

## 점토지반에서 하중특성 및 연결보조건에 따른 송전철탑용 연결형 말뚝기초의 특성 분석

### Analysis of Characteristics of Connected-pile Foundations for Transmission Tower according to Changes of Load and Connection Beam Conditions in Clay

경 두 현<sup>1</sup> Kyung, Doohyun

이 준 환<sup>2</sup> Lee, Junhwan

백 규 호<sup>3</sup> Paik, Kyuho

김 영 준<sup>4</sup> Kim, Youngjun

김 대 홍<sup>5</sup> Kim, Daehong

#### Abstract

The differential settlement between the foundations causes the critical damage on the transmission tower constructed in soft ground. Connected-pile foundation for transmission tower structures is an option to prevent the differential settlement. It consists of main foundations and connection beams that are placed between the individual foundations at each corner of tower. In this study, 24 model pile load tests were conducted at a construction site in jeonlabuk-do to investigate the effects of the connection beams on transmission tower foundation. In model tests, various load conditions and connection beam conditions were considered. As the test results, the displacements of connected-pile foundation differed in accordance with load directions. The settlements of connected-pile foundation decreased with the increased stiffness of connection beams, lateral load capacity decreased in accordance with load height, and the lateral load capacity on the failure criteria was similar regardless of load direction.

#### 요 지

부등침하는 연약지반에 시공되는 철탑기초에 있어서 주요한 손상을 야기한다. 송전철탑용 연결형 말뚝기초는 연약지반에서의 송전철탑기초의 부등침하를 방지하기 위한 구조물로서, 주기초체와 주기초체 사이에 위치하여 기초를 연결하는 연결보로 구성된다. 본 연구에서는 송전용 철탑기초에 작용하는 연결보의 영향을 조사하기 위하여, 전라북도에 위치한 건설현장에서 24회의 모형재하시험을 수행하였다. 시험에서는 다양한 하중조건과 연결보 조건이 고려되었으며, 시험결과 수평하중에 의한 연결형 말뚝기초의 발생변위가 철탑에 작용하는 수평하중의 각도에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 연결형 기초의 침하는 연결보의 강성이 증가할수록 감소하였으며, 수평지지력은 수평하중이 재하되는 철탑의 높이가 낮을수록 증가하였고, 파괴시점에서의 하중의 크기는 대부분의 경우 하중재하방향에 상관없이 유사한 것으로 나타났다.

**Keywords** : Clay, Connected-pile foundation, Lateral behavior, Model test, Transmission tower

1 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D Candidate, School of civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., School of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-5796, Fax: +82-2-364-5300, E-mail: junlee@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 관동대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Department of Civil Engrg., Kwandong Univ.)

4 비회원, 관동대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Department of Civil Engrg., Kwandong Univ.)

5 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, KEPRI/KEPCO)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

국가경제가 발전하고 국민들의 생활수준이 향상되면서 산업체와 가정에서 사용하는 전기제품이 많아지고, 그로 인한 전력소비량이 매년 큰 폭으로 증가하고 있다. 그 결과 원자력과 함께 태양광 및 풍력 등과 같은 신재생 에너지를 이용한 발전시설이 활발하게 건설되고 있으며, 발전소에서 생산된 전기를 각 수요처로 공급하기 위한 송전선로의 건설도 활발해지고 있다. 송전선로는 전력케이블과 전력케이블을 지지하는 송전철탑 그리고 철탑을 지지하는 기초로 구성되며, 전력의 안정적인 송전을 위해서는 송전철탑과 함께 철탑기초의 구조적인 안전성이 확보되어야 한다. 일반적으로 송전철탑에서는 지반조건에 따라 다른 기초형식을 사용한다. 일례로, 지형이 완만하고 토질특성이 양호한 지반에서는 역T형 기초를 사용하며, 연약지반과 같이 토질특성이 불량하고 가파른 곳에서는 말뚝기초를 사용한다(Kim and Cho, 1995).

국내에는 해안 및 하상지반과 같은 연약지반이 매우 폭넓게 분포하고 있으며, 최근에는 캄보디아, 베트남, 라오스 등 연약지반이 집중적으로 분포된 지역에 송변 전사업의 해외진출이 활발하게 이루어지고 있다. 따라서, 연약지반에서 시공되는 구조물에 적합한 철탑기초에 대한 다양한 연구가 매우 필요하다. 해외에서는 연약지반에 시공되는 철탑기초에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 기초의 지지력을 증가를 도모할 수 있는 다양한 형태의 철탑기초에 대한 연구 또한 활발하게 이루어지고 있다. Rattley et al.(2008)은 연약지반에서 송전철탑의 기초에 사용되는 앵커형 기초와 피라미드 형상의 기초의 인발거동에 대한 실험과 수치해석을 통하여 연약지반에서의 철탑기초의 거동을 확인하였으

며, Merifield et al.(2010)은 연약지반에서 2개의 앵커판을 연결한 다중연결 앵커기초를 사용하여 인발지지력의 증가를 도모하는 연구를 수행한바 있다. 또한, Vanitha et al.(2007)은 그룹말뚝의 선단부에 앵커를 설치하여 인발지지력을 증진시키는 특수한 형태의 기초에 대한 연구를 수행한바 있다.

철탑기초는 기초에 작용되는 하중형식에 따라 연직 하중기초와 모멘트하중기초로 구분되어 사용되고 있다. Fig. 1(a)와 같이 하중이 기초에 연직하중으로 전달되는 경우에는 역T형 기초나 말뚝기초, 앵커기초 등과 같은 연직하중기초를 사용하고, Fig. 1(b)와 같이 철탑 하중이 기초에 휩모멘트로 작용하는 경우에는 매트기초를 사용한다(Jang et al., 2007). 그러나 철탑의 4각부에 위치한 말뚝기초는 철탑에 작용하는 수평하중을 말뚝의 인발력과 압축력에 의해 지지하지만, 연약지반에서는 부등침하로 인한 철탑구조체의 손상을 유발할 수 있고, 매트기초는 부등침하로 인한 철탑부재의 손상을 방지하지만, 수평하중에 대한 지지능력이 작다. 이에 따라 일본과 미국에서는 부등침하에 의한 철탑의 손상 가능성이 존재하는 곳에서는 Fig. 1(c)와 같이 철탑을 지지하는 4각부의 기초를 연결보로 연결한 연결기초의 사용을 추천하고 있다.(TEPCO, 1988; IEEE, 2001). 일례로, 국내에서도 시화호를 가로지르는 345kV ○○ T/L의 경우 4각 철탑기초의 부등침하로 인해 Fig. 2와 같이 송전철탑을 구성하는 부재에 손상이 발생했고, 추가적인 손상을 방지하기 위해 4각 철탑기초를 연결보로 연결하는 보강 공사를 수행한 사례가 있다(KEPCO, 2007).

현재까지 국내에서 이루어진 송전철탑용 연결기초에 대한 설계는 일본동경전력(1988)의 UHV설계기준과 IEEE (2001)의 설계기준을 참고하여 수행되었다. 그러나 UHV

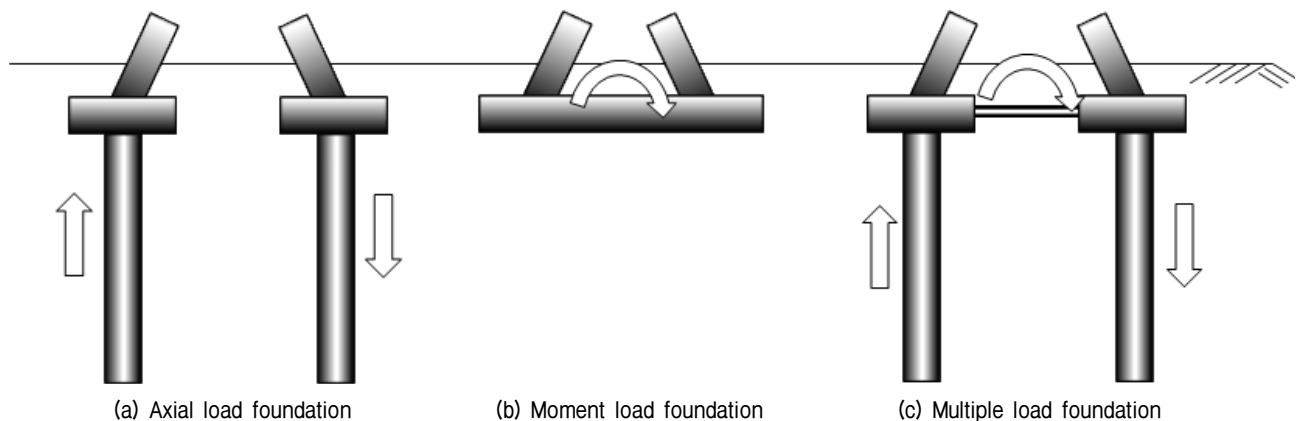


Fig. 1. Types of foundations for transmission tower



(a) Bulking damage for tower members



(b) Reinforcement by connection beam

Fig. 2. Examples of damage and reinforcement for transmission tower due to the differential settlement (KEPCO 2007)

설계기준에서는 모든 연결기초를 강체로 간주함으로써 연결보의 강성에 따른 연결기초의 거동 변화를 고려하지 않고 있으며, IEEE의 설계기준에서도 4각 철탑기초의 부등수평변위를 제어하기 위한 대안으로 연결기초를 제시하고 있을 뿐 연결기초의 형태와 연결보의 강성에 따른 철탑기초의 거동 및 지지력 변화를 고려하지 않고 있다. 뿐만 아니라 국내외적으로 송전철탑용 4각 연결기초의 거동 특성과 관련한 연구결과도 거의 발표된 바가 없으며, 그로 인해 현재까지 연결보의 특성을 고려한 연결기초에 대한 합리적인 설계기준이 정립되지 않고 있다.

