

## 모형실험에 의한 사면 안전율의 적정성 연구

### A Fair Investigation on Safety Factor of Slope by Model Tests

김용식<sup>1)</sup>, Yong-Sik Kim, 박춘식<sup>2)</sup>, Choon-Sik Park,

<sup>1)</sup> 케이에스씨엔지니어링(주) 대표이사, The chief director of KSC Engineering Co.,Ltd

<sup>2)</sup> 창원대학교 토목공학과 교수, Prof., Dept. of Civil Eng. Changwon National Univ.

**SYNOPSIS** : The purpose of this study is to understand behaviors of slopes and determine soil parameters of slopes through the triaxial compression test and the direct shear test. Following results were obtained by comparing and analyzing model tests and analysis programs of slope stability.

The safety factors of the Bishop's simple method, the Morgenstern - Price method, the Spencer method and the GLE method were similar to each other but safety factors of the Fellenius method and the Janbu method were different from the formers.

It was found that the Bishop's simple method, the Morgenstern - Price method, the Spencer method and the GLE method could be used for design but attention should be paid to the Fellenius method and the Janbu method since they underestimated safety factor.

**Key Words** : Bishop's simple method, Morgenstern - Price method, Spencer method, GLE method, Fellenius method, Janbu method

## 1. 서론

사면안정은 각종 토목공사에 있어서 항상 경험할 수 있는 매우 중요한 문제이다. 이러한 사면안정해석에 있어서 실제적으로 파괴형상이 비원호 파괴일 수도 있다는 것이 현장조사와 모형실험에 의하여 밝혀짐에도 불구하고 대부분의 경우에 계산상의 편의를 위하여 원호파괴 형태로 가정하여 구한 최소 안전율을 설계와 안정검토에 적용하고 있다. 그리고 안정검토에 사용되는 토질정수는 일반적인 흙의 토질정수 값을 이용하거나 현장 시료를 채취하여 실내에서 직접 전단시험을 통한 토질정수 값을 이용하고 있으나 이 토질정수 값은 공간적인 변화, 시간에 따른 변화, 불확실한 시료의 수 그리고 실험실과 현장조건 사이의 차이에 따라 변하기 때문에 문제가 발생한다.

따라서, 본 연구는 이러한 사면안정에 대한 문제점을 보다 더 적극적으로 접근하기 위해 점토와 모래로 배합·구성된 6가지 모델로 모형실험에 의해 파괴형상을 확인하고, 모형실험에 사용한 시료를 채취해 삼축압축시험과 직접전단시험을 실시하여 얻어진 점착력(c)과 내부마찰각( $\phi$ )을 이용하여 사면안정해석을 수행하였고, 모형실험에서 실제 파괴면의 사면안전율과 해석에 의한 안전율을 비교 검토함으로써 향후 설계 및 안전진단에 지침을 마련함은 물론 그 해석결과를 각 연구자들이 제시한 사면안정해석방법 중 어떤 해석방법이 실제의 모형실험 결과와 비교적 정확한 안전율을 제시하는가를 확인하고자 한다.

## 2. 모형실험

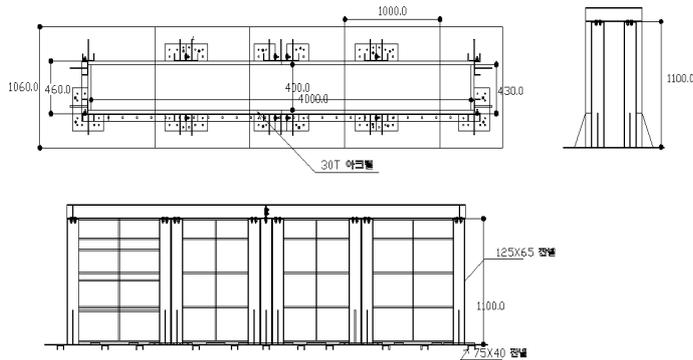
### 2.1 모형실험 장치

본 실험에서는 평면변형률 지반을 모델링하기 위해 실험용 토조, 재하 장치, 지반 계량 장치(저울, 수조, 믹서통 등), 변위 측정 장치, 재하판, Slope 성형 장치와 같은 실험기구를 이용하였다.

#### (1) 실험용 토조

본 실험에서 사용된 평면 변형률 토조는 지반의 거동을 관찰할 수 있게 전면부는 아크릴로 뒷면은 철판으로 제작되었고 상단부의 변위를 방지하기 위해 강봉의 측방변형 억제봉으로 다시 고정 시켰다.

크기는 1100(H)×4000(L)×400(W) ( $V=1,760m^3$ )이고 그림 1과 같다.



