig. 1(e)는 PHC 파일과 연결부가 체결되는 형상을 나타낸다. 각각의 부재에 대한 치수는 Fig. 2 및 Table 1에 제시되었다.

본 논문에서는 Table 2과 같이 PHC 파일 부재인 콘크리트의 압축강도는 한국산업규격^[9]에 따라 80MPa, 연결부의 L형단면판과 원형판, 사각너트는 SS400으로 항복응력은 240

Table 1. Size of PHC pile connection devices

(a) L-section plate and circular plate				
Division	Outer diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Thickness (mm)	Height (mm)
L-section plate	450	310	12	49
Circular plate	450	310	12	-

(b) Square nut				
	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Hole diameter (mm)
Square nut	25	55	25	16

(c) Bolt	
Division	Diameter (mm)
Horizontal bolt	16
Vertical bolt	20

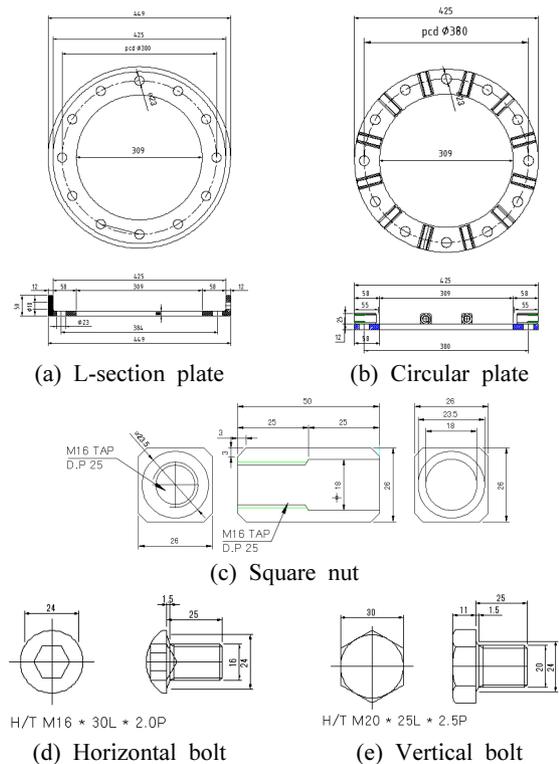


Fig. 2. PHC pile connection

MPa이며 볼트는 M16 및 M20의 고장력 볼트(F10T)를 사용하여 항복응력은 900MPa로 해석을 수행하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 모델

본 연구에서는 PHC 파일 연결부의 거동을 확인하기 위해 압축, 인장, 휨, 전단의 유한요소해석을 진행하였다. 4가지 모델 모두 PHC 파일의 바깥지름은 450mm이고 두께는 70mm로 동일하며 각각의 모델에서 연결한 PHC 파일의 길이는 다르게 설정하였다.

해석 모델은 ABAQUS를 이용하여 3차원 Solid 모델로 모델링하였다. Mesh는 정사면체 모양으로 하였으며 일정하게 분할하지 않고 Fig. 3과 같이 구멍이 뚫린 곳은 더 세밀하게 분할하여 일정하게 분할했을 때보다 구멍이 원형에 가깝게 모델링하였다. 이때 Curvature control을 사용해 편차 계수를 작게 입력하면 더 세밀하게 Mesh를 분할할 수 있다. Fig. 3(a)와 (b)는 Curvature control의 편차계수를 각각 0.1, 0.05로 적용했을 때의 Mesh이고 본 논문에서는 Fig. 3(b)와 같은 모델을 사용하여 응력해석을 수행하였다.

