creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000239139

2010年 2月

碩士學位論文

Bishop의 간편법에 의한 사면안정해석 프로그램의 특성 분석

朝鮮大學校 大學院

土 木 工 學 科

姜 儁 遠

Bishop의 간편법에 의한 사면안정해석 프로그램의 특성 분석

A Characteristic Analysis on the Program of Slope Stability Analysis by Bishop's Simplified Method

2010年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

土 木 工 學 科

姜 儁 遠

Bishop의 간편법에 의한 사면안정해석 프로그램의 특성분석

指導敎授　安 鍾 弼

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함.

2009年 10月

朝鮮大學校 大學院

土 木 工 學 科

姜　儁　遠

姜儁遠의 碩士學位 論文을 認准함

委員長　朝鮮大學校　敎授　金　大　賢　(印)

委　員　朝鮮大學校　敎授　朴　正　雄　(印)

委　員　朝鮮大學校　敎授　安　鍾　弼　(印)

2009年　12月

朝鮮大學校 大學院

목 차

표차례 ····· iv

그림차례 ····· vii

ABSTRACT ····· ix

제1장 서 론 ····· 1

1.1 연구배경 및 목적 ····· 1

1.2 연구동향 ····· 3

1.3 연구방법 및 범위 ····· 5

제2장 토사사면의 안정해석 및 방법 ····· 6

2.1 사면의 불안정 요인 및 파괴형태 ····· 6

2.1.1 사면의 불안정 요인 ····· 6

2.1.2 사면의 파괴형태 ····· 7

2.2 사면안정에 대한 매커니즘 ····· 14

2.3 토사사면의 안정해석 및 방법 ····· 22

2.3.1 단일활동체 해석방법 ····· 27

2.3.2 절편법 ····· 31

2.3.3 프로그램 해석법 ····· 43

2.3.4 수치해석법 ····· 44

제3장 사면안정 해석 프로그램 ····· 48

3.1 사면안정 해석 프로그램의 특성 ····· 48

3.1.1 SLOPE/W ····· 48

3.1.2 TALEN 97 ····· 49

3.1.3 GSTABL 7 ····· 52

3.1.4 STABR ····· 53

3.1.5 STABGM ····· 58

3.1.6 UTEXAS ····· 59

3.1.7 MALE ····· 61

제4장 Program에 의한 사면안정해석 및 고찰 ····· 62

4.1 사례사면지반의 강도특성 ····· 62

4.1.1 사면 현황 ····· 62

4.1.2 사례사면 토질정수 ····· 65

4.1.3 지하수위 ····· 66

4.2 사면안정성 해석 결과 ····· 67

4.2.1 전단강도 변화시의 해석결과 ····· 67

4.2.2 사면경사 변화시의 해석결과 ····· 76

4.2.3 간극수압 변화시의 해석결과 ····· 80

제5장 종합분석 및 고찰 ····· 84

제6장 결 론 ····· 107

참고문헌 ····· 109

표 차 례

표 2.1 사면거동의 간략한 분류 ····· 7

표 2.2 토사사면의 파괴종류 및 파괴형태 ····· 8

표 2.3 사면파괴의 저항력 감소와 작용력 증가 ····· 9

표 2.4 암반사면의 파괴형태 ····· 11

표 2.5 원호 파괴 형태와 평사투영 결과 ····· 12

표 2.6 평면 파괴 형태와 평사투영 결과 ····· 13

표 2.7 쐐기 파괴 형태와 평사투영 결과 ····· 13

표 2.8 전도 파괴 형태와 평사투영 결과 ····· 14

표 2.9 원지반 토질에 대한 비탈면 경사의 범위 ····· 18

표 2.10 우리나라 여러기관의 절토사면 표준경사 ····· 19

표 2.11 국내·외 기관의 절토사면 안전율기준 ····· 19

표 2.12 안정검토를 필요로 하는 절토사면 ····· 22

표 2.13 사면안정 해석법의 분류 ····· 25

표 2.14 비선형 안정해석법의 가정과 안전율 계산근거 ····· 26

표 2.15 사면안정 해석법의 종류 ····· 26

표 2.16 한계평형법을 이용한 토사사면 안정해석 방법의 종류 ····· 33

표 2.17 해석방법들의 한계평형조건 ····· 42

표 2.18 사면해석 프로그램 개요 ····· 44

표 4.1 Ⅰ구간 깎기부 현황 ····· 63
표 4.2 Ⅱ구간 깎기부 현황 ····· 64
표 4.3 Ⅲ구간 깎기부 현황 ····· 65
표 4.4 Ⅰ구간 깎기부 적용 토질정수 ····· 65
표 4.5 Ⅱ구간 깎기부 적용 토질정수 ····· 65
표 4.6 Ⅲ구간 깎기부 적용 토질정수 ····· 66
표 4.7 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=15kN/m2) ····· 69
표 4.8 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=20kN/m2) ····· 69
표 4.9 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=25kN/m2) ····· 70
표 4.10 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=20kN/m2) ····· 72
표 4.11 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=25kN/m2) ····· 72
표 4.12 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=30kN/m2) ····· 73
표 4.13 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=5kN/m2) ····· 75
표 4.14 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=10kN/m2) ····· 75
표 4.15 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=15kN/m2) ····· 75
표 4.16 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.5) ····· 76
표 4.17 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.8) ····· 76
표 4.18 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:2.0) ····· 77
표 4.19 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.5) ····· 77
표 4.20 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.8) ····· 78

표 4.21 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:2.0) ····· 78
표 4.22 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.5) ····· 79
표 4.23 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.8) ····· 79
표 4.24 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:2.0) ····· 79
표 4.25 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표면 상단) ····· 80
표 4.26 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 1m) ····· 80
표 4.27 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 2m) ····· 81
표 4.28 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표면 상단) ····· 81
표 4.29 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 1m) ····· 82
표 4.30 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 2m) ····· 82
표 4.31 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표면 상단) ····· 83
표 4.32 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 1m) ····· 83
표 4.33 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 2m) ····· 83

그 림 차 례

그림 2.13 사면의 불안정 요인 ····· 6

그림 2.1 경사면에 작용하는 수직응력과 전단응력의 관계 ····· 15

그림 2.2 절편에 작용하는 힘의 System ····· 24

그림 2.3 무한사면해석 ····· 28

그림 2.4 흙쐐기해석 ····· 30

그림 2.5 Φ=0의 모멘트해석 ····· 31

그림 2.6 Fellenius법에 의한 사면안정 해석 ····· 35

그림 2.7 Bishop법에 의한 사면안정 해석 ····· 37

그림 2.8 절편 바닥의 경사와 와의 관계 ····· 38

그림 2.9 Janbu법에 의한 사면안정 해석 ····· 38

그림 2.10 Janbu법에서 사용되는 보정계수 ····· 40

그림 2.11 GLE법 ····· 42

그림 2.12 사면에 대한 유한요소해석 결과에 따른 변위량 ····· 46

그림 3.1 절편의 평형 ····· 50

그림 3.2 복잡한 기하형상의 예 ····· 51

그림 3.3 절편에 작용하는 힘 ····· 55

그림 3.4 STABR에 사용되는 X,Y좌표 ····· 56

그림 3.5 CENTER A를 중심한 첫 번째 시계방향 회전 ····· 56

그림 4.1 Ⅰ구간 제1깎기부 대표단면 ····· 62
그림 4.2 Ⅱ구간 제1깎기부 대표단면 ····· 63
그림 4.3 Ⅲ구간 제9깎기부 대표단면 ····· 64
그림 4.4 Ⅰ구간 대표단면 해석 OUTPUT(SLOPE/W) ····· 67
그림 4.5 Ⅰ구간 대표단면 해석 OUTPUT(TALEN 97) ····· 68
그림 4.6 Ⅰ구간 대표단면 해석 OUTPUT(GSTABL 7) ····· 68
그림 4.7 Ⅱ구간 대표단면 해석 OUTPUT(SLOPE/W) ····· 70
그림 4.8 Ⅱ구간 대표단면 해석 OUTPUT(TALEN 97) ····· 71
그림 4.9 Ⅱ구간 대표단면 해석 OUTPUT(GSTABL 7) ····· 71
그림 4.10 Ⅲ구간 대표단면 해석 OUTPUT(SLOPE/W) ····· 73
그림 4.11 Ⅲ구간 대표단면 해석 OUTPUT(TALEN 97) ····· 74
그림 4.12 Ⅲ구간 대표단면 해석 OUTPUT(GSTABL 7) ····· 74
그림 5.1 Ⅰ구간 전단강도 변화에 따른 안전율 경향 ····· 86
그림 5.2 Ⅱ구간 전단강도 변화에 따른 안전율 경향 ····· 89
그림 5.3 Ⅲ구간 전단강도 변화에 따른 안전율 경향 ····· 92
그림 5.4 Ⅰ구간 사면경사 변화에 따른 안전율 경향 ····· 95
그림 5.5 Ⅱ구간 사면경사 변화에 따른 안전율 경향 ····· 98
그림 5.6 Ⅲ구간 사면경사 변화에 따른 안전율 경향 ····· 101
그림 5.7 Ⅰ구간 지하수위 변화에 따른 안전율 경향 ····· 103
그림 5.8 Ⅱ구간 지하수위 변화에 따른 안전율 경향 ····· 104
그림 5.9 Ⅲ구간 지하수위 변화에 따른 안전율 경향 ····· 106

ABSTRACT

A Characteristic Analysis on the Program of Slope Stability Analysis by Bishop's Simplified Method

Kang, Jun - Won
Advisor : Prof. Ahn, Jong-Pil, Ph.D.
Department of Civil Engineering,
Graduate School of Chosun University

Since the stability of slope is determined by comprehensive examination of layer composition condition, topographical characteristics of soil and base rock, systematic and rational analysis processes as well as th application of reinforcement method, should be used for the long-term and economical maintenance of slope stability.

Therefore, this study accomplished theoretical consideration about the mechanism of slope stability and the analysis methods of the slope stability, analyzed the place where actually designed or constructed by used ground investigation and soil test, trough slope stability analysis program SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7.

Limit equilibrium analysis showed that stability of slope may be varied greatly depending on the influence of pore water pressure and the property of soil and the slope incline.

In this study the trend of safety rate in dry condition and saturation

condition by using the slope stability analysis program SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7 showed that the SLOPE/W is larger than the TALEN 97 and GSTABL 7.

The program analysis results of change an underground water table in dry condition showed that the safety rate by using SLOPE/W as Fs=1.760 ~5.790, by using TALEN 97 as Fs=1.65~6.12, by using GSTABL 7 as Fs=1.49~6.03. According to this results SLOPE/W shows larger safety rate more than TALEN 97, GSTABL 7.

The analysis results of change a shear strength and a slope incline showed that the safety rate small an order of SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7

제1장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

지난 수십년간 우리나라의 건설기술은 철도, 도로 등 교통시설, 댐구조물 등의 수리시설, 원자력발전소, 화력발전소 등과 같은 중요 구조물 및 인간 생활의 편리를 위한 토목구조물의 건설을 통하여 많은 발전을 거듭하여 오고 있다. 더욱이 최근에 이르러서는 구조물의 규모가 증대되어 가고 있으며 토지의 평면적 확장과 입체적 공간 활용도가 요구됨에 따라 열악한 환경에서의 구조물 건설이 요구되어 오고 있다.

이와 같은 개발에 따라 산악지역에도 건물이 들어서고 도로가 건설되며 동시에 사람들의 활동공간도 확대되고 있다. 그러나 이러한 현상과 더불어 구릉지나 산지에서의 사면의 붕괴는 인구밀집 지역으로 점점 확대되는 경향이 있어 해마다 수많은 사면재해에 의한 피해가 증가하고 있는 실정이다(한국지반공학회, 2002).

사면은 크게 자연사면과 인공사면으로 구분할 수 있으며, 이중 인공사면은 절토사면과 성토사면으로 나뉘어 진다. 여기서 절토사면은 주로 도로개설을 위한 도로사면, 터널 입·출구부 정지작업에 의한 갱구부사면, 댐 축조시 형성된 양안부사면, 기타 부지확보를 위해 절토한 부지사면이 있다. 또한 성토사면은 도로개설을 위한 노반성토사면, 제방이나 댐의 제체사면, 기타 부지확보를 위해 성토한 사면 등이 있다.

이들 사면의 일반적인 특징은 장기간 자연적인 안정화 과정을 거친 자연사면이나 구성재료의 품질관리가 가능한 성토사면은 통상 안전율을 확보하고 있는 경우가 많으나 절토사면은 인위적인 하부지지력 제거로 급속한 힘의 불균형 상태를 초래하게 되어 상대적으로 붕괴위험이 높다고 볼 수 있다.

일반적으로 사면파괴는 지질·토질·지질구조·지형 등 내적요인(잠재적 요

인)과 강우·융설·지하수·침식·지진·절토 등과 같은 자연적·인위적 요인과 같은 외적요인(직접적 요인)이 서로 복합적으로 다양하게 발생된다. 이러한 사면파괴에 대한 안정성은 사면 자체의 지질학적·지형학적·지반공학적 특성에 따라 좌우되지만 주변의 환경에 따라 영향을 받을 수 있으므로 사면의 안정성에 영향을 미치는 내적·외적요인 뿐만 아니라 여러 가지 요인들을 조사·분석하여 큰 영향을 미칠 수 있는 요인들을 선정하여야 한다.

토사사면은 미시적으로는 불연속적인 토립자로 구성된 집합체이나 전체적으로 볼 때 하나의 연속체로 간주할 수 있다. 따라서 특별한 지층(연약층)이 분포하지 않는 경우의 파괴는 임의의 최소 활동저항면을 따라 발생한다는 점을 염두에 두고 안정성 평가가 이루어지는 것이 보통이다. 또한 안정성 평가에 필요한 주요소 중 하나인 지반정수 측면에서 볼 때 토사층의 경우 구성토질 및 조성상태 등의 요인에 따라 지반정수 값이 달라지고 사면안정 검토시 이에 대한 면밀한 파악이 필요하게 된다.

이와 같이 현재의 토사사면에 대한 설계 및 시공은 수학적·물리학적 법칙에 기초하여 만든 다양한 공학적 기법의 모델링과 전산화에 의해 자동화시스템의 개발이 정착단계에 이르렀으나, 실제 각 사면의 안정성 평가는 사면내부의 다양한 인자와 불확실성을 내포하고 있으므로 조사자의 주관적 판단에 크게 의존하는 인간의 한계를 극복하지 못한 실정이다.

이에 본 연구에서는 우리나라 각기 다른지역에 분포하는 실제 설계 또는 시공이 이루어진 경상북도 김천～교리국도건설공사 현장의 절토사면 10개소, 전라남도 여수～순천간 도로 확・포장공사 현장의 절토사면 8개소, 광주～양수간 국도확장공사 절토사면 3개소를 대상으로하였으며, 토사층에 대한 전단강도, 사면경사, 간극수압의 매개변수를 고려하여 SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7 등 사면안정해석 프로그램을 이용한 한계평형해석을 실시한 후 해석결과를 비교·분석함으로서 사면의 안정성 해석에 대해 고찰 및 합리적인 사면의 안정성 해석을 수행함에 그 목적이 있다.

1.2 연구동향

일반적으로 널리 이용되는 사면안정해석 방법은(절편법 형식) 사면을 이루는 토질이 이에 작용하는 자중에 대하여 전단파괴 또는 활동파괴를 이루는 최소한의 안전율을 찾는 것이다. 이러한 정의에 따른 안전율은 현장 토질응력 및 그에 의존하는 전단응력의 불확실성으로 인하여 균질의 토질에서조차 논란의 여지가 있다. 또한 예상 파괴면을 원호, logarithmic spiral arc 또는 부분선형 등으로 가정한 후 반복 해석하기 때문에 실제 파괴면의 추정은 결코 쉬운 일이 아니다. 이러한 이유 등으로 사면의 형태, 높이, 경사각 등의 기하학적 형상 및 사면을 구성하는 토질재료에 따라 여러 가지 가정 및 단순화된 해석적 방법이 존재한다.

지반공학과 관련된 신뢰성 연구로는 Lumb(1966), Meyerhof(1970), Schultze(1971), 등이 토질정수에 대하여 통계학적 자료 분석을 수행하였으며, 그 후 Singh(1971), Matsuo (1974), Ang & Tang(1975), Vanmarcke (1977), Tobutt(1979), Yucemen(1983) 등에 의한 연구가 진행되었다. 사면의 신뢰성해석은 Freudenthal(1966), Ang(1969), Wu and Kraft(1970), Cornell(1974), Cravero(1982), Carter(1983) 등에 의해 수행되었다.

토사사면의 안정해석에 사용되는 한계평형방법은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 안정성을 해석하는 것이다. 문제를 단순화하기 위한 가정을 설정하고 이 방법을 사용하면 간단한 정역학 이론으로 해를 얻을 수 있게 된다. 따라서 한계평형방법은 절성토 사면의 안정해석에 널리 사용되고 있으며, 이 방법의 유용성과 신뢰성은 현재까지 축적된 경험을 통하여 잘 알려져 있다. 한계평형이론에 의한 사면안정 해석방법은 여러 가지가 있으나 그 정확성은 강도정수와 사면의 기하학적 조건의 정확도 및 각 해석방법 고유의 정밀도에 따라 좌우되며, 그 유용성과 신뢰성은 현재까지 축적된 경험을 통하여 잘 알려져 있다. 한계평형방법과 흙 쐐기해석법(Duncan and Wright: 1980), Fellenius방법(1927,

1936), Bishop(1955)의 간편법, 일반한계평형, 절편법(Fredlund and Krahn: 1977) 등의 방법들이 많이 사용되어지고 있으며, Whitman and Baily(1967)등은 이러한 방법들에 대한 비교 연구 결과를 발표한 바 있다.

최근 우리나라에서도 주경훈·김주철·이종규(1994) 등이 프로그램과 도표에 의한 사면안정해석 비교연구를 수행하였으며, 박연준·최영수·유광호·백영식(1999) 등이 절편법과 유한차분법에 의한 사면안정해석 비교연구, 김일구(2008) 등이 퍼지-신경망에 의한 사면지반의 안정성 평가방법에 관한 연구 등 다양한 각도의 사면안정에 대한 연구가 이루어지고 있다.

1.3 연구방법 및 범위

사면의 안정성 평가는 지층의 구성상태, 지형조건, 용출수의 유·무, 토질 및 암반의 공학적 특성, 사면의 안정성 및 경제성, 보강공법의 적용 여부 등을 종합적으로 검토하여 결정되므로 사면의 안정성을 장기적으로 유지하기 위해서는 체계적이고 합리적인 분석과정을 거쳐야 한다.

현재까지 사면안정성에 대한 연구는 주로 가상사면에 대한 매개변수 민감도 분석이나 특정사면에 대한 안정성 검토 및 대책공법 적용에 대하여 이루어져 왔다. 본 연구에서는 국내의 지반조건에서 다양한 형태로 조성되는 실제로 설계 또는 시공이 이루어진 절토사면에 단위중량, 점착력, 내부마찰각의 강도정수와 더불어 지하수위 등의 매개변수를 적용하여 SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7 등의 프로그램을 이용 한계평형해석 수행을 하였으며 강도정수, 사면경사, 지하수위의 위치에 따른 사면안정을 검토하여 사면안정성에 대한 합리적인 연구를 위한 안정성 경향을 비교·분석을 하였다.

연구 대상사면은 우리나라 각기 다른지역에 분포하는 실제 설계 또는 시공이 이루어진 3~4개 지층으로 구성된 다층사면인 절토사면으로서 경상북도 김천~교리국도건설공사 현장의 절토사면 10개소, 전라남도 여수~순천간 도로 확·포장공사 현장의 절토사면 8개소를 대상으로 수행하였으며, 사면안정해석에 적용된 지반의 토질정수는 각 현장별 토질시험 결과를 이용하였다. 또한 각기 다른 강도정수의 토사층과 암반층으로 구성된 대상사면에 대해 건기시 및 우기시의 절토사면 안정성을 검토하여 비교·분석 하였다.

본 연구에서는 각 현장의 대상 절토사면 안정성 검토 해석프로그램은 SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7 등을 사용하였으며, 사면안정해석법으로 일반적 사면 안정해석에 많이 이용되는 Bishop의 방법을 적용하여 절토사면 안정성을 검토하였다.

제2장 토사사면의 안정해석 및 방법

2.1 사면의 불안정 요인 및 파괴형태

2.1.1 사면의 불안정 요인

사면의 불안정 요인은 크게 직접적인 요인과 간접적인 요인으로 구분되며, 직접적인 요인은 자연적 원인과 인공적 원인으로 분류되며, 간접적인 요인은 지질적 원인과 지형적 원인으로 구분된다. 이에 대한 분류는 그림 2.1과 같다.

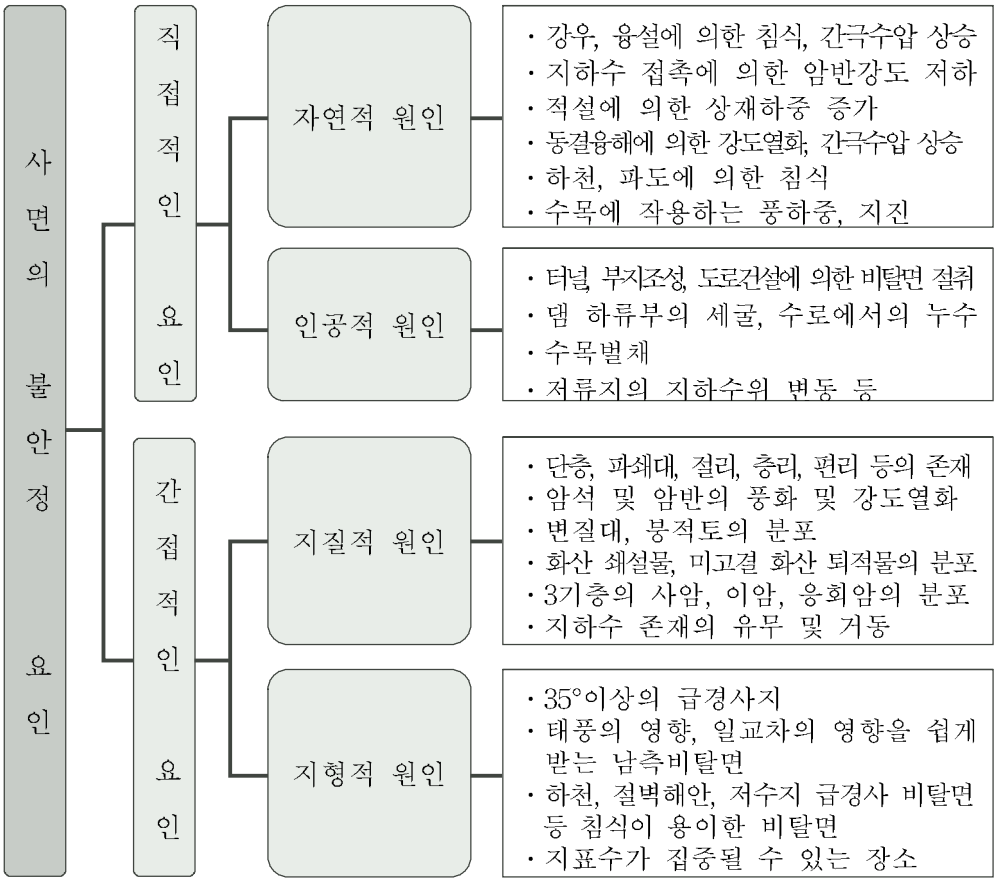


그림 2.1 사면의 불안정 요인

2.1.2 사면의 파괴형태

비탈면의 붕괴현상은 자연적인 원인과 인위적인 행위에 의하여 일어나며, 이러한 원인들이 복합적으로 작용되어 실제로 나타나는 붕괴의 형태는 대단히 복잡하다.

비탈면의 붕괴형태는 Eckel, Skempton and Hutchinson, Zaruba and Mencl 등에 의해 여러 가지 형태로 분류되었다. 이들은 붕괴면의 형태는 붕괴의 직접적인 원인이 되는 지질구조 및 응력의 상태 등을 기준으로 붕괴의 형태를 분류하였다. 최근에는 Varnes에 의해 제시된 분류가 널리 사용되며 이에 의한 분류 및 파괴형태는 다음과 같다.

표 2.1 사면거동의 간략한 분류

Type of Movement	Type of Material		
	Bedrock	Engineering Soils	
		Predominantly Coarse	Predominantly Fine
Fall	Rock fall	Debris fall	Earth fall
Topples	Rock topple	Debris topple	Earth topple
Slides	Rock slump	Debris slump	Earth slump
Rotational	Rock block slide	Debris block slide	Earth block slide
Translational	Rock slide	Debris slide	Earth slide
Lateral spreads	Rock spread	Debris spread	Earth spread
Flow	Rock flow (deep crack)	Debris flow (soil creep)	Earth flow (soil creep)
Complex	Combination of two or more principal types of movement		

주) After Varnes (1978)

가. 토사사면의 파괴형태

토사사면의 파괴형상은 원호형, 대수나선형, 직선형 등 수없이 많으므로 이것을 한마디로 단정하기 힘들다. 원칙적으로 말하면 균질한 사면에 있어서는 활동면이 원호에 가까우므로 원호활동으로 가정하여 사면안정해석을 할 수 있다. 그러나 전단강도가 깊이에 따라서 증가하는 무한사면의 경우는 병행활동을 하므로 이와 부합하는 안정해석을 우선적으로 해야 하며, 만일 사면 내에 얕게 약한층이 존재할 때에는 이 면을 따라 활동되기도 한다. 이와 같이 활동현상은 다양함으로 해석에 앞서 예상되는 활동면에 대한 여러 가지 경우를 충분히 검토하여 활동 가능성이 가장 높은 경우에 대해 검토하는 것이 중요하다.

토사사면의 종류는 사면의 형태에 따라 직립사면, 무한사면, 단순사면 등으로 분류하며, 표 2.2는 토사사면의 파괴의 종류 및 파괴형태를 간략하게 정리한 것이다.

표 2.2 토사사면의 파괴종류 및 파괴형태

파괴의 종류	파괴 형태
사면 내 파괴	얕은 표층의 붕괴
사면선단 파괴	원호, 대수나선 형태의 활동
저면 파괴	깊고 광범위한 Land Sliding

사면의 불안정 요인은 크게 외적인 요인과 내적인 요인으로 구분되며 Terzaghi 등은 그 원인을 다음과 같이 제시하였다.

-외적인 요인

- 지형의 기하학적 변화(인위적인 깎기, 유수에 의한 침식 등)
- 토피하중의 제거(침식, 인위적인 깎기)

· 하중의 증가(하중의 추가, 비탈높이의 증가, 수위강하로 인한 흙무게의 증가)
· 충격과 진동
· 인접한 호수 또는 저수지의 수위 강하
· 강우

-내적인 요인

· 진행성 파괴
· 풍화작용(동결 융해, 건조 수축 등)
· 물의 침투로 융해(융해에 의한 침식, 파이핑 현상 등)

토사사면의 파괴원인은 크게 저항력의 감소와 작용력의 증가에 의해서 파괴되는 경우가 많으며, 파괴원인에 대해서는 표 2.3에 정리하였다.

표 2.3 사면파괴의 저항력 감소와 작용력 증가

저항력 감소	작용력의 증가
- 수압증가 - 다짐 불충분(성토사면) - 수축, 팽창 또는 인장으로 인하여 발생하는 미세한 균열발생 - 동토나 빙결Land의 융해 - 느슨한 토립자의 진동	- 함수비의 증가에 따른 흙의 단위중량 증가 - 지진, 발파 등에 의한 진동 - 균열내에 작용하는 수압

나. 암반사면의 파괴형태

암반사면의 파괴형태에 대한 추정은 사면의 해석이나 평가, 사면의 거동, 이동의 계측, 시공 후의 유지관리 및 파괴 징후시의 대책에 이르는 전체의 흐름 중에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러나 암반사면의 거동은 일반적으로 암석 고유의 특성과 불연속면을 포함한 구조체로서의

특성에 따르며, 암반사면의 파괴기구는 암석강도, 불연속면의 방향이나 빈도, 연속성 및 지하수 상황 등의 많은 요인들에 의해 지배되기 때문에 파괴기구를 명확하게 해석하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 암반사면의 파괴형태에 대한 추정은 복잡한 상황을 단순화하여 문제 해결을 도모하는 것이 일반적이다.

암반사면의 파괴형태는 사면과 불연속면들의 경사방향 및 경사각에 의하여 이루어지는 상관관계에 따라 결정할 수 있고, 이에 대해 Hoek and Bray(1979)에 의한 스테레오투영법 등을 사용함으로서 구체적인 파괴형태를 산출할 수 있으며, 다음의 표 2.3과 같이 활동파괴, 전도파괴, 좌굴파괴, 붕락현상 및 응력개방에 따른 변상 등의 형태로 분류할 수 있다.

암반사면의 파괴형태는 암반이나 지층의 생성과정 및 지각변동에 따른 변성 등에 따라 정해지는데 크게 지질조건에 의한 원인과 사면의 절취에 따라 생기는 암반의 변상, 지하수의 변동, 지표수의 침투 및 지진 등의 외적인 원인으로 구별된다. 지질조건으로는 고결도나 풍화 등의 원지반의 물성 및 응력, 절리, 편리, 단층 등의 지질구조상의 불연속성을 들 수 있으며, 외적인 요인으로 발파진동에 의한 암반의 변상, 응력개방에 의한 변상, 원지반의 노출 등에 의한 풍화, 지하수 또는 지표수의 침투 등이 암반사면의 안정성에 영향을 주는 주요 인자들이다.

