

# 응력상태를 고려한 사질토지반에 관입된 말뚝의 극한수평지지력 분석 및 평가

## Estimation of Pile Ultimate Lateral Load Capacity in Sand Considering Lateral Stress Effect

이 준 환<sup>1</sup> Lee, Jun-Hwan                      백 규 호<sup>2</sup> Paik, Kyu-Ho  
김 대 홍<sup>3</sup> Kim, Dae-Hong                      황 성 욱<sup>4</sup> Hwang, Sung-Wuk  
김 민 기<sup>4</sup> Kim, Min-Kee

### Abstract

In this study, ultimate lateral load capacity of piles is analyzed with consideration of lateral stress effect. Based on results obtained in this study, a method for the estimation of ultimate lateral load capacity is proposed. This makes it possible to more realistically estimate the ultimate lateral load capacity under various stress states caused by in-situ soil condition and pile installation process. Calibration chamber test results with various soil conditions were used in the analysis. From the test results, it was found that effect of the lateral stress was greater than that of the vertical stress on the ultimate lateral load capacity of piles. It was also found that, as the relative density increases, displacements required to reach the ultimate state increases, showing relative displacements of around 14% and 18-25% for  $D_R = 55\%$  and  $86\%$ , respectively. Based on results obtained in this study, a methodology for the estimation of ultimate lateral load capacity of piles using correction factors was proposed. Results from proposed method matched well measured results.

### 요 지

본 연구에서는 수평하중을 받는 말뚝을 대상으로 응력상태에 따른 극한수평지지력의 변화추이를 분석하였으며, 이를 토대로 다양한 응력상태를 고려할 수 있는 극한수평지지력의 평가방법을 제안하였다. 이를 통해 기존의 수평지지력 평가방법에 있어 제한되었던 응력효과의 고려가 가능하게 되었으며, 지반조건 및 시공조건 등에 따른 지반응력 변화를 보다 효과적으로 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해 모래질 지반을 대상으로 모형토조에서 수행된 말뚝의 수평재하시험결과가 사용되었으며, 토조시험에는 다양한 범위의 응력상태가 고려되었다. 분석결과, 말뚝의 극한수평지지력은 수직응력 및 수평응력 모두에 영향을 받는 것으로 나타났으나, 수평응력에 따라 더욱 민감하게 변화하고 있음을 알 수 있었다. 극한수평지지력이 발휘되는 변위량의 수준은 지반조건에 따라 달랐으며, 상대밀도가 50%범위에서는 상대변위량 14%내외, 86%내외에서는 18-25%정도의 상대변위량을 나타내었다. 본 연구결과에 근거하여 극한수평지지력 평가를 위한 수평토압보정계수가 제안되었으며, 제안된 평가법에 의한 예측치는 다양한 응력조건에 대해 실측치와 유사한 결과를 나타내었다.

**Keywords :** Ultimate lateral load capacity, Piles, Calibration chamber tests, Lateral stress, sands

1 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 (Member, School of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ., junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 관동대학교 토목공학과 부교수 (Member, Dept. of Civil Engrg., Kwan-Dong Univ.)

3 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 (Member, Korea Electric Power Corporation)

4 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 (Member, School of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

말뚝의 수평지지력은 연직지지력에서와 마찬가지로 지반조건에 따라 크게 좌우되며, 일반적인 지반설계에서와 같이 지반조사과정에서 얻어지는 지반특성치의 정확한 분석과 적절한 반영이 핵심사항으로 간주된다. 말뚝의 연직지지력은 선단 및 주변지지력으로 구분되어 독립적인 산정과정을 거치는 반면, 수평지지력은 말뚝 근입깊이의 상당부분 혹은 전 범위가 단일지지층으로 간주될 수 있으며, 산정결과 또한 단일 지지력항으로 나타나게 된다. 이러한 수평지지력의 발휘특성은 말뚝 두부로부터 선단까지 분포하는 각 깊이 별 지반특성이 지지력 평가에 직접적인 영향을 미치게 됨을 의미하며, 단일 지지력항에 포함된 불확실성의 범위 또한 증대될 수 있다.

