한국지반공학회논문집 제28권 2호 2012년 2월 pp. 57 ~ 70

송전용 철탑기초의 현장수평재하시험을 통한 연결형 말뚝기초의 거동 및 지지력특성

The Behavior and Resistance of Connected-pile Foundations for Transmission Tower from In-situ Lateral Load Tests

경 두 현[1] Kyung, Doo-Hyun
이 준 환[2] Lee, Jun-Hwan
백 규 호[3] Paik, Kyu-Ho
김 대 홍[4] Kim, Dae-Hong
김 대 학[5] Kim, Dae-Hak

Abstract

For soft ground, a pile foundation is typically used as a substructure of transmission tower. However, differential settlement between the foundations can cause structural damage of transmission tower. The connected-pile foundation is a type of group foundation consisting of four foundations connected with beams, and it was suggested in USA and Japan. In this study, a series of 1/8 scale model pile tests were performed to investigate the effect of load direction and stiffness of connecting beam on the responses of connected-pile foundation. As a result, the load capacities of the connected-pile foundation were larger than those of the conventional group pile foundation. For example, under the given test conditions in this paper, the resistibility against differential settlement was improved significantly for connected-pile foundation and its efficiency was maximized when the stiffness of connecting beams is about 25% of the mat foundation.

요 지

연약지반에 시공되는 송전철탑의 경우 말뚝기초가 주로 사용되나, 부등침하로 인한 철탑구조물의 손상이 유발될 수 있으며, 이에 따라 미국과 일본에서는 4각의 기초를 연결보로 연결한 연결형 기초의 사용을 추천하고 있다. 본 연구에서는 송전철탑에 작용하는 하중조건과 연결보의 강성조건이 연결형 말뚝기초의 수평거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 1/8 규모의 축소모델을 이용한 연결형 말뚝기초의 수평재하시험을 수행하였다. 본 시험결과 연결형 기초는 말뚝기초에 비하여 지지력이 크고 부등변위등의 송전철탑의 안전성을 저해하는 요인에 저항하는 효율적인 기초 형식인 것으로 나타났으며, 특히 연결보의 상대강성에 따른 효과를 분석한 결과 연결보의 강성이 매트의 강성대비 25%에서 연결형 기초의 형식으로 사용의 효율성이 좋은 것으로 나타났다.

Keywords : Connected-pile foundation, Lateral load test, Soft ground, Transmission tower, Ultimate lateral load capacity

1 연세대학교 토목환경 공학과 박사과정 (Ph.D candidate, School of Civil and Environmental Eng, Yonsei Univ.)
2 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Professor, School of Civil and Environmental Eng, Yonsei Univ., Junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)
3 정회원, 관동대학교 토목공학과 교수 (Professor, Department of Civil Eng, Kwandong Univ.)
4 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원 (Principal researcher, KEPRI/KEPCO)
5 정회원, 유니콘기술연구소 소장 (Unicon istitute of technology, manager)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

송전철탑의 기초는 상부의 전력케이블과 송전철탑을 지지하는 기초구조물로서 지반의 종류와 기초의 저항형식에 따라 다양하게 구분된다. 지반의 상태에 따라 적용하는 기초의 종류로는 사질토와 점성토, 퇴적암류 등의 양질의 지반에서 시공되는 역T형기초를 비롯하여 지지층이 비교적 깊고 급경사, 구릉지 등에 사용되는 심형기초, 점성토, 연약매립토등의 비교적 연약한 지반에 사용되는 말뚝기초, 풍화암 이상의 암반이 지표면 가까이에 있는 경우에 사용되는 앵커형 기초 등이 있으며, 이러한 기초는 저항하는 하중의 형식에 따라 연직하중기초와 모멘트하중 기초로 구분된다(김정부 등 1997, 장석한 등 2007).

국내의 연약지반에 시공된 송전용 철탑기초의 경우, 말뚝기초가 주요한 기초형식으로 사용되고 있다. 그러나, 연약지반에 시공된 송전철탑에 수평하중이 작용하였을 경우에는 4각에 위치한 기초에서 압축거동과 인발거동이 각각 독립적으로 발생하며, 이에 따른 기초사이의 부등변위에 의하여 상부구조물의 구조적인 손상이 유발될 수 있다. 연결형 말뚝기초는 송전철탑의 기초와 기초사이를 연결보로 연결하여 기초의 구조적 안전성을 높인 복합기초 형태(Combined footing)의 기초형식으로 미국과 일본에서 제안된바 있다(동경전력 1988, IEEE 2001). 그러나, 동경전력(1988)에서는 연결보의 거동형상을 강체로 간주하여 강성의 변화에 따른 기초의 거동특성을 충분히 반영하지 못하고 있으며, IEEE(2001)에서도 철탑기초간의 전단력을 분산시켜 부등수평변위를 제거할 수 있는 방법으로 연결보의 설치를 언급하고 있으나, 연결형 기초의 설계에 대한 구체적인 제안은 하지 못하고 있다(경두현 등 2011).

연결형 말뚝기초와 유사한 형태인 복합기초(Combined footing)에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되어왔다. Dequan and Hongli(2011)은 상이한 길이의 말뚝을 배치한 복합말뚝기초에 대한 실험적 연구를 수행한바 있으며, Dajin(2003)에 의하여 말뚝이 사용된 복합기초의 간편한 구조적인 해석기법이 제안된바 있다. 그러나, 송전철탑을 대상으로 하는 연결형 말뚝기초는 최근 들어 국내에 적용되어온 관계로, 관련 연구가 제한적으로 진행되어 왔으며(경두현 등 2011), 실증시험을 토대로 한 기초 연구사례 또한 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 1/8규모 송전철탑 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 수평재하시험을 통하여 하중조건과 연결보의 강성조건에 따른 연결형 말뚝기초의 거동특성과 지지력특성을 확인하고자 하였다. 본 시험의 1/8규모 시험모델은 345kV의 ○○ T/L(Transmission Line)을 원형모델로 하여 계획되었으며, 하중재하 방향과 연결보의 강성조건을 변화시켜 시험을 수행하였고, 시험결과를 분석하여 연결형 말뚝기초의 주요한 지지력 특성 및 거동특성과 효율적인 연결보의 강성조건을 도출하고 제안하고자 하였다.

2. 1/8규모 모형철탑 수평재하시험

2.1 1/8규모 모형철탑의 설계

본 연구에서는 1/8규모 송전철탑의 수평재하시험을 통하여 연결형 말뚝기초의 하중조건 및 연결보의 강성조건에 따른 거동특성 및 지지력특성을 확인하고자 하였다. 본 연구를 위하여 최근에 수행된 송전전선로의 설계값을 기준으로 상사성을 고려하여 시험하중과 시험체의 설계를 수행하였다. 그림 1은 본 연구에서 대상으로한 345kV ○○ T/L 2회선 선로의 원형 모델을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 실제 송전철탑 기초의 설계하중은 압축력이 417tonf(4086.6kN), 인장력 367tonf(3596.6kN), 수평력 34tonf(333.2kN)으로 설계되었으며, 철탑의 높이는 27m, 기초와 기초사이의 근개거리(L_p)는 10m, 4각에 위치한 기초의 폭은 4m, 기초의 두께는 1m, 기초부의 강관말뚝의 외경과 두께는 508mm와 12mm이었다.

