

연약지반에서의 건설과 해안공사도 활발해지고 내진설계법의 도입과 함께 구조물의 안전성에 대한 인식도 달라짐에 따라 기초구조보강을 위해 사용되는 말뚝은 좀 더 깊은 관입량과 큰 지지력을 필요로 하게 되었다.

PHC 파일의 특성

1. 개요

우리나라에서는 1960년대부터 1970년대 초반까지는 주로 RC 말뚝을 사용하였고, 1970년대 후반부터 1990년대 초반까지는 PC말뚝이 주류를 이루었다. 하지만, 구조물이 점점 고층화, 대형화되고 지가상승, 환경문제 등이 주요관심사로 떠오르며 종래에는 볼 수 없었던 각종의 특수공사가 증가됨에 따라 좀 더 발전된 말뚝기초공법이 요구되었다. 또한 종래의 건설구조물의 입지로써 경원시 되었던 연약된 연약지반에서의 건설과 해안공사도 활발해지고 내진설계법의 도입과 함께 구조물의 안전성에 대한 인식도 달라짐에 따라 기초구조보강을 위해 사용되는 말뚝은 좀 더 깊은 관입량과 큰 지지력을 필요로 하게 되었다. 결국, 이러한 여러가지 사회적 요구에 의해 기존PC말뚝의 개선책으로써 PHC말뚝이 실용화 되었고 현재는 대부분의 현장에서 PHC말뚝이 사용하고 있다.

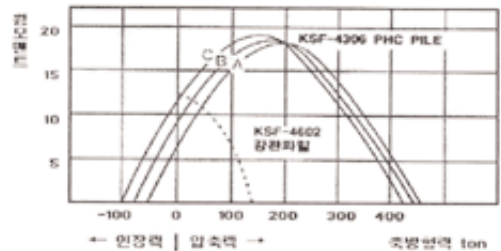
PHC말뚝은 1992년에 일본에서 기술을 도입하여 처음으로 생산되기 시작하였으며 이후 PHC말뚝의 생산량은 꾸준히 성장하여 현재는 국내 총 콘크리트 말뚝 생산량의 90%이상을 PHC말뚝이 점유하고 있는 실정이다.

2. PHC말뚝의 거동

말뚝내력은 일반적으로 중심축압내력 또는 순 휨균열 모멘트 및 순 휨파괴 모멘트로 평가되지만, 실제 시공에서는 축 방향력 및

휨모멘트를 동시에 받는 것이 보통이다. 따라서 휨과 축압의 조합을 곡선으로 표시한 IC(Interaction Curve)로 말뚝의 역학적 내력을 평가하는 것이 바람직하다. 다음의 그림 1은 PHC말뚝과 강관말뚝의 상대비교를 위하여 허용지지력을 같게 하여 IC를 그린 것이다. 강관말뚝은 축력이 0에서 휨모멘트가 최대이고 축력이 커지면 휨모멘트는 감소하므로 축방향하중작용시 파괴에 대한 내력은 PHC말뚝이 더 크게 된다.

[그림1] 휨모멘트와 축방향력의 관계



[표 1] 표준성능비교

다음의 표는 동일한 외경의 PHC말뚝과 강관말뚝의 성능비교에 대한 예를 나타낸 것이다.

구분	종별	외경D mm	두께 mm	환산단면적 cm ²	단면2차모멘트 cm ²	단면계수 cm ³	허용축하중 tf	단위중량 (kg/m)	
PHC 말뚝	A종	400	65	704	102,382	5,119	112	178	
		500	80	1,085	247,671	9,906	173	274	
		600	90	1,480	496,611	16,538	236	375	
강관 말뚝		400	9	7.5	91.8	17,400	877	110	87
		500	12	10.5	106.9	47,500	1,910	190	144
		600	12	10.5	193.8	83,200	2,780	230	174

여러현장의 시험들을 통해 PHC말뚝은 기존의 PC말뚝 및 강관말뚝에 비해 여러가지 측면에서 유리하다고 알려져 있다. 우선 일반 PC말뚝을 직타 시공시에 PHC말뚝으로 대체 사용할 경우 경제적인 효과도 있을 뿐 아니라 말뚝간격이 조밀하지 않아서 유통성과 시공성이 좋아진다. 또한 저공해 공법인 SIP공법의 적용시에는 공법자체의 시공비가 고가인 관계로 PHC말뚝으로 원가절감을 크게 도모할 수 있다.

