



내부충전 콘크리트와 전단철근을 이용한 중공 PHC말뚝의 전단보강 효과

현정환¹⁾ · 방진욱¹⁾ · 이승수²⁾ · 김윤용^{1)*}

¹⁾충남대학교 토목공학과 ²⁾(주)하경엔지니어링

Shear Strength Enhancement of Hollow PHC Pile Reinforced with Infilled Concrete and Shear Reinforcement

Jung-Hwan Hyun,¹⁾ Jin-Wook Bang,¹⁾ Seung-Soo Lee,²⁾ and Yun-Yong Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾Hakyong Engineering Co. Ltd., Seoul 689-4, Korea

ABSTRACT In order to improve the shear strength of conventional pre-tensioned spun high strength concrete (PHC) pile, concrete-infilled composite PHC (ICP) pile, a PHC pile reinforced by means of shear reinforcement and infilled concrete, is proposed. Two types of specimens were cast and tested according to KS (Korean Standards) to verify the shear strength enhancement of ICP pile. Based on the test results, it was found that the KS method was not suitable due to causing shear failure of ICP pile. However, shear strength enhancement was clearly verified. The obtained shear strength of the ICP pile was more than twice that of conventional PHC pile. In addition, the shear strength of ICP pile reinforced with longitudinal reinforcement was estimated to be more than 2.5 times greater than that of conventional PHC pile. The allowable shear force of ICP pile, which was determined by the allowable stress design process, indicated a large safety factor of more than 2.9 compared to the test results.

Keywords : PHC pile, infilled concrete, shear reinforcement, shear strength

1. 서 론

PHC(pre-tensioned spun high strength concrete) 말뚝은 90년대 초반까지 주류를 이루었던 기존 PC(pre-stressed concrete)말뚝의 성능을 개선하여 압축강도, 휨 모멘트에 대한 저항성 및 경제성 등을 향상시킨 말뚝이다.^{1,2)} 1992년 처음 국내에 도입된 이후 급속도로 활용이 증가하여, 2010년에는 국내 PHC말뚝 출하량이 약 428만톤³⁾으로 건설공사용 기초소재로서 중요한 위치를 차지하고 있다. PHC말뚝의 수직력은 강관말뚝과 대등한 반면 수평력은 강관말뚝의 1/5~1/6 수준⁴⁾으로 수평력이 크게 작용하는 교대 등의 기초에는 제한적으로 적용할 수 밖에 없는 것이 현실이다. 또한 수평력 확보를 위해 말뚝의 본수나 직경을 늘리게 되고 확대기초의 크기가 커지는 등의 설계변경이 필요하므로 현장에서는 대부분 강관말뚝을 사용하고 있는 실정이다.⁵⁾ 그러나 2000년대 이후 불안정한 환율과 강재 가격의 급격한 상승은 강관말뚝의 자체비 증

가로 이어져 강관말뚝을 대체할 수 있는 말뚝에 대한 관심이 증가하고 있다. 그 대안으로 국내에서 강관말뚝과 PHC 말뚝을 결합한 복합말뚝,⁶⁾ 기존의 CFFT(concrete filled FRP tube) 말뚝에 압축, 휨 및 전단 성능을 향상시킨 FRP-콘크리트 합성말뚝 등에 대한 연구⁷⁾가 진행된 바 있다.

유럽 및 미국에서는 말뚝의 내부식성 확보에 대한 연구가 주축을 이루고 있으며 말뚝 단면 보강형태의 한 방법으로 FRP(fiber reinforced polymer)로 기존 콘크리트 말뚝의 외부를 보강하여 말뚝의 성능을 향상시킨 연구⁸⁾가 수행되었다. 또한 일본에서는 빈번한 지진 발생으로 말뚝의 휨 강성을 높이기 위하여 강관말뚝 내부에 콘크리트를 채운 뒤 원심력으로 회전시켜 콘크리트와 강관이 합성체를 구성하여 압축 및 휨 강성을 증가시킨 SC(steel composite)말뚝⁹⁾이 개발되어 용도에 맞춰 사용되고 있는 실정이지만 여전히 경제성에 있어서 불리한 측면이 문제점으로 지적되고 있다.

따라서 이 연구에서는 PHC말뚝을 이용한 기존의 복합 또는 합성말뚝에 비해 보다 경제적으로 전단력을 향상시킬 수 있도록 전단철근과 내부충전 콘크리트로 보강된 PHC말뚝(concrete-infilled composite PHC pile, 이하 ICP말뚝) 개발을 위한 연구를 수행하였다. ICP말뚝은 기성 PHC말

*Corresponding author E-mail: yunkim@cnu.ac.kr

Received November 8, 2011, Revised January 11, 2012,

Accepted January 12, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

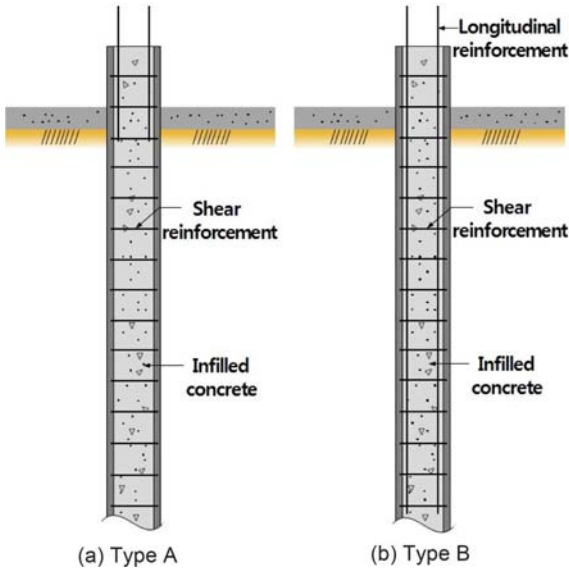


Fig. 1 Conceptual image of ICP pile

뚝의 부족한 전단력을 증진시키기 위하여 Fig. 1과 같이 PHC말뚝의 축방향으로 일정 간격의 전단철근을 배근하고 말뚝 중공부에 내부충진 콘크리트를 타설한다는 간단한 개념으로 계획하였다.