(a) 실험용 토조 자원

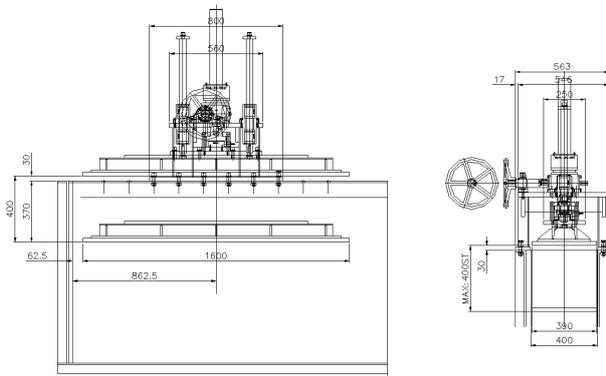


(b) 모형실험 장치

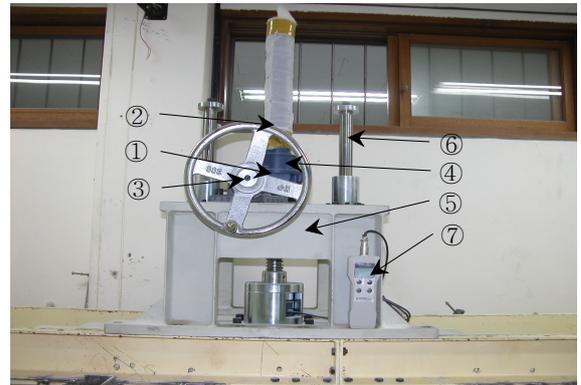
그림 1. 실내모형실험 장치

#### (2) 재하 장치

본 실험에서 하중 재하를 위해 그림 2와 같은 재하 장치를 제작하여 실험을 실시하였다. 하중 재하 장치는 크게 6개의 부분으로 나눌 수 있으며 각각의 명칭은 다음과 같다. 동력을 발생시키는 동력 발생 핸들, 발생된 동력의 회전속도를 줄여주는 감속기, 동력을 전달하는 볼-스크루, 회전운동을 직선운동으로 바꾸어주는 엘엠 가이드, 지반에 하중을 가하고 로드셀이 부착되어 있어 하중을 측정할 수 있게 제작된 재하판, 재하판을 고정하는 프레임 그리고, 하중을 측정할 수 있는 측정패널로 나누어진다.



(a) 재하장치 자원



①동력 발생 핸들 ②감속기 ③볼 스크루 ④엘엠 가이드  
⑤프레임 ⑥가이드 ⑦하중측정 패널

(b) 재하장치 부속 명칭

그림 2. 재하 장치

## 2.2 모형 지반의 구성

모형지반은 각 Case별 최대건조밀도를 알기 위해서 모래 100% : 카오린 0%인 경우를 제외하고 다짐 시험을 실시하여 그 최대건조밀도는 표 1에 나타내었고, 모래 100%인 경우의 최대 및 최소 건조밀도는 일본의 실험기준(JIS)에 의해 실험을 실시하였다.

표 1. 배합비별 최대건조밀도

배 합 비	최대 건조 밀도(kN/m <sup>3</sup> )	최적 함수비(%)
모래 100% : 카오린 0%	15.76	-
모래 80% : 카오린 20%	17.50	11.77
모래 60% : 카오린 40%	18.26	12.53
모래 40% : 카오린 60%	17.83	14.44
모래 20% : 카오린 40%	16.65	16.78
모래 0% : 카오린 100%	16.25	22.42

각 배합비 별 경사는 1 : 0.8, 1 : 1, 1 : 1.2, 1 : 1.5로 나누어 실험 하였고, 최대건조밀도에서 90%~95%사이에 들도록 건조밀도를 조정하였다. 모형지반 제작시 사용된 건조밀도·함수비·다짐도는 표 2와 같다.

표 2. 모형지반의 물성치

배 합 비	경 사	건조 밀도 (kN/m <sup>3</sup> )	함수비 (%)	다짐도 (%)
모래 100% : 카오린 0%	1.0 : 1.5	14.70	0	92.97
모래 80% : 카오린 20%	1.0 : 1.2	16.47	12.83	94.12
모래 60% : 카오린 40%	1.0 : 1.2	17.22	13.35	94.31
모래 40% : 카오린 60%	1.0 : 1.1	16.82	15.27	94.34
모래 20% : 카오린 80%	1.0 : 1.1	15.67	17.83	94.11
모래 0% : 카오린 100%	1.0 : 0.8	14.62	21.92	89.99

## 2.3 실내모형실험 방법 및 순서

### (1) 모형지반 제작

모형지반을 제작하는 데에 있어서의 가장 중요한 것 중에 하나가 지반을 균일하게 하는 것이다. 따라서, 본 실험에서는 100mm 층다짐을 원칙으로 각 층마다 체적을 계량하여 다짐을 실시하였으며, 혼합된 지반 재료를 토조에 투입하여 최대한 평평하게 정지작업을 시행한 이후에 다짐도 90%~95%가 되게 다짐봉(6.8kg)을 이용하여 다짐을 실시하였다.

### (2) 단조재하실험

모형지반을 제작한 후 크기가 같은 하나의 재하판 쪽으로 9.8kN 단위로 재하 실험을 실시하여 모형지반의 변위와 거동 상태를 확인하였다.

하중재하는 9.8kN부터 시작하여 평판재하시험에서와 같이 분당 1/100mm가 될 때 까지 9.8kN씩 점차적으로 상승시킨다. 매 단계별로 분당 1/100mm가 될 때 까지 시간과 변위량을 기록하며 최종 파괴면이 관찰 될 때 까지 재하하중을 증가시켰다.

## 2.4 실내모형실험 결과

모래 100% : 카오린 0%인 경우에는 모래의 흘러내림 현상으로 인해 균열이 육안으로 관측되지 않았고, 나머지 Case의 경우에는 그림 3과 같이 지반 사면의 파괴면을 육안으로 확인하였다.



그림 3. 재하후 사면 파괴

모래와 카오린의 배합비에 따른 각 Case별 재하하중과 응력은 표 3과 같다.

