손상 PHC말뚝의 휨성능 보강에 대한 실험적 연구

Flexural Performance Reinforcing Method of Damaged PHC Piles

정지원* · 박찬동** · 양준모*** · 권오균****

Jeong, Ji-Weon*, Park, Chan-Dong**, Yang, Jun-Mo***, and Kwon, Oh-Kyun****

Abstract

Cracks may occur in a prestressed high-strength concrete (PHC) pile foundation because of factors, such as the aging of the domestic foundation structure, earthquake occurrence, and foundation ground expansion. The cracking of a pile foundation significantly reduces the bearing capacity of the pile such that its function as a structural foundation is lost. Recently, research on the development of reinforced methods for damaged piles has become essential in securing the stability of pile foundations. In this study, flexural strength tests were conducted on PHC piles with cracks, breakage, and cutting caused by various external forces to examine the reinforcing effects of various reinforcement conditions, such as mortar thickness, epoxy injection, and thickness of reinforcing steel, on the stability of a structure. Based on experimental results, a detailed reinforcing method for crack filling with epoxy, steel reinforcing, and mortar filling is suggested.

Key words : PHC Pile, Damaged Pile, Reinforcing Method, Flexural Strength Test

요 지

국내 기초구조물의 노후화, 지진 발생, 기초지반 팽창 등으로 인해 PHC말뚝기초에 균열이 발생될 수 있고, 말뚝기초의 균열은 말뚝의 지지력을 크게 감소시켜 구조물 기초로서의 기능이 상실되도록 한다. 최근 이러한 말뚝기초에 대한 안정성 확보를 위해 손상된 말뚝의 보강기법 개발에 대한 연구 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 다양한 외력으로 인해 균열 및 파손, 절단 등이 발생한 PHC말뚝을 대상으로 모르타르의 두께, 에폭시 주입 유무, 보강강재의 두께 등의 다양한 보강 조건에 따른 보강 효과를 검토하기 위하여 휨강도 실험을 진행하였다. 실험 결과를 토대로 에폭시 균열 충전, 강재보강, 모르타르 충전에 대한 보강 상세공법을 제시하였다.

핵심용어 : PHC말뚝, 손상말뚝, 보강공법, 휨강도 시험

1. 서 론

기초공사를 진행함에 있어서 지반이 불안정한 경우 상부 구조물의 하중을 지지층에 전달하고 지반침하 등을 방지하기 위한 목적으로 말뚝기초가 사용되고 있다. 국내 현장에서 사용되는 여러 가지 형태의 말뚝은 하중의 형태, 지질 조건,

지하수위 등의 환경 조건에 따라 다양하게 적용되고 있으며, 사용재료에 따라 대표적으로 콘크리트 말뚝과 강관말뚝 및 복합말뚝이 사용되고 있다. 특히 콘크리트 말뚝 중 가장 많이 사용되고 있는 PHC말뚝(Prestensioned spun high strength concrete pile; Fig. 1(a))은 기성 콘크리트 말뚝을 대표하는 말뚝으로 강봉의 프리스트레싱을 통한 균열에 대한 저항이

*정회원, 계명대학교 토목공학과, 석사과정(E-mail: pizza1593@naver.com)

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Keimyung University

**계명대학교 토목공학과, 석사과정(E-mail: superior2372@gmail.com)

Master's Course, Department of Civil Engineering, Keimyung University

***정회원, 계명대학교 건축토목공학부 토목공학전공, 조교수

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Keimyung University

****교신저자, 정회원, 계명대학교 건축토목공학부 토목공학전공, 교수(Tel: +82-53-580-5280, Fax: +82-53-586-1313, E-mail: ohkwon@kmu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Keimyung University

크고, 콘크리트의 원심성형 및 오토클레이브 양생으로 단기간에 80MPa의 고강도 말뚝 본체를 확보할 수 있다. 또한 기계화 공정으로 제작되는 콘크리트 2차 제품이기 때문에 고생산성과 우수한 품질관리를 확보할 수 있다는 장점이 있다(Bang et al., 2016).