ICP말뚝의 적용성을 평가하기 위해 기존의 교대 설계 사례를 조사하여 ICP말뚝의 목표 허용전단력을 설정하였다. 국내 설계기준^{10,11)}에 따라 허용응력 설계법을 바탕으로 목표 허용전단력을 계산하고, 이를 만족하도록 전단철근과 내부충진 콘크리트를 사용변수로 결정하여 시험체를 제작하였으며, 전단강도 시험 결과를 강도설계법을 활용한 전단강도 예측 결과와 비교함으로써 ICP말뚝 설계법의 안전율을 평가하였다.

2. ICP말뚝의 설계

2.1 개요

Fig. 2는 교대 설계 시 반영된 말뚝 1본당의 작용력과 기존 허용응력설계법에 따라 직경 450 mm, 두께 70 mm인 기성 PHC말뚝($\phi 450-70t$)에 대해 계산한 상시 및 지진시 허용 전단력을 비교한 것이다. 이때 지진시 전단력은 도로교설계기준해설¹²⁾에 근거하여 상시 허용응력의 1.33배를 취하여 허용 전단력을 산정하였다. 검토 결과 PHC말뚝의 상시 및 지진시 허용 전단력은 교대 기초 설계에서 반영된 말뚝의 작용력에 비해 크게 부족함을 알 수 있다.

따라서 이 연구에서는 ICP말뚝을 교대 기초에 적용할 수 있는 상시 120 kN, 지진시 160 kN 이상의 목표 허용전단력을 확보할 수 있도록 계획하였으며, 전단철근의 직경과 배근간격 및 내부충진 콘크리트의 강도 등을 변수로 두고 설계하였다. ICP말뚝의 허용 전단력(V_a)은 콘크리트 구조설계기준¹¹⁾을 근거로 산정하였고, 식 (1)에 나타낸 바와 같이 PHC말뚝의 허용 전단력(V_{pa}), 내부충진 콘크리트의

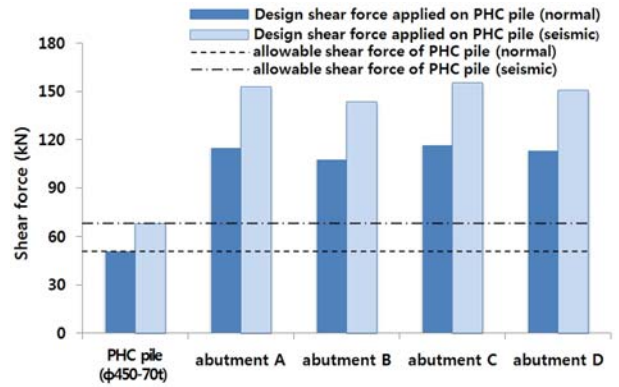


Fig. 2 Allowable shear force of PHC pile, compared with design shear force applied on PHC pile supporting abutment

허용 전단력(V_{ca}) 그리고 전단철근의 허용 전단력(V_{sa})을 각각 합산하여 구할 수 있다.

$$V_a = V_{pa} + V_{ca} + V_{sa} \quad (1)$$

2.2 ICP말뚝의 허용응력 설계

2.2.1 원심성형 말뚝 본체의 허용 전단력

ICP말뚝은 I사의 기성 PHC말뚝에 전단철근을 배근하여 제작한 것으로서 PHC말뚝의 허용 전단력은 현업에서 적용하고 있는 방법^{13,14)}을 이용하여 계산하였다. 이 방법은 허용응력설계법을 기초로 하고 있으므로 현행 콘크리트 구조설계기준과 부합하지 않는다는 단점이 있으나, 현업에서 적용하고 있다는 점을 감안하여 ICP말뚝 설계에 그대로 반영하였다. 식 (2)와 (3)에서 PHC말뚝의 허용전단응력 1.2 MPa¹³⁾과 전단형상계수 α ¹⁴⁾를 적용하여 전단력을 산정하였다. 식 (2)와 (3)에서 A 는 PHC말뚝의 콘크리트 단면적, D 는 말뚝의 외경이며, d 는 말뚝의 내경이다. 이 방법으로 구한 PHC말뚝 본체의 상시 및 지진시 허용 전단력은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

$$V_{pa} = 1.2 \times \frac{A}{\alpha} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{4(D^2 + D \times d + d^2)}{3(D^2 + d^2)} \quad (3)$$

2.2.2 내부충진 콘크리트의 허용 전단력

ICP말뚝 전단력에 기여하는 내부충진 콘크리트의 전단력을 파악하기 위하여 설계기준압축강도 24 MPa, 27 MPa,

Table 1 Allowable shear force of PHC pile

Type	Condition	Allowable shear force (kN)
$\phi 450-70t$	Normal design	51.3
	Seismic design	68.2

40 MPa 등 3종류의 내부충전 콘크리트에 대한 허용 전단력(V_{ca})을 계산하였다. 식 (4)를 이용하여 V_{ca} 를 계산하였고, 그 결과는 Table 2에 나타난 바와 같다. 식 (4)에서 내부충전 콘크리트의 허용 전단응력 v_{ca} 는 콘크리트 구조설계기준¹¹⁾에 제시되어 있는 간편식 $0.08\sqrt{f_{ck}}$ 를 적용하였으며, f_{ck} 는 내부충전 콘크리트의 압축강도, b_w 는 내부충전 콘크리트의 직경, d 는 내부충전 콘크리트의 압축연단에서 긴장재 도심까지의 거리이다.

