

무용접 복합말뚝 연결부 상세 평가

Detailed analysis of Non-Welding Composite Pile Joint

고준영¹⁾, Jun-Young Ko, 신윤섭²⁾, Yun-Sup Shin, 정상섭³⁾, Sang-Seom Jeong, 부교탁⁴⁾, Kyo-Tag Boo

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

²⁾ (주)GS건설 기술본부 지반팀 과장, Geotechnical Engineering Division of GS E&C.

³⁾ 연세대학교 토목공학과 정교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

⁴⁾ 삼표이앤씨(주) 파일사업팀 상무, Geotechnical Engineering Division of Sampyo E&C.

SYNOPSIS : In this study, the joint part of non-welding composite pile is investigated by a three dimensional finite element analysis. Special attention is given to the overall stress distribution under lateral, axial and tensional load conditions. Through comparisons with allowable stress of materials, a simple method is proposed to estimate the ultimate load condition of joint part. The appropriate design method is suggested and highlighted through the numerical analysis.

Keywords : bending moment, steel pile, PHC pile, non welding composite pile

1. 서론

최근 해상공사 및 초고층 빌딩에 대한 수요가 늘어나면서 지반강도가 작은 지역에 심도가 깊은 말뚝을 시공하는 사례가 증가하고 있는 추세이다. 토목 및 건축분야에서 사용하고 있는 강관말뚝은 단위 면적당 하중지지능력이 우수하고, 같은 하중을 지지하는데 필요한 말뚝재료 중량도 가장 경량이며 또한 시공성도 우수하고 이음이나 절단도 용이하기 때문에 지층 변화가 심한 현장에 소요길이까지 시공할 수 있어 현장적용성이 뛰어난 장점이 있다. 그러나 강관말뚝은 말뚝재료가 고가라는 단점이 있으며 국내에서 강재를 전량 외국 수입에 의존하므로 수급 및 가격의 변화가 심할 수밖에 없으므로 강관말뚝 재료비의 증가는 전체공사비의 증가로 이어져 국가적으로도 큰 손실이 되고 있는 실정이다. (고준영 등, 2009)

본 연구에서는 큰 수평력과 휨모멘트에 저항할 수 있는 강관말뚝의 기능을 유지하면서 수평력이 작게 작용하는 심도에서는 PHC말뚝을 사용하여 말뚝의 재료비를 경감시켜 경제적인 시공을 할 수 있는 복합말뚝(Composite Pile)에 대한 것이며, 기존 용접방식이 가지고 있는 문제점을 해결하고 말뚝 이음시공에 대한 작업성을 개선하여 말뚝 공사에 소요되는 공사비와 공기를 단축시키고 시공품질을 향상시킬 수 있는 무용접 이음방식(Non Welding)에 대한 연결부 안정성 평가를 하고자 한다. 이러한 무용접 복합말뚝(Non-Welding Composite Pile)의 연결부 안정성 평가는 3차원 유한요소해석 기법(FEM)을 통하여 검증하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 무용접 복합말뚝 연결부 구성

무용접 복합말뚝 연결부는 크게 접속 플레이트, 보강밴드, 조인트, 볼트로 구성되며 조인트에는 8개의

보강 리브로 구성된 연결부가 장착되며, 접속 플레이트에는 12개의 볼트가 결합되는 형태로 이루어진다. 기존 용접방식이 가지고 있는 문제점을 해결하고 말뚝 이음시공에 대한 작업성을 개선하여 말뚝 공사에 소요되는 공사비와 공기를 단축시키고 시공품질을 향상시킬 수 있는 무용접 이음방식(Non Welding)은 용접방식과 비교할 때 여러 가지 장점을 보유하고 있다. 하지만 이러한 무용접 이음장치를 강관말뚝과 PHC말뚝을 연결하여 사용하는 복합말뚝(Composite Pile)에 적용하기 위해서는 연결부에 작용하는 연직력, 인장력, 수평력에 대한 안정성이 확보되어야 한다.