암반사면의 파괴형태는 지질조건에 따라 여러 가지 형태로 발생하여 단순한 형태의 파괴는 적고, 몇 가지 형태의 파괴가 복합적으로 발생하는 경우가 많으며, 불연속면(절리, 층리, 편리, 단층)이 불규칙하게 많이 발달하여 있고, 뚜렷한 특징이 없으면 원호파괴가 발생하고, 불연속면이 한 방향으로 발달하여 있으면 평면파괴가 발생하며, 불연속면이 두 방향으로 발달하여 교차할 경우에는 쐐기파괴가 발생한다. 그리고 절취면의 경사방향과 불연속면의 경사방향이 반대이고 불연속면이 급경사로 발달하여 기둥형태로 암반이 갈라진 경우에는 전도파괴가 발생한다.

이와 같은 암반사면의 파괴형태를 정확하게 추정하기 위해서는 암반분류

외에 불연속면의 조사를 필요로 한다. 불연속면의 조사는 지질 및 암반조사 자료를 이용하여 불연속면의 분포형태 즉, 방향, 간격, 길이, 연속성, 폭, 개소 및 거칠기 등의 정보를 스테레오투영법이나 개별요소법 혹은 블록이론 등에 의한 정성적 또는 정량적 기법으로 분석하여 얻을 수 있다.

그러나 이와 같은 불연속면의 분석방법이 현재로서는 확실하게 정립되어 있지 않고, 표시구분도 통일되어 있지 않은 실정이므로 암반사면 파괴형태의 정확한 추정을 위해서는 보다 다각적이고 면밀한 불연속면의 자료분석과 함께 당초의 조사결과에 너무 집착하지 않는 재검토가 요구되어진다.

표 2.4 암반사면의 파괴형태(Markland, 1972)

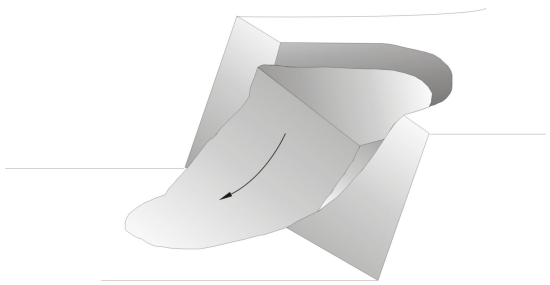
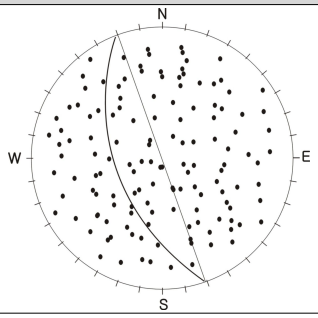
파 괴 형 태		파 괴 조 건
활동파괴	평면활동파괴	불연속면의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 일치하고 사면의 경사가 불연속면의 경사보다 급한 경우
	쐐기활동파괴	두 불연속면의 교선의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 일치하고 사면의 경사가 교선의 경사보다 급한 경우
	원호활동파괴	명백한 탁월방향이 없는 불연속면들이 무수히 산재하는 경우
전도파괴		불연속면의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 반대인 경우
좌굴파괴		산사태나 지진 및 중력활동에 의한 경우
붕락변상		낙석이나 활락에 의한 경우
응력개방에 따른 변상		사면의 절취과정에서 상재하중을 따라 발생되는 형태의 경우

이에 따른 파괴 형태에 대한 자세한 사항은 다음과 같이 설명할 수 있다.

1) 원호파괴(Circular Failure)

토층비탈면 및 불연속면이 불규칙하게 많이 발달되어 뚜렷한 구조적 특징이 없는 암반에서 원형파괴가 발생하는데 주로 풍화가 심한 암반이나 파쇄가 심한 암반에서 발생한다.

표 2.5 원호 파괴 형태와 평사투영 결과

원호 파괴 형태	평사 투영 결과
	
일정한 지질구조 형태를 보이지 않는 표토, 폐석, 심한 파쇄 암반에서의 원호파괴	

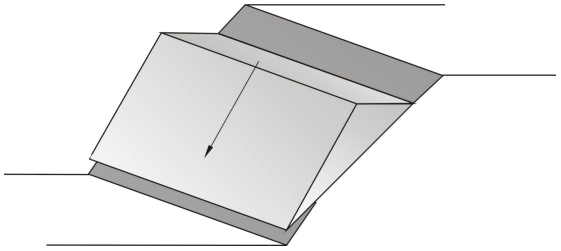
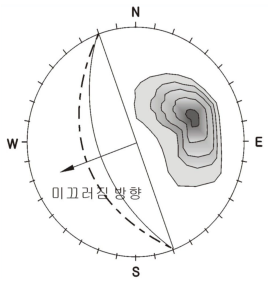
2) 평면파괴(Planar Failure)

불연속면의 주절리가 한 방향으로 발달된 암반에서 발생가능하며, 암괴가 어떤 절리면을 따라서 붕괴하려면 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

- 절개면과 절리면의 경사방향이 같아야 한다.
- 절리면의 주향이 절개면의 주향과 비슷해야 한다. (±30°이내)
- 절리면의 주향이 절개면상에 나타나야 한다.

  즉, 절리면의 경사각 (α) 〈 절개면의 경사각 (βa)
- 절리면의 경사각 (α)이 절리면의 마찰각 (Φ) 보다 커야 한다.
- 붕괴는 암괴의 양쪽측면이 절단되어서 암괴가 무너지는데 측면의 영향이 적어야 한다.

표 2.6 평면 파괴 형태와 평사투영 결과

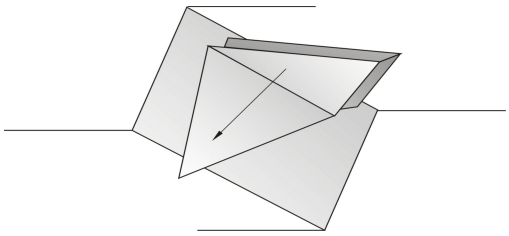
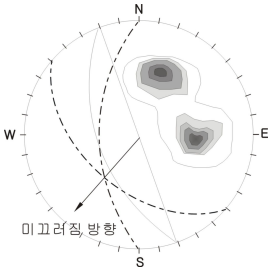
평면 파괴 형태	평사 투영 결과
	
퇴적암같이 질서정연한 지질구조를 가지는 암반에서의 평면 파괴	

3) 쐐기파괴 (Wedge Failure)

쐐기파괴는 두개의 불연속면을 따라서 발생하는 암반블록의 미끄러짐으로 인한 파괴형태로서 기본적인 역학관계는 평면파괴와 유사하지만, 평면파괴의 경우 경사벡터를 사용하고 쐐기파괴는 불연속면들의 교선으로 이루어지는 교선벡터를 고려하는 차이점이 있다. 쐐기파괴의 발생조건은 다음과 같다.

- 절리의 교선과 절개면의 경사방향이 같아야 한다.
- 절리면의 주향이 절개면의 주향과 비슷해야 한다.
- 절개면의 경사 〉 절리의 교선의 경사 〉 절리의 마찰각 ($\beta a > \alpha > \phi$)

표 2.7 쐐기 파괴 형태와 평사투영 결과

쐐기 파괴 형태	평사 투영 결과
	
교차하는 두 불연속면 위에서의 쐐기 파괴	

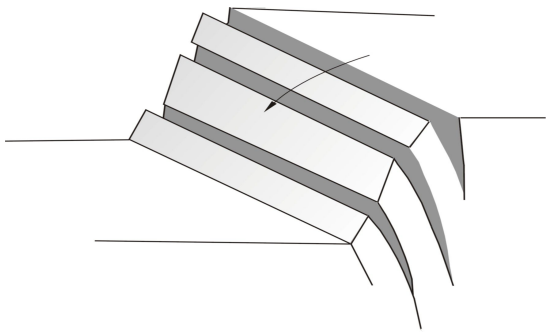
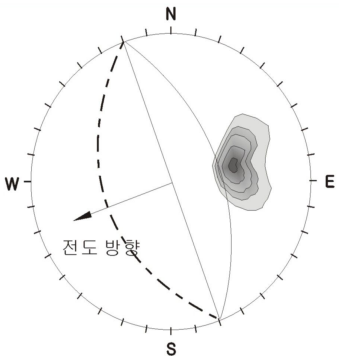
4) 전도파괴 (Toppling Failure)

전도파괴는 수직절리가 발달한 암반에서 발생되며, 이때 전도파괴의 발생조건은 다음과 같다.

- 절개면과 절리면의 경사방향이 반대이어야 한다.
- 절리면의 주향과 절개면의 주향이 비슷해야 한다(±25°).
- (90°- 절리면의 경사) + 절리면의 마찰각 〈 절개면의 경사

$$\Rightarrow \quad (90°-\alpha) + \phi < \beta a$$

표 2.8 전도 파괴 형태와 평사투영 결과

전도 파괴 형태	평사 투영 결과
	

급경사 불연속면에 의해 분리된 주상 구조를 형성하고 있는 경암암반에서의 전도파괴

2.2 사면안정에 대한 메커니즘

사면안정에 대한 역학적 특성은 암반이나 토체의 마찰각과 점착력 및 단위중량이 큰 비중을 차지한다. 마찰각과 점착력은 암반내의 불연속면을 따라 미끄러짐을 발생시키는데 필요한 전단응력과 수직응력의 관계로서 표현되며, 이는 절리와 같은 지질학적 불연속면을 가진 암석시편이 불연속면을 따라 미끄러짐을 유발시키는 하중을 받는 경우에 얻어지는 결과들

을 단순하게 표현한 것이다.

미끄러짐을 유발시키는 전단응력은 수직응력이 증가함에 따라 함께 증가한다. 마찰각은 전단응력과 수직응력의 관계를 나타내는 직선의 기울기로 정의된다. 대표적인 암석표면이나 흙 시료의 경우 전단응력은 식 (2.1)과 같이 표현된다.

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \tag{2.1}$$

여기서, c:점착력, σ:가상 파괴면에 작용하는 수직응력, ϕ:내부마찰각 이다.

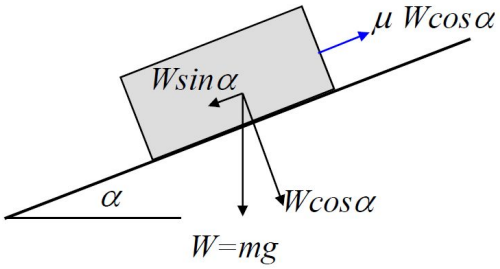


그림 2.2 경사면에 작용하는 수직응력과 전단응력의 관계

수평에 대해 ψ의 각도를 갖는 경사면 위에 놓여있는 중량 W의 블록을 고려할 때 블록에는 중력만 작용하므로 중량 W는 그림 2.1에서와 같이 연직방향으로 작용하게 된다.

이때 블록의 미끄러짐을 유발시키는 중량 W의 분해성분은 W$\sin\psi$ 이고, 경사면에 수직으로 작용하여 블록을 안정화 시키는 성분은 W$\cos\psi$ 이므로 잠재적인 미끄러짐면에 작용하는 수직응력은 식(2.2)와 같이 표현된다.

$$\sigma = \frac{W\cos\psi}{A} \tag{2.2}$$

여기서, A:블록의 밑면적, ψ:미끄러짐 경사각, W:블록의 중량 이다.

식 (2.2)를 식 (2.1)에 대입하여 정리하면 식 (2.3) 및 식 (2.4)와 같이 된다.

$$\tau = c + \frac{W\cos\psi}{A}\tan\Phi \tag{2.3}$$

$$R = cA + W\cos\psi\tan\Phi \tag{2.4}$$

여기서, $R=\tau_A$ 는 미끄러짐에 저항하는 전단력이며, 경사면 아래로 미끄러지려는 힘이 저항력과 정확히 같을 때 미끄러짐이 일어나려는 순간, 즉 극한평행 상태에 있게 한다.

사면의 안정해석은 활동면상에 있는 암괴 또는 토체의 극한평행조건에 의해 실시되고, 활동면상에서 활동을 일으키고자 하는 합력에 대한 활동에 저항하고자 하는 합력의 비율로 정의되는 안전율로 표시되며, 이는 식 (2.5)에서와 같이 가상활동면을 따라 동원되는 전단응력에 대한 지반의 전단강도로 표시된다.

$$\text{Fs(안전율)} = \frac{\tau_f(\text{활동에 저항하고자 하는 합력})}{\tau_d(\text{활동을 일으키고자하는 합력}} \tag{2.5}$$

토목공사에 있어 절취사면의 지층 분포는 일부의 토사층과 암반층이 복합적으로 출현되며, 이는 토사층과 암반층이 각각의 붕괴 특성이 다소 차이가 있으므로 토사층과 암반층으로 구분하여 안정성 평가를 해야 할 필요가 있다. 토사층의 경우 미시적으로는 불연속적인 토립자들로 구성된 집합체이나 전체적으로 볼 때 하나의 연속체를 간주할 수 있는 반면, 암반사면의 경우 대부분 암반 내 단층, 절리, 엽리, 층리 등과 같은 불연속

면들이 존재하므로 불연속면에 의해 분리된 암체들의 집합체로 간주할 수 있다.

그러므로 토사사면의 경우 연속체로 간주될 수 있음에 따라 특별한 지층(연약층)이 분포하지 않은 경우의 파괴는 임의의 최소활동저항면을 따라 발생한다는 점을 염두에 두고 안정성 평가를 실시하고, 암반사면의 경우는 분포하고 있는 불연속면의 특성 즉, 주연속면의 방향, 경사, 거칠기, 틈새, 연장성, 풍화정도, 충전물질 유·무 등과 같은 불연속면의 공학적인 특성에 의해 붕괴가 발생하기 때문에 안정성 평가시 토사사면의 경우와 비교할 때 복잡한 분석 및 계산을 필요로 한다.

또한 안정성 평가에 필요한 주 요소 중 하나인 지반정수 값이 달라지므로 암반층에 대한 안정해석에 필요한 지반정수 값은 불연속면의 풍화상태, 거칠기, 충전물질 유·무, 불연속면 강도 등과 같은 여러 가지 요소에 따라 좌우되어 대표 값의 판단 및 결정이 쉽지 않다. 따라서 사면안정 검토 시 토사사면은 구성토질 및 조성상태 등의 파악이 중요하며, 암반사면은 사면붕괴에 영향을 미칠 가능성이 큰 우세한 지질구조 또는 기층에 분포된 많은 불연속면에 대한 평가가 중요하다는 점에서 차이가 있다.

사면경사는 지층의 구성상태, 지형조건, 용출수의 유·무, 토질 및 암반의 공학적 특성, 사면의 안정성 및 경제성, 보강공법 적용 여부 등을 종합적으로 검토하여 결정되므로 사면의 안정성을 장기적으로 유지하기 위해서는 체계적이고 합리적인 분석과정을 거쳐야 한다. 절토사면의 표준경사는 사면을 구성하는 지층의 종류, 상태 및 사면높이에 따라 표 2.8, 표 2.9와 같이 적용하고 있다.

사면의 안정성은 안전율(Factor of Safety)을 근거로 하여 판단하고 있어 산정된 안전율이 1.0보다 크면 안정하지만 지반정수, 하중조건 및 파괴모델의 불확실성으로 인하여 허용안전율(Allowable Factor of Safety) 이상이 되어야 안전한 것으로 평가하여 명확한 규정 없이 1.5를 선택하고 있다. 그러나 Duncan and Buchignai(1975)은 사면파괴에 따릉 인명과 재산의 피해정도 및 복구비용 그리고 전단강도 측정치에 관한 신뢰도에 따라

1.25~2.0의 허용안전율을 제시하였고, Duncan(1992)은 완공직후 및 다단계 재하의 경우는 1.3, 장기재하의 경우 1.5, 수위 급강하의 경우 1.0~1.2의 허용안전율을 제시하고 있다. 또 국내·외 허용안전율에 대한 설계기준은 지역과 발주처, 공사내용에 따라 상이하나 대체로 1.1~1.5정도의 범위이며 적용기준은 표 2.10과 같다.

표 2.9 원지반 토질에 대한 비탈면 경사의 범위(건설교통부, 1996)

원 지 반 의 토 질		비탈면높이	경 사	비 고
모 래		-	1:1.5 이상	SW, SP
사 질 토	밀 실	5 m 이하	1:0.8 ~ 1:1.0	SM, SP
		5~10 m	1:1.0 ~ 1:1.2	
	밀실하지 않음	5 m 이하	1:1.0 ~ 1:1.2	
		5~10 m	1:1.2 ~ 1:1.5	
자갈 또는 암괴 섞인 사 질 토	밀 실 또는 입도양호	5 m 이하	1:0.8 ~ 1:1.0	SM, SC
		5~10 m	1:1.0 ~ 1:1.2	
	밀실하지 않음 또는 입도불량	5 m 이하	1:1.0 ~ 1:1.2	
		5~10 m	1:1.2 ~ 1:1.5	
점 토 및 점 성 토		0~10 m	1:0.8 ~ 1:1.2	ML,MH,CL,CH
암괴 또는 호박돌 섞인 점성토		5 m 이하	1:1.0 ~ 1:1.2	GM, GC
		5~10 m	1:1.2 ~ 1:1.5	

* 붕적층에서는 강우시 활동이 자주 발생하므로 풍화 잔류토층보다 비탈면경사를 완화시키는 것이 바람직함.

표 2.10 우리나라 여러기관의 절토사면 표준경사

토질조건		땅깎기높이	비 탈 면 경 사			
			건설교통부	도로공사	토지공사	주택공사
토 사		5m이상	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:1.5
		0~5m	1:1.2	1:1.2	1:1.2	1:1.2
리핑암 (풍화암)		5m이상	1:0.7	1:1.0	1:1.0	1:1.2
		0~5m				1:1.0
발파암	연 암	5m이상	1:0.5~0.7	1:0.5	1:0.5	1:1.0
		0~5m				1:0.8
	경 암	5m이상				1:0.8
		0~5m				1:0.5

표 2.11 국내·외 기관의 절토사면 안전율기준

(1) 국내기준

● 건설교통부

구 분	최소안전율	내 용
건 기	Fs > 1.5	· 암반 : 인장균열이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음 · 토층 및 풍화암 : 지하수위 미고려
우 기	Fs > 1.1~1.2	· 암반 : 인장균열면이나 활동면을 따라 작용되는 수압을 H_w=0.5H로 가정하여 적용 · 토층 및 풍화암 : 지하수위는 지표면에 위치

출처 : 국도건설공사설계실무편람, 건설교통부(2003), p.89

● 한국도로공사

구 분	최소안전율	내 용
건 기	Fs > 1.5	· 암반 : 인장균열이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음 · 토층 및 풍화암 : 지하수위 미고려
우 기	Fs > 1.1~1.2	· 암반 : 인장균열면이나 활동면을 따라 작용되는 수압을 H_w=1/2H로 가정하여 적용 · 토층 및 풍화암 : 지하수위는 지표면에 위치 (지하수 영향은 합리적인 방법으로 고려할 수 있음)

출처 : 도로설계요령 제2권 토공, 한국도로공사(2000), p.118

(2) 국외기준

• 미국-Naval Facilities Engineering Command - Department of the Navy(미해군공병단)

구 분	최소안전율	내 용
Case1	Fs > 1.5	하중이 오래 작용할 경우
Case2	Fs > 2.0	구조물 기초인 경우
Case3	Fs > 1.25~1.30	일시적인 하중이 작용하는 경우 및 시공시
Case4	Fs > 1.15~1.20	지진 하중이 작용하는 경우

출처 : NAVFAC DM.7.1-329

• 영국 - National Coal Board (1970)

구 분	최소안전율	내 용
Case1	$1.5 > F_s > 1.25$	Pack Shear stress (UU Test)
Case2	$1.35 > F_s > 1.15$	Residual Shear stress (CD Test)
Case3	$1.35 > F_s > 1.15$	포화된 사질토의 경우 (C=0)
Case4	$1.20 > F_s > 1.10$	Case2, Case3 공히 적용되는 경우 (C=0, CD Test)

• 홍콩 - Geotechnical Engineering Office (1997)

Economic Risk \ Risk to Life		Recommended Factor of Safety against Loss of Life for a Ten-year Return Period Rainfall		
		Negligible	Low	High
Recommended Factor of Safety against Economic Loss for a Ten-year Return Period Rainfall	Negligible	> 1.0	1.2	1.4
	Low	1.2	1.2	1.4
	High	1.4	1.4	1.4

Note : (1) In addition to a factor of safety of 1.4 for a ten-year return period rainfall, a slope in the high risk-to-life category should have a factor of safety of 1.1 for the predicted worst groundwater conditions

(2) The factors of safety given in this Table are recommended values. Higher or lower factors of safety might be warranted in particular situations in respect of economic loss.

Typical Examples of Slope Failures in Each Risk-to-Life Category

Example	Risk to Life		
	Negligible	Low	High
(1) Failure affecting country parks and lightly used open-air recreation areas	V		
(2) Failures affecting roads with low traffic density	V		
(3) Failures affecting storage compounds (non-dangerous goods).	V		
(4) Failures affecting densely used open spaces and recreational facilities (e.g. sitting-out areas, playgrounds, car parks).		V	
(5) Failures affecting roads with high vehicular or pedestrian traffic density		V	
(6) Failures affecting public waiting areas (e.g. railway platforms, bus stops, petrol stations)		V	
(7) Failures affecting occupied buildings (e.g. residential, educational, commercial, industrial)			V
(8) Failures affecting building storing dangerous goods			V

Typical Examples of Slope Failures in Each Risk Category

Example	Economic Risk		
	Negligible	Low	High
(1) Failure affecting country Parks	V		
(2) Failures affecting rural (B), feeder, district distributor and local distributor roads which are not sole accesses.	V		
(3) Failures affecting open-air car parks.	V		
(4) Failures affecting rural (A) or primary distributor roads which are not sole accesses.		V	
(5) Failures affecting essential services which could cause loss of that service for a temporary period (e.g. power, water and gas mains).		V	
(6) Failures affecting rural or urban trunk roads or roads of strategic importance			V
(7) Failures affecting essential services, which could cause loss of that service for an extended period			V
(8) Failures affecting buildings, which could cause excessive structural damage			V

출처 : Geotechnical Manual for Slopes, GEO(1997), pp.183~184

표 2.12 안정검토를 필요로 하는 절토사면(한국도로공사, 1996)

조 건	검 토 사 항
침식에 약한 토질	수침시 전단강도에 의한 풍화토의 안정검토
고결도가 낮은 토사나 강한 풍화암	배수대책, 실내시험에 의한 안정검토
풍화가 급속히 진행된 암석	풍화가 빠른 암반에서의 안정검토
구성지반이 붕적층 혹은 퇴적층인 경우	배수대책, 실내시험에 의한 안정검토
Land sliding 등의 붕괴 이력이 있는 지반	현장 정밀조사 후 안정검토
지하수위가 높고 용수가 많은 곳	배수대책, 실내시험에 의한 안정검토
주변의 기존구조물에 나쁜 영향을 미칠 것으로 예상되는 경우	보강대책

2.3 토사사면의 안정해석 및 방법

사면안정해석은 현재 한계평형방법(Limit Equilibrium Meth od)을 주로 사용하고 있으며, 기본가정은 직선, 원호, 대수나선으로 가정된 표면이나 불규칙적인 표면을 따라 Coulomb 의 파괴표준이 만족된다는 것으로, 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 안정성을 해석하는 것이다. 문제를 단순화하기 위한 가정을 설정하고 이방법을 사용하면 간단한 정역학이론으로 해를 얻을 수 있게 된다. 한계평형법은 절성토 사면의 안정해석에 널리 사용되고 있으며, 이 방법의 유용성과 신뢰성은 현재까지 축적된 경험을 통하여 잘 알려져 있다. 한계평형이론에 의한 사면안정 해석방법은 여러 가지가 있으나 그 정확성은 강도정수와 사면의 기하학적 조건의 정확도 및 각 해석방법 고유의 정밀도에 따라 좌우된다.

대부분의 경우에 있어서는 강도정수와 기하학적 조건이 각 해석방법의 차이보다 결과에 더 큰 영향을 미치게 된다.

해석방법으로는 Φ = 0 해석법, Fellenius 방법, Bishop방법, Janbu의 방법, Spencer의 방법, Morgenstern and Price방법, 일반한계평형(GLE) 방법, 대수나선해석방법, 무한사면해석법, 흙쐐기해석법 등이 있다.

한계평형이론에 의한 사면안정해석법은 다음 4가지 특성을 공통적으로 가지고 있다.(Dun can & Wright , 1980)

① 안전율 F의 정의가 동일하다. 즉,

$$F = \frac{s}{\tau} \tag{2.6}$$

여기서, s = 전단강도(Shear Strength), τ = 전단응력(Shear Stress)

안전율이 전단강도의 힘으로 정의되기 때문에 안전율은 가장 중요한 미지수가 된다.

② 흙의 강도- 변위 특성은 non - britt le이며, 큰 변위가 일어나는 동안에도 전단강도의 값은 동일하다고 생각한다. 한계평형방법에서는 변위를 전혀 고려하지 않으므로 이러한 가정이 필요하게 된다. 따라서, 엄격히 말하자면 이 방법은 잔류강도(Residual Strength)가 최대강도(Peak Strength)보다 훨씬 적은 흙 사면 안정해석에는 부적당하다. 실제에서 이러한 난점은 최대강도 보다 적은 강도를 채택함으로 극복하고 있다.

③ 전단응력τ 와 활동면의 수직응력 σ를 산정하기 위하여 평형방정식을 사용하게 된다. 수직응력 σ는 다음과 같이 전단강도 S를 구하는데 필요하다.

$$S = c + \sigma \cdot \tan\psi \tag{2.7}$$

④ 한계평형법에 의한 사면안정해석은 부정정문제이다. 즉, 미지수의 수

가 방정식의 수 보다 많다. 따라서 해를 구하기 위해서는 미지수의 수와 방정식 수의 차이를 보완할 수 있는 개수만큼의 가정을 도입하고 있다. 즉, 방정식, 미지수 및 가정은 다음과 같이 설정하고 있다.

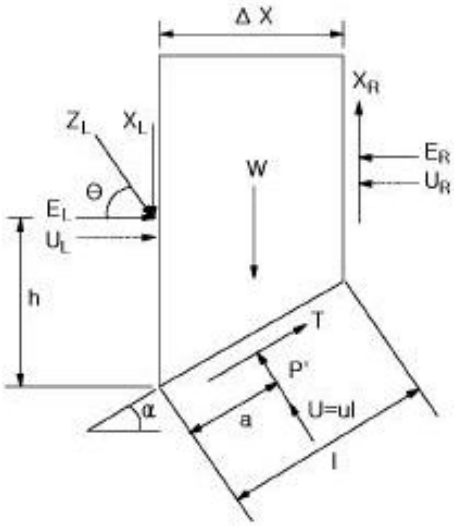


그림 2.3 절편에 작용하는 힘의 System

그림 2.3에서 보인 바와 같이 사면을 n개의 절편으로 나누면

방정식의 수는 3n 개 (연직력, 수평력, 모멘트평형) 이며, 미지수의 수는 (5n - 2) 개다. 또, 힘의 평형은 n 개의 유효수직응력값(각 절편마다 1개씩), n - 1개의 X값 (절편의 연직 경계면 마다 1개씩), n - 1개의 E값 (절편의 연직 경계면 마다 1개씩), 1개의 안전율을 나타내며, 힘의 평형에서 미지수는 (3n - 1)개 이다. 다음으로 모멘트 평형에서 n 개의 a 값 (a는 모멘트이 팔길이), n - 1개의 h값 (h는 E의 작용점) 이며, 미지수의 개수는 (2n - 1)개 이다.

힘과 모멘트평형 고려 시 총(5n - 2)개의 미지수가 있으므로 (2n - 2)차 부정정이 된다. 이 부정정차수를 극복하기 위하여 가정을 설정할 필요가

생기게 된다.

각 방법은 서로 다른 가정위에 성립되었으므로 계산된 안전율이 상이하며 어느 것도 정확한 해를 얻을 수는 없다. 그러나 다음과 같은 가정설정은 실용상으로 타당성이 있는 결과를 얻을 수 있다.

① 절편의 저면에 적용하는 $\bar{\sigma}$의 작용위치 a는 절편의 중앙점(또는 중심)이라고 가정해도 큰 오차는 일어나지 않는다.(n개의 미지수가 제거된다.)

② 절편의 측면에 적용하는 수직응력과 전단력의 합력이 수평면과 이루는 각 Θ나 위치 h를 가정함으로써 n - 1개의 미지수가 제거되어 (2n - 1)개의 미지수가 제거된다.

따라서, 미지수의 수가 방정식의 수보다 1개 더 적은 것이 된다.

즉, 미지수의 수 = 5n - 2

방정식의 수 = 3n

가정조건 수 = 2n - 1

한계평형이론에 의한 사면안정 해석법은 가정에 따라 일부는 직접 안전율을 계산할 수 있고(Linear Method), 나머지는 안전율을 얻기 위하여 반복계산을 할 필요가 생긴다.(Non Linear Method)

표 2.13 사면안정 해석법의 분류

구 분	사면안정 해석법
선형법	무한사면해석법 Sliding block 혹은 Wedge해석법 Φ_u = 0법 Fellenius법
비선형법	일반한계평형해석법 (GLE) Bishop 간편법 Janbu 간편법 Janbu 정밀법 Spencer법 Morgenstern & Price법

표 2.14 비선형 안정해석법의 가정과 안전율 계산근거

해 석 방 법	가 정	한 계 평 형 조 건	
		모멘트평형	힘평형
Fellenius법	X/E = tan x	○	
Bishop 간편법	$X_R - X_L = 0$	○	
Spencer법	X/E = tanΘ	○	○
Janbu 간편법	$X = 0$		○
Morgenstern-Price법	$X/E = \lambda f(x)$	○	○

가장 보편적으로 사용되는 사면안정해석방법에 대하여 설명하고 해석방법에 대한 정확성은 강도정수와 사면의 기하학적 조건의 정확도 및 각 해석방법 고유의 정밀도에 따라 좌우된다. 다음의 표는 사면의 기하학적 조건과 각 해석방법 고유의 정밀도를 요약하였으나, 대부분의 경우에 있어서 토성과 기하학적 조건이 해석방법 차이보다 결과에 더 큰 영향을 미치게 되므로, 강도정수를 정확히 산정하는 것이 중요한 사항이 됨을 특히 유의하여야 한다.