$$V_{ca} = v_{ca} b_w d \quad (4)$$

2.2.3 전단철근의 허용 전단력

전단철근의 허용 전단력 V_{sa} 는 철근직경 D10, D13과 배근간격 150 mm, 200 mm의 총 4개의 변수에 대하여 식 (5)를 이용하여 계산하였고 그 결과는 Table 3에 나타내었다.

$$V_{sa} = \frac{A_w f_{sa} d}{s} \quad (5)$$

식 (5)에서 s 는 전단철근의 간격, f_{sa} 는 설계기준항복강도 400 MPa인 전단철근의 허용인장응력 180 MPa¹¹⁾이며, 유효깊이(d)는 내부충전 콘크리트 계산시 적용한 값과 동일하다. 특히, 전단철근 단면적(A_w) 산정시 배근간격 s 내에서 단면높이에 따라 전단철근의 다리수(단면적)가 2~4개로 변하게 되므로 가장 불리한 조건인 2개를 전단철근의 다리수로 가정하여 면적 계산에 적용하였다.

Table 2 Allowable shear force of infilled concrete

Specified compressive strength (MPa)	Condition	Allowable shear force (kN)
24	Normal design	32.8
	Seismic design	43.7
27	Normal design	34.8
	Seismic design	46.3
40	Normal design	42.4
	Seismic design	56.4

Table 3 Allowable shear force of shear reinforcement

Diameter	Spacing (mm)	Condition	Allowable shear force (kN)
D10	150	Normal design	46.3
		Seismic design	61.6
	200	Normal design	34.7
		Seismic design	46.2
D13	150	Normal design	82.1
		Seismic design	109.2
	200	Normal design	61.6
		Seismic design	81.9

Table 4 Allowable stress design results

Type of ICP pile	PHC pile (kN)	Infilled concrete (kN)	Shear reinforcement (kN)	ICP pile (kN)	
	Normal design	Normal design	Normal design	Normal design	Seismic design
$\phi 450-70t$	51.3	42.4	34.7	128.4	170.8

2.2.4 ICP말뚝 허용 전단력 산정 결과

허용응력 설계법을 통해 원심성형 말뚝 본체, 변수에 따른 내부충전 콘크리트 및 전단철근의 허용 전단력을 산정하였다. 그 결과 내부충전 콘크리트의 압축강도가 증가되고, 전단철근의 직경 증가 및 배근간격이 줄어들수록 ICP말뚝의 허용 전단력이 향상됨을 알 수 있어 다양한 조건에 부합하는 ICP말뚝을 설계할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 3가지 허용 전단력을 고려하여 이 연구에서 목표로 하는 ICP말뚝의 허용 전단력(상시 120 kN, 지진시 160 kN)과 비교한 결과, Table 4에 나타난 바와 같이 40 MPa의 내부충전 콘크리트를 사용하고, D10의 전단철근을 200 mm로 배근할 경우 상시 128.4 kN, 지진시 170.8 kN을 확보할 수 있어 목표 허용 전단력이 만족함을 알 수 있다. 전단철근 배근간격 200 mm를 결정한 이유는 배근간격이 150 mm인 경우에 비하여 철근량이 감소되고 배근작업성도 우수할 것으로 기대하였기 때문이다.

3. 시험체 제작 및 시험 방법

3.1 사용 재료

ICP말뚝을 제작하기 위해 국내 I사에서 KS F 4306¹⁵⁾ 기준에 따라 기성품으로 제작되고 있는 $\phi 450-70t$ 규격의 PHC말뚝을 이용하였으며 PHC말뚝에는 인장강도 1,450 MPa 이상의 9.2 mm PC강재를 8개 사용하였다. 내부충전 콘크리트는 다양한 조건의 물성을 검토하였으며 콘크리트의 충전성 향상과 강도 확보를 위하여 슬럼프 120 mm, 굵은 골재의 최대치수 20 mm, 설계기준 압축강도 40 MPa의 일반 콘크리트를 사용하였다. 한편 보강된 전단철근으로 설계기준항복강도 400 MPa의 D10 이형철근을, 축방향 철근으로는 설계기준항복강도 400 MPa의 D22 이형철근을 사용하였다. 사용된 PHC말뚝, 내부충전 콘크리트, 전단철근 및 축방향 철근의 종류 및 물리적 특성은 Tables 5~7에 나타난 바와 같다.

3.2 시험체 제작

3.2.1 원심성형 말뚝 본체

PHC말뚝을 제작하는 기존의 공정에 전단철근을 배근하는 공정을 삽입하여 내부충전 콘크리트를 현장 타설하기 전의 ICP말뚝 본체를 제작하였다. ICP말뚝 시험체는 현

Table 5 Physical properties of PHC pile ($\phi 450-70t$)

	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Compressive strength (MPa)	Effective prestress of concrete (MPa)	Transformed sectional area (mm ²)
PHC pile	450	70	86.8	4.0	86.13

Table 6 Physical properties of infilled concrete

	Specified slump (cm)	Maximum size of coarse aggregate (mm)	Specified concrete strength (MPa)
Concrete	12	20	40

Table 7 Physical properties of reinforcing bars

	Nominal diameter (mm)	Nominal section area (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)
D10	9.53	71.33	618	505
D22	22.2	387.1	631	524

장에서 적용하고 있는 허용응력설계법에 기초하여 설계하였으며, 이에 대한 내용은 2.2절에 기술한 바와 같다.

