

매입말뚝의 표준설계 및 시공컨설팅 기법 및 적용 사례 소개

- SDA공법으로 시공하는 PHC말뚝 중심으로 -



채수근

지에스이앤씨(주)
대표이사
(ceo@gsenc.co.kr)



박정호

지에스이앤씨(주)
기업부설연구소 소장/부사장
(pjh605@hanmail.net)



류경렬

지에스이앤씨(주)
지반조사·기초부/이사
(gsenc@chol.com)



김준호

지에스이앤씨(주)
기업부설연구소 책임연구원/차장
(gsenc@chol.com)

1. 서론

설계기준강도가 78.5MPa인 PHC말뚝(Pretension spun High-strength Concrete pile, 고강도 콘크리트말뚝)이 1991년 일본에서 도입된 이후에 1990년대 말까지는 $\Phi 300 \sim \Phi 500$ mm PHC말뚝, 2000년부터는 $\Phi 500 \sim \Phi 600$ mm PHC말뚝을 주로 사용하고 있다.

그러나 2010년부터 고층 또는 대규모의 건물과 아파트, 공장, 항만구조물, 장대(長大)한 도로 및 철도 교량을 중심으로 큰 지지력이 발휘되는 말뚝에 대한 수요가 증가하면서 현재 $\Phi 700 \sim \Phi 1200$ mm 대구경 PHC말뚝까지 사용이 확대되고 있다. 특히 대구경 PHC말뚝이 대규모로 사용된 아파트 현장의 적용사례를 통해 대구경 PHC말뚝의 높은 현장 적용성이 확인되었다(채수근 등, 2013, 2014). 또한 설계기준강도가

110MPa인 초고강도(Super Strength, SS) PHC말뚝이 2012년도부터 사용되면서 고강도 PHC말뚝은 물론이고 현장타설 콘크리트말뚝이나 강관말뚝보다 안정성과 경제성에서 유리한 것이 확인됨에 따라 현재 사용량이 급증하고 있다. 지난해 건설안전 규제가 강화되면서 기초말뚝의 중요성이 높아진 결과 2014년 출하량이 600만톤을 넘었으며 금년에는 700만톤 이상 될 것으로 예상된다.

이와 같이 PHC말뚝의 수요는 급증하고 있지만 말뚝의 설계와 시공법은 좀처럼 개선되지 않는 실정이다. 시멘트밀크의 배합비와 장비규격을 규정한 표준 시방서와 이를 고려한 지지력 산정식이 없는 상황에서 여러 건설사와 설계자들은 PHC말뚝의 설계지지력을 과거보다 30% 이상 높여 적용하고, 초고강도 PHC말뚝은 고강도 PHC말뚝보다 30~70% 이상 큰 설계지

지력을 적용하고 있다. 그 결과 설계지지력과 장비규격 미달에 따른 공사비 증가, 공기지연 등 문제가 나타나고 있다.

이에 따라 지에스이앤씨(2012)와 채수근 등(2013, 2014)은 PHC말뚝의 표준설계 및 시공방법을 연구하고 여러 현장에서 설계 및 시공컨설팅을 수행하면서 문제점을 꾸준히 개선해 왔다. 본고에서는 기초말뚝의 설계 및 시공상의 여러 문제점을 상세히 제시하였으며, 안전한 기초말뚝공사는 물론이고 원가절감 및 공기단축을 실현할 수 있는 말뚝설계 및 시공 컨설팅 기법을 소개하고 장차 개선할 점을 제안하였다.

2. PHC말뚝

2.1 특성

1998년도에 한국표준협회에서 고강도 콘크리트말뚝(PHC말뚝)의 재료와 단면성능을 $\phi 300 \sim \phi 1200\text{mm}$ 까지 규정하였으며, PHC말뚝의 치수와 형상은 그림 1 및 사진 1과 같다. PHC말뚝은 pretension 방식으로 원심력을 이용하여 중공(中空) 형태의 원형으로 제조하고 있으며 $\phi 300 \sim \phi 600\text{mm}$ 인 중·소구경 말뚝의 선단부는 폐쇄형, $\phi 700 \sim \phi 1200\text{mm}$ 인 대구경은 개방형이다.

현재 국내 말뚝제조사에서는 설계기준강도가 78.5MPa인 고강도 PHC말뚝과 110MPa인 초고강도 PHC말뚝을 양산하고 있으며, 말뚝본체의 허용축방향하중이 커서 말뚝본수가 감소되어 원가절감과 공기

단축이 가능하고 항타 내력(耐力)이 크기 때문에 건전도(健全度, integrity)가 높아 안전한 기초말뚝이 될 수 있다. 반면에 PHC말뚝은 휨강도가 크어도 불구하고 적재, 운반, 하차 및 이음시 충격과 편타로 인한 파손과 휨균열이 발생할 수 있다.

2.2 표준성능

현재 고강도 PHC말뚝은 $\phi 400 \sim \phi 1200\text{mm}$ 까지 20개사 27개 공장에서 제조하고 있으며, 초고강도 PHC말뚝은 $\phi 500\text{mm}$ 부터 6개사에서 제조하고 있다. PHC말뚝은 5~15m까지 1m단위로 A~C종을 생산하고 있으며, 표 1에서 보는바와 같이 큰 차이나는 허용축방향하중을 제외하고 단면력은 고강도와 초고강도 PHC말뚝이 동일하다.

