

전철주기초 설계 자동화 프로그램 개발

Development of Automated Design Program for Electric Railway Pole Foundation

김정무† 정원용* 전윤배** 안승화*** 송규석**** 김종남***** 이수형*****
Jung-Moo Kim Won-Yong Chung Yun-Bae Jeon Seung-Hwa An Kyu-Seok Song Jong-Nam Kim Su-Hyung Lee

ABSTRACT

In this paper, a design program for electric railway pole foundation was developed by applying the estimation study performed by Korean Railway. There are two kinds of shapes in the cross-section of electric railway pole foundation: rectangle and circle. In foundation designing, The rectangular foundation should be satisfied with vertical, horizontal and moment equilibrium equations. On the other hand, the circular foundation should be satisfied with horizontal and moment equilibrium equations. The design program was coded into MFC(Microsoft Foundation Class) by MS Visual C. The equation's roots in the program were obtained by Incremental Search method. Dialog and property sheet(Wizard Mode) input windows were selected for user-friendliness. The biggest advantage of this program is to find an optimum depth in a given section.

1. 서론

구조물 기초의 설계는 기초를 지지하는 지반과의 관계에 관한 것으로 검토의 대상이 되는 지반은 그 특성이 매우 다양할 뿐만 아니라 공학적인 성질 또한 매우 복잡하고, 또한 각종 시험이나 조사에 의하여 얻은 토질정수의 정확성과 신뢰성도 강재나 콘크리트 등의 재료와 비교하여 현저히 떨어지는 실정이다. 또한 기초와 지반 상호간의 역학적인 거동에 관해서도 매우 다양한 이론이 있으나 그 현상을 명확히 규명하지는 못하고 있다. 따라서 기초에 관한 계산은 국가 또는 단체마다 다르고 적용하는 이론도 다양하다. 특히 전차선로와 같이 넓은 지역에 걸쳐 소규모 단위로 시공해야 하는 경우는 다양한 지반특성에 따른 토질시험을 시행할 수 없으므로 표준화된 설계 및 시공방법에 대한 필요성이 매우 크게 요구된다. 여기에 시공되는 전차선로 구조물 기초는 전차선로의 전주 또는 빔과 같은 구조물을 견고하게 지지하기 위하여 지반속에 매입되는 콘크리트 구조물로서 전차선로 설계에 있어서 매우 중요한 요소이나 국내에서는 아직까지 일본 철도 조건에 대하여 유도된 경험적인 공식을 적용하고 있는 실정이다. 이에 한국철도시설공단에서는 전철주기초 설계를 위한 저항모멘트 산정에 대한 연구(2009)를 진행하여 이론적인 근거를 제시하여 공식의 유효성을 검증하였으며, 국내 지반조건 및 시공여건에 대해 적합한 이론식을 제시하였다. 이에 본 논문에서는 이와 같은 상황을 충분히 고려하고 최근의 연구동향 및 국내 전 기철도 현실에 적합하며 설계에 쉽게 반영할 수 있는 전철주기초 설계 자동화 프로그램을 개발하는 것을 목표로 한다.

† 책임저자 : 정희원, (주)삼안, 연구개발원, 차장
E-mail : jmkim1@samaneng.com
TEL : (02)3677-0580 FAX : (02)503-1695
* 비회원, (주)삼안, 연구개발원, 연구원장
** 정희원, 한국철도시설공단, KR기술연구소, 부장
*** 정희원, 한국철도시설공단, KR기술연구소, 차장
**** 비회원, (주)삼안, 연구개발원, 전무
***** 비회원, (주)삼안, 연구개발원, 차장
***** 정희원, 한국철도기술연구원, 무가선트램연구단, 선임연구원

2. 설계이론

2.1 전철주기초에 작용하는 토압

전철주기초에 작용하는 토압 산정시에는 기초의 단면 형상에 따라 다음과 같은 토압 분포를 가정한다.

