



링형 합성 전단연결재를 적용한 철근 콘크리트 충전 PHC말뚝의 유한요소해석

김정희^{1)*} · 이두성²⁾ · 박영식¹⁾ · 민창식³⁾

¹⁾아이에스동서(주) 기술연구소 ²⁾(주)홍지 기술연구소 ³⁾동국대학교 건설환경공학과

Finite Element Analysis on Reinforced Concrete Filled PHC Pile with Ring Type Composite Shear Connectors

Jeong-Hoi Kim,^{1)*} Doo-Sung Lee,²⁾ Young-Shik Park,¹⁾ and Chang-Shik Min³⁾

¹⁾Technical Research Institute, IS Dongseo, Seoul 06071, Rep. of Korea

²⁾Technical Research Institute, Hong-G, Sungnam 13595, Rep. of Korea

³⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University, Seoul 10326, Rep. of Korea

ABSTRACT The purpose of this study was to contribute to the field application cost effectively and reasonably by developing the functional piles that make up for the defects of PHC piles. CFP (Concrete Filled Pretensioned Spun High Strength Concrete Pile with Ring type Composite shear connectors) piles developed in this study increases the compressive stress through enlarged cross section by rearranging composite shear connectors and filling the hollow part of PHC pile with concrete. And it improved shear and bending performance placing the rebar (H13-8ea) within the PHC pile and the hollow part of PHC pile of rebar (H19-8ea). In addition, the composite shear connectors were placed for the composite behavior between PHC pile and filled concrete. Placing Rebars (H13-8ea) of PHC pile into composite shear connector holes are sleeve-type mechanical coupling method that filling the concrete to the gap of the two members. Nonlinear finite element analyzes were performed to verify the performance of shear and bending moments and it deduced the spacing of the composite shear connectors. Through a various interpretation of CFP piles, it's proved that the CFP pile can increase the shear and bending stiffness of the PHC pile effectively. Therefore, this can be utilized usefully on the construction sites.

Keywords : CFP pile, composite shear connector, PHC pile, filled concrete, finite element analysis

1. 서 론

최근 건설산업은 인구의 도시 집중화에 따른 지가 상승 및 한정된 부지의 효율적 활용 등에 초점이 맞춰져 구조물의 초고층화 및 무주구조를 통한 대형화를 이루고 있다. 이에 따라 구조 부재의 성능향상 및 신재료 개발 등의 연구가 활발히 진행되고 있으며, VE(Value Engineering) 설계를 통한 경제성 확보 등의 최적 설계가 이루어지고 있다. 이러한 추세는 하부 기초인 말뚝에서도 나타나 성능 및 경제성 개선에 관한 요구가 지속되고 있어 원심성형의 특수 제작방법을 적용하여 78.5 MPa의 높은 압축강도를 확보하고 이형 강연선의 사용을 통한 긴장력(Prestress) 도입으로 휨 모멘트에 대한 저항성을 증대시키는 PHC말뚝(Pretensioned Spun High Strength Concrete Pile)을 1992년 국내에 도입하여 건축, 토

목, 항만 구조물 등의 많은 현장에 적용되고 있으며, 최근에는 프리캐스트 콘크리트 말뚝의 약 90% 이상이 PHC말뚝으로 사용되고 있어 국내에서 현장타설 말뚝 다음으로 그 사용량이 많은 것으로 알려져 있다.^{1,2)}

그러나 PC 말뚝 대안으로 도입된 PHC말뚝은 PC 말뚝 대비 높은 성능 향상에도 불구하고 강관 말뚝에 비해 전단 및 휨 성능이 취약하다는 재료적 특성의 한계를 갖고 있어, 이를 극복하기 위한 여러 연구들이 진행 중에 있다.

2. 연구의 필요성

말뚝 매입 및 굴착 작업의 국내 시방기준에는 측정기준 및 시공기준이 제시되어있지 않아 PHC말뚝 시공 중 말뚝의 연직성을 확보하지 못할 경우 말뚝에 휨모멘트가 발생하며, 발생된 휨모멘트가 허용과피한도를 초과하게 되면 말뚝의 파괴 또는 하중 지지력 저하 등의 문제점이 발생된다.³⁾ 이러한 시공적 측면 이외에도 지진하중과 상부구조물의 수평방향하중 등의 영향으로 말뚝 상부에 전단력과 휨모멘트가 가장 크게 발생되는데, 이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 1

*Corresponding author E-mail : special9373@isdongseo.co.kr

Received December 6, 2016, Revised April 10, 2017,

Accepted April 25, 2017

©2017 by Korea Concrete Institute

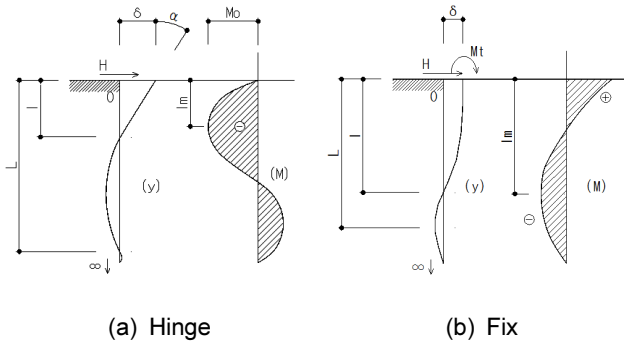


Fig. 1 Strain curves and bending moment diagram of underground pile

과 같은 외력에 의한 말뚝의 부재력 분포를 고려하여 말뚝 상단에 인장부재인 강관 말뚝을 배치하고 주하중이 축하중인 중·하단 말뚝에 압축부재인 콘크리트를 사용하는 PHC 말뚝을 배치하여 합성 구조를 이루는 복합말뚝이 개발되어 활발히 적용되고 있다.

