

대심도 연약지반에서 장대 PHC말뚝의 향타에 따른 지반과 말뚝거동

Pile and Ground Responses during Driving of a Long PHC Pile in Deep Soft Clay

김 성 렬¹ Kim, Sung-Ryul

정 성 교² Chung, Sung-Gyo

N. T. Dung³

Abstract

Because pile behavior is governed by geotechnical characteristics of surrounding soils, it is therefore necessary to monitor ground responses during pile driving and analyze the relation between the behaviors of pile and ground. In this research, the 57 m long PHC pile was driven into deep soft clay in the Nakdong River estuary area. During and after the pile driving, the ground responses and the residual load of pile have been monitored for about a year, by using piezometers, inclinometers, level posts for surface settlement, and strain gauges in piles etc. As the results, the residual load by the negative skin friction along the pile increased with the dissipation of the excess pore pressure, which was developed by pile driving and reclamation. About 30% of the maximum residual load developed due to the dissipation of the increased excess pore pressure during the driving. It is thus emphasized that most piles driven in clay deposits need to be designed by considering negative skin friction along the pile.

요 지

말뚝 기초의 거동은 말뚝을 둘러싼 주변 지반의 특성에 좌우되므로, 향타 중의 지반거동을 예측하고 지반과 말뚝 거동간의 상관관계를 분석하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 말뚝 인접지반에 간극수압계, 경사계, 지표 변위말뚝, 그리고 말뚝 변형률계 등을 매설하여 낙동강 하구지역에 위치한 대심도 연약지반에 약 57m 관입깊이의 PHC 장대 말뚝을 향타하였을 때 말뚝 축하중 분포와 인접지반의 거동을 약 1년간 예측하고 그 결과를 분석하였다. 예측결과 매립하중과 향타에 의해 발생한 점토층 내의 과잉간극수압이 소산되면서 말뚝체 내에 부마찰력이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 부마찰력에 의해 발생한 말뚝체의 최대 압축력 중 약 30%는 향타 중 증가한 과잉간극수압의 영향 때문으로 나타났다. 그러므로, 점성토 지반에 설치되는 대부분의 말뚝에 대하여 부마찰력을 고려한 설계를 수행할 필요성이 강조되었다.

Keywords : Ground response, Negative Skin friction, PHC pile, Pile driving, Residual load, Soft clay

1. 서 론

최근에 이르러 낙동강 하구 일대의 도심지에서는 건

축부지가 부족해지고 항만 매립공사 등이 수행됨에 따라 대심도 연약 지반에 구조물을 시공하는 사례가 증가하고 있다. 특히, 이 지역에서는 대심도 연약지반이 분

1 정회원, 동아대학교 토목공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.)

2 정회원, 동아대학교 토목공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ., sgchung@dau.ac.kr, 교신저자)

3 동아대학교 토목공학부, 박사과정 (Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

포하고 있으므로, 큰 하중을 지지할 수 있는 말뚝 지지층의 깊이는 50m 이상의 깊이에 위치하고 있다. 이러한 연약지반 상에 장대말뚝을 향타할 경우에 말뚝 부피만큼 흙이 배토되면서 인접한 말뚝과 구조물의 손상 및 변위 유발, 그리고 지반교란으로 인한 인접지반의 강도저하 등으로 여러 가지 문제들이 발생할 수 있다.

또한, 말뚝 기초의 지지력을 명확히 산정하기 위해서는 향타로 유발되는 과잉간극수압의 변화, 지반변위 등에 의하여 말뚝 인접지반의 거동과 말뚝체에 발생하는 응력변화를 연관지어 분석할 필요가 있다. 말뚝 설치 시에는 지반이 교란되면서 과잉간극수압이 증가하고, 설치가 끝난 후에는 향타 중에 발생하였던 과잉간극수압이 소산되면서 지반강도가 회복되고 지반 지지력이 증가하는 setup 효과가 발생한다. 이 때, 과잉간극수압 소산에 의해 지반이 침하되기 때문에 말뚝체에는 부마찰력에 의해 상당한 크기의 축력이 유발되는 것으로 알려져 있다. 이러한 과정에 의해 말뚝 재하시험 및 상부구조물 시공 등으로 말뚝두부에 하중이 가해지기 전에 말뚝체 내에 축력이 존재하게 되며 이 축력은 잔류하중(residual load)으로 알려져 있다(Hanna 등, 1973; Holloway 등, 1978; Briaud 등, 1984; Fellenius, 2002; 김성렬 등, 2006). 현재 국내에서 수행되는 대부분의 재하시험은 시험 전 말뚝체 내에 존재하는 이러한 잔류하중 효과를 고려하지 않기 때문에 비록 하중전이시험을 수행하더라도 주면마찰력과 선단지지력의 크기를 잘못 예측하는 경우가 빈번하다. 이와 같이 말뚝향타로 인해 발생할 수 있는 제 문제들을 해결하고 말뚝기초의 지지력을 명확히 산정하려면, 말뚝향타에 따른 지반거동 및 말뚝 응력변화에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하게 되었다.

국외에서는 오래전부터 말뚝 향타 중 발생한 과잉간극수압의 변화가 지반의 전단강도에 미치는 영향(Roy 등, 1981; Bond and Jardine, 1991)과 향타에 의해 발생하는 인접지반의 수평 및 수직 변위(Cooke and Price, 1973; Randolph 등, 1979) 등에 대한 연구가 이루어졌다. 또한, 최근에 수행된 관련 연구로서, Hwang 등(2001)은 콘크리트 말뚝을 향타하면서 과잉간극수압, 지반 수평변위, 지표면 침하량, 지표면 진동 등을 측정하고, 이 결과를 바탕으로 향타 시의 지반거동을 종합적으로 분석하였다. Pestana 등(2002)은 강관말뚝의 향타에 의한 지반의 수평변위와 간극수압 소산의 측정을 통하여, 말뚝 향타 중 발생한 과잉간극수압은 말뚝으로부터의 거리의 함수로 나타낼 수 있고 향타시 발생한 수평변위가 압밀이 진행됨에 따

라 감소하는 것을 관찰하였다. Bullock 등(2005)은 정방형 콘크리트 말뚝체 표면에 간극수압계와 압력계 등을 매설하여 향타 후 말뚝체에 작용하는 수평토압과 수압을 측정 후 시간경과에 따른 주면마찰력의 변화를 분석하였다.

그러나, 지금까지 대부분의 연구는 향타 후 지반거동 또는 말뚝체 응력변화에 국한하여 연구하였으며, 향타에 의한 지반거동과 말뚝체의 응력변화를 동시에 측정하여 분석한 사례는 부족하다. 또한, 국내에서는 이와 관련된 현장 실측연구사례가 거의 없는 실정으므로, 국내 고유의 지반조건에 대하여 장대말뚝 향타 시의 인접지반과 말뚝거동에 대한 실규모 현장계측 연구를 수행하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 최근 국내에서 사용이 증가하고 있는 PHC 말뚝(Pretensioned spun High strength Concrete pile)을 대상으로 대심도 연약지반 내에 말뚝의 향타 중, 설치 후 시간경과에 따른 지반거동 및 말뚝의 잔류응력을 장기간 측정하였다. 지반거동 측정항목은 경사계를 이용한 인접지반의 수평변위 측정, 거리별, 깊이별로 설치한 간극수압계를 이용한 간극수압 측정, 그리고 변위말뚝을 이용한 지표면 침하계측 등이다. 또한, 공장제작시에 PHC 말뚝 내에 변형률계를 설치하고, 말뚝 향타 직후부터 말뚝체 내에 발생하는 잔류하중을 측정하였다. 이러한 결과를 바탕으로 말뚝 인접지반의 간극수압, 수평변위, 지표면 침하량, 그리고 말뚝체 잔류하중 변화와 서로의 상관관계를 분석하였다.