본 연구에서는 다양한 하중조건하에서 연결보의 설치 유무와 연결보의 특성변화가 연결기초의 거동 및 하중 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 점토지반에 설치된 모형 4각 철탑기초에 대한 모형수평재하시험을 현장에서 수행하였다. 본 연구에서는 하중재하 높이 및 하중재하각도를 변화시켜 다양한 조건의 하중조건을 모사하고자 하였으며, 인장력에는 저항할 수 있으나 압축 및 휨모멘트에는 저항하지 못하는 연결보(저강성 연결보)와 인장 및 압축력과 휨모멘트에 저항할 수 있으나, 휨변형이 발생하는 연결보(중강성 연결보), 인장 및 압축력과 휨모멘트에 저항할 수 있으나, 휨변형이 발생하지 않는 연결보(고강성 연결보)를 사용하여 실험을 수행하였다. 또한, 실험의 결과를 분석하여 하중특성 및 연결보 조건에 따른 연결형 말뚝기초의 특성을 확인하였다.

## 2. 송전철탑 연결형 말뚝기초의 모형수평재하시험

### 2.1 시험 개요

송전용 철탑기초는 철탑구조물에서 발생하는 하중을

전달받는 구조체로서, 4각에 위치한 각각의 기초체가 피라미드 형상의 철탑구조물에 의하여 구속되어 동시에 거동한다. 송전철탑에 수평하중이 작용하였을 경우 각각의 기초에서는 연직력과 수평력이 동시에 작용하며, 철탑구조물을 구성하는 주각재의 각도 및 기초간의 구속 상태에 따라 다양한 형태의 하중이 발생할 수 있다. 그러나, 송전철탑기초의 설계는 이러한 송전철탑기초의 복합적인 하중의 작용을 반영하지 않고, 기존의 기초구조물의 설계와 같이 단일한 방향의 하중에 대하여 단일한 방향의 거동을 개별적으로 검토하도록 하고 있으며, 송전철탑 기초에 대하여 진행되는 대부분의 연구도 이러한 형태에서 벗어나지 못하고 있다. 그러나, 최근 Richards et al.(2010)은 피라미드형상의 철탑모형체에 수평하중을 재하하여 철탑기초의 거동을 분석하여 보다 실제기초와 유사한 조건에서 철탑기초의 거동을 분석한바 있으며, 본 연구에서도 철탑구조물의 형태를 모사한 피라미드 형상의 상부구조물을 구성하여 기초와 결합하였고, 상부구조물에 수평하중을 재하하여 모형기초에 하중을 전달하는 재하시스템을 사용하도록 하였다. 또한, 본 실험에 사용된 모형기초는 말뚝기초와 매트 결합하여 실제로 사용되는 철탑말뚝기초의 형상과 유사한 형태로 모사하였으며, 기초와 상부구조물은 힌지로 결합하여, 실제의 철탑기초에서 기초판의 주각재와 철탑이 힌지로 결합되는 결합조건을 모사하도록 하였다.

본 연구에서는 총 24회의 모형수평재하실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행된 실험조건은 말뚝기초조건과 연결형 말뚝기초로 구분되며, 각각의 실험에서는 기초에 전달되는 하중의 상태를 다양하게 구현하기 위하여 하중재하높이와 하중재하각도를 다양하게 작용시키

도록 하였다. 본 실험에서는 Fig. 3과 Table 1에 나타난 바와 같이, 하중이 작용하는 재하높이를 기초체의 중심 사이의 거리(L)의 1배, 2배, 3배로 변화시켜가며 시험을 수행하였으며, 재하각도를 0°와 45°로 하여 4각 연결기초와 평행한 방향과 대각선의 방향으로 하중이 작용하도록 하였다.

한편, 연결형 말뚝기초를 구성하는 연결보의 종류는 저장성 연결보, 중강성 연결보, 고강성 연결보로 구분되었다. 각각의 연결보는 압축력과 인장력, 휨모멘트의 저

항 여부와 휨변형의 발생 유무에 따라 각각의 다른 특성을 갖는 연결보를 사용하여 강성 및 저항특성이 다른 조건에서의 연결형 기초의 거동특성을 확인하도록 하였다. 본 실험에서 사용된 연결보는 Fig. 4와 같으며, 각 연결보의 저항특성과 휨강성은 Table 2와 같다.

## 2.2 지반조건

본 연구에서 수행된 수평모형재하시험은 전라북도 익

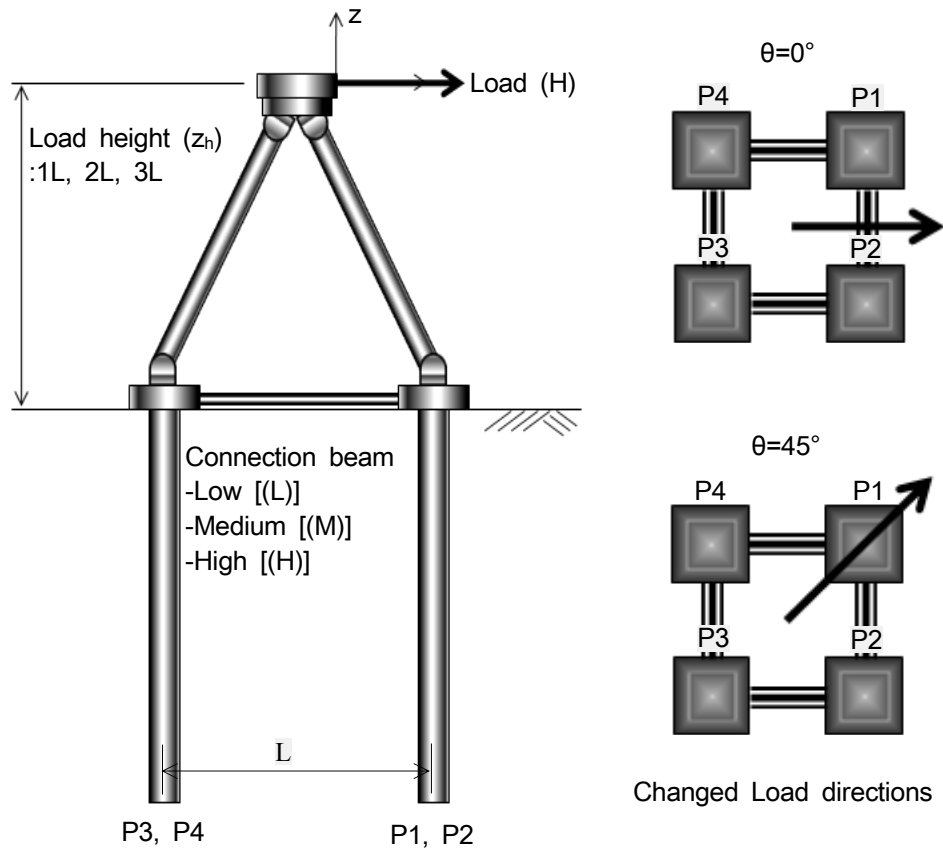


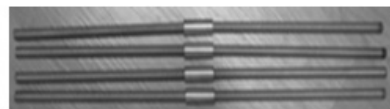
Fig. 3. Test conditions

Table 1. Test conditions for pile and connected-pile foundations of transmission tower

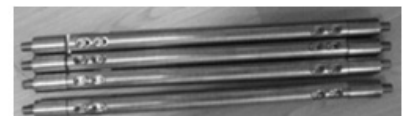
Types	Load condition		Types of connection beam	number of tests	
	Load height	Load angle			
Pile foundation	1L, 2L, 3L	0°, 45°	-	6	24
Connected-pile foundation	1L, 2L, 3L	0°, 45°	Low[(L)], Medium[(M)], High[(H)]	18	



(a) Low-stiffness (8x1 mm steel plate)



(b) Medium-stiffness ( $\phi 5$  mm steel bar)



(c) High-stiffness ( $\phi 20$  mm steel bar)

Fig. 4. Connection beams for connected-pile foundations

Table 2. Resisting characteristics of connection beams for connected-pile foundation