3. 설계 및 시공시 문제점

3.1 설계, 견적 및 발주시 문제점

① 설계단계 문제점으로는 일본의 지지력 산정식을 도입하여 제안한 국내 학회식으로 산정한 허용 지지력은 현장지지력과 차이가 크고, 시공법, 시멘트밀크 배합비 및 장비규격 결정에 대한 오류가 있다. SPT-N치를 60까지 사용하여 허용지지력을 설계하고, 시공법별 지지력 차이 몰이해, 너무 크거나 작은 설계반력으로 말뚝 배치, 말뚝길이 산정 없이 설계도면에 말뚝직경과 설계지지력

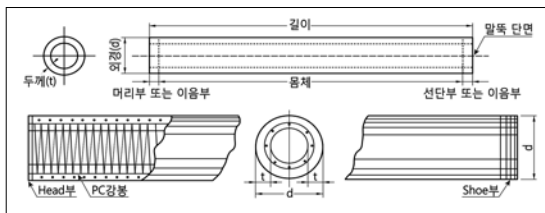


그림 1. PHC말뚝의 치수(한국표준협회, 2003)



사진 1. PHC말뚝(삼표파앤씨, 2010)

표 1. 고강도 PHC말뚝과 초고강도 PHC말뚝의 표준성능표(A종 기준)

말뚝 외경 (mm)	말뚝 두께 (mm)	기준휨모멘트 (n=0)		콘크리트 단면적 A _c (cm ²)	환산 단면적 A _e (cm ²)	환산단면 2차모멘트 I _e (cm ⁴)	환산 단면계수 Z _e (cm ³)	허용축방향하중 P _o *(kN)	
		균열 M _{cr} (kN·m)	파괴 M _u (kN·m)					고강도 말뚝	초고강도 말뚝
400	65	54.0	81.4	684	702	99,580	5,104	1,120	제조하지 않음
450	70	73.6	110.8	836	859	156,000	7,121	1,370	
500	80	103.0	155.0	1,056	1,085	247,549	9,902	1,730	2,960
600	90	166.8	250.2	1,442	1,480	496,407	16,547	2,360	4,040
700	100	264.9	397.3	1,885	1,936	896,396	25,611	3,090	5,290
800	110	392.4	588.6	2,384	2,447	1,496,598	37,415	3,910	6,690
900	120	539.6	809.3	2,941	3,021	2,351,613	52,258	4,830	8,260
1000	130	735.8	1,104	3,553	3,648	3,528,736	70,575	5,840	9,970
1100	140	932.0	1,398	4,222	4,332	5,099,592	92,720	6,930	11,840
1200	150	1,177	1,766	4,948	5,078	7,147,677	119,128	8,120	13,880

주 1) 허용축방향하중(고강도말뚝 : P_o*= (f_{cr}/4-σ_{ce}) x A_e, 초고강도말뚝 : P_o*= (f_{cr}/3.5-σ_{ce}) x A_e)
 2) 설계기준강도(고강도말뚝 : 78.5MPa, 초고강도말뚝 : 110MPa)
 3) PHC말뚝 표준성능표는 삼표피앤씨(주), 대림C&S(주) 'PHC PILE 자료' 참조

만 제시, 말뚝공사 특별시방서 부재 또는 오류도 문제점이다. 특히 시추공수와 조사심도 부족, NX 규격 대신 BX규격으로 시추, 투수시험 누락, 토사 및 암반분류 오류, N치 측정오차, 전석(轉石, boulder)과 핵석(核石, corestone) 조사부실 또는 표기오류는 지반조사의 가장 큰 문제점이다.

- ② 견적단계 문제점으로는 시공법 선정과 길이견적 오류(지층, 말뚝직경, 설계지지력 크기와 관계없이 풍화암반내 1~2m 또는 N치 50/5에 관입지)가 대표적이다.
- ③ 발주단계에서는 말뚝공사에 자재(말뚝과 시멘트)와 말뚝재하시험을 말뚝공사와 함께 발주하는 것이 문제점이다.

3.2 시공시 문제점

- ① 지반조건과 시공조건이 지반조사 자료나 설계내

용과 상이하고 너무 큰 선단지지력이나 설계지지력 적용에 따른 시공법 변경, 장비규격(전용기, 천공 모터와 해머 용량)이 미달되거나 노후장비 투입, 시공법에 적합한 시방서 부재, 부실한 시험시공과 재하시험으로 설계조건과 현장조건에 적합한 시공관리기준을 제시할 수 없는 것이 문제이다.

