

## S.L. 도포 및 미도포 말뚝의 축하중전이거동

### The Behavior of Axial Load Transfer for S.L. Coated Pile And Uncoated Pile

배기열<sup>1)</sup>, Ki-Yeul Bae, 김정환<sup>2)</sup>, Jung-Hwan Kim, 이민희<sup>3)</sup>, Min-Hee Lee, 최용규<sup>4)</sup>, Yongkyu Choi

<sup>1)</sup> 경성대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyungsoong University

<sup>2)</sup> 경성대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyungsoong University

<sup>3)</sup> 부산대학교 일반대학원 박사과정수료, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Pusan National University

<sup>4)</sup> 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungsoong University

SYNOPSIS : In this study, in order to compare the behavior of axial load transfer for S.L. coated piles and uncoated piles installed at a field test site. During static pile load tests, axial load transfer for S.L. coated piles and uncoated piles were measured.

Key words : axial load transfer, S.L. coated pile, field test, static pile load test

## 1. 서 론

최근 건설부지의 부족과 국토의 효율적인 발전을 위해 연약지반상에서 건설활동이 많이 이루어지고 있다. 이러한 연약지반내에 구조물을 건설하기 위한 기초 설계시 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 주면마찰력과 반대로 말뚝에 재하되는 하중으로 작용하게 된다. 이와 같은 하향의 마찰력을 부주면마찰력이라 한다.

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 주면 마찰력은 말뚝의 직경과 무관하게 말뚝이 약 10~20mm 정도의 침하가 발생하였을 때 최대로 발휘된다고 하지만 이러한 거동특성은 아직도 명확하게 규명되지 않았으며 부마찰력이 발생되면 말뚝에 과도한 응력을 발생시켜 재료파괴 및 지반파괴를 일으킬 수 있다.

이러한 부마찰력을 저감시키기 위해 주로 말뚝주면에 S.L.(Slip Layer) 도포를 하는데 S.L.의 종류와 두께, 지층의 종류에 따라 저감의 정도는 다르나 종래의 연구결과 50~90% 정도의 저감효과를 발휘하는 것으로 나타나고 있다 (정상삼, 김준수 (1996)).

본 연구에서는 현장시험을 통하여 S.L. 도포한 말뚝과 미도포말뚝에 대한 축하중전이거동을 측정하여 분석하였다.

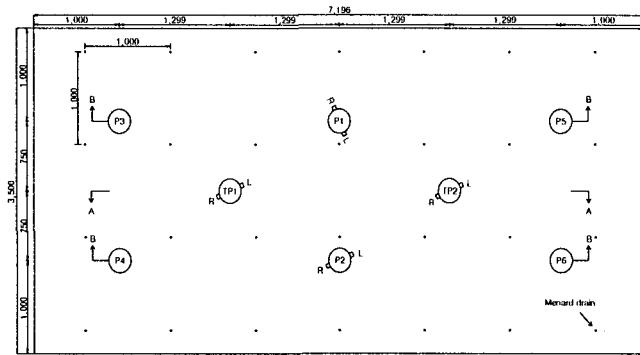
## 2. 현장시험

### 2.1 개요

표 1. 시험개요

항목	내 용		
시험 현장	○○ 경기장		
시험 기간	약 ○개월		
시험 말뚝 제원	$\Psi = 609 \text{ mm}, t = 12 \text{ mm}$		
시험 항목	연약지반 처리구간에서의 부마찰력 발생크기 및 S.L.처리로 인한 저감량 측정을 위한 장기 계측		
	말뚝의 지지력 확인을 위한 정재하시험 (예상압밀완료시)		
	지반의 압밀 특성 확인을 위한 연약지반 계측		
	지반특성치 확인을 위한 지반조사 및 현장시험 (CPT)		
시험 말뚝 (개단선단지지 말뚝)	기호	연약지반처리 여부	S.L.도포 여부
	TP(Test Pile)1	팩드레인 시공	SL 도포
	TP(Test Pile)2	팩드레인 시공	SL 미도포