2. 지반조건

본 시험은 낙동강 하구지역에 위치한 매립지역에서

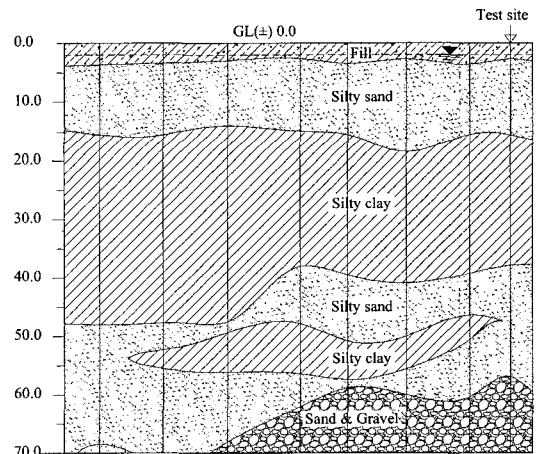


그림 1. 시험부지의 지층구성

수행하였다. 그림 1은 시험부지의 지층구성을 보여준다.

지반조건을 보면, 상부에서는 최근에 매립된 2~4m 두께의 매립층이 존재하고 바로 그 아래에 하상 퇴적층인 실트질 모래층이 약 15m의 깊이까지 위치하고 있다. 그 아래에 약 40m의 깊이까지 연약한 실트질 점토층이 두껍게 분포하고 있다. 점토층 아래에는 표준관입시험 N값이 50이 넘는 조밀한 모래층이 약 10m 두께로 존재하며 그 아래에 다시 연약한 모래층이 약 57m 깊이까지 분포한다. 본 시험말뚝은 약 57m 깊이에 존재하는 단단한 자갈모래층에 지지시키는 것으로 계획하였다.

그림 2는 본 시험위치에서의 지반정수값들을 보여준다. 이 지반정수값들은 CPT 시험 결과 및 실내시험결과에 근거하여 결정되었다. 이 지역의 점토층 비배수 전단강도값은 Chung 등(2006)이 제안하였듯이 수직 유효응

력(σ_v')의 0.22배로 산정할 수 있는 것을 알 수 있다. 본 지역은 매립을 수행한 후 약 1~5년이 경과되었는데, 점성토 내의 과잉간극수압이 약 20~30kPa 크기로 존재하고 있었다.

3. 지반거동 예측계획

본 연구에서는 말뚝 항타 전 인접지반에 간극수압계, 경사계, 지표 변위말뚝 등을 설치하고 항타 중에 발생하는 간극수압과 변위를 예측하였다. 그리고, 말뚝체 내에 변형률계를 설치하여 말뚝체의 축력 변화를 예측하였다.

표 1에 예측항목을 정리하였으며, 그림 3은 각 예측기의 설치위치를 보여준다. 간극수압계는 총 7개를 설치하여 설치 깊이 및 말뚝으로부터의 거리에 따른 지반

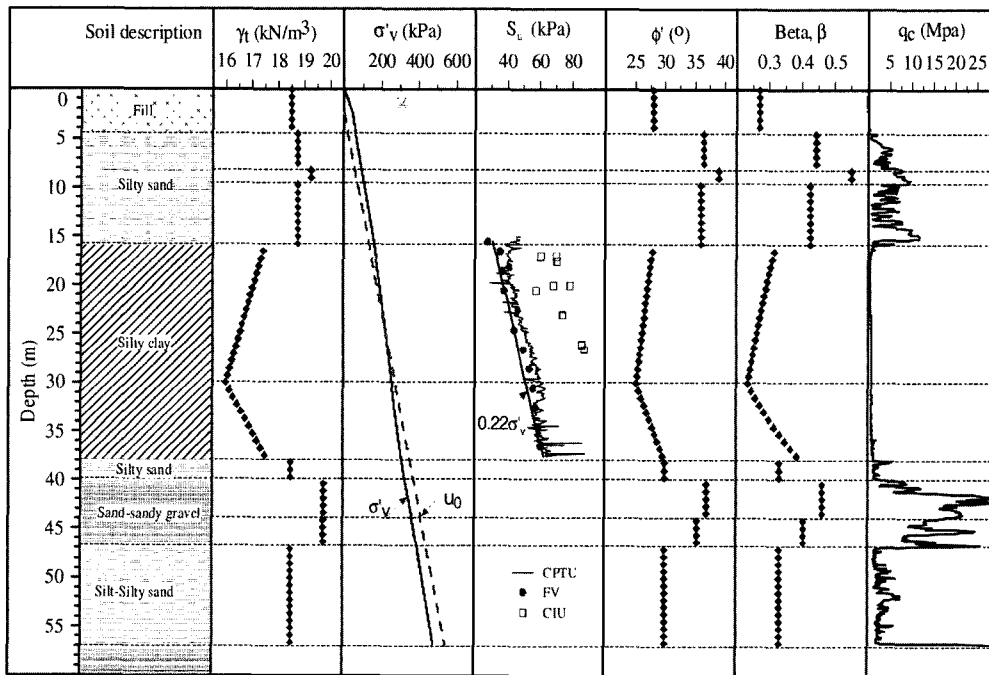


그림 2. 시험위치에서의 지반정수

표 1. 말뚝 항타에 따른 지반거동 분석을 위한 예측항목

예측항목	측정항목	설치위치	제품형식
간극수압계	간극수압	3D ¹⁾ (깊이 ²⁾ : 13, 20, 27, 35, 44m) 6D(깊이: 27m), 8D(깊이: 27m)	진동원식
경사계	인접지반 방사방향 수평변위	3D, 6D	-
변위말뚝	지표 침하량	1.5D, 3D, 5D, 8D, 12D	-
말뚝 변형률계	말뚝 축변형률	깊이별 13쌍 설치(그림 4 참조)	Tokyo Sokki 90° 2-element cross type, model: FCB-3-350-11
지하수위계	지하수위	-	standpipe piezometer

¹⁾ 예측말뚝 중심으로부터의 거리, D=말뚝직경

²⁾ 설치깊이 13m(점토층 상부 모래층), 20m(점토층 상부), 27m(점토층 중앙부), 35m(점토층 하부), 44m(점토층 하부 모래층)

내 간극수압 변화를 계측하였다. 간극수압계 형식은 장기간의 계측에 유리한 진동현식을 사용하였다. 진동현식은 내구성이 좋다는 것이 장점이나 전기저항식에 비하여 1회의 측정시간이 긴 단점이 있다. 본 계측에서는 신뢰성있는 값을 얻기 위해 계측간격을 10초로 설정하였다. 그러므로 10초 간격 이내의 순간적인 간극수압 변화값은 계측되지 않을 수도 있다.

지중 경사계의 측정 파이프는 약 60m 깊이의 모래자갈층까지 근입시켜 설치하였다. 경사계는 말뚝 항타 중과 항타 종료 후 계측말뚝에 대한 방사방향의 지반 수평변위를 계측하는데 이용하였다.

변위말뚝은 말뚝 중심으로부터 거리에 따라 총 6개를 설치한 후 수중측량을 실시하여 말뚝 항타 중과 항타 종료 후의 지표면 침하량을 측정하였다.