- ② 특히 시멘트밀크 배합비와 충전 관리 부실, 마찰지지력을 무시하고 무리하게 천공길이와 말뚝길이를 늘리거나 과도한 경타 횟수에 따라 말뚝의 건전도가 떨어지는 것이 가장 큰 문제점이다.
- ③ 또한 현장기술자의 말뚝공사에 대한 무지와 무관심, 말뚝시공업체에서 시공법과 말뚝길이를 임의로 변경하여 공사비가 증가하고 공기가 지연되는 사례가 많은 것도 중요한 문제점이다.
- ④ 말뚝공사에서 재하시험업체를 선정하거나 시험하고, 재하시험자의 분석오류와 현장을 지원할 기술력 부족도 문제이다.

4. 표준설계 및 시공컨설팅 기법 소개 및 개선할 사항

4.1 컨설팅 단계별 검토사항

표준설계 및 시공컨설팅을 통해 변형하지 않은 표



그림 2. PHC말뚝의 표준설계 및 시공컨설팅 단계

준말뚝을 사용하여 안정성과 경제성을 동시에 확보한 사례를 소개함으로써 컨설팅의 중요성을 알리고자 한다. 말뚝설계 및 시공컨설팅은 그림 2에서 보는 바와 같이 설계단계, 발주단계, 시공단계 및 완료단계 등 네 단계로 구성되며, 각 단계별로 검토해야할 사항을 소개하였다.

가. 설계단계

설계단계에서는 기존 지반조사 자료를 검토하거나 필요시 추가지반조사를 수행하고, 기초형식 제안, 하중조건과 지반조건 및 시공조건을 고려하여 말뚝 직경과 규격(설계기준강도, A~C종)을 선정하고 시공법을 고려하여 직경별 설계지지력을 제안한다.

표 2와 표 3은 고강도 및 초고강도 PHC말뚝의 직경별 설계지지력과 설계효율을 제안한 것으로써 당사에서 설계 및 시공컨설팅을 수행한 여러 현장에서 적용했거나 1회 이음에서 추천하는 값이다. 그러나 말뚝을 2회 이상 이음하여 시멘트밀크와 교반한 모래퇴적층 또는 혈암(眞岩, shale)과 이암(泥岩, mudstone) 같은 약한 퇴적암반에 말뚝이 지지되고 부주면마찰력을 고려하는 현장에선 감소시켜 적용해야한다.

표 2. 고강도(78.5MPa) PHC말뚝의 직경별 설계지지력과 설계효율

말뚝직경 (mm)	말뚝두께 (mm)	설계지지력 (kN)	허용 축방향하중(kN)	설계효율 (%)	비고
400	65	900~1,000	1,120	80~92	소구경 말뚝
450	70	1,100~1,250	1,370	80~94	
500	80	1,400~1,600	1,730	81~95	중구경 말뚝
600	90	2,000~2,200	2,360	85~95	
700	100	2,600~2,800	3,090	84~93	대구경 말뚝
800	110	3,300~3,600	3,910	84~94	
900	120	4,000~4,500	4,830	83~95	
1000	130	5,000~5,400	5,840	85~95	
1100	120	5,900~6,400	6,930	85~95	
1200	150	6,800~7,400	8,120	84~94	

표 3. 초고강도(110MPa) PHC말뚝의 직경별 설계지지력과 설계효율

말뚝 직경 (mm)	말뚝 두께 (mm)	설계지지력 (kN)	허용 축방향하중 (kN)	설계효율 (%)	비고
500	80	2,100~2,500	2,960	71~87	중구경 말뚝
600	90	2,600~3,400	4,040	66~86	
700	100	3,600~4,500	5,290	68~87	대구경 말뚝
800	110	4,600~5,700	6,690	69~87	
900	120	5,600~7,000	8,260	68~87	
1000	130	6,800~8,500	9,970	68~87	
1100	140	8,000~10,000	11,840	68~87	
1200	150	9,400~11,500	13,880	68~85	

매입말뚝의 연직지지력을 산정하는 일반식은 식 (1)~(2)와 같으며 학회식(한국지반공학회, 2009; 대한토목학회, 2008; 대한건축학회, 2005), LH공사식(2008)과 표 4와 표 5의 채수근식(2007)을 이용하여 산정할 수 있다. 이중 학회에서 제안한 식은 일본에서 도입한 것으로써 국내의 지반조건과 시공방법이 일본과 매우 다르기 때문에 현장지지력과 차이가 있다. 특히 매입말뚝에서 지지력에 큰 영향을 주는 시멘트밀크 배합비(W/C)를 지반조건이나 지지력에 따라 명확하게 규정하지 않고, 50회까지 측정하는 N치를 60까지 환산하여 허용지지력을 설계하면 오차는 더 커질 수 있다.

