

# 현장시험을 통한 기초 말뚝 부마찰력의 특성과 시공관리

## Characteristics of Negative Skin Friction of Foundation Pile and Construction Management by Experimental Field Test

홍석우 Hong, Seok Woo | 정회원 · 동의대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (E-mail : hongswoo@deu.ac.kr)

### ABSTRACT

In this study the negative skin friction test of foundation pile was performed in order to monitor the negative skin frictional force acting on the steel pipe pile installed in soft soil. The monitored frictional stresses obtained from the long-term loading test. Through the long-term frictional stress monitoring test, the economical period for the construction of the superstructure was determined. The following conclusion were derived from this study: (1) In soft soil, negative skin friction increases with the increase in the rate of settlement. (2) In the friction relationship graph, the period where there is no frictional strain increase is verified and the time for the construction of the superstructure is determined. (3) The pile loading test was performed and the negative skin friction was compared with the test results. It was determined that the negative skin friction after driving was larger than the negative skin friction obtained from the loading test. 15 days after the construction, the monitored value was similar with the theoretical data. (4) It was determined that even during the occurrence of negative skin friction an economical construction management can be performed using the long-term monitoring method of negative skin friction.

### KEYWORDS

*negative skin frictional force, experimental field test, long-term monitoring method, economical construction management*

### 요지

본 연구에서는 교량기초 말뚝의 부주면마찰력 시험을 통하여 연약지반에 타설된 강관말뚝의 부주면마찰력을 측정하였으며 장기적인 마찰응력의 관측시험을 통하여 경제적인 상부구조물 시공시기를 판단하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다. (1) 연약 지반에서 부마찰력의 크기는 침하속도가 클수록 크게 나타났다. (2) 마찰력의 관계 그래프에서 마찰응력의 증감이 없는 시기를 확인하여 상부구조물 시공시기를 판단할 수 있었다. (3) 말뚝정재하시험결과와 부주면마찰력 시험결과를 비교해 본 결과 항타 직후의 부주면마찰력은 재하시험 시의 마찰응력보다 크게 나오는 것으로 판단되며 15일 경과후의 측정값은 비슷하게 나오는 것으로 판단되었고, 이론식에 의한 결과와도 비슷하였다. (4) 부주면마찰력의 장기관측기법을 사용하면 부주면마찰력이 발생하고 있는 중이라도 적절한 상부구조물의 시공시기를 파악할 수 있어 경제적인 시공관리가 가능한 것으로 판단된다.

### 핵심용어

*부주면마찰력, 현장재하시험, 장기관측법, 경제적시공관리*

## 1. 연구배경 및 목적

최근의 도로건설의 추세가 점점 연약한 지반이나 해상에 구조물을 설치하는 것이 일반화되고 있어 건설부

지의 부족과 국토의 효율적인 발전을 위해서는 긍정적인 일이라 할 수 있다. 그러나 교량이나 도로교 구조물이 대형화가 되어 연약지반에 시공 시 대형이나 다수의

말뚝시공을 필요로 한다. 이 경우 연약지반 내에 구조물을 건설하기 위한 기초설계 시 점토층을 관통한 말뚝기초가 지지층에 박혀 있는 경우에는 포화된 점토층 위에 새로운 성토를 하거나 지하수위가 저하되면 점토층에 압밀 침하가 발생되는데, 이 경우 침하하는 지층은 말뚝에 대하여 하향의 마찰력을 유발시키며 이러한 마찰력은 상향의 주면마찰력과는 반대로 말뚝에 재하되는 하중으로 작용하게 된다. 이와 같은 하향의 마찰력을 부주면마찰력이라 한다.

그림 1은 말뚝과 지반의 침하 관계를 나타낸 것으로 말뚝과 지반의 상대적인 침하량이 증가하면 부주면마찰력의 크기는 증가하지만 상대적인 침하가 일정한 크기 이하가 되면 부주면마찰력의 크기는 더 이상 증가하지 않고 최대 부주면마찰력 값에 수렴하게 된다. 부주면마찰력이 설계 하중을 초과하는 경우 말뚝의 탄성 압축 및 지지층으로 말뚝 선단부가 관입되거나 말뚝의 파괴로 인한 추가적인 변위가 발생하여 부등침하의 원인이 된다.