본 연구에서는 1/8규모의 시험모델을 구현하기위하여 표 1과 같이 상사성을 고려하였다. 1/8규모 모델에 사용되는 재료적 특성은 원형모델과 동일한 재료를 사용하였으며, 모델의 거동에 영향을 미치는 수평하중(선하중) 및 연결보의 처짐 등은 1/8 규모로 상사하여 수평하중에 대한 기초체의 거동특성을 확인할 수 있도록 하였다. 시험모델은 재하력과 구조물의 반력의 관계를 고려하여 적정 재하력이 산출되도록 상부의 철탑구조물에 대한 반복계산을 수행하였으며, 계산을 통하여 산출된 재하력에 의한 부재력을 만족시킬 수 있도록 부재를 선정하였다. 그리고 상부구조물은 추가로 재하될 하중을 고려하여 부재강성을 증가시켜 구조물의 충분한 안전성을 확보하였으며, 기초와 연결부는 조립해체가 가능하도록 하여 상부의 철탑구조물이 다수의 시험에 사

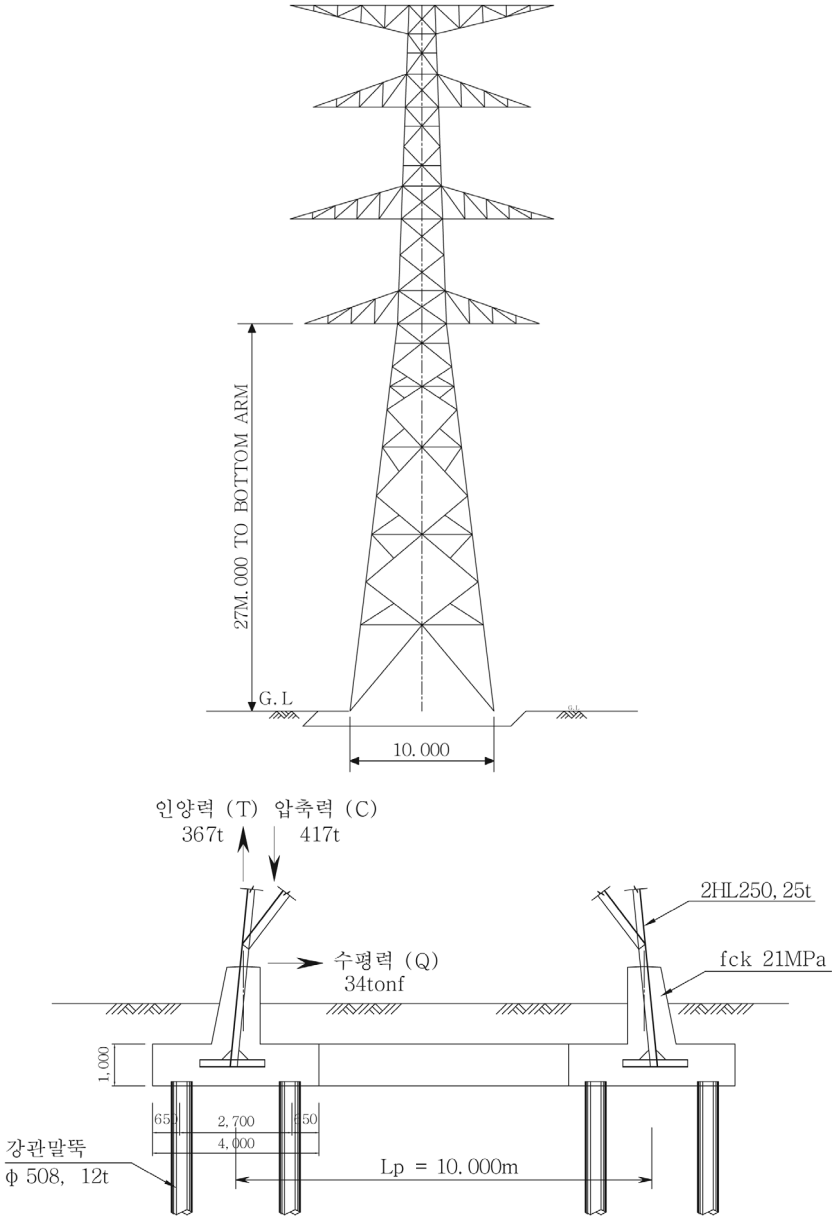


그림 1. 원형모델원형모델

표 1. 구조물의 상사비율 적용

구 분			상사비(S_p/S_m)	비 고
재료 특성	콘크리트	인장, 압축강도, 변형률, 탄성계수, 포아송비	1	
	철근	축응력, 부착강도, 변형률, 탄성계수	1	
기하학적 특 성		치수, 처짐	8	
		각변위	1	
		철근단면적	64	$A_p/A_m = L_p^2/L_m^2 = 64$ 최소규격 철근 사용(D10mm)
하중		집중하중	64	$F_p/F_m = (\sigma A)_p/(\sigma A)_m = (\sigma L_p^2/\sigma L_m^2) = 64$
		선하중	8	$w_p/w_m = (FL^{-1})_p/(FL^{-1})_m$ $= (\sigma AL^{-1})_p/(\sigma AL^{-1})_m$ $= (\sigma L)_p/(\sigma L)_m = 8$

S_p : Prototype Scale, S_m: Model Scale

용될 수 있도록 하였다.

2.2 지반조건

본 연구에서 수행된 1/8규모 송전철탑의 수평재하시험은 경기도 화성시 비봉면 삼화리 일원에서 수행되었다. 현장지반의 지반조건을 조사하기 위하여 표준관입시험(SPT)을 수행하였으며, 점토층에 대한 토질정수를 얻기 위하여 현장에서 채취된 비교란 시료를 사용하여 각종 실내시험을 수행하였다. 그림 2는 현장지반의 지반조사결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 현장의 지반은 지표에서부터 약 0.4m까지 실트와 점토가 섞인 모래로 구성되어있었고, 이후 약 4m까지는 모래질 점토층으로 구성되어 있었으며, 4m 이후로는 실트질 모래로 구성되어있었다. 현장지반의 SPT-N치는 모래질 점토에서 1～2정도로 매우 연약한 것으로 나타났으며, 실트질 모래에서 10 이상인 것으로 나타났다.

표 2는 점토지반의 실내시험결과를 나타낸 표이다. 표 2에 나타난 바와 같이 점토의 단위중량(γ_t)은 15.53kN/m^3 이었고, 함수비(W)는 69.6%이었으며, 액성한계(LL)와 소성지수(PI)는 각각 55.9, 29.2%로 통일분류법상 CL로 분류되었다. 또한 점토지반의 일축압축강도(q_u)는 12.11kN/m^2, 비배수 전단강도(S_u)는 8.58kN/m^{2}로 나타났으며, 선행압밀하중(P_c)은 29.06kN/m^2, 압축지수(C_c)는 0.673으로 나타났다.

