

# HCP(Hybrid Composite Pile) 말뚝의 연결부 성능 평가

(The Performance Evaluation of Hybrid Composite Pile Connections)



이 장 덕  
Yi, Chang-Tok  
(주)파일테크 전무  
공학박사, 토질및기초기술사



이 흥 수  
Lee, Heung-Su  
(주)한맥기술 실장, 공학박사  
hslee@hanmaceng.co.kr

## 1. 서론

말뚝은 상하부 구조에서 전달되는 수평력, 축력, 휨모멘트를 지반에 전달하여 구조물을 안전하게 지지하는 역할을 수행하는 것으로 작용력의 크기와 작용형태 및 지반조건에 따라 강관말뚝과 PHC말뚝이 주로 사용되고 있다.

건축구조물에서의 말뚝은 수평력이나 휨모멘트에 비해 축력에 의해 지배된다는 판단으로 축력에 대한 저항력이 큰 콘크리트말뚝을 선호하였으나, 근래 높이가 높은 건물 및 중요시설에 이용되는 건물 등을 중심으로 내풍설계 및 내진설계 등이 도입되면서 수평력에 대한 콘크리트말뚝의 적용성에 대한 검토가 대두되고 있는 실정이다.

말뚝 상부에는 수평력에 의해 모멘트가 작용하고 이러한 모멘트 때문에 말뚝상부에 인장응력이 작용한다. 콘크리트 말뚝의 경우 인장응력이 작용하게 되면 인장응력에 취약한 콘크리트말뚝의 특성 때문에 구조적으로 불리하다. 하지만 말뚝에 작용하는 모멘트는 말뚝상부에서는 크게 작용하지만 말뚝하부로 내려갈수록 급격하게 감소하게 되며, 이에 따라 말뚝하부에서는 축력이 지배적으로 작용하게 된다.

이와같은 힘의 작용에 적절하게 대응할 수 있는 방안으로 휨모멘트가 크게 작용하는 말뚝상부에는 강관말뚝으로, 축력이 크게 작용하는 말뚝하부에는 PHC말뚝으로 하여 부재의 효율적인 배치가 가능할 것으로 판단되며 이를 실현한 부재가 HCP(Hybrid Composite Pile)말뚝이다.

말뚝길이에 따른 휨모멘트의 분포와 부재의 저항정도를 나타내면 그림 1과 같다. 그림 1에서 보는바와 같이 모멘트가 크게 작용하는 말뚝의 상부는 모멘트 저항능력이 뛰어난 강관말뚝으로, 압축력이 주로 작용하는 하부는 콘크리트

말뚝인 고강도 콘크리트말뚝(PHC)으로 구성하고 용접으로 연결시켜 복합 말뚝형태로 말뚝을 합성시킴으로써 2가지 재료의 장점을 최대한 활용하여 경제성 및 말뚝기초의 안정성을 확보하는 것이 HCP말뚝의 주요 특징이다. HCP말뚝은 이미 시험항타를 통해 항타관입성을 검토하였으며 귀래교에 현장시공하는 등 활발히 적용되고 있으나, 본 연구에서는 강관과 콘크리트의 새로운 복합구조이므로 이를 구조적으로 검토·평가하였다.

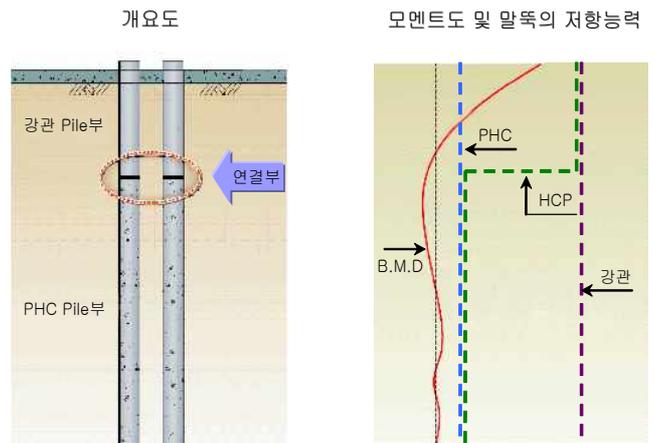


그림 1. 말뚝길이에 따른 모멘트 분포

## 2. HCP 말뚝의 연결부 특성

말뚝시공법의 기원은 항타말뚝에서 부터 시작되었으며 대부분의 말뚝의 지지력공식 역시 항타말뚝을 기본으로 유도되었다. 최근들어 이러한 항타말뚝이 소음, 진동 등 환경 문제로 인하여 매입말뚝 형식으로 바뀌어가고 있는 실정이지만 기본적으로 말뚝이 항타할 수 없다면 현장 적용에 많

은 한계가 있는 것이 사실이다. 그러므로 HCP말뚝도 매입 공법과 항타공법에 모두 적용할 수 있는 개념을 적용하였다.

