항타 H말뚝의 연직지지력 특성

The Characteristics of Axial Bearing Capacity of Driven H-piles

천 병 식 [*1]
Chun, Byung-Sik

조 천 환 [*2]
Cho, Chun-Whan

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정회원, 삼성물산(주), (02) 2145-6584

Abstract

The bearing capacity of driven H-pile can be characterized by driveability, time effect and plugging effect etc. ; however the related research is not yet enough to apply to practice. H-pile including steel pipe pile and PHC pile were driven and tested at 3 locations for the purpose of the analysis of bearing characteristics. Dynamic pile load tests accompanied by static load test were carried out for the analysis. Test results indicated that H-pile had the best driveability, the worst set-up effect among the 3 piles and that its plugging effect was higher than that of steel pipe pile. It was found out that it would be possible to increase the pile design capacity 1.9 times higher than a current design capacity of piles if the piles could be installed under an appropriate quality control. It was also found out that high strength H-pile was much more economical than ordinary grade H-pile. Comparison of the various bearing capacity calculation methods showed that Wave Equation Analysis of Piles(WEAP) was the most reliable method for the prediction of bearing capacity of H-pile.

요 지

항타 H말뚝의 지지력 특성은 관입성, 시간경과효과, 폐색효과 등으로 설명할 수 있으나 실무에 활용할 수 있을 만큼 충분히 연구되어 있지 않으므로 본 연구에서는 국내 3개 현장에 H말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝을 직접 시공한 후 정재하시험에 의해 검증된 동재하시험을 실시하여 결과를 분석함으로써 H말뚝의 지지력 특성을 평가하였다. 시험분석결과 H말뚝은 관입성이 가장 우수한 것으로 나타났고 시간경과효과(set-up 효과)는 가장 작은 것으로 나타났으며, 강관말뚝보다 선단지지력이 크고 폐색효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 시험시공결과 적절한 시공의 전제하에 현행 설계하중대비 약 1.9배 만큼 설계하중을 증가시킬 수 있는 것으로 분석되었으며 특히 고강도 H말뚝이 일반강도 H말뚝에 비해 경제성이 있는 것으로 분석되었다. H말뚝에 대한 각종 지지력 예측법중 파동방정식에 의한 분석방법이 가장 신뢰도가 높은 것으로 평가되었다.

Key words : H-pile, Driveability, Time effect, Plugging effect, Bearing capacity.

1. 서 론

우리나라는 많은 물량의 기성말뚝이 사용되고 있음에도 불구하고 기성말뚝 시장은 PC, PHC 및 강관말뚝의 3종류의 말뚝만이 사용되고 있을 뿐, 외국에서 보편적으로 사용되는 H말뚝은 거의 사용되지 않고 소수의 실적만이 기록되어 있으며 이들 실적도 탱크, 창고 등 대부분 중요도가 낮은 구조물들에만 이용되고 있는 실정이다.[1] 이와 같이 사용실적이 부진함에도 H말뚝에 관한 기준(KS F 4603, 1996[2])은 제정되어 있다.

H말뚝은 강관말뚝과 같이 강철로 만들어 졌기 때문에 강관이 갖고 있는 지지능력, 품질의 균질성, 길이조정의 간편성, 운반 및 취급의 용이성 등 장점을 보유하고 있고 동시에 관입성, 주변지반의 영향 등에서 특별한 장점을 갖고 있다.[3][4] 물론 H말뚝에 있어서도 재료강성의 방향성, 부식문제, 이음 등은 단점으로 작용하고 있지만 적절한 보완조치만 이루어 진다면 지반조건에 따라서는 효율적으로 활용할 수 있는 말뚝재료라고 판단된다. 이러한 점을 감안하면 그동안 우리나라에서 H말뚝을 거의 이용하지 못했던 점은 그만큼 비효율적인 기초공사가 이루어져 왔다고도 볼 수 있다.

외국의 경우 특히 미국, 유럽 및 동남아 등지에서도 H말뚝의 사용은 일반화되어 있다(AISI, 1975[5] ; Bustamante, 1992[6] ; De Beer, 1981[7] ; Ho, 1991[8]). 오히려 이들 지역에서는 강말뚝에 관한한 강관말뚝보다도 H말뚝의 적용이 보편화 되어 있는 실정이다.

우리나라에서 H말뚝이 사용되지 못하고 있는 이유는 여러 가지가 있을 수 있지만 관례적인 설계 답습, H말뚝에 대한 연구와 이를 바탕으로 한 공사실적이 부족한 것이 가장 큰 원인으로 판단된다. 즉 H말뚝의 적용시 참고할 수 있는 자료나 과거의 시공사례가 거의 전무한 실정인 바 설계자가 이를 채택하지 못하였기 때문이다.[1]

본 연구에서는 H말뚝(치수 및 강도변화)을 다른 종류의 말뚝(강관말뚝, PHC말뚝)과 함께 국내의 각종 지반조건에서 실물실험을 수행하고 관련시험을 실시한 후 결과를 비교 평가해 봄으로써 H말뚝에 대한 연직방향 지지력 특성을 분석하였다.

2. H말뚝의 재료 및 지지력 특성

기초공학적 측면에서 볼 때 H말뚝의 특징은 그것의 형상 및 재료적인 면으로 설명할 수 있다.

H말뚝은 강철로 만들어졌으므로 길이 및 치수에 제약없이 시공이 가능하다. 그러나 H말뚝이 지반에 항타되었을 때는 지반과의 접촉면적이 상대적으로 넓어 부식에 불리하게 작용한다. 이러한 부식은 일반적인 지반조건에서는 큰 문제가 되지 않지만 매립지반내 혹은 지하수위의 근처에서는 방식에 대한 조치가 필요하다. H말뚝의 이음은 용접길이가 비교적 길어져 불리하지만 간편하게 적용할 수 있는 이음기구들이 개발되어 이용되고 있다.

H말뚝은 말뚝재료의 강도(grade) 조정이 용이하여 필요에 따라 큰 추가 비용없이 지지능력을 증가시킬 수 있다. H말뚝의 재료는 국내기준을 따를 경우 일반강도(SPS 400, 항복강도 2400 $\mathrm{kg/cm^2}$)와 고강도(SPS 490, 3200 $\mathrm{kg/cm^2}$)의 사용이 가능하며 이들의 가격차는 7%에 불과하다. 이러한 점에 착안하여 Ho(1991)[8]는 홍콩에서 초고강도 H말뚝(항복강도 4600 $\mathrm{kg/cm^2}$)을 개발하여 실용화시킨 실적도 보고하고 있다.

