

# 강관합성 현장타설말뚝 머리의 수평하중-변위 거동 분석

## Analysis of Pile Head Lateral Load-Deflection Behavior of Steel-Concrete Composite Drilled Shafts

이 용 안<sup>1</sup> Lee, Yong-An

정 문 경<sup>2</sup> Chung, Moonkyung

박 재 현<sup>3</sup> Park, Jae-Hyun

이 주 형<sup>4</sup> Lee, Ju-Hyung

### Abstract

To analyze the lateral load-deflection behavior of steel-concrete composite drilled shafts, a series of lateral pile load tests were performed. The test results were compared with the results from various analytical methods for lateral pile behaviors using the coefficients of subgrade reaction ( $k_h$ ) estimated by pressuremeter test (PMT) and standard penetration test (SPT). As a result, it was found that the analytical methods using the  $k_h$  estimated by SPT N value were not suitable for evaluating the pile head lateral load-deflections of the piles within the allowable deflection. However, the methods using the  $k_h$  calculated from PMT were able to represent the initial lateral behavior at the head of the piles fairly well. Also, the method by the pressuremeter curve, which was applied directly to the p-y curve of the piles, offered a reasonable lateral behavior estimation by applying the correction factor to the pile materials.

### 요 지

본 연구에서는 강관합성 현장타설말뚝의 수평재하시험을 수행하고, 공내재하시험과 표준관입시험 결과에 의한 지반반력계수를 평가하여, 말뚝 머리의 수평거동에 대한 다양한 해석법과 비교·분석하였다. 분석 결과, 표준관입시험의 N값에 의한 지반반력계수를 이용하는 방법은 말뚝의 허용 변위량 내에서 수평거동을 평가하기에 적합하지 않은 것으로 나타났다. 반면 공내재하시험에 의한 지반반력계수를 이용하는 방법은 말뚝의 초기 수평거동을 비교적 잘 모사할 수 있었으며, 프레스미터 곡선을 직접 말뚝머리의 p-y 곡선으로 이용하는 방법에서, 말뚝 재료에 대한 보정계수를 도입하여 말뚝머리의 수평거동을 타당하게 평가할 수 있었다.

**Keywords** : Coefficient of subgrade reaction, Lateral load-deflection, Pressuremeter, p-y curve, Steel-concrete drilled shafts

### 1. 서 론

최근 장대교량, 초고층 빌딩 등 상부 구조물의 하중이 커짐에 따라 큰 하중을 지지할 수 있고 침하량을 최소화 할 수 있는 현장타설말뚝의 적용이 증가되고 있는

추세이다. 또한 최근의 대구경 현장타설말뚝의 경우 단단한 암반에 근입되어 지반의 지지력이 말뚝의 재료강도보다 큰 경우가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 강관-콘크리트 합성거동을 고려하여 말뚝재료의 강도 및 변형 특성을 향상시키고자 하는 연구가 진행 중이다(한국

1 정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, KICT.)

2 정회원, 한국건설기술연구원 기획조정처 차장 (Member, Director, Planning & Coordination Department, KICT.)

3 정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, KICT.)

4 정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, KICT., leejh73@kict.re.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

건설기술연구원, 2009, 2010). 강관합성 현장타설말뚝은 굴착시 공벽 보호를 위해 사용되는 강관 케이싱을 구조재로 고려하여 내부에 콘크리트를 채운 합성말뚝으로 외부 강관이 내부 콘크리트의 변형을 억제하여 말뚝의 강도를 증가시키고 연성파괴를 유도하는 보강효과를 발휘하는 것으로 보고되고 있다(이주형 등, 2010). 따라서 수평하중을 받는 강관합성말뚝은 일반적인 현장타설말뚝에 비하여 동일한 하중에 대하여 더 큰 저항력과 변위억제 효과를 발휘할 수 있을 것이다. 그러나 아직까지 강관합성말뚝의 보강효과 및 수평거동에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다.

수평하중을 받는 말뚝의 거동을 평가하는 방법에는 탄성지반반력법, p-y 곡선법, 유한요소법 등이 있다. 유한요소법의 경우에는 다양한 해석 모델을 적용하여 말뚝과 지반의 고유한 재료특성을 반영할 수 있는 장점이 있으나, 해석에 사용되는 지반의 변형특성을 적절히 평가하기 어렵고, 지반과 말뚝의 모델링과 경계조건 등이 복잡하다. 반면, 탄성지반반력법과 p-y 곡선법은 지반의 연속성이 무시되나 해석에 필요한 입력정수가 상대적으로 적고 간편하게 해석할 수 있어, 일반적으로 수평하중을 받는 말뚝의 해석은 이들 방법이 주로 이용되고 있다. 탄성지반반력법은 말뚝을 탄성지반에 지지된 보로 가정하여 지반에 묻힌 말뚝의 휨 변형을 해석하는 방법으로, 지반의 강성이 일정한 것으로 가정한 Chang(1937)의 방법이 널리 이용되고 있다. 지반의 강성이 깊이에 따라 변화하는 경우에는 유한차분법을 활용한 말뚝의 p-y 곡선을 이용한다. 이 방법들의 해석 결과를 결정하는 가장 중요한 입력값인 지반의 강성 특성은 말뚝의 폭이 고려된 지반반력계수를 이용한다. 지반반력계수는 지반의 탄성적 거동을 표현한다는 의미에서 지반의 탄성계수와 유사하나, 지반의 탄성계수는 지반상태에 따라 일정한 값을 가진다. 그러나, 지반반력계수는 같은 지반이라도 깊이에 따라 달라지며, 기초와 같은 지반구조물의 크기, 형상 등에 따라 변화되는 복잡한 성질을 가진 정수이다. 따라서 이를 어떻게 결정하느냐 하는 것은 매우 어려운 문제이며, 말뚝의 수평변위를 평가하는데 있어서 정확한 지반반력계수를 평가하는 것은 매우 중요한 문제라 할 수 있다(이용안 등, 2010). 또한, 규모가 큰 말뚝일 때 사용하는 지반반력계수에 대해서는 실물 재하시험을 수행하기 곤란하기 때문에 충분한 연구가 되어 있지 못하므로 경험에 의하여 지반반력계수를 결정하는 경우가 많다.

