

부주변 마찰력과 그 감소방법의 평가

Estimation and Reduction of Downdrag Force

林 鍾 錫*

Lim, Jong-Seok

金 明 模**

Kim, Myoung-Mo

鄭 寅 駿***

Chung, In-Joon

Abstract

Model pile tests are performed, first, to estimate downdrag exerted on pile surfaces due to the settlement of surrounding soils, and, second, to evaluate the efficiency of the downdrag reduction methods such as the bitumen coating method and the method of the attachment of an enlarged base.

Test results show that the downdrag forces may be expressed as $0.25\bar{\sigma}$ ($\bar{\sigma}$: effective overburden). Bitumen coating reduces the downdrag by more than 50 percent, and the enlarged base attachment method is also effective, whose effectiveness increases as the size of the base increases as expected. When the bitumen coating and enlarged base are both applied, the downdrag force is reduced as much as 90 percent.

Finally, it is found that the quantity of the relative displacement between the pile and the surrounding soil mobilizing full downdrag is extremely small.

要 旨

말뚝에 작용하는 부주변마찰력의 양상과 감소방법을 일련의 모형실험을 통하여 평가하였다. 감소 방법으로는 역청재와 확대선단부를 사용하였다.

실험은 점성토로 이루어진 모형지반에서 지름이 3.2cm 인 모형강관말뚝을 사용하여 수행하였으며, 부주변마찰력으로 인한 하향력을 압력계로 측정하였다. 특히 여러가지 경우에 대한 확대선단부의 감소효과는 인발실험을 통하여 알아보았다.

보통말뚝인 경우에 부주변마찰력은 깊이에 따라 $0.25\bar{\sigma}$ ($\bar{\sigma}$: 유효상재압)로 나타나며, 말뚝과 주변 흙과의 상대변위가 아주 작아도 부주변마찰력은 충분히 발휘된다.

말뚝에 역청재를 도포하여 부주변마찰력을 50%이상 감소시킬 수 있다. 확대선단부의 사용도 부주변마찰력의 감소에 효과적이었으며, 말뚝의 지름에 대한 확대선단부의 지름이 커지거나 주변 흙의 강도가 커질수록 그 효과는 커진다. 역청재와 확대선단부를 동시에 사용하면 약 90%의 감소효과가 있다.

* 正會員, 서울대학교 工科大学 助教

** 正會員, 서울대학교 工科大学 副教授

*** 正會員, 서울대학교 工科大学 教授

1. 서 론

침하가 예견되는 연약지반에 구조물을 건설할 목적으로 말뚝기초를 설치하는 경우, 지반의 침하량이 말뚝의 침하량보다 커지게 되면 말뚝과 주변 흙과의 사이에 부주변마찰력(Negative Skin Friction)이 발생한다. 부주변마찰력은 말뚝을 끌어내리는 작용을 하므로 말뚝에는 하향력(Downdrag Force)이 유발되어 말뚝자체나 지지층에 추가하중으로 작용하게 된다.

Johannessen & Bjerrum¹⁰⁾에 따르면 말뚝에 유발된 하향력은 말뚝의 설계하중을 초과할 정도로 충분히 클 수 있다. 따라서 말뚝기초 설계시 부주변마찰력이 예견되는 지역에서는 이에 대한 대비가 필요하다. 이를 위하여는 부주변마찰력에 대한 정확한 평가와 억제대책이 요구된다.

점성토지반에서 부주변마찰력을 평가하는 방법은 비배수전단강도, s_u , 를 적용하거나 마찰력계수, N_f , 를 사용하는 것이 대표적이다^{14,20)} 비배수전단강도는 다음과 같은 형태로 적용된다.

$$f_N = c_a = \alpha \cdot s_u \dots\dots\dots(1)$$

여기서, f_N : 단위면적당 부주변마찰력
 c_a : 말뚝과 흙과의 부착력
 α : 부착력계수

부주변마찰력이 배수조건에서 발생하게 되면 다음 식처럼 마찰력계수를 사용한다.

$$f_N = \bar{\sigma} K \tan \bar{\phi} = \bar{\sigma} \cdot N_f \dots\dots\dots(2)$$

여기서, $\bar{\sigma}$: 유효상재압
 K : 토압계수
 $\bar{\phi}$: 유효내부마찰각

식 (2)에서 N_f 는 토압계수와 내부마찰각의 함수로서 토질마다 다른 값으로 나타난다.

말뚝의 임의점에서의 하향력은 그 점 윗부분의 말뚝의 전면적에 걸쳐 식 (1), (2)를 적용해서 구할 수 있다. 따라서 하향력은 깊이가 깊어질수록 점점 커지게 된다. 그러나 어느 점 이하에서는 하향력이 오히려 감소하게 되는데, 그 이유는 그 점 이하에서는 말뚝의 침하량이 지반의 침하량보다 커져서 말뚝과 흙과의 마찰력이 부

주변마찰력과 반대방향인 지지력으로 작용하기 때문이며, 이 전환점을 중립점(Neutral Point)이라고 한다.^{3,19)}

부주변마찰력을 감소시키는 방법으로는 말뚝 표면에 역청재(Bitumen)를 입혀서 시공하는 방법^{1,2,4,5,17)}, 전기적삼투작용(Electro-Osmosis)을 이용하는 방법^{2,13)}, 군말뚝으로 시공하는 방법^{15,17)} 등이 연구되었다.

Thompson & Critchfield¹⁸⁾는 말뚝타입시 선단부에 외부보강재(Oversized Bottom Plate)를 사용하면 말뚝과 흙 사이의 마찰력이 감소된다고 하였다. 따라서 말뚝선단에 말뚝의 단면적보다 큰 단면적을 갖는 확대선단부(Enlarged Base)를 장치하여 말뚝을 타입하면 말뚝과 흙 사이의 마찰력이 감소되어 결국 부주변마찰력을 감소시키는 소기의 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 확대선단부를 이용하는 방법은 Bjerrum et al.²⁾에 의해 시도된 바가 있으나 이들의 경우는 확대선단부가 보조적으로 고려되었으며 실험의 절대수가 부족한 관계로 적절한 결론을 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 연약점성토지반에 설치된 강관 말뚝의 경우에 대하여 부주변마찰력의 발생양상과 그 크기를 살펴보고, 역청재와 확대선단부를 사용한 부주변마찰력 감소방법의 효과를 모형실험을 통하여 알아보고자 한다.

2. 모형지반

말뚝의 부주변마찰력은 주위지반의 침하량이 말뚝의 침하량보다 큰 경우에 발생한다. 따라서 실험적으로 부주변마찰력을 연구하기 위해서는 이러한 지반을 인위적으로 만들 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 요구에 따라 60cm×60cm×60cm의 크기를 갖는 철제상자를 준비하여 여기에 연약점성토로 모형지반을 형성하여 사용하기로 했다. 이 모형지반은 자중에 의한 압밀침하가 일어나게 되어 말뚝이 설치되면 말뚝표면에 부주변마찰력을 유발하게 된다.

