

매크로 스프레드시트를 이용한 사면 안정 해석

민덕기
토목공학과

<요 지>

최근 소형 컴퓨터와 각종 소프트웨어의 개발로 새롭거나 과거에는 불가능하다고 여겨지던 문제들을 어렵지 않게 해결할 수 있게 되었다. 특히 매크로 스프레드시트는 기존의 스프레드시트로 해결할 수 없었던 문제들을 취급할 수 있게 하고 있다. 본 논문에서는 매크로 스프레드시트를 이용하여 Hardin의 'Lever Arm Equilibrium 이론'을 프로그램하였다. 이 이론은 가상 파괴단면을 비원형인 경우에 적용할 수 있는 한계평형이론중의 한 방법이다.

본 논문에서는 매크로 스프레드시트를 복잡한 공학적인 문제에 적용할 수 있음을 보였다. 특히 본 예제의 경우 매크로 스프레드시트의 반복 계산의 기능은 안전율 계산에 매우 유용하였으며, 그래픽기능을 이용하여 손쉽게 응력분포 등을 나타낼 수 있음을 보였다.

MACRO SPREADSHEET PROGRAMING APPLIED TO SLOPE STABILITY ANALYSIS

Min, Tukki
Dept. of Civil Engineering

<Abstract>

Recent advancements in microcomputer hardware and spreadsheet software have provided the computer user with many new and as yet unexplored problem - solving capabilities. Specially, command and function macros in macro spreadsheets provide the necessary tools to tackle problems that cannot be solved using a conventional spreadsheet. A computer program using the macro spreadsheet was developed to solve slope stability analysis problems based on the Hardin's 'Lever Arm Equilibrium Method'. This method is one of the statically consistent limiting equilibrium methods

of slope analysis applicable to noncircular slip surfaces.

It was found that the macro spreadsheet could be written to assist the user in solving complicated engineering problems. Particularly, the iterative approach was found very useful in determining the factor of safety, F . The graphic function was also useful in displaying the pattern of stress distribution.

1. 서 론

1978년 소형 컴퓨터에 스프레드시트(sheet)가 처음 소개된 후 많은 분야에서 그 활용도가 높아져가고 있다. 1985년에는 Lotus^R Development Corporation에 의해 electronic macro-spreadsheet인 Lotus^R 1-2-3가 개발되었으며¹⁾, 그후 Symphony^R, Excel^{TR}, Quattro 등이 개발되었고 계속해서 강력한 소프트웨어가 개발되고 있다.

주지하는 바와 같이 소형 컴퓨터가 일반화되기 시작한 것은 1977년 워지니아크롭스에 의해 Apple computer가 발표된 이후의 일이다. 이전에도 마이크로 프로세서로 CPU로 사용한 퍼스널 컴퓨터가 일부 판매되고 있었으나, 이들은 대부분 완제품 형태가 아닌 키트 형태의 것에 불과하였다. 취미 및 Basic 학습 등의 범주를 벗어나지 못하고 있던 퍼스널 컴퓨터는 1978년 Visicalc가 발표된 이후 급속도로 변모 발전하게 되었다. Visicalc의 개략적인 형태는 Lotus 1-2-3와 유사하게 되어 있으며, 합계, 평균, 최대값, 최소값 등을 위시한 각종 계산 기능이 구비되어 있어 각종 계산을 간단히 처리해 주었다.

그 이후 Visicalc와 유사한 각종 스프레드시트 프로그램이 발표되었다. 1980년 IBM PC가 발표되자 업무용 분야에서도 8비트 퍼스널 컴퓨터가 급속도로 퇴조하기 시작하였다. 마침내 1985년 미국의 디벨로프사에 의해 오늘날과 같은 Lotus 1-2-3가 개발되자 순식간에 스프레드시트가 각 분야에서 널리 사용되게 되었으며 이러한 추세는 지금까지 이어지고 있다.