## 2.2 시험계획 및 절차



범례 : TP1 : 시험말뚝 (S.L.도포), TP2 : 시험말뚝 (S.L.미도포), P1 : 반력말뚝 (S.L. 도포)  
P2 ~ P6 : 반력말뚝 (S.L. 미도포) R.L : 계측센서 설치방향  
비고 : 메너드 드레인 시공위치는 정확하지 않음

그림 4.1 현장시험위치의 평면도

그림 1. 현장시험위치의 평면도

현장시험개요는 그림 1과 같고, 각 단면은 그림 2~그림 3에 나타내었다. 메너드 드레인 시공후 축하중계측용센서가 설치된 시험말뚝(TP1~TP2)과 반력말뚝(P1~2) 그리고 축하중계측용센서가 설치되지 않은 반력말뚝(P3~P6)을 각각 시공한 후 약 9m의 프리로딩을 실시하였다.

강관말뚝(시험말뚝 : 2개, 반력말뚝 : 6개)을 준비하여 축하중계측용 센서를 설치하고 보호용 채널을 용접하고 TP1에는 S.L. 도포, TP2에는 S.L. 미도포, P1에는 S.L. 도포, P2~P6에는 S.L. 미도포 하였다. 시험말뚝(TP1~2) 및 반력말뚝 (P1 ~ 6)의 항타시공 후 약 ○개월간 장기계측 실시하였고 이어서 말뚝에 대한 정재하시험을 실시하였다 (부산광역시 건설안전관리본부 (1997), 최용규(1998)).

그림 2와 그림 3은 그림 1의 단면 A-A와 B-B를 나타낸 것이다.

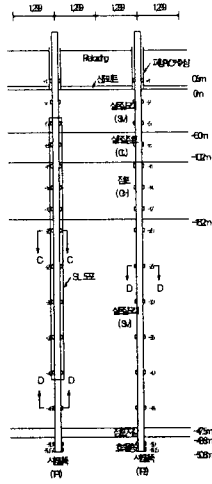


그림 2. 3현상 시험 위치 단면 A-A

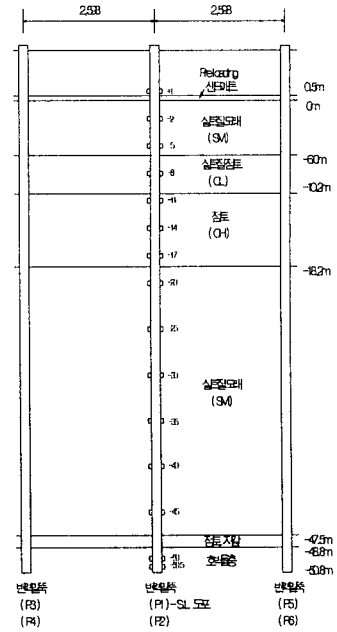


그림 3. 3현상 시험 위치 단면 B-B

### 3 시험결과

#### 3.1 말뚝머리 하중-침하량-시간 관계

그림 4는 TP1(S.L. 도포)과 TP2(S.L. 미도포)의 말뚝머리 하중-침하량 관계를 나타낸 것이다.

