

수치해석을 이용한 송전철탑 연결형 기초의 연결보 강성에 따른 거동 특성

최영호* · 경두현** · 이준환***

Choi, YoungHo*, Kyung, DooHyun**, Lee, JunHwan***

Finite Element Analysis for Transmission Tower Behavior Characteristic by Connection Beam Stiffness

ABSTRACT : This study analyzed the effect of performance connected-type foundations of behavior and the connected beams according to the characteristics into soft clay transmission tower foundation. For this purpose, the finite element analysis model was built and connected to the transmission tower foundation mat and the contact area of the connection beam by the percentage change in the behavior and resistance characteristics were analyzed and finite element verification of the validity of the analytical model was conducted using connected-type transmission tower results of the model experiments constructed, and effective connected-type transmission tower basis of the behavior of connected beams were selected by analyzing the effect due to the increase of the stiffness. In addition, weak analysis by connected beam self-bending moment distribution was conducted.

Key words : Transmission tower, Connected beam, Displacement, Plaxis 3D Foundation, Bending Moment

초 록 : 본 연구에서는 연약점토지반에 근입된 송전철탑 기초를 대상으로, 기초부보강공법의 하나인 연결형 기초 형식의 거동과 연결보 특성에 따른 성능발휘 효과를 분석하였다. 이를 위해 유한요소 해석 모델을 구축하였으며, 송전철탑 기초에 연결보의 매트와 닿는 면적 비율변화에 의한 거동 및 저항력 특성을 분석하였고, 송전철탑 연결형 기초 모형실험 결과를 이용하여 구축된 유한요소 해석 모델의 타당성의 검증을 실시하여 다양한 매개변수 해석을 통해 연결보의 강성 증가에 따른 효과를 분석하여 송전철탑 연결형 기초의 거동에 효과적인 연결보의 강성을 선정 하였다. 또한, 연결보 자체 휨 모멘트 분포를 확인하여 취약부 분석을 실시하였다.

검색어 : 휨 모멘트, 연결보, 변위, Plaxis 3D Foundation, 송전철탑

1. 서 론

송전용 철탑기초는 송전시스템을 구성하는 요소 중에 송전용 철탑구조물 자체의 안정성을 확보하기 위해 매우 중요한 구성 요소이며, 하중 전달 방식에 따라 연직 하중기초, 모멘트하중 기초로 구분 지을 수 있다(김정부 등, 1997; 장석한 등, 2007). 국내에 적용 되고 있는 연직하중 기초로는 역T형 기초, 심형기초, 말뚝기초, 앵커기초 등이 있고, 모멘트하중 기초에는 매트기초 등이 보편적으로 적용되고 있다. 연약지반에 시공 된 송전철탑의 경우, 지지력 부족 및 부등침하 발생 등으로 인해 철탑기초의

* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (dudghwnth@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (iamdh0630@yonsei.ac.kr)

*** 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 정교수 (Corresponding Author · Yonsei university professor · junlee@yonsei.ac.kr)

Received October 22 2012, Revised November 13 2012, Accepted November 29 2012

안정성이 크게 위협 받을 수 있어, 이에 대한 적절한 보강공법이 필요하다. 이를 위한 효과적 기초보강공법의 일환으로 연결형 기초 형식이 제안된 바 있다(일본동경전력, 1998; IEEE, 2001).

연결형 기초에 대한 설계는 일본동경전력(1988)과 IEEE(2001)에 의해 제안된 바 있으나, 일본동경전력(1988)의 경우 기초와 연결보의 거동 형상을 연결보의 강성에 상관없이 강제로 취급하여 연결보 강성 변화에 따른 연결형 기초의 거동 특성을 충분히 반영하지 못하고 있으며, IEEE(2001)의 경우, 연결보 설치에 의한 연결형 기초의 전단력을 분산시켜 부등수평변위를 제거할 수 있는 방법으로써 연결보의 설치를 언급하고 있을 뿐 연결보 강성에 대한 구체적인 제안을 하지는 못하고 있다(경두현 등, 2011)

연결형 기초와 유사한 형태인 복합기초에 대한 연구는 많은 연구자들(Michael H. Galubeck, 1987; Dequan and Hongli, 2011; Dajin, 2003; 박병기 등, 1987; 김대규, 2003; 양극영 등, 2002)에 의해 수행되어 왔다. 그러나, 송전철탑 연결형 기초의 기초부에 해당하는 연구는 매우 제한적으로 진행되어 왔으며(경두현 등, 2011), 실증시험을 토대로한 기초 연구사례 또한 미흡한 실정이다. 특히, 대규모 구조물인 송전철탑구조물

의 경우 실험 규모 재하 실험이 어려워 수치해석적 방법을 이용한 상세해석의 필요성이 더욱 강조된다.

본 연구에서는 실 규모의 송전철탑 연결형 기초를 대상으로 변위 및 저항력 특성과 연결보 자체 휨 모멘트 분석을 통한 취약부 분석을 하고자 한다. 이를 위해 연결형 말뚝기초의 수평 재하 시험의 비교분석을 통한 수치해석 프로그램의 검증을 실시 후, 실 스케일의 송전철탑 연결형 기초를 대상으로 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 3D Foundation을 이용하여 실 규모 송전철탑 기초와 송전철탑 연결형 기초에 대한 해석을 실시하였으며, 그에 따른 하중-변위 관계 및 기초의 저항력 특성과 연결보 내부 휨 모멘트를 통한 취약부 분석을 실시하였다.