휨 및 전단에 대한 강성이 큰 강관말뚝은 원자재인 철강 재를 전량 수입에 의존하고 있고, 계속되는 강재가격의 상승으로 인하여 기초 공사비를 크게 증가시킨다는 문제점이 있다.⁴⁾ 따라서, 최근에 활발히 적용되고 있는 복합말뚝이 강관말뚝의 문제점을 일정부분 해소할 수 있으나, 강제 사용에 따른 경제성 문제에서 자유로울 수는 없는 실정이다.

말뚝 시공시 말뚝과 확대기초의 결합은 강결합을 원칙으로 하고 있으며, 결합 방법에 따라 Type A와 Type B로 나뉘게 된다. 말뚝을 확대기초 내 일정 깊이 근입하는 Type A와 말뚝의 최소 깊이와 말뚝본체 내 보강철근 그리고 속채움 보강철근을 확대기초 내 배치시켜 강합성시키는 Type B 방법이 있다. Type A, Type B 모두 말뚝의 상단부 커팅에 의한 말뚝 손실(loss)이 발생하게 되며, 상단부가 강재인 강관말뚝과 복합말뚝이 콘크리트 말뚝에 비해 경제성 확보가 어려운 이유 중 하나이다. 따라서 강재의 사용을 배제할 수 있으면서 우수한 내력을 확보할 수 있는 기능성 말뚝의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

기존 연구에서 PHC말뚝에 나선 철근량을 증가시켜 전단력을 향상시킨 실험결과와 PHC말뚝 중공부에 콘크리트만을 충전한 경우 극한강도는 증가되었으나 취성파괴가 발생된다는 결과를 토대로 속채움 콘크리트와 나선 철근량의 증가를 통해 개량된 말뚝에서 변형 거동의 향상과 극한강도의 증가라는 결과를 얻을 수 있었다.⁵⁻⁷⁾ 그러나 나선 철근량의 증가에 따라 철근 간격이 줄어들어 따른 콘크리트 타설 작업의 효율 저하가 발생하여 나선 철근량 증가에 한계가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 개선된 PHC말뚝을 개발하고자 링형 합성 전단연결재와 보강철근을 배치하고 콘크리트를 충전시켜 내력이 향상된 기능성 말뚝인 콘크리트 충전 PHC말뚝(Concrete Filled Pretensioned Spun High Strength Concrete Pile with Ring type Composite shear connectors, 이하 CFP말뚝)에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 다양한 매개변수를 갖는 CFP말뚝에 대한 비선형해석을 통해서 주요 변수에 대한 CFP말뚝 성능의 변화를 조사하여 합리적인 CFP말뚝을 설계 자료로 활용하고자 한다.

3. CFP말뚝의 개념 및 링형 합성 전단연결재의 설계

3.1 CFP말뚝의 개념

CFP말뚝은 Fig. 2와 같이 PHC말뚝에 링형 합성 전단연결재를 배치하여 PHC말뚝과 속채움 콘크리트의 합성거동을 통한 전단보강, 말뚝 보강철근과 중공단면에 내부 보강철근을 배치하여 휨 보강 효과를 갖도록 구성하였으며, 수평방향 작용하중에 따라 발생하는 전단력과 휨모멘트에 적절한 대응 단면을 갖기 위해 (a), (b), (c) 3가지 단면으로 분류하여 최적 설계가 가능하도록 하였다.

3.2 링형 합성 전단연결재 형상 설계

말뚝에 작용하는 수평하중은 하중이 작용하는 방향이 일정하지 않는 가변성을 갖는 하중으로 하중이 작용하기 전에는 말뚝 단면에 강축과 약축이 존재하지 않기 때문에 말뚝은 등방성(isotropic)을 갖아야 한다. 따라서 링형 합성 전단연결재 형상은 말뚝과 같은 단면인 원형단면을 형상화하여 작용 하중의 방향에 상관없이 동일한 내력을 발휘 할 수 있도록

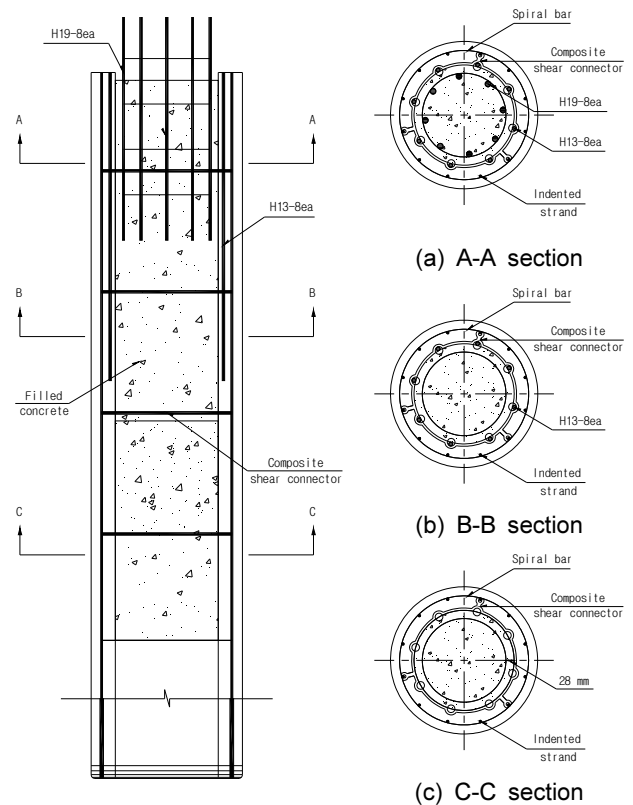


Fig. 2 CFP pile concept

록 고려하였으며, PHC말뚝 내 매입 보강철근을 정착시킬 수 있는 정착홀이 구성되어 매입 보강철근과 링형 합성 전단연결재 그리고 콘크리트로 결합되는 기계적 결합이 되도록 하였다.

링형 합성 전단연결재의 형상 결정에는 최대 수평전단 응력이 속채움 콘크리트 주면에 작용한다는 가정으로 검토를 수행하였다. 식 (1)~(12)는 CFP말뚝의 전단강도를 구하기 위한 유효 프리스트레스 산출에 적용되었다.