모형지반을 위한 시료로는 경남 하동산 고흥토(Kaolin) 중 #40체(눈금 0.420mm) 통과분을 사용했으며 시료의 입도분포와 물리적성질이

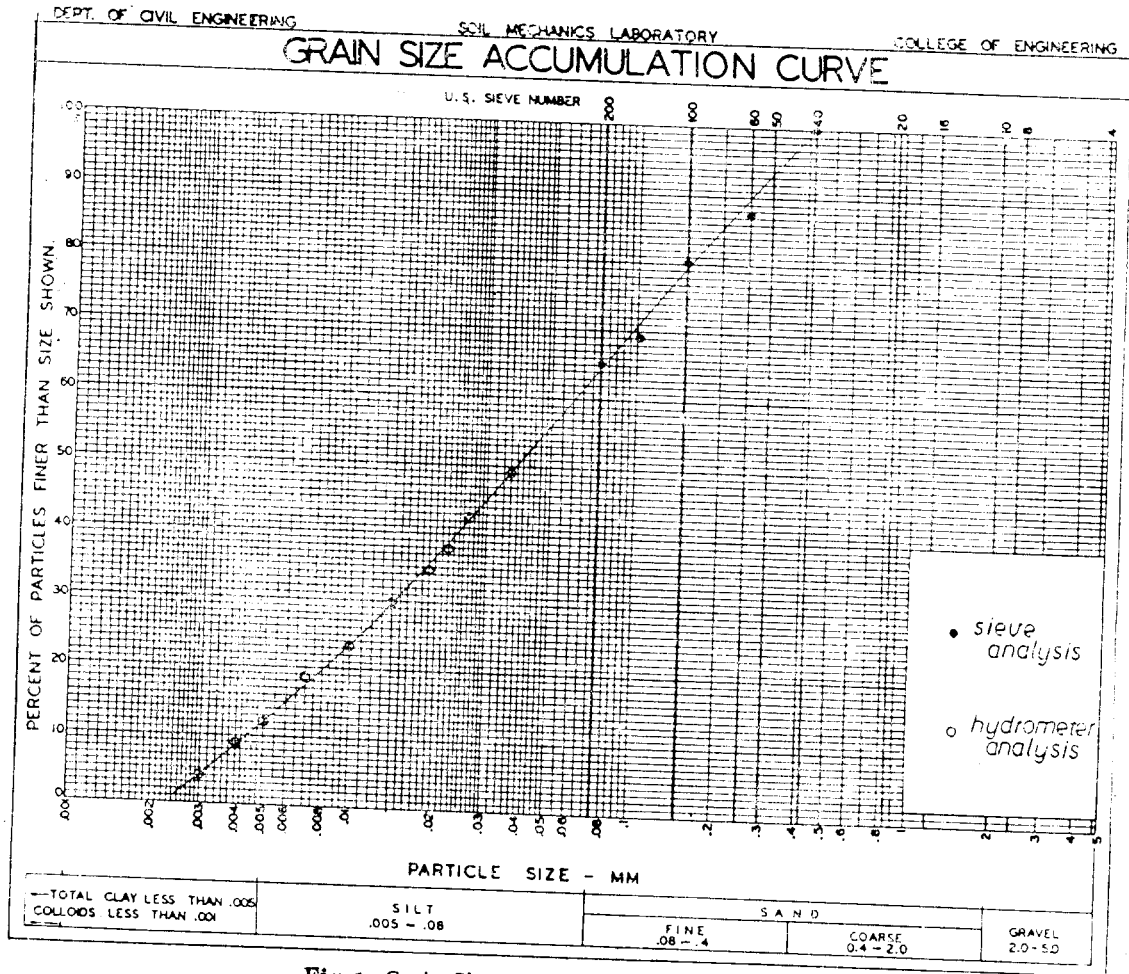


Fig. 1. Grain Size Accumulation Curve of Kaolin

Table 1. Physical Properties of Kaolin

Specific Gravity : $G_s = 2.65$
Liquid Limit : $LL = 37.0\%$
Plastic Limit : $PL = 29.5\%$
Plasticity Index : $PI = 7.5$

Fig. 1 과 Table 1 에 나타나 있다.

이 시료를 반죽하여 철제상자에 넣을 때에는 함수비가 클수록 다루기가 용이했다. 그러나 시료의 함수비가 지나치게 크면 침하량도 커져서 모형지반의 궁극적인 높이가 너무 낮아질 우려가 있다. 따라서 반죽시 시료의 함수비는 55~60%로 하였는데, 이것은 액성한계의 약 1.5 배로서 다루기도 용이할 뿐만 아니라 침하량도 적

당하였다. 이것을 콘크리트혼합기 (Concrete Mixer)를 사용하여 고르게 반죽하여 넣었다. 이렇게 형성된 모형지반은 비교적 높은 함수비로 인하여 초기에는 급격히 침하하다가 어느 정도 시간이 지나면 완만히 침하하며, 표면은 시료에서 빠져나온 물이 고여있고 그 바로 아래는 슬러리 (Slurry) 형태의 흙이 존재한다.

모형지반의 침하양상을 살펴보기 위하여 별도로 가로, 세로가 25cm 이고 높이가 60cm 인 아크릴상자를 준비하여 여기에 모형지반과 동일한 시료를 초기함수비 (Initial Water Content, ω_i) 와 초기높이 (Initial Height, h_i) 를 달리하여 채워넣고 침하량을 측정하여 Fig. 2 를 얻었다. 그림에서 침하율 (Settlement Ratio) 이란 초기높이

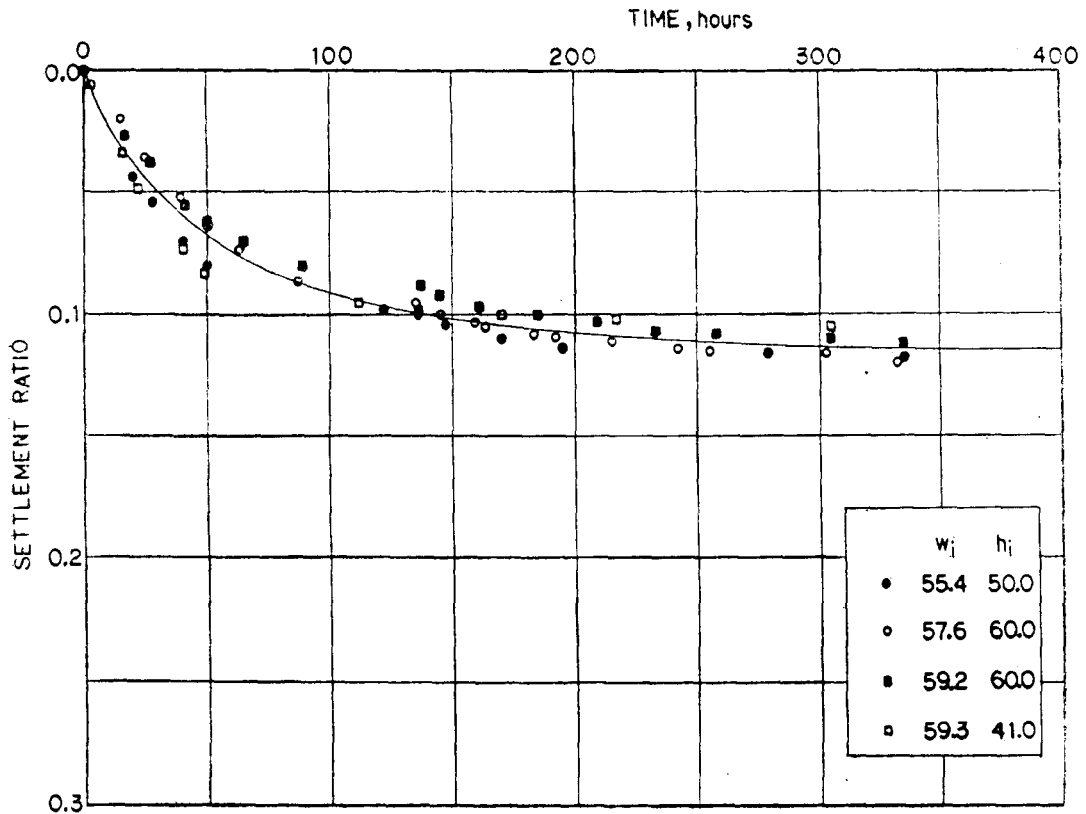


Fig. 2. Settling Behavior of Model Ground

에 대한 침하량의 비를 나타낸다. 그림에서 보듯이 함수비 55~60%범위에서는 시간에 따라 비슷한 침하양상을 나타내며, 그 양상은 70~80 시간(약 3일)을 경계로 초기의 급격한 부분과 그 이후의 완만한 부분으로 크게 나뉘어진다. 여기서 초기의 급격한 부분은 간섭침강(Hindered Settling)과 압밀침하의 구분이 애매한 상태로서 공학적인 의미의 흙이라 간주하기에는 어려움이 있으며, 그 이후의 완만한 부분은 지반이 비교적 안정되어 공학적인 의미의 흙으로 거동하는 압밀침하단계로 볼 수 있다^{7,8,11,12}.

