

점토지반에 근입된 모형송전철탑 연결형 기초의 수평거동분석

The analysis of lateral behavior of connected foundation for transmission tower in clay

경두현¹⁾, Doohyun Kyung, 송원준²⁾, Wonjune Song, 이준환³⁾, Junhwan Lee

1) 연세대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

2) 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

3) 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : In this study, we analyzed lateral behavior of connected foundation for transmission tower in clay. For this study, we performed model lateral load test, measured load-displacement curve of connected foundation. For the tests, we manufactured connected foundation model that consider a change of rigidity, installed various measuring sensors for understanding of elements and general foundation behavior. From the test results, we measured load capacities using various methods, compared and analyzed these capacities.

Key words : model lateral load test, connected pile, transmission tower, clay, load capacity.

1. 서 론

송전용 철탑기초는 4각의 개별기초로 구성되어 수평력과 인발력이 핵심 설계하중으로 간주되는 구조물로서, 일반적인 교량이나 빌딩구조물의 기초와는 거동이 매우 다른 양상을 나타낸다. 국내에는 해안 및 하상지반과 같은 연약지반이 매우 폭넓게 분포하고 있으며, 국내 연약지반에 주로 사용되는 송전철탑기초는 자켓형상의 독립말뚝기초로서, 일본의 UHV 설계기준을 자주 차용하여 사용되고 있을 뿐, 국내 연약지반내의 시공을 위한 철탑기초의 형식 및 설계기준, 연구성과는 매우 미흡한 실정이다.

연결형 기초는 기초체와 기초를 연결하는 연결보로 구분되며, 기초와 연결보가 복합적으로 거동하여 기존의 형식에 비하여 연약지반에 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나, 국내의 경우 시화호구간 345kV 영흥 송전철탑에서 과도한 지반침하로 인한 부재손상의 보수의 목적으로 연결보를 설치한 사례가 있을 뿐, 연결형 기초에 대한 설계기준, 연구성과, 적용사례는 전무하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 연약지반에 유리한 연결형 기초를 대상으로 모형수평재하시험을 수행하고, 연결형 기초의 하중-변위특성을 이용하여 연결형 기초의 수평거동을 분석하였다. 본 실험은 전라북도 익산의 실트질 점토지반에서 수행되었으며, 연결체의 강성의 변화를 고려할 수 있는 연결형 기초 모형을 제작하여 사용하였고, 요소 및 기초전반의 거동을 파악하기 위하여 다양한 계측장치를 설치하였다. 실험결과를 토대로, 다양한 방법을 이용하여 연결형 기초의 지지력을 측정하고 비교 분석하였으며, 수평하중을 받는 연결형 기초의 거동을 분석하였다.

2. 송전철탑 연결형 기초의 지지력 측정방법

2.1 말뚝의 변위를 이용한 지지력 측정 방법

2.1.1 JEC (1979)

기초의 설계에 있어서 말뚝의 파괴는 특정 파괴기준을 통하여 적용되는 파괴기준에 따라 말뚝의 지지력이 달라진다(Fellenius 1980). 국내의 송전철탑기초는 기초에 작용하는 극한하중을 고려하여 설계하도록 하고 있으나, 극한하중을 선정하기 위한 송전철탑의 지지력 산정 기준은 각각의 송전철탑기초를 구성하는 기초의 특성에 따라 일반적으로 사용되는 기초의 지지력 산정 기준을 통하여 선정하도록 하고 있으며, 송전철탑기초에 대한 별도로 지지력 산정기준을 정의하지는 않고 있다. 특히, 말뚝기초가 적용된 연결형 송전철탑기초는 수평력과 인발력에 주로 지배되는 구조물로서, 송전철탑기초의 지지력 산정 기준을 기초의 수평변위와 인발변위를 통하여 정의하거나, 송전철탑의 재하시험에서 얻어지는 하중-변위 곡선을 통하여 도식적인 방법을 이용하여 정의할 수 있다.

그림 1에 나타난 바와 같이, JEC(1979)에서는 송전철탑의 허용지지력에 대한 기준으로 송전철탑 각각의 말뚝간의 근개거리(L)의 1/800에 해당되는 변위를 수평변위의 기준으로 정의하고 있으며, 말뚝의 수직변위의 경우, 말뚝간의 근개거리(L)의 1/1200에 해당되는 변위로 정의하고 있다.