2. 송전철탑 연결형 기초

본 연구의 해석에 수행된 송전철탑 기초는 Fig. 1의 (a)와 같은 상부구조물과 Fig. 1 (b), (c)와 같은 기초부로 이루어진다. Fig. 1의 (b)와 (c)는 각각 기초부의 평면과 측면을 나타내고 있다. 송전철탑 기초는 철탑 상부의 하중을 지반으로 전달하여 철탑 구조물의 안전성을 확보하여 설비로서의 제 기능을 유지하

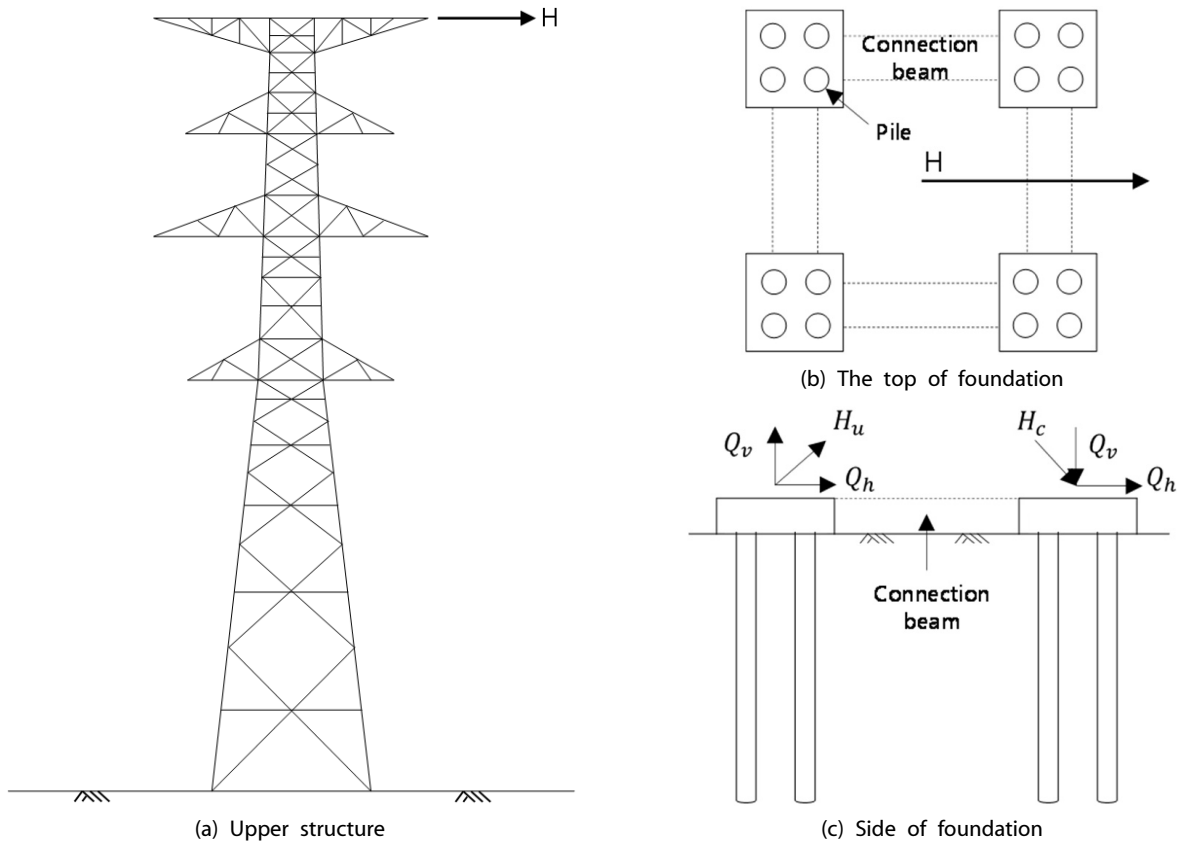


Fig. 1. Transmission Tower

기 위한 것이며, 현재 국내에서 적용하고 있거나 연구중인 철
 탐기초로는 사질토와 점성토, 퇴적암류 등의 양질의 지반에서
 시공되는 역T형기초, 지층이 비교적 깊고 급경사, 구릉지 등에
 사용되는 심형기초, 연약매립토등의 비교적 연약한 지반에 사용
 되는 말뚝기초, 풍화암 이상의 암반이 지표면 가까이 있는
 경우에 사용되는 앵커기초 등이 있으며, 송전 철탑 기초로 사용
 중인 기초형식은 하중전달 방식의 구분에 따라 연직하중기초와
 모멘트 하중 기초로 구분된다(김경부 등, 1995).

연약지반에 시공된 송전용 철탑기초의 경우, 말뚝기초가 주
 요한 기초형식으로 사용되고 있다. 송전용 철탑기초는 일반
 구조물과는 달리 인발력이 기초설계를 지배하는 주요인이 되며,
 연약지반에 시공된 송전철탑에 수평하중이 작용하는 경우에는
 4각에 위치한 기초에서 압축거동과 인발거동이 각각 독립적으
 로 발생한다. 이에 따른 기초사이의 부등변위에 의하여 상부구
 조물의 손상이 유발될 수 있으며, 이를 방지하기 위해 송전철탑
 의 기초와 기초사이를 연결보로 연결하여 기초의 구조적 안전성
 을 높은 복합기초 형태의 기초 형식으로 연결형 기초를 사용하
 며, 미국과 일본에서 제안된 바 있다(IEEE, 2001; 동경전력,
 1988).

송전철탑 기초의 상부구조물은 Fig. 1의 (a)와 같은 형상이
 며 상부구조물(Upper structure)에 작용하는 하중 H 에 대해
 Fig. 1의 (c)에 보이는 바와 같이 인발력 H_u 와 압축력 H_c 로
 구성된다. 그에 따른 인발력과 압축력에 대해 수직분력 Q_v ,
 수평분력 Q_h 로 구성되며, 이를 해석에 적용하였다. 연결형 기초
 는 Fig. 1의 (b)와 (c)에서 점선으로 나타난 바와 같이 4각의
 기초부 매트를 연결하는 연결보로 구분되며, 연결되는 기초의
 형태에 따라 얇은기초의 연결형 기초, 마이크로 말뚝의 연결형
 기초, 말뚝기초의 연결형 기초 등으로 구분될 수 있다. 국내의
 경우 기초를 연결보로 연결하여 과도한 지반침하로 인한 부재손
 상에 대해서 비틀림방지 및 수평보강, 추가침하방지와 보수의
 목적으로 연결보를 설치한 사례가 있으며, 기초와 연결보로
 연결된 형태이므로 기존 말뚝기초와 상이한 거동이 발생한다(경
 두현 등, 2011).