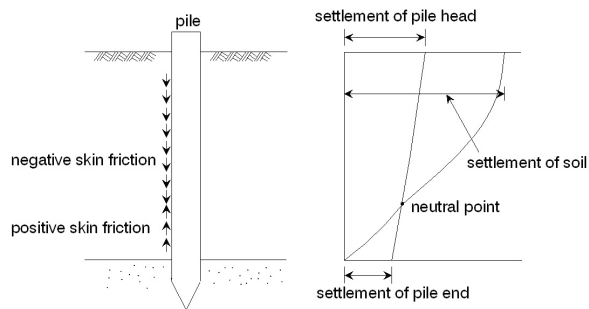


그림 1. 지반침하와 주면마찰력과의 관계

기초말뚝의 지지력은 선단지지력과 주면마찰력의 합으로 나타낼 수가 있으며 지지층 상태에 따라 선단지지말뚝과 마찰말뚝으로 분류되는데 일반적으로 선단지지력은 말뚝의 침하가 말뚝 직경의 5~10%일 때 최대로 발휘되며 주면마찰력은 말뚝의 직경과 무관하게 말뚝이 약 10~20mm 정도의 침하가 발생하였을 때 최대로 발휘된다고 하지만 이러한 거동특성은 아직도 명확하게 규명되지 않았으며 부주면마찰력이 발생되면 말뚝에 과도한 응력을 발생시켜 재료파괴 및 지반파괴를 일으킬 수 있다. 기초말뚝의 지지력을 추정하는 수단으로는 정역학적 지지력공식과 동역학적 지지력공식 등이 제안되어 있으나 이들 방법들은 신뢰도가 낮으며, 정재하시험도 실제와 상이한 조건에서 시행되어 그 방법이나 결과의 해석에 아직 약간의 문제가 남아 있기는 하지만 현재의 공학적인 수준으로는 정재하시험을 실시하여 지지력을 확인하는 방법이 가장 신뢰성이 높은 것으로 판단되

고 있다(최용규, 1998, 한국지반공학회, 2002).

실제 연약지반에 타입된 말뚝 위에 구조물이 축조된다면 부주면마찰력과 구조물하중이 중첩하여 작용하게 되는데 말뚝이 타입된 후 장기적인 계측을 통하여 연약지반에서 받는 말뚝의 부주면마찰력을 측정하고 부주면마찰응력이 수렴하는 시기를 파악하여 이를 상부구조물의 축조시기로 판단하면 경제적인 시공이 가능해 질 것이다. 그리고 많은 시험을 통해 이와 유사한 지반현장에 적용하여 정확한 말뚝 부주면마찰력을 산정할 수 있다면 연약지반개량 시 필요한 공기를 어느 정도 단축시킬 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 연약지반에서 말뚝 시공 시 침하속도와 부주면마찰력의 관계를 파악하고 말뚝의 시공 후 상부구조물의 축조시기를 계측결과를 통하여 분석하고, 재하시험에서 구한 마찰응력과 부주면마찰력과의 관계 등을 파악하여 실제 현장에서 적용할 수 있는 방법을 연구하는 것이 본 논문의 목적이다.

## 2. 말뚝의 부주면마찰력 시험

### 2.1. 시험현장 현황

현장시험위치에서의 실트질 점토층의 표준관입시험시 N치는 3~7정도로 나타났고, 상부 실트질 모래층은 3~15정도, 하부 실트질 모래층은 7~50정도로 나타났고, 공내 지하수위 측정결과 G.L. -5.2~G.L. -7.8m에 걸쳐 분포하는 것으로 나타났다.

시추조사 과정에서 채취된 S.P.T 및 불교란시료에 대해서 흙 분류, 입도분포 및 연경도(Consistency) 특성 등의 물리적 시험을 실시하였으며, 압축 및 강도특성 등의 역학적 시험을 실시하였다. 실내토질시험 결과는 성토층 직하부의 원지반 상부 실트질 모래층과 지반개량의 주 대상층인 실트질 점토층으로 구분하여 정리하였다.

본 시험이 실시된 상부 실트질 모래층을 조사한 결과 흙의 분류는 통일분류법상, 전반적으로 'SM'으로 분류되며 부분적으로 'SC', 'ML', 'CL' 등으로 분류되었다. 그리고 0.08mm체 통과중량백분율의 분포범위는 24~75%이며 평균적으로 49%의 분포범위를 보였다.

액성한계의 분포범위는 32.5~46.9%이며 소성한계는 20.8~34.4%, 소성지수는 2.1~24.4, 자연함수비는 24.5~40.2%의 범위로 분포하는 것으로 나타났으며 비중은 2.624~2.699의 범위였다.

실트질 점토층의 실내토질시험 결과 흙의 분류는 통일

분류법상, 전반적으로 'CH'로 분류되며 부분적으로 'MH', 'ML' 'CL' 등으로 분류되었다. 0.08mm체 통과 중량백분율의 분포범위는 57~96%이며, 액성한계는 40.8~66.4%, 소성한계는 17.7~30.9%, 소성지수는 17.6~36.6의 범위로 분포하였고, 자연함수비는 31.8~43.6%의 범위이며, 비중은 2.62~2.74의 범위로 나타났다. 습윤 단위중량은 16.7~18.5kN/cm<sup>3</sup> 범위이며 점토층의 표준압 밀시험 결과, 초기간극비의 분포범위는 0.89~1.25이고 e-log p 곡선에 의해 평가된 압축지수는 0.27~0.45로 나타나며, 선행압밀응력은 5.2~32.4N/cm<sup>2</sup>의 범위에 분포하는 것으로 나타났다.

점토층의 강도특성중, 일축압축시험에 의해 평가된 비배수전단강도  $c_u = 2.65 \sim 8.63 \text{N/cm}^2$ . 삼축압축시험에 의해 평가된 비배수전단강도  $c_u = 3.24 \sim 9.42 \text{N/cm}^2$ 의 분포범위를 나타낸다. 한편, 삼축압축( $\bar{C}U$ )시험결과 내부마찰각은  $\phi = 30.42^\circ$ 로 평가되었다.

## 2.2. 현장시험 개요

말뚝의 부주면마찰력을 관찰하여 부주면마찰력이 안정되는 시점을 파악하고 시공시기를 결정하기 위해 말뚝의 표면에 변형률계지를 부착하여 항타시점부터 마찰응력을 관찰하였다. 부주면마찰력 현장시험의 개요는 표 1과 같다.