말뚝의 수평지지력 평가는 크게 p-y곡선 및 변위해석에 근거한 허용지지력의 측면과 말뚝 주변지반의 파괴 및 소성상태를 가정한 극한수평지지력의 측면으로 구분될 수 있다. 극한수평지지력의 경우 적절한 안전율의 사용이 전제가 되어야 하며, 지금까지 실험적 및 해석적 방법을 통해 다양한 평가방법이 제안되어 왔다(Brinch-Hasen, 1961; Broms, 1964; Barton, 1982; Zhang et al., 2005). 지금까지 제안되어온 대부분의 평가법은 지반의 소성평형상태를 기반으로 극한수평토압의 크기와 깊이별 분포 형태를 정의하여 극한수평지지력을 결정하고 있다. 그러나 실제의 경우, 지반응력은 다양한 상태로 존재할 수 있으며, 말뚝의 시공과정 또한 지반응력의 상당한 변화를 가져올 수 있으므로 이에 대한 분석이 요구되고 있다.

본 연구에서는 앞서 서술된 연구배경 하에 사질토 지반대상으로 말뚝의 수평지지력에 미치는 응력상태의 영향을 분석하고자 하며, 수정된 극한수평지지력 평가 방법을 제안하고자 한다. 이와 관련된 선행연구로서 현장타설말뚝을 모사한 모형말뚝 및 가압토조를 이용한 수평재하실험이 수행된 바 있으며(이준환 등 2007), 본 연구는 선행연구결과를 바탕으로 극한수평지지력 및 변위량 분석과 새로운 평가방법 등으로 구성되어 있다.

## 2. 말뚝의 극한수평지지력 평가

### 2.1 Broms에 의한 간략법

말뚝에 수평하중이 작용할 때 발생하는 극한수평토

압의 깊이별 분포는 말뚝의 수평변위가 주변지반의 수동상태를 발생시키기에 충분하다는 가정하에 정의되며, 이 경우 말뚝 회전점의 위치에 따라 변화하게 된다. 말뚝의 강성 또한 극한수평지지력을 결정짓는 중요한 요소 중 하나이다. 말뚝의 상대강성도가 충분히 커서 지지력의 발현이 지반강도에 의해 좌우될 경우 일반적으로 단말뚝으로서 정의되며, 본 연구에서도 단말뚝을 대상으로 살펴보고자 한다.

단말뚝의 경우, 대부분의 극한수평지지력 평가법이 경험적 혹은 근사적 접근방법에 의해 제안되어 왔다. Broms(1964)는 수평하중에 의한 말뚝의 회전점을 고려하지 않고 말뚝 주변지반의 단일 수평상태를 토대로 한 간략법을 제안하였다. Broms(1964)에 의하면 극한수평토압의 분포가 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 삼각형 형태로 주어지며, 말뚝 선단부에는 집중하중이 작용하는 것으로 가정하고 있다. 일반적으로 Rankine의 토압이론에 의해 정의되는 수동토압은 수동토압계수  $K_p$ 의 단일항으로 표시되나, 실질적으로 관찰되는 말뚝의 극한수평토압은 3차원적 지지력 및 거동특성에 따라 Rankine의 수동토압보다 큰 값으로 나타나게 된다. Broms의 간략법에 사용되는 극한수평토압은 다음과 같이 주어진다.

$$p_u = K_{u,Broms} \cdot \sigma_v \tag{1}$$

여기서  $p_u$  = 극한단위수평지지력,  $K_{u,Broms} = 3K_p$ ,  $K_p$  = 수동토압계수 =  $\tan(45+\phi/2)^2$ ,  $\sigma_v$  = 연직응력이다. 일반적으로 식 (1)에 의한 극한수평토압의 실측토압에 비해 다소 과소평가된 결과를 나타낸다고 알려져 있다. 식 (1)과 그림 1(a)에 의하면, 극한수평지지력  $H_u$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_u = \frac{K_p \cdot \sigma_{v,e} \cdot L^2 \cdot B}{2(e+L)} \tag{2}$$

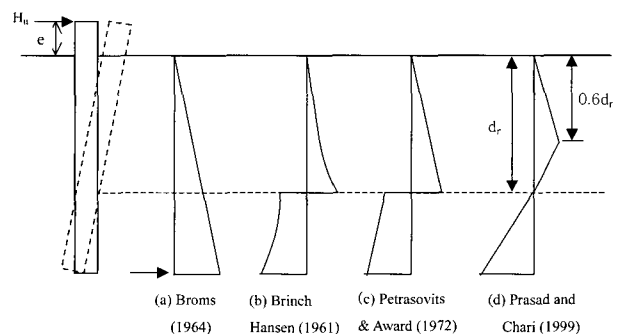


그림 1. 수평하중을 받는 말뚝에 작용하는 극한수평토압의 분포

여기서  $H_u$  = 극한수평지지력,  $\sigma_{v,e}$  = 말뚝선단에서의 연직응력,  $L$  = 말뚝길이,  $B$  = 말뚝직경,  $e$  = 지표면으로부터 하중작용점까지의 거리이다. Broms의 방법은 제안된 방법 중 가장 간략화된 방법으로 간주될 수 있으나, 말뚝회전점의 평가가 이루어질 필요가 없으므로 실무에서 간편하게 적용될 수 있다.