Fig. 1. Picture of PHC and PC Pile

1992년 일본에서 제조기술을 국내로 도입한 PHC말뚝은 많은 현장 실험을 통해 구조안정성 및 경제성 등의 장점이 알려지면서 기존의 말뚝기초의 주류를 이루었던 PC말뚝(Prestressed concrete pile; Fig. 1(b))을 대체하기 시작했다. PC말뚝은 타격 시 말뚝 몸체에 대한 균열발생이 적으며, 처짐이 적고 부식에 대한 저항성도 우수하여 1992년 이전까지 주로 사용되어 왔다. 하지만 산업화의 가속 및 경제성장과 더불어 구조물의 초고층화, 대형화뿐만 아니라 교량 등의 토목구조물이 대형화되었으며, 급격한 도시화, 인구집중화로 인해 활용 가능한 대지가 부족함에 따라 연약지반에서의 건설이 활성화되고, 구조물 안정성에 대한 인식도 변화함에 따라 더욱 큰 지지력 및 매설깊이를 필요로 하게 되었으며, 이로 인하여 중간층의 관통이나 장대말뚝의 시공이 가능한 PHC말뚝으로 대체되었다(Jeong, 1994).

PHC말뚝은 시공 중 말뚝의 연직성을 확보하지 못할 경우 말뚝에 휨모멘트가 발생하고, 발생한 휨모멘트가 허용파괴 한도를 초과하게 되면 말뚝의 파괴 또는 하중지지력 저하 등의 문제점이 발생한다. 또한, 국내·외적으로 기초구조물의 노후화가 진행되고 있고, 지진하중, 기초지반의 팽창, 풍력, 파력 등의 외력에 의하여 PHC말뚝기초에 균열 및 파괴가 발생할 우려가 있다(Kim and Yea, 2013; Kim et al., 2017). 말뚝기초의 궁극적인 목적은 축조되는 구조물의 하중을 확실하고 안전하게 지반에 전달함에 있지만, 최근 2016년 경주지진과 2017년 포항지진 등 국내 지진발생빈도가 증가함에 따라 말뚝기초의 손상 및 파괴에 대한 문제가 발생할 수 있다. 말뚝기초의 파괴 유형에는 말뚝머리 압축파괴, 전단파괴, 종·횡방향 균열, 선단균열 등이 있으며, 이러한 말뚝기초의 균열은 말뚝의 지지력을 크게 감소시켜 구조물 기초로서의 기능을 손상시키기 때문에, 말뚝기초의 안정성 확보를 위해 손상된 부분의 보강방법에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

이에 본 연구에서는 다양한 균열 및 파손, 절단 등의 형태로 손상된 PHC말뚝을 대상으로 최적의 보강방법을 제시하고, 손상된 PHC말뚝에 대한 보강 후의 성능을 평가하였다. 다양한 보강방법에 대한 성능검토를 수행하고자 휨강도 실험을 수행하였으며, 손상되지 않은 기성말뚝의 성능과 비교·분석을 통하여 보강방법을 검토하였다. 손상된 말뚝의 지지력을 고려하지 않았기 때문에 지표면으로부터 깊은 곳에 손상 부위가 위치하는 경우는 고려하지 않았다.

2. 시험체 제작 및 재료 특성

2.1 PHC말뚝

PHC말뚝은 외경에 따라 300~1,200 mm로 구분되고, 철근의 유효 프리스트레스 크기에 따라 A-Type, B-Type, 및 C-Type이 있으며, 유효 프리스트레스는 각각 3.92N/mm², 7.85N/mm² 및 9.81N/mm²이다. 본 연구에서는 현재 국내에서 가장 많이 사용되는 외경 600 mm, A-Type의 PHC말뚝을 선정하였고, 길이 5 m, 6 m, 9 m의 PHC말뚝을 사용하였다. 각 PHC말뚝의 규격 강도는 Table 1과 같다(KS F 4306, 2014).