그림 4는 말뚝 변형률계(strain gauge)의 설치위치를 보여준다. 변형률계는 지표면 위치에 4개(1m 지점), 지표면 아래로는 5m 간격으로 양방향 2개씩 13곳의 단면에 총 28개를 설치하였다. 변형률계는 직경 6mm, 길이 80cm의 이형철근의 가운데 부분을 매끈하게 갈아낸 후 전기저항식 변형률계를 부착하여 철근 변형률계 형태로 제작하였다. 공장제작 단계에서 말뚝의 철근망에 철근 변형률계를 부착한 이후에 콘크리트를 타설하고 말뚝체를 제작하였다.

본 시험에 이용된 PHC 말뚝은 외경 600mm, 내경 360

mm으로서 단면적이 1810cm²이다. 말뚝 선단은 폐쇄형이며 십자형 슈를 용접하여 관입을 용이하게 하고 선단의 손상을 방지하도록 하였다. 최종적인 말뚝 근입깊이는 57m로서, 말뚝선단이 조밀한 모래자갈층에 놓인다. 말뚝의 항타는 16톤 유압 해머(제작사: 동광해머, 모델명: DKH-16)를 이용하여 실시되었으며, 항타 중에 연속적으로 동재하 시험을 실시한 결과 말뚝체에 발생한 인장 및 압축응력이 허용값보다 작았고 말뚝의 건전도는 양호한 것으로 나타났다.

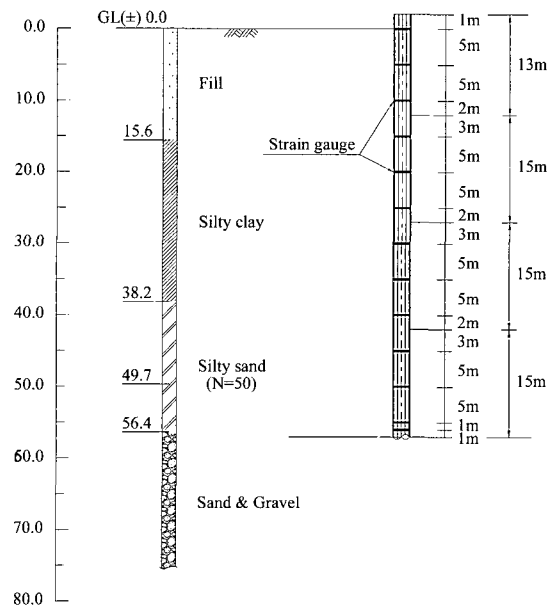


그림 4. 말뚝 축하중 측정을 위한 변형률계의 설치위치

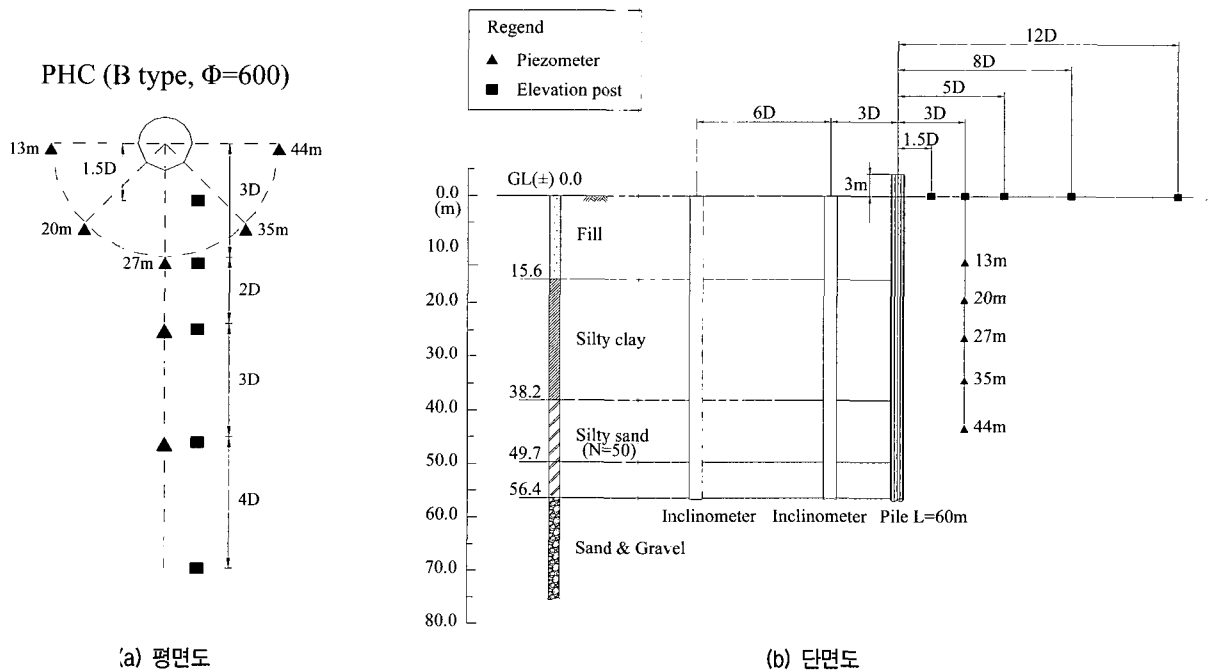


그림 3. 지반거동 계측을 위한 계측기 배치도

최종 근입깊이가 57m이고 말뚝 1개의 길이는 15m이므로 총 4개의 말뚝을 향타하고 3번 용접이음 하였다. 말뚝 1개의 향타시간은 30분 이내였으나 각 말뚝의 향타 후 상부말뚝 용접, 상하부의 변형률계를 위한 계측선 연결, 경사계 및 지표면 변위측정 등을 수행하는데 약 4~5시간이 소요되었다.

4. 계측결과

4.1 간극수압 거동

그림 5는 말뚝 향타 중 측정된 깊이별 간극수압 변화 곡선을 보여주고 있다. 본 향타는 15m 길이의 말뚝 4개를 용접이음하기 때문에 총 4단계의 향타과정으로 이루어졌다. 각 향타 종료 후의 근입깊이(PD)는 첫번째 향타의 경우 14m, 2번째 향타의 경우 29m, 3번째 향타의 경우 44m, 그리고 향타 종료 후 57m이었다. 초기에 점토층 내의 간극수압(실선)이 정수압(점선)보다 크므로 과잉간극수압이 존재하고 그 크기는 약 20~30kPa로 나타났다. 향타 후 간극수압 변화를 살펴보면 말뚝 선단이

간극수압계의 설치위치를 지나는 순간에 간극수압이 크게 증가하며, 간극수압계 설치위치를 지나게 되면 추가 증가 없이 소산되는 것으로 나타났다. 또한, 13m와 44m 깊이의 모래층에서는 향타 중 증가된 간극수압이 약 1시간 후에 대부분 소산되었음을 나타내고 있다.