## 2.2 말뚝의 회전점을 고려한 극한수평지지력 평가방법

Broms(1964)에 의한 간략법 이외에 말뚝의 회전점을 고려하여 보다 실질적인 토압분포를 가정한 방법들도 다양하게 제안되어 왔다[그림 1(b)-(d)]. 그림 1(b), (c)에 나타난 Brinch-Hansen(1961)과 Petrasovits & Award(1972) 방법은 수평하중 작용 시 특정 깊이에서 나타나는 말뚝의 회전점을 중심으로 극한수평토압의 역전이 발생한다고 가정하고 있다. Brinch-Hansen방법에 적용되는 극한수평토압계수  $K_{u,BH}$ 는 지반의 마찰각과 깊이에 따라 정의되고 있으며, 결과적으로 그림 1(b)와 같은 비선형 분포를 나타내게 된다. Petrasovits & Award 방법에 적용되는 극한수평토압계수  $K_{u,PA}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{u,PA} = 3.7 \cdot K_p - K_a \quad (3)$$

여기서  $K_a$  = 주동토압계수 =  $\tan(45-\phi/2)^2$ 이다.

최근에 제안된 방법으로는 그림 1(d)에 나타난 Prasad & Chari(1999)와 Zhang et al.(2005)에 의한 방법이 대표적으로 포함된다. Zhang et al.(2005) 방법은 기본적으로 Prasad & Chari(1999) 방법과 동일한 형식을 취하고 있으나, 말뚝에 작용하는 극한수평토압의 요소를 수직분력(Normal component)와 전단분력(Shear component)로 구분하여, 말뚝주변에 대해 각각의 적분량으로서 전체 지지력을 정의하고 있다.

Prasad & Chari(1999) 방법은 그림 1(d)에서 보는 바와 같이 수평하중에 의한 말뚝의 회전점  $d_r$  및  $0.6d_r$ 를 기준으로 발생하는 수평지지력의 변화량을 반영하고 있으며, 선단에서는 깊이  $0.6d_r$ 에서 나타나는 극한수평토압의 1.7배가 작용하는 것으로 제안하였다. Prasad & Chari(1999)에 의하면, 말뚝 회전점의 깊이  $d_r$ 은 말뚝길이와 하중작용거리에 의해 주어질 수 있으며, 다음과 같이 나타낸다.

$$d_r = [-(0.567L + 2.7e) + (5.307L^2 + 7.29e^2 + 10.541eL)^{0.5}] / 2.1996 \quad (4)$$

여기서  $L$ 과  $e$ 는 각각 말뚝의 길이와 하중작용거리이다. Prasad & Chari(1999)에 의해 적용된 극한수평토압계수  $K_{u,PC}$ 는 마찰각의 단일함수로 정의되고 있는 반면, Zhang et al.(2005)은 Barton(1982)의 극한수평토압계수  $K_{u,Barton}$ 이 실제 계측된 극한수평토압을 가장 유사하게 모사함을 실험결과를 통해 제시하였다 Barton(1982)의 극한수평토압계수  $K_{u,Barton}$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$K_{u,Barton} = K_p^2 \quad (5)$$

식 (5) 및 그림 1(d)의 분포형태가 고려된 극한수평지지력은 아래와 같다.

$$H_u = 0.3K_p^2 \cdot \sigma_{v,R} \cdot B \cdot (2.7d_r - 1.7L) \quad (6)$$

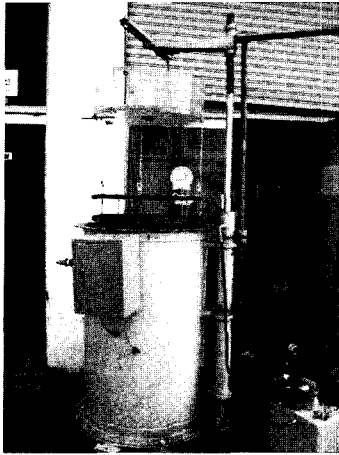
여기서  $\sigma_{v,R}$  = 깊이  $0.6d_r$ 에서의 연직응력이다.

