

압축하중을 받는 압입강관말뚝의 지지거동 특성

Bearing Behavior Characteristics of Pressure Penetrating Steel Pipe Pile Under Compression Load

권 오 균[†]

Ohkyun Kwon

Received: March 4th, 2015; Revised: March 17th, 2015; Accepted: June 2nd, 2015

ABSTRACT : The pressure penetrating steel pipe pile method which can be constructed in a narrow space using the hydraulic jack is used on the foundation reinforcement, extension of the structure and basement, restoration of the differential settlement etc.. This method is possible to construct in narrow areas and low story height, the non-noise and non-vibration works, and it is possible for the construction site to be clean without slime. And it is possible to confirm the bearing capacity of pile due to penetrating the pile with the compression load of hydraulic jack. In this study, the static load test with the load-transfer test was carried out to investigate the bearing behavior characteristics of the pressure penetrating steel pipe pile. Four series of static load test were executed to investigate the variation of bearing behavior of the pressure penetrating steel pipe pile. As a result of these tests, the allowable load of the pressure penetrating steel pipe was evaluated more than 637 kN, and the shaft resistance corresponding to 81~86% of each applied load was mobilized with only a small portion of the base resistance acting. And it was also evaluated that the unit skin friction was mobilized to maximum value after two months.

Keywords : Static load test, Load-transfer, Pressure penetrating steel pipe pile, Bearing behavior characteristics, Base load, Shaft load

요 지 : 압입강관말뚝공법은 기초보강, 상부 및 지하 증축, 부등침하 복원 등에 사용되는 공법으로 유압잭을 이용하여 좁은 공간에서 시공이 가능한 기초 보강공법이다. 이 공법의 특징은 협소한 공간, 낮은 층고, 근접 시공이 가능하고, 무소음 및 무진동 공법이며 슬라임을 배출하지 않아서 시공현장을 청결하게 유지할 수 있다. 또한 모든 말뚝을 유압잭의 압입하중으로 시공하므로 시공 중 지지력 확인이 가능하다. 본 연구에서는 압입강관말뚝에 대하여 하중전이시험을 수반한 말뚝 정재하시험을 수행하여 압입강관말뚝의 하중지지 거동 특성을 파악하였다. 그리고 말뚝 시공 후 경과시간에 따른 압입강관말뚝의 지지거동의 변화를 확인하기 위하여 총 4회의 정재하시험을 실시하였다. 재하시험 결과, 압입강관말뚝의 허용지지력은 최소 637kN 이상으로 나타났고, 재하하중의 81~86%를 마찰하중이 지지하는 것으로 나타났다. 그리고 대체적으로 2개월이 경과하면 단위주면마찰력은 최대값에 도달하는 것으로 평가되었다.

주요어 : 정재하시험, 하중전이, 압입강관말뚝, 하중지지거동, 선단하중, 축하중

1. 서 론

말뚝기초는 상부구조물의 하중을 안전하게 하부 지지층으로 전달하기 위해 사용되는 깊은 기초의 한 형태이다. 말뚝에 작용하는 하중은 선단지지력과 주면마찰력에 의해 지지되는데, 이러한 말뚝기초의 지지력 및 침하량을 추정할 수 있는 여러 가지 이론적·경험적 방법들이 제안되었다. 현재 주로 사용되는 말뚝의 극한연직지지력 결정방법에는 말뚝정재하시험, 정·동재하시험, 동재하시험(PDA), 정역학적 지지력 공식, 동역학적 지지력 공식, 현장시험결과(SPT, PMT, CPT)에 의한 경험공식, 파동방정식, 말뚝해석코드에 의한 추

정, 연속체 해석에 의한 추정 등이 있으며 이 방법들 중에서 말뚝정재하시험이 가장 신뢰성 있는 방법으로 알려져 있다.

압입강관말뚝은 기초보강, 상부 및 지하 증축, 부등침하 복원 등에 사용되는 공법으로 유압잭을 이용하여 좁은 공간에서 시공이 가능한 기초 보강공법이다. 이 공법의 특징은 협소한 공간, 낮은 층고, 근접 시공이 가능하고, 무소음 및 무진동 공법이며 슬라임을 배출하지 않아서 시공현장을 청결하게 유지할 수 있다. 또한 모든 말뚝을 유압잭의 압입하중으로 시공하므로 시공 중 지지력 확인이 가능하다. 본 연구에서는 부산광역시 소재 『○○병원 의료시설 증축공사』에서 기초보강을 위하여 사용된 강관말뚝의 지지거동에 관한

[†] Department of Civil Engineering, Keimyung University (Corresponding Author : ohkwon@kmu.ac.kr)

연구를 수행하였다. 먼저 직경 216mm의 강관말뚝을 유압잭을 이용하여 압입 시공한 다음 시험말뚝의 주면에 가압틀을 설치하여 반력앵커방식(케미컬 앵커 또는 후크정착)에 의한 압축 정재하시험을 수행하였다. 또한 정재하시험 시 선단지 지지력과 주변마찰력의 거동을 파악하기 위하여 하중전이를 측정하였다. 이러한 시험을 통하여 압입강관말뚝의 허용지 지지력 확인, 말뚝기초의 하중지지거동 파악, 하중 크기에 따른 주변마찰력과 선단지 지지력의 거동 특성을 파악하였다.

또한 강관말뚝을 압입 시공하면 일반적으로 시공 초기에는 상부 구조물 하중을 선단이 지지할 것으로 예상되며, 시간이 경과됨에 따라 마찰지지력이 증가할 것으로 추정된다. 이러한 현상을 확인하기 위하여 동일한 강관말뚝에 하중전 이시험을 수반한 시간경과에 따른 총 4차례의 재하시험을 실시하였다.