이 흙의 함수비에 따른 비배수전단강도 s_u 를 Fig. 3에 보이고 있다. 측정은 비압밀비배수삼축압축실험으로 행했으며, 비배수전단강도와 함수비는 반대수지상에 직선으로 나타난다⁶)는 사실에 따라 실험으로 얻은 점들을 최소제곱법에 의해 회귀분석하여 Fig. 3에서와 같은 직선을 얻

었다. 이후의 해석에서 이 흙의 함수비-비배수 전단강도관계는 이 직선이 대표하는 것으로 한다.

또한 이 시료를 반죽하여 일정기간 방치한 다음 배인전단시험기로 전단강도를 측정하고, 이것을 교란시켜서 교란된 시료에 대해서도 같은

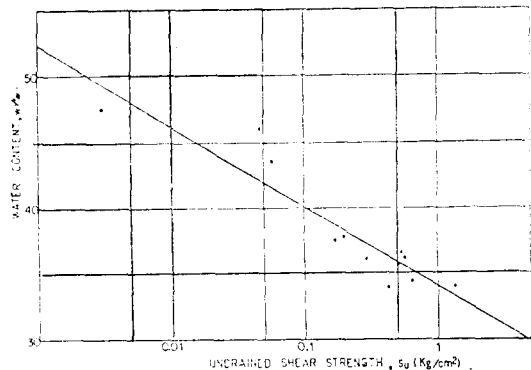


Fig. 3. Relationship between Undrained Shear Strength and Water Content

방법으로 전단강도를 측정하여 예민비(Sensitivity)를 구했다. 그 결과 7일 후와 14일 후 지반시료의 예민비는 모두 1.1이었다.

3. 실험과정 및 방법

말뚝의 부주변마찰력으로 인하여 발생하는 하향력의 측정을 위하여 압력계(Pressure Gage)를 사용하였으며, 그 장치는 Fig. 4와 같다. 압력계는 내부에 스트레인게이지(Strain Gage)가 들어있어서 힘이 가해지면 탄성적인 변위가 생긴다. 이것을 증폭기(Amplifier)로 측정하여 힘으로 환산하면 압력계가 받는 힘, 즉 하향력을 알 수 있다. 본 실험에서 사용된 압력계는 본래 토압측정용으로 만들어진 것으로서 측정위치에 따라 사용이 편리하도록 두가지 형태로 선이 연결되어 있으나 작동방식은 동일하며 본 실험에서는 사용시 차이가 없었다.

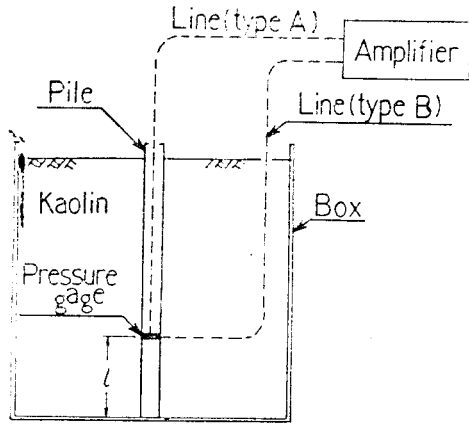


Fig. 4. Testing Apparatus Measuring Downdrag Force

맨 먼저 말뚝의 깊이에 따른 부주변마찰력의 크기를 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 지름 3.2cm, 길이 60cm인 강관을 모형말뚝으로 하였다. 이 모형말뚝을 6개 준비하여 각 말뚝마다 압력계의 설치위치를 말뚝선단에서 각각 0, 5, 10, 20, 30, 40cm로 다르게 하여 동시에 모형지반에 설치했다. 이 때 압력계의 충격을 방지하기 위하여 미리 말뚝을 세워놓고 그 사이로 흙을 타설하는 방식을 취했다. 따라

서 압력계에는 압력계 윗부분의 모형말뚝의 무게와 부주변마찰력에 의한 하향력이 작용하게 된다. 이것을 매일 세 차례씩 측정하여 그 평균치를 취하는 방법으로 약 1개월간 계속하였다. 측정치에서 압력계 상부의 모형말뚝의 무게를 빼 값이 하향력이 된다.

다음으로는 역청재에 의한 감소효과를 알아보기 위하여 앞서와 같은 모형말뚝에 도포두께를 0, 1.6, 2.5, 3.9, 4.4, 4.7mm로 달리하여 6개 준비하였다. 이 때 압력계의 위치는 모두 선단에서 10cm 상부로 동일하게 하였다. 여기에 사용된 역청재는 Shell에서 말뚝도포용으로 제품화한 것이며 그 중 B형이 사용되었다¹⁶⁾. 이 외에는 앞서의 방법과 마찬가지로 하여 측정치가 일정한 때까지 측정을 계속하였다.

확대선단부에 의한 감소효과 실험에는 앞서와 같은 모형말뚝 2개를 사용하였다. 선단부는 끝이 60°인 원추형으로서 말뚝과 별도로 제작하여 접착제로 고정시켰다. 이 중 하나는 지름 5cm인 확대선단부로서 보통의 선단부와 압력계의 위치가 일치하도록 말뚝을 끼울 수 있는 홈이 파여 있다(Fig. 5 참조). 이 실험에서는 지반형성과 동시에 말뚝을 설치하지 않고 지반형성 7일 후에 말뚝을 타입하였다. 이것은 Fig. 2에서 보듯이 초기의 지반상태는 너무 연약하여 공학적 의미의 흙으로 볼 수 없기 때문에 확대선단부를 장치하여 타입한 영향을 알아보기 위해서는 어느정도 지반이 안정된 시기를 선택하는 것이 적절하다고 판단되었기 때문이다.

말뚝을 타입할 때에는 말뚝상호간에 타입으로

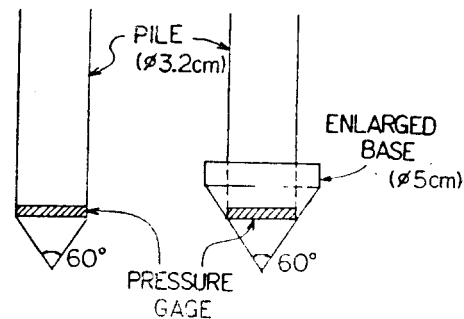


Fig. 5. Installing Manner of Enlarged Base

인한 영향을 주지 않아야 한다. 이에 따라 본 실험에서는 단독말뚝과 군말뚝을 구분하는 다음식을 적용하였다²¹⁾.

$$S = 1.5 \sqrt{r \cdot l} \dots \dots \dots (3)$$

여기서, S : 단독말뚝으로 거동하기 위한 말뚝사이의 최소간격

r : 말뚝의 반지름

l : 말뚝의 타입깊이

이 식에서 r 에 확대선단부의 반지름을 대입하여 이 이상의 간격으로 말뚝을 타입하였다. 측정은 측정치가 어느 정도 일정할 때까지 계속하였으며 말뚝타입 후 40일 이상, 모형지반형성 후 약 50일이 소요되었다.

확대선단부의 효과를 알아본 후에는 확대선단부의 크기와 지반의 상태에 따른 영향을 고려할 필요가 있다.

