

프로그램과 도표에 의한 사면안정해석의 비교연구
A comparative study on slope stability by program and stability chart

주 경 훈, KYOUNG-HUN JU
김 주 철, JOO-CHEOL KIM
이 중 규, CHONG-KYU LEE

단국대학교 토목공학과 석사과정, GRADUATE STUDENT, DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, DAN KOOK UNIVERSITY
단국대학교 토목공학과 연구조교, RESEARCH ASISTANCE, DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, DAN KOOK UNIVERSITY
단국대학교 토목공학과 정교수, PROFESSOR, DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, DAN KOOK UNIVERSITY

SYNOPSIS : Recently, computer technique for the analysis of slope stability enable to reduce a considerable time and efforts. And also, stability problems can be approached by using stability chart which was basically developed to handle the problems under simple conditions only.

Most of the conventional slope stability computer programs and stability chart are still based on the general limit equilibrium method.

16 types of sample slopes and 2 types of failure slopes were compared and analysed by stability charts and programs.

This research work intend to apply 4 types of conventional computer programs based on the same theoretical background and 7 types of stability charts for solving the same stability problems and the results are compared and analysed in order to justify their reliability.

1. 서 론

1.1 연구 목적

사면안정 문제는 오래전부터 많은 토질공학자들에 의하여 연구되어 왔으나, 근본적으로 사면내의 활동면을 가상하고 각 활동면에 대하여 가장 위험한 임계 활동면을 찾아내는 시행착오법을 사용하는 것이 일반적 해법이다.

근래에 와서 컴퓨터 기법에 의한 사면안정 해석으로 많은 시간과 노력이 절감되고 있으며, 또한 단순한 조건하에 개발되어 왔던 안정해석 도표도 비교적 복잡한 조건하에 상당한 정밀도를 반영하여 제안되고 있다. 이들 대부분 국내에서 통용되는 범용해석 프로그램과 안정해석 도표는 아직까지도 일반 한계평형이론에 근거하고 있어 근본 이론에는 차이가 없으나 프로그램에서는 인지하기 어려운 기법상의 문제로 또, 안전해석도표는 단순화된 가정과 균질사면을 대상으로하여 같은 사면조건에 대하여서도 동일한 결과가 얻어지는 것은 아니다.

본 연구는 위와같은 사실에 근거하여 동일한 조건을 가지는 사면에 대하여 동일한 이론에 근거한 4종의 범용프로그램과 7종의 안정해석 도표로 사면안정을 실시하여 그 결과를 비교, 검토하므로써 이들을 적용할때의 타당성과 문제점을 제시하고 실제 파괴가 발생한 사면에 대하여 파괴면과 임계활동면을 비교하여 프로그램 및 안정해석 도표의 적합성을 판별하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구 방법

해석사면은 가상사면과 실제 파괴사면을 대상으로 하였다. 가상사면은 균질토로 구성된 경우와 3개지층으로 구성된 경우의 2종의 사면에 대하여 사면경사각이 다를 경우를 가상하였고, 실제 파괴사면중 1개소는 2개의 지층으로, 다른 하나는 5개의 지층으로 구성된 복합사면을 대상으로 하였다.

해석조건은 위의 각 사면에 대하여 국내에서 통용되는 4종의 범용해석프로그램 및 7종의 안정해석도표에 의한 안정해석을 실시하여 그 결과를 비교, 검토하였다. 실제파괴사면에 대하여는

프로그램과 안정해석도표에 의한 해석을 실시하여 파괴사면에 대한 안전율을 검토하였다.

2. 해석 조건

2.1 프로그램 해석조건

- 1) 범용프로그램 : STABL5M, SLOPE, REAME, OASYS
- 2) 해석방법 : Bishop의 간편법

$$F = \frac{1}{\sum W_i \sin \alpha_i} \sum \left(\frac{c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'}{m_\alpha} \right) \quad (1)$$

$$m_\alpha = \cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{F} \right) \quad (2)$$

- 3) 사 면 : ① 가상사면 (균질한 토층, 3개토층)
② 실제 파괴사면 (2개토층, 5개토층)
- 4) 가상사면의 경사각 : 10° ~ 45° 까지 5° 씩 증가.