이에 많은 분야에서 이 스프레드시트라는 새로운 기법을 널리 사용하게 되었으나, 공학 분야에서는 그 활용도가 극히 저조한 편이다. 특히 이 패키지가 가지고 있는 그래픽 기능 및 매크로 기능을 적절히 이용하지 못하고 있는 실정이다. 매크로 스프레드시트는 많은 function, branching, looping 등을 사용하여 프로그램할 수 있도록 개발되어 있으며, 특히 매크로는 electronic spreadsheet와 일반적인 언어인 BASIC, FORTRAN 등과의 간격을 연결시켜 주는 '교량'의 기능을 하고 있는 것으로 매크로 프로그램을 포함하고 있는 스프레드시트는 복잡한 자료의 조작이나 수치 해석을 가능하게 하고 있다. 이러한 스프레드시트는 기존 언어에 대해 모르는 초심자들도 비교적 쉽게 이용할 수가 있어 최근 그 사용도가 기하급수적으로 증가하는 추세이다.²⁾

스프레드시트의 최대 크기는 소프트웨어에 따라 다르겠지만 일반적으로 8000 row \times 250 column = 2,000,000 개의 방(cell)으로 이루어져 있다. 본 연구에서 사용한 Lotus Symphony^R의 경우는 8192 row \times 256 column의 방으로 이루어져 있다. 스프레드시트의 최대의 장점은 주어진 방정식을 입력시킨 후 입력 데이터를 바꾸워주면 자동적으로 새 결과를 재계산(recalculation)하는 것이며 이 재계산 역시 매우 신속하게 수행한다는 것이다.³⁾

현재는 많은 공학자들도 이 패키지를 이용하여 점점 복잡한 문제 풀이를 시도하고 있으며 더 나아가서는 기술자나 고용자들을 위한 template가 준비되고 있다. 본 연구에서는 로터스 디벨로프사 제품인 Lotus Symphony^R을 이용하여 Hardin의 사면안정해석이론을 프로그램화하였다. 그러나 이 기법들은 유사한 다른 스프레드시트에도 어렵지 않게 적용시킬 수가 있다.

2. HARDIN의 사면해석이론

현재 관용되고 있는 사면안정해석방법은 대부분 한계평형법(limit equilibrium method)이다. 이 방법은 현재까지 축적된 많은 경험을 통하여 유용하고 신뢰성이 있는 것으로 평가되고 있다. 한계평형이론에 기초를 둔 사면안정해석 방법은 각 방법을 고안할 때 설정한 가정의 차이에 따라 여러 방법이 발표되었고, 거의 모든 방법은 프로그램화 되어 실용상 편리한 단계에 와 있다. 사면안정해석 결과의 정확도는 사면의 기하학적 조건과 강도특성의 파악 정도에 일차적으로 지배된다. 또한 동일한 문제에 대해서도 각 방법은 상의한 안전율과 파괴면을 제시하게 된다. 한계평형에 근거를 두고 있는 연구들은 Frohlich(1955)⁴⁾, Bishop(1955)⁵⁾, Whitman과 Moore(1963)⁶⁾, Morgenstern과 Price(1965)⁷⁾, Spencer(1967,1973)^{8,9)}, Janbu(1973)¹⁰⁾ 등의 연구가 대표적이다. 최근에는 물리적인 모든 조건을 고려할 수 있는 방법들이 연구되고 있는데 그 대표적인 연구로는 Chen과 Morgenstern(1973)¹¹⁾, 그리고 Hardin(1984)¹²⁾의 연구가 있다.

본 연구에서는 비교적 최근에 소개된 Hardin(1984)의 이론을 근거로 프로그램을 작성하였으며, 파괴면을 원호로 가정한 경우에는 Bishop의 간이해법과도 비교하였다. Hardin의 해석 방법은 최근 개발된 방법 중 하나로 파괴 토체에서 정력학적

인 평형을 이루며 정정해석이 가능한 새로운 사면해석방법이다. 이 해석 방법은 'Lever Arm Equilibrium' 이라고 하는 새로운 이론으로 파괴토체에서의 내적 평형을 만족시키기 때문에 그 결과가 정해에 매우 가까운 것으로 알려져 있다. 이 이론은 이미 대한토질공학회지¹³⁾에도 상세히 소개된 바가 있으며 그 이론에 대한 개략적인 내용은 다음과 같다.

