

점토지반에 근입된 송전철탑 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수

Resistance Increasing Factor of Connected-pile Foundation for Transmission Tower in Clay

경 두 현¹ Kyung, Doo-Hyun

이 준 환² Lee, Jun-Hwan

백 규 호³ Paik, Kyu-Ho

김 대 홍⁴ Kim, Dae-Hong

Abstract

Pile foundation for transmission tower constructed in weak ground can cause the damage of the tower due to the different settlement between the foundations. In Japan and USA, connected-pile foundations whose 4 foundations are connected each other by beams were used for transmission tower (TEPCO 1988, IEEE 2001). Resistance increasing factors for connected-pile foundation signify increasing amount of resistance due to the effect of connected-pile material. In this study, we performed model lateral load tests of connected-pile foundations for transmission tower and found the resistance increasing factors for connected-pile foundation. The tests were performed in silty clay, and the resistance increasing factors were founded in various conditions that lateral load directions and height, the stiffness of beams in the connected-pile foundations were changed. The resistance increasing factors from our research were presented as a function of normal lateral loading height and normal stiffness of the connected-pile material. The resistances which were estimated from the resistance increasing factors were similar to measured values.

요 지

연약지반에 건설되는 송전철탑 말뚝기초는 부등침하로 인한 철탑구조체의 손상을 유발 할 수 있다. 이에 따라 일본과 미국에서는 철탑을 지지하는 각 기초부를 연결보로 연결한 연결형기초의 사용을 추천하고 있다(TEPCO 1988, IEEE 2001). 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수는 연결체의 영향으로 인하여 증가되는 연결형 말뚝기초의 저항력의 증가량을 나타낸다. 본 연구에서는 점토지반에 근입된 송전철탑 연결형말뚝 기초의 모형수평재하시험을 수행하여 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수를 도출하였다. 본 시험은 실트질 점토지반에서 수행되었으며, 수평하중의 재하높이와 재하각도, 말뚝기초를 연결하는 연결체의 강성을 변화시켜 다양한 조건상에서의 저항력 증가계수를 도출하였다. 본 연구에서 도출된 저항력 증가계수는 송전철탑의 하중작용높이와 기초를 연결하는 연결체의 강성에 대한 함수로 나타났으며, 도출된 증가계수를 통하여 연결형 말뚝기초의 저항력을 산정한 결과 측정결과와 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

Keywords : Resistance increasing factor, Transmission tower, Connected-pile foundation, Lateral load test, Clay

1 정희원, 연세대학교 토목환경 공학과 박사과정 (Member, Ph.D candidate, School of Civil and Environmental Eng, Yonsei Univ.)
2 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Professor, School of Civil and Environmental Eng, Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-7494, Fax: +82-2-364-5300, Junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)
3 정희원, 관동대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Department of Civil Eng, Kwandong Univ.)
4 정희원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원 (Member, Principal reasearcher, KEPRI/KEPCO)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

송전선로는 전력케이블과 전력케이블을 지지하는 송전철탑 그리고 철탑을 지지하는 기초로 구성된다. 안정적인 송전선로의 건설을 위해서는 송전철탑의 구조적 안전성 확보와 함께 구조물이 건설되는 지반조건과 하중특성에 맞는 송전철탑의 기초형식을 선정하도록 하여야 한다. 국내에서 사용되는 철탑기초의 형식은 저항하는 하중의 특성에 따라 연직하중기초와 모멘트하중기초로 구분된다. 국내에서 시공되는 연직하중기초로는 역T형 기초, 말뚝기초, 심형기초, 앵커기초 등이 있으며, 모멘트하중기초로는 매트기초가 있다(Jang 등 2007).

국내에는 해안 및 하상지반과 같은 연약지반이 매우 폭넓게 분포하고 있으며, 캄보디아, 베트남, 라오스 등 연약지반이 집중적으로 분포된 지역에 송변전사업의 해외진출이 활발하게 이루어지고 있다. 국내의 연약지반에서는 송전철탑기초 형식으로 말뚝기초가 주로 사용된다(Kim 등 1997). 그러나 연약지반에 시공된 송전철탑 말뚝기초형식에 수평하중이 작용하였을 경우에는 4각부의 위치한 기초부의 압축거동과 인발거동이 각각 발생하여 부등침하로 인한 손상이 발생하기 쉽다. 이에 미국과 일본에서는 부등침하에 4각부의 기초와 기초사이에 연결보를 설치하여 구조체의 안전성을 높일 수 있는 연결형 기초의 사용을 추천하고 있다(TEPCO 1988, IEEE 2001). 그러나, TEPCO(1988)의 경우, 연결보의 거동형상을 강제로 간주하여 강성의 변화에 따른 기초의 거동 특성을 충분히 반영하지 못하고 있으며, IEEE(2001)에서도 철탑기초간의 전단력을 분산시켜 부등수평변위를 제거할 수 있는 방법으로 연결보의 설치를 언급하고 있으나, 연결형 기초의 설계에 대한 구체적인 제안을 하고 있지는 못하는 실정이다(Kyung 등 2011).

본 연구에서는 하중조건 및 연결체조건에 따른 연결형 기초의 지지력특성을 분석하여 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수를 도출하였다. 본 연구를 위해 점토지반에 설치된 말뚝기초 및 연결형 말뚝기초에 대한 모형수평재하시험을 현장에서 수행하고, 하중조건 및 연결형 기초의 조건에 따른 송전철탑의 극한수평지지력 특성을 분석하였으며, 송전철탑의 극한수평지지력과 기초의 각 요소간의 저항력 관계를 확인하였다. 또한, 연결형 기초조건에서 발생하는 인발저항력과 말뚝기초의 인발지지력을 분석하여 저항력증가계수 측정하였으며, 하중조건 및 연결체조건에 따라 변화하는 저항력증가

계수의 특성을 분석하여 저항력증가계수를 산정하는 경험식을 도출하였다.

2. 송전철탑 연결형 말뚝기초의 모형수평재하시험

2.1 모형수평재하시험

본 연구에서는 송전철탑 연결형 말뚝기초의 저항력증가특성 및 저항력증가계수를 측정하기 위하여 모형수평재하시험을 수행하였다. Figure 1과 Table 1에서 나타난 바와 같이, 본 연구에서 수행된 수평모형시험은 연결체가 없는 말뚝기초 조건과 연결체가 설치된 연결형 말뚝기초의 조건으로 구분되며, 하중조건과 연결체 조건에 따라 총 24회 수행되었다. 본 연구에서는 수행된 모형수평재하시험의 하중조건으로 하중재하높이를 기초와 기초사이의 거리(L)의 1배, 2배, 3배의 높이로 변화시켰으며, 하중재하각도를 0도 45도로 변화시키도록 하였다. 또한, 기초와 기초사이를 연결하여 연결형 말뚝기초를 구성하는 연결체의 조건을 저장성 연결체(Wire type; $EI=0.133Nm^2$), 중강성 연결체(Flexible beam type; $EI=6.135Nm^2$), 고강성 연결체(Rigid beam type; $EI=1571Nm^2$)로 변화시켜가며 시험을 수행하였다.

