매입말뚝의 선단지지력 증대를 위한 강관 부착 PHC파일 개발

Development of Steel Pipe Attached PHC Piles for Increasing
Base Load Capacity of Bored Pre-cast Piles백 규 호¹ Paik, Kyu-Ho양 희 정² Yang, Hee-Jeong

Abstract

Bored pre-cast piles using PHC piles is widely used in foundation of building structures constructed in urban areas because noise and vibration due to pile installation are low. However, since slime is formed at the base of borehole and the density of bearing stratum surrounding the base of borehole is decreased due to stress relaxation in drilling process of bored pre-cast pile method, the base load capacity of bored pre-cast piles is very low compared to the strength of bearing stratum. In this study, a new type of PHC pile, which short steel pipe with the same diameter as the PHC pile is attached to the pile tip, is developed to increase the base load capacity of bored pre-cast piles. In order to check the effect of the use of new PHC pile on the base load capacity of bored pre-cast piles, field pile load tests are performed for bored pre-cast piles using the new and existing PHC piles. Results of the pile load tests show that the new PHC pile gives higher base load capacity to bored pre-cast piles than the existing PHC pile, since the tip of new PHC pile is penetrated to undisturbed bearing stratum passing through the slime at the base of borehole and the loosened bearing stratum under the slime by pile driving using light hammer.

요 지

PHC파일을 사용한 매입말뚝은 시공 중에 발생하는 소음과 진동을 최소화할 수 있다는 장점 때문에 많은 경우 도심지에 건설되는 건축구조물의 기초로 사용된다. 그러나 매입말뚝의 시공을 위해 굴착공을 천공하는 과정에서 굴착공 저면에 슬라임이 형성되고 그 하부의 지반은 응력이완으로 인해 조밀도가 느슨해져서 매입말뚝은 원지반의 강도에 비해 선단지지력이 작게 발휘된다는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키기 위해 PHC파일의 선단에 길이가 짧고 PHC파일과 직경이 동일한 강관을 부착한 새로운 형태의 PHC파일을 개발하였다. 새로운 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 증대 효과를 검증하기 위해 현장 말뚝재하시험을 수행한 결과 새로운 PHC파일은 경타에 의해 파일 선단이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층 영역을 관통해서 강도가 큰 원지반에 관입됨으로써 기존 PHC파일보다 매입말뚝의 선단지지력을 상당히 증대시키는 것으로 나타났다.

Keywords : New PHC pile, Bored pre-cast pile, Base load capacity, Field pile load test

1 정희원, 관동대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kwandong Univ., Tel: +82-33-649-7515, Fax: +82-33-642-3359, pkh@kd.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 롯데건설 기술연구원 책임연구원 (Manager, Research & Development Institute, Lotte Eng. & Const.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

구조물 기초로 사용되는 말뚝은 시공방법에 따라 항타말뚝과 매입말뚝, 현장타설말뚝으로 분류된다. 이중 항타말뚝은 지지력이 크고 시공비가 저렴해서 경제적이지만 시공 중 발생하는 소음과 진동이 커서 도심지와 농가 주변에서는 사용이 제한되고 있다. 그리고 현장타설말뚝은 시공 중 발생하는 소음과 진동이 비교적 작고 본당 지지력이 커서 장대교량이나 도심지 대형구조물의 기초로 많이 사용되지만 시공비가 비싸고 시공이 복잡하다는 단점을 갖고 있다. 따라서 도심지에 건설되는 대부분의 건축구조물에서는 기초 공사비를 절감하고 시공 중 발생하는 소음과 진동으로 인한 민원 발생을 최소화하기 위해 시공 중 발생하는 건설공해는 항타말뚝보다 작고 시공비는 현장타설말뚝보다 저렴한 매입말뚝을 구조물 기초로 사용하고 있다.

매입말뚝은 Fig. 1과 같이 스크류 오거(screw auger)나 에어해머(일명 T4)를 이용해서 풍화암이나 연암까지 천공한 굴착공에 시멘트밀크를 주입하고 PHC파일을 삽입한 후 해머를 이용해서 PHC파일의 두부를 가볍게 타격(즉 경타)하는 것으로 시공을 완료한다. 이때 매입말뚝공법은 지반 천공과정에서 굴착공벽의 붕괴 방지를 위해 케이싱(casing)을 사용하는 SDA(Separated Double Auger)공법과 케이싱을 사용하지 않는 SIP(Soil cement Injected Pre-cast pile)공법으로 분류되고, 천공 과정에서 사용된 케이싱은 굴착공에 PHC파일을 삽입한 직후 제거된다. 그러나 굴착공을 천공하는 과정에서 굴착공 저면에 최대 굴착공 직경의 1~2배 두께의 슬라임이 형성

될 뿐만 아니라 굴착공에서 토사를 배토함에 따른 응력 이완으로 인해 굴착공 하부 지반이 원지반보다 느슨해지는 현상이 발생한다(Jardine 1988). 이런 상황에서 굴착공에 삽입된 말뚝에 경타를 가하더라도 경타에너지가 크지 않기 때문에 대부분의 PHC파일이 굴착공 저면에 쌓인 슬라임과 그 하부의 느슨해진 지지층을 관통하지 못하고, 압축성이 크고 강도가 작은 슬라임 위에 놓임으로써 원지반 지지층의 강도에 비해 매입말뚝의 선단지지력은 상당히 작게 된다. 그 결과 현재 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 대부분은 PHC파일이 갖고 있는 허용내력의 55~70%만을 설계지지력으로 사용하고 있으며, 그로 인해 구조물의 하중에 비해 많은 수량의 매입말뚝이 시공되고 있다.