PHC 파일 연결부의 부재를 연결하기 위해서 Contact 및

Table 2. Material properties

(a) PHC pile		
	Compressive strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
PHC Pile	80	36,600
(b) Steel plate and bolts		
Division	Yield strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
Steel plate	240	205,000
Bolt	900	205,000

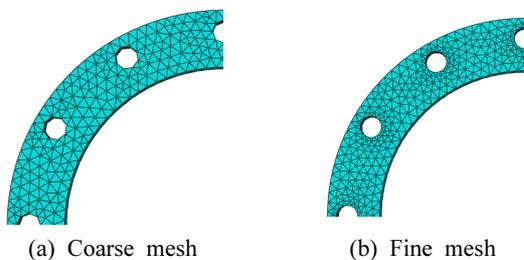


Fig. 3. Division of mesh

Tie 조건을 사용하였다. 해석 시 각각의 부재가 서로 침범하는 것을 막기 위해 PHC 파일과 L형단면판, PHC 파일과 원형판, L형단면판과 사각너트, 수직 볼트끼리 맞닿는 부분에 Master/Slave Surface를 적용한 Contact 구속조건을 부여하였다. Contact 조건에서 Steel의 마찰계수를 0.5로 설정하여 마찰 거동을 모델링하였다. 또한 PHC 파일과 수직볼트, 사각너트와 수평볼트처럼 볼트 체결부위와 사각너트와 원형판을 용접하는 곳에는 Tie 조건을 사용하였다.

3.2 축력, 휨모멘트 및 전단력 재하

압축 모델은 Fig. 4와 같은 외팔보에 압축 하중을 자유단에 적용하였다. 압축 하중은 실제 PHC 파일을 생산하는 공장의 PHC 파일 제품 성능표^[10]에 따라 연결부가 없는 PHC 파일의 허용 축방향 내력을 사용하였다. 직경 450mm인 경우의 허용 축방향 내력은 1,370kN이며, PHC 파일의 단면적 84,053mm²으로 나눈 값인 16.30MPa를 외팔보 자유단에 압력으로 재하하였다.

콘크리트구조기준^[11]에 따라 콘크리트의 인장강도는 압축 강도의 1/9~1/13이다. 압축해석에서 재하한 허용 축방향 내력 1,370kN의 1/9인 152.22kN을 PHC 파일 단면적 84,053mm²으로 나누어 압력으로 환산한 1.81MPa를 외팔보 자유단에 Fig. 5와 같이 적용하였다. PHC 파일은 유효 프리스트레스가 도입되어 있지만 해석상 제외하여 실제보다 안전측에 해당하는 인장 해석을 수행하였다.

또한 연결부가 없는 PHC 파일의 한국산업규격^[9]에 따른 균열 휨 모멘트를 고려하여 휨 해석을 수행하였다. PHC 파일 한국산업규격^[9]에 따른 휨 강도 시험과 같은 단순보로 모델링하였다. 직경 450mm인 경우 단순보에서 균열 휨모멘트

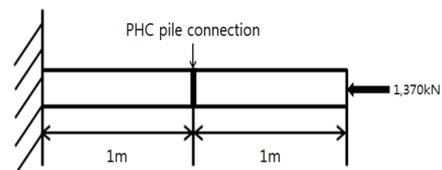


Fig. 4. Compressive analysis model

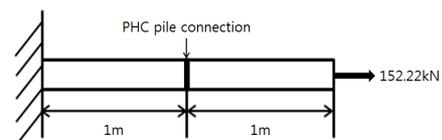


Fig. 5. Tensile analysis model

는 73.6kN·m이므로 이때의 하중을 찾기 위해 PHC 파일 한국산업규격^[9]에 제시된 식 (1)을 사용하였다. 여기서 M 은 지름 450mm PHC 파일의 균열 휨 모멘트 73.6kN·m, W 는 지름 450mm 길이 10m인 PHC 파일의 중량 21.3kN, L 은 PHC 파일의 길이 10m를 대입하여 하중 P 를 계산하였다. 계산한 P 의 값은 54.62kN이며 Fig. 6과 같이 재하하였다.

$$M = \frac{WL}{40} + \frac{P}{4} \left(\frac{3}{5}L - 1 \right) \quad (1)$$

전단 해석은 PHC 파일의 한국산업규격^[9]에 따른 PHC 파일 몸체의 전단강도를 고려하여 해석을 수행하였다. 바깥지름이 300~600mm인 것에 대해서는 대표 바깥지름을 400mm로 하고, 바깥지름 700~1,200mm인 것에 대해서는 대표 바깥지름을 800mm로 한다. 본 해석에서 PHC 파일의 지름은 450mm이므로 대표 바깥지름은 400mm이며 전단강도는 148.1kN이다. 이때 재하하중을 찾기 위해 PHC 파일 한국산업규격^[9]에 제시된 식 (2)를 사용하여 전단 지간 내에 경사 인장 균열이 발생했을 때의 하중 P_c 를 계산한다. 여기서 Q_c 는 전단강도이다. 계산한 P_c 의 값은 296.2kN이고 Fig. 7과 같이 재하하였다.