하 중

하중으로는 체적력 (body forces), 표면력(surface loading) 그리고 공극수압을 고려하였다. 본 해석방법은 분할법(slice method)의 일종으로, 각 분할토편에 대한 평형조건을 고려하면 전수평력, Q_x , 전수직력, Q_y , 그리고 전모멘트, Q_m 는 각각 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_x &= \int q_x dx, & Q_y &= \int q_y dx, \\ Q_m &= \int q_m dx \end{aligned} \quad (2-1)$$

이 하중들의 합력, Q 와 그 lever arm, a_n 는 다음식으로 주어진다.

$$Q = (Q_x^2 + Q_y^2)^{1/2} \quad (2-2)$$

$$a_n = Q_m / Q \quad (2-3)$$

반력

파괴면을 따라 작용하는 전단응력과 유효수직응력은 반력으로 고려할 수 있다. 유효수직성분에 의한 합력, N' 과 그 lever arm, a_n 그리고 전단성분에 의한 합력, T 와 그 lever arm, a_t 는 다음과 같다.

$$N' = [(N'_x)^2 + (N'_y)^2]^{1/2}, a_n = N'_m / N' \quad (2.4a)$$

$$T = [(T_x)^2 + (T_y)^2]^{1/2}, a_t = T_m / T \quad (2.4b)$$

N' 과 T/F 의 합력, R 의 크기는 다음 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 F 는 안전율이다.

$$R = N'/F (F^2 + f^2)^{1/2} \quad (2.5a)$$

$$\text{여기서 } m = (N'_x T_x + N'_y T_y) / (N')^2 \quad (2.5b)$$

$$f = T/N' \quad (2.5c)$$

반력 합력의 모멘트, $R_m = N'_m + (T_m/F)$ 이므로 그 lever arm, a_r 은 다음과 같다.

$$a_r = \frac{F a_n + f a_t}{(F^2 + 2mF + f^2)^{1/2}} \quad (2.6)$$

Lever Arm 평형방정식

활동사면의 역학계가 평형을 이루기 위해서는 하중과 반력의 크기가 동일하며 작용방향은 반대가 되어야 한다. 이로부터 안전율, F 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$F = -f_1 \pm (f_1^2 - f_2^2)^{1/2} \quad (2.7a)$$

$$\text{여기서 } f_1 = \frac{m - r_n r_t f}{1 - r_n^2}$$

$$\text{그리고 } f_2 = \frac{(1 - r_n^2) f^2}{1 - r_n^2} \quad (2.7b)$$

원형 파괴면의 경우에는 $a_n = 0$ 이 되므로 이때의 안전율은

$$F = [(r_t^2 - 1) f^2 + m^2]^{1/2} - m \quad (2.7c)$$

이 된다.

내적 평형(Internal Equilibrium)

한 분할토편에 작용하는 힘들은 수직, 수평 및 모멘트에 관하여 평형을 이루게 되면 활동파괴토체에서 내적 평형을 만족하는 것을 의미하게 되고, 이로부터 반력의 작용거리, y_H' 의 일반식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\int [q_m' (n_x' + t_x/F) y_r' (n_y' + t_y/F) x] dx + x \int (q_v' + n_y' + t_y/F) dx + y_H'(x) \int (q_x - n_x - t_x/F) dx \quad (2.8)$$

유효수직응력의 계산

Lever arm equilibrium 방정식으로부터 안전율을 구하기 위해서는 활동면에서의 유효수직응력, $\sigma'(x)$ 가 먼저 산정되어야 한다. 그러나 $\sigma'(x)$ 는 두 미지수 $V(x)$ 와 $H'(x)$ 로 표현되는 2변함수이므로 두 변수 관계를 합리적으로 설정하여야만 $\sigma'(x)$ 를 구할 수 있다. 이들 관계는 일반적으로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV}{dx} = \lambda f(x) \frac{dH'}{dx} \quad (2.9)$$

이로부터 $\sigma'(x)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma'(x) = \frac{q_v + \lambda f(x) q_x + c'/F [\lambda f(x) - \tan \alpha]}{1 + \tan \alpha \tan \phi' / F + \lambda f(x) (\tan \alpha - \tan \phi' / F)} \quad (2.10)$$

여기서 $\lambda f(x)$ 는 정역학적 조건을 만족할 수 있도록 선정되어야 한다.

3. 스프레드시트를 이용한 전산화

본 연구에서는 전장에서 기술한 Hardin의 이론을 Lotus Symphony^R 스프레드시트를 이용하여 프로그램화 하였다. 문제의 해를 구하기 위해 전산화한 과정을 정리하면 아래와 같다.