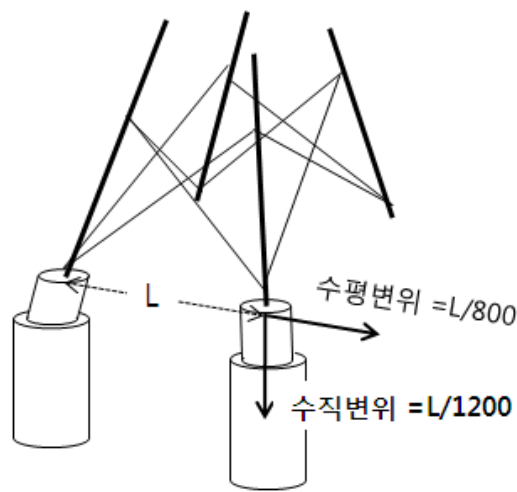


그림 1. JEC(1979) 허용지지력 측정기준

2.1.2 최초인발변위법(0.04B)

인발력이 작용하는 말뚝은 말뚝의 하중-변위곡선상에서 특정지점을 기준으로 곡선의 기울기가 완만해지는 지점이 발생하며, 그 지점을 기준으로 말뚝의 인발지지력을 측정할 수 있다. 자켓형상의 송전철탑의 기초는 구조체에 작용하는 수평하중에 대하여 말뚝의 압축 및 인발에 의한 거동이 크게 일어나며, 특히, 인발에 의한 거동이 가장 크게 일어나는 구조이므로, 말뚝의 인발하중에 도달하는 최초의 인발변위를 연결형 기초의 최초의 파괴 가능성을 갖는 지점으로 정의할 수 있다. 본 실험에서 측정된 무연결체의 기초의 최초의 인발파괴지점은 말뚝직경(B)의 4%의 지점이므로, 최초인발변위법은 말뚝의 인발변위가 0.04B에 도달한 시점으로 정의할 수 있다.

2.1.3 0.1B법

ISSMFE(1985)와 BSI(1986), Fleming 등(1992)과 JGS (2002)에서는 두부에서 발생하는 변위가 원형 말뚝직경의 10%에 해당되는 변위가 발생 되었을 때를 기준으로 극한지지력을 측정할 것을 제안하고

있으며, 한국지반공학회(2007)의 경우, 인발력이 발생하는 말뚝의 극한지지력을 인발 저항이 최대일 때의 하중으로 판정하되, 선단 직경의 10% 이하의 범위로 선정할 것을 제안하고 있다. 따라서, 말뚝 직경의 10%이후의 변위는 이미 말뚝 기초의 파괴가 발생한 이후의 지점을 의미하며, 말뚝 직경의 10%에 해당되는 지점은 연결형 기초의 파괴의 최대지점으로 정의할 수 있다.

2.1.4 Chin(1970)의 방법

앞서 언급한 바와 같이, 송전철탑기초의 지지력 산정기준은 기초의 수평변위와 인발변위를 통하여 정의하거나, 재하시험에서 얻어지는 하중-변위 곡선을 통하여 도식적인 방법을 이용하여 정의할 수 있다. 재하시험을 통하여 얻어지는 하중-변위 곡선을 이용한, 대표적인 도식적인 방법으로는 Chin(1970)의 방법이 있다. Chin(1970)은 말뚝에 발생하는 하중과 변위의 관계를 쌍곡선 형태로 정의하여 말뚝의 극한지지력을 측정하는 방법을 제안하였으며, 그 방법은 다음과 같다.

$$\frac{S}{P} = C_1 S + C_2 \quad (1)$$

$$P_u = 1/C_1 \quad (2)$$

여기서, S=발생변위, P=재하하중, P_u=극한지지력이다.