본 연구는 강관합성 현장타설말뚝의 수평거동 평가를 위한 기초연구로서, 다양한 해석적 방법들을 이용하여 말뚝 머리의 수평하중-변위를 예측하고, 대상 말뚝의 수평재하시험 결과와 비교·분석하였다. 해석에 사용된 지반반력계수는 공내재하시험, 표준관입시험 등을 통하여 산정하였으며, 지반반력계수 산정방법 및 말뚝의 변위 해석 방법에 따른 말뚝 머리의 수평거동 예측 결과의 차이를 분석하였다. 이를 통하여 말뚝 머리의 수평거동을 효과적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 수평하중을 받는 말뚝의 해석

### 2.1 탄성지반반력법

탄성지반반력법은 지반을 일련의 독립된 탄성스프링으로, 말뚝을 탄성지반에 지지된 보로 가정하고 하중 재하에 따른 말뚝 변위를 평가하는 방법으로서, 지반의 변형특성을 반영하는 지반반력계수를 이용하여 말뚝의 수평거동을 평가하는 방법이다. 스프링에 지지된 탄성보에 작용하는 하중에 대한 휨의 지배방정식을 적용하면 식 (1)과 같이 수평하중을 받는 말뚝에 대한 지배방정식을 구할 수 있다.

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} + k_h y = 0 \quad (1)$$

여기서,  $E_p$ 와  $I_p$ 는 각각 말뚝재료의 탄성계수 및 단면 2차 모멘트이며,  $k_h$ 는 수평방향 지반반력계수이고,  $z$ 와  $d$ 는 각각 깊이와 말뚝의 폭이다. 식 (1)의 해를 결정하는 가장 중요한 정수는  $k_h$ 로서,  $k_h$ 를 지반조건이 일정한 상수로 적용하여 기본 해를 도출하거나, 깊이 및 변위에 따른 변수로 적용하여 해를 도출할 수 있다. Chang(1937)의 방법은 가장 널리 이용되는 선형 탄성지반반력법으로서 식 (1)에 대한 일반해에 경계조건이 주어지면 표 1과 같이 수평하중을 받는 자유단 또는 구속단 말뚝에 대한 변위 및 모멘트의 해를 얻을 수 있다. 여기서,  $H$ 는 수평력이며,  $\beta$ 는 말뚝과 지반의 강성에 따른 특성치이다.

한편, 표준관입시험에 의한 저항치로부터 수평 지반반력계수를 산정하는 경험식들은 여러 연구자에 의하여 제안되어 왔다. Yokoyama법은 직경이 30cm 이상인 말뚝의 수평재하시험으로부터 얻은 말뚝 머리 또는 지표면에서의 하중-변위곡선 및 실측 변형률로부터 지반

표 1. 수평하중을 받는 말뚝의 해(Chang, 1937)

말뚝머리 조건	매몰된 말뚝		돌출된 말뚝	
	자유단	구속단	자유단	구속단
말뚝머리의 휨모멘트, $M_0$	0	$\frac{H}{2\beta}$	0	$\frac{H}{2\beta}(1+\beta h)$
지중 최대 휨모멘트, $M_{max}$	$-0.3224 \frac{H}{\beta}$	$-0.104 \frac{H}{\beta}$	$-Hh \frac{\sqrt{(1+\beta h)^2+1}}{2\beta h} \exp\left(-\tan^{-1} \frac{1}{1+2\beta h}\right)$	$-Hh \frac{\sqrt{(1+\beta h)^2+1}}{2\beta h} \exp\left(-\tan^{-1} \frac{1}{\beta h}\right)$
$M_{max}$ 의 발생 깊이, $L_m$	$\frac{\pi}{4\beta} = \frac{0.785}{\beta}$	$\frac{\pi}{2\beta} = \frac{1.571}{\beta}$	$\frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1}{1+2\beta h}$	$\frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1}{\beta h}$
말뚝머리의 변위, $y_0$	$\frac{H}{2H\beta^3} = \frac{2H\beta}{k_h B}$	$\frac{H}{4H\beta^3} = \frac{H\beta}{k_h B}$	$\frac{H\beta^3}{3EI} = \frac{(1+\beta h)^3+0.5}{(\beta h)^3}$	$\frac{H\beta^3}{12EI} = \frac{(1+\beta h)^3+2}{(\beta h)^2}$
지표면의 말뚝변위, $y_{GL}$	$y_{GL} = y_0$	$y_{GL} = y_0$	$\frac{H\beta^3}{2EI} \frac{1+\beta h}{(\beta h)^3}$	$\frac{H\beta^3}{4EI} \frac{1+\beta h}{(\beta h)^3}$
제 1 부동점 깊이, $L_0$	$\frac{\pi}{2\beta} = \frac{1.571}{\beta}$	$\frac{3\pi}{4\beta} = \frac{2.356}{\beta}$	$\frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1+\beta h}{\beta h}$	$\frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1+\beta h}{\beta h - 1}$

여기서,  $\beta = \sqrt[3]{k_h B / 4EI}$

표 2. N값과 수평 지반반력계수의 관계식

구분	제안식	비고
Yokoyama법	$k_h = N/5$	단위 : kgf/cm <sup>3</sup>
Hukuoka법	$k_h = 0.691 N^{0.406}$	
이송 등(2001)	$k_h = 0.29 N^{0.8509}$	

반력계수를 역산하여, 지표면에서의 특성장  $1/\beta$ 까지의 구간 평균 N값의 관계로부터 수평 지반반력계수를 제안하였다. 또한 Hukuoka법은 공내재하시험을 이용하여 수평 지반반력계수를 결정하고 N값과의 관계를 경험적으로 제시하였다. 국내에서는 이송 등(2001)이 수평재하시험 및 L-PILE 프로그램을 역해석하여 수평 지반반력계수를 결정하고 N값과의 관계식을 제안하였다. 이상과 같이 경험적 N값에 의한 수평 지반반력계수 제안식들을 표 2에 정리하였다.