H말뚝은 강재로 구성되어 있어 항타시 말뚝쿠션이 필요하지 않으며 또한 표면적이 커서 콘크리트 푸팅내에 보통 6" 이상 매설하면 별도의 하중 캡(cap)을 필요로 하지 않는다.[3] 그러나 H말뚝은 비대칭의 구조형상으로 강성이 방향성에 따라 다르게 나타나며 특히 이러한 점은 말뚝의 횡방향 지지력에 영향을 줄 수 있다. 따라서 말뚝의 횡방향 지지력이 중요한 기초구조물에서는 별도의 조치가 필요하다.

H말뚝의 지지력 특성에 대한 연구는 실무에 활용할 수 있을만큼 충분한 연구가 되어있지 못한 실정인데 지지력 특성중 관입성, 시간효과, 폐색효과 등에 대한 연구결과를 고찰하면 다음과 같다.

H말뚝은 재료의 강도가 커서 강력한 항타에너지를 사용하여 견고한 지반까지 관입시키는 것이 가능

한 데, 특히 항타시 지반의 변형을 줄여 조밀한 모래질 지반이나 견고한 점토질 지반을 관입하는 데 우수한 성능을 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 말뚝항타시 지반의 융기나 주변의 구조물에 유해한 영향을 주는 지반에 적용할 수 있고, 적절한 조치(선단부 보호구)가 이루어 진다면 전석과 같은 지중장해물이 있는 곳에서도 항타가 가능하다. 이러한 H말뚝의 우수한 관입성에 대한 사례는 Tomlinson (1994)[3], Wong(1994)[9], Bustamante(1992)[6], Huang(1988)[10], Evans(1985)[11] 등 연구 보고에서 찾아 볼 수가 있다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 정성적인 비교가 되고 있을 뿐 말뚝종류별로 계측기를 이용하여 이들의 거동을 정량적으로 비교한 연구는 거의 없다.

말뚝 지지력의 시간경과효과(time effect)는 최근 국내에서도 이 등(1995)[12]에 의해 연구된 바 있다. 시간경과효과는 지반조건 및 말뚝조건에 따라 다른 데, 시간경과에 따른 지지력변화는 증가(set-up 효과)할 수도 있고 감소(relaxation 효과)할 수도 있다. relaxation 현상은 매우 특이한 현상으로 조밀한 포화 세립지반, shale, mud stone과 같은 층상의 암반 등지에서 발생할 수 있는 것으로 보고되고 있다.[13] H말뚝의 시간경과효과에 대한 연구, 특히 본 연구에서와 같이 말뚝 및 지반별로 시간경과효과를 비교해 본 사례는 찾기 어렵다. 시간경과효과라는 것은 항타시 말뚝의 지반교란 정도와 관련된 부분으로 같은 지반조건 및 시공법하에서 말뚝의 종류별로 비교할 경우는 시간효과가 지지력의 절대적인 크기에는 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다.

폐색효과(plugging effect)는 말뚝의 지지특성에 큰 영향을 주는 것으로 지지력의 발현에 매우 중요한 요소이다. 말뚝의 폐색효과는 주로 강관말뚝을 위주로 연구되어 왔으며, H말뚝의 경우는 연구실적이 거의 없는 실정이다. 최근에 윤 등(1997)[14]은 모델 H말뚝을 통하여 폐색효과에 대한 연구를 수행하였는데 이러한 모형시험 결과가 실무에 적용되기에는 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

상기의 이유들로 인해 H말뚝의 지지력 예측방법은 아직 확립되어 있지 못하다고 할 수 있다. FHWA 기준[13]에 의하면 선단지지력은 사질토 및 점성토 모두 폐색된 것으로 가정하여 선단면적을 박스(box) 면적으로 고려하도록 하고, 주면지지력은 사질토에서는 플렌지(flange)사이의 아칭효과를 고려하여 박스 주면장에 대한 전단력을, 점성토에서는 플렌지부분에서는 부착력(c_a, adhesion)을, 웨브(web)부분에서는 흙의 전단력(c_u)을 고려하도록 제안하고 있다.

현재까지 실무적으로 H말뚝에 대한 지지력 계산법을 별도로 제시하고 있는 방법은 정역학적인 방법, Nordlund 방법, Meyerhof 방법, α방법(혹은 β방법), 파동방정식 분석법(WEAP 해석법), PMT 혹은 CPT에 의한 방법 등이 있다. 유수한 말뚝 설계기준별로 보면 DM-7[15]에서는 정역학적인 방법과 α방법을, FHWA[13][16]에서는 Nordlund 방법과 α방법(또는 β방법)을 권장하고 있으며, LCPC에서는 PMT에 의한 방법도 제안하고 있다. 이들 외에 H말뚝에 대한 지지력 예측법을 제안하고 있는 경우는 거의 찾아볼 수 없다.

3. 실물시험

3.1 시험내용 및 분석방법

국내 지반에 대한 H말뚝 지지력 특성을 분석하기 위해 3종류의 말뚝에 대해 3개 현장에서 실물시험을 실시하였다. 실물시험에서는 각 말뚝의 지지특성을 비교하기 위해 H말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝을 동일지점에 시공하고 이들에 대해 동재하 및 정재하시험을 실시하였다. 특히 A현장에서는 H말뚝에 대한 지지특성을 중점 분석하기 위해 H말뚝을 크기와 강도별로 변화시켜 시험을 실시하였는데 본 논문에서는 대표적인 결과만 분석하였다. 지지력 특성에 대한 분석항목은 관입성, 시간경과효과, 폐색효과, 지지력의 크기 등이므로 항타분석기(Pile Driving Analyzer : PDA)를 이용하여 항타시 동재하시험(end of initial driving test : EOID)을 실시하고 시간경과에 따라 재항타시험(restrike test : Restrike)을 실시하였다. 또한 동재하시험의 신뢰도 확인을 위해 동일 말뚝에 대해 정재하시험과 동재하시험을 실시하여 비교한 후 이를 바탕으로 모든 분석시험에는 동재하시험(dynamic pile load test)을 이용하였다. 정재하

및 동재하시험의 비교는 시험시기, 시험순서 등을 고려하여 두시험으로부터 얻어진, 하중-침하량 곡선의 거동과 경향을 분석한 결과 양호한 것으로 평가되었다. 표 1은 현장별로 시험내용 및 방법을 정리한 것이다.