표 3. 배합비 별 모형실험에 대한 최대 재하하중과 응력

배합비	재하하중(kN)	응력(kPa)
모래 100% : 카오린 0%	100.20	250.50
모래 80% : 카오린 20%	90.73	238.76
모래 60% : 카오린 40%	85.98	226.27
모래 40% : 카오린 60%	58.62	162.82
모래 20% : 카오린 80%	58.62	162.82
모래 0% : 카오린 100%	46.38	98.68

### 3. 실험방법에 따른 전단정수의 비교

삼축압축시험결과와 직접 전단시험의 점착력과 내부마찰각을 비교 해보면 대체적으로 점착력은 직접 전단시험이 크고 카오린의 비율이 높을 수록 그 차이는 더욱 커지며, 내부마찰각은 직접 전단시험과 삼축압축시험이 비슷한 값으로 나타나지만 모래 100% : 카오린 0%와 모래 60% : 카오린 40%는 내부마찰각이 직접 전단시험값이 더 작게 나왔다. 이는 모래의 함유량이 많으면 직접 전단시험의 내부마찰각이 삼축압축시험에 비해 과소 평가 된다는 것을 알 수 있다.

배합비별 삼축압축시험과 직접 전단시험의 점착력 및 내부마찰각과 차이는 그림 4와 그림 5와 같다.

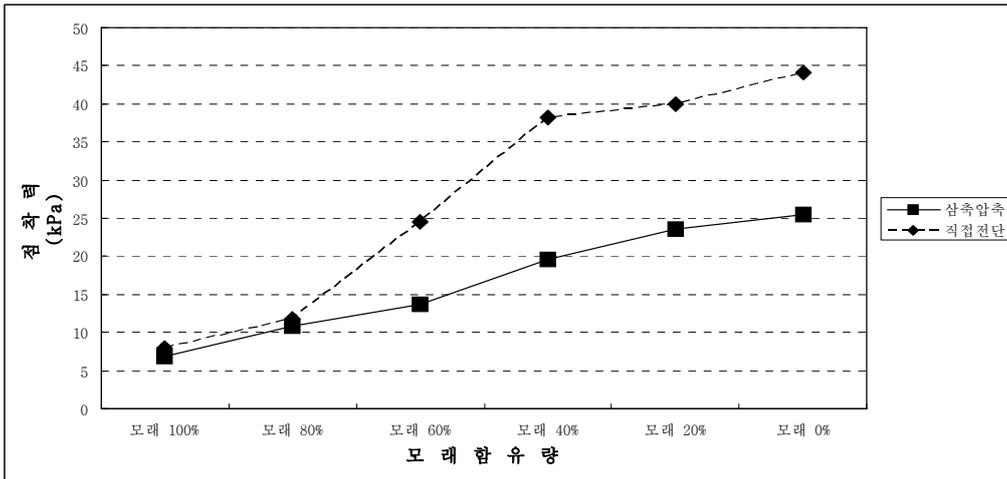


그림 4. 삼축압축시험과 직접 전단시험의 점착력

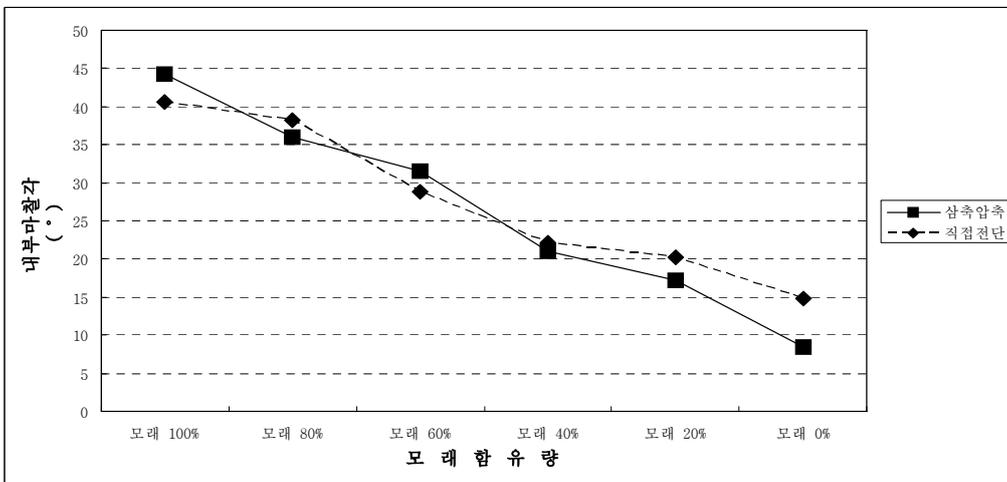


그림 5. 삼축압축시험과 직접 전단시험의 내부마찰각

### 4. 모형실험 해석 결과

사면안정 해석에 필요한 점착력(c)과 내부마찰각( $\phi$ )은 모형실험에 사용된 재료를 채취하여 직접 전단 시험과 삼축시험의 결과를 사용하였으며, 사용된 지반물성치는 표 4에 요약하였다.

모형사면의 사면안정해석은 Bishop의 간편법, Fellenius법, Janbu법, Morgenstern-Price법, Spencer법, GLE법으로 해석하였고, 대표적인 해석 결과는 그림 6과 같다.