표 1. 부주면마찰력 현장시험 개요

항 목	내 용
시험 기간	말뚝 항타전 ~ (상부 구조물 완료 시+2개월)까지
시험 말뚝 제원	$\phi = 508\text{mm}$ , $t = 9\text{mm}$
시험 말뚝	개단선단지말뚝

본 현장에서 실시된 부주면마찰력 관측시험을 위해 그림 2, 3과 같이 총 6개의 변형률계지를 설치하였으며 지반별 부주면마찰력의 발생기구를 관찰하기 위해 실트질 모래지반과 점토지반에 걸쳐 변형률계지를 배치하였다.

## 2.3. 시험순서 및 방법

부마찰력 측정시험을 위하여 강관말뚝( $\phi=508\text{mm}$ ,  $t=9\text{mm}$ )을 준비했다. 강관말뚝의 표면에 부주면마찰력 측정을 위한 전기저항식 스트레인계지 센서를 그림 3과 같이 설치하였고, 그 위에 말뚝 항타 시 지반과의 마찰로 인한 센서의 파괴를 막기위해 보호용 채널을 용접하여 설치하였다. 시험말뚝은 말뚝항타기를 이용해 시공하였는데, 시험말뚝 항타 직후부터 구조물 축조 후 +

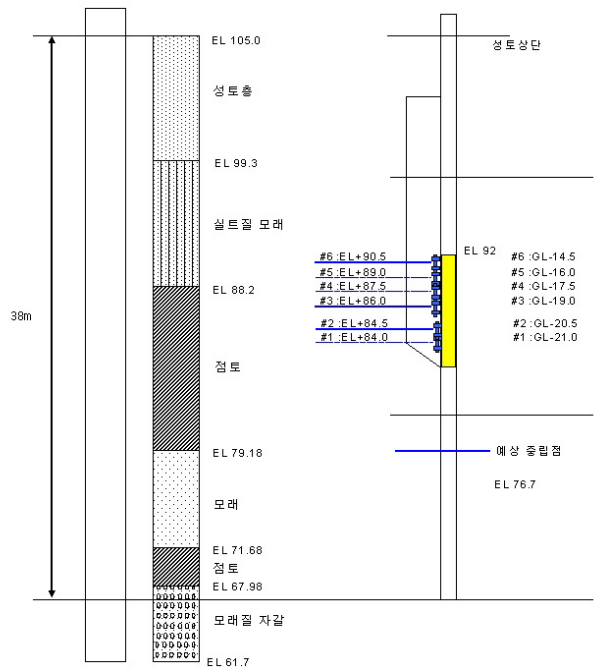


그림 2. 현장시험시의 지반 주상도 및 변형률계지 위치도

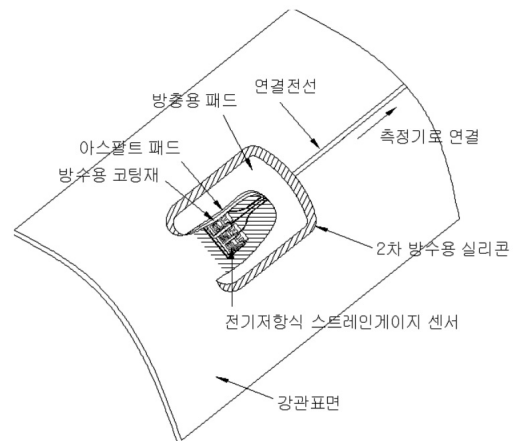


그림 3. 완전결선회로의 강관표면 접착형 센서

2개월까지 장기계측을 실시하였고 시험결과를 정리하고 이를 분석하였다.

## 2.4. 말뚝축하중의 계산순서

말뚝의 축하중은 스트레인계지에서 측정된 변형률을 이용하여 다음의 순서대로 식(1), (2)를 이용하여 계산하였다.

### 2.4.1. 말뚝의 축방향 변형률의 측정

시간의 경과에 따라 축하중 계측용 센서에 발생하는 스트레인( $\epsilon_m$ )을 데이터집록기(Data logger)를 통해 측정하였다.

### 2.4.2. 응력 계산

센서 각 위치에서의 응력은 식 (1)을 이용하여 계산되었다.

$$\sigma_{mi} = \epsilon_{mi} \cdot E_s \quad (1)$$

여기서,  $E_s$  : 강관말뚝의 탄성계수( $2.06 \times 10^7 \text{N/cm}^2$ )

### 2.4.3. 말뚝 축하중 계산

센서 각 위치에서의 말뚝 축하중은 식 (2)를 이용하여 계산되었는데, 이를 이용하면 말뚝의 부마찰력을 계산할 수 있다.

$$Q_{mi} = \sigma_{mi} \cdot A_s = \epsilon_{mi} \cdot E_s \cdot A_s \quad (2)$$

여기서,  $A_s$  : 강관말뚝의 강재 두께부 면적( $141.1 \text{cm}^2$ )

### 2.4.4. 각 위치에서 측정된 $Q_{mi}$ 를 깊이에 대하여 도시

임의의 시간에 각 위치에서 측정된  $Q_{mi}$ 를 깊이에 따라 도시하였고, 각 지점에서의 부주면마찰응력을 계산하여 정리하였다.