모형체에 적용된 기초는 강관파이프로 제작된 폐단 말뚝과 매트를 결합하여 제작하였으며, 모든 실험에 동일하게 사용되었다. 시험기초의 말뚝부의 직경은 50mm, 길이는 800mm로 구성되었으며, 말뚝에 결합된 매트의 가로 및 세로 길이는 100mm, 두께는 50mm로 구성하였다.

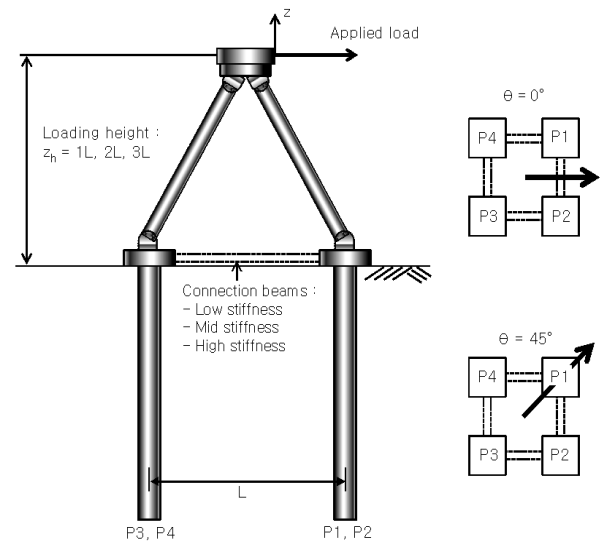
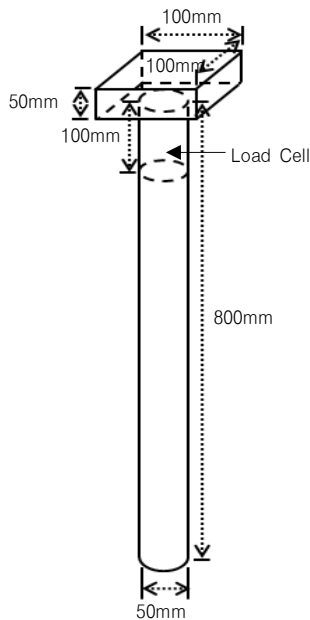


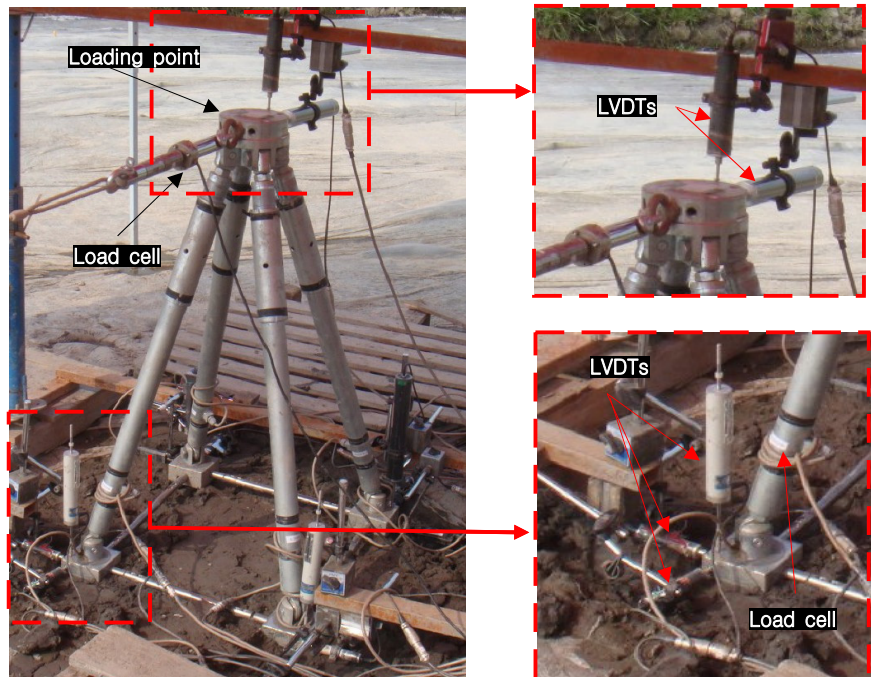
Fig. 1. Conditions for model lateral load tests

Table 1. Conditions for model lateral load tests

Type of foundation	Stiffness of connection beam (EI, Nm ²)	Loading height (m)	Load directions	Testing name
Pile foundation	None	0.5 (1L)	0°	1L0(N)
			45°	1L45(N)
		1.0 (2L)	0°	2L0(N)
			45°	2L45(N)
		1.5 (3L)	0°	3L0(N)
			45°	3L45(N)
Connected-pile foundation	0.133 (L)	0.5 (1L)	0°	1L0(L)
			45°	1L45(L)
		1.0 (2L)	0°	2L0(L)
			45°	2L45(L)
		1.5 (3L)	0°	3L0(L)
			45°	3L45(L)
	6.135 (M)	0.5 (1L)	0°	1L0(M)
			45°	1L45(M)
		1.0 (2L)	0°	2L0(M)
			45°	2L45(M)
		1.5 (3L)	0°	3L0(M)
			45°	3L45(M)
	1571 (H)	0.5 (1L)	0°	1L0(H)
			45°	1L45(H)
		1.0 (2L)	0°	2L0(H)
			45°	2L45(H)
		1.5 (3L)	0°	3L0(H)
			45°	3L45(H)



(a) Model pile



(b) Transmission tower structures

Fig. 2. Model pile and transmission tower structures

시험기초는 송전철탑의 4각의 위치에 각각 향타되었으며, 기초와 기초사이에는 연결체를 설치하여 연결형 말뚝기초를 구성하였다. 설치된 기초위에는 피라미드형상의 송전철탑상부구조물을 설치하였다. 모형수평재하시험이 수행되는 동안 송전철탑상부구조물의 최상단부에서는 수평하중이 가해졌으며, 가해진 수평하중은 하중을 작용시키는 와이어와 하중재하대 사이에 위치한 로드셀을 이용하여 측정되었다. 또한, 송전철탑상부구조물의 하단부에 로드셀을 설치하여 기초로 전달되는 하중을 측정하였고, 각각의 기초에 3방향(x, y, z)방향으로 설치된 LVDT를 통하여 시험기초의 직접적인 변위를 측정하였다.