1) 관계되는 하중을 계산한다. 즉 각 절편에 작용하는 수평 및 수직 하중과 모멘트, $q_x(X)$, $q_y(X)$, $q_m(X)$, 그리고 전 하중인 Q_x , Q_y , Q_m , Q 그리고 lever arm, a_q .

2) 안전율 계수 λ 를 가정한다. 일반적으로 최초의 값은 $F = 1$, $\lambda =$ 적당한 상수로 보통은 0 이나 1/3로 가정한다.

3) 반력들을 계산한다. 즉 $n_x(X)$, $n_y(X)$, $t_x(X)$, $t_y(X)$, $t_m(X)$, N_x , N_y , N_m , N' , T_x , T_y , T_m , T , R , a_n , a_t , r_n , r_t , m , f 그리고 이 값들을 이용하여 안전율, F 를 계산한다.

4) 가정한 안전율, F 와 λ 에 대하여 계산된 안전율, F 가 수렴할 때까지 3)항의 계산을 반복한다.

5) 외력의 합, Q 와 반력의 합, R 이 일치하지 않으면 λ 를 변화시키며 3)과 4)항의 계산을 반복한다.

6) 필요한 경우에는 F 와 λ 의 최종치를 이용하여 y_H' 을 구한다.

해를 구하는 첫번째 과정은 하중을 구하는 것이다. 이 과정은 식 (2.1) -(2.3)에서부터 구할 수 있다. 반력을 구하기 위해서는 반복 계산이 요구된다. 단계 1에서 $y_H'(X)$ 를 구할 필요가 없을 경우에는 Q_m 은 다음식으로 구할 수 있다.

$$Q_m = \int [\int (\gamma_y x - \gamma_x y) dy + (w_y x - w_x y \tan \delta) + u_r(y_r \tan \alpha - x)] dx + (U y_u)_{XR} - (U y_u)_{XL} \quad (3.1)$$

두번째 단계에서는 안전율과 계수 λ 를 가정하였다. 보통 안전율은 1로 계수 λ 는 1/3로 가정하였다. 단계 3에서는 식

(2.2)에서 식 (2.6)까지의 식을 이용하여 각종 힘의 크기 및 작용점을 구한다. 단계 4에서는 안전율을 계산하기 위해서는 안전율이 수렴할 때까지 반복 계산을 하여야 하며, 본 프로그램에서는 최초 안전율을 1로 가정하여 계산하고 이 계산된 안전율을 다시 가정안전율로 하여 반복계산을 하였으며, 외력과 반력의 값이 일치할 때까지 반복계산을 실시 하였다. 이때 스프레드시트의 매크로 기능이 유용하게 쓰일 수 있었다. 아래의 표 3. 1에는 안전율을 구하기 위한 매크로의 한 예를 보여준다. 표 3. 1에서 fa 는 가정한 안전율을, fc 는 계산된 안전율이다. 단계5에서는 외력의 합과 반력의 합이 일치될 때까지 λ 의 값을 변화시키며 단계1에서 단계4의 계산을 반복한다.

단계6에서는 계산된 안전율과 계수 λ 를 이용하여 y_H' 을 구한다.

Table 3. 1 The Macro Program for Calculating the Safety Factor

c	{let fa,fc}
	{if + c6 < 0.001}{branch end}
	{branch c}
	end {quit}

4. 예제 문제

여기서는 본 프로그램을 검증하기 위해 Hardin이 그의 논문¹²⁾에서 택한 예제에 대하여 Lotus Symphony^R 스프레드시트를 이용하여 프로그램을 실시하였다. 그림 4. 1에서 보는 바와 같이 해석에 고려한 하중은 자중뿐 아니라 사면표면에 가해지는 외력과 공극수압을 고려하였다. 가상 파괴면은 그림 4. 1에서 보는 바와 같이 직선으로 구성되어 있다. 사면 지반의 $\gamma_y = 20KN/m^3$, $\gamma_x = 2KN/m^3$, 물의 $\gamma_y = 10KN/m^3$, $\gamma_x = -1KN/m^3$, 점착력, c 는 $10KN/m^2$ 이었으며, $\tan \phi' = 0.5$ 이다. 사면 상부

에는 인장균열이 존재하며 이 균열은 물로 채워져 있다고 가정하였고, 침윤선은 그림에서 보는 바와 같이 직선으로 가정하였다.