실제 파괴사면 경사각 :

- ① 2개토층으로 형성된 사면에서 경사각은 43°, 10°, 26° 및 6° 의 4개로 이루어진 사면.
- ② 5개토층으로 형성된 사면에서 경사각은 17° 와 41° 의 2개로 이루어진 사면.

Table 1. 가상사면 토질정수

	재료	기호	건조 단위중량 (t/m ³)	습윤 단위중량 (t/m ³)	점착력 (t/m ²)	내부 마찰각 (°)
균질한 사면	C-φ Soil	Soil 1	1.80	1.90	0.50	29.0
		Soil 2	1.94	1.98	0.76	30.0
다층토인 사면	C-φ Soil	Soil 1	2.04	2.08	1.02	35.0
		Soil 2	1.94	1.98	0.76	30.0
		Soil 3	1.84	1.88	0.51	25.0

5) 간극수압 고려.

6) 토질정수 : 프로그램에 적용한 각 토질정수는 가상사면과 실제 사면의 지반조사 결과치를 사용하였다. (Table 1, 2)

Table 2. 실제사면 토질정수

재료	기호	건조 단위중량 (t/m ³)	습윤 단위중량 (t/m ³)	점착력 (t/m ²)	내부 마찰각 (°)	
A 지역	C-φ Soil	Soil 1	1.75	1.85	0	26
		Soil 2	1.80	1.90	0	28
		Soil 3	1.75	1.75	1.88	0
		Soil 4	1.80	1.80	7.50	0
		Soil 5	1.90	1.90	3.00	23
B 지역	C-φ Soil	Soil 1	1.80	1.84	2.386	7.5
		Soil 2	2.00	2.04	3.00	30

2.2 안정도표 해석조건

- 1) 안정도표 : TAYLOR, BISHOP & MORGENSTERN, MORGENSTERN, HUNTER & SCHUSTER, COUSIN, HUANG, JANBU
- 2) 해석방법 : 2종(TAYLOR, COUSIN)의 도표는 마찰원법이고 2종(HUNTER et al., HUANG)은 원형활동면이며 기타 분할법(Bishop의 간편법)으로 해석.
- 3) 간극수압은 간극수압비(r_u)로 적용. (식 4)

$$r_u = \frac{\text{지하수위아래의 활동체적} \times \text{물의 단위중량}}{\text{활동체적} \times \text{흙의 단위중량}} \quad (3)$$

본 해석은 근사적으로 $\gamma/\gamma_{sat} \approx 1/2$ 로 하여 계산하였고 r_u는 다음과 같다.

$$r_u = \frac{\text{면적}abcd}{2 \times \text{면적}abcdea} \quad (4)$$

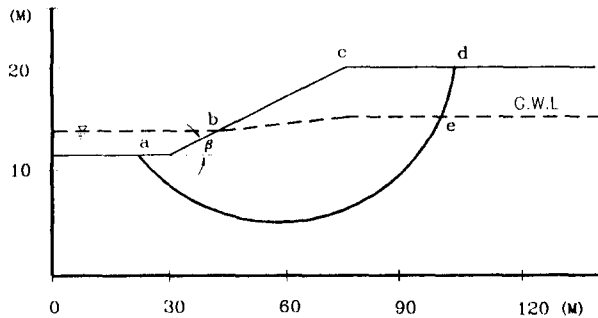


Fig 1. 간극압비 산정

4) 다층사면의 안정해석도표 적용시 토질정수

- ① 층별깊이를 고려한 평균값.
- ② 활동면내 면적비를 고려한 평균값.

5) 안정해석도표 해석방법 요약 : Table 3

6) 기타조건 : 프로그램 해석과 동일함.