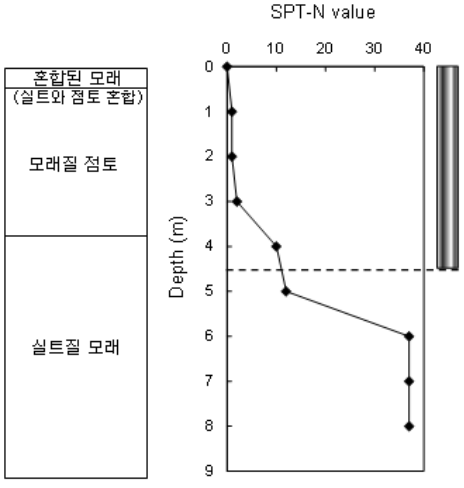


그림 2. 지반조건

2.3 1/8규모 모형철탑의 수평재하시험

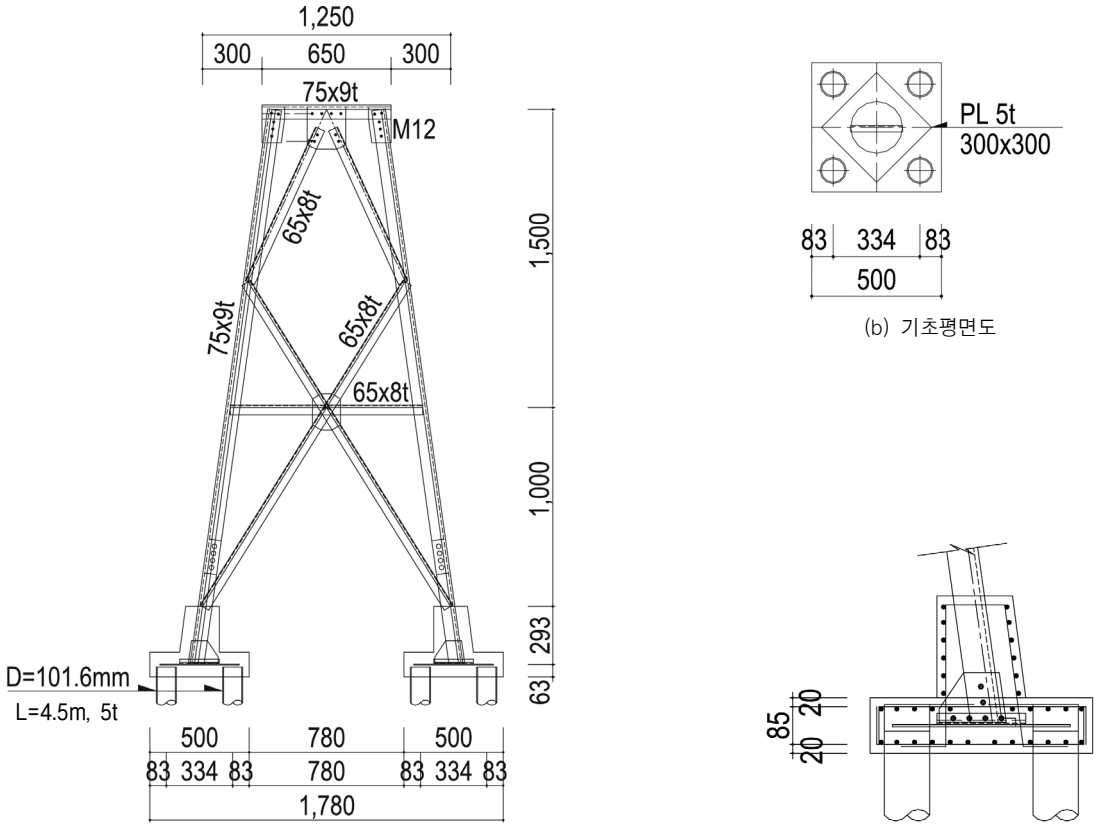
2.3.1 시험개요

본 연구에서는 1/8규모 송전철탑의 수평재하시험을 통하여 연결형 말뚝기초의 하중조건 및 연결보의 강성조건에 따른 거동특성 및 지지력특성을 확인하였다. 본 연구에서 수행된 수평재하시험은 연결보가 연결되지 않는 일반적인 말뚝기초조건과 연결보가 연결된 연결형 기초조건으로 구분되며, 하중조건과 연결보의 강성조건에 따라 총 6회 수행되었다. 본 연구에서는 수평하중의 재하방향을 4각에 위치한 기초를 중심으로 0도 45도로 변화시키는 하중조건을 통하여 수평하중의 작용방향에 따른 연결형 말뚝기초의 변화를 확인하였다. 그리고, 연결보의 강성을 매트를 기준으로 25%, 50%로 변화시켜 연결보의 상대강성변화에 따른 연결형 기초의 거동특성을 확인하였으며, 4개의 연결보가 송전철탑 4각에 위치한 기초의 매트와 매트사이에 설치되었다.

그림 3은 본 연구에서 사용된 1/8규모 시험모델을 나타낸 그림이다. 본 시험에서 시공된 기초는 강관파이프로 제작된 4개의 폐단말뚝과 철근과 콘크리트로 시공되는 매트를 결합하여 모든 시험에 동일하게 적용하였다. 본 시험에서 사용된 시험기초의 말뚝부의 직경은 101.6mm, 길이는 4.5m이며, 말뚝과 결합되는 매트의 가로 및 세로 길이는 500mm, 두께는 85mm이다. 매트와 결합되는 각각의 말뚝의 중심은 매트의 끝단으로부터 83mm 지점에 위치하며, 각각의 기초와 기초사이의 근개거리(L_p)는 1280mm이다. 그림 4는 본 연구를 위하여 시공된 기초를 나타낸 그림이다. 기초의 시공은 말뚝의 항타 기초체 및 철근의 조립, 기초콘크리트 타설, 철탑상부구조체 조립의 순서로 수행되었으며, 말뚝은 항타이후 시험 시까지 2주이상의 존치기간을 두어 지반의 안정을 도모하도록 하였다.

표 2. 현장시험부지 점토의 주요물성

기본물성시험					압밀시험		삼축 압축시험			일축 압축시험
W (%)	γ_t (kN/m^3)	LL (%)	PI (%)	#200	P_c (kN/m^2)	C_c	S_u (kN/m^2)	C_{CU} (kN/m^2)	Φ (°)	q_u (kN/m^2)
69.6	15.53	55.9	29.2	96.1	29.06	0.673	8.58	3.14	9.2	12.11



(a) 시험체 정면도

(b) 기초평면도

(c) 기초단면도

그림 3. 1/8규모 시험모델

(a) 말뚝설치 및 항타

(b) 말뚝 및 매트조립

(c) 기초콘크리트 타설

(d) 시험체 조립 완료

그림 4. 1/8규모 모형철탑의 시공

2.3.2 시험장치 및 하중재하장치

그림 5는 본 시험에서 사용된 계측시스템의 전경을 나타낸 그림이다. 그림 5(a)에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 수행된 1/8규모 모형철탑의 수평재하시험에서는 모형철탑의 상부에 하중판(pulling plate)을 설치하고 가력대에 설치된 유압실린더에 연결하여 수평하중을 재하하는 방법을 이용하였다. 철탑에 가해지는 수평하중을 측정하기위하여 유압실린더와 하중판 사이에는 로드셀(Laod cell)이 설치되었으며, 하중판(pulling plate)의 후위에는 선을 연결하여 발생되는 선변위를 통해 송전철탑의 상부의 수평변위를 측정하도록 하였다[그림 5(b)]. 각 기초부에서 발생되는 변위는 기초주변에 프레임을 설치하고 프레임에 변위측정장치(LVDT)를 설치하여 기초에서 발생하는 3방향(x,y,z축)변위를 측정하고자 하였으며, 각각의 변위측정장치(LVDT)의 위치는 그림 6과 같다.

그림 6은 기초부에 설치된 변위측정장치(LVDT)의 위치를 나타내는 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 기초의 수평변위를 측정하기 위하여 각각의 매트에는 두 개의 축 방향으로 변위측정장치(LVDT)가 설치되었으며, 가력대로부터 최장거리에 있는 기초끝단과 최단거리에 있는 기초의 끝단에 기초의 수직변위를 측정하기 위한 변위측정장치(LVDT)를 설치하여, 기초부의 최대수직변위와 최소수직변위를 측정하도록 하였다.

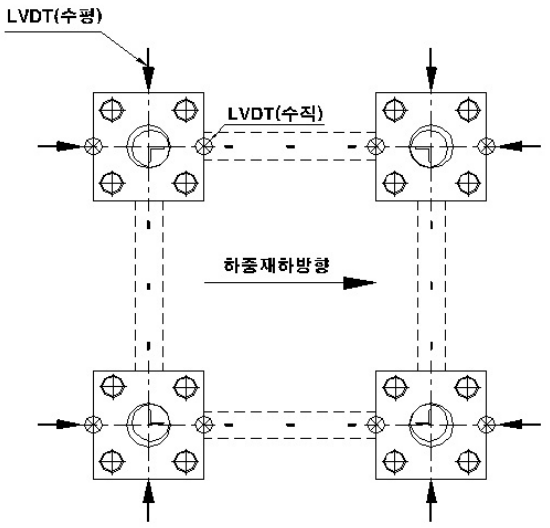
수평하중의 재하는 5tonf(49kN)을 단위로 점진적으로 증가되었으며, 각각의 하중단계에서는 15분간 하중

