

가공 송전 철탑기초 설계 및 시공 방법 연구 - 심형기초를 중심으로 -

論 文
56-6-6

A Study on the Transmission Tower Foundation Design and Construction Method - A Focus of Cylindrical Foundation -

張石漢* · 金熙光** · 李康現*** · 韓炘洙§ · 咸邦郁§§ · 丁沂善†
(Suk-Han Jang · Hee-Kwang Kim · Kang-Hyeon Lee · Kyung-Soo Han ·
Bang-Wook Ham · Ki-Sun Chung)

Abstract - Electric transmission lines pass through a variety of area. Foundation supporting the conductors and tower are selected properly in accordance with external load, for example dead load, wind load, snow load, construction load etc, and topography and geology condition.

Typical types of foundation are as follows: pad foundation for small load and hard soil or rock in mountainous area, pile foundation for medium or large load and soft soil in plain field area. This paper introduced cylindrical foundation design & construction for large load and mountainous area. This foundation failure mode against pulling-out show splitting failure by tensile force toward circumferential direction.

Key Words : Cylindrical foundation, Liner plate, Transmission line foundation, Bearing capacity, Load diagram

1. 송전철탑기초

송전용 철탑기초는 철탑상부의 하중을 지반으로 전달하여 철탑구조물의 안전성을 확보하여 설비로서의 제 기능을 유지하기 위한 것이다. 송전 철탑 기초로 사용중인 기초형식은 하중전달방식의 구분에 따라 그림 1에서 보는 바와 같이 크게 연직하중기초(압축 및 인발력이 지배적인 기초)와 모멘트하중 기초(모멘트하중이 지배적인 기초)로 구분된다.

현재 국내에서 적용하고 있거나 연구 중인 철탑기초로는 연직하중기초로 분류되는 역T형기초, 심형기초, 말뚝기초, 앵커기초 등이 있고 모멘트기초에는 매트기초와 철탑구조물은 아니지만 송·배전용 철주가 있다.^[2] 철탑기초는 일반구

조물과는 달리 인발력이 기초설계를 지배하는 주요인이 된다. 철탑기초의 대표적인 형상은 그림 2와 같다. 현대사회의 산업화와 도시화로 대용량의 송전이 요구되어 송전선로가 고전압화, 다도체화가 되고, 장경간의 송전선로가 출현되어 철탑 상재하중이 급격히 증가되고 민원 등으로 인해 도심지 보다는 험준한 산악지를 통과하게 되어 급경사지에 위치하는 대형 철탑기초의 설치 빈도가 높아지고 있다. 이러한 상황에 적합한 철탑기초가 심형기초이다. 송전선의 대형화에 따라 기초공사에 있어 작업환경의 개선, 비용절감, 공기단축, 안전성 향상은 중요한 과제이다. 이러한 요건을 만족하는 심형기초에 대한 설계 및 시공방법 등에 대한 개략적인 설명 및 향후 연구가 필요한 부분 등에 대해 제시해 보고자 한다.