Table 1. Specified Strength of PHC Pile (KS F 4306)

Outside diameter (mm)	Type	Cracking moment, kN·m (tf·m)	Maximum bending moment, kN·m (tf·m)
600	A	166.8 (17.0)	250.2 (25.5)
	B	245.2 (25.0)	441.4 (45.0)
	C	284.5 (29.0)	569.0 (58.0)

2.2 균열 손상 PHC말뚝의 제작

PHC말뚝의 보강방법 적용을 위해 시험체에 미리 하중을 가하여 균열을 발생시켜서 손상된 PHC말뚝을 제작하였다. 예비실험을 통해 PHC말뚝의 균열하중 및 파괴하중을 확인하여 시편별 동일한 손상하중을 미리 결정하였다. 횡방향(말뚝길이 수직방향) 균열 생성의 경우, PHC말뚝의 하부 강선부분을 중심으로 표시한 후, 길이가 5 m인 PHC말뚝의 경우 하중재하 지간거리를 4m로 하여 4점재하 실험을 실시하였으며(Fig. 2(a)), 종방향(말뚝길이 방향) 균열 생성의 경우, Fig. 2(b)와 같이 압축할렬실험을 실시하여 균열을 생성하였다.

2.3 균열부 에폭시 충전

손상된 PHC말뚝의 오염물질 등을 와이어 브러쉬, 사포 등으로 깨끗하게 제거한 후, Fig. 3과 같이 주사기 형식의 주입장치를 이용하여 균열 부위에 에폭시를 주입하고 균열을 보수하였다. 균열폭보다 넓게 썰링하여 주입 시 에폭시가 흘러나오지 않도록 처리하였다.

Fig. 2. Preliminary Crack Formation

Fig. 3. Filling Cracks with Epoxy

손상된 PHC말뚝의 균열충진재로 사용된 에폭시는 내수성, 내구성, 접착력이 우수하며 탄성복원력이 거의 없는 충진재인 퍼티형 실링재 KG400을 사용하였다. 제조사에서 제시한 KG400의 재료 특성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Properties of Epoxy

Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Bond strength (MPa)	Water resistance
1140	540	140	over 500hr.

2.4 강재 보강

길이 2 m 강관을 사용하여 PHC말뚝의 손상된 부분을 보강하였다. 보강강재를 반쪽의 강관 형태로 2개 제작하고 용접하여 길이 2 m의 강관을 만든 후 PHC말뚝 손상부분에 강관을 위치시키고, 모르타르가 흐르지 않도록 강재의 양 끝단을 처리한 후 보강강재와 PHC말뚝 사이의 틈새를 볼트로 유지시킨 상태에서 모르타르를 주입하여 보강을 완료하였다. Fig. 4는 손상된 PHC말뚝에 강재를 보강하는 모습을 나타내며, 이 그림에서 보는 바와 같이 강관의 마감부는 링 용접과 케미컬 마감재로 처리하여 주입된 모르타르가 흘러나오지 않도록 마감 처리하였다. 모르타르 충전 후 용접부에 대한

비파괴 검사를 실시하여 보강 시 발생할 수 있는 결함 유무를 확인하였으며, 용접부위의 결함은 없는 것으로 확인되었다.