(a) 수평시험 전경

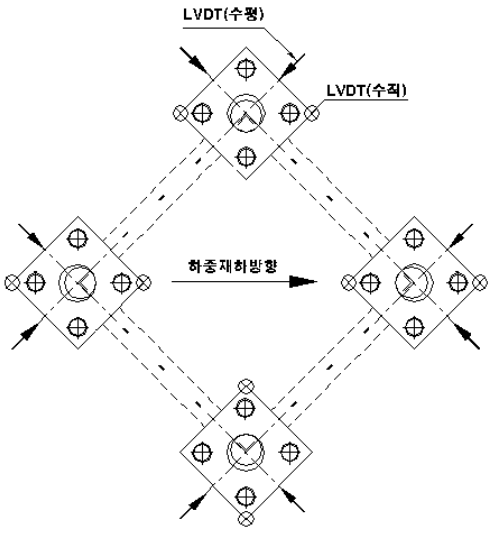
(b) 철탑 수평변위측정

(c) 기초부 변위측정

그림 5. 시험계측시스템 전경



(a) 하중재하방향 0도



(b) 하중재하방향 45도

그림 6. 기초부 변위측정장치(LVDT)의 위치

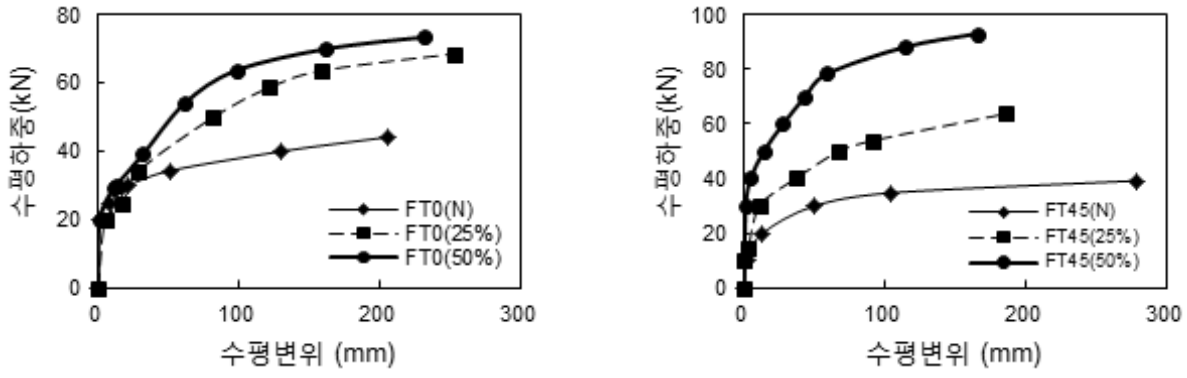
을 유지하도록 하여 각각의 하중단계에서의 추가적인 변위가 발생되지 않도록 하였다. 각각의 로드셀과 변위 측정장치(LVDT)를 통하여 측정되는 하중과 변위는 데이터로고를 통하여 컴퓨터에 저장되었으며, 저장된 하중과 변위를 분석하여 1/8규모 모형철탑의 거동과 하중특성을 분석하도록 하였다.

2.3.3 재하시험 결과

그림 7은 본 시험의 송전철탑의 상부에서 측정된 수평하중-수평변위 곡선이다. 그림에서의 시험의 종류 표기는 현장실험(FT), 하중재하방향(0 or 45), 연결보의 매트대비 상대강성(N, 25%, 50%)의 순서로 표기하였으며, 그림 7(a)는 수평하중이 0도 방향으로 재하된 경우의 수평하중-수평변위 곡선을 나타내었고, 그림 7(b)는 수평하중이 45도 방향으로 재하된 경우를 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 말뚝기초[FT0(N), FT45(N)]와 연결형 말뚝기초[FT0(25%), FT0(50%), FT45(25%), FT45(50%)] 모두에서 수평하중이 증가함에 따라 수평변위가 서서히 증가하였으며, 말뚝기초에 비하여 연결형 말뚝기초에서, 연결형 말뚝기초에서는 연결보에 강성이 큰 경우에서 더 큰 수평하중에 저항하는 것으로 나타났다.

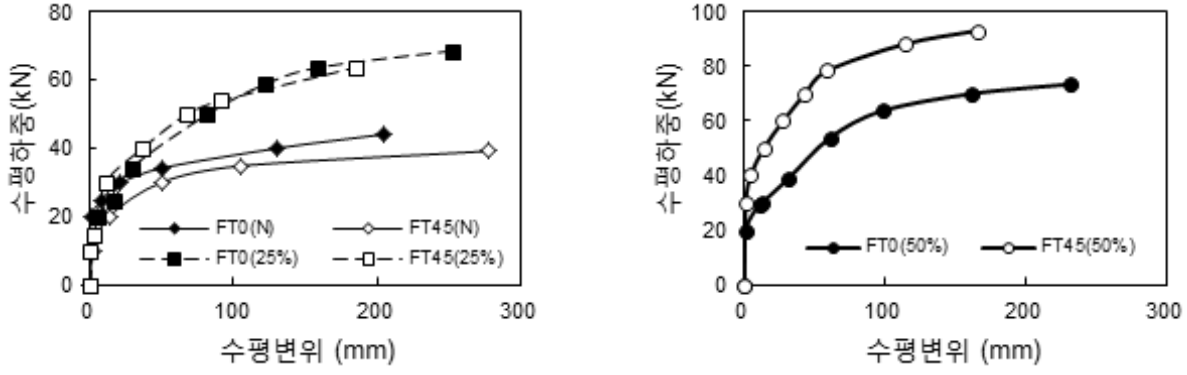
그림 8은 본 시험의 하중재하방향에 따른 수평하중-수평변위 곡선을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 말뚝기초와 25%의 연결보가 설치된 연결형 말뚝기초에서 하중재하 각도에 따른 수평하중-수평변위 곡선이 하중재하방향에 상관없이 유사한 것으로 나타났다. 그러나 연결보의 강성이 매트강성의 50%에 해당하는 기초의 경우에는 하중재하각도가 45도인 경우에서 0도인 경우에 비하여 매우 큰 수평하중에 저항하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이에 따라 FT0(50%)의 시험이 수행된 지반과 FT45(50%)의 시험이 수행된 지반에서 SPT시험을 수행하였다.

그림 9는 지반상태의 확인을 위하여 추가적으로 수행한 SPT시험의 수행결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 FT45(50%)의 시험이 수행된 지반은



(a) 하중재하방향 0도 (b) 하중재하방향 45도

그림 7. 송전철탑 상부에서 측정된 수평하중-수평변위 곡선



(a) 말뚝기초, 연결형 말뚝기초(25%) (b) 연결형 말뚝기초(50%)

그림 8. 하중재하방향에 따른 수평하중-수평변위 곡선

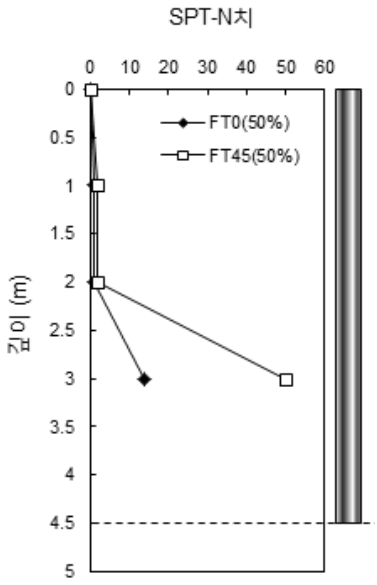


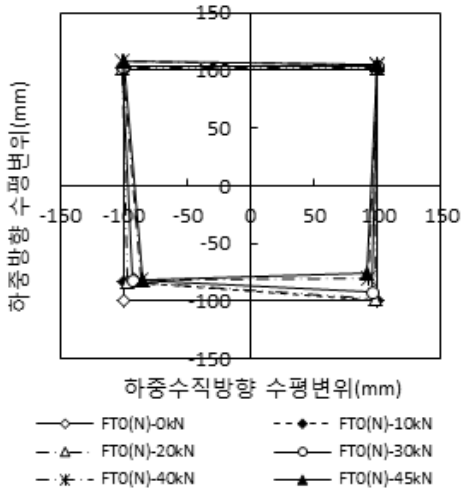
그림 9. 지반의 상태조사를 위한 SPT 추가시험

FT0(50%)의 시험이 수행된 지반에 비하여 지반의 상태가 급격히 견고해 지는 곳에 위치하고 있는 것으로 나타났으며, 이에 따라 수평하중에 대한 저항력이 커진 것으로 판단된다. 따라서, 하중재하방향에 따른 수평하중의 저항특성은 비교적 유사한 지반에서 수행된 말뚝기초와 25%의 연결보가 설치된 연결형 말뚝기초를 통하여 확인 할 수 있었으며, 이에 따라 하중재하방향이 0도인 경우와 하중재하방향이 45도인 경우에서 유사한 것으로 판단된다.