최근 국내 건설시장의 여건이 악화되면서 많은 건설회사들이 원가절감을 위한 기술개발에 박차를 가하고 있으며, 말뚝기초 분야에서는 매입말뚝의 선단지지력을 향상시켜 구조물 기초로 시공되는 말뚝의 본 수를 줄임으로써 기초 공사비를 절감하고 공사기간을 단축하기 위한 연구를 진행하고 있다. 이들 연구결과 중 매입말뚝의 선단지지력 향상을 위해 PHC파일의 선단에 파일보다 큰 직경의 철판을 부착하거나 PHC파일의 선단부 벽 두께를 두껍게 해서 파일의 선단부 직경을 확대시킨 선단확장형 PHC파일이 개발되었으나(Yoo et al., 2007), 현재까지 매입말뚝의 선단지지력 증대효과와 이에 따른 공사비 절감효과를 이론적으로나 실험적으로 증명하지 못함에 따라 그 효과에 대해 논란이 계속되고 있는 상황이다.

본 연구에서는 매입말뚝의 선단지지력 저하 원인을

Fig. 1. Installation process of bored pre-cast piles using PHC piles

규명하고, 매입말뚝의 선단지지력을 증대시킬 수 있는 몇 가지 방안에 대해 타당성을 검토하였다. 그리고 매입말뚝의 선단지지력 증대방안 중 최적안으로 결정된 내용에 따라 개발된 강관 부착 PHC파일의 특징과 이 파일에 의한 매입말뚝의 선단지지력 증대 원리를 소개하고, 기존 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용해서 시공된 매입말뚝에 대한 현장 말뚝재하시험을 통해 강관 부착 PHC파일에 의한 매입말뚝의 선단지지력 증대 효과를 검증하였다.

2. 매입말뚝의 선단지지력 증대 방안

매입말뚝의 선단지지력(Q_p)은 식 (1)과 같이 말뚝 선단에 작용하는 단위 면적당 선단지지력(q_p)과 말뚝 선단면적(A_p)의 곱으로 계산되고, 단위 면적당 선단지지력은 다시 말뚝 선단에 작용하는 유효연직응력(σ'_v)과 지지력계수(N_q)의 곱으로 계산된다.

$$Q_p = q_p A_p = (\sigma'_v N_q) A_q \quad (1)$$

그러므로 매입말뚝의 선단지지력은 말뚝의 선단면적이나 단위 면적당 선단지지력을 키움으로써 향상될 수 있고, 단위 면적당 선단지지력은 말뚝을 보다 단단한 지지층에 깊게 관입시켜서 말뚝 선단이 작용하는 유효연직응력을 키우거나 말뚝 선단이 위치하는 지지층의 강도에 의해 결정되는 지지력계수를 키움으로써 향상될 수 있다.

이상과 같이 매입말뚝의 선단지지력은 다양한 방법에 의해 향상될 수 있다. 그 중 매입말뚝의 선단지지력을 증대시킬 목적으로 PHC파일의 선단부 직경을 확대한 것이 선단확장형 PHC파일이다(Yoo et al., 2007). 즉,

Fig. 2와 같이 PHC파일의 선단에 파일 외경보다 직경이 50mm 큰 원형 철판을 부착하거나 PHC파일 선단부의 벽두께를 50mm 더 두껍게 해서 파일의 선단부 직경을 본체보다 50~100mm 더 크게 한 PHC파일을 매입말뚝에 사용함으로써 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키는 것이다. 그러나 Jardine(1988)은 지반에 굴착공을 천공할 때 응력이완으로 인해 굴착공 저면에서 하부로 일정한 영역까지 지반의 조밀도 저하가 발생하고, 응력이완에 따른 조밀도 이완영역의 범위는 굴착공의 직경에 비례한다는 연구결과를 보고하였다. 따라서 매입말뚝에 선단확장형 PHC파일을 사용하기 위해 굴착공의 직경을 키우면 굴착공 하부지반의 조밀도 이완영역이 기존 PHC파일을 사용할 때보다 더욱 커지게 되므로 응력이완에 따른 말뚝 선단지반의 강도저하가 더욱 커지게 된다. 또한 선단확장형 PHC파일을 사용하면 경타 시 말뚝 선단에 발생하는 관입저항이 커져서 경타관입성이 저하되므로 PHC파일이 굴착공 저면에 형성되는 슬라임을 관통하지 못할 뿐만 아니라 경타에 의한 말뚝 선단부 슬라임의 압축량도 감소한다. 그 결과 선단확장형 PHC파일의 사용으로 매입말뚝의 선단면적은 말뚝 직경에 따라 21~44% 증가하지만 PHC파일 선단 지반의 강도저하가 커짐에 따라 식 (1)에서 N_q 값이 작아져서 말뚝의 단위 면적당 선단지지력이 감소하므로 매입말뚝의 선단지지력은 PHC파일의 선단면적 증가율 만큼 증가하지 않거나 경우에 따라서는 오히려 감소할 수도 있게 된다. 그리고 PHC파일의 선단면적이 커지면 매입말뚝의 시공을 위한 굴착공의 직경도 커져야 하므로 굴착공의 천공 비용이 상승하고 굴착공에 충전되는 시멘트ミルク의 양이 많아져서 기존 PHC파일을 사용할 때보다 시공비가 많이 소요되며, 굴착공벽과 PHC파일간에 공간이 커져서 PHC파일의 연직도 관리도 쉽지 않게 된다.