PHC말뚝은 압축강도와 지지력이 높고 선단부와 두부에 강관이 부착되어 있어서 용접에 의한 이음이 확실하므로 종전의 강관말뚝과 대체시공이 가능하며 말뚝자체의 가격차이가 현저하기 때문에 말뚝의 심도가 깊을수록 많은 원가절감이 가능하다.

[표 2] PHC말뚝과 강관말뚝의 재료특성 및 경제성의 비교

다음의 표2는 PHC말뚝과 강관말뚝의 재료특성 및 경제성을 비교하여 나타낸 것이다.
↑ : 유리함, ↓ : 불리함, - : 보통

항목	PHC말뚝	강관말뚝	항목	PHC말뚝	강관말뚝
안정성	↑	↓	재료비	↑	↓
내부식성(내산성)	↑	↓	시공비	-	↑
수직허중설계시	↑	-	내구연한	↑	↓
횡하중설계시	-	↑			

PHC말뚝은, 콘크리트 강도가 현저하게 높은 것으로 800kgf/cm² 이상의 콘크리트를 사용한다. 이와 같은 고강도 콘크리트를 얻기 위해서는, 고성능 감수제를 사용하고 상압증기 양생후에 오토클레이브 양생을 하는 방법과 고성능 감수제 및 고강도 혼화재를 이용하여 상압 증기 양생을 되풀이 하는 방법을 사용하게 된다.

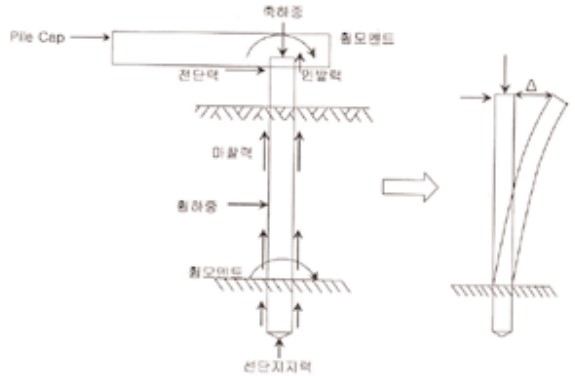
PHC말뚝은 PC말뚝에 비해 높은 압축강도의 콘크리트를 사용함으로써 허용응력을 높게 할 수 있고, 이로 인해 말뚝의 허용축방향 하중이 커지게 된다. 고강도 콘크리트는 골재와 시멘트 페이스트와의 결합이 강하기 때문에 뛰어난 내충격성을 나타낸다. 따라서 타격 공법에 의해 말뚝을 시공하는 경우, 단단한 중간층을 통과하는 관입이 용이해지며, 보다 큰 용량의 해머를 사용하여 시공속도를 앞당기는 것이 가능하고, 보다 좋은 지지력을 얻는다.

3. PHC말뚝의 요구조건 및 말뚝에 가해지는 하중

[표 3] PHC말뚝의 요구조건

구분	요 구 조 건
강도	고강도 확보, 지지력 증대, 단면의 크기 감소, 타격 및 충격에 대한 저항력 증가, 지내력 증가
내구성	크리프 및 건조수축의 감소, 공극률 감소, 투수계수 감소, 확산계수 감소, 수밀성 증가, 염분침투 저항성 증가, 화학적 저항성 증가, 동결융해 저항성 증대, 탄산화 저항성 증가, 내마모성 증가, 박리제어
사용성	Strain capacity 증가, 고탄성계수, 큰 변형률, 포아송비 증가, 작은 체적 변화를 확보(critical stress의 증가)→stone-like concrete
Prestressing	효율적인 부재의 저항력 증가 가능(압축력, 인장력, 휨, 비틀림, 전단)→ 단면감소, 강성증가(변위감소), 균열제어, 충격저항증대

[그림2] 말뚝에 가해지는 하중



4. 사용성

PHC말뚝에서 발생하는 균열에 대해서는 정확한 기준이 존재하지 않는다. 다만, KS규격에서는 균열의 허용범위에 대하여 사용상에 유해한 흠, 균열등의 결점이 없을 것이라고만 규정하고 있다. 여기에서 사용상의 유해한 균열은 장기허용축방향응력, 장기허용전단응력, 장기허용휨응력을 발현하는데 유해한 균열 등이 될 수 있을 것이다. 참고로 흠관에서 허용되는 균열의 범위는 건조수축에 의하여 발생한 거북이등 형상의 불규칙한 균열로서 균열폭은 0.05mm이하로 제한되어 있다. 한편, PHC말뚝은 다음과 같은 사용성 항목들을 고려해야 한다.

