

## 강원도 정선군 고한 지역 붕괴사면의 수치해석을 이용한 사면안정성 평가

장현식<sup>1</sup> · 이주용<sup>2</sup> · 서용석<sup>3</sup> · 장보안<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지구물리학과, <sup>2</sup>한국시설안전공단, <sup>3</sup>충북대학교 지구환경과학과

### Stability Evaluation of failed Slope in Gohan, Korea using Numerical Analysis

Hyun-Sic Jang<sup>1</sup>, Ju-Young Lee<sup>2</sup>, Yong-Seok Seo<sup>3</sup>, and Bo-An Jang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University

<sup>2</sup>Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

<sup>3</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

Received 18 November 2014; received in revised form 28 November 2014; accepted 3 December 2014

확장공사 중 큰 규모의 붕괴가 발생한 사면에 대하여 현재와 확장공사 완료 후의 안정성을 평가하기 위하여 한계평형법과 유한차분법을 이용하여 안정해석을 실시하였다. 이 지역은 복잡한 공학적 특성을 갖는 붕적층이 존재하여 안정해석을 위한 해석모델 결정이 쉽지 않다. 따라서 실제 사면의 상태를 반영하는 해석모델을 만들기 위해 경계면(파괴면)의 형상과 지반강도정수를 변화시켜가며 역해석을 실시하여 최종적인 해석모델을 결정하였다. 대책공법으로 고려한 억지말뚝이 적용된 해석모델은 비교적 안정한 상태로 분석되었으며, 이러한 해석결과는 실제 사면의 상태와 일치하는 것이다. 또한 이 연구에서 제시된 해석모델과 지반물성은 향후 계획중인 사면 절취공사 시 지반의 안정성을 확보하는데 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어:** 안정해석, 한계평형법, 유한차분법, 붕적층, 역해석

Limit equilibrium analysis and finite difference analysis were used to evaluate slope stability in the in Gohan, Korea, which is affected by large-scale tensile cracks and uplift. There is a thick colluvial layer in the study area and predicting ground behavior is problematic because the presence of clay makes it difficult to determine the strength parameters of the soil. Consequently, a numerical model able to reflect the collapse properties of the site was required that applied the modified boundary layer model and calculated the strength parameters using back analysis. The numerical simulation results that consider the strength parameter one does with the present situation the establishment of the pile is completed, and the simulation is able to asses ground stability in complex terrain in a reliable manner. Also the somewhat it judges with the fact that it will be able to provide the fundamental data which secures the stability of the segment where it is unstable.

**Key words:** stability evaluation, limit equilibrium, finite difference, colluvial layer, back analysis

\*Corresponding author: [bajang@kangwon.ac.kr](mailto:bajang@kangwon.ac.kr)

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

최근 산지나 구릉지에 대한 개발이 빈번해짐에 따라 많은 사면들이 생성되고 있으며, 이중에는 안정성에 문제가 있거나 실제로 붕괴가 발생하는 사례도 종종 보고되고 있다. 특히, 사람들이 많이 이용하는 시설물 주변에서의 사면붕괴는 심각한 인적, 물적 피해를 유발하므로 정확한 안정성 평가에 기초한 사면안전대책 수립이 요구된다. 사면의 안정성 분석은 대상 사면의 구성물질과 붕괴유형에 따라 여러 방법이 사용되고 있으나, 분석 목적에 부합되게 적절한 방법을 선택해야 한다. 대표적인 사면 안정성 분석방법으로는 암반분류법 등을 이용한 경험적인 방법, 평사투영해석(stereographic projection analysis)과 같은 운동학적 분석(kinematic analysis), 한계평형해석(limit equilibrium analysis) 및 수치해석(numerical analysis)과 같은 동역학적 분석(kinetic analysis) 등이 있다. 이중에서도 한계평형해석은 다양한 형태의 붕괴조건에서도 적용이 가능하고 사면의 안정성을 직관적으로 판단할 수 있는 안전율을 결정할 수 있어서 많은 연구자들과 엔지니어들로부터 오랫동안 선호되어 사용되어 왔다(Anderson and Richards, 1987). 최근에는 컴퓨터 성능의 향상으로 유한요소법(Finite element method, FEM)과 유한차분법(Finite difference method, FDM) 등을 이용한 전산 수치해석도 널리 사용되고 있으며 한계평형해석 결과와의 비교를 통하여 해석결과의 타당성을 보완하고 있다. 수치해석의 주된 목적은 지반구조의 변형정도를 정량적으로 예측하는 것이지만 근래에는 강도감쇠기법을 이용하여 안전율을 간접적으로 구하여 한계평형해석에서 계산된 안전율과 비교하는 연구들도 수행되고 있다(Matsui and San, 1992; Griffith and Lane, 1999; Park et al., 1999; Lechman and Griffiths, 2000). Park et al. (1999)은 유한차분법을 기반으로 하는 지반해석용 프로그램 FLAC에서 계산된 사면의 안전율과 Chen (1975)의 한계평형해석 결과를 비교 검증하고, 비교적 복잡한 지반조건을 갖는 Fredlund and Krhan (1977)의 연구사면에 적용할 때 한계평형해석 결과와 비교하여 작은 오차범위 내에서 비교적 잘 일치한다고 보고하였다.