Fig. 4. Steel Reinforcement of PHC Pile

보강 강재는 SS400, HSM500 두 종류의 재질을 사용하였다. 최초 보강 계획에서는 SS400 일반구조용 압연강재(KS D3503, 2016)를 고려하여 적용하였고, 고강도 강재의 사용을 통한 강재 두께 감소 및 지반 속에 묻히는 PHC말뚝 보강재의 부식 저항성 향상을 위해 HSM500(KS D3003, 2013)소재도 추가하여 적용하였다. HSM500은 크롬, 구리 합금의 비율을 높여 해수에 의한 부식 저항능력을 향상시킨 강재로써, 얇은 두께로도 부식속도를 늦추면서 같은 강도를 유지할 수 있어서, 강관말뚝 제작에 들어가는 강재 물량을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다(Lee et al., 2015). 사용된 보강 강재의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of Reinforcing Steel

Name	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SS400	≥ 235	≥ 400	≥ 17
HSM500	≥ 380	≥ 500	≥ 16

2.5 모르타르 충전

손상된 PHC말뚝과 강관 사이의 빈 공간을 채우기 위하여 Fig 5와 같이 모르타르를 주입하였다. 모르타르는 특수첨가제가 적절히 배합되어 무수축, 고강도, 고유동성, 고내구성, 내염성 특성을 가진 프리믹스 타입의 그라우트용 제품을 사용하였다. 모르타르 공급자로부터 제공된 제품의 품질 특성은 Table 4와 같으며, 보강 재료의 신뢰성 확인을 위해 추가적으로 KS D4044 (2004)에 준하여 압축강도 실험을 진행한 결과 역시 Table 4에 나타내었다. 모르타르 압축강도 실험 결과 실제 강도가 기준강도보다 더 높게 나타났다.

Fig. 5. Filling of Mortar

Table 4. Properties of Reinforcing Mortar

Item		Value
Valid time (sec.)		≤ 60
Flow (mm)		$300 \leq$
Setting time (hour)	Initial set	$2 \leq$
	Slow set	≤ 8
Bleeding (%)		0
Expansion ratio (%)	1~28 days	$0.0 \sim 0.3$
	1 days	$20 \leq$
	3 days	$35 \leq$
	7 days	$50 \leq$
Compression strength specified by supplier (MPa)	28 days	$70 \leq$
	3 days	45.9
	7 days	57.6
	28 days	71.3

3. 실험 변수 및 계획

3.1 보강강재 및 모르타르 두께에 따른 성능평가

Test series I에서는 손상된 PHC말뚝의 보강에 사용되는 강재와 모르타르 두께에 따른 PHC말뚝의 보강성능과 보강 위치에 따른 보강성능을 휨강도 실험을 통하여 평가하였다. Fig. 6과 같이 PHC말뚝 양 끝단으로부터 0.25 m 떨어진 양 지점을 하부 지점으로 하고, 중앙부 0.5 m 간격의 상부 지점을 두어 4점 재하 시험으로 휨강도를 평가하였다. 이 시험방법은 KS F 4306에 규정되어 있는 실험방법과 상이하여 일반적인 휨강도 값과 다를 수 있고, 시험체들 간의 상대평가를 통해 휨강도를 평가하였다. PHC말뚝의 길이(5 m, 6 m), 보강강재의 두께(6 mm, 7 mm), 모르타르 두께(5 mm, 10 mm)를 변수로 하여 총 10개의 PHC말뚝을 시험하였으며, 각 시험체당 1개소의 횡방향(말뚝길이의 직각 방향) 균열을 제작하였다. 모르타르 두께변화의 경우 말뚝의 보강에 사용된 강관의 내경을 다르게 제작하였으며, 각 시험체의 종류 및 특성은 Table 5의 Series I과 같다.

Fig. 6. Schematic of Flexural Strength Test

3.2 균열형태와 위치 및 에폭시 유무에 따른 성능평가

Test series II에서는 손상된 PHC말뚝의 균열형태와 균열

의 위치 및 에폭시 주입 유무에 따른 보강말뚝의 성능을 휨강도 실험을 통하여 평가하였다. 총 PHC말뚝의 개수는 7개이며, 길이 6 m 말뚝 4개에서, 9 m 말뚝 3개를 실험하였다. 길이 6 m 말뚝은 SS400 강재로 보강하였고, 9 m 말뚝은 HSM500 강재로 보강하였으며, 강재보강 두께는 모두 5 mm로 동일하다. 손상 PHC말뚝의 형태는 종·횡방향 균열, 내·외측 횡방향 균열 및 횡방향 절단이다(Fig. 7). 절단은 그라인더를 이용하여 절단하였고, 모르타르 두께는 10 mm로 고정하였다. 각 시험체의 종류 및 특성은 Table 5의 Series II와 같다.