표 2.15 사면안정 해석법의 종류

방 법	절편에 대한 가정
일반한계평형법(G.L.E)	$\theta = X/E = \lambda f(x)$
Fellenius방법	절편저면에 평행
수정 Bishop방법	수평(수직절편력 없다.)
Janbu의 간편법	수평
Spencer의 방법	평형(Θ = 일정)
Morgenstern and Price방법	절편에서 절편까지 측면력 경사(Θ)의 변화 패턴 : Θ = X / E = f (x), f(x)값은 각 내부절편경계로 가정되고, λ값은 미지수.
흙쐐기해석법	경사정의
대수나선사면해석	파괴면의 모양이 대수나선이다
무한사면해석법	사면에 평형

2.3.1 단일활동체 해석방법

가. 무한사면의 안정해석

그림 2.4에 보인 바와 같이 경사각 β인 무한사면(Infinit e Slope)이 지표면과평행한 평면활동면을 따라 활동을 일으키는 경우, 무한사면안정 해석방법이 편리하다.(Skempt on & Delory , 1957.)

깊이에 비해서 사면의 길이가 길 때 파괴면은 사면에 평행하게 형성된다. 사면의 길이는 거의 무한대이므로 양 끝의 영향은 무시한다. 침투수압이 사면에 평행하게 작용한다고 가정한다. 또, 임의의 분할면 양 끝의 수직면에 작용하는 절편력의 크기가 같고 반대 방향으로 작용하며, 이러한 응력상태는 어느 분할면에서나 같다고 가정한다.

그림 2.4에서 $Q_L=Q_R$ 로 가정하면 파괴면에 평행하게 발생하는 전단력 T는

$$T = W \cdot \sin\beta = \tau \tag{2.8}$$

따라서, 식(2.8)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$s = \frac{W}{b} cos\beta \sin\beta \tag{2.9}$$

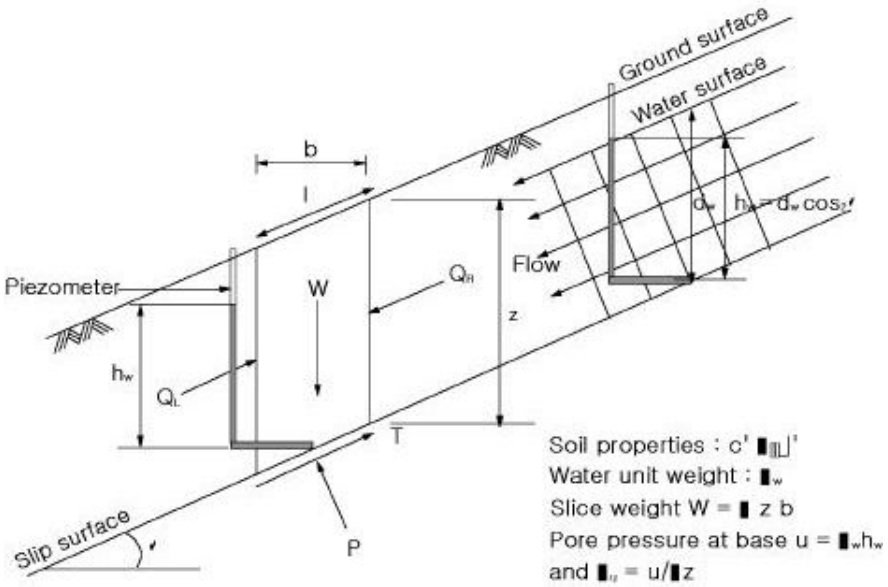


그림 2.4 무한사면해석(Haefili, 1948 : Skemption & Delry, 1957)

파괴면에 수직한 방향의 힘 P 는

$$P = W \cdot \cos\beta = \sigma \cdot 1 \tag{2.10}$$

따라서, 식(2.10)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \frac{W}{b} cos^2\beta \tag{2.11}$$

파괴표준에서 전단강도는

$$s = c' + (\sigma - u)\tan\Phi' \tag{2.12}$$

동원되는 전단강도는

$$\tau = \frac{S}{F} \tag{2.13}$$

여기서 식(2.12)에 식(2.9)와 식(2.10)을 대입하여 정리하면 식(2.14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{W}{b} cos\beta \sin\beta = \frac{1}{F}(c' + [\frac{W}{b} cos^2\beta - u] \tan \Phi' \tag{2.14}$$

따라서 안전율 F에 대하여 정리하면 식(2.15)과 같다.

$$F = \frac{c' + [rz \cos^2\beta - u]\tan\Phi'}{rz \sin\beta\cos\beta} \tag{2.15}$$

나. 흙 쐐기 해석법

Wedge 방법은 임계활동면이 비원호임이 명백한 경우 즉 2개 또는 3개의 평면으로 이루어진 경우에 주로 적용하는 사면안정 해석법이다. 이 방법의 개요는 그림 2.5에 제시되어 있다.

이 방법은 힘의 평형만을 고려하고 있다. 그림 2.5에서 알 수 있는 바와 같이 미지수가 방정식 수보다 많아 보통 Z의 경사각 Θ를 가정하여 부정정을 극복한다. F를 가정하고 힘다각형이 폐합되도록 시행착오법(Trial and Error)을 사용하여야 한다. 마지막 흙쐐기가 평형상태에 있으면 가정한 F가 정답이 된다.

이 방법으로 구한 F의 값은 가정한 Θ값에 따라 상당히 예민하게 달라진다. Duncan and Wright(1980)에 의하면 보다 정밀한 방법으로 안전율이 2.27(오차 ±15%)인 사면을 이 방법으로 해석한 결과 F=2.98이 되어 약

30%가 크게 평가되었다. 이때 Θ는 지표면의 경사와 같에 보았다. 이 경우 만약 정확한 안전율이 1.0이나 이 방법으로 구한 F=1.3으로 산정할 것이므로 심각한 문제가 될 수 있다.

Z의 경사각 Θ를 가정하는 방법은 여러 가지가 제안되었다. 첫째, Θ를 사면의 경사각과 같게 하는 방법, 둘째, $\theta = \rho_m$으로 보는 방법, 단 $\tan\rho_m = \tan\frac{\rho'}{F}$ 셋째, Low and Karfiath(1960)의 방법으로 Θ를 경계면 상단의 사면경사각과 경계면하단의 활동면의 경사각의 평균치로 취하는 방법 등이다.

Lambe and Whitman(1969)에 의하면 첫째와 둘째 방법으로 계산한 안전율은 그 차이가 미미하다고 한다. Duncan and Wright(1980)은 셋째 방법을 추천하고 있으며 ρ 또는 ρ'가 클수록 이 방법은 더욱 정확한 결과를 산정한다고 한다.

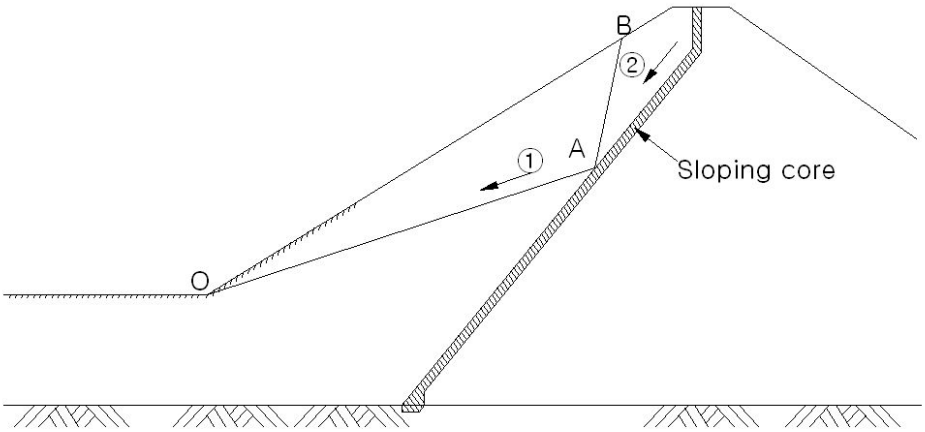


그림 2.5 흙쐐기해석(Nash, 1987)

다. Φ=0 해석법

원호활동면에 대한 안정해석방법 중 가장 간단한 것이다. 이 방법의 개

요는 그림 2.6에 제시되어 있다. 사면의 파괴는 활동면 보다 위 쪽에 있는 흙이 강체로서 회전함으로써 일어나게 되며, 활동면에는 비배수강도 c_u가 작용하게 된다. 안전율은 활동원호 중심에 대한 모멘트를 취하여 구하게 된다. 흙의 전단강도가 전 활동면에 걸쳐 일정하지 않을 때에도 이 방법을 쉽게 사용할 수 있다.

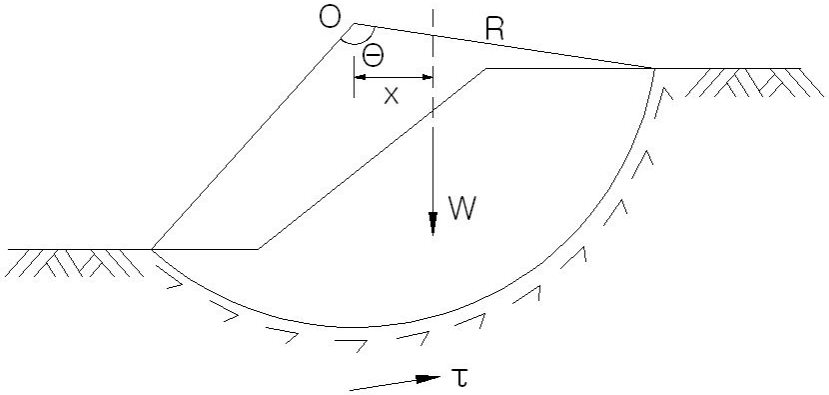


그림 2.6 ϕ=0의 모멘트해석

이 방법은 ϕ=0해석법 이므로 완공직후(End of Construction) 조건, 예를 들어 연약점토상에 축조된 제방의 단기안정해석에 적당하다. 일반적으로 이 방법은 급격한 하중의 변화가 일어난 경우를 제외하고는 자연적인 점토 사면해석에는 부적당하다(Anderson M.G and Richards K.S, 1987)

2.3.2 절편법

일반적으로 토사사면에 사용되는 안정해석 방법으로 임계활동면에서 역학적인 평형관계만을 해석하는 한계평형해석법이 있는데, 이는 근본 원리상 사면안정 해석뿐만 아니라 토압, 지지력 등과 같은 지반공학적 문제를 설명하고 해결하는데 기초를 이루는 방법으로 대상 지반을 하나의 토체로

간주하여 임의의 파괴면에 대한 힘 또는 모멘트의 평형조건을 고려하는 것이다.

한계평형해석법은 굴착에 따른 비탈면 내 응력변화 및 그에 수반되는 변형 거동상태 해석이 가능한 일반적 수치해석 방법과는 달리 변형과 관련된 지반문제 해석에 있어서는 적용될 수 없다는 단점이 있으나, 이해가 쉽고 사용이 간편하다는 점과 과거 많은 사면안정 해석에 대한 적용사례로 그 신뢰성이 입증된 방법으로 사면안정 해석방법으로 가장 많이 사용되고 있다.

한계평형이론에 의한 사면안정 해석방법은 여러 가지 관점에 의해 분류될 수 있으나 크게 활동토체를 단일토체로 보는 방법과 활동토체를 여러 개의 수직절편으로 분할하는 절편법으로 구분할 수 있는데, 이중 절편법에 의한 사면안정 해석법이 널리 이용되고 있다.

절편법에 의한 사면안정 해석방법은 많은 연구자들에 의해 여러 가지 방법들이 제안되었으나, 안전율 산정을 위한 평형조건, 해석 활동면의 형상, 절편의 작용력 및 작용위치 가정 등에서 다소 차이가 있을 뿐 그 근본적 방법에는 차이는 없는 것으로 알려지고 있다.

일반적으로 토사사면의 안정성 해석에 널리 사용되고 있는 한계평형해석 방법은 활동면을 따라 지반에 작용하는 전단응력과 전단저항력의 크기를 비교하여 사면의 안정성을 해석하는 방법으로 한계평형이론에 의한 사면안정 해석방법은 여러 가지가 있으나, 그 정확성은 강도정수와 사면의 기하학적인 조건의 정확도 및 각 해석방법 고유의 정밀도에 따라 좌우되며, 여기서 기하학적인 조건은 파괴면의 형상을 결정하는 것으로서 파괴면이 평면, 원호, 임의의 불규칙한 면인가 또는 이들의 복합적인 형태인가를 결정하는 문제로서 토사사면의 파괴면은 일반적으로 곡면이지만 수평방향의 지층, 불연속면의 존재 시에는 평면파괴가 자주 일어나고 있다.

표 2.16 한계평형법을 이용한 토사사면 안정해석 방법의 종류

해석방법		활동면형상	평형만족조건				계산		비고
			Overall of moment	Individual Slice moment	Vertical force	Horizontal force	수계산	컴퓨터계산	
단일활동토체해석방법	Infinite Slope (Skempton & Delory, 1957)	평면	-	-	o	o	o	o	·지표면과 평행한 무한비탈면이 지표면과 평행한 평면적 파괴 예상시 적용
	Wedge Analysis	평면	-	-	o	o	o	o	·비원호의 2개, 3개의 평면에 의한 파괴 예상시 적용
	Friction Circle method	원호	-	-	o	o	o	o	·단일한 점성토 또는 사질토 지반의 비탈면 안정 해석에 유용 ·활동면상 반력 작용선은 활동원 중심으로 하는 마찰원에 접한다는 사항을 토대로 작용력과 저항력간의 평형조건으로부터 안전율 산정
수직절편으로 분할하는 절편법	Fellenius method (Ordinary Slice Method) (Fellenius, 1927)	원호	o	-	-	-	o	o	·절편법중 가장 간단한 방법임 ·완만비탈면에 대해 간극수압을 감안한 유효응력해석시 안전율 과소평가 ·깊은 원호 활동면이고 원호중심각(α)의 변화가 클 경우 해석결과 오차 증대
	Bishop's simplified method (Bishop, 1955)	원호	o	-	o	-	o	o	·절편법중 가장 널리 이용되며 편리성과 신뢰성이 매우 양호함 ·선단부의 절편 저면 경사각 α가 클 경우 안전율이 과대평가 ·본방법에 의한 안전율 Fellenius 방법에 의한 결과보다 다소 큼

해 석 방 법		활동면형상	평 형 만 족 조 건				계 산		비 고
			Overall of moment	Individual Slice moment	Vertical force	Horizontal force	수계산	컴퓨터계산	
수직절편으로 분할하는 절편법	Janbu's simplified method (Janbu, 1968)	임의의 형상	-	-	o	o	o	o	·절편양측면에 작용하는 수직전단응력을 없는 것으로 가정하여 부정정 차수 감소 ·엄밀해석법을 계산의 간편성을 위해 힘의 평형조건만을 감안하여 간편화 시킨 방법으로 이로 인한 부정확성을 보정계수(fo)를 감안해 줌으로서 보완
	Spencer's method (Spencer, 1967)	임의의 형상	o	o	o	o	-	o	·각 절편 경계면상의 작용하는 전단 력을 별도로 감안치 않은 대신 합력으로서 양측에서 서로 평행한 수평력으로 감안 (작용각Θ는 일정) ·해석적으로 정해에 가까운 안전율을 산정하므로 신뢰성 높음
	G.L.E method (Fredlund & Krahn, 1977)	임의의 형상	o	o	o	o	-	o	·Bishop, Janbu, Spencer 방법 등 을 포괄할 수 있는 해석방법 ·비원호 활동해석시 가상 회전중심(Frictional center of Rotation)을 사용하며 모멘트 평형, 힘의 평형을 개별로 고려하여 각각에 대한 안전율 산정이 가능

이때 각 절편 사이의 힘 일반적으로 사용되고 있는 한계평형법으로는 Fellenius법, Bishop법, Janbu법, Spencer법, Morgenstern-Price법 등이 있

으며 본장에서는 주로 안정성 평가에 많이 사용되는 Fellenius법, Bishop법, Janbu법에 대해서 간략하게 정리하였다.

가. Fellenius법

파괴가 점 O에 중심을 가진 원통형 절편의 회전에 의하여 발생하며 점 O에 대한 총모멘트 평형으로부터 안전율을 구한다. 그림 2.7과 같이 이의 합력은 절편의 바닥에 평행하다고 가정한다.

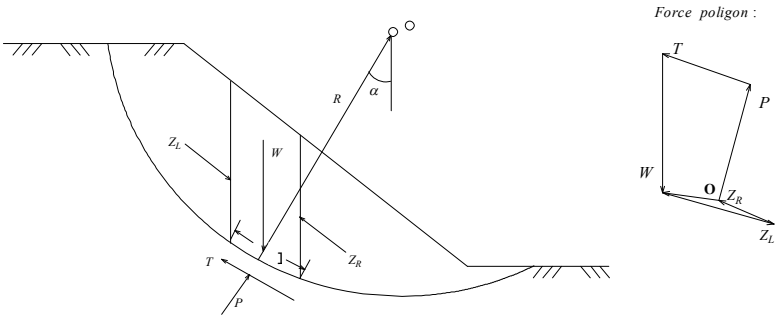


그림 2.7 Fellenius법에 의한 사면안정 해석

절편의 바닥에서 파괴식 $s = c + (\sigma - u)\tan\phi$ 이고, 활동 전단강도는 $\tau = s/Fs$ 로 표현할 수 있다(수직응력 σ, 전단응력 τ, 공극압 u).

여기서, $P = \sigma l$, $T = \tau l$ 이므로 $T = \frac{1}{F}(cl + (P - ul)\tan\phi)$ 이다.

절편사이의 힘의 합력이 절편의 바닥에 평행하다고 가정하면 $P = W\cos\alpha$ 이고 점 O 에 대한 전체 모멘트의 평형으로부터 $\sum WR\sin\alpha = \sum TR$ 이 된다.

따라서 $\sum W\sin\alpha = \sum \frac{1}{F}(cl + (P - ul)\tan\phi$이므로 안전율 Fs 는 식 (2.16)과 같다.

$$Fs = \frac{\Sigma(c\,l + (W\cos\alpha - u\,l)\tan\phi}{\Sigma\,W\sin\alpha} \tag{2.16}$$

여기서, W : 절편 흙의 전체중량 (kN/m^3), α : 경사각 (°), c : 흙의 점착력 (kN/m^2), l : 절편바닥 길이 (m), ϕ : 흙의 내부마찰각 (°)

상기 식은 우측변에 안전율 Fs 를 포함하고 있지 않기 때문에 수작업으로 계산을 수월하게 할 수 있지만 절편 사이의 힘에 대한 가정에 오류가 있어 결과치가 최대 60%까지 오차가 있을 수 있다(Whitman and Bailey, 1967).

나. Bishop 간편법

본 연구에서 해석프로그램에 적용한 해석방법으로 이 방법은 절편법 가운데 가장 널리 사용되고 있으며, 그 결과는 이론상으로 "정확한" 다른 방법과 별 차이가 없다. 즉 이 방법의 편리성과 신뢰성은 많은 경험으로부터 입증된 셈이다.

그림 2.8와 같이 파괴가 점 O 에 중심을 가진 원통형 절편의 회전에 의하여 발생하며 점 O 에 대한 총모멘트평형으로부터 안전율을 구한다. 이때 각 절편 사이의 힘들은 수평하다고 가정한다.

절편의 바닥에서 파괴식 $s = c + (\sigma - u)\tan\phi$ 이고, 활동 전단강도는 $\tau = s/Fs$ 로 표현할 수 있다.

여기서, $P = \sigma l$, $T = \tau l$ 이므로 $T = \frac{1}{F}[cl + (P - ul)\tan\phi]$ 이다.

수직방향의 힘에 대하여 $P\cos\alpha + T\tan\alpha = W - (X_R - X_L)$의 관계가 있는데 절편력 사이의 힘이 수평방향이라는 가정으로부터 $X_R = X_L = 0$ 이므로 절편 바닥에 수직하는 힘 P는 식(2.17)과 같다.

$$P = [W - \frac{1}{F}(c\,l\sin\alpha - u\,l\tan\phi\sin\alpha)]/m_a \tag{2.17}$$

여기서, $m_a = \cos\alpha + \frac{\tan\phi \times \sin\alpha}{Fs}$ 이며 이를 그림으로 표현하면 그림 2.9와 같다.

점 O 에 대한 전체 모멘트의 평형으로부터 $\sum WR\sin\alpha = \sum TR$ 이 된다. 상기 식들을 정리하여 안전율 Fs로 표현하면 다음과 같다.

$$Fs = \frac{\Sigma[(c\,b + (W - ub)\tan\phi]/m_a}{\Sigma\,W\sin\alpha} \tag{2.18}$$

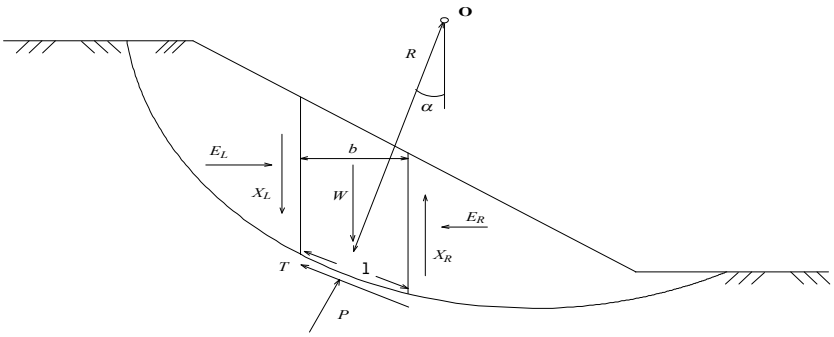


그림 2.8 Bishop법에 의한 사면안정 해석

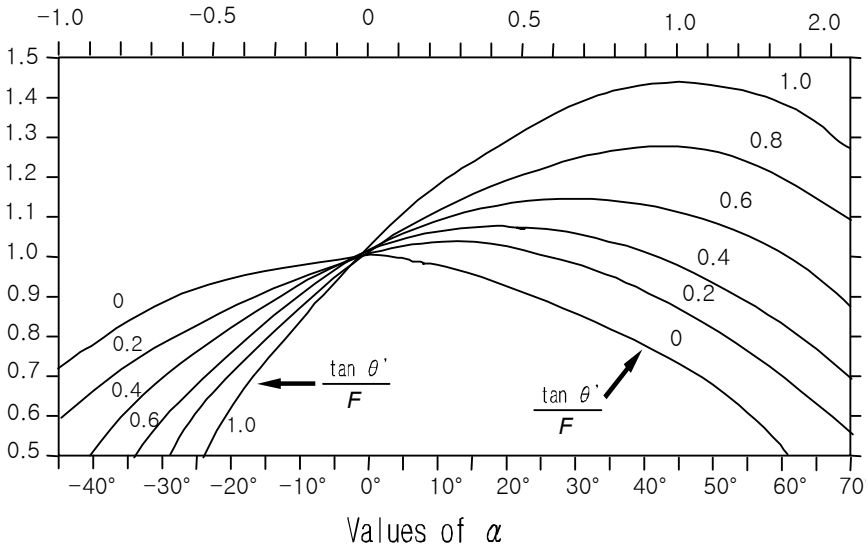


그림 2.9 절편 바닥의 경사와 m_a와의 관계

다. Janbu 간편법

그림 2.10과 같이 파괴가 비원호 파괴면에 대한 원통형 절편의 회전에 의하여 발생하며 총 힘의 평형으로부터 안전율을 구한다. 이때 각 절편 사이의 전단력이 0이라고 가정하기 때문에 각 절편의 바닥에 작용하는 총 수평력은 Bishop법과 동일하나 보정계수를 도입한다.

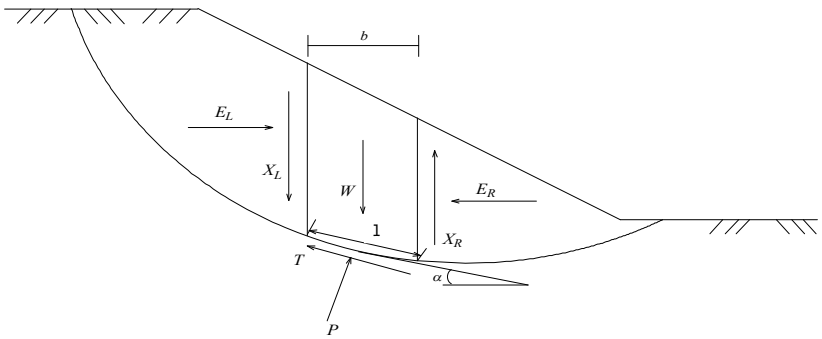


그림 2.10 Janbu법에 의한 사면안정 해석

절편의 바닥에서 파괴식 $s = c + (\sigma - u)\tan\phi$ 이고 활동 전단강도는 $\tau = s/Fs$ 로 표현할 수 있다.

여기서, $P = \sigma\, l$, $T = \tau\, l$ 이므로 $T = \frac{1}{F}(c\,l + (P - u\,l)\tan\phi)$ 이다.

수직방향의 힘에 대하여 $P\cos\alpha + T\sin\alpha = W - (X_R - X_L)$의 관계가 있는데 절편력 사이의 힘이 수평방향이라는 가정으로부터 $X_R = X_L = 0$ 이므로 절편 바닥에 수직하는 힘 P 는 식(2.19)과 같다.

$$P = [\,W - \frac{1}{F}(c\,l\sin\alpha - u\,l\,\tan\phi\sin\alpha)]/m_a \qquad (2.19)$$

여기서, $m_a = \cos\alpha + \frac{\tan\phi \times \sin\alpha}{Fs}$ 이다.

절편바닥에 대하여 평행한 힘들은 $T + (E_R - E_L)\cos\alpha = (W - (X_R - X_L)\sin\alpha)$ 이다.

$X_R = X_L = 0$ 이므로 T 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$E_R - E_L = W\tan\alpha - \frac{1}{F}(c\,l + (P - u\,l)\tan\phi)\sec\alpha$$

전체 힘의 평형상태에서 지표면에 하중이 작용하지 않는 경우에 $\sum(E_R - E_L) = 0$ 이므로

$$\sum(E_R - E_L) = \sum W \tan\alpha - \frac{1}{F}(c\,l + (P - u\,l)\tan\phi)\sec\alpha = 0$$

이다.

따라서 전체 힘의 평형력에 의한 안전율은

$$F_o = \frac{\Sigma\,(c\,l + (P - u\,l)\tan\phi)\sec\alpha}{\Sigma\,W\tan\alpha}$$ 이다.

절편사이의 전단력을 고려하기 위하여 Janbu는 보정계수 f_o를 도입하여 안전율을 $F_s = f_o F_o$ 로 하였다.

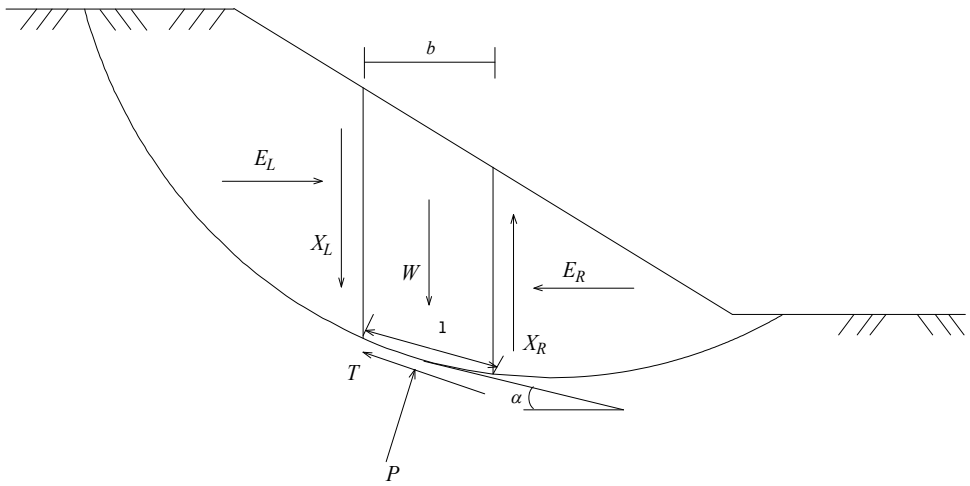


그림 2.11 Janbu법에서 사용되는 보정계수 f_o

라. 일반 한계평형(GLE)절편법

얼마 전까지만 해도 여러 가지 사면안정 해석법은 서로 독립적이며 상호 관계가 그다지 밀접하지 않는 것으로 생각하였다. 각 방법의 해법을 차례

로 소개하고 각 방법에 내포된 가정을 밝히는 것이 이 문제를 기술하는 내용이였다. 그러나 Fredlund and Krahn(1977)이 일반한계평형(General limit equilibrium : GLE) 절편법을 발표함으로써 이제는 각 해석방법의 차이점 보다는 유사성을 집중적으로 연구할 수 있게 되었다.

