

## 단말뚝 거동에 관한 원심모형실험

유남재\* · 이명욱\*\* · 이종호\*\*\*

## Centrifuge Model Experiments on Behaviors of Single Pile

Yoo, Nam-Jae\* · Lee, Myeung-Woog\*\* · Lee, Jong-Ho\*\*\*

### ABSTRACT

This thesis is an experimental research of investigating behavior of single pile, subjected to the vertical compression loads, using the centrifuge facility located in the geotechnical engineering laboratory in Kangwon National University. Centrifugal model experiments of model pile were carried out changing diameter of model pile, relative density of sandy ground and the gravitational level applied in the centrifuge. Thus, their effects on the load-settlement behavior and the ultimate bearing capacity of pile were investigated.

Experimental results obtained from centrifuge model tests were compared with the theoretical or semi-empirical equations to analyze values of ultimate bearing capacity of model pile.

When we compare the ultimate bearing capacity of experimental results with the ultimate bearing capacity of theoretical results, the experimental results appear more higher in the De Beer method and Meyerhof. Especially, Terzaghi method is very same as the experimental results normally.

### 1. 서 론

구조물을 축조함에 있어 기초지반이 지지력을 갖지 못하는 경우 구조물의 안정성에 대한 문제가 야기된다. 말뚝은 상부구조물의 하중과 주변 지반의 토압을 지지력이 더 큰 지반으로 전달 분산함으로써 상부구조물에 대한 안정성을 확보하는데 그 목적이 있다. 안정성에 관한 근본적인 설치목적과 더불어 최적의 경비와 시간으로 최대의 안정성을 확보하는 경제성에 대한 현실적인 문제로 인

해 이들 두 조건에 대한 시공관련 기술수준의 개발과 이론적인 연구가 국내외적으로 끈임 없이 진행되어 왔으나 크기와 형태, 시공방법, 지반조건에 따라 지반 내에서 복잡하게 거동하는 말뚝의 하중에 대한 이해는 아직도 불확실성을 갖고 있는 부분으로 남아있는 실정이다.

말뚝은 피어와 케이슨과 마찬가지로 깊은 기초이지만 이들보다 보편화되고 역사가 깊은 기초 형태로서 말뚝은 인류가 발명한 가장 오래되고 효과적인 기초일 것이다.

지반공학적 토류 구조물 또는 기초 구조물 등의 거동에 관한 연구를 수행하기 위하여 일반적으로 이론적인 방법과 실험적인 방법이 수행되고 있다.

\* 강원대학교 공과대학 토목공학과 부교수  
\*\* 강원대학교 공과대학 토목공학과 박사수료  
\*\*\* 강원대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

이론적 방법은 구조물의 변형을 고려하지 않고 극한 상태에서 힘의 평형관계를 고려하여 해석을 수행하는 극한 평형해석, 에너지 및 일의 평형관계를 고려한 극한해석, 구조물의 파괴 이전까지의 응력-변형 관계를 조사 및 분석할 수 있는 다양한 수치해석 방법 등이 있다. 한편 실험적 방법은 원형 실험실물 실험, 실험실내 또는 현장상태에서 축적의 상사법칙을 고려한 축소 모형실험이 기존에 많이 사용되어져 왔던 방법 등이 알려져 있다. 그러나 최근에 와서 실험 방법의 용이성, 경제성, 타당성 등이 동시에 만족되고 있는 원심모형실험 기법이 전 세계적으로 광범위하게 확산 적용되고 있다. 이와 병행하여 강원대학교 토목공학과 토질실험실에 소재하고 있는 원심모형시험기를 사용하여 말뚝모형 재하시험을 수행하였다.

## 2. 이론적 연구

### 2.1 하중-침하곡선 분석

모형실험을 통하여 얻은 하중-침하 곡선을 분석하는 많은 방법들이 제시되었지만 그 방법들을 실제 적용하는 방법은 용이하지만은 않다. 또한 재하시험을 통해 얻은 하중-침하 곡선은 극한 하중상태까지 도달하지 않은 하중단계까지만 실시하여 극한 하중 값을 실질적으로 관찰할 수 없다. 따라서 하중과 침하량의 관계가 변화되기 시작하는 하중을 구하는 관계로 항복하기 시작하는 하중 즉 항복하중 판정법으로 산정함이 타당하다.