### 2.2 p-y 곡선법

하중의 증가에 따라 말뚝의 변위가 커지게 되면 지반이 항복에 도달하며, 이때 말뚝변위와 지반반력의 관계는 일반적으로 비선형성을 나타낸다. 이러한 말뚝과 지반의 비선형 관계는 p-y 곡선을 통하여 나타낼 수 있다. 이 방법은 지반의 비선형성, 깊이에 따른 지반반력계수의 변화, 지반의 성층 구조를 고려할 수 있는 장점이 있으나, 지반을 대표하는 p-y 곡선의 산정이 쉽지 않다(조천환, 2010). 이에 따라 많은 연구자들에 의하여 다양한 지반과 하중조건을 고려한 p-y 곡선이 제안되어 왔으며, 현재까지 제안된 대표적인 p-y 곡선은 표 3에 나타내었으며, 이 방법은 L-PILE과 같은 대표적인 상용 프로그

표 3. p-y 곡선의 종류(LPILe plus 5.0 Manual, 2004)

지반의 종류와 상태	제안자
지하수위 하부 연약 점토층	Matlock(1970)
지하수위 하부 굳은 점토층	Reese 등(1975)
지하수위 상부 굳은 점토층	Welch and Reese(1975)
사질토층	Reese 등(1975)
c-φ 토체	Evans and Duncan(1982)
경암	Nyman(1980)
연암	Reese(1997)

램을 이용하여 널리 사용되고 있다.

### 2.3 공내재하시험 결과를 이용하는 방법

공내재하시험은 토사 및 암반의 응력-변형을 관계로부터 기초지반의 변형특성을 파악하고, 수평방향 하중을 받는 구조물의 해석에 필수적인 지반의 수평방향 지지력계수를 산정하기 위하여 실시한다. 공내재하시험에 사용하는 프레스미터는 유한한 길이를 가지는 프루브(probe)가 팽창하면서 지반에 수평방향 하중을 가하게 되는데, 이러한 메커니즘은 수평하중을 받는 말뚝을 유한한 요소로 분할했을 경우, 하나의 요소에 작용하는 유한길이 및 하중상태와 유사하다. 다만 프레스미터는 방사방향으로의 하중과 변형이 발생하고, 수평하중을 받는 말뚝은 하중 작용방향을 따라 주동영역과 수동영역의 하중과 변형이 프레스미터 시험과 다르게 발생한다. 그러나, 공내재하시험은 말뚝의 수평방향 거동과 가장 유사한 현장시험법이라 할 수 있으며, 선굴착 방식의 공내재하시험은 보링공을 먼저 굴착한다는 점에서 본 연

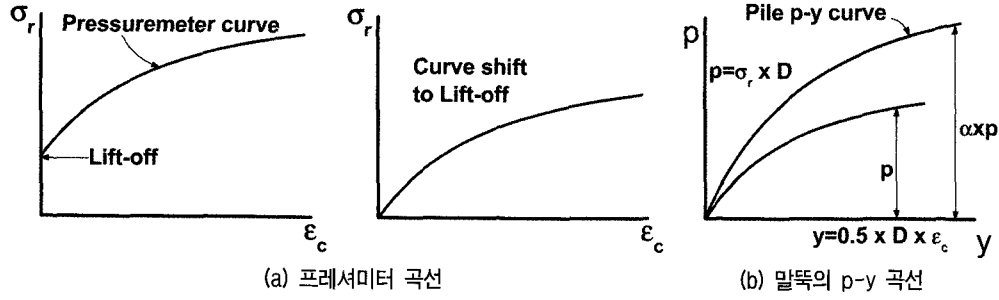


그림 1. 프레스미터 곡선에 의한 말뚝의 p-y 곡선 작성법(Hughes 등, 1979)

구와 같은 현장타설말뚝의 형성과정과 유사하다고 할 수 있다. 이러한 점에 착안하여 Hughes 등(1979)은 실측된 프레스미터 곡선을 말뚝의 p-y 곡선에 적용하기 위하여 그림 1과 같이 보정계수  $\alpha$ 를 이용하는 경험적 방법을 제안하였다.  $\alpha$ 는 수평하중을 받는 말뚝의 지반반력이 프레스미터의 지반반력보다 크다는 사실에 대한 경험적 계수이다. Robertson 등(1986)은 토질조건에 따라 점착성 흙의  $\alpha$ 는 2.0, 비점착성 흙의  $\alpha$ 는 1.5를 제시하였다.

Suyama 등(1982)은 선굴착 방식의 수평 공내재하시험(Lateral Load Test, LLT) 결과를 직접적으로 이용하여, 수평하중을 받는 말뚝의 변위를 예측하고 지반반력계수를 다음과 같이 제안하였다.

$$k_s = 0.5\pi [2r_0(r_m - r_0)^2]^{0.25} \left( \frac{P_f - P_0}{r_f - r_0} \right) \quad (2)$$

여기서,  $r_0$ 는 공동의 초기반경이며,  $r_f$ 는 항복압력 상태에서의 공동의 반경이다.  $p_0$ 와  $p_y$ 는 각각,  $r_0$ ,  $r_f$ 에서의 정지압력, 항복압력을 나타내고,  $r_m = (r_f + r_0)/2$ 이다. 보다 신뢰성 있는 말뚝의 하중-변위 관계를 산정하기 위해서는 상대적으로 변위가 큰 상부 층의 지반반력계수를 이용한다(Clarke 등, 1995). 말뚝이 여러 개의 요소로 분할되고 각 요소에 접한 지반 층에 대한 지반반력계수( $k_s$ )가 결정되면, 말뚝의 직경( $B$ )을 고려한 등가 지반반력계수( $k_e$ )를 다음과 같이 산정한다.

$$k_e = k_s / B^{0.25} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 말뚝의 해석에 이용되는 지반반력계수( $k_d$ )는 변위( $y_i$ )의 증가에 따라 식 (4)와 같이 산정된다.

$$k_d = k_e / y_i^{0.5} \quad (4)$$

이상과 같이 구한 지반반력계수를 이용하여 Suyama

등(1982)은 Chang(1937)의 방법에 따라 표 1에 나타낸 바와 같이, 돌출된 말뚝의 해석방법에 의한 말뚝의 수평 변위 평가방법을 제안하고 있다. 일본 도로협회는 식 (4)와 동일한 말뚝의 지반반력계수( $k_d$ )를 제안하고 있다. 그러나, 식 (4)에서  $k_e$ 의 산정 방식은 Suyama 등(1982)이 제안한 식 (3)과 달리 다음의 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$k_e = \alpha \cdot E_0 / B^{0.75} \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는 보정계수로서 0.8을 사용하고, 지반의 탄성계수  $E_0$ 는 공내재하시험에 의한 값을 사용한다. 한편, Chen 등(1961)은 공내재하시험으로부터 구한  $E_0$ 를 이용하여 선형 지반반력계수를 식 (6)과 같이 제안하였다.