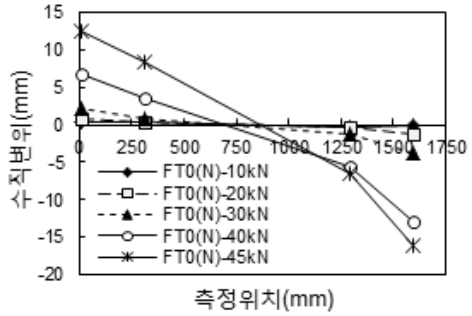
3. 송전철탑 말뚝기초의 거동특성

3.1 송전철탑 말뚝기초의 기초부 거동

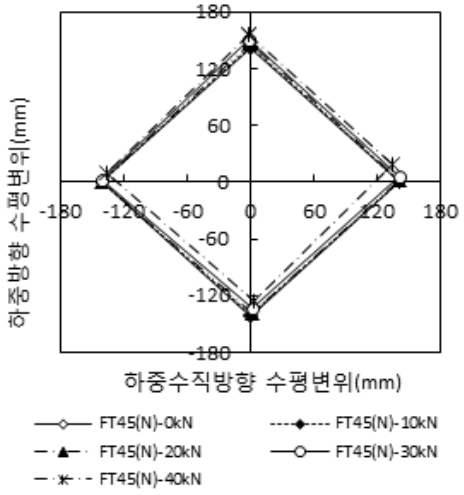
그림 10은 수평하중이 작용하는 송전철탑 말뚝기초



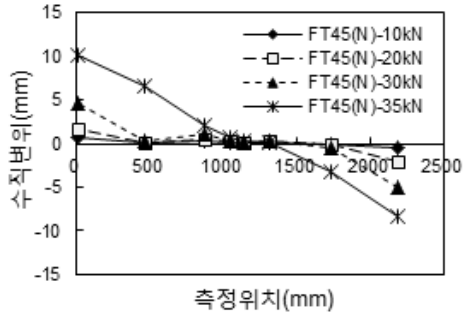
(a) 말뚝기초의 수평변위(하중재하각도=0°)



(b) 말뚝기초의 수직변위(하중재하각도=0°)



(c) 말뚝기초의 수평변위(하중재하각도=45°)



(d) 말뚝기초의 수직변위(하중재하각도=45°)

그림 10. 송전철탑 말뚝기초의 변위특성

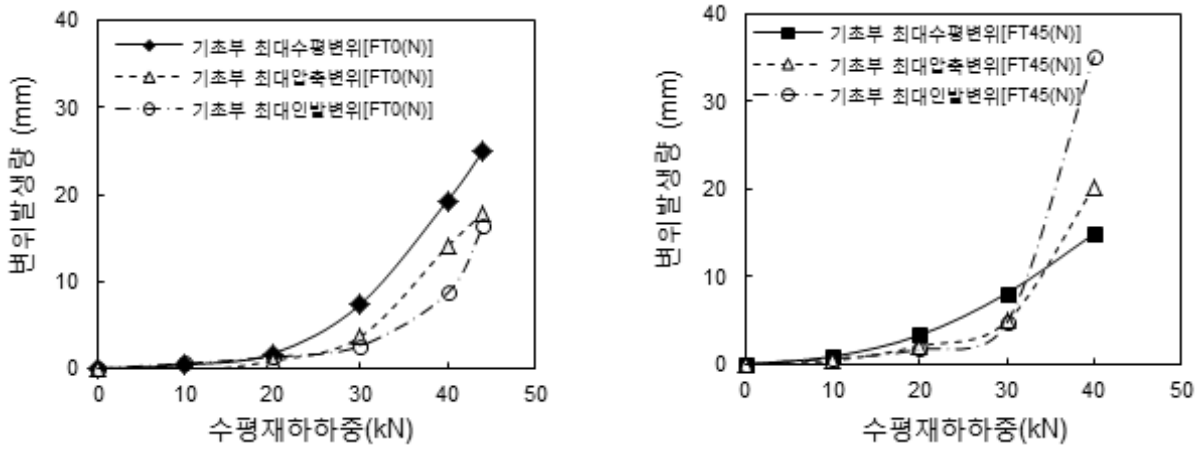
의 변위특성을 나타낸 그림이다. 그림 10(a)와 (b)는 수평하중의 작용방향이 0도인 경우의 말뚝기초의 수평변위와 수직변위를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 하중재하각도가 0도인 경우에서의 수평변위는 4각의 기초체의 중심을 기준으로 전위에 위치한 기초는 밖으로 벌어지고 후위에 위치한 기초는 경우 안쪽으로 모이는 거동이 발생하였으며, 전위에 위치한 기초는 압축거동이 발생하였고, 후위에 위치한 기초는 인발거동이 발생하였다. 그리고 수평변위 발생량은 재하방향의 변위가 하중재하방향의 직각방향에 비하여 더 큰 변위가 발생하는 것으로 나타났으며, 압축거동이 발생하는 기초체에 비하여 인발거동이 발생하는 기초체에서 변위발생량이 더 큰 것으로 나타났다.

그림 10(c)와 그림 10(d)는 수평하중의 작용방향이 45도인 경우의 말뚝기초의 수평변위와 수직변위를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 하중재하각도가 45도인 경우에서의 수평변위는 4각의 기초체의 중심을 기준으로 전위에 위치한 기초와 후위에 위치한 기초는 하중재하방향으로 거동하였고, 중간부에 위치한 기초는 안쪽으로 다소 모이는 거동이 발생하는 하였다. 기초의 수직거동의 경우에는 전위에 위치한 기초에서 압축거동이 발생하였고, 후위에 위치한 기초는 인발거동이 발생하였으며, 중간부에 위치한 기초는 중립축으로서의 거동을 보이다가 재하수평하중이 증가함에 따라 미세한 인발거동이 발생하였다. 반면, 수평변위의 발생량은 재하방향의 변위가 하중재하방향의 직각방향에 비하여 더 큰 변위가 발생하는 것으로 나타났으며, 압축거동이 발생하는 기초에 비하여 인발거동이 발생하는 기초에서의 변위 발생량이 더 큰 것으로 나타났다. 또한, 수평하중의 작용방향에 따라 동일한 거동이 발생하는 기초 일지라도 설치된 지반의 상태가 온전히 동일하지 못하므로, 상대적으로 더 약한 지반에 설치된 기초에서 변위가 더 많이 발생하여, 기초와 기초사이의 부등수평변위가 유발되는 것으로 확인되었다.