확대선단부의 크기에 따른 감소효과를 알아보기 위해서는 많은 실험을 필요로 하는데, 타입할 수 있는 말뚝의 수가 제한되어 있는 모형지반에 있어서 앞서의 실험법으로는 장비와 시간에 많은 제약이 따르기 때문에 지반의 침하로 부주변마찰력을 발생시키는 대신 말뚝을 인발(Pull-out)하여 역으로 부주변마찰력을 평가하는 방법을 적용했다. 이 방법은 실제상황에서 지반의 침하로 인하여 부주변마찰력이 발생하는 것에 대하여 간접적으로 마찰력을 평가하게 되는데, 현장에서서도 이러한 방법으로 마찰력을 평가하기도 한다⁹⁾. 본 연구에서는 동일한 지반으로부터 4~9개의 결과를 얻게 되는데, 매 회마다 지반이 동일하다고 단정하기 어려우므로 확대선단부가 장치되지 않은 말뚝을 매 회 기준말뚝으로 설치하여 감소효과를 기준말뚝의 인발마찰력에 대한 비율로서 평가하기로 하였다. 실험시 말뚝의 타입깊이는 동일하게 40cm로 하였다. 이 실험에서는 지름 1.61, 2.20, 2.73, 3.41cm의 네 종류의 말뚝과 말뚝지름의 최대 2배까지의 다양한 크기의 확대선단부를 사용했다. 인발실험장치와 이 때 사용된 모형말뚝과 확대선단부가 각각 Fig. 6, Fig. 7에 나타나 있다.

인발시 확대선단부는 말뚝과 분리되어 인발력은 말뚝의 무게와 마찰저항력으로만 구성된다. 이 실험은 초기함수비 55~60% 정도로 형성된

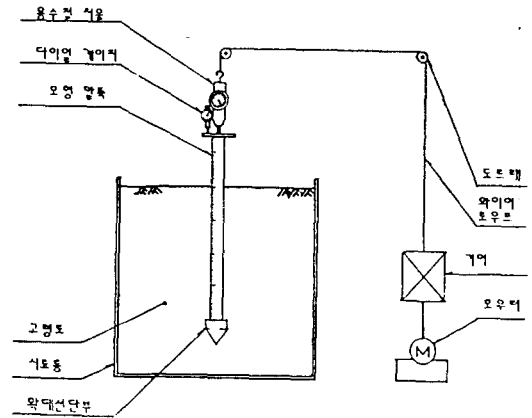


Fig. 6. Pull-out Testing Apparatus

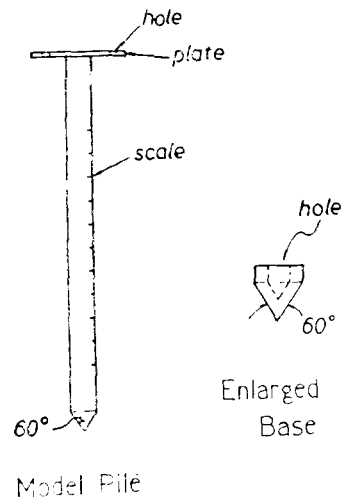


Fig. 7. Model Pile and Enlarged Base

모형지반에 7일 후 말뚝을 타입하고 그 7일 후에 모든 말뚝에 대해 동일하게 0.2cm/min의 인발속도로 실험을 수행하였다. 타입 후 7일을 인발하기로 택한 이유는 Fig. 8에 보인 바와 같이 타입 후 얼마동안은 다소 불규칙적인 인발력비를 보이다가 약 7일경부터는 대체로 일정해지기 때문이다. 동 그림의 세로축인 인발력비(Pulling Force Ratio)는 각 말뚝의 인발력을 기준말뚝의 인발력으로 나눈 값이다. 이 실험에서는 지름 1.61cm의 말뚝과 지름 2.80cm 크기의 확대선단부를 사용하였으며 앞서 설명한 바와 같이 매 회 기준말뚝을 이용하여 인발력비를 구하

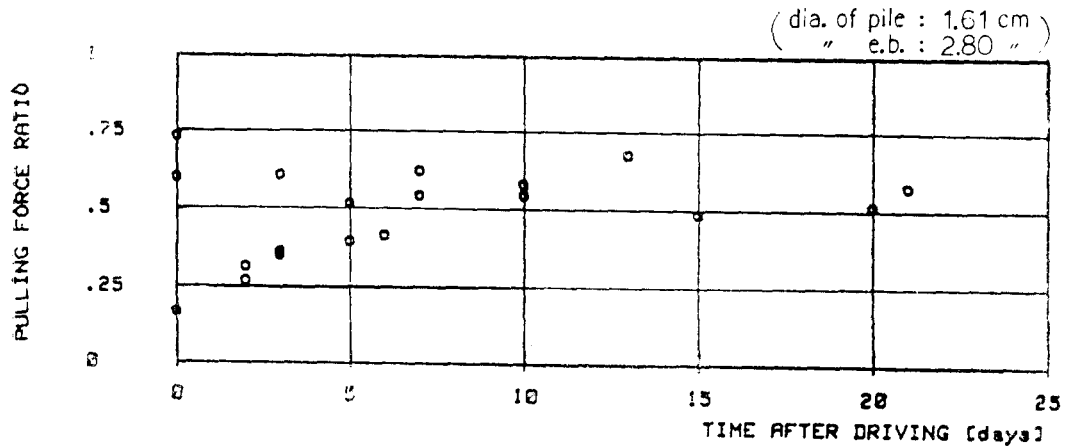


Fig. 8. Pulling Force Ratio to Elapsed Time after Driving

였다.

지반상태에 따른 확대선단부의 효과를 알아보기 위하여는 시료의 초기함수비를 조절하여 모형지반의 강도를 달리하는 방법으로 실험을 행했다. 이 때 앞서의 철제상자는 비교적 그 용량이 커서 원하는 상태로 모형지반을 형성하는데 어려움이 있다. 따라서 이 실험에서는 40cm×40cm×40cm의 철제상자를 별도로 구비하여 사용하였으며 말뚝도 지름 1cm의 작은 것을 사용하였다. 또한 말뚝의 타입깊이는 30cm로 하고 인발속도는 0.1cm/min로 하였다. 아울러 확대선단부가 장치된 말뚝은 Fig. 9에서와 같이 확대선단부상에 존재하는 흙에 의해 상재압이 작용

하여 지지층에 하중을 더 보태는 결과를 예상할 수 있으므로 그 영향을 알아보기 위하여 확대선단부가 분리되지 않는 상태에 대해서도 인발시험을 수행해 보았다.

이상과 같이 역청재와 확대선단부의 효과를 각각 알아본 후 이들을 동시에 적용한 효과를 알아보았다. 이를 위하여 앞서의 두 방법을 병용한 말뚝 즉, 역청재가 도포되고 지름 5cm의 확대선단부가 장치된 말뚝이 사용되었다. 압력계는 Fig. 5에서와 같이 장치했으며, 모형지반형성 후 7일이 지난 뒤에 준비한 말뚝을 타입하고 매일 하향력을 측정했다.

4. 실험결과 및 분석

Fig. 10에 말뚝의 각 깊이에 작용하는 하향력을 시간에 따라 나타냈다. 하향력은 말뚝설치 후 10일까지 증가하다가 그 이후는 대략 일정한 값을 갖는다. 이 때의 지반은 초기높이 58.7cm에서 10일 후는 54.0cm로, 30일 후는 53.6cm로 침하하였다. 그림에서 말뚝선단의 하향력은 20일경에는 오히려 감소하는 경향을 보이는데, 그 이유는 선단부근지반의 침하량이 말뚝의 압축량보다 작아지게 되어 선단부근의 마찰력은 부주변마찰력과 작용방향이 반대인 지지력으로 작용하여 하향력을 감소시키기 때문으로 보인다.