$$k_h = \alpha \cdot E_0 / B \quad (6)$$

여기서,  $\alpha$ 는 보정계수로서, 사질토 지반과 점성토 지반에 따라 각각 3.0과 1.6을 제안하였다. 국내의 구조물 기초 설계기준(2003)에서는 식 (6)의 보정계수 3.3을 적용하여 사질토에 대한 수평 지반반력계수 추정방법을 제시하고 있다. 또한 도로교 설계기준(2008)에서는 다음과 같은 식 (7)이 제안되고 있다.

$$k_h = k_{h0} (B_H / 30)^{-3/4} \quad (7)$$

여기서  $k_{h0}$ 는 지름 30cm의 강체 원판에 의한 평판재하시험에 의한 값에 상당하는 수평방향 지반반력계수로서  $k_{h0} = 0.33 \cdot \alpha \cdot E_0$ 로 제시하고 있으며,  $E_0$ 는 공내재하시험에 의한 탄성계수를 사용할 경우,  $\alpha$ 는 0.4를 제시하고 있다. 또한  $B_H$ 는 하중 작용방향에 직교하는 기초의 환산 재하폭으로서 기초의 형식에 따라 달라지며, 말뚝기초의 경우에는  $B_H = (B/\beta)^{1/2}$ 의 식으로 산정된다. 여기서,  $B$ 는 말뚝의 직경이며,  $\beta$ 는 표 1에 나타낸

말뚝의 특성값이다.

### 3. 수평재하시험 결과

#### 3.1 말뚝의 제원 및 지반조건

시험말뚝은 강관내부에 철근망과 콘크리트를 타설한 철근콘크리트 강관합성 현장타설말뚝(Case 1)과 강관의 철근망 대체효과를 고려하여 강관내부에 철근망을 제외하고 콘크리트만 타설한 무근콘크리트 강관합성 현장타설말뚝(Case 2) 2본이다. 외부 강관은 STK490  $\phi 508-9t$ 를 사용하였으며, 말뚝의 외경은 강관이 근입되는 부분은 0.508m이고 강관없이 오거굴착만 수행된 부분은 0.430m이다. 내부의 콘크리트는 국내 현장타설말뚝 시공시 일반적으로 사용되는 설계강도 35MPa를 적용하였으며, 실제 재령 60일인 공시체에 대한 압축강도 실험 결과 41.5MPa로 나타났다. Case 1의 경우, 내부 철근망의 주철근 면적비는 말뚝 단면적에 대하여 1.19%를 적용하였다.

각각의 말뚝은 5m 이격되어 시공되었으며, 시험말뚝의 위치에서 수행된 표준관입시험 결과와 시험말뚝의 간략한 제원은 그림 2에 나타내었다. 본 연구에서의 재하시험을 수행한 장소는 인천의 매립지반으로서, 지표면으로부터 약 1.7m 두께의 사석 및 자갈이 혼재된 매

립층이 존재하고, 그 하부에 약 3.2m 두께의 실트질 모래층, 그리고 그 하부로 연암층과 경암층이 존재한다.

#### 3.2 공내재하시험 결과

N값이 평균 8 정도인 상부 매립층에 대해서는 3.0m 깊이에서 LLT를 적용하였으며, N값이 50 이상인 실트질 모래층에 대해서는 5m 깊이에서 일라스트미터-200 (Elastmeter-200)을 적용하였다. LLT는 프루브를 시추공 내에 삽입하고 질소가스 압력으로 고무막 내에 물을 주입시켜 고무막을 팽창시킨 후, 이 때 가한 압력과 팽창량과의 관계로 지반의 응력-변형 특성을 파악할 수 있는 대표적인 저압형 프레스미터 장비이다. 일라스트미터-200은 기계식 프루브의 종류에 따라 풍화토에서 경암까지 비교적 넓은 범위의 지반에 적용이 가능하다. 그러나, 가압한계가 약 20MPa에 불과하기 때문에 현실적으로 연암, 경암에서는 정량적인 결과를 확보하기 어렵다는 단점이 있다. 그림 3은 각각의 위치에서 수행된 공내재하시험 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 지반의 정지압력( $P_s$ )을 평가하기 위하여, 그림 3의 결과에서 초기 가압시 프루브의 체적변화가 일정하게 유지되기 시작하면서 압력-변위곡선이 선형적으로 증가되기 시작하는 상태를 선굴착으로 느슨해진 교란된 공벽이 프루브 압력에 의해 충분히 압축된 상태로 간주하였으며, 이