프리스트레스 도입 직후의 이형 강연선의 인장응력은 초기인장응력(f_{pi}), 릴랙세이션(k)과 콘크리트 합성단면을 이용한 식 (1)과 같다.

$$f_{pt} = \frac{(1 - \frac{k}{2})f_{pi}}{1 + n \frac{A_p}{A_c}} \quad (1)$$

프리스트레스 도입 직후의 프리스트레스(f_{cpt})는 식 (2)와 같으며, 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 이형 강연선의 인장응력 감소량(Δf_{pcs})은 프리스트레스 도입 직후의 프리스트레스(f_{cpt}), 이형 강연선과 콘크리트의 탄성 계수비(n), 콘크리트 크리프 계수(ϕ), 콘크리트의 건조수축(ϵ_s)과 이형 강연선의 탄성계수(E_p)로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f_{cpt} = \frac{f_{pt} A_p}{A_c} \quad (2)$$

$$\Delta f_{pcs} = \frac{n\phi f_{cpt} + E_p \epsilon_s}{1 + n \frac{f_{cpt}}{f_{pt}} (1 + \frac{\phi}{2})} \quad (3)$$

이형 강연선의 릴랙세이션에 의한 인장응력 감소량(Δf_{pr})은 식 (4)와 같이 프리스트레스 도입 직후의 이형 강연선의 인장응력, 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 인장응력 감소량과 이형 강연선의 순릴랙세이션(r_0)으로 산출된다.

$$\Delta f_r = r_0 (f_{pt} - 2\Delta f_{pcs}) \quad (4)$$

이형 강연선의 유효 인장응력(f_{ce})은 프리스트레스 도입 직후의 이형 강연선의 인장응력에 콘크리트의 인장응력 감소량과 이형 강연선의 릴랙세이션에 의한 인장응력 감소량의 차로 식 (5)와 같으며, 이 단면을 환산하여 유효 프리스트레스(f_{ce})를 구하면 식 (6)과 같다.

$$f_{pe} = f_{pt} - \Delta f_r - \Delta f_{pcs} \quad (5)$$

$$f_{ce} = f_{pe} \frac{A_p}{A_c} \quad (6)$$

전단강도(V_n)는 환산단면 1차 모멘트(Q), 2차 모멘트(I_c),

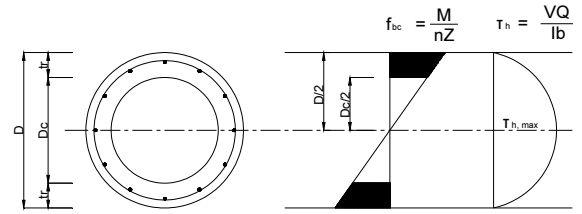


Fig. 3 Shear flow concept

최대 전단응력(τ), 말뚝의 두께(t)로 산출되며 식 (7)과 같다.⁸⁾

$$V_n = \frac{2tI_c}{Q} \tau \quad (7)$$

링형 합성 전단연결재는 Fig. 3과 같이 최대 수평전단 응력이 속채움 콘크리트 주면에 작용한다고 가정하고 아래와 같이 배치간격 및 두께를 검토하였다.⁹⁾

식 (1)~(6)에 의해 유효 프리스트레스(f_{ce})는 5.912 MPa이고 수직 전단강도(V_u)는 식 (8), (9)를 이용하면 270.30 kN, 최대 수평전단응력($\tau_{h, max}$)은 1.32 MPa이며, 최대수평전단응력이 속채움 콘크리트의 주면에 작용한다고 가정하여 식 (9)에 의해 1422.5 N/mm로 산출된다.

$$\tau_{h, max} = \frac{4 V_n}{3 A_{CFP}} \quad (8)$$

$$F_h = \pi d \tau_{h, max} \quad (9)$$

링형 합성 전단연결재 설치 간격 400 mm, 450 mm, 500 mm에 따른 전단류는 식 (10)에 의해 각각 565.14 kN, 635.78 kN, 706.42 kN이며, 링형 합성 전단연결재 최소 두께는 식 (11)에 의해 배치 간격에 따라 6.61 mm, 7.44 mm, 8.27 mm로 산출된다.

$$V_f = s F_h \quad (10)$$

$$t_{csc} \geq \frac{V_f}{f_y \Pi Dc} \quad (11)$$

4. 유한요소해석 방법 및 모델링

본 연구에서는 CFP말뚝의 극한거동을 파악하기 위해 범용유한요소 해석프로그램인 MIDAS FEA V3.2을 사용하여 3차원 Solid 해석모델을 구성하고, 실물모형의 실험조건과 동일한 경계조건, 하중조건을 고려한 비선형 해석을 수행하였다. 수치해석으로 콘크리트 부재의 비선형 거동을 조사하기 위한 콘크리트 소성모델로 PHC말뚝과 속채움 콘크리트의 합성 거동 양상을 파악하기 위해 Fig. 4와 같이 Total Strain Crack 모델을 적용하였다. Total Strain Crack은 균열 축에 따라 주변형률의 변화와 함께 균열방향이 계속 회전한다고 가

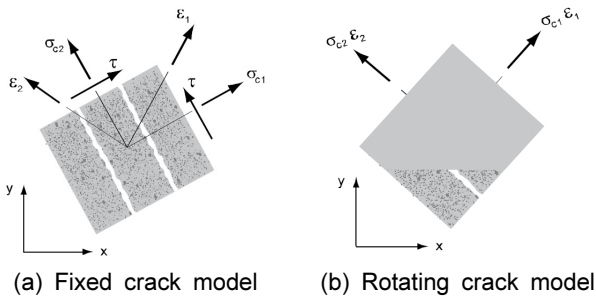


Fig. 4 Total strain crack model

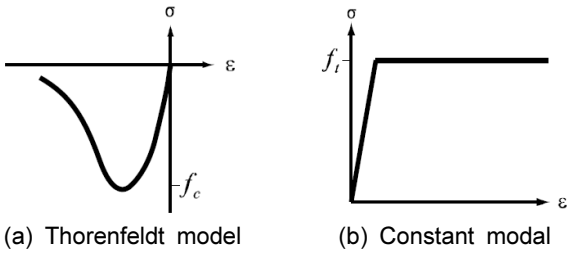


Fig. 5 The nonlinear material model of concrete

정하는 Rotating crack model과 균열 축이 한번 결정되면 변화하지 않는 것으로 가정하는 fixed crack model이 있는데 그 중 지점 및 하중재하 축의 불변성을 고려하여 fixed crack model을 적용하였다.