GLE 절편법의 개요가 그림 2.12에 제시되어 있다. 안전율을 구하는 식은 원호활동면과 비원활동면에 대해 동일하게 되는데 비원호활동면인 경우에는 가상회전 중심(Fictional center of Rotation)을 사용하게 된다. 모멘트 평형과 힘의 평형을 개별로 고려함으로써, 모멘트에 대한 안전율(Fm)과 힘에 대한 안전율(Ff)를 구하는 두 개의 식을 얻을 수 있다. 그림 2.12에 보는 바와 같이 각 절편에 대하여 연직방향 힘의 평형을 생각하여 절편 저면의 전수직력 P를 식 (2.20)과 같이 구할 수 있다.

$$P = [\,W - (X_R - X_L) - \frac{1}{F}(c\,l\sin\alpha - u\,l\,\tan\phi\sin\alpha)]\frac{1}{m_a} \qquad (2.20)$$

여기서, $m_a = \cos\alpha(1+\tan\alpha\frac{\tan\phi}{Fs})$ 이다.

함수 m_a의 값은 그림 2.9에서 구한다.

P를 구하는 식에 절편간 작용력 X_L과 X_R이 포함되어 있으므로 이 문제를 정정화시키기 위해서는 가정을 도입해야 한다. 그리고 이 가정에 따라 P를 구하는 식이 달라지게 된다.

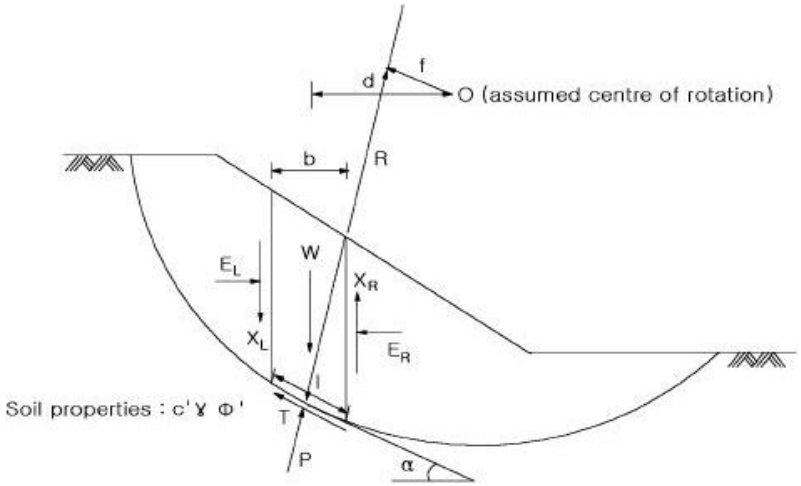


그림 2.12 GLE법(Fredlund and Krahn , 1977)

절편간 작용력에 관한 가정의 차이와 모멘트평형만을 고려하는가, 힘의 평형만을 고려하는가, 또는 두 가지 평형을 모두 고려하는가에 따라 여러 가지 사면안정 해석방법이 성립하게 된다. 이 사실이 표 2.17에 제시되어 있다. 즉 Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern and Price의 방법은 GLE 방법의 특수한 경우에 해당되는 셈이다. 물론 이들의 사면안정 해석방법이 GLE방법보다 먼저 독립적 입장에서 발표되었지만 이제 와서는 GLE 절편법으로 모두 표현될 수 있다고 말할 수 있다.

표 2.17 해석방법들의 한계평형조건

해 석 방 법	가 정	한 계 평 형 조 건		
		모멘트	수직력	수평력
Fellenius법	절편의 합력은 각 절편의 바닥에 평행	○	×	×
Bishop 간편법	절편의 합력은 수평방향	○	×	×
Janbu 간편법	절편축력은 수평방향	○	○	○
Spencer법	X/E 는 모든 사면에 대해 일정	○	○	○
Morgenstern-Price법	$X/E = \lambda f(x)$	○	○	○

절편법에 의하여 사면안정을 분석하는 방법들은 절편 측면에 작용하는 힘의 분력에 대한 가정을 달리하여 활동면의 수직응력과 전단응력을 다르게 산정함으로써 안전율이 다르게 산정되게 된다. 각 해석방법들의 평형식 조건 유무는 표 2.6과 같다. 그러나 각 해석방법으로 구한 안전율의 수치적 차이에 대한 연구결과에 따르면 그 차이는 그리 크지 않다고 보고되고 있다.

2.3.3 프로그램 해석법

현행 원호활동에 대한 안정계산은 "CHAMP" 또는 "STABL" 등의 컴퓨터 프로그램을 이용하며, 이와 같은 프로그램 해석방법은 가상 원호활동면의 중심점으로 예상되는 부분에 Grid를 작성하여, Grid의 각 절점을 중심점으로 한 무수한 가상 원호활동면에 대하여 최소사면안전율이 구하여지는 곳을 찾는 방법이다.

원호활동에 대한 안정계산은 한계평형원리에 입각한 Fellenius방법이나 Bishop방법 등의 사면안정 해석법을 적용하여 해석한다. 원호활동파괴에 대한 안전율은 다음의 식(2.21)와 같이 나타낼 수 있으며 활동토괴가 미끄러져 내려가려는 힘 F_d 혹은 M_d와 이에 저항하려는 힘 F_r 혹은 모멘트 M_r의 비로 안정성을 검토할 수 있다. 여기서, 저항력 F_r 혹은 모멘트 M_r은 토괴가 활동시 발생되는 마찰력 및 점착력에 의한 전단저항력 F_{rs} 혹은 저항모멘트 M_{rs}와 말뚝에 의한 저항력 F_{rp} 혹은 모멘트 M_{rp}으로 활동모멘트M_d 로 나누면 다음 식과 같다.

$$F_s = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_{rs} + M_{rp}}{M_d} = \frac{\sum(W\cos\alpha - ul)\tan\phi + \sum cl}{\sum W\sin\alpha} \qquad (2.21)$$

여기서, M_r는 저항모멘트($M_{rs} + M_{rp}$), M_d는 활동모멘트, W는 토괴의 중

량, u는 간극수압, c는 점착력, l는 사면길이, Φ는 내부마찰각, α는 사면 경사각이다.

표 2.18 사면해석 프로그램 개요

프로그램	개발자	해석방법	활동면 형태	활동면 추정 유무	외부 하중 적용 유무	간극수압	
						정수압	간극수압 계수
STABR	Guy Lefebvre (1971)	Fellenius Bishop	원호	○	×	○	×
STABGM	J.M.Duncan B.K.Low (1984)	Fellenius Bishop	원호	○	○	○	×
PCSTABL5	J,R Carpenter (1986)	Bishop Janbu Spencer	원호 비원호 Block	○	○	○	○
SLOPE8R	S.G.Wright J.M.Duncan (1968)	Spencer	비원호	×	×	○	×
PC-SLOPE	Fredlund Krahn Geo-Slope)	Fellenius Janbu Bishop Morgenstern-Price Spencer	원호 비원호 Block	○	○	○	○

2.3.4 수치해석법

일반적으로 토사사면에 사용되는 수치해석법으로는 유한요소법, 유한차분법, 개별요소법 등이 있다.

수치해석법은 지반의 변형특성을 고려한 탄성 또는 탄소성 해석방법으로 지반정수 산정 시 많은 현장시험 및 실내시험이 필요하며 해석상의 소요시간이 길고 그 결과에 대한 신뢰도가 떨어지는 단점이 있는 것으로 알려져 있다.

유한요소 해석은 사면 변형에 대한 예측에 가장 적합한 방법이라 할 수 있으며. 이 해석방법은 지반 내에서 발생하는 응력분포 및 변형의 크기와 방향을 계산할 수 있으므로 이를 통하여 그림 2.12에서 보는 바와 같이

변형의 크기와 형태를 예측할 수 있는 방법이다.

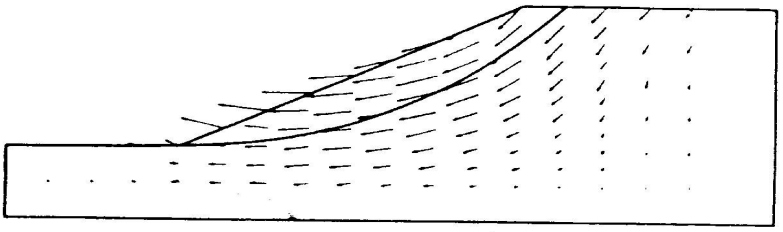
유한요소 해석은 1950년대에 구조 해석에 처음 도입되었고, 그 이후 토질공학에서는 1960년대부터 사용하여 거의 모든 토목구조물 뿐만 아니라 터널의 거동 해석에 이르기까지 광범위하게 이용되었다. 지금까지의 사면안정에 이용된 유한요소해석은 성토사면 중 주로 댐의 안정문제의 검토에 많이 적용되었다. 최근에는 성토사면에 대한 검토 뿐 아니라. 도심지의 굴착과 관련된 굴착사면에 대한 변형 해석에도 적용되고 있다. 또 유한요소해석은 굴착사면의 변형을 공사 단계별로 예측할 수 있어 흙막이공의 설계에 많이 이용되며, 지금까지 검토된 사면해석을 보면 시공 단계별 안정에 대한 검토, 공사 직후 최종 단면의 안정에 대한 검토, 장기간의 안정에 대한 검토, 지진과 같은 동하중에 대한 검토 등이다.

사면안정의 평가에 있어서 유한요소 해석방법의 적용은 그리 간단한 문제는 아니지만 응력과 변형의 해석을 위하여 유한요소법의 이론은 미소변형율의 개념을 근거로 한 탄성이론에 기초를 두고 있어 초기에는 지반을 탄성체로 가정한 탄성해석이 주도하였다. 이후, 지반은 탄성체가 아니므로 경우에 따라 큰 변형을 유발하고 있어 이러한 지반에 유한요소해석을 적용하기 위하여 기존의 해석에 다음 두 가지 문제를 고려하려는 노력을 해오고 있는데, 그 중 첫째는 큰 변형을 수용할 수 있는 유한요소 이론식의 정립이며, 둘째로 비선형 거동을 하는 지반에 대하여 정교한 응력-변형률의 거동식을 구성하는 것으로 아직까지 위의 두 가지 문제가 완벽하게 해결되지 못한 상태이다.

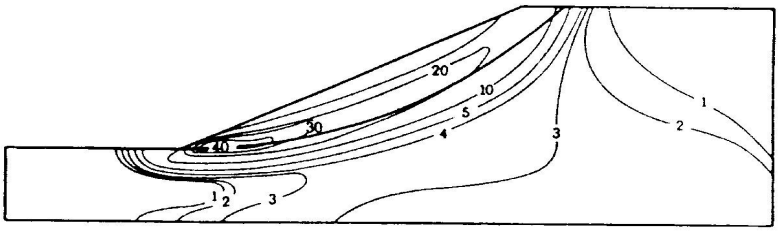
유한요소법은 본래 물리적 또는 공학적인 문제에서 성립된 미분방정식을 수치 해석적으로 풀기 위한 방법으로 이용되고 있다. 이러한 미분방정식을 풀기 위해서 "Weighted Residual Methods" 라고 알려진 고전적인 방법으로 유한요소 해석을 위한 식이 정립되었다.

유한요소 해석은 변형에 대한 예측 이외에도 절토사면과 관련하여 제방의 인장 균열에 대한 예측, 과잉 간극수압으로 인한 제방의 균열에 대한

예측, 국부 파괴가 발생되는 지역 및 전반적인 사면안정에 대한 예측 등을 할 수 있으며 유한요소 해석에 의하여 얻어진 변위의 크기와 방향을 통하여 사면의 안정성의 여부를 직접적으로 판단할 수 있다.



(a) 변위에 대한 벡타



(b) 소성 전단 변형률의 분포도

그림 2.13 사면에 대한 유한요소해석 결과에 따른 변위량

위와 같이 유한요소 해석을 통한 사면안정 해석은 한계평형이론을 근거로 한 기존의 일반적인 절편법과 거의 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그리고 유한요소 해석의 장점으로는 시공단계별 사면의 변형에 대한 예측, 국부적인 파괴를 일으키는 지역의 예측, 변형 벡터를 통한 파괴형태의 예측 등을 들 수 있다.

유한요소 해석에서 가장 큰 과제는 토질의 거동을 정확히 나타낼 수 있는 거동 모델에 대한 연구이다. 즉, 토질의 거동모델에 따라 해석 결과는 차이를 보이고 있으며. 최근에 이러한 문제를 해결하기 위해 대단히 많은

거동모델들이 연구되어 유한요소 해석에 적용되고 있지만, 아직까지도 Hyperbolic모델, Mohr-Coulomb모델, 또는 Drucker - Prager모델 등이 많이 사용되고 있다. 이는 모델에 따른 토질정수를 결정하기가 쉽고 만족할 만한 해석 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

제3장 사면안정 해석프로그램

3.1 사면안정 해석프로그램의 특성

3.1.1 SLOPE/W

가. SLOPE/W 프로그램의 배경

SLOPE/W 프로그램은 캐나다의 Geo-slope사에서 개발, 상용화한 사면안정해석 프로그램으로 윈도우 환경이 발전함에 따라서 User-friendly한 모델링 방법을 추구하며 프로그램의 버전이 몇 년 간격으로 업그레이드되고 있다. 2006년 현재 최신 버전은 SLOPE/W 2004 v6이며, 이전 버전에 비해서 모델링 방법이 많이 진화되었다. 특히, Region이라는 새로운 메뉴의 출현으로 복잡한 형태의 사면 모델링을 보다 간편하게 작업할 수 있게 되었다. 또한, 같은 회사 다른 제품들 간에 호환성이 강화되어서 coupled 해석이 보다 용이해졌다.

GeoStudio는 Main 창에서 각 프로그램이 지원되어 동시 작업에 있어 효율성이 높아졌다. GeoStudio는 각 제품별 구매 및 독립적 작업수행이 가능하며, 제품별 데이터 통합관리도 가능하다. 활성화 시켜놓은 제품 간에 연계 모델링 및 해석이 가능하다.

나. SLOPE/W 프로그램의 특징

SLOPE/W 에서는 한계평형해석이론을 이용한 절편법 중에서 다음과 같은 여러 가지 방법을 기본적 또는 선택적으로 사용할 수 있다. 즉 Fellenius방법, Bishop의 간편법, Janbu의 간편법, Spencer방법, Morgenstern-Price방법, Lowe-Karafiath방법, Corps of Engineers방법 등을 사용할 수 있다.

Slip surface도 circular slip, fully specified slip, composite slip 중 선택

사용이 가능하며 최대 15개의 층까지 토질토층으로 이루어진 사면의 해석이 가능하다.

Mohr의 파괴포락선은 곡선으로 표시되므로 이것을 흙에 적용하는데 있어서는 대단히 불편하다. 이에 따라 Coulomb의 전단강도에 대한 개념을 도입하여 이것을 직선으로 나타낸 Mohr-Coulomb의 포락선을 적용하였으며, 사면 주변에 작용하는 지진하중, 지표면 상재하중, 선하중 등을 고려할 수 있으며, 사면의 완전침수, 부분침수, 인장균열 등을 고려할 수 있다.

3.1.2 TALEN 97

가. TALEN 97 프로그램의 배경

프랑스의 TERRASOL사에서 개발한 TALREN 4는 지반구조물의 안정성 해석 프로그램이다. 이 프로그램은 수리 및 지진에 관한 자료와 지반에 설치되는 여러 가지 보강재(Nail, anchor, brace, reinforcing strip, geotextile, pile, micropile, sheetpile 등)도 고려하여 계산할 수 있다. 이 프로그램은 실제 구조물의 설계와 지반과 구조물사이의 관계에 대한 실험적 연구와 병행되어 개발되었다.

나. TALEN 97 프로그램의 특징

이 프로그램은 지반의 보강재(Nail, anchors, reinforcing strip, braces, piles, etc)의 유무에 관계없이 지반구조물의 안정성(절토 및 성토 등)을 평가할 수 있다. TALREN 97는 한계평형상태에서 지반파괴면을 고려하는 고전적인 사면안정방법(Slope Stability Method)에 근거를 두고 있다. 이 방법의 유효성은 40년 동안 천 여건 이상의 실제 적용에서 증명되었다. 원호, 비원호 파괴 혹은 어떠한 형상의 파괴시에 주동토괴(Active soil mass)의 평형은 전통적인 방법, 즉 Fellenius or Bishop 절편법, 혹은 Perturbation방법으로 해석할 수 있다.

이러한 방법에서 지반은 정적평형이 해석될 수 있도록(그림 3.1 참조) 불연속적 형태로 분할되던지 또는 요소화된 수직절편으로 분할된다. 지반파괴면을 따라 일정하다고 가정된 안전계수는 지반 파괴면의 실제 전단응력(τ)과 최대전단응력(τ_{max})과의 비로 정의되어 진다. 지반의 평형은 감소된 강도계수인 c/τ_c와 $\tan\phi/\tau_\phi$ 를 사용하여 결정된다. (c는 점착력, ϕ는 내부마찰각)

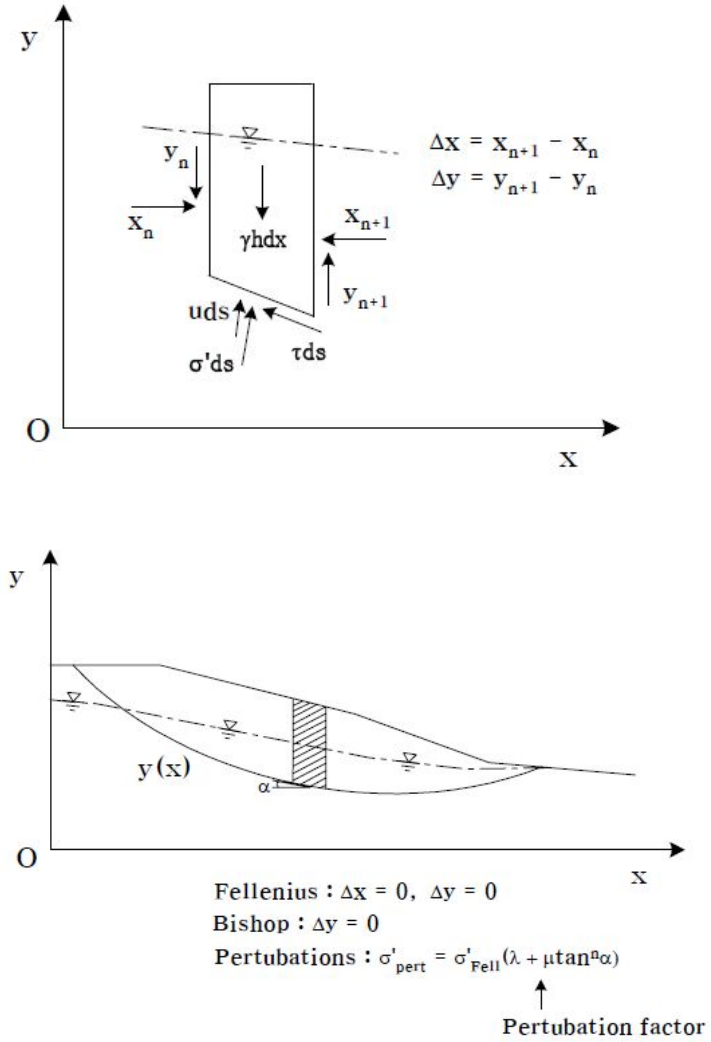


그림 3.1 절편의 평형

TALREN 97는 그림 3.2 기하형상의 예와 같이 모든 가능한 경사와 지반의 형상을 해석할 수 있다. 기하형상은 점들(points)과 영역들(segments), 폐곡선이나 개곡선을 사용하여 정의한다. 이런 방법으로 복잡한 기하형상도 정의할 수 있다.

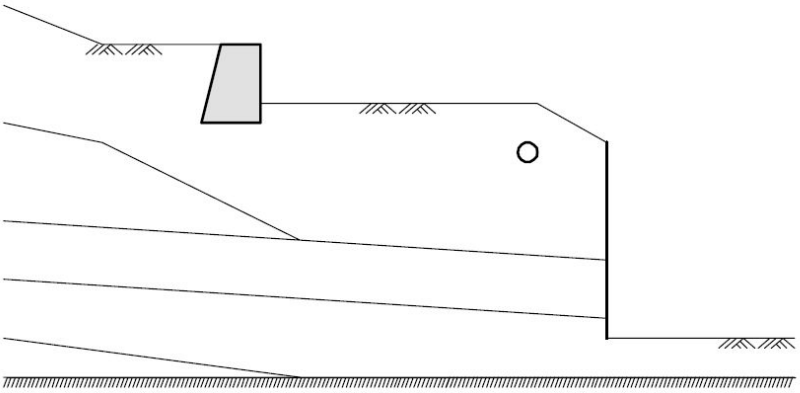


그림 3.2 복잡한 기하형상의 예

또한 지반파괴면의 간극수압(pore pressure)을 계산하는데 있어 4가지의 방법이 있다.

- 지하수면은 점들로 표시될 수 있으며 각 점에 등위수압선을 지정함으로 침투(seepage)도 고려할 수 있다.
- 원호가 아닌 지반파괴면의 각 점에 간극 수압을 정의할 수 있다.
- 삼각요소의 각 절점에 예를 들어 유한요소를 이용한 침투해석(Seepage Analysis)에서 구한 간극수압을 정의할 수 있다.
- 특정한 지반에 대해 간극수압계수를 정의할 수 있다.

TALEN 97에서는 3가지 형태의 상재하중을 적용할 수 있다

- 파괴면 상에 분할된 절편의 두께에 비례하여 각 절편의 자중을 증가시키는 수직분포하중

• 파괴면을 따라 부가적인 지중응력을 야기시키는 선하중(Line Load). 이러한 응력의 증가는 평형방정식에서 전단응력의 증분(Δ τ)과 수직응력의 증분(Δ σ)을 고려함으로 적용된다. 경사 선하중은 Yield Design Method에서만 적용 가능하다.

• 지반의 모멘트(driving moment)에 추가되거나 감소시키는 외부모멘트. 원호 파괴면에 대해 외부모멘트는 Fellenius 또는 Bishop 해석방법이 적용될 때만 고려될 수 있다.

3.1.3 GSTABL 7

가. GSTABL 7프로그램의 배경

1975년 Indiana주 Purdue 대학교 R.A Siegel 등이 수정 Bishop 방법을 적용하여 일반적인 사면안정 문제를 다룰 수 있도록 개발한 컴퓨터 프로그램인 STABL의 시리즈의 통합된 프로그램이다.

STABL은 사면안정 문제의 일반적인 해를 2차원 한계평형법으로 구하며, 사면의 불안정에 대한 안전율은 절편법으로 계산한다.

나. GSTABL 7 프로그램의 특징

STABL은 일반 형상의 전단면을 가정하여 해석을 하며, 이러한 한계평형법으로 구한 안전율은 완전한 평형상태로 만족되지는 않지만 계산시간이 상당히 많이 소요되며 또한 결과를 합리적으로 평가하게 되는 정확한 방법을 사용하여 계산한 것과는 비교가 된다.

STABL의 특징은 보다 더 임계적인 면 및 이 임계면에 해당하는 안전율을 결정하기 위하여 일반적으로 파괴가능면에 대해서 세가지 독특한 무작위 기법을 가지고 있다. 즉 원호형상의 가상파괴면, 활동 Block 특성을 갖는 가상파괴면, 일반 불규칙형상의 가상파괴면을 발생 시킬 수 있다.

STABL은 일반적인 토층, 비등방성 토층, 비등방성 토질강도정수, 전단으로 인한 과잉 간극수압, 정적 지하수 및 지표수, 가상의 정적 지진하중

및 경계상재하중에 대한 문제를 해결할 수 있는 능력을 보유하고 있다. 도형출력 결과로부터 해당문제에 대한 입력데이터가 올바르게 작성되었는지를 시각적으로 확인 하는데 도움을 준다. STABL은 에러메시지를 통하여 STABL의 입력 요구사항과 일치하지 않을 경우 그 위치를 정확하게 지적하여 준다.

STABL은 Free-Form 데이터 입력을 사용하므로 입력데이타 작성을 용이하게 하며 입력에러를 감소시킨다. 사면파괴 현황을 조사하여 실제 파괴면의 위치를 안다면 STABL에서는 특정파괴면으로 기지의 파괴면을 규정하여 해석이 가능하다. 이러한 해석을 선택할 수 있는 또다른 경우는 지질형태와 전단강도 자료로부터 파괴가 일어나는 것으로 예상되는 연약한 면을 정의할 수 있는 경우이다. 특정파괴면은 선분으로 분할시켜 개략적으로 표시하여 이 분할 선분을 나타내는 일련의 점으로 정의한다. 그러나 가상파괴면이 연직지표면 경계에서 시작되거나 종료되면 STABL에서는 명시된 Y좌표 값을 사용하도록 지시하게 된다. 또한 좌표값은 왼쪽에서 오른쪽순으로 작성하여야 한다.

3.1.4 STABR

가. STABR 프로그램의 배경

STABR 프로그램은 절편법을 이용한 사면안정 해석 프로그램으로 1971년 U.C.Berkeley의 Guy Lefebvre에 의해 프로그램화 되었다가, 그 후 여러 차례 수정을 거쳐 1983년 K.Wong에 의하여 현재의 프로그램으로 변천되었다. 이 프로그램은 Bishop 간편법이나, Fellenius 방법을 극한평형이론으로 원호 파괴면에 대하여 사면해석을 수행하는 방법으로 다음과 같은 가정상의 차이가 있다. 그림 3.3(b)와 같이 양측면을 향하여 작용하는 측방향력의 합력이 절편에 수직으로 작용하는 것으로 가정한 Bishop의 간편법은 모멘트평형 조건을 이용하였고, 그림 3.3(a)와 같이 측방향력 E_i

가 전단력 T_i와 같은 방향으로 작용하는 것으로 가정한 Fellenius 방법은 모멘트평형조건을 이용하였다. 안전율은 사면을 이루는 흙이나 그 아래에 있는 흙의 전체 전단저항력의 합계와 전단력의 비를 말하는데, Fellenius 방법과 Bishop 간편법의 안전율은 다음과 같이 각각 구할 수 있다. 그림 3.3(a)와 같이 절편의 파괴면 수직방향에 작용하는 힘들의 합력이 0이라 가정하면 다음 식이 성립된다.

$$\overline{N_i} + U_i = W_i \cos\theta_i \tag{3.1}$$

식 (3.1) $\overline{N_i}$에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$\overline{N_i} = W_i \cos\Phi_i - U_i = W_i \cos\Phi_i - u_{i\,\Delta} l_i \tag{3.2}$$

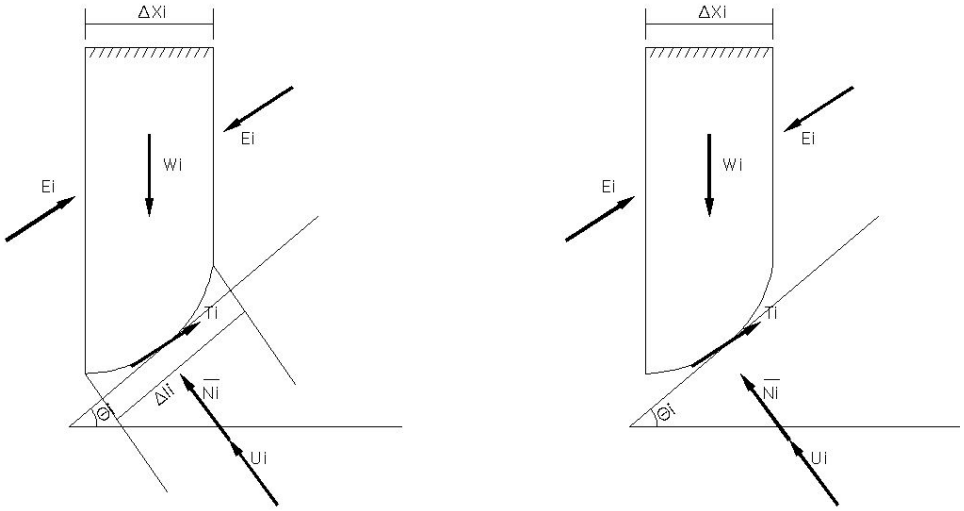
한편 안전율은 다음의 식으로 정의할 수 있다.

$$F = \frac{\overline{C} L_a + \tan\overline{\Phi} \sum \overline{N_i}}{\sum W_i \sin\theta_i} \tag{3.3}$$

여기서, L_a는 호의길이

식 (3.2)와 (3.3)으로부터 안전율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{\overline{C} L_a + \tan\overline{\Phi} \sum (W_i \cos\theta_i - u_i \Delta l_i)}{\sum W_i \sin\theta_i} \tag{3.4}$$



(a) 절편법 (b) Bishop의 간편법

그림 3.3 절편에 작용하는 힘

Bishop의 간편법의 경우는 그림 3.3(b)와 같이 절편양측에 작용하는 힘들의 합력을 0이라 가정한다. 그리고 $\overline{N_i}$는 안전율 F를 적용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\overline{N_i} = \frac{W_i - u_i \Delta l_i - (1/F)\overline{C}\,\Delta X_i \tan\theta_i}{\cos\theta_i [1 + (\tan\theta_i \tan\overline{\Phi})/F} \tag{3.5}$$

이 식을 이용하여 안전율을 구하면

$$F = \frac{\sum(\overline{C}\Delta X_i + (W_i - u_i \Delta X_i)\tan\overline{\Phi})(1/M_i(\theta))}{\sum W_i \sin\theta_i} \tag{3.6}$$

여기서, $M_i(\theta) = \cos\theta_i(1 + \frac{\tan\theta_i \tan\overline{\Phi}}{F})$

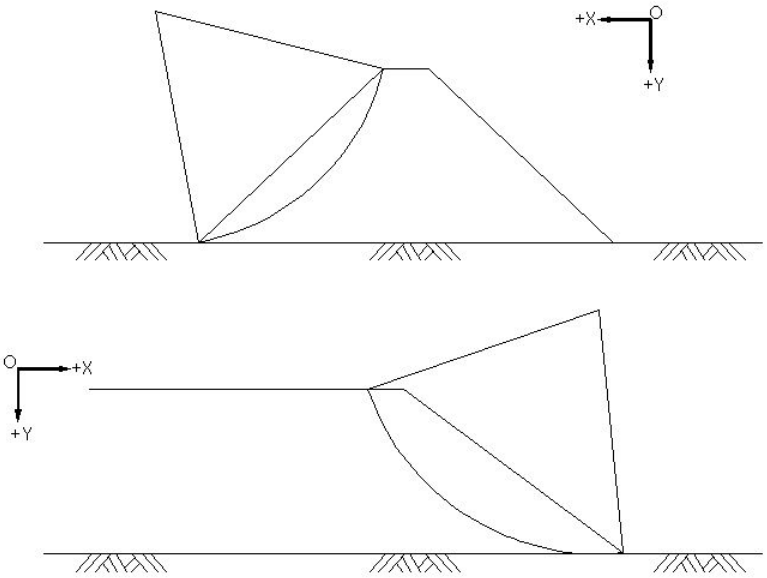


그림 3.4 STABR에 사용되는 X,Y좌표

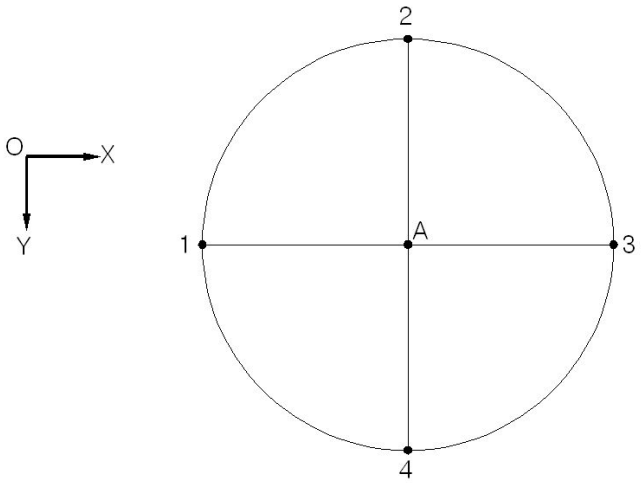


그림 3.5 CENTER A를 중심한 첫 번째 시계방향 회전

나. STABR 프로그램의 특징

이 프로그램은 복잡한 사면형태, 깊이에 따라 비배수강도가 불규칙하게 변하는 경우, 인장균열, 두께와 성질이 다른 토층, 복잡한 간극수압 형태 그리고 지진과 같은 동적하중을 고려할 수 있고, 전응력 해석과 유효응력 해석이 가능하다. 그림 3.4에서처럼 STABR은 사면형상을 X-Y축인 2차원으로 나타내고 있다. X축(수평)은 좌우에 상관없이 사면의 Top에서 Toe로 갈수록 좌표값이 증가하고 Y축(수직)은 내려 갈수록 좌표값이 증가한다.