말뚝의 극한지지력은 편의상 주변마찰력과 선단지지력의 산술적인 합으로 나타내는데, 선단지지력은 선단의 단면적에 대하여 지반이 감당할 수 있는 극한저항력을 발휘하여야 한다. 강관말뚝에서 하단이 개단(Open-Ended)인 경우에는 폐색효과(Plugging Effect)를 반영하여 실제 강재단면부의 크기에 관계없이 폐단(Closed-Ended)말뚝과 동일하게 간주하여 선단지지력을 검토한다. 하지만, 기존 실험결과에 의하면 폐색효과는 말뚝의 직경에 대한 관입깊이의 비(L/D)와 지반 상태 등에 따라 결정되는 것으로 폐색효과의 반영시 적용조건에 주의하여야 할 것이다(김명모, 1987). 하부가 PHC말뚝인 경우에는 말뚝을 폐색된 상태로 사용하므로 지반의 극한저항력 발휘에 문제가 발생하지 않는다.

해머로 말뚝항타시 말뚝에 작용하는 항타응력은 재료의 강도 이하로 관리되면서 최대한 관입이 이루어져야 최대한 말뚝지지력을 발휘할 수 있다. 일반적으로 강관말뚝의 최대 항타응력은 재료 항복응력( $f_y$ )의 90% 정도로 보고 있다. 그러나, 콘크리트 말뚝인 경우에는 말뚝에 적용하는 인장응력의 크기와 콘크리트의 압축강도에 영향을 받은 것으로 알려져 있다(AASHTO, 1983).

국내에 사용되고 있는 고강도 콘크리트 말뚝(PHC)의 A-type 인 경우 최대 항타 압축응력은 AASHTO 기준에 따르면 64MPa, 고속도로공사전문시방서에 따르면 48MPa 인 반면에 강관말뚝(STK400)의 최대항타 압축응력이 216MPa로 콘크리트와 강재의 재료적 차이에 따라 최대항타 압축응력의 차이가 크게 나타난다.

HCP를  $\phi 508-12t$  강관말뚝과  $\phi 500$  PHC말뚝을 사용하여 제작하는 경우에 대해 항타응력을 표로 나타내면 표 1과 같다.

표 1. 말뚝제원 및 허용항타응력

말뚝 구분	강관말뚝 ( $\phi 508-12t$ )	고강도콘크리트말뚝 ( $\phi 500$ A-type)
허용항타응력 압축응력(MPa)	0.9 $f_y$ (216)	AASHTO : 64 한국도로공사 : 48
순단면적(mm <sup>2</sup> )	18,700	105,600
최대항타력(kN)	4,030	6,750

말뚝항타시 HCP 말뚝의 경우 상부의 강관말뚝을 항타하게 되고 강관말뚝에 전달되는 압축력은 하부의 콘크리트 말뚝으로 전달되게 된다. 강관말뚝과 콘크리트말뚝의 접촉부는 단면적의 차이로 인해 강관말뚝에 의해 전달되는 항타하중으로 인해 콘크리트말뚝에 응력집중이 발생하므로 콘크리트 말뚝의 손상을 야기시킬 수 있다. 그러므로 강관말뚝에 전달되는 항타하중을 콘크리트 말뚝 두부면에 일정하게 분산시킬 필요가 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 실제 강관말뚝에 작용하는 하중을 콘크리트 말뚝 두부면에 균등하게 분산시킬 수만 있다면 콘크리트 말뚝의 파손은 발생하지 않을 것이다. 이는 콘크리트 말뚝의 단면적이 강관말뚝의 단면적보다 훨씬 크기 때문이다. 그러므로 그림 2와 같이 콘크리트 말뚝에 전달되는 하중을 분산시킬 수 있도록 콘크리트 말뚝과 강관말뚝 사이에 강관을 이용한 보강관을 부착시켜 말뚝 연결부의 보강뿐만 아니라 하중을 분산시키는 역할을 수행하게 된다. 연결관은 말뚝연결부의 안전성과 모멘트나 수평하중에 대해 저항할 수 있는 구조상세를 갖는 연결관을 사용하여야 한다. HCP말뚝 연결부에 대한 연결부 구조의 적정성과 건전성을 파악하는 것이 필요하므로 연결부에 대하여 수치해석과 휨실험을 수행하여 연결부 구조에 대하여 검토하고자 한다.