3.2 송전철탑 말뚝기초의 파괴특성

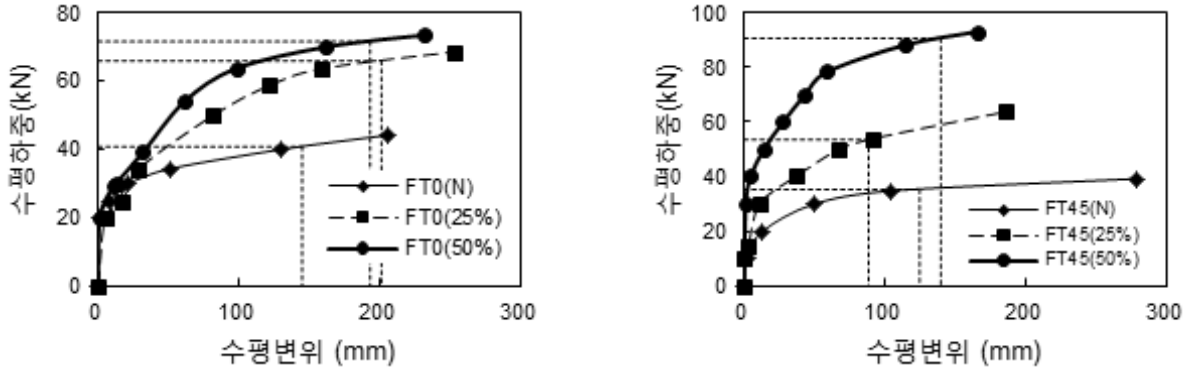
앞서 언급한 바와 같이 송전철탑의 기초부의 거동은 수직거동과 수평거동이 복합적으로 발생하고, 상대적으로 더 약한지반에 설치된 기초에서 변위발생량이 증가하여 부등변위가 유발되며, 이에 따라 기초의 파괴가 발생된다. 따라서 본 연구에서는 하중단계에 따라 변화하는 4각의 기초부의 변위량 변화를 통하여 송전철탑 말뚝기초의 파괴특성을 확인하고자 하였으며, 그 결과를 그림 11에 나타내었다.

그림 11은 송전철탑에 가해진 수평하중에 따른 기초부의 최대변위발생량을 나타낸 그림이다. 그림 11(a)는 하중재하방향이 0도인 경우의 기초부의 최대변위를 나타낸 그림이며, 그림 11(b)는 하중재하방향이 45도인 경우의 기초부의 최대변위를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 하중재하방향이 0도인 경우에는 초기재하시점으로부터 최대하중이 재하 될 시점까지의 수평변위가 크게 발생하였다. 그러나 최대하중에 근접한 30kN의 하중에서 40kN의 하중이 발생할 경우에는 수평하중에 따른 수평변위의 발생량과 압축변위 발생량이 일정하게 증가하는 것에 반하여 인발변위의 발생량이



(a) 하중재하방향이 0도인 경우 (b) 하중재하방향이 45도인 경우

그림 11. 수평하중에 따른 기초부의 최대변위발생량



(a) 하중재하방향이 0도인 경우 (b) 하중재하방향이 45도인 경우

그림 12. 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 극한수평지지력 측정

매우 급격하게 증가는 것으로 나타났다. 특히, 하중재하방향이 45도인 경우에서는 초기하중으로부터 30kN의 하중이 재하 될 시점까지 하중재하방향이 0도인 경우와 마찬가지로 수평변위의 발생량이 수직방향의 발생량에 비하여 크게 발생하였으나, 30kN이후로는 인발변위의 발생량이 매우 급격하게 증가하였으며 최종하중단계에 있어서는 인발변위의 발생량이 수평변위 발생량 및 수직변위의 발생량에 비하여 매우 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 송전철탑 기초의 거동이 송전철탑의 상부구조체의 영향으로 인하여 초기의 거동에서는 수평거동에 지배되는 거동을 보이지만, 기초의 파괴에 근접해 짐에 따라 수직 및 인발거동에 지배되게 되며 최종적인 기초의 파괴는 인발거동에 의하여 발생되게 됨을 의미한다. 따라서, 송전철탑 기초의 파괴는 인발거동이 급격하게 발생되는 시점을 통하여 정의할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 송전철탑 연결형 말뚝기초의 연결보효과

4.1 연결형 말뚝기초의 지지력 증가특성

4.1.1 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 극한수평지지력 측정

기초의 설계에 있어서 기초의 파괴는 특정 파괴기준을 통하여 정의되며, 적용되는 파괴기준에 따라 지지력이 달리 결정된다(Fellenius 1980). 경두현 등(2011)은 송전철탑기초의 파괴를 정의하기 위하여 소규모 모형기초의 수평재하시험을 수행하였으며, 기초의 거동특성과 다양한 파괴기준(Chin 1970, JEC 1979, ISSMFE 1985, BSI 1986, Fleming 등 1992, JGS 2002)을 분석하여 송전철탑을 구성하는 4각의 기초체중 인발거동이 발생되는 기초체에서 말뚝직경의 10%에 해당되는 인발변위가 발생하였을 시점을 기준으로 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 파괴를 정의하였다. 본 연구에서는 경두현 등(2011)이 제안한 기준을 통하여 송전철탑에 작용하는 극한수평지지력을 측정하였으며, 그 결과를 그림 12의 수평하중-수평변위 곡선에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 측정된 송전철탑의 극한수평지지력은 하중에 따른 수평변위가 급격히 증가하여 극한상태로 간주되는 지점에서 측정되는 것으로 나타났으며, 이에 따라 상기의 기준을 이용하여 극한수평지지력을 측정하는데 무리가 없는 것으로 판단하였다.

4.1.2 하중재하각도와 연결보의 강성에 따른 극한수평지지력 증가특성

그림 13은 하중재하방향에 따른 극한수평지지력의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 수평하중이 0도로 재하되었을 경우와 45도로 재하되었을