표 1 시험내용 및 방법

표 1에서와 같이 3개 현장 모두 직항타 방법으로 시공하였다. 항타시는 PDA를 이용하여 표 2에서와 같이 말뚝의 허용항타응력 이내까지 항타하되 가능한한 제시된 값 정도의 최종 단위길이당 타격수(blow per meter ; BPM)까지 관입시켰다. 항타시 측정 자료는 PDAPLOT 프로그램[17]을 이용하여 비교 분석하였다.

표 2 항타시 허용항타응력 및 관입량 기준치

또한 EOID 및 Restrike 시험자료는 CAPWAP[18](CAse Pile Wave Analysis Program ; CAPWAP, 1996)을 이용하여 지지력을 산출한 후 비교 분석하였다. 아울러 지반조사 및 현장시험자료를 이용하여 각종 지지력공식과 WEAP(Wave Equation Analysis of Piles ; WEAP, 1996) 프로그램[19]을 이용하여 지지력을 계산한 후 이들의 결과도 비교 평가하였다.

3.2 시험현장별 지반조건

전술한 바와 같이 3개 현장에서 시험시공이 실시되었으며 이들 현장에 대한 지층구성도를 그림 1에서 그림 3에 나타내었다. 분석에 적용된 N치는 현장마다 시험수행자가 다르므로 보정없이 현장자료를 그대로 이용하였다.

그림 1 A현장 지층구성도

그림 2 B현장 지층구성도

그림 3 C현장 지층구성도

4. 결과분석

4.1 관입성

H말뚝의 항타관입성을 분석하기 위해 항타분석기(PDA)를 이용하여 항타시 재하시험(EOID)을 실시하였다. 그림 4 그림 6은 각 현장에 대한 항타시 동재하시험 결과를 PDAPLOT으로 분석한 내용이다. 그림들과 전체적인 시험시공결과를 판단할 때 관입깊이는 전반적으로 H말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝의 순서로 나타나고 있어 H말뚝의 항타관입성이 우수함을 알 수가 있었다.

항타시 말뚝에 걸리는 응력을 비교해보면 H말뚝과 강관말뚝의 경우 말뚝두부에서 측정된 응력(CSX)과 선단부에서 측정된 응력(CSB)은 지지층에서 일정한 격차를 유지하는 상태로 허용항타응력에 이르러 항타가 종료되는 반면, PHC말뚝의 경우는 격차를 유지하다가 최종 관입깊이에서는 2개의 응력의 크기가 비슷한 상태로 허용항타응력에 이르러 항타가 종료되고 있음을 알 수가 있다. 이러한 사실은 개단말뚝과 폐단말뚝의 관입특성차이에 기인하는 것으로, 개단말뚝의 경우 주면저항력에 의해, 폐단말뚝의 경우는 선단저항력에 의해 항타관입이 좌우되는 것이라고 평가된다. C현장의 PHC말뚝은 CSX와 CSB의

응력크기가 앞서의 두 경우보다 어느정도 간격을 유지하고 있음을 알 수 있는데 이는 C현장의 지지층이 견고한 점토(stiff clay)층이어서 선단지지력은 물론 주면마찰력에도 영향을 받은 것으로 판단된다.

그림 4 그림 6에서 RMX는 항타시 측정된 지지력(Case 지지력)으로 H말뚝 및 강관말뚝의 경우 에너지가 일정함에도 소정의 깊이부터 지지력이 상당부분 증가하는 것으로 보아 부분폐색이 발생하고 있는 것으로 추정된다. 그림 4의 (a)와 (b)는 치수는 같지만 강도를 달리한 H말뚝의 항타시험결과로써 고강도말뚝(b)의 경우 해머의 용량부족으로 허용항타응력(0.9 σ_y = 2970 kg/cm^2)까지 충분한 에너지로 항타하지 못했음에도 불구하고 일반강도 H말뚝보다 더 깊은 지지층까지 도달하여 지지력도 크게 증가하였음을 보여주고 있어 고강도 H말뚝의 우수한 관입성과 지지력 향상효과를 나타내고 있다.

그림 4 A현장 시험말뚝의 PDA 측정결과

그림 5 B현장 시험말뚝의 PDA 측정결과

그림 6 C현장 시험말뚝의 PDA 측정결과

4.2 시간경과 효과

H말뚝의 시간경과효과, 즉 시간경과에 따른 지지력의 변화를 확인하기 위해 항타시 시험을 실시한 후 일정기간이 지난후에 재항타시험을 말뚝 및 현장별로 실시하였다. 표 3은 항타시 및 재항타시의 재하시험 결과를 비교한 것이다. 항타시 시험값과 재항타시 시험값을 그대로 비교하는 데에는 시험시 항타에너지의 크기 및 차이, CAPWAP 분석시 선택된 타수(blow number)의 차이, 분석오차 등에 의해 어느정도 제한사항이 있으므로 여기서는 이러한 영향을 줄이기 위해 CAPWAP 분석에서 얻은 하중-침하곡선을 Davisson 방법으로 판정한 허용지지력과 비교하였다. 또한 같은 지역이라 하더라도 지층의 불균질성, 시험순서 등에 따라 얻어지는 지지력에 어느정도 차이가 있을 수 있지만 이러한 사항을 전제로 분석을 실시하였다.

표 3 항타시 및 재항타시 재하시험결과 비교

표 3에서와 같이 2개의 말뚝(AH-2, CH)을 제외한 모든 말뚝의 지지력은 시간경과에 따라 증가하는 현상(set-up 효과)이 나타나고 있으며, 이러한 지지력의 증가형태는 말뚝 및 지반별로 차이가 있는 것을 알 수가 있다. 즉, 지반조건에 관계없이 H말뚝은 강관말뚝 및 콘크리트말뚝에 비해 set-up 효과가 작게 나타나는 데, 이러한 사실은 H말뚝이 다른 말뚝에 비해 항타시 타입에 의한 지반의 교란 및 변위량이 작은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

표 3의 결과를 지질주상도와 관련지어 보면 사질토 지반에서도 set-up 효과가 매우 크게 나타날 수 있으며 이 경우 지반상태에 따른 시간경과효과는 밀도가 클수록 set-up 효과가 큰 것을 알 수 있다.