그림 1. 무용접 복합말뚝 연결부 (무용접 이음방식)

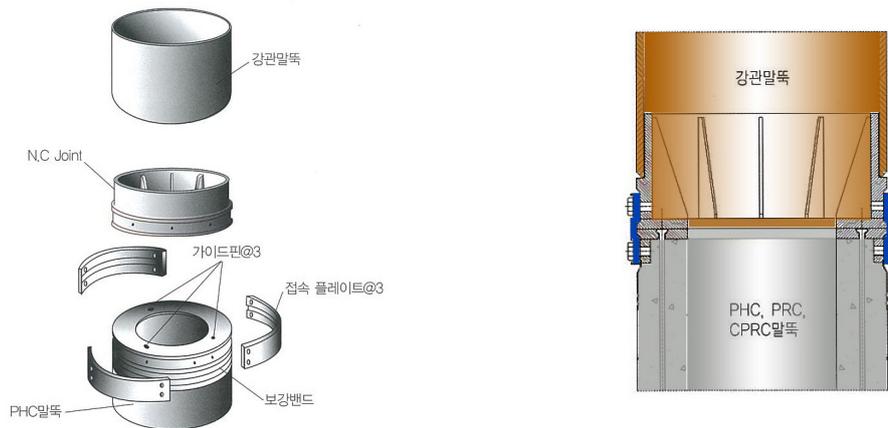


그림 2. 무용접 복합말뚝 개요도

2.2 해석 조건

본 연구에서는 무용접 복합말뚝의 연결부 안정성을 확인하기 위하여, 3차원 유한요소해석 기법을 이용한 ABAQUS version 6.5 (2004) 프로그램을 통하여 연결부를 상세 모델링하였다.

무용접 복합말뚝의 안정성을 평가하기 위하여 수치해석 시 말뚝기초에 적용한 하중은 수직력, 수평력, 인장력을 적용하여 해석을 실시하였다. 하중은 모두 강관말뚝 두부면에 등분포 하중으로 가정하였고 종류별 하중의 크기를 증가시키면서 연결부가 최대로 견딜 수 있는 한계 하중값을 확인하였다.

해석 모델은 연결부를 중심으로 상부인 강관말뚝($\phi 500$, 12t), 하부인 PHC말뚝($\phi 500$, A-Type)을 각각 50cm로 모델링하여 상세해석을 수행하였다. 말뚝의 연결부 제원은 표 1과 같다.

표 2는 프로그램을 이용하여 실제 연결부를 구성하는 요소들을 모델링을 하였다. 말뚝의 경계조건은 PHC말뚝 하부에 x, y, z 방향에 대해 변위를 발생시키지 않도록 구속하였다.

표 1. 말뚝 연결부 제원 (연세대학교, 2009)

구분	재질	규격 (mm)	탄성계수 (MPa)	항복응력 (MPa)
강관 연결리브	SC450	-	210,000	240
PHC보강관	SC450	-	210,000	240
측면 감합부 (3개)	SS400	14t	210,000	240
강관말뚝	SS400	500×12t	210,000	240
연결 볼트 (12개)	SCR420B	M14×25	210,000	900