우선 하중-침하량 관계로부터 판정하는 방법은 하중과 침하량의 곡선으로부터 극한하중을 판정하는 방법과 하중 및 침하량의 좌표를 변환시켜 극한하중을 판정하는 방법의 두 가지로 구분할 수 있다. 전자의 경우는 DIN 1054, British CP2004, Schenck법, Buttler & Hay법, 일본 토질공학회 기준, Swedish 90% Criterion법 등이 속하며, 이외에도 Housel이 제안한 Tangent Elastic Limit법, Rebound Elastic Limit법, Davision이 제안한 Offset법, Fuller & Hay가 제안한 Slope Criteria법 등이 있다. 한편 후자의 경우는 Van Der Veen의  $S-\log(1-P/P_{max})$ 법,  $\log S-\log P$ 법,  $S-\log P$ 법 등이 있다.

따라서 본 연구에서는  $\log S-\log P$ 법, Swedish 90% Criterion법을 사용하여 분석에 적용하였다.

### 2.2 단말뚝의 극한하중 산정

말뚝 타설시 복잡한 말뚝의 거동은 말뚝 주변지반의 재성형 발생과 관련지을 수 있으며 말뚝의 거동은 지반 조건에 따라 점토와 사질토로 구별할 수 있다. 점토지반에서는 말뚝 타설에 따른 주변지반에 미치는 영향은 말뚝 주변지반의 교란 및 재성형, 주변지반 응력 변화, 과잉간극수압의 발생 및 배수, 장기적인 전단강도의 회복 등으로 구별할 수 있다(De Mello, 1969). 한편, 이에 반하여 사질토 지반에 대한 말뚝의 타설은 타설시 진동에 의하여 사질토 지반의 조밀화와 말뚝 주변의 수평토압의 증가를 유발할 수 있다. 말뚝 타설에 의한 주변지반의 조밀화 범위는 말뚝 중심에서 말뚝 직경의 8배 정도까지 발생할 수 있으며 수평토압은 매우 다양한 범위에서 변화되며 수평토압계수의 크기가 1을 초과하여 접근할 수 있다(Lambe and Whitman, 1969) 말뚝이 균질한 사질토 지반에 타설되는 동안에 말뚝 선단부 주변지반은 말뚝직경의 3~4배의 범위까지 교란이 발생한다 (Robinsky and Morrison (1964), Meyerhof(1959)).

말뚝 설치후 재하시 말뚝의 거동 역시 말뚝과 주변지반의 경계면의 특성에 의하여 결정되며 경계면상의 지반상태의 말뚝 설치시의 지반변형 및 그 이후의 응력 변화, 말뚝 주변지반의 재압밀에 따른 응력 변화, 하중재하 중의 경계면이 거동 등에 의하여 결정된다. 한편, 말뚝은 일반적으로 균 말뚝의 형태로 설치되고 있으나 말뚝의 허용하중 또는 설계하중은 일반적으로 단말뚝에 대하여 극한하중에 대한 안전율을 고려한 허용하중 또는 허용침하량에 대응하는 허용하중으로 결정된다.

말뚝의 극한하중을 결정하는 방법은 기존에 많은 연구가 수행되어 왔으며(Kezdi(1975), Meyerhof (1976), Tomlinson (1977), Vesic (1977), Polous and Davis (1980)) 경험 또는 반 경험적 방법이 제시되어 사용되어 왔으나 일반적으로 정역학적인 방법, 현장 표준 실험 결과와 관련된 경험식, 말뚝 타설 공식이나 과동방정식을 이용한 동역학적인 방법, 현장 말뚝 재하시험이 대표적으로 사용되어 왔으나 본 연구에서는 기존의 정역학적 방법을 사용하여 실험결과와 비교 분석을 실시하고자 한다.

일반적으로 단말뚝의 극한하중은 다음의 식과 같이 선단저항력과 주변마찰력으로 분리하여 고려된다.

$$Q_u = Q_p + Q_s = A_p \sigma'_0 N_q + p K_s \tan \delta \sum_{L=0}^L \sigma'_{vl} \Delta L$$

여기서,

- $Q_u$  = 단말뚝의 극한하중
- $Q_p$  = 선단 하중
- $Q_s$  = 주변 마찰력
- $A_p$  = 말뚝의 단면적
- $p$  = 말뚝의 윤변의 길이
- $\sigma'_0$  = 말뚝 선단에서의 평균  
연직 유효응력
- $\sigma'_{vl}$  = 말뚝길이에 따른 연직유효응력
- $K_s$  = 토압 계수
- $N_q$  = 하중 계수
- $\Delta L$  = 말뚝 깊이방향의 옆의 깊이

이러한 이론적 공식은 실제와 말뚝의 설치방법, 말뚝의 재료특성, 크기, 형상, 지반의 강도와 변형 특성, 초기응력 상태 등에 따라 달라질 수 있다.