2. 이론적 배경

도로교설계기준(대한토목학회·교량설계핵심기술연구단,

2008)과 최용규(1999)는 말뚝기초의 설계가 예비설계, 검증 시험, 예비설계의 보완 절차를 거쳐서 수행하는 것이 바람직하다고 설명하고 있다. 그리고 검증시험은 일정 규모 이상의 교량공사에서 말뚝의 시공시방 설정, 깊이에 따른 말뚝지지력 평가 및 말뚝길이 산정, 말뚝의 하중 지지거동의 확인 등을 위하여 실시하는 시험이라고 명시하고 있다. 말뚝 재하시험은 목적에 따라 시험말뚝에 대한 검증시험(설계 목적의 재하시험)과 통상적인 재하시험으로 구분하고 있는데 자세한 내용은 Table 1에 나타나 있다(대한토목학회·교량설계핵심기술연구단, 2008). 또한 시험말뚝에 대한 검증 시험과 통상적인 재하시험에서 얻을 수 있는 대표적인 결과가 Fig. 1에 나타나 있다(대한토목학회·교량설계핵심기술연구단, 2008). 말뚝 재하시험은 실제 말뚝 또는 시험말뚝에 하중을 가하여 실제 상부구조물이 건설되었을 때를 재현하므로 여러 가지 말뚝지지력 산정방법 중에서 가장 신뢰도가 높은 방법으로 알려져 있다(한국지반공학회, 2009).

일반적으로 기초를 설계하기 위한 말뚝재하시험의 대표적인 시험 방법은 정재하시험이다. 또한 경제적이고 정확한 설계를 위해서는 하중전이시험을 수반하는 것이 바람직하

Table 1. Type of pile load test by the purpose (대한토목학회·교량설계핵심기술연구단, 2008)

	Pile load test for design (verification test for test pile)	Normal pile load test
Object	- Performing the optimal design for utilizing in pile design (include determination of the construction specification)	- Check the possibility of supporting the design load to be determined on the safe side
Basic principle	- Loading to the ultimate load (at least the yield load) - Including the load transfer test - Vertical compression load test, vertical uplift load test, lateral load test	- More than 2 times the design load to be determined on the safe side - Vertical compression load test
Test method	- Full-scale pile or downscaled pile - Static pile load test in principle - Bi-directional pile load test is effective in case of large scaled drilled shaft - Dynamic load test or other methods are possible additionally if necessary - Include the test construction for determining the construction and pile driving criterion	- Full-scale pile - Static pile load test, bi-directional pile load test, dynamic load test, etc.
Performance time	- Design stage - Early period of construction if impossible in the design stage	- Under construction
Test results	- Load-settlement curve (loading to the ultimate load) - A distribution diagram of shaft load (load transfer) - The construction and pile driving criterion	- Load-settlement curve (loading under the yield load)
Site investigation	- The detailed site investigation → the accurate geological stratum classification - Laboratory and in-situ tests → the accurate ground characteristic value	- Measuring only the N-value in the site investigation for the geological stratum classification - The results of site investigation almost are not utilized (results by considering the design cases)
Remarks	- Being mandatory in AASHTO specification - Being recommended as the most reliable method in Japan Road Bridge Design Code - Being obligatory to execute the pile load test in the early period of construction in NAFAC DM-7.2 and is stated as the most reliable method - Reflected in Road Bridge Design Code - Little case adopted in the country - Some cases were executed in the early period and middle of construction	- General method of pile load test executed in the country

다. 하중전이시험을 통하여 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력을 분리하여 측정하고 이를 설계에 반영하여 말뚝 개수, 길이, 단면 크기 등을 결정할 수 있다.

말뚝과 주변 흙 사이에 발생하는 마찰력은 응력-변위-시간의 특성, 말뚝-흙 시스템 내에 있는 모든 요소의 파괴 특성, 그리고 말뚝의 설치 방법 등에 의해 영향을 받는다(Vesic, 1977). 하중전이해석 방법으로는 실험적인 방법, 하중전이 함수를 이용한 방법, 탄성·고체 방법, 유한요소해석 방법을

들 수 있다(최용규 등, 1998). 실험적인 하중전이해석 방법은 Fig. 2(a)에서와 같이 말뚝에 축하중 계측장치를 부착 또는 매설하여 축하중의 분포를 각 재하단계별로 직접 측정하는 것이다(정성기, 2000). 대표적인 결과가 Fig. 2(b)에 나타나 있다. Fig. 2(b)에서 함수 $Q(z)$ 는 말뚝 축을 따라 전달된 하중이고, 말뚝선단($z = L$)에서 Q_b 는 말뚝선단까지 전달된 축하중을 나타내고, $Q_s (= Q - Q_b)$ 는 말뚝 주변마찰력의 합을 나타낸다. 그리고 말뚝의 주변장 P 로 나눈 축하중 곡선의