2.2 지반조건

본 연구에서 수행된 모형시험은 전라북도 익산현장의 점토지반에서 수행되었다. 현장지반의 지반조건을 조사하기 위하여 표준관입시험(SPT)와 콘관입시험(CPT)를 수행하였으며, 점토층에 대한 토질정수를 얻기 위하여 현장에서 채취된 비교란 시료를 사용하여 각종 실내시험을 수행하였다. 점토층의 SPT-N치는 1정도로 매우 연약한 상태였으며, CPT 콘지력은 0.31-0.43Mpa의 범위에 있었다. 또한 점토층의 주요 물성은 Table 2와 같이 나타났다.

2.3 송전철탑의 극한수평지지력

송전철탑에 수평하중이 작용하면 송전철탑을 지지하는 각각의 기초에서는 압축력과 인발력, 수평력이 복합적으로 작용하게 된다. 이에 따라 송전철탑에서 저항하는 극한수평지지력은 각각의 기초에 전달되는 하중에 따른 거동특성을 확인하고 전반적인 기초시스템의 파괴기준을 정의하여 측정할 수 있다. Kyung 등(2011)은 송전철탑 연결형 말뚝기초의 하중-변위특성 및 거동특성을 분석하여 기초의 파괴기준을 제안하였다. Kyung

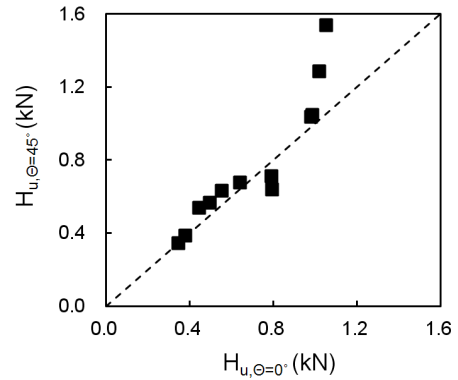


Fig. 3. Ultimate lateral load capacity of transmission tower

등(2011)에 따르면 말뚝기초의 수평하중-수평변위의 변화는 특정하중에 수렴되지만, 연결형 말뚝기초의 경우에는 수렴하지 않으며, 연결체의 강성에 따라 지속적으로 증가하는 특성이 있다. 또한, 각 기초부의 거동을 분석한 결과, 인발에 의한 거동변화가 압축 및 수평에 대한 거동변화에 비하여 월등하게 크게 발생하여, 인발부에서 발생하는 변위에 의하여 기초부의 파괴거동이 발생하는 것으로 나타났다.

따라서, 송전철탑 연결형 기초의 파괴는 기초의 인발 거동에서 정의될 수 있으며, Kyung 등(2011)은 ISSMFE (1985), BSI(1986), Fleming 등(1992), JSG(2002)의 파괴기준을 참조하여 연결형 말뚝기초의 파괴기준을 제안하였다. 본 연구에서는 Kyung 등(2011)이 제안한 파괴기준에 따라, 기초부의 인발변위가 최초로 말뚝 직경의 10%에 도달하였을 시점을 기준으로 기초의 파괴를 정의하였으며, 송전철탑의 극한수평지지력을 측정하였다.

Figure 3은 본 시험에서 측정된 송전철탑의 극한수평지지력을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 본 시험에서 측정된 극한수평지지력은 하중재하각도가 0도일 경우와 하중재하각도가 45도일 경우가 대부분 유사한 것으로 나타났으나, 몇몇 경우에 있어서는 하중재하각도가 45도인 경우에 매우 크게 측정되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 송전철탑에 작용하는 수평하중의 재하각도가 0도인 경우를 송전철탑의 수평지

Table 2. Soil properties for model lateral load tests

Primary property	γ_t (kN/m ³)	G_s	LL (%)	PI (%)	ω	USCS	q_u (kPa)	S_u (kPa)	σ'_p (kN/m ²)	C_c
values	16.59	2.69	44.9	23.3	43.3	CL	16.89	11.08	65.71	0.40

γ_t =Unit weight, G_s =Specific gravity, LL=Liquid limit, PI=Plastic index, ω =Water content, USCS=Unified soil classification system, q_u =Unconfined compression strength, S_u =Undrained shear strength, σ'_p =Preconsolidation load, C_c =Compression index

지력을 대표하는 경우로 판단하였고, 이를 분석하여 연결형 말뚝기초의 지지력증가계수를 도출하였다.

3. 송전철탑 연결형 말뚝기초의 저항특성

3.1 연결형 말뚝기초의 거동특성

송전철탑에 수평하중이 작용하면 송전철탑 4각에 위치한 각각의 기초에는 상부구조물을 따라 하중이 전달되며, 인발거동에 의하여 파괴가 발생한다. 말뚝기초 조건에서 인발거동에 의한 기초의 파괴가 발생할 경우에는 기초의 수평거동 및 압축거동에 작용하는 하중의 크기가 지반이 갖는 본래의 극한지지력에 비하여 매우 작게 작용한다. 그러나 기초와 기초사이에 연결체를 연결하여 인발하중에 대한 저항요소를 추가한 연결형 말뚝기초의 경우에는 송전철탑 기초의 파괴를 유발하는 인

발하중에 대한 저항능력이 증가하여, 파괴를 유발하는 인발하중의 크기가 증가하며, 이때 수평거동 및 압축거동에 전달되는 하중의 크기가 증가하여, 지반이 갖는 본래의 저항능력을 보다 많이 활용하므로, 결과적으로 수평하중에 대한 송전철탑의 저항력을 증가시키게 된다.

Figure 4는 연결체의 특성에 따라 상이하게 나타나는 거동을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 수행된 시험의 연결체는 휨모멘트에 대한 저항 유무에 따라 두 가지로 구분할 수 있다. Figure 4(a)에 나타난 바와 같이 휨모멘트에 대한 저항이 거의 없는 저항성(wire type)의 연결체를 사용한 경우에는 인발거동이 발생됨에 따라 연결체에 인장저항이 발생하여 인발기초부에서 작용하는 저항력이 증가된다. 반면, Figure 4(b)와 Figure 4(c)에 나타난 바와 같이, 휨모멘트에 저항이 가능한 중강성(Flexible beam)의 연결체와 고강성(Rigid beam)의 연결체를 사용한 경우에는 인발거동에