Table 3. 안정해석도표 해석방법 요약

Author	Parameters	Slope angle β	Methods
Taylor (1948)	C φ	0-90°	Friction Circle
Janbu (1954)	C φ r _u	11-90°	Bishop Simplified
Bishop & Morgenstern (1960)	C φ r _u	11-26.5°	Bishop Simplified
Morgenstern (1963)	C φ	11-26.5°	Bishop Simplified
Hunter & Schuster (1968)	C _u	0-90°	Circular Sliding arc.
Cousin (1978)	C φ r _u	0-45°	Friction Circle
Huang (1975, 1983)	C φ r _u	0-45°	Circular sliding arc.

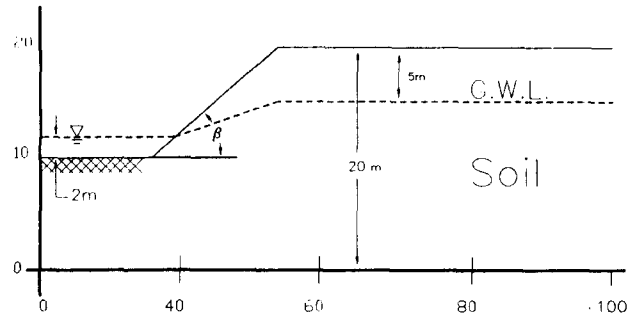


Fig 2. 균질한 사면 해석모델

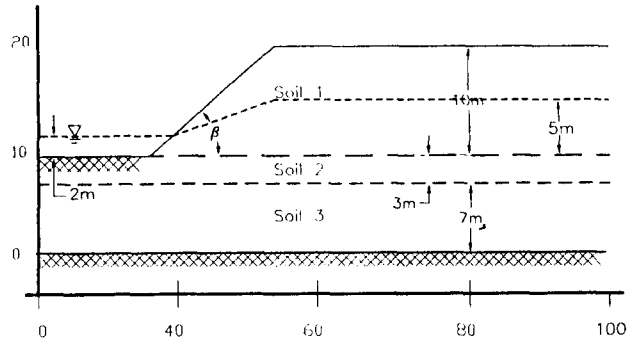


Fig 3. 다층토 사면 해석모델

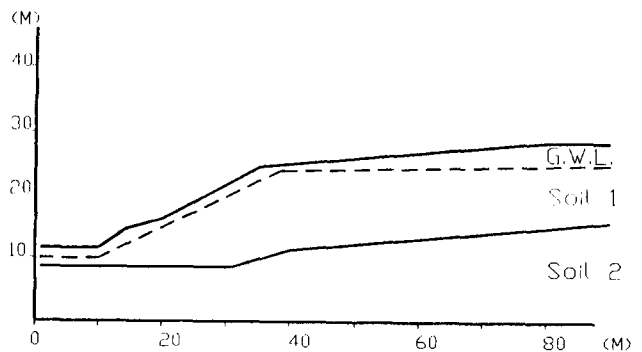


Fig 4. 2개지층으로 구성된 실제 파괴사면 해석모델

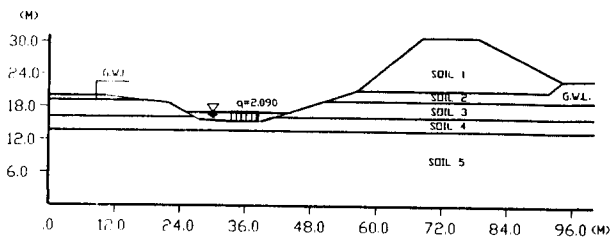


Fig 5. 5개지층으로 구성된 실제 파괴사면 해석모델

3. 해석결과 및 검토

3.1 각 프로그램 해석결과와 평균안전율과의 비교

3.1.1 균질한 지반으로 구성된 사면

균질한 지반으로 구성된 가상사면에 대하여 프로그램을 해석한 결과 평균안전율에 대한 프로그램별 분산정도는 10%~-10%로 약 10%정도 였는데 REAME만을 고려하면 4.8%크고, STABL5M은 -5.1%로서 분산정도가 작았다. 평균적 분산정도는 4.7%~-4.17%로 약 ±8.8%정도였다.