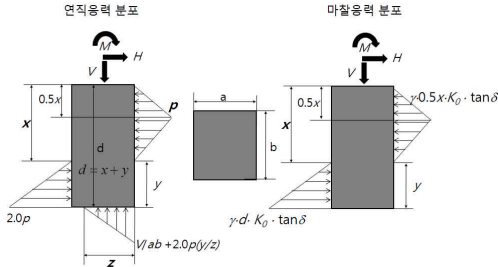


그림1. 각형기초의 응력분포

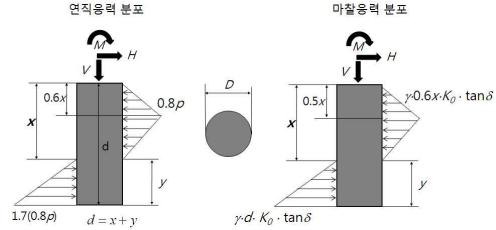


그림2. 원형기초의 응력분포

여기서, M : 기초에 작용하는 모멘트

V : 기초에 작용하는 수직하중

H : 기초에 작용하는 수평하중

a : 기초의 하중 방향 폭

b : 기초의 하중 직각방향 폭

d : 노반에 근입된 기초 깊이

x : 기초의 회전 깊이 ($y=d-x$)

γ : 노반의 단위중량

δ : 기초와 지반사이의 마찰각

z : 하중 재하시 기초 저면부와 지반의 접촉 폭

D : 원형기초의 직경

2.1.1 토압 및 회전 깊이의 계산

전철주 기초에 작용하는 토압 및 회전 깊이는 힘과 모멘트의 평형을 고려하여 결정한다.

① 각형기초

각형기초에 대하여 주어진 토압분포에 대하여 수평방향(H), 수직방향(V) 및 모멘트(M)에 대한 평형방정식은 식(1), 식(2), 식(3)과 같다.

$$H = \frac{1}{2}pb(x-2y) + \frac{1}{2}\gamma K_0 \tan \delta a(x^2 - 2dy) \quad \text{식(1)}$$

$$V = \frac{1}{2}bz \left\{ \frac{V}{ab} + 2.0p \left(\frac{y}{z} \right) \right\} \quad \text{식(2)}$$

$$M = pb \left(-\frac{1}{4}x^2 + xy + \frac{2}{3}y^2 \right) + \gamma K_0 (\tan \delta) \left(\frac{1}{4}x^3 + daxy + \frac{2}{3}day^2 \right) + V \left(\frac{a}{2} - \frac{z}{3} \right) \quad \text{식(3)}$$

② 원형기초

각형기초에 대하여 주어진 토압분포에 대하여 수평방향(H), 모멘트(M)에 대한 평형방정식은 식(5), 식(6)과 같다.

$$H = \frac{1}{2}0.8pD(x-1.7y) + \frac{1}{2}\gamma K_0 \tan \delta D(x^2 - 2dy) \quad \text{식(4)}$$

$$M = 0.8pD \left(-\frac{1}{4}x^2 + 1.7xy + \frac{2}{3}1.7y^2 \right) + \gamma K_0 (\tan \delta) D \left(\frac{1}{2}0.6x^3 + dxy + \frac{2}{3}dy^2 \right) \quad \text{식(5)}$$

위의 방정식을 $d = x + y$ 관계와 함께 연립하여 풀면 전면부 발생 토압 p, 회전깊이 x, 기초 저면부 접촉길이 z 를 구할 수 있다. 기초의 안전성은 계산된 전면부 발생토압과 기초주변 지반의 한계토압과의 비교를 통해 평가된다.

③ 한계토압

노반의 한계토압(p_{cr})은 노반의 내부마찰각 및 단위중량으로부터 다음의 식에 의하여 결정하며 지형적인 영향으로 노반의 강도 감소가 예상되는 경우는 지형계수(K)를 적용하여 한계토압을 감소시킨다.

$$p_{cr} = K \cdot 10^{(1.3 \tan \phi + 0.3)} \gamma z \tag{6}$$

표1. 지형 고려를 위한 지형계수

상태	쌓기	쌓기	평지 및 깎기
단면			
K	0.7	1.0	1.0

④ 안정성 평가

전철주기초의 안전성은 식(1)~식(5)에서 계산된 기초 전면부 토압(p)과 식(6)에서 지형계수가 고려된 기초주변 노반의 한계토압(p_{cr})과의 비교를 통해 평가되며, 기초의 안전율은 전면부 토압과 한계토압으로부터 아래와 같이 계산한다.

$$FS = \frac{p_{cr}}{p} > 2 \tag{7}$$

3. 비선형방정식의 해

공학분야에서 가장 자주 접하게 되는 문제로 $f(p, x, y, z) = 0$ 인 형태의 방정식을 풀어야 할 때가 많다. 특히 다항식을 포함하는 비선형방정식의 문제를 해결하는 데에는 두 가지의 경우로 나누어 생각할 수 있는데, 근의 근사값을 알고 있는 경우와 근사값을 전혀 알지 못한 상태에서 주어진 방정식의 근을 구하는 경우이다. 이런 비선형방정식을 수치적으로 푸는 방법에는 여러 가지가 개발되어 있으나 본 논문에서는 근의 근사값을 알고 있는 경우에 유용하게 사용할 수 있는 Incremental Search법을 수정적용하여 문제를 해결하였다.