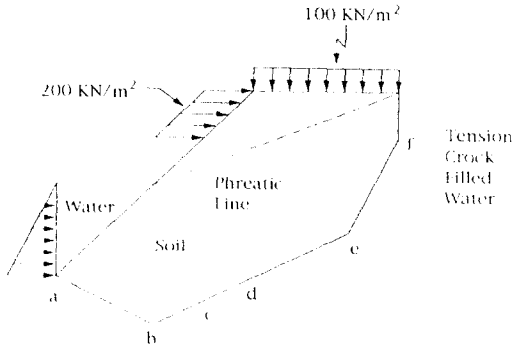


Fig. 4. 1 Example Problem Loading

여기서는 정정해석을 하기 위해 Spence⁸⁾가 채택되었던 것과 같이 수직 단면에 작용하는 전단력이 유효수직력에 선형적으로 비례한다고 가정하였다. 이는 Hardin이 그의 논문¹²⁾서도 채택한 가정이다.

$$V(x) = \lambda H'(x) \quad (4. 1)$$

이로부터 $\sigma'(x)$ 에 대하여 풀면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\sigma'(x) = \frac{qy + \lambda qx + c'/F(\lambda - \tan \alpha)}{1 + \tan \alpha \tan \phi'/F + \lambda(\tan \alpha - \tan \phi'/F)} \quad (4. 2)$$

상기식을 이용하여 프로그램을 수행한 스프레드시트의 일부가 부록에 수록되어 있다. 사면은 그림 4. 1의 b, c, d, e점을 통과하는 4개의 절편을 나누었다. 최초 안전율 F를 1로, λ 는 1/3으로 가정하여 안전율을 계산하였으며 해석 결과 계산된 안전율은 1.102867이었으며, 이 값을 다시 가정 안전율로 하여 안전율을 재 계산하는 방법으로 반복계산을 한 결과 안전율

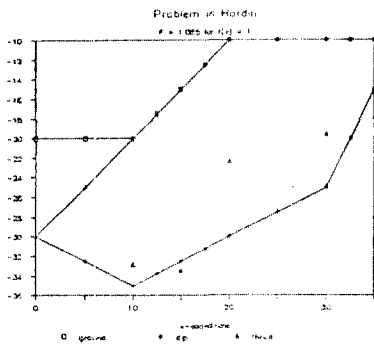
은 1.076474에 수렴하였다. 이 계산시 매크로의 기능이 유용하게 이용되었다. 그러나 이 경우 Q는 7120인데 R은 7017.7이 되어 완전히 일치하지 못하고 있다. 따라서 전절의 단계 5에서 설명한 바와 같이 λ 의 값을 0.40, 0.35 등으로 변환시키며 재계산을 실시하였으며, 그 결과 λ 가 0.34944일 때 안전율 1.085030이 되고 이때 Q와 R은 7109.7로 일치 하였다. λ 의 변화에 따른 안전율 및 반력 R의 값의 변화를 표 4. 1에 나타내었다.

Table 4. 1 Determination of Statically Consistent λ

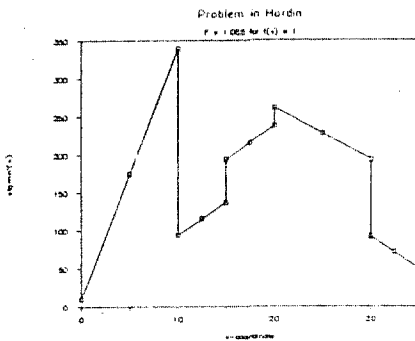
λ	Converged F	R(KN)
1/3	1.076474	7107.7
0.34944	1.085030	7119.7
0.35	1.085334	7120.1
0.37	1.096409	7136.7
0.4	1.113977	7166.7

그림 4. 2는 반력의 위치와 $\sigma'(x)$ 의 값을 보여 주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 반력의 위치가 파괴면 아래에 있는 경우가 발생하고, $\sigma'(x)$ 는 불연속점이 발생하여 정역학적 조건을 만족시키지 못하고 있다. 이는 $V(x)$ 와 $H'(x)$ 의 관계를 선형으로 가정한 연유에 기인한 것으로 이러한 가정은 $\sigma'(x)$ 의 분포에 불연속이 되는 각 절편측면에서의 응력 값의 평균치인 σ'_{mean} 과 반력계수, $D(x)$ 를 이용하여
$$\sigma'(x) = prev. \sigma'(x) + \beta D(x) \sigma'(x)_{mean} \quad (4. 3)$$

로 조정하였다. 이 식에서 $prev. \sigma'(x)$ 는 이전 $\sigma'(x)$ 의 계산치이고, β 는 상수로 본 예제의 경우 0.05를 사용하였다. $\sigma'(x)$ 를 조정하여 정역학적 조건을 만족시킬 때까지 재계산을 실시하였으며, 그 결과는 그림 4. 3에 보여주고 있다.