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s = q_p A_p + \Sigma f_s A_s \quad (1)$$

여기서, Q_{ult} : 말뚝의 축방향 극한지지력(tf)
 Q_p : 선단극한지지력(tf)
 Q_s : 마찰극한지지력(tf)
 q_p : 단위면적당 선단지지력도(tf/m²)

A_p : 말뚝의 선단면적(m²)
 A_s : 말뚝의 마찰지지면적(m²)
 f_s : 단위면적당 마찰지지력도(tf/m²)

$$Q_a = (Q_p + Q_s) / F_s \quad (2)$$

여기서, Q_a : 말뚝의 장기 허용지지력
 F_s : 안전율

따라서 국내에서 검증된 매입말뚝의 연직지지력 산정식을 이용하여 설계지지력을 만족하는 말뚝길이를 산정하고 말뚝 직경별 예상길이도면과 시방서(시공법, 장비규격, 시멘트밀크 배합비, 재하

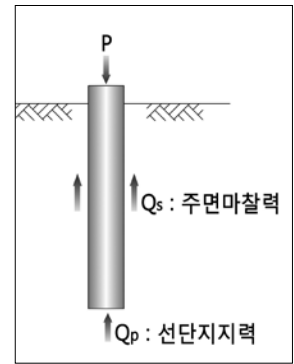


표 4. SDA매입말뚝의 지반종류별 단위선단지지력(q_p , tf/m²)

지반 종류	단위선단지지력(tf/m ²)	최대단위선단지지력(tf/m ²)	비고
점성토지반	15N'	600	N' ≤ 40,50
풍화토지반	20N'	1,000	
사력지반, 풍화암반(N' < 50/5)	25N'	1,250	
풍화암반(N' ≥ 50/5, D-4)	30N'	1,500	
기반암*	-	1,500~2,400**	

주) *기반암(연암반, 보통암반, 경암반)
 **암중, 코아회수율(TCR), 암질지수(RQD), 풍화도, 강도를 고려하여 적용

표 5. SDA매입말뚝의 시멘트밀크 배합비와 지반종류별 단위주면마찰력(f_s , tf/m²)

지반 종류	배합비	W/C(%)			비고
		59	68	83	
점성토지반		0.25N _s (≤10.0)	0.2N _s (≤5.0)	-	N _s ≤ 40,50 () : 제한치 (tf/m ²)
사질토지반*		0.25N _s (≤12.5)	0.2N _s (≤10.0)	0.15N _s (≤7.5)	
암반**		0.30N _s (≤15.0)	0.25N _s (≤12.5)	0.20N _s (≤10.0)	

주) *사질토지반 : 모래 지반, 모래·자갈 지반, 풍화토 지반

시험과 용접검사)를 작성해야한다. 사진 2는 SDA매입말뚝 시공장비 조합(전용기, 천공 모터와 해머, 시멘트밀크 플랜트)과 시공전경이다. 말뚝직경별로 상세한 장비조합에 대해서는 채수근 등(2014)을 참조한다.

매입말뚝에서 시멘트밀크의 물시멘트비(W/C)와 충전량은 연직지지력은 물론이고 수평지지력과 인발지지력에 직접 영향을 준다. 따라서 말뚝이 시공되는 지반의 투수성과 설계지지력 및 말뚝길이를 고려하여 물시멘트비(W/C)를 선택하는 것이 중요하며 배합비는 채수근 등(2014)을 참조한다.

한편 매입말뚝의 수평지지력 및 인발지지력 산정은 구조물기초설계기준해설(한국지반공학회, 2009)

을 참조한다. 만약 시멘트밀크로 말뚝주면 공간을 충전하지 않으면 매입말뚝의 수평지지력이 돌출말뚝이 되어 감소될 수 있으며, 마찰지지력 감소로 인발지지력도 감소한다. 따라서 큰 연직하중은 물론이고 수평하중과 인발하중이 작용하는 말뚝은 부배합의 시멘트밀크를 사용하여 말뚝주면 공간을 반드시 충전해야한다.

나. 발주단계

발주단계에서는 발주물량(장비규격 및 투입대수, 말뚝본수와 총 시공길이, 시멘트 수량, 공사기간, 재하시험과 용접검사 횟수, 두부정리와 폐기물 수량, 잡석 치환량 등)을 제안한다. 또한 현실자료를 검토하여 보완하고 현장설명회에 참여하여 설계내용과 시공방법에 대해 설명한다.

다. 시공단계

말뚝시공업체가 작성한 시공계획서를 검토하여 말뚝시공법과 시공장비의 적정성을 확인한다. 또한 재하시험업체가 작성한 재하시험계획서를 검토하고 재하시험 수량 및 시험방법, 재하장치 규격의 적정성을 확인하고 필요시 변경할 것을 요구한다.

말뚝공사중에는 예상말뚝길이나 시방서를 참조하여 시험시공 및 말뚝재하시험 관리 또는 재하시험을 직접 수행하고 시험시공과 재하시험 결과자료를 분석하여 본시공용 말뚝길이나 시공관리기준(말뚝길이, 시멘트밀크 배합비와 충전량, 경타 기준 등)을 제안한다. 매입말뚝 시공법중 국내에서 가장 많이 이용하는 SDA공법의 시공순서는 그림 3과 같으며, 'Casing screw + 개량해머 또는 정해머' 천공방식의 SDA시공 순서도와 시공법은 채수근 등(2014)을 참조한다.