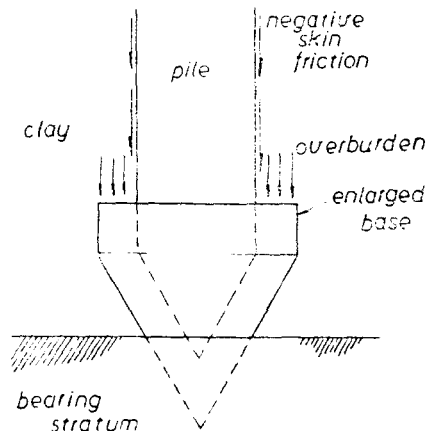


Fig. 9. Forces Acting on Enlarged Base of Pile

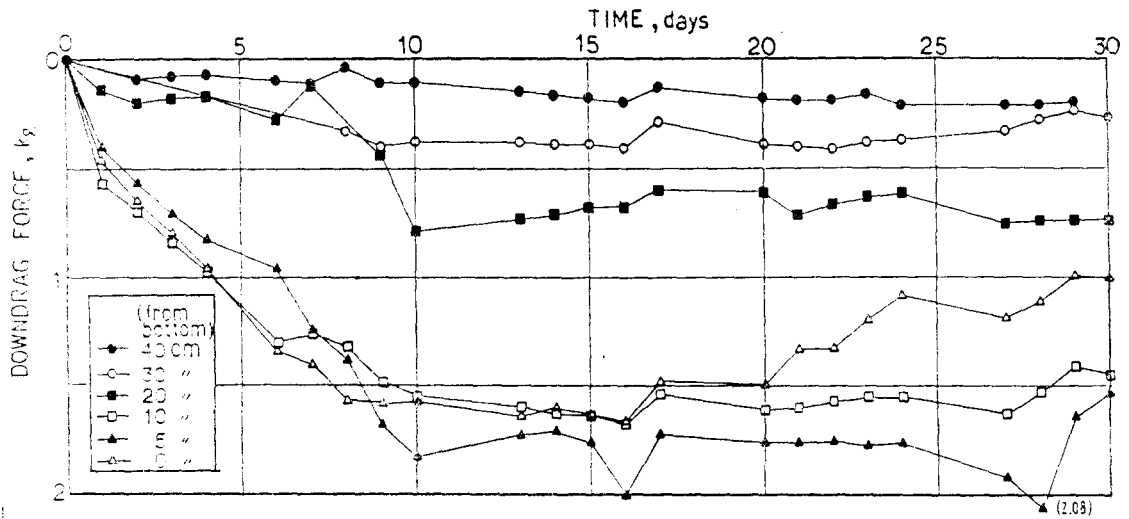


Fig. 10. Downdrag Force at each Depth with Time

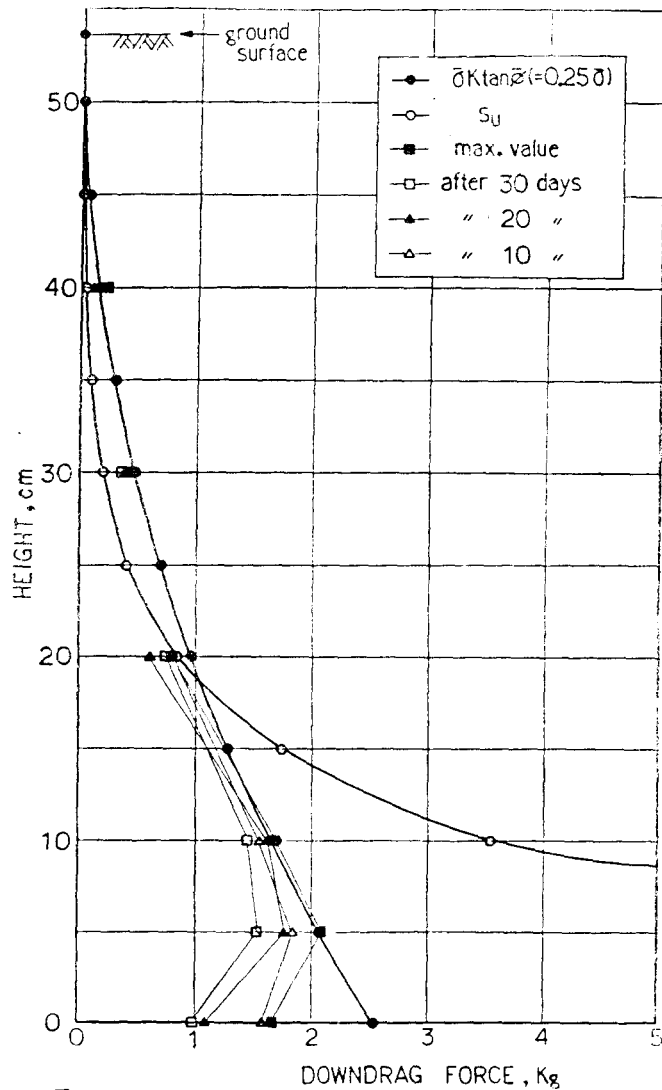


Fig. 11. Distribution of Downdrag Force with Depth

Fig. 11에 말뚝의 각 깊이에서의 하향력을 깊이
 이에 따라 도시하였다. 그림에는 또 실험 후 모
 형지반의 함수비를 측정해서 각 깊이마다의 비
 배수전단강도와 유효응력을 구하여 식 (1), (2)
 로 계산한 하향력을 동시에 나타내고 있다. 이
 때 마찰력계수를 0.25로 하여 식(2)로 계산한
 결과는 실험치와 잘 일치하고 있다. 그림에서
 선단위로 10cm 지점까지는 이론치와 일치하지
 않고 있는데, 이것은 이 부근에서 중립점이 형
 성되기 때문이라 여겨진다.

역청재를 도포한 말뚝에 대한 실험결과가 Fig.
 12에 나타나 있다. 이 때의 지반은 55cm 높이

에서 10일 후 48.9cm, 20일 후 48.8cm로 쪼
 힌 하하였다. 역청재가 도포되지 않은 말뚝은 앞서
 의 결과와 비슷한 양상을 보이고 있으나 역청재
 가 도포된 말뚝은 전체적으로 7일까지는 증가
 하다가 그 후 감소하여 15일경부터 어느 정도
 일정해지는 경향을 보인다. 이것은 역청재의 점
 탄성거동에 따른 것으로 볼 수 있으며¹⁷⁾, 7일
 경의 최대값을 역청재도포된 말뚝에 발생하는
 하향력으로 보는 것이 보수적이다. 그림에서 1.
 6mm 도포한 말뚝과 3.9mm 도포한 말뚝은 지나
 치게 작은 하향력을 보이거나 심지어는 음의 값
 을 보이는데, 이것은 압력계의 설치나 실험시의