표 4. 사면안정해석에 사용된 지반 물성치

배 합 비	삼축시험 (CD시험)		직접전단시험		파괴시 재하 응력 (kPa)	습윤단위 중량 (kN/m <sup>3</sup> )
	점착력(c) (kPa)	내부마찰각 ( $\phi$ ) ( $^{\circ}$ )	점착력(c) (kPa)	내부마찰각 ( $\phi$ ) ( $^{\circ}$ )		
모래 100% : 카오린 0%	6.86	44.22	8.04	40.56	245.59	14.70
모래 80% : 카오린 20%	10.78	36.00	11.76	38.20	243.63	18.59
모래 60% : 카오린 40%	13.72	31.50	24.50	28.90	230.89	19.51
모래 40% : 카오린 60%	19.60	20.96	38.22	22.19	161.21	19.38
모래 20% : 카오린 80%	23.52	17.14	39.89	20.30	148.67	18.46
모래 0% : 카오린 100%	25.48	8.38	44.10	14.76	99.18	17.83

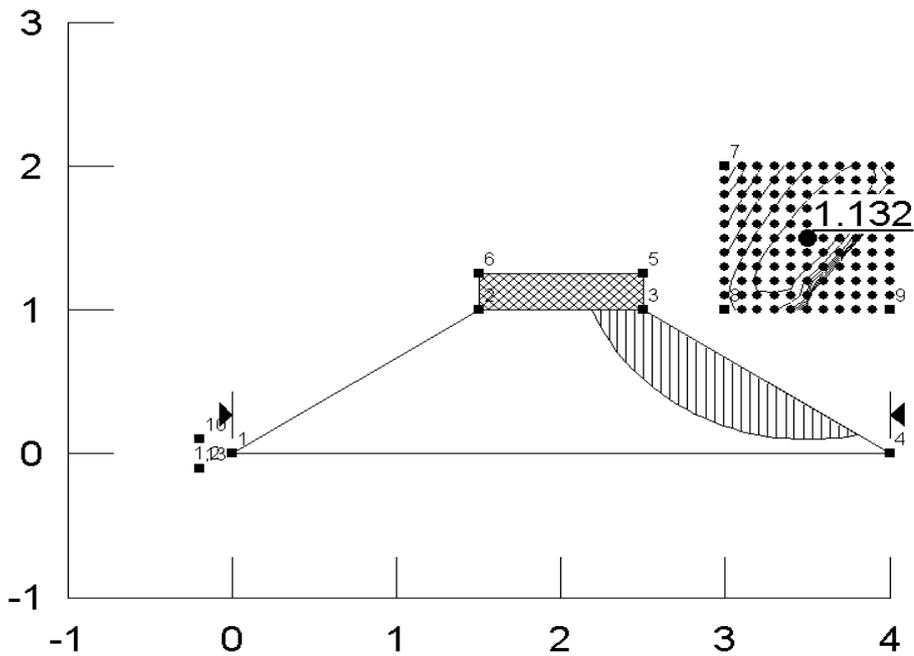


그림 6. 모래 100%일 때 Bishop의 간편법에 의한 최소안전율

#### 4.1 이론적인 안전율(최소 안전율) 비교

사면안정해석 프로그램으로 해석한 결과 일반적으로 삼축압축시험값에 의한 최소안전율( $F_s$ )이 직접 전단시험값에 의한 최소안전율( $F_s$ ) 보다 대부분 낮게 해석 되었지만 모래 100% : 카오린 0%인 경우에는 표 4에서와 같이 삼축압축시험값에 의한 점착력은 직접 전단시험값보다 1.18kPa이 작은 미미한 차이를 나타낸 반면, 내부마찰각은 오히려 3.62°가 크게 나타나므로 삼축압축시험값에 의한 최소안전율( $F_s$ )이 직접 전단시험값에 의한 최소안전율( $F_s$ ) 보다 높게 해석 되며, 나머지 5가지 경우는 삼축압축시험값에 의한 점착력과 내부마찰각이 직접 전단시험값보다 대체로 작게 나타나므로 삼축압축시험값에 의한 최소안전율( $F_s$ )이 직접

전단실험값에 의한 최소안전율(Fs) 보다 작게 해석 되는 것으로 판단된다.

모래 100%인 경우 모형 실험시 파괴면이 육안으로 관찰되지 않아 파괴시 응력을 정확히 산출하기가 어려워 어떠한 해석 방법도 실제 파괴 거동선과 오차가 크게 해석되어 실제 적용시 주의하여야 할 것으로 판단된다.

모래 80%~모래 40%인 경우 Bishop의 간편법과 Morgenstern-Price, Spencer, GLE법에 의한 최소안전율(Fs)이 실제 파괴 거동선보다 약간 작으나 높게 해석 되었으며, Fellenius와 Janbu법에 의한 최소안전율(Fs)은 실제 파괴 거동선보다 많은 차이를 보이며 낮게 해석되었다.

모래 20%~모래 0%인 경우 Bishop의 간편법과 Morgenstern-Price, Spencer, GLE법에 의한 최소안전율(Fs)이 실제 파괴 거동선보다 약간 높게 해석 되었으며, Fellenius와 Janbu법에 의한 최소안전율(Fs)은 다른 경우와 마찬가지로 실제 파괴 거동선보다 많은 차이를 보이며 낮게 해석되었다.

삼축압축실험값에 의한 해석 방법중 Bishop의 간편법과 Morgenstern-Price, Spencer, GLE법에 의한 최소안전율(Fs)이 높게 해석 되었고, Fellenius와 Janbu법에 의한 최소안전율(Fs)은 낮게 해석되는 경향을 나타내었다. 또한 모든 배합비에서 과소평가를 보이는 Fellenius와 Janbu법에 의한 최소안전율(Fs)은 점토의 함유량이 커질수록 Fellenius에 의한 최소안전율이 실제 파괴 거동선에 가까이 해석되는 경향을 나타내었으며, 안전율 비교는 그림 7~그림 12와 같다.