4.1 Compression Model

압축 응력하의 콘크리트는 등방성 응력이 증가하고 이에 따라 강도(Strength)와 연성(Ductility)이 증가하게 된다. 이러한 등방성 응력의 영향을 반영하기 위해 압축 응력-변형률의 관계는 이러한 함수인자들인 Peak Stress (f_c)와 Peak Strain (ϵ_p)들은 파괴를 일으키는 파괴함수로부터 결정된다. 압축부의 기본함수는 f_p 와 a_p 로 표현되며, 본 해석에서는 기 정의된 곡선 중 Thorenfeldt 경화곡선을 적용하였다.

4.2 Tension Model

Total Strain Crack 모델의 인장거동 모델인 Elastic, Ideal, Brittle, Linear, Exponential, Hordijk, Multi-linear 는 파괴에너지(Fracture energy)에 근거한 연화함수로 구현된 모델과 파괴에너지와 직접적으로 상관이 없는 인장거동을 하는 모델로 구분할 수 있는데, 본 연구에서는 인장응력이 인장강도를 초과할 때 인장응력이 그대로 유지되는 Fig. 5(b)의 Constant model을 적용하였다.

4.3 유한요소해석 모델링

해석에 적용된 PHC말뚝은 D500 A-type으로 각 부재별 모형의 제원 및 형상은 Tables 1, 2, Fig. 6과 같으며, 해석모형을 4절점 3D Solid 요소를 이용하여 구성하였으며, 이형 강연

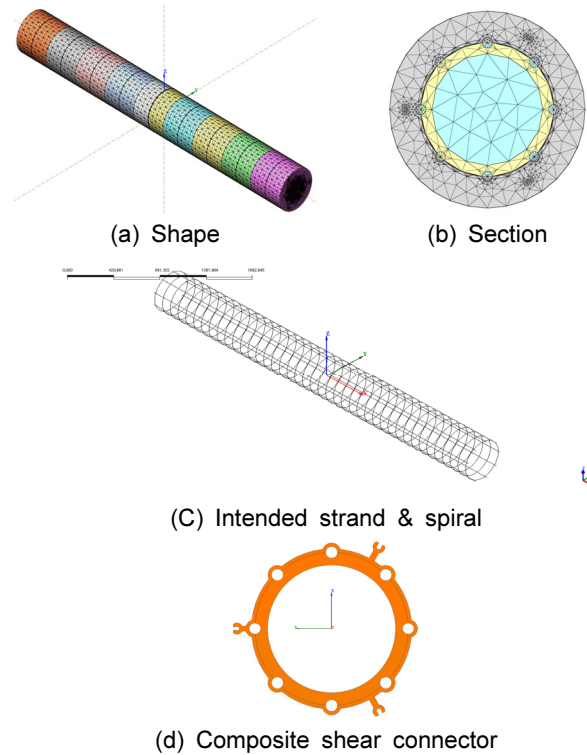


Fig. 6 F.E. model of CFP Pile

Table 1 Concrete material property

	Compression Strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Tensile strength (MPa)
PHC pile	80	37,297	5.83
Filled concrete	24	23,236	2.77

Table 2 Steel material property

	Tension Strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Diameter (mm)	Thickness (mm)
PHC rebar	400	200,000	13	-
Filled section rebar	400		19	-
Composite shear connector	235		-	8
Indented strand	1,275		9.2	-
Spiral	400		4.0	-

선, 나선 철근, 보강철근은 Fig. 6과 같이 Embedded Reinforcement 요소를 이용하여 모델링하였다.

링형 합성 전단연결재는 PHC말뚝과 속채움 콘크리트의 합성 효과를 극대화하기 위해 유한요소해석을 통해 링형 합성 전단연결재의 최적 배치 간격을 도출하고자 하였으며, 변수로 Table 3과 같이 400 mm, 450 mm, 500 mm의 배치간격을 적용하여 CFP말뚝의 전단해석을 수행하고 링형 합성

Table 3 Variable of shear analysis model

Model	Composite shear connector spacing	Analysis type	Rebar
SN400	400	Shear	None
SN450	450		
SN500	500		

전단연결재의 응력 분포를 비교·분석하여 최종 배치 간격을 결정하였다.

본 수치해석에서는 CFP말뚝에 적용된 링형 합성 전단연결재의 두께는 제작성과 경제성을 고려하여 8 mm로 적용하였다.

4.4 하중조건 및 재하방법

링형 합성 전단연결재 배치간격 결정 후 Table 4와 같이 CFP말뚝의 전단 및 휨 해석을 수행하였다.

실질적인 해석조건을 고려하기 위하여 시공단계별 해석을 수행하였으며, Table 5와 같이 Step-1에서는 속채움 콘크리트가 모델에서 제외된 상태에서 이형 강연선에 프리스트레스가 도입되도록 하여 CFP말뚝의 자중과 이형 강연선에 도입된 프리스트레스력이 적용되었다.

Step-2 해석은 Step-1에 속채움 콘크리트를 추가하여 모델링 후 실험시험과 동일한 조건으로 Fig. 7과 같이 중앙부에서 양방향으로 0.5 m 떨어진 위치에 집중하중을 재하하였다.