그림 6은 1번째~3번째의 향타과정 중 계측된 간극수압 변화를 보여준다. 가로축의 시간은 그림 5에 나타난 시간을 기준으로 표시하였다. 그림 6(a)는 1번째 말

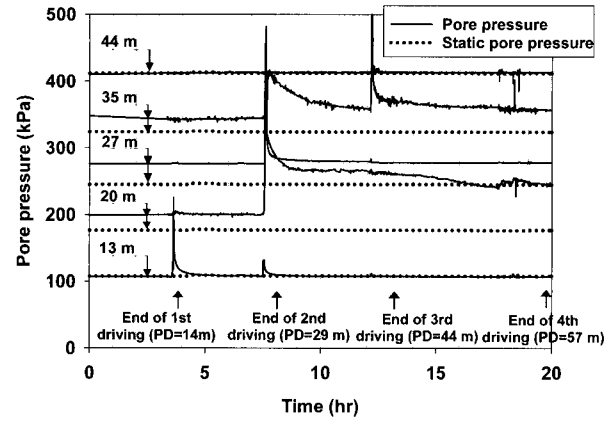
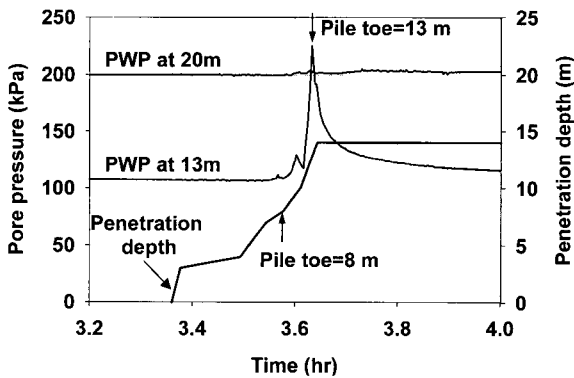
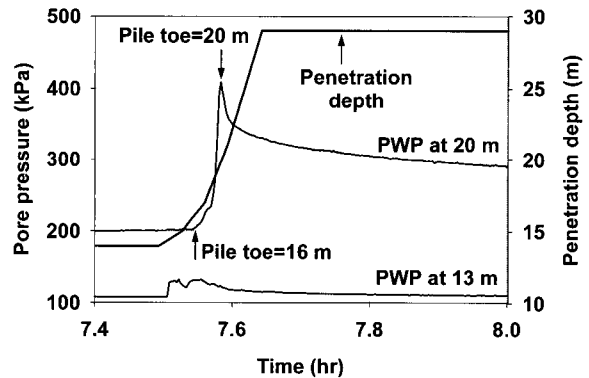


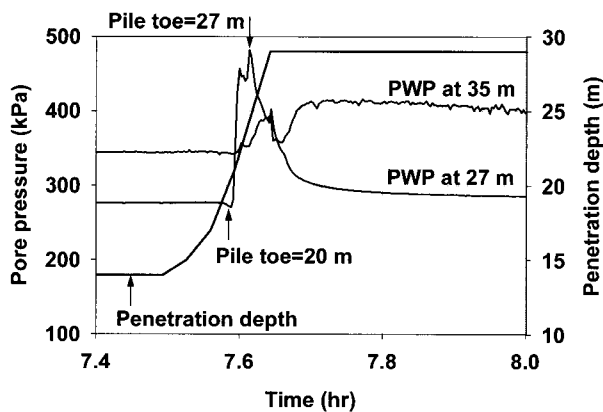
그림 5. 말뚝 향타 중 측정된 간극수압 시간이력 곡선(3D 거리, PD=Penetration Depth)



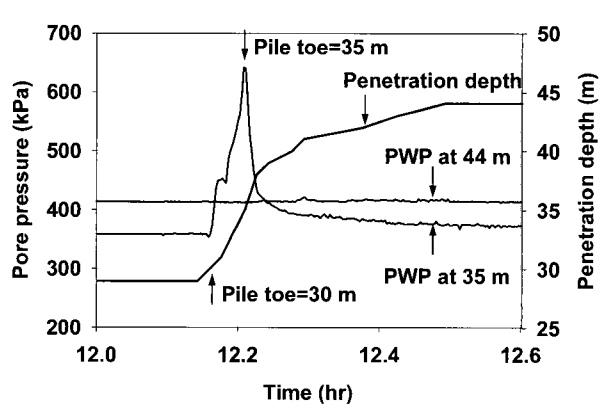
(a) 1번째 말뚝 향타(깊이: 13m, 20m)



(b) 2번째 말뚝 향타(깊이: 13m, 20m)



(c) 2번째 말뚝 향타(깊이: 27m, 35m)



(d) 3번째 말뚝 향타(깊이: 35m, 44m)

그림 6. 말뚝 향타 중 측정된 간극수압과 말뚝 근입깊이의 시간이력(거리 3D)

뚝 항타과정 중 13m와 20m 깊이에서 계측된 간극수압 변화곡선이다. 13m 깊이의 간극수압을 살펴보면, 말뚝 선단이 8m 깊이에 도달할 때 간극수압이 발생하기 시작했으며 말뚝선단이 간극수압계 설치깊이인 13m에 도달할 때 간극수압이 최대가 되었다. 그림 6(b)~그림 6(d)에 나타난 나머지 간극수압계 계측결과에서도 이와 비슷한 경향을 보여준다. 즉, 말뚝선단이 간극수압계 설치 깊이로부터 3m~7m 위에 위치할 때 간극수압이 발생하기 시작하였으며, 말뚝선단이 간극수압계 설치깊이를 지날 때 간극수압의 최대값이 발생하였다.

그림 7에서는 점토층 중앙부인 27m 깊이에서 말뚝으로부터 3D, 6D, 8D 거리에 설치한 간극수압계의 측정결과를 보여준다. 간극수압 최대값은 말뚝으로부터 거리가 멀어질수록 감소하였으며 말뚝으로부터 8D 위치에서의 간극수압 증가량은 매우 작은 것으로 나타났다.

표 2에서는 간극수압의 초기값 및 항타중 최대값, 정수압, 과잉간극수압, 그리고 지반의 유효응력 등을 정리하여 보여준다. 초기 과잉간극수압을 살펴보면 상부 모

래층과 중간 모래층에서는 과잉간극수압이 존재하지 않고, 점토층의 상부와 하부에 약 20kPa, 중앙부에 약 30kPa의 과잉간극수압이 존재하였다. 항타 중 발생한 최대 간극수압을 이용하여 계산된 과잉간극수압비는 상부 모래층에서 0.87, 중간모래층에서 0.03으로서 상부 모래층은 항타 중 액상화에 가까운 상태가 되었으며, 중간모래층은 매우 조밀한 상태여서 항타중 발생하는 간극수압 증가량은 매우 작았다. 점토층에서의 과잉간극수압비는 3D 거리에서 1.13~1.37로서 점토층의 낮은 투수성으로 인하여 항타 중 발생한 과잉간극수압이 모래층보다 크며, 과잉간극수압비가 1.0이 넘어 순간적으로 액상화가 발생하였다. 또한, 27m 깊이의 점토층 중앙부에서 거리에 따른 과잉간극수압비를 살펴보면 3D 거리에서 1.13, 6D 거리에서 0.64, 8D 거리에서 0.09로 나타났다. 그러므로, 항타위치가 8D 이상 떨어지면 점토층내의 과잉간극수압 발생량은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 8은 말뚝 항타 후 약 1년간 계측한 간극수압의

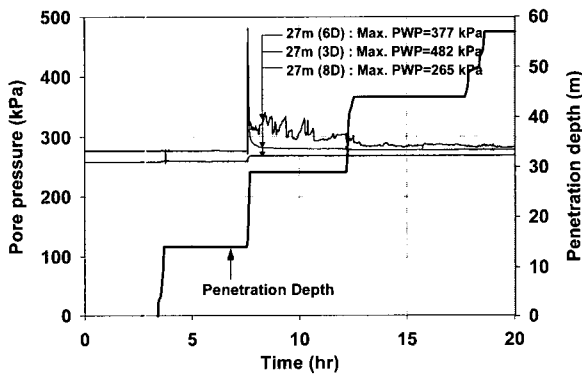


그림 7. 말뚝으로부터 거리에 따른 간극수압 변화 곡선(거리: 3D, 6D, 8D, 깊이: 27m)