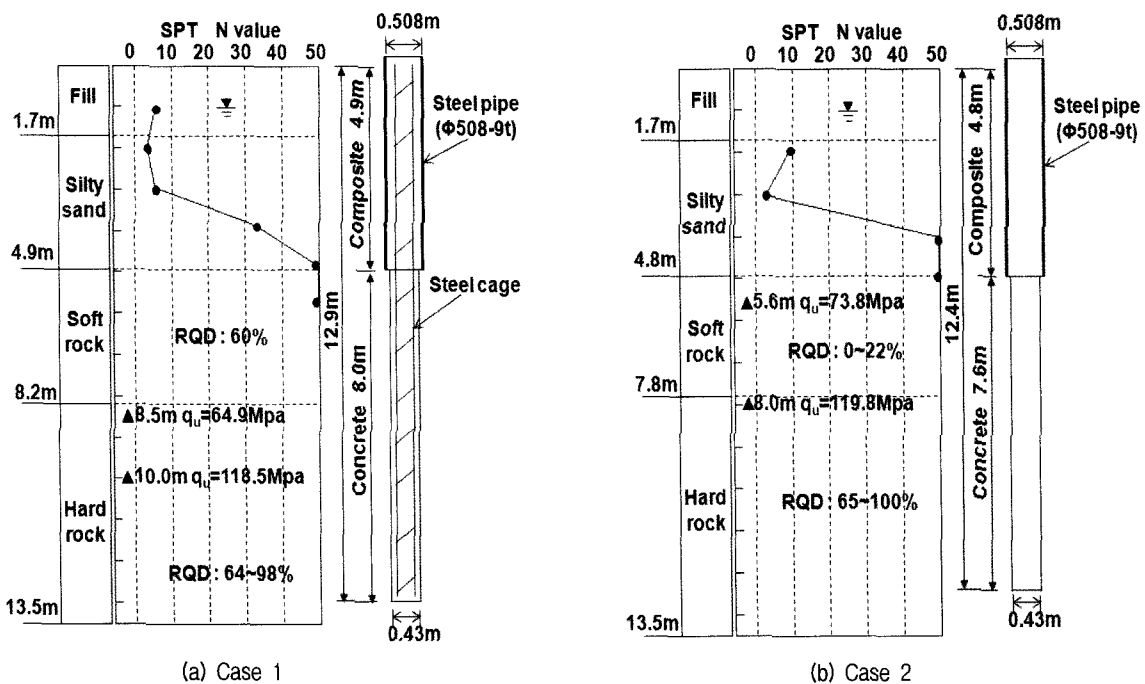
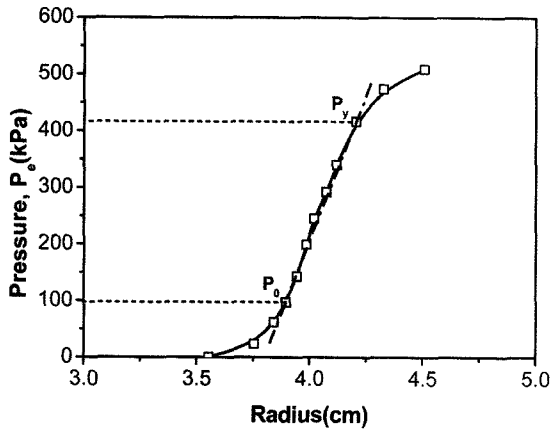
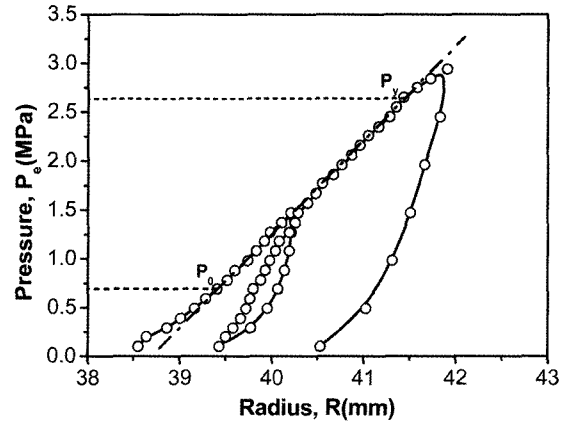


그림 2. 말뚝의 제원 및 지반조건



(a) 3m 깊이의 LLT



(b) 5m 깊이의 Elastometer-200

그림 3. 공내재하시험에 의한 압력-변위 곡선

표 4. 공내재하시험 결과

구분	LLT	Elastometer-200	비고
정지압력( $P_0$ )	0.097(MPa)	0.69(MPa)	
항복압력( $P_y$ )	0.42(MPa)	2.65(MPa)	
평균반경( $r_m$ )	40.5mm	40.42mm	$r_m = (r_0 + r_y)/2$
포아송비( $\nu$ )	0.4	0.35	추정
수평지반반력계수( $k_h$ )	97.8(MN/m <sup>3</sup> )	970(MN/m <sup>3</sup> )	$k_h = (P_y - P_0)/(r_y - r_0)$
탄성계수( $E_0$ )	5.5MPa	52.4MPa	$E_0 = (1 + \nu) \cdot r_m \cdot k_h$

때의 압력을 원지반의 초기 수평응력으로 가정하였다. 표 4는 공내재하시험에 의한 수평 지반반력계수 및 탄성계수를 나타내었다.

### 3.3 수평재하시험에 의한 말뚝머리의 거동

수평변위는 말뚝과 지표면이 만나는 지점과 이 지점에서 말뚝 상부로 약 90cm 떨어진 지점에 각각 LVDT를 설치하여 말뚝의 수평변위를 측정하였다. 그림 4는 각 지점에서 측정된 변위의 평균값을 취하여 수평하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. Case 1과 Case 2 말뚝 모두 69kN의 재하하중 단계에서 내부 콘크리트의 소성변형이 발생하는 것으로 판단되어 하중을 제거하였다. Case 1의 경우, 재하하중 54kN 단계에서 하중의 증가없이 큰 변위가 발생하였다가, 다음 하중 단계에서 다시 일정한 하중-변위 곡선을 나타내었는데, 이는 54kN 하중단계에서 기준대(reference beam)의 움직임 등과 같은 외부요인에 의한 측정오차로 판단된다. 따라서 Case 1 말뚝의 실제 하중-변위 거동은 그림 4의 점선으로 나타낸 궤적을 따를 것으로 판단되며, Case 1의 경우 점선으로 표시

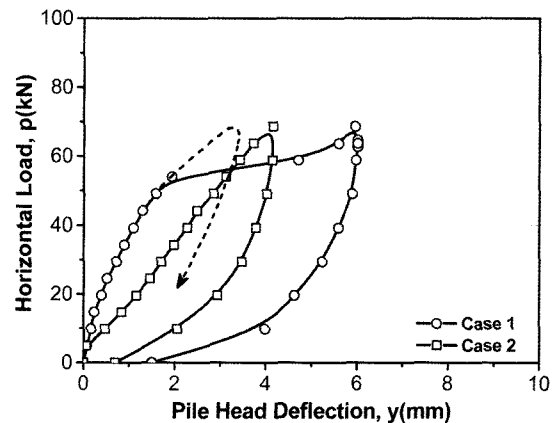


그림 4. 수평재하시험에 의한 말뚝머리의 하중-변위 곡선

한 하중-변위 곡선을 기준으로 말뚝의 수평거동을 분석하였다.

그림 4에서 나타낸 바와 같이 동일한 지반조건에서 Case 2 말뚝이 Case 1에 비하여 동일 수평하중에서 수평변위량이 크게 발생하였다. 이는 다음의 표 5에 나타낸 바와 같이 철근의 유무에 따른 말뚝재료의 강성에 의한 차이로 판단된다.