- 상부선단부근의 횡방향 변위
- 마찰지지층 상부 연약층내에서의 횡방향 변위
- 용접부의 균열 및 변위
- 중공부에 들어오는 토사 팽창압에 의한 횡방향 변위

다음의 표4에 PHC말뚝 사용시에 발생할 수 있는 변형, 파손 및 균열등의 문제들에 대해 나타내었다.

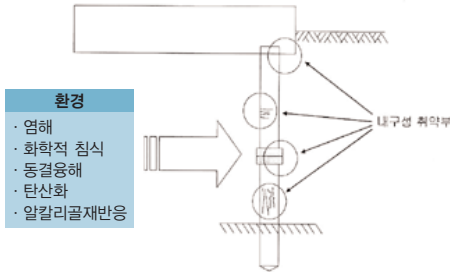
[표 4] PHC말뚝의 변형, 파손 및 균열

구분	원 인	대 책
두부의 파손	단면의 직각도 불량, 콘크리트의 강도부족	· 단면직각의 허용치 ≤ 2° · 콘크리트 시편으로 압축강도 확인
중간부의 파손	· 장애물로 인한 부근말뚝의 경사, 그후 합병형의 증대 · 타격중 인장력으로 말뚝에 동근상태로 실크랙이 발생해 서서히 증대하여 파손	· 장애물제거 · 선단부의 구조변경 · A중 → B중 → C중 · 프리스트레스가 증가된 입장내력의 증대 시행 · 인장력을 저감시키는 쿠션
중방향 균열	편심타격, 전석등의 장애물, 중간층 혹은 지지층 근방으로 말뚝 중공부에 토사가 들어와 내압으로 파손	· 개방형 슈를 폐쇄형으로 · 개방형 슈의 개방부를 작게 · +자 리브의 보강 · 선단부에 직경의 2배 정도의 부강편을 일체성형
횡방향 균열	편심타격, 인장내력의 부족, 세우기불량 말뚝이 경사된 대로 타격하여 중간부에 과도한 휨모멘트가 발생	· 단면직각도의 허용치 ≤ 2° · 세워타기 정밀도의 향상
선단부의 파손	펜슬형 슈가 횡타 중 밀려들어가 절단되거나 지대지반이 경사되어 선단부에서 미끄러짐 발생	· 펜슬형 슈를 전면철판으로 씌움. · 선단부에 말뚝직경보다 약간 작은 강관을 용접

[표 5] 내구성 영향인자와 고강도 콘크리트

구분	특징
염해	시멘트 혹은 고성능감수재(응력경화축진형)에 염화물이 다량혼입되어 있는 경우에는 그 영향이 증가하여 염화물 총량이 증가할 수 있어 주의를 요한다. 그러나 고강도 콘크리트의 경우는 물시멘트비가 작아 조직이 치밀함에 따라 염화물 이온의 침투가 억제되고 내부의 알칼리도가 높기때문에 저항성이 증가한다.
건조수축	콘크리트의 건조수축은 고강도화 할수록 작아진다. 반면 시멘트 수화반응 중 화학적 수축에 기인한 자기수축량은 대단히 커지므로 중요시되고 있다.
내동해성	내동해성은 고강도화할수록 우수해진다. 특히 초고강도 콘크리트로 될수록 AF제를 혼입하지 않아도 동해를 일으키지 않을 것으로 보고된 바 있다.
수밀성	고강도 콘크리트의 수밀성은 물시멘트비가 작음에 따라 조직이 치밀하여 대단히 우수하게 된다.
탄산화	탄산화는 물시멘트비의 영향을 크게 받는다. 즉 물시멘트비가 작아 고강도화 할수록 탄산화속도가 감소한다. 특히 물시멘트비가 25%이하일 경우에는 탄산화에 대한 영향이 거의 없는 것으로 연구된 바 있다. 고강도 콘크리트의 양생에서 고강도화 할수록 살수양생기간이 짧아지는 것은 탄산화 저항성이 크기 때문이다.