ICP말뚝에 사용된 전단철근의 형상은 내부충진 콘크리트의 충전성, 제작과정에서 배근 및 결속의 용이함, 원심성형으로 인한 탈락의 방지, 사인장 균열과 전단철근의 배치 방향 등을 고려하였다. 최종적으로 Fig. 3에 나타난 바와 같이 폐쇄된 직사각형 형태로 제작된 철근 2개를 서로 교차하도록 배치한 후 주위의 PC강재 및 나선철근에 결속하여 고정하였다. 말뚝 총 길이 3,000 mm에 대해 200 mm 간격으로 전단철근을 배근하였으며(Fig. 4(b)), 배근공정이 끝난 후에는 PC강재를 긴장하였다. 그 후 콘크리트를 2회에 걸쳐 분할 타설하고(Fig. 4(c)), 원심성형 시간에 따라 총 4단계 회전속도로 조절하여 약 15분 동안 원심성형을 실시하였다(Fig. 4(d)). 이와 같은 방법으로 ICP말뚝을 제작할 경우, 전단철근의 시공성을 확보하고 그 피복두께를 35 mm 이상 확보할 수 있어 콘크리트구조설계기준¹⁰⁾에서 규정하고 있는 프리캐스트 콘크리트의 최소 피복두께 10 mm와 프리스트레스트 콘크리트 최소 피복두께 30 mm를 모두 만족할 수 있다. 또한 내부 공간을 확보함으로써 원심

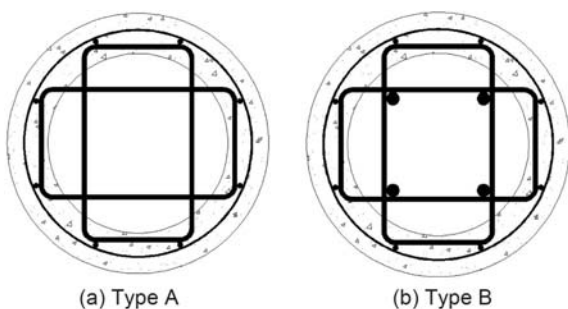


Fig. 3 Sectional view of ICP pile reinforced with shear and longitudinal reinforcements

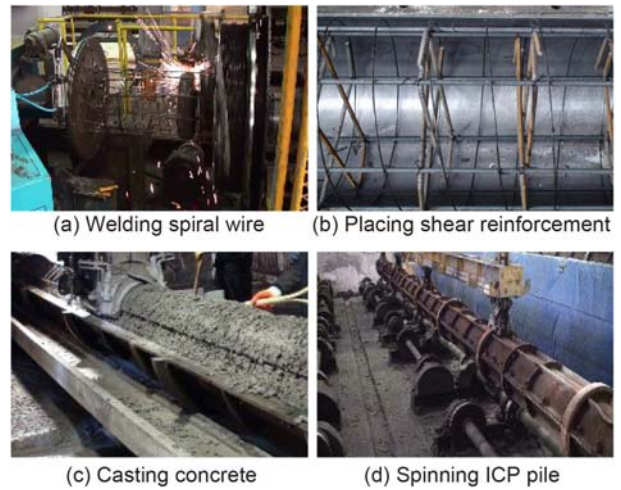


Fig. 4 Manufacturing process of ICP pile

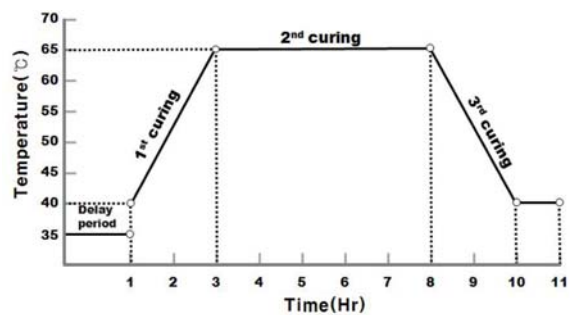


Fig. 5 Steam curing process

성형 시 콘크리트의 충전성도 확보할 수 있다. 원심성형이 끝난 몰드는 양생실로 이동하여 11시간 동안 Fig. 5와 같이 3단계 순서에 따라 증기양생을 실시하였고, 최고 양생온도는 65°C로 조절하였다.¹⁶⁾

3.2.2 내부충진 콘크리트 타설

내부충진 콘크리트를 타설할 때, 말뚝의 시공 현장 조건을 반영하고 내부충진 콘크리트의 충전성능을 평가하기 위해 오거를 이용하여 지반을 굴착하였다. 그 후 말뚝을 수직으로 배치하고 Fig. 3(a)와 같이 말뚝 중공부 단면에 진동다짐기를 이용하여 콘크리트만 충전한 Type A 시험체 3개와 Fig. 3(b)와 같이 축방향 철근을 삽입한 후 말뚝 내부에 콘크리트를 충전한 Type B 시험체 3개 등 총 6개의 시험체를 제작하였으며, 콘크리트 타설 시 트레미관과 진동다짐기를 이용하여 재료분리 발생 가능성을 최소화하였다. 이후 콘크리트를 현장에서 타설 후 28일 동안 기건양생을 실시한 후 시험을 수행하였다.

3.3 ICP말뚝의 전단강도 시험 방법

ICP말뚝의 전단강도는 KS F 4306¹⁵⁾에서 제시하는 시험방법에 따라 측정하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 말뚝 총 길이 3,000 mm에 대해 1,900 mm를 지간으로 하여 축력의 도입 없이 최대용량 1,000 kN의 말뚝 전용시험기

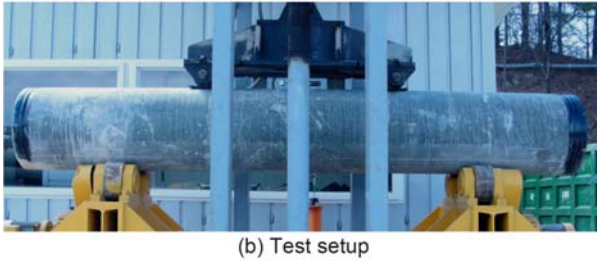
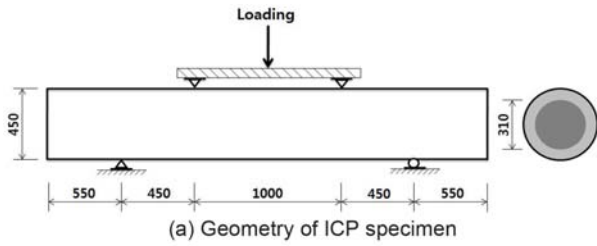