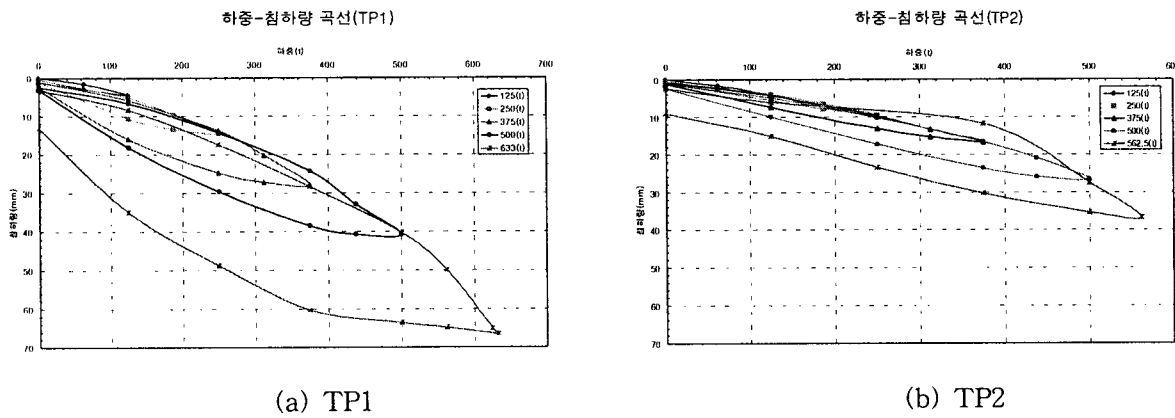
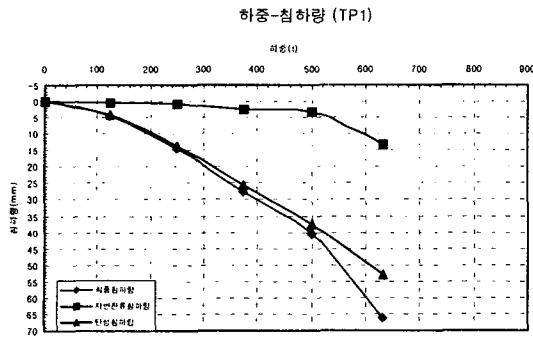
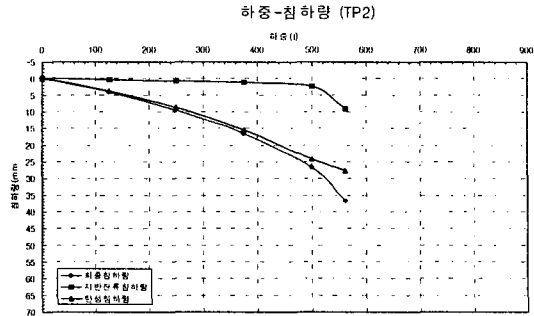


그림 5. 말뚝머리 하중-침하량 관계

그림 5는 TP1(S.L. 도포)과 TP2(S.L. 미도포)의 말뚝머리 하중-잔류침하량(또는 변형량) 관계를 나타낸 것이다.



(a) TP1

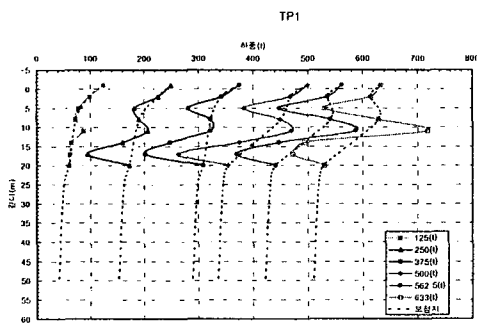


(b) TP2

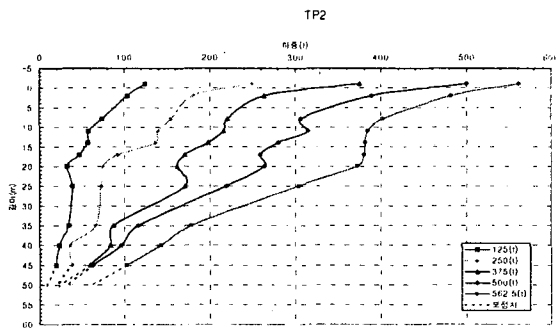
그림 5. 말뚝머리 하중-잔류침하량(또는 변형량) 관계

### 3.2 축하중전이 측정 결과

시험말뚝 TP1, TP2의 축하중 분포도를 그림 6에 나타내었는데, 여기서, 점선으로 나타낸 부분은 계측 데이터의 손실로 인해서 직접 측정하지 못 하였으나 축하중을 예측하여 도시하였다. 그림 6에 나타낸 축하중 분포도는 말뚝정재하시험시 측정한 값만을 도시하였으며 항타잔류하중 및 부마찰력 측정치는 포함하지 않았다.