[그림 3] PHC 말뚝의 내구성에 영향을 미치는 주된 영향인자



5. PHC말뚝의 구조적 특성

5-1. 설계지저력

PHC말뚝의 콘크리트 설계기준강도는 최소 800 kg/cm^2 으로 기존의 PC말뚝설계기준강도 (500 kg/cm^2) 에 비해 대폭 향상된 것이다. 실제로 생산되는 말뚝의 경우 오토클레이브 양생을 종결했을 때에 대부분 $850\sim 900 \text{ kg/cm}^2$ 전후의 압축강도를 확실하게 얻을 수 있다. 이것은 PC말뚝의 콘크리트 압축강도 $500\sim 600 \text{ kg/cm}^2$ 에 비해 약 60~70% 정도 더 높은 강도를 나타내고 있는 것이다. 더구나 강도의 편차가 증기양생 콘크리트의 경우와 비교해 상당히 작고 변동계수는 4%이하로 알려져 있는데 이것은 오토클레이브 양생에 의해 시멘트의 경화가 거의 최종단계까지 도달하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, PHC 말뚝의 콘크리트 압축강도는 PC에 비해 월등히 높기 때문에 허용압축응력도를 크게 잡을 수 있다.

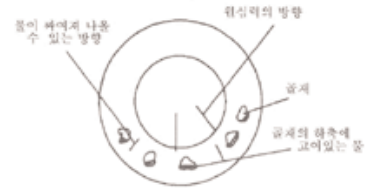
5-2. 타격에 대한 저항력

PHC말뚝은 상압에서 증기양생한 콘크리트에 비해 내충격성이 상당히 뛰어나다. 이것은 오토클레이브 양생에 의해 골재와 시멘트페이스트와의 결합이 극히 강하게 되어있기 때문이며, 이는 콘크리트의 압축강도가 높다는 것을 의미한다.

다음의 그림4과 같이 원심력 성형중 물이 빠져 나올 수 있는 물

은 골재의 하측에 모이고 골재와 시멘트페이스트와의 결합을 방해한다. 물은 수산화칼슘으로 포화되어져 있기 때문에 오토클레이브 양생하는 것에 의해 반응을 일으켜 골재와 굳게 부착된다. 이로인해 내충격성이 증가하는 것이다.

[그림4] 원심력 성형중 물의 분리



이와 같이 PHC말뚝은 타격에 대한 저항력이 크기 때문에 사용하는 말뚝 해머를 크게 할 수가 있고 이것만큼 시공효율이 높아 경제적이다. 또 중간층을 뚫기 위해 타격횟수를 늘려도 항타중의 파손확률이 낮고 지지층까지 확실하게 도달시킬 수 있다.

5-3. 말뚝의 저항력

지진력과 수평방향의 힘이 작용하면 말뚝은 지중에서 힘을 받는다. 같은 크기로 같은 배근의 PC말뚝과 PHC말뚝에 대하여 파괴 휨모멘트에 측면에서 비교하여 보면, 말뚝의 축방향 하중이 없는 경우는 PHC말뚝이 불과 10~20% 정도 큰 수치를 나타내지만 축력이 크게되면 그 차는 점점 더 크게 된다. 따라서 대부분 말뚝의 경우처럼 큰 축방향의 하중을 받으면서 힘을 받는 상황에서는 PHC말뚝이 훨씬 더 높은 안전율을 가지고 있다.

다음의 그림 5은 파괴 휨모멘트와 축력과의 관계를 나타낸 그래프이다. PC말뚝과 PHC말뚝을 비교해보면, 축력 N이 증가함에 따라 PHC말뚝의 파괴 휨모멘트가 크게 되는 것을 알 수 있다.

[그림 5] 파괴 휨모멘트-축력과의 관계

M_u - 파괴 휨모멘트, M_{Cr} - 균열 휨모멘트