Types		Stiffness of connection beam (EI)	Resisting characteristics of connection beam			bending deformation occurrence
			tension	compression	bending moment	
Connected-pile foundation	Low-stiffness [(L)]	0.133 Nm <sup>2</sup>	○	×	×	○
	Medium-stiffness [(M)]	6.135 Nm <sup>2</sup>	○	○	○	○
	High-stiffness [(H)]	1571 Nm <sup>2</sup>	○	○	○	×

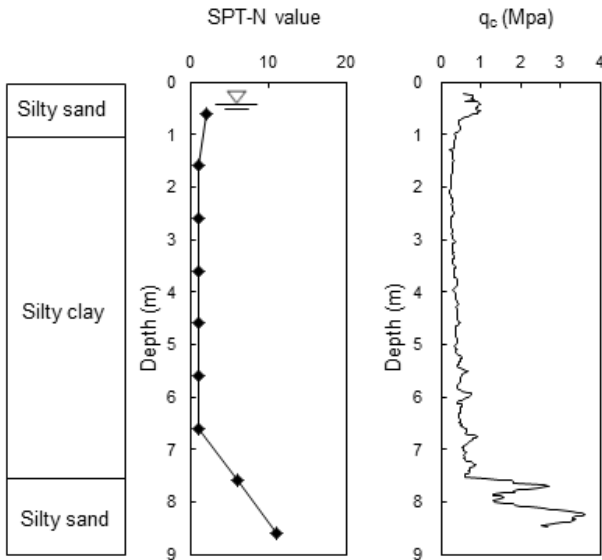


Fig. 5. Investigation results for model test site

산에 위치한 ○○도로현장에서 수행되었다. 현장의 지반조사를 위해 표준관입시험(SPT)과 콘관입시험(CPT)을 수행하였으며, 시험말뚝이 관입된 점토층의 토질물성치를 얻기 위해 현장에서 채취한 비교란 시료를 이용하여 각종 실내시험을 수행하였다.

Fig. 5는 현장지반의 표준관입시험(SPT)과 콘관입시험(CPT)의 시험 결과를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 현장지반은 지표면으로부터 1.0m의 실트질 모래층이 존재하였으며, 6.8m 두께의 실트질 점토층이 존재하였고, 7.8m 이후로는 실트질 모래층이 존재하는 것으로 나타났다. 점토층의 SPT-N치는 1정도로 매우 연약한 상태였으며, CPT 콘지력은 0.31MPa~0.43MPa의 범위에 있었으며, 모형실험은 1.0m 두께의 실트질 모래층을 제거한 후 점토층에서 수행되었다.

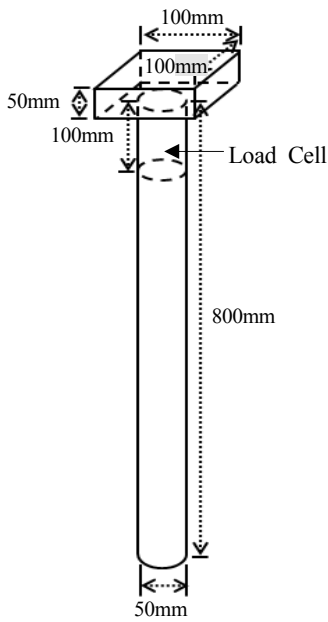
토질물성치를 얻기 위한 비교란 시료는 지표면으로부터 3m 지점에서 채취되었다. 채취된 비교란 시료를 이용하여 기본 물성 실험과 일축압축시험, 비압밀 비배수 삼축압축시험, 압밀시험이 수행되었으며, 실험결과 점

토의 단위중량( $\gamma_t$ )은 16.59kN/m<sup>3</sup>이었고, 비중( $G_s$ )과 함수비(w)는 각각 2.69와 43.3% 이었으며, 액성한계와 소성지수는 각각 44.9%와 23.3%로 통일분류법상 CL로 분류되었다. 또한 점토지반의 일축압축강도( $q_u$ )는 16.87kPa, 비배수 전단강도( $s_u$ )는 11.08kPa로 나타났으며, 선형압밀하중( $\sigma'_p$ )은 65.71kPa, 압축지수( $C_c$ )는 0.40인 것으로 나타났다.

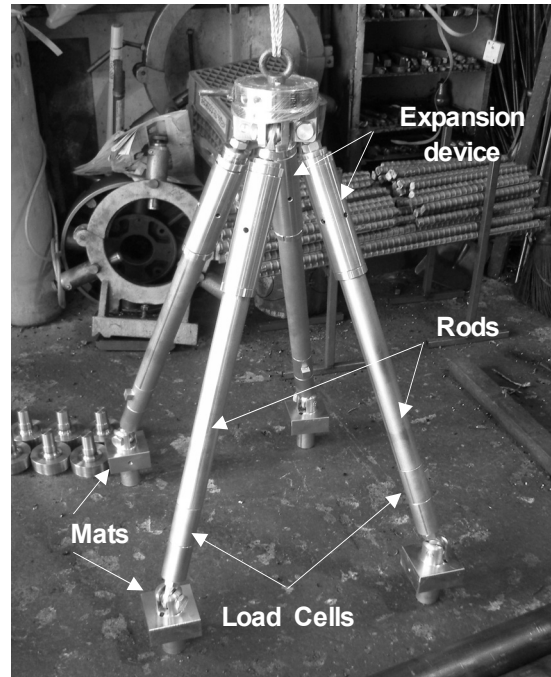
### 2.3 시험장치 및 하중재하장치

본 모형실험에서는 Fig. 6(a)와 같이 강관파이프로 제작된 폐단말뚝의 두부에 하중계와 매트를 결합하여 연약지반에 시공되는 송전철탑기초의 형상을 모사한 기초를 구성하였다. 시험기초의 말뚝부는 직경이 50mm이고 길이가 700mm인 강관파이프로 길이가 100mm인 하중계(load cell)를 결합하여 구성하였으며, 모형말뚝에 결합된 매트는 가로 및 세로의 길이를 100mm, 두께를 50mm로 구성하여 송전철탑기초와 같이 지반에 대하여 충분히 강한 강성을 갖도록 하였다.

지반에 설치가 완료된 4각 철탑기초에 대한 수평재하시험을 위해 Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 길이조절이 가능한 4개의 강봉으로 이루어진 하중재하장치가 4각 철탑기초를 구성하는 4개의 시험말뚝에 결합되었다. 하중재하장치는 철탑 상부에 가해진 하중을 그대로 철탑기초에 전달하기 위해 철탑을 구성하는 4개의 강봉을 철탑 상부에서 힌지(hinge)로 결합하였고, 강봉과 확대기초도 힌지로 연결하였다. 그리고 모형철탑의 높이를 변화시키기 위해 강봉 상부에 강봉의 길이를 조절할 수 있는 신축장치(expansion device)를 장착하였고, 가해지는 하중이 4개의 시험말뚝에 전달되는 상황을 조사하기 위해 4개의 강봉 하단부에 하중계(load cell)을 설치하였다. 따라서, 철탑기초에 대한 수평재하시험이 진행되는 동안 각 하중 단계별로 측정된 강봉의 경사각의 변화를



(a) Model pile



(b) Model tower structures

Fig. 6. Model pile and tower structures

이용하여 강봉하단부에서 측정된 하중을 3방향(x, y, z 방향)에서 시험말뚝에 전달되는 하중으로 분리하였다.

## 2.4 하중재하시험

본 연구에서는 1.0m 두께의 실트질 모래층을 제거한 후 실트질 점토층에서 수평재하시험을 수행하였다. 모형말뚝은 말뚝 두부에 위치한 하중계와 강체 매트가 결합된 확대기초 형태로 조립된 상태에서 약 900mm 높이에서 자유낙하하는 무게가 78.5N인 해머의 타격에 의해 800mm 깊이로 설치되었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 시험말뚝은 설치 프레임(installation frame)을 이용하여 설치간격과 연직도를 유지하며 지반에 설치되었으며, 시험기초의 중심간 거리(L)는 500mm로 하였다.