(a) Enlarged steel plate type

(b) Thick concrete wall type

Fig. 2. PHC piles with enlarged toe

뿐만 아니라 PHC파일의 선단부 직경이 커지면 무리효과(group effect)로 인한 선단지지력의 저하를 방지하기 위해 말뚝간에 유지해야 하는 최소 간격도 커지게 되므로 무리말뚝의 두부에 시공되는 매트기초의 크기도 커지게 되고, 그로 인해 매트기초의 시공에 투입되는 콘크리트와 철근량이 증가해서 공사비가 증가하는 단점도 있다.

한편, 선단확장형 PHC파일과 달리 파일의 선단면적은 기존 PHC파일과 동일하게 유지하고 말뚝 선단에 작용하는 단위 면적당 선단지지력을 키우는 방법을 통해서도 매입말뚝의 선단지지력을 증대시킬 수 있다. 즉, 경타에 의해 PHC파일이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 지반 천공으로 인해 이완된 지지층을 관통해서 원래의 단단한 지지층에 관입되도록 하면 말뚝 선단에 작용하는 유효연직응력이 커지고 말뚝 선단이 관입된 지지층의 강도에 의해 결정되는 지지력계수 N_q 도 커져서 매입말뚝의 단위 면적당 선단지지력이 커지게 된다. 이처럼 경타 시 말뚝 선단에 작용하는 관입저항을 최소화해서 PHC파일의 경타관입성이 극대화될 수 있도록 Fig. 3과 같이 PHC파일의 선단에 길이가 짧고 직경은 PHC파일과 동일한 강관을 부착한 강관 부착 PHC파일을 개발하였다.

강관 부착 PHC파일을 매입말뚝에 사용하면 경타에 의해 PHC파일의 선단에 부착된 강관이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층을 관통해서 전혀 교란되지 않은 단단한 지지층에 관입되어 말뚝의 단위 면적당 선단지지력이 큰 폭으로 향상되므로 매입말뚝의 선단지지력을 크게 향상시킬 수 있다. 이때 굴착공 저면에 형성되는 슬라임은 시멘트밀크와의 교반으로 유동성이 높아져서 강관 부착 PHC파일을 경타하는 과정

Fig. 3. Shape of toe of new PHC piles

에서 파일 선단에 크게 천공되는 부력 방지공(hole)으로 배출되므로 매입말뚝의 선단지지력을 극대화할 수 있는 강관의 최적길이는 굴착공 하부의 조밀도 이완 영역의 깊이와 밀접한 관계가 있다. Jardine(1988)은 모래지반에 굴착공을 천공하면 굴착공 하부로 굴착공 직경의 2~3배 범위까지 지반이 이완된다고 보고하였고, Carranza-Torres와 Fairhurst(1999)의 연구결과에 따르면 풍화도와 파쇄도가 매우 높고 화성암 계열 중 강도가 매우 작은 응회암에 약 15m 깊이로 굴착공을 천공하면 굴착공 저면으로부터 굴착공 직경의 10% 미만의 깊이까지만 조밀도가 이완되는 것으로 계산되었다. 따라서 일반적으로 매입말뚝의 선단이 SPT-N치가 50/8~50/5인 풍화암에 안착되는 점과 풍화암의 강도특성을 고려할 때 매입말뚝의 시공을 위해 풍화암에 굴착공을 천공하면 굴착공 하부의 조밀도 이완영역은 굴착공 직경의 1배 미만으로 형성될 것으로 사료되어 강관 부착 PHC파일에 부착되는 강관의 길이를 PHC파일 직경의 1배로 결정하였다.