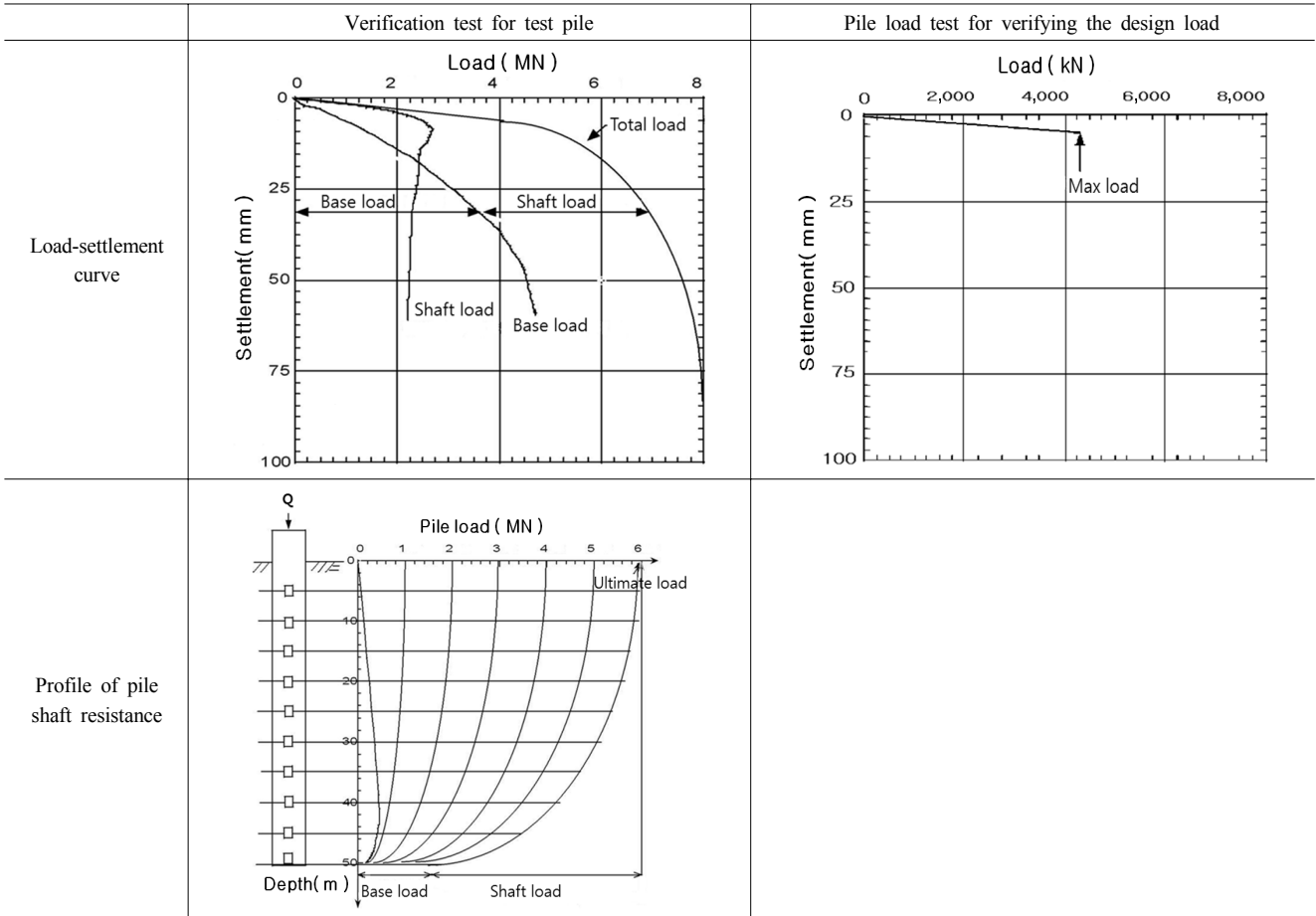


Fig. 1. Typical result from pile load test by the purpose (대한토목학회·교량설계핵심기술연구단, 2008)

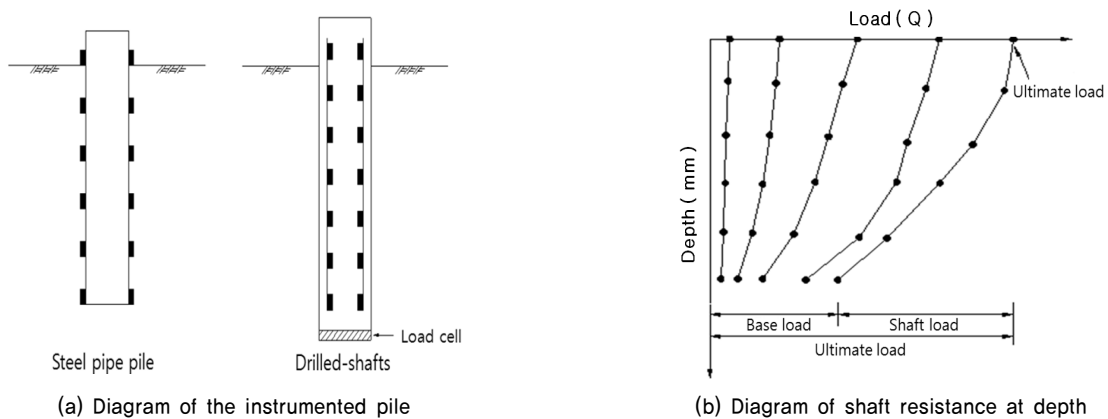


Fig. 2. Schematic diagram of load transfer analysis (정성기, 2000)

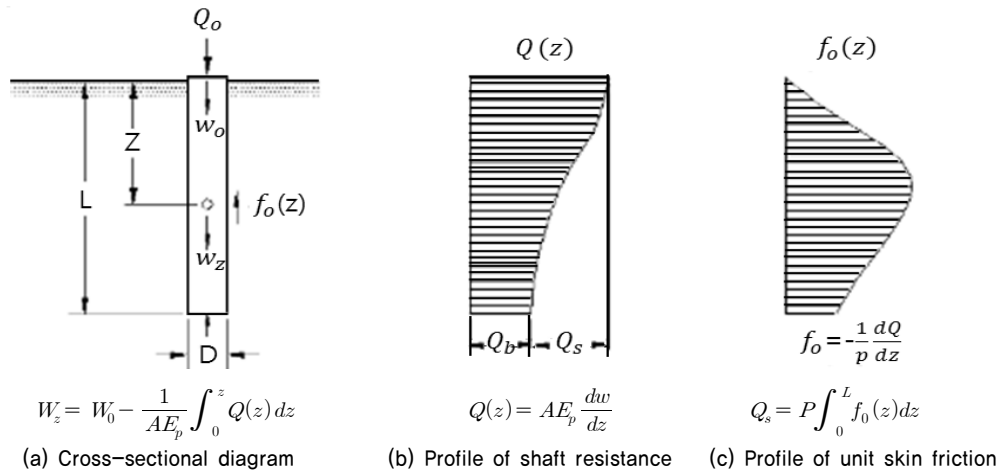


Fig. 3. Load transfer of a single pile (Vesic, 1977)

z 방향에 대한 기울기는 말뚝 몸체부를 따라 생기는 단위 주면마찰응력(f_0)이며, Eq. (1)과 같다.