## 3. 모형토조실험

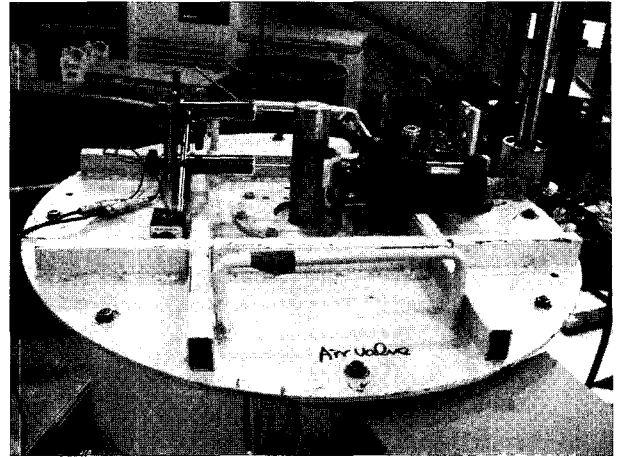
### 3.1 실험개요 및 조건

서론에서 언급된 바와 같이 본 연구의 선행연구로서 가압토조 및 모형말뚝을 이용한 수평재하시험이 실시되었다. 실험 및 기본결과에 대한 세부적인 사항은 이준환 등(2007)에 나타나 있으므로, 본 절에서는 재하시험의 개요 및 지지력평가를 위한 핵심결과만을 나타내고자 한다. 시험에 사용된 가압토조는 직경 77cm, 높이 121cm이며, 내부에는 공기압을 통해 수직 및 수평토압의 독립적인 적용이 가능한 멤브레인이 부착되도록 하였다. 모형지반 조성을 위해 주문진 표준사가 이용되었으며, 강사장치를 통해 목표로 하는 임의의 상대밀도를 조절할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 대표적인 기초지반조건으로서 조밀한 상태 및 중간상태의 상대밀도를 선택하였으며, 상대밀도 86%와 55%이 실험에 적용되었다.

토조실험에 사용된 모형말뚝은 직경 6cm 이며 길이는 90cm이나 말뚝의 실질적인 근입깊이는 70cm이다. 모형말뚝의 변형률을 측정하기 위해서 말뚝의 전면과 후면에 변형률 게이지를 대칭으로 부착하였다. 수평재하장치는 토조 상단면에서 10cm 위에 자체 제작된 버팀보와 함께 설치되었으며, 유압잭과 로드셀로서 구성되었다. 그림 2는 실험에 사용된 토조 및 재하장치를 보여주고 있다.



(a) 모형토조



(b) 수평재하장치

그림 2. 실험에 사용된 기압토조 및 수평재하장치

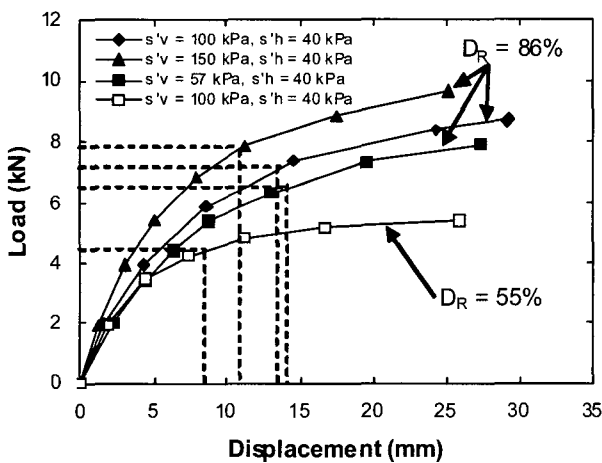
본 연구의 주안점인 응력상태에 따른 수평지지력의 변화를 살펴보기 위해 다양한 지반응력상태 및 토압계수가 모형토조시험에 적용되었다. 적용된 응력조건은 초기수직응력( $\sigma_v = 57, 100, 150\text{kPa}$ ) 및 초기수평응력( $\sigma_h = 40, 70, 100\text{kPa}$ )의 조합에 따라 6가지 경우이며, 적용된 토압계수 $K_0$ 는 0.25, 0.4, 0.7, 1.0 이 사용되었다.