시험말뚝이 지반에 타입된 후 4개의 매트 위에 하중재하장치가 결합되었고, Fig. 8과 같이 상부구조물의 하중재하대에서 수평하중을 재하하였다. 이때 각 하중단계별 강봉의 경사도와 확대기초의 변위를 측정하기 위해 모형철탑 상단과 4개의 매트의 상부에 총 14개의 LVDT를 설치하였으며, LVDT는 모형체의 주변에 고정된 가이드 프레임에 고정하였다. 수평하중이 재하되는 모형철탑 상부에서 하중 재하방향과 연직방향의 변위를 측정하기 위해 2개의 LVDT를 설치하였고, 4각의 모

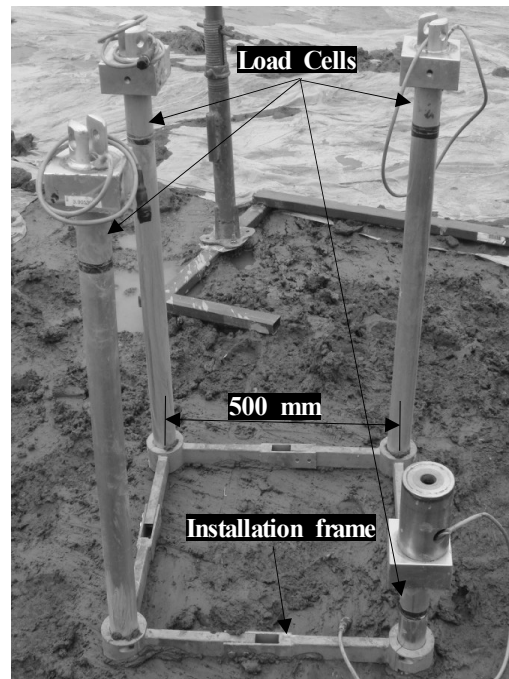


Fig. 7. Installation of model piles

형철탑을 지지하는 4개의 매트 기초에서 3방향(x, y, z)의 변위를 측정하기 위해 1개의 기초당 3개씩 총 12개의 LVDT를 설치하여 하중의 변화에 따른 기초의 변위 변화를 측정하도록 하였다. 특히 기초에 설치된 수평방향(x, y)의 LVDT는 기초의 연직방향 거동에 의하여 매

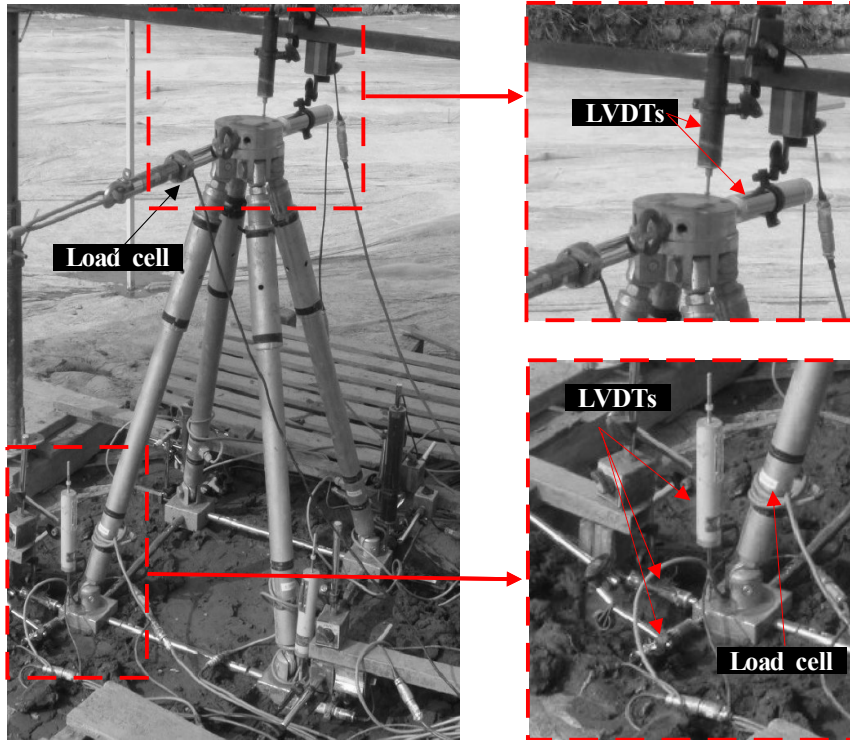


Fig. 8. Complete view of measurements installation

트를 벗어날 수 있으므로 압축거동이 예상되는 지점에서는 매트로부터 20mm아래에 측정하여 압축변위가 30mm 발생할 때까지 측정이 가능하도록 하였으며, 인발거동이 예상되는 지점에서는 매트로부터 30mm아래의 지점에 설치하여 인발변위가 30mm 발생할 때 까지 측정이 가능하도록 하였다.

Fig. 9는 모형 철탁기초에 대한 하중재하시스템의 진경을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 모형 철탁기초에 대한 수평재하시험을 위한 수평하중은 하중재하장치로부터 약 8m 떨어진 지점에 타입된 H형 강 말뚝과 모형철탁의 상부를 연결하는 강선을 윈치(winch)로 당기는 방법으로 가해졌다. 이때 모형철탁에 가해지는 수평하중의 크기는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 모형 철탁과 강선 사이에 설치한 하중계를 통해 측정되었다. 그리고 모형철탁과 반력말뚝 사이에 설치한 두부에 롤러가 설치된 강선지지장치를 이용하여 강선을 지지함으로써 모형철탁에 가해지는 하중이 수평방향으로 작용하도록 함과 동시에 강선의 자중이 모형철탁에 추가 하중으로 작용하지 않도록 하였다.

본 연구에서 수행된 수평재하시험은 하중재하대에 가해지는 수평하중을 0.1kN 단위로 증가시키면서 진행되었으며, 하중재하장치를 통하여 힘을 전달받는 4각의 철탁기초중 어느 하나라도 인발변위가 30mm 도달하였

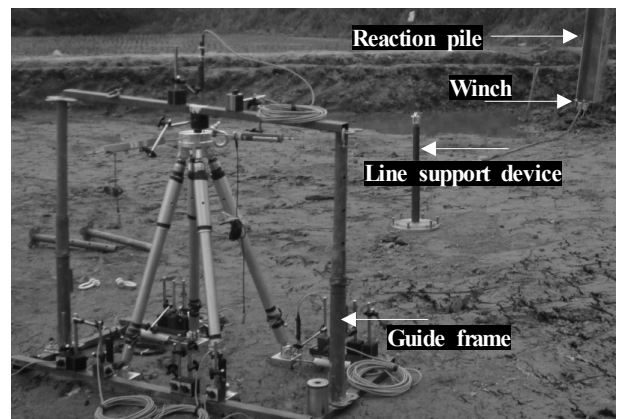


Fig. 9. Complete view of applied load system for model transmission tower foundation

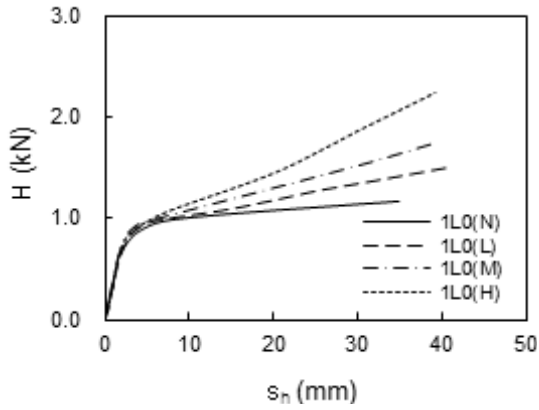
을 때, 재하시험을 종료하였다. 재하시험이 진행되는 동안 각 하중단계마다 모형철탁과 모형 철탁 기초에 설치된 총 9개의 하중계와 14개의 LVDT에 의해 각 부분에 작용하는 하중과 변위를 데이터로거와 컴퓨터를 통하여 기록하였다.