$$f_0 = -\frac{1}{P} \frac{dQ(z)}{dz} \quad (1)$$

$Q(z)$ 가 깊이 z 에 따라 감소하면 주면마찰응력은 Fig. 3(c)에 나타난 것처럼 양의 값을 갖는다. 만약 단면적(A)과 말뚝 축의 변형계수(E_p)를 알고 말뚝머리의 수직 변위(w_0)를 알면, 실험에서 측정된 말뚝 축하중 분포 곡선 $Q(z)$ 를 이용하여 깊이 z 에서의 말뚝 수직변위 $w(z)$ 를 Eq. (2)로부터 산정할 수 있다.

$$w(z) = w_0 - \frac{1}{AE_p} \int_0^z Q(z) dz \quad (2)$$

따라서 하중전이해석은 말뚝의 연직지지력뿐만 아니라 말뚝의 침하량을 산정하는데 활용될 수 있으므로 그 중요성은 매우 크다고 할 수 있을 것이다. 하중전이실험을 통하여 규명된 하중전이 특성은 말뚝의 하중지지 거동을 확인하는데 이용할 수 있을 뿐만 아니라 말뚝기초의 최적화 설계 활용, 말뚝 기초의 하중전이 거동 규명, 침하량 해석, 안전 시공관리 및 사후 유지관리 등에 활용할 수 있다(최용규 등, 1998).

3. 정재하시험

3.1 정재하시험 개요

기초말뚝의 지지력을 추정하는 수단으로는 정역학적 지지력 공식과 동역학적 지지력 공식 등이 제안되어 있으나 이 방법들은 신뢰도가 낮으며, 정재하시험도 실제와 상이한

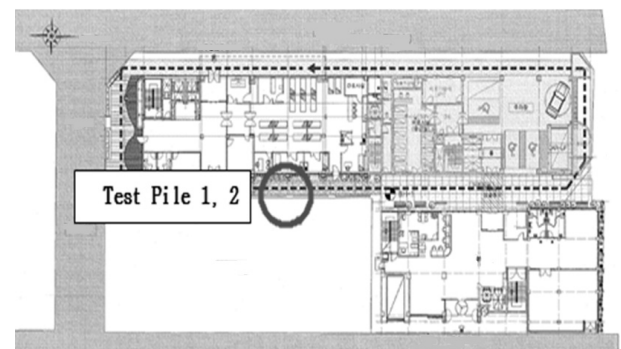


Fig. 4. Drawings of static load test of the pressure penetrating steel pipe pile

조건하에서 시행되므로 그 방법이나 결과의 해석에 아직 약간의 문제가 남아있기는 하지만 현재의 공학적인 수준으로는 정재하시험을 실시하여 지지력을 확인하는 방법이 신뢰성이 가장 높은 것으로 알려져 있다(한국지반공학회, 2009). 본 연구에서는 당 현장의 초기 계획단계에서 시험의 위치, 종류, 방법, 시험말뚝의 시공 등에 대한 자료수집과 검토를 시행하였고 이를 근거로 일정 계획을 수립하여 시공 초기에 시험말뚝을 시공하였다(대한토목학회 대구경북지회, 2013; 권오균 등, 2014).

시험 위치는 부산광역시에 위치한 『○○병원 의료시설 증축공사』 현장이며, 상세도는 Fig. 4와 같다. 당 현장은 기존 건물(지상 5층, 지하 1층)을 지상 14층 및 지하 2층으로 증축하기 위하여 기존 건물을 강관압입말뚝으로 지지한 상태에서 하부 굴착과 상부 건물 증축이 이루어진 현장이다. 시험말뚝은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 건물 외벽 2개소에 설치되어 있으며 사용말뚝이다. 지반조건은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 지표면으로부터 매립층, 모래층, 자갈층, 풍화토층, 풍화암층의 순으로 분포하고 있으며 지하수위는 지표면으로부터 -0.6m에 위치하고 있다.

현장에서 시험말뚝으로 사용할 압입강관말뚝($\phi=216\text{mm}$, $t=12.7\text{mm}$) 2본을 시공하였고 반력은 지중앵커(6ea)를 이용한 기압틀을 사용하였으며 말뚝부재에 발생하는 응력을 측정

하기 위하여 압입강관말뚝의 7개소에 각 위치당 2방향으로 진동현식 강관변형률계를 설치하였으며, 설치 위치와 수량은 시험말뚝의 길이와 지반조건 등을 감안하여 변화시켰다. 시험말뚝에 설치한 센서의 종류, 설치 위치 그리고 소요수량 등에 관한 센서 설치도가 Fig. 5에 자세하게 나타나 있다.

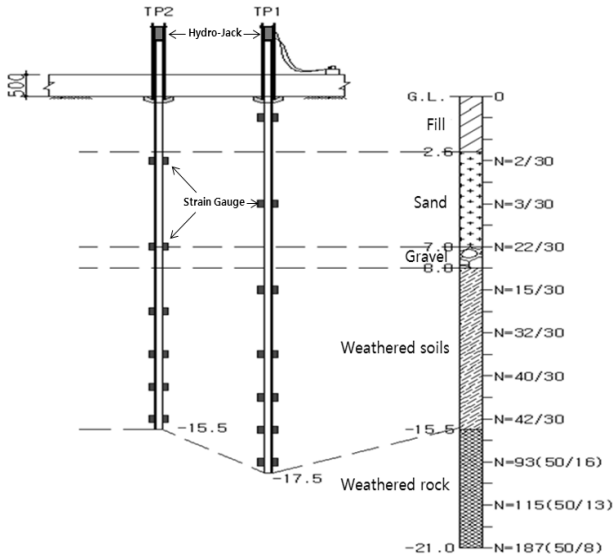


Fig. 5. Drawings of instrumented test pile and ground condition

3.2 정재하시험 방법

정재하시험의 종류에는 사하중 재하방법, 반력말뚝 방법, 반력 지중연속벽 방법, 복합방법 등 여러 가지가 있으며 본 연구에서는 반력말뚝 방법 중에서 지중앵커 방식을 사용하여 정재하시험을 수행하였다. 본 현장에서 실시한 정재하시험 모습이 Fig. 6에 나타나 있으며, Table 2에는 압입강관말뚝의 정재하시험에 대한 내용이 정리되어 있다.