Fig. 7. Schematic of Test Series II

3.3 모르타르 충전 양상에 따른 성능평가

Test series III에서는 모르타르 충전 양상에 따른 보강성능을 휨강도 실험을 통하여 평가하였다. 총 3개의 길이 5 m PHC말뚝을 사용하였으며, 시험체 모두 1개소의 중앙 횡균열 제작 후 보강하여 실험하였다. 보강강재의 재질은 SS400이며, 두께는 6 mm이었다. 시험체의 균열부분은 에폭시로 충전하였고, 각 시험체의 모르타르 충전 양상은 모르타르를 충전하지 않은 경우, 빈 공간 전체를 모르타르로 충전한 경우 및 절반만 모르타르를 충전한 경우 등 3가지이다. 각 시험체의 종류 및 특성은 Table 5의 Series III과 같다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 보강강재 및 모르타르 두께에 따른 성능평가 결과

Series I 실험결과 나타난 휨모멘트-변위 곡선은 Fig. 8과 같다. 먼저 길이 5 m PHC말뚝에 대한 실험결과(Fig. 8(a), Table 5)를 살펴보면, 손상된 기성말뚝(L5)의 파괴 휨모멘트는 $368.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 이고, 무보강 말뚝(L5U)의 파괴 휨모멘트는 $205.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 로 나타나 균열 손상에 의해 기성말뚝의 약 55.8% 수준으로 휨강도가 감소되었고 초기 강성 역시 크게 감소된 것을 확인할 수 있다. 에폭시, 강재 및 모르타르로 보강된 말뚝 시험체들(L5T6EM5, L5T6EM10, L5T7EM5, L5T7EM10)의 파괴 휨모멘트는 강재두께 및 모르타르 두께에 관계없이 거의 유사한 파괴 휨모멘트 결과를 보였고,

Table 5. Details of Test Specimens and Test Results

Test specimen	Length of pile (m)	Reinforcing steel		Epoxy filling	Thickness of mortar (mm)	Max. bending moment (kN-m)	Note
		Type	Thickness (mm)				
Series I	L5	-	-	X	-	368.8	Plain
	L5U	-	-	X	-	205.8	Unreinforced
	L5T6EM5	SS400	6	O	5	524.3	Center vertical crack
	L5T6EM10	SS400	6	O	10	522.7	Center vertical crack
	L5T7EM5	SS400	7	O	5	525.5	Center vertical crack
	L5T7EM10	SS400	7	O	10	505.4	Center vertical crack
	L6	-	-	X	-	296.1	Plain
	L6U	-	-	X	-	300.3	Unreinforced
	L6T7EM5-VC	SS400	7	O	5	444.6	Center vertical crack
	L6T7EM5-VO	SS400	7	O	5	316.0	Off-center vertical crack
Series II	L6T5EM10-VC	SS400	5	O	10	446.8	Center vertical crack
	L6T5EM10-LC	SS400	5	O	10	429.5	Longitudinal crack
	L6T5EM10-VO	SS400	5	O	10	315.7	Off-center vertical crack
	L6T5M10-VC	SS400	5	X	10	430.3	No epoxy filling
	L9	-	-	X	-	298.9	Plain
	L9T5EM10-VC	HSM500	5	O	10	350.6	Center vertical crack
	L9T5EM10-PC	HSM500	5	O	10	352.1	Pile cutting
Series III	L5T6E-VC	SS400	6	O	10	531.0	No mortar filling
	L5T6EMH-VC	SS400	6	O	10	527.0	Mortar half filling
	L5T6EMF-VC	SS400	6	O	10	518.0	Mortar full filling

where, L5 is the pile length of 5m, U is the unreinforcement of steel plate, T7 is the steel plate thickness of 7mm, E is the epoxy filling, M5 is mortar thickness of 5mm, VC is the vertical crack at center, VO is the vertical crack at off-center, PC is the pile cutting, MH is the mortar half filling, and MF is the mortar full filling.