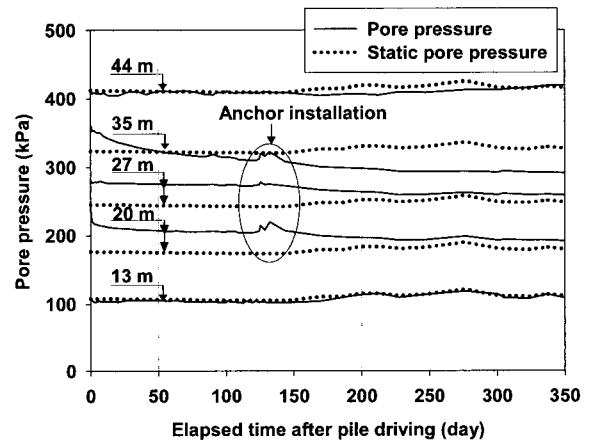


그림 8. 항타 후의 간극수압 시간이력곡선

표 2. 항타 중 간극수압의 변화

간극수압계 설치위치	간극수압 (kPa)				초기 유효 응력 (σ_v') ¹⁾ (kPa)	항타중 과잉간극수압비 최대값 ²⁾
	초기값 (U_1)	정수압 (U_s)	초기과잉간극수압 ($U_e=U_1-U_s$)	항타중 최대값 (U_m)		
13m (상부 모래층)	108	107	1	225 (=1.6)	136	0.87
20m (점토층 상부)	200	177	23	409	169	1.37
27m (점토층 중앙부)	3D	245	31	482	208	1.13
	6D		32	377	207	0.64
	8D		13	265	226	0.09
35m (점토층 하부)	343	324	19	642	271	1.17
44m (중간 모래층)	412	412	0	422	368	0.03

¹⁾ 초기 유효응력 = (유효단위중량으로 계산된 수직응력) - (초기 과잉간극수압)

²⁾ 과잉간극수압비 최대값 = $(U_m - U_s) / \sigma_v'$

시간이력 곡선이다. 그림에서 실선은 간극수압, 점선은 정수압을 나타낸다. 매립에 의해 지반 내 존재하던 과잉 간극수압이 소산되면서 간극수압이 점차 정수압에 가까워졌다. 35m 깊이의 간극수압은 계속 감소하면서 정수압보다 작아져 부의 과잉간극수압이 발생하는 것으로 나타났는데, 이에 대한 원인은 향후 추가적인 연구를 통하여 규명되어야 할 것으로 판단된다. 점토층에서 항타에 의한 간극수압이 소산하는데 걸리는 시간, 즉 항타 전의 과잉간극수압과 동일해지는 시점은 27m와 35m 깊이의 간극수압계의 경우 약 2주일로 나타났으나, 20m 깊이의 간극수압계의 경우 약 140일로 일반적으로 예상되는 소산시간보다 매우 긴 것으로 나타났다. 20m 깊이의 간극수압계 결과를 제외하면 점토층에서는 약 2주일이 경과되면 항타 중에 증가된 간극수압이 대부분 소산되는 것으로 판단된다. 또한, 말뚝 설치 후 약 130일이 지난 후 말뚝 정재하시험을 위한 반력앵커를 말뚝 중심으로부터 약 3.8m 위치에 시공하였는데, 이 때 지반교란에 의하여 간극수압이 증가된 것으로 나타났다.

4.2 수평변위 거동

그림 9는 말뚝항타시 발생한 인접지반의 수평변위 계측결과를 보여준다. 말뚝에서 3D 거리에서의 수평변위는 상부 모래층에서 최대 20mm(평균=12mm), 점토층에서 최대 36mm(평균=25mm), 조밀한 모래층에서 최대 11mm(평균=5mm) 발생하였다. 6D 거리에서는 상부 모래층에서 최대 5mm(평균=3mm), 점토층에서 최대 13mm(평균=9mm), 조밀한 모래층에서 최대 7mm(평균=4mm) 발생하였다. 점토층에서 발생한 수평변위는 모래층에 비해 평균 약 2배 이상 큰 것으로 나타났다. 그리고, 말뚝에서의 거리가 3D에서 6D로 멀어짐에 따라 수평 변위 값은 약 3배~4배 감소하였다. 수평변위가 최대가 되는 깊이는 상부 점토층 내의 약 22m로 나타났다.

말뚝 선단 아래로 수평변위가 발생하는 영향깊이를 살펴보면 1번째와 2번째 말뚝 세그먼트의 항타 종료 후 말뚝 선단 아래로 약 5m(8.6D) 깊이까지 수평변위가 발생하였다. 그러나, 3번째 항타 종료시에는 말뚝선단이