사면 안정성 분석 과정에서 가장 중요한 단계는 대상 지반에 대한 정확한 정보를 수집하여 안정해석에 적용할 합리적으로 단순화된 해석모델을 설정하는 것이다. 그러나 대부분의 사면은 다양한 지질구조의 발달과 공학적인 지층 경계선을 설정함에 있어 어려움이 있기 때

문에 원지반의 상태를 효과적으로 나타낼 수 있는 해석 모델을 설정하는 것이 쉽지 않다. 또한 토층과 암반의 경계가 뚜렷하게 나타나는 경우와 점토물질이 포함된 지반의 경우에는 함수상태와 간극수압 등의 수리조건에 따라 지반의 역학적 특성이 변하게 되므로 수리조건에 따른 지반의 전단강도 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하게 여겨지고 있다(Lee, 1997; Lee, 2001). 따라서 이러한 복잡한 지반조건에 대한 합리적인 안정성 분석을 위해서는 다양한 해석모델을 도입하여 실제 지반상태와 잘 부합되는 최적의 해석모델과 각 지층의 전단강도를 합리적으로 추정하려는 노력이 필요하다.

이 연구에서는 복잡한 지층구조를 가지며, 굴착 공사 중 대규모 인장균열과 지반용기가 발생한 불안정 사면을 대상으로 시공 단계별 사면의 안정성을 평가하였다. 이를 위해 지표지질조사 및 시추조사 자료를 바탕으로 안정해석에 적용할 해석모델을 설정하였으며, 한계평형해석을 이용한 역해석 방법으로 파괴면(활동면)의 위치와 지반강도정수를 결정하였다. 또한 동일한 해석모델과 지반강도정수가 적용된 한계평형해석과 유한차분해석 결과를 비교하여 적용된 해석모델과 지반강도 정수의 적절성을 검토하고 추가 굴착에 따른 사면의 안정성 및 보강공법의 효과를 검토하였다.

## 연구지역의 지질 및 붕괴이력

연구지역은 강원도 정선군 고한읍 지역의 해발 784 m에 위치하는 면적 27,582 m<sup>2</sup>의 대규모 절취사면이다. 이 지역 일대는 호명도폭(Geological Society of Korea, 1962)에 해당하며, 평안누층군 분포지 중의 하나인 삼척탄전 서부에 해당하며 도사곡층과 고한층이 분포한다. 연구지역의 주된 지질은 고방산통의 상부에 해당되는 도사곡층으로 삼척탄전 중부 및 서부의 함백향사의 축부를 따라 광범위하게 분포하며 하위의 함백산층을 정합으로 덮고, 상위의 고한층에 의하여 정합으로 덮인다. 주로 담록색 내지 담회색의 조립사암이 우세하며 녹회색과 적색 세일이 협재해 있다. 연구지역의 지질도와 지질계통은 Fig. 1과 같다.