인발과 압축하중이 복합적으로 작용하게 되는 연결형 기초의
 설계에 있어서 지지력 결정을 위한 기초의 파괴기준은 기초의
 인발부 변위를 기준으로 인발지지력의 크기에 의해 좌우되며,
 이는 일반적인 송전철탑기초 설계기준과 동일하다. 국내의 송전
 철탑기초의 설계는 송전철탑하부의 4각에 설치된 각 말뚝에
 대하여 압축력 및 인발력, 수평력에 대한 극한지지력을 산정하
 고 안전율을 고려한 설계하중을 산정하여 설계하고 있다. 인발
 지지력의 경우, 기준이되는 상향의 인발변위는 압축지지력 결
 정을 위한 하향변위에 비해 작으나, 연결형 기초의 경우 극한하

중을 산정하기 위한 송전철탑의 파괴기준은 말뚝 직경의 10%
 에 준하여 결정하는 것으로 제안된바 있다(JES, 2002; KGS,
 2007; 경두현 등, 2011).

3. 연결형 기초의 수치해석

3.1 수치해석 모델링

송전철탑 연결형 기초의 실증시험을 토대로 한 기초 연구사례
 가 미흡한 실정이며, 대규모 구조물인 송전철탑구조물의 경우
 실험도 재하 실험이 어렵다. 이에 따라, 연결보가 설치된 송전철
 탐 연결형 기초의 거동해석과 지지력 해석을 위해 유한요소해석
 을 실시하였으며, 이를 위해 Plaxis 3D Foundation 프로그램을
 사용하였다. 연결보의 역학적 특성변화를 해석에 반영하고자
 하였으며, 이를 통해 효과적인 연결보 강성 도출 및 연결보
 자체 분석을 통해 연결보 강성에 따른 연결보 거동해석 및
 연결보에 작용하는 하중분담 해석을 실시하였다. 본 연구의
 수치해석에 사용된 Plaxis 3D Foundation은 3차원 지반공학
 전용 유한요소해석 프로그램으로 탄소성 상태에서 평형상태에
 도달 및 수렴을 위한 효율적 알고리즘이 적용된다. 유한요소해
 석에 적용된 송전철탑 기초부의 규모는 Fig. 2와 같다. Fig.
 2에서 보는 바와 같이 기초부는 매트와 4개의 말뚝으로 구성되
 어 있는 복합 기초 형태를 나타내며 기초의 매트는 가로, 세로
 4m, 높이 1m가 되도록 하였고, 매트 중심을 기점으로 10m의
 간격이 되도록 하였다. 기초의 매트에는 4개의 말뚝이 연결되어
 있으며, 말뚝은 직경 0.508m, 길이 9m로 하였고, 말뚝 중심을
 기점으로 2.7m의 간격이 되도록 하였다.

송전철탑 연결형 기초의 연결보는 Fig. 3과 같이 4각의 기
 초부 매트 사이에 설치하게 되며, 연결보의 강성은 높이 1m로
 동일한 매트와 연결보가 닿는 매트 너비(L)에 대한 연결보
 너비(D)인 단면적대비 비율(L/D)로 나타내었다. 연결보 미설
 치 상태를 0%로 가정하고, 매트 단면적대비 비율 10%, 25%,
 50%, 75%에 한하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 3의 상재

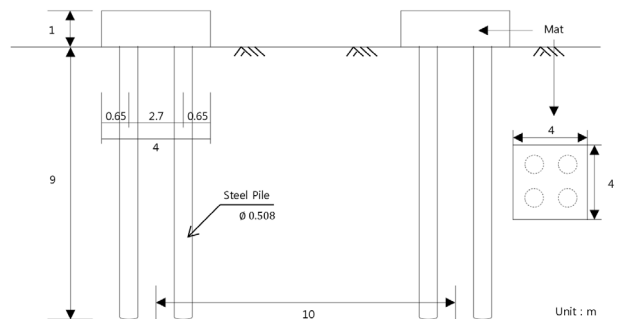


Fig. 2. Condition of foundation

하중 방향에 따라 기초부 P1과 P2는 압축부를 나타내며, P3, P4는 인발부를 나타낸다. 이에 따라 해석 결과는 인발부 및 압축부로 나타내었다. 4각의 기초부 매트에 걸리는 분력을 산정

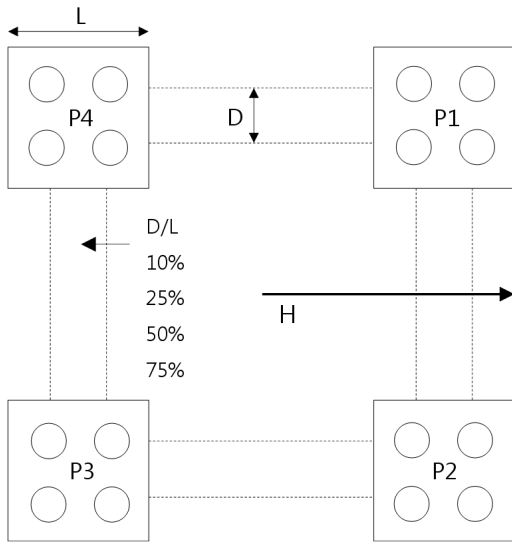


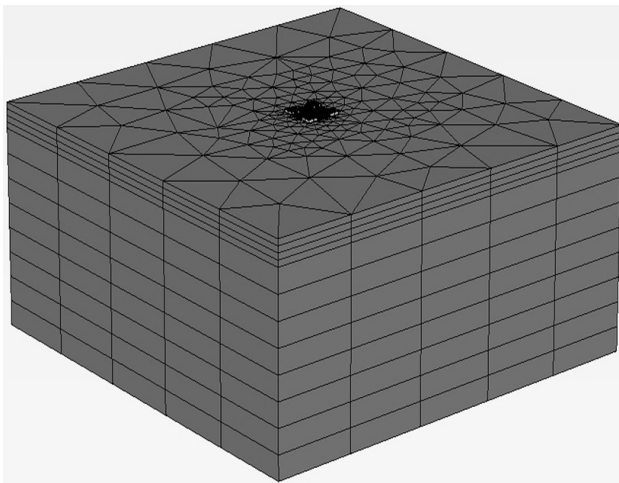
Fig. 3. Size and analysis model for connection beam

하여, Plaxis 3D Foundation에 적용 후 해석을 실시하였다.