정재하시험에서의 재하장치는 기압틀(반력앵커), 기압장치(유압잭, 펌프) 등으로 구성하였고, 재하방법은 ASTM D1143-81(1994)에 규정된 급속재하방법 1주기 방식에 의한 하중제어방식을 채택하였다. 여기서 하중재하는 130kN씩 10단계 즉 1,300kN까지 증가시켰으며, 하중제하는 260kN씩 하중을



(a) Ground anchors



(b) Test pile

Fig. 6. Photo of the static pile load test

Table 2. Details of static load test of the pressure penetrating steel pipe pile

Type		Static compression load test with load transfer test	
Test pile no.		TP1	TP2
Test location		Test piles TP1 & 2 in the medical facilities extension construction work	
Pile type		Pressure penetrating steel pipe pile	
Pile data	Feature	Working pile	
	Diameter (mm)	216	
	Length (m)	18	16
Prospected load (kN)		1,300	
Design load (kN)		600	
Loading method		Working pile ($\phi = 216 \text{ mm}$, $t = 12.7 \text{ mm}$) : 1 EA Reaction anchor (chemical anchor or Hook settlement) : 6 EA	
Remark		Instrumented pile to measure the load transfer	

감소시켰다. 각 하중 단계별 하중 유지시간은 1, 2, 3, 5, 10 분으로 하였으며 최대하중에서는 15분 경과 이후에 15분 간격으로 최대 1시간까지 침하를 측정하였다. 모든 하중 단계에서 침하 기준에 수렴하면 다음 단계의 하중을 재하 하는 방법으로 실험을 실시하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 말뚝머리하중-침하량 관계

본 현장에서는 기 시공된 시험말뚝에 대하여 총 4차례(시공 후 22일, 32일, 46일 및 79일 경과)에 걸쳐서 말뚝정재하 시험을 실시하였으며, 정재하시험에 의한 말뚝머리 하중-침하 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 7로부터 말뚝머리 하중-침하 곡선은 거의 직선 관계를 나타내며, 본 시험말뚝에 재하된 하중은 항복하중에도 미치지 못하는 것으로 평가되었다. 이 결과들을 이용하여 P-S 곡선, Log P-log S 곡선, $\Delta S/\log \Delta t$ -P 곡선, S-log t 곡선, Davisson 방법 등(박영호 등, 2009; 한국지반공학회, 2010)으로 항복하중을 산정한 결과, 모든 방법에서 항복하중은 최소 1,274kN 이상으로 나타

났고 따라서 허용하중은 637kN으로 평가되었다. 원래 정재하 시험에서 1,300kN까지 재하하는 것으로 계획하였지만 재하시스템 문제로 인하여 1,274kN까지만 재하하였다. 최대하중에서 침하량은 TP1과 TP2에서 각각 약 10.35mm와 10.08 mm로 나타났으며, 허용하중에서의 침하량은 각각 약 4.65mm와 3.16mm로 나타났다.

4.2 하중전이 특성

본 연구에서는 압입강관말뚝의 선단지지력과 주변마찰력을 분리 측정하기 위하여 하중전이실험을 수행하였으며 이 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8로부터 최대 재하하중 1,272kN에서 선단지지하중은 TP1에서 117kN, TP2에서 235kN을 나타냈고, 주변마찰하중은 TP1과 TP2에서 각각 1,096kN과 1,038kN으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 최대 재하하중에 대하여 선단지지하중은 TP1과 TP2에서 각각 약 13.9%와 18.5%가 발휘되었고, 주변마찰하중은 TP1과 TP2에서 각각 86.1%와 81.5%가 발휘된 것으로 나타났다. 그러므로 본 현장의 강관압입말뚝은 작용된 하중에 대하여 대부분 마찰지지 거동을 하고 있는 것으로 평가되었다.