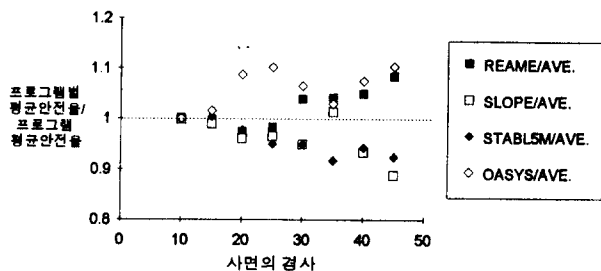


Fig 6. 균질한 사면의 프로그램 해석결과와 평균안전율과의 비교

3.1.2 다층지반으로 구성된 사면

다층토로 구성된 가상사면에 각 프로그램으로 안정해석한 결과, 각 프로그램의 안전율을 평균안전율과 비교할때 분산정도는 약 -2.38%~0.9%로 평균 ±1.6%였고 사용한 4종의 프로그램중 REAM은 1.65%크고, STABL5M은 -0.43%로서 분산정도가 가장 작았다. 평균적 분산정도는 1.26%~-1.05%로 약 ±1.65%정도로 나타났다.

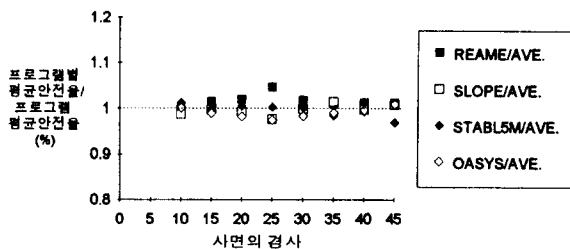


Fig 7. 다층 사면의 프로그램 해석결과와 평균안전율과의 비교

위의 결과를 종합할때 국내에서 통용되는 4종의 범용프로그램으로 가상균질 및 다층토 사면에 대하여 경사각을 변화시켜 안전율을 구한결과 그 분산정도는 ±3%정도로 나타났다.

3.1.3 실제 파괴사면

5개지층으로 구성된 실제 파괴사면에 각 프로그램으로 안정해석 결과 안전율은 0.789~0.902사이로 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 평균안전율에 대한 분산정도는 STABL5M과 OASYS의 경우 각각 5.25%, 3.85%크게 나타났고 REAME와 SLOPE의 분산정도는 -7.9%, -1.05%작게 나타났다. 평균적 분산정도는 4.52%~-18%로 약 ±11.3%차이를 나타냈다.

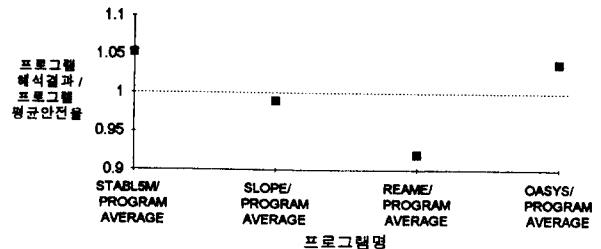


Fig 8. 5개지층으로 구성된 실제 파괴사면의 프로그램 해석결과와 평균안전율과의 비교

2개지층으로 구성된 실제 파괴사면에 대하여 각 프로그램으로 안정해석결과 안전율이 0.941~0.996사이로 나타났고 평균 안전율에 대한 분산정도는 STABL5M과 SLOPE의 경우 0.21%~0.7%로서 매우 작았으며 OASYS는 3%정도, REAME은 -3.39%정도 작은값을 나타냈다. 평균적 분산정도는 3.34%~-1.11%로 약 ±2.2%차이를 나타냈다.

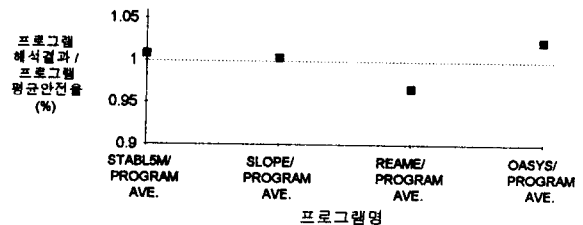


Fig 9. 2개지층으로 구성된 실제 파괴사면의 프로그램 해석결과와 평균안전율과의 비교

위의 결과를 종합할때 범용프로그램의 평균 분산정도는 약 5.19% 정도로 나타났다.