표 2. 무용접 복합말뚝 구성요소 모델링

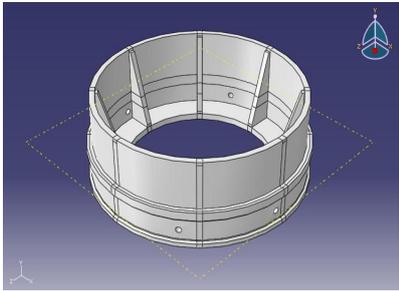
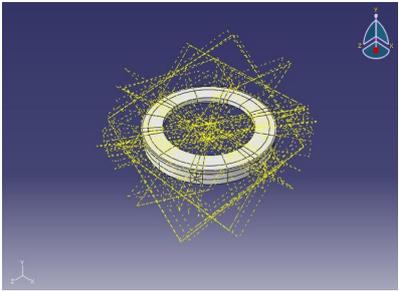
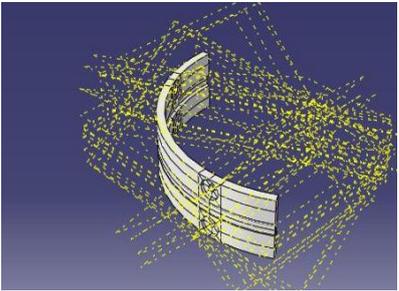
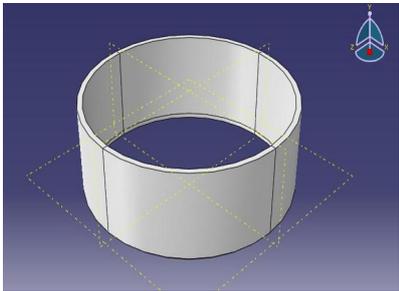
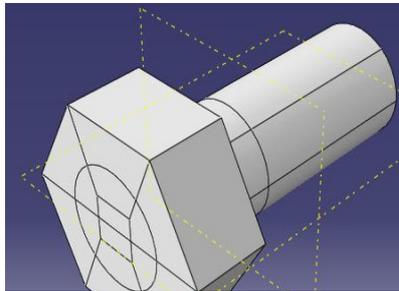
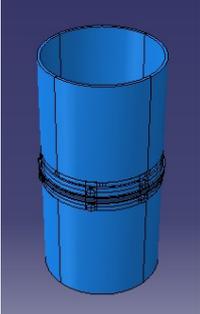
		
강관말뚝 연결리브	PHC 보강관	측면 감합부
		
강관말뚝	연결 볼트(12개)	복합말뚝 조립

표 3. 하중조건

구분	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계
압축력 (kN)	500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000
수평력 (kN)	60	80	100	120	140	160	180	200
인장력 (kN)	100	150	200	250	300	350	400	500

3. 수치해석결과

3.1 압축력 재하 결과

압축력의 경우 500kN~4,000kN까지 하중을 증가시켜 재하 하였으며, 해석 결과 말뚝 각각 구성요소에 발생하는 응력(Von Mises)을 산정하여 허용응력과 비교하였다.