(a) PHC piles with 5m length

(b) PHC piles with 6m length

Fig. 8. Bending Moment vs Displacement Relationship of Test Series I

평균 519.5kN·m로 나타나 허용휨모멘트 수준을 만족하면서 기성말뚝(L5), 무보강 말뚝(L5U) 대비 각각 40.8%, 152.4% 정도의 휨강도 증진효과를 나타내었다. 6 mm와 7 mm의

강재두께 변화에 따른 실험결과를 비교해 보면, 파괴 시 최대 휨모멘트는 큰 차이 없이 유사하게 나타났으며, 5 mm와 10 mm의 모르타르 두께변화에 따른 결과 역시 큰

차이를 보이지 않았다. 이러한 결과로부터 보강강재의 두께 및 모르타르 두께 변화가 말뚝의 직경에 비하여 미소할 경우, 손상된 말뚝의 보강효과에 미치는 영향은 미미한 것으로 확인되었다.

Fig. 8(b)는 길이가 6 m인 PHC말뚝에서 균열생성 위치와 보강유무에 따른 휨모멘트-변위 측정결과를 보여준다. 먼저 균열생성 위치에 따른 보강효과를 살펴보면, 중앙부에 횡방향 수직균열을 보강한 시험체(L6T7EM5-VC)와 중앙부 외부에 수직균열을 보강한 시험체(L6T7EM5-VO)의 파괴 휨모멘트는 각각 444.6kN·m와 316.0kN·m로 나타나 중앙 횡균열 보강시험체의 파괴 휨모멘트가 약 40.7% 더 높게 나타났다. 손상이 없는 기성말뚝(L6)의 파괴 휨모멘트는 296.1N·m로 나타났고, 무보강 시험체의 경우 300.3kN·m로 나타나 균열 손상의 의한 휨강도 감소가 없었지만, 길이 5 m 말뚝 시험체의 경우와 마찬가지로 초기 강성이 크게 감소된 것을 확인할 수 있었다. 중앙부 수직균열을 에폭시, 강재 및 모르타르로 보강한 경우 기성말뚝(L6), 무보강 말뚝(L5U) 대비 각각 50.2%, 48.1%의 휨강도 증진효과를 나타냈다.

대표적인 균열 및 파괴양상을 Fig. 9에 나타내었다. 중앙부에 보강이 적용되지 않은 경우(Figs. 9(a), (c))는 상부 가력지점 사이에서 수직방향 휨 균열이 발생하는 균열 양상을

보였고, 중앙부에 보강이 적용된 경우(Fig. 9(b))는 중앙부 강재보강으로 인해 중앙부 휨균열을 관찰할 수 없었고, 강재 보강 끝부분에서 균열 발생을 확인할 수 있었다.

4.2 균열형태와 위치 및 에폭시 유무에 따른 성능평가 결과

손상된 PHC말뚝의 균열형태와 균열의 위치 및 에폭시 주입 유무에 따른 보강성능을 평가한 Series II 실험에서는 4.1절의 보강강재 및 모르타르 두께에 따른 차이 없는 실험결과를 반영하고, 휨손상에 따른 말뚝의 변형 및 손쉬운 현장 모르타르 주입을 고려하여 강재 두께는 5 mm, 모르타르 두께는 10 mm로 결정하여 실험하였다. 실험결과 나타난 최대 휨모멘트는 Table 5에 나타내었고, 휨모멘트-변위 곡선은 Fig. 10과 같다.