전술한 바와 같이, 2개의 말뚝(AH-2, CH)에서는 재항타시 지지력이 항타시 지지력보다 작게 나타나고 있다. 여기서 AH-2말뚝의 경우 하중-침하량 곡선이 Davisson의 offset line과 만나지 않음으로써 재항타시의 에너지(EMX : 5.7 t·m)가 항타시의 에너지(EMX : 6.0 t·m)보다 작아 지지력도 작게 평가된 것으로 판단되나, CH말뚝의 경우는 하중-침하량 곡선이 Davisson의 offset line과 만난 것으로써 에너지의 크기와는 관계가 없음에도 불구하고 지지력이 작게 평가되는 relaxation 현상을 보여주고 있다. 즉, 일반적인 경우와는 달리 점성토 지반이라도 지지층이 매우 견고한 점토(very stiff clay) 혹은 이암(mud stone)으로 구성된 경우는 항타조건에 따라 relaxation 현상이 일어날 수 있는 것도 알 수 있다. 이러한 것은 H말뚝의 관입성이 뛰어나 이암층을 상당부분 관입함으로써 이암내부를 심각하게 교란(방사형 균열 발생) 시킴으로써 지지층내에서의 지지력이 증가하지 않거나 감소하는 것에 기인한 것으로 평가된다.

그림 7과 그림 8에는 본 연구의 시험말뚝중에서 set-up 현상과 relaxation 현상이 일어난 대표적인

말뚝에 대해 각각 하중-침하량 곡선과 주면마찰력의 분포를 도시한 것이다. 그림에서와 같이 대부분의 set-up 효과는 주면마찰력의 증가에서 일어나고 relaxation 효과는 지지층내 선단부분에서의 지지력 감소에 기인하는 것으로 보인다.

그림 7 set-up 효과가 일어난 말뚝(BH)

그림 8 relaxation 효과가 일어난 말뚝(CH)

4.3 폐색효과

시험말뚝중에서 PHC말뚝은 폐단말뚝이고, H말뚝과 강관말뚝은 개단말뚝이므로 이들의 지지력을 비교하는 것은 폐색효과를 규명하는 데 의미가 있다고 판단된다. H말뚝의 폐색효과를 알아보기 위해 표 4에는 말뚝별로 선단지지력과 주면마찰력을 산출하여 비교하였다. 표 4에서와 같이 분석시에 항타시 선단지지력과 재항타시 주면마찰력을 선정한 것은 항타에너지의 영향을 고려한 것으로 가능한한 극한에 가까운 값을 이용하기 위함이다.

표 4의 결과중 항타시 선단지지력과 재항타시 주면마찰력은 각 말뚝의 최종항타시 타수를 CAPWAP 분석하여 구한 것이고, PHC말뚝 관입깊이에서의 비교말뚝들에 대한 선단지지력은 항타시 해당관입깊이에서의 타수를 CAPWAP 분석하여 얻은 값이다. 또한 정적지지력 계산은 FHWA 방법(폐색상태로 가정)에 의한 것이다.

표 4에서 동일깊이(PHC 말뚝깊이)에서의 폐단말뚝과 개단말뚝의 선단지지력을 분석해보면 A현장은 부분폐색상태, B현장은 개방상태, C현장은 폐색상태로 볼 수 있으며 이러한 결과는 각각의 선단부의 지반특성에 좌우되는 것임을 알 수 있다. 표 4에서와 같이 H말뚝은 강관말뚝의 선단지지력보다 크고 폐색성도 우수하며, C현장과 같은 지반조건에서의 선단부는 폐단말뚝에 가까운 특성을 보이기도 한다. 또한 본 연구에서와 같이 H말뚝이 허용항타응력까지 항타되었을 경우 항타시 선단지지력은 일반적인 선단부의 제한지지력(1500 t/m^2)보다 크게됨을 알 수 있어 H말뚝은 Box 면적의 폐단말뚝으로 간주할 수 있다고 평가된다.

표 4에서와 같이 H말뚝에 있어 폐색상태로 가정된 주면마찰력의 계산치와 CAPWAP 결과치를 비교해보면 후자가 전자를 초과하거나 약간 부족한 상태를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실과 실측시 타격에너지의 미흡 및 충분한 시간경과 반영 미흡 등을 고려하면 H말뚝이 허용항타응력까지 항타되는 것을 전제로 정적지지력 계산시 주면부의 경우도 폐색상태로 고려할 수 있다고 판단된다.

표 4 항타시 선단지지력의 비교

4.4 말뚝의 지지력 및 예측방법

말뚝의 재료조건 및 지반조건에 대해 해머조건이 적절할 경우 말뚝재료가 받을 수 있는 하중까지 지지력을 내는 것이 가능하다. 그러나 이 등(1996)[20]에 의하면 국내의 설계는 관행에 의존하는 경우가 많아 적용되는 강관말뚝의 설계지지력은 SPS 400 강재의 재료허용하중 대비 52.4% 수준에 불과하며 시공결과는 재료허용하중 대비 76.8% 수준으로 보고되었다.

표 5에서와 같이 본 연구에서 시공된 말뚝의 경우 CP를 제외하면 시공결과(지반의 허용지지력)는 재료허용하중을 모두 초과하고 있음을 알 수 있다. 즉 본 연구에서와 같이 적절히 시공관리만 된다면 현행설계하중은 재료하중만큼 증가(약 1.9배 1/0.524)시키는 것이 가능하다고 볼 수 있다.

표 5에서 AH-1 말뚝과 AH-2 말뚝은 같은 규격이지만 강도는 전자가 일반강도, 후자가 고강도말뚝으로 이들의 최종지지력은 각각의 재료강도만큼 나타나고 있음을 알 수 있다. 4.1절에서 설명한 바와 같이 고강도 H말뚝은 재료강도가 큰 만큼 허용항타응력도 커서 관입성도 좋으므로 높은 지지력이 발현되

는 것으로 볼 수 있다. 이러한 사실은 말뚝재료로써 고강도 H말뚝의 적용성을 시사하는 것이라고 할 수 있다. 환언하면 현재가격기준에 의할 경우 고강도(SPS 490) H말뚝의 가격은 일반강도의 그것에 비해 7%가 높게 나타나지만 설계지지력은 재료의 설계 강도만큼 증가(35.7%)시킬 수 있으므로 H형강을 말뚝으로 이용할 경우는 반드시 고강도로 적용해야 할 필요성을 보여주고 있는 것이다.