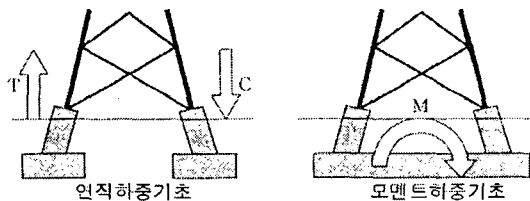


그림 1 기초의 종류
Fig. 1 A type of foundation

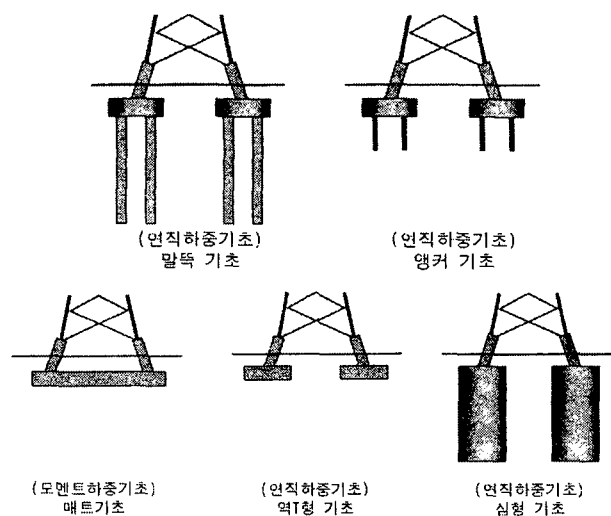


그림 2 송전철탑 기초형상과 종류
Fig. 2 shape and type of transmission line foundation

* 正 會 員 : 韓 國 電 力 公 社 電 力 系 統 建 設 處 勤 務 (處 長)
** 正 會 員 : 韓 國 電 力 公 社 電 力 系 統 建 設 處 勤 務 (副 處 長)
*** 正 會 員 : 韓 國 電 力 公 社 電 力 系 統 建 設 處 勤 務 (部 長)
§ 正 會 員 : 韓 國 電 力 公 社 電 力 系 統 建 設 處 勤 務 (課 長)
§§ 正 會 員 : 韓 國 電 力 公 社 電 力 系 統 建 設 處 勤 務 (課 長)
† 교신저자, 正會員 : 韓 國 電 力 公 社 電 力 系 統 建 設 處 勤 務 (部 長)
E-mail : chung2@kepeco.co.kr
接受日字 : 2007年 3月 26日
最終完了 : 2007年 5月 10日

2. 심형기초 설계 및 시공




2.1 심형기초 설계

심형기초는 Liner Plate(파형강판)로 공벽을 보호하며 내부토사를 배출하고 그 내부에 기초체를 형성하여 하중을 지반에 전달하는 기초이다. 일본에서 1930년경으로부터 주로 건축기초로 사용되어 오다가 최근에 일본의 토목구조물 기초에 많이 사용되고 있다. 1971년 일본 도로공단이 연구를 본격적으로 진행하여 현장재하시험과 실내시험결과에 의해 검증을 실시하여 암반층을 지지층으로 하는 설계법을 개발하였다.^[4]

기초는 근입깊이, 지반과의 강성, 시공법에 의해서 직접기초, 케이슨기초, 말뚝기초로 크게 구분된다. 이들 기초에 대한 안정성 검토방법과 지지기구의 개념도는 다음 표 1과 같다. 사면상의 구조물은 수평에 대한 안정성 검토가 중요하며 이에 대한 기준은 사면경사각이 10°를 넘는 경우에는 경사지반으로 간주하여 수평에 대한 안정성 검토를 반드시 시행해야한다. 따라서 설계부분에서는 수평지지력에 대한 검토방법 부분을 먼저 소개한다.

표 1 기초 안정검토 항목 및 지지기구의 개념도^[4]

Table 1 Items of stability review and diagrams of bearing mechanism^[4]

| 설계상의 기초의 종류 | 검토항목 | | 수평지지에 대한 안정 | | 전도에 대한 안정 | 가정하는 지지기구 | |
|-------------------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|---|-------------------------------------|---|---|
| | 검토사항 | 지지기구 | 검토사항 | 지지기구 | | | |
| 기초의 근입 · 지반과의 강성 · 시공법에 의한 구분 | 직접기초 (얕은 강체기초) | 수직하중 \wedge 허용수직지지력 | 수평하중 \wedge 저면지반의 지지력 | 수평하중 \wedge 활동저항력 | 하중합력의 편심량 \wedge 허용편심량 |  | |
| | 케이슨기초 (깊은 강체기초) | 수직하중 \wedge 허용수직지지력 | 저면지반의 지지력 + (측면마찰) | 수평하중 (모멘트포함) \wedge 허용수평지지력 | 저면에서의 수동저항 + 저면에서의 활동저항력 | 직접적인 검토는 하지 않는다. |  |
| | 말뚝기초 (깊은 탄성기초) | 수직하중 \wedge 허용수직지지력 | 저면지반의 지지력 + 측면마찰 | 수평하중 (모멘트포함)에 의한 변위 \wedge 허용수평변위량 | 전면지반의 수동저항 | 직접적인 검토는 하지 않는다. |  |


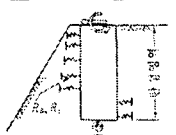

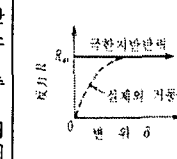
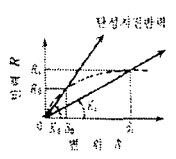
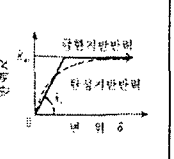
2.2.1 수평지지력

수평방향 지지력 설계에서는 유한한 수평거리의 영향과 기초의 수평변위에 동반되는 암반의 역학적 거동을 어떻게 반영하는 지가 문제가 된다. 즉 지반의 거동으로서는 경사면에 설치된 기초가 수평방향으로 하중을 받으면 변형을 발생