## 3. 시험결과 및 분석

### 3.1. 단면위치별 축하중

말뚝향타 직후 각 변형률게이지에서 측정된 변형률의 크기를 측정하고 식 (1), (2)를 이용하여 단면 별 축력 및 응력을 계산하여 시간대 별로 그림 4~7에 나타내었다. 2월 21일에 향타를 시작하였으며, 3월 23일 +20cm의 표토정리를 끝냈고, 지속적인 측정 및 분석결과 4월 8일경에 축력 및 응력의 증가가 수렴하는 것을 확인하고 콘크리트 구조물을 축조하기 시작하였으며 7월 10일까지 구조물을 시공하는 동안 다시 응력의 증가가 일어나는 것을 그래프를 통해서 확인할 수 있었다.

### 3.2. 각 지점에서의 부주면마찰응력 분포

각 지점의 변형률게이지에서 출력된 값을 식(1), (2)를 이용하여 구간별 부주면마찰응력을 계산하면 그림 8과 같다. 역시 4월 8일 이후로 부주면마찰응력이 수렴하는 것을 알 수 있으며 구조물 축조 후 약간 증가하였으나 급격한 주면마찰응력의 증가가 없는 것으로 보아서 안정되어 있는 상태인 것을 알 수 있다.

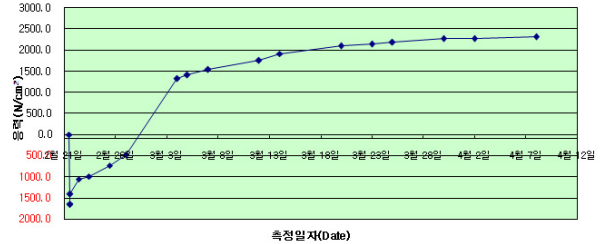
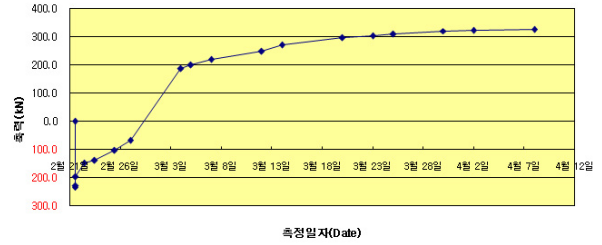


그림 4. #114-1게이지에 대한 시간대 별 축력 및 응력분포

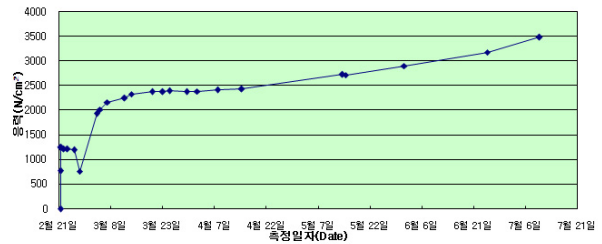
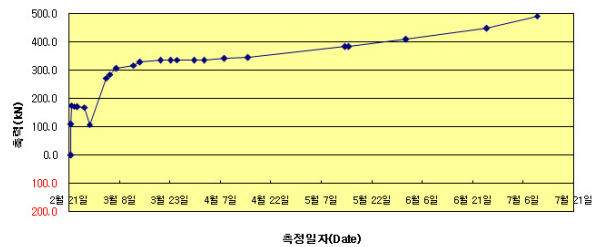


그림 5. #114-2게이지에 대한 시간대 별 축력 및 응력분포

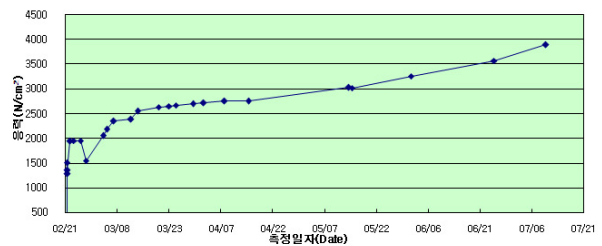
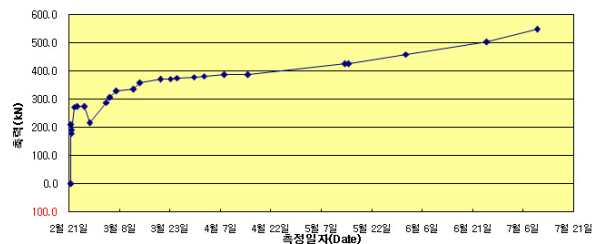