Fig. 6 Specimen configuration and test setup

를 사용하여 변위 제어 방법으로 연직하중(P)을 가하였다. 하중 가력시 재하점에서 국부파괴가 일어나지 않도록 고무판 받침을 설치하였으며, 하중과 처짐은 시험기에 부착된 로드셀과 말뚝중앙부에 설치된 100 mm LVDT를 이용하여 측정하였다. 측정된 하중을 바탕으로 다음 식 (6)을 이용하여 말뚝의 전단강도를 산출하였다. 여기서, Q_c 는 전단강도(kN), P_c 는 전단 지간 내에 경사균열이 발생했을 때의 하중이다.

$$Q_c = \frac{P_c}{2} \quad (6)$$

4. ICP말뚝의 전단강도 시험 결과 분석

4.1 전단강도 시험 결과

4.1.1 시험체 파괴 양상

KS F 4306¹⁵⁾에 따라 전단지간에 대한 유효깊이 비(ald)를 1.0으로 계획하여 전단강도 시험을 실시한 결과 휨이 발생하는 시험체 중앙부에서 초기에 휨 균열이 발생하였다. 그 이후, 연직하중이 증가함에 따라 휨 균열이 발달하면서 1번째 경사균열이 최고하중의 약 60% 수준에서 발생하였다. Fig. 7은 시험이 진행되는 과정에서 표시한 균열양상을 보여주고 있다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 하중이 증가함에 따라 균열이 지간 전체에 걸쳐 나타났으며, Type A 시험체의 경우 평균 450 kN, Type B 시험체는 평균 545 kN 전후에 초기 경사균열이 발생하였다. Type A 시험체는 경사균열이 발생한 이후에도 추가되는 하중을 지지하여 새로운 경사균열이 발생하였고, 약 750 kN의 하중에서 휨 구간의 PC강재 파단과 함께 1개의 휨 균열로 변위가 집중되면서 최종 파괴되었다(Fig. 7(a)~(c)).

한편 축방향 철근을 추가로 보강한 Type B 시험체는 시험기 용량의 한계로 인해 모두 파괴점까지 시험을 진행하지 못하고(Fig. 7(d)~(f)), 하중이 900 kN 전후에 도달하였을 때 시험을 종료하였다. 말뚝 인장부의 균열의 폭이

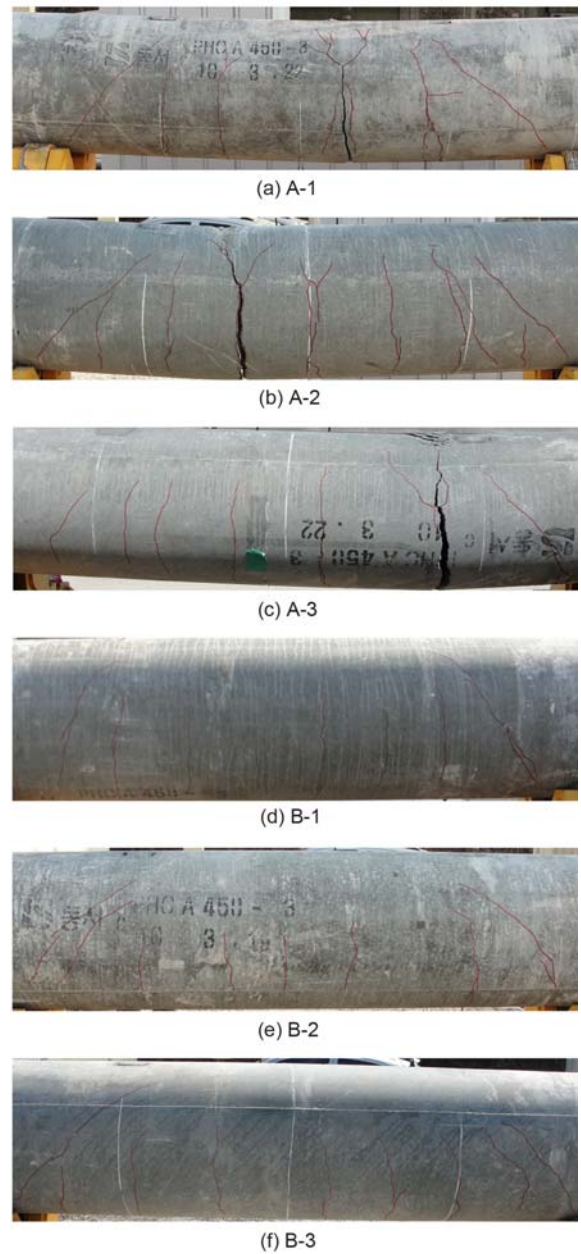


Fig. 7 Crack patterns of ICP pile after shear test

Type A 시험체에 비해 작게 관찰되었으며, 최고하중은 약 20% 이상 증가된 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 ICP 말뚝의 ald 가 1.0임을 고려해 볼 때, 전단철근, 내부충전 콘크리트 및 말뚝 본체가 일체로 거동하며 전단 균열을 억제함으로써 전단파괴를 방지하고, 휨 균열의 전진과 압축연단 콘크리트 파쇄에 의한 휨 파괴를 유도한 것으로 판단된다. 또한 축방향 철근을 보강한 경우에는 다월 효과가 추가되어 전단 저항능력이 더욱 향상되는 것으로 나타났다.