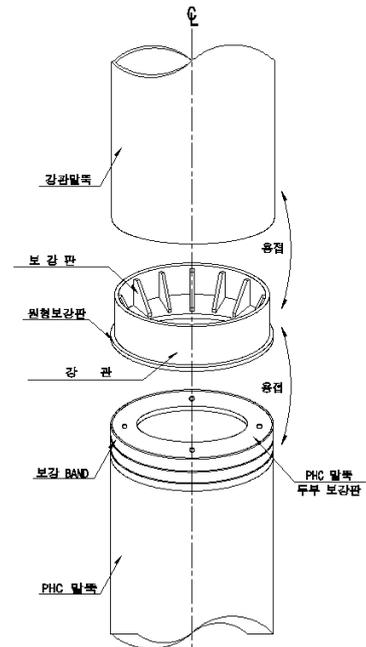


그림 2. 말뚝 연결부 보강 개념도

### 3. HCP말뚝 연결부의 유한요소해석

#### 3.1. 해석 개요

HCP말뚝은 서로 다른 재질과 강성을 가진 재료(강관말뚝과 PHC말뚝)가 결합되어 일체로 거동하여야 하므로 연결부 보강 방법에 따른 HCP말뚝의 구조적 안전성과 연결부 보강방법의 적정성을 확인하고자 범용유한요소프로그램인 Midas를 이용하여 실제와 유사하게 모델링하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통해서 HCP말뚝의 거동에 따른 응력을 파악하여 연결부의 안전성을 검토하였다.

#### 3.2. 해석모델 및 하중조건

연결부 위치를 중심으로 상하 각각 500mm 구간을 관요소와 입체요소로 모델링하였으며, 그 외 상부 강관말뚝과 하부 PHC말뚝은 FRAME 요소로 모델링하여 이음부의 상세해석을 수행하였다. PHC말뚝의 프리스트레스 4.0MPa은 PHC말뚝두부 입체요소의 mm<sup>2</sup> 당 4.0N을 수직력으로 재하하여 작용시켰다. 말뚝의 제원은 표 2에 상세하게 나타내었으며 연결부의 모델링 및 하중조건은 그림 3과 같다.

표 2. 말뚝 제원

구분	강관말뚝	PHC말뚝	결합구-강관	결합구-보강리브	·결합구-원형보강관, PHC말뚝-두부보강관
재질	STK400	fck=80MPa	SS400	SS400	SS400
규격(mm)	D500*12T	D500*80T A-TYPE	D476*12T	50*90*12T -12EA	D340~500*12T
길이(m)	5.7	13.0	0.1	-	-
탄성계수(MPa)	210,000	36,598	210,000	210,000	210,000
단면계수(mm <sup>4</sup> )	548.0×10 <sup>6</sup>	2,412.0×10 <sup>6</sup>	-	-	-