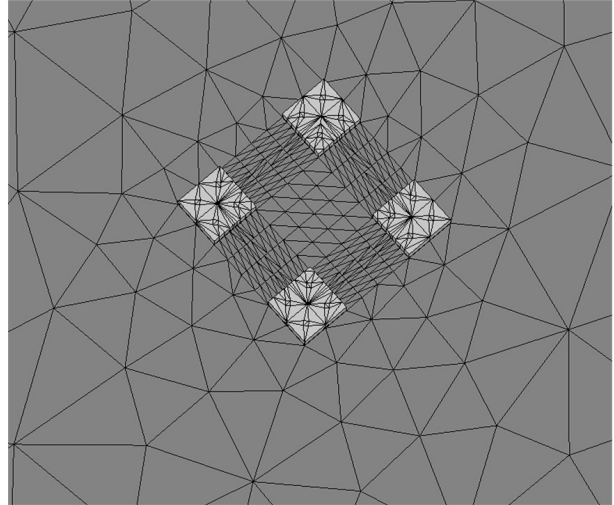
Fig. 2에 나타난 대상 기초의 형상과 규모를 바탕으로 Plaxis 3D Foundation 수치해석 모델을 구축하였으며, 해석에 사용된 격자요소망(Mesh)은 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 (a)에서 지반의 경계조건은 고정조건으로 가정하였으며, 원형 모델에 가까운 해석을 수행 할 수 있도록 가로 160m, 세로 160m, 깊이 90m로 기초부 해석 부분의 10배로 가정하였으며, 기초부의 격자요소망(Mesh)은 Fig. 4의 (b)와 같이 조밀도를 향상시켜 해석을 실시하였다. 앞서 언급 한 바 외같이 상부구조물에 작용하는 수평하중 H 에 의해 인발력 H_u 와 압축력 H_c 로 구성되며, 송전철탑 구조물의 중량 평균 24ton(김정부, 2010)을 사각의 기초에 고려하였으며, 인발력과 압축력에 대해 수직분력 Q_v , 수평분력 Q_h 로 구성되어 해석에 적용하였다.

3.2 지반 및 기초부 해석 조건

해석에 가정한 지반은 연약 점토지반으로써 비배수조건인 Mohr-Coulomb의 구성 법칙을 만족시키는 재료이며, 비배수조건으로 가정하였으며, Table 1에서 보는 바와 같이 해석에 적용된 연약점토지반의 전체단위중량(γ_t)과 탄성계수(E), 비배



(a) Mesh of soil body



(b) Mesh of foundation

Fig. 4. Condition of mesh

Table 1. Properties for model

Type	Model	γ_t (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	s_u (kN/m ²)	ϕ (°)
Soil	Mohr-Coulomb	16	5000	0.49	10	0
Pile	Linear Elastic	25	1.25×10^7	0.25	-	-
Connection Beam	Linear Elastic	25	1.25×10^7	0.25	-	-

γ_t = Unit weight, E = Elastic Modulus, ν = Poisson's ratio, s_u = Undrained shear strength, ϕ = Friction angle

수전단강도(s_u)는 연약지반에서 적용되는 일반적인 범위에서 16 kN/m^3 , 5000 kN/m^2 , 10 kN/m^2 으로 각각 가정하였다 (Terzaghi-Peck, 1967; Coduto, 1994; Hunt, 1984).

기초의 매트, 말뚝 및 연결보는 선형탄성 재료로 가정하였으며, 탄성계수 (E)는 $1.25 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, 프와송비 (ν)는 0.25로 가정하였다. 4각의 기초를 연결하는 연결보의 경우 기초부 매트와 연결보가 닿는 면적 대비 비율로 산정하였으며, 매트 면적 대비 10%, 25%, 50%, 75%에 대응하는 조건을 해석에 사용하였다.

해석에 적용된 상부구조물에 작용하는 수평하중 (H)는 2000 kN 으로 가정하였으며, 이에 따른 구조적인 계산을 통해 기초의 압축부와, 인발부에 수직분력 3000 kN , 수평분력 555.6 kN 으로 적용하여 해석을 실시하였다.

3.3 모형 시험과의 비교 분석

본 연구에서 수행된 수치해석모델의 적정성을 평가하기 위해 기존연구에서 얻어진 모형실험결과와의 비교분석을 실시하였으며, 송전철탑 연결형 기초에 대한 수치 해석의 타당성을 검토하고자 하였다. 모형실험은 전라북도 익산에 위치한 점토지반에 근입된 송전철탑 연결형 기초를 대상으로 축소 모형을 이용한 재하시험이 수행되었다(경두현 등, 2011).

모형실험에서 사용된 기초 형식은 매트와 말뚝이 연결된 확대기초 형식의 말뚝으로, 매트는 좌우폭 100 mm , 두께 50 mm 인 강판을 이용하였고, 말뚝은 직경 50 mm 길이 800 mm 의 강관파이프를 이용하였으며, 시험이 수행된 지반조건은 전라북도 익산의 현장에서 수행되었으며, 현장지반은 지표면으로부터 1.0 m 의 실트질 모래층과 6.8 m 두께의 실트질 점토층으로 구성되었고, 7.8 m 이후로는 실트질 모래층이 존재하였다. 현장의 지반조건을 조사하기 위해서 표준관입시험(SPT)와 (CPT)

를 사용하였으며, 점토층에 대한 토질정수를 얻기 위하여 현장에서 채취된 비교란 시료를 이용하여 실내시험을 수행하였다. 대상 지반의 단위중량 (γ_t)은 16.59 kN/m^3 , 프와송비 (ν)는 0.49, 비배수전단강도 (s_u)는 11.08 kN/m^2 이며, 탄성계수 (E)는 3000 kN/m^2 로 가정하였다.