Table 4 Variable of shear and bending analysis model

Model	Composite shear connector spacing	Analysis type	Rebar
BN	450	Bending	None
BR1			H13-8ea
BR2			H13-8ea + H19-8ea
SN		Shear	None
SR1			H13-8ea
SR2			H13-8ea + H19-8ea

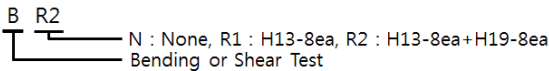


Table 5 CFP pile section of each construction stage

Stage	Step 1 (PS)	Step 2 (loading)
Cross section		

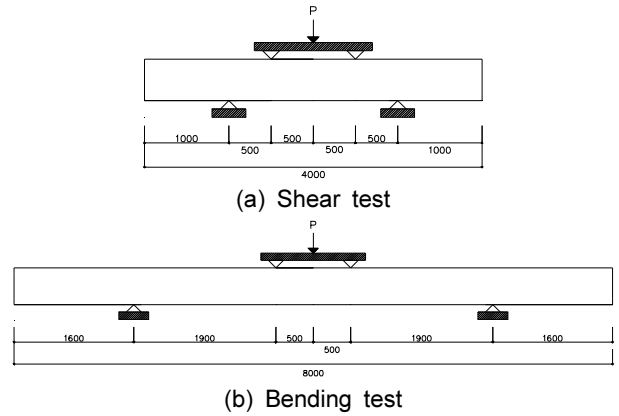


Fig. 7 Third-point loading method⁸⁾ (unit: mm)

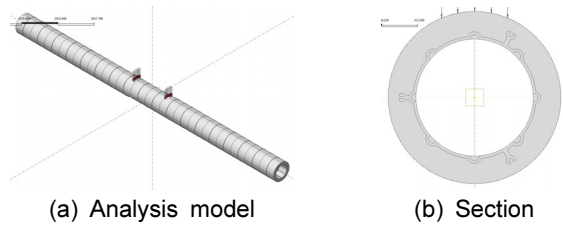


Fig. 8 Validation model of PHC pile (D500)

Table 6 Results of validation model

	Experimental results ①	F.E. results ②	KS F 4306 ③	Remarks	
				①/②	②/③
Shear strength (kN)	286.1	304.9	228.6	0.94	1.33
Cracking moment (kN·m)	152.3	148.7	103.0	1.02	1.44
Failure moment (kN·m)	210.3	201.0	155.0	1.05	1.30

4.5 유한요소해석 모델 검증

PHC pile (D500)의 전단과 휨 실험 결과와 KS 규정 및 Fig. 8의 유한요소 해석을 수행하여 Table 6과 같이 결과를 비교를 통한 해석모델 검증을 수행하였다.

Table 6과 같이 실험값 및 유한요소 해석 결과값 모두 KS 기준 대비 30~48% 높게 나타나며, 실험 결과 대비 유한요소 해석값은 전단강도 94%, 균열 휨 모멘트 102%, 파괴 휨 모멘트 105% 수준으로 나타났다.

5. 유한요소해석 결과

단면의 극한강도와 최종파괴를 조사하기 위해 기하학적 및 재료 비선형 해석이 수행되었다. 해석된 결과로 링형 합성 전단연결재 배치간격에 따른 응력분포를 알아보기 위해 SN 시리즈 모델에는 내부 보강철근은 배치하지 않고 해석

을 수행하였다. 배치간격 결정 후 내부 보강철근을 배치하여 전단 및 휨 해석을 통해 하중-변위 관계와 초기균열발생 및 분포를 분석하였다.

5.1 링형 합성 전단연결재 배치 간격

Fig. 9는 링형 합성 전단연결재의 배치 간격에 따른 전단 해석결과이며, SN400, SN450, SN500 해석 모델 모두 극한 강도에 도달할 때까지 선형적인 거동을 보였으며, 각각 약 1,629 kN, 1,030 kN, 784 kN까지의 추가적인 하중에 대해 저항할 수 있는 것으로 조사되었다. Table 7은 CFP 말뚝의 부재별 응력을 나타낸 것으로 다음과 같다.

1) SN400 모델은 극한상태에서 링형 합성 전단연결재는 이미 항복에 도달하였으며, 말뚝과 속채움 콘크리트는 인장균열이 발생하여 파괴가 발생하였다. 링형 합

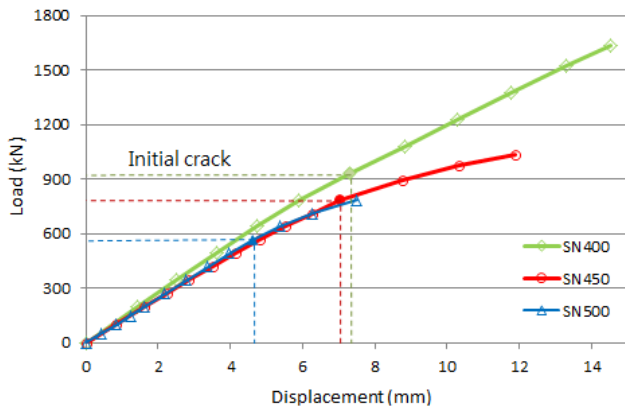


Fig. 9 Load-displacement curve depend on spacing of ring type composite shear connectors

Table 7 Ring type composite shear connector stress depend on spacing

Element	Stress	Analysis results (MPa)		
		SN400	SN450	SN500
PHC PILE	Compression	61.413	38.301	34.383
		Minimum 28-day compressive strength of concrete $f_{ck} = 78.5 \text{ MPa}$		
	Tension	21.352	5.854	5.437
		Allowable tensile stress $0.63 \sqrt{f_{ck}} = 5.634 \text{ MPa}$		
Filled concrete	Compression	14.634	14.307	11.687
		Minimum 28-day compressive strength of concrete $f_{ck} = 24.0 \text{ MPa}$		
	Tension	3.421	3.060	3.098
		Allowable tensile stress $0.63 \sqrt{f_{ck}} = 3.086 \text{ MPa}$		
Composite shear connector	Principal	235.000	157.997	64.785
		Specific yield stress $f_{sy} = 235 \text{ MPa}$		
	Shear	134.897	83.964	34.386
		Allowable shear stress $v_a = 80 \text{ MPa}$		

성 전단연결재의 간격이 해석 모델 중에서 가장 작은 경우로 전단강성은 가장 우수한 경우이다.