### 3. 송전철탁 연결형 말뚝기초의 거동특성

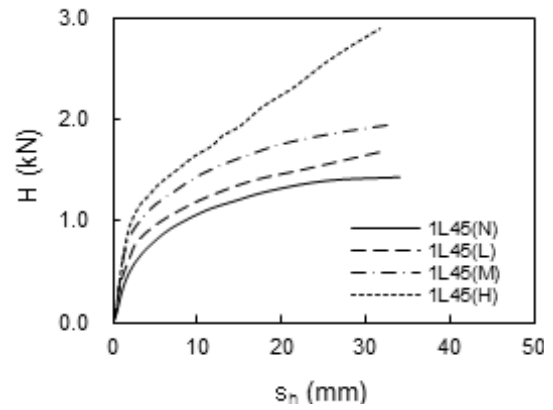
#### 3.1 송전철탁 연결형 말뚝기초의 재하수평하중-변위 특성

Fig. 10은 상부구조물의 하중재하지점에서 측정된 수

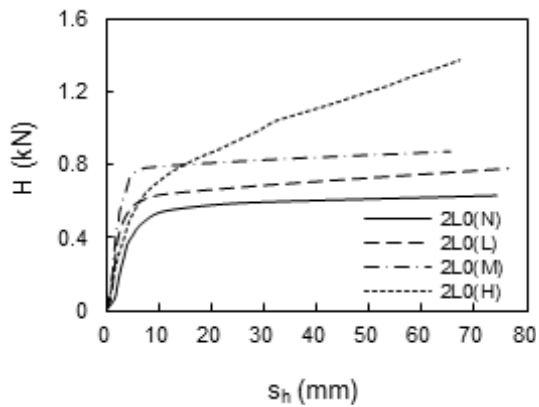




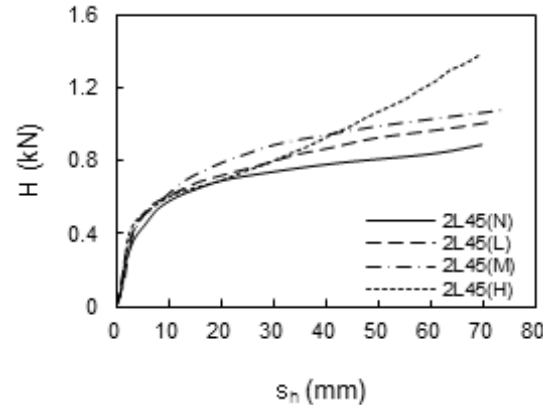
(a) Load height 1L, Load direction 0°



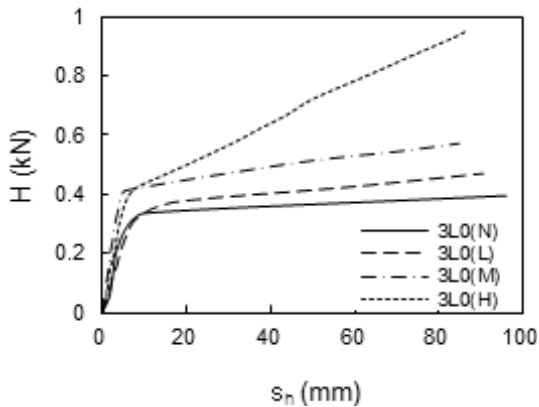
(b) Load height 1L, Load direction 45°



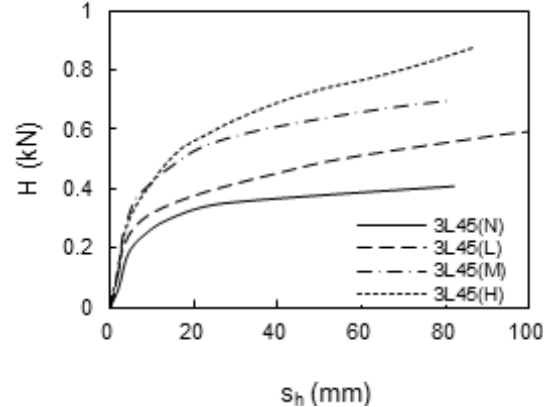
(c) Load height 2L, Load direction 0°



(d) Load height 2L, Load direction 45°



(e) Load height 3L, Load direction 0°



(f) Load height 3L, Load direction 45°

Fig. 10. Lateral load(H)-displacement( $s_n$ ) curves for transmission tower

평하중(H)에 대한 재하방향의 수평변위( $s_n$ )를 나타낸 그림이다. 그림에서 3개의 문자(ABC)로 이루어진 시험명 중 첫 번째 문자(A)는 기초의 중심간의 거리(L)로 정규화된 하중재하높이고, 두 번째 문자(B)는 수평하중의 재하방향, 세 번째 문자(C)는 연결보의 강성(N)=무연결, (L)=저강성, (M)=중강성, (H)=고강성을 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 수평하중이 0°로 재하되는 경우에는 재하 초기에 하중이 선형으로 급격히 증가한 후

곧이어 극한상태에 도달하고 연결보의 강성이 큰 연결보의 경우에는 하중이 선형으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 수평하중이 45° 방향으로 재하된 경우에는 0°인 경우보다 재하초기의 하중 증가는 작지만 모형체의 수평변위가 증가함에 따라 철탑이 지지하는 수평하중의 크기도 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 이처럼 하중 재하방향에 따른 모형체의 거동이 상이한 것은 4각의 철탑기초의 하중지지기구(mechanism)가 다르기



때문이다. 즉, 수평하중이 철탑에 0°로 재하되면, 인발력을 받는 후열에 위치한 2본의 말뚝(P3, P4)이 파괴되면서 모형체가 극한상태에 도달해 모형철탑의 수평변위가 급격히 증가하지만, 수평하중이 45°로 재하되면 가장 후열에 위치한 1본의 말뚝(P3)이 인발파괴된 이후에도 중간열에 위치한 2본의 말뚝(P2,P4)이 인발에 저항하므로 철탑의 수평변위는 서서히 증가하게된다.

그리고 철탑상부의 수평변위가 동일할 때 말뚝기초보다 연결형 말뚝기초가 그리고 연결형 말뚝기초라도 연결보의 강성이 클수록 철탑기초의 수평하중 지지능력이 더 우수했다. 이러한 시험결과는 시험말뚝 두부의 구속조건 차이에 따른 것으로, 말뚝 기초는 말뚝 두부가 자유상태인 반면, 연결형 말뚝기초는 말뚝 두부가 고정상태에 있고, 연결보의 강성이 클수록 말뚝 두부의 고정상태가 더 강해지기 때문에 4각 철탑기초의 수평하중 지지능력이 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 수평하중이 작용하는 모형체 상부의 수평변위를 기준으로 할 때 동일 수평변위에서 하중 재하높이가 높을수록 모형체의 수평하중 지지능력이 감소하였다. 이것은 철탑기초가 지지할 수 있는 모멘트 하중이 일정한 상태에서 수평하중 재하높이가 높아지므로 수평하중의 크기는 작아지기 때문이다.

### 3.2 송전철탑 말뚝기초의 거동

송전철탑에 가해지는 수평하중은 철탑을 지지하는 4개의 기초에 압축력과 인발력, 수평력으로 동시에 전달

되며, 전달되는 하중의 방향을 따라 기초의 변위가 발생한다. Fig. 11은 하중재하대에 가해진 수평하중에 의하여 발생된 기초부의 연직방향변위와 하중방향변위를 나타낸 그림으로, Fig. 11(a)은 하중재하각도 0°의 경우의 연직방향변위와 하중방향변위를 나타내며, Fig. 11(b)는 하중재하각도 45°의 경우의 연직방향변위와 하중방향변위를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이, 하중재하각도 0°의 경우에서는 전위말뚝(P1, P2)에서 압축거동이 발생하였고, 후위말뚝(P3, P4)에서 인발거동이 발생하였다. 반면, 하중재하각도 45°의 경우에서는 전위말뚝(P1)에서 압축거동이, 후위말뚝(P3)에서는 인발거동이 발생하였으며, 중간부말뚝(P2, P4)에서는 매우 세밀한 인발거동이 발생하였다. 또한, 하중방향의 상관없이 4개의 기초의 변위는 하중방향보다 연직방향에서 매우 크게 발생하였으며, 특히 인발변위가 크게 발생하여 철탑기초의 파괴가 기초의 인발거동에 의해서 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 재하각도 45°의 전위말뚝(P1)의 압축변위가 재하각도 0°의 전위말뚝(P1, P2)의 압축변위에 비하여 매우 큰 변위변화가 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 하중재하각도의 변화에 따라 압축에 저항하는 말뚝의 개수가 변화하였기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 12는 본 실험에서 나타난 하중 재하방향과 재하높이에 따른 4각 철탑기초의 수평 및 연직변위 특성의 변화를 보인 것이다. 그림에서 ○은 인발력을 받는 말뚝을 그리고 ●은 압축력을 받는 말뚝을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이, 하중재하가 0°로 작용한 경우 전위에