3. 송전철탑 연결형 기초의 수평재하시험

3.1 시험개요

본 연구에서 수행된 수평재하시험은 연결체의 연결유무에 따라 독립기초 조건과 연결형 기초 조건의 시험으로 구분되며, 독립기초 조건에서는 각각의 단독 말뚝을 4개의 강봉과 하중재하대로 구성된 강봉구조체로 연결하여 송전철탑의 형상을 이루도록 하고, 연결형 기초의 조건에서는 각각의 독립기초 사이에 강성이 다른 3종류의 연결체를 연결하여 연결형 기초를 구현하도록 하였다. 연결형 기초를 구성하는 연결체의 경우, 근접한 기초사이에 3종류의 연결체가 설치되었으며, 각각의 연결체는 연결체의 강성에 따라 저강성의 연결체(EI=0.133Nm²), 중강성의 연결체(EI=6.135Nm²), 고강성의 연결체(EI=1571Nm²)로 구분하여 설치되었다. 또한, 하중을 재하하는 하중조건으로, 하중재하높이를 말뚝간 근개거리(L)의 1배, 2배 3배의 높이로 구분하였으며, 하중재하의 각도를 0°와 45°로 각각 구분하여 실험을 수행하였다. 따라서, 본 연구에서 수행된 모형실험은 4가지 기초형태와 6가지 하중형태에 대해서 총 24회가 수행되었다.

표 1. 모형시험의 기초형태 및 재하조건

구분	연결체강성	하중높이	하중각도	시험횟수	
무연결 독립기초	-	1L, 2L, 3L	0°, 45°	6	24
연결형 기초	저(l), 중(m), 강(h)	1L, 2L, 3L	0°, 45°	18	

3.2 지반조건

본 연구에서 수행된 모형시험은 전라북도 익산의 현장에서 수행되었다. 현장지반은 지표면으로부터

1.0m의 실트질 모래층과 6.8m 두께의 실트질 점토층으로 구성되었고, 7.8m이후로는 실트질 모래층이 존재하였다. 현장지반의 지반조건을 조사하기 위해서 표준관입시험(SPT)과 콘관입시험(CPT)을 수행하였으며, 점토층에 대한 토질정수를 얻기 위하여 현장에서 채취된 비교란 시료를 이용하여 각종 실내시험을 수행하였다. 본 시험은 시표면의 1.0m까지 위치한 실트질 모래층을 제거한 이후의 실트질 점토층에서 수행되었으며, 시험현장의 점토층의 주요 물성은 표 2와 같다.