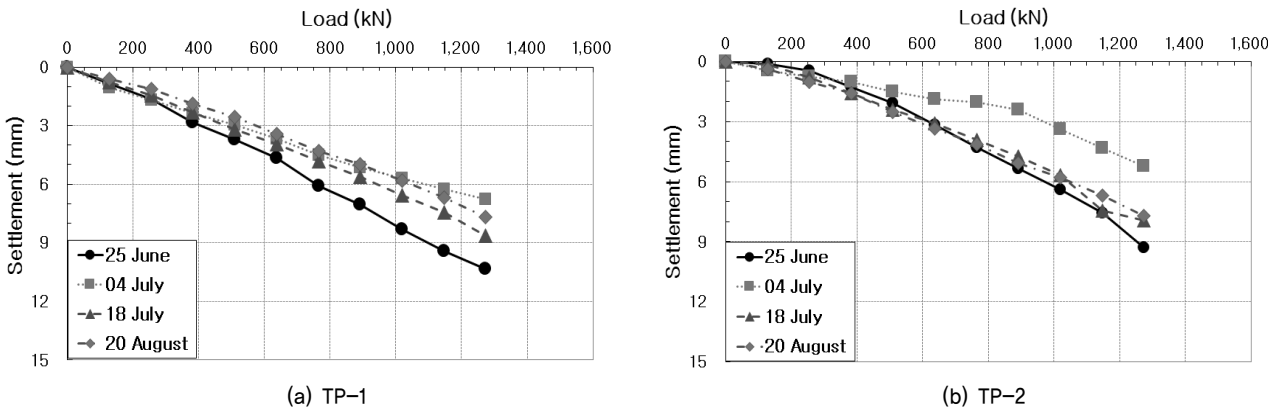


Fig. 7. Pile head load-settlement relationship

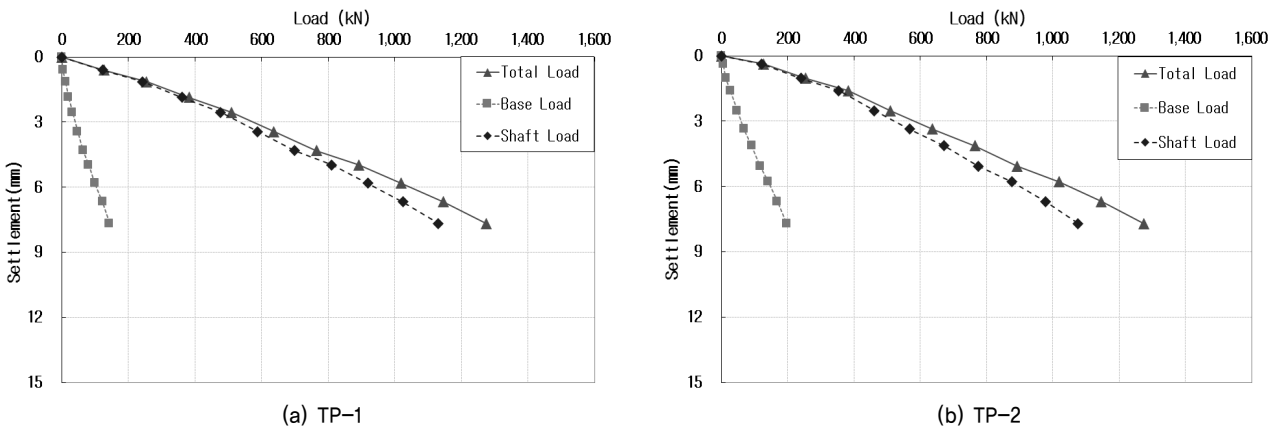


Fig. 8. Skin friction and end bearing resistance at the load stages

말뚝 두부에 작용된 하중 단계별로 각 지층에서의 마찰지 지용력을 계산할 수 있다. Fig. 9는 각 재하단계에서 지층별로 발휘된 평균마찰응력의 분포를 나타내고, Fig. 10은 시험 말뚝의 지층별 단위주면마찰력과 각 지층 구간별 변위의 관계를 보여준다. 이 그림들로부터 평균 마찰응력은 매립층, 모래층, 자갈층, 풍화토층의 순서로 커지며 재하하중이 커질수록 평균 마찰응력도 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4.3 장기계측 결과

본 연구에서는 말뚝 시공 후 경과시간에 따른 지지거동의 변화를 파악하기 위하여 동일한 조건 하에서 일정한 시간 간격을 두고 말뚝 정재하시험을 반복 수행하였고, 이에 따른 하중전이 특성을 비교하여 분석하였다. 시험말뚝에 대하여 총 4차례(시공 후 22일, 32일, 46일 및 79일 경과)의 정재하시험을 수행하였다. 원래 계획은 말뚝 시공 후 6개월이 경과한 시점까지 말뚝의 지지거동을 파악할 계획이었지만, 현장 사정으로 인하여 약 79일의 경과시점까지 4차례의 정재하시험이 실시되었다. 이들 재하시험 중에서 두 번째 정재하시험은 현장 사정과 측정계기의 오류로 인하여 측정값의

신뢰에 문제가 있어서 본 연구의 해석에서는 제외하였다. 실험 결과, TP-1과 TP-2 말뚝의 시간경과에 따른 거동이 다소 상이하게 나타났는데 이는 인접한 지역이지만 Fig. 6에서 보는 바와 같이 말뚝길이가 약 2m 정도 차이가 있는 것으로 보아 약간의 지층 차이가 존재하고, 또한 말뚝시공 및 재하 시험에서의 차이 등에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 3차례의 정재하시험 결과로부터 시간 경과에 따른 강관압입말뚝의 하중전이 특성을 파악하였으며, 그 결과가 Fig. 11~13에 나타나 있다. Fig. 11은 최대 재하하중에 대한 지층분포에 따른 마찰응력의 분포를 나타내고 Fig. 12는 시간 경과에 따른 단위선단지지력과 변위 사이의 관계를 보여 주고 있다. Fig. 11로부터 강관압입말뚝 시공 후 시간경과에 따라 단위주면마찰력은 다소 차이는 있지만 약간 증가하는 경향을 보여 주고 있다. Fig. 12로부터 단위선단지지력은 변위가 커짐에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈고, 시간 경과에 따라 동일한 변위에서 단위주면마찰력은 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고 대체적으로 말뚝 관입 후 약 2개월이 경과되면, 단위선단지지력은 최대값에 도달하는 것으로 판단된다. Fig. 13은 시간경과에 따른 각 지층에서의 단위주면마찰력을 보여 준다.