실험에 사용된 모형체와 지반조건을 적용하여 수치해석을 진행 하였으며, 해석으로부터 얻어진하중-변위 곡선은 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 (a)는 송전철탑 기초 모형실험의 인발부의 수직하중-수직변위를 도시한 것이며, 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5의 (b)는 송전철탑 기초 모형실험의 압축부의 수직하중-수직변위를 도시한 것이며, 이 또한 인발부와 마찬가지로 유사한 경향이 보이는 것을 확인할 수 있다.

4. 해석 및 결과분석

4.1 연결보 강성조건에 따른 변위 특성

Fig. 6은 Plaxis 3D Foundation을 통한 수치해석으로 얻어진 실 규모 송전철탑 기초의 매트 중앙에서의 하중-변위 관계를 나타낸 것이며, Fig. 6의 (a)는 송전철탑 기초의 압축부와 인발부에 작용하는 수직분력 (Q_v)에 따른 수직변위 관계를 도시한 것이고, Fig. 6의 (b)는 송전철탑 기초 인발부의 상부구조물 재하하중(H)에 따른 수평 및 수직 변위를 도시한 것이다. 해석을 통해 송전철탑 기초는 Fig. 6의 (a)에서 보는 바와 같이 압축력을 받는 기초의 압축부에 비해 인발력을 받는 기초의 인발부 변위량이 큰 것을 확인할 수 있고, Fig. 6의 (b)를 통해 기초 인발부의 수직 변위량이 수평 변위량에 비해 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 기초의 인발부에서의 수직분력이 크게 작용함에 따라 지반과 말뚝 주면에 작용하는 마찰력의 감소로 인해 수직변위량이 크게 발생하는 것으로 판단되며, 지반 수평반력의

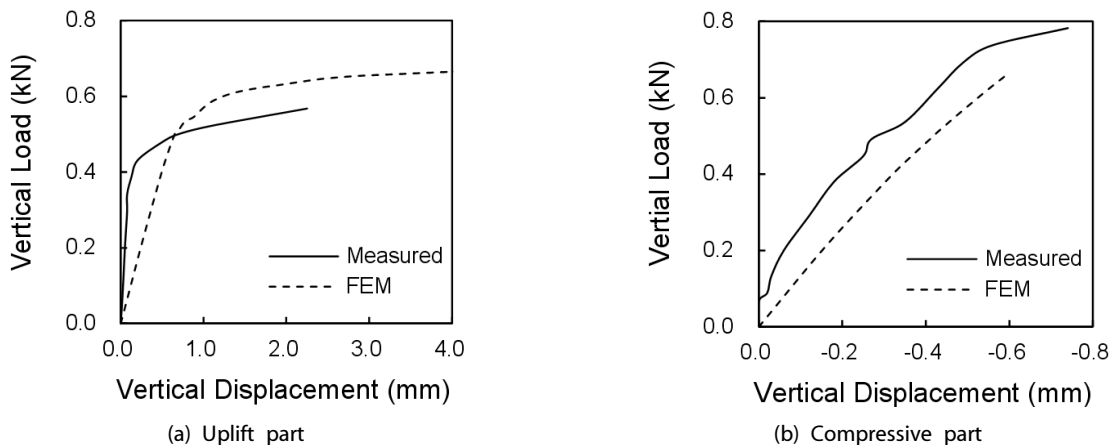
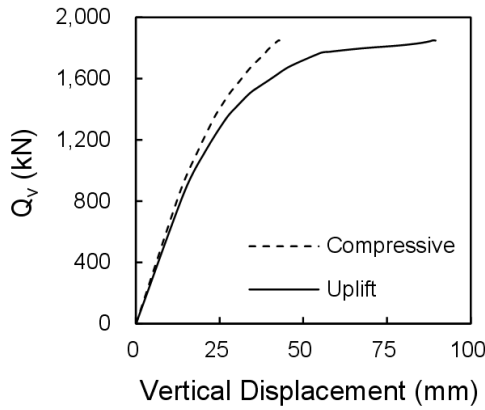
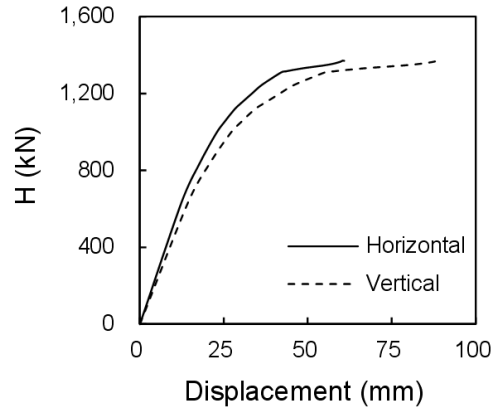


Fig. 5. Compared with vertical load and displacement



(a) Vertical Displacement of uplift and compressive part



(b) Vertical and Horizontal displacement of uplift part

Fig. 6. Characteristic of foundation behavior

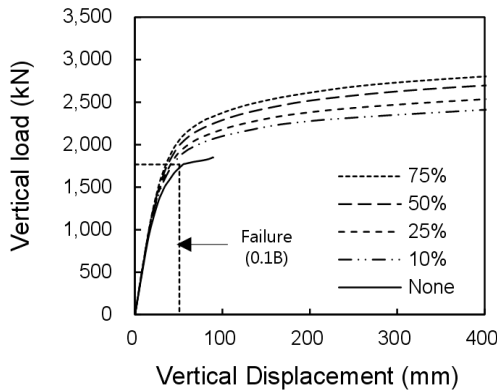
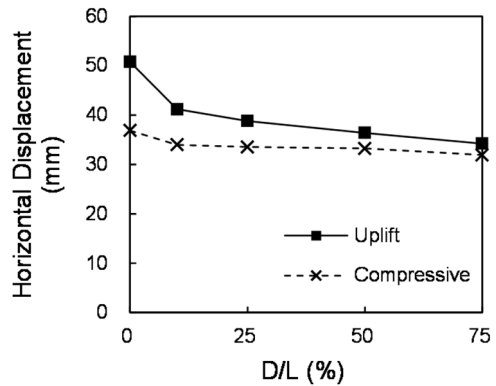