3.1 원리

함수 $f(p, x, y, z) = 0$ 인 경우 초기근사해(p_i, x_i, y_i, z_i)로부터 초기증분($\Delta p, \Delta x, \Delta y, \Delta z$)을 가지고 연속적으로 p, x, y, z 값을 변화시켜 $f(p, x, y, z)$ 값이 특정조건을 만족할 때까지 반복 계산한다. $f(x) = 0$ 을 예로 들면 아래의 그림3과 같이 $f(x_i) \times f(x_i + \Delta x) < 0$ 이면, 일반적으로 x_i 와 $x_i + \Delta x$ 사이에는 근이 존재함을 의미한다. 근에 보다 더 가까운 값은 위의 관계가 성립하였을 때의 x_i 값을 초기치로 다시 놓고 증분(Δx)을 보다 더 작은 값으로 놓은 후 위의 계산을 반복하여 실시함으로써 얻을 수 있다.

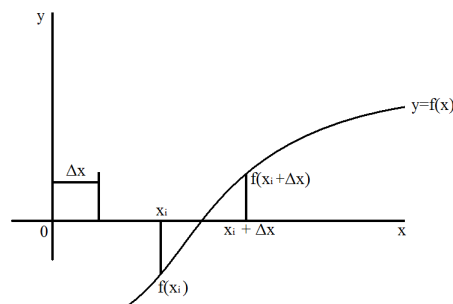


그림3. Incremental Search Method

3.2 방정식의 해

방정식 식(1)~식(5)까지의 해를 풀기 위해서는 경계조건이 필요하며 그림1과 그림2에서 보인바와 같이 x, y, z 의 경계조건은 기초의 형상(가로, 세로, 높이)이다. 또한 Incremental Search법에서는 경계가 되는 값을 찾아낸 후 그 값을 좀더 상세히 나누어 근사해를 찾는 방식을 채택하였으나 전철주기초에서는 경계조건이 명확히 정해져 있으므로 바로 그 경계조건에서부터 각각의 식을 만족하는 해를 찾아가도록 하는 방법을 택하였다. 즉, 각형기초의 토압 및 회전깊이를 구하기 위해서는 H, V, M 을 만족하는 p, x, y, z 를 구하여야 하는데, 우선 H 를 만족하는 p, x 를 구하고, 다음으로 p, x 는 고정하고 V 를 만족하는 z 를 구한다. 마지막으로 구한 값이 M 을 만족하는지를 검토한 후 만족하지 않을 경우는 다시 처음부터 찾아가는 방법을 택하였다. 이와 같은 방식은 경계조건이 명확할 경우 모든 방정식을 만족하는 p, x, y, z 를 쉽게 찾을 수 있다.

3.2.1 각형기초 방정식계산

각형기초 방정식을 풀기 위해서는 각 식(1)~식(3)을 모두 만족하는 해를 찾아야 하며, 우선 식(1)을 만족하는 해(p, x)를 찾고 이 값을 식(2)에 대입하여 만족하는 해(p, z)를 찾는다. 이렇게 구한 값(p, x, y, z)을 식(3)에 대입하여 방정식이 만족하면 이 값들이 방정식 근이며, 만족하지 않을 경우 다시 반복한다. 그림4는 본 방정식을 풀기 위한 순서도이다. 여기서 H, V, M 은 수평력, 수직력, 모멘트이며 설계시 주어지는 값이고 f_h, f_v, f_m 은 식(1)~식(3)의 p, x, y, z 가 대입된 함수의 결과값으로 설계에서 주어진 값과의 차는 오차(e)를 만족해야 한다. 본 프로그램에서의 오차는 10^{-5} 이며 정량적인 크기는 0.0001m로 2~3m 크기의 전철주기초에서는 무시할만한 크기이다.