표 4. 압축력 재하 결과

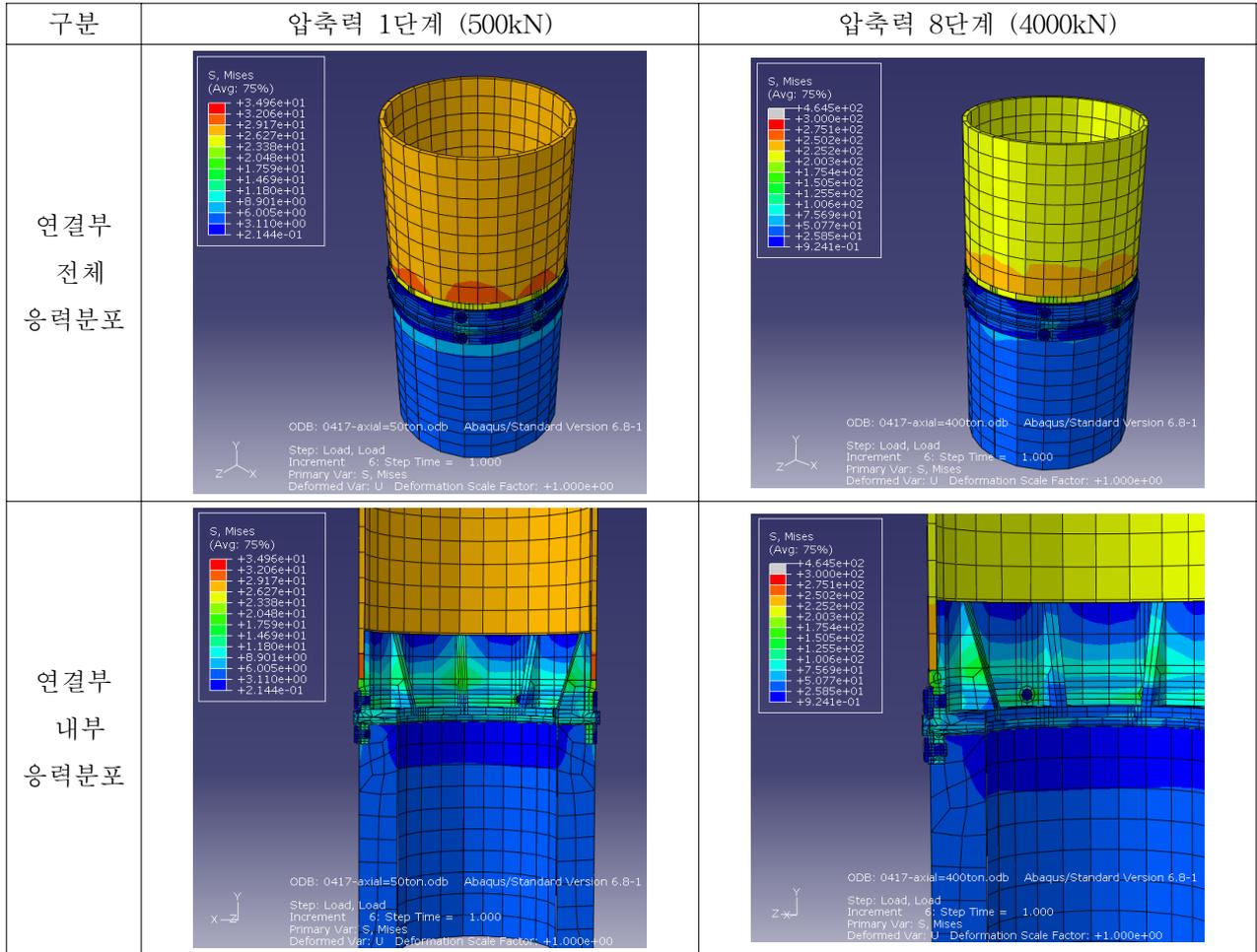


표 5. 압축력 작용 시 결과 분석

구성요소	압축력 재하 결과 최대 응력분포(Von Mises, MPa)						
	1,000kN	1,500kN	2,000kN	2,500kN	3,000kN	3,500kN	4,000kN
강관연결리브	68.1	102.8	137.6	172.4	207.3	242.3	300.8
PHC보강관	52.4	76.7	100.3	124	147.5	170.8	193.7
측면감합부	25.4	37.4	52.4	68.2	85.4	103	121.1
강관말뚝	62.1	93	123.8	154.5	185.2	215.8	246.3
연결 볼트	18.7	26.98	35.5	43.3	50.9	58.2	66

압축응력 산정결과 강관연결 보강리브, 강관말뚝과 PHC 상부 보강관에서 가장 큰 응력이 발생하였으며, 말뚝 연결부에 전달되는 최대 압축응력이 2,100kN이상일 경우 강관연결 보강리브 부분에서 허용응력을 초과하는 것으로 나타났다.

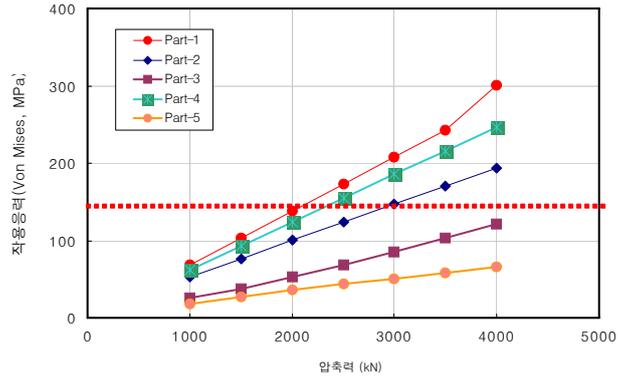


그림 3. 압축력 재하 결과 연결부 구성요소별 작용 응력

3.2 수평력 재하 결과

말뚝에 재하되는 수평력은 일반적으로 상부 압축력과 수평력의 하중 조합으로 작용하게 되므로 작용 압축력이 500kN 경우 수평력에 대해 해석을 하였다. 수평력의 경우 60kN~200kN까지 증가시켜 재하 하였으며, 해석 결과 말뚝 각각 구성 요소에 발생하는 응력(Von Mises)을 산정하여 각각 구성요소의 허용응력과 비교하였다.