#### 4. 말뚝의 수평변위 해석법 비교·분석

##### 4.1 말뚝 및 지반의 강도정수

수평하중을 받은 말뚝의 수평변위 해석을 위해서는 말뚝과 지반의 강도정수가 필요하다. 본 연구에서 사용한 탄성지반반력법이나 p-y 곡선법 등은 유한요소법과 달리 말뚝을 구성하는 각 요소를 분리하여 각각의 고유한 재료특성을 입력할 수 없다. 따라서 본 연구의 해석대상인 강관합성 현장타설말뚝의 경우, 강관-콘크리트 합성부분에 대하여 강관, 철근, 콘크리트의 면적비를 고려한 등가 탄성계수를 산정하여 적용하였다. 또한, 본 연구에 사용한 각 해석법들에 필요한 지반정수들은 현장에서 실시한 표준관입시험에 의한 N값과 공내재하시험에 의한 탄성계수 및 지반반력계수를 이용하였다. 표 5에 해석에 필요한 말뚝 및 지반의 입력정수들을 정리하였다.

##### 4.2 선형 탄성지반반력법에 의한 수평하중-변위 분석

일반적으로 깊이에 따라 지반의 강성이 증가하는 층상지반인 경우, 말뚝의 수평변위는 대부분 상부 층의 영향을 받게 된다. 따라서, 본 연구의 말뚝머리 하중-변위 곡선의 해석에 대하여, 탄성지반반력법과 공내재하시험 결과를 직접 이용하는 방법은 상부 층의 표준관입시험 및 공내재하시험 결과만을 이용하였으며, 다층지반의 모델링이 가능한 p-y 곡선법은 그림 2의 시추주상도를 참고하여, 강관이 합성된 4.8-4.9m를 경계로 2층 지반으로 나누고, L-PILE 프로그램을 이용하여 해석하였다.

그림 5에서는 말뚝의 수평재하시험 결과와 Chang(1937)의 방법으로 해석한 결과를 비교하였다. 그림 5에서 두 말뚝의 선형 탄성지반반력법에 의한 해석결과는 거의 동일하게 나타났는데, 이와 같은 이유는 말뚝의 강성은 차이가 있으나, 이를 반영하는 말뚝의 특성값  $\beta$ 는 큰 차이를 나타내지 않았기 때문으로 판단된다. 한편, N값에 의한 Yokoyama법, Hukuoka법 및 이송 등(2001)에 의하여 제안된 지반반력계수를 적용한 하중-변위 곡선은 실제 말뚝의 수평변위를 매우 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 반면, 공내재하시험에 의하여 산정된 탄성계수를 이용하고, 말뚝의 폭을 고려한 Chen(1961)의 제안식, 도로교 설계기준 해설(2008), 구조물 기초 설계기준(2003)에 의한 지반반력계수를 적용한 하중-변위 해석결과는 상대적으로 재하시험 결과에 근접하는 결과를 나타내고 있다. 전반적으로 이들 방법은 말뚝의 수평거동을 예측하기 어려우나, 말뚝 직경의 1% 수평변위에서 허용하중을 결정할 경우, 도로교 설계기준 해설(2008)의 제안식이 비교적 적합한 것으로 판단된다.

##### 4.3 비선형 탄성지반반력법에 의한 수평하중-변위 분석

그림 6은 지반반력계수를 변위의 함수로 나타낸 일본 도로협회의 제안식, Suyama 등(1982)의 제안식, Reese (1976)의 사질토 모델을 이용한 p-y 곡선법(L-PILE 프로그램) 등에 의한 말뚝머리의 하중-변위곡선을 수평재하시험 결과와 비교한 것이다. Suyama 등(1982)이 제안한 방법에서 상부 층의 등가 지반반력계수는 Chen(1961)의 지반반력계수와 거의 동일하게 평가되었으나, 해석에 적용한 지반반력계수는 변위의 함수로 식 (4)와 같이

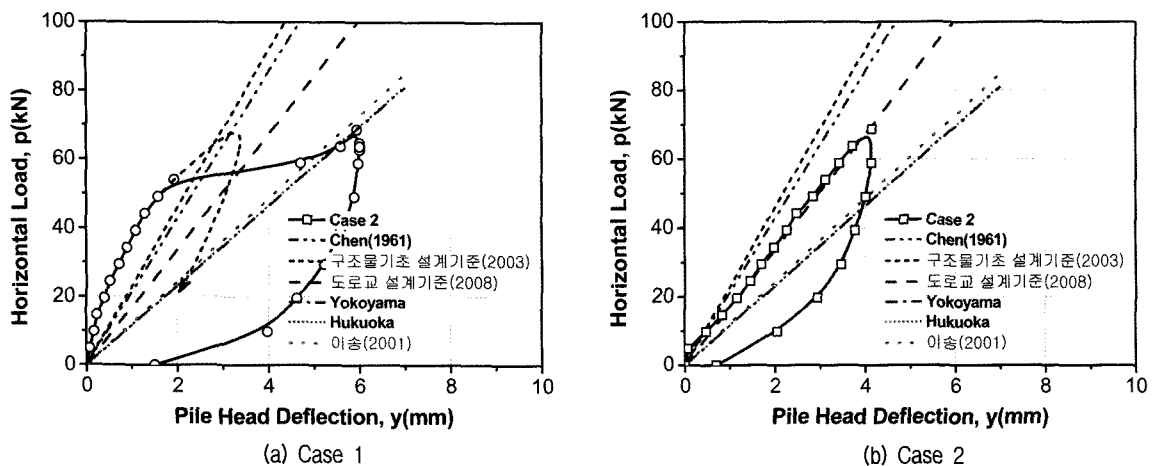
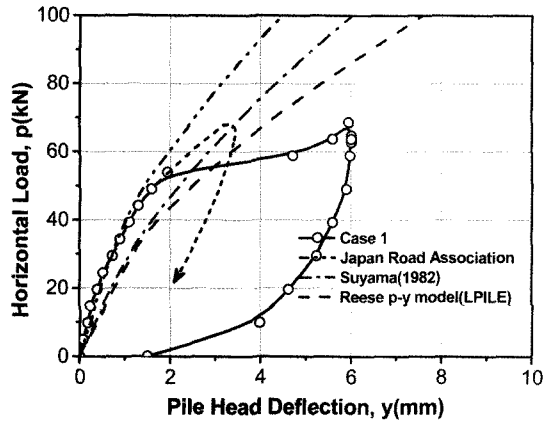
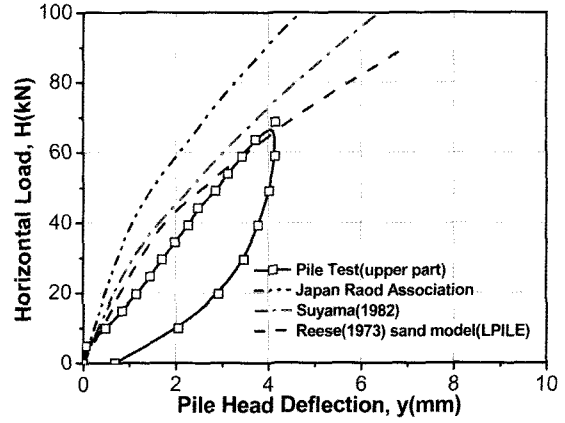