하게 되고 지반은 순차적으로 탄성영역에서 소성영역으로 이행하게 되며 하중에 저항하는 지반은 소성영역과 탄성영역이 혼재하게 된다. 따라서 경사면에 위치한 심형기초 두부부근의 수평방향의 지반은 유한하게 되며 기초의 변위나 기초체의 응력에 대해서는 지표면 부근 지반의 거동이 크게 작용하는 것을 고려하는 설계법이 개발되었다. 수평저항에 관한 해석방법은 극한지반반력법, 탄성지반 반력법, 복합지반 반력법으로 구분된다. 심형기초는 지반조건이나 기초형상 범위를 고려하여 기초를 탄성체로 모델로서 지반의 소성화를 고려한 탄소성설계법(복합지반 반력법)으로 한다. 다만 기초 변위에 의한 영향이 적고, 지반은 기초 전체길이에 걸쳐 극한 상태에 도달하는 경우는 극한지반 반력법도 사용될 수 있다.^[1] 이에 대한 간략한 설명은 다음 표 2와 같다.

표 2 기초 수평저항에 관한 설계법 비교^{[4][1]}

Table 2 comparison of design methods on horizontal resistance of foundation^{[4][1]}

| 해석법 | 극한지반 반력법 | 탄성지반 반력법 | 복합지반 반력법 |
|-----------------|--|---|---|
| 계산모델 |  |  |  |
| 지반요소의 하중과 변위 관계 |  |  |  |
| 장 · 단점 | - 근입 깊이가 얇은 강체기초에 적용 - 기초변형문제에 부적합 | - 실용적으로 기초의 변위에 대응한 계산이 가능 - 안정계산에 부적합 | - 이론적으로는 변형과 안정문제를 동시에 평가할 수 있음 - 지반정수나 계산모델에 민감함 |

기초는 설계시 지반과의 상대강성(βl) 즉 기초의 강성에 따라 서로 다른 설계방법을 사용한다. 케이슨과 같이 강체로 볼 수 있는 기초의 경우 안정성은 주로 지지지반의 내력에 의존하므로 기초안정 검토는 지반의 극한평형시 힘의 균형에 의한 해석법인 극한지반 반력법을 적용하고 말뚝의 경우는 전길이에 걸쳐서 지반이 항복하는 상태로는 고려할 수 없고 미소한 변위량에서는 지반을 탄성체로서 생각할 수 있으므로 탄성지반상의 보로 한 탄성지반 반력법이 적용되고 있다. 이와 같은 이유로 도로교 하부구조기준에서도 기초의 강성에 따라 케이슨 기초와 말뚝기초로 설계방법이 구분되어 있다. 심형기초의 경우는 설계구분상 케이슨 기초와 말뚝기초의 중간영역에 속한다. 수평지지력에 대한 설계를 위해서는 그림 3과 같은 모델에서 우선 지반조건과 가정한 심형기초의 형상치수에 사면의 영향을 고려한 지반반력계수를 구하고 외력조건하에서 탄성지반 위의 보로서 Matrix 해석을 통해 지반반력을 구한다. 경사각이 10°를 넘는 경우에는 지반반력계수를 저감해야 한다. 이 지반반력이 각 심도마다 계산된 허용지지력을 넘지 않으면 수평방향의 안정검토는 종료하고 기초 본체의 응력해석을 진행한다. 지반측면의 절

점에서의 변위가 극한변위보다 크게 되면 그 질점에서는 지반이 소성화된 것이다. 따라서 지반반력계수가 극한변위가 넘지 않도록 재 수정하여 이용한다. 실험결과 탄성영역은 구체부직경이나 구체부 길이의 1/3 정도로 알려져 있다. 이러한 소성화부분의 토사중량이 수평력에 저항하는 것으로 본다. 이러한 반복 계산과정을 통하여 기초에서의 변위, 단면력 등을 구할 수 있다. 해석결과는 그림 4와 같이 된다.^{[6][7]}