표 6. 수평력 재하 결과 (압축력 500kN 작용)

구분	수평력 1단계 (60kN)	수평력 8단계 (200kN)
연결부 전체 응력분포	<p>ODB: 0630-axial=50ton+lateral=6ton.odb Abaqus/Standard Version 6.8-1 Step: Load, Load Increment: 6; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00</p>	<p>ODB: 0630-axial=50ton+lateral=20ton.odb Abaqus/Standard Version 6.8-1 Step: Load, Load Increment: 6; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00</p>
연결부 내부 응력분포	<p>ODB: 0630-axial=50ton+lateral=6ton.odb Abaqus/Standard Version 6.8-1 Step: Load, Load Increment: 6; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00</p>	<p>ODB: 0630-axial=50ton+lateral=20ton.odb Abaqus/Standard Version 6.8-1 Step: Load, Load Increment: 6; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00</p>

표 7. 수평력 작용 시 결과 분석

구성요소	수평력 재하 결과 최대 응력분포(Von Mises, MPa)						
	60kN	80kN	100kN	120kN	140kN	160kN	180kN
강관 연결리브	59	77	103	141	186	247	311
PHC 보강관	47	53	60	68	78	103	136
측면 감합부	74	86	121	170	228	293	345
강관말뚝	43	49	56	63	70	78	85
연결 볼트	45	63	87	113	144	185	230

수평응력 산정결과 강관연결 측면 감합부(Part-3), 보강리브(Part-1)와 연결볼트(Part-5)에서 가장 큰 응력이 발생하였으며, 말뚝 연결부에 전달되는 최대 수평응력이 109kN이상일 경우 측면 감합부에서 허용응력을 초과하는 것으로 나타났다.

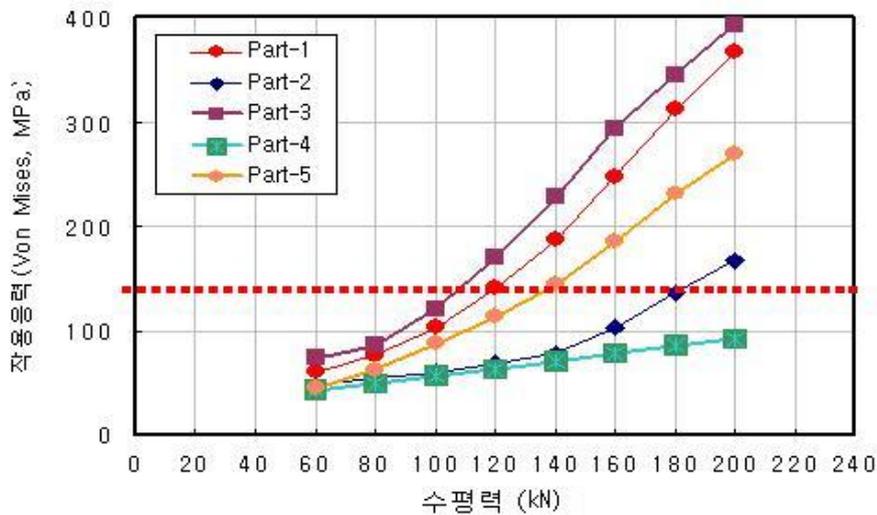


그림 4. 수평력 재하 결과 연결부 구성요소별 작용 응력

3.3 인장력 재하 결과

인장력의 경우 100kN~500kN까지 하중을 증가시켜 재하 하였으며, 해석 결과 말뚝 각각 구성요소에 발생하는 응력(Von Mises)을 산정하여 허용응력과 비교하였다.