3.2 각 안정해석 도표에 의한 안전율과 평균 안전율과의 비교

3.2.1 균질한 지반으로 구성된 사면

7종의 해석도표에 의한 평균안전율과 각각의 해석도표로 구한 안전율을 비교하면 분산정도가 B&M, COUSIN, 및 HUANG의 안정해석 도표는 평균적으로 -11.38%, -8.5%, 6%로 나타났으며 이 결과는 사면의 경사각에 관계없이 같은 결과를 나타냈다. TAYLOR와 MORGENSTERN의 도표로 구한 안전율은 평균값과 각각 64%와 -32.7%로 큰 차이를 나타냈는데 TAYLOR의 도표는 마찰원법에 근거하였고 간극수압도 고려하지 않았으며 MORGENSTERN도표의 경우에는 수위 급강하를 전제조건으로 작성되었기 때문에 판단된다. 다만 TAYLOR도표의 경우는 그 차이가 커서 안전율의 평균값에서 제외하였다. TAYLOR도표를 제외한 평균적 분산정도는 9.78%~-14.55%로 약 ±12.16%로 나타났다.

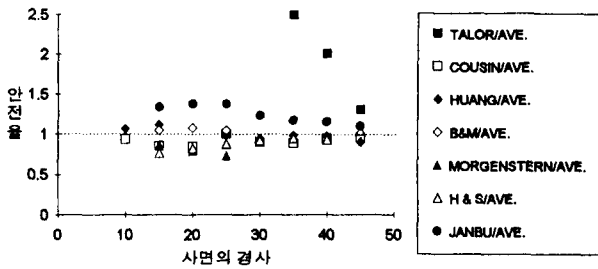


Fig 10. 균질한 사면에서 안정해석 도표에 의한 안전율과 평균안전율과의 비교

3.2.2 다층토로 구성된 사면

다층토 사면을 도표에 적용하는 경우 평균 토성치로 단일화하여 해석하였다. 그 결과 층별깊이를 고려한 토성치로 구한 안전율은 도표해석 평균값과 비교하면 분산정도가 COUSIN의 안정해석 도표는 평균적으로 -5.59%~7.24%로 나타났고 기타 도표들은 -27.65%~39.64%로 불규칙한 큰 차이를 보였으며 이 결과는 사면 경사각에 관계없이 같은 결과를 나타냈다.

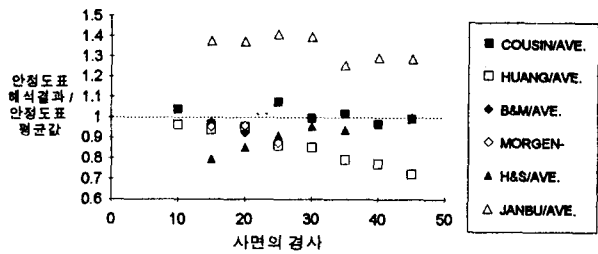


Fig 11. 안정해석 도표 안전율과 안정해석도표 평균안전율과의 비교 (깊이비)

한편, 다층토에 대하여는 도표해석에 적용하기 위하여 적용한 토질정수를 임계활동면내의 면적비를 고려하여 해석한 결과 도표해석 평균값과 -15%~14%차이를 나타냈다. JANBU 도표의 경우 도표해석 평균값보다 약 10%~20%가량 크게 나타나 가장 큰 분산정도를 보여준다. 그의 안정도표들은 도표해석 평균값과 차이가 약 5%로 나타났고 면적비를 고려한 안전율이 층별깊이를 고려한 안전율보다 작게 나타났다. 분산정도는 깊이비를 고려한 경우 -9.95%~11.24%, 면적비를 고려한 경우 -16.92%~24.45%로서 평균분산정도는 각각 $\pm 20.69\%$ 및 $\pm 10.6\%$ 로 크게 나타났다.