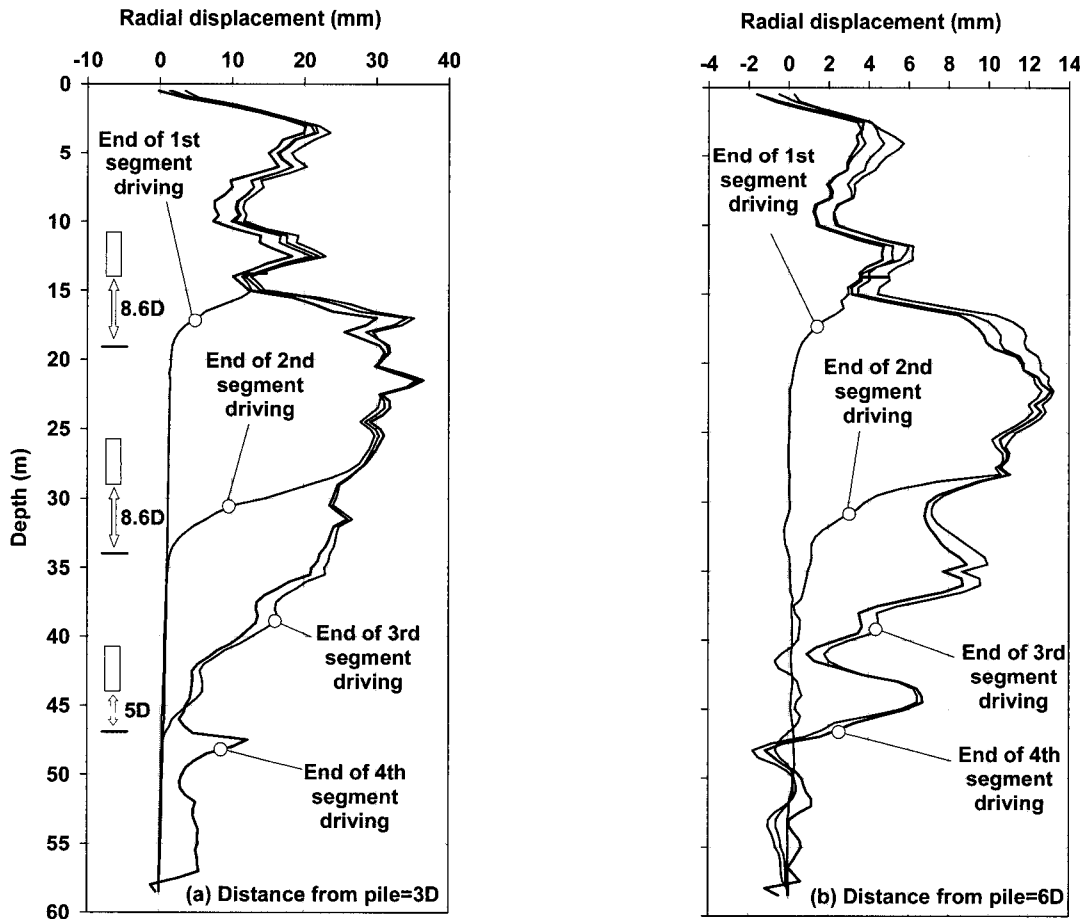


그림 9. 말뚝항타 중 발생한 지반지반의 수평변위

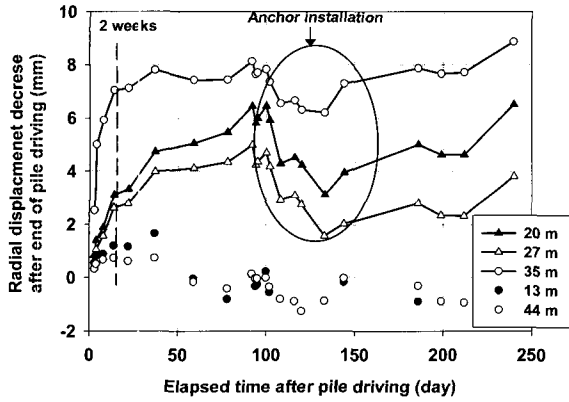


그림 10. 수평변위 감소량 시간이력 곡선

단단한 중간모래층에 위치하여 선단 아래로 약 3m(5D) 깊이까지만 영향을 미치는 것으로 나타났다.

그림 10은 항타 종료 직후의 수평변위량을 기준으로 감소된 수평 변위량을 보여준다. 13m와 44m 깊이의 모래층의 경우 항타 종료 후의 수평변위 변화량은 무시할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 점토층의 수평변위량은 점차 감소하였으며, 점토층에서 항타 중 발생한 과잉간극수압이 소산되는 약 2주 후에 수평변위량의 감소량이 수렴되는 것으로 나타났다. 감소량의 최대값은 약 8mm로 나타났으며 이는 항타중 발생한 점토층 평균 수평변위량의 약 30%에 해당한다. 또한, 정재하시험을 위한 앵커설치로 인하여 지반의 수평변위가 약 2mm 증가한 것으로 나타났다.

4.3 말뚝 잔류하중 거동

그림 11은 말뚝 변형률계로부터 측정된 말뚝 축하중 분포곡선을 보여준다. 이 축하중은 재하시험이나 구조물 시공에 의해 말뚝두부에 하중이 가해지기 전 말뚝체 내에 존재하는 하중인 잔류하중을 나타낸다. 4.1절에서 설명한 바와 같이 말뚝항타와 매립하중에 의해 점토층 내 발생한 과잉간극수압이 시간이 경과하면서 소산하게 되는데, 과잉간극수압이 소산되면 지반내 유효응력이 증가하면서 지반침하가 발생하게 된다. 이 지반침하는 말뚝을 하향으로 끌어내리려는 부마찰력을 유발시키고 부마찰력에 의해 말뚝체에는 잔류하중이 발생하게 된다. 그림을 보면 시간경과에 따라 잔류하중이 계속적으로 증가하였으며 최대 잔류하중은 약 35m 깊이에서 약 4,000kN이 발생하였다.

본 연구에서 측정한 최대 잔류하중에 대하여 말뚝재

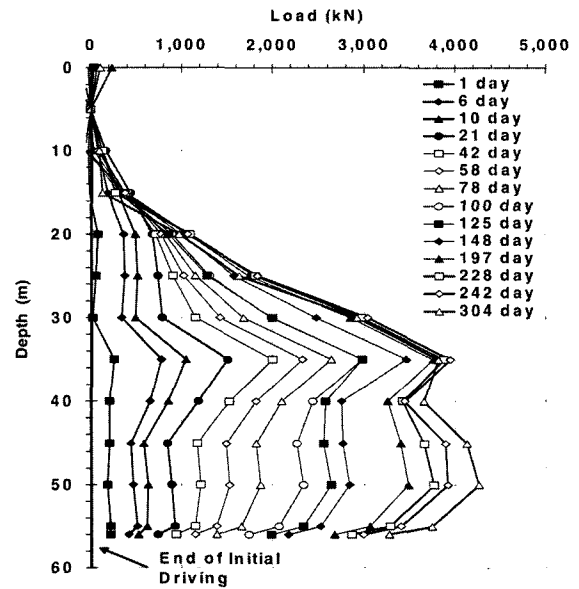


그림 11. 말뚝체의 잔류하중 발생곡선

료 강도의 안정성을 검토할 필요가 있다. 일반적으로 직경 600mm의 PHC B종 말뚝의 축방향 허용압축하중은 2,300kN 인데(한국지반공학회, 2003), 이 값은 말뚝 두부에서의 허용하중으로서 전단력, 모멘트 등의 영향을 고려하여 제시된 값이다. 잔류하중의 최대값은 약 35m 깊이의 말뚝 중립면에서 발생하였는데, 말뚝은 이 깊이에서 주면지반의 횡토압에 의해 수평변형이 억제되므로 순수한 압축력만이 발생하는 것으로 가정할 수 있다. 이 경우 중립면에서의 말뚝재료 허용압축응력은 콘크리트 압축강도의 2/3(Fellenius, 1991) 또는 말뚝두부 허용하중의 2배로 산정하고 있으며, (일본 토질공학회, 1997), 이 방법들로 산정된 중립면 말뚝재료 허용압축강도는 약 5,000kN~6,500kN으로서 말뚝재료강도의 안정성에는 여유가 있는 것으로 판단된다.

그림 12는 15m~45m 깊이에서의 잔류하중 시간이력 곡선을 나타낸다. 잔류하중은 약 300일이 지난 시점까지 계속적으로 증가하였다. 이것은 점토층 내에 발생한 과잉간극수압이 서서히 감소하면서 지반 침하량이 발생하고 이에 의해 말뚝체에 부마찰력이 증가하였기 때문이다.

점토층 내 과잉간극수압은 매립에 의해 기존에 존재하던 과잉간극수압과 항타에 의해 증가된 과잉간극수압으로 구성된다. 그림 8에서 설명하였듯이 항타에 의한 과잉간극수압은 말뚝 설치 후 약 2주일이 경과되면 소산이 완료되는 것으로 나타났다. 잔류하중의 증가경향을 살펴보면 항타에 의해 증가된 과잉간극수압이 소산되는 약 2주일까지 최대 약 1,300kN의 잔류하중이 발

생하였다. 이 크기는 최종 잔류하중인 4,000kN의 약 30%에 해당하는 값으로서, 이러한 사실은 말뚝이 압밀이 완료된 지반에 설치되더라도 항타 중 발생한 과잉간극수압이 소산되면서 상당한 크기의 잔류하중이 발생할 수 있다는 것을 보여준다. 항타에 의한 과잉간극수압이 소산된 2주일 이후부터는 매립하중에 의해 기존에 점토층 내에 존재하던 과잉간극수압의 소산에 의하여 잔류하중이 증가되었다.

또한, 앵커설치시점에 지반교란에 의해 과잉간극수압이 증가하였는데 이 시점에 말뚝체 내의 잔류하중도 감소한 것을 알 수 있다. 즉, 말뚝체의 주변마찰력은 지반의 유효응력과 밀접하게 연관되므로, 과잉간극수압 증가에 의해 유효응력이 감소하여 주변마찰력이 감소한 것이다.