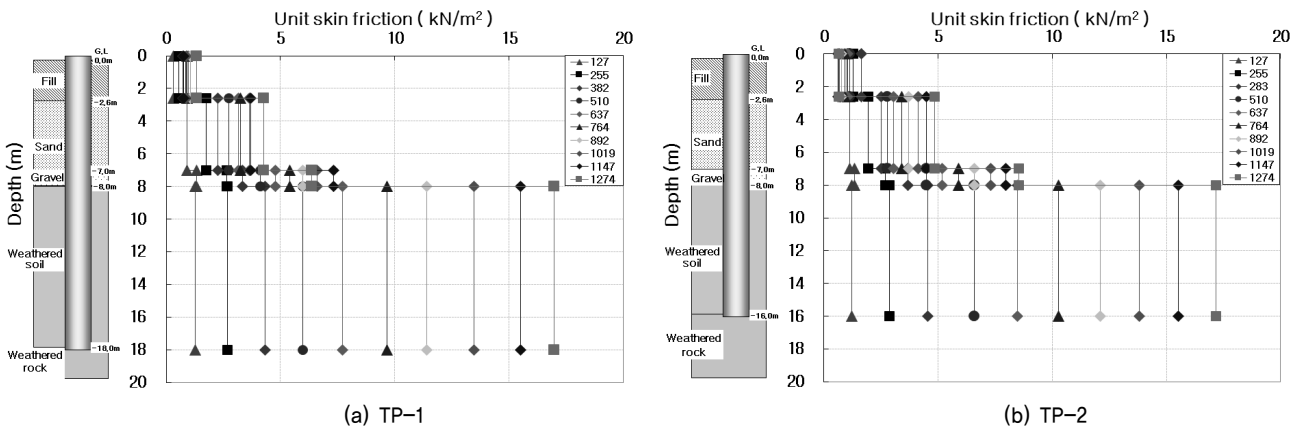


Fig. 9. Average unit skin friction of each layer at each load stages

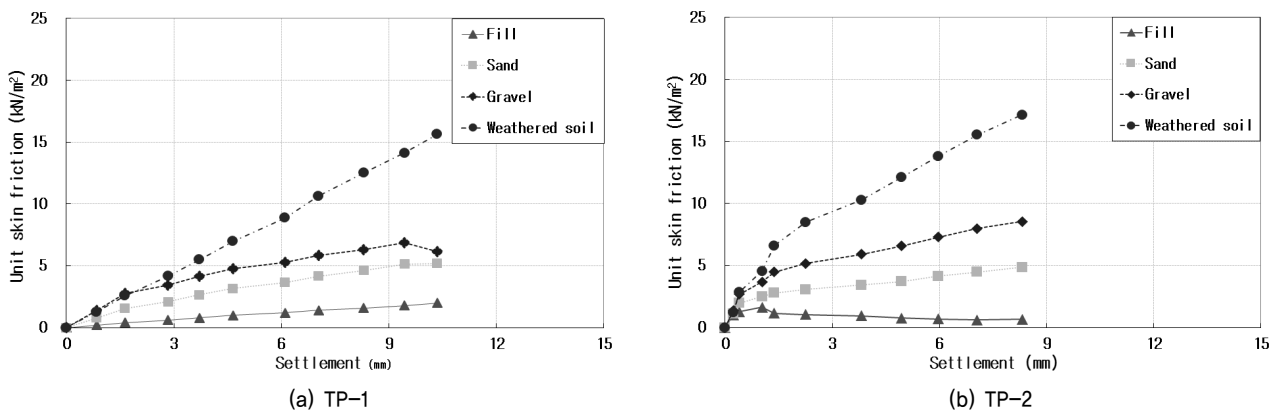


Fig. 10. Relationship of unit skin friction-settlement of each layer

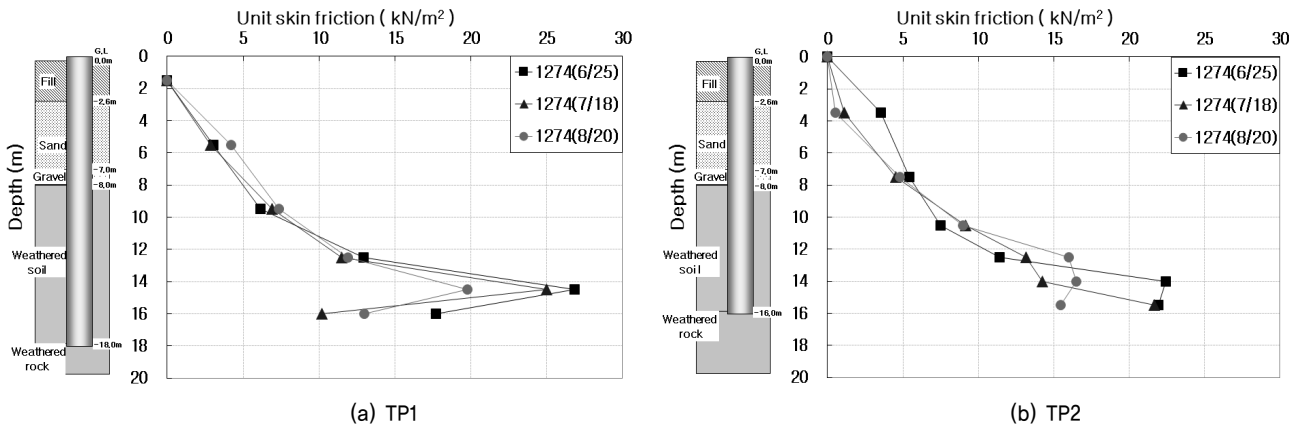


Fig. 11. Unit skin friction at depth in a long-term measurement

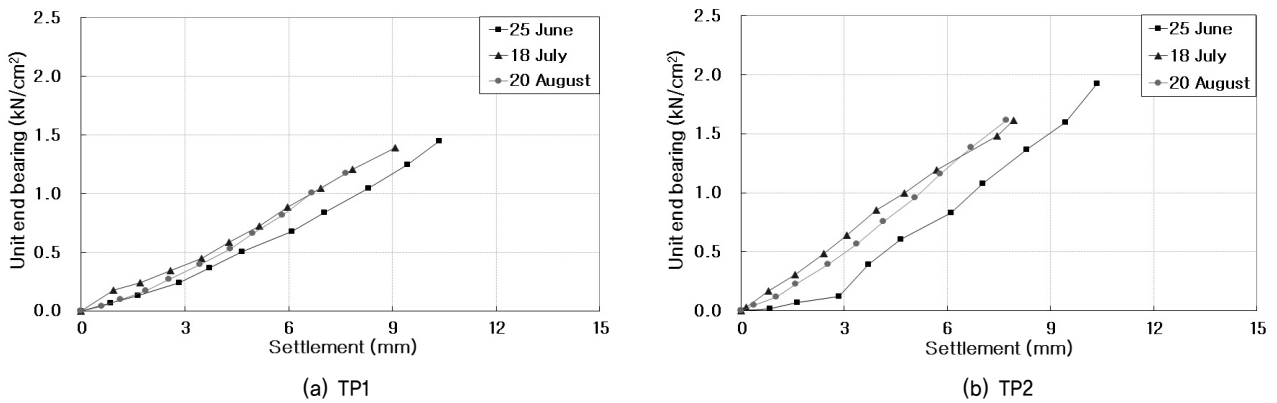


Fig. 12. Relationship of unit skin friction-settlement in a long-term measurement