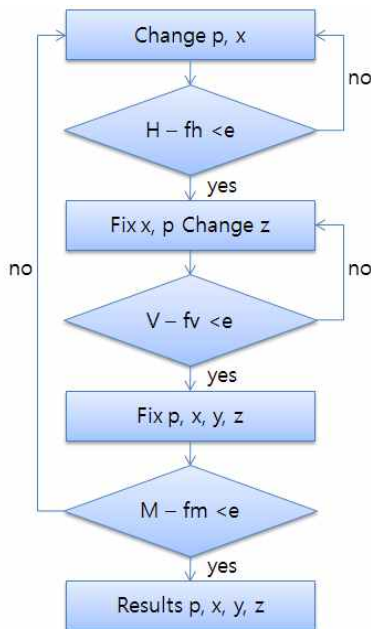


그림4. 각형 방정식을 풀기 위한 순서도

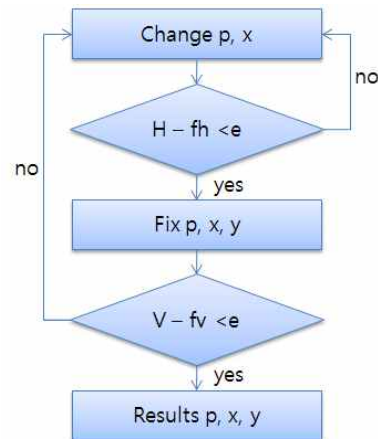


그림5. 원형 방정식을 풀기 위한 순서도

3.2.2 원형기초 방정식계산

원형기초 방정식을 풀기 위해서는 각 식(4)와 식(5)를 만족하는 해를 찾아야 하며, 우선 식(4)를 만족하는 해(p, x, y)를 찾고 이 값을 식(5)에 대입하여 방정식이 만족하면 이 값들이 방정식 근이며, 만족하지 않을 경우 다시 반복한다. 그림5는 본 방정식을 풀기 위한 순서도이다. 여기서 H, M 은 수평력, 모멘트이며 설계시 주어지는 값이고 f_h, f_m 은 식(4)~식(5)의 p, x, y 가 대입된 함수의 결과값으로 설계에서 주어진 값과의 차는 오차(e)를 만족해야 한다.

4. 윈도우 프로그램 개발

본 논문에서 개발한 프로그램은 사용자의 편의를 위해 세 가지 형태의 입력창을 지원한다. 첫 번째는 마법사형태의 입력창(그림6~그림11)으로 전철주기초 설계는 입력단계를 따라 진행한다. 두 번째는 기초 데이터 입력창(그림12)으로 첫 번째 창에 익숙한 사용자는 별도의 단계를 거치지 않고 기초데이터 입력창을 통해 입력을 마칠 수 있다. 세 번째는 결과출력창(그림13)으로 상·중·하 세 개의 창으로 구성되어 있으며, 가운데 창의 그리드에 값의 입력·수정·변경이 가능하다. 모든 입력이 완료되면 근입깊이계산 또는 최적근입깊이계산 버튼을 눌러 결과를 볼 수 있다. 결과의 출력은 결과출력창(그림13)과 보고서인쇄에 의한 출력물(그림14)이 있다. 결과출력창은 세 개로 구분되어 있으며, 상단창은 설계표준단면, 안전율, 토공물량 및 개략공사비를 보여준다. 중단창에는 입력한 값이 그리드상에 나타내며, 하단창에는 각형의 경우 p, x, y, z , 원형의 경우 p, x, y 가 안전율과 함께 표시된다.