### 3.2 하중-변위량 곡선 및 극한수평지지력

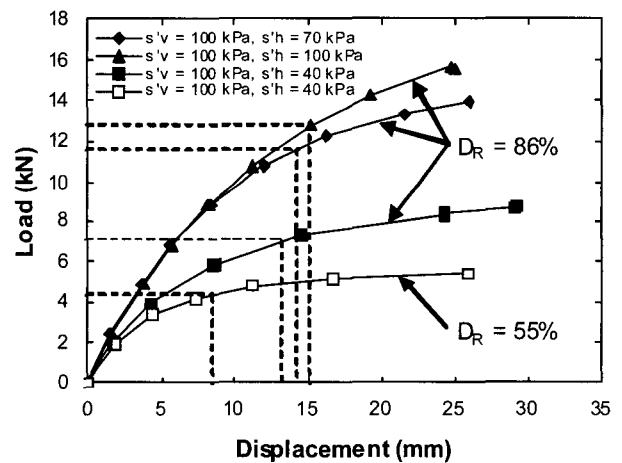
그림 3은 토조실험으로부터 얻어진 하중-변위량 곡선을 나타내고 있다. 그림 3(a)의 경우, 초기수평응력이 40kPa에 대해 초기수직응력이 57, 100, 150kPa인 경우에서의 하중-변위량 곡선을 나타내고 있으며, 이에 상응하는 토압계수는 각각 0.7, 0.4, 0.25이다. 그림 3(b)의 경우, 초기수직응력 100kPa에 대해 초기 수평응력이 40,

70, 100인 경우에서의 하중-변위량 곡선을 나타내고 있으며, 토압계수는 각각 0.4, 0.7, 1.0이다. 그림에서 보는 바와 같이 하중-변위량 곡선은 수직응력뿐만 아니라 수평응력에 대해서도 상당히 민감한 것으로 나타나고 있으며, 기존의 평가방법을 적용할 경우, 이에 대한 영향은 고려될 수 없음을 나타내고 있다.

연직하중을 받는 말뚝의 경우 극한지지력 결정을 위한 다양한 기준들이 제시되어 있는 반면, 극한수평지지력에 대해서는 명확한 기준이 없어 많은 가변성을 내포하고 있다. 이는 수평지지력의 발휘특성이 매우 복잡하며 광범위한 응력 및 변위에서의 진행성 파괴특징을 지니고 있기 때문이라 할 수 있다. Fleming et al.(1992)의 경우 말뚝을 구형체로 가정하여 지름의 약 10%정도의 변위가 발생하였을 시 극한상태에 도달한다 하였으나, 상부구조물과 관련하여 임의의 변위 혹은 말뚝의 회전



(a) 수평응력이 40kPa 인 경우



(b) 수직응력이 100kPa 인 경우

그림 3. 각 실험조건 별 하중-변위량곡선 및 극한수평지지력의 결정

표 1. 모형토조실험으로부터 얻어진 극한수평지지력 및 변위량

DR (%)	86					55
$\sigma'_v$ (kPa)	57	150	100	100	100	100
$\sigma'_h$ (kPa)	40	40	40	70	100	40
$K_0$	0.7	0.27	0.4	0.7	1.0	0.4
$H_u$ (kN)	6.4	7.8	7.1	11.5	12.7	4.4
$b_u$ (mm)	14.5	11	13.5	14.2	15.1	8.5
$b/B$ (%)	24.1	18.3	22.5	23.7	25.2	14.2

각을 기준으로 극한수평지지력이 결정되는 경우도 빈번하다. 본 연구에서는 극한수평지지력 평가를 위해 Meyerhof et al.(1981)의 방법을 적용하였다. Meyerhof et al.(1981)방법에서는 하중-변위량 곡선에서 전반부의 비선형 침하곡선 이후에 나타나는 직선부의 시작점에 해당하는 하중이 극한수평지지력으로 정의되고 있다. 표 1은 그림 3을 통해 얻어진 각 실험조건 별 극한수평지지력값을 나타내고 있다.

### 3.3 극한수평지지력 발휘에 따른 침하량 분석

본 절에서는 재하시험을 통해 얻어진 극한수평지지력과 이에 상응하는 변위량을 통해 수평하중하의 극한 변위량의 발휘특성을 보다 구체적으로 분석하고자 한다. 재하시험 별 얻어진 극한수평지지력과 함께 각각의 경우에 있어 발생된 극한변위량( $b_u$ )은 표 1에 나타나 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 상대밀도 86%인 경우, 응력조건에 따라 18-25% 내외의 상대변위량( $b/B$ =수평 변위/말뚝직경 $\times 100\%$ )에서 극한수평지지력이 발휘된 것으로 나타나고 있으며, 상대밀도 55%인 경우에는 약 14% 정도로, 동일한 토압계수( $K_0=0.4$ )를 기준으로 상대밀도 86%에서의 값보다도 작은 변위량을 나타내고 있다.