### 2.2.1 선단하중

앞서 언급한 바와같이 비점착성 지반에서 말뚝의 선단하중은 다음과 같다.

$$Q_p = A_p \sigma'_0 N_q$$

지금까지 선단저항은 수직 유효응력  $\sigma'_v$ 의 지배를 받는 것으로 알려졌으나 최근의 연구결과에 의하면 평균 연직 유효응력  $\sigma'_0$ 의 지배를 받는 것으로 밝혀졌다. 평균 연직 유효응력  $\sigma'_0$ 과 수직 유효응력  $\sigma'_v$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\sigma'_0 = \frac{1+2K_0}{3} \sigma'_v$$

여기서,

$$K_0 = \text{횡방향 정지 토압계수}$$

말뚝이 균질한 비점착성 지반에 설치될 때, 말뚝 주변의 지반은 교란에 의하여 초기 물성이 변화된다. 즉 지반의 물성이 변화된 상태에서 하중을 고려하여야 한다. 그러나 말뚝 주변의 변화된 물성을 측정하고, 말뚝이 관입되면서 발생하는 지반내의 복잡한 거동을 예견하여 하중을 산출하는 데는 이론적으로 많은 어려움을 갖는다. 그러므로 초기 강도와 지반의 변형된 물성을 고려한 무차원화된

계수  $N_q$ 값에 대한 많은 실험적 연구가 진행되었다. <Table 1>은 비점성토 지반에서의 말뚝의  $N_q$ 값에 대한 기존의 연구 발표 결과를 나타낸다.

“한국지반공학회지 제9항 제2호 말뚝기초(IV), 김명모, 1993.6”에서는 평범한 석영질의 충적된 모래나 해성모래에 설치된 타입말뚝의  $N_q$  값은 앞은 사각형 기초의  $N_q$  값을 초과하지 않는다. 그리하여  $\phi$ 만으로 나타낸  $N_q$ 에 대한 근사식을 다음과 같이 제시하였다.

$$N_q = (1 + \tan \phi) e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

Table 1 비점성토 지반에서 말뚝의  $N_q$

Experimental Study for $N_q$	$N_q$ for Friction angles			
	30	35	40	45
Friction Angles(Degrees)				
De Beer (1945)	155	380	1150	4000
Meyerhof (1953)	89	255	880	4000
Caquot-Kerisel (1956)	55	140	350	1050
Brinch Hansen (1961)	46	115	350	1650
Skempton, Yassin, Gibson(1953)	66	110	220	570
Brinch Hansen (1951)	54	97	190	400
Berezantzev (1961)	33	75	186	
Vesic (1963)	28	58	130	315
Vesic (Ir=60b, 1972)	27	40	59	85
Vesic (Ir=200b, 1972)	46	72	110	165
Terzaghi (General Shear)	22.5	41.4	81.3	173.3
Terzaghi (Localized Shear)	8.3	12.6	20.5	35.1

### 2.2.2 주변마찰력

사질토 지반내의 말뚝에서 발생하는 주변 마찰력의 계산은 흙과 접촉한 강체의 미끄러짐에 대한 저항력의 계산 및 해석 방법과 유사하다. 주변 마찰력의 크기  $Q_s$ 를 계산하기 위하여 단위 면적당 마찰 저항력의 크기  $f_s$ 의 결정이 선행되어야 한다. Mohr-Coulomb의 파괴 기준에 의하여 단위 면적당 주변 마찰력  $f_s$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_s = C_a + \sigma'_{vt} \tan \delta$$

여기서,

$$C_a = \text{단위 점착력}$$

$\delta$  = 지반과 말뚝 사이의 마찰각

$\sigma'_{hl}$  = 말뚝 주변에 작용하는 수평 유효응력

점성이 없는 완전 사질토 지반에서 ( $C_a=0$ )  $f_s$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$f_s = K_s \sigma'_{vi} \tan \delta$$

여기서,

$$K_s = \sigma'_{hl} / \sigma'_{vi} \text{ (토압계수)}$$

$\sigma'_{vi}$  = 말뚝 깊이  $l$ 에 작용하는 연직 유효응력

$\delta$  = 지반과 말뚝 사이의 마찰각

따라서, 말뚝의 주변 마찰 저항력  $Q_s$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_s = p K_s \tan \delta \sum_{L=0}^{L=L} \sigma'_{vi} \Delta L$$