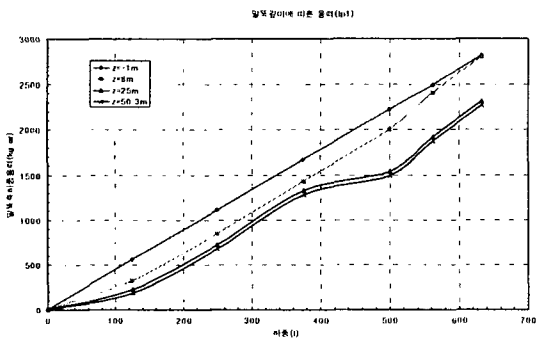
(b) TP1



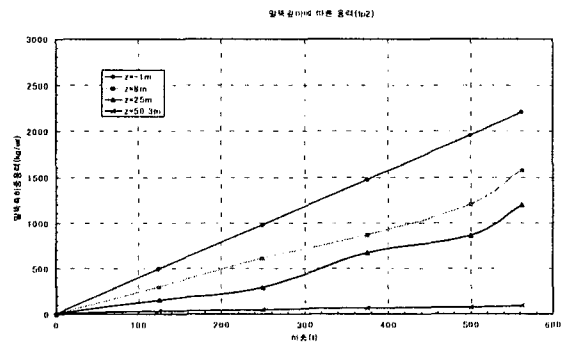
(b) TP2

그림 6. 하중단계별 말뚝축하중 분포도

그림 7은 TP1(S.L. 도포)과 TP2(S.L. 미도포)의 하중단계별 말뚝깊이에 따른 응력 관계를 나타낸 것이다.



(a) TP1



(b) TP2

그림 7. 하중단계별 말뚝 깊이에 따른 응력 측정치

## 4 정재하시험 결과분석

말뚝재하시험의 결과를 여러가지 극한(또는 항복)지지력 판정방법들을 이용하여 극한(또는 항복)지지력에 대하여 분석하였으며, 말뚝재하시험 결과를 토대로 다음과 같은 항목들을 검토할 수 있었다 (건설교통부 (2000), 건설교통부 (2001)).

### 4.1 항복 또는 극한지지력 분석

그림 8은 TP1(S.L. 도포)과 TP2(S.L. 미도포)의 P(말뚝머리 하중)-S(잔류침하량) 관계에서 지지력을 산정한 것이다.

분석결과, TP1의 항복지지력은 633(tonf)이었고, TP2의 항복지지력은 562.5(tonf)이었다.

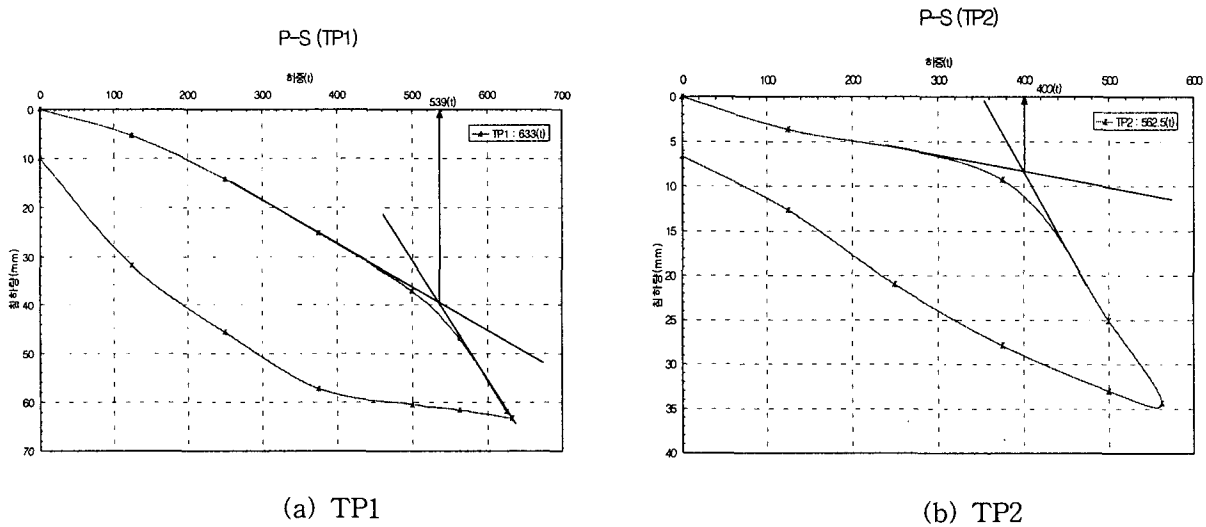


그림 8. P-S 분석법

그림 9는 TP1(S.L. 도포)과 TP2(S.L. 미도포)의  $\log p$ (말뚝머리하중) -  $\log s$ (잔류침하량) 관계에서 지지력을 산정한 것이다.