그림 6. #114-3게이지에 대한 시간대 별 축력 및 응력분포

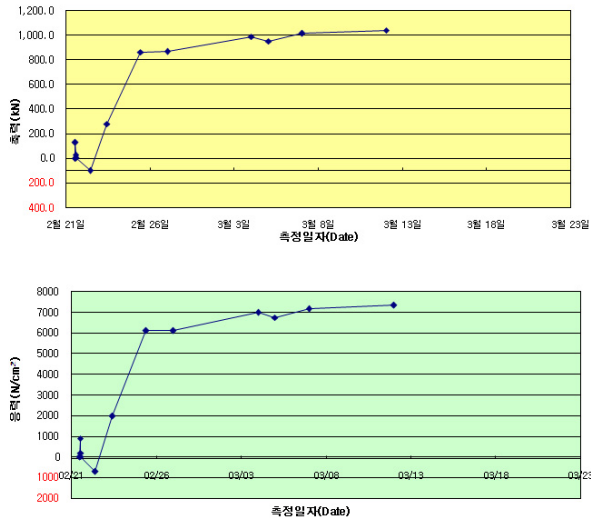


그림 7. #114-5게이지에 대한 시간대 별 축력 및 응력분포

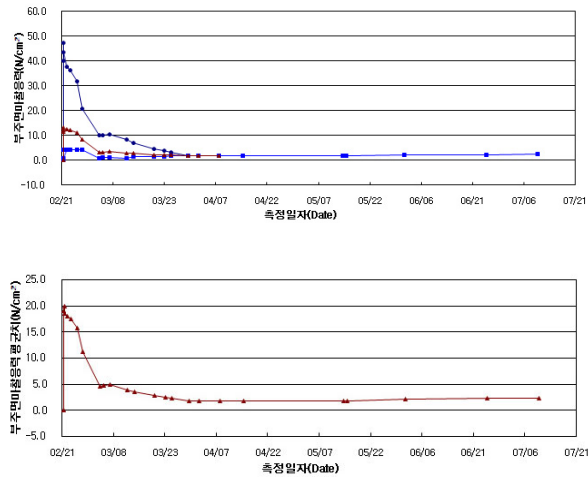


그림 8. 각 지점의 부주면마찰응력 및 평균치 분포도

### 3.3. 부주면마찰응력 측정결과 분석

그림 4~7에 나타난 응력 측정결과에서 볼 수 있듯이 3월초 이후로 말까지의 응력은 점차로 수렴하는 것을 알 수 있다. 각 변형률게이지에 측정되어진 변형률을 이용하여 주면마찰응력의 변화를 그래프로 표시하면 그림 9~11과 같다(변형률게이지 #5는 매설위치가 실트질모래이고 측정치도 3/12일 이후로 측정 불가능상태가 되어 주면마찰응력 계산에서 제외하였음).

그림 9~11에서와 같이 주면마찰응력이 발달하다가 다시 하향 안정되어가는 점을 현장측정을 통해 파악할 수 있다면, 더 이상의 주면마찰응력의 증감이 없는 시기를 파악하여 이를 상부 구조물 축조시기로 판단할 수 있을 것이다.