표 5 지반의 허용지지력과 말뚝의 재료허용강도 비교

2장에서 설명한 바와 같이, H말뚝에 대한 지지력 계산법을 별도로 제시하고 있는 기준은 소수에 불과하다. 따라서 향후 H말뚝의 설계 참고자료로 제시하기 위해 대표적인 기준에서의 지지력 예측방법을 비교 분석하여 보았다. 본 연구에서는 주어진 지반조건과 시험시공자료를 이용하여 DM-7 기준(정역학적 방법), FHWA 기준(사질토 : Nordlund 방법, 점성토 : α방법), 파동방정식 분석법(WEAP 해석)으로 지지력을 계산하여 CAPWAP의 결과치와 비교 평가하였다. 여기서 WEAP 분석시 지지력 판정은 표 2의 값을 기준하였다. 그림 9는 본 연구의 시험시공 자료를 토대로 H말뚝의 지지력 예측방법에 대한 신뢰도를 평가하기 위해 지지력값의 비(계산값/CAPWAP값)를 lognormal 확률분포곡선으로 도시한 것이다.

소수현장에 대한 제한된 자료지만 이를 바탕으로 각 방법의 신뢰도를 평가해보면 그림 9에서와 같이 WEAP에 의한 해석법이 가장 산포도가 작고 DM-7 방법은 비교적 산포도가 큰 것으로 나타났다. 현장별로 보면 A현장과 B현장이 사질토가 우세한 지반이고 FHWA의 결과가 비교적 CAPWAP값에 일치하는 것으로 보아 경험적인 H말뚝의 지지력 평가방법중 사질토에서의 적용방법인 Nordlund 방법이 상대적으로 신뢰도가 있는 것으로 평가된다. 상기와 같이 H말뚝에서의 지지력 예측법중 WEAP 해석결과가 비교적 안정적이고 CAPWAP 결과에 근접하는 것으로 나타난 것은 H말뚝의 경우 set-up 효과가 작게 나타나고 WEAP 해석방법중 지지력 분석법(bearing graph analysis)에서는 set-up 효과가 확실히 반영되지 않으므로 두 값이 상대적으로 일치하는 것으로 평가된다.

그림 9 H말뚝의 지지력 예측방법의 신뢰도 분석

5. 결론

H말뚝의 지지력 특성연구를 위해 국내 3개현장에서 3종류의 기성말뚝에 대해 실물실험을 실시하고 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 3개말뚝중 H말뚝이 가장 관입성이 우수한 것으로 나타났으며 H말뚝과 같은 개단말뚝류의 관입성은 주면저항력에 의해 좌우되는 것으로 조사되었다. 고강도 H말뚝의 관입성은 일반강도의 그것에 비해 우수한 관입성을 발휘함으로써 큰 지지력 증가효과를 나타내었다.
2) H말뚝에 대한 시간경과효과를 분석해본 결과 H말뚝은 일반 지반에서 set-up 효과를 나타내며 이의 효과는 강관말뚝이나 PHC말뚝에 비해 작게 나타나는 데, 이는 H말뚝이 다른 말뚝에 비해 항타시 타입에 의한 지반의 교란 및 변위량이 작은 것에 기인하는 것으로 평가되었다. 반면 H말뚝은 특수지질조건(very stiff clay 혹은 이암으로 구성된 지지층)에서는 우수한 관입성으로 인해 지지층에 상당부분 관입되고 이것은 오히려 지지력이 감소하는 relaxation 현상을 초래할 수 있음을 알 수 있었으며 이러한 현상은 주로 지지층내 선단부분에서의 지반교란과 미회복에 기인하는 것으로 분석되었다.
3) H말뚝은 강관말뚝보다 단위면적당 선단지지력이 크고 폐색효과가 큰 것으로 나타났다. 특히 H말뚝이 허용항타응력까지 항타되었을 경우 H말뚝의 저항력은 주면부 및 선단부 모두 폐색으로 간주하여 지지력을 계산할 수 있다고 판단된다. H말뚝의 각종지지력 예측방법을 검토해본 결과 파동방정식 분석방법(WEAP)이 신뢰도가 높았으며 경험적 방법으로는 Nordlund 방법이 어느정도 신뢰도

가 있는 것으로 평가되었다.

4) 본 연구에서와 같이 적절히 시공관리가 가능하다면 현행 설계하중대비 약 1.9배 만큼의 설계하중을 증가시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 특히 H말뚝으로써 고강도(SPS 490) H형강을 사용할 경우는 7%의 가격상승으로 36%의 지지력을 향상시킬 수 있으므로 향후 H말뚝의 사용시는 반드시 고강도로 이용해야할 필요성이 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. (주)파일테크, H말뚝의 실무적용을 위한 연구, 연구보고서, 강원산업, 인천제철, 1997, 78 p.
2. 한국표준협회, H 형강말뚝, KS F 4603, 1996.
3. Tomlinson, M. J., *Pile Design and Construction Practice(4th ed.)*, E & FN SPON., 1994, pp. 8 35, 99 122.
4. Prakash, S and H. G, Sharma, *Pile Foundations in Engineering Practice*, 1989, pp. 70 113.
5. American Iron and Steel Institute, *Steel Pile Load Test Data.*, 1975, 84 p.
6. Bustamante, M., "Comparative Study on the Load Bearing Capacity of Driven Steel H Piles", *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Barends(ed.), Balkema, Rotterdam, 1992, pp. 531 536.
7. De Beer, E., "H Steel Piles in Dense Sand", *Proceedings of 10th Int. Conf. on S. M. F. E.*, Stockholm 15 19 June, 1981, pp. 693 698.
8. Ho, J., "The Use of High Strength H Bearing Piles in Hong Kong", *Proc, of 4th Int. DFI Conf., Balkema.* 1991, pp. 249 254.
9. Wong, I. W., "Performance of Long, Slender Piles Installed By Jacking", *Proc. of Int. Conf. on Design & Construction of Deep Foundations(Vol. III)*, FHWA, 1994, pp. 1657 1665.
10. Huang, S. M., "Application of Dynamic Measurement on Long H-Pile Driven into Soft Ground in Shanghai", *Proc. of 3rd Int. Conf. of Application of Stress Wave Theory to Piles*, Ottawa, 1988, pp. 635 643.
11. Evans and Pump, "Discussion Contribution", *Proceedings of Int. Symp. on Penetrability and Driveability of Piles, SanFrancisco*, ISSMFE, 1985, pp. 77 79.
12. 이원제, 전영석, 홍헌성, 이명환, "시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력 변화 연구", '95 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 1995, pp. 60 76.
13. U. S. Dpt. of Transportation, *Design and Construction of Driven Pile Foundations*, Workshop Manual., 1996, FHWA, pp. 8-1 9-163.
14. 윤여원, 천영남, 김두균, "모델 H말뚝의 거동", H말뚝 기초공법 학술세미나 논문집, 한국지반공학회, 1997, pp. 3 35.
15. DPT. of The Navy, *Foundations and Earth Structures(Design Manual 7.2)*, 1982, pp. 7.2-177 7.2-244.
16. PILEBUCK, *Foundations*, 1994, pp. 197 298.
17. Pile Dynamics, Inc., *PDA User Manual*, 1993.
18. GRL Associates, Inc., *CAPWAP User Manual*, 1995.
19. GRL Associates, Inc., *GRLWEAP User Manual*, 1996.
20. 이명환, 홍헌성, 조천환, "강관말뚝의 압축하중 지지능력", 강관말뚝 기초공법 세미나집, 한국지반공학회, 1966, pp. 3 23.