여기서,

$p$  = 말뚝의 주변장

$K_s$  = 토압계수

$\Delta L$  = 말뚝 깊이 방향의 임의 길이

토압계수  $K_s$ 는 주로 초기 지반응력 조건과 말뚝의 설치방법, 말뚝의 형태에 좌우된다. 설치방법에 있어 천공말뚝의 경우  $K_s$ 는 정지토압 계수  $K_0$ 보다 작거나 같으며, 강제 H형 말뚝이나 개단말뚝과 같이 변위가 작게 발생하는 타입말뚝의 경우  $K_s$ 는  $K_0 \sim 1.4K_0$  범위의 크기를 갖는다. 또한 모래에 타입된 짧은 고변위 말뚝의 경우  $K_s$ 는  $K_0 \sim 1.8K_0$  범위의 크기를 갖는다.  $K_s$ 는 관입깊이가 증가함에 따라 감소하는데, 이것은 말뚝의 선단근처에서의 유효응력이 같은 깊이에서의 초기지반응력보다 상당히 작은 값일 수 있다는 사실을 반영한다. 설계 편의상, 일반적으로 주변 마찰력은 선단하중과 같이 임계깊이(=말뚝직경 $\times 20$ )까지는 증가하나 그 이하의 깊이에서는 일정한 값을 유지하는 것으로 가정하여 수행한다. 한편, 말뚝과 주변지반 상호간의 마찰각  $\delta$ 는 말뚝 재료의 특성에 따라 근본적으로 결정되나 설계편의상 일반적으로  $\delta = \frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \phi$ 의 값을 사용하고 있다.

### 3. 실험방법

#### 3.1 기본물성

주문진 표준사의 기본적인 물리적 특성은 <Table 2>와 같다. 주문진 표준사는 Fig. 1에서 보는 바와같이 매우 균등한 입경가적곡선을 나타

내고 있으며 통일분류법상 SP로 분류되고 있다. 최대 및 최소 건조밀도는 각각  $1.682 \text{ g/cm}^3$ ,  $1.384 \text{ g/cm}^3$ 이고 그에 대응하는 간극비는 0.546, 0.879를 나타내고 있다.

Table 2 주문진 표준사의 물리적 특성

Grain Size Distribution	$D_{10} = 0.21 \text{ mm}$ $C_u = 1.19$ $C_g = 1.01$
Maximum Dry Density	$1.682 \text{ g/cm}^3$
Minimum Dry Density	$1.384 \text{ g/cm}^3$
Maximum Void Ratio	0.879
Minimum Void Ratio	0.546
Specific Gravity	2.6

#### 3.2 전단강도 정수

삼축압축실험을 통해 결정된 상대밀도 50%와 80%에 대한 내부마찰각은 <Table 3>와 같다.

Table 3 삼축압축시험 결과

Relative Density	Slope of Failure Line in p-q Space $\tan \alpha$	Frictional angle in $\sigma - \tau$ Space $\phi$ (Degrees)	Cohesion ( $\text{kg/cm}^2$ )
50	32.06	38.8	
80	34.88	44.2	

#### 3.3 모형재하실험

본 연구는 사질토 지반에 설치한 단말뚝의 하중-침하거동 및 극한하중에 대한 실험적 및 이론적 연구로서 말뚝의 거동을 실내에서 재현시키기 위하여 축소된 모형실험을 수행하였다. 축소된 말뚝의 모형실험은 1G시험과 원심모형실험으로 구분하여 실시하였는데 1G실험은 중력수준을 증가시키지 않은 상태에서 실험을 실시하였고 원심모형실험은 모형을 원심모형실험기에 장착한 후 소정의 중력수준까지 가속시켜 지반의 자중을 증가시키므로써 구속응력을 증가시킨 후 모형말뚝에 관한 실험 자료를 획득하였다. 하중재하를 실시하여 단말뚝의

극한하중을 산정하였다. 모형지반으로 사용된 시료는 공기 건조된 주문진 표준사로서 기본적인 물리적 특성을 얻기 위하여 체분석, 최대, 최소 간극비 및 비중실험을 실시하였고, 극한 하중을 산정하기 위한 전단강도 정수를 구하기 위하여 삼축압축 실험을 실시하였다. 모형 기초의 재하 실험에서 모형지반은 상대밀도를 50%와 80%로 성형시킴으로써 느슨한 사질토 지반과 조밀한 사질토 지반을 실내에서 모사하였다. 한편, 말뚝의 직경변화에 따른 단말뚝의 거동의 영향을 조사연구하기 위하여 모형말뚝의 직경을 5, 7, 9mm로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

따라서, 실험은 말뚝거동에 영향을 미치는 주요 변수로 사질토 지반의 상대밀도, 말뚝직경, 원심모형시험의 중력수준으로 구별하여 수행하고 실험결과에서 하중-침하 곡선의 거동을 분석하고 극한하중값에 대하여 다양한 극한하중 공식에 비교 분석을 실시하므로 그의 적용타당성을 고찰하였다.