4.1.2 전단균열강도 및 최대 전단력 분석

식 (6)에 나타난 바와 같이 ICP말뚝 시험체의 전단균열강도는 초기 경사균열 하중에 1/2배를 하여 계산하였다. 그 결과 Type A 시험체는 각각 223.5 kN, 233.3 kN,

216.0 kN을, Type B 시험체는 각각 263.8 kN, 274.7 kN, 280.3 kN을 얻었다. I사에서 제공한 동일한 직경의 기존 PHC말뚝 시험 성적서¹⁷⁾에서 제시한 전단균열강도 106.9 kN과 비교하였을 때, Type A는 평균 210%, Type B 시험체의 경우 평균 255%에 해당하는 결과를 나타내어 기존 PHC말뚝의 전단균열강도를 약 2배 이상 증진시킬 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 최고하중의 경우 Type A 시험체는 평균 744.7 kN, Type B 시험체가 평균 917.2 kN 이상으로 측정되어 기존 PHC말뚝의 최고하중 361.0 kN에 비해 각각 206%, 254% 이상 향상됨을 알 수 있어 최대 전단력 역시 2배 이상 증가함을 확인하였다.

Fig. 8은 전단강도 시험을 통한 ICP 말뚝 시험체의 연직하중과 초기 경사균열 하중 이후에 측정된 중앙부 처짐의 관계를 나타낸 것이다. 최초의 경사균열 하중 이전에 얻은 초기 처짐은 매우 작은 값을 나타내며 불안정한 데이터로 측정되어 도시하지 못하였다. 또한 시험체 B-3의 경우 전단 시험 중의 데이터 전송에 문제가 발생하여 중앙부 처짐 변위를 측정하지 못하고 최고하중만을 나타내었다.

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 ICP말뚝은 초기 경사균열이 발생한 뒤에도 급격한 하중감소 없이 추가의 하중을 지지하며 서서히 파괴되는 특성을 나타내고 있다. Type A 시리즈의 경우, 초기 경사균열 이후 최고하중에 도달할 때까지의 처짐이 평균 15.3 mm에 이르렀으며, 최종 파괴가 휨 파괴에 기인하는 특성을 나타내었다. Type B 시리즈는 시험기기의 가력 용량 문제로 인하여 파괴에 도달하지는 못하였지만, 실험을 종료한 하중점의 강성이 초기 경사균열 시점에 비하여 크게 감소하지 않았음을 알 수 있다. 따라서 파괴 시에는 더욱 높은 수준의 값으로 최대 전단력이 측정될 것으로 판단된다. 이러한 결과를 종합하여 볼 때, ICP 말뚝 내부에 배근된 전단철근과 축방향 철근이 경사균열 발생 이후에도 균열 면을 통하여 높은 수준의 전단력을 효과적으로 전달한 것으로 판단된다.

Table 8 Results of shear test

		First inclined crack load (kN)	Maximum load (kN)	Midspan deflection after first inclined crack ⁽²⁾ (mm)
Expected max. load ⁽¹⁾		-	703.6	-
Conventional PHC pile		213.9	361.0	-
Type A	A-1	447.0	749.0	13.7
	A-2	466.6	749.1	15.8
	A-3	432.0	736.1	16.4
Type B	B-1	527.5	903.6 ⁽³⁾	10.0 ⁽³⁾
	B-2	549.3	897.1 ⁽³⁾	10.8 ⁽³⁾
	B-3	560.5	950.8 ⁽³⁾	-

⁽¹⁾Calculation on the basis of eq.(6)

⁽²⁾Midspan deflection measured after first inclined crack

⁽³⁾Termination of loading before failure

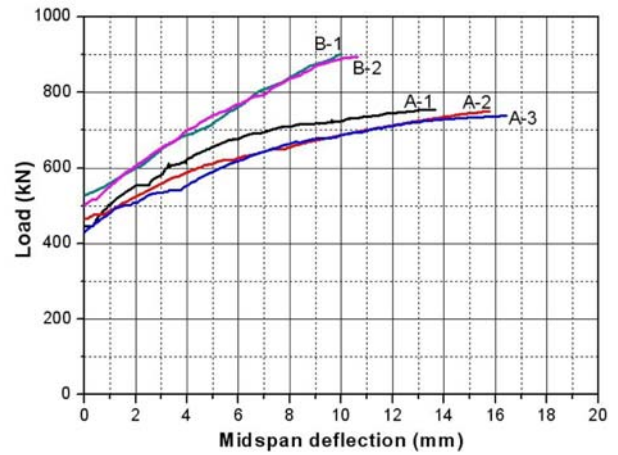


Fig. 8 Load-midspan deflection curves plotted after first inclined crack

4.2 ICP말뚝의 전단강도 계산

4.2.1 개요

2.2절에서 수행한 허용응력 설계를 통해 내부충전 콘크리트, 전단철근의 설계조건을 이용하여 제작된 ICP말뚝 시험의 최대 전단력과 비교하기 위하여 강도설계법에 따라 전단강도를 계산하였다. 강도설계법을 이용할 경우, ICP말뚝이 저항할 수 있는 최대 전단강도를 간단한 계산식을 이용하여 예측할 수 있어 말뚝의 최대 성능을 평가하는 데에 효과적이라고 판단된다.

강도설계법에 근거한 ICP말뚝의 전단강도 계산식은 식 (7)과 같이 말뚝 본체(V_p), 내부충전 콘크리트(V_c) 및 전단철근(V_s)이 부담하는 각각의 전단강도를 합산하는 방법을 적용할 수 있다.

$$V_n = V_p + V_c + V_s \quad (7)$$

4.2.2 원심성형 말뚝 본체의 전단강도

말뚝 본체의 전단강도 V_p 를 계산하기 위해 KS F 4306¹⁵⁾에서 제시하고 있는 아래 식 (8)을 이용하여 계산하였고, 그 결과 V_p 는 186.4 kN이다.

$$V_p = \frac{2tI}{S_o} \times \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{ce} + 2\phi\sigma_t)^2 - \sigma_{ce}^2} \quad (8)$$

여기서, t 는 말뚝의 두께(mm), I 는 중심축에 관한 콘크리트 환산 단면 2차 모멘트(mm^4), S_o 는 중심축 이상의 단면 중심축에 대한 환산 단면 1차 모멘트(mm^3), σ_{ce} 는 유효 프리스트레스(MPa), ϕ 는 0.5, σ_t 는 콘크리트의 인장강도로 5.39 MPa이다.