라. 완료단계

컨설팅 완료단계에서는 시험시공 및 재하시험 결과자료를 분석하고 현장의 시공자료를 검토하여 설계내용과 비교하고 기초말뚝 컨설팅 내용을 보고서에 수록

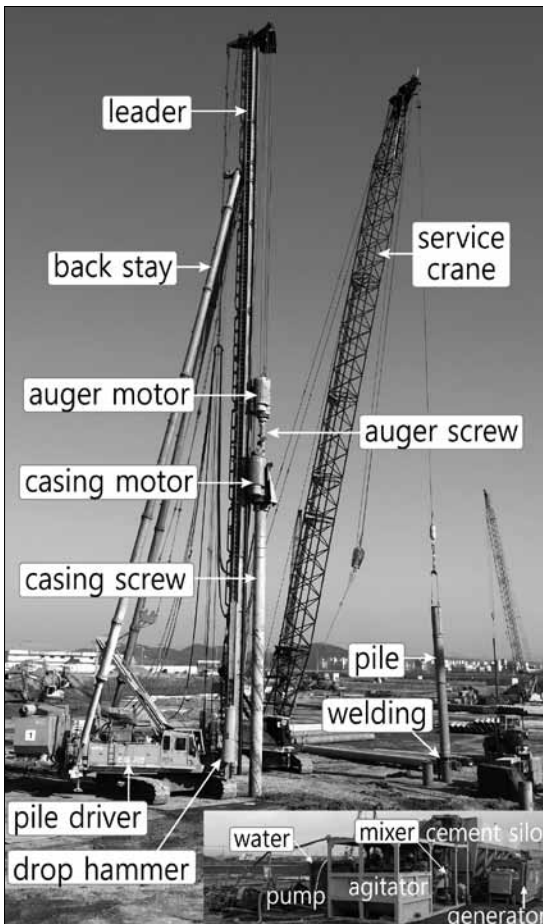


사진 2. SDA매입공법 장비조합 및 시공전경

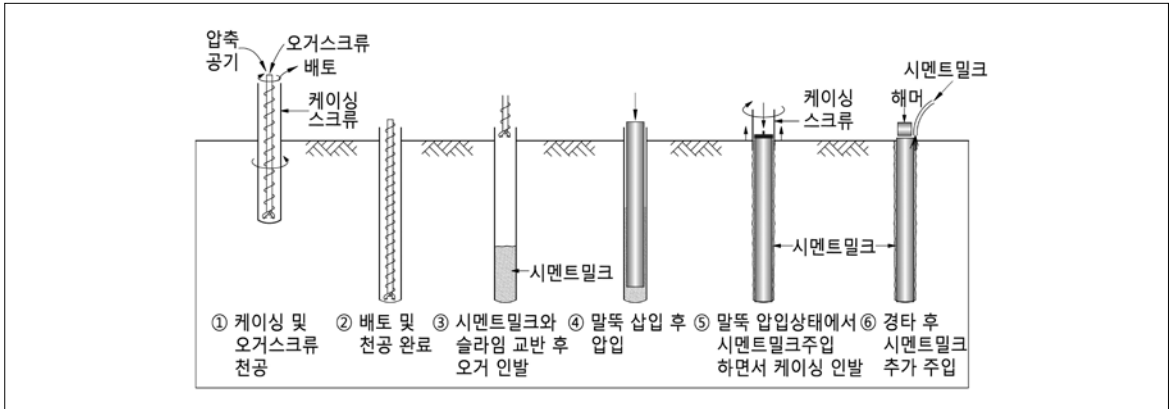


그림 3. SDA공법 시공순서도(Casing screw + Auger screw 천공방식)

한다. 말뚝재하시험을 수행한 경우 재하시험보고서를 작성하여 제출한다.

4.2 표준설계 및 시공컨설팅 사례 소개

가. 말뚝의 규격 및 직경별 설계지지력 적용 현황

1) 표준설계 및 시공기법으로 당사에서 수행한 컨설팅 사례는 표 6에서 보는 바와 같다. 표에서 $\Phi 500$ 고강도 PHC말뚝은 설계지지력을 1,500 또는 1,600kN 까지 적용하였으며, $\Phi 600$ 말뚝은 1,600kN에서 2,000 또는 2,100kN까지 적용한 것을 알 수 있다.

2) 최근에는 말뚝내력과 설계지지력을 증가시킨 초고강도 PHC말뚝의 사용이 급증하고 있다. 초고강도 PHC말뚝은 동일한 직경의 고강도 PHC말뚝에 비해 재료비는 약 15% 높은 반면에 설계지지력이 약 30~70% 크기 때문에 지반조건과 장비조건을 충족하는 현장에서는 경제적인 기초말뚝이 된다. 현재 국내에서 주로 $\Phi 500 \sim \Phi 600$ mm 초고강도 PHC말뚝을 사용하고 있으며 표 6에서와 같이 $\Phi 500$ 는 2,100kN, $\Phi 600$ 은 2,600kN까지 적용하고 있지만 설계지지력은 앞으로 더욱 증가할 것이다. 초고강도 PHC말뚝은 40m 이하 심도에 분포하는 기반암반 또는 매우 단단한 풍화암반(50/5이하)에 지지할 수 있는 현장에서 안

전하고 경제적으로 적용할 수 있다.

다만, 안전하면서 높은 설계효율로 초고강도 PHC말뚝을 사용하기 위해서는 말뚝재료와 제조공종별 품질관리수준, 시공장비 규격과 시공품질이 고강도 PHC말뚝 보다 엄격해야 한다.