분석결과, TP1의 항복지지력은 550(tonf)이었고, TP2의 항복지지력은 410(tonf)이었다.

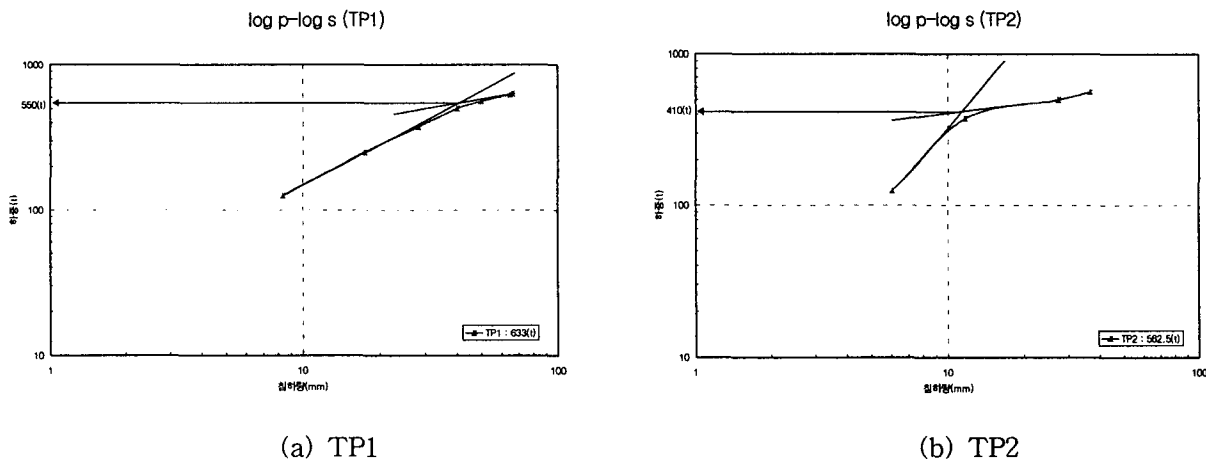


그림 9.  $\log p - \log s$  분석법

그림 10은 TP1(S.L. 도포)과 TP2(S.L. 미도포)의 S(말뚝머리하중) - log t(재하시간) 관계에서 지지력을 산정한 것이다.

분석결과, TP1의 항복지지력은 633(tonf)이었고, TP2의 항복지지력은 562.5(tonf)이었다.

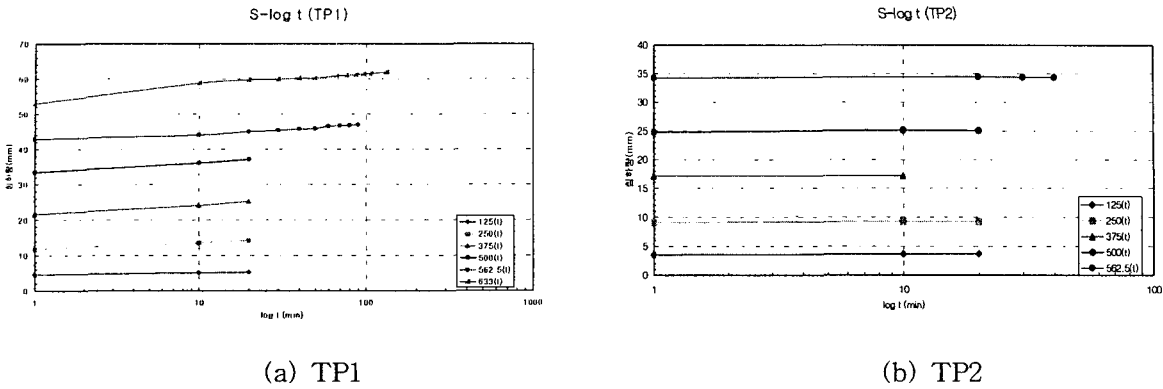


그림 10. S - log t 분석법

두 개의 시험말뚝(TP1, TP2)에 대하여 말뚝정재하시험을 실시하였으며, 각 분석방법에 의한 결과를 표 1에 요약하였다.