연구사면은 절취공사 중 폭 0.8 m, 연장성 300 m 가량의 대규모 인장균열과 함께 사면 하부에서 용기가 발생하였다. 계획 토공량의 20%를 절취한 상태에서 인장균열이 발생하였고 확장공사의 모든 범위로 균열이 확대되었다. 지반조사 및 계측 결과에 의하면 변위속도 20~30 mm/day의 지속적인 지반거동이 발생하는 것으로

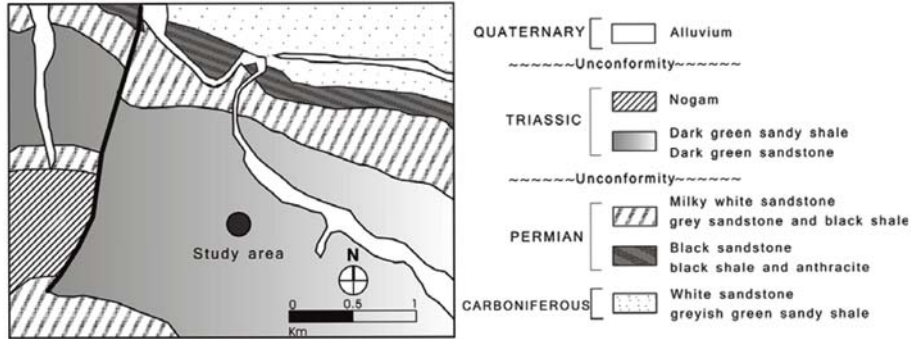


Fig. 1. Geological map of the study area (Gohan, Korea), modified from Geological Society of Korea (1962).

분석되어, 현재는 지반거동을 억지하기 위한 억지말뚝이 시공된 상태이다. 억지말뚝은 활동도괴의 중앙을 기준으로 시공되어야 하나, 확장공사가 예정된 관계로 사면 상부에 시공위치가 선정되었다. 따라서 억지말뚝의 보강효과에 대한 사면 안정성 검토와 향후 확장공사구간의 절취 시 사면의 안정성 평가를 필요한 상태이다. Fig. 2는 연구지역의 현재 상태를 묘사한 그림으로 실선으로 나타난 1열의 억지말뚝이 시공된 상태이며, 조사를 위해 시추한 시추공들의 위치가 함께 표시되어 있다. 또한 확장공사구간에 대한 절취 완료 후 추가로 타설되는 억지말뚝의 위치는 점선으로 나타나있다. 지반거동의 시작점인 대규모 인장균열은 상부사면 북서쪽에 위치하고 있으며, 확장공사구간에 해당되는 하부사면에 균열의 수직 방향으로 용기부가 위치하고 있다. 하부사면의 동쪽은 붕적층 및 전석의 붕락이 발생한 구간으로 용기부에 비하여 급경사를 이루고 있다.

현장조사 및 모니터링

연구지역내에서는 이미 여러 번의 시추조사가 시행되었으나, 본 연구에서는 가장 최근에 수행된 BH-17부터 BH-21까지 총 5개 시추공에 대한 조사결과를 중심으로 지반의 상태를 분석하였으며, Fig. 2에 지층모델을 작성하는데 사용된 기존 시추공을 함께 표시하였다.

연구지역은 상부로부터 0.4 m~7.0 m의 층후를 보이는 매립층과 그 하부의 붕적/풍화토층, 풍화암층, 연암층, 경암층의 순으로 분포하고 있다. 붕적층은 상부사면의 붕괴 또는 침식으로 경사면을 따라 쌓인 지층으로써 GL(-)1.7 m~20 m의 분포심도를 보이며, 암회색 내지 황갈색의 모래 및 점토가 섞인 자갈질 호박돌로 구성되어 있다. 풍화토층은 GL(-)16.0 m~20.0 m의 분포심도를 가

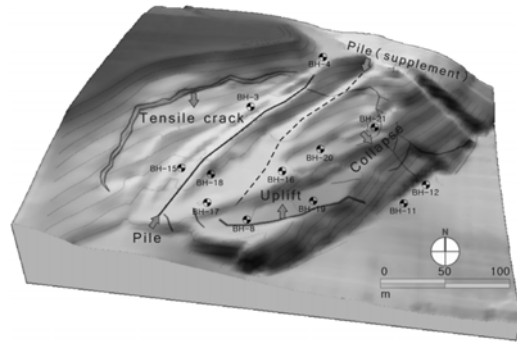


Fig. 2. Schematic diagram of the studied slope. Arrows indicate directions of sliding.