표 8. 인장력 재하 결과

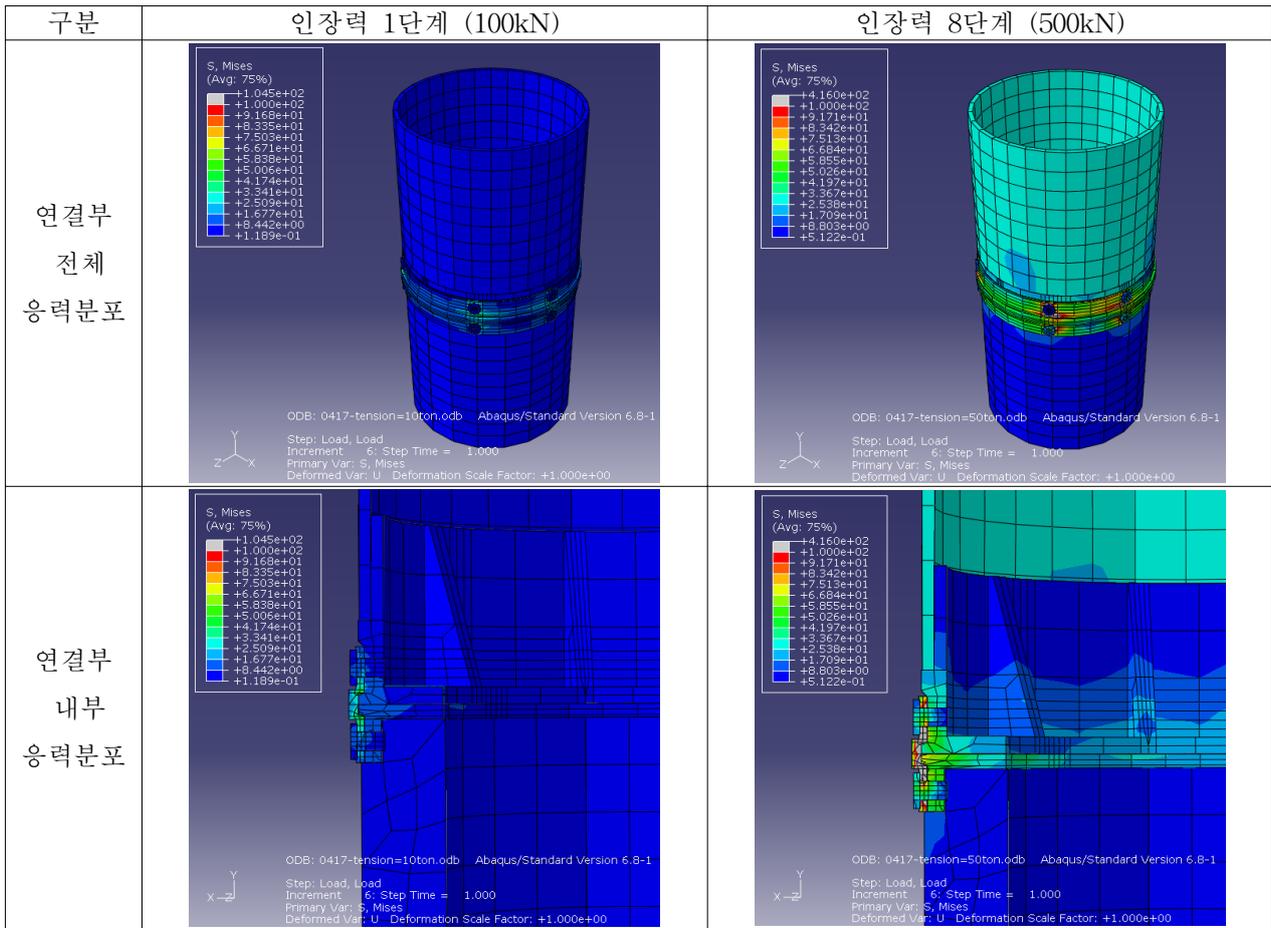


표 9. 인장력 작용 시 결과 분석

구성요소	인장력 재하 결과 최대 응력분포(Von Mises, MPa)							
	100kN	150kN	200kN	250kN	300kN	350kN	400kN	500kN
강관 연결리브	42.6	55.2	66.5	78	89.5	100.9	112.8	137.2
PHC 보강관 측면 감합부	25.5	37.4	49.1	60.5	71.8	83	94.3	117.1
강관말뚝	6.2	9.3	12.4	15.5	18.5	21.5	24.6	30.7
연결 볼트	31.8	42.9	53	62.8	72.3	82.6	92.4	109.9

인장력 산정결과 강관연결 측면 감합부(Part-3)에서 가장 큰 응력이 발생하였으며, 말뚝 연결부에 전달되는 최대 인장응력이 220kN이상일 경우 강관연결 보강리브 부분에서 허용응력을 초과하는 것으로 나타났다.

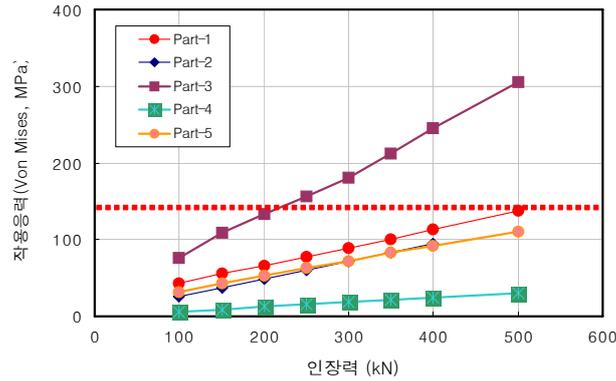


그림 5. 인장력 재하 결과 연결부 구성요소별 작용 응력

4. 결론

본 연구에서는 무용접 복합말뚝의 연결부 안정성을 확인해보기 위하여 3차원 수치해석을 통한 하중종류에 따른 극한값을 해석 및 검증하였다. 이를 통해 실제 무용접 복합말뚝 설계에 적용할 수 있는 결과를 얻었다.