Fig. 7. Vertical behavior of uplift part at transmission tower

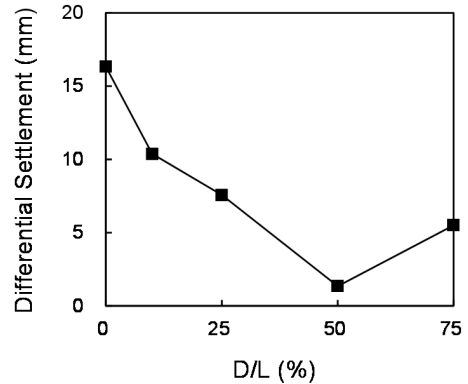
작용으로 인해 기초 인발부의 수직변위량이 수평변위량에 비해 크게 나타나는 것으로 판단된다. 따라서, 송전철탑 기초는 인발력을 받는 기초의 인발부 수직변위가 파괴에 있어서 주요한 요인이라 판단된다.

Fig. 7은 파괴를 정의하기 위한 송전철탑 기초 및 송전철탑 연결형 기초의 인발부 기초의 하중-변위 관계를 도시한 것이며, 송전철탑 연결형 기초의 파괴기준은 말뚝직경 10%의 수직변위에 해당하는 0.1B에 준한다고 제안된 바(경두현 등, 2011) 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 해석을 실시한 송전철탑 기초 및 송전철탑 연결형 기초의 파괴에 있어서 주요한 요인이 되는 기초의 인발부 수직분력(Q_v)에 따른 수직변위곡선을 대상으로 파괴를 정의하였으며, 말뚝 직경 10%인 50.8mm를 파괴 변위시점이라 가정하였다. 또한, 송전철탑 기초의 파괴변위시점인 50.8mm 일 때의 수직분력(Q_v)을 파괴하중시점이라 가정하였다.

이와 같은 Fig. 7의 파괴시점의 정의를 통해 산정된 파괴하중시점을 기준으로 연결보 강성에 따른 기초의 인발부 변위 특성



(a) Vertical displacement of uplift and compressive part



(b) Differential settlement

Fig. 8. Behavior of foundation according to the strength of the connection beam

및 기초의 인발부와 압축부의 부등수직변위, 부등수직변위 감소율을 Fig. 8과 같이 도시하였다.

Fig. 8의 (a)는 파괴하중시점에서의 인발력을 받는 기초의 인발부(P3, P4)와 압축력을 받는 기초의 압축부(P1, P2)의 매트와 닿는 면적에 따른 연결보 상대 강성도에 대한 수직변위

를 도사한 것이며, Fig. 8의 (a)를 통해 송전철탑 기초에 비해 연결보를 설치한 송전철탑 연결형 기초의 인발부 수직변위가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 연결보의 매트와 닿는 면적비를 10%에서 75%로 증가함에 따라 그 차이는 미미하지만 그에 따른 인발부 수직변위가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 연결보의 매트와 닿는 면적비를 75%일 때 최소의 수직변위를 나타내며, 이는 연결보의 매트와 닿는 면적 비율이 증가함에 따라 인발력을 받는 기초의 인발부 수직변위는 감소하는 것으로 판단된다. Fig. 8의 (a)에서 확인할 수 있듯이 압축력을 받는 압축부의 경우 연결보의 매트와 닿는 면적 비율이 10%에서 75%인 송전철탑 연결형 기초는 송전철탑 기초에 비해 압축부 수직 변위가 감소하는 경향을 보이나 연결보를 설치하였을 경우 기초의 인발부 수직변위에 비해 그 감소량이 적은 것으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는, 연결보에 의한 압축부 수직변위량 감소 효과로 판단되지만 연결보 강성이 높아질수록 상부구조물 재하하중(H)에 의한 회전 거동 영향으로 인발부 기초에 비해 수직변위 감소량이 적다고 판단된다. Fig. 8의 (b)는 압축력을 받는 기초의 압축부와 인발력을 받는 기초의 인발부 사이의 부등수직변위를 나타낸 것이다. Fig. 8의 (b)에서 보는 바와 같이 송전철탑 기초에 비해 연결보를 설치한 송전철탑 연결형 기초의 부등수직변위가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 연결보 설치 시 매트와 닿는 연결보의 면적 비율 75% 까지 부등수직변위가 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 연결보 면적비가 높아짐에 따라 부등수직변위 감소에 효과적인 것으로 판단된다.

4.2 연결보 강성조건에 따른 지지력 특성 분석

송전철탑 연결형 기초의 저항력 분석을 위해, 앞서 말한바와 같이 송전철탑 연결형 기초의 파괴기준 0.1B(경두현 등, 2011)에 따라 인발부의 수평변위가 말뚝 직경의 10%인 50.8mm 일 때를 기준으로 하였다. 변위 분석을 통해 송전철탑 기초의 주요한 거동은 기초의 인발부 수직거동임을 확인할 수 있고, 정의된 파괴변위시점에서의 연결보의 매트와 닿는 면적대비 송전철탑 연결형 기초의 인발부 수직 저항력을 Fig. 9와 같이 나타내었다.

Fig. 9를 통해 기존의 송전철탑 기초에 비해 연결보를 설치한 송전철탑 연결형 기초의 수직저항력이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 연결보의 매트와 닿는 면적 비율이 높아질수록 수직저항력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 송전철탑 기초에 연결보를 설치함으로써, 저항력 증가 효과를 얻을 수 있다고 판단되며, 송전철탑 연결형 기초 연결보의 매트와 닿는 면적 비율이 높을수록 저항력이 증가한다고 판단된다.