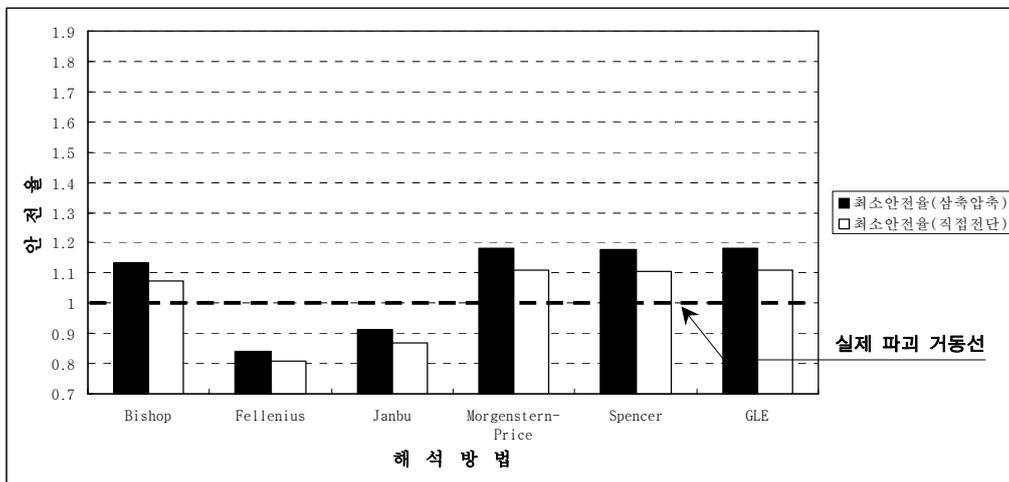


그림 7. 모래 100%일 때 사면안정해석의 안전율 비교

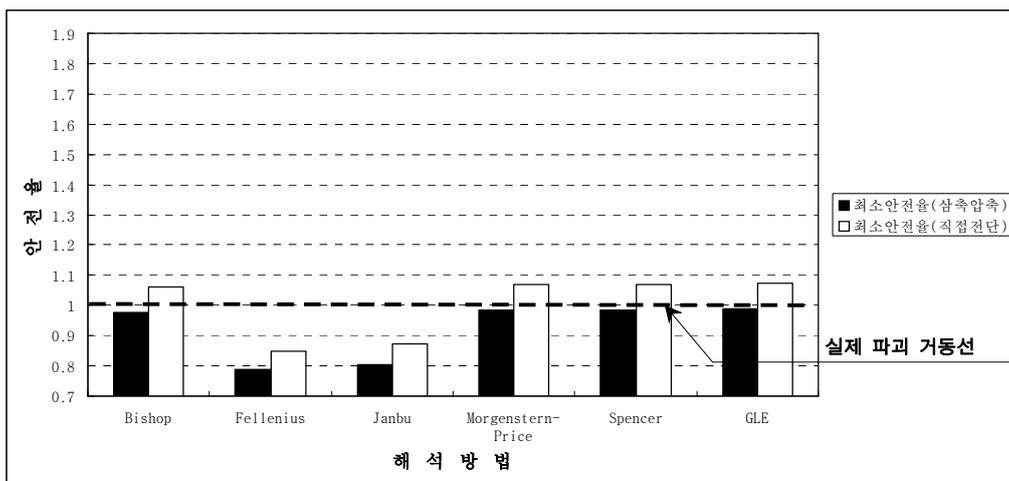


그림 8. 모래 80%일 때 사면안정해석의 안전율 비교

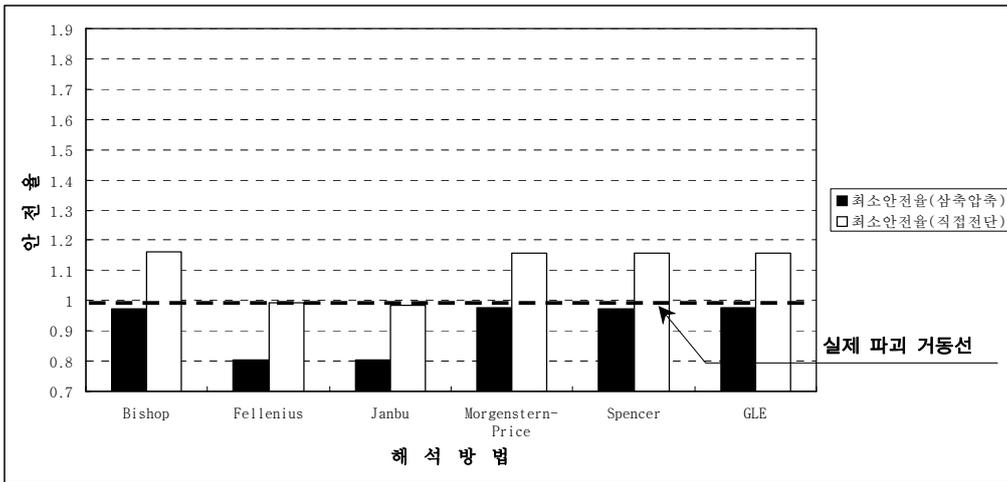


그림 9. 모래 60%일 때 사면안정해석의 안전율을 비교

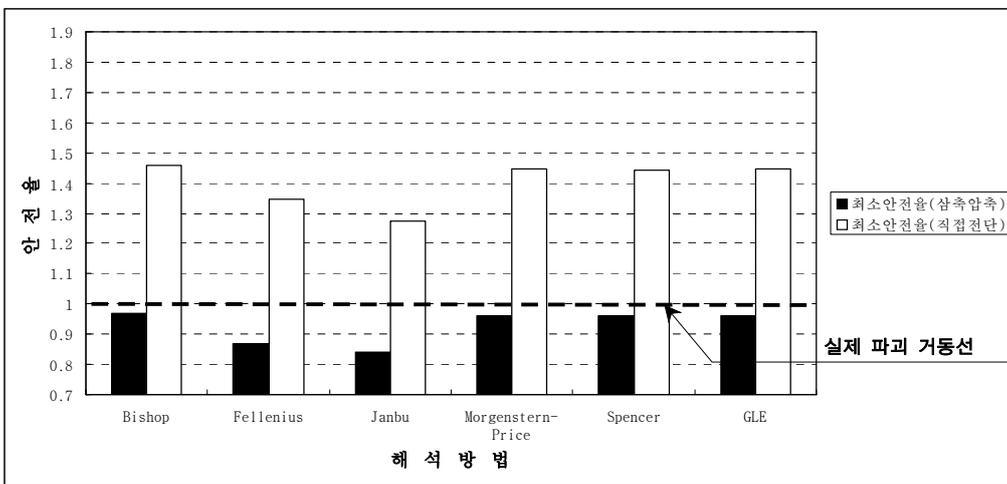


그림 10. 모래 40%일 때 사면안정해석의 안전율을 비교

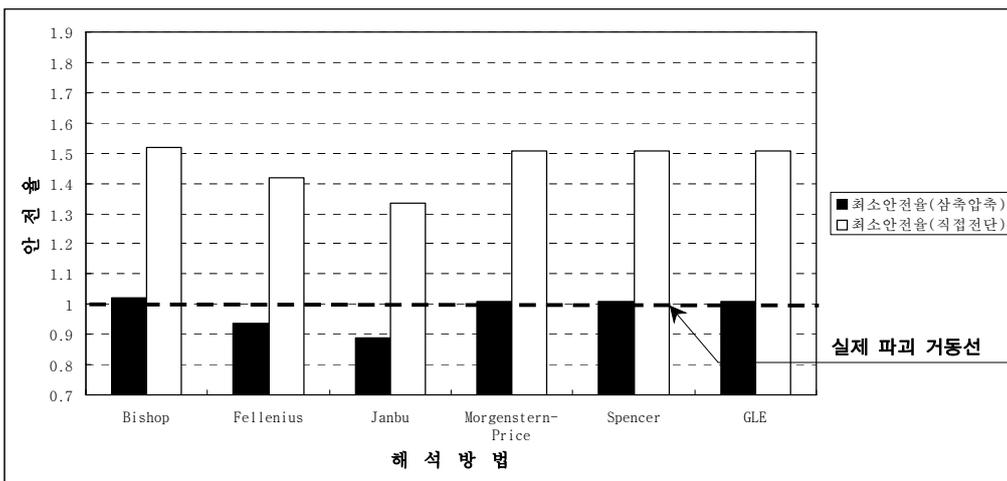


그림 11. 모래 20%일 때 사면안정해석의 안전율을 비교

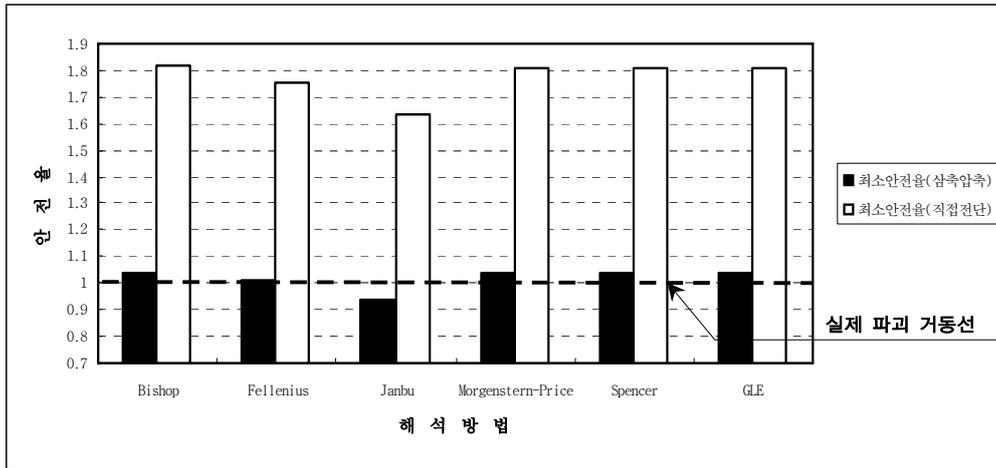


그림 12. 모래 0%일 때 사면안정해석의 안전율 비교

#### 4.2 실제파괴면에 대한 안전율 비교

모형실험결과에서 균열이 일어난 파괴면을 삼축압축시험과 직접 전단시험의 결과로 나누어 Bishop의 간편법으로 해석해 보았다. 모래 100%인 경우에는 파괴형상을 육안으로 관찰하기 어려워 파괴시의 재하하중을 산정할 수가 없어 해석이 불가하였고, 파괴형상이 비교적 뚜렷하게 나타난 5가지 경우에 대하여 해석하였으며, 대체로 직접 전단시험에 의한 해석 결과가 삼축압축시험에 의한 해석 결과보다 높게 해석되었다. 또한 삼축압축시험값으로 사면안정해석을 하는 것이 실제 사면의 파괴 형상 안전율에 가깝고, 파괴형상에 따른 해석 결과가 사면 안정해석의 최소안전율( $F_s$ )보다 높게 해석되는 경향을 알 수 있으며, 안전율 비교는 그림 13~그림 17과 같이 그래프로 비교하였다