그림 13은 항타 후 시간경과에 따른 점토층 내 과잉간극수압과 35m 깊이에서의 잔류하중의 상관관계를 보

여준다. 항타 후 약 100일까지의 과잉간극수압 소산량은 20m 깊이의 경우 43kPa에서 31kPa로 약 12kPa, 그리고 27m 깊이의 경우 33kPa에서 30kPa로 약 3kPa로 매우 작다. 그럼에도 불구하고 같은 기간 말뚝체에서 증가된 잔류하중의 크기는 약 3,000kN으로 나타났다. 그리고, 125일에서 138일 기간 사이에 정재하 시험을 위한 반력앵커를 설치하였는데 이 때 지반교란에 의해 과잉간극수압이 증가하고, 35m 깊이의 잔류하중이 약 250kN 감소하였다. 즉, 말뚝 주변마찰력은 지반의 유효응력과 연관되므로, 과잉간극수압 증가에 의해 유효응력이 감소하여 주변마찰력이 감소한 것이다. 그리고, 150일 이후부터 과잉간극수압이 급격히 소산되었는데, 이것은 봄, 여름철 강우로 인한 지하수위가 상승하였기 때문이다. 약 150일 이후부터의 잔류하중의 크기는 점차 수렴되어 최대 크기는 약 4,000kN까지 증가하였다.

그림 14는 과잉간극수압과 잔류하중의 상관관계를

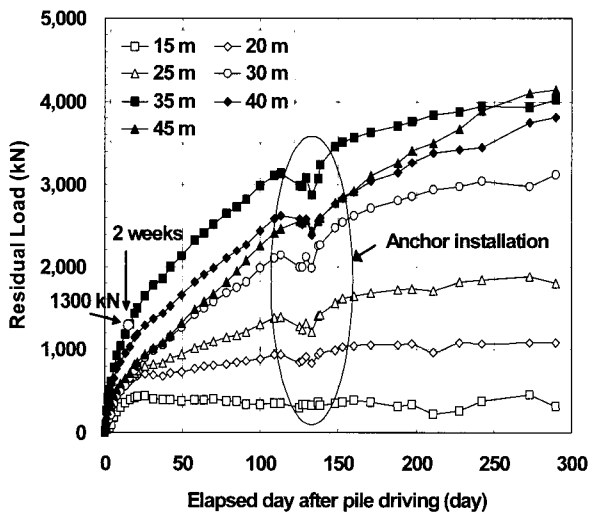


그림 12. 시간경과에 따른 잔류하중의 변화곡선

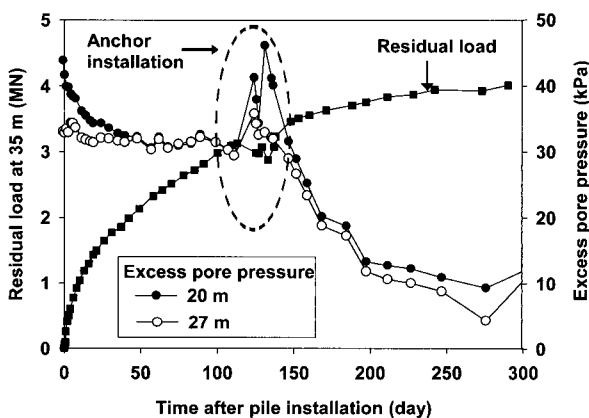
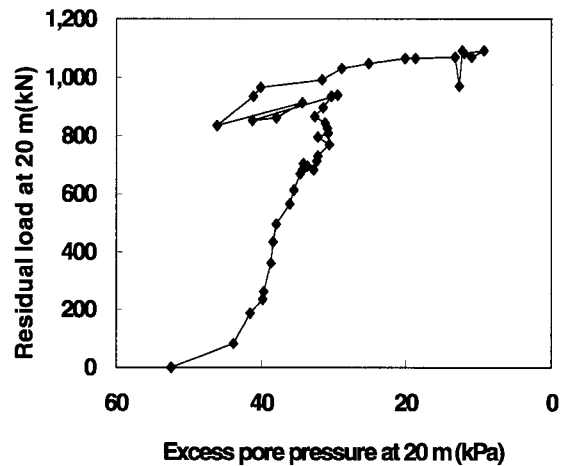
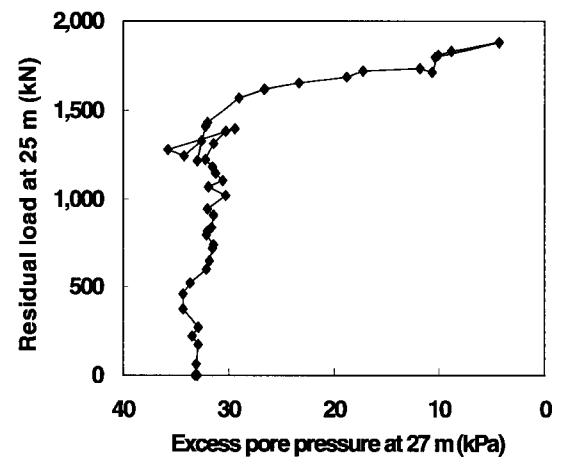


그림 13. 과잉간극수압-잔류하중 관계



(a) 간극수압 20m-잔류하중 20m



(b) 간극수압 27m-잔류하중 25m

그림 14. 과잉간극수압-잔류하중 변화 관계

보여준다. 과잉간극수압이 감소함에 따라 말뚝체 내의 잔류하중이 초기에 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 14(a)의 경우 과잉간극수압이 44kPa에서 31kPa로 감소할 때 증가된 잔류하중은 최종 잔류하중의 약 78%였으며, 그림 14(b)의 경우 과잉간극수압이 33kPa에서 23kPa로 감소할 때 증가된 잔류하중은 최종잔류하중의 약 87%로 나타났다. 즉, 과잉간극수압 감소량이 약 10kPa로 작음에도 불구하고 상당한 크기의 잔류하중이 발생하였다. 이러한 결과는 매립 후 압밀이 완전히 완료되지 않은 지반에 설치된 대부분의 말뚝은 부마찰력이 크게 발생할 수 있으므로, 부마찰력을 고려한 설계를 수행해야 한다는 것을 보여준다.

4.4 지표면 침하량 거동

그림 15는 변위말뚝을 이용하여 측정한 지표 침하량을 보여준다. 1번 째 말뚝의 항타 시에는 전체 측정점에서의 침하량이 10mm 미만이었으나 항타가 계속될수록

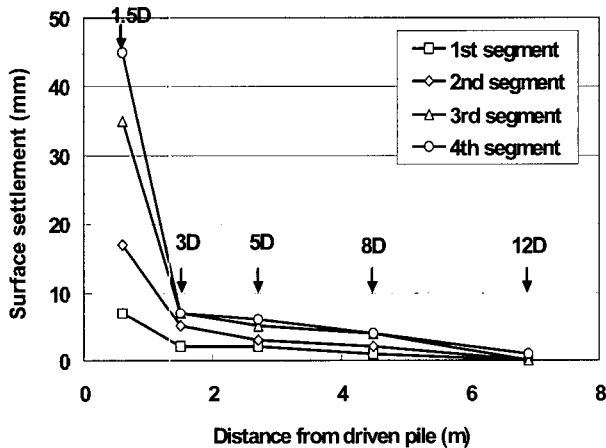


그림 15. 말뚝 항타 중 발생한 지표면 침하량

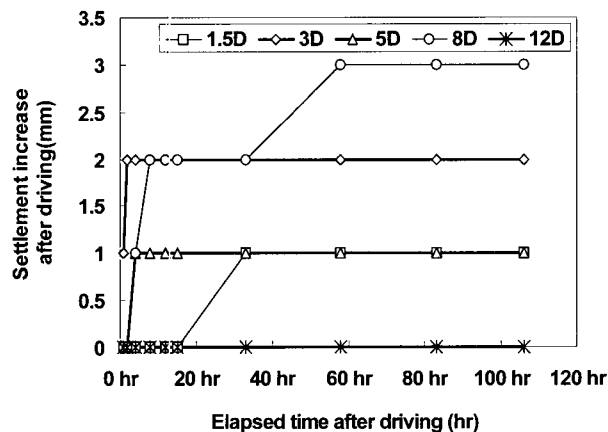


그림 16. 항타 후 시간경과에 따른 지표면 침하량 변화

침하량 크기는 점차 증가하였으며, 항타 종료 후의 최대 침하량은 1.5D 거리에서 최대 45mm로 나타났다. 말뚝으로부터 거리에 따른 침하량을 살펴보면 1.5D 거리에서 45mm의 침하량이 발생하였으나, 말뚝으로부터 3D 이상 떨어지면 침하량 크기가 10mm 이하인 것으로 나타났다. 또한, 12D 거리에서 발생한 침하량은 무시할만한 수준으로 나타났다.