3) 대구경 PHC말뚝은 중·소구경말뚝에 비해 큰 설계지지력을 적용할 수 있기 때문에 원가절감과 공기 단축이 가능하지만 말뚝길이가 너무 길어지면 장비한계에 따른 원가증가와 비효율적인 공사로 인해 비경제적인 기초말뚝이 될 수 있다. 따라서 대구경 PHC말뚝은 대구경 강관말뚝과 현장타설말뚝보다 경제성과 안정성이 확인된 대형건물과 구조물 및 공장에서 사용량이 증가하고 있다.

나. 말뚝전문가의 컨설팅기법 도입 필요성

건설사 또는 설계자마다 동일한 직경과 규격의 PHC말뚝에 대한 설계지지력 차이가 매우 큰 상황이며, 현장마다 공사비와 공사기간도 크게 다르다. 이것은 표준설계 및 시공기법으로 말뚝 설계여부와 말뚝전문가의 설계 및 시공컨설팅기법의 채택여부에 따라 달라진다.

따라서 설계지지력과 설계효율을 안전하게 적용하고 효율적인 기초말뚝공사를 하기 위해선 정밀지반조

표 6. PHC말뚝의 규격(고강도, 초고강도) 및 직경별 설계지지력 적용 현황

현장명 (시공사)	말뚝 직경, 규격 ^{주1)}	설계 지지력(kN)	말뚝길이 (m)	시공법 ^{주2)} (천공방식)	CM ^{주3)} (W/C, %)	지층 조건 ^{주4)}		공사 현황
						중간층	선단지반	
시흥배곧 H사	450(고)	1,200	25~38	SDA(A)	68	CM, S, RS	WR	공사중
	600(고)	2,100	25~38		75			
부산명지,신호 D,K,B,H,S사	500(고)	1,200	34~41	SDA(A)	59, 68	CM, S	S	완료
	600(고)	1,600	33~41					
구미교리 D사	500(고)	1,500	6~20	SDA(A)	68	RS	WR	완료
창원현동 J사	500(고)	1,500	8~11	SDA(A)	68	CM, G, RS	SR	완료
원주혁신 J사	500(고)	1,500	5~14	SDA(A)	68	CM, RS	WR, SR	완료
서산예천 D사	500(고)	1,500	9~17	SDA(A)	68	CM, RS	WR	공사중
대전관저 J사	500(고)	1,500	5~12	SDA(A)	68	RS	WR	완료
경주황성 D사	500(고)	1,600	6~25	SDA(JH)	83, 68	F(G, S)	WR, SR	완료
광주역동 D사	500(고)	1,600	3~25	SDA(JH)	83	F(G, RS)	SR	완료
				SDA(A)	68	RS	WR	
천안불당 P사	500(고)	1,600	13~26	SDA(A)	68	RS	WR	완료
천안백석 P사	500(고)	1,600	12~21	SDA(A)	68	RS	WR	완료
울산강동 S사	500(초)	1,800	5~25	SDA(JH)	59	F(G), RS	WR, SR	완료
하남미사 W사	500(초)	2,100	13~26	SDA(JH)	75	G	WR, SR	완료
평택비전 W사	500(초)	2,100	6~20	SDA(A)	68	RS	WR	공사중
서울서초 W사	500(초)	2,100	3~15	SDA(A, JH)	83	S, RS	WR, SR	공사중
화성반월 D사	500(초)	2,100	7~30	SDA(A)	68	RS	WR	공사중
	500(고)	1,500	6~27					
김포풍무 W사	600(고)	2,000	5~24	SDA(A)	68	RS, WR	WR, SR	완료
천안불당 W사	600(고)	2,100	13~28	SDA(A)	83	RS, WR	WR	완료
천안불당 J사	600(초)	2,600	10~20	SDA(A)	59	RS	WR	완료
서울신내 T사	700(고)	2,600	17~29	SDA(A)	59	F, RS	WR	완료
	800(고)	3,300	8~27					
	900(고)	4,000	7~30					
	1000(고)	5,000	13~30					
인천송도 L사	700(고)	2,600	23~33	SDA(A)	59	CM, S RS, WR	WR	완료
	1000(고)	5,000	26~29	SDA(A)	59			
	1000(초)	9,500	33~38	SDA(A)	59			

주 1) 말뚝규격, (고) : 고강도 PHC말뚝(78.5MPa), (초) : 초고강도 PHC말뚝(110MPa)

2) 천공방식, (A) : 오거(Auger bit), (JH) : 잭해머(개량해머), (AH) : 에어해머(정해머)

3) CM(W/C) : cement milk의 물시멘트 배합비(%)

4) F(매립), G(자갈), S(모래), CM(점성토), RS(풍화대), WR(풍화암반), SR(연암반)

사는 물론이고 표준설계 및 시공기법에 따라 말뚝전문가가 체계적으로 기술지원(consulting)하는 시스템을 도입할 필요가 있다.