Table 4 실험 내역

상대밀도(%)	중력수준(G)	말뚝 직경 (mm)
50	1	5, 7, 9
	30	
80	40	
	50	

## 4. 실험결과

### 4.1 극한하중 결정

원심모형실험 결과 획득한 모형말뚝의 극한하중 결정은 하중-침하 곡선의 실험결과를 판독한 후 수행하였다. 극한하중이 수렴되는 하중침하 곡선을 나타내는 실험결과에서는 그대로 극한하중을 구하고 그렇지 않은 경우에는 하중증가에 따라 지속적으로 침하가 발생하는 대부분의 원심모형실험에서는 LogS - LogP법을 사용하여 말뚝의 항복하중을 구하고 다음의 경험적 관계식을 이용하여 극한하중을 산정하였다.

$$Q_U = \frac{3}{2} Q_Y \text{ (kg)} \quad (2.1)$$

여기서,

$Q_U$  = 말뚝의 극한하중

$Q_Y$  = 말뚝의 항복하중

하중-침하 곡선의 관계식에서 극한하중을 구하는 여러 방법중 LogS-LogP 방법은 일관성 있게 전 실험자료에 대하여 사용할 수 있으므로 결과분석의 일관성을 유지할 수 있게 되었다.

Fig. 1은 하중-침하 곡선의 실험결과에서 LogS - LogP법을 사용하여 말뚝의 항복하중을 구한후 항복하중 값의 3/2을 취하여 극한하중을 구한 것을 그림에 도시한 결과이다. 그림에서 보인바와 같이 중력수준이 증가함에 따라 극한하중이 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히 직경 5mm의 모형말뚝의 실험에서는 중력수준 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있으며 직경 7mm의 모형말뚝도 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 9mm의 모형말뚝에서는 중력수준의 증가에 따라 비선형적으로 극한하중이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 중력수준의 증가에 따라 모형지반내의 구속응력이 증가해 전단강도 정수의 감소현상을 고려할 때 이와 상반되는 결과임을 알 수 있다.

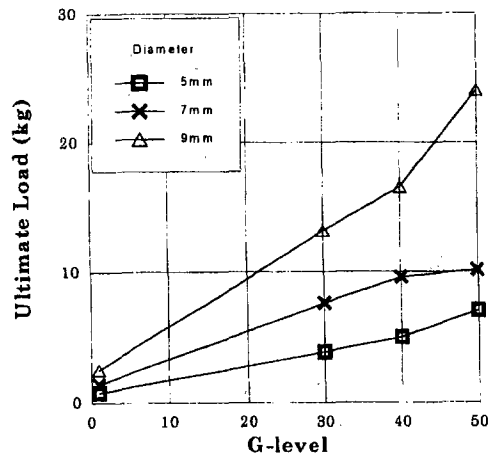


Fig. 1 중력수준에 따른 극한하중 변화(Dr=50%)

즉 Mohr-Colomb 파괴 포락선의 비선형적 관계를 고려할 때 중력수준의 증가에 따른 구속응력의 증가에 따라 흙의 내부 마찰각 또는 말뚝과 지반사이의 경계면의 마찰각의 감소가 쉽게 예상되므로 타변수의 변화가 고려되지 않는 경우 동일한 모형, 지반 조건, 타설 방법에서 중력수준의 증가에 따라 극한하중의 감소경향이 예상된다.

그러나 이와 상반하여 비선형적으로 증가하는 현상은 모형말뚝 설치시 발생하는 지반의 교란효

과에 기인하는 것으로 추정된다. 말뚝 직경이 증가할수록 지반의 교란범위, 특히 모형말뚝 선단부의 교란이 확대되어 말뚝설치에 따른 지반다짐 효과에 의한 전단강 정수 증가 경향을 예상할 수 있다.