STABR에는 입력 데이터 형식이 Free Format 이다. 이 프로그램에서는 사면의 형상을 20개 이내의 불규칙 수직단면(Vertical Section)으로 정의할 수 있으며 첫 번째와 마지막 수직단면은 항상 가상활동면 안에 들어와야 한다. 또 전단강도가 토층에 걸쳐 일정한 c, Φ값을 나타내거나 또는 깊이에 따라 비선형적으로 변하는 사면도 해석이 가능하다. 강도의변화를 표시할 때 총 지점수가 20개를 초과해서는 안된다. 사용자가 초기 원호파괴면의 원점과 원호의 접선깊이를 정하여 주면, 원점을 변화시켜 가면서 최소안전율을 갖는 임계면(Critical Surface)을 찾는다.

이때 첫 가상파괴원호의 중심좌표와 마지막 격자망의 간격이 명시되어야 한다. 명시된 원호 중심과 그림 3.5에서 보여주는 것과 같이 마지막 격자망 간격의 2배와 같은 간격을 가지고 주어진 원호중심 주위를 시계방향으로 90° 회전하면서 각 지점의 안전율 계산을 수행한다. 임의 지점에서의 안전율이 회전중심과 이전의 회전중심에서 구한 안전율의 차가 새로 지정된 회전중심에서 구한 안전율의 5% 이하이거나 같다면, 간격은 마지막 격자 간격으로 감소한다. 회전이 끝난 안전율들 중에서 회전중심에서 보다 더 작은 값이 나타나지 않으면, 동일한 중심을 가지고 다른 새로운 시계방향 회전이 시작된다. 이 회전 방법은 시작을 수평에서 시계방향으로 45°인 지점에서 시작하고, 간격은 마지막 격자망 간격의 1.414배로 하며 회전의 증가분으로 90°증가한다.

3.1.5 STABGM

가. STABGM 프로그램의 배경

J.M. Duncan and B.K. Low(1984)가 STABR 프로그램을 수정하여 보강재가 사용된 사면에까지 안정해석을 할 수 있도록 한 프로그램이다. 그러므로 STABGM은 STABRRHK 같이 Bishop의 간편법이나 Fellenius 방법을 이용하여 원호 파괴면에 대하여 가장 작은 안전율을 구하는 프로그램이며, 실행상 특징은 STABR과 같다. 보강재를 사용함으로 저항모멘트가 증가된 사면의 경우는 다음과 같이 안전율을 구한다.

$$F = \sum_{i=1}^{n} [F_{Ri} (Y_{Ri} - Y_C)] \tag{3.7}$$

여기서, ΔM_R : 보강재로 인한 저항모멘트

F_{Ri} : 활동원호에 놓여있는 보강재 i층의 힘

Y_{Ri} : Y-보강재 좌표값 (아래는 음수)

Y_C : Y-원호 중심의 좌표값

N : 보강재의 수

보강사면의 안전율은

$$F_W = F_{WO} + \frac{\Delta M_R}{M_O} \tag{3.8}$$

여기서, F_W : 보강재를 사용한 사면의 안전율

F_{WO} : 보강재를 사용하지 않은 사면의 안전율

ΔM_R : 보강재 사용으로 인해 증가된 저항모멘트

M_O : 사면의 전도 모멘트

나. STABGM 프로그램의 특징

STABGM은 자연사면이나 보강재를 넣어 시공한 성토사면의 안정해석이 가능하며 파괴면을 가정하여 가장 작은 안전율을 갖는 가상 원호파괴면을 찾거나 사용자가 지정한 활동면의 안전율을 구하는 프로그램이다.

본 프로그램은 유효응력 해석 및 전응력 해석이 가능하고 흙의 강도는 C, Φ 값과 깊이에 따른 비배수강도 곡선으로 표시 될 수 있다. 단위는 임의단위 사용이 가능하다. STABGM의 실행상의 특징은 STABR의 특징과 유사하나, 무엇보다도 보강재가 최고 20개층(Layer)까지 들어간 사면의 해석이 가능하다는 점이다. STABGM은 다음과 같은 문제점을 포함하고 있다.

① 보강사면의 경우, 보강재와 흙사이의 상호작용 관계가 고려되지 않았으며 보강재의 응력분포도 고려하지 않았다.

② STABGM은 원호활동파괴면을 가정한 것으로, 실제 비원호활동파괴면에 적용시 한계가 있다.

③ Fellenius방법은 간극수압이 존재하는 사면의 안정해석에서 최고 40%까지 오차를 갖는데, 이는 식 (3.4)에서 $\overline{N_i}$값이 음의 값을 갖게 되는 경우이다.

③과 같은 경우에 예상치 않는 결과가 나오지만 이 프로그램에서는 Bishop의 간편법과 Fellenius방법의 안전율을 서로 비교할 수 있고, 또 Bishop의 간편법과 Fellenius방법에서 각각 구한 안전율 중 작은 값을 취하므로 신뢰도에는 큰 문제는 없다.

3.1.6 UTEXAS

가. UTEXAS 프로그램의 배경

UTEXAS는 Wright(1969, 1975)에 의해 확장되어진 Spencer의 절편법에 의한 사면의 안정해석을 하기위한 프로그램이다.

나. UTEXAS 프로그램의 특징

UTEXAS는 사면의 단기안정과 장기안정 해석, 인장균열과 같은 변수들의 영향, 지진계수, 사면위에 가해지는 다양한 상재하중 그리고 다양한 지하수 조건 등을 고려하여 해석할 수 있으며, 파괴면의 형상을 원호, 비원호, BLOCK 파괴면으로 가정하여 해석할 수 있다.

본 프로그램은 Output에 Graphic 기능에 있어 사면활동에 대한 시각적 이해를 도우며 사용자가 지정한 활동면에 대한 안전율을 계산하거나 임의 발생에 의한 활동면중 가장 작은 안전율의 활동면을 찾을 수 있고, 사면 해석은 전응력과 유효응력 모두에 대해 해석할 수 있다.

좌표축에서 수평인 X축은 오른쪽으로 갈수록 증가하고 수직인 Y축은 위쪽으로 갈수록 증가하지만, 축체계의 원점은 임의적으로 잡을 수 있으나 사면 높이의 10배 거리 이내에서 사면 부근에 있어야 한다.

사용되는 단위는 Pound, Feet 단위이며 다른 단위를 사용할 수 있으나 Output 결과가 부정확하거나 Graphic이 불확실 하게 될 수 있다.

흙에 대한 특성들은 단위중량(Unit Weight), 전단강도(Shear Strengths), 간극수압(Pore Water Pressures)의 항으로 입력되어 진다.

지하수의 영향은 Piezometric, 또는 Pore Water Pressure의 항으로 나타낼 수 있으며, 어떤 것을 사용하는 지는 사용자의 필요에 따라 선택되어진다.

Pore Water Pressure의 계산은 각 절편 바닥의 중앙에서 보간법(Interpolation)으로 간극수압을 구하며 모든 절편에 대해서 동일한 방법을 구한다. Surface Pressure는 사면표면 위의 외부하중을 수평과 수직의 항으로 분류시켜 고려한다.

안전율은 주어진 여러 요소들을 고려하여 가정되어지면, Iteration을 통해 구한 계산치가 허용 Force Imbalancer, Moment Imbalance 그리고 Accuracy Limits 등의 가정치와 일정오차 범위에 들 때까지 반복 시행하여 안전율을 계산한다.

3.1.7 MALE

가. MALE 프로그램의 배경

MALE은 Shiffman에 의하여 현상된 프로그램이며, Morgenstern 해석방법과 한계평형이론을 기초하여 비원호파괴면을 해석할 수 있다.

Goverming Theory인 Price(1965) and Morgenstern(1968) 방법의 특징은 임의의 형상의 활동면에 적용할 수 있는 보편적인 사면안정 해석법이며, 또한 Spencer의 방법이 절편간 작용력의 경사가 일정하다고 가정하고 있는 반면에 이 방법은 θ값이 전체활동 토체에 걸쳐 일률적으로 변한다고 가정하고 있다.

나. MALE 프로그램의 특징

MALE은 파괴면이 일련의 직선으로 연결되어 있다고 가정한다. 흙사면이나 암반사면의 안정해석은 유효응력 해석방법으로 수행하며, 사용자가 지정한 가상파괴면을 최고 100개의 활동면에 대해서 해석할 수가 있다.

간극수압의 계산은 지하수위, 외부수면, 간극수압 압력비 등으로 구할 수 있고, 또한 MALE Program은 내부압력수두 뿐만 아니라 외부수면의 상류와 하류를 명시할 수가 있다. 활동사면의 토체무게는 파괴면 y(x)축과 제방의 표면 z(x)축에 의해서 계산할 수 있다. 그리고 반드시 영국단위를 싸용하여야 한다.

MALE은 plot기능이 있으나 정상적인 동작을 하기 위해서는 Run Compiler를 필요로 하고며, 다른 Compiler는 plot option을 수행하지 못한다.

입력자료에 이상이 있을 경우 10가지 Error Message 중 적절한 Error Message가 나타나 입력자료의 수정을 도와준다.

이 프로그램은 또한 Imput Data 안에 지진계수(Earthquake, Factor, a)를 추가함으로 지진의 영향을 고려할 수 있으며, 이 지진계수는 흙의 종류에 따라 달라지고 흙의 특성으로 취급되어진다.

제4장 Program에 의한 사면안정해석 및 고찰

본 연구에서는 한계평형해석법 중 Bishop방법을 토대로 해석을 수행하였으며, SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7의 프로그램을 이용 전단강도, 사면경사, 지하수위의 매개변수를 적용하여 해석을 수행하였다.

4.1 사례사면지반의 강도특성

4.1.1 사면 현황

가. 김천～교리 국도건설공사 절토사면 10개소(Ⅰ구간) 현황

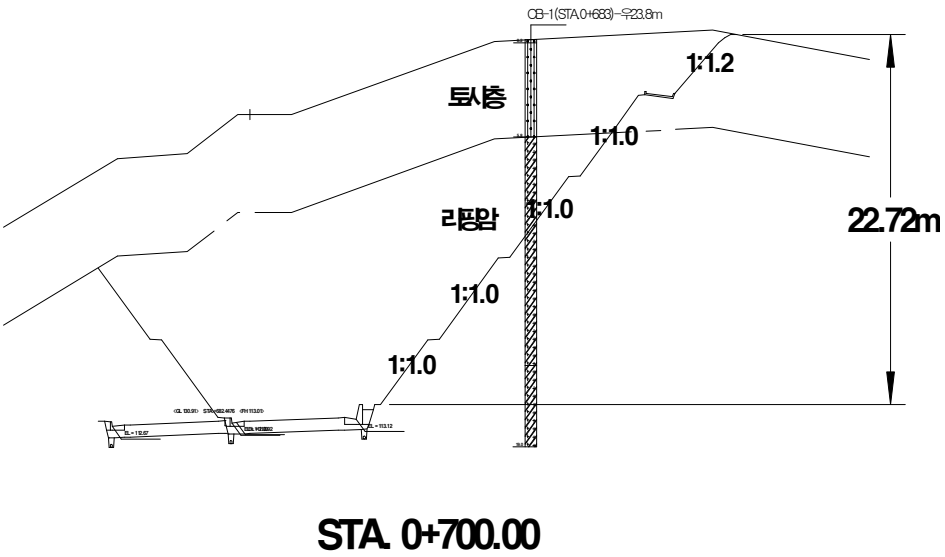


그림 4.1 Ⅰ구간 제1깎기부 대표단면

표 4.1 Ⅰ구간 깎기부 현황

구 분	구 간 (STA.)	검토단면 (STA.)	비탈면 방 향	깎기높이 (m)	분포지반
제1깎기부	0+620～0+760	0+700	김천방향	22.72	토사층, 리핑암층
제2깎기부	0+840～1+160	1+060	김천방향	22.06	토사층, 리핑암층
제3깎기부	1+240～1+520	1+280	김천방향	28.08	토사층, 리핑, 발파암층
제4깎기부	1+850～1+970	1+900	거창방향	25.25	토사층, 리핑, 발파암층
	1+800～1+980	1+920	김천방향	34.61	토사층, 리핑, 발파암층
제5깎기부	2+720～2+860	2+800	김천방향	14.65	토사층 ,리핑, 발파암층
제6깎기부	3+100～3+340	3+140	김천방향	18.40	토사층, 리핑, 발파암층
제8깎기부	4+080～4+520	4+500	거창방향	32.01	토사층, 리핑, 발파암층
제9깎기부	5+800～6+000	5+860	김천방향	32.42	토사층, 리핑, 발파암층
제10깎기부	7+020～7+240	7+200	거창방향	20.52	토사층, 리핑, 발파암층

나. 여수～순천간 도로확·포장공사 절토사면 8개소(Ⅱ구간) 현황

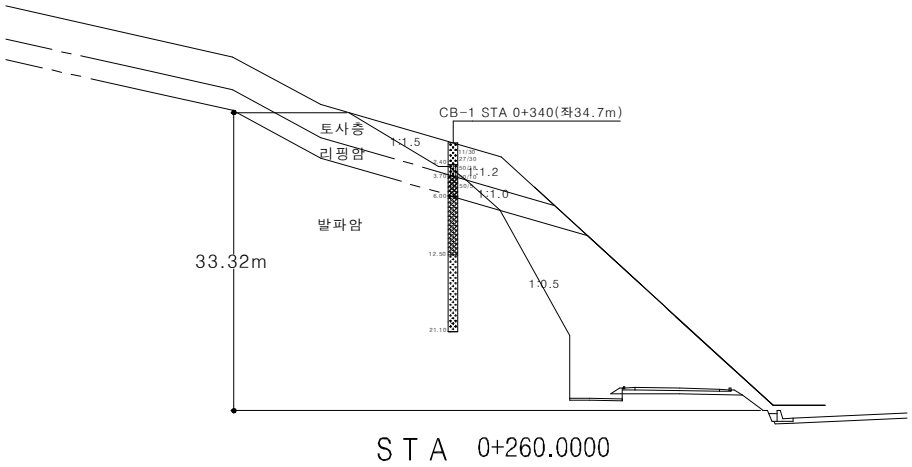


그림 4.2 Ⅱ구간 제1깎기부 대표단면

표 4.2 Ⅱ구간 깎기부 현황

구 분	구 간 (STA.)	검토단면 (STA.)	비탈면 방 향	깎기높이 (m)	분포지반
제1깎기부	0+220～0+360	0+260	여수방향	33.32	토사층, 리핑, 발파암층
제2깎기부	1+460～1+800	1+640	여수방향	23.90	토사층, 리핑, 발파암층
	1+340～1+780	1+520	순천방향	34.40	토사층, 리핑, 발파암층
제6-1깎기부	6+500～6+700	6+660	여수방향	42.84	토사층, 리핑, 발파암층
제6-2깎기부	6+700～6+760	6+700	여수방향	60.22	토사층, 리핑, 발파암층
제7깎기부	8+390～9+000	8+520	여수방향	35.56	토사층, 리핑, 발파암층
00국도 17호선	2+860～3+100	2+900	좌측사면	35.79	토사층, 리핑, 발파암층
0000 IC	0+320～0+600	0+440	좌측사면	49.63	붕적,토사, 리핑,발파암층

다. 광주～양수 국도확장공사 절토사면 3개소(Ⅲ구간) 현황

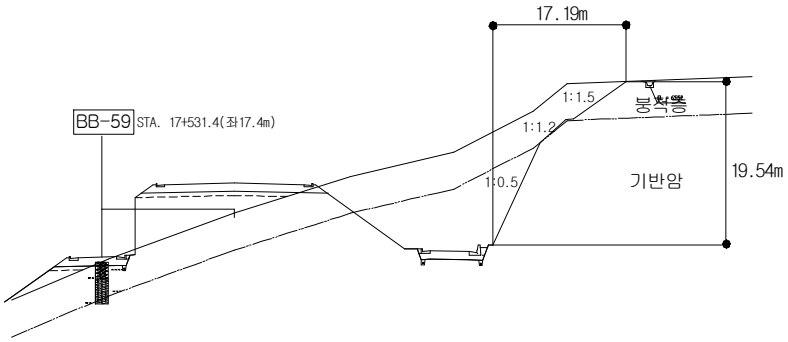


그림 4.3 Ⅲ구간 제9깎기부 대표단면

표 4.3 Ⅲ구간 깎기부 현황

구 분	구 간 (STA.)	검토단면 (STA.)	비탈면 방 향	깎기높이 (m)	분포지반
제6깎기부	14+780 ~ 15+120	14+880	광주방향	26.10	붕적층 리핑,발파암층
제7깎기부	15+560 ~ 16+020	15+600	광주방향	26.21	붕적층 리핑,발파암층
제9깎기부	17+440 ~ 17+900	17+660	광주방향	19.54	붕적층, 발파암층

4.1.2 사례사면 토질정수

가. Ⅰ구간의 토질정수

표 4.4 Ⅰ구간 깎기부 적용 토질정수

구 분	단위중량 (kN/m^3)	점 착 력 (kN/m^2)	내부마찰각 (°)	비 고
토 사 층	19	15	33	
풍화암층	20	40	35	
연 암 층	24	100	35	
경 암 층	26	300	45	

나. Ⅱ구간의 토질정수

표 4.5 Ⅱ구간 깎기부 적용 토질정수

구 분	단위중량 (kN/m^3)	점 착 력 (kN/m^2)	내부마찰각 (°)	비 고
붕 적 층	19	5	33	
토 사 층	19	20	28	
풍화암층	20	30	33	
연 암 층	22	100	35	
경 암 층	25	300	45	

다. Ⅲ구간의 토질정수

표 4.6 Ⅲ구간 깎기부 적용 토질정수

구 분	단위중량 (kN/m^3)	점 착 력 (kN/m^2)	내부마찰각 (°)	비 고
붕 적 층	18	5	30	
풍화암층	20	30	33	
연 암 층	25	70	33	
경 암 층	26	100	35	

4.1.3 지하수위

비탈면의 안정성 분석시 지하수위가 안전율에 큰 영향을 미치는 바, 쌓기비탈면의 경우에는 인공적으로 조성하므로 지하수위의 상승을 억제하기 위하여 배수층, 측구, 도수로 등의 배수시설을 설치하므로 지하수위가 원지반 표면까지 상승하는 것으로 예상하여 안정성 분석을 하였으며, 깎기비탈면의 경우에는 지하수위의 저하가 어려운 점을 고려하여 깎기 예정지역에 대한 지형과 지표지질조사, 용출수 현황조사 성과 및 시추조사 종료후 48시간 경과시 측정한 지하수위 등을 검토하여 평상시 및 우기시 예상되는 지하수위를 다음과 같이 결정하였다.

가. 평상시 지하수위

본 대상지역에 대한 지형 및 지표지질조사 결과 대부분의 깎기부가 능선부 또는 그 부근을 통과하고 있어 자연비탈면에 용출수가 관찰되지 않았으며, 깎기계획고 하부 1m까지 시추조사를 실시한 시추공에서 지하수위를 관측한 결과 대부분의 시추공이 토사 및 풍화암층 하부 암반층내에서 지하수위가 관찰되고 있어 평상시 깎기부 안정검토시 검토단면에 지하수위를 고려하지 않았다.

나. 우기시 지하수위

우기시 지하수위는 강우강도와 지속시간, 지형, 지층분포상태 등에 따라 큰 변화를 나타내며 특히 토사층에 비하여 투수성이 낮은 암반층의 분포 위치에 따라 큰 영향을 받는 것으로 밝혀지고 있으나 지하수위의 정량적인 분석은 현실적으로 어려운 실정이고 우기시 모관상승 및 강우침투에 의한 지하수 상승이 예상되므로 지하수위는 지표면 포화로 가정하였다.

4.2 사면안정성 해석 결과

4.2.1 전단강도 변화시의 해석결과

가. Ⅰ구간

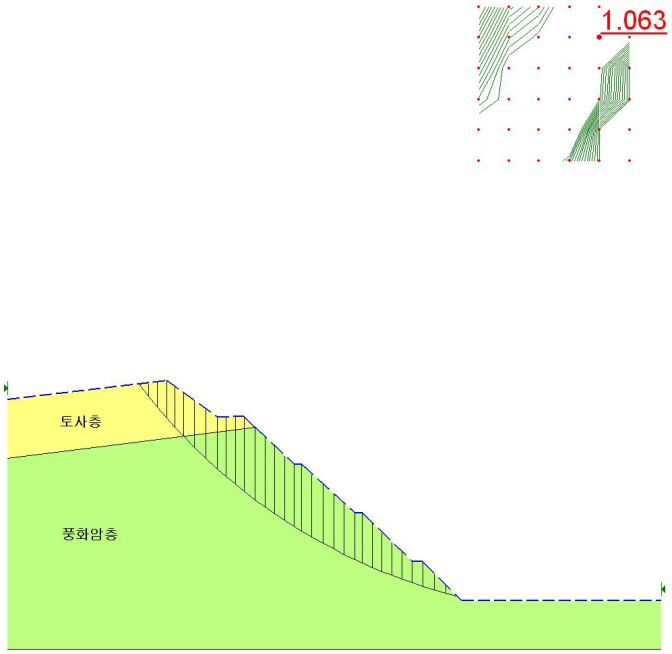


그림 4.4 Ⅰ구간 대표단면 해석 OUTPUT (SLOPE/W)

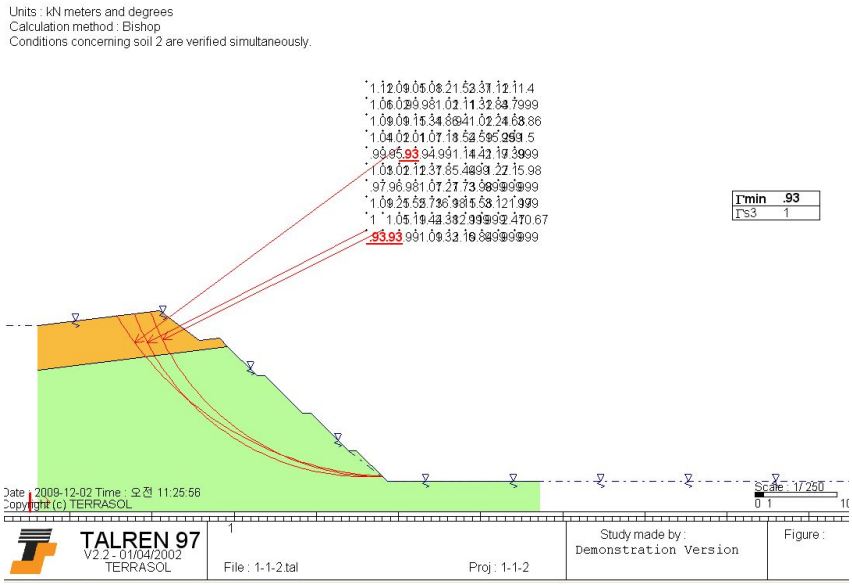


그림 4.5 Ⅰ구간 대표단면 해석 OUTPUT (TALEN 97)

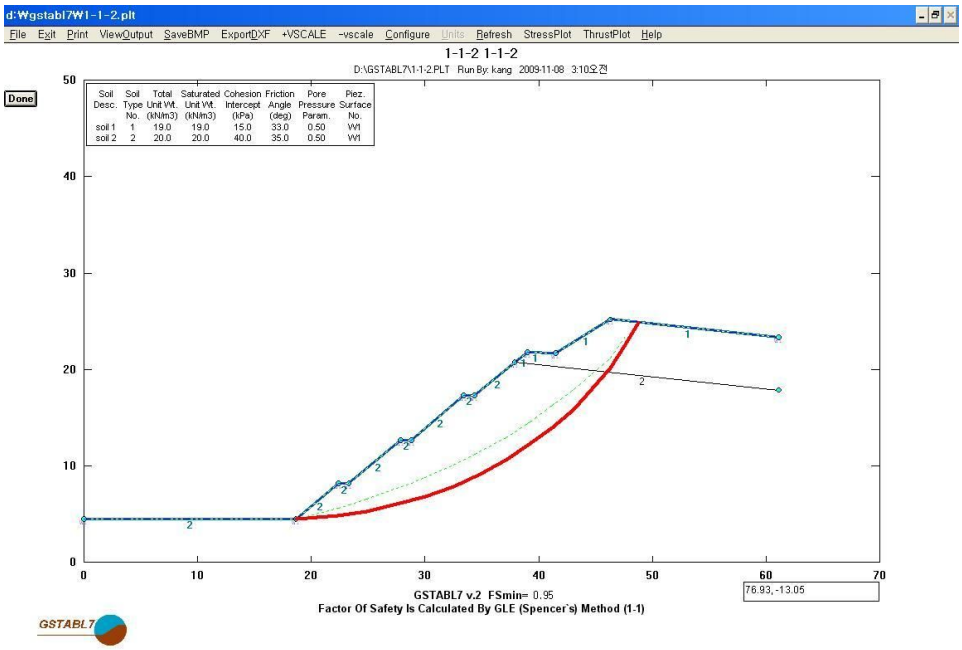


그림 4.6 Ⅰ구간 대표단면 해석 OUTPUT (GSTABL 7)

1) 점착력 c=15 kN/m^2 경우

표 4.7 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=15kN/m^2)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	1.879	1.65	1.75	1.063	0.93	0.95
제2깎기부	1.870	1.67	1.85	1.044	0.90	1.16
제3깎기부	2.187	2.17	1.86	1.335	1.26	1.22
제4깎기부	3.088	2.45	2.14	2.088	1.63	1.36
	5.796	6.12	6.03	3.852	5.12	5.16
제5깎기부	3.905	2.26	1.92	2.979	1.42	1.17
제6깎기부	2.345	2.03	1.64	1.421	1.23	0.95
제8깎기부	2.256	2.06	1.62	1.441	1.30	0.98
제9깎기부	1.760	1.91	1.49	1.118	1.13	0.84
제10깎기부	2.039	1.97	1.73	1.234	1.21	1.09

2) 점착력 c=20 kN/m^2 경우

표 4.8 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=20kN/m^2)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	1.893	1.66	1.79	1.076	0.94	1.03
제2깎기부	1.889	1.70	1.89	1.071	0.92	1.20
제3깎기부	2.201	2.19	1.88	1.367	1.29	1.24
제4깎기부	3.262	2.64	2.31	2.214	1.78	1.50
	5.798	6.19	6.10	4.244	5.28	5.23
제5깎기부	4.272	2.57	2.01	3.291	1.64	1.24
제6깎기부	2.471	2.07	1.71	1.651	1.26	1.01
제8깎기부	2.557	2.07	1.64	1.727	1.30	0.99
제9깎기부	1.941	1.92	1.50	1.195	1.14	0.86
제10깎기부	2.145	2.00	1.77	1.310	1.23	1.12