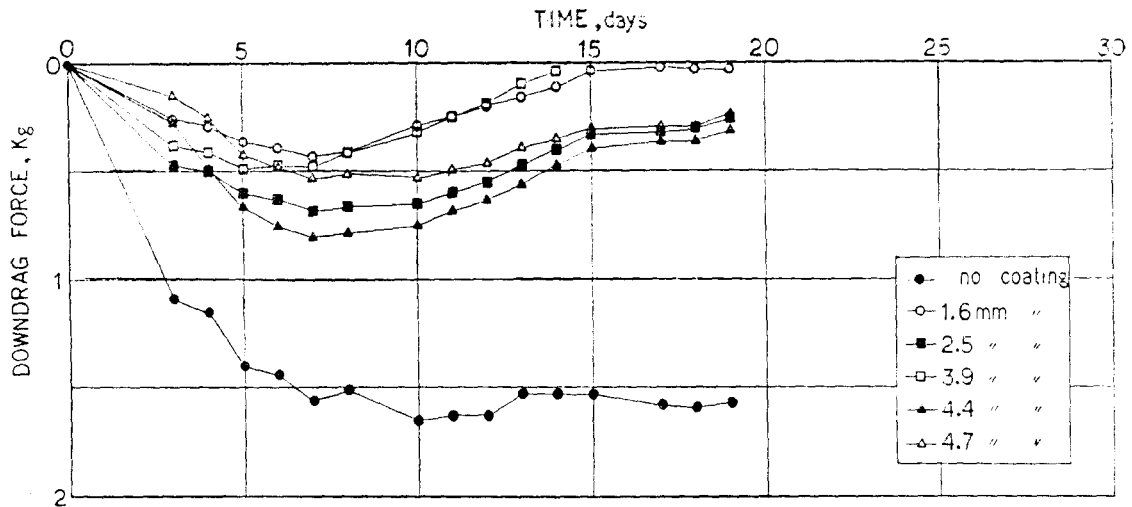


Fig. 12. Downdrag Force with Coating Thickness and Time

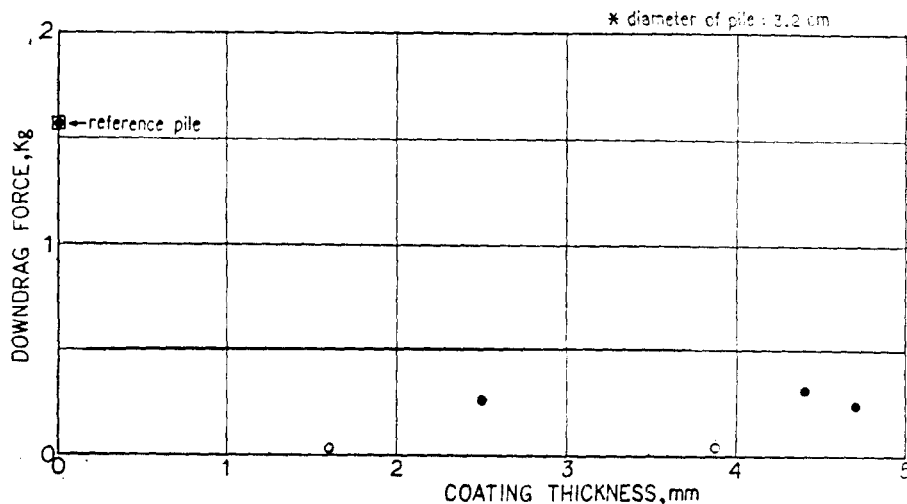


Fig. 13. Downdrag Force about Coating Thickness

실수에 기인한 것으로 보여진다. 이들을 제외하고 판단하면, 역청재도포로 말뚝의 부주변마찰력을 50%이상 감소시킬 수 있다. Fig. 13에는 역청재의 도포두께에 따른 하향력을 보이는데, 이 그림으로부터 부주변마찰력의 감소효과와 역청재도포두께사이에는 특정한 관계가 없다고 판단된다.

지름 3.2cm의 보통말뚝과 지름 5cm인 확대선단부를 장치한 말뚝(길이 60cm)을 지반형성 7일 후에 타입하여 시간에 따른 하향력을 측정 한 결과가 Fig. 14에 나와있다. 그림에서 보면 타입 후 25일까지는 다소 불규칙적으로 하향력이 증가하다가 그 이후는 비교적 일정해지는 것을 알 수 있다. 모형지반 형성시의 초기높이는 52cm였으며, 모형말뚝 타입시, 즉 7일후에 48.2cm로 침하하였고, 그 후 25일간의 침하량은 약 1.5mm정도였으며 그 이후의 침하는 눈으로 관측하기 어려웠다. 확대선단부가 있는 말뚝의 하향력은 약 0.9kg으로서 없는 말뚝의 하향력 약 1.9kg의 약 50%를 나타낸다. 이와 같은 효과를 얻을 수 있는 원인은 다음 3가지로

볼 수 있다. 첫째, 타입시 확대선단부로 인하여 생겨난 말뚝과 흙 사이의 공간에 지반상부에 존재하는 물과 슬러리가 흘러들어가서 말뚝과 흙 사이의 마찰력을 완화시키기 때문이고, 둘째는 확대선단부로 인하여 타입시 밀려나간 흙이 다시 밀려들어와서 말뚝에 부착하는 것이 완전히 이루어지지 못함으로 인한 부착면적의 감소이고, 셋째는 타입으로 인한 주위지반의 교란으로 볼 수 있다. 그러나 이 흙의 예민비는 1.1정도밖에 되지 않으므로 교란으로 인한 영향은 그다지 크지 않다고 보인다.

Fig. 12와 Fig. 14에서 아무런 장치도 하지 않은 말뚝의 경우, 하향력이 각각 1.6, 1.8kg으로 거의 비슷하게 작용함을 볼 수 있다. Fig. 12의 경우는 지반과 동시에 말뚝을 설치했고 10일경까지 증가추세였으며 이 때 지반의 침하량은 6.1cm였다. Fig. 14의 경우는 지반형성 7일후에 말뚝을 타입했고 그 후 25일간 지반의 침하량이 0.15cm밖에 되지 않는다. 이 사실은 부마찰력이 완전히 발휘되기에 필요한 말뚝과 주변 흙사이의 상대변위는 본실험에서 사용한 모형지