4.3 표준설계 및 시공을 위해 개선할 사항

가. 말뚝재료에 대한 의견

1) 고강도 PHC말뚝은 일본에서 도입되었지만 국내 고강도 PHC말뚝의 내력(耐力) 산정시 일본(일본콘크리트공업주식회사, 2010)에서 적용하는 안전율 3.5 대신 4를 적용하고 있다. 그러나 국내 말뚝재료와 제조공정의 수준을 고려할 때 안전율을 개선할 수 있을 것으로 판단되므로 말뚝 본체로 강도시험하고 현장에서 재하시험으로 내력을 검증하여 안전율 3.5를 적용할 경우 설계지지력과 설계효율을 개선할 수 있다.

2) 초고강도 PHC말뚝은 말뚝내력 산정시 안전율을 일본처럼 3.5를 사용하고 있지만 실제 안전율 3.5를 만족하는 큰 내력이 확보되는지 말뚝 본체에 대한 검증이 필요하다. 본고에서는 안전율 3.5 적용이 증명될 때까지 초고강도 PHC말뚝의 설계지지력이 안전율 4로 산정되는 허용축방향하중을 초과하지 않도록 표 3과 같이 제안하였다. 그리고 현재 초고강도 PHC말뚝 제조사마다 명칭과 색깔이 달라 사용하는 현장기술자들이 혼동하기 쉬우므로 통일하여 사용 되길 바란다.

나. 시멘트밀크 배합비와 충전량에 대한 의견

1) 매입말뚝은 말뚝직경보다 큰 직경으로 천공하기 때문에 천공홀 주변지반이 교란되고 지중응력이 이완되므로 시멘트밀크를 충전하여 가능한 원지반상태가 되어야 한다. 말뚝직경보다 50mm 정도만 큰 케이싱으로 천공하면 시멘트밀크 충전량이 적고 충전이 쉬워 마찰지지력(Q_s) 확보가 용이하다. 반면에 그림 4에서와 같이 천공직경이 커지면 시멘트밀크 충전량이 많아지거나 충전이 어렵고, 충전하지 않으면 마찰지지력이 작아지는 문제점이 있다. 또한 말뚝의 기울기와 수

평이동(δ)이 허용기준을 초과하여 구조적인 보강이 필요할 수 있으며 흙막이벽체 변위에도 영향을 준다. 더군다나 말뚝주면 공간이 지하수로 충수되고 지하수가 동통로가 되면 장기지지력이 감소할 수 있다.

2) 결국 그림 4에서 보는바와 같이 말뚝주면 공간을 시멘트밀크로 채우지 않으면 마찰지지력 감소로 인해 연직 및 인발지지력이 작아지고, 수평하중을 받는 말뚝은 돌출말뚝이 되어 수평지지력(H_a)이 작아질 수 있다.

이와 같이 모든 종류의 말뚝지지력에 영향을 주는 마찰지지력은 표 5에서와 같이 동일한 지반에서도 시멘트밀크의 배합비(W/C)에 따라 큰 차이를 보인다. 따라서 큰 설계지지력과 설계효율을 활용하기 위해선 부배합의 시멘트밀크를 사용하여 말뚝주면 공간을 충전하는 것이 매우 중요하다.

3) 또한 천공직경이 작을수록 천공홀 바닥지반은 교란 및 응력이완 영역이 작아지며, 경타로 인해 말뚝의 선단지반이 다짐된다. 특히, 시멘트밀크가 원지반에 침투되고 슬라임과 시멘트밀크 교반으로 말뚝 선단지반이 보강되므로 매입말뚝은 장기적으로 선단지지력(Q_p)도 증가한다.