L6T5EM10-VC 시험체의 최대 휨모멘트는 446.8kN·m으로 나타나 기성말뚝(L6) 보다 50.9% 향상된 성능을 보였고, Series I의 L6T7EM5-VC 시험체의 최대 휨모멘트인 444.6kN·m와 매우 유사한 결과를 보였다. 이는 4.1절에서 도출한 보강강재 및 모르타르의 두께의 영향이 거의 없다는 결론과 부합한다. 균열 방향에 따른 시험체(L6T5EM10-VC와 L6T5EM10-LC)의 파괴 휨모멘트는 각각 446.8kN·m와 429.5kN·m로 그 차이가 약 4.0% 정도로 작게 나타나 균열형

Fig. 9. Representative Crack and Failure Patterns

Fig. 10. Bending Moment vs Displacement Relationship of Test Series II

태에 따른 보강된 PHC말뚝의 휨성능은 거의 차이 없이 매우 유사한 결과를 나타냈다. 에폭시 사용 유무에 따른 보강효과를 비교해 보면, 에폭시를 사용하여 보강한 PHC말뚝(L6T5EM10-VC)의 파괴 휨모멘트는 에폭시를 사용하지 않은 PHC말뚝(L6T5M10-VC)의 430.3kN·m 보다 약 9.6% 크게 나타나, 보강공법에서 에폭시의 효과가 미미하게 나타나는 것으로 확인되었다. 균열 위치에 따른 보강효과를 살펴 보면, 시험체 L6T5EM10-VO의 파괴 휨모멘트 315.7kN·m가 L6T5EM10-VC의 경우보다 41.5% 작게 나타났다. 이는 휨모멘트가 가장 크게 작용하는 중앙부에는 아무런 보강이 되어있지 않았기 때문으로 기성말뚝과 유사한 휨모멘트를 나타내는 결과를 보였다.

균열이 발생한 경우와 절단된 PHC말뚝에 대해 보강공법을 적용한 9m PHC말뚝 시험체에 대해 휨실험을 실시하여 도출한 휨모멘트-변위 곡선을 Fig. 10(b)에 나타내었다. 균열이 없는 기성 PHC말뚝의 파괴 휨모멘트는 298.9kN·m로 나타났고, 균열이 발생한 PHC말뚝을 보강한 시험체(L9T5EM10-VC)와 절단된 말뚝을 보강한 시험체(L9T5EM10-PC)의 파괴 휨모멘트는 각각 350.6kN·m와 352.1kN·m로 손상이 없는 PHC말뚝 보다 17~18% 큰 보강효과를 나타내었다. 균열이 발생한 말뚝과 절단된 말뚝을 보강한 시험체의 파괴 휨모멘트는 차이가 거의 없이 비슷하게 나타나, 균열 및 절단의 손상이 보강효과에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

4.3 모르타르 충전 양상에 따른 성능평가 결과

Series III 시험체들을 통해 모르타르의 충전 양상에 따른 손상 말뚝의 보강효과를 살펴보고, 그 결과를 Table 5와 Fig. 11에 나타내었다. 손상된 PHC말뚝을 강재로 보강하면, 모르타르 충전 여부 및 양상에 관계없이 강재로 보강하지 않는 기성말뚝에 비해 40~44% 정도 더 큰 파괴 휨모멘트를 나타냈다. 그리고 손상된 PHC말뚝을 강재로 보강한 경우, 모르타르 충전 여부 및 양상에 따라 파괴 휨모멘트의 차이는