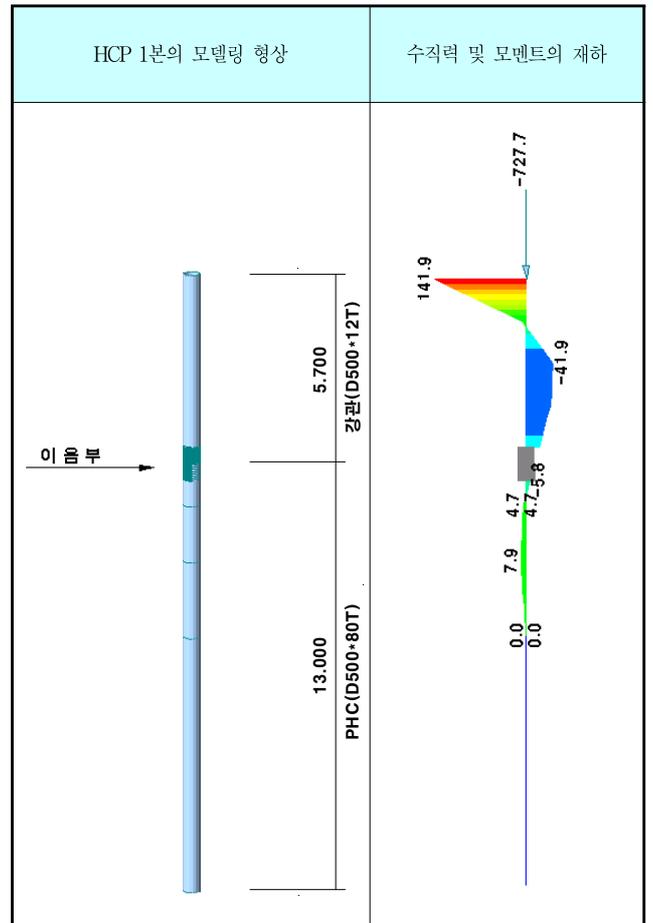
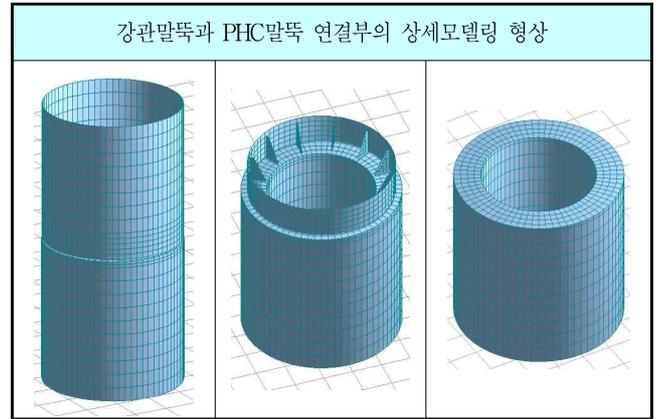


그림 3. 모델링 형상 및 하중재하 현황

#### 3.3. 해석결과

유한요소해석 결과에 따른 각 부재요소의 응력 발생현황을 그림 4에 나타내었으며, 해석결과에서 최대와 최소 발생응력을 표 3에 정리하였다. 그림 4와 표 4에서 보면, 강재로 구성된 강관말뚝과 연결부에 작용하는 응력이 재료의 허용응력 보다 작고, PHC말뚝의 상단 외측부(강관말뚝 하중 전달부)에 작용하는 최대압축응력이 17.0MPa으로 허용

응력인 20.0MPa에 87% 정도로 발생되어 HCP말뚝 부재 전체에 작용하는 응력이 허용응력 이내로 발생하는 것으로 나타났다.

따라서 수직력, 수평력, 모멘트의 작용에 따른 HCP말뚝 연결부의 보강 및 연결방법의 안전성이 확보된 것으로 판단된다.

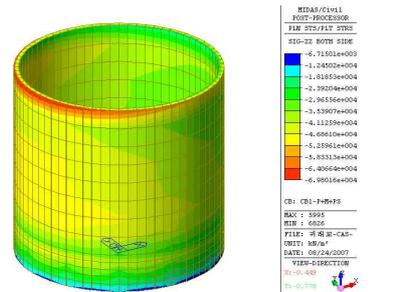
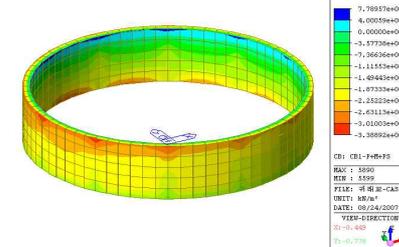
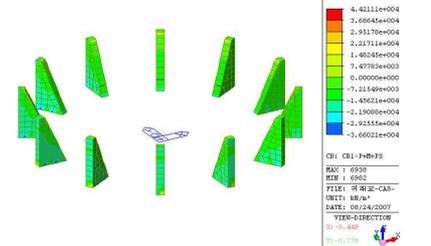
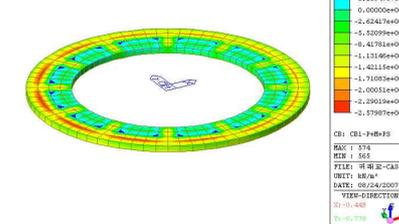
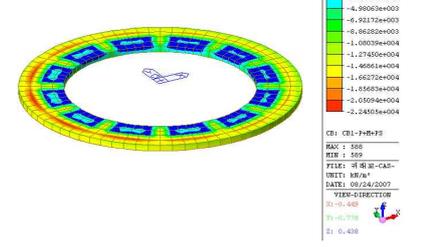
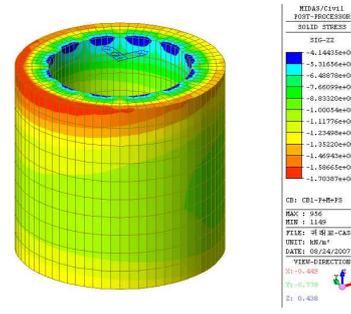
응력검토 01 - 강관말뚝		응력검토 02 - 결합구 강관	
			