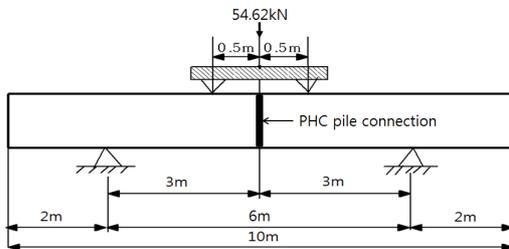


Fig. 6. Flexural analysis model

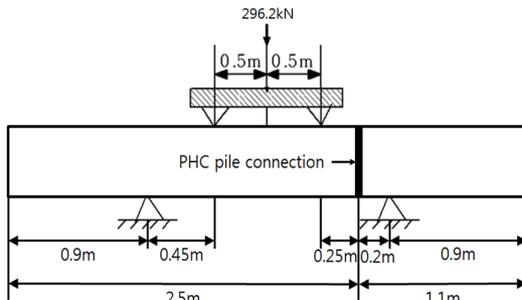


Fig. 7. Shear analysis model

$$Q_c = \frac{P_c}{2} \quad (2)$$

4. 해석 결과

4.1 압축력을 받는 PHC 파일 연결부

압축력이 재하된 PHC 파일 연결부에서의 최대Von-Mises 응력은 L형단면판에서 65.7MPa, 원형판에서 58.0MPa, 사각너트에서 198.6MPa, 수평볼트에서 69.3MPa, 수직볼트에서 61.7MPa이 발생하였다. 압축력을 PHC 파일의 끝단 단면에 집중하중이 아닌 압력으로 재하했기 때문에 각 부재의 응력분포는 균일하게 발생되었고 하중을 재하한 끝단에서 일정하게 0.9mm의 수축 변위가 발생하였다.

연결부의 최대응력은 변형률이 가장 큰 사각너트의 수평볼트 체결부에서 발생하였는데, 이는 압축력에 지지하는 사각너트의 전체적인 단면적이 평판에 비해 작기 때문이다. 즉, 수평볼트가 사각너트의 길이보다 짧아서 볼트가 너트를 완전 관통하지 못하여 사각너트의 내부의 빈 공간에 압축력이 집중되기 때문이라고 판단된다.

연결부에서의 Von-Mises 응력분포는 Fig. 8에 나타내었으며, Table 3과 같이 모든 연결부에서 항복응력보다 작은 응력 값이 산정되어 압축력을 재하하였을 때 강재 연결부의 안전성은 확보되는 것으로 검토되었다.

4.2 인장력을 받는 PHC 파일 연결부

인장하중은 PHC 파일 끝단의 단면에 균일한 압력으로 PHC 파일 단면에 일정하게 재하하였다. 그 결과 연결부 부재가 일정하게 늘어났으며 하중을 재하한 PHC 파일 끝단의 단면에서 0.2mm의 신장변위가 발생하였다. PHC 파일에 인장력을 작용하였을 때 최대 Von-Mises 응력은 L형단면판에서 202.4MPa, 원형판에서 147.2MPa, 사각너트에서 102.3MPa, 수평볼트에서 322.4MPa, 수직볼트에서 160.5MPa이 발생하였다.

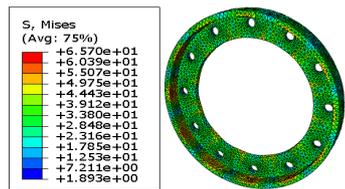
인장해석에서의 최대 응력은 수평볼트에서 발생하였으며 항복응력과 비율인 안전율이 2.79로서 인장에 대하여 안전성이 확보되고 있다고 볼 수 있다. 인장하중에서 연결부의 최대응력은 Fig. 9와 같이 L형단면판의 수평볼트 체결부에서 발생하였다. PHC 파일이 인장력에 의해 당겨질 때 수평볼트 머리의 아랫면과 L형단면판의 측면이 접촉되면서 최대

응력이 발생하는 것으로 판단된다.