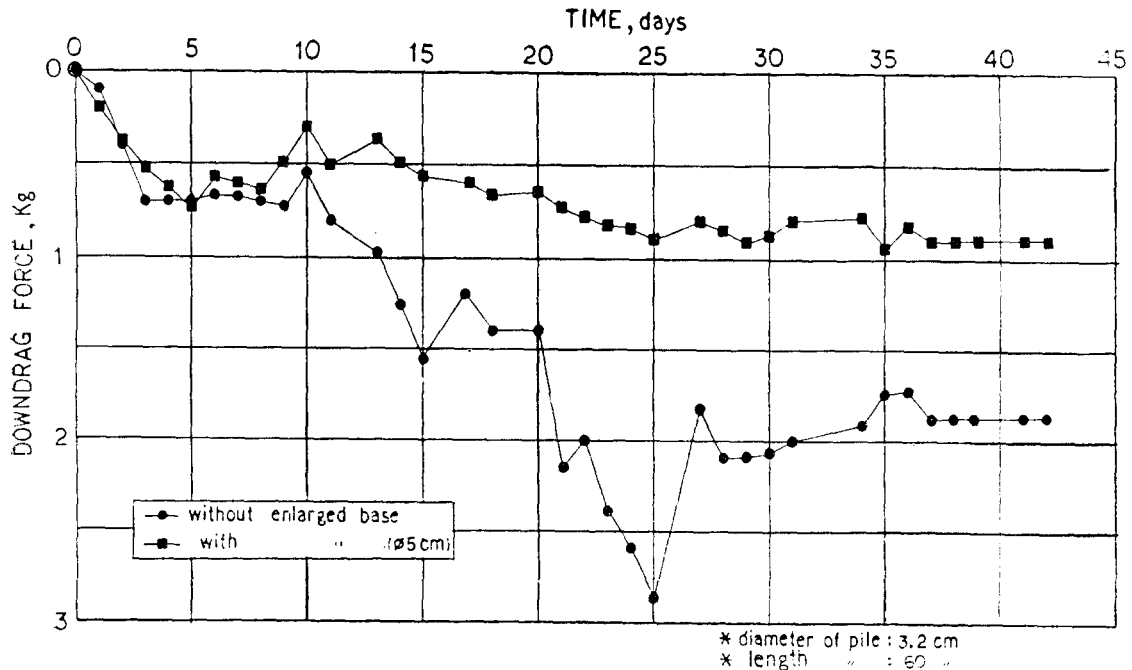


Fig. 14. Downdrag Force of Pile with or without Enlarged Base

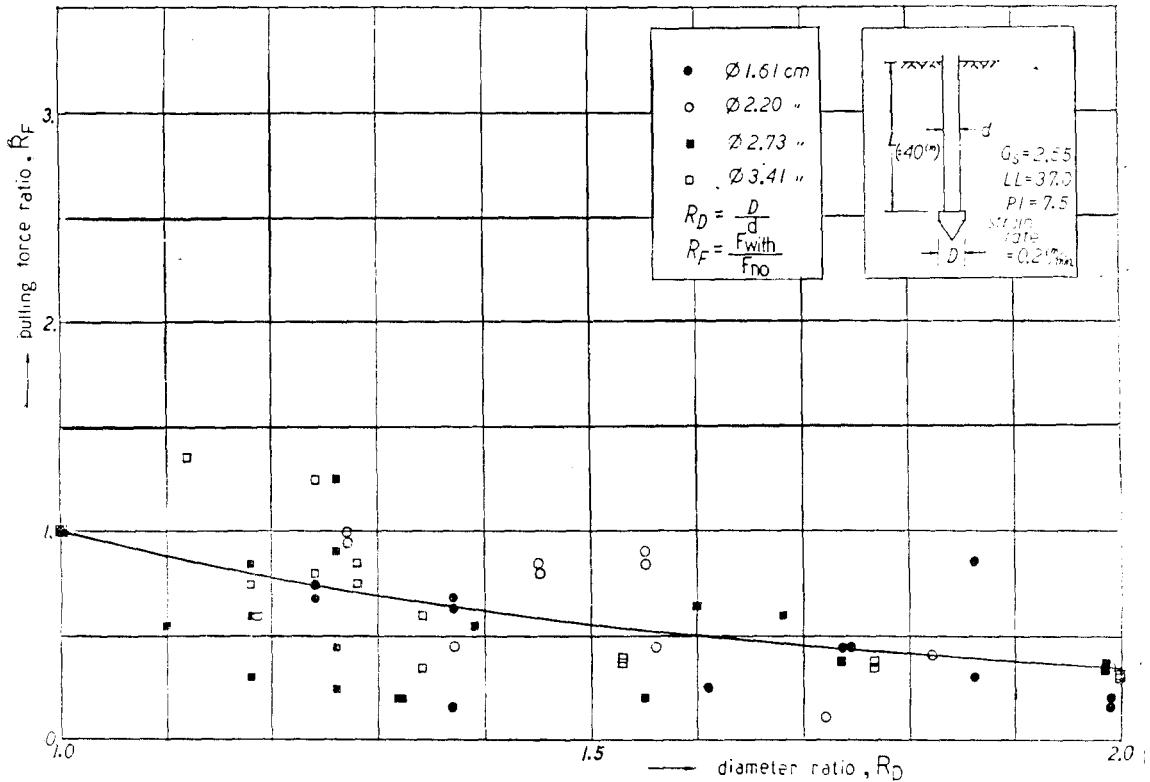


Fig. 15. Pulling Force Ratio about Diameter Ratio

반과 모형말뚝의 경우 매우 작음을 나타낸다.

Fig. 15는 확대선단부의 크기에 따른 인발력비를 나타낸다. 그림에서 지름비 (Diameter Ratio, R_D)는 확대선단부의 지름을 말뚝의 지름으로 나눈 값이고, 인발력비는 앞서와 같다. 그림의 곡선은 실험으로 구한 점들을 회귀분석하여 얻은 것으로서 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_F = 1.3/R_D - 0.3 \dots\dots\dots(4)$$

이 회귀식의 결정계수 r^2 은 약 0.55로서 그다지 큰 신뢰도를 갖지는 못한다²²⁾. 그러나 Fig. 15와 식 (4)로부터 말뚝크기에 관계없이 확대선단부가 커질수록 감소효과도 커진다는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 16에 지반의 강도에 따른 확대선단부의 효과를 보이고 있다. 이 실험은 앞서 밝힌대로 보다 작은 말뚝과 타입깊이로 수행했으며 인발 속도도 작게 하였다. 그림의 점들은 동일조건에서 4회 실시한 결과의 평균치로서 앞서의 크기

에 따른 실험결과와 비슷한 경향을 갖는다. 그림에서 보면 지반의 강도가 커질수록 확대선단부에 의한 감소효과는 크게 나타남을 알 수 있다.

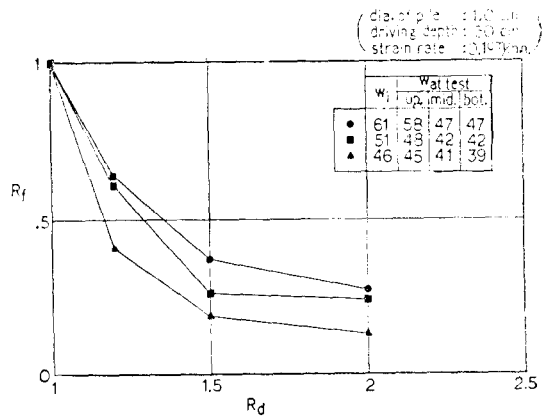


Fig. 16. Pulling Force Ratio about Ground Stiffness

Fig. 17에 확대선단부가 분리되는 것과 그렇지 않은 것에 대한 인발실험 결과를 나타내었다. 이러한 실험으로 확대선단부 위로 작용하는 상재하중의 영향을 정확히 평가하기는 어렵지만 대체적인 경향을 판단하는 것은 가능했다. 그림에서 알 수 있듯이 분리(Detach), 비분리(Attach)에 따른 차이는 거의 나타나지 않는다. 따라서 확대선단부위로 작용하는 상재하중의 영향은 무

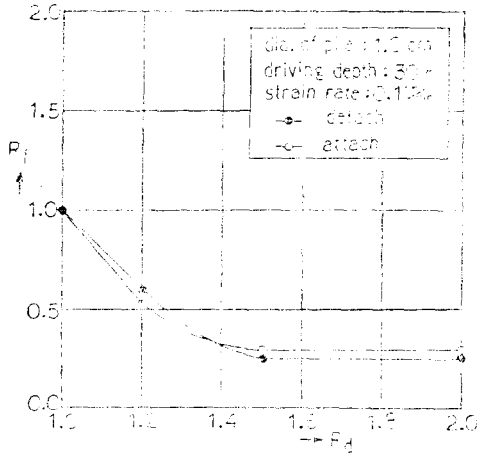


Fig. 17. Pulling Force Ratio about Enlarged Base Attachment

시할 수 있다고 여겨진다. 이러한 경향은 상재하중의 영향하에서 하향력을 측정된 결과인 Fig. 14와, 확대선단부를 인발시 분리하여 마찰저항력을 측정된 결과인 Fig. 15를 비교해도 알 수 있다. Fig. 14에서 지름비 1.56인 확대선단부는 약 50%의 감소효과를 보이고 있으며, 마찬가지로 Fig. 15에서도 그 정도의 효과를 볼 수 있다. Fig. 17에서 볼 때 지름비가 2 이상이 되면 상재하중의 영향이 커지리라고 유추할 수 있으나 확대선단부의 지름이 말뚝지름의 2배를 넘는다는 것은 타입시의 어려움 등을 고려할 때 공학적으로 의미가 없다고 판단된다.