3) 점착력 c=25 kN/m^2 경우

표 4.9 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=25kN/m^2)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	1.911	1.67	1.82	1.091	0.94	1.07
제2깎기부	1.910	1.72	1.91	1.086	0.94	1.23
제3깎기부	2.234	2.22	1.89	1.399	1.31	1.25
제4깎기부	3.364	2.84	2.48	2.289	1.93	1.66
	5.860	6.27	6.18	4.271	5.36	5.30
제5깎기부	4.339	2.64	2.10	3.345	1.71	1.33
제6깎기부	2.504	2.10	1.78	1.682	1.29	1.07
제8깎기부	2.570	2.08	1.65	1.739	1.31	1.00
제9깎기부	1.954	1.93	1.52	1.205	1.15	0.87
제10깎기부	2.168	2.02	1.81	1.329	1.25	1.16

나. Ⅱ구간

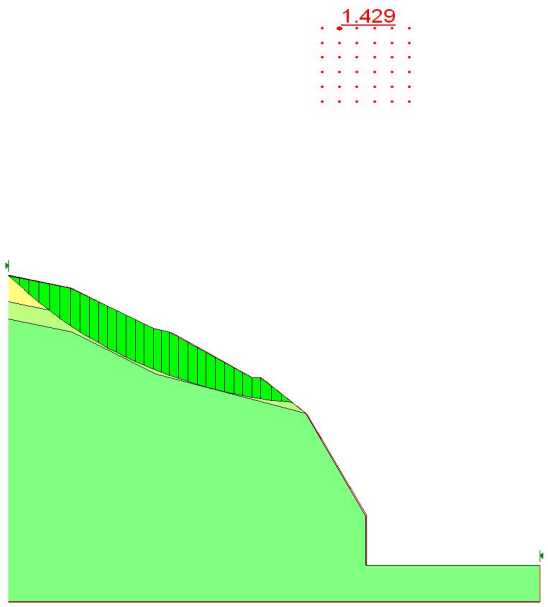


그림 4.7 Ⅱ구간 대표단면 해석 OUTPUT (SLOPE/W)

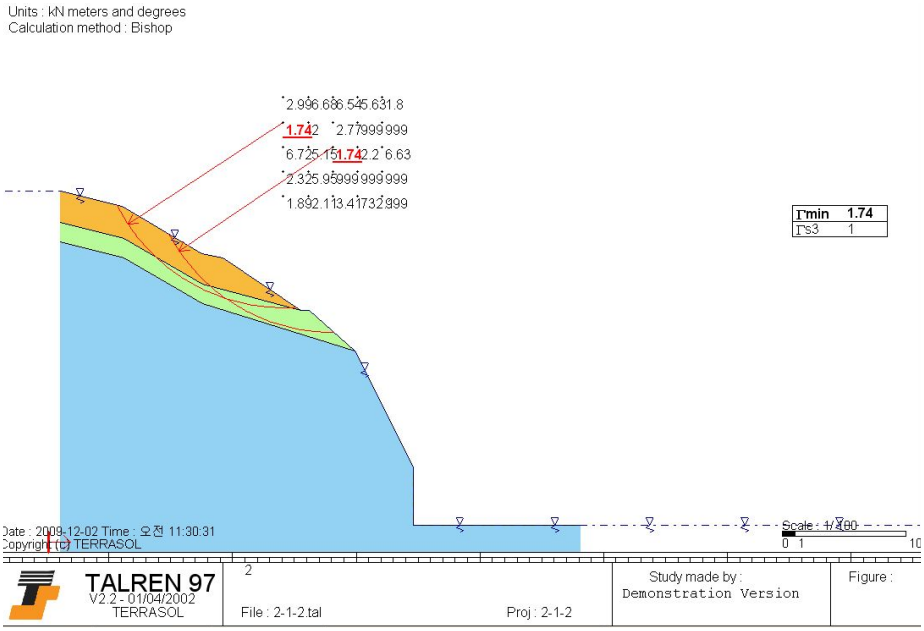


그림 4.8 Ⅱ구간 대표단면 해석 OUTPUT (TALEN 97)

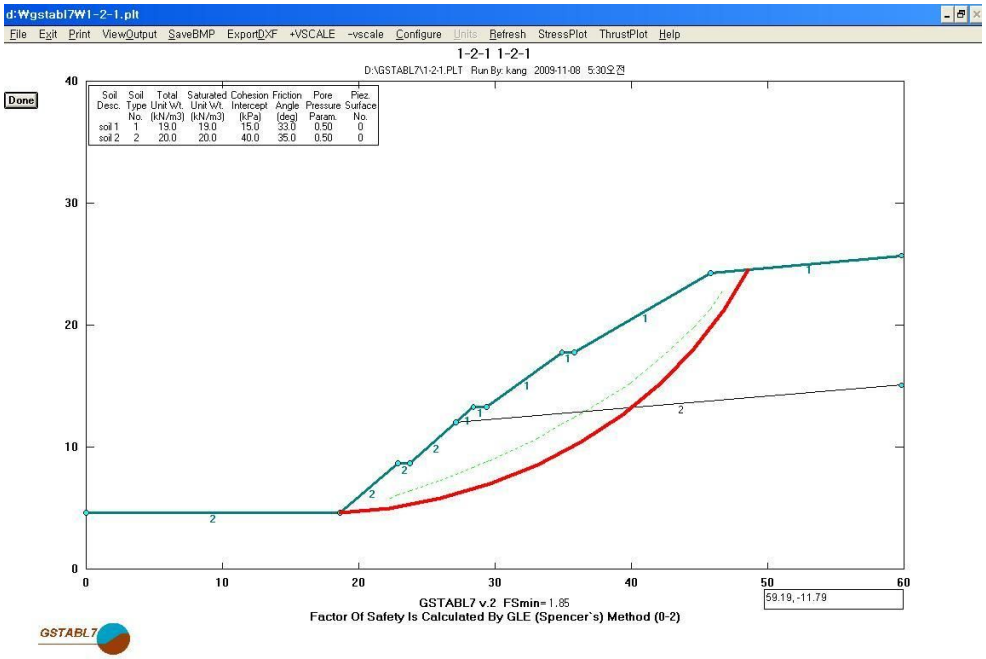


그림 4.9 Ⅱ구간 대표단면 해석 OUTPUT (GSTABL 7)

1) 점착력 c=20kN/m^2 경우

표 4.10 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=20kN/m^2)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	2.197	2.50	2.28	1.429	1.74	1.64
제2깎기부	3.497	3.64	3.59	3.039	2.74	2.95
	2.256	1.96	1.33	1.441	1.29	0.72
제6-1깎기부	3.851	3.76	4.38	3.153	2.87	3.80
	2.706	2.98	3.98	1.935	2.18	3.36
제6-2깎기부	2.576	2.67	2.67	1.811	1.97	2.00
화장국도 17호선	2.634	2.55	2.50	1.883	1.82	1.89
제2산단IC	1.747	1.96	2.23	1.057	1.16	1.61

2) 점착력 c=25kN/m^2 경우

표 4.11 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=25kN/m^2)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	2.267	2.57	2.40	1.438	1.80	1.76
제2깎기부	3.653	3.72	3.76	2.885	2.82	3.12
	2.290	1.99	1.34	1.510	1.31	0.74
제6-1깎기부	3.980	3.91	4.81	3.095	3.02	4.22
	2.803	3.05	4.46	1.969	2.25	3.81
제6-2깎기부	2.939	3.05	3.22	2.155	2.26	2.55
화장국도 17호선	2.746	2.59	2.57	1.977	1.86	1.96
제2산단IC	2.196	2.04	2.64	1.435	1.25	2.02

3) 점착력 c=30kN/m^2 경우

표 4.12 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=30kN/m^2)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	2.306	2.64	2.53	1.458	1.87	1.88
제2깎기부	3.736	3.81	3.93	2.947	2.90	3.29
	2.302	2.01	1.35	1.522	1.33	0.75
제6-1깎기부	4.069	4.07	5.24	3.182	3.17	4.65
	2.880	3.12	4.92	2.046	2.32	4.26
제6-2깎기부	3.200	3.19	3.77	2.413	2.39	3.10
화장국도 17호선	2.783	2.63	2.65	2.010	1.89	2.04
제2산단IC	2.370	2.12	3.05	1.541	1.33	2.43

다. Ⅲ구간

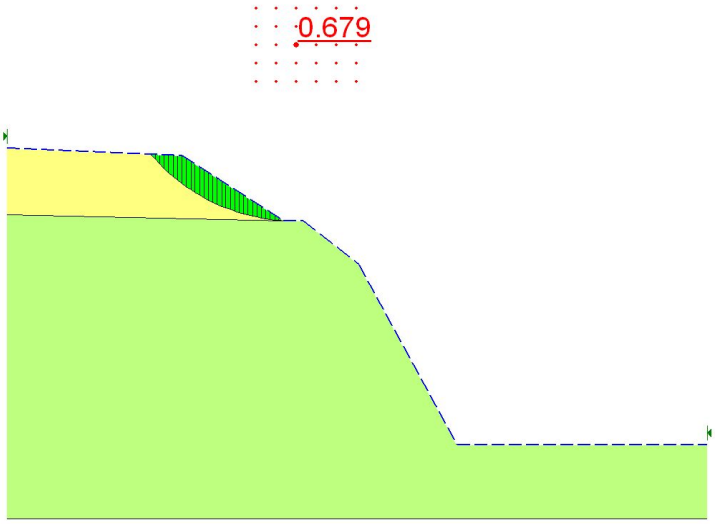


그림 4.10 Ⅲ구간 대표단면 해석 OUTPUT (SLOPE/W)

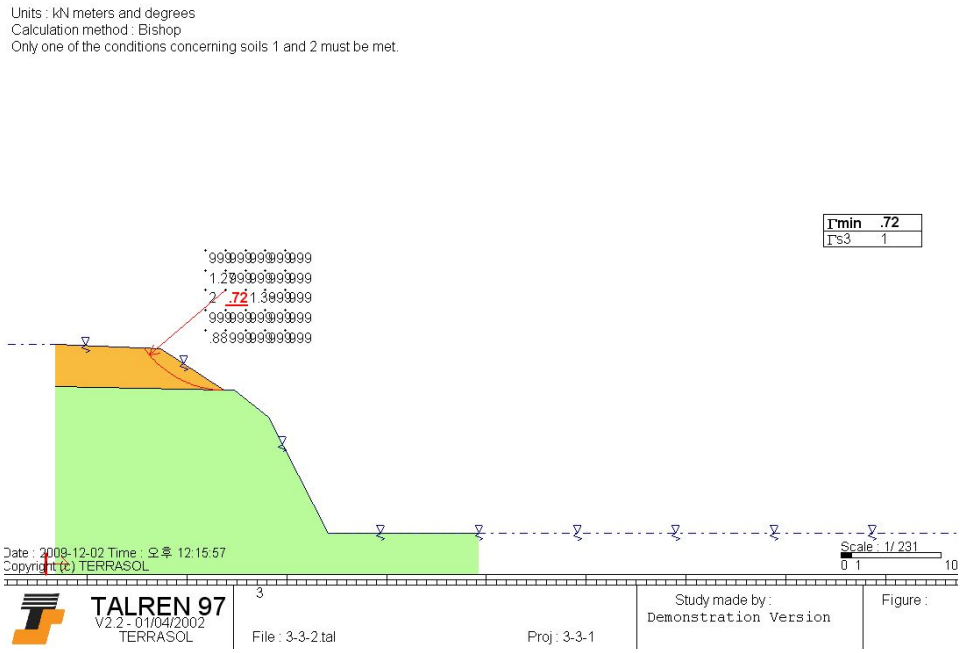


그림 4.11 Ⅲ구간 대표단면 해석 OUTPUT (TALEN 97)

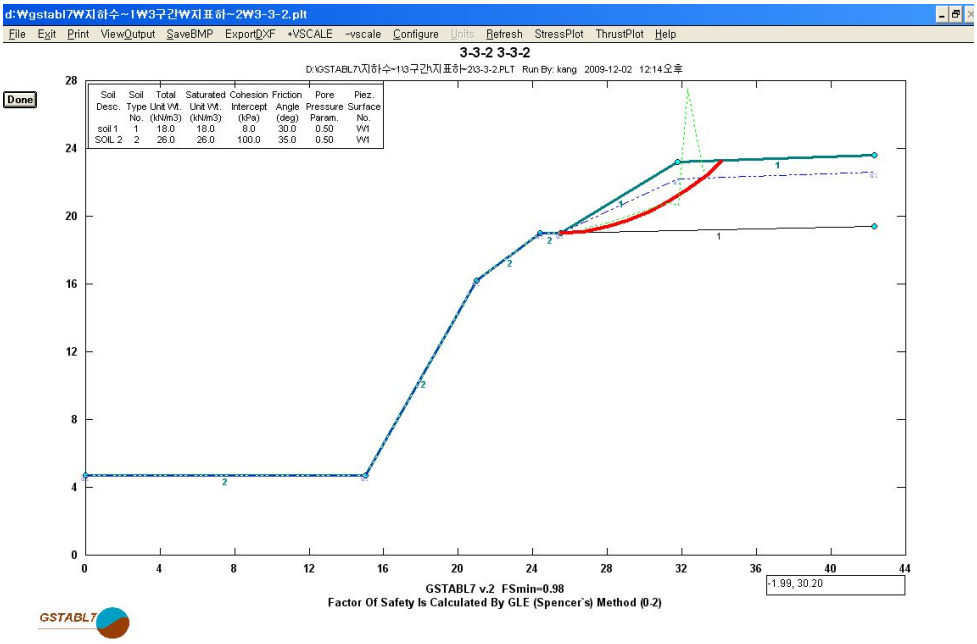


그림 4.12 Ⅲ구간 대표단면 해석 OUTPUT (GSTABL 7)

1) 점착력 c=5 kN/m^2 경우

표 4.13 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=5kN/m^2)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제6깎기부	1.661	1.62	1.63	0.784	0.75	0.86
제7깎기부	1.395	1.32	1.14	0.603	0.53	0.43
제9깎기부	1.430	1.45	1.36	0.679	0.72	0.68

2) 점착력 c=10 kN/m^2 경우

표 4.14 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=10kN/m^2)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제6깎기부	1.990	1.87	1.99	1.108	0.99	1.21
제7깎기부	1.576	1.45	1.30	0.779	0.66	0.59
제9깎기부	1.725	1.86	1.59	0.967	1.12	0.90

3) 점착력 c=15 kN/m^2 경우

표 4.15 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (c=15kN/m^2)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제6깎기부	2.207	2.11	2.35	1.414	1.23	1.56
제7깎기부	1.757	1.58	1.47	0.948	0.78	0.65
제9깎기부	2.021	2.26	2.16	1.251	1.53	1.46

4.2.2 사면경사 변화시의 해석결과

가. Ⅰ구간

1) 토사사면 경사 1:1.5 경우

표 4.16 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.5)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	1.879	1.65	1.75	1.063	0.93	0.95
제2깎기부	1.870	1.67	1.85	1.044	0.90	1.16
제3깎기부	2.187	2.17	1.86	1.335	1.26	1.22
제4깎기부	3.088	2.45	2.14	2.088	1.63	1.36
	5.796	6.12	6.03	3.852	5.12	5.16
제5깎기부	3.905	2.26	1.92	2.979	1.42	1.17
제6깎기부	2.345	2.03	1.64	1.421	1.23	0.95
제8깎기부	2.256	2.06	1.62	1.441	1.30	0.98
제9깎기부	1.760	1.91	1.49	1.118	1.13	0.84
제10깎기부	2.039	1.97	1.73	1.234	1.21	1.09

2) 토사사면 경사 1:1.8 경우

표 4.17 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.8)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	1.923	1.67	1.77	1.098	0.94	0.96
제2깎기부	1.993	1.71	1.89	1.114	0.93	1.20
제3깎기부	2.254	2.22	1.90	1.406	1.31	1.26
제4깎기부	3.397	2.83	2.57	2.294	1.89	1.69
	5.861	6.22	6.08	4.255	5.31	5.22
제5깎기부	4.698	2.67	2.42	3.687	1.77	1.64
제6깎기부	2.620	2.21	1.88	1.722	1.38	1.14
제8깎기부	2.668	2.23	1.82	0.824	1.44	1.13
제9깎기부	2.013	2.04	1.64	1.252	1.24	0.96
제10깎기부	2.167	2.14	1.77	1.327	1.36	1.12

3) 토사사면 경사 1:2.0 경우

표 4.18 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:2.0)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	1.930	1.68	1.78	1.105	0.95	0.97
제2깎기부	2.062	1.99	1.95	1.142	1.15	1.25
제3깎기부	2.292	2.28	1.96	1.443	1.35	1.30
제4깎기부	3.459	3.00	2.84	2.326	2.01	1.90
	5.856	6.22	6.15	4.251	5.32	5.29
제5깎기부	5.060	2.94	2.87	4.006	2.02	2.04
제6깎기부	2.734	2.31	2.07	1.888	1.46	1.29
제8깎기부	2.720	2.27	1.87	1.871	1.49	1.17
제9깎기부	2.041	2.08	1.70	1.272	1.28	1.00
제10깎기부	2.189	2.04	1.84	1.343	1.27	1.18

나. Ⅱ구간

1) 토사사면 경사 1:1.5 경우

표 4.19 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.5)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	2.197	2.50	2.28	1.429	1.74	1.64
제2깎기부	3.497	3.64	3.59	3.039	2.74	2.95
	2.256	1.96	1.33	1.441	1.29	0.72
제6-1깎기부	3.851	3.76	4.38	3.153	2.87	3.80
	2.706	2.98	3.98	1.935	2.18	3.36
제6-2깎기부	2.576	2.67	2.67	1.811	1.97	2.00
화장국도 17호선	2.634	2.55	2.50	1.883	1.82	1.89
제2산단IC	1.747	1.96	2.23	1.057	1.16	1.61

2) 토사사면 경사 1:1.8 경우

표 4.20 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.8)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	2.360	2.69	2.88	1.512	2.01	2.17
제2깎기부	3.938	3.90	4.37	3.048	3.00	3.71
	2.404	2.00	1.48	1.604	1.31	0.84
제6-1깎기부	4.227	3.94	4.52	3.324	3.07	3.83
	3.181	3.88	4.45	2.346	3.04	3.71
제6-2깎기부	3.025	3.43	3.05	2.217	2.70	2.39
화장국도 17호선	2.935	2.99	3.17	2.130	2.24	2.55
제2산단IC	2.203	1.96	2.47	1.329	1.19	1.85

3) 토사사면 경사 1:2.0 경우

표 4.21 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:2.0)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제1깎기부	2.520	3.11	2.99	1.696	2.38	2.27
제2깎기부	3.967	3.92	4.75	3.039	3.03	4.08
	2.460	2.00	1.52	1.646	1.32	0.88
제6-1깎기부	4.412	4.18	4.56	3.462	3.32	3.87
	3.352	4.21	4.50	2.515	3.35	3.75
제6-2깎기부	3.086	3.32	3.62	2.266	2.15	2.96
화장국도 17호선	3.134	3.23	3.51	2.301	2.45	2.86
제2산단IC	2.491	2.13	3.19	1.609	1.33	2.53

다. Ⅲ구간

1) 토사사면 경사 1:1.5 경우

표 4.22 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.5)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제6깎기부	1.661	1.62	1.63	0.784	0.75	0.86
제7깎기부	1.395	1.32	1.14	0.603	0.53	0.43
제9깎기부	1.430	1.45	1.36	0.679	0.72	0.68

2) 토사사면 경사 1:1.8 경우

표 4.23 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:1.8)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제6깎기부	1.711	1.63	1.87	0.845	0.77	1.09
제7깎기부	1.499	1.35	1.18	0.671	0.56	0.43
제9깎기부	1.474	1.63	1.72	0.724	0.88	1.02

3) 토사사면 경사 1:2.0 경우

표 4.24 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (사면경사 1:2.0)

구 분	건 기 시			우 기 시		
	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7	SLOPE/W	TALEN97	GSTABL7
제6깎기부	1.760	1.65	2.12	0.876	0.80	1.33
제7깎기부	1.639	1.43	1.27	0.755	0.64	0.48
제9깎기부	1.541	1.90	2.11	0.780	1.12	1.37

4.2.3 간극수압 변화시의 해석결과

가. Ⅰ구간

1) 완전포화시

표 4.25 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표면 상단)

구 분	SLOPE/W	TALEN 97	GSTABL 7	비 고
제1깎기부	1.063	0.93	0.95	
제2깎기부	1.044	0.90	1.16	
제3깎기부	1.335	1.26	1.22	
제4깎기부	2.088	1.63	1.36	
	3.852	5.12	5.16	
제5깎기부	2.979	1.42	1.17	
제6깎기부	1.421	1.23	0.95	
제8깎기부	1.441	1.30	0.98	
제9깎기부	1.118	1.13	0.84	
제10깎기부	1.234	1.21	1.09	

2) 지표하 1m 위치시

표 4.26 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 1m)

구 분	SLOPE/W	TALEN 97	GSTABL 7	비 고
제1깎기부	1.098	0.98	0.99	
제2깎기부	1.115	0.93	1.19	
제3깎기부	1.406	1.30	1.23	
제4깎기부	2.391	1.80	1.47	
	4.662	6.03	5.66	
제5깎기부	3.476	1.75	1.31	
제6깎기부	1.689	1.33	0.98	
제8깎기부	1.769	1.32	1.00	
제9깎기부	1.229	1.16	0.87	
제10깎기부	1.356	1.27	1.13	

3) 지표하 2m 위치시

표 4.27 Ⅰ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 2m)

구 분	SLOPE/W	TALEN 97	GSTABL 7	비 고
제1깎기부	1.110	0.99	1.01	
제2깎기부	1.151	0.96	1.22	
제3깎기부	1.419	1.40	1.25	
제4깎기부	2.504	1.95	1.57	
	4.818	6.12	5.8	
제5깎기부	3.598	1.92	1.42	
제6깎기부	1.709	1.40	0.99	
제8깎기부	1.801	1.40	1.04	
제9깎기부	1.252	1.23	0.91	
제10깎기부	1.396	1.33	1.17	

나. Ⅱ구간

1) 완전포화시

표 4.28 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표면 상단)

구 분	SLOPE/W	TALEN 97	GSTABL 7	비 고
제1깎기부	1.429	1.74	1.64	
제2깎기부	3.039	2.74	2.95	
	1.441	1.29	0.72	
제6-1깎기부	3.153	2.87	3.80	
	1.935	2.18	3.36	
제6-2깎기부	1.811	1.97	2.00	
화장국도 17호선	1.883	1.82	1.89	
제2산단IC	1.057	1.16	1.61	

2) 지표하 1m 위치시

표 4.29 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 1m)

구 분	SLOPE/W	TALEN 97	GSTABL 7	비 고
제1깎기부	1.506	1.75	1.68	
제2깎기부	3.124	3.09	3.20	
	1.544	1.30	0.74	
제6-1깎기부	3.365	3.29	4.13	
	2.311	2.46	3.48	
제6-2깎기부	2.540	2.36	2.36	
화장국도 17호선	2.155	2.07	1.93	
제2산단IC	1.642	1.71	1.86	

3) 지표하 2m 위치시

표 4.30 Ⅱ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 2m)

구 분	SLOPE/W	TALEN 97	GSTABL 7	비 고
제1깎기부	1.556	1.85	1.71	
제2깎기부	3.302	3.50	3.44	
	1.568	1.33	0.78	
제6-1깎기부	3.550	3.72	4.38	
	2.442	2.52	3.57	
제6-2깎기부	2.741	2.66	2.38	
화장국도 17호선	2.292	2.32	1.94	
제2산단IC	1.760	1.96	2.01	

다. Ⅲ구간

1) 완전포화시

표 4.31 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표면 상단)

구 분	SLOPE/W	TALEN 97	GSTABL 7	비 고
제6깎기부	0.784	0.75	0.86	
제7깎기부	0.603	0.53	0.43	
제9깎기부	0.679	0.72	0.68	

2) 지표하 1m 위치시

표 4.32 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 1m)

구 분	SLOPE/W	TALEN 97	GSTABL 7	비 고
제6깎기부	1.176	0.99	1.05	
제7깎기부	0.686	0.63	0.45	
제9깎기부	0.991	1.05	0.98	

3) 지표하 2m 위치시

표 4.33 Ⅲ구간 비탈면안정 분석결과 요약 (지표하 2m)

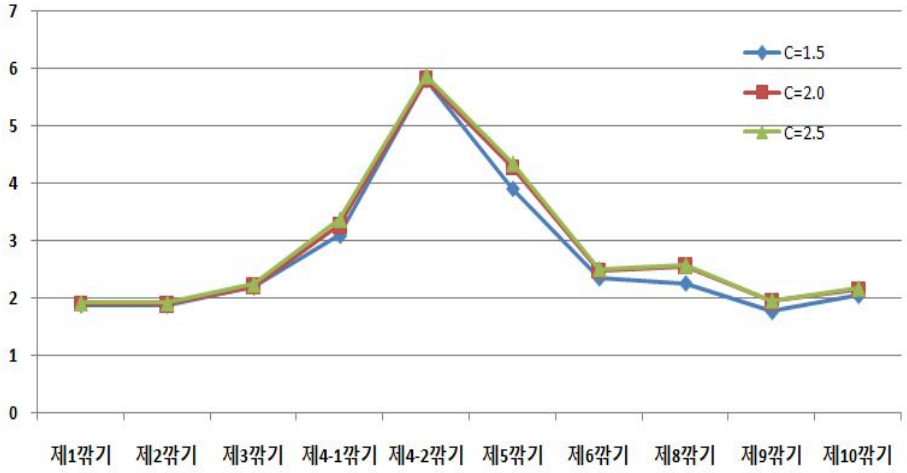
구 분	SLOPE/W	TALEN 97	GSTABL 7	비 고
제6깎기부	1.369	1.29	1.24	
제7깎기부	0.743	0.67	0.51	
제9깎기부	1.155	1.45	1.22	

제5장 종합분석 및 고찰

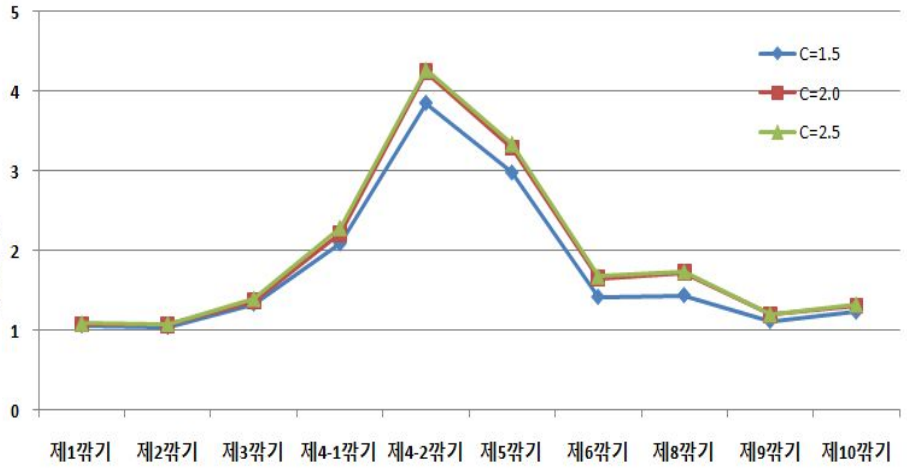
가. 전단강도 변화에 따른 안전율 경향

1) Ⅰ구간 안전율 경향

건 기 시(SLOPE/W)

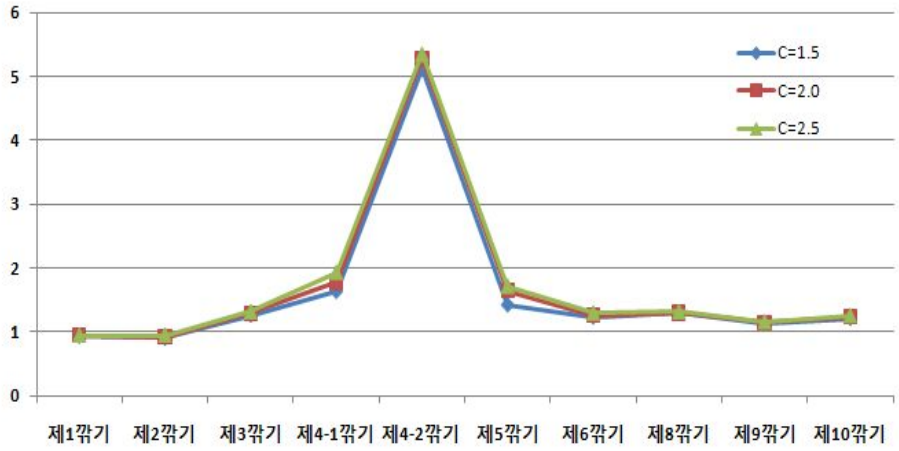


우 기 시(SLOPE/W)

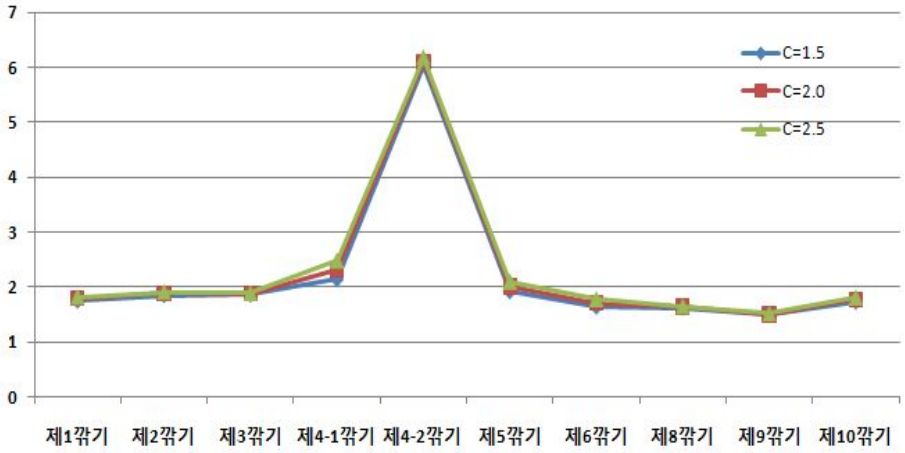


건 기 시(TALEN97)