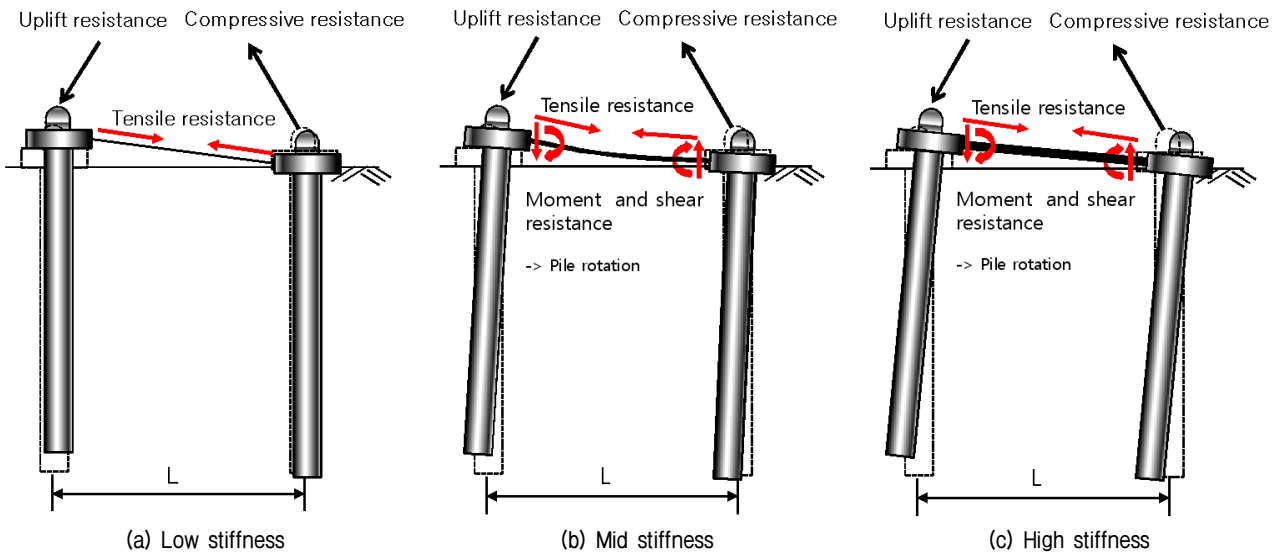


Fig. 4. Behavior of connected-pile foundation

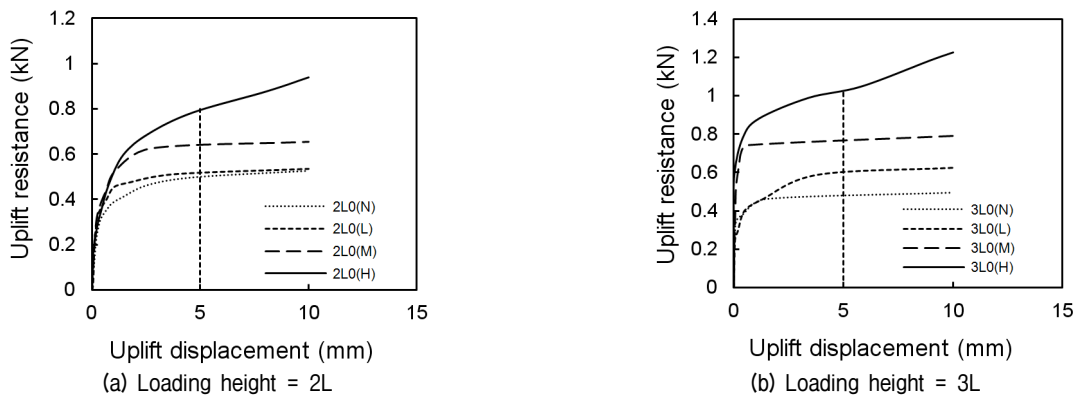


Fig. 5. Resistance and displacement of uplift foundation

의하여 인장저항이 발생되며, 연결체에서 발생하는 휨 모멘트와 전단력으로 인하여 기초의 회전거동이 유발되어, 동일한 인발변위가 발생하였을 시점의 인발기초부의 저항력이 보다 크게 작용하게 된다. Figure 5는 재하초기부터 인발변위가 말뚝직경의 10%에 해당되는 5mm에 도달하는 동안에 기초 인발부에서 측정된 저항력을 나타낸 그림으로, 기초 인발부에서 측정된 저항력의 크기가 연결체의 강성이 증가함에 따라 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

Figure 6은 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 하중단계에 따른 압축기초부의 압축변위변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 하중단계는 모형체에 작용하는 수평하중(H)을 극한수평하중(H_u)으로 나눈 값으로 표현하였으며, 그 값이 1인 경우는 인발변위가 말뚝직경의 10%에 도달하였음을 의미한다. Figure 6(a)에서 나타난 바와 같이 극한상태에서의 연결형 말뚝기초의 압축변위는 말뚝기초의 압축변위에 비하여 작은 변위가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 압축기초와 인발기초가 연결체로 연결된 연결형 기초에서는 두 기초사이의 부등변위에 저항하는 인장력이 발생되며, 이에 따라 파괴를 유발하는 인발변위(0.1B)가 발생된 시점의 압축변위가 말뚝기초에 비하여 작게 발생하게 되기 때문인 것으로 판단된다.

반면, Figure 6(b)에서 나타난 바와 같이 극한상태에서의 연결형 말뚝기초의 압축변위는 연결체의 강성이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 압축변위의 증가는 모형체에 작용하는 극한수평하중(H_u)의 증가와 연결체를 통하여 유발되는 말뚝의 회전거동 때문인 것으로 판단된다. 연결형 말뚝기초는 기초를 연결하는 연결체의 강성이 증가함에 따라 압축기초부와 연

결기초부간의 구속력이 증가하며, 이에 따라 연결형 말뚝기초가 하나의 구조체로서 거동하게 된다. 송전철탑상부구조물에서 수평하중이 작용할 때, 기초부에서는 인발거동이 주요한 거동으로 발생하게 되므로, 연결형 말뚝기초의 전체 거동은 압축기초부를 중심으로 회전하는 회전거동이 유발되게 된다. 또한, 이러한 회전거동은 연결체의 강성이 커짐에 따라 증가되는 극한수평하중(H_u)으로 인하여 보다 크게 발생되며, 이에 따라 압축변위량이 크게 발생하게 되는 것으로 판단된다.

3.2 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 저항력관계

송전철탑 말뚝기초의 설계는 송전철탑의 4각에 설치된 각 말뚝의 허용인발지지력, 허용압축지지력, 허용수평지지력이 기초에 작용하는 하중보다 크게 설계하도록 하고 있다(KEPCO 2011). 본 연구에서는 송전철탑상부구조물의 하단에 설치된 로드셀에서 측정된 복합적인 저항력을 상부구조물의 경사각의 변화와 수평방향(x,y방향)의 LVDT의 측정값을 이용하여 시험말뚝의 3방향(x,y,z방향)에서 발생하는 저항력으로 분리하였으며, 분리된 저항력과 송전철탑의 극한수평지지력을 분석하여 송전철탑의 기초시스템의 파괴시 기초에서 발생하는 저항력사이의 관계를 도출하고자 하였다.