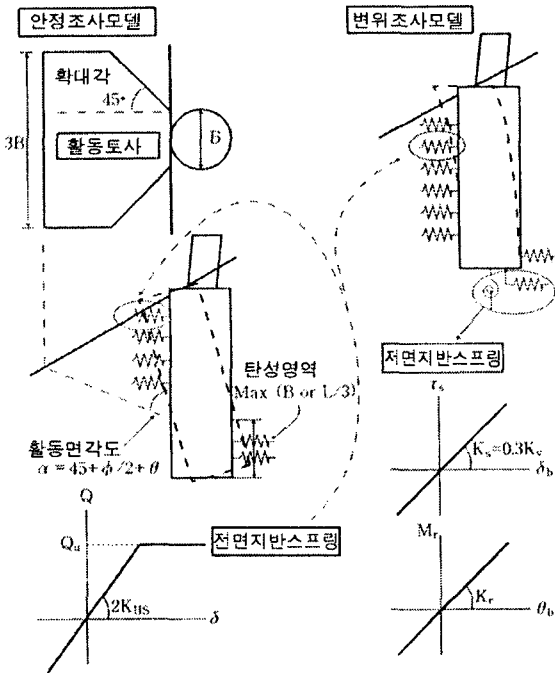


그림 3 수평지지력 산정 모델
Fig. 3 Calculation model of horizontal bearing capacity

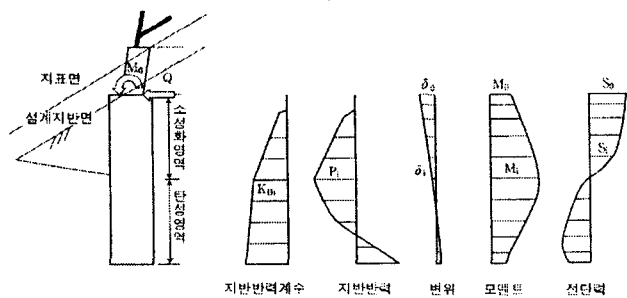


그림 4 계산결과
Fig. 4 Calculation results

최근 일본에서 경사지반에서의 재하시험결과, 경사지반에서의 진행성 파괴과정을 그림 5와 같은 것으로 보고하고 있는데 이에 대해 간략하게 살펴보면 1단계에서는 전면지반과 측면지반이 주로 저항하고 상부에서 하부로 소성화가 진행된다. 2단계에서는 전면지반과 측면지반의 소성화가 진전되며, 구체부의 회전량이 커지며 저면지반의 소성화도 진행된다. 3단계에서는 전면지반과 측면지반 및 저면지반의 소성화가 진전되며, 탄성영역이 기초 하부까지 진행되어 최후의 배면 지반까지 소성화되고 기초는 파괴에 이른다.^[1]

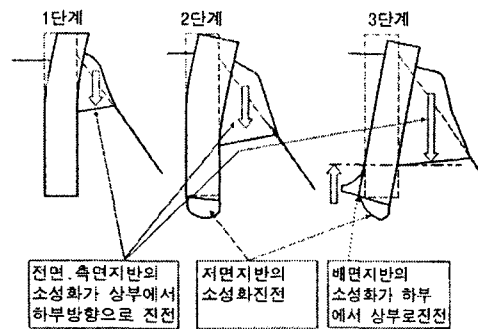


그림 5 수평파괴 진행과정
Fig. 5 Process of horizontal failure

2.2.2 압축 및 인발지지력

압축지지력은 말뚝기초와 같이 비교적 깊게 근입하는 것이 기본이나 시공법의 특성상 선단지지력과 주변마찰력을 발휘하는 것으로 생각할 수 있다. 철탐기초 설계에서 선단지지력은 Terzaghi식을 이용하고, 주변마찰력은 원지반의 전단저항력을 이용한다. 압축지지력의 하중 개념도는 그림 6과 같다.

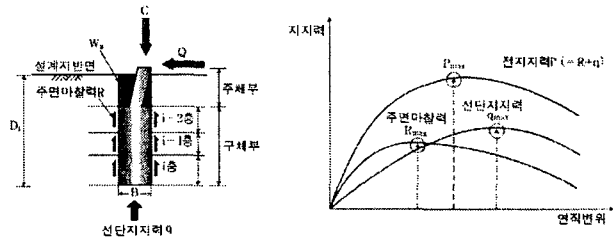


그림 6 압축지지력 하중개념도
Fig. 6 Load diagram of compressive bearing capacity

인발지지력은 철탐기초 고유의 특징으로 해외에 여러 가지 식이 제시되어 있으나 수많은 축소모형이나 실 규모 시험체의 평가를 통해 일본에서 개발된 설계방법을 사용하고 있다. 인발력은 기초의 자중과 주변마찰력이 저항하는 것으로 설계하나 경사지반에서는 전술한 바와 같이 소성화영역이 발생하므로, 이 소성화 영역에서의 주변마찰력은 무시한다. 인발지지력에 대한 하중개념도는 그림 7과 같다. 다만 대규모 송전철탐기초는 풍하중의 반복작용에 의해 지반의 크립변형이 발생되어 기초안정성에 문제가 될 수 있으므로 기초의 자중으로 평상시 인발하중에 대한 안전성을 확보해야 한다.^[5]