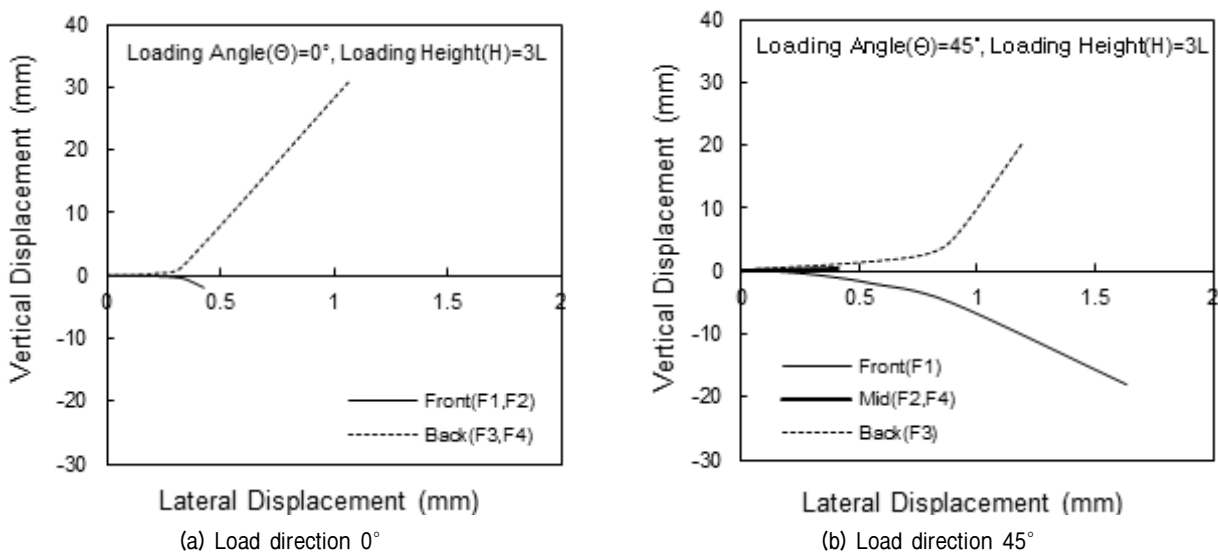


Fig. 11. Change of vertical and lateral displacements with load directions

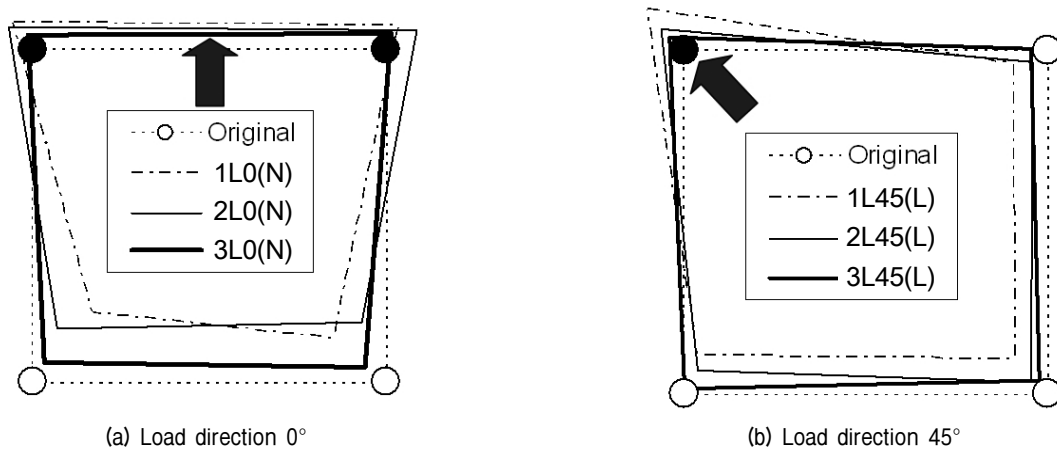


Fig. 12. Change of lateral displacements with load heights

위치하여 압축력을 받는 2개의 말뚝은 말뚝 간 거리가 멀어지지만 후위에 위치하여 인발력을 받는 2개 말뚝은 거리가 좁혀지는 경향을 보였다. 그러나 하중재하방향이 45°로 작용한 경우에는 재하방향에서 전위에 위치하는 1개의 말뚝은 압축력을 그리고 후위에 위치한 1개의 말뚝은 인발력을 받으면서 이들 모두 재하방향으로 수평이동을 하였고, 중간열에 위치한 2개의 말뚝은 매우 미세한 인발력을 받으면서 기초 중심간의 거리가 다소 좁혀지는 것으로 나타났다.

또한, Fig. 12에 나타난 바와 같이, 철탑기초의 수평변위는 재하높이가 높아짐에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 철탑에 작용하는 수평하중은 4각의 철탑기초를 구성하는 말뚝의 인발 및 압축지지력에 의해 지지되므로 철탑기초의 수평변위는 철탑에 작용하는 수평하중의 크기에 좌우되고 연직변위는 기초에 작용하는 모멘트에 의해 결정된다고 할 수 있다. 따라서, 수평하중 재하높이가 높을수록 철탑기초에 작용할 수 있는 수평하중의 크기가 감소하므로 철탑기초의 수평변형 정도도 감소하게 되는 것으로 판단된다.

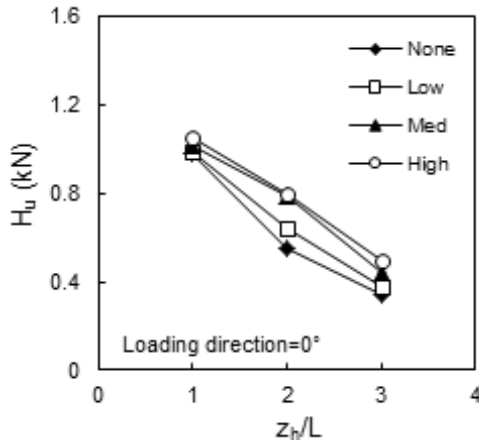
#### 4. 송전철탑 연결형 말뚝기초의 지지력특성

##### 4.1 극한수평지지력 측정

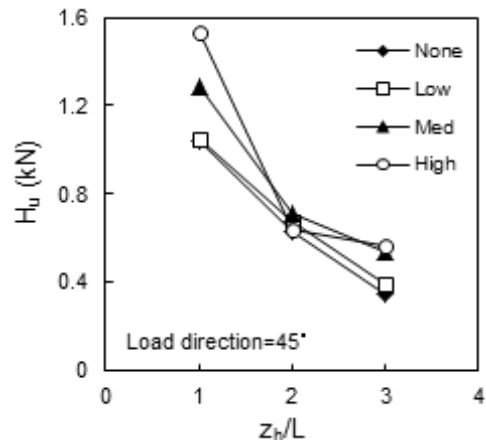
기초의 설계에 있어서 기초의 파괴는 특정 파괴기준을 통하여 정의되며, 적용되는 파괴기준에 따라 지지력이 달리 결정된다(Fellenius, 1980). 국내의 송전철탑기초의 설계는 송전철탑하부의 4각에 설치된 각 말뚝에 대하여 압축력 및 인발력, 수평력에 대한 극한지지력을

산정하고 안전율을 고려한 설계하중을 이용하여 4각의 기초를 각각 설계하도록 하고 있으나, 송전철탑기초의 극한지지력을 결정하는 기준을 별도로 제시하지는 못하고 있다(KEPCO, 2011). 반면, JEC(1979)는 철탑기초의 수평변위가 기초의 중심간의 거리의 1/800, 수직변위가 1/1200에 도달하는 시점에서 기초에 전달되는 하중을 기초의 허용지지력으로 정의하고 있다. 그러나, 상기의 기준은 허용지지력을 선정하는 기준으로 극한지지력을 산정하기위하여 적용시키기에는 적합하지 않다. 한편, Kyung et al.(2011)은 Fleming et al.(1992)과 JSG(2002)가 말뚝직경의 10%에 해당하는 변위가 발생하였을 때를 연직말뚝의 극한상태로 정의한 것을 참고하여 4각 철탑기초를 구성하는 4각의 기초 중 인발하중을 받는 말뚝의 연직변위가 말뚝 직경의 10%에 가장먼저 도달하였을 때 연결형 기초시스템 전체의 파괴를 정의할 것을 제안하였다.

송전철탑기초는 철탑에서 작용하는 하중을 수직력과 수평력의 형태로 동시에 전달받는다. 본 연구에서 수평하중-변위 특성을 분석한 결과 말뚝기초의 경우에는 송전철탑에 가해지는 하중이 변위가 발생함에 따라 극한상태에 수렴하는 것으로 나타났다. 그러나, 연결형 말뚝기초의 경우에는 변위가 발생함에 따라 하중이 선형으로 증가하는 경향이 있었으며, 이러한 경향은 강성이 강한 연결보를 사용하였을 경우에 더욱 명확하게 나타났다. 그리고 철탑기초를 구성하는 4각의 기초의 거동을 분석한 결과 말뚝기초와 연결형 말뚝기초 모두 수평거동보다는 수직거동이 매우 크게 발생하며, 특히 인발거동이 가장 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 송전철탑 연결형 말뚝기초 시스템의



(a) Load direction 0°



(b) Load direction 45°

Fig. 13. Ultimate lateral load capacity with load heights

최초 파괴가 인발거동에 의하여 발생하는 것으로 판단하였고, 기초에서 발생하는 인발변위가 말뚝 직경의 10%에 도달하였을 때를 기준으로 극한상태를 정의하여 이때 하중재하지점에서 가해지는 수평하중을 송전철탑의 극한수평지지력으로 정의하였다.

#### 4.2 극한수평지지력 분석

Fig. 13은 수평하중이 0°와 45° 방향으로 재하될 때 연결보의 강성과 기초의 중심간의 거리(L)로 정규화된 하중 재하높이에 따른 송전철탑의 극한수평지지력 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 철탑 기초의 극한수평지지력은 거의 선형으로 감소하였고, 말뚝기초보다 연결기초의 극한수평지지력이 그리고 연결기초에서도 연결보의 강성이 클수록 철탑기초의 극한수평지지력이 커지는 것으로 나타났다. 수평하중이 0° 방향으로 재하되었을 경우에는 정규화된 하중재하높이가 1일때를 기준으로 2일 때 약 30%, 3일 때 약 60% 감소하였다. 반면, 수평하중이 45° 방향으로 재하되었을 경우에는 연결보의 종류에 따라 다소 차이가 있었으나, 정규화된 하중재하높이가 1일때를 기준으로 2일 때 약 47%, 3일 때 63% 감소하여 수평하중이 45° 방향으로 재하되었을 때, 0° 방향으로 재하되었을 때에 비하여 높이에 대한 지지력의 감소폭이 다소 큰 것으로 나타났다. 이러한 시험결과는 앞에서 언급한 바와 같이 4각 철탑기초가 지지할 수 있는 모멘트 하중이 일정한 상태에서 수평하중의 크기와 재하높이의 관계 그리고 연결보의 강성에 따른 말뚝 두부의 구속조건 변화를 통하여 설명될 수 있다.