$f_{c(\min)} = -6.7 \text{ Mpa}$	$f_{c(\max)} = -69.8 \text{ Mpa}$	$f_{t(\max)} = +7.7 \text{ Mpa}$	$f_{c(\max)} = -33.8 \text{ Mpa}$
응력검토 03 - 결합구 보강리브		응력검토 04 - 결합구 원형보강판	
			
$f_{t(\max)} = +44.2 \text{ Mpa}$	$f_{c(\max)} = -36.6 \text{ Mpa}$	$f_{t(\max)} = +6.0 \text{ Mpa}$	$f_{c(\max)} = -25.7 \text{ Mpa}$
응력검토 05 - PHC말뚝 두부보강판		응력검토 06 - PHC말뚝	
			
$f_{c(\min)} = -1.0 \text{ Mpa}$	$f_{c(\max)} = -22.4 \text{ Mpa}$	$f_{c(\min)} = -4.1 \text{ Mpa}$	$f_{c(\max)} = -17.0 \text{ Mpa}$

그림 4. 응력발생 현황

표 3. 해석결과

구 분	허용응력 (MPa)	작용응력 (MPa)	비고
응력검토 01 -강관말뚝	-140 ~ +140	-6.7	O.K
		-69.8	O.K
+7.7		O.K	
-33.8		O.K	
응력검토 03 -결합구(보강리브)		+44.2	O.K
-36.6		O.K	
응력검토 04 -결합구(원형보강관)	+6.0	O.K	
	-25.7	O.K	
응력검토 05 -PHC말뚝 두부보강관	-1.0	O.K	
	-22.4	O.K	
응력검토 06 -PHC말뚝	-20	-17.0	O.K
	+1	-4.1	O.K

#### 4. HCP말뚝의 휨실험

##### 4.1. 실험의 목적

HCP말뚝은 콘크리트말뚝과 강관말뚝의 장점을 발휘할 수 있도록 연결한 말뚝형태로 연결부위에서의 휨저항능력을 평가하는 것은 매우 중요하다. 강관말뚝이나 콘크리트말뚝은 이미 토목현장이나 건축현장에서 검증된 말뚝재료이므로 재료에 대한 검증은 필요없지만 연결부위는 HCP말뚝에만 있는 것으로서 연결부위에 대한 검증을 위해 휨실험을 수행하였다. HCP말뚝은 강관말뚝과 콘크리트말뚝 사이에 연결 보강판으로 보강하여 연결 보강판을 용접이음하였다.

실험은 연결부의 건전성을 파악하고 작용모멘트가 콘크리트말뚝의 모멘트 저항능력을 초과하는 것을 확인하기 위하여 KS F 4306에 따라 PHC말뚝의 파괴시까지 하중을 가하여 HCP말뚝에 대한 휨저항 능력을 평가하였다.

##### 4.2. 실험방법

프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝 (KS F 4306)에서는 표 4에 나타난 균열휨모멘트를 가하였을때 균

열이 발생하여서는 안되며, 연결부의 휨강도는 몸체의 파괴휨모멘트와 같거나 그 이상의 값을 갖도록 규정하고 있다. 또한 휨실험시의 재하방법은 그림 5와 같이 재하하도록 규정하고 있으며 연결부의 휨강도 실험은 지간 중앙에 연결부분을 일치시켜 실시하도록 하고 있다.