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 압축력 작용 시 강관연결 보강리브, 강관말뚝과 PHC 상부 보강판에서 가장 큰 응력이 발생하였으며, 말뚝 연결부에 전달되는 최대 압축응력이 2,100kN이상일 경우 강관연결 보강리브 부분에서 허용응력을 초과하는 것으로 나타났다.
- (2) 수평력 작용 시(압축력 500kN 작용) 강관연결 측면 감합부, 보강리브와 연결볼트에서 가장 큰 응력이 발생하였으며, 말뚝 연결부에 전달되는 최대 수평응력이 109kN이상일 경우 측면 감합부에서 허용응력을 초과하는 것으로 나타났다.
- (3) 인장력 작용 시 강관연결 측면 감합부에서 가장 큰 응력이 발생하였으며, 말뚝 연결부에 전달되는 최대 인장응력이 220kN이상일 경우 강관연결 보강리브 부분에서 허용응력을 초과하는 것으로 나타났다.
- (4) 각 하중종류에 따라 큰 응력이 발생하는 부분을 알 수 있었고, 발생하는 응력값과 재료별 허용응력값을 비교하여 무용접 복합말뚝이 견딜 수 있는 극한 하중값을 확인할 수 있었다. 그 결과 실제 적용성을 확보할 수 있었다.

참고문헌

1. 고준영, 신운섭, 정상섭, 부교탁(2009), “무용접 복합말뚝 수평거동특성 및 연결부 안정성 평가”, 한국지반공학회 2009년도 봄학술발표회 논문집.
2. ABAQUS, Theory manual, Ver.6.5 (2004), Hibbit, Karlsson & Sorensen, Pawtucket R.I.
3. 연세대학교(2009), 재하시험을 통한 무용접 복합말뚝 거동특성 연구 보고서, 연세대학교, pp.99.