Figure 7은 본 시험에서 측정된 송전철탑의 극한수평지지력과 기초에서 발생하는 수평저항력사이의 관계를 나타낸 그림이다. Figure 7(a)와 Figure 7(b)는 말뚝기초와 연결형 말뚝기초 조건에서의 송전철탑의 극한수평지지력과 기초의 수평저항력의 합의 관계를 나타낸 그림이며, Figure 7(c)와 Figure 7(d)는 기초의 압축부의 수평저항력과 인발부의 수평저항력의 관계를 나타낸 그

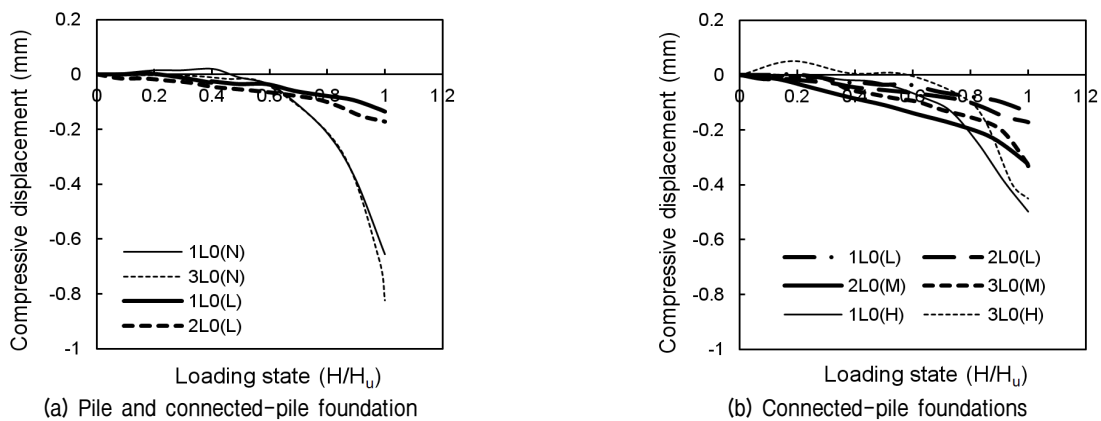


Fig. 6. Behavior of compressive foundation

림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 송전철탑의 극한수평지지력은 기초의 수평저항력의 전체의 합과 동일한 것으로 나타났으며, 압축력을 받는 기초의 수평저항력과 인발력을 받는 기초의 수평저항력 사이에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서, 말뚝기초와 연결형 말뚝기초 조건에서의 송전철탑의 극한수평지지력은 식 (1)과 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$H_u = 2R_{HC} + 2R_{HT} = 4R_H \quad (1)$$

$$H_u^* = 2R_{HC}^* + 2R_{HT}^* = 4R_H^* \quad (2)$$

여기서, H_u = 송전철탑의 극한수평지지력(말뚝기초), R_{HC} = 압축기초부의 수평저항력(말뚝기초), R_{HT} = 인발기초부의 수평저항력(말뚝기초), $R_H = (R_{HC} + R_{HT})/2$ = 기초부의 평균수평저항력(말뚝기초), H_u^* = 송전철탑의 극한수평지지력(연결형 말뚝기초), R_{HC}^* = 압축기초

부의 수평저항력(연결형 말뚝기초), R_{HT}^* = 인발기초부의 수평저항력(연결형 말뚝기초), $R_H^* = (R_{HC}^* + R_{HT}^*)/2$ = 기초부의 평균수평저항력(연결형 말뚝기초)이다.

본 연구에서는 시험에서 측정된 인발저항력을 이용하여 압축력이 작용하는 기초부를 중심으로 모멘트를 취하여 송전철탑의 극한수평지지력을 산정함으로써, 송전철탑의 극한수평지지력과 인발저항력의 관계를 도출하고자 하였다. Figure 8은 본 시험에서 측정된 말뚝기초 및 연결형 말뚝기초조건에서 송전철탑의 극한수평지지력과 기초에서 발생하는 인발저항력을 이용하여 산정된 송전철탑의 극한수평지지력을 비교한 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 측정된 인발저항력을 통하여 산정된 송전철탑의 극한수평지지력은 측정된 극한수평지지력과 매우 유사한 값이 산정되는 것으로 나타났다. 따라서, 말뚝기초와 연결형 말뚝기초조건에서의 송전철탑의 극한수평지지력은 식 (3)과 식 (4)와 같이 각각 표현될 수 있다.