표 1 시험내용 및 방법

	시공말뚝 및 수량	말뚝의 강도 (말뚝번호)	동재하시험	정재하시험	시공법	비고
A현장	H-300×300×10×15(2) PHC 400(1) Steel ø 406×9t(1)	SPS 400(AH-1) SPS 490(AH-2) σ_{ck}=800kg/㎠(AS) SPS 400(AP)	EOID Restrike	1개소 수행	유압 7톤 직항타	인천시 소재
B현장	H-300×305×15×15(1) PHC 400(1) Steel ø 406×9t(1)	SPS 400(BH) σ_{ck}=800kg/㎠(BP) SPS 400(BS)	EOID Restrike	1개소 수행	유압 7톤 직항타	시흥시 소재
C현장	H-294×302×12×12(1) PHC 450(1)	SPS 490(CH) σ_{ck}=800kg/㎠(CP)	EOID Restrike	1개소 수행	유압 7톤 직항타	포항시 소재

표 2 항타시 허용항타응력 및 관입량 기준치

	허용항타응력	최종 단위길이당 타격수(BPM) / (mm/blow)
H말뚝	0.9 σ_y (σ_y : 항복강도)	500 / 2
강관말뚝	0.9 σ_y (σ_y : 항복강도)	500 / 2
PHC말뚝	0.6 σ_{ck} (σ_{ck} : 극한강도)	200 / 5

표 3 항타시 및 재항타시 재하시험결과 비교

현장명	말뚝번호	허용지지력(ton)		지지력비 (Restrike/EOID)	경과일수 (日)
		EOID	Restrike		
A현장	AH-1	125.0↑	127.2↑※	1.01	9
	AH-2	165.0↑	147.0↑	0.89	9
	AS	118.0↑	135.0↑	1.14	9
	AP	151.0	168.0↑	1.11	8
B현장	BH	126.1	151.0↑	1.19	2
	BS	118.7	165.0↑	1.39	3
	BP	75.0	144.0↑	1.92	1
C현장	CH	136.0	123.5	0.9	20
	CP	78.0	90.0	1.15	20

주) ↑은 하중-침하량곡선이 Davisson offset line과 만나지 않아 허용지지력이 그 이상을 의미함

표 4 항타시 선단지지력과 재항타시 주면마찰력의 비교

현장명	말뚝 번호	관입 깊이 (m)	EOID시 선단지지력(t/m^2)		주면마찰력(t/m^2)		비고
			최종 관입깊이	PHC말뚝 관입깊이(%)*	Restrike	정적지지력 계산	
A현장	AH-1	22.4	1756	1755(86)	3.9	4.8	Box면적 계산
	AH-2	23.2	2350	1744(85)	4.8	5.4	Box면적 계산
	AS	22.6	1302	1122(55)	3.7	4.9	원면적 계산
	AP	21.3	2043	2043(100)	4.5	6.1	원면적 계산
B현장	BH	28.5	1738	142(10)	5.5	4.5	Box면적 계산
	BS	28.0	1029	172(11)	7.6	4.8	원면적 계산
	BP	25.2	1480	1480(100)	2.6	5.1	원면적 계산
C현장	CH	9.2	2235	1483(118)	10.8	6.4	Box면적 계산
	CP	8.6	1257	1257(100)	5.3	7.2	원면적 계산

주) * ( )은 PHC말뚝의 선단지지력에 대한 해당 깊이에서의 각 말뚝의 지지력비를 의미함.

표 5 지반의 허용지지력과 말뚝의 재료허용강도 비교

현장명	말뚝번호	말뚝재료	① 재료허용하중 (ton)	② 지반의 허용지지력 (ton)	지지력비 (②/①)	허용지지력 (ton)
A현장	AH-1	300×300×10×15 mm (SPS 400)	112.9	127.2↑	1.13	112.9
	AH-2	300×300×10×15 mm (SPS 490)	153.2	165.0↑	1.08	153.2
	AS	ø 406 × 9 t	115.6	135.0↑	1.17	115.6
	AP	PHC 400	104.6	168.0↑	1.61	104.6
B현장	BH	300×305×15×15 mm (SPS 400)	128.7	151.0↑	1.17	128.7
	BS	ø 406 × 9 t	115.6	165.0↑	1.43	115.6
	BP	PHC 400	104.6	144.0↑	1.38	104.6
C현장	CH	294×302×12×12 mm (SPS 490)	119.5	123.5	1.03	119.5
	CP	PHC 450	121.1	90.0	0.70	90.0

주) * 재료허용하중은 현장 시공상황에 의해 결정되었음.

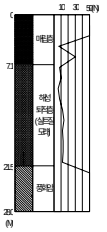


그림 1. A현장 지층구성도

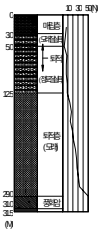


그림 2. B현장 지층구성도

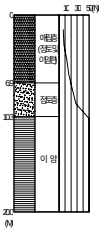
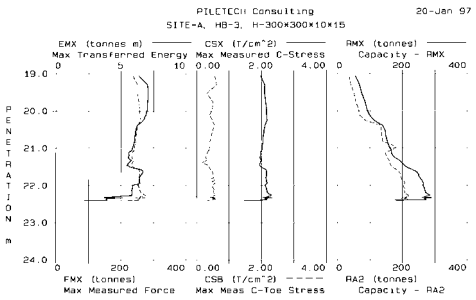
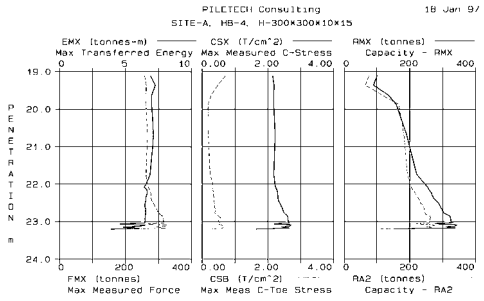