시험 시공된 말뚝의 정재하시험결과 말뚝의 극한지지력을 구할 수 있었으며, 극한지지력을 근거로 허용지지력을 200톤 이상으로 결정할 수 있었다.

말뚝정재하시험 결과를 토대로 말뚝의 허용지지력 작용시 침하량을 검토하였고, 말뚝의 허용지지력 작용시에 발생하는 침하량이 TP1은 약 18mm이고 TP2는 7.5mm이므로 허용침하량(통상 25.4 mm 기준을 사용)이내에 들게 되어 충분히 안전측인 것으로 판단되었다.

표 2. 시험결과요약

시험 말뚝	S.L. 도포 여부	P-S 법 (tonf)	log p - logs 법 (tonf)	S - logt 법 (tonf)	항복 지지력 (tonf)	허용 지지력 (tonf)	안전율	말뚝 침하량 (mm)	말뚝 허용지지력 (tonf)
TP1	S.L. 도포	539	550	562.5	539	269	2.0	약 18	269
TP2	S.L. 미도포	400	410	562.5	400	200	2.0	약 7.5	200

시험결과를 분석해 볼 때 정재하시험시 일반적으로 S.L. 미도포 말뚝인 TP2의 지지력이 크게 나올 것으로 예상되었으나 본 시험에서는 S.L. 도포한 말뚝인 TP1의 지지력이 크게 나왔다. 이것은 시험시 재하대로 사용된 프레임이 재하하중을 견디지 못해 변형이 발생하여 실제 하중-침하량의 오차가 지지력산

정에 문제가 있었다고 판단된다.

## 4.2 축하중전이 특성분석

### (1) S.L. 도포말뚝(TP1)

그림 6(a)에 나타난 하중재하단계에 따른 말뚝축하중의 분포도에서 최대재하하중단계인 633(tonf)에서 주면마찰력이 123(tonf), 선단지지력이 510(tonf)으로 산정되었다.

하중재하시 S.L. 도포된 말뚝은 주면마찰력이 미도포된 말뚝보다 작게 발현되고 주면마찰력의 하중부담이 한계에 이르면 말뚝의 선단이 재하된 하중을 부담하게 된다. 그림 6(a)에서 각 재하단계에서 재하하중이 증가함에 따라 S.L. 도포에 의한 마찰저항력의 감소로 인해 주면마찰력의 증가는 작게 나타나고 선단지지력이 크게 나타남을 알 수 있고 증가된 대부분의 재하하중을 말뚝의 선단이 지지하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 시험말뚝 TP1은 선단에 의해 지지되는 선단지지말뚝으로 볼 수 있다.

### (2) S.L. 미도포말뚝(TP2)

그림 6(b)에 나타난 하중재하단계에 따른 말뚝축하중의 분포도에서 최대재하하중단계인 562.5(tonf)에서 주면마찰력이 496(tonf), 선단지지력이 67(tonf)으로 산정되었다. 대부분의 재하하중을 주면마찰력이 부담하고 있고 재하하중이 증가함에 따라 주면마찰력의 크기가 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 시험말뚝 TP2는 주면마찰력에 의해 지지되는 말뚝으로 볼 수 있다.

## 4.3 축하중전이 특성

각 지층별 마찰지지용력의 크기를 식 (1)에 의해 계산할 수 있으며, 말뚝머리에 작용된 하중을 단계마다 계산할 수 있다 (최용규 (1999)).

$$f_{si} = \frac{\Delta Q_{si}}{\pi \cdot D \cdot \Delta L_i} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta Q_{si}$  = 각 지층에서 발휘된 마찰력,

D = 말뚝직경,

$\Delta L_i$  = 각 지층의 토층 두께

### (1) S.L. 도포말뚝(TP1)

말뚝 축하중전이 분포도(그림 6(a))를 참고하여 말뚝머리 하중을 주면마찰력과 선단지지력으로 분리할 수 있었으며 각 재하단계에서 각 지층에서 발휘된 평균마찰용력의 분포를 각 지층에 대하여 도시하여 그림 11(a)에 나타내었다. 그림 11(a)에서 재하하중이 증가함에 따라 대부분의 재하하중이 주면마찰력보다는 선단지지력이 부담하고 있고 주면마찰력은 상부 실트질모래, 실트질점토, 점토층인 18m정도의 토층에서 발휘되는 것을 볼 수 있었으며 상대적으로 실트질모래층, 점토·자갈층과 호박돌층에서는 작은 마찰력이 발휘되었다,

하중 633(tonf)을 재하했을 때의 지층의 최대마찰용력은  $0.522(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 이었다.