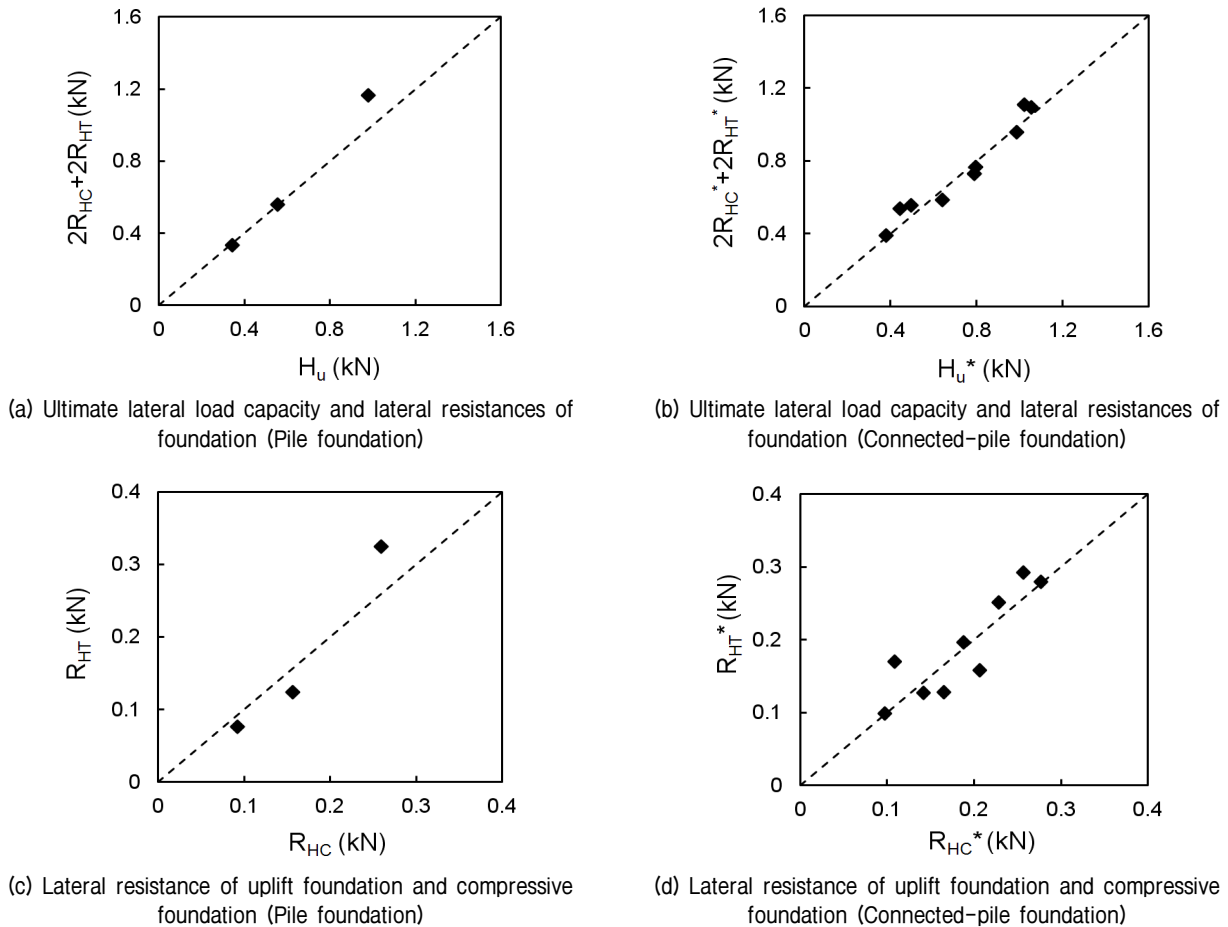
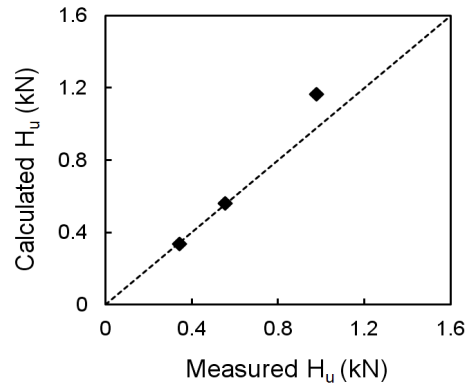
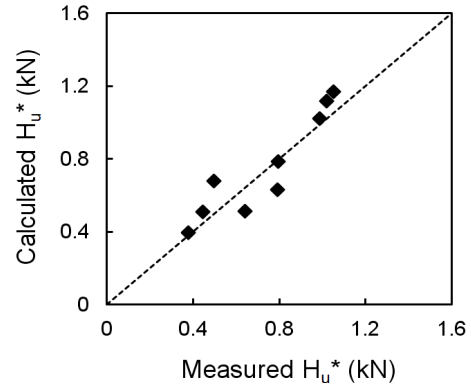


Fig. 7. Relationships between ultimate lateral load capacity and lateral resistance



(a) Measured and calculated H_u (Pile foundation)



(b) Measured and calculated H_u (Connected-pile foundation)

Fig. 8. Comparison of measured and calculated ultimate lateral load capacity

$$H_u = \frac{2R_T L}{z_h} \quad (3)$$

$$H_u^* = \frac{2R_T^* L}{z_h} \quad (4)$$

$$R_T^* = R_T + \Delta R_T = C_R R_T \quad (5)$$

$$H_u^* = \frac{2R_T^* L}{z_h} = \frac{2R_T L}{z_h} C_R = C_R H_u = 4C_R R_H = 4R_H^* \quad (6)$$

여기서, R_T = 인발기초의 인발저항력(말뚝기초), L = 기초간 거리, z_h = 하중재하높이, R_T^* = 인발기초의 인발저항력(연결형 말뚝기초)이다.

4. 송전철탐 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수

4.1 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수

수평하중을 받는 송전철탐의 기초의 거동은 인발거동에 지배되어, 송전철탐 말뚝기초 및 송전철탐 연결형 말뚝기초의 파괴가 인발거동에 의하여 발생한다. 따라서, 기초시스템의 파괴시 발생하는 인발기초의 인발저항력은 송전철탐의 지지력을 결정하는 주요한 요소로 간주되며, 연결체의 영향으로 연결형 말뚝기초의 인발저항력이 말뚝기초의 인발저항력에 비하여 큰 저항력이 발생된다. 본 연구에서는 연결형 말뚝기초조건에서의 인발저항력의 증가를 반영하기 위한 계수로서 저항력증가계수(C_R)를 도입하고자 한다. 본 연구에서 도입된 저항력증가계수는 연결형 말뚝기초의 인발저항력과 말뚝기초의 인발저항력사이에서 식 (5)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (1)-식 (5)의 관계에 따라, 연결형 말뚝기초조건에서의 송전철탐의 수평저항력은 식 (6)과 같은 식으로 표현되어 기초 각각의 요소의 저항력의 증가특성을 하나의 저항력증가계수를 통하여 나타낼 수 있다.

여기서, C_R = 저항력증가계수이다.

4.2 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수 측정

송전철탐 말뚝기초 및 송전철탐 연결형 말뚝기초 시스템의 파괴기준은 인발거동이 발생하는 기초부의 인발변위가 0.1B 발생한 시점을 기준으로 정의 되므로, 말뚝기초 조건에서 측정된 인발저항력은 지반에 의한 인발지지력으로 간주할 수 있다. 본 연구에서는 연결형 말뚝기초의 저항력 증가계수를 정의하기 위하여 말뚝의 인발지지력을 선정하였다. Figure 9는 본 실험에서 측정된 말뚝기초의 인발저항력을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 1L0(N)의 P4 말뚝과 2L45(N)의 인발말뚝을 제외한 대부분의 말뚝에서 유사한 인발저항력이 측정된 것으로 확인되었다. 따라서, 본 연구에서는 1L0(N)의 P4 말뚝과 2L45(N)의 인발말뚝을 제외한 모든 경우의 인발저항력을 평균하여 말뚝기초의 인발지지력 간주하였으며, 선정된 인발지지력은 크기는 0.509kN으로 나타났다. 본 연구에서는 선정된 인발지지력의 크기를 확인하기위하여 측정된 송전철탐의 극한수평지지력과 식 (3)을 이용하여 말뚝기초의 인발지지력을 산정하였다. Figure 10은 본 연구에서 선정된 인발지지력과 송전철탐의 극한수평지지력으로부터 산정된 인발지지력을 비교한 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 선정된 인발지지력은 극한수평지지력으로부터 산정된 인발