표 1의 결과에 의하면, 극한변위량은 상대밀도와 토압계수의 영향을 크게 받는 것으로 관찰되고 있으며, 상대밀도와 토압계수가 증가할수록 극한수평지지력 발휘에 요구되는 변위량은 증가하는 것으로 나타나고 있다. 일반적으로 역학적 의미에서의 극한상태는 응력이 기준이 되며 변위량은 고려되지 않고 있으나, 본 연구에서 얻어진 결과에 의하면 상대밀도와 토압계수가 작을 경우 극한상태에서의 변위량도 허용변위량 함께 설계에 고려되어야 함을 의미하고 있다. 또한 표 1에 나타난 결과는 말뚝의 극한수평지지력이 Fleming et al.(1992)이 제시한 상대변위량 10%보다 큰 값에서 발휘되고 있음을 보여주고 있다.

## 4. 응력상태를 고려한 말뚝의 극한수평지지력 평가

### 4.1 응력변화에 따른 극한수평지지력의 변화율

표 1에 나타난 바와 같이 극한수평지지력은 기존 평가법에서 정의된 바와는 달리 수직응력과 수평응력 모두에 영향을 받고 있음을 보여주고 있다. 이러한 영향을 구체적으로 살펴보기 위해 각 응력요소의 증가율에 대한 극한수평지지력의 증가율을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 수평응력에 따른 극한수평지지력의 증가가 수직응력에 의한 변화량에 비해 큰 것으로 나타나고 있다. 예를 들어 수직 및 수평응력 증가율 150%에 대해 극한수평지지력은 각각 약 67%와 30%의 증가율을 보이고 있다.

이러한 수평응력의 효과는 극한수평지지력에 상당한 영향을 미치고 있음을 나타내고 있어, 현장응력상태에 따른 극한수평지지력의 변화는 설계에 반영되어야 할 사항이라 판단된다. 말뚝시공과 관련하여서도, 항타말뚝과 같이 시공 중 말뚝 주변지반의 응력증가를 유발하거나, 현장타설말뚝과 같이 시공 중 응력이완이 발생할 수 있는 경우에도, 수평응력의 영향은 적지 않을 것이므로 설계 및 시공단계에 있어 고려되어야 할 것으로 판단된다.

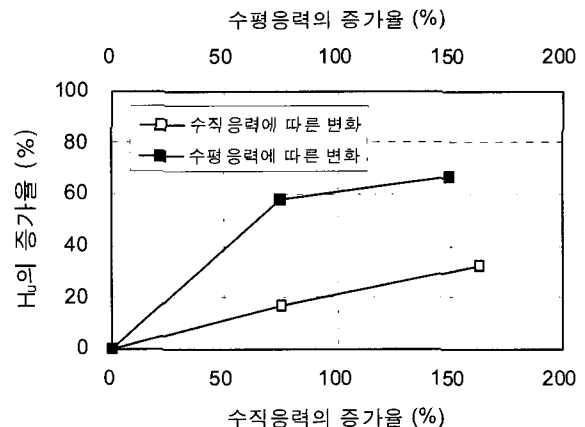


그림 4. 응력증가율에 따른 극한수평지지력의 증가율

#### 4.2 수평응력상태를 고려한 극한수평지지력의 평가

그림 5는 수직 및 수평응력에 대한 극한지지력의 실측값 및 예측값을 나타내고 있다. 예측값을 위해서는 실무에서 보편적으로 사용되어온 Broms(1964)방법과 더불어 Prasad and Chari(1999) 방법이 채택되어 비교분석에 사용되었다. 그림 5(a)의 경우, 수평응력 40kPa일 때 수직응력의 변화에 따른 극한수평지지력의 변화추이를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 수직응력이 증가함에 따라 실측치와 예측치 모두 증가하고 있으나, 값에 있어서는 상당한 차이가 나타나고 있다.  $K_0$ 값이 0.4인 경우에는 실측치와 예측치가 매우 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있는데, 이는 기존 방법들이 정규압밀상태의 일반적인 토압계수 값인 0.4 - 0.5 범위를 대상으로 제안되어 왔음을 간접적으로 나타내고 있다.

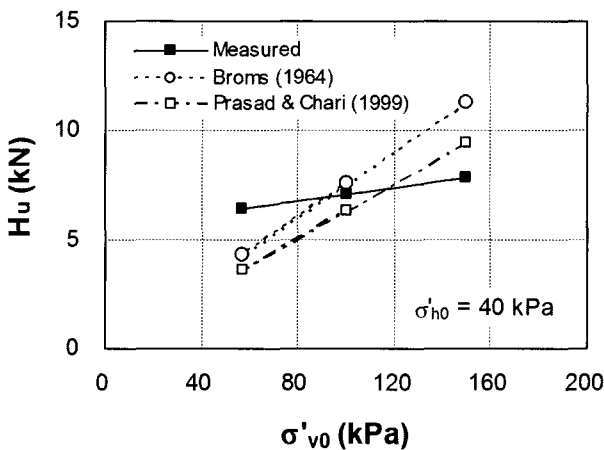
그림 5(b)의 경우, 수직응력이 100kPa일 때 수평응력

의 변화에 대한 극한수평지지력의 변화량을 나타내고 있다. 본 연구에서 적용된 2 가지 평가방법 모두 수평응력의 변화량은 고려되어 있지 않기 때문에 예측치는 수평응력과 무관하게 일정한 값을 나타내고 있으나, 실측치의 경우 수평응력이 증가함에 따라 지지력도 함께 증가함을 나타내고 있다.