### (2) S.L. 미도포말뚝(TP2)

말뚝 축하중전이 분포도(그림 6(b))를 참고하여 말뚝머리 하중을 주면마찰력과 선단지지력으로 분리할

수 있었으며 각 재하단계에서 각 지층에서 발휘된 평균마찰응력의 분포를 각 지층에 대하여 도시하여 그림 11(b)에 나타내었다. 그림 11(b)에서 대부분의 재하하중을 선단지지력보다는 주변마찰력이 부담하고 있고 주변마찰력은 각 지층에서 골고루 발휘되는 것을 볼 수 있었으며 상대적으로 실트질모래층, 점토·자갈층과 호박돌층에서는 많은 마찰력이 발휘되었고, 실트질 점토층과 모래·자갈층과 호박돌층에서는 마찰력이 거의 발휘되지 않았다.

하중 562.5(tonf)을 재하했을 때의 지층의 최대마찰응력은  $1.298(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 였다.

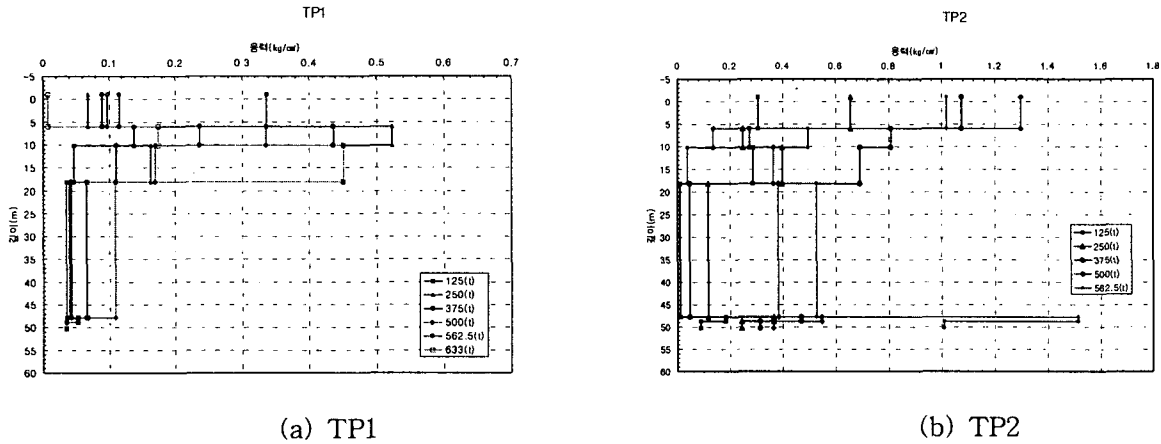


그림 11. 각 지층에서 발휘된 평균 마찰응력

## 6. 참고문헌

1. 건설교통부 (2000). "도로교 설계기준."
2. 건설교통부 (2000). "구조물기초설계기준." pp 174 - 176.
3. 건설교통부 (2001). "도로교설계기준 해설집"
4. 부산광역시 건설안전관리본부 (1997). "제 2부산대교(현 남항대교) 건설공사 실시설계 설계목적의 말뚝재하 시험보고서." 1997. 6.
5. 정상섭, 김준수 (1996). "부주면마찰력을 고려한 단독말뚝의 지지력 산정".
6. 최용규 (1998). "알기쉬운 말뚝기초공학." 부산시 공무원 교육교재, 부산광역시 건설안전관리본부.
7. 최용규 (1999). "말뚝재하시험의 결과해석 - 현장기술자를 위한 워크샷." (사)한국지반공학회