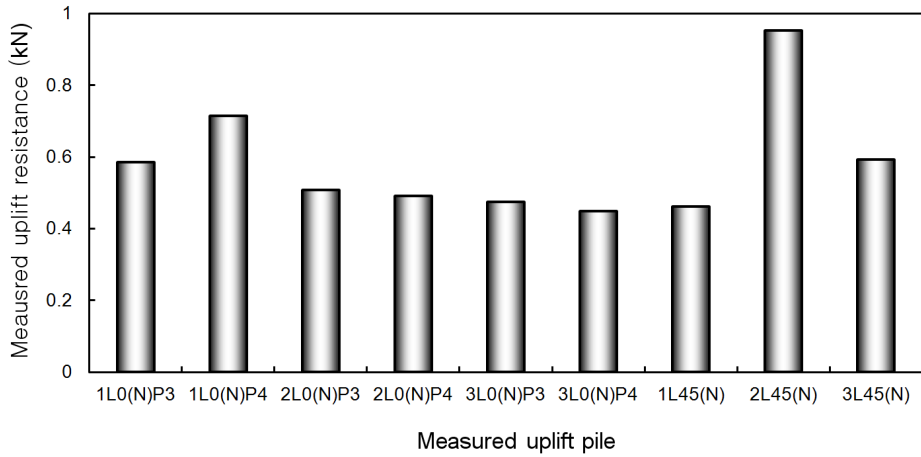


Fig. 9. Measured uplift resistance

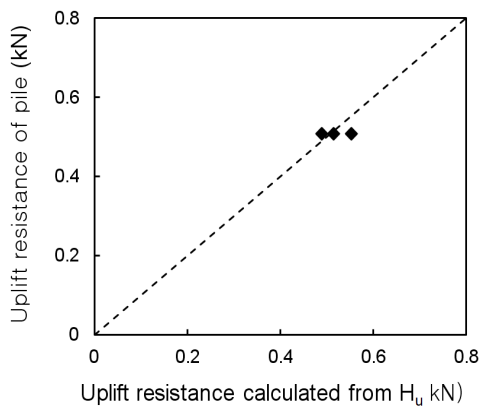


Fig. 10. Comparison of measured and calculated uplift resistance of pile foundation

지지력과 매우 유사한 값이 도출되는 것으로 나타났으며, 이에 따라 선정된 인발지지력이 합리적인 값을 갖는 것으로 판단하였으며, 선정된 말뚝기초의 인발지지력과 연결형말뚝기초의 인발저항력을 비교하여 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수를 측정하였다.

4.3 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수 분석

본 연구에서 측정된 저항력 증가계수는 송전철탑에 작용하는 수평하중의 재하높이와 연결체의 강성에 따라서 상이한 값이 나타나는 것으로 확인되었다. Figure 11은 상대재하높이에 따른 저항력증가계수의 변화를 나타내는 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 저항력 증가계수는 상대재하높이가 높아짐에 따라 증가하는 경향이 있었다. 일정한 수평하중을 재하 하였을 때, 재하높이가 높아지면, 기초에서 작용하는 인발하중의 크기가 커지고, 이에 따라 기초의 인발변위가 증가된다.

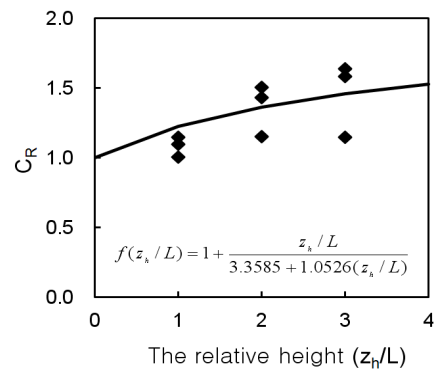


Fig. 11. Resistance increasing factor(C_R) with relative height

반면에 연결형 말뚝기초의 연결체는 인발하중에 대한 저항요소로 작용하므로, 하중재하높이가 높을수록 연결체에 의한 영향이 커져 그 효과는 크게 나타나게 되는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 정규재하높이에 대한 저항력증가계수의 분포를 회귀분석하여 상대재하높이가 저항력증가계수에 미치는 영향을 확인하였으며, 그 관계는 식 (7)과 같이 나타났다.

$$f(z_h/L) = 1 + \frac{z_h/L}{3.3585 + 1.0526(z_h/L)} \quad (7)$$

연결형 말뚝기초는 연결체의 강성이 클수록 더 높은 저항력이 나타나며, 이에 따라 저항력증가계수의 크기 또한 보다 큰 값을 갖게 된다. 본 연구에서는 연결체의 강성에 따른 저항력증가계수의 변화를 확인하기 위하여 연결체의 강성을 정규화하여 정규강성과 저항력증가계수의 관계를 도출하고자 하였다. 연결형 말뚝기초의 저항력 증가계수는 연결체의 강성에 따라 증가하지만, 말뚝기초에 의한 지지력이 큰 조건인 경우에는 연

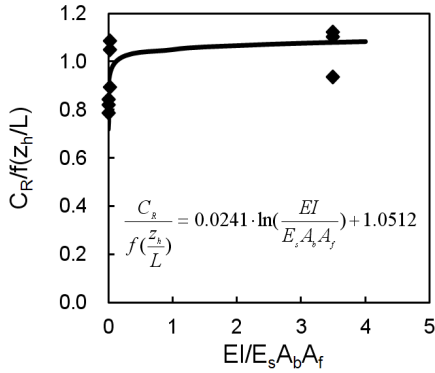


Fig. 12. Resistance increasing factor(C_R) with normalized stiffness of connection beam

결체를 통한 지지력이 상대적으로 작은 부분을 부담하게 된다. 따라서 본 연구에서는 연결체의 강성을 말뚝기초의 지지력에 영향을 미치는 지반의 탄성계수와 말뚝기초의 주면적, 선단면적으로 정규화하였다. 연결체의 강성을 정규화하기 위한 지반의 탄성계수는 Bowles(1982)이 제안한 콘관입저항치를 이용한 탄성계수 추정방법 [$E_s = (6 \sim 8)q_c$]에서 시험지반의 SPT N치가 1로 매우 연약한 상태임을 고려하여 $E_s = 6q_c$ 로 측정하였으며, 저항력증가계수에 영향을 미치는 정규재하높이의 영향을 고려하여 하나의 관계식으로 표현하였다. Figure 12는 연결체의 정규강성에 따라 증가하는 연결형 말뚝기초의 저항력증가계수를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 연결형 말뚝기초의 저항력 증가계수는 정규강성의 크기가 증가함에 따라 증가하는 특성이 있으나, 지속적으로 증가하지 못하고 특정한 값에서 수렴하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 도출된 저항력증가계수의 식은 다음과 같다.