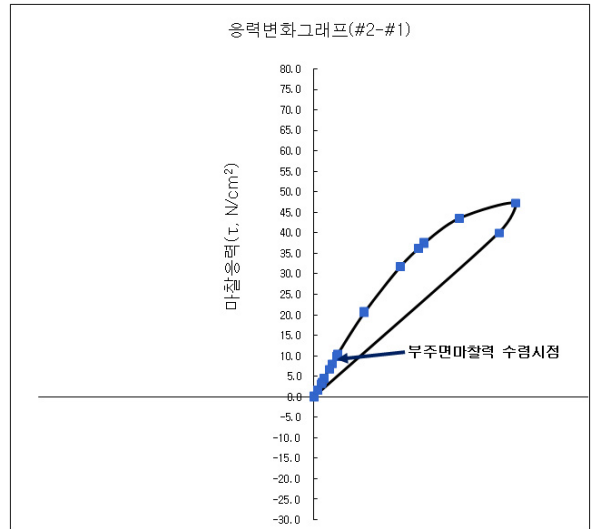


그림 9. 게이지 #2-#1 사이의 부주면마찰응력의 변화

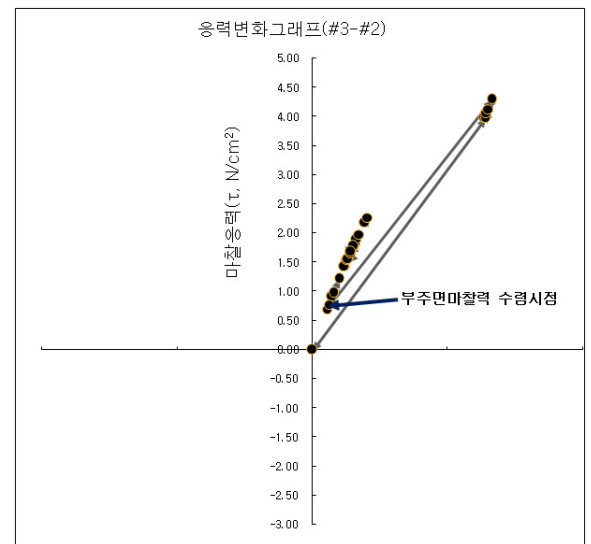


그림 10. 게이지 #3-#2 사이의 부주면마찰응력의 변화

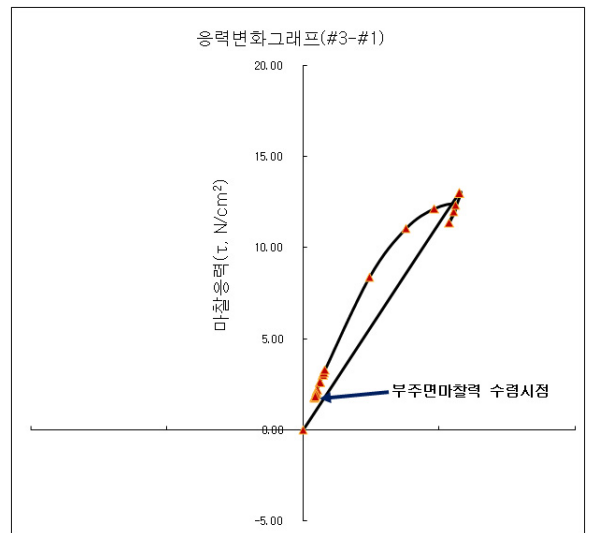


그림 11. 게이지 #3-#1 사이의 부주면마찰응력의 변화

### 3.4. 부주면마찰응력 산정식에 의한 분석

말뚝의 부마찰력 산정을 위한 적절한 해석방법으로는 최대전단강도법(maximum friction method), 탄성 또는 탄소성 해석법(elastic or elastoplastic method), 하중전달곡선을 이용한 방법(load transfer curve method) 등을 들 수 있다(정삼성, 1993, 한국지반공학회, 2002). 본 연구에서는 일반적인 부마찰력 산정식인 최대 전단강도법에 의해 부주면마찰응력을 산정하였다. 비배수 전단강도법과 유효응력법으로 나누어 계산하였는데 그 결과는 다음과 같다.

#### 3.4.1. 비배수 전단강도법

$$f_n = c_u = \alpha \cdot c_u \quad (3)$$

시험에서 구한 본 현장의 비배수 전단강도는 깊이에 상관없이  $c_u = 8.63 \text{N/cm}^2 = 0.88 \text{kgf/cm}^2$  정도로 나타나는데,  $\alpha$ 의 추천값(정삼성, 1993, 한국지반공학회, 2002)을 구하면  $\alpha \approx 0.6$  정도이므로 부주면마찰응력은 약  $5.18 \text{N/cm}^2 = 0.528 \text{kgf/cm}^2$  정도로 계산되어 진다.

$$f_n = \alpha \cdot c_u = 0.6 \times 8.63 = 5.18 \text{N/cm}^2$$

#### 3.4.2. 유효응력법

$$f_n = \beta \cdot \sigma'_v \quad (4)$$

토질시험결과와 기존자료를 통해 구한 현장점토에서의 추천  $\beta$  값은 약 0.2 정도이며 습윤단위중량은  $\gamma_w = 17.9 \text{kN/cm}^3$ 이므로 G.L. -20m 정도에서의 부주면마찰응력을 계산하면

$$\sigma'_v = 17.9 \text{kN/cm}^3 \times 20 \text{m} = 358 \text{kN/m}^2 = 35.8 \text{kN/cm}^2$$

$$f_n = \beta \cdot \sigma'_v = 0.2 \times 35.8 = 7.16 \text{N/cm}^2 (0.72 \text{kgf/cm}^2)$$

따라서, 각 방법으로 구한 부주면마찰응력은  $f_n = 5.18 \sim 7.16 \text{N/cm}^2$ 이며 이는 말뚝향타직후 피크 시의 측정치의 평균인  $19.8 \text{N/cm}^2 = 198 \text{kN/m}^2$ 보다는 적으며, 향타 후 15일 경과시점인 3월 5일경의 값과 일치하는 것으로 나타났으며, 그 이후 계속적으로 부주면마찰응력 값은 계속적으로 감소하다가 2개월 후에 수렴하였다. 이러한 현상은 토질이나 상재하중의 조건에 따라 다

르게 나타나리라고 판단된다. 그리고 각 변형률계이지의 측정 변형률의 시간대별 출력치 상 수치가 차이가 나서 정확한 주면마찰응력을 계산하기엔 무리가 있어 보이나 시간대별 추이는 비슷하게 나타나 주면마찰응력이 수렴하는 시점은 파악이 가능했다. 따라서 현장에서 부주면마찰력을 고려한 시공을 할 때에는 현장시험 및 계측을 통해 부주면마찰력이 수렴하는 시점을 파악하여 시공에 임한다면 부주면마찰력에 의한 피해를 최소화할 수 있고 공기를 단축함으로써 경제적인 시공이 가능하리라고 판단된다.

### 3.5. 침하속도와 부마찰력의 크기

연약지반에서 침하속도와 부마찰력의 크기와 관계를 관찰한 결과 부마찰력의 크기는 침하속도가 클수록 크게 나타났고, 침하속도에 따른 부주면마찰력의 증가량은 표 2와 같다.

표 2. 침하속도에 따른 부주면마찰력의 증가량

계측기 번호	부주면마찰력 증분 (kN)		부주면마찰력 일증분량 (kN/일)	
	시공초기 (0.5cm/월)	시공초기 (0.1cm/월)	시공초기 (0.5cm/월)	시공초기 (0.1cm/월)
#114-1	504.87	55.13	22.95	2.12
#114-2	220.03	10.0	11.47	0.44
#114-3	149.00	28.81	6.77	1.11

\* 기간침하속도는 2월 21일~3월 14일 동안 0.5cm/월, 3월 14일~4월 8일 동안 0.1cm/월

## 4. 정재하시험 결과와 비교 고찰

본 연구대상 현장의 인근에서 기설시되었던 정재하시험결과를 본 부마찰력시험과 비교하였다(한국지반환경공학회, 2004). 정재하시험은 본 시험과 같이 축하중 계측용 센서가 설치된 같은 제원의 개단강관말뚝을 사용하였고, 그림 12와 같이 각 단면당 2개소에 완전결선형 전기저항식 강관변형률계를 설치하여 시험 시의 변형률을 측정하였다.