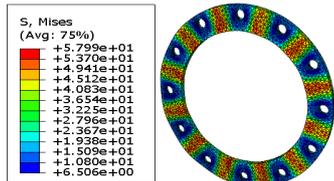
Table 4에 나타난 바와 같이 모든 연결부에서의 응력이 항복응력보다 작은 값으로 안전율이 1 이상이기 때문에 안전성

Table 3. Max. Von-Mises stresses under compressive load

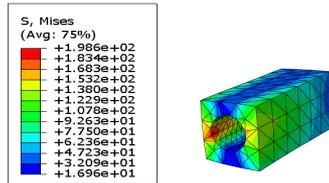
Division	Von-Mises stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Safety factor
L-section plate	65.70	240	3.65
Circular plate	57.99	240	4.14
Square nut	198.6	240	1.21
Horizontal bolt	69.33	900	12.98
Vertical bolt	61.66	900	14.60



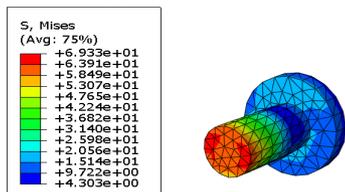
(a) L-section plate



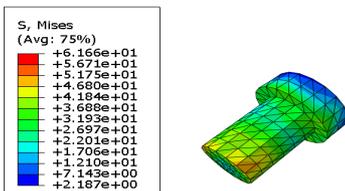
(b) Circular plate



(c) Square nut



(d) Horizontal bolt



(e) Vertical bolt

Fig. 8. Stress distribution of PHC pile connection under compressive load

이 확보되는 것으로 나타났다. Fig. 10에서 인장 하중에 대한 각 연결부의 Von-Mises 응력분포를 나타내었다.

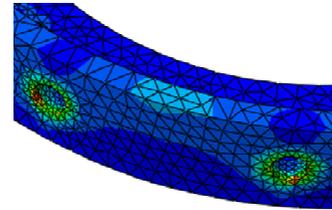
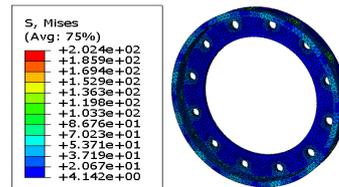
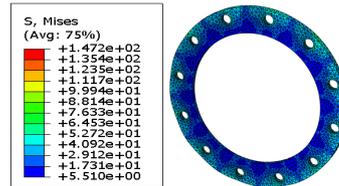


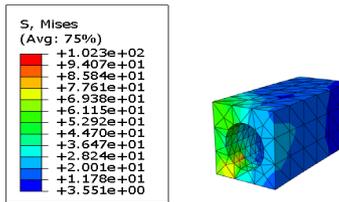
Fig. 9. Maximum stress distribution



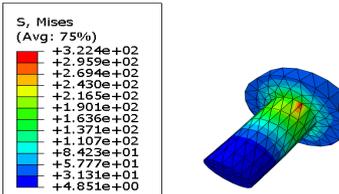
(a) L-section plate



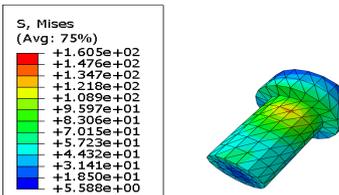
(b) Circular plate



(c) Square nut



(d) Horizontal bolt



(e) Vertical bolt

Fig. 10. Stress distribution of PHC pile connection under tensile load

Table 4. Max. Von-Mises stresses under tensile load

Division	Von-Mises stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Safety factor
L-section plate	202.4	240	1.19
Circular plate	147.2	240	1.63
Square nut	102.3	240	2.35
Horizontal bolt	322.4	900	2.79
Vertical bolt	160.5	900	5.61

Table 5. Max. Von-Mises stresses under bending load

Division	Von-Mises stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Safety factor
L-section plate	175.4	240	1.37
Circular plate	166.2	240	1.44
Square nut	149.0	240	1.61
Horizontal bolt	283.8	900	3.17
Vertical bolt	157.4	900	5.72