위의 결과를 종합하면 7종의 안정해석 도표로 균질 및 다층토 가상사면에 대하여 사면 경사각을 변화시켜 안전율을 구한 결과

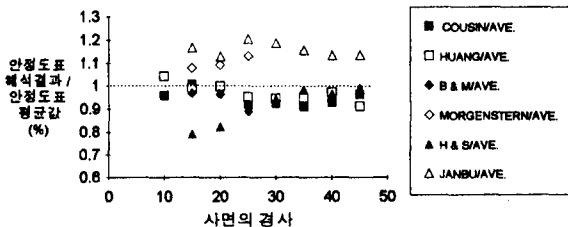


Fig 12. 안정해석 도표안전율과 안정해석도표 평균안전율과 비교 (면적비)

평균 분산정도는 토질정수 환산시 깊이비를 고려하면 $\pm 16.42\%$, 면적비를 고려하면 $\pm 11.38\%$ 로서 큰 차이를 나타냈는데 면적비를 고려한 경우 분산정도가 작은것으로 나타났다.

3.2.3 실제 파괴사면

실제 파괴사면의 경우 도표를 사용하여 2개지층으로 구성된 실제파괴사면을 면적비를 고려하여 해석한 결과, 도표해석 평균값과 -5.5%~11.25%로 평균 분산은 약 $\pm 8.38\%$ 로 나타났고 또한 층별깊이를 고려하여 해석한 결과, 도표해석 평균값과 -33.1%~33.46%로 평균분산은 $\pm 33.3\%$ 로 크게 나타났다. 그리고 5개지층으로 구성된 실제파괴사면을 면적비를 고려하여 해석한 결과, 도표해석 평균값과 -4.73%~9.5%로 평균 분산은 약 $\pm 7.12\%$ 로 나타났고 또한 층별 깊이를 고려하여 해석한 결과, 도표해석 평균값과 -12.07%~24.3%로 평균 분산은 약 $\pm 18.19\%$ 로 나타났다.

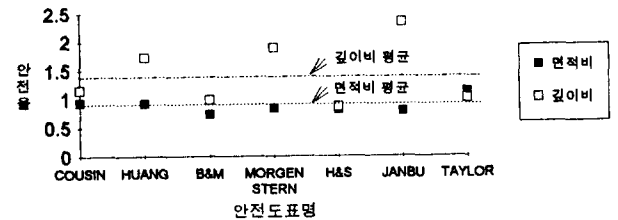


Fig 13. 2개지층으로 구성된 실제사면의 안전율

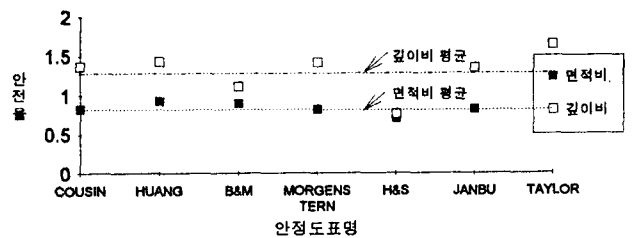


Fig 14. 5개지층으로 구성된 실제사면의 안전율

위의 경우를 종합할때 실제파괴 다층사면에 대하여 7종의 안정해석도표로 안전율을 구한 결과 토질정수 적용시 깊이비를 고려하면 안전율이 평균 1.36으로 파괴가 발생되지 않는것으로 나타나 신뢰성이 없었으나 면적비를 고려한 경우 평균 안전율이 0.85로서 실제 파괴발생과 일치되었다. 또, 평균 분산정도는 깊이비와 면적비를 고려한 경우 각각 $\pm 25.75\%$, $\pm 7.75\%$ 로 나타났다.