3. 강관 부착 매입말뚝

3.1 강관 부착 매입말뚝의 시공

강관 부착 매입말뚝은 PHC파일 대신 강관 부착 PHC파일을 사용해서 시공한 매입말뚝이다. 강관 부착 PHC파일의 선단에 위치한 강관은 파일 본체와 직경이 동일하기 때문에 강관 부착 매입말뚝은 PHC파일을 사용하는 기존의 매입말뚝과 동일한 방법으로 시공된다. 즉, Fig. 4와 같이 스크류 오거나 T4 장비를 이용해서 소정의 깊이까지 굴착공을 천공하고 오거의 선단으로 분출되는 시멘트밀크를 굴착공에 주입하면서 굴착공 저면에 형성된 슬라임과 교반한 후 굴착공에 강관 부착 PHC파일을 삽입하고 그 두부에 경타를 가함으로써 강관 부착 매입말뚝의 시공을 완료하게 된다. 이때 경타 과정에서 선단면적이 큰 기존 PHC파일 및 선단확장형 PHC파일은 선단에 작용하는 관입저항이 커서 굴착공 저면에 형성되는 슬라임을 관통하지 못하고 그 위에 안착되는 반면, 선단면적이 매우 작은 강관 부착 PHC파일은 경타 관입성이 우수해서 Fig. 5와 같이 굴착공 저면에 형성된 슬라임과 그 하부의 굴착공 천공에 의한 이완된 지지층을 관통해서 전혀 교란되지 않은 단단한 원지반 지지층에 관입된다.

(a) Boring and injecting cement milk

(b) Inserting new PHC pile into borehole

(c) Removing casing

(d) Pile driving using light hammer

Fig. 4. Installation process of bored pre-cast piles using new PHC piles

Fig. 5. Comparison of Installation condition between existed and new PHC piles

Fig. 6. Change of relative density in sandy soil under base of borehole due to boring

3.2 강관 부착 매입말뚝의 선단지지력 메카니즘

매입말뚝을 시공하기 위해 지반에 굴착공을 천공하면 토압의 불균형에 따른 응력이완으로 인해 굴착공 주변의 일정 범위내에 존재하는 지반은 조밀도가 느슨

해진다. Jardine(1988)의 연구결과에 따르면 전 깊이에 걸쳐 상대밀도가 D_R 인 모래지반에 굴착공을 천공하면 Fig. 6과 같이 굴착공 저면은 매우 느슨한 상태로 전환되고, 굴착공 저면으로부터 깊이가 깊어질수록 지반의

상대밀도가 증가해서 굴착공 직경(D)의 2~3배 깊이에서 비로소 지반의 상대밀도가 굴착공 천공 이전의 원지반 상태와 동일해지는 것으로 나타났다.

그리고 Carranza-Torres와 Fairhurst(1999)는 Hoek-Brown 파괴기준을 따르는 암반에 구형의 공동(spherical opening)을 천공했을 때 응력이완으로 인해 공동 주변에 발생하는 소성영역(즉, 지반입자가 압축변형을 받아 체적이 팽창해서 조밀도가 이완되는 영역)의 범위를 평가한 결과 암반의 강도가 크고 풍화도가 낮을수록 공동 주변에 발생하는 소성영역이 작아진다는 연구결과를 발표하였다. 일례로 Carranza-Torres와 Fairhurst(1999)의 연구결과를 이용해서 화성암중 암석의 압축강도가 가장 작은 응회암으로 구성되고 풍화도와 파쇄도가 매우 높아서 지질 강도계수(geological strength index, GSI)가 0인 지반에 15m 깊이로 굴착공을 천공했을 때 굴착공 하부지반의 소성영역을 계산한 결과 굴착공 저면으로부터 굴착공 반경의 약 18% 깊이까지 소성영역이 형성되어 지반이 이완되는 것으로 나타났다. 따라서 매입말뚝이 안착되는 풍화암의 강도특성을 고려할 때 말뚝 직경과 동일한 길이의 강관이 부착된 강관 부착 PHC파일을 사용해서 매입말뚝을 시공하면 경타에 의해 말뚝 선단의 강관이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 조밀도 이완영역을 관통해서 원지반 상태의 풍화암에 관입됨으로써 매입말뚝의 선단지지력이 증가될 수 있다.

한편, 강관 부착 매입말뚝의 시공을 위해 강관 부착 PHC파일에 경타를 가하면 말뚝 선단에 부착된 강관 내부로 시멘트밀크와 교반된 슬라임과 함께 굴착공 하부의 이완된 지지층이 유입되어 관내토가 형성된다. 일반

적으로 강관파일을 지반에 타입하면 관내토에 의해 파일 선단부가 막히는 폐색효과(plugging effect)가 발생하고, 파일이 관내토에 의해 완전히 막히는 완전폐색(fully plugging) 상태에 가까울수록 파일 선단에 작용하는 단위 면적당 선단지지력이 커지는 것으로 알려져 있다 (Paik과 Salgado 2003, Lee 등 2003). 또한 Paik과 Lee(1993)의 연구결과에 따르면 강관파일의 경우 관내토에 작용하는 선단지지력은 Fig. 7(a)와 같이 파일 선단으로부터 파일 내경(D_i)의 2~3배 영역에 있는 관내토와 파일간의 마찰력에 발휘되므로 관내토에 의한 선단지지력의 발휘를 위해서는 관내토 길이가 파일 직경의 2~3배 이상이 되어야 한다. 그러나 강관 부착 PHC파일에 부착된 강관은 그 길이가 말뚝 직경의 1배로 매우 짧지만 Fig. 7(b)와 같이 시멘트밀크가 경화되면 강관으로 유입된 관내토가 PHC파일 하단의 부력 방지공(hole)이 뚫린 선단철판과 PHC파일 벽체에 의해 지지되므로 완전폐색(fully plugging) 상태로 거동하게 된다. 따라서 원지반 상태의 지지층에 관입된 강관 부착 매입말뚝의 선단에는 매우 큰 크기의 선단지지력이 발휘되고, 선단지지력은 강관의 순단면부 뿐 아니라 강관 내부의 관내토 부분에서도 발현된다.