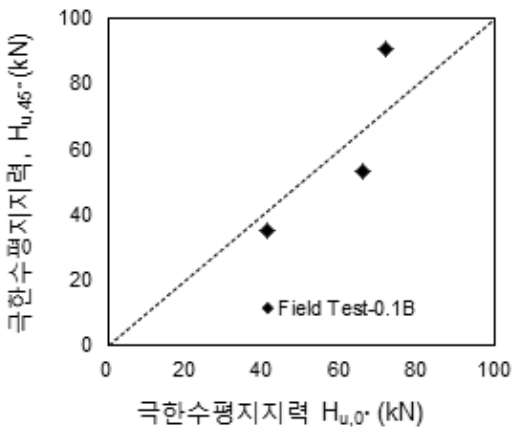


그림 13. 하중재하방향에 따른 극한수평지지력의 변화

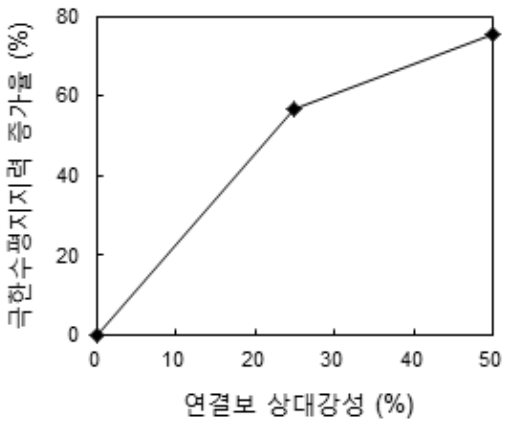


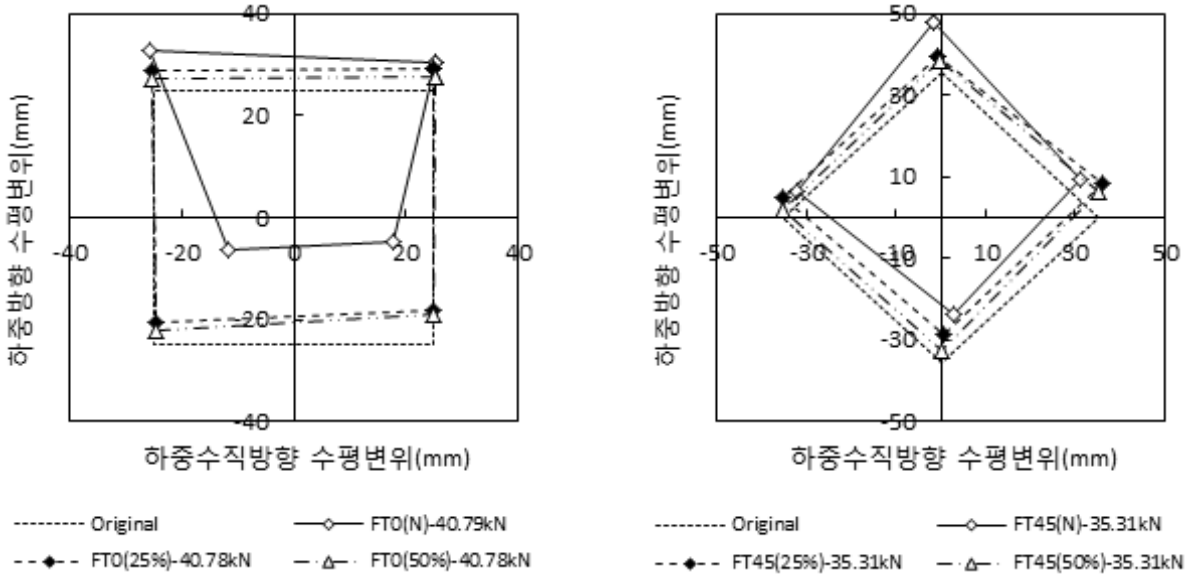
그림 14. 연결보의 상대강성에 따른 극한수평지지력 증가율

경우의 극한수평지지력은 연결보의 강성에 따라 다소 차이가 있으나, 비교적 유사한 극한수평지지력이 측정되는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 연결보의 상대강성에 따른 연결형 기초의 평균적인 극한수평지지력 증가효과를 확인하고자 하였으며, FT45(50%)의 결과는 지반의 상태가 다른 지반에 비하여 매우 견고하였으므로, 연결보의 상대강성에 따른 지지력의 증가효과에는 포함시키지 않았다.

그림 14는 연결보의 매트대비 상대강성도에 따라 변화하는 연결형 말뚝기초의 극한수평지지력 증가율을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 연결형 말뚝기초의 극한수평지지력 증가율은 연결보의 상대적인 강성도에 따라 증가하나, 그 증가폭은 점진적으로 감소하며, 특정 강성도에서 수렴하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 본 시험의 측정결과 연결보의 상대강성 25%의 경우에서는 연결형 말뚝기초가 말뚝기초에 비하여 약 57% 증가한 것으로 나타났으며, 상대강성 50%의 경우에서는 약 76%가 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 연결보의 상대강성 50%인 연결형 말뚝기초의 경우에는 연결보의 상대강성이 25%인 경우에 비하여 극한수평지지력이 약 9% 증가하는 것으로 나타나, 상대 강성의 증가에 따른 극한수평지지력의 증가효율이 높지 않은 것으로 나타났다.

4.2 연결형 말뚝기초의 변위감소특성

앞서 언급한 바와 같이 송전철탑 기초부의 거동은 하중초기단계에서 상부구조 및 기초의 자중에 의하여 하중방향으로 수평변위가 발생하나 극한수평하중에 근접해 짐에 따라 수직거동이 급격하게 발생되어 파괴에 도달한다. 그림 15는 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 연결보의 상대강성의 변화에 따른 수평변위변화를 나타낸 그림이다. 그림 15(a)는 하중재하방향이 0도인 경우의 수평변위변화를 나타내고, 그림 15(b)는 하중재하방향이 45도인 경우에 측정된 수평변위를 나타내며, 각각의 수평변위는 말뚝기초의 극한수평하중을 기준으로 측정되었다. 그림 15(a)에서 나타난 바와 같이 수평하중이 0도 방향으로 재해된 경우에는 하중이 재하되는 중심점

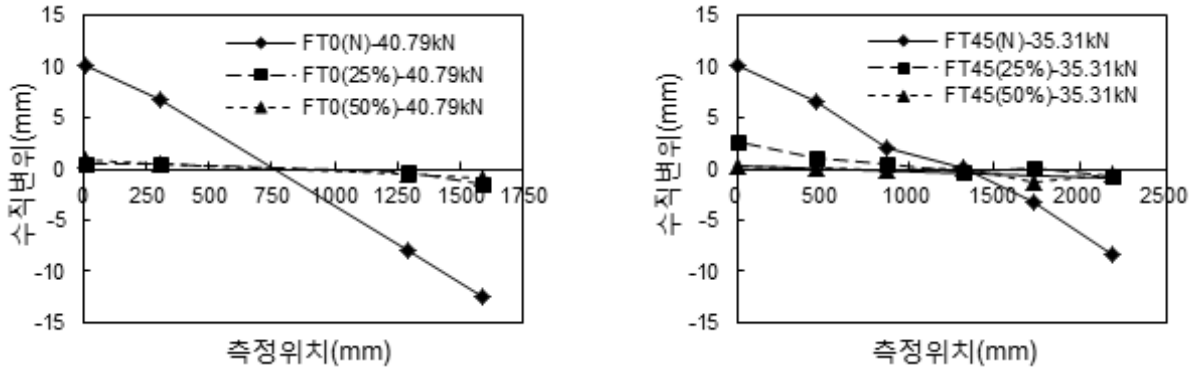


(a) 하중재하방향이 0도인 경우 (b) 하중재하방향이 45도인 경우

그림 15. 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 연결보 상대강성에 따른 수평변위변화

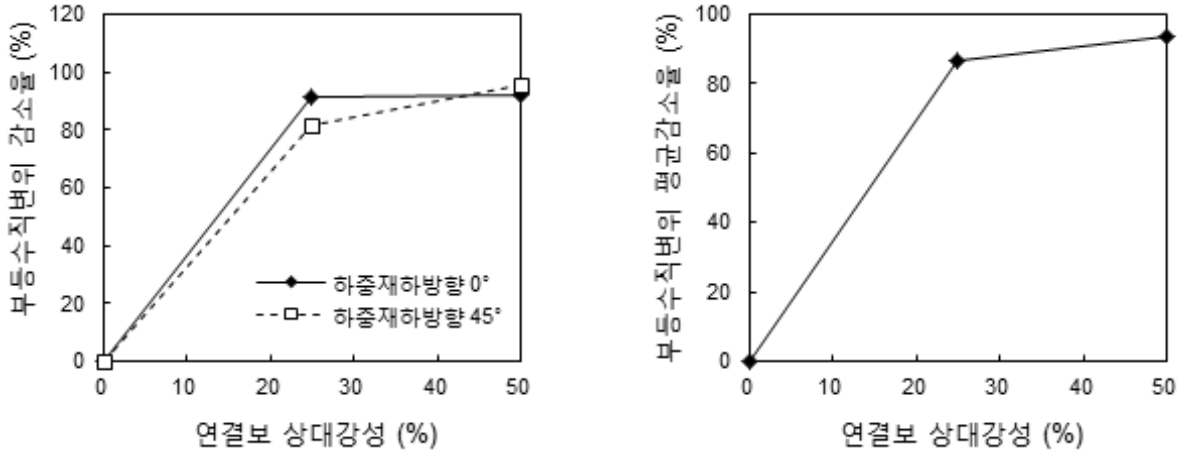
을 기준으로 전위의 기초부는 벌어지고 후위의 기초부는 모이는 거동형상을 보이고, 하중수직방향의 변위변화보다 하중방향의 변위변화가 크게 발생하며, 전위에 위치한 압축기초부에 비하여 후위에 위치한 인발기초부에서의 수평변위의 변화가 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 그림 15(b)에서 나타난 바와 같이 수평하중이 45도 방향으로 재하된 경우에는 하중이 재하되는 중심점을 기준으로 전위의 기초와 후위의 기초는 하중방향의 수평변위가 주로 발생하며, 중간부 기초의 경우에도 하중방향의 수평변위가 주로 발생하나, 두기초가 서로 모이는 거동형상이 보였다. 반면, 연결형 말뚝기초의 경우에는 하중재하방향이 0도인 경우와 하중재하방향이 45도인 경우 모두에서, 말뚝기초에 비하여 수평변위 발생량이 크게 감소하는 것으로 확인되었으며, 4각의 기초체가 함께 거동하여 상대적으로 취약한 지반으로부터 유발되는 부등변위에 의한 영향을 감소시켜 기초의 역학적 기능을 향상시키는 것으로 나타났다.