우 기 시(TALEN97)



건 기 시(GSTABL7)



우 기 시(GSTABL7)

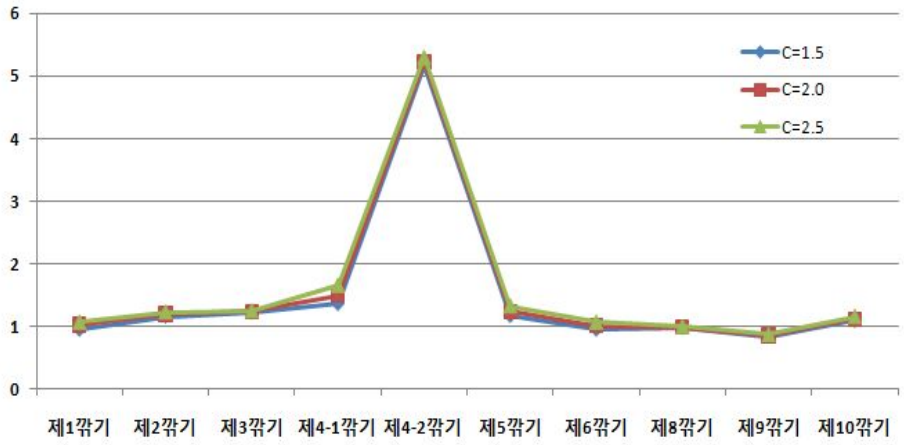
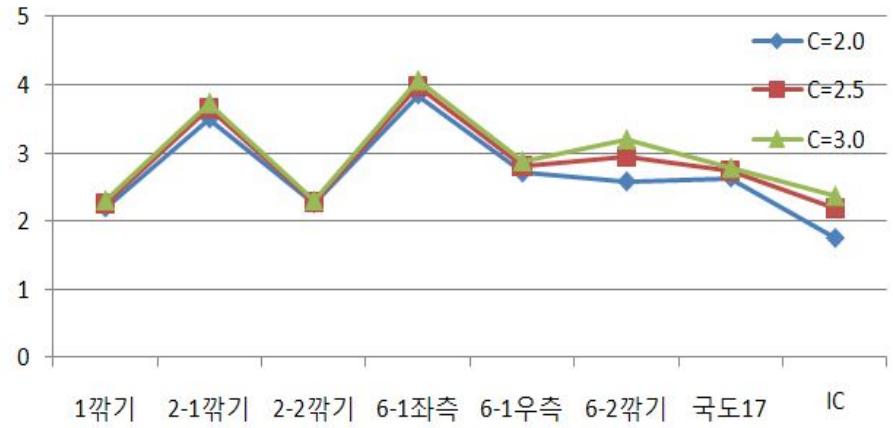


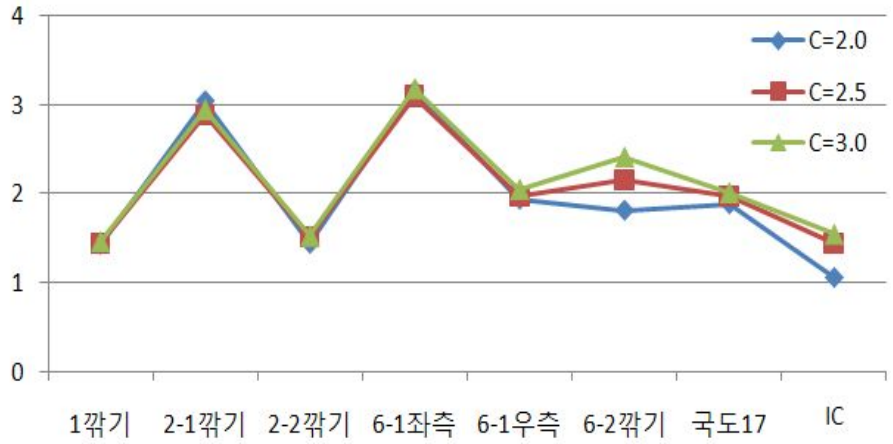
그림 5.1 I 구간 전단강도 변화에 따른 안전율 경향

2) Ⅱ구간 안전율 경향

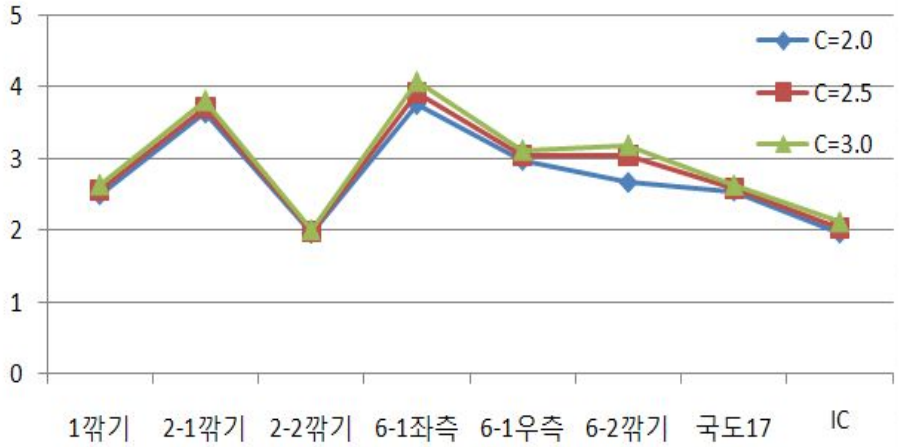
건 기 시(SLOPE/W)



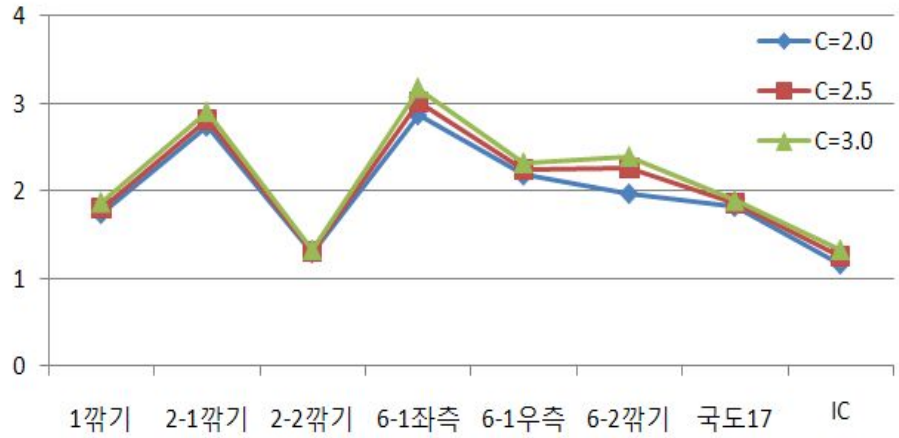
우 기 시(SLOPE/W)



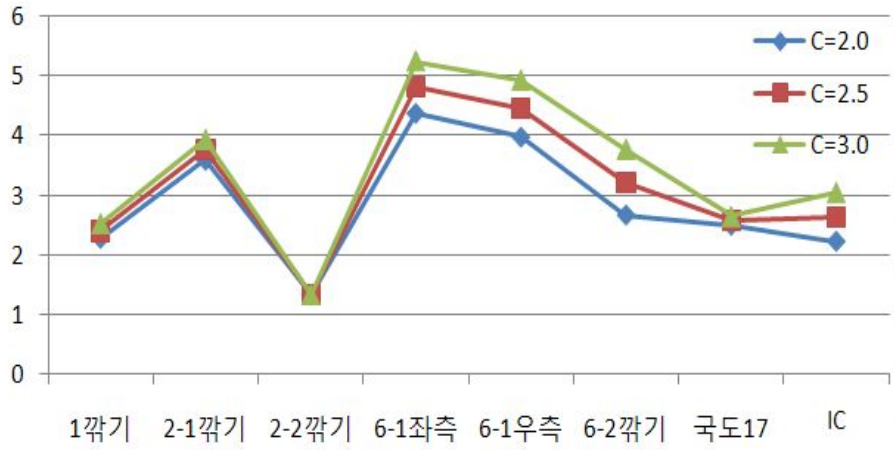
건 기 시(TALEN97)



우 기 시(TALEN97)



건 기 시(GSTABL7)



우 기 시(GSTABL7)

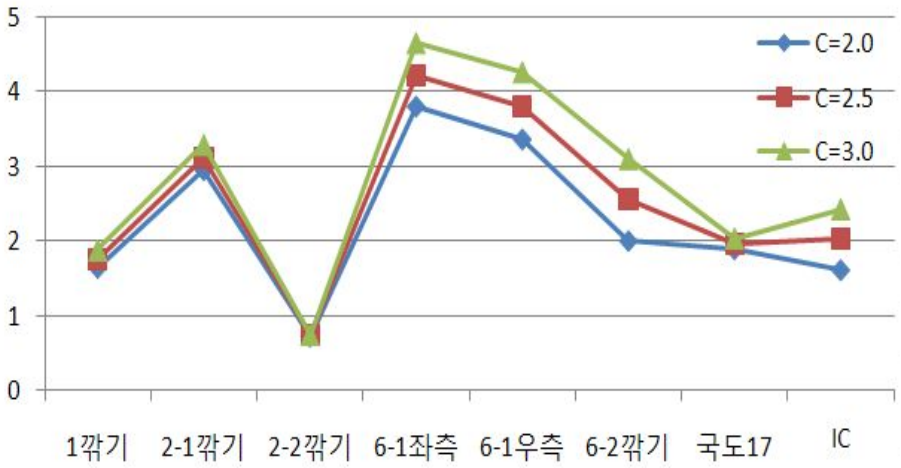
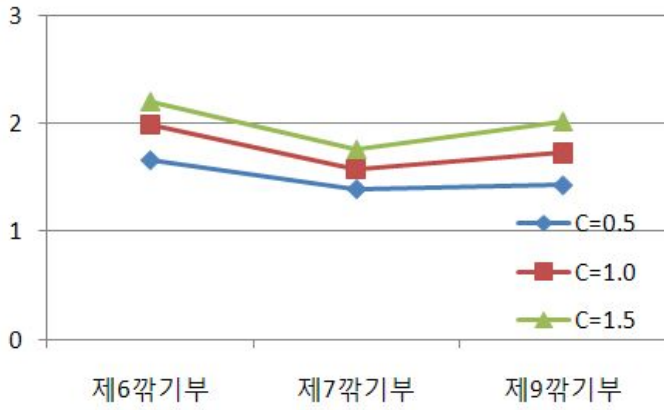


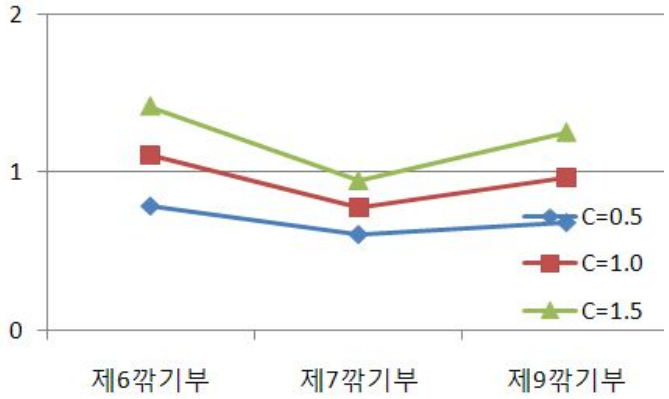
그림 5.2 Ⅱ구간 전단강도 변화에 따른 안전율 경향

3) Ⅲ구간 안전율 경향

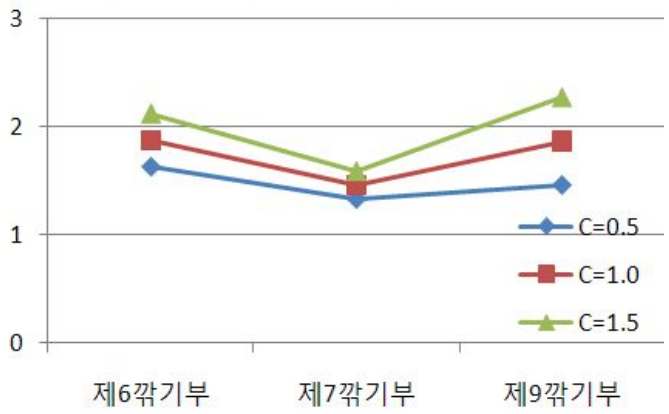
건 기 시(SLOPE/W)



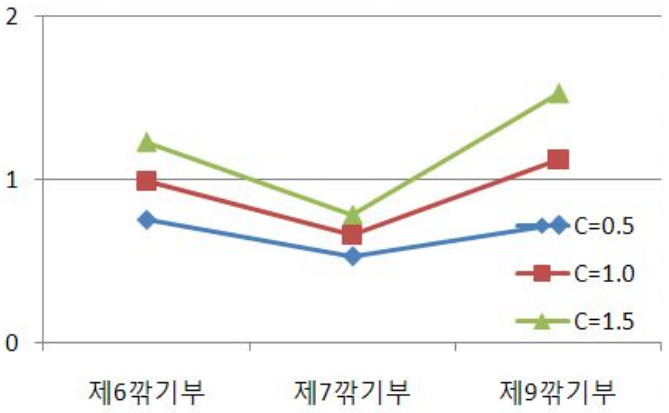
우 기 시(SLOPE/W)



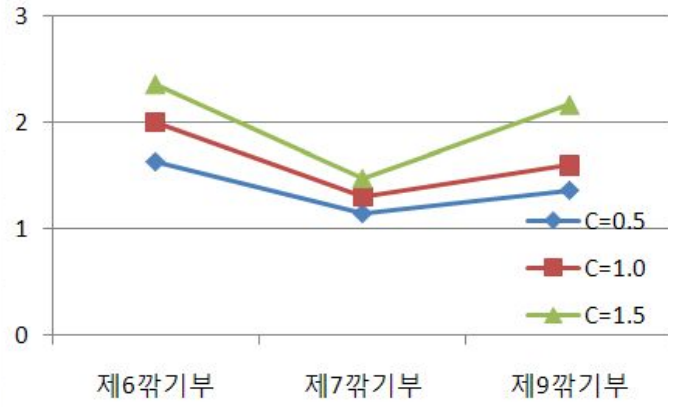
건 기 시(TALEN97)



우 기 시(TALEN97)



건 기 시(GSTABL7)



우 기 시(GSTABL7)

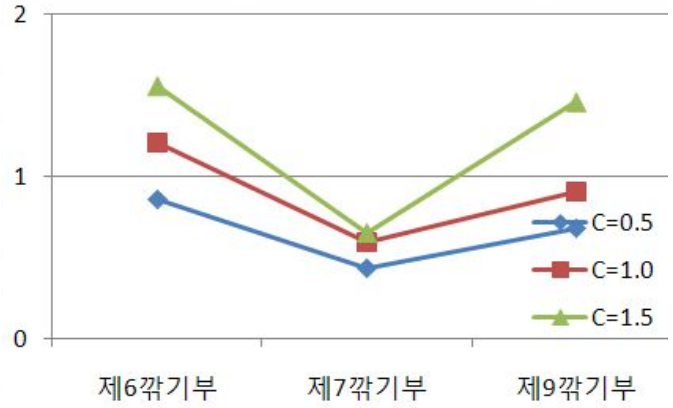
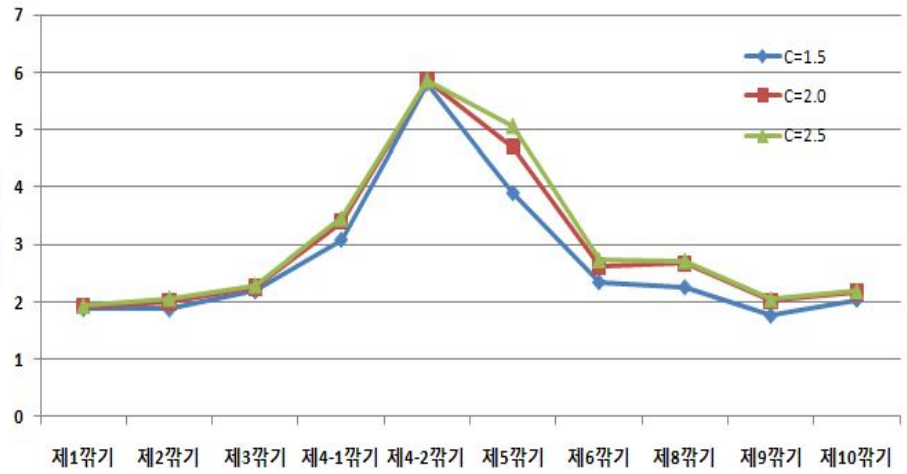


그림 5.3 Ⅲ구간 전단강도 변화에 따른 안전율 경향

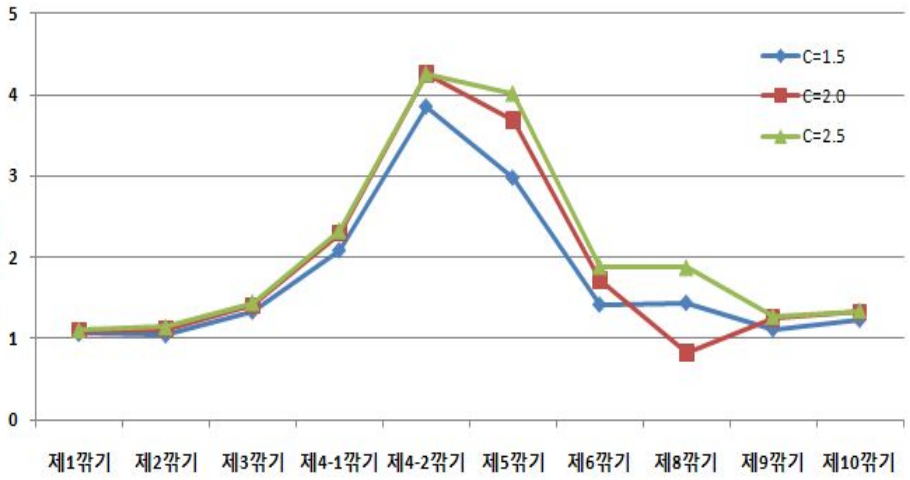
나. 사면경사 변화시 안전율 경향

1) Ⅰ구간 안전율 경향

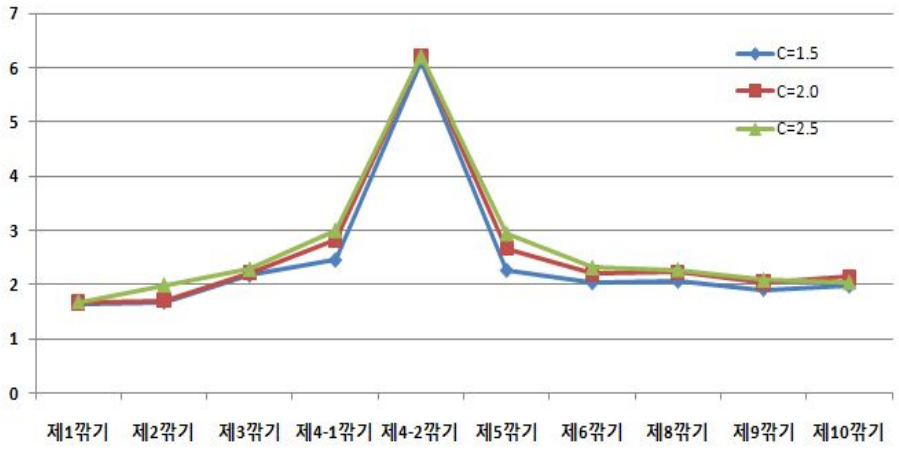
건 기 시(SLOPE/W)



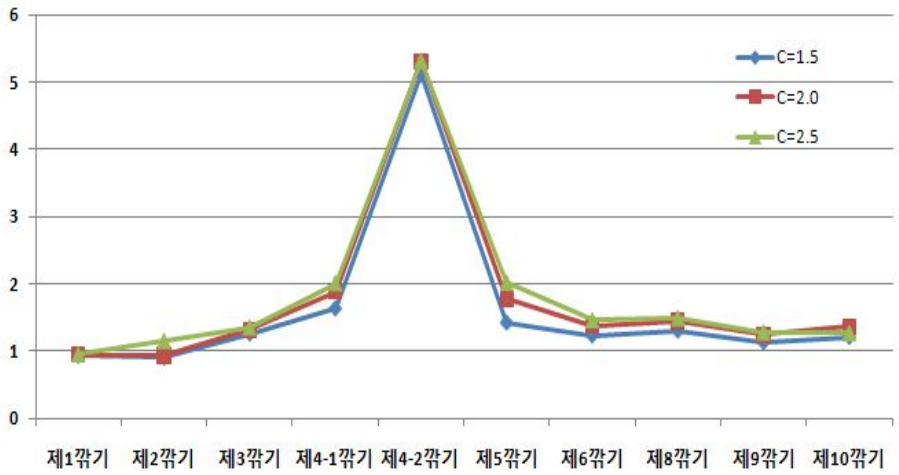
우 기 시(SLOPE/W)



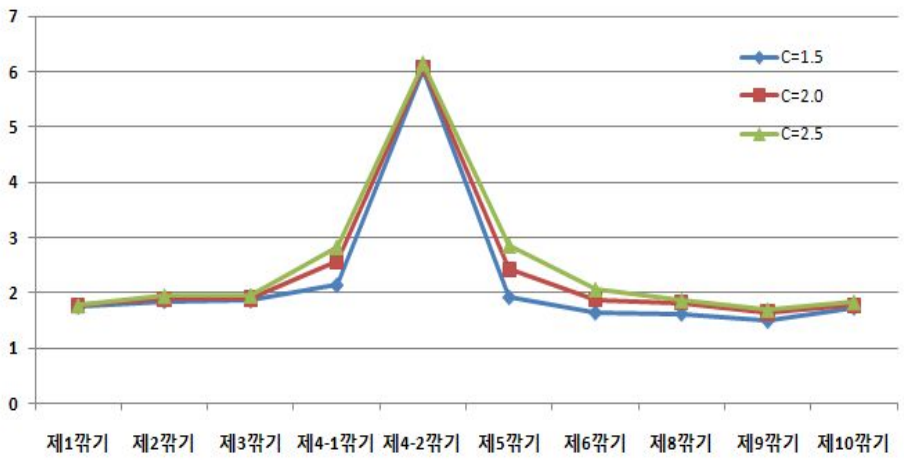
건 기 시(TALEN97)



우 기 시(TALEN97)



건 기 시(GSTABL7)

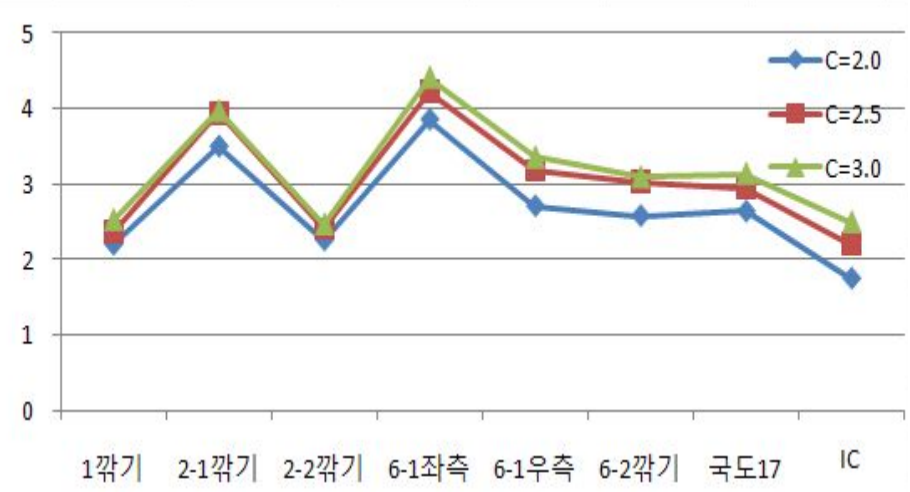


우 기 시(GSTABL7)

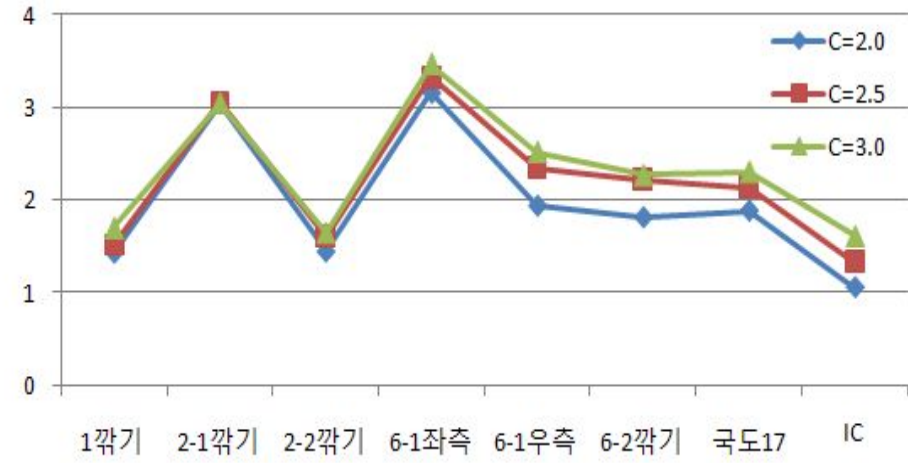
그림 5.4 Ⅰ구간 사면경사 변화에 따른 안전율 경향

2) Ⅱ구간 안전율 경향

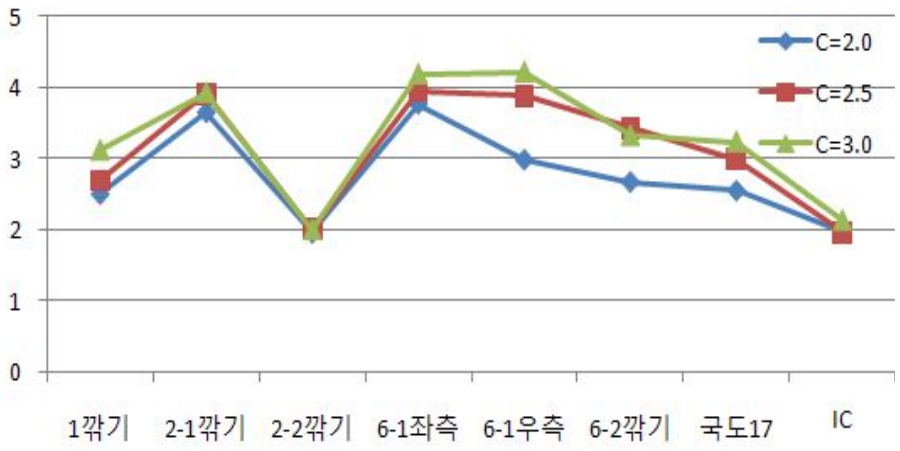
건 기 시(SLOPE/W)



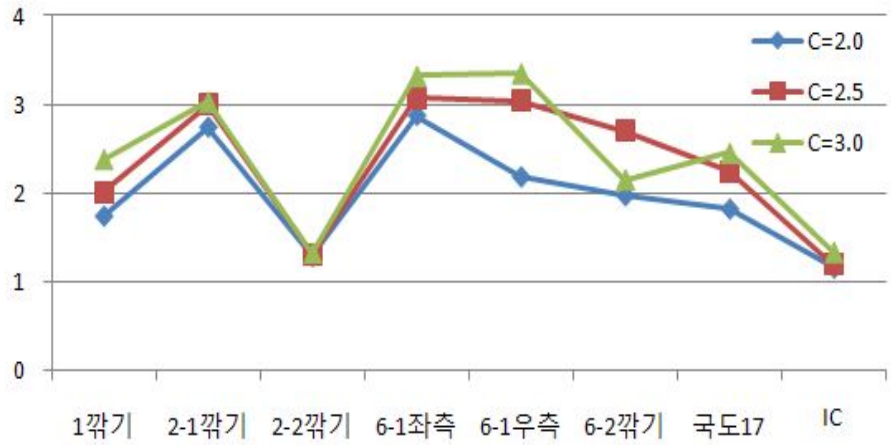
우 기 시(SLOPE/W)



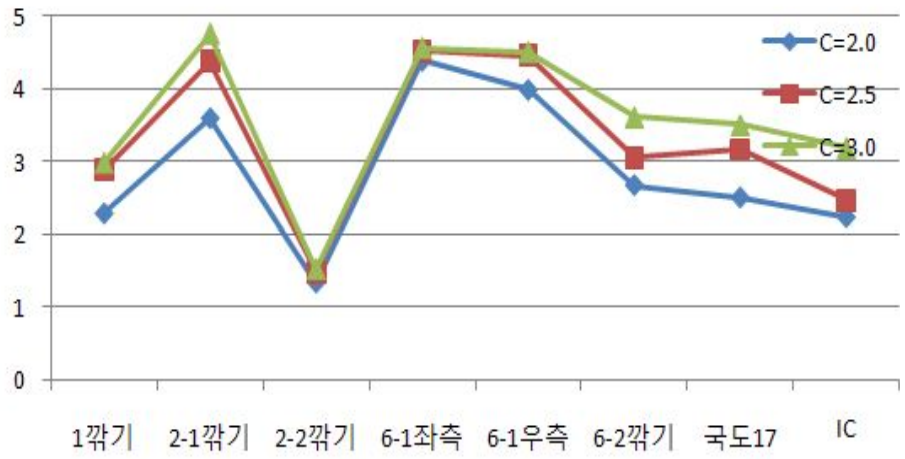
건 기 시(TALEN97)



우 기 시(TALEN97)



건 기 시(GSTABL7)



우 기 시(GSTABL7)