3.3 강관 부착 매입말뚝의 특징

강관 부착 매입말뚝은 PHC파일을 사용하는 기존 매입말뚝과 달리 경타관입성이 향상된 강관 부착 PHC파일을 사용해서 경타에 의해 파일 선단을 원지반 상태의 단단한 지지층에 관입시킴으로써 기존보다 선단지지력을 대폭 증대시킨 새로운 형태의 매입말뚝이다. 강관 부착 매입말뚝은 PHC파일의 선단에 부착된 강관이 관입되는 지지층의 강도에 따라 기존 매입말뚝보다 대폭 향상된 선단지지력을 발휘하므로 동일 구조물에 대해 말뚝의 설치 본 수를 줄일 수 있으며, 그로 인해 기존 매입말뚝 사용 시보다 기초 공사비를 절감하고 공사기간을 단축시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. 그리고 기존 PHC파일을 사용하는 매입말뚝과 시공방법이 동일하므로 시공효율이 우수하고 시공관리가 용이하다는 특징이 있다.

강관 부착 매입말뚝은 선단확장형 PHC파일을 사용하는 매입말뚝에 비해서도 많은 장점을 갖고 있다. 말뚝의 선단부 직경을 확대한 선단확장형 PHC파일과 달리 강관 부착 PHC파일은 전 길이에 걸쳐 파일 직경이 동일

Fig. 7. Comparison of base load capacity mechanism between steel pipe and new PHC piles

하므로 매입말뚝의 시공을 위해 굴착공의 직경을 확대할 필요가 없다. 그 결과 선단확장형 PHC파일을 사용할 때보다 굴착공 천공비용이 저렴하고 굴착공에 충전되는 시멘트밀크량이 감소해서 말뚝의 본당 시공비를 낮출 수 있다. 또한 환경적인 측면에서도 매입말뚝의 시공 분수가 줄어서 기초공사 중에 발생하는 소음·진동의 총량이 줄어들므로써 건설공해로 인한 민원발생 가능성을 줄이고 말뚝 시공에 사용되는 시멘트량을 줄여서 시멘트 생산 시 발생하는 이산화탄소 배출량을 감소시켜 온실가스 감축에 크게 기여할 수 있다.

4. 강관 부착 매입말뚝의 지지력 검증

강관 부착 PHC파일에 의한 매입말뚝의 선단지지력 증대효과를 검증하기 위해 2개 현장에서 강관 부착 매

Fig. 8. Boring log of Site A

입말뚝과 기존의 매입말뚝을 시공하였고, 이들 말뚝에 대해 말뚝재하시험을 수행하였다. 특히 지지층의 강도 특성에 따른 강관 부착 매입말뚝의 선단지지력 변화를 조사하기 위해 현장별로 지지층의 강도가 다른 지점에 강관 부착 매입말뚝의 선단을 안착시켰다.

4.1 현장 A

본 현장은 충청북도 청원군에 위치한 곳으로, 지반은 Fig. 8과 같이 지표면으로부터 각각 4.5m 두께의 매립층과 풍화토층이 위치하고 그 아래는 SPT-N치가 50/10 이상인 풍화암층으로 구성되어 있다. 기존 매입말뚝과 강관 부착 매입말뚝의 지지력 비교를 위해 직경이 500mm인 PHC파일과 동일 직경의 PHC파일에 1D_p 길이(D_p=PHC파일의 직경)의 강관이 부착된 강관 부착 PHC파일을 사용해서 SDA공법으로 매입말뚝을 시공하였다(Fig. 9 참조). 굴착공은 10m 깊이까지 천공하였고, 굴착공 저면 깊이에서 SPT-N치는 50/8로 측정되었다. 두 본의 시험말뚝은 시멘트밀크를 주입하지 않은 상태에서 굴착공에 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 삽입한 후 해머로 경타를 가하는 방법으로 시공되었다. 그리고 시험말뚝을 시공한 지 5일이 경과했을 때 반력앵커를 이용해서 시험말뚝에 대한 정재하시험을 실시하였다. 이때 굴착공에 삽입된 PHC파일과 강관 부착 PHC파일의 주변에 시멘트밀크가 충전되지 않아 주변마찰력이 발현되지 않은 상태였다. 따라서 말뚝의 주변마찰력으로 인해 지지층에 작용하는 구속압력이 증가해서 선단지지력이 커질 수 있다는 점을 고려하면 시멘트밀크를 충전하지 않음으로써 시험말뚝의 선단지지력이 실제보다 다소 작게 측정될 수 있다. 이처럼 시멘트밀크의 충전유무

(a) Making steel pipe attached PHC pile

(b) Inserting new PHC pile into casing

Fig. 9. Installation of test piles at site A

에 따라 매입말뚝의 선단지지력은 다소 달라질 수 있지만 기존 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 비는 큰 차이를 보이지 않을 거라는 판단 하에 정재하시험에서 측정된 시험말뚝의 전체하중을 선단하중으로 간주하였고, 이 값을 이용해서 두 시험말뚝의 선단지지력 비를 계산하였다.