그림 5. 말뚝머리의 수평하중-변위 곡선 및 선형 지반반력 해석결과 비교

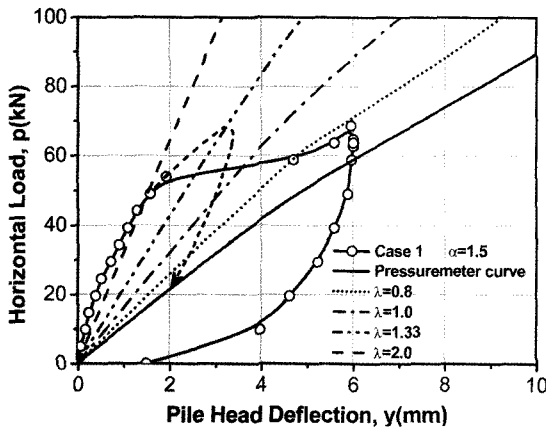


(a) Case 1

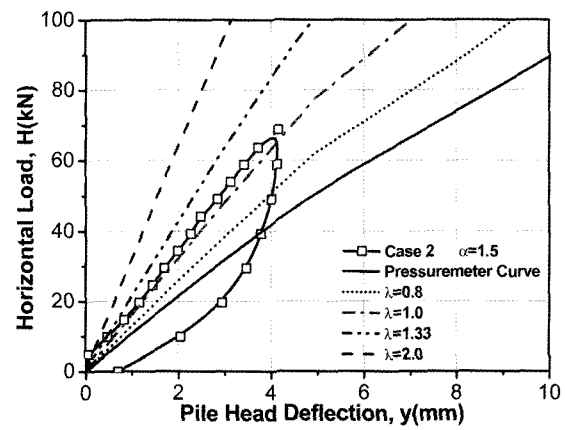


(b) Case 2

그림 6. 말뚝머리의 수평변위 및 비선형 지반반력 해석결과 비교



(a) Case 1



(b) Case 2

그림 7. 말뚝머리의 수평변위 및 프레스미터 곡선 해석결과 비교

표현되어, 하중-변위의 비선형 거동을 실질적으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 일본 도로협회의 제안식의 경우, 식 (5)와 같이 산정된 등가 탄성계수가 Suyama 등(1982)의 등가 탄성계수에 비하여 크게 산정되어 결과적으로 하중-변위곡선이 가파르게 나타났다. 한편, 사질토 Reese(1973) 모델을 적용한 p-y 곡선법의 경우, Suyama 등(1982)의 방법과 유사한 초기 수평거동을 보이고 있으나, 변위의 증가에 따라 동일한 하중에서 더 큰 변위를 나타냄을 알 수 있다. 그림 6에 나타낸 바와 같이, Case 1의 경우에는 일본 도로협회에서 제안한 방법이 초기의 수평하중-변위 곡선과 가장 잘 일치하는 것으로 나타났으며, Case 2의 경우에는 적용한 모든 방법들이 초기의 수평하중-변위 거동을 과대평가하는 것으로 나타났다. 그러나, 두 Case 모두, 말뚝 직경의 1%(5mm) 변위에서 허용 수평하중을 결정할 경우에는 Suyama 등(1982)의 방법이나 p-y 곡선법에 의한 평가방법이 신뢰

성을 가지는 것으로 판단된다.

#### 4.4 공내재하시험 곡선을 이용한 수평하중-변위 분석

그림 7은 Hughes 등(1979)이 제안한 프레스미터 곡선에 의한 말뚝 머리의 수평하중-변위 곡선과 수평재하시험 결과를 비교한 결과이다. 그림 3(a)의 프레스미터 곡선에서 초기의 느슨한 부분은 선굴착에 의한 응력 이완을 나타낸다. 따라서, 정지압력( $P_0$ ) 상태를 원점으로 설정하여 하중과 변위를 보정하였다.

그림 1(b)의 계수  $\alpha$ 는 말뚝의 지반반력이 프레스미터의 지반반력보다 크다는 사실에 대한 경험적인 값으로 지반의 조건에 대한 보정상수이다. 그러나, 이 방법은 말뚝의 크기(직경)는 반영되나, 재료적인 특성은 고려되지 않는다. 따라서 프레스미터 곡선을 말뚝의 수평하중-변위 곡선에 직접 적용하기 위해서는 말뚝의 재료특성



에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다. 비록 말뚝 2본에 대한 한정된 결과이긴 하나, 본 연구에서 수행한 말뚝의 수평재하시험 결과에서 보이는 바와 같이, 철근 보강 유무에 따른 강관합성 현장타설말뚝의 강성 차이에 의하여 서로 다른 초기 거동을 나타내었다(그림 4). 따라서 Robertson 등(1986)이 제안한 지반에 대한 계수  $\alpha$  외에 말뚝의 재료 특성에 대한 계수  $\lambda$ 를 도입하여, 그림 1(b)에서와 같이 말뚝의 수평하중을 프레스미터 하중에 대하여 식 (8)과 같이 보정하였다.

$$P_{pile} = \alpha \cdot \lambda \cdot P_{pressuremeter} \quad (8)$$

그림 7에서  $\alpha$ 는 Robertson 등(1986)이 사질토에 대하여 제안한 1.5를 적용하였으며,  $\lambda$ 는 0.8 - 2.0까지 변화시키며, 각 말뚝의 수평재하시험에 의한 말뚝머리의 하중-변위 곡선과 비교하였다. 그 결과, Case 1의 철근콘크리트 강관합성말뚝과 Case 2의 무근콘크리트 강관합성말뚝의 초기 수평거동은 각각  $\lambda$ 를 2.0과 1.0을 적용하여 산정한 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 반면, 허용 수평하중을 말뚝 직경의 1%(5mm) 변위에서 결정할 경우, Case 1의 철근이 보강된 강관합성 현장타설말뚝에 대한  $\lambda$ 는 1.33, Case 2의 무근 콘크리트 강관합성 현장타설말뚝에 대한  $\lambda$ 는 1.0이 적정한 것으로 평가되었다.