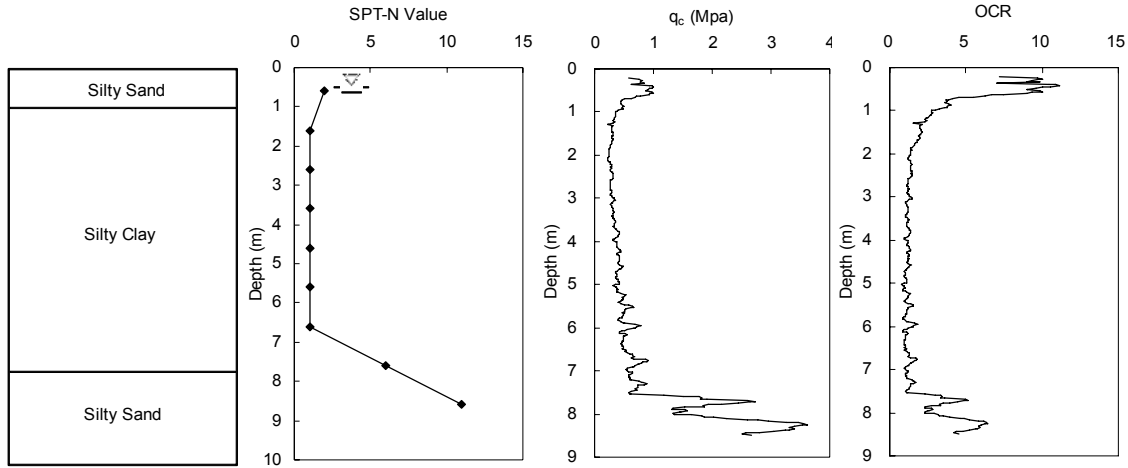


그림 2. 모형시험부지에 대한 지반조사결과

표 2. 모형시험부지 점토의 주요 물성

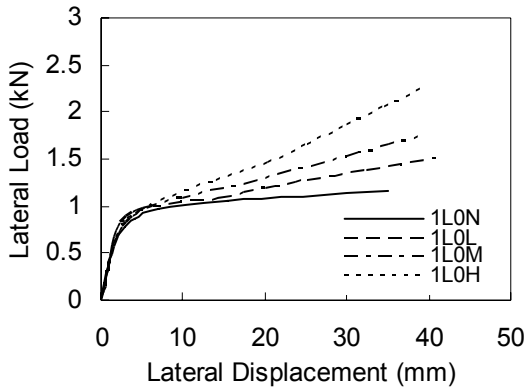
주요물성	γ_t (kN/m^3)	G_s	LL (%)	PI (%)	w (%)	USCS	q_u (kPa)	S_u (kPa)	σ'_p (kN/m^2)	C_c
물성치	16.59	2.69	44.9	23.3	43.3	CL	16.87	11.08	65.71	0.40

γ_t =단위중량, G_s =비중, LL =액성한계, PI =소성지수, w =함수비, USCS=통일분류법, q_u =일축압축강도, S_u =비배수전단강도, σ'_p =선형압밀하중, C_c =압축지수

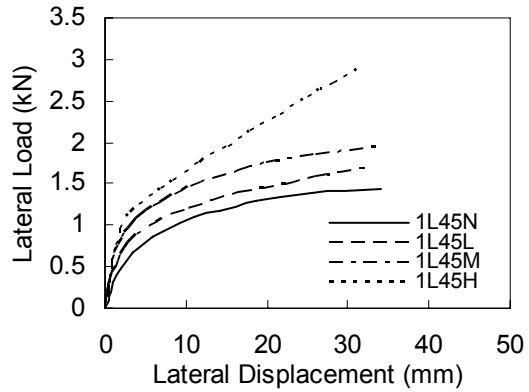
4. 모형송전철탑 연결형 기초의 수평거동분석

4.1 하중재하대에서 측정된 수평하중-수평변위곡선

그림 3은 연결체의 변화에 따른 수평하중-수평변위를 나타낸 곡선이다. 일례로, 그림 3(a)는 하중높이 1L과 하중각도 0° 조건에서의 연결체의 변화에 따른 수평하중-수평변위를 나타내는 곡선이며, 그림 3(b)는 하중높이 1L과 하중각도 45° 조건에서의 연결체의 변화에 따른 수평하중-수평변위 곡선을 나타내는 그림이다. 그림 3에서 나타난 바와 같이, 수평하중-수평변위 곡선의 탄성구간에서는 독립기초와 연결형 기초의 하중-변위 특성의 차이가 전반적으로 명확하게 나타나지는 않은 것으로 나타났다. 그러나, 변위가 커짐에 따라 독립기초(1L0N, 1L45N)가 극한상태로 급격히 수렴하는 반면, 연결형 기초는 변위가 커짐에 따라 하중지지능력도 계속 증가하며, 연결체의 강성이 클수록 이러한 경향이 더욱 분명해 지는 것으로 나타났다.



(a) 재하높이 1L, 재하각도 0°



(b) 재하높이 1L, 재하각도 45°

그림 3. 연결체의 변화에 따른 수평하중-수평변위곡선

4.2 각 말뚝에서 측정된 하중-변위곡선

그림 4는 하중재하각도에 따라 달라지는 말뚝의 거동형상을 나타낸 그림이며, 그림 5는 재하방향이 0°인 경우에 각 말뚝에서 측정된 하중-변위 곡선을 나타내는 그림이고, 그림 6은 하중재하방향이 45°인 경우에 각 말뚝에서 측정된 하중-변위 곡선을 나타내는 그림이다. 그림 4와 그림 5에 나타난 바와 같이 재하방향이 0°인 기초의 경우 전위의 말뚝(P1, P2)에서 압축력(-) 및 압축변위(-)가 발생되며, 후위의 말뚝(P3, P4)에서 인발력(+) 및 인발변위(+)가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 각 말뚝에서의 수평하중 및 변위가 발생하는 것으로 나타났으나, 그 값의 크기는 말뚝의 연직방향의 하중 및 변위에 비하여 매우 작은 것으로 확인되었다. 또한, 연직방향의 하중 및 변위 중에서는 인발에 대한 하중 및 변위가 압축력에 의한 하중 및 변위보다 큰 것으로 나타났다.