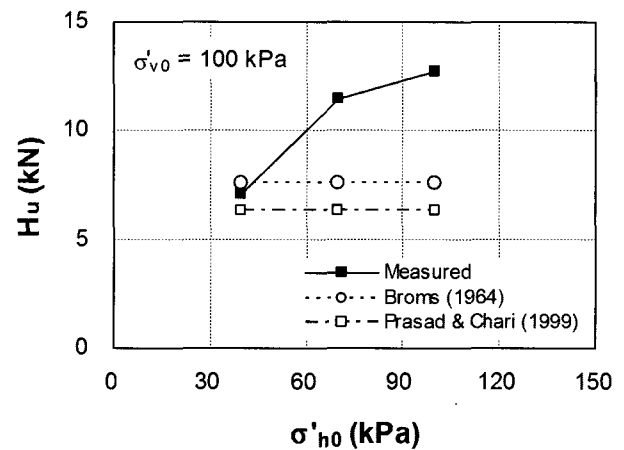
본 연구결과에 근거하여, 극한수평지지력에 대한 수평응력의 효과를 반영하기 위해 다음과 같은 수평응력 보정계수를 도입하였다.

$$CF_h = \left( \frac{K_0}{1 - \sin \phi} \right)^{0.6} \quad (7)$$

여기서  $CF_h$  = 수평응력보정계수,  $K_0$  = 원위치토압계수이다. 식 (7)은 Jaky(1944)의 공식 ( $=1 - \sin \phi$ )이 유효한 일반적인 정규압밀상태의 지반에서는 기존의 평가법과

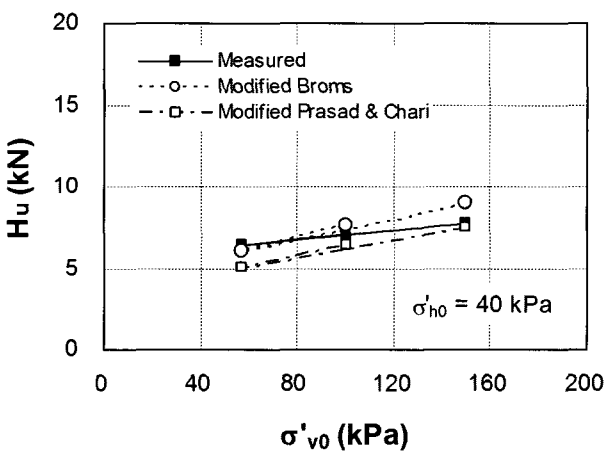


(a) 수평응력이 40kPa 인경우

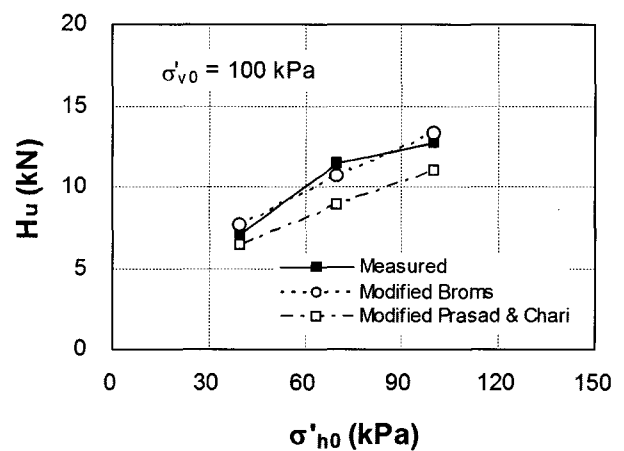


(b) 수직응력이 100kPa 인경우

그림 5. 하중조건에 따른 극한수평지지력의 실측치 및 예측치



(a) 수평응력이 40kPa 인경우



(b) 수직응력이 100kPa 인경우

그림 6. 제안된 방법에 의한 극한수평지지력의 예측치 및 실측치의 비교

동일한 결과를 나타내게 되나, 원위치토압계수  $K_0$ 가 Jaky의 토압계수보다 크거나 작은 경우에는 동일한 수직응력이라 할 지라도 수평응력의 크기에 따라 극한수평지지력이 달리 산정됨을 의미하고 있다.