저항력 증가 효과에 효율적인 연결보 강성을 확인하기 위해

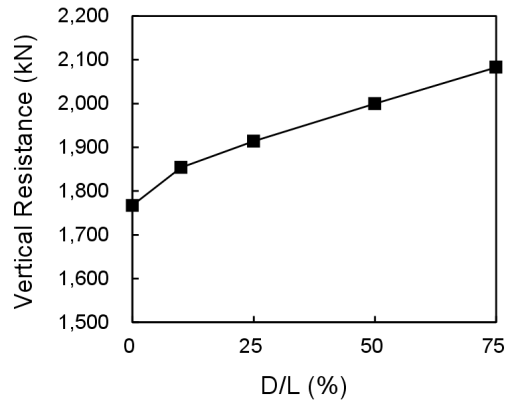


Fig. 9. Vertical resistance and connection beam strength of uplift foundation

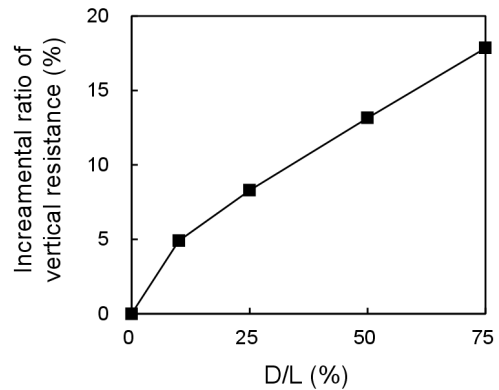


Fig. 10. Incremental ratio of vertical resistance and connection beam strength of uplift part

연결보 강성대비 저항력 증가율을 확인하였으며 Fig. 10에 나타내었다.

송전철탑 연결형 기초 인발부의 수직저항력 증가율은 송전철탑 기초의 인발부 수직저항력 대비 각 연결보의 상대적인 강성도에 따라 증가된 율을 도사한 것이며, Fig. 10에서 보는 바와 같이 송전철탑 기초에 비해 연결보의 매트와 닿는 면적대비 10%인 경우 약 5%증가 한 것으로 나타내며, 면적대비 면적비 25%인 경우 약 8%, 50%인 경우 약 13%, 75%인 경우 약 17% 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 연결보 면적비 10%에서 25%로 증가하는 경우 약 3%가 증가 하는 것으로 나타났으며, 연결보 면적비 25%에서 50%로 증가하는 경우 약 5% 증가하며, 50%에서 75%로 증가하는 경우 약 4% 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라, 파괴변위시점에서의 연결보의 면적비 증가에 따른 수직저항력 증가효율이 높아지는 것으로 나타났으며, 연결보 면적비 10%와 50%일 때 수직저항력 증가효과에 효율이 우수한 것으로 판단된다.

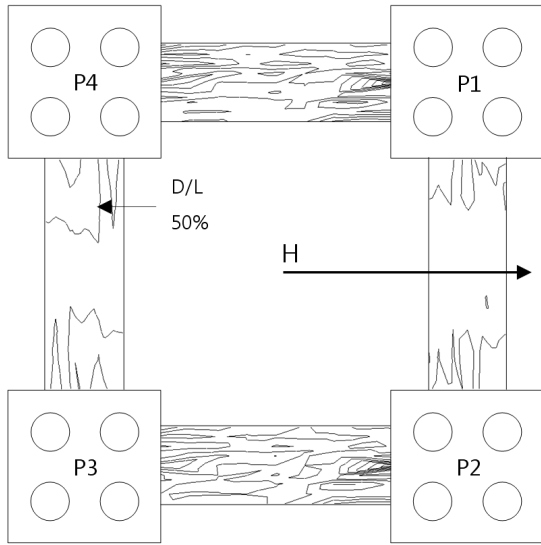


Fig. 11. Distribution of bending moment

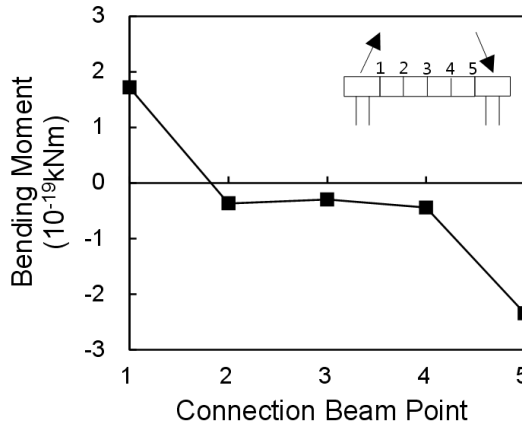


Fig. 12. Bending moment in connection beam point

4.3 연결보 휨 모멘트(Bending moment) 및 취약부 분석

본 연구에서의 연결보 조건은 앞서 말한 바와 같이 송전철탑 기초의 기초부 매트 사이에 매트와 닿는 면적대비 비율 10%, 25%, 50%, 75%에 한하며, 앞서 진행된 변위 및 저항력 특성을 통해 매트면적대비 50%의 강성을 가지는 연결보 효율이 우수한 것으로 판단하여, 휨 모멘트 분석을 실시하였다. 연결보의 매트 면적대비 50%인 경우 파괴변위시점에서의 자체 휨 모멘트 해석을 실시하고, 취약부 분석을 진행 하였다.

Fig. 11은 해석을 통한 연결보 자체의 휨 모멘트 분포를 나타낸 것이며, 그 분포가 조밀할수록 휨 모멘트가 크게 작용하는 것이다. Fig. 11에서 기초의 압축부 P1, P2 사이의 연결보와 기초의 인발부 P3, P4 사이의 연결보에 비해 기초의 압축부와 인발부를 연결하는 P1, P4 사이와 P2, P3 사이 연결보의 휨

모멘트 분포가 조밀한 것을 확인 할 수 있으며, 특히, 기초의 압축부와 인발부 매트부분에 인접한 연결보의 위치에서 휨 모멘트가 크게 작용하는 것으로 나타난다. P1, P4 사이의 연결보와 P2, P3 사이의 연결보는 유한요소 해석의 특성인 등방성에 따라 P2, P3 사이의 연결보에 대해 정성적인 값을 도출하여 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12에서 확인 할 수 있듯이 기초의 압축부와 인발부에 인접한 연결보 지점 부분에서 작용하는 휨 모멘트가 높은 것으로 나타나며, 압축부와 인접한 지점의 연결보 휨 모멘트가 가장 높은 것을 확인 할 수 있다. 휨 모멘트 해석을 통해 기초의 압축부와 인발부 사이에 설치된 연결보의 양 끝단 지점이 취약하고, 송전철탑 연결형 기초의 압축부와 인발부 사이 연결보의 압축부에 인접한 부분이 가장 취약하며, 그에 대한 보강이 필요 하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 송전철탑 연결형 기초의 모형실험에 기초하여 실규모 급 송전철탑 연결형 기초를 유한요소 해석 프로그램인 Plaxis 3D Foundation를 이용, 해석을 실시하였으며, 해석결과를 통한 결론은 다음과 같다.