그림 6은 재하방향을 45°인 기초의 각 말뚝에서 발생한 하중-변위를 나타낸 그림이다. 그림 4와 그림 6에 나타난 바와 같이, 재하방향을 45°의 모형체의 경우 전위 말뚝(P1)에서 압축력(-) 및 압축변위(-)가 발생되며, 중간부 말뚝(P2, P4)과 후위의 말뚝(P3)에서 인발력(+)과 인발변위(+)가 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 중간부의 말뚝(P2, P4)의 경우 후위의 말뚝(P3)에 비하여 매우 작은 변위가 발생되었으며, 각 말뚝의 수평하중 및 변위의 경우, 0°에서와 같이 연직방향의 경우에 비하여, 매우 작은 것으로 나타났다. 또한, 연직방향의 하중 및 변위 중에서는 인발에 대한 하중 및 변위가 압축력에 의한 하중 및 변위보다 큰 것으로 나타났다.

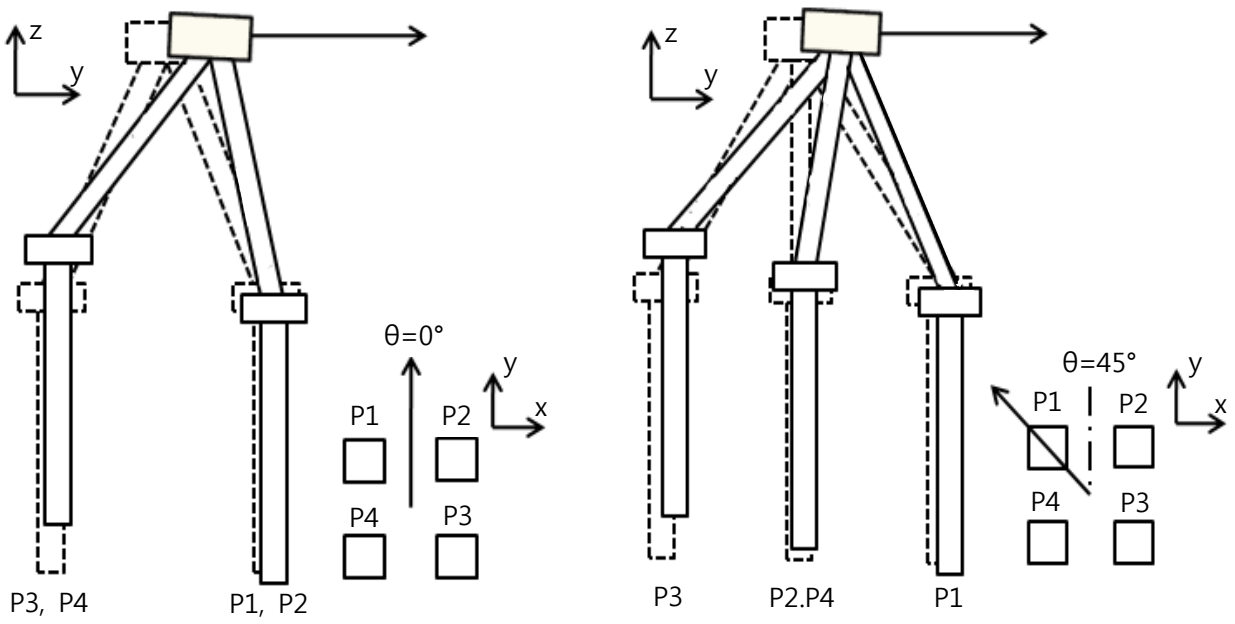


그림 4. 개별기초요소에 대한 하중각도 및 기초의 거동형상

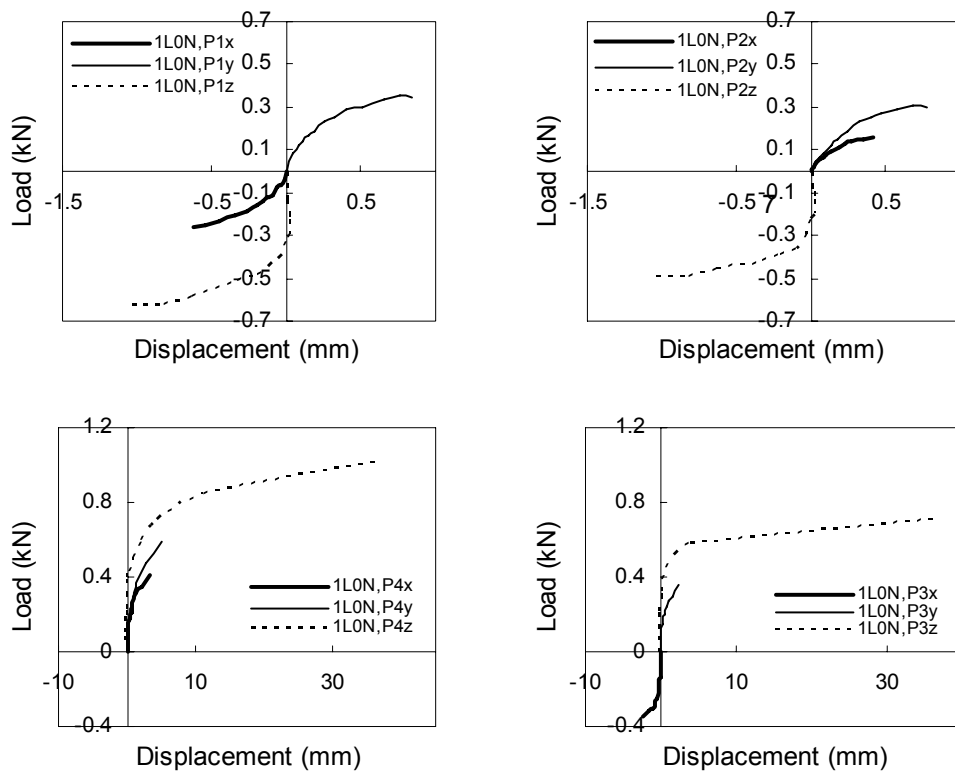


그림 5. 말뚝의 거동형상 및 각 말뚝에서 측정된 하중-변위곡선 (재하방향 0°)

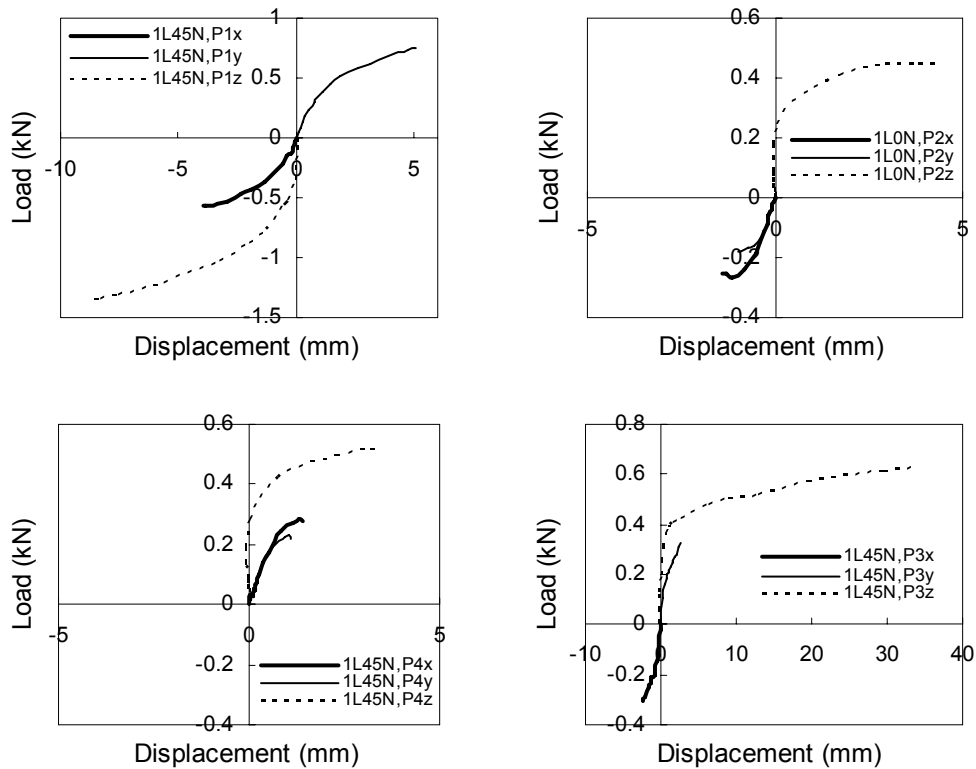
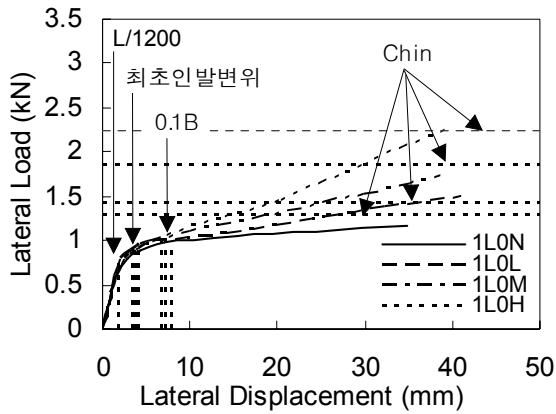