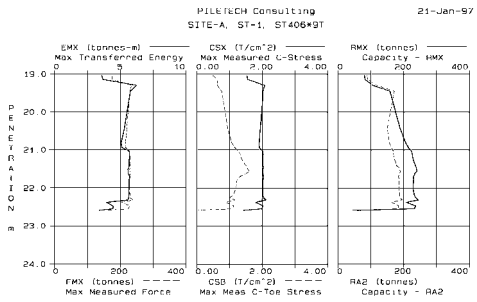
그림 3. C현장 지층구성도



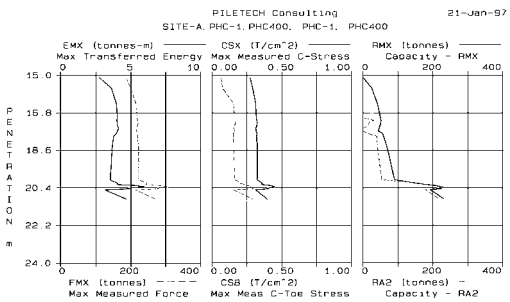
(a) H말뚝(300×300×10×15 mm, SPS 400, AH-1)



(b) H말뚝(300×300×10×15 mm, SPS 490, AH-2)

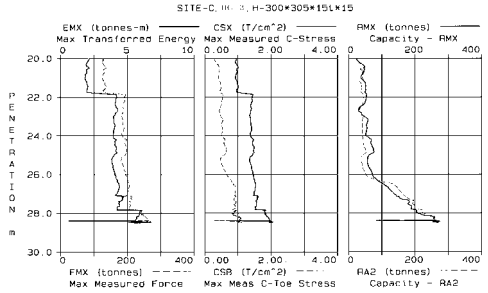


(c) 강관말뚝(Steel ø 406, 9 t, AS)

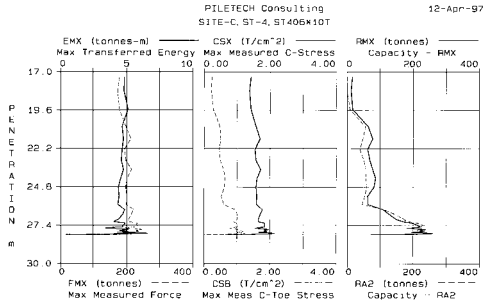


(d) PHC말뚝(ø 400, AP)

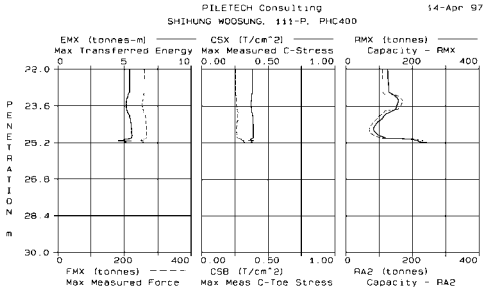
그림 4 A현장 시험말뚝의 PDA 측정결과



(a) H말뚝(300×305×15×15 mm, SPS 400, BH)

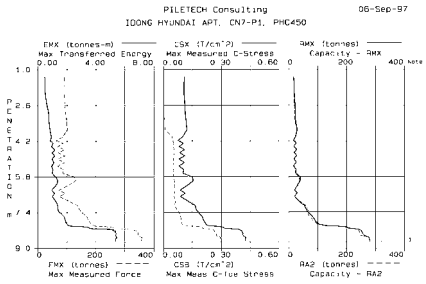


(b) 강관말뚝(Steel ø 406, 9 t, BS)

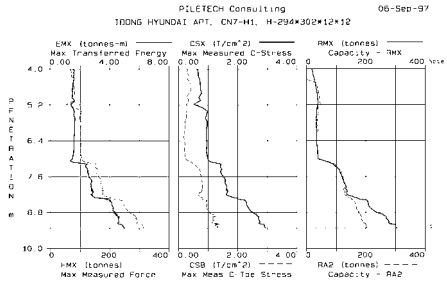


(c) PHC말뚝(ø 400, BP)

그림 5 B현장 시험말뚝의 PDA 측정결과

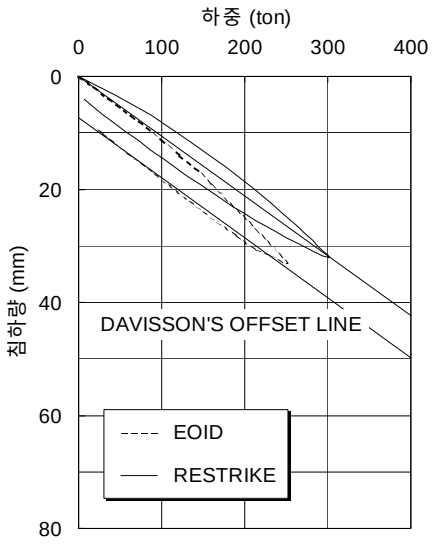


(a) H말뚝(294×302×12×12 mm, SPS 490, CH)

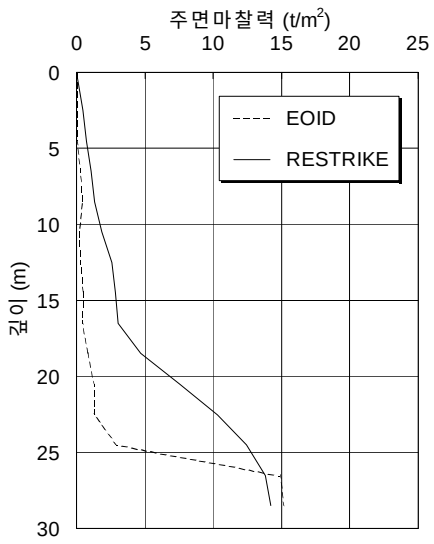


(b) PHC말뚝(ø 450, CP)