해석을 통해 기존의 실규모급 송전철탑 기초는 기초의 인발부 거동이 중심이 되며, 수직 거동에 의존하게 된다. 송전철탑 기초에 연결보를 설치한 송전철탑 연결형 기초의 거동 특성으로 연결보가 설치되지 않은 기존의 송전철탑 기초에 비해 수직 및 수평 변위가 감소하게 되며, 부동 수직변위 또한 감소하는 것으로 나타난다. 송전철탑 연결형 기초는 매트와 닿는 면적대비 비율이 높아질수록 효과적이라 판단되며, 이는 연결보 매트와 닿는 면적대비 인발부 수직 변위 감소효과에서 알 수 있다.

송전철탑 연결형 기초는 인발력에 의존하며, 파괴시점인 0.1B(경두현 등, 2011)를 기준에서 인발부 수직 저항력은 기존의 송전철탑 기초에 비해 증가함을 알 수 있고, 연결보 설치 시 연결보 강성 75%로 증가 할 때 까지 수직 저항력은 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 지지력 해석을 통해 연결보 강성이 증가 함에 따라 송전철탑 연결형 기초의 지지력 효과가 좋은 것으로 확인되며, 연결보 매트와 닿는 면적 10%와 50% 일 때 지지력 효율이 좋은 것으로 판단된다.

송전철탑 연결형 기초의 변위 특성 및 저항력 특성을 통해 매트면적대비 50% 강성의 연결보가 효과적인 것으로 판단하였으며, 그에 따라 연결보 면적비 50%를 대표로 자체 휨 모멘트 확인을 통해 취약부 분석을 실시하였다. 취약부 분석을 통해 송전철탑 연결형 기초의 압축부와 인발부 사이의 연결보 기초의

압축부와 인발부에 인접한 지점에서 취약한 것으로 판단하였고, 기초의 압축부에 인접한 연결보의 지점이 가장 취약한 부분이라 판단된다.

본 연구에서 실시한 실험모형 송전철탑 연결형 기초를 기본으로 하여 지반조건의 변화에 따른 거동 및 지지력 특성 확인이 필요할 것으로 판단되고, 연결보 자체의 취약부 분석을 통한 보강 방법 또한 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국전력공사 “송전철탑 기초용 마이크로말뚝 해석모델 개발 용역” 및 한국과학재단 선도연구센터(ERC) “기후변화 적응형 지반구조물 설계 기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Jang, Suk Han, Kim, Hee Kwang, Lee, Kang Hyeon, Han Kyung Soo, Ham, Bang Wook, Chung, Ki Sun(2007) A Study on the Transmission Tower Foundation Design and Construction Method, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 56, No. 6, pp. 1031-1034.
- Kim, Woo Bum, Kim, Kyung Jin(1998) Full Scale Load Test for 754kV Transmission Tower, *Korean Society of Steel Construction*, Vol. 10 No. 2, pp. 134-141.
- Korea Electric Power Corporation(2004) *Design Standard of Tower for Overhead Transmission Tower Line-1111*
- Kyung, DooHyun, Lee, JunHwan, Paik, Kyu Ho, Kim, Dae Hong (2011) The Failure Standard to Estimate the Behavior and Bearing Capacity for connected-type of Transmission Tower in Clay, *Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 3, pp. 27-40.
- Kyung, DooHyun, Lee, JunHwan, Paik, Kyu Ho, Kim, Dae Hong, Kim, Dae Hak(2012) The Behavior and Resistance of Connected-pile Foundations for Transmission Tower From In-situ Lateral Load Tests, *Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 2, pp. 57-70.
- The Tokyo Electric Power Company(1988) UHV基礎設計要項(案), 5.4-5.5
- Abdulazim Yildiz (2009) Numerical modeling of vertical drains with advanced constitutive models, *Computers and Geotechnics*, pp. 1072-1083.
- 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.
- Fellenius, B.H. (1980) The analysis of results from routine pile load tests, *Ground Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 19-36.
- Fellenius, B.H. (2001) What Capacity Value to Choose from the Results of a Static loading Test, *Fulcrum, Deep Foundation Institute*, New Jersey.
- IEEE (2001) IEEE Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing(Over Moment tests), IEEE Standard, pp. 691-2001.
- JEC (1979) Design Standard for Power Transmission Supports, *Standard of the Japanese Electro technical Committee*, JEC-127 -1979.
- JGS (2002) Standard for Vertical loading test of pile. *Japanese Geotechnical Society*, JGS-1813-2002.
- Jasim M. Abbas, ZamriH. Chik, Mohd R. Taha (2008) Numerical Modeling and Analysis for Lateral Response of Pile Under Vertical and Horizontal Loads, *Engineering Postgraduate Conference (EPC)*.
- K. Georgiadis, M.Georgiadis (2010) Undrained Lateral Pile Response in Sloping Ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1489-1499.
- M.C. Khoury, A.J.Alzamora, A.J.Ciancia (2011) A Piled-Raft Foundation for the Tallest Building in Brooklyn, *Geo-Frontiers 2011, ASCE*, pp. 3818-3827.
- Reese, L.C., and O'Neill, M.W. (1988) drilled Shafts: construction procedures and design methods, *FHWA-HI-88-042, Fedral Highway Administration*, McLean, Va.