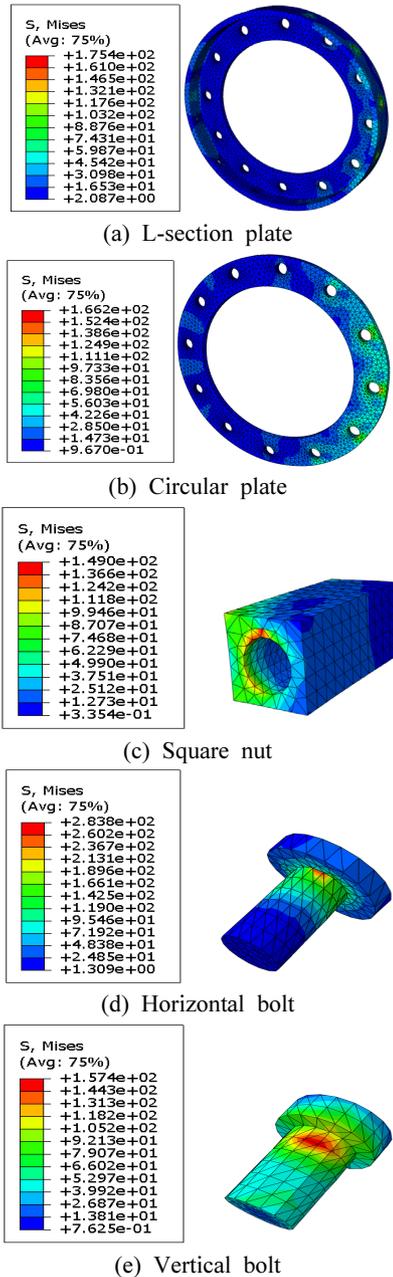


Fig. 11. Stress distribution of PHC pile connection under flexural load

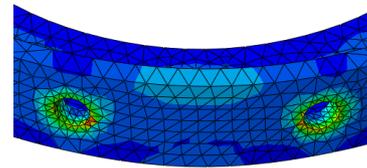


Fig. 12. Maximum stress distribution

4.3 휨 모멘트를 받는 PHC 파일 연결부

휨에 대한 해석의 경우, 압축과 인장이 동시에 발생하는 데 압축부에서는 L형단면판과 원형판 사이에 사각너트가 있어서 응력이 크게 발생하지 않는다. 인장부에서는 수직볼트로 연결된 L형단면판과 수평볼트로 체결된 사각너트 및 주변의 국부적인 휨 변형이 크게 발생하여 수평볼트 체결 부위에 응력이 크게 발생한다.

Fig. 6과 같이 휨 하중이 재하되었을 때 연결부의 Von-Mises 응력분포를 Fig. 11에 나타내었다. 사각너트와 볼트의 경우 응력이 가장 크게 발생하는 인장부의 Von-Mises 응력 분포를 나타내었다. Table 5는 연결부의 안전율을 계산한 표이다.

최대 Von-Mises 응력은 L형단면판에서 175.4MPa, 원형판에서 166.2MPa, 사각너트에서 149MPa, 수평볼트에서 283.8 MPa, 수직볼트에서 157.4MPa이 발생하였다. 최대 응력은 수평볼트에서 발생하지만 고장력 볼트를 사용하여 안전율이 3.17로 안전하다고 볼 수 있다. 볼트를 제외한 연결부의 최대응력은 Fig. 12과 같이 인장영역에서 L형단면판의 수평볼트 체결부에서 발생하였다.

하지만 항복응력인 240MPa보다 작게 해석되어, PHC 파일 단면의 균열 모멘트와 동일한 모멘트를 연결부에 발생시키는 하중을 재하했을 때 강제 연결부의 안전성은 확보되는 것으로 검토되었다.

4.4 전단력을 받는 PHC 파일 연결부

압축, 인장, 휨 해석 모델에서는 연결부가 중앙에 위치했지만 전단 해석 모델의 경우 연결부는 Fig. 7과 같이 최대 전단력이 발생하는 곳에 위치해있다. 즉, 연결부는 하중이 재하되는 부분과 PHC 파일을 지지하는 지점 사이에 위치해 있다. PHC 파일 상부에서는 하중이 아래로 작용하고 하부에서는 지점으로 인해 반력이 위로 작용하여 연결부의 전단변형이 최대가 된다.