본 실험에서 사용된 PHC말뚝은  $\phi 500$  A-Type이며, 하중을 재하하면서 강관과 PHC의 연결부위에 균열이 발생할 때의 하중을 기록하여 연결부에 대한 안전성을 평가하였다. 실험시에 하중재하는 KS F 4306에 따라 그림 5와 같이 연결부에 순수휨모멘트를 유발하기 위해서 4점가력하였다.

표 4. PHC말뚝의 휨모멘트

외 경 (mm)	두께 (mm)	종 류	균열휨모멘트 kN·m (tf·m)	파괴휨모멘트 kN·m (tf·m)
$\phi 500$	80	A	103.0 (10.5)	155.0 (15.8)
		B	147.2 (15.0)	264.9 (27.0)
		C	166.8 (17.0)	333.5 (34.0)

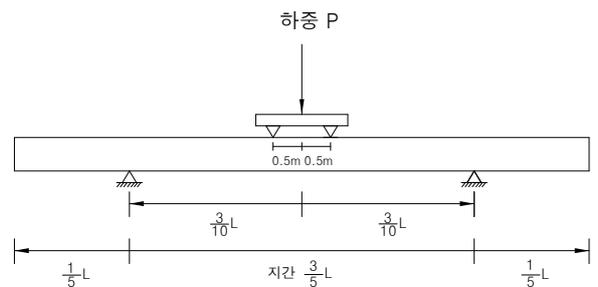


그림 5. 하중 재하도

##### 4.3. 휨실험 하중재하 현황

휨실험시 실험체 배치 상태와 하중재하 현황은 그림 6과 같으며, 하중작용에 따른 PHC말뚝에 발생한 균열 형상은 그림 7과 같다.



a. 휨실험체 전경



b. 하중제하

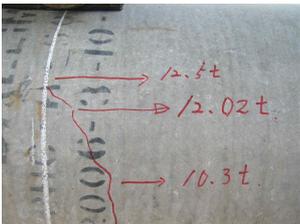
그림 6. 실험체 배치 현황



a. 시험하중 조건에 따른 균열관찰-1



b. 시험하중 조건에 따른 균열관찰-2



c. 시험하중 조건에 따른 균열관찰-3



d. 시험하중 조건에 따른 균열관찰-4

그림 7. 균열 발생 현황

#### 4.4. 실험결과 분석

KS F 4306에서 PHC의 균열휨모멘트는  $103.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 이며 본 실험에서는  $128.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 의 모멘트 작용시 PHC표면에 미세크랙이 발생하기 시작하였고 모멘트가 증가할수록 휨균열에 의한 PHC의 파괴가 진행되었으며, 강관과 PHC의 연결부에서는 몸체의 파괴휨모멘트인  $155.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 보다 큰  $163.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 의 모멘트에서도 파괴 및 균열의 징후가 발생하지 않아 HCP의 연결부가 PHC보다 먼저 파괴되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 실험결과를 검토해 보았을때, HCP의 연결부에 대한 보강 및 결합방법이 휨모멘트에 대해서 안전성을 확보한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

작용하중에 따라 합성구조(Composite Structure) 또는 복합구조(Hybrid Structure)를 적절하게 사용하여 재료의 효율성을 향상하고 경제성과 시공성의 향상을 유도하는 것이 요구되는 상황에서, 작용하중의 특성을 반영하여 강재와 콘크리트구조를 적절하게 사용하고자 한 것이 HCP말뚝이다.

본 연구에서는 HCP말뚝의 구조적 성능을 평가하고자 연결부에 대한 수치해석과 휨실험을 수행하였으며, 연구결과에 의하면 HCP말뚝의 연결부는 구조적인 문제가 없는 것으로 판단되며 용접부의 횡방향 저항력도 콘크리트말뚝 이상 확보되는 것으로 판명되었다. HCP말뚝은 PHC말뚝보다 시공성이 우수하며, 강관말뚝보다 경제성에서 우수하고 안전성 또한 강관말뚝에 비해 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

국립환경대학교 건설공학연구소, HCP(Hybrid Composite Pipe)의 관입성 분석 및 연결부의 건전성 연구, 2006

김명모, 개단 강관말뚝의 폐색효과에 대한 모형실험 연구, 대한토목학회논문집, 제7권 제3호, 1987, pp.175-181

한국도로공사, 고속도로공사전문시방서, 2005

한국산업규격 KS F 4306, 프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝, 1998

AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, Thirteenth Edition. Washington, DC., 1983