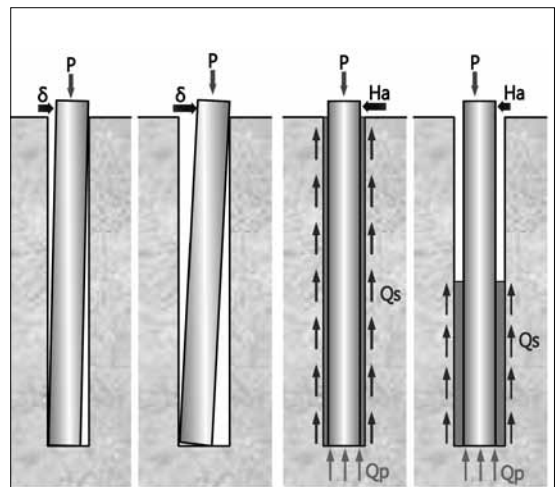


그림 4. 천공직경 크기와 시멘트밀크 충전길이 영향 개념도

5. 결론

최근 초고강도 및 대구경 PHC말뚝이 개발되고 안정성과 경제성이 확인되면서 PHC말뚝의 수요가 급증하고 있지만 과소 또는 과대시공하고 있으며, 설계 지지력과 장비규격 미달에 따른 공사비 증가 및 공기 지연 문제가 종종 발생하고 있다. 본고에서는 이와 같은 여러 문제점을 개선하여 안전한 말뚝공사는 물론이고 원가절감 및 공기단축을 실현할 수 있는 당사의 말뚝설계 및 시공컨설팅기법과 컨설팅을 수행한 현장을 소개하였다. 그러나 이와 같은 새로운 패러다임의 설계와 시공기법을 정착시키기 위해선 개선할 점이 많이 있으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 최적의 말뚝설계와 시공을 위해서는 충분한 시추공수와 심도까지 NX규격으로 조사해야하며 1m 간격으로 정확하게 N치를 측정하고, 투수시험 실시, 전석과 핵석의 분포와 크기조사 및 표기가 분명해야한다. 이와 같은 정밀지반자료를 얻기 위해선 말뚝전문가가 지반조사 과업지시서를 작성하고 건설사와 공사(公社)에서 지반조사업체에 직접 발주하는 것이 바람직하다. 또한 국내에서 적용하는 말뚝시공법과 지반조건, 말뚝과 장비규격에 적합한 지지력 산정식을 개발해야하며, 매입말뚝에서 선단지지력만을 강조하고 마찰지지력을 무시하는 잘못된 인식, PHC말뚝 내력 산정시 규격별로 다른 안전율 또는 작은 안전율을 적용 등은 반드시 개선해야한다.

2) 지반조건에 적합한 천공방식 선정, 시멘트밀크의 배합비(W/C)와 충전량, 충전방법 및 플랜트 규격 개선, 천공장비와 해머 규격 향상, 이음방법(용접, 무용접), 말뚝두부 보강법 개선을 포함한 말뚝공사 공종별 표준시공법을 보완해야한다. 또한 현장기술자의 기초말뚝에 대한 이해와 시공관리능력 향상을 위한 전문가 교육 및 말뚝공사 표준시방서와 매뉴얼 제정은 중요한 과제이다. 특히 기술자들의 표준시공법에 대한 무관심과 몰이해는 말뚝공사의 잘못된 시공관습 및 인식

과 함께 지지력 미달과 시공법 변경으로 공사비가 증가하는 요인이 되므로 반드시 개선해야한다.

3) 건물과 토목구조물의 대형화 및 연약지반 활용이 증가함에 따라 초고강도 및 장대(長大)말뚝의 수요가 많아지면서 말뚝 시공장비 규격은 개선되고 있지만 중·소 규격 장비의 노후도는 심각한 수준이다. 노후장비는 설계지지력 미달, 공기 지연, 공사비 증가, 안전사고 및 민원발생의 원인이 되므로 노후장비의 사용을 제한해야한다.

4) 말뚝직경과 지지력이 증가하면서 재하시험의 중요성도 매우 커지고 있다. 따라서 말뚝전문가가 현장에서 재하시험을 수행하거나 관리하고 시험결과에 따라 시공기준을 제시하는 것을 의무화하여 말뚝의 시공 품질을 높여야한다. 그리고 큰 직경 또는 큰 설계지지력을 적용하면서 작은 규격의 정재하시험 장비로 시험하거나 시험자료 분석 오류로 인해 재하시험에 대한 신뢰도와 기초의 안전이 저하되는 일이 없어야 한다. 특히, 말뚝시공사에서 재하시험업체를 선정하는 문제는 즉시 개선되어야한다.

5) 현재 도로 및 철도교량은 물론이고 건축물의 기초말뚝 설계시 건설사 또는 설계자마다 동일한 직경과 규격의 PHC말뚝에 적용하는 설계지지력과 설계반력 차이가 매우 큰 상황이다. 이와 같은 설계 분야의 비율은 본고에서 제안한 설계 및 시공컨설팅기법을 통해 표 2와 표 3에 제안한 설계지지력과 설계효율을 활용함으로써 개선할 수 있다.

참고 문헌

1. 대림 C&S(주)(2011), PHC PILE 자료.
2. 대한건축학회(2005), 건축기초구조설계기준, pp. 89~276. pp. 173~184.

3. 대한토목학회(2008), 도로교 설계기준 해설, pp. 838~860.
4. 삼표피앤씨(주)(2010), PHC말뚝 자료집.
5. 지에스이앤씨(주)기업부설연구소(2012), “대구경 PHC말뚝 (Φ700~Φ1200mm) 설계 및 시공표준화 연구보고서”, pp. 1~180.
6. 채수근(2007 a), “시멘트 밀크 배합비에 따른 다양한 지반 내 SDA 매입말뚝의 연직지지력”, 박사학위논문, 중앙대학교 pp. 1~262.
7. 채수근(2007 b), “SDA매입말뚝의 지지력 산정방법”, 특허청, 특허 제10-0792211호.
8. 채수근 등(2013), “대구경 PHC말뚝의 국내 사용현황 및 전망”, 한국지반공학회, ‘2013 기초기술위원회 세미나’, pp. 25~50.
9. 채수근 등(2014), “대구경 PHC말뚝 표준설계 및 시공기법(2판)”, 이엔지·북, pp. 84~177.
10. 한국지반공학회(2009), 구조물 기초설계기준 해설, pp. 293~346.
11. 한국표준협회(2003), 프리텐션방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝, KS F 4306, pp. 1~12.
12. 日本コンクリート工業株式會社(2010), TECHNICAL NOTE 2010, pp. 7~10.