시험말뚝의 축하중 전이 거동을 그림 13에 나타내었다. 여기서, 1주기에서 5주기까지는 각 주기별 최대하중에 대한 하중전이 거동을 나타내었고, 6주기에서의 최대하중 7.35MN로 하중을 증가시키는 중에 말뚝두부의 재료파손으로 시험을 종료하고 최대하중인 6.74MN에 대한 하중전이 거동을 나타내었다.

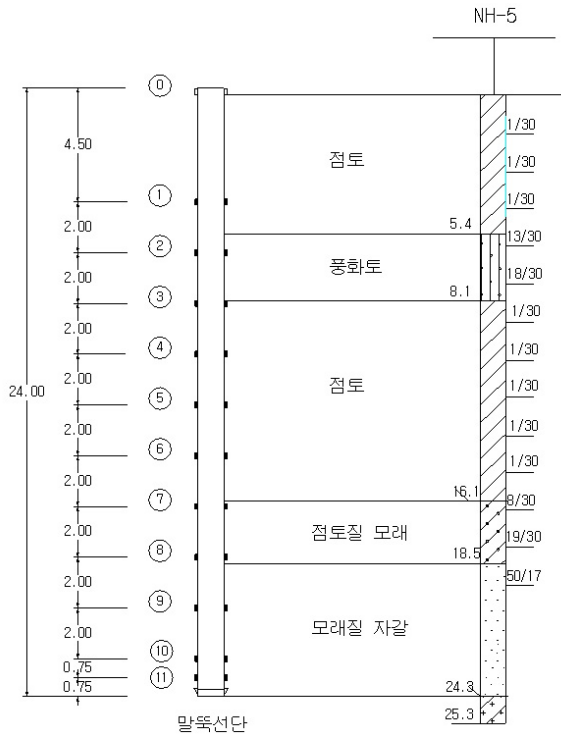


그림 12. 정재하시험 말뚝의 계측센서 설치위치도

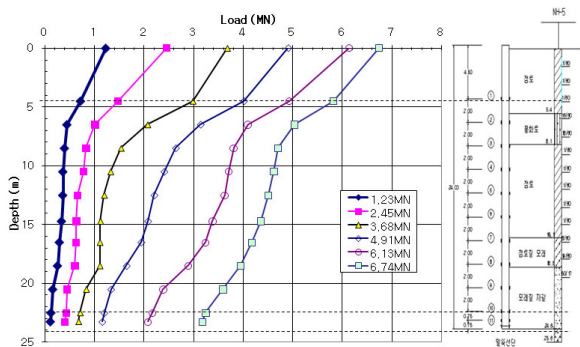


그림 13. 하중단계별 말뚝의 축하중전이 분포도

각 지층별 마찰지지응력의 크기를 식 (1), (2)에 의해 계산하고, 말뚝 두부에 작용된 하중 단계별로 나타내었다. 각 재하단계에서 발휘된 평균마찰응력의 분포를 각 지층별로 나타내면 그림 14와 같다. 재하하중 6.74MN에서 각 지층별 평균 마찰응력은 점토층(0~5.4m)에서 14.79N/cm<sup>2</sup>, 풍화토층(5.40~8.10m)에서 16.15N/cm<sup>2</sup>, 점토층(8.1~16.1m)에서 4.34N/cm<sup>2</sup>, 점토질모래층(16.1~18.5m)에서 7.21N/cm<sup>2</sup>, 모래질 자갈층(18.5~24.3m)에서 8.27N/cm<sup>2</sup>만큼 발생된 것으로 계산되었다. 본 부주면마찰력 측정시험에서 측정된 위치와 비슷한 깊이의 점토층(8.1~16.1m)에서의 하중 단계별 주면마찰응력의 변화는 그림 15와 같으며 최대주면마찰응력은 9.82N/cm<sup>2</sup>로 측정되었다.