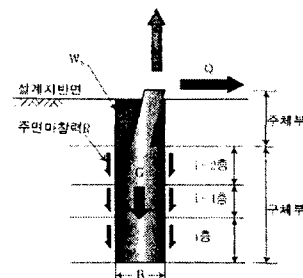


그림 7 인발지지력 하중개념도
Fig. 7 Load diagram of tensile bearing capacity

2.2 심형기초 시공

심형기초는 기계굴착 및 발파를 이용하여 굴착하며, 직경은 3~4.5m 정도의 규모가 많이 사용되고 있다. 구체부의 길이는 구체부 직경의 2배를 넘어야 한다. 심형기초의 시공은 상단 Liner Plate를 설치(그림 8 참조)한 후, 계속적으로 수직굴착 하에 Liner Plate를 설치하는 과정을 반복한다. 설계심도까지 굴착완료 후에 Lean Concrete를 타설하고 구체부 철근조립을 하여 기초재 하단까지 콘크리트를 타설한다. 콘크리트 타설완료 후 기초재를 각입하고, 주체부의 상부철근조립 후 구체부 콘크리트를 타설하면 구체부 공사는 완료된다. 다음으로 주체부 철근조립 후 강관거푸집을 설치하고 주체부 콘크리트를 타설하면 심형기초공사가 완료된다.^[3]



그림 8 최상단 Liner Plate 설치도
Fig. 8 Establishment figure of Liner Plate

3. 향후과제

국·내외에서 송전용 지지물에 발생한 변형 및 이상·장해는 주로 상부의 부재가 파괴된 경우가 대부분으로 현재의 기초설계방법이 충분히 안정된 것으로 판단되나 이것이 합리적이며 경제적인 상태인지 여부를 정확하게 판단하기는 곤란하다. 따라서 향후 기초내력을 검토하는 데 있어서 불확실성이 높은 지반에 대한 설계방법, 지지력 및 변위량의 산정방법 등을 검토하여 최적의 안전율을 설정하는 것이 필요하다. 또한 현재 기초 설계에서 사용하고 있는 허용응력 설

계법은 전세계적으로 그 사용 추세가 감소되고 있다. 따라서 국내에서도 강도설계법 또는 한계상태 설계법으로의 전환이 요구된다. 기초설계의 합리화를 위해서는 설계 지반정수를 경험적으로 추정하는 것이 아닌 지형조건 및 지반특성을 고려한 지반조사 및 시험방법의 합리화가 필요하다. 아울러 경사지에 대한 기초 지지력은 일본 송전분야의 독자적인 연구 성과를 바탕으로 설계에 적용하고 있으나 아직도 불확실한 요소가 많이 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다. 예를 들면 최소지지력이 되는 활동면과 주면의 마찰력을 고려하여 측면지반의 극한지지력을 산정하는 검토방식은 현행 검토방법보다 진일보한 방법으로 예상되며 이에 대한 연구가 필요하다.

시공부분에서는 다양한 지반조건에 따라 통상적으로 이용하고 있는 심형기초가 아닌 구체부 바닥을 확대하여 인발저항력을 증가시킨 확장형 심형기초 또는 구체부 내의 일부를 증공시켜 잔토를 채워 넣은 중공형 심형기초나 구체부 측면에 Anchor를 타입하여 구체부와 일체화시킨 지반보강형 심형기초에 대해서도 그 적용가능성을 검토하여 적재적소에 알맞게 적용하는 것도 심형기초의 설계 및 시공에 관한 기술력 향상에 도움이 될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 전기협동연구 제58권 제3호, 송전용철탑기초의 설계, 2002
- [2] 한국전력공사, 설계기준 송전편, 2005
- [3] 한국전기공사협회, 354kV이하 가공송전선로공사 표준 시공 요령, 1998
- [4] 창우출판, 경사지구조물, 1997
- [5] 일본전기학회, JEC-127 송전용지시물설계표준, 1979
- [6] 일본동경전력, UHV 기초설계요령, 1988
- [7] 일본동경전력, 가공송전선기초표준설계요령, 1995