Fig. 10은 정재하시험에서 측정된 시험말뚝의 선단하중-침하량 곡선을 보인 것이다. 여기서 강관 부착 매입말뚝의 선단지지력은 말뚝 선단에 부착된 강관의 폐쇄 단면에 작용하는 선단하중과 강관의 외주면에 작용하는 마찰력의 합으로 정의하였다. 그림에서 보듯이 재하시험 초기부터 강관 부착 매입말뚝은 기존 매입말뚝에 비해 상당히 우수한 선단하중 지지 능력을 발휘하였다. 그리고 말뚝 두부의 침하량이 말뚝 직경의 10%에 도달했을 때 말뚝에 가해진 하중을 극한지지력으로 정의하는 Eurocode 7(CEN 2004)의 파괴기준을 재하시험 결과에 적용한 결과 기존 매입말뚝과 강관 부착 매입말뚝의 극한선단지지력은 각각 2428kN과 3641kN으로 측정되어 기존 매입말뚝보다 강관 부착 매입말뚝의 선단지지력이 약 50% 큰 것으로 나타났다.

두 시험말뚝의 전체지지력을 비교하기 위해 구조물 기초설계기준(KGS, 2008)에서 매입말뚝의 주면마찰

력 산정식으로 제시하고 있는 식 (2)를 이용해서 시험말뚝의 극한주면마찰력을 산정한 결과 두 매입말뚝의 극한주면마찰력은 850kN으로 계산되었다. 따라서 Table 1에서 보듯이 기존 매입말뚝과 강관 부착 매입말뚝의 극한전체지지력이 각각 3278kN과 4491kN으로 추정되어 1D_p 길이의 강관이 부착된 강관 부착 매입말뚝은 기존 매입말뚝보다 37% 큰 전체지지력을 발휘하는 것으로 나타났다.

$$Q_s(\text{kN}) = f_s \cdot A_s = 2 \cdot \bar{N} \cdot A_s \quad (2)$$

여기서 f_s 는 단위 면적당 극한주면마찰력이고, A_s 는 매입말뚝의 주면 면적, $\bar{N}$ 는 말뚝 주면과 접하는 지반에서 측정된 SPT-N치의 평균값이다.

4.2 현장 B

본 현장은 세종시에 위치한 ○○기관 신청사 건립현장으로, Fig. 11(a)와 같이 지표면으로부터 1.5m 두께의 매립층과 3.1m 두께의 실트질 모래층, 4.4m 두께의 풍화토층이 순서대로 존재하고 그 아래 매우 두꺼운 풍화암층이 위치한다. 기존 매입말뚝과 강관 부착 매입말뚝의 지지력 비교를 위해 Fig. 11(b)와 같이 직경이 600mm인 PHC파일과 선단에 1D_p 길이의 강관이 부착된 강관 부착 PHC파일을 사용해서 근입깊이가 9.0m와 13.0m인 매입말뚝을 각각 3본씩 시공하였다. 9.0m 길이의 매입말뚝 선단은 SPT-N치가 50/8인 풍화암 상단에 그리고 13.0m 길이의 매입말뚝은 SPT-N치가 50/4인 풍화암에 선단이 근입되었고, 현장 A와 달리 굴착공에 시멘트밀크를 주입하고 PHC파일을 삽입한 후 경타를 가하는 방법으로 시험말뚝을 시공하였다. 시험말뚝 종류별 최종 근입깊이는 Table 2와 같았으며, 강관 부착 매입말뚝의 경우 말뚝 근입깊이에서 파일 선단에 부착된 강관의 길이는 제외하였다.

시험말뚝의 시공이 종료되고 10일 후에 동일 깊이에 근입된 시험말뚝 중 2본의 기존 매입말뚝에 대해서는 반력앵커를 이용한 압축재하시험과 인발재하시험을 수

Fig. 10. Base load-settlement curves of test piles at site A

Table 1. Summary of ultimate load capacities and normalized load capacities measured at site A

Pile type	Ultimate load capacity (kN)			Normalized load capacity	
	Base	Shaft	Total	Base	Total
PHC pile	2428	850	3278	1	1
New PHC pile	3641	850	4491	1.50	1.37

Fig. 11. Soil condition and test plan at Site B

Table 2. Summary of installation condition of test piles

Pile type	Embedment length (m)			
	Group 1		Group 2	
	Compression	Uplift	Compression	Uplift
PHC pile	8.85	9.05	12.7	13.0
New PHC pile	9.20	—	12.5	—

행하였고, 강관 부착 매입말뚝에 대해서는 압축재하시험을 수행하였다. 압축 및 인발재하시험을 위해 시험말뚝에 가하는 하중은 각각 600kN과 250kN씩 증가시켰고, 재하시험은 말뚝 두부의 침하량이 말뚝 직경의 10%에 해당하는 60mm를 초과할 때까지 계속 진행하였다. 그러나 13.0m 깊이에 근입된 압축재하시험용 시험말뚝은 반력앵커의 용량이 부족해서 두부 침하량이 60mm에 도달하기 훨씬 이전에 재하시험이 종료되었다.