2) SN450은 극한상태에서 PHC말뚝의 하단응력이 균열 인장응력을 초과하여 인장균열이 발생되고, 속채움 콘크리트에서는 균열이 발생되지 않는 것으로 조사되었다.

3) SN500은 링형 합성 전단연결재의 배치간격이 500 mm 인 해석모델로 극한상태에서 링형 합성 전단연결재는 큰 응력에 도달하지 않은 상태에서 PHC 말뚝과 속채움 콘크리트에서 균열이 발생하고 확장하여 파괴가 발생하는 것으로 조사되었다.

링형 합성 전단연결재의 배치 간격이 400 mm인 SN400 모델에서 합성효과가 가장 우수하게 나타났으나, 링형 합성 전단연결재의 강도발현과 배치 간격에 따른 경제성을 고려하여 최종 배치 간격을 450 mm로 결정하였다.

5.2 전단해석 결과

Fig. 10은 극한상태에서 전단해석 유한요소모델의 하중-변위 관계를 나타내고 있으며, Table 8은 각 부재별 나타난 응력분포를 보여주고 있다.

추가적인 철근보강 없이 전단연결재와 속채움된 말뚝 모델인 SN의 하중-변위 곡선은 극한강도에 도달할 때까지 선형적인 거동을 보였으며, C-C단면은 784 kN에서 초기균열이 발생된 후 최종적으로 1,030 kN에서 파괴로 수렴되는 것으로 나타났다.

B-B단면은 중앙부 가력치가 894 kN 이후에 초기균열이 발생되었고, 949 kN까지 추가적인 하중에 대해 저항할 수 있는 것으로 조사되었다.

A-A단면 거동은 중앙부 재하 하중이 894 kN에서 초기균열이 발생되고, 최종적으로 982 kN에서 파괴되었다.

Table 9는 극한상태에서 각 단면별 부재의 응력을 조사한 것으로 SR1은 극한상태에서 PHC말뚝 하단에 인장균열이 발생하였고, 링형 합성 전단연결재도 허용응력을 넘어 항복 응력에 86%까지 도달하여 비탄성구간 상태에 도달하는 것으로 나타났다.

SR2도 SR1과 유사한 형태로 PHC말뚝 하단에 인장균열

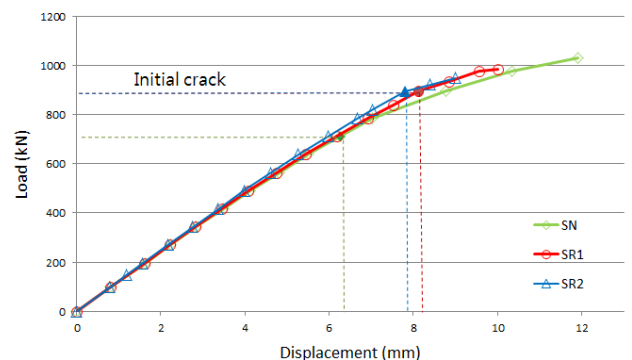


Fig. 10 Load-displacement curve of shear analysis models

Table 8 Numerical models stresses by shear analysis

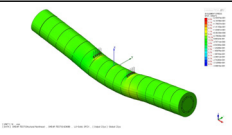
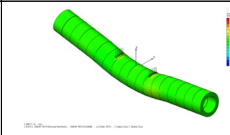
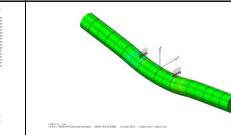
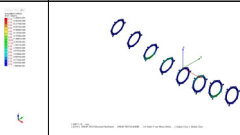
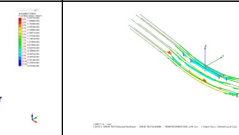
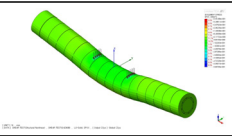
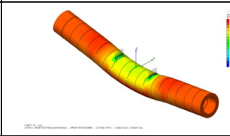
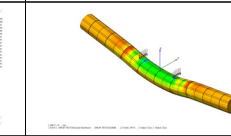
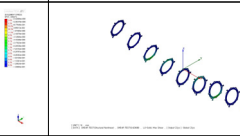
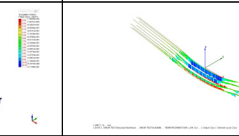
Ultimate state shear stress			Yield stress	Rebar H13
CFP PILE	PHC PILE	Filled concrete		
				
Ultimate state bending stress			Maximum shear stress	Rebar H19
CFP PILE	PHC PILE	Filled concrete		
				

Table 9 Results of shear analysis

Model	Shear strength (kN)	Model	Shear strength (kN)
S400	465.8	SN	392.3
S450	392.3	SR1	447.2
S500	281.9	SR2	447.2

이 발생하고 링형 합성 전단연결재도 항복응력에 86%까지 도달하면서 비탄성구간에 도달하는 것으로 판단된다. S 시리즈의 요소별 극한응력 분포에서는 SR1의 링형 합성 전단연결재의 주응력이 SN 대비 약 28%, 전단응력은 약 26% 크게 나타났으며, SR1과 SR2의 주응력과 전단응력의 분포가 유사하게 나타난 것으로 보아 내부 보강철근(H19-8ea)은 링형 합성 전단연결재의 응력에 미치는 영향이 미비하나, 말뚝 보강철근(H13-8ea)은 링형 합성 전단연결재 내의 홀에 삽입되고 콘크리트가 공극을 메우는 기계적 결합을 함으로서 링형 합성 전단연결재의 응력에 미치는 영향이 큰 것으로 조사되었다.