그림 6. 말뚝의 거동형상 및 각 말뚝에서 측정된 하중-변위곡선(재하방향 45°)

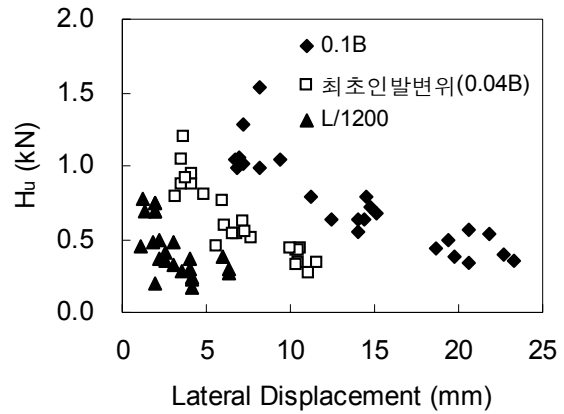
4.3 지지력측정 방법에 의하여 측정된 연결형 기초의 수평지지력

그림 7(a)는 본 연구에서 선정된 4가지 방법에 따라 측정된 지지력과 기준변위를 수평하중-수평변위 곡선에 나타낸 그림이며, 그림 7(b)는 L/1200법(JEC 1979), 최초인발변위법(0.04B), 0.1B법에 따라 측정된 모든 실험조건의 수평지지력 및 수평변위를 나타내는 그림이다. Chin 방법의 경우 측정 방법의 특성상 기준변위가 측정되지 않으므로, 모든 실험조건의 수평지지력을 표 3에 나타내었다.

그림 7과 표 3에 나타난 바와 같이, 수평지지력과 이에 상응한 수평변위는 적용기준에 따라 다르게 측정되는 것을 확인할 수 있었으며, 측정된 수평지지력은 L/1200법(JEC 1979), 최초인발변위법(0.04B), 0.1B법, Chin법의 순서로 나타나게 되는 것을 확인할 수 있었다. 각각의 방법에서 L/1200방법(JEC 1979)은 기초의 수평하중-수평변위 곡선의 탄성구간에서 측정되는 것을 확인할 수 있었으며, 최초인발변위법(0.04B)은 수평하중-수평변위 곡선의 기울기가 급격하게 변화되는 변곡점에서 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 말뚝 직경에 10%의 인발변위 지점을 기준으로 측정하는 0.1B방법은 수평하중-수평변위 곡선의 기울기가 급격하게 변화되는 변곡점 이후에서 측정되는 것을 확인할 수 있었으며, Chin의 방법의 경우 측정된 수평하중-수평변위 곡선의 이후의 지점에서 지지력을 측정하는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 측정된 지지력과 기준변위



(b) 선정된 방법을 통하여 측정된 수평지지력

그림 7. 송진철탑 연결형 기초의 지지력측정

표 3. Chin의 방법을 통하여 측정된 수평지지력

구분		수평지지력 (kN)					
		1L		2L		3L	
		0°	45°	0°	45°	0°	45°
독립기초 (N)		1.285	1.699	0.695	0.946	0.419	0.452
연결형 기초	저강성 (l)	1.414	1.865	0.812	1.063	0.499	0.609
	중강성 (m)	1.852	2.124	0.916	1.183	0.581	0.767
	고강성 (h)	2.249	3.199	1.508	1.481	1.021	0.949