Fig. 12는 압축 및 인발 정재하시험에서 측정된 시험말뚝에 대한 전체하중-침하량 곡선을 보인 것이다. 그림에서 보듯이 9.0m 길이의 시험말뚝은 모두 60mm이상 침하되어 Eurocode 7(CEN 2004)에서 정의하는 극한상태에 도달한 반면, 13.0m 길이의 압축시험용 매입말뚝은 반력앵커의 용량 제한으로 인해 극한상태 훨씬 이전인 7200kN의 하중단계에서 재하시험이 종료되었다. 따라서 시험말뚝의 극한지지력은 정재하시험에서 측정된 하중-침하량 곡선에 말뚝의 탄성변형을 고려해서 극한상태를 정의하는 Davisson(1972)의 파괴기준을 적용해

서 결정하였다. 그리고 극한주면마찰력은 압축 및 인발 재하시험에서 측정된 말뚝의 주면마찰력이 동일하다는 가정하에 인발재하시험에서 측정된 인발지지력을 이용해서 단위 면적당 평균 극한주면마찰력을 산정한 후 이 값을 압축용 매입말뚝의 전 길이에 적용하는 방법으로 결정하였고, 시험말뚝의 극한선단지지력은 재하시험에서 측정된 극한전체지지력에서 극한주면마찰력을 빼는 방법으로 계산하였다.

시험결과에서 보듯이 강관 부착 매입말뚝은 기존 매입말뚝보다 동일 침하량에서 큰 하중을 지지하였다. 그리고 각 시험말뚝에 대한 극한지지력과 함께 기존 매입말뚝에 대한 강관 부착 매입말뚝의 극한지지력 비로 정의한 지지력 비를 나타낸 표 3에서 보듯이 말뚝의 근입깊이가 9.0m와 13.0m일 때 기존 매입말뚝보다 강관 부착 매입말뚝의 선단지지력이 각각 44%와 60%, 그리고 극한전체지지력은 각각 40%와 48% 큰 것으로 나타났다. 이처럼 말뚝의 근입깊이가 깊을수록 선단지지력에 대한 지지력 비가 조금씩 커지는 것은 말뚝의 근입깊이가 깊을수록 말뚝 선단의 지지층 강도가 커짐과 동시에 기존 매입말뚝보다 강관 부착 매입말뚝의 선단지지력이 선단 지지층의 강도에 더 크게 영향을 받기 때문이다. 반면 말뚝의 근입깊이가 깊을수록 강관 부착 PHC파일에 의한 매입말뚝의 전체지지력 증가율은 감소하는데, 이것은 강관 부착 PHC파일의 사용으로 매입말뚝의 선단지지력은 증가하지만 말뚝의 근입깊이가 깊어질수

Table 3. Summary of ultimate load capacities and normalized load capacities measured at site B

Group	Pile type	Ultimate load capacity (kN)			Normalized load capacity	
		Total	Base	Shaft	Base	Total
1	PHC pile	3077	2806	271	1.0	1.0
	New PHC pile	4305	4034	271	1.44	1.40
2	PHC pile	6239	5016	1223	1.0	1.0
	New PHC pile	9210	8006	1204	1.60	1.48

Fig. 12. Total load-settlement curves of test piles at site B

록 전체지지력에서 선단지지력이 차지하는 비중이 감소하기 때문이다.

5. 강관 부착 매입말뚝의 경제성

강관 부착 PHC파일은 기존 PHC파일의 선단에 단가가 비싼 짧은 길이의 강관을 부착했기 때문에 기존 PHC 파일보다 말뚝의 재료비가 비싸다는 단점을 갖고 있다. 그러나 기존 PHC파일을 사용할 때보다 매입말뚝의 선단지지력이 대폭 증가하기 때문에 동일 구조물에 대해 말뚝의 시공 본 수를 줄일 수 있고, 선단확장형 PHC파일과 달리 파일 선단의 강관과 파일 본체의 직경이 동일하므로 기존 PHC파일을 사용할 때와 동일한 장비로 매입말뚝을 시공할 수 있어서 기존 매입말뚝과 비교해서 말뚝의 1m당 순수한 공사비는 증가하지 않는다는 장점을 갖고 있다. 따라서 강관 부착 매입말뚝의 경제성을 분석하기 위해 동일 구조물의 기초로 기존 매입말뚝과 강관 부착 매입말뚝을 사용했을 때 공사비를 비교하였다.