그림 16은 말뚝 항타 종료 후에 추가적으로 발생한 침하량을 나타낸 것으로 항타 후 약 5일간 침하량 변화를 측정하였다. 침하량은 시간경과에 따라 점차 증가하였으며, 약 3일이 지난 후에 변화가 수렴되었다. 약 5일간 발생한 침하량 증가량은 최대 약 3mm로 나타났다. 35m 깊이에서의 잔류하중(그림 13 참조)은 항타 후 5일 경과시 약 600kN이었으며, 약 10일 경과시 약 1,000kN으로 증가하였다. 즉, 미소한 침하량이 발생하였음에도 불구하고, 상당한 크기의 잔류하중이 증가하였다. 현재, 부마찰력을 받는 말뚝의 설계시 중립면 위치 결정과 부마찰력의 크기 산정 등에 말뚝과 지반 침하량 산정결과를 이용하고 있다. 그러나, 침하량이 작음에도 큰 부마찰력이 발생하는 본 연구결과를 고려할 때 침하량 산정결과를 이용하는 것은 매우 부정확하다. 그러므로, 중립면의 위치 결정과 부마찰력의 크기 산정은 말뚝체 내에 발생하는 하중분포를 고려하여 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단한다.

5. 결론

본 연구에서는 간극수압계, 경사계, 지표 변위말뚝, 그리고 말뚝 변형률계 등을 설치하여 도심도 연약지반에 PHC 말뚝을 항타하였을 때의 지반거동과 말뚝체 잔류하중을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 말뚝 항타 중에 간극수압은 말뚝선단이 간극수압계 설치깊이로부터 3m~7m 위에 위치할 때 발생하기 시작하였으며, 말뚝선단이 간극수압계 설치깊이를 지날 때 최대가 되었다. 간극수압 크기는 말뚝으로부터 거리가 멀어질수록 감소하였으며 8D 위치에서의 간극수압 증가량은 매우 작은 것으로 나타났다. 또한, 항타 중 증가된 간극수압은 모래층에서는 1시간, 점토층에서는 2주일이 경과하면 대부분 소산되는 것으로 나타났다.

- (2) 말뚝으로부터 3D 위치에서 말뚝 향타에 의해 발생한 수평변위량은 상부 모래층에서 최대 20mm(평균=12mm), 점토층에서 최대 36mm(평균=25mm)로 나타났다. 그리고, 말뚝으로부터 거리가 3D에서 6D로 멀어짐에 따라 수평변위량은 약 3배~4배 감소하였다. 말뚝 선단 아래로 수평변위가 발생하는 영향깊이는 점토층에서 약 5m(8.6D)로 나타났으며, 점토층 하부 단단한 모래층에는 약 3m(5D)로 나타났다.
- (3) 향타에 의한 지표면 침하량은 말뚝 향타가 지속될수록 점차 증가하였다. 말뚝으로부터 3D이상 떨어진 지면 침하량 크기가 10mm 이하로 감소하는 것으로 나타났으며, 12D 거리에서의 침하량은 무시할 수 있는 크기였다.
- (4) 말뚝 잔류하중의 증가와 감소는 지반 내 과잉간극수압 거동에 지배된다. 점토층 내 과잉간극수압이 약 10kPa 감소하는 경우 최종 잔류하중의 약 80% 크기의 잔류하중이 발생하였다. 또한, 향타 중 발생한 과잉간극수압의 소산만으로 최종 잔류하중의 약 30% 크기의 잔류하중이 발생하였다. 이러한 사실은 점성토 지반에 설치되는 대부분의 말뚝은 부마찰력이 크게 발생할 수 있으므로 이를 고려한 설계를 수행해야 함을 보여준다.

감사의 글

본 논문은 (주)영조주택과 건설교통평가원의 건설핵심사업의 지원 하에서 수행된 것임을 밝히며, 이에 감사를 표한다.

참고 문헌

1. 김성렬, 정성교, N.T.Dung (2006), "PHC 말뚝의 하중전이실험을 통한 참 지지력의 산정", *한국지반공학회 논문집*, Vol.22, No.11, pp.113-122.

2. 일본 토질공학회 (1997), *말뚝기초의 설계법과 해설*
3. 한국 지반공학회 (2003), *구조물 기초 설계기준*
4. Bond, A.J., and Jardine, R.J. (1991), "Effects of installing displacement piles in a high OCR clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.3, pp.341-363.
5. Briaud, J.L. and Tucker, L.T. (1984), "Piles in sand : a method including residual stresses", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.11, pp.1666-1680.
6. Bullock, P.J., Schmertmann, J.H., McVay M.C., and Townsend, F.C. (2005), "Side shear setup. I: Test piles driven in Florida", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.1, pp.1-12.
7. Chung, S. G., Kim, S. K., Kang, Y. J., Im, J. C. and Prasad, K. N. (2006), "Failure of a breakwater founded on a thick normally consolidated clay", *Geotechnique*, Vol.56 No.6, pp.393-409.
8. Cooke, R.W., and Price, G. (1973), "Strains and displacements around friction piles", *Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering*, Moscow, Vol.III.9, pp.53-60.
9. Hanna, T.H. and Tan, R.H.S. (1973), "The behavior of long piles under compressive loads in sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.10, No.3, pp.311-340.
10. Holloway, M., Clough, G.W., and Vesic, A.S. (1978), "A rational procedure for evaluating the behavior of impact-driven piles", *ASTM Symposium on Behavior of Deep Foundations*, ed. R. Lundgren, Special Technical Publication STP 670, pp.335-357.
11. Hwang, J.H., Liang, N., and Chen, C.H. (2001), "Ground response during pile driving", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.11, pp.939-949.
12. Fellenius B.H. (2002), "Determining the resistance distribution in piles, Part 1: Notes on shift of no-load reading and residual load", *Geotechnical news magazine*, Vol.20, No.2, pp.35-38.
13. Fellenius, B.H. (1991), *Pile foundations*. Chapter 13 in *Foundation Engineering Handbook*, edited by H.Y. Fang, Chapman and Hall.
14. Pestana J.M., Hunt, C.E., and Bray, J.D. (2002), "Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.1, pp.1-12.
15. Randolph, M.F., Steinfeld, J.S., and Wroth, C.P. (1979), "The effect of pile type on design parameters for driven piles", *Proceedings of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundations in Engineering*, Brighton, Vol.II, pp.1156-1182.
16. Roy, M., Blanchet, R., Tavenas, F., and La Rochelle, P. (1981), "Behaviour of a sensitive clay during pile driving", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, No.2, pp.67-85.

(접수일자 2007. 2. 12, 심사완료일 2007. 5. 28)