그림 6 C현장 시험말뚝의 PDA 측정결과

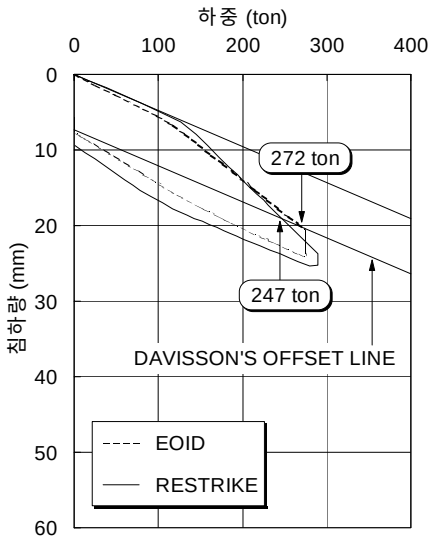


(a) 하중-침하량 곡선

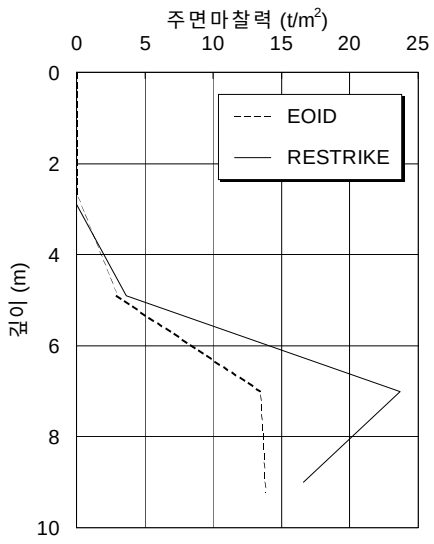


(b) 주면마찰력 분포

그림 7 set-up 효과가 일어난 말뚝(BH)

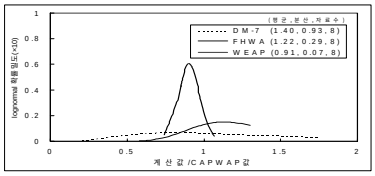


(a) 하중-침하량 곡선



(b) 주면마찰력 분포

그림 8 relaxation 효과가 일어난 말뚝(CH)



Input

2.1	0
4.0375	.645161290323
7.9125	0
11.7875	.967741935484
15.6625	.967741935484
17.6	0

Lognorm(1.40,0.93)

2.09999905	0.21	5.62E-02	
2.41632645	0.24163263	9.18E-02	
2.73265298	0.27326533	0.135084056	
3.04897952	0.30489798	0.183981197	
3.36530606	0.33653306	0.236311324	
3.68163260	0.36816330	0.289979488	
3.99795914	0.39979759	0.343155029	
4.31428568	0.43142860	0.394343424	
4.63061222	0.46306120	0.442398947	
4.94693876	0.49469390	0.486502273	
5.26326530	0.52632650	0.526120166	
5.57959184	0.55795920	0.560558417	
5.89591838	0.58959180	0.590914807	
6.21224492	0.62122450	0.616035787	
6.52857146	0.65285710	0.636478623	
6.84489801	0.68448980	0.652479537	
7.16122455	0.71612250	0.664327659	
7.47755109	0.74775510	0.67234426	
7.79387763	0.77938780	0.67686659	
8.11020417	0.81102040	0.67823559	
8.42653071	0.84265310	0.676786797	
8.74285725	0.87428570	0.672843832	
9.05918379	0.90591840	0.666713942	
9.37551033	0.93775510	0.658685139	
9.69183687	0.96918370	0.649024577	
10.0081634	1.00081630	0.637977853	
10.3244899	1.03244490	0.625769008	
10.6408165	1.06408160	0.612601016	
10.9571430	1.09571430	0.598656623	
11.2734695	1.12734700	0.584099422	
11.5897961	1.15897960	0.569075058	
11.9061226	1.19061230	0.553712522	
12.2224492	1.22224490	0.538125452	
12.5387757	1.25387760	0.522413439	
12.8551022	1.28551020	0.506663281	
13.1714288	1.31714290	0.490955018	
13.4877553	1.34877550	0.475338912	
13.8040819	1.38040820	0.459884827	
14.1204084	1.41204080	0.444634895	
14.4367349	1.44367350	0.429628584	
14.7530615	1.47530620	0.414898699	
15.0693880	1.50693880	0.400472141	
15.3857146	1.53857150	0.386370597	
15.7020411	1.57020410	0.372611162	
16.0183676	1.60183680	0.359206904	
16.3346942	1.63346940	0.346167368	
16.6510207	1.66510210	0.333499032	
16.9673473	1.69673470	0.321205711	
17.2836738	1.72836740	0.309288919	
17.6000003	1.76	0.297748195	

Input(FHWA)

6.7	.69
8.5	.69
10.3	0
12.1	4.1
13	0

Lognorm(1.22,

5.62E-03	5.80000019
9.18E-03	5.94693896
1.35E-02	6.09387773
1.84E-02	6.24081651
2.36E-02	6.38775528
2.90E-02	6.53469405
3.43E-02	6.68163282
3.94E-02	6.82857159
4.42E-02	6.97551036
4.87E-02	7.12244914
5.26E-02	7.26938791
5.61E-02	7.41632668
5.91E-02	7.56326545
6.16E-02	7.71020422
6.36E-02	7.85714299
6.52E-02	8.00408176
6.64E-02	8.15102054
6.72E-02	8.29795931
6.77E-02	8.44489808
6.78E-02	8.59183685
6.77E-02	8.73877562
6.73E-02	8.88571439
6.67E-02	9.03265317
6.59E-02	9.17959194
6.49E-02	9.32653071
6.38E-02	9.47346948
6.26E-02	9.62040825
6.13E-02	9.76734702
5.99E-02	9.9142858
5.84E-02	10.0612246
5.69E-02	10.2081633
5.54E-02	10.3551021
5.38E-02	10.5020409
5.22E-02	10.6489797
5.07E-02	10.7959184
4.91E-02	10.9428572
4.75E-02	11.089796
4.60E-02	11.2367347
4.45E-02	11.3836735
4.30E-02	11.5306123
4.15E-02	11.677551
4.00E-02	11.8244898
3.86E-02	11.9714286
3.73E-02	12.1183674
3.59E-02	12.2653061
3.46E-02	12.4122449
3.33E-02	12.5591837
3.21E-02	12.7061225
3.09E-02	12.8530612
2.98E-02	13
0.00E+00	
0.00E+00	
0.00E+00	
0.00E+00	
0.00E+00	
0.00E+00	
0.00E+00	
0.00E+00	
0.00E+00	

그림 9 H말뚝의 지지력 예측방법의 신뢰도 분석