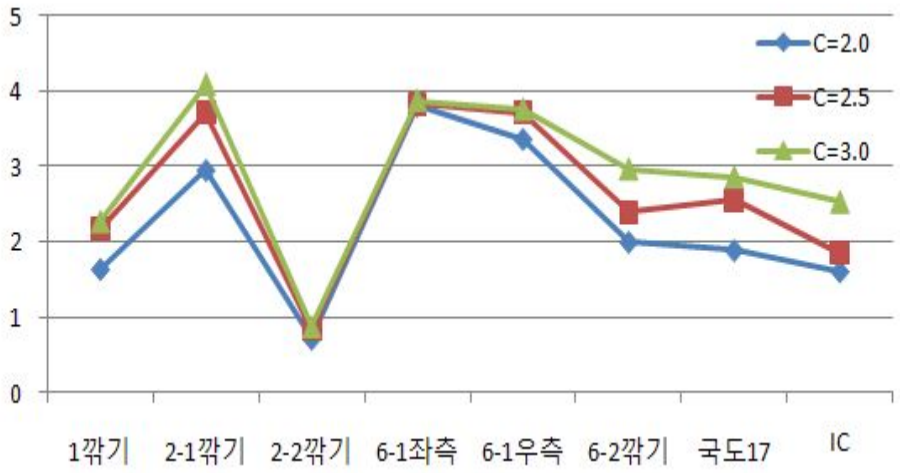
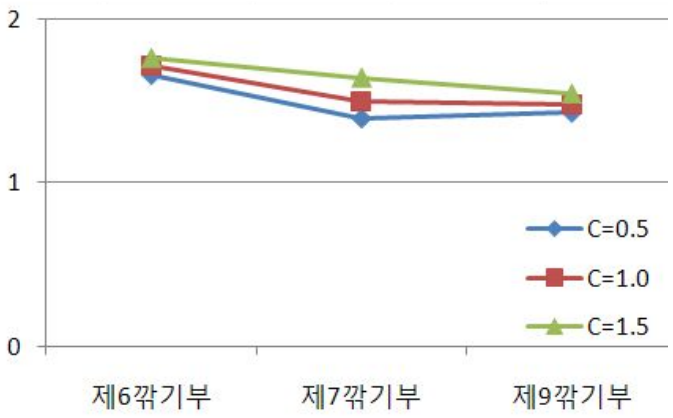


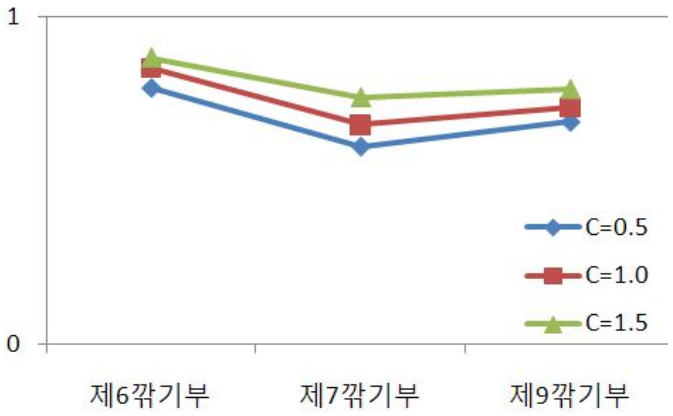
그림 5.5 Ⅱ구간 사면경사 변화에 따른 안전율 경향

3) Ⅲ구간 안전율 경향

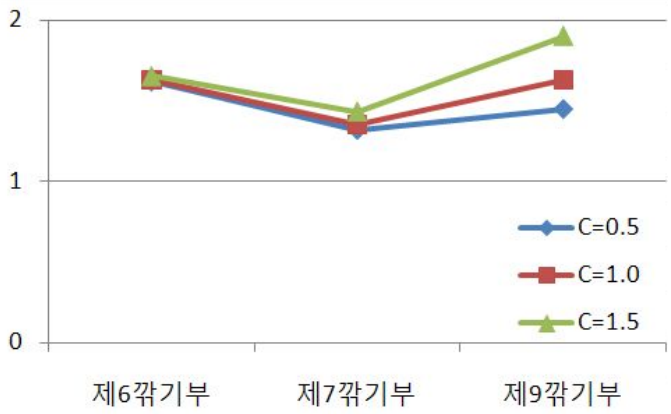
건 기 시(SLOPE/W)



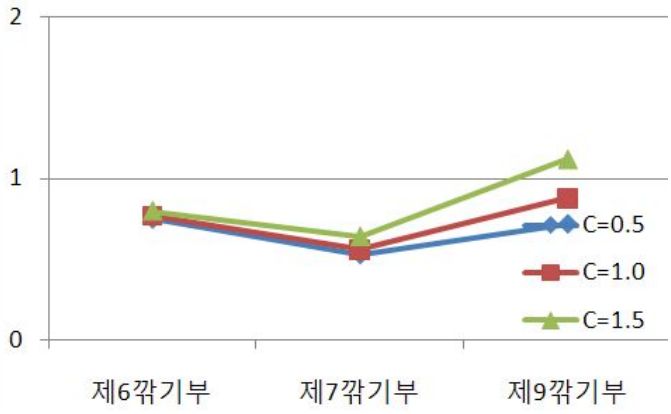
우 기 시(SLOPE/W)



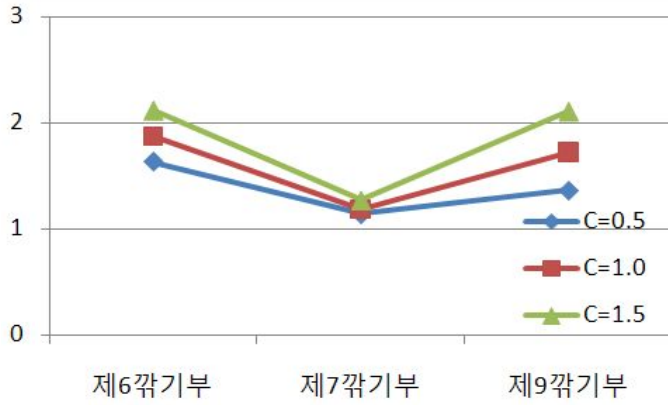
건 기 시(TALEN97)



우 기 시(TALEN97)



건 기 시(GSTABL7)



우 기 시(GSTABL7)

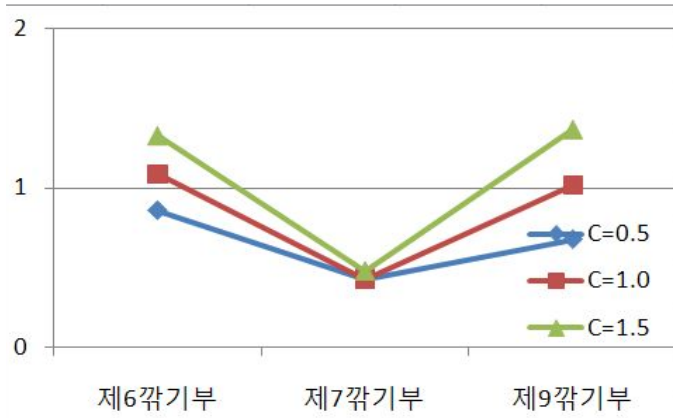
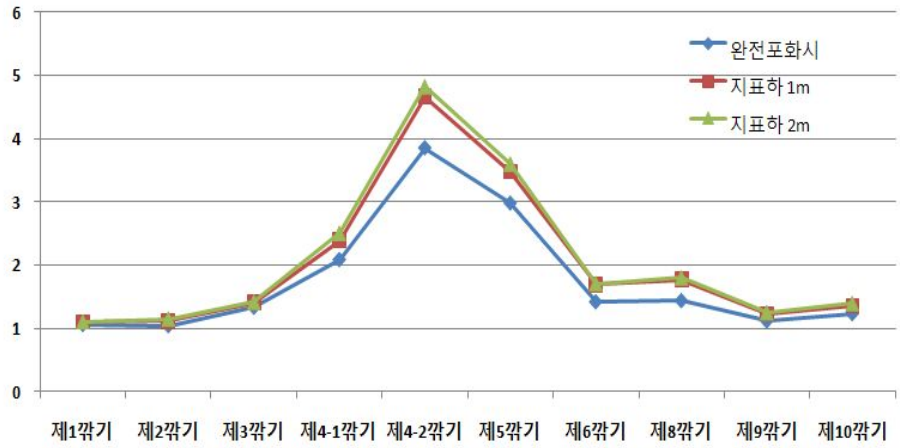


그림 5.6 Ⅲ구간 사면경사 변화에 따른 안전율 경향

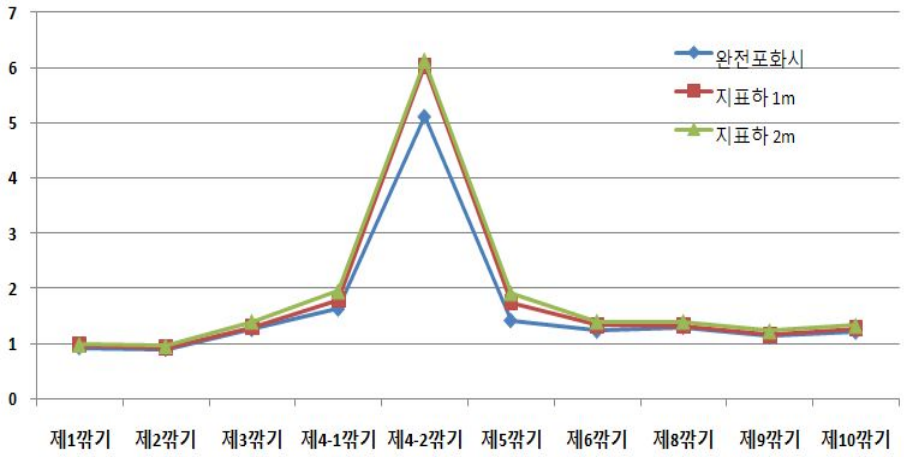
다. 지하수위 변화시 안전율 경향

1) Ⅰ구간 안전율 경향

SLOPE/W



TALEN 97



GSTABL 7

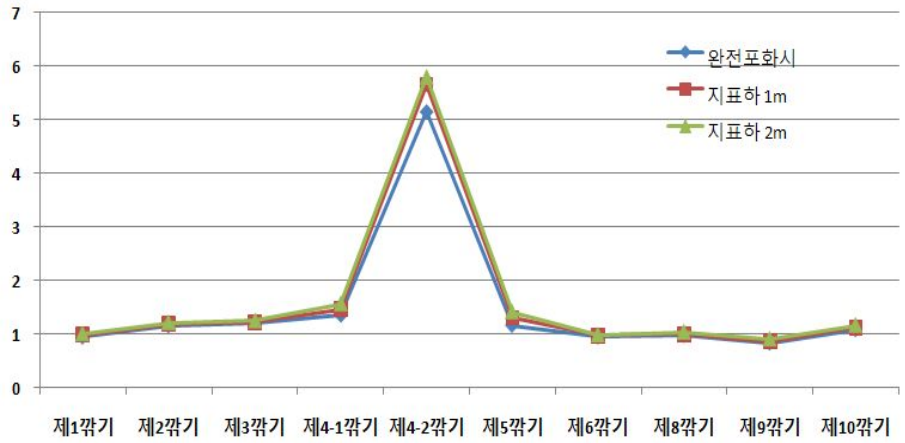
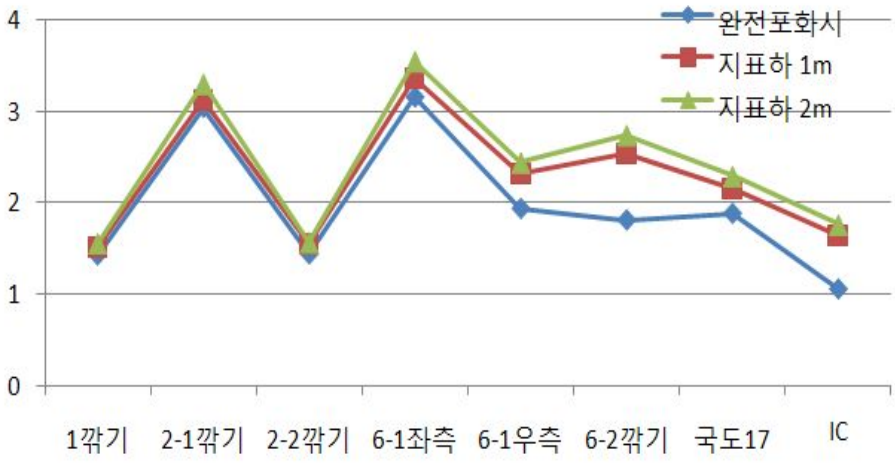


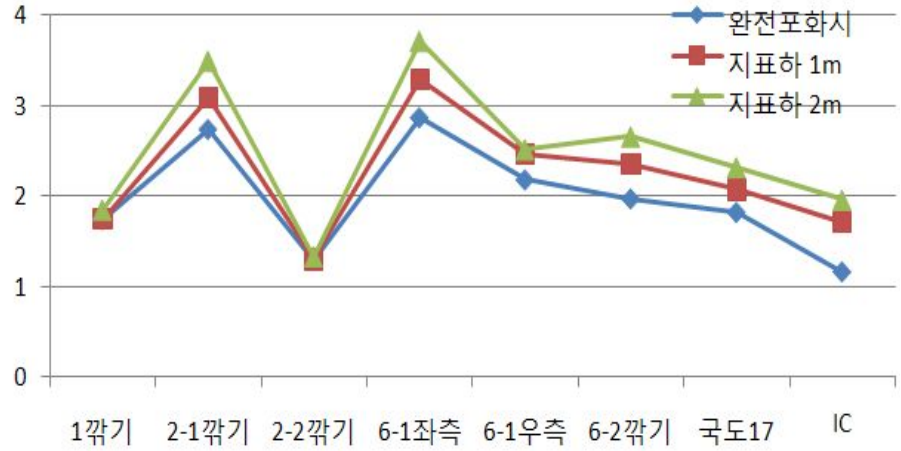
그림 5.7 Ⅰ구간 지하수위 변화에 따른 안전율 경향

2) Ⅱ구간 안전율 경향

SLOPE/W



TALEN 97



GSTABL 7

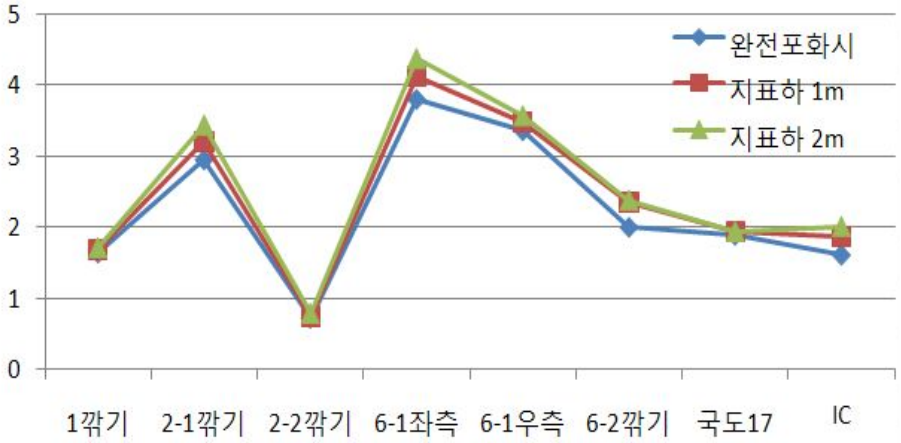
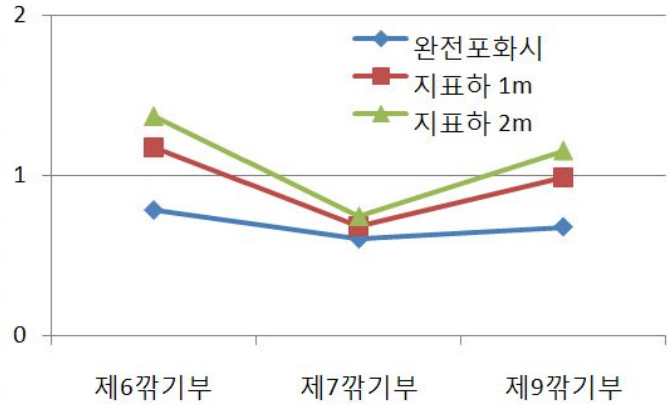


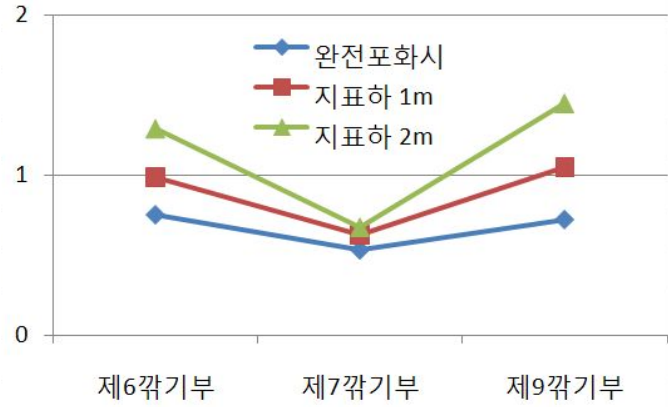
그림 5.8 Ⅱ구간 지하수위 변화에 따른 안전율 경향

3) Ⅲ구간 안전율 경향

SLOPE/W



TALEN 97



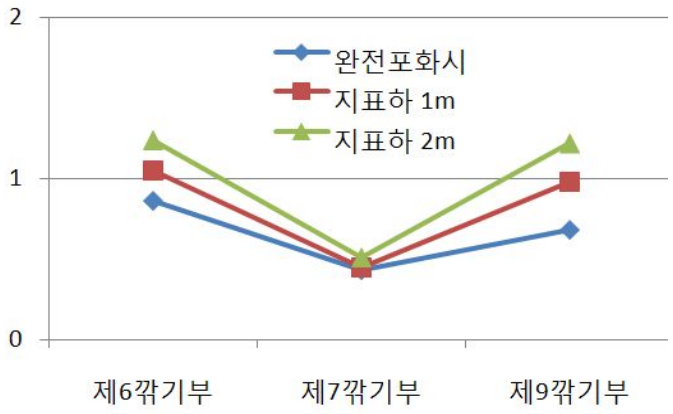


그림 5.9 Ⅲ구간 지하수위 변화에 따른 안전율 경향

이와 같이 실제 시공 또는 설계된 사면에 대하여 SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7 등 한계평형 해석프로그램을 이용하여 전단강도, 사면경사, 간극수압을 매개변수로 분석한 결과 프로그램 모델링에 따른 약간의 오차가 존재하지만 토사사면의 경우 지반의 전단강도가 증가할수록 안전율이 증가함을 확인할 수 있었으며, 사면경사가 완화될수록 해석 안전율이 커지며, 간극수압의 위치가 낮을수록 안전율은 커짐을 알 수 있다.

이는 지반의 전단강도, 사면경사, 간극수압의 영향에 따라 사면의 안전성이 크게 달라질 수 있음을 확인하는 것이며, 평가된 안전율도 토사사면의 전체적인 파괴 가능성에 대한 안정성을 평가하는데 유효한 것으로 판단할 수 있으나, 이는 임의의 한 구간에 대한 안전율을 나타낸 값이므로 전체 사면의 안정성을 판정 및 보수·보강공법을 결정하기에는 다소 불안정한 부분이 있는 것으로 판단된다.

제6장 결 론

본 연구는 우리나라 각기 다른지역에 분포하는 실제 설계 또는 시공이 이루어진 경상북도 김천~교리국도건설공사 현장의 절토사면 10개소, 전라남도 여수~순천간 도로 확·포장공사 현장의 절토사면 8개소, 광주~양수간 국도확장공사 절토사면 3개소를 대상으로 하였으며, 토사층에 대한 전단강도, 사면경사, 간극수압을 매개변수로하여 약 300여회의 한계평형해석 프로그램 SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7 등을 이용하여 사면안정해석을 실시하였다. 안정성 해석결과를 상호 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 토사사면에 대한 SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7의 프로그램을 이용 한계평형해석을 실시한 결과 검토안전율이 Ⅰ구간에서 건기시 SLOPE/W의 경우 1.760~5.790, TALEN 97의 경우 1.65~6.12, GSTABL 7의 경우 1.49~6.03으로 검토되었으며, 우기시 SLOPE/W의 경우 1.044~3.852, TALEN 97의 경우 0.90~5.12, GSTABL 7의 경우 0.84~5.16으로 SLOPE/W의 안전율이 대체적으로 크게 검토되었으며 TALEN 97, GSTABL 7이 순서로 작은 안전율 경향을 나타냈다. Ⅱ구간, Ⅲ구간도 Ⅰ구간과 유사한 안전율 경향이 나타났다.

2. 지하수위 위치에 따른 안전율 경향은 Ⅰ구간에서 완전포화시 SLOPE/W의 경우 1.044~3.852, TALEN 97의 경우 0.90~5.12, GSTABL 7의 경우 0.84~5.16으로 검토되었으며, 지표하 1m일 때 SLOPE/W의 경우 1.098~4.662, TALEN 97의 경우 0.93~6.03, GSTABL 7의 경우 0.87~5.66으로 검토되었으며, 지표하 2m일 때 SLOPE/W의 경우 1.110~4.818, TALEN 97의 경우 0.96~6.12, GSTABL 7의 경우 0.91~5.80으로 검토되었다. Ⅱ,Ⅲ구간에서도 SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7의 순서

로 작아지는 안전율 경향을 나타냈다.

3. 지반의 전단강도를 다르게 했을 경우 안전율 경향은 I 구간에서 C=15kN/m^2 일 때 우기시 SLOPE/W의 경우 1.044~3.852, TALEN 97의 경우 0.90~5.12, GSTABL 7의 경우 0.84~5.16으로 검토되었으며, C=20kN/m^2 일 때 SLOPE/W의 경우 1.071~4.244, TALEN 97의 경우 0.92~5.28, GSTABL 7의 경우 0.86~5.23으로 검토되었으며, C=25kN/m^2 일 때 SLOPE/W의 경우 1.091~4.271, TALEN 97의 경우 0.94~5.36, GSTABL 7의 경우 0.87~5.30으로 지하수위 위치 변화시의 경우에 비해서 안전율 감소의 폭은 적지만 SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7의 순서로 작아지는 안전율 경향을 나타낸다.

4. 토사층의 사면경사를 다르게 했을 경우 안전율 경향은 I 구간에서 사면경사 1:1.5 일 때 우기시 SLOPE/W의 경우 1.044~3.852, TALEN 97의 경우 0.90~5.12, GSTABL 7의 경우 0.84~5.16으로 검토되었으며, 사면경사 1:1.8 일 때 SLOPE/W의 경우 1.098~4.255, TALEN 97의 경우 0.93~5.31, GSTABL 7의 경우 0.96~5.22으로 검토되었으며, 사면경사 1:2.0 일 때 SLOPE/W의 경우 1.105~4.251, TALEN 97의 경우 0.95~5.32, GSTABL 7의 경우 0.97~5.29으로 SLOPE/W, TALEN 97, GSTABL 7의 순서로 작아지는 안전율 경향을 나타낸다.

참 고 문 헌

김일구(2009), “퍼지-신경망에 의한 사면지반의 안정성 평가방법에 관한 연구”, 공학박사학위논문, 조선대학교 대학원, pp.7～30.

이종규·장서만(1996), “사면안정해석 방법에 관한 비교연구”, 대한토목학회 봄학술발표회 논문집, 제16권, 제 Ⅲ-4호, pp.359～368.

서영교(2001), “사면안정해석의 수치 모델링”, 대한토목학회 가을학술발표회 논문집, 제 21권, 제 6-C호, pp.625～632.

홍원표·한중근·이형·송영석(2003), “우리나라 절개사면의 사면안정 설계법에 관한 연구”, 대한토목학회 1999년도 학술발표회 논문집, pp.53～56.

오희주(2008), “강우시 침투영향을 고려한 사면안정해석에 관한 연구”, 공학박사학위논문, 조선대학교 대학원, pp.1～8.

장범수·신창건·최용기·안상로(2004), “절토사면 안전관리 요령”, 대한토목학회 가을학술발표회 논문집, 제 51권, 제 12호, pp.11～25.

박연준·채영수·유광호·백영식(2002), “절편법과 유한차분법에 의한 사면안정해석 비교연구”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, 제 15권, 제 6호, pp.263～272.

유남재·박병수·전상현·조한기(2006), “토사사면에서의 영향인자에 따른 사면안정성 비교연구”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, pp. 1208～1211.

주경훈·김주철·이종규(1994), “프로그램과 도표에 의한 사면안정해석의 비교연구”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.253～257.

김영수(1988), “사면안정의 확률론적 해석”, 대한토목학회 논문집, 제 8권, 제 3호, pp.85～90

이광모·심태섭·김선학·최용준(2005), “강우강도에 따른 무한사면의 간극수압 변화 특성”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.4442～4445

한국도로공사(1996), “도로교설계실무편람”, 토질 및 기초, 한국도로공사

김영수(1988), “사면안정의 확률론적 해석”, 대한토목학회 논문집, 제 8권, 제 3호, pp.85~90.

전성기(2002), “실무자를 위한 사면안정화 설계실무편람”, 사면의 안정성 해석방법, 도서출판 과학기술, pp.1~105.

최인걸·박영목(2007), “현장실무를 위한 지반공학”, 사면안정, 구미서관, pp.147~176.

한국도로공사(1996), “도로설계 실무지침”

신종호·이인모(2001), “토질역학”, 사면안정론, 도서출판 엔지니어, pp.610~644.

Anderson, M.G and Richards, K.S.,(1987), " Slope Stability Ch.2 A Comparative Review of Limit Equilibrium Methods of Stability Anlysis," John Wiley and Sons.

Bishop, A.W.(1955), The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of slopes, Geotechnique, Vol.5, No.1, pp.7～17.

Hencger S.R. and R.P. Martin(1984), "The Failure of a Cut Slope on the Tuen Mun Road in Hong Kong", Int. Conf. on Rolla,(ed. S. Prakash), Vol.2, pp.683～688.

Lukman P.G.(1987), "Slope Stability Assessment Under Uncertaninty: A First Order Stochastic Approach", Ph.D. Thesis, Dept of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

Meyerhof, G. G.(1982), "Limit State Design in Geotechnical Engineering Structural Safety, Vol. 1.

감사의 글

부족한 저에게 2년여의 대학원 석사과정이 끝나고 이렇게 결실을 맺기까지 변함없는 사랑과 관심을 베풀어주신 안종필 교수님과 사모님께 감사드립니다. 때론 아버님처럼 따뜻함과 엄격한 모습으로 격려와 가르침을 베풀어주신 안종필 교수님 항상 교수님의 가르침을 평생 가슴에 품겠습니다(존경합니다!!).

바쁘신 가운데 귀한 시간을 허락하시어 본 논문에 대해 세심한 지도·격려·조언을 해주신 박길현 교수님, 오재화 교수님, 김운중 교수님, 김성홍 교수님, 박정웅 교수님, 김대현 교수님 정말 감사드립니다.

제가 논문에 대해 방황할 때 본 논문의 방향을 잡아주시고 소중한 조언을 해주신 박주원 선배님 그리고 서울에서 많은 관심을 가져주시며 보살펴 주신 안기문 선배님과 형수님, 매주 연구실에 오셔서 전공과 가치관에 대해서 많은 조언을 주신 박상범 선배님·박경호 선배님 정말 감사드립니다.

지반공학연구실의 선배이시면서 인생선배로써 많은 용기와 지혜, 관심을 기울여 주신 서재우 선배님, 김현태 선배님, 나상한 선배님, 오희주 선배님, 최병남 선배님, 김대해 선배님, 김석재 선배님 깊은 감사 드립니다.

논문을 세세히 살피면서 많은 부족한 점을 지적해주신 서준형 선배님, 평소에 여러 가지 자료 및 조언을 해주신 임재춘 형님, 최진호 형님 감사드립니다.

항상 연구실 옆자리에서 많은 힘을 주신 허홍균 형님, 이번 논문을 준비하면서 여러 가지 도움을 준 장석인 후배님, 박경호 후배님 고맙습니다.

듬직한 내 친구 이동준, 이창훈, 김주현, 위창환, 김태진, 노경태, 노재철, 안현우 등 많은 친구들에게 감사에 마음을 전하며 앞으로의 우정이 계속되길 기원합니다(화이팅!!).

사회생활동안 따뜻한 보살핌을 주신 이남구 사장님, 윤경석 전무님, 오승배 이사님, 안용관 차장님, 김광빈 과장님, 박제형과장님의 따뜻한 보살핌 감사합니다.

저를 길러주신 부모님인 큰형님, 큰형수님 오늘날의 제가 있는 것은 모두 두분의 사랑 덕분입니다. 두분의 은혜를 잊어버리지 않고 보답하겠습니다(사랑합니다).

끝으로 논문쓰는 동안에 연구실까지 도시락을 싸다 나르며 고생한 나의 연인 김명랑에게 감사와 사랑의 마음을 드립니다.

오늘의 결실이 있기까지 많은 관심을 기울여주신 모든분께 다시한번 고개숙여 감사의 말씀 드립니다. 항상 건강하시고 행복한 삶을 기원합니다.

저작물 이용 허락서

학 과	토목공학과	학 번	20077062	과 정	석사
성 명	한글: 강 준 원 한문 : 姜 儁 遠 영문 : Kang, Jun-Won				
주 소	광주광역시 광산구 월계동 대우아파트 104동 1402호				
연락처	E-MAIL : grain6@nate.com				
논문제목	한글 : Bishop의 간편법에 의한 사면안정해석 프로그램의 특성분석 영어 : A Characteristic Analysis on the Program of Slope Stability Analysis by Bishop's Simplified Method				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(o) 반대( )

20010년 2월 일

저작자: 강 준 원 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하