5. 결론

본 연구에서는 송진철탑 연결형 기초의 수평거동특성을 분석하고자 다양한 조건의 송진철탑 연결기초의 모형수평재하시험을 수행하였다. 본 연구에서는 다양한 지지력을 측정방법을 확인하고 선정하여 연결형 기초의 지지력을 측정하였으며, 하중-변위특성을 분석하여 연결형 기초의 수평거동특성을 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 본 시험의 하중재하시점으로부터의 측정된 수평하중-수평변위 곡선은 탄성구간에서는 독립기초와 연결형 기초의 하중-변위 특성의 차이가 명확하게 나타나지는 않았으며, 변위가 커짐에 따라 독립기초는 극한상태로 급격히 수렴하는 반면, 연결형 기초는 하중지지능력이 지속적으로 증가하여 연결형 기초의 지지력이 독립기초의 지지력보다 커지는 것을 확인할 수 있었으며, 연결형 기초의 하중지지능력이 연결체의 강성이 클수록 더욱 분명해 지는 것을 확인할 수 있었다.

2. 하중재하방향이 0°인 기초의 경우, 전위의 말뚝(P1, P2)에서 압축력(-) 및 압축변위(-)가 발생되며, 후위의 말뚝(P3, P4)에서 인발력(+) 및 인발변위(+)가 발생하는 것으로 나타났으며, 재하방향을 45°의 모형체의 경우, 전위 말뚝(P1)에서 압축력(-) 및 압축변위(-)가 발생되며, 중간부 말뚝(P2, P4)과 후위의 말뚝(P3)에서 인발력(+)과 인발변위(+)가 발생하는 것으로 나타났다.

3. 모형수평재하시험시 발생하는 연결형 기초의 각 기초체의 거동은 수직거동과 수평거동이 모두-발생하나, 수평거동에 비하여 수직거동이 지배적이며, 특히 수직거동 중에서는 인발력을 받는 말뚝의 인발거동이 지배적인 것으로 나타났다.

4. 다양한 방법의 지지력측정 방법을 이용하여 연결형 기초의 지지력을 측정한 결과, JEC(1979), 최초 인발변위법(0.04B), 0.1B법, Chin(1970)법의 순서로 지지력이 측정되는 것을 확인할 수 있었으며, JEC(1979) 방법은 기초의 수평하중-수평변위 곡선의 탄성구간에서 측정되고, 최초인발변위법(0.04B)은 수평하중-수평변위 곡선의 기울기가 급격하게 변화되는 변곡점에서 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 0.1B방법은 수평하중-수평변위 곡선의 기울기가 급격하게 변화되는 변곡점 이후에서 측정되는 것을 확인할 수 있었으며, Chin의 방법의 경우 측정된 수평하중-수평변위 곡선의 이후의 지점에서 지지력을 측정하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “송전철탑 특수기초 공법개발 및 설계기준 수립 연구”의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국지반공학회(2009), *구조물기초설계기준*, 한국지반공학회, pp347-pp368.
2. BSI(1986), "British standard code of practice for foundations", BS8004, British Standard Institution (BSI), London
3. Chin, F.V.(1970), "Estimation of the Ultimate Load of Piles Not Carried to Failure", *Proc. of 2nd southeast Asian Conference on Soil Engineering*, pp. 81-90
4. Fellenius, B.H.(1980), "The analysis of results from routine pile load tests", Vol. 13, No.6, pp19-31
5. Fleming, W. G., Weltman A. J, Randolph, M. F., and Elson, W. K. (1992), "Piling Engineering", 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc.21.
6. ISSMFE(1985),"Axial pile loading test-part 1: static loading Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.8, No.2, pp79-89
7. JEC(1979), "Design Standard for Power Transmission Supports", Standard of the Japanese Electro technical Committee JEC-127-1979
8. JGS(2002), "Standard for Vertical loading test of pile", JGS-1813-2002, Japanese Geotechnical Society