Fig. 2는 상대밀도  $Dr = 80\%$  모형지반에 대한 실험결과로 중력수준이 증가함에 따라 극한하중의 증가 경향을 보여주고 있으며 모형말뚝 직경이 작은 경우( $D=5\text{mm}$ )의 선형적인 증가변화에 비하여 말뚝 직경이 증가할수록 높은 중력수준( $G=30, 40, 50$ )에서는 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이와같은 변화는 Fig. 1의  $Dr=50\%$ 의 상대 밀도가 비교적 작은 경우와 반대의 현상을 나타내고 있다. 초기의 지반조건이 조밀한 경우에는 모형말뚝의 관입에 따른 지반교란으로 인하여 다이러턴시(Dilatancy) 효과에 의한 상대밀도의 감소경향이 예측된다.

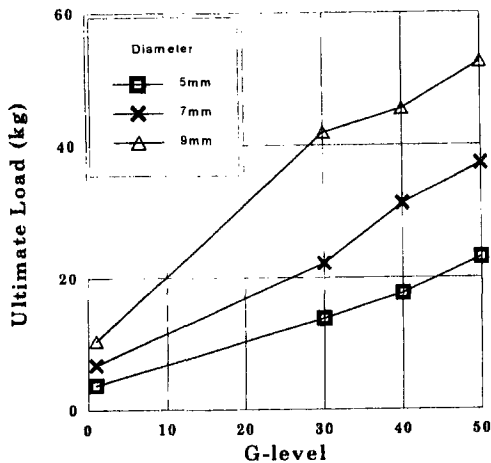


Fig. 2 중력수준에 따른 극한하중 변화( $Dr=80\%$ )

따라서, 모형말뚝의 직경이 증가할수록 교란범위가 확대되어 체적팽창에 의한 상대밀도 감소는 전단강도 정수의 감소경향을 가지고 있음을 예상할 수 있기 때문에 중력수준의 증가에 따라 직경이 큰 모형말뚝에서는 극한 하중이 감소하는 것으로 추정된다. 중력수준의 증가에 따른 구속응력의 증가에 의한전단강도 정수의 감소 효과 추세는 작은 직경의 모형말뚝( $D=5, 7, 9\text{mm}$ )의 거동에 만족스러운 설명을 주지 못하고 있다.

Fig. 3과 Fig. 4는 모형말뚝의 직경 변화에 따른 극한하중의 변화를 나타내고 있다. 말뚝 선단하중

의 크기는 직경의 제곱에 비례하는 경향이 있으므로 직경 크기에 따라 포물선적으로 증가하는 경향이 있으므로 Fig. 3의 상대밀도  $Dr=50\%$ 인 경우에

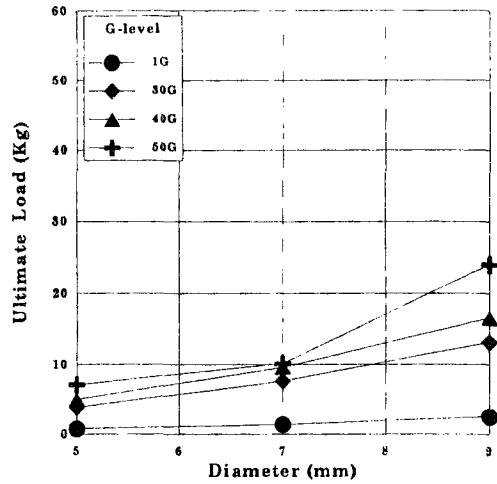


Fig. 3 직경에 따른 극한하중 변화( $Dr=50\%$ )

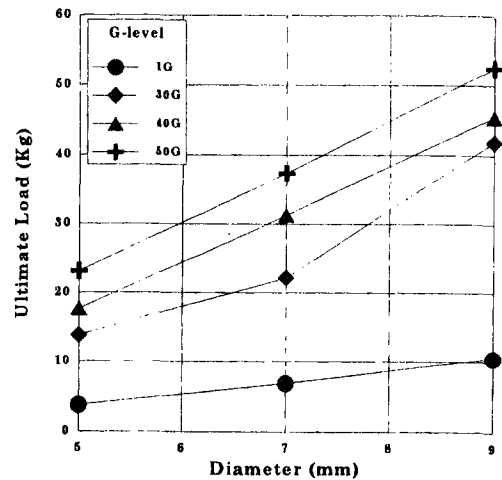


Fig. 4 직경에 따른 극한하중 변화( $Dr=80\%$ )