전단 모델의 해석 결과 SR1과 SR2의 전단강도는 동일하게 나타나 H19-8ea의 철근 배치에 따른 전단강도 증가는 없었으며, H13-8ea의 철근 배치에 따른 강도 증가는 약 14%로 나타났다.


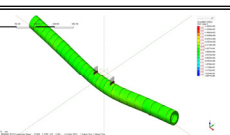
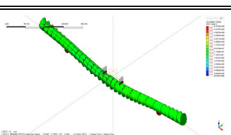
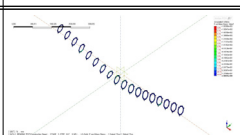
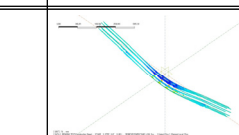
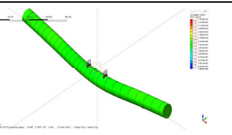
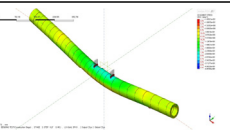
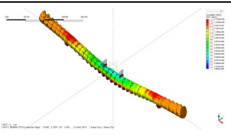
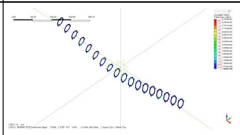
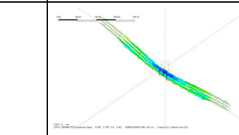
5.3 휨 해석 결과

Table 10은 CFP 말뚝의 휨 해석 결과 각 부재의 응력 분포를 나타낸 것이며, Fig. 11은 극한상태에서 유한요소모델의 하중-변위 관계이며, BN 모델은 극한강도에 도달할 때까지 선형적인 거동을 하고 중앙부 가력치가 177 kN (186 kN·m)에서 초기 휨인장균열이 발생한 후, 지속적으로 하중이 증가하여 Table 11과 같이 최대하중 244 kN (256 kN·m)에서 더 이상 저항하지 못하고 파괴되는 것으로 조사되었다. 또한, 극한상태에서 콘크리트 응력은 압축이나 균열인장에 도달하는 상태에서 강제로 제작된 링형 합성 전단연결재의 응력은 항복응력에 도달하지 않고 변형도 크지 않아 손상은 발생되지 않은 것으로 판단된다.

BR1 모델도 극한강도에 도달 할 때까지 선형적인 거동을 보였으며, 중앙부 가력치 178 kN (187 kN·m)에서 해석모델 하단부에 초기 휨인장균열이 발생된 후 약 334 kN (351 kN·m)까지 추가적인 하중에 대해 저항할 수 있는 것으로 나타났다. 극한상태에서 PHC말뚝의 콘크리트 응력은 하단에서 균열인장에 도달한 상태로 링형 합성 전단연결재의 응력은 항복응력에 도달되지 않고 변형도 크지 않게 나타났다.

BR2 모델은 극한강도에 도달할 때까지 선형적인 거동을

Table 10 Numerical models stress by bending analysis

Ultimate state shear stress			Yield stress	Rebar H13
CFP PILE	PHC PILE	Filled concrete		
				
Ultimate state bending stress			Maximum shear stress	Rebar H19
CFP PILE	PHC PILE	Filled concrete		
				

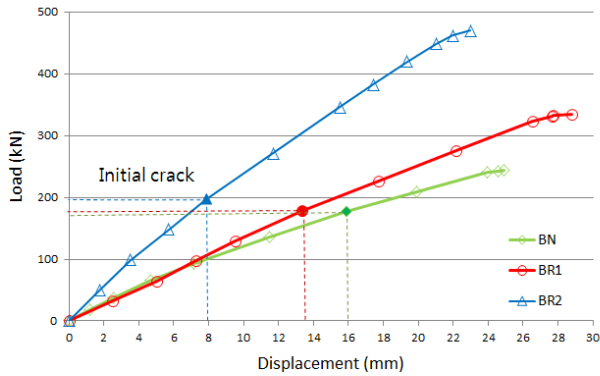


Fig. 11 Load-displacement curve of bending analysis models

Table 11 Comparison between PHC and CFP pile

Model	Shear strength		Bending moment	
	Analysis (kN)	Efficiency	Analysis (kN)	Efficiency
SN400	465.8	1.9	-	-
SN450	392.3	1.6	-	-
SN500	281.9	1.1	-	-
SR1	447.2	1.8	-	-
SR2	447.2	1.8	-	-
BN	-	-	255.9	1.6
BR1	-	-	350.7	2.2
BR2	-	-	493.6	3.2

▶ D500 A-type PHC PILE

Shear strength: 247.5 kN, Bending moment: 156.2 kN·m

보였으며, 중앙부 가력 하중이 197 kN (207 kN·m)에서 초기 균열이 발생하고 하중과 변위가 증가하다가 최종 재하 하중 470 kN (494 kN·m)에서 파괴되었다.

극한상태의 콘크리트 응력은 압축이나 균열인장에 도달하는 상태에서 링형 합성 전단연결재의 응력은 항복응력에 도달되지 않고 변형도 크지 않아 BN, BR1, BR2 모두 손상은 발생되지 않은 것으로 판단된다.

Table 12에서와 같이 PHC말뚝에 콘크리트 속채움과 링형 합성 전단연결재를 배치한 모델의 휨모멘트가 약 64% 증가하는 것으로 나타났으며, H13-8ea의 철근이 말뚝 내 보강된 BR1

모델이 BN 모델보다 약 37%, H19-8ea의 철근이 중공단면에 보강된 BR2 모델이 BR1 모델보다 약 41%의 휨 강도가 증가되었으며, 각 부재에 나타난 응력은 Table 12와 같이 조사되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 PHC말뚝의 다양한 보강방법에 따른 CFP 말뚝의 거동 및 강도에 대한 수치해석을 수행하였다.