PHC 파일에 전단 시간 내에 전단 균열이 발생할 때의 하

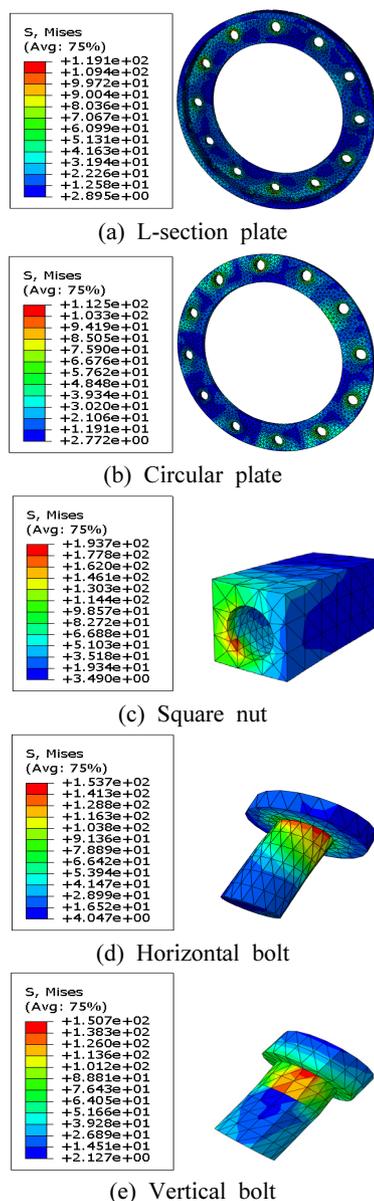


Fig. 13. Stress distribution of PHC pile connection under shear load

Table 6. Max. Von-Mises stresses under shear load

Division	Von-Mises stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Safety factor
L-section plate	119.1	240	2.02
Circular plate	112.5	240	2.13
Square nut	193.7	240	1.24
Horizontal bolt	153.7	900	5.86
Vertical bolt	150.7	900	5.97

중을 가했을 때 연결부의 Von-Mises 응력은 L형단면판에서 119.1MPa, 원형판에서 112.5MPa, 사각너트에서 193.7MPa, 수평볼트에서 153.7MPa, 수직볼트에서 150.7MPa이 발생하였다. Fig. 13과 같이 연결부의 측면부분에 국부적인 전단 변형으로 인하여 수평볼트와 체결된 사각너트에 응력이 크게 발생하였다.

Fig. 13은 전단 하중이 작용할 때의 Von-Mises 응력분포를 나타낸 것이고 사각너트와 수평 및 수직 볼트의 경우 응력이 가장 클 때의 응력분포를 도시하였다. Table 6에서 PHC 파일 연결 장치에 따른 최대 Von-Mises 응력과 항복응력의 비를 안전율로 표기하여 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 강판과 수평 및 수직볼트를 이용해 PHC 파일을 연결하는 연결 장치에 대하여 압축, 인장, 휨 및 전단에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 연결기구의 안전성을 검토한 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) PHC 파일의 연결부에 대한 압축, 인장, 휨과 전단력 재하시 안전율이 1 이상으로 평가되어 본 논문에서 제시한 연결 장치로 PHC 파일을 체결하였을 때 해석적인 면에서 안전성이 확보되는 것으로 나타났다.
- (2) 압축, 인장, 휨 및 전단력에 대한 최대응력 발생 위치는 모두 수평볼트 체결부에서 발생하므로, 사각너트 및 L형 단면판의 두께를 증가시키거나 고강도 강재를 사용하면 모든 영역에서의 안전율을 균일하게 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 향후 PHC 파일의 직경 변화, 수평볼트의 사용 개수 및 고강도 강재의 사용에 따른 매개변수해석 및 실험적 연구가 요구된다.