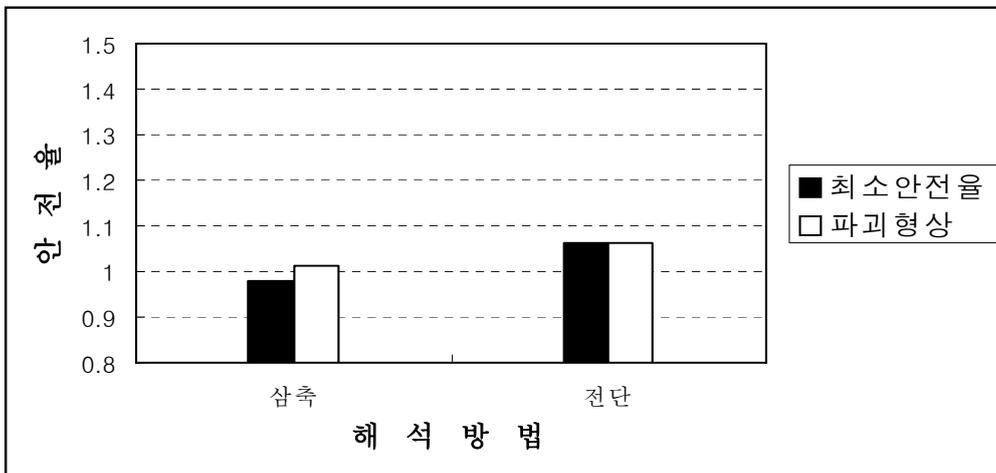


그림 13. 모래 80%일 때 모형실험 파괴면과 사면안정해석 결과 비교

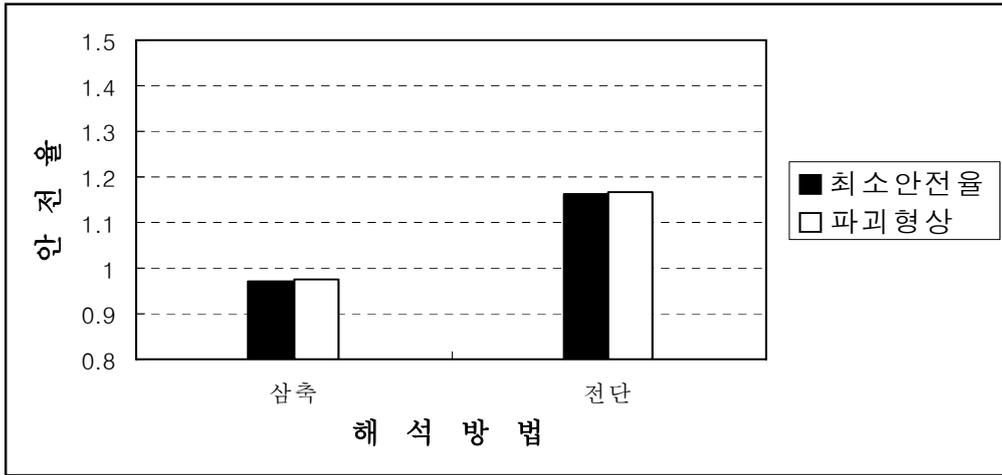


그림 14. 모래 60%일 때 모형실험 파괴면과 사면안정해석 결과 비교

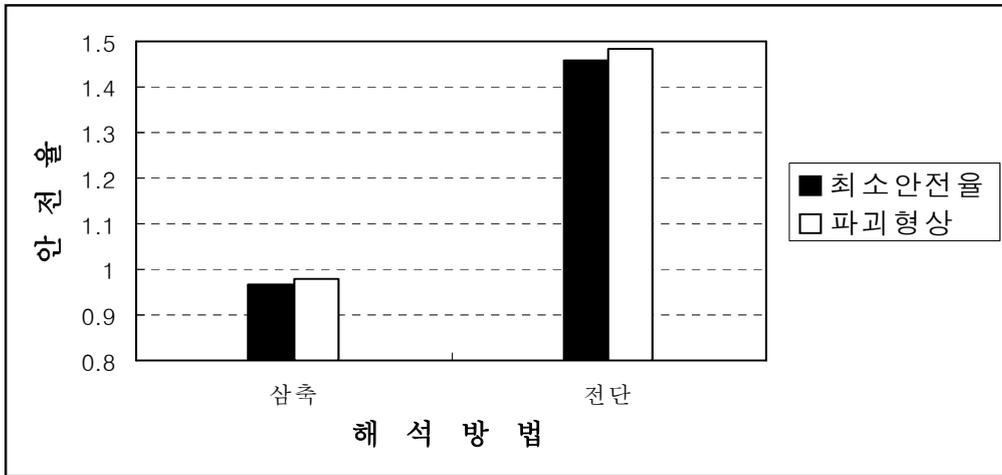


그림 15. 모래 40%일 때 모형실험 파괴면과 사면안정해석 결과 비교

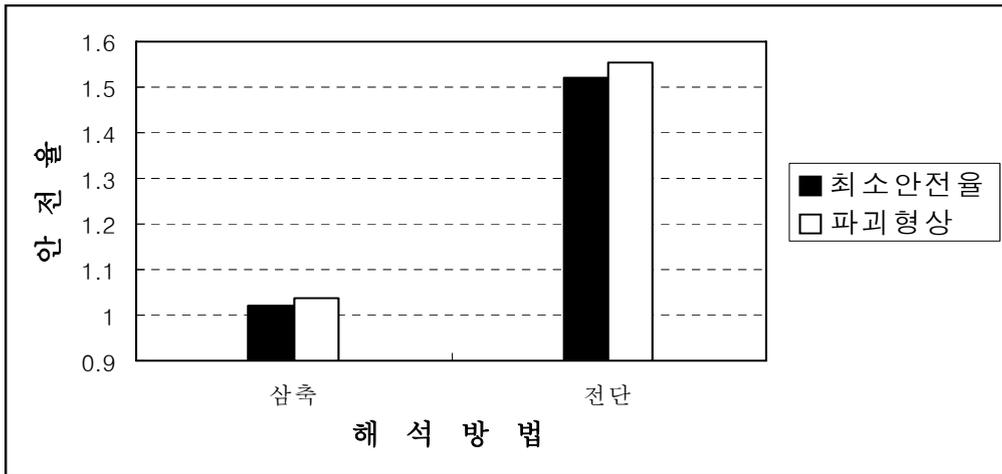


그림 16. 모래 20%일 때 모형실험 파괴면과 사면안정해석 결과 비교

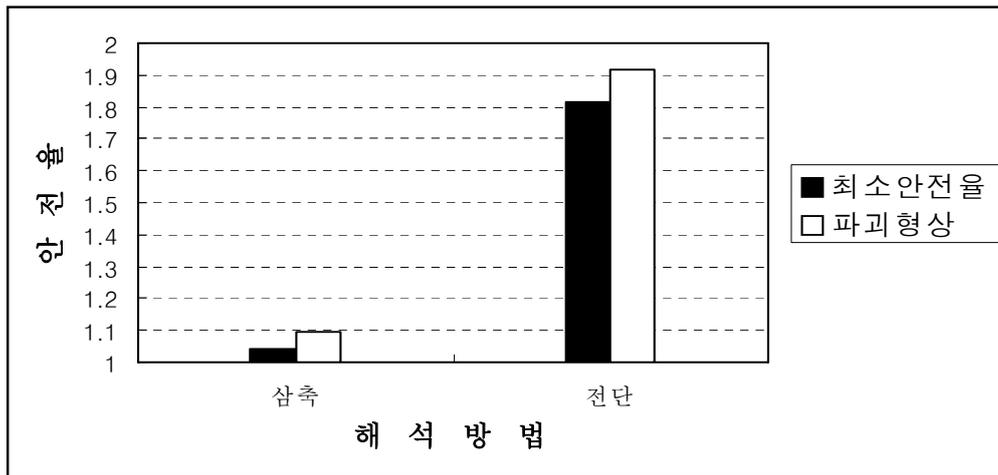


그림 17. 모래 0%일 때 모형실험 파괴면과 사면안정해석 결과 비교

## 5. 결론

본 연구에서는 모형실험을 통하여 사면의 거동을 파악하고, 사면의 토질정수를 삼축압축시험(CD시험)과 직접 전단시험을 통하여 구하였다. 그리고 모형실험의 파괴면에 따른 사면안정해석을 통하여 모형실험과 사면안정해석프로그램에 대한 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Bishop의 간편법과 Fellenius법, Janbu법, Morgenstern-Price법, Spencer법, GLE법에 대하여 해석방법에 의한 비교를 한 결과 Bishop의 간편법, Morgenstern-Price법, Spencer법, GLE법의 안전율이 실제 사면의 안전율과 비슷한 값으로 해석 되었으며, Fellenius법과 Janbu법은 안전율을 과소평가하는 것으로 평가되었다.
- 2) Fellenius법과 Janbu법의 안전율을 비교해 본 결과 상대적으로 모래함유량이 클수록 두방법의 안전율이 유사하게 해석되지만, 카오린의 함유량이 클수록 Janbu법의 안전율이 최소안전율을 나타내는 경향이 있다.