- 1) 링형 합성 전단연결재의 간격에 대한 비교해석에서는 예상과 같이 링형 합성 전단연결재의 배치간격이 촘촘할수록 전단강성이 우수한 것으로 조사되었으나, 강도발현과 경제성을 고려하여 링형 합성 전단연결재의 간격은 450 mm가 효과적인 것으로 판단된다.
- 2) 말뚝 보강철근(H13-8ea)으로 보강한 모델의 해석결과에서 전단강도의 증가효과가 약 20%정도 상승되었지만, 내부에 추가적으로 H19-8ea를 보강한 모델에서는 전단강성의 증가효과는 없는 것으로 나타났다.
- 3) 휨에 있어서는 일반 PHC말뚝에 비해 CFP말뚝의 휨 강도는 1.6배 이상 증가하는 것으로 조사되었다. 또한, 추가적으로 배치된 보강철근 H13-8ea와 H19-8ea에 의해 휨 강성 증가효과는 최대 3.2배 이상을 발현하는 수치 해석 결과를 얻을 수 있었다.
- 4) 링형 합성 전단연결재를 배치하여 제작되는 CFP말뚝의 다양한 해석을 통해서 PHC말뚝의 전단 및 휨 강성을 효과적으로 증대시킬 수 있음이 입증되었다.
- 5) 따라서 본 연구에서 검토된 CFP말뚝의 해석결과와 실험을 통한 실험 결과값의 비교·검토를 통해, PHC말뚝의 합리적인 보강형식인 CFP말뚝의 성능검증을 통한 건설 현장 적용에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

1. Chun, Y. S., Park, J. B., and Sim, Y. J., "Mechanical Properties of PHC Pile Head Connection with Foundation Slab and Field Application", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 5, 2010, pp. 71-77.
2. Bang, J. W., Hyun, J. H., Lee, B. Y., Lee, S. S., and Kim, Y.

Table 12 Stress of each element by shear & bending analysis

Model	Limit state stress (MPa)							
	PHC PILE		Filled concrete		Composite shear connector		Rebar	
	Compression	Tension	Compression	Tension	Principal	Shear	H13	H19
SN	38.301	5.854	14.307	3.060	157.997	83.964	-	-
SR1	41.259	5.777	13.608	3.048	202.121	106.070	53.315	-
SR2	40.995	5.786	13.388	3.029	203.715	106.858	53.053	23.151
BN	44.704	17.380	11.477	2.188	187.062	104.031	-	-
BR1	44.452	15.812	17.203	2.159	171.060	94.487	253.300	-
BR2	44.516	14.594	10.918	2.134	160.300	87.874	239.600	79.400

- Y., “Flexural Strength of PHC Pile Reinforced with Infilled Concrete Transverse and Longitudinal Reinforcements”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 1, 2013, pp. 91-98.
3. Park, T. K., Lee, J. C., and Lee, C. S., “Problem and Improvement Measure of PHC Pile Construction”, *In Proceedings of the Korean Institute of Construction Engineering and Management*, Korean Institute of Construction Engineering and Management, 2008, pp. 344-348.
 4. Kim, I. T., Kim, S. R., and Kim, M. M., “A Study on the Applicability of High-Performance Piles on Railway Bridges”, *In proceedings of 2012 The Korean Society for Railway*, The Korean Society for Railway, Gyeongju, Korea, 2012. pp. 165-171.
 5. Kishida, S., Horii, M., Kuwabara, F., and Hayashi, S., “Experimental Study on Shear Strength of the PHC Pile with Large Diameter”, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000, pp. 1-8.
 6. Seiji, K., Akira, W., Katsumi, K., Shiro, M., and Kuninari, U., “The effectiveness of concrete fill in the hollow part of PHC piles: Study of the improvement in the bearing capacity and deformability of the prestressed high strength concrete (PHC) pile”, *Part 2. J. Struct. Constr. Eng.*, No. 390, 1988, pp. 134-141
 7. M. Horrii., S. Hayashi., and S. Kokusho., “Improve ment of plastic deformability of high-strength prestressed concrete piles under axial and lateral forces” *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Rotterdam, Netherlands, 1992, pp. 1945-1950.
 8. KS F 4306, *Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles*, Korean Agency for Technology and Standards, Seoul, Korea, 2004, pp. 1-55.
 9. Kookmin University, *Development Study of High Durable New Material Marin Piles*, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Seoul, Korea, 2002.

요 약 본 연구는 PHC말뚝의 단점을 보강한 기능성 말뚝을 개발함으로써 보다 경제적이고 합리적인 말뚝의 현장 적용에 기여하고자 하였다. 본 연구를 통해 개발된 CFP말뚝은 링형 합성 전단연결재를 배치하고 PHC말뚝 중공부에 콘크리트를 속채움함으로써 말뚝 단면 확대를 통한 압축응력을 증대시키고, PHC말뚝 내 보강철근(H13-8ea)과 말뚝 중공부의 보강철근(H19-8ea)을 배치함으로써 전단과 휨 성능을 향상시켰다. 또한, 속채움 콘크리트와 PHC말뚝의 합성거동을 위해 링형 합성 전단연결재를 배치함과 동시에 PHC말뚝 내 보강철근(H13-8ea)을 연결재 내부에 배치함으로써 두 부재의 유격내에 콘크리트로 메우는 슬리브형 기계적 이음방법을 도입하였다. 링형 합성 전단연결재의 배치 간격 도출과 말뚝의 전단 및 휨 성능을 검증하고자 범용프로그램을 이용한 콘크리트 구조물의 비선형재료 모델로 유한요소해석을 수행하였다. 링형 합성 전단연결재를 배치하여 제작되는 CFP말뚝의 다양한 해석을 통해서 PHC 말뚝의 전단 및 휨 강성을 효과적으로 증대시킬 수 있음이 입증되어 건설현장에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : CFP말뚝, 합성 전단연결재, PHC말뚝, 속채움 콘크리트, 유한요소해석