본 연구에서 제안된 보정계수를 적용하여 Borms 및 Prasad & Chari의 예측식을 재구성하면 각각 다음과 같다.

$$H_u = \frac{K_p \cdot \sigma_{v,e} \cdot L^2 \cdot B}{2(e+L)} \left( \frac{K_0}{1-\sin\phi} \right)^{0.6} \quad (8)$$

$$H_u = 0.3K_p^2 \cdot \sigma_{v,R} \cdot B \cdot (2.7d_r - 1.7L) \left( \frac{K_0}{1-\sin\phi} \right)^{0.6} \quad (9)$$

그림 6은 본 연구에서 제안된 보정계수를 도입하여 산정된 극한지지력의 예측값 및 실측치와의 비교를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 방법을 사용할 경우, 다양한 범위에서의 수직 및 수평응력의 변화에 대해 실측치와 매우 근접한 결과를 나타내고 있어, 보다 실질적인 극한수평지지력의 평가가 가능함을 나타내고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 토조실험을 이용한 말뚝의 수평재하시험 결과를 통해 응력상태에 따른 극한수평지지력의 변화를 분석하였으며, 이를 고려한 지지력평가방법을 제안하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 말뚝의 극한수평지지력은 수직응력 및 수평응력 모두에 영향을 받는 것으로 나타났으나, 수평응력이 변화에 따라 더욱 민감하게 변화하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 다양한 범위의 토압계수를 사용하여 수행된 토조실험결과를 통해 얻을 수 있었으며, 상대밀도와 더불어 수평응력 또한 수평말뚝설계에 고려되어야 할 중요한 요소임을 알 수 있었다.
- (2) 극한수평지지력이 발휘되는 변위량의 수준은 지반조건에 따라 달랐으며, 상대밀도가 50%범위에서는 상대변위량 11%내외, 86%내외에서는 15-20%정도의 상대변위량을 나타내었다. 이러한 결과는 상대밀도가 증가할수록 극한상태에 도달되는 말뚝변

위량 또한 증가함을 나타내고 있다.

- (3) 기존의 극한수평지지력 평가방법은 정규압밀상태에서의 토압계수 값인 0.4-0.5범위에서는 실측치와 비교적 부합되는 결과를 나타내고 있었으나, 이외의 범위에서는 과소 혹은 과다평가의 결과를 나타내었다.
- (4) 본 연구결과에 근거하여 극한수평지지력 평가를 위한 수평토압보정계수가 제안되었으며, 제안된 평가법에 의한 예측치는 다양한 응력조건에 대해 실측치와 유사한 결과를 나타내었다.

## 감사의 글

본 논문은 한국전력공사 전력연구원의 연구비 지원에 의해 수행된 “가공송전용 광관주 철타기초 설계기준 수립 연구”의 결과 중 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 이준환, 백규호, 김대홍, 김민기, 황성욱 (2007), “말뚝형태 및 지반조건을 고려한 현장타설말뚝의 수평지지력 평가”, 지반공학회, 제출.
2. Barton, Y. O. (1982), “Laterally loaded model piles in sand: Centrifuge tests and finite element analyses”, Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
3. Brinch-Hansen, J. (1961), “The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces”, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Bulletin No.12, pp.5-9.
4. Broms, B. B. (1964), “Lateral resistance of piles in cohesive soils”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.90, No.2, pp.27-64.
5. Fleming, W. G., Weltman, A. J., Randolph, M. F., and Elson, W. K. (1992), “Piling Engineering”, 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley and Sons, Inc.
6. Jaky, J. (1944), “The coefficient of earth pressure at rest”, *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, pp.355-358.
7. Meyerhof, G. G., Mathur, S. K., and Valsangkar, A. J. (1981), “Lateral resistance and deflection of rigid wall and piles in layered soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, pp.159-170.
8. Petrasovits, G. and Award, A. (1972), “Ultimate lateral resistance of a rigid pile in cohesionless soil”, *Proc. of 5<sup>th</sup> European Conf. on SMFE*, Vol.3, pp.407-412.
9. Prasad, Y. V. S. and Chari, T. R. (1999), “Lateral capacity of model rigid piles in cohesionless soils”, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.2, pp. 21-29.
10. Zhang, L., Silva, F., and Grismala, R. (2005), “Ultimate lateral resistance to pile in cohesionless soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol.131, No.1, pp.78-83.

(접수일자 2007. 1. 29, 심사완료일 2007. 4. 25)