그것을 확인할 수 있으며 직경변화에 따른 극한하중 변화폭의 크기는 중력수준이 증가할수록 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, 전술한 바와 같이 모형말뚝의 직경이 클수록 지반교란효과의 영향이 크게 작용할 것으로 예상되므로 Fig. 3의 상대밀도가 비교적 작을 경우에는 다짐에 따른 전단강도 정수 증가에 의한 극한하중의 증가가 예상되며

Fig. 4의 상대밀도가 큰 경우에는 지반교란으로 인하여 다이러턴시에 의한 상대밀도 감소로 전단강도 정수의 감소에 따라 부정적으로 작용할 수 있음을 예상할 수 있다. Fig. 1~Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 현장 말뚝에서 지반조건, 말뚝 직경 영향, 중력수준의 효과를 원심모형실험을 통하여 그대로 재현하고 유효한 실험결과를 획득할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4.2 이론식에 의한 극한하중 비교

[식 2.1]을 이용하여  $N_q$ 값에 근거한 이론적인 말뚝의 극한하중은 구하였으며, 이때 말뚝의 길이에 따른 연직유효응력  $\sigma'_v$ 은 말뚝 지름의 20배 깊이까지는 선형적으로 증가하고 그 이하의 깊이에서는 일정한 상태로 가정하였다. 토압계수  $K_s$ 는 정지상태로 보아 1로 가정하였으며, 말뚝과 주변지반 상호간의 마찰각  $\delta$ 는 흙의 내부마찰각  $\phi$ 의 2/3으로 가정하여 계산과정을 수행하였다. 한편  $N_q$  값은 Table 1에 제시된 값을 기본 값으로 Newton의 보간법을 이용하여 내부마찰각을 독립변수로 사용하여 각각의 중력수준에서의  $N_q$  값을 산정하였다.

기존에 제시된  $N_q$ 값을 이론식에 적용하여 구한 말뚝의 이론적인 극한하중과 실험결과를 비교하여 볼 때 1G상태에서는 Skempton, Yassin, Gibson (1953)이 제시한  $N_q$ 값을 사용할 때 실험결과와 비교적 잘 일치하는 반면에 중력수준이 증가할수록 Terzaghi (Localized Shear)이 제시한  $N_q$ 값을 이론식에 적용할 때 실험결과와 비교적 일치하는 경향이 있고 De Beer, Meyerhof 등이 제시한  $N_q$ 값을 사용할 때 실험결과보다 과대하게 산정되는 경향이 있다. Fig. 5~Fig. 6은 전반적으로 실험결과와 일치하고 있는 Terzaghi가 제시한  $N_q$ 값을 이론식에 적용하여 구한 단말뚝의 이론적인 극한하중과 실험결과에 의한 단말뚝의 극한하중을 비교 도시한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 상대밀도에 관계없이 직경 5, 7mm에 대한 이론적인 값과 실험결과는 거의 일치하는 경향을 보인다. 그러나 직경 9mm에 대한 실험결과는 이론적인 값과 유사하게 증가하는 경향을 보이지만 이론식에 의한 값보다는 약간 큰 수치를 보인다. 단말뚝의 하중재하시험을 결과를 이용하여 실험적 극한하중을 결정하고 이론적인 결과와 비교 분석한 결과, 원심모형실험은 단말뚝의 거동을 효과적으로 연구할 수 있는 유용한 실험임을 알 수 있었다.

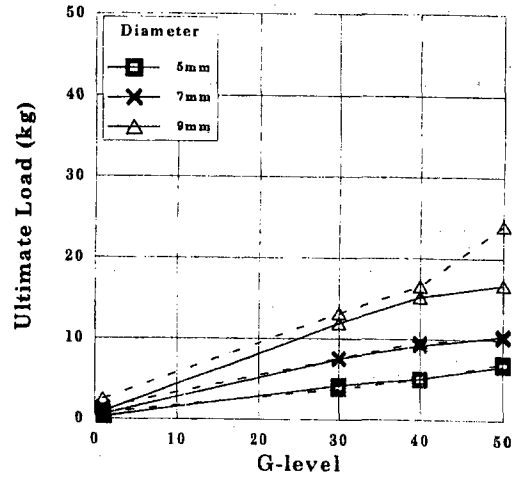


Fig. 34 이론식에 의한 극한하중 비교 (Dr=50%)