이 방법은 현장타설말뚝의 형성과정 및 수평적 거동이 역학적으로 유사한 프레스미터 곡선을 직접 이용한다는 점에서 매우 실용적이다. 따라서, 말뚝재료의 강성에 대한 보정계수를 도입하면, 프레스미터 곡선을 직접 적용하여 다양한 재료로 이루어진 말뚝에 대한 수평하중-변위를 간편하고 합리적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서는 강관합성 현장타설말뚝 2본의 수평재하시험 결과에 제한되어 있어, 추후 다양한 말뚝의  $\lambda$ 에 대한 매개변수의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 수평하중을 받는 강관합성 현장타설 말뚝에 대하여 탄성지반반력법, p-y 곡선법, 공내재하시험 결과를 직접 이용하는 방법 등을 통하여 말뚝 머리의 하중-변위 거동을 평가하고 수평재하시험 결과와 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 동일한 지반조건에서 철근이 보강 콘크리트 강관합성 현장타설말뚝(Case 1)이 무근 콘크리트 강관합성 현장타설말뚝(Case 2)에 비하여 수평저항력이 큰 것으로 나타났다.
- (2) 표준관입시험 N값에 의한 지반반력계수를 적용한 Chang(1937)의 탄성지반반력법은 말뚝의 초기 수평변위 거동을 과소평가하여 말뚝의 수평거동을 예측하기에 적합하지 않으나, 말뚝 직경의 1% 또는 15mm의 허용 수평변위에서 허용 하중을 결정할 경우, 도로교 설계기준 해설(2008)의 제안식이 비교적 적절한 것으로 판단된다.
- (3) 공내재하시험에 의한 지반반력계수를 직접 이용하고 말뚝의 변위를 고려한 비선형 지반반력계수를 이용하는 Suyama 등(1982)의 방법, 일본 도로협회의 제안식 및 p-y 곡선법은 비교적 말뚝의 비선형 수평하중-변위 거동을 비교적 잘 묘사할 수 있었다. 한편, 허용 수평하중을 말뚝 직경의 1% 또는 15mm의 대변형 상태에서 결정할 경우에는, Suyama 등(1982)의 방법 또는 p-y 곡선법에 의한 평가방법이 적합한 것으로 판단된다.
- (4) 프레스미터 곡선을 직접 말뚝의 p-y 곡선으로 고려하는 방법은 말뚝의 재료적 특성을 전혀 반영할 수 없어 말뚝의 종류에 관계없이 해석적으로 두 말뚝 모두 동일하게 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 말뚝 2본에 대하여 한정되어 있긴 하나, 말뚝의 재료 특성을 반영하기 위한 보정계수  $\lambda$ 를 제안하여, 두 말뚝의 수평거동을 타당하게 평가할 수 있었다. 이와 같이 말뚝재료의 강성에 대한 보정계수를 도입하면, 프레스미터 곡선으로서 다양한 재료로 이루어진 말뚝에 대한 수평하중-변위 거동을 실용적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서는 강관합성 현장타설말뚝에 대한 2본의 말뚝에 제한되어 있어, 추후 다양한 말뚝의  $\lambda$ 에 대한 매개변수 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 ‘고효율 하이브리드 대형기초 공법 개발(IV)’ 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 대한토목학회 (2008), 도로교 설계기준 해설, pp.831-884.
2. 이송, 이장덕, 김태훈 (2001), “수평력을 받는 말뚝의 지반반력계수 평가”, *대한토목학회 논문집*, 제21권 제4호, pp.349-357.
3. 이용안, 이주형, 정문경 (2010), “공내재하시험을 이용한 수평하중을 받는 단말뚝의 해석”, *한국지반공학학회 2010년 춘계 학술발표회*, pp.1051-1060.
4. 이주형, 정문경, 박기석, 김성렬 (2010), “말뚝 재하시험을 이용한 강관합성 현장타설말뚝의 적용성 분석”, *한국지반공학학회 논문집*, 제26권 제11호, pp-111-123.
5. 조천환 (2010), *말뚝 기초 실무*, 이엔지 북, pp.202.
6. 한국건설기술연구원 (2009), *교효율 하이브리드 대형 기초 공법 개발(II)*, pp.129-163.
7. 한국건설기술연구원 (2010), *교효율 하이브리드 대형 기초 공법 개발(III)*, pp.123-178.
8. 한국지반공학학회 (2003), *구조물 기초 설계기준 해설*, pp.347-357.
9. Chang, Y. L. (1937), “Discussion on Lateral Pile Loading Tests”, *ASCE*, Vol.102, pp.272-278.
10. Clarke, B. G. (1995), “Pressuremeters in Geotechnical Design”, *Blackie Academic & Professional*, pp.238-296.
11. Ensoft Inc. (2004), *LPILE plus 5.0 Technical Manual*, pp.36-88.
12. Hughes, J. M. O., Wroth, C. P. and Windle, D. (1979), “Pressuremeter tests in sands”, *Geotechnique*, Vol.27, No.4, pp.455-477.
13. Robertson, P. K., Hughes, J. M. O., Campanella, R. G., Brown, P. and McKeown, S. (1986), “Design of Laterally Loaded Piles Using the Pressuremeter”, *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. Pressuremeter and Its Marine Application*, pp.443-457.
14. Suyama, K., Imai, T. and Ohya, S. (1982), “Development of LLT Pressuremeter and Its Application in Predicted of Pile Behavior under Horizontal Load”, *Proc. Int. Symp. Pressuremeter and Its Marine Application*, pp.61-76.

(접수일자 2011. 10. 10, 심사완료일 2011. 11. 25)