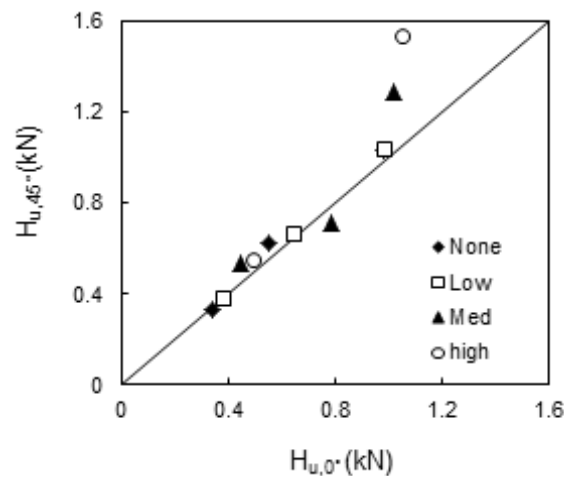


Fig. 14. Ultimate lateral load capacity with load directions

한편, 본 연구에서 수행된 24개의 모형실험 중 하중 재하높이가 2L이고 재하방향이 45°이며, 연결보의 강성이 고강성인 경우[2L45(H)]에서는 연결보에 따른 지지력의 증대효과가 크게 나타나지 못한 것으로 나타났다. 이는 연결보의 강성에 따른 지지력증가효과가 다른 경우에 비하여 늦게 발생한 것에서 나타난 결과로서, 시험에서의 연결보의 체결상태, 지반의 상태에 등에 따른 시험오차 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 이 경우에 대한 시험결과는 철탑기초의 지지력의 특성을 분석하는데 사용하지 않도록 하였다.

Fig. 14는 수평하중이 0°와 45° 방향으로 재하될 때 철탑기초의 극한수평지지력( $H_u$ )을 비교한 것이다. 시험결과 수평하중이 0° 방향으로 재하 될 때와 45° 방향으로 재하되었을 때 극한수평지지력의 크기는 대부분의 경우 유사하며 몇몇의 경우에 있어서는 45° 방향으로 재하되었을 경우 크게 발생한 것으로 나타났다. 일반적

으로 말뚝의 인발지지력은 압축지지력보다 작으므로 모형체에서 발생하는 수평지지력은 철타기초를 구성하는 말뚝의 인발지지력에 의해 좌우된다. 인발지지력에 저항하는 말뚝의 수는 하중의 재하방향과 침하상태에 따라 달라진다. 하중재하의 방향이 0°인 경우, 침하초기부터 최종상태까지 4본의 말뚝 중 2본이 인발에 저항한다. 그러나 하중재하방향이 45°인 경우, 침하초기에는 후방에 위치한 말뚝 1본이 저항하나, 침하가 발생함에 따라 중간부에 위치한 2본의 말뚝이 인발력에 점차적으로 저항하게 된다. 본, 실험에서는 최대의 인발변위가 발생하는 말뚝의 10%에서 극한수평지지력을 측정하도록 하였으며, 이때에 인발에 대한 기초의 전체 저항상태는 하중재하방향에 상관없이 유사하게 나타나며, 이에 따라 극한수평지지력( $H_u$ )의 크기도 대부분의 경우 유사하게 측정된 것으로 판단된다.

### 4.3 모멘트저항력 분석

일반적으로 철타에 작용하는 수평하중은 철타구조물의 4각에 위치한 철타기초를 구성하는 기초의 지지력에 의해 지지되므로 철타의 하중재하지점에서 발생하는 극한수평지지력은 4각의 철타기초가 동시에 저항하는 모멘트저항력으로 표현될 수 있다. 철타의 기초에서 저항하는 모멘트저항력은 극한수평지지력과 하중재하지점으로부터 기초까지의 거리에 비례하며, 그 값은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M_R = H_u z_h \quad (1)$$

여기서,  $M_R$  = 기초로부터 저항하는 모멘트저항력,  $H_u$  = 철타의 하중재하지점에서 측정되는 극한수평지지력,  $z_h$  = 하중재하높이이다.

Fig. 15는 극한수평지지력 발생시 기초로부터 저항하는 모멘트저항력을 나타내는 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 극한수평지지력으로부터 산정된 모멘트저항력은 연결보의 종류에 따라 유사한 결과가 나타나는 것으로 확인되었으며, 그 값의 크기는 연결보의 강성이 증가함에 따라 크게 나타났다. 한편, 본 연구에서 수행된 24개의 모형실험 중 하중 재하높이가 1L이고 재하방향이 0°이며, 연결보의 강성이 중강성과 고강성인 경우(1L0(M), 1L0(H))는 다른 경우에 비하여 극한수평지지력을 통하여 측정된 모멘트저항력이 매우 작게 측정되는 것으로 확인되었다. 이는 연결보에 의한 지지력 증대효과가 다른 경우에 비하여 비교적 늦게 나타남으로써 다른 경우에 비하여 철타기초의 극한수평지지력이 작게 측정되는 것에서 비롯된 것으로 확인되었다. 따라서, 이 두 경우에 대한 시험결과는 기초로부터 저항하는 모멘트저항력을 산정하는데 적용시키지 않았다.

Fig. 16은 극한수평지지력이 발생할 시점에서 기초로부터 작용하는 연결보의 종류에 따라 변화하는 모멘트저항력의 증가율(Increase rate of  $M_R$ , IR of  $M_R$ )을 나타내는 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 수평하중의 방향이 0°인 경우에는 저강성의 연결보에 의해 9%의 모멘트저항력이 증가하는 것으로 나타났으며, 중강성 연결보를 사용하였을 경우에는 40%, 고강성 연결보를 사용하였을 경우에는 48%의 모멘트저항력이 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 수평하중의 방향이 45°인 경우에

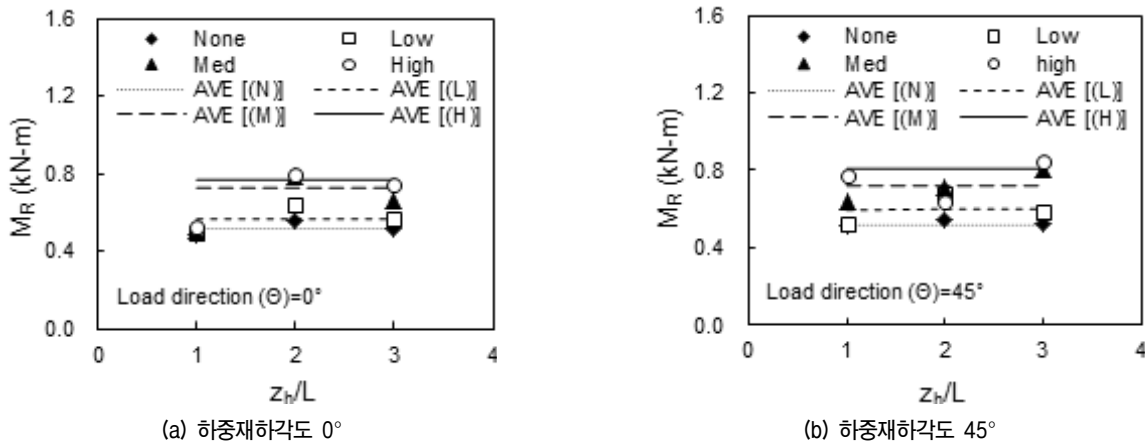


Fig. 15. Moment resistance ( $M_R$ ) for connected-pile foundation

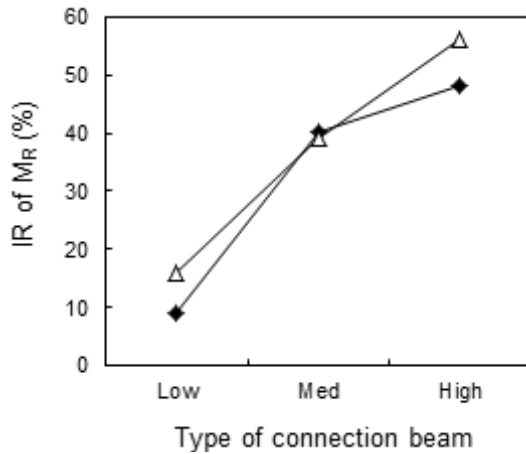


Fig. 16. Increase rate (IR) of moment resistance ( $M_R$ ) for connected-pile foundation

는 저항성 연결보에 의하여 14%의 모멘트저항력이 증가하였으며, 중강성의 경우에는 40%, 고강성의 경우에는 56%의 모멘트저항력이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 수평하중의 방향이  $0^\circ$ 인 경우에 비하여 수평하중의 방향이  $45^\circ$ 인 경우, 모멘트저항력의 증가율이 대부분의 크게 나타나, 연결보에 의한 지지력증가효과가  $45^\circ$  방향일 때,  $0^\circ$  방향보다 큰 것으로 나타났다. 따라서, 연결형 말뚝기초의 연결보는 압축력과 인장력, 휨모멘트에 모두 저항할 수 있는 중강성 연결보 이상의 강성을 갖는 연결보를 사용할 때, 기존의 말뚝기초에 비하여 비교적 큰 지지력 증가효과를 기대할 수 있는 것으로 판단되며, 연결형 말뚝기초를 사용할 경우에는 주요한 하중이  $45^\circ$ 로 작용하도록 시공하는 것이 보다 유리한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 점토지반에 설치된 송전철탄의 말뚝기초와 연결형 말뚝기초를 대상으로 다양한 하중 조건 및 기초조건에서의 수평모형재하시험을 수행하였으며, 실험결과를 분석하여 연결형 말뚝기초의 특성을 규명하고자 하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론 다음과 같다.