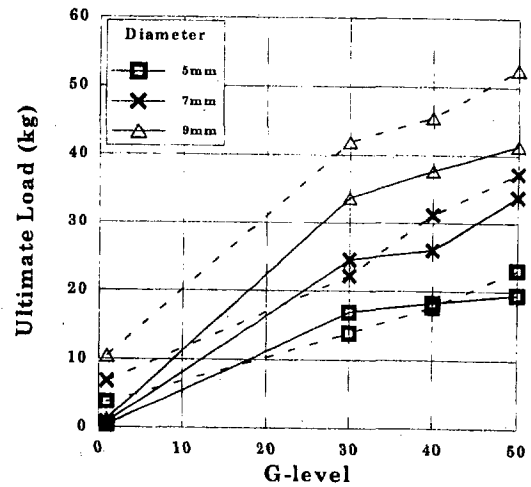


Fig. 6 이론식에 의한 극한하중 비교 (Dr=80%)

## 5. 결론

본 논문은 비점착성 사질토 지반내에 타설한 단말뚝의 연직하중에 대한 침하거동 및 극한하중에 관한 원심모형실험적 연구로서 모형말뚝의 직경, 모형지반의 상대밀도, 중력수준을 변화시키면서 실험을 실시하고 그 결과를 기존의 경험식과 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 말뚝의 거동에 관한 원심모형실험에서 현장응력을 중력수준 변화에 따라 재현시킴으로써 이와 관련된 현장거동을 실험실에서 근접하게 재현

- 할 수 있는 효율적인 실험결과를 얻을 수 있다.
2. 모형실험결과 특정된 단말뚝의 극한 하중은 말뚝의 직경, 지반의 상대밀도, 중력수준이 증가할수록 증가하는 경향을 얻었다.
  3. 본 연구에서는 말뚝설치시 지반 교란효과가 말뚝의 극한하중에 미치는 영향은 말뚝 직경이 클수록 중력 수준이 증가할수록 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다.
  4. 본 연구에서는 말뚝설치시 중간정도 밀도의 사질토 지반에서는 다짐에 따른 극한하중 증가 경향이 증가하며 조밀한 밀도의 사질토 지반에서는 지반교란에 의한 다이러턴시효과에 따른 극한하중 증가 경향이 감소함을 예상할 수 있다.
  5. 본 실험의 경우 원심모형 실험에서 중력수준의 변화가 전단강도 정수의 변화 및 그에 따른 극한하중 계수의 변화에 미치는 영향은 말뚝의 직경, 상대밀도, 지반교란효과 등에 비하여 크지 않은 것으로 나타났다.
  6. 말뚝의 극한하중에 관한 원심모형 실험결과를 기존에 제시된  $N_q$ 값을 사용하여 이론식과 비교하여 볼 때 1G상태에서는 Skempton, Yassin, Gibson (1953)이 제시한  $N_q$ 값이 실험결과와 비교적 잘 일치하는 반면에 중력수준이 증가할수록 Terzaghi (Localized Shear)가 제시한  $N_q$ 값을 사용할 때 비교적 일치하는 경향이 있고 De Beer, Meyerhof 등이 제시한  $N_q$ 값을 이론식에 적용할 때 실험결과 보다 과대하게 산정되는 경향이 있다. 특히, Terzaghi가 제시한  $N_q$ 값을 사용할 때 전반적으로 실험결과와 잘 일치하고 있다.
  3. 조영목(1995), "사질토의 용력-변형 거동에 관한 비선형 구성모델의 적용", 강원대학교 석사학위 논문.
  4. De Beer, E.E.(1963),"The Scale Effect in The Transportiion of Deep Sounding Test on The Ultimate Bearing Capacity of Pile Casson Foundation", Geotechnique, Vol. 13, No.1, pp.39-75.
  5. Fioravante V., Jamiolkowski M., Pedroni S. (1994), "Modeling the behaviour of piles in sand subjected to axial load", Centrifuge 94, pp.455-460.
  6. Kishida, H(1967),"Ultimate bearig capacity of piles driven into loose sand", Soil and foundations, Vol.7, No.3, pp20-29.
  7. Meyerhof, G.G.(1976),"Bearing Capacity and settlement of pile foundations", Proc. ASCE. GT3, pp.197-223
  8. Vesic, A.S.(1977), "Design of pile foundations", National Cooperation Highway Research Program, Report No.42, Transportration Rsearch Board, Washington, D.C..
  9. Yet N.S., Leung C.F., Lee F.H.(1994),"Behaviour of axially loaded piles in sand", Centrifuge 94, pp. 461- 466.

## 참고문헌

1. 김명모 (1993.6) 한국지반공학회지 제9항 제2호 말뚝기초(IV).
2. 정해운(1996), "사질토 지반의 무리말뚝 모형실험", 강원대학교 석사학위 논문.