- 3) Bishop의 간편법, Morgenstern-Price법, Spencer법, GLE법을 실제의 설계 및 안전진단 등에 사용하여도 무방하다고 판단되며, Fellenius법과 Janbu법은 안전율을 과소평가하게 되므로 유의하여 사용하여야 한다.
- 4) 삼축압축시험값으로 사면안정해석을 하는 것이 실제 사면의 파괴 형상 안전율에 가깝고, 직접 전단시험값으로 사면안정해석을 한다면 실제 사면의 안전율보다 과대평가 할 수 있으며, 일반적으로 안전진단 및 설계시 대부분 직접 전단시험으로 토질정수값을 사용하고 있는데, 이 또한 삼축압축 시험을 통한 토질정수값을 취하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Bishop, A. W.(1955). "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes" Geotechnique 5 pp. 7~17
2. Fellenius, W.(1927). Erdstatische Berechnungen mit Reibung and Kohasion Ernst Berlin.
3. Janbu, N.(1973). Slope Stability Computations Embankment Dam Engineering, wileys.
4. Morgenstern, N. "Stability Charts for Earth Slopes during Rapid Drawdown," Geotechnique : pp. 121~131.
5. Spencer, E.(1967). "A Method of analysis of the Stability of embankments. assuming Parallel interslice forces" Geotechnique 17(1) pp. 11~26