그림 16은 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 연결보의 상대강성의 변화에 따른 수직변위를 나타낸 그림이다. 그림 16(a)는 하중재하방향이 0도인 경우의 수직변위변화를 나타낸 그림이고, 그림 16(b)는 하중재하방향이 45도인 경우의 수직변위변화를 나타낸 그림이며, 각 기초의 수직변위는 말뚝기초의 극한수평하중을 기준으로 측정되었다. 그림에서 나타난 바와 같이 하중재하방향이 0도인 경우와 하중재하방향이 45도인 경우 모두에서 압축수직변위와 인발수직변위가 모두 크게 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 연결보의 상대강성도에 따라 변화하는 수직변위의 감소율을 측정하기위하여 압축수직변위와 인발수직변위의 차이로 인하여 송전철탑 기초부에서 발생되는 부등수직변위를 측정하였으며, 그 결과를 그림 17에 나타내었다. 그림 17(a)에 나타난 바와 같이 연결체의 강성도에 따른 부등수직변위의 변화는 하중재하방향에 따라 비교적 유사한 부등변위 감소율이 측정되는 것을 확인할 수 있었으며, 연결보



(a) 하중재하방향이 0도인 경우 (b) 하중재하방향이 45도인 경우

그림 16. 말뚝기초와 연결형 말뚝기초의 연결보 상대강성에 따른 수직변위변화



(a) 부등수직변위 감소율 (b) 부등수직변위 평균감소율

그림 17. 연결형 말뚝기초의 연결보 상대강성에 따른 부등수직변위 감소효과

의 상대적인 강성도가 높아짐에 따라 부등변위의 감소율이 감소되나, 그 감소폭은 점진적으로 감소하며 특정 강성도에서 수렴하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 본 실험의 측정결과 연결체의 강성도에 따른 평균부등수직변위의 감소율은 그림 17(b)에서 나타난 바와 같이 상대강성도가 25%일때 86.5%, 50%일때 93.7% 감소하는 것으로 나타나 연결보의 상대강성도가 50%일 경우와, 연결보의 상대강성도가 25%일 경우에서 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 연결보의 강성변화에 따른 변위저감효과는 연결보의 강성이 25%인 경우에서 더 효율적인 것으로 판단되며, 연결형 말뚝기초의 극한수평지지력의 증가율이 연결보 강성이 25%인 경우에서 더 효율적인 것으로 나타난 앞선 결과를 고려하였을 때 연결형 기초의 효율적인 연결보의 강성은 매트강성대비 25%인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 1/8규모 송전철탑의 수평재하시험을 수행하여 말뚝기초 및 연결형 말뚝기초의 하중조건과 연결보의 강성조건에 따른 거동특성과 지지력특성을 분석하는 연구를 수행하였으며, 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 말뚝기초와 연결형 말뚝기초를 기초체로 사용한 송전철탑의 수평하중-수평변위특성을 분석한 결과 수평하중의 단계에 따라 수평변위가 서서히 증가하였으며, 말뚝기초에 비하여 연결형 말뚝기초에서, 연결형 말뚝기초에서는 연결보에 강성이 큰 경우에서 더 큰 수평하중에 저항하는 것으로 나타났다. 또한 하중재하방향에 따른 송전철탑의 수평하중-수평변위특성이 비교적 유사한 것으로 나타났다.

(2) 송전철탑 말뚝기초의 기초부의 거동을 분석한 결과 하중재하각도 0도인 경우에는 수평하중이 재하됨에 따라 전위에 위치한 기초체는 압축거동과 함께 하중재하지점을 중심으로 벌어지는 거동이 발생하고, 후위부에 위치한 기초체는 인발거동과 함께 하중재하지점을 중심으로 모이는 수평거동이 발생하는 것으로 나타났으며, 기초부의 수평변위 발생량은 인발거동을 하는 기초에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 하중재하각도가 45도인 경우에는 전위의 기초체는 압축거동과 함께 하중재하방향의 수평거동이 발생하였고, 후위의 기초체는 인발거동과 함께 하중재하방향의 수평거동이 발생하였으며, 중간부의 기초체는 미세한 인발거동과 함께 하중재하방향의 수평거동이 발생하며, 하중재하지점을 중심으로 다소 모이는 거동이 발생하는 것으로 나타났다.

(3) 하중재하단계에 따른 기초부의 변위발생량을 분석한 결과 재하초기에는 송전철탑의 상부부재의 영향으로 인하여 수평거동이 주로 발생하지만, 파괴에 근접한 하중에 도달하는 순간 인발기초의 인발거동이 급격히 발생하며 기초의 파괴가 발생하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 송전철탑의 파괴는 인발거동에 의한 기초의 파괴시점을 기준으로 정의할 수 있는 것으로 판단된다.

(4) 본 연구에서는 경두현 등(2011)이 제안한 송전철탑 연결형 말뚝기초의 파괴기준을 적용하여 송전철탑의 극한수평지지력을 측정하였으며, 측정된 결과를 통하여 연결형 기초의 지지력특성을 규명하고자 하였다. 극한수평지지력 측정결과 연결형 기초의 극한수평지지력은 하중재하방향에 따라 유사한 지지력을 보이는 것으로 확인되었으며, 연결보 강성에 따른 극한수평지지력은 연결보의 강성이 증가함에 따라 증가하나 연결보의 강성이 25%의 경우에서 연결보의 강성이 50%인 경우에 비하여 강성의 증가에 따른 지지력 증가효과의 효율이 우수한 것으로 나타났다.

(5) 본 연구에서는 말뚝기초의 극한수평지지력발생시 연결형 말뚝기초에서 발생하는 수평변위와 수직부등변위를 분석하여 연결형 말뚝기초의 변위저감효과를 분석하였다. 분석결과 연결형 말뚝기초조건에서 약 90%의 변위저감효과가 확인되었으며, 각 기초가 위치한 지반의 상대적인 상태에 따라 변화하는 부등변위 또한 크게 감소되는 것으로 나타났다. 또한, 연결보의 강성이 25%의 경우에서 연결보강성이 50%인 경우에 비하여 강성의 증가에 따른 변위저감효과의 효율이 우수한 것으로 나타났으며, 이에 따라 연결형 말뚝기초에 사용되는 연결보의 최적강성은 매트의 강성대비 25%인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너

지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 "복합기초 시스템 도입을 통한 특수지반내 송전철탑기초 설계 최적화 및 신공법 개발" 연구과제의 결과의 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다. (No.20101020200060)

참 고 문 헌

1. 경두현, 이준환, 백규호, 김대홍 (2011), 점토지반에 근입된 송전철탑 연결형 기초의 거동 특성 및 지지력결정을 위한 파괴기준, *한국지반공학회 논문집*. 제27권 제3호, pp.27-40.
2. 김정부, 조성배 (1995), 765kV 철탑기초 설계 및 기초재하시험, *대한전기학회 1995년도 추계 학술대회 논문집*, pp.447-449.
3. 일본동경전력 (1988), UHV 기초설계요항(안), 5.4-5.5.
4. BSI (1986), "British standard code of practice for foundations", BS8004, British Strandard Institution (BSI), London.
5. Chin, F. V. (1970), "Estimation of the Ultimate load of piles not carried to failure", *Proc. of 2nd southest Asian Conference on Soil Engineering*, pp.81-90.
6. Dajin Liu (2003), "Structural Analysis of Combined Footing on Piles", Practice periodical on structure design and construction, ASCE, Vol.8, No.1, pp.22-24.
7. Dequan Zhou, Hongli Liu (2011), "Experimental comparison study on behavior of combined composite foundation", Applied Mechanics and Materials, Vol.90-93, pp.264-270.
8. Fellenius, B. H. (1980), "The analysis of results from routine pile load tests", Ground Engineering, Vol.13, No.6, pp.19-36.
9. 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.
10. IEEE (2001), "IEEE Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing. (Overturning Moment tests)", IEEE Strandard 691-2001.
11. ISSMFE (1985), "Axial pile loading test-part 1: static loading", Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.9, No.2, pp79-89.
12. JEC (1979), "Design Standard for Power Transmission Supports", JEC-127-1979, Standard of the Japanese Electro technical Committee.
13. JGS (2002), "Standard for Vertical loading test of pile", JGS-1813-2002, Japanese Geotechnial Society.

(접수일자 2012. 1. 1, 심사완료일 2012. 2. 20)