4.2.3 내부충전 콘크리트의 전단강도

ICP말뚝 내부에 충전되는 콘크리트의 전단강도 V_c 는 국내기준¹⁰⁾에서 제시하는 간편식인 식 (9)를 이용하여 계산하였고, 그 결과 V_c 는 88.3 kN이다.

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (9)$$

여기서, f_{ck} 는 내부충전 콘크리트의 설계기준압축강도로 40 MPa이며, b_w 는 내부충전 콘크리트의 직경, d 는 내부충전 콘크리트의 압축연단에서 긴장재 도심까지의 거리이다.

4.2.4 전단철근의 전단강도

ICP말뚝 부재축에 직각으로 배근되는 전단철근의 전단강도 V_s 는 식 (10)을 이용하여 계산하였고, 그 결과 V_s 는 77.1 kN 이다.

$$V_s = \frac{A_w f_y d}{s} \quad (10)$$

여기서, f_y 는 전단철근의 항복강도 400 MPa이다. 또한 s 는 전단철근의 배근간격인 200 mm이고 전단철근의 단면적과 단면의 유효깊이를 각각 나타내는 A_w 와 d 는 2.2.3 절의 허용응력 설계와 동일한 값을 적용하였다.

4.3 전단 시험결과와 계산값의 비교

Table 9에 나타낸 바와 같이 식 (7)에 의하여 계산된 ICP말뚝의 전단강도는 351.8 kN이다. 한편, 전단시험 결과 ICP말뚝 Type A와 Type B 시험체의 최대 전단력 평균값은 각각 372.4 kN, 458.6 kN으로 측정되어 계산된 강도에 비하여 약 5% 및 30%를 상회하는 안전측의 값을 나타내었다. 이러한 결과는 전단강도 간편식과 전단철근의 다리수 등에 포함되어 있는 안전율과 축방향 철근의 다월 효과를 반영하지 않은 안전측의 계산 과정에 기인하는 결과라 사료된다. 그러나 KS F 4306¹⁵⁾에서 제시하는 전단강도 시험 방법으로는 ICP말뚝의 전단파괴를 얻을 수 없으므로 정확한 전단강도를 알 수는 없으나, 이 연구에서 얻은 것보다 높은 전단 저항력이 있음을 알 수 있다. 따라서 KS 규격과는 다른 방법으로 전단파괴를 유도한다면 ICP말뚝의 전단

보강 효과를 정량적으로 파악할 수 있으리라 판단되며, 이에 대한 연구는 추후에 보다 면밀히 수행할 계획이다.

또한 Table 9에 나타낸 바와 같이 허용응력 설계법으로 계산된 ICP말뚝의 허용 전단력은 128.4 kN인 반면, 시험에 의하여 측정된 Type A의 전단균열강도와 최대 전단력은 각각 224.3 kN과 372.4 kN으로 측정되었다. 따라서 현재 현장에서 적용하고 있는 허용응력설계를 ICP말뚝의 전단 설계에 적용할 경우, 경사균열에 대하여는 약 1.7, 전단강도에 대한 안전율 약 2.9 이상, 축방향 철근을 추가로 보강한 Type B 시험체는 경사균열 및 전단강도에 대한 안전율을 각각 2.1 이상, 3.6 이상을 확보하는 것으로 나타났다.

ICP말뚝의 상시 허용 전단력을 120 kN으로 목표하였음을 감안할 때에 축방향 철근을 배근하지 않더라도 전단 저항력에 대하여는 2.9 이상의 높은 안전율이 확보됨을 알 수 있다. 또한 전단철근과 내부충전 콘크리트를 기성 PHC 말뚝에 적용함으로써 PHC말뚝이 갖고 있는 취약점인 전단 저항력을 효과적으로 증진시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 현재 적용하고 있는 허용응력설계법의 안전율이 합리적인가에 대한 문제는 말뚝 설계 전반에 걸친 심도 있는 검토를 통하여 논할 수 있으리라 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 기존 PHC말뚝의 전단 저항력을 향상시키기 위하여 전단철근 및 내부충전 콘크리트로 보강한 ICP말뚝을 제안하였다. ICP말뚝의 전단보강 효과를 평가하기 위하여 KS F 4306의 전단강도 시험 방법에 따라 α 를 1.0으로 계획하여 ICP말뚝의 전단시험을 수행하였다. 시험 결과는 허용응력설계법으로 설계된 허용 전단력 및 강도설계법에 의하여 예측된 전단강도 계산값과 비교 검토하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 허용응력설계법에 따라 말뚝직경 450 mm, 두께 70 mm의 원심성형 말뚝 본체에 D10의 이형철근을 200 mm 간격으로 배근하고, 설계기준압축강도가 40 MPa인 내부충전 콘크리트를 현장 타설하여 ICP말뚝을 제작하였다. ICP말뚝을 설계할 때에 목표 허용 전단력은 상시 120 kN, 지진시 160 kN이었으며, 그 값은 기존의 교대 기초 설계자료를 토대로 결정된 것이다.
- 2) ICP말뚝의 전단균열강도를 측정하기 위하여 Type A, Type B 등 2종류의 시험체에 대하여 시험을 실시하였다. Type A 시험체의 경우, 초기 경사균열 하중이 기존 PHC말뚝에 비해 평균 210%로 향상되었으며, 최고 하중은 평균 206% 이상 향상되었다. 또한 축방향 철근이 보강된 Type B의 경우 초기 경사균열 하중 및 최고하중이 PHC말뚝에 비해 평균 255%, 254% 이상 향상되었다. 따라서 ICP말뚝 내부에 배근된 전단철근과 축방향 철근이 경사균열 발생 이후에도 균열면을 통하여 높은 수준의 전단력을 효과적으로 전달한 것으로 판단된다.