참고문헌(References)

- [1] 강두원, 권영봉(2009) 원형강관 기둥의 구조적인 거동 및 강도에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제5호, pp.505-514.
Kang, D.W. and Kwon, Y.B. (2009) A Study on the Structural Behavior and the Strength of Circular Hollow Steel (CHS) Section Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.5, pp.505-514 (in Korean).
- [2] 김선희, 최영환, 최성모(2012) HSB600 원형강관 기둥의 거동에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, pp.743-751.
Kim, S.H., Choi, Y.H., and Choi, S.M. (2012) Experimental Study on the Behavior of Circular Steel Tube Columns using HSB600 Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.743-751 (in Korean).
- [3] 백규호, 박용부(2005) 말뚝연결부를 이용한PHC말뚝의 새로운 이음방법, 대한토목학회논문집 C 25(3C), 대한토목학회, 제2005권, 제5호, pp.143-150.
Paik, K.H. and Park, Y.B. (2005) A New Joining Method of PHC Piles using Pile Coupler, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C 25 (3C)*, KSCE, Vol.2005, No.5, pp.143-150 (in Korean).
- [4] 김병철, 송치용, 권형석, 임해식(2006) 볼트를 이용한PHC 말뚝의 비음접식 이음방법, 대한토목학회 학술대회, 대한토목학회, 제2006권, 제10호, pp.4410-4413.
Kim, B.C., Song, C.Y., Kwon, H.S., and Lim, H.S. (2006) A Bolting Method for Connection PHC Piles, *Conference of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.2006, No.10, pp.4410-4413 (in Korean).
- [5] 이용준, 임해식, 장순호, 이호경, 양홍석(2008) 볼트를 이용한 PHC 말뚝의 새로운 이음방법, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집, 한국지반환경공학회, 제2008권, 제9호, pp.227-231.
Lee, Y.J., Lim, H.S., Jang, S.H., Lee, H.K., and Yang, H.S. (2008) A New Joint Method of PHC Piles Using Bolt, *Proceedings of Korean Geo-Environmental Society*, KGES, Vol.2008, No.9, pp.227-231 (in Korean).
- [6] 최원용, 김두겸, 이형교, 송병은, 심낙훈, 박영석(2010) PHC 파일의 수직형 볼트 이음공법에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제22권, 제6호, pp.46-51.
Choi, W.Y., Kim, D.K., Lee, H.G., Song, B.E., Shim, N.H., and Park, Y.S. (2010) An Experimental Study on Vertical Bolt joint Method of PHC Piles, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.6, pp.46-51 (in Korean).
- [7] 윤원섭, 방의석, 주원영, 김신국, 채영수(2015) 수치해석을 이용한 PHC 말뚝 이음장치의 거동 특성 연구, 한국지반신소재학회 학술발표회, 한국지반신소재학회, 제2015권, 제4호, pp.111-114
Yoon, W.S., Bang, E.S., Ju, W.Y., Kim, S.K., and Chae, Y.S. (2015) A Study on the Characteristics of PHC Pile Connected Using Numerical Analysis, *Conference of Korean Geosynthetics Society*, KGSS, Vol.2015, No.4, pp.111-114 (in Korean).
- [8] ABAQUS (2010) *ABAQUS/CAE User's Manual Version 6.10*, H. K&S Inc.
- [9] 한국산업규격(1998) 프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝, KS F 4306
Korea Industrial Standards (1998) *Pretensioned Spun high strength concrete piles*, KS F 4306
- [10] 대림 C&S Hypile 제품성능표(2015)
DaeLim C&S Hypile Product Performance Table (2015)
- [11] 콘크리트구조기준(2012), 국토교통부
Concrete Structure Standard (2012), Ministry of Land, Infrastructure, and Transport

요 약 : PHC 파일을 연결하기 위해 수평 및 수직 볼트를 사용한 연결부의 안전성 평가를 유한요소해석을 통하여 수행하였다. 수치해석 모델은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였으며 모든 연결 장치를 3D Solid 모델로 모델링하였다. 볼트 연결부는 ABAQUS에 제시된 Contact 및 Tie 조건에 고려하여 검토하였다. 유한요소해석을 통해 PHC 파일 연결부의 압축, 인장, 휨 및 전단 해석을 수행하였으며, 각 연결 장치에서 발생하는 Von-Mises 응력을 도출하여 볼트연결부의 안전성을 평가하였다.

핵심용어 : PHC 파일, 연결부, 수평 및 수직볼트, Von-Mises 응력, ABAQUS