한편, 다층토로된 가상 및 실제파괴사면에 대한 평균 분산정도는 깊이비를 고려한 경우 $\pm 21.08\%$, 면적비를 고려한 경우 $\pm 9.56\%$ 로서 면적비를 고려한 경우 신뢰성이 높았으나 임계활동면을 추정하여야만 면적비 산출이 가능하다는 난점이 있다. 또한 다층토로 구성된 사면의 안정해석을 하는 경우 각각 해석방법이 달라 평균치의 편차가 크므로 이를 사용하는 경우 토질조건, 지하수위등이 적용사면과 일치되는지 여부를 면밀히 검토하는것이 바람직하다.

3.3 프로그램과 안정해석 도표로 구한 안전율의 비교, 검토

3.3.1 균질한 지반으로 구성된 사면

균질한 사면으로 구성된 사면에서 4종의 프로그램과 7종의 안정해석 도표로 구한 안전율을 비교해보면, 프로그램으로 구한 평균 안전율에 대하여 안정해석 도표로 구한 평균안전율의 차이는 8%~15%로 평균 12.5%로 크게 나타났으나 계산된 안전율 값의 차이는 0.1~0.42로서 평균 0.26이므로 매우 근소하였다.

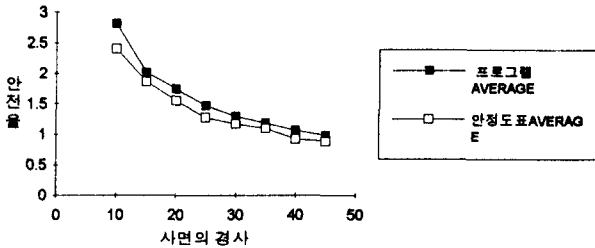


Fig 15. 균질한 사면에서 프로그램 평균안전율과 안정도표 평균안전율의 비교

3.3.2 다층토로 구성된 사면

다층토로 구성된 사면에서 4종의 프로그램과 7종의 안정해석 도표로 구한 안전율을 비교해보면, 프로그램으로 구한 평균안전율과 도표로 구한 평균안전율을 비교한 결과, 안정해석 도표로 구한 경우 깊이비를 고려한 안전율 평균값은 프로그램 평균안전율보다 4.9%~34.8%로 약 20.49% 작게 나타났다. 또, 깊이비를 고려한 안전율 평균값은 면적비를 고려한 안전율 평균값과 약 3.57% 차이를 보였는데 계산된 안전율 값의 차이는 층별 깊이비를 고려한 경우 0.12~0.35로서 평균 0.235의 차이를 나타냈고 면적비를 고려한 경우 0.098~0.410로서 평균 0.254차이를 나타냈다.

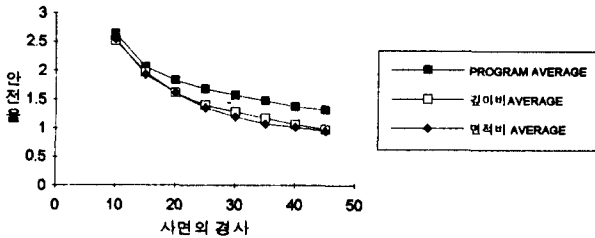


Fig 16. 다층토로 구성된 사면에서 프로그램 평균안전율과 안정도표 평균안전율의 비교

3.3.3 실제 파괴사면

국내에서 발생한 실제파괴사면에 대하여 프로그램의 평균값과 안정해석 도표에 의한 평균안전율을 비교하면 5개지층으로 구성된 사면의 경우, 깊이비를 고려한 경우에는 프로그램으로 구한 안전율과 -10.76%~91.31%로 평균 ±51.47%의 차이를 나타내었으나 면적비를 고려한 경우에는 프로그램으로 구한 안전율과 그 차이가 -3.5%~8%로 평균 ±5.75%의 차이를 나타내었다. 그러나 계산된 안전율 값의 차이는 면적비를 고려한 경우 0.15 정도로서 매우 근소하였다. 2개지층으로 구성된 사면에서도 유사한 결과를 얻었다.