그림6. 설계과업명

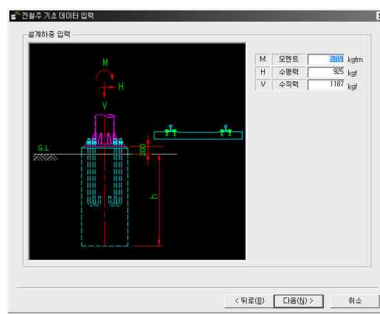


그림7. 설계하중

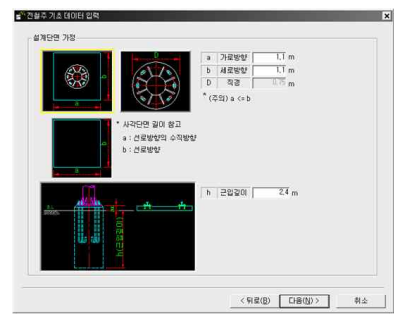


그림8. 설계단면



그림9. 노반조건

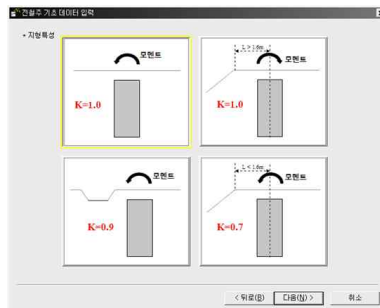


그림10. 지형특성



그림11. 기초설치방법과 공사비

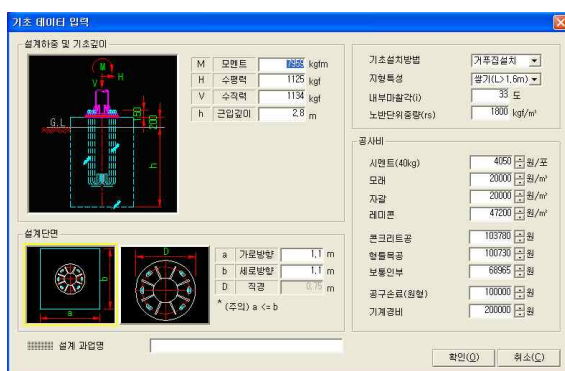


그림12. 기초데이터 입력창



그림13. 결과출력창

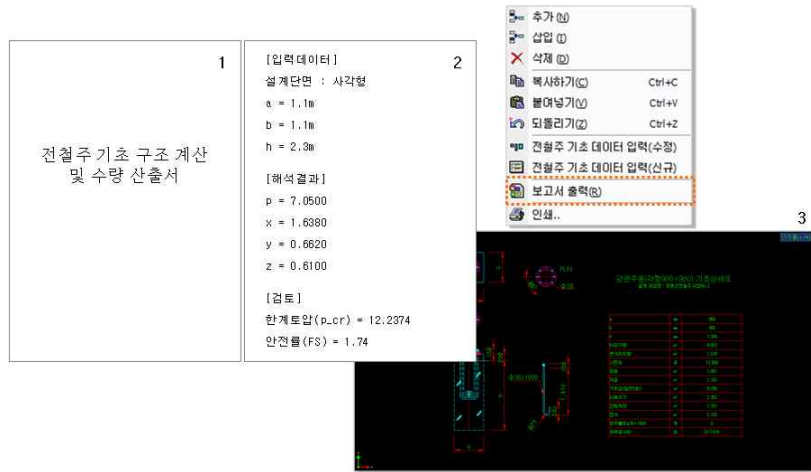


그림 14. 보고서출력 메뉴 및 출력결과

본 프로그램의 가장 큰 장점은 사용자 입력편의를 위해 각기 다른 세 가지 입력방식을 제안한 것과 주어진 단면에 대해 기준안전율(F.S = 2.0)을 만족하는 최적깊이 설계가 가능한 것이다. 이상과 같이 개발한 프로그램은 상부구조물의 형태와는 상관없이 하중으로 입력할 수 있으나 설계자의 편의를 고려할 때 이를 통합할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 가장 최근에 연구되고 검증된 산정식을 사용하여 프로그램을 개발하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 제안된 연립방정식은 수정 Incremental Search법으로 방정식의 근사해를 구하였으며 오차는 시공시 무시할만한 크기로 계산된다.
- 2) 계산된 해를 전철주기초 설계에 쉽게 적용하기 위하여 윈도우 프로그램으로 개발하였다.
- 3) 본 프로그램의 장점은 사용자 편의를 위해 세 가지 입력방법을 제시한 것과 형상과 단면이 결정되면 최적근입깊이를 자동으로 계산해 주는 것이다.
- 4) 본 연구에서 개발한 프로그램은 상부구조물의 형태와는 상관없이 하중으로 입력할 수 있으나 설계자의 편의를 고려할 때 이를 통합할 수 있는 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

이 연구는 한국철도시설공단 “전철주기초 설계를 위한 저항모멘트 산정 연구 용역” 지원에 의해 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국철도시설관리공단 (2009) “전철주기초 설계를 위한 저항모멘트 산정 연구” 중간보고서
2. 홍준표 (1991) “개정판 컴퓨터 수치해석” 문운당
3. msdn.microsoft.com