Fig. 11. Bending Moment - Displacement Relationship of Test Series III

거의 나타나지 않았다. 그러나, L5T6E-VC, L5T6EMH-VC, L5T6EMF-VC 시험체들의 초기 강성의 차이가 나타났는데, 이는 모르타르 채움에 따라 강성의 향상이 미소하게 있기 때문이다. 또한, 모르타르 충전없이 PHC말뚝을 보강할 경우, 외력이 작용함에 따라 변위가 발생할 가능성이 있기 때문에 현장에서 손상된 PHC말뚝을 강재로 보강하는 경우, 반드시 모르타르로 충전하여야 보강효과가 충분히 발휘될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 외력으로 인해 균열 및 파손, 절단 등이 발생한 PHC말뚝을 대상으로 모르타르의 두께, 에폭시 주입 유무, 보강강관의 두께 등의 다양한 보강 조건에 따른 보강 효과를 검토하기 위하여 휨강도 실험을 진행하였다. 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 보강강재의 두께와 모르타르 두께가 손상말뚝의 보강 효과에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 보강말뚝의 평균 파괴 휨모멘트는 무균열 기성말뚝 대비 약 40.8%, 무보강 균열말뚝 대비 약 152.4%의 증진효과를 나타냈다.
- (2) 균열형태에 따른 보강효과는 약 4%로 매우 유사하게 나타났고, 에폭시 주입에 따라 보강효과가 9.6% 증가하는 것으로 나타났다. 균열 위치에 따른 보강효과는 중앙에 횡방향 균열이 있는 시험체의 파괴 휨모멘트가 측면에 횡균열이 있는 경우보다 약 41.5% 크게 나타났다. 균열이 발생한 말뚝과 절단된 말뚝을 보강한 시험체의 파괴 휨모멘트는 유사한 결과를 보여 균열 및 절단의 손상이 보강효과에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
- (3) 손상된 PHC말뚝을 강재로 보강하면, 모르타르 충전 여부 및 양상에 따른 파괴 휨모멘트의 차이가 나타나지 않았다. 그러나, 모르타르를 모두 채운 경우 초기 강성의 증진이 나타났고, 현장에서 모르타르 충전 없이 PHC말뚝을 보강할 경우, 외력이 작용함에 따라 변위가 발생할 가능성이 있기 때문에 현장에서 강재보강 시 보강효과 증대를 위해 모르타르의 충진이 필요하다고 판단된다.
- (4) 이상의 실험결과를 통하여 본 연구에서는 손상된 PHC말뚝에 대하여 다음과 같은 보강방법을 제안하고자 한다. 먼저 균열이 발생한 부분을 깨끗이 정리한 후에, 에폭시로 균열을 충전하고, 손상된 PHC말뚝 주위를 HSM500 강재(길이 2 m, 두께 5 mm)로 보강한 후, PHC말뚝과 강재 사이의 틈을 모르타르(두께 10 mm)로 주입한다.

References

- Bang, J.W., Park, C.K., Yang, S.Y., and Kim, Y.Y. (2016). Flexural behavior of large-diameter composite PHC pile using in-filled concrete and reinforcement. *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, Vol. 20 No. 5, pp. 109-115.
- Jeong, Y. (1994). Pretensioned spun high strength concrete piles. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 6, No. 6, pp. 35-41.
- Kim, J.H., Jung, H.K., Park Y.S., and Min, C.S. (2017). Flexural design and experiments on reinforced concrete filled PHC pile. *J. Korea Concr. Inst.*, Vol. 29, No. 4, pp. 353-360.
- Kim, J.H., and Yea, G.G. (2013). Case study of comparative analysis between static and dynamic loading test of PHC pile. *J. Korea Geo-Environ. Soc.*, Vol. 14, No. 11, pp. 13-23.
- KS D 3003. (2013). *Corrosion resistance steel for port and offshore structures*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), Korea.
- KS D 3503. (2016). *Rolled steels for general structure*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), Korea.
- KS F 4044. (2004). *Hydraulic-cement grout (Nonshrink)*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), Korea.
- KS F 4306. (2014). *Pretensioned spun high strength concrete piles*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), Korea.
- Lee, J.K., Park, J.W., and Bae, D.B. (2015). Seawater corrosion resistance steel, poseidon500, for port & offshore structures. *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, Vol. 27, No. 1, pp. 40-43.

Received	November 1, 2018
Revised	November 5, 2018
Accepted	February 18, 2019