

강관말뚝과 PHC말뚝으로 구성된 복합말뚝



이 명 환 (주)파일테크 연구소 소장
김 동 수 (주)파일테크 대표이사
김 병 규 (주)파일테크 설계부 이사
(kbg0615@empal.com)

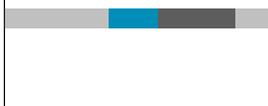
1. 머리말

말뚝은 지지층이 깊은 지반에서 구조물의 지지력을 확보하기 위해 설치된다.

국내에서 사용되고 있는 말뚝의 종류로는 기성 콘크리트말뚝, 강관말뚝, 현장타설 콘크리트말뚝 및 H형강말뚝 등이 있다.

기성 콘크리트말뚝으로서는 PHC말뚝(고강도 프리스트레스트 콘크리트 말뚝)이 사용되며 최대 장점은 저렴한 재료비에 있으나 두부정리시 폐기물이 발생하며 특히 기초 상판과 연결부분의 취약성으로 인하여 내진설계시 적용이 곤란하다.

강관말뚝은 기성 콘크리트 말뚝에 비하여 시공관리가 용이하고 재료의 특성상 수평력에 대해 강점이 있으나 다른 말뚝재료에 비하여 재료비가 고가이며 원자재의 대부분을 외국 수입에 의존하므로 수급 및 가격의 변화가 심할 수밖에 없다. 기성말뚝 가격은 2002년을 기준으로 볼 때 강관말뚝 대비 콘크리트말뚝의 재료비는 약 2배에 해당되었으나 세계원자재의 급등으로 인하여 2004년을 기준으로 강관말뚝대 콘크리트말뚝의 재료비는 3배에 달하다가 2008년에는 최고 5배 이상의 가격이 형성되어 공사를 수행하는 시공회사의 고통이 가중되고 있으며 강관말뚝 재료비의 증가는 전체공사비의 증가로 이어져



국가적으로도 큰 손실이 되고 있다.

현장타설 콘크리트말뚝은 장대교량 기초 또는 대형건물 기초 등 제한된 경우에 사용된다. 대구경 현장타설말뚝의 문제점으로는 대형 시공장비의 사용으로 인한 고가의 공사비, 보강재인 철근망의 품질관리 및 시공의 어려움 등이 있다.

H형강말뚝은 우리나라에서는 거의 사용되지 않는 말뚝재료이다. 1997년 우리나라에서도 선진외국과 같이 H형강말뚝을 적용하기 위한 연구가 실시되었으나 아직까지 실제 공사에서의 적용은 미미한 실정이다.

우리나라는 전 세계적으로 말뚝 기초의 활용이 가장 활발한 나라 중 하나이다. 그러나 현장에서 실제 적용되고 있는 것은 PHC 및 강관말뚝이 주로 사용되고 있을 뿐 외국에서 보편적으로 사용되는 사각 콘크리트말뚝이나 복합말뚝은 거의 사용되지 않고 있다.

우리나라에서 복합말뚝이 사용되지 않았던 것은 여러 요인이 있겠지만 복합말뚝에 대한 본격적인 연구와 그를 바탕으로 한 시공경험이 부족한 것이 가장 큰 원인으로 판단된다. 따라서 본고에서는 말뚝의 거동에 따라 재질을 조합함으로써 상기의 PHC말뚝, 강관말뚝, 대구 경 현장타설 말뚝이 지니고 있는 문제점들을 해소 경감할 수 있고 구조적으로 안정하며 경제성 측면에서도 우수한 신기술 신공법인 HCP(Hybrid Composite Pile)를 소개 하고자 한다.

2. 복합말뚝(Composite Pile)

2.1 복합말뚝의 개요

복합말뚝(Composite pile)이란 2개 이상의 이질의 재료로 구성된 말뚝을 말한다.

오래된 복합말뚝형태로 항만 구조물에서 적용된 말뚝 상부는 콘크리트말뚝으로 하고 수면하부는 나무 말뚝으로 구성된 복합말뚝이 있는데, 이는 수면 상부로 노출된 나무말뚝의 부식문제를 해결하기 위해 적용된 예이다. 이러한 복합말뚝의 적용은 말뚝의 기능 향상이 우선이지만 부수적으로 경제적인 효과도 상당히 큰 것으로 알려져 있다(Prakash, 1990).¹⁾

실용적으로 복합말뚝의 적용 및 연구가 활발하게 진행되고 있는 나라가 일본이다. 지역 특성상 지진이 빈번하여 지진시 구조물에 작용하는 수평력에 대해 효과적으로 대처하기 위해 말뚝상부에 강성이 큰 말뚝 재료, 말뚝하부에는 수직력에 효과적으로 저항할 수 있는 현장타설 콘크리트 말뚝이나 콘크리트 기성말뚝을 사용하고 있다.

미국에서는 2000년 이후에 항만 구조물의 Fender나 안벽 구조물 기초에 기존에 사용되어 왔던 강관 말뚝의 문제점인 부식 문제를 해소시키려는 일환으로 복합말뚝에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 FRP(Fiber Reinforced Polymers)나 탄성 섬유로 원형 말뚝 안쪽에 PC나 RC콘크리트를 채운 복합말뚝을 구성하여 항만구조물의 유지비용을 획기적으로 줄일 수 있는 복합말뚝에 대한 연구가 진행되고 있다(Pando 등, 2002).²⁾