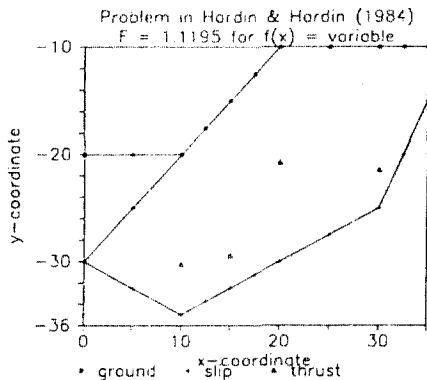


a) The Locations of Thrust

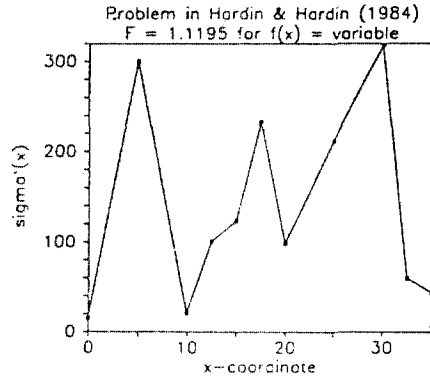


b) $\sigma'(x)$ of the Side of Slices

Fig. 4. 2 The Locations of Thrust and $\sigma'(x)$ of the Side of Slices for $f(x) = 1$



a) The Locations of Thrust



b) $\sigma'(x)$ of the Side of Slices

Fig. 4.3 The Locations of Thrust and $\sigma'(x)$ of the Side of Slices for $f(x) = \text{variable}$

5. 원호활동면으로 가정한 간편법

Hardin은 원호활동면으로 가정한 경우에 대한 안전율을 구하기 위해 안전율을 1로 가정하고, 계수 λ 를 0으로 보고 $\sigma'(x)$ 에 관한 새로운 식을 유도하였다.

$$\sigma'(x) = \frac{q_y - c' \tan \alpha}{1 + \tan \phi' \tan \alpha} \quad (5. 1)$$

식 (5. 1)을 이용하여 식 (2. 7c)로부터 반복 계산 없이 바로 안전율을 구할 수 있다.

여기서는 전절의 그림 4. 1의 경우에 대하여 Hardin이 그의 논문에서 시도한 바와 같이 원점을 그림 4. 1의 원점의 5m 아래로 잡고, 그림 4. 1에서 a, b, f점을 지나는 원호로 파괴면을 가정하여 안전율을 계산하였다. 이 경우 파괴원호의 반경은 26.93m 이었고, 점착력 c' 은 20 KN/m², 그리고 $\tan \phi'$ 는 0.65로 하였다. 이 경우에는 전장에서 기술한 방법에 약간의 수정을 가하여 쉽게 프로그램화 할 수 있었다. 본 예제의 경우는 절편을 5 m 간격으로 균등하게 분할하여 7개의 절편으로

나누어 해석하였으며, 해석 결과 안전율은 1.020551이 되었다. 이 경우에는 반복계산이 필요 없으므로 안전율을 신속하게 구할 수 있었다. 같은 조건의 문제에 대하여 Bishop의 간편법으로 해석을 시도한 결과 안전율은 0.929로 나타나 본 예제 문제의 경우에는 Hardin의 해석 방법이 Bishop의 간편법 보다 약간 큰 안전율을 보였다.

6. 결 론

오늘날 많은 프로그램 언어들이 개발되어 있고, 또 그 언어들을 사용한 소프트웨어가 수없이 많이 개발되어 있다. 최근 개발된 소형 컴퓨터의 하드웨어와 스프레드시트 소프트웨어는 컴퓨터 이용자로 하여금 지금까지 소형 컴퓨터에서 해결하지 못하던 문제들에 대한 새로운 해결의 길을 열어 놓았다. 최근 국내에서도 소형 컴퓨터의 스프레드시트 이용이 급증하고 있으나 아직 공학분야에서는 그 이용이 미미한 실정이다.