이 결과 역시 다층토사면에 대하여 해석 도표로 안전율을 구하는 경우 단일층과 할때의 토질정수는 임계활동면 내의 면적비로 환산하는 것이 타당하나 임계활동면을 먼저 추정할 수 없는 것이 단점으로 지적된다.

위의 결과를 종합할때 도표로 안정해석한 결과와 프로그램으로 해석한 결과의 안전율 차이는 근소하여 프로그램 해석전후의 예측과 검토에 적용가능하나 안정해석 도표는 그 종류에 따라 토층구성, 지하수위등이 유사한 경우에 적용하여야 하며 다층사면인 경우에는 토질정수 환산에 면적비를 고려하여야 할것으로 사려된다.

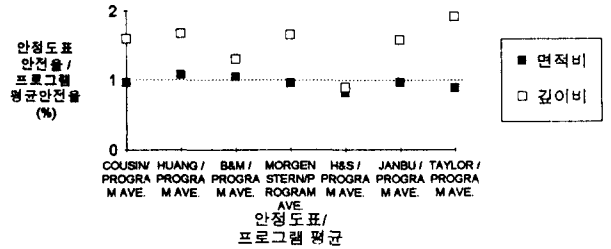


Fig 17. 5개지층으로 구성된 사면에서 프로그램 평균안전율과 안정도표 평균안전율의 비교

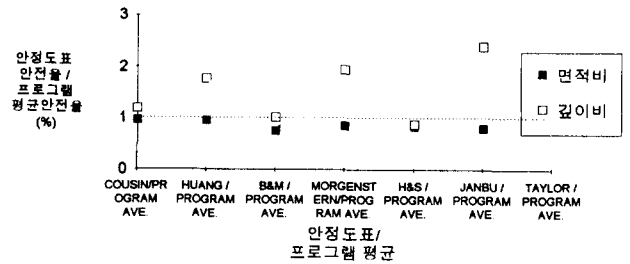


Fig 18. 2개지층으로 구성된 사면에서 프로그램 평균안전율과 안정도표 평균안전율의 비교

4. 결 론

- 1) 국내에서 통용되는 4종의 범용프로그램으로 가상 균질 및 다층토 사면에 대하여 경사각을 변화시켜 안전율을 구한 결과 그 평균 분산정도는 ±3%로서 실용성이 있다고 판단된다.
- 2) 다층토로 구성된 실제파괴 사면에 대하여 4종의 범용프로그램으로 안정해석한 결과 평균 안전율이 1 이하로서 파괴되는 것으로 나타나 신뢰성이 있는 것으로 사려되며 평균 분산정도는 ±2.2%로 실용성이 인정되었다.
- 3) 안정해석 도표로 사면을 해석하는 경우 같은 사면에 대하여도 지반조건, 토층구성, 지하수위등에 따라 큰 편차를 나타내므로 조건이 유사한 도표에만 적용하여야 한다.
- 4) 다층토 사면에 대하여 안정해석 도표로 안전율을 구하는 경우 단일층으로의 토질정수 환산은 임계활동면을 가상하여 그 면적비로 구하는 경우 통상적 깊이비를 고려하는 경우 보다 신뢰성이 크다.
- 5) 프로그램과 안정해석 도표로 구한 안전율의 차이는 평균 12.4%로 다소 크게 나타났으나 안전율의 값으로는 평균 0.22 정도 이므로 사면조건을 고려하여 적용하면 예측 및 검토시에 실용성이 있는것으로 사려된다.

< 참고 문헌 >

- David, F., Mccarthy(1988), "Essential of Soil mechanics and Foundations". Prentice-Hall, Inc. pp434-489
- E., N., Bromhead(1992), "The Stability of Slope", 2nd. Blackie academic and Professional pp142-170
- Hsai-Yang, Fang(1991), "Foundation Engineering Handbook", 2nd. Van Nostrand Reinhold. pp379-394
- M., G., Anderson and K., S., Richards(1987), "Slope Stability", John Wiley and Sons. pp29-56
- Young, H. Huang(1983), "Stability analysis of earth slopes", Van Nostrand Reinhold. pp145-167