지며, 암갈색의 암편이 섞인 점토질모래로 구성되어 있다. 풍화암층은 GL(-)9.5 m~29.5 m의 분포심도를 보이며, 기반암의 심한 풍화 상태로 모암의 조직과 형태를 그대로 보존하고 있으나, 암석의 역학적 성질을 상실한 상태이다. 이 층은 주로 사암 내지 셰일로 구성되어 있으며 황갈색 점토가 혼재해 있다. 연암층 역시 사암 내지 셰일로 구성되어 있으며 GL(-)0.4 m~52.4 m의 분포심도를 나타낸다. 연암층의 TCR은 12.0%~89.2%, RQD는 0.0%~46.4%의 범위를 보이며, 신선 내지 보통풍화 정도의 암반상태를 보인다. 경암층은 사암과 셰일이 교호하며 GL(-)9.6 m~51.5 m 이하에서 나타난다. 경암층의 TCR은 91.9%~99.4%, RQD는 43.1%~91.0%의 범위를 보이며, 비교적 신선한 암반상태를 갖고 있다.

연암층과 경암층을 이루고 있는 암석의 물리적 특성 및 강도 특성을 파악하기 위하여 시추조사 시 채취한 코어들 중에서 시추공별로 대표시료를 선정하여 실내 암석시험을 수행하였다. 암석시험은 국제암반역학회(ISRM)에서 제시한 시험규정에 따라 수행되었으며(ISRM, 1978a; ISRM, 1978b), 일축압축시험과 삼축압축시험을

**Table 1.** Mechanical properties of rock core samples.

Properties	Soft rock (Moderately weathered)	Hard rock (Slightly weathered)
Depth (m)	34.9 - 41.9	57.3 - 68.7
Density (kN/m <sup>3</sup> )	26.37 - 27.04	27.04 - 27.25
UCS (MPa)	53.03 - 83.08	56.81 - 97.32
Young's modulus (GPa)	36.55 - 64.38	49.28 - 66.42
Poisson's ratio	0.182 - 0.196	0.198 - 0.264
Cohesion (MPa)	10.1 - 11.9	18.6 - 32.6
Friction angle (°)	44.9 - 49.3	49.1 - 52.1

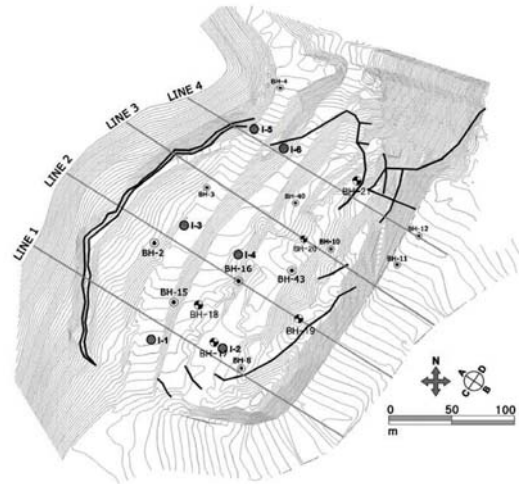
**Table 2.** Maximum displacement at each station, as measured using an inclinometer.

Inclinometer ID	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6
A-B Max. displacement (mm) [GL(-) depth]	26.1 [14 m]	38.7 [14 m]	98.9 [23 m]	26.2 [25 m]	42.7 [17 m]	17.3 [25 m]
C-D Max. displacement (mm) [GL(-) depth]	12.1 [14 m]	-6.8 [14 m]	12.0 [23 m]	10.2 [24 m]	4.1 [31 m]	11.7 [25 m]