(1) 수평하중-수평변위 곡선에서 수평하중이  $0^\circ$ 로 재하되는 경우에는 재하 초기에 하중이 선형으로 급격히 증가한 후 곧이어 극한상태에 도달하고 연결보의 강성이 큰 연결보의 경우에는 하중이 선형으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 수평하중이  $45^\circ$  방

향으로 재하된 경우에는  $0^\circ$ 인 경우보다 재하초기의 하중 증가는 작지만 모형체의 수평변위가 증가함에 따라 철타이 지지하는 수평하중의 크기도 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 이처럼 하중 재하방향에 따른 모형체의 거동이 상이한 것은 인발에 저항하는 4각의 철타기초의 하중지지기구(mechanism)가 다르기 때문이다.

(2) 철타상부의 수평변위가 동일할 때 말뚝 기초보다 연결형 말뚝기초가 그리고 연결형 말뚝기초라도 연결보의 강성이 클수록 철타기초의 수평하중 지지능력이 더 우수하며, 이는 시험말뚝 두부의 구속이 강성이 커짐에 따라 견고해져 4각 철타기초의 수평하중 지지능력이 변하기 때문이다.

(3) 수평하중을 받는 4각 철타기초에서 하중이 철타기초에 평행한 방향( $\theta=0^\circ$ )으로 작용하면 전위와 후위에 위치한 2본씩의 말뚝은 각각 압축과 인장을, 그리고 하중이 철타기초에 대각선방향( $\theta=45^\circ$ )으로 작용하면 전위에 위치한 1본의 말뚝만 압축을 받고 중간과 후위에 위치한 3개의 말뚝은 인발을 받는 것으로 나타났다.

(4) 수평하중이 4각 철타기초에 평행하게 작용하면 전위에 위치한 말뚝 2본의 간격은 멀어지고 후위에 위치한 말뚝 2본의 간격은 가까워졌다. 그리고 수평하중이 철타기초에 대각선으로 작용하면 하중 재하방향에서 전위와 후위에 위치한 각 1본씩의 말뚝은 재하방향으로 수평변위를 일으키고 중간에 위치한 말뚝 2본의 간격이 약간 가까워지는 경향을 보였다. 이러한 수평하중에 의한 철타기초의 변형 특성은 연결형 말뚝기초보다 말뚝기초에서 그리고 연결형 말뚝기초라도 연결보의 강성이 작을수록 더 분명하게 나타났다. 또한, 연결보의 강성이 일정할 경우 철타 상부에 가해지는 수평하중의 재하높이가 높을수록 4각 철타기초의 수평변형 정도는 감소하였고, 이는 하중 재하높이가 높아짐에 따라 기초의 극한수평지지력이 감소하기 때문으로 판단된다.

(5) 철타구조물에서 작용하는 극한수평지지력은 최대 인발변위가 발생하는 후위말뚝의 변위가 말뚝직경의 10%인 지점에서 측정될 수 있으며, 측정된 극한수평지지력은 말뚝기초에 비하여 연결형 말뚝기초의 경우에 더 크고, 그 크기는 연결보의 강성이 증가함에 따라 증가하는 반면, 하중재하높이가 증가함에 따라 선형적으로 감소한다. 또한, 극한수평지지

력은 말뚝직경의 10%의 최대인발변위 발생시점에서 하중의 재하방향에 상관없이 유사한 특성이 있으나, 인발에 저항하는 말뚝의 개수 차이로 인하여, 기초의 변위량이 증가할수록 철탐기초에 수평하중이 대각선 방향( $\theta=45^\circ$ )으로 작용할 때, 평행한 방향( $\theta=0^\circ$ )으로 작용할 때 보다 큰 수평지지력이 측정된다. 이에 따라 4각 철탐기초의 안정성과 경제성 확보를 위해서는 철탐에 작용하는 최대 수평하중이 철탐기초의 대각선 방향에 놓이도록 하는 것이 바람직하다.

- (6) 철탐기초에서 발생하는 극한수평저항력은 기초에 있어서는 모멘트저항력의 형태로 표현되며, 모멘트저항력은 극한수평지지력과 기초로부터 하중재하지점까지의 거리의 곱을 통하여 산정된다. 산정된 모멘트저항력은 연결보의 종류 및 하중재하방향에 따라 일정하게 산정되며, 산정된 모멘트저항력을 이용하여 연결보의 종류에 따른 모멘트 저항력의 증가율을 분석한 결과 수평하중이 대각선 방향( $\theta=45^\circ$ )으로 작용할 경우가 평행한 방향( $\theta=0^\circ$ )으로 작용할 때 보다 연결보에 의한 지지력증가효과가 큰 것으로 나타났다. 또한, 연결형 말뚝기초의 연결보는 압축력과 인장력, 휨모멘트에 모두 저항할 수 있는 중앙성 연결보 이상의 강성을 갖는 연결보를 사용할 때, 기존의 말뚝기초에 비하여 비교적 큰 지지력 증가효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 수행된 “송전철탐 기초용 마이크로파일 해석모델 개발” 및 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-0030845) 결과의 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Fellenius, B.H. (1980), “The analysis of results from routine pile load tests”, *Ground Engineering*, Vol.13, No.6, pp.19-36.
2. Fleming, W. G K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., and Elson, W. K. (1992), *Piling Engineering 2nd Ed.*, John Wiley and Sons, New York.
3. IEEE (2001), “IEEE Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing. (Overturning Moment tests)”, *IEEE Standard 691-2001*, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
4. Jang, S. H., Kim, H. K., Ham, B. W., and Chung, K. S. (2007), “A study on the transmission tower foundation design and construction method-A focus of cylindrical foundation”, *Journal of Korean Institute of Electrical Engineering (KIEE)*, Vol.56, No.6, pp.1031-1034.
5. JEC (1979), “Design Standard for Power Transmission Supports”, *Standard of the Japanese Electrotechnical Committee, JEC-127-1979*, Japanese Electrotechnical Committee.
6. JGS (2002), “Standard for Vertical loading test of pile”, *JGS-1813-2002*, Japanese Geotechnical Society.
7. KEPCO (2007), “Outline of 765kV transmission tower foundation and implementation of foundation load test”, *The Bulletin of Korea earth works*, No.7, pp.113-121.
8. KEPCO (2011), Design standard for transmission tower foundation, *DS-1110*, Korea Electronic Power Corporation.
9. Kim, J. B. and Cho, S. B. (1995), “The design and the full load test results of 765kV tower foundation”, *Proceeding of Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE) fall national conference 1995*, pp.447-449.
10. KGS (2007), “Standard for vertical uplift pile load test”, *KGS TCF S 3-2007*, Korean Geotechnical Society Technical Committee of Foundation.
11. Kyung D. H., Lee, J. H., Paik, K. H., and Kim, D. H. (2011), “The failure standard to estimate bearing capacity for connected-type foundation of transmission tower and the behavior in clay”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.3, pp.27-40
12. Merifield, R.S. and Smith, C.C. (2010), “The Ultimate uplift capacity of multi-plate strip anchors in undrained caly”, *Computers and Geotechnics*, Vol.37, No.4, pp.504-514
13. Rattley, M.J., Richards, D.J., and Lehane, B.M. (2008), “Uplift Performance of Transmission Tower Foundations Embedded in Clay”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.134, No.4, pp.531-540
14. Richards, D.J., White, D.J., and Lehane, B.M. (2010), “Centrifuge modelling of the pushover failure of an electricity transmission tower”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.47, No.4, pp.413-424.
15. TEPCO (1988), “Design guideline for UHV foundation”, *Tokyo Electric Power Company*, 5.4-5.5.
16. Vanitha, L., Patra, N.R., and Chandra, S. (2007), “Uplift capacity of pile group anchors”, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.25, No.3, pp.339-347.

(접수일자 2011. 2. 18, 수정일 2011. 7. 12, 심사완료일 2013. 9. 23)