Table 4는 강관 부착 매입말뚝에 대한 현장 말뚝재하시험이 수행된 현장 A와 B에 기존 매입말뚝 1000본을 필요로 하는 구조물을 건설할 경우 구조물 기초로 기존 매입말뚝과 강관 부착 매입말뚝을 적용했을 때 말뚝의 지지력을 고려해서 시공 본 수를 계산한 결과를 보인 것이다. 표에서 보듯이 현장 A와 B에서 기존 매입말뚝보다 강관 부착 매입말뚝의 전체지지력이 37~48%까지 크기 때문에 기존 매입말뚝을 동일 직경의 강관 부착 매입말뚝으로 변경하면 말뚝의 시공 본 수가 1000본에서 676~730본으로 27.0~32.4% 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 말뚝의 지지력이 지반의 지지력과 말뚝 본체의 허용내력 중 작은 값에 의해 결정되므로 말뚝 지지력이 말뚝 본체의 허용내력에 의해 결정되는 경우에는 표 4에 계산된 말뚝 시공 본 수의 절감률은 다소 낮아질 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 매입말뚝의 선단지지력을 증대시킬

Table 4. Change in amount of piles by replacing existed with new PHC piles

Site	Embedment length (m)	Normalized load capacity			Amount of pile		Reducing ratio in amount of pile (%)
		Base	Shaft	Total	PHC	New PHC	
A	10.0	1.50	1.0	1.37	1000	730	27.0
B	9.0	1.44	1.0	1.40	1000	715	28.5
	13.0	1.60	1.0	1.48	1000	676	32.4

수 있는 강관 부착 PHC파일을 개발하였고, 이 파일을 사용해서 시공된 강관 부착 매입말뚝의 선단지지력 특성을 검증하기 위해 2개 현장에서 실규모 말뚝재하시험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 매입말뚝 시공 중 경타에 의해 파일 선단이 굴착공 저면에 형성되는 슬라임과 그 하부의 응력이완으로 인해 조밀도가 느슨해진 이완된 지지층 영역을 관통해서 원지반의 단단한 지지층에 관입될 수 있도록 PHC파일 선단에 동일 직경의 짧은 강관을 부착해서 경타관입성을 극대화한 강관 부착 PHC파일을 개발하였다.
- (2) 현장 말뚝재하시험을 통해 기존 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용해서 시공된 두 종류의 매입말뚝에 대해 압축 및 인발 재하시험을 수행한 결과 기존 PHC파일 대비 강관 부착 PHC파일은 매입말뚝의 선단지지력을 44~60% 이상 향상시키는 것으로 나타났고, 선단 지지층의 강도가 클수록 강관 부착 매입말뚝의 선단지지력은 증가하였다.
- (3) 선단면적이 큰 기존 PHC파일은 경타 시 말뚝 선단에 발생하는 관입저항이 커서 파일 선단이 슬라임이나 그 하부의 이완된 지지층 위에 안착되어 지지층의 강도에 비해 상당히 작은 선단지지력을 발휘하는 반면, 선단 면적이 작은 강관이 부착된 강관 부착 PHC파일은 경타 시 관입저항이 작아 파일 선단이 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층을 관통해서 원지반의 지지층에 관입되어 지지층의 강도에 상응하는 선단지지력을 발휘하는 것으로 나타났다.
- (4) 현장 말뚝재하시험이 수행된 현장 A와 B에 매입말뚝을 시공할 경우 기존 PHC파일을 강관 부착 PHC파일로 대체하면 동일 구조물에 대해 매입말뚝의 시공 본수를 27.0~32.4%까지 줄일 수 있고, 이로 인해 구조물 기초공사에 투입되는 공사비의 절감과

공사기간의 단축이 가능한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 롯데건설(주), 동부건설(주), 대림C&S(주), IS동서(주)의 연구비 및 제품지원에 의해 수행된 것으로, 연구비를 지원해준 관계사를 비롯해 현장시험이 가능하도록 지원해준 동부건설 KDI현장의 김철근 소장님과 기술연구소의 서경범 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C. (1999), "The Elasto-Plastic Response of Underground Excavations in Rock Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.36, pp.777-809.
2. CEN (Comité Européen De Normalisation) (2004), EN 1997 Eurocode 7, Geotechnical - Part 1: General Rules, CEN.
3. Davisson, M. T. (1972), "High Capacity Piles", Proceeding of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, ASCE, Illinois Section, Chicago, pp.81-112.
4. Jardine, F. M. (1988), "Introduction to Papers 1-9", Proceedings of Penetration Testing in the UK, ICE, Birmingham, pp.23-49.
5. KGS (Korean Geotechnical Society) (2008), Structural Foundation Design Manual.
6. Lee, J. H., Salgado, R., and Paik, K. H. (2003), "Estimation of Load Capacity of Pipe Piles in Sand Based on CPT Results", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.129, No.5, pp.391-403.
7. Paik, K. H. and Lee, S. R. (1993), "Behavior of Soil Plugs in Open-Ended Model Piles Driven into Sands", Marine Georesources and Geotechnology, Vol.11, pp.353-373.
8. Paik, K. H. and Salgado, R. (2003), "Determination of Bearing Capacity of Open-Ended Piles in Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.129, No.1, pp.46-57.
9. Yoo, C., Kim, S., Heo, K., and Song, K. (2007), "End Bearing Capacity of Pile Tip-enlarged PHC Piles in Weathered Rock", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.23, No.1, pp.23-37.

(접수일자 2013. 3. 3, 수정일 2013. 6. 14, 심사완료일 2013. 7. 11)