실시하여 일축압축강도, 영률(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio), 점착력 및 내부마찰각 등을 구하였다(Table 1). 세일 및 사암으로 구성되어 있는 대표시료들에서 연압층에 해당하는 보통풍화 상태의 암석인 경우, 53.03~83.08 MPa의 일축압축강도 범위를 보였으며, 영률 및 포아송비는 각각 36.55~64.38 GPa, 0.182~0.196의 범위를 보였다. 경암층에 속하는 보통풍화 상태의 암석인 경우 일축압축강도는 56.81~97.32 MPa의 범위에 분포하며, 영률과 포아송비는 각각 49.28~66.42 GPa, 0.198~0.264의 범위를 보인다. 또한 점착력과 내부마찰각은 보통풍화 상태의 암석은 10.1~11.9 MPa, 44.9~49.3°의 범위를 보이며, 약간 풍화상태의 암석은 보통 풍화상태의 암석보다 다소 높은 범위를 보인다.

사면붕괴 이후 연구지역의 지반 활동 상태를 분석하기 위하여 실시된 지중경사계 계측의 심도별 수평변위량 결과(Daewoo Institute of Construction Technology, 2009)를 이용하여 예상 활동면(파괴면)의 심도를 추정하였다. 계측은 억지말뚝 시공이 완료된 이후부터 수행되었으며, 억지말뚝 배후에 I-1, I-3, I-5의 경사계와 억지말뚝 전면에 I-2, I-4, I-6의 총 6개소의 경사계를 설치하여 사면지반의 거동을 파악하였다(Fig. 3). 경사계에서 측정된 A-B 방향의 변위는 사면의 활동방향, 즉 사면상부 균열대에서 사면하부 용기지점 방향으로 발생한 수평변위를 나타내며, C-D 방향의 변위는 A-B 방향에 수직인 방향으로 발생한 수평변위를 나타낸다.

지중경사계 6개소에서 2개월 동안 계측한 최대 변위량과 변위 발생심도를 Table 2에 나타내었다. 억지말뚝

**Fig. 3.** Locations of boreholes and inclinometers in the study area. BH: borehole; I: inclinometer.

배후에 설치된 경사계에서 사면하부 방향인 B 방향으로 발생한 A-B 방향의 변위량은 26.1~98.9 mm 범위로 나타났다. I-3 경사계에서 최대 98.9 mm의 변위가 발생하였으며 발생심도는 23 m로 측정되었다. C-D 방향의 변위량은 4.1~12.1 mm의 범위로 나타났으며, C 방향으로 변위가 발생하였다. I-1 경사계에서 최대 12.1 mm의 변위가 발생하였으며 발생심도는 14 m로 측정되었다. 억지말뚝 전면에 설치된 경사계에서 발생한 A-B 방향의 변위량은 17.3~38.7 mm의 범위를 나타내었으며 배후에 설치된 경사계와 마찬가지로 B 방향으로 변위가 발생하

였다. I-2 경사계에서 최대 38.7 mm의 변위가 발생하였으며 발생심도는 14 m로 측정되었다. C-D 방향으로서는 -6.8~11.7 mm 범위의 변위가 발생하였으며, I-2 경사계에서 음의 값으로 계측된 자료는 사면의 용기부에 근접한 위치의 영향으로 D 방향으로 변위가 측정된 것으로 판단된다. I-6 경사계에서 최대 11.7 mm의 변위가 C 방향으로 발생하였으며 발생심도는 25 m로 측정되었다.

계측결과를 종합하면 I-3과 I-4, I-5와 I-6에서 각각 역지말뚝 배후에 비해 전면부에서의 변위가 40% 이하의 수준을 보이고 있어 역지말뚝에 의한 지반거동 억제 효과가 작용하는 것으로 나타났다. 또한 계측결과와 시추결과와의 비교 검토에 의하면 A-B 방향의 최대 변위가 주로 붕적층 하부 구간에서 발생하는 것으로 나타나 지반거동이 붕적층과 풍화암의 경계를 따라 발생하는 것으로 판단된다.