Table 9 Comparison of shear strength

		Shear strength (kN)	
Conventional PHC pile	First crack ⁽¹⁾	107.0	
	Maximum	180.5	
Test (avg. value)	Type A	First crack ⁽¹⁾	224.3
		Maximum	372.4
	Type B	First crack ⁽¹⁾	272.9
		Maximum	458.6 ⁽²⁾
Allowable stress design ⁽³⁾		128.4	
Expected strength ⁽⁴⁾		351.8	

⁽¹⁾First inclined crack strength

⁽²⁾Termination of loading before failure

⁽³⁾Calculation result based on eq. (1)

⁽⁴⁾Calculation result based on eq. (7)

- 3) 전단 시험 결과 ICP말뚝 Type A와 Type B 시험체의 최대 전단력의 평균값은 각각 372.4 kN, 458.6 kN으로 측정되었다. 이 값은 강도설계법에 의하여 계산된 강도에 비하여 약 5% 및 30%에 해당되는 값이다. 다만, 모든 시험체가 휨으로 파괴되는 양상을 보였기 때문에 정확한 전단강도를 알 수는 없으나, 이 연구에서 얻은 것보다 높은 저항력을 갖고 있음을 알 수 있다. ICP말뚝의 정확한 전단강도를 파악하기 위해서는 다른 시험 방법이 요구되며, 이에 대해서는 후속 연구에서 수행할 계획이다.
- 4) 허용응력설계법에 따라 설계된 ICP말뚝의 허용 전단력은 128.4 kN으로서 시험에 의하여 측정된 최대 전단력(Type A: 372.4 kN, Type B: 458.6 kN)에 비하여 Type A는 약 2.9 이상, Type B는 약 3.6 이상의 안전율을 나타내었다.

감사의글

이 논문은 (주)하경엔지니어링의 지원과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0024924).

참고문헌

1. 최승선, "PHC 말뚝의 콘크리트 고품질화를 위한 제언," 콘크리트학회 논문집, 14권, 6호, 2002, 41 pp.
2. 천영수, 박종배, 심영중, "조립철근망을 사용한 PHC 말뚝과 기초판 접합부의 역학적 성능 검증 및 현장시공 사례," 콘크리트 학회지, 22권, 5호, 2010, 71 pp.

3. 한국원심력콘크리트공업협동조합, 파일 조업 통계, 2010.
4. 송태인, "강관말뚝을 PHC말뚝으로 변경시 판단절차서," 쌍용건설 기술 가을호, Vol. 48, pp. 32~36.
5. 황영철, 조천환, "국내 말뚝기초의 현황과 발전방향," 한국지반공학회지, 21권, 2호, 2005, pp. 10~11.
6. 한국토질및기초기술사회, "강관말뚝과 PHC말뚝을 결합구조로 용접시킨 매입형 복합말뚝(HPC : hybrid composite pile)의 설계 및 시공방법," 지반과 기술 가을호, 5권, 3권, pp. 33~37.
7. 최진우, 주형중, 남정훈, 윤순중, "FRP-콘크리트 합성말뚝의 개발," 한국복합신소재구조학회 논문집, 1권, 2호, 2010, pp. 20~28.
8. Pando, M., Filz, G., Dove, J., and Hopper, E., "Interface Shear Tests on FRP Composite Piles," ASCE International Deep Foundations Congress, Orlando, Florida, Vol. 2, 2002, pp. 1486~1500.
9. 大岩健治郎, 富山勝三, 梁島郁, "기성 콘크리트 말뚝의 현황," 주택기술정보, 75호, 1996, pp. 141~157.
10. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준해설," 기문당, 2007, 523 pp.
11. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준해설, 부록 별도 설계법, 기문당, 2003, 405 pp.
12. 대한토목학회, "도로교설계기준해설 제5,8장 말뚝기초의 설계," 2008, 1008 pp.
13. 류기송, "PHC 말뚝기초의 설계," 농공기술 학술논문, 43호, 1994, pp. 27~37.
14. 한국도로공사, "도로설계 실무편람, 3장 구조물공," 1996, pp. 14~42.
15. KS F 4306, "프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝," 2003, 51 pp.
16. (주)IS동서 콘크리트 종합 카탈로그, 2009, 24 pp.
17. 한국콘크리트학회, "내부충전 합성 PHC 말뚝의 설계법 개발 및 성능평가," 2010, 144 pp.

요약 이 논문에서는 기존 PHC말뚝의 전단성능을 향상시키기 위하여 전단철근과 내부충전 콘크리트로 보강한 ICP말뚝을 제안하였다. 허용응력 설계법을 바탕으로 전단철근 및 내부충전 콘크리트를 설계하였으며, 이를 바탕으로 2종류의 시험체를 제작하여 KS규격에 따라 전단시험을 수행하였다. 전단시험 결과, KS규격에 의거한 시험방법으로는 전단파괴를 얻을 수 없었으나, 제안된 방법에 의한 전단보강효과는 충분히 검증할 수 있었다. ICP말뚝 시험체의 전단 저항력은 기존 PHC말뚝에 비하여 평균 2배 이상으로 증진되는 것으로 나타났다. 또한 축방향 철근을 추가 보강한 ICP말뚝 시험체의 전단 저항력은 기존 PHC말뚝에 비하여 평균 2.5배 이상 증진되었다. 한편 허용응력설계법에 따라 결정된 ICP말뚝의 허용 전단력에 비하여 시험으로 측정된 전단강도는 약 2.9 이상의 안전율을 갖는 것으로 나타났다.

핵심용어 : PHC말뚝, 내부충전 콘크리트, 전단철근, 전단강도