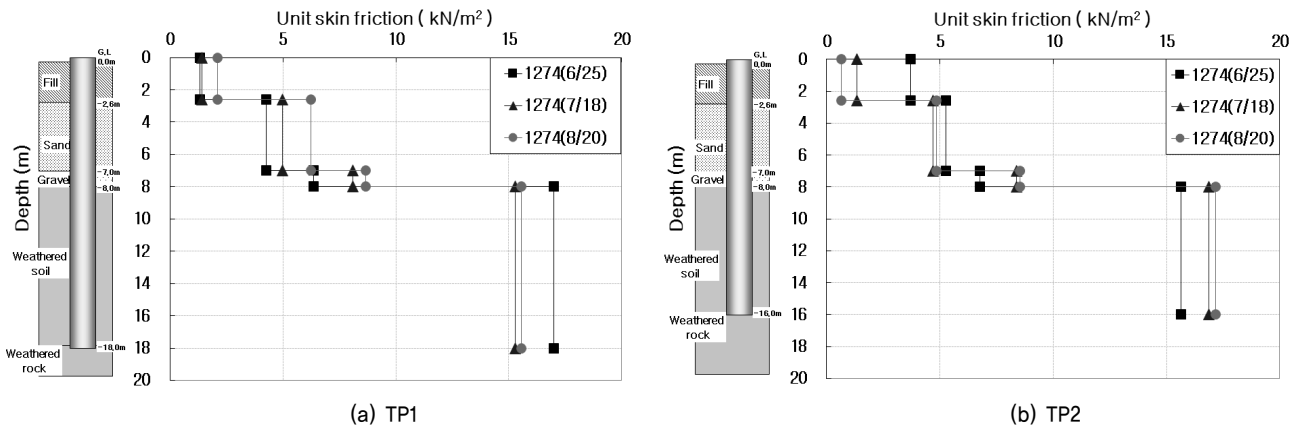


Fig. 13. Average unit skin friction of each layer in a long-term measurement

5. 결론

본 연구는 『○○병원 의료시설 증축공사』 현장에서 사용된 압입관말뚝($\phi=216\text{mm}$)의 지지거동을 파악하기 위하여 정재하시험을 실시하였다. 시험말뚝의 주변에 가압틀을 설치하여 반력앵커방식에 의한 하중전이시험이 수반된 압축 정재하시험을 수행하여 허용지지력 확인, 하중지지거동 파악, 마찰력과 선단지지력의 분리 측정, 시간에 따른 주면마찰력

과 선단지지력의 하중지지거동의 변화 등을 파악하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 정재하시험에서 최대시험하중은 1,274kN이며, 2개 시험말뚝의 허용하중은 모두 637.0kN 이상으로 평가되었고 이때의 침하량은 TP1에서 4.65mm, TP2에서 3.16mm로 나타났다. 최대 재하하중 1,274kN에서 각 지층별 평균마찰응력은 TP1의 경우 매립토층에서 1.34kN/m², 모래층

에서 4.26kN/m², 자갈층에서 6.37kN/m², 풍화토층에서 16.98kN/m²가 발생하였으며, TP2의 경우 매립토층에서 3.71kN/m², 모래층에서 5.28kN/m², 자갈층에서 6.77kN/m², 풍화토층에서 15.65kN/m²가 발생하였다.

- (2) 최대 시험하중 1,274kN에서 말뚝의 선단지지력과 주변 마찰력을 분리하여 보면 TP1에서 말뚝의 선단지지하중 177kN, 주변마찰하중 1,096kN이고, TP2에서 선단지지하중 235kN, 주변마찰하중 1,038kN으로 나타났다. 즉 최대 재하하중 1,274kN에서 TP1과 TP2의 선단지지하중은 각각 약 13.9%와 18.5%를 발휘하였고, 주변마찰하중은 각각 86.1%와 81.5%를 발휘하는 것으로 나타나 본 현장의 압입말뚝은 거의 대부분 마찰지지거동을 하는 것으로 평가되었다.
- (3) 총 4차례의 정재하시험으로부터 말뚝시공 후 시간이 경과함에 따라 단위 주변마찰력과 단위 선단지지력은 증가하는 경향을 나타냈고, 대체적으로 약 2개월 이상이 경과하면 단위선단지지력은 최대값에 도달하는 것으로 평가되었다.
- (4) 압입강관말뚝에 대한 지지거동의 내용은 당 현장에서의 정재하실험에 의한 결과이므로 더 많은 자료를 축적하여야 할 것으로 판단된다.

References

1. 권오균, 박종운, 김진복, 이민희, 김준성 (2014), 압입강관말뚝의 정재하시험, 2014 한국지반공학회 가을학술발표회, 서울, pp. 53~56.
2. 대한토목학회·교량설계핵심기술연구단 (2008), 도로교설계기준 해설, 기문당, 서울, pp. 831~836.
3. 대한토목학회 대구경북지회 (2013), 압입말뚝의 하중전이 재하 실험 연구보고서, 대구, p. 75.
4. 박영호, 김성환, 김낙영, 육정훈 (2009), 기초공학실무와 무조인트교량, 건설가이드, 서울, pp. 22~33.
5. 정성기 (2000). 변형봉 센서를 이용한 대구경 현장타설말뚝의 하중전이 거동에 관한 실험적 연구, 동아대학교 박사학위 논문, pp. 6~17.
6. 최용규 (1999), 국내 말뚝기초 설계관행의 개선을 위한 제안-말뚝기초의 지지력 관점에서, 대한토목학회논문집, 제19권 제III-3호, pp. 467~477.
7. 최용규, 정성기, 권오균 (1998), 개단강관말뚝의 하중전이실험에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제18권 제III-2호, pp. 241~250.
8. 한국지반공학회 (2009), 구조물기초 설계기준 해설, 구미서관, 서울, pp. 325~328.
9. 한국지반공학회 (2010), 기초의 재하시험 방법 및 해설, 구미서관, 서울, pp. 1~55.
10. ASTM D1143-81(Reapproved by 1994) (1994), Standard test method for piles under static axial compressive load.
11. Vesic, A. S. (1977), Design of pile foundations. National cooperative highway research program, Synthesis of Highway Practice No. 42, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 8~55.