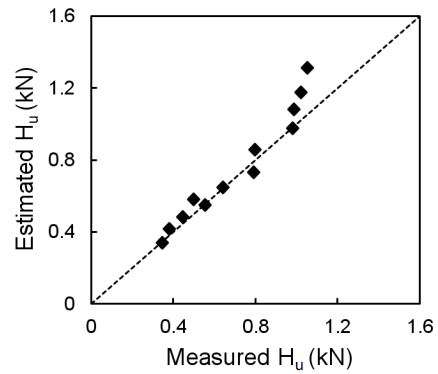
$$C_R = \left[0.0241 \ln \left(\frac{EI}{E_s A_b A_f} \right) + 1.0512 \right] f \left(\frac{z_n}{L} \right) \quad (8)$$

여기서, E =연결체의 탄성계수, I =연결체의 단면2차 모멘트, E_s =지반탄성계수, A_b =말뚝의 선단면적, A_f =말뚝의 주면적이다.

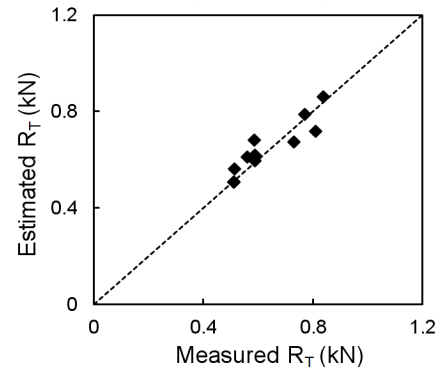
4.4 저항력증가계수를 이용한 연결형 말뚝기초의 저항력산정 결과

본 연구에서는 말뚝기초의 측정된 인발지저항력과 식 (7), 식 (8)을 이용하여 본 시험에서 측정된 각 요소의

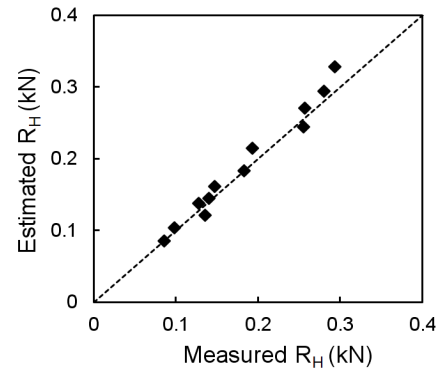
저항력을 예측하였고, 그 값과 측정값을 비교하여 확인하였다. Figure 13은 본 실험에서 측정된 저항력과 저항력증가계수를 이용하여 예측한 저항력을 비교한 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 측정된 송전철탑의 극한수평지저력, 기초의 인발저항력, 기초의 수평저항력 모두 저항력증가계수를 이용하여 산정된 값과 일치하는 것으로 나왔으며, 이에 따라 저항력증가계수를 이용한 연결형 말뚝기초의 저항력산정이 비교적 합리적인 결과를 도출하는 것으로 판단된다.



(a) Comparison of ultimate lateral load capacity



(b) Comparison of uplift resistance



(c) Comparison of lateral resistance

Fig. 13. Estimation of resistance using resistance increasing factor

5. 결 론

본 연구에서는 점토지반에 설치된 송전철탐 말뚝기초와 연결형 말뚝기초를 대상으로 다양한 하중조건과 기초조건에서의 수평재하시험을 수행하여 연결형 말뚝기초조건에서의 저항력의 증가특성 및 거동특성을 확인하고, 저항력의 관계를 분석하여 저항력증가계수를 도출하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 송전철탐 말뚝기초 및 연결형 말뚝기초의 거동은 인발거동이 주요한 거동으로 작용하며, 송전철탐의 연결형 기초의 파괴는 인발변위가 발생하는 기초에서 정의된다.
- (2) 송전철탐 연결형 말뚝기초는 연결체의 휨모멘트의 저항 유무에 따라 두 가지 종류로 구분할 수 있으며, 이러한 형식의 주요한 거동적 차이는 연결체를 통하여 말뚝기초의 회전거동을 유발하는데 있다. 연결형 말뚝기초는 연결체의 강성이 클수록 말뚝의 회전거동을 유발하여 동일한 인발변위를 발생시키는 필요한 인발부의 전달하중의 크기를 증가시켜, 수평하중의 저항력을 크게 발생시키며 이에 따라 송전철탐의 극한수평지지력의 증가를 도모할 수 있다.
- (3) 송전철탐 연결형 말뚝기초에서 발생하는 요소별 저항력의 관계를 분석한 결과, 송전철탐의 극한수평지지력과 말뚝기초의 요소별 저항력은 일정한 관계가 있는 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서는 송전철탐 연결형 말뚝기초의 저항력의 증가특성을 나타내기 위하여 저항력증가계수를 도입하여 말뚝기초 조건의 인발지지력을 통하여 연결형 말뚝기초조건에서의 송전철탐의 극한수평지지력, 기초의 인발저항력, 기초의 수평저항력을 예측하도록 하였다. 이를 위하여 정규재하높이와 연결체의 정규강성에따른 저항력증가계수를 분석하여 관계식을 도출하였으며, 도출된 관계식과 말뚝기초의 인발지지력을 이용하여 예측된 송전철탐의 저항력을 측정값과 비교한 본 연구를 통해 제안된

예측식이 비교적 합리적인 값을 예측하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “송전철탐 특수기초 공법개발 및 설계기준 수립 연구”의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. BSI (1986), “British standard code of practice for foundations”, BS8004, British Standard Institution(BSI), London.
2. Bowles, J. E. (1982), “Foundation Analysis and Design”, McGrawHill Book Company, New York.
3. 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.
4. IEEE (2001), “IEEE Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing. (Overturning Moment tests)”, IEEE Standard, pp.691-2001.
5. ISSMFE (1985), “Axial pile loading test-part 1: static loading”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.9, No.2, pp79-89.
6. Jang, S. H., Kim, H. K., Lee, K. H., Han, K. S., 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 Engineers(KIEE)*, Vol.56, No.6, pp.1031-1034.
7. JGS (2002), “Standard for vertical loading test of pile”, JGS-1813-2002, Japanese Geotechnical Society.
8. KEPCO (2011), Design standard for transmission tower foundation, DS-1110.
9. Kim, J. B., Cho, S. B. (1995), “The design and the full load test results of 765kV tower foundation”, *Proceedings of Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE) fall national conference 1995*, pp.447-449.
10. Kyung, D. H., Lee, J. H., Paik, K. H., Kim, D. H. (2011), “The behavior and resistance of connected-pile foundations for transmission tower from In-situ lateral load tests”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.27, No.3, pp.27-40.
11. TEPCO (1988), UHV 基礎設計要項(案), 5.4-5.5

(접수일자 2012. 2. 20, 심사완료일 2012. 8. 7)