### 해석모델의 설정 및 강도정수의 추정

#### 해석단면 및 해석단계 설정

사면의 붕괴현상은 자연적인 원인과 인위적인 원인이 복합적으로 작용하여 발생하는 경우가 많으며, 실제로 사면붕괴의 메커니즘은 대단히 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 안정해석에 적용되는 지반의 강도정수와 단순화된 해석모델의 불확실성을 고려하여 역해석 과정을 통해 실제의 붕괴특성을 반영할 수 있는 지층구조와 지반 강도 정수를 결정하고자 하였다. 연구지역과 같이 붕적층이 두껍게 존재하는 지반을 절취할 경우 붕적층과 암반층 사이의 경계를 따라 상부퇴적물이 활동하는 경우

가 있으며, 이러한 지반활동은 이상징후가 뚜렷하지 않고 순간적으로 발생하여 예측이 어려운 특징이 있다. 또한 점토질 물질이 다수 포함된 본 사면의 경우에는 파괴 시작부위에서 인장균열이 발생할 가능성이 있다. 인장균열은 사면의 붕괴를 인지할 수 있는 대표적인 인자로서 상부 자연사면에서 관찰되며 붕괴면의 이동방향에 수직으로 발달하여 규모에 따라 수 미터에서 수십 미터에 걸쳐 발생한다. 그러므로 연구지역에 대한 전반적인 안정성 평가를 위해 해석단면은 상부사면에서 발생한 인장균열대로부터 하부의 용기 지점까지 Fig. 3과 같이 1번 단면(Line 1)에서부터 4번 단면(Line 4)까지 총 4개의 단면을 설정하였다. 또한 해석단면의 구조는 측량조사 및 시추조사를 토대로 설정되었으며, 기존 문헌자료를 이용하여 상부사면 및 시추공 사이의 지층구성을 보완하였다(Daewoo Institute of Construction Technology, 2009). 해석단면은 Fig. 4와 같이 기본적으로 붕적층, 풍화암층, 연암층, 경암층 등 4개 지층으로 구성되어있다.

해석단계는 사면붕괴 전후와 안정화 공사를 고려한 4단계로 설정하였으며 한계평형해석과 유한차분해석에 동일하게 적용하였다. 각 단계에서의 함수조건은 건기와 포화상태로 구분하였으며, 건기 시의 지하수위는 경암의 바닥면에 위치시켜 지하수위에 의한 영향을 배제하였고, 포화 시에는 지표면까지 지하수위가 상승하는 것으로 가정하였다.

1단계(Stage 1)는 붕괴발생 이전의 원지반 상태이며, 2단계(Stage 2)는 확장공사 중 사면이 붕괴되기 시작한 시점으로, 건기 시에는 안정한 상태를 보이지만 포화 시에는 불안정해지는 특성을 갖는다. 3단계(Stage 3)는 붕

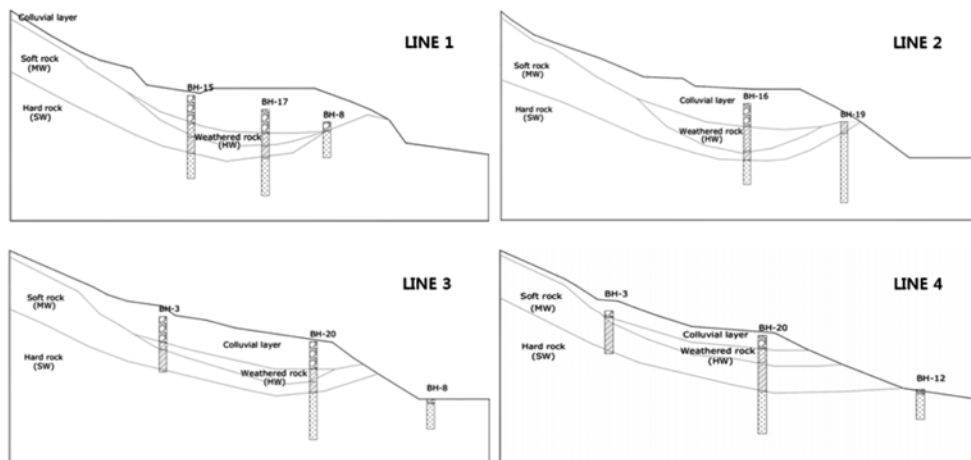


Fig. 4. Geometries and cross-sectional views of