본 연구에서는 개인용 컴퓨터에서 손쉽게 사용할 수 있는 스프레드시트를 이용하여 사면안정 해석을 실시하여 보았다. 본 연구에서는 Lotus Symphony^R 스프레드시트를 이용하여 프로그램 하였으며, 이는 다른 유사한 스프레드시트를 이용하여도 유사한 방법으로 프로그램할 수 있다. 본 연구에서는 Hardin의 lever arm equilibrium 이론을 프로그램화 하였다. 그의 이론은 일종의 절편법으로 안전율을 구하는데 필요로 하는 반복 계산은 스프레드시트가 가지고 있는 재계산기능과 매크로 기능을 사용하여 손쉽게 해결할 수가 있었다. 스프레드시트를 이용하여 안전율을 계산하여 본 결과 그의 논문에서 다루었던 예제 문제에 대하여 안전율을 0.34944로 구할 수 있었으며, 이는 Hardin이 그의 논문에서 계산한 0.35와 일치하는 값이다. 또한 스프레드시트의 그래픽 기능을 이용하여 응력의 분포등도 쉽게 볼 수 있었다.

또한 본고에서는 원호 활동면으로 가정한 Hardin의 간이해법과 Bishop의 간편법을 이용하여 안전율을 계산하였으며, 그 결과 두 방법은 거의 유사한 안전율을 보여 주었다.

본 연구에서는 절편법을 이용한 사면해석방법의 일종인 Hardin의 Lever Arm Equilibrium 이론에 대하여 프로그램함으로써 복잡한 공학적인 문제에 매크로 스프레드시트를 손쉽게 적용할 수 있음을 보였다. 아직까지 공학분야에 이 기법의 이용이 미미한데 머물러 있으나, 앞으로 이 기법의 이용은 급격히 확대될 것으로 보이며 이에 대한 공학자들의 좀더 깊은 관심이 있어야 할 것으로 여겨진다.

참고문헌

- 1) Casas, A., 'Spreadsheets : A New Design Tool,' Civil Engineering, p.55, December, 1985.
- 2) Neis, M. E., Wigham, J. M. and Neis, V. V., 'Macro-Spreadsheet Programming Applied to Well Drawdown,' J. of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol.2, No.2, pp. 121-135, April, 1988.
- 3) Ewing, D. P. and LeBlond, G. T., 'Using Symphony^R,' 2nd Edition, QUE, p. 780, 1988.
- 4) Frohlich, O. K., 'General Theory of Stability of Slopes,' Geotechnique, Vol.5, No.1, pp. 37-47, 1955.
- 5) Bishop, A. W., 'The Use of the Slip Circle in stability Analysis of Earth Slopes,' Geotechnique, Vol.5, No.1, pp. 7-17, 1955.
- 6) Whitman, R. V. and Moore, P. J., 'Thoughts Concerning the Mechanics of Slope Stability Analysis,' Proc. 2nd Pan-Am. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Vol.1, pp. 391-411, 1963.

- 7) Morgenstern, N. R. and Price, V. E., 'The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces,' *Geotechnique*, Vol. 15, No.1, pp. 79-93, 1965.
- 8) Spencer, E., 'A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces,' *Geotechnique*, Vol.17, No.1, pp. 11-26, 1967.
- 9) Spencer, E., 'Thrust Line Criterion in Embankment Stability Analysis,' *Geotechnique*, Vol.23, No.1, pp. 85-100, 1973.
- 10) Janbu, N., 'Slope Stability Computations,' *Embankment Dam Engineering*, R. C. Hirshfeld and S. J. Poulos Eds. Wiley, New York, pp. 47-86, 1973.
- 11) Chen, Z. Y., and Morgenstern, N. R., 'Extensions to the Generalized Method of Slices for Stability Analysis,' *Canadian Geotech. J.*, Vol.20, No.1, pp. 103-119, 1983.
- 12) Hardin, B. O., and Hardin, K. O., 'A New Statically Consistent Formulation for Slope,' *IV International Symposium on Landslides*, Toronto, pp. 429-434, 1984.
- 13) 김수일, '내적평형을 만족시키는 사면 안정해석방법', *대한토질공학회지*, 제4권, 제4호, pp. 68-73, 1988.