Fig. 18에 역청재와 확대선단부를 병용한 말뚝에 대한 하향력의 변화를 보이고 있다. 이 실험에서도 말뚝타입으로 인한 압력계의 충격때문에 초기에는 다소 불규칙한 양상을 보인다. 특히 도포두께 1.63mm인 말뚝의 경우에는 30일 경과후에 갑자기 하향력이 증가했는데, 이것은 확인할 수 없는 어떤 외력이 작용한 때문이라 보여진다. 이것을 제외하고 분석해 보면 하향력은 도포두께에 관계없이 확대선단부와 역청재를 병용했을때 약 0.2kg으로 나타나서 아무런 처

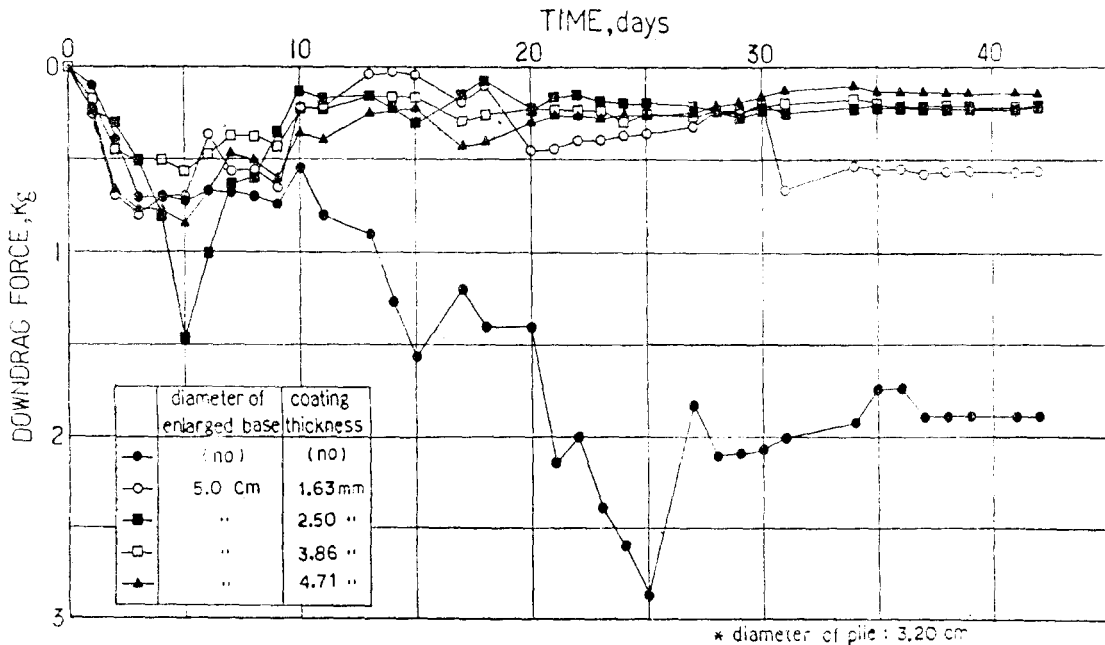


Fig. 18. Downdrag Forces of Piles with Bitumen Coating and Enlarged Base

리도 하지않은 말뚝의 하향력 약 1.9kg의 10% 정도로 감소한다는 것을 알 수 있으며 이것은 Bierrum et al.²⁾의 현장실험과 유사한 결과를 나타낸다. 따라서 확대선단부와 역청재의 적절한 사용은 부주변마찰력으로 인한 영향에 거의 완벽한 대응책이 될 것이다.

5. 결 론

이상과 같은 실험결과 및 그의 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구가 행해진 연약점성토지반에 있어서 말뚝의 단위면적당 부주변마찰력은 깊이에 따라 0.25 σ 로 나타난다.

(2) 부주변마찰력이 완전히 발휘되기에 필요한 말뚝과 주변흙사이의 상대변위는 매우 작다.

(3) 역청재를 도포한 말뚝에서의 하향력은 보통말뚝의 하향력에 비해 50%이상 감소하며, 도포두께는 별 영향을 주지 못한다.

(4) 예상했던 바와 같이 말뚝에 확대선단부를 장치하여 부주변마찰력을 감소시킬 수 있으며, 그 효과는 말뚝의 크기에 관계없이 확대선단부의 단면적이 말뚝의 단면적에 비하여 클수록, 말뚝이 타입되는 지반의 강도가 클수록 커지며, 확대선단부 위로 작용하는 상재하중의 영향은 지름비 2까지는 무시할 수 있다.

(5) 역청재와 확대선단부를 동시에 사용하면 하향력은 보통말뚝의 하향력의 10%정도로 나타난다.

■ 감사의 글

본 연구는 1984년도 후반기 한국과학재단의 연구비 지원을 받아 이루어졌으며 이에 심심한 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. Baligh, M.M., Vivatrat, V. and Figi, H., "Downdrag on Bitumen-Coated Piles," J. Geot. Eng. Div., ASCE, Vol.104, GT11, 1978, pp.1355~1369.
2. Bjerrum, L., Johannessen, I.J. and Eide, O.,

- "Reduction of Negative Skin Friction on Steel Piles to Rock", Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found Eng., Vol.2, 1969, pp.27~33.
3. Canadian Geotechnical Society, Canadian Foundation Engineering Manual, 2nd Ed., 1985, pp.299~304.
4. Claessen, A.I.M. and Horvat, E., "Reducing Negative Friction with Bitumen Slip Layers", J. Geot. Eng. Div., ASCE, Vol.100, GT8, 1974, pp.925~944.
5. Clemente, Jr., F.M., "Downdrag on Bitumen Coated Piles in a Warm Climate," Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol.2, 1981, pp.673~676.
6. Henkel, D.J., "The Shearing Strength of Saturated Remoulded Clays", Proc. Res. Conf. Shear Strength Cohesive Soils, ASCE, 1960, pp.533~554.
7. Imai, G., "Settling Behavior of Clay Suspension," Soils and Foundations, Vol.20, No.2, 1980, pp.61~77.
8. Imai, G., "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", Soils and Foundations, Vol.21, No.1, 1981, pp.7~20.
9. Ireland, H.O., "Pulling Tests on Piles in Sand", Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol.2, 1957, pp.43~45.
10. Johannessen, I.J. and Bjerrum, L., "Measurement of the Compression at a Steel Pile to Rock Due to Settlement of the Surrounding Clay," Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol.2, 1965, pp.261~264.
11. Kynch, G.J., "A Theory of Sedimentation", Trans. Farady Soc., No.48, 1952, pp.166~176.
12. McRoberts, E.C. and Nixon, J.F., "A Theory of Soil Sedimentation", Canadian Geotechnical Journal, Vol.13, 1976, pp.294~310.
13. Mitchell, J.K., "In-place Treatment of Foundation Soils", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.96, SM1, 1970, pp.73~110.
14. Naval Facilities Engineering Command, Foundations and Earth Structures, DM-7.2, 1982, pp.209~212.
15. Okabe, T., "Large Negative Friction and Frict-

- ion-Free Pile Methods”, Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, 1977, pp.679~682.
16. Shell, Slip Layer Compounds for Bearing Piles, 1974, pp. 1~7.
 17. Shibata, T., Sekiguchi, H. and Yukitomo, H., “Model Test and Analysis of Negative Friction Acting on Piles,” Soils and Foundations, Vol. 22, No. 3, 1982, pp.29~39.
 18. Thompson, D.E. and Critchfield, J.W., “Case History: Concrete Filled Steel Pipe Piles”, Proc. Sympo. Co. Deep Found. Geot. Eng. Div., ASC E, 1979, pp.444~458.
 19. Tomlinson, M.J., Pile Design and Construction Practice, A Viewpoint Publication, London, 1977, pp.158~162.
 20. 土質工學會, 杭基礎の設計法とこの解説, 1985, pp.317~322.
 21. 村山 外, 基礎工學ハンドブック, 1979, pp.527~528.
 22. 김우철 의, 현대통계학, 영지문화사, 서울, 1986, pp.214~245.