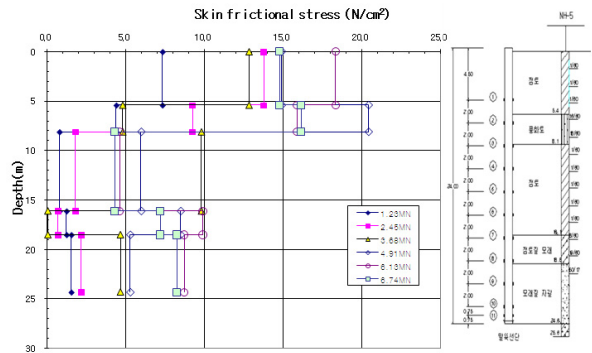


그림 14. 각 층별에서 발휘된 평균 마찰응력

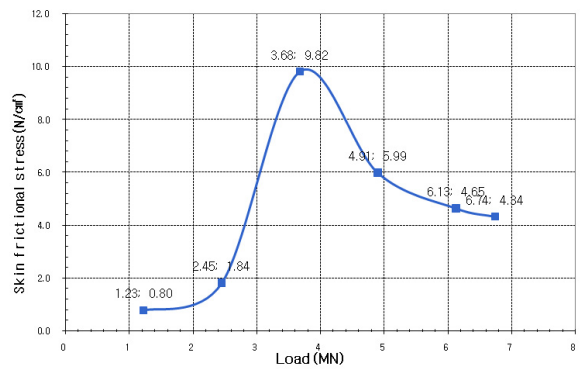


그림 15. 점토층에서의 하중 단계별 주면마찰응력의 변화

부주면마찰력 시험에서 말뚝시공 시공직후에 측정된 점토층의 초기 부주면마찰응력의 평균치는 19.8N/cm<sup>2</sup>=198kN/m<sup>2</sup> 정도로 정재하시험에서 구한 최대주면마찰응력 9.82N/cm<sup>2</sup>와는 2배 정도의 차이가 있으며, 피크를 지난 후의 잔류주면마찰응력은 4.84N/cm<sup>2</sup> 정도로 말뚝시공 후 15일 경과시점에서 측정된 부주면마찰응력 4.53N/cm<sup>2</sup>와 비슷한 값을 나타낸다. 이는 부주면마찰응력의 계산치인 7.16N/cm<sup>2</sup>과도 비슷한 것으로 나타났다. 따라서 계산치를 부주면마찰응력으로 사용해서 설계 시는 이런 점을 고려해서 설계해야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 부주면마찰력 시험을 통하여 연약지반에 타설된 강관말뚝의 부주면마찰응력을 측정하였으며 정재하시험에서 구한 정주면마찰응력과 비교해 보았다. 그리고 장기적인 부주면마찰응력의 관측시험을 통하여 경제적인 상부구조물 시공시기를 판단하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 연약지반에서 부마찰력의 크기는 침하속도가 클수록



크게 나타났다.

2. 인근 현장에서 기 수행된 말뚝재하시험결과와 본 부주면마찰력 시험결과와 비교해 본 결과 항타직후의 부주면마찰력은 재하시험 시의 마찰응력보다 2배 정도 크게 나오는 것으로 판단되며 피크를 지난 후의 잔류주면마찰응력은  $4.84\text{N/cm}^2$  정도로 말뚝시공후 15일 경과시점에서 측정된 부주면마찰응력  $4.53\text{N/cm}^2$ 와 비슷한 값을 나타내며 이론식에 의한 결과와도 비슷하였다.
3. 경과시간대 별 부주면마찰력의 변화 그래프를 이용한 장기관측기법을 사용하면 부주면마찰력이 발생하고 있는 중이라도 적절한 상부구조물의 시공시기를 파악할 수 있어 경제적인 시공이 가능한 것으로 판단된다.
4. 앞으로 더 많은 현장에서의 부주면마찰력 측정시험을 통해 우리나라 지반에 적합한 부주면마찰력 산정식을 고안하여 보다 쉽게 현장에서 유사한 지반에 적용할 수 있도록 해야 할 것이다.

#### 참고 문헌

정상섬, 『단독말뚝과 군말뚝의 Downdrag』, 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, pp.259-269, 1993

최용규, 『알기쉬운 말뚝기초공학』, 부산시 공무원 교육교재, 부산광역시 건설안전관리본부, 1998

(사) 한국지반공학회, 『구조물기초 설계기준』, 2002

(사) 한국지반공학회, 『깊은기초』, 지반공학시리즈 4, 한국지반공학회 강습회교재, 2002

(사) 한국지반환경공학회, 『강관말뚝의 경제적 설계를 위한 정재하시험 및 하중전이시험 최종보고서』, 고려개발(주), 2004

남문석, 김상일, 홍석우, 황성춘, 최용규 『대구경 현장타설말뚝의 대용량 양방향 말뚝재하시험 분석 및 극한지지력

추정을 위한 수치해석 연구』, 한국지반환경공학회 논문집, Vol. 12, No. 10, pp.63~72, 2011

Broms, B. B., 『Design of Pile Groups with Respect to Negative Skin Friction』, Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Mexico, Specialty Session 8, 1969

Duncliff, J., 『Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance.』 John Wiley & Sons, New York, 1988

Girault, P., 『Positive Skin Friction and Settlement of Piled Foundations』, Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Mexico, Specialty Session 8, 1969

Jeong, S. S., Kim, S. I. and Briaud, J. L., 『Analysis of Downdrag on Pile Groups by the Finite Element Method』, Computers and Geotechnics, Vol. 21, No. 2, pp.143-161, 1997

Kuwabara, F. and Poulos, H. G., 『Downdrag Forced in Group of Piles』, J. of Geotech. Eng., ASCE, Vol. 115, No. 6, pp.806-818, 1989

Lambe, T. W., Garlanger, J. E. and Leifer, S. A., 『Prediction and Field Evaluation of Downdrag Forces on a Single Pile』, Research Report No. R74-27, Soil Publication No. 339, MIT, 1974

Terzaghi, K., and Peck, R.B., 『Soil Mechanics in Engineering Practice』, John Wiley and Sons, New York. 1948.

Terzaghi, K., and Peck, R.B., 『Settlement of Point Bearing Pile Foundation; Settlement of Floating Pile Foundation』, Soil Mechanics in Engineering Practice., 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 540-555, 1967

Tomlinson, M. J., 『Pile Design and Construction Practice, 3rd ed.』 A Viewpoint Publication, U. K., 1987

Verruijt, A., 『A Simplified Method for the Calculation of Negative Skin Friction on Piles』, Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Mexico, Specialty Session 8, 1969

Vesic, A. S., 『Design of Pile Foundations.』 National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 42, 1977

(접수일 : 2012. 2. 6 / 심사일 : 2012. 2. 21 / 심사완료일 : 2012. 6. 7)