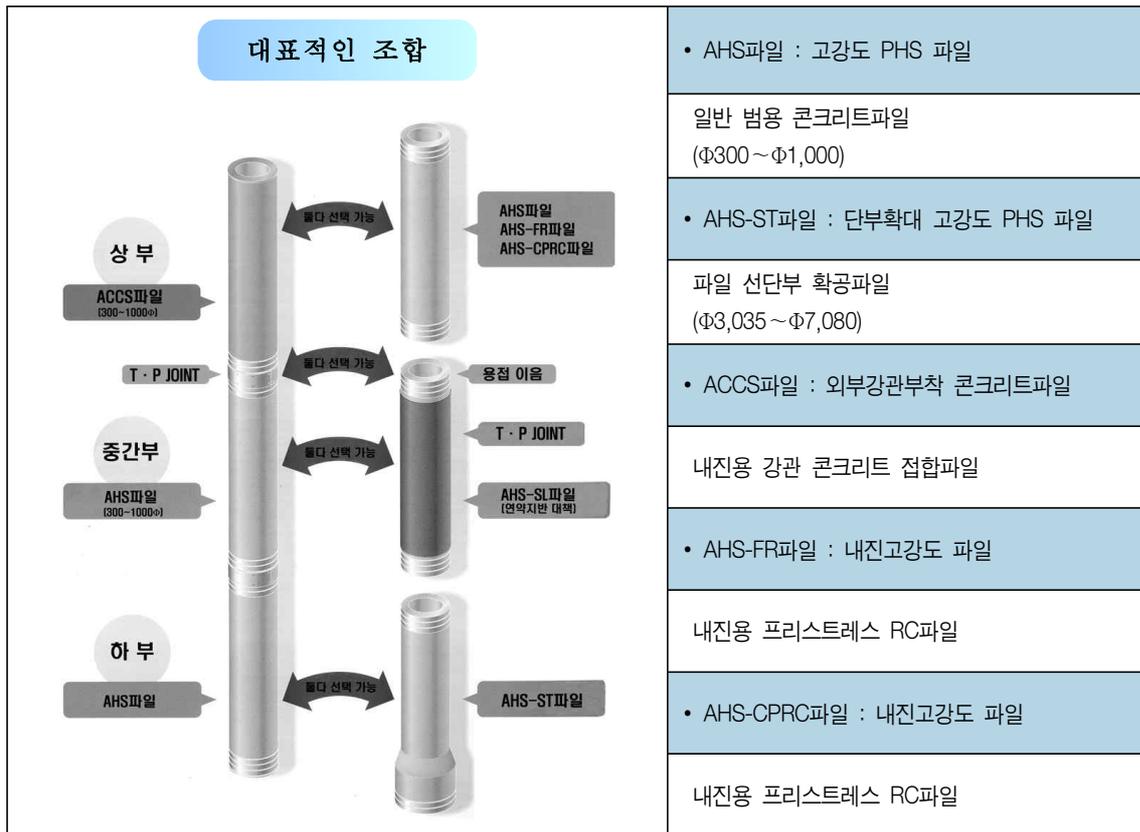
〈그림 2-1〉 다양한 형태의 복합말뚝

2.2 해외의 복합말뚝 적용 사례

일본은 산업화가 활발히 진행되면서 많은 양의 말뚝이 필요하게 되는데 국토면적이 넓지 않아 운반에 대한 부담이 적고 품질확보, 대량생산, 경제성 등에서 장점이 있는 기성말뚝이 발달하게 되었다.

또한 지진이 빈번한 지역적 특성 때문에 구조물의 안정성에 직접적인 영향이 있는 말뚝에 대한 연구가 활발하여 다양한 기능과 형태의 기성말뚝을 제작하여 사용하고 있다.

일본의 말뚝은 〈그림 2-2〉의 예처럼 다양한 종류의 기성말뚝을 이용한 복합말뚝 적용을 특징으로 한다. 이러한 복합말뚝의 적용은 1970년대부터 시작하여 항만, 도로, 철도, 건축, 발전소등 사회 각 분야에서 구조물의 특성과 연계되어 다양하게 적용되고 있다.



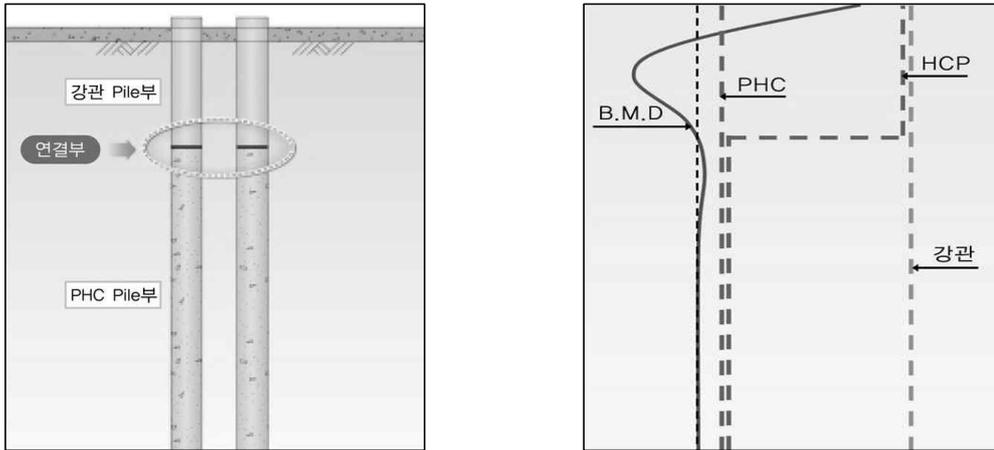
〈그림 2-2〉 복합말뚝의 구성

3. 복합말뚝의 국내 신기술인 HCP(Hybrid Composite Pile) 소개

3.1 HCP(Hybrid Composite Pile)의 개요

국내에서 생산되는 기성말뚝은 강관말뚝과 PHC말뚝이 있다.

HCP(Hybrid Composite Pile)는 강관말뚝과 PHC말뚝을 합성한 복합말뚝으로써, 지반 및 하중 조건에 따라 재질과 단면이 다른 복합말뚝의 구조적 거동을 파악하여 수평력과 모멘트가 크게 작용하는 말뚝의 상부는 전단 및 휨 저항 능력이 우수한 강관말뚝으로 구성하고 압축력이 주로 작용하는 말뚝하부는 고강도 콘크리트 말뚝(PHC)으로 조합되며, 현장에서 각각의 말뚝심도에 따라 말뚝을 조합할 수 있도록 시험타, 모니터링, 지지층분석, 자재조합 등을 유기적으로 결합시켜 맞춤말뚝으로 시공하여 구조적 안정성과 경제성, 환경성을 향상시킨 복합말뚝(HCP)이다.



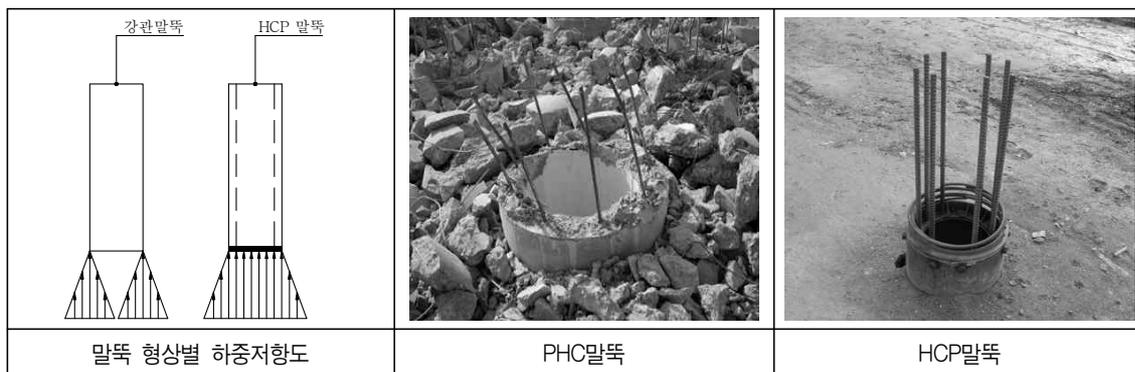
〈그림 3-1〉 HCP의 개요 및 말뚝의 저항능력

3.2 HCP(Hybrid Composite Pile)의 기대효과

가. 구조적 안정성 확보

말뚝은 지지력산정시 말뚝 선단이 폐합되어 있는 것으로 가정하고 지지력을 산정한다. 국내에서 시공되는 강관말뚝은 선단면 형상이 개(열림)단면으로 설계지지력을 만족(폐쇄효과)하기 위해 별도의 시공 방법 및 관리가 필요하다. 본복합말뚝은 선단면 형상이 폐(닫힘)단면으로 같은 지지층에 도달했을 때 강관말뚝에 비하여 선단지지력 확보가 용이하다.

또한 PHC말뚝은 두부정리시 두부 파쇄로 인한 두부 균열과 그에 따른 긴장력 손실이 발생하고 기초와 강결합(고정)이 어려워 구조적으로 말뚝에서 가장 중요한 부위인 기초연결부 및 두부에 취약점이 있으나, HCP의 경우 말뚝 상부가 강관말뚝이므로 두부 정리로 인한 구조적 손실이 없어 PHC의 단점을 해결할 수 있다.



〈그림 3-2〉 말뚝 선단부형상 및 PHC, HCP의 두부

나. 경제성 향상

HCP는 말뚝상부 일정 구간을 제외하고는 PHC말뚝을 사용하여 강관말뚝에 비하여 경제성이 향상되는 구조로 말뚝의 길이가 길수록 강관말뚝 대비 자재비 절감 효과가 크다.

또한 말뚝 상부의 강관말뚝 두께 조절이 탄력적이므로 수평력이 커서 말뚝의 지지력보다는 말뚝에 작용하는 합성응력으로 말뚝의 본수가 결정되는 구조물에서는 강관말뚝 대비 본수를 절감할 수 있다.



〈그림 3-3〉 말뚝자재비 변동 추이(2008년 기준)

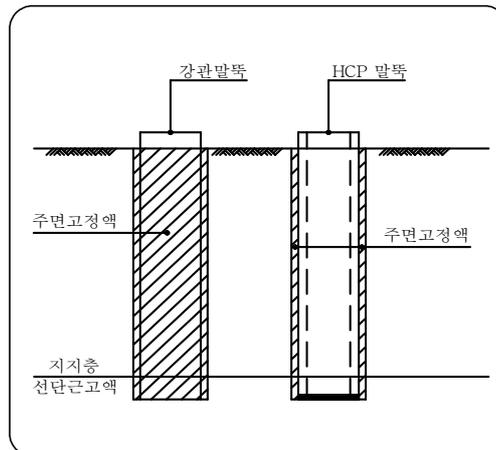
다. 국가경쟁력 향상

강관말뚝은 재료 대부분을 수입에 의존하지만 HCP는 재료의 대부분이 콘크리트로 국내자원으로 자급자족이 가능하므로 강관말뚝 대체로 인한 고용유발 효과 및 산업활성화 효과가 커 국가경쟁력 향상에도 일조할 것이다.

라. 환경훼손 최소화

최근의 말뚝시공은 환경적인 요인으로 인해 매입말뚝 시공이 증가되고 있다.

매입말뚝 시공시 강관말뚝은 선단이 개단면(Open-Ended)이므로 선단폐색(Plugging Effect)을 위한 선단근고액이 필요하고 지반 굴착 후 주변고정액을 주입한 후 말뚝을 삽입하므로 주변마찰력확보를 위해 주변고정액이 과다투입되지만 HCP는 선단근고액이 필요치 않고 주변고정액도 강관말뚝에 비해 훨씬 감소되므로 주변 및 선단근고액의 주재료인시멘트로 인한 토질 및 하천의 환경피해를 경감할 수 있다.



〈그림 3-4〉 매입공법 시공시 그라우팅 비교

3.3 HCP(Hybrid Composite Pile)의 설계

복합말뚝은 말뚝 부위별에 따라 다른 재질을 조합하여 사용하므로 재질별 말뚝의 길이를 산정하는 일이 매우 중요하다. 말뚝의 부위별 길이를 산정하기 위해서는 각 부위별 말뚝의 작용력(수직력, 수평력, 모멘트)을 산출해야 한다.

말뚝의 부위별 길이를 산정시 가장 중요한 작용력인 말뚝의 모멘트는 말뚝의 수평 저항에 관계되는 지반에 많은 영향을 받기 때문에 실제 지반 조건을 고려한 해석이 필수적이라 할 수 있다. 그러나 현재까지의 국내의 말뚝 설계는 말뚝의 수평 저항에 관계는 지반 산정시 설계 지반면에서 $1/\beta$ 까지 깊이의 평균값을 사용하고 있다.

실제로 지반은 깊이에 따라 지반의 종류, N치 등이 매우 다양해 말뚝의 수평저항에 관계되는 지반을 설계 지반면에서 $1/\beta$ 까지 깊이의 평균값을 적용하는 현재의 설계방법은 동일 재료를 사용하는 말뚝의 경우에는 큰 문제가 없겠지만 복합말뚝처럼 재료의 물성이 다른 말뚝에서 그 해석법을 수용하기에는 문제가 있을 것이라 판단된다. 때문에 복합말뚝에서는 말뚝 부위별 길이를 산정하기 위해 변위법에 의한 해석 및 별도의 지반 해석프로그램을 병행하여 지반조건, 하중, 말뚝의 강성 등을 입력하여 실제의 말뚝 설치 현황을 모사할 수 있도록 하였다.

가. 말뚝의 축방향 스프링 정수(K_v)

HCP의 변위법에 의한 해석은 말뚝 기초 전체의 변위(확대 기초의 변위)를 매트릭스를 매개로 하여 말뚝 기초 전체에 작용하는 수평력, 연직력, 회전모멘트에 관한 평형방정식을 풀어 말뚝의 반력, 작용력, 변위를 산출한다. 이런 변위법에 의한 해석은 말뚝의 스프링정수를 결정하는 것이 가장 기본적이고 중요한 사항이다.

말뚝의 스프링정수는 말뚝머리에서 말뚝 축방향으로 단위 변위량을 발생시키는 축방향력으로 말뚝의 연직재하시험에서 구한 (P)-침하량(S) 곡선으로부터 구하는 것이 가장 신뢰성이 높지만 일반적인 설계에서는 추정식을 통해 구할 수 있고 ‘도로교 설계기준’에서는 말뚝의 축방향 스프링정수 K_v 를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$K_v = a \cdot \frac{A_p \cdot E_p}{L}$$

여기서,

K_v : 말뚝의 축방향 스프링 정수(kgf/cm)

A_p : 말뚝의 순단면적(cm^2)

E_p : 말뚝의 탄성 계수(kgf/ cm^2)

L : 말뚝 길이(cm)

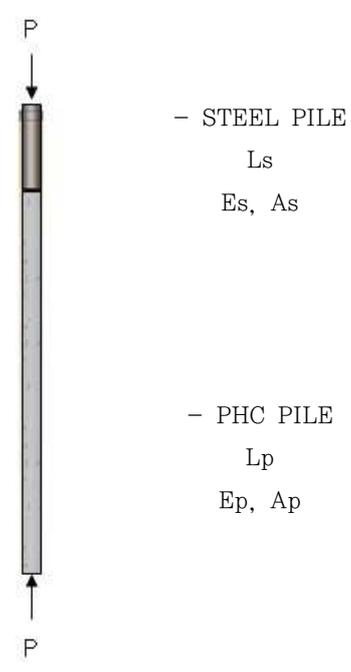
D : 말뚝 지름(cm)

그리고 K_v 에서의 a 는 말뚝의 종류 및 시공법에 따라 L/D 을 이용할 수 있도록 아래와 같이 제시하고 있다.

타입말뚝(타격공법)	$a = 0.014(L/D) + 0.72$
타입말뚝(바이브로해머공법)	$a = 0.017(L/D) - 0.014$
현장타설말뚝	$a = 0.031(L/D) - 0.15$
내부굴착말뚝	$a = 0.010(L/D) + 0.36$
프리보링말뚝	$a = 0.013(L/D) + 0.53$
쏘일시멘트말뚝	$a = 0.040(L/D) + 0.15$

K_v 에서의 a 값을 개정한 것은 말뚝 직경과 길이가 같은 말뚝에서는 말뚝의 재질보다는 말뚝 설치 방법이 말뚝 설치시 말뚝 주변 흙의 거동, 정적 저항, 점성 저항, 저항력분포 등에 더 많은 영향을 주므로 말뚝시공법에 따라서 a 값을 결정하는 것이 타당하기 때문인 것으로 판단된다.

a 값을 결정할 수 있으므로 복합말뚝의 K_v 는 다음과 같이 정리될 수 있다.



- STEEL PILE
Ls
Es, As

- PHC PILE
Lp
Ep, Ap

$$P = k \times \delta$$

$$\delta_s = \frac{P \times L_s}{E_s \times A_s}, \quad \delta_p = \frac{P \times L_p}{E_p \times A_p}$$

$$\delta = \delta_s + \delta_p$$

$$= P \left(\frac{L_s}{E_s \times A_s} + \frac{L_p}{E_p \times A_p} \right)$$

$\delta = P/K$ 이므로

$$K_v = \left(\frac{L_s}{E_s \times A_s} + \frac{L_p}{E_p \times A_p} \right)^{-1}$$

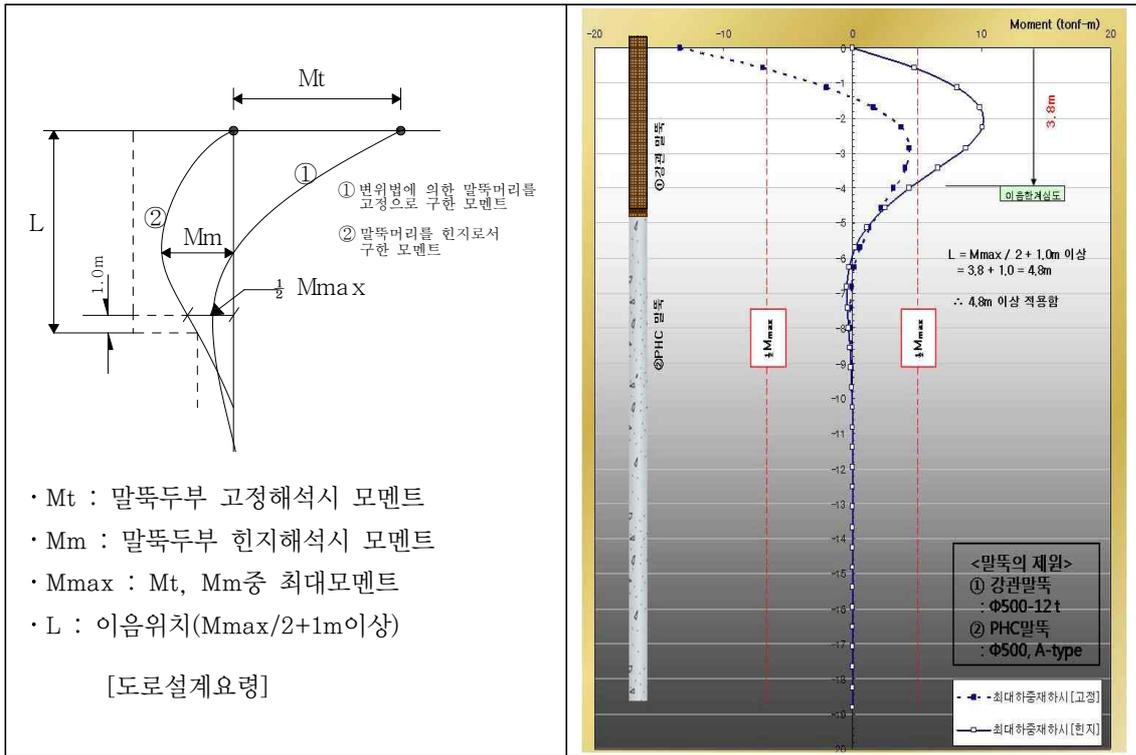
$$= \left(\frac{E_p \times A_p \times L_s + E_s \times A_s \times L_p}{E_s \times A_s \times E_p \times A_p} \right)^{-1}$$

$$= \left(\frac{E_s \times A_s \times E_p \times A_p}{E_p \times A_p \times L_s + E_s \times A_s \times L_p} \right)$$

〈그림 3-5〉 복합말뚝의 K_v 산출식

나. HCP 연결위치 결정

일본도로협회에서 발간된 杭其礎設計便覽(항기초설계편람, 2004)에서의 말뚝단면변화와 위치에 대한 기준을 <그림 3-6>을 참조하여 설명하면 다음과 같다.³⁾



<그림 3-6> 말뚝 단면변화 위치

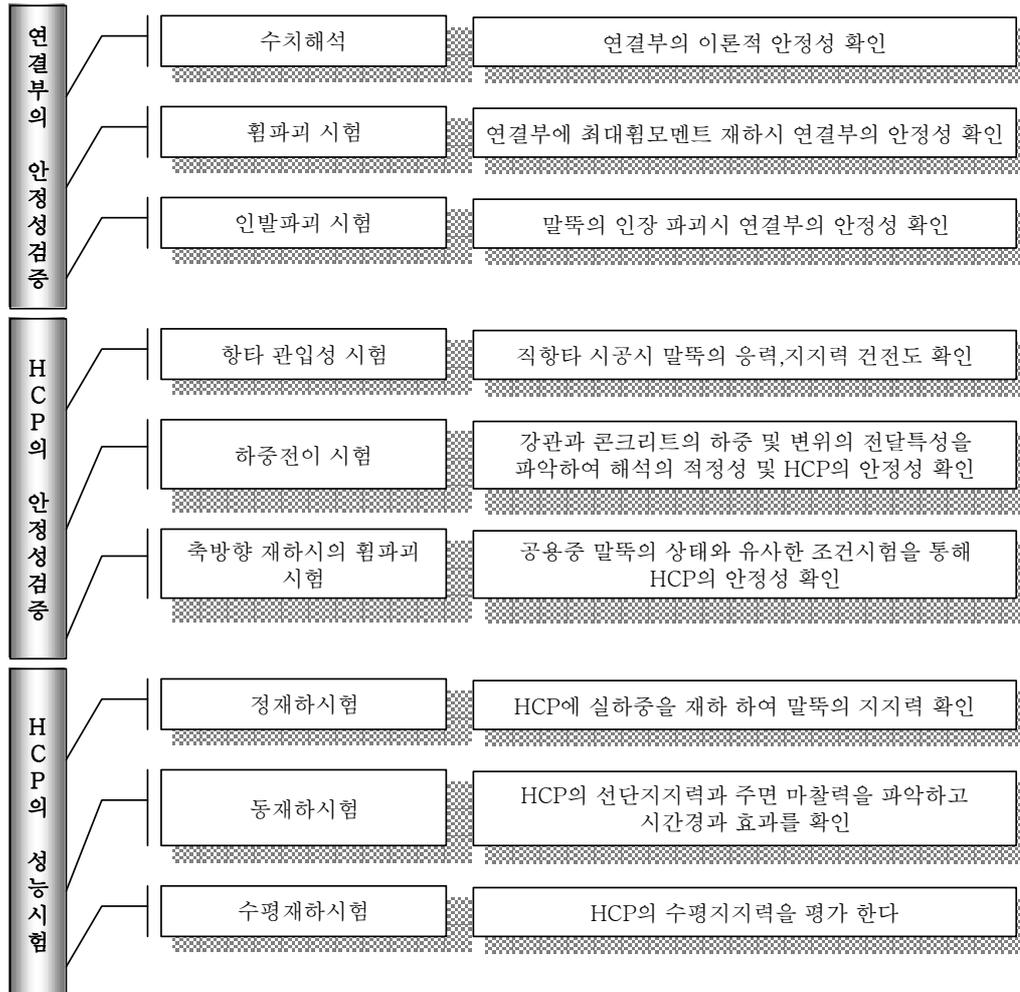
말뚝단면이 변하는 위치는 최대 모멘트(Mmax)의 1/2의 값을 갖는 위치 이하로 규정하고 있다. HCP인 경우 엄격하게 말하면 말뚝의 단면 변화라 볼 수 없지만 결국 말뚝의 단면 변화가 말뚝의 강성변화와 관련이 있기 때문에 강관 말뚝에서 콘크리트 말뚝으로의 강성변화시 이러한 기준을 적용하는 것은 타당한 것으로 판단된다. 또한 일본의 말뚝기초의 조사, 설계에서 시공까지(토질공학회, 1990)에서는 말뚝단면이 변하는 최소길이(l)는

$$l_1 = \frac{1}{2} M_{max} + 1.0(m) \text{ ----- } (l)$$

로 말뚝단면 변화에 대한 언급이 있었으며 도로설계요령(제3권, 한국도로공사, 2001)에서도 말뚝단면이 변하는 최소길이(l)를 위의 식을 적용하고 있다. 그러므로 HCP의 강관말뚝과 콘크리트 연결부의 위치는 국내규정인 “도로설계요령”에 따라 말뚝 최대모멘트의 1/2 위치에 여유치 1.0m를 가산하여 적용하였다.⁴⁾

3.4 HCP(Hybrid Composite Pile)의 안정성 검증

HCP(Hybrid Composite Pile)의 안정성은 이론적 해석은 물론 다양한 시험을 통하여 안정성을 확인할 수 있다.



3.4.1 연결부의 안정성 검증

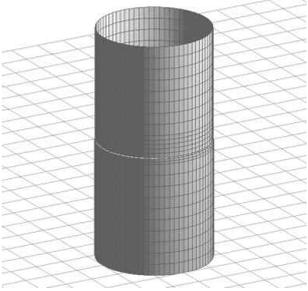
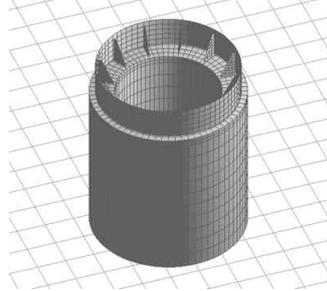
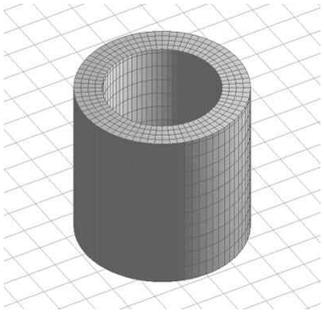
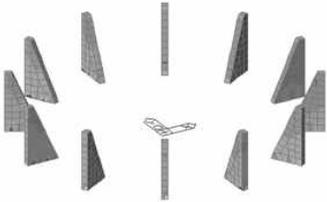
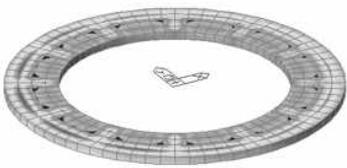
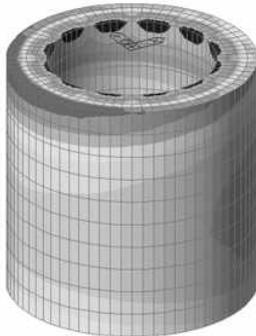
가. HCP 연결부의 유한요소 해석

(1) 검토개요

HCP(Hybrid Composite Pile)는 서로 다른 재질과 강성을 가진 재료(강관말뚝과 PHC말뚝)가 결합되어 일체로 거동해야 하므로 결합 및 결합부 보강 방법에 따른 HCP의 구조적 안전성과 연결부보강

방법의 적정성을 확인하고자 범용유한요소해석프로그램인 Midas를 이용하여 실제와 유사하게 모델링 한 후 FEM 해석으로 HCP의 거동에 따른 응력을 파악하여 연결부의 안전성을 검토하였다.⁵⁾

(2) 해석모델

	
<p>강관말뚝과 PHC말뚝 모델링</p>	<p>결합구와 PHC 말뚝 모델링</p>
	 <p>MIDAS/CIVIL3 POST-PROCESSOR SOLID STRUCTURE S10-S2 6.37523e+002 5.56425e+002 4.53326e+002 3.54227e+002 2.53129e+002 1.52030e+002 5.09317e+001 0.00000e+000 -1.51266e+002 -2.52364e+002 -3.53463e+002 -4.54561e+002 CB: CB1-PH-PPS MAX: 6938 MIN: 6982 FILE: 9월20-CA3- UNIT: kgf/cm² DATE: 04/18/2007 VIEW-DIRECTION X: 0.000 Y: 0.770 Z: 0.438</p>
<p>PHC 말뚝 모델링</p>	<p>결합구 보강리브 응력검토</p>
 <p>MIDAS/CIVIL3 POST-PROCESSOR SOLID STRUCTURE S10-S2 6.04629e+003 3.16947e+003 0.00000e+000 -2.62417e+003 -5.52099e+003 -8.44781e+003 -1.13146e+004 -1.42115e+004 -1.71083e+004 -2.00051e+004 -2.29019e+004 -2.57987e+004 CB: CB1-PH-PPS MAX: 574 MIN: 565 FILE: 9월20-CA3- UNIT: kgf/cm² DATE: 09/24/2007 VIEW-DIRECTION X: 0.449 Y: 0.770 Z: 0.438</p>	 <p>MIDAS/CIVIL3 POST-PROCESSOR SOLID STRUCTURE S10-S2 -4.09131e+001 -5.30096e+001 -6.52062e+001 -7.74037e+001 -8.95993e+001 -1.01796e+002 -1.13992e+002 -1.26109e+002 -1.38385e+002 -1.50582e+002 -1.62778e+002 -1.74975e+002 CB: CB1-PH-PPS MAX: 980 MIN: 873 FILE: 9월20-CA3- UNIT: kgf/cm² DATE: 04/18/2007 VIEW-DIRECTION X: 0.440 Y: 0.770 Z: 0.438</p>
<p>결합구 원형보강판 응력검토</p>	<p>PHC말뚝 응력검토</p>

(3) 해석결과

연결부 상세해석 결과 강재에서는 허용응력 값이 상당히 크므로 작용응력에 비하여 2배 이상의 여유가 있으나 PHC말뚝 상단부 콘크리트는 강재에 비하여 허용응력 여유치 비율이 작은 것으로 산출되었다. 이는 상부강관말뚝 단면의 작용력이 PHC말뚝에 전달되면서 기하형상의 차이로 인하여 하중이 등분포 적으로 전달되지 못하고 응력 집중이 발생하여 생기는 것으로 판단되었다.

하지만 보강재를 통하여 응력이 집중되는 것을 많은 부분 방지할 수 있었으며 이로 인하여 PHC 상부 부분에서의 응력이 허용응력 이내에 들어감을 확인할 수 있었다. 이의 결과를 통해 강관과 PHC의 연결로 인한 연결부에 대한 구조적 안전성이 충분히 확보된 것으로 판단된다.

나. HCP 휨 파괴시험

(1) 시험개요 및 목적

연결부의 건전성을 파악하고 작용모멘트가 콘크리트 말뚝의 모멘트 저항능력을 초과하는 것을 확인하기 위해 KS F 4306에 따라 PHC말뚝의 파괴시까지 하중을 가하여 연결부의 이상 유무를 확인한다.

(2) 시험결과

강관과 PHC연결부에서는 몸체의 파괴모멘트 보다 큰 모멘트에서도 파괴 및 균열의 징후가 발생하지 않아 HCP의 연결부가 PHC보다 먼저 파괴되지 않는 것을 확인할 수 있었다.



다. HCP 인발시험

(1) 시험개요

시공된 HCP를 인발하여 HCP연결부 안전성을 확인하고자 인발시험을 실시하였으며, 시험말뚝을 제작하여 SDA공으로 지지층에 근입시킨 후 주면고정액을 주입하고 주면마찰력이 발휘될 때 AUGER를 이용하여 회전하여 말뚝을 인발하였다.

(2) 시험결과

HCP 인발시험중 지중에 설치된 말뚝의 파손이 발생하였으며 파손된 말뚝을 검토한 결과 상부강관말뚝과 연결부는 별다른 이상이 없었으나 상대적으로 인장력에 약한 PHC말뚝에 파손이 발생하였다.

말뚝의 파손 양상을 고려할 때 회전에 의한 Torsion과 인발시 작용한 인장력에 의해 PHC말뚝이 파손된 것으로 판단되며 이 시험을 통하여 HCP 연결부에 대한 안전성이 확보되는 것으로 확인되었다.



3.4.2 HCP의 안정성 검증

가. HCP의 항타 관입성 시험

(1) 시험 개요 및 목적

말뚝시공의 적정성을 확인하기 위해 심도 20.0~40.0m의 말뚝을 직항타 하여 시공시 말뚝의 응력 및 시공후 지지력과 건전도 등을 확인한다.⁶⁾

(2) 시험결과

HCP말뚝이 일반적인 설계지지력(Meyerhof) 이상의 지지력이 확보되었으며 항타 에너지에 의한 수직하중 재하에 대해 연결부 및 말뚝의 건전도, 항타응력에 대해 문제가 없음을 확인하였다.





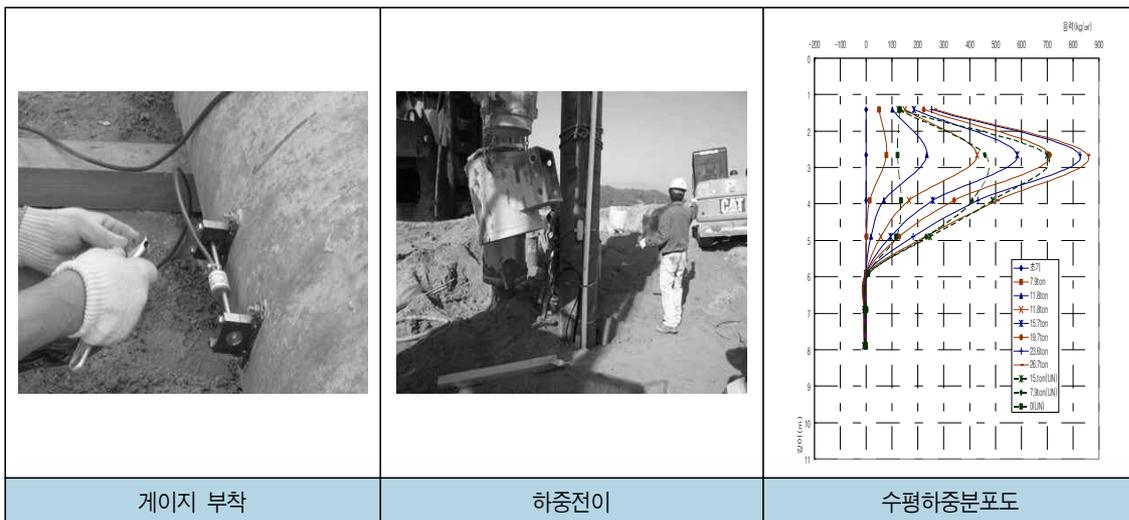
나. HCP의 하중전이시험

(1) 시험개요

서로 다른 물리적 특성을 가진 재료의 사용으로 인한 하중 및 변위의 전달 특성을 파악하여 해석의 적정성 및 HCP의 안정성을 확인한다.

(2) 시험결과

시험결과 강관말뚝과 PHC의 강성(EI)은 강관의 탄성계수에 비해 PHC말뚝의 탄성계수는 작고 반대로 단면2차모멘트의 경우 PHC말뚝이 커서 강성을 비교해 보면 서로 비슷하여 원활한 하중전이 현상이 나타남을 확인하였다.



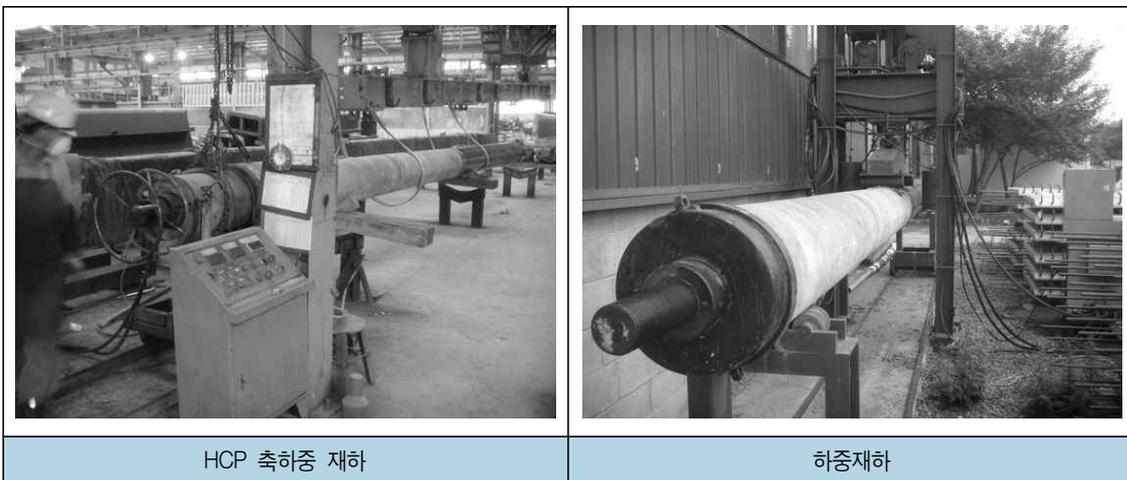
다. 축방향 재하시에서의 휨 인장파괴시험

(1) 시험개요

본 축력 휨강도 시험은 HCP의 재료적 물리적인 변화에 대해 품질관리의 조건을 만족 시키고 소정의 강도를 확인하기 위해 공용중 말뚝의 상태와 유사한 조건의 시험을 통해 HCP의 안정성을 확인한다.

(2) 시험결과

시험결과 반복 재하하중을 10사이클 이상 재하하면서 측정된 상대변위를 이용하여 휨모멘트 계산식을 통해 균열 및 파괴 휨 모멘트를 산정한 후 규정된 모멘트를 가했을 때 균열이 발생하지 않았음을 확인하였다.



3.4.3 HCP의 성능시험

말뚝은 구조물을 소정의 지지력이 확보될 수 있는 지지층에 전달하는 기능이 필요하기 때문에 말뚝 성능이 충분히 발휘되어야 한다. 말뚝의 성능은 크게 수직력, 수평력, 인발력에 대한 사항이므로 말뚝의 성능을 확인할 수 있도록 다양한 규격(Ø400, Ø500, Ø600)과 길이를 갖는 HCP를 직접 타입한 후 HCP의 수직력, 수평력, 인발력에 대해 성능과 안정성을 검증하였다.

가. 정재하 시험

(1) 시험개요

HCP에 말뚝재료 허용 축하중의 200%를 9단계로 나누어 재하하여 말뚝의 최종 항복하중을 확인한다.

(2) 시험결과

재하시험결과 전체적인 하중-침하량 거동은 완만한 포물선 형태로서 최대시험하중단계 (472tonf)까지 극한(파괴)의 징후는 나타나지 않았으며 항복하중 해석기준으로 분석한 결과, $S-\log t$, $\log P-\log S$, $dS/d(\log t)-P$ 분석법에서는 뚜렷한 항복점이 나타나지 않았으나 Davisson방법에 의하면 재하하중 395tonf단계에서 항복점(offset line)에 교차하는 것으로 나타나 HCP의 안정성을 확인하였다.

나. 동재하 시험

(1) 시험개요

동재하시험은 시공 종료 시 또는 말뚝시공 중 항타응력, 타격에너지, 말뚝의 건전도, 말뚝의 선단지 지력을 측정하는 목적으로 시행하나 본시험에서는 항타시 HCP에서 발생하는 항타응력을 검토하여 HCP의 성능을 확인한다.

(2) 시험결과

응력검토시 각각의 측정 DATA는 HCP 말뚝의 강관부에서 측정하여 CAPWAP 프로그램으로 PHC 부분의 응력을 산정한 값으로서 항타에 따른 말뚝(PHC)의 압축응력은 $0.33\text{tonf}/\text{cm}^2 \sim 0.42\text{tonf}/\text{cm}^2$ 로 허용범위인 $0.48\text{tonf}/\text{cm}^2$ 보다 작고, 인장응력은 $0.018\text{tonf}/\text{cm}^2 \sim 0.035\text{tonf}/\text{cm}^2$ 로 허용범위인 $0.062\text{tonf}/\text{cm}^2$ 보다 작게 나타나 PHC의 안정성을 확인하였다.

다. 수평재하 시험

(1) 시험개요

가능한 극한수평하중을 확인하기 위해 극한 또는 항복상태에 도달하거나 가압장치의 stroke의 한계까지 시험HCP의 수평지지력을 확인한다.

(2) 시험결과

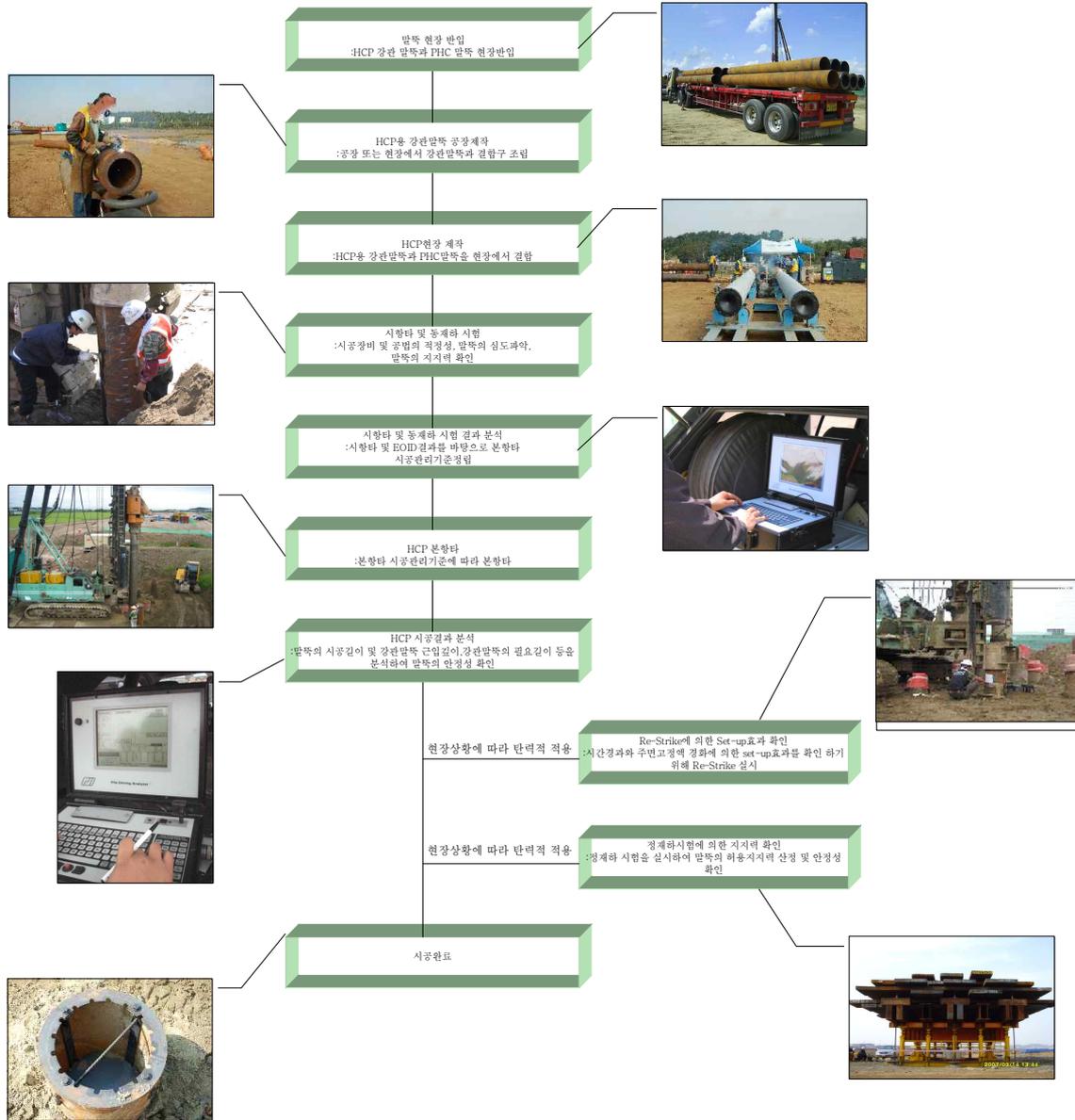
수평재하 시험 결과 변위량 15mm 기준일 때 HCP의 말뚝재료의 허용 수평지지력(23tonf) 이상의 수평지지력(32~43tonf)을 확인하였다.

3.4.4 HCP의 안정성 검증의 결론

수치해석, 현장 항타시험, Bending시험결과, HCP의 연결부 및 항타관입력에는 문제가 없는 것으로 판단되며 따라서 HCP의 경우 강관말뚝과 비교해 구조적 안정성 및 시공성에서 다르지 않음을 확인할 수 있다.

물론 HCP말뚝을 보완하기 위한 연구와 시험은 계속 수행함으로써 다각도로 HCP말뚝의 안전성을 검증할 뿐만 아니라 횡방향 저항을 하는 말뚝의 경우 말뚝의 설계인자 즉 말뚝본수의 수직력보다는 수평력에 의해 결정되기 때문에 수평력에 대한 저항능력을 크게 하는 방법이 말뚝본수의 감소뿐 아니라 경제성도 확보할 수 있으므로 이에 대한 연구도 추진할 계획에 있다.

3.5 HCP(Hybrid Composite Pile)의 시공 순서



4. 맺음말

앞서 소개한 복합말뚝(HCP)은 기존의 강관말뚝을 대체할 수 있도록 작용하중에 따라 합성구조(Composite Structure) 또는 복합구조(Hybrid Structure)를 적절하게 사용하여 재료의 효율성을 향상시키고 경제성과 시공성의 향상을 유도하는 것이 요구되는 상황에서 말뚝의 작용하중과 거동을 고려하여 강재와 콘크리트 구조를 적절하게 조합하여 만들어졌다.

HCP는 국내 여러 현장에서의 시공 경험과 다양한 시험 등을 통하여 PHC말뚝보다 시공성이 우수하며, 강관 말뚝보다 경제성에서 우수하고 안전성 또한 강관말뚝에 견주어 다르지 않음을 확인하였다. 따라서 건축 및 토목구조물에서 나타나고 있는 문제점들은 HCP 적용으로 인해 해소 및 경감시킬 수 있다.

HCP는 단기적으로는 경제성 측면에서 유리하기 때문에 단일 강관 말뚝을 복합말뚝으로 대체할 수 있을 것이며, 중장기적으로는 단일 PHC말뚝도 대체할 것으로 판단되므로 수급 및 활용전망이 클 것으로 판단된다. 

▶ 참고 문헌 ◀

1. Pando, M., Filz, G., Dove, J., and Hoppe, E.(2002), "Interface Shear Tests on FRP Composite Piles", Proceedings, International Deep Foundations Congress, American Society of Civil Engineers, Orlando, Florida, pp.1486~1500.
2. Prakash, Sharma(1990), Pile Foundations in Engineering Practice, John Wiley and Sons, Canada, pp.59~60.
3. 日本道路協會(1992), 杭基礎設計便覽, 日本道路協會, pp.330~334.
4. 한국도로공사(2001), 도로설계요령 제3권, 한국도로공사, pp.497~502.
5. 강구조학회지(2007.9), HCP(Hybrid Composite Pile) 말뚝의 연결부 성능평가
6. 국립한경대학교 건설공학연구소, HCP(Hybrid Composite Pile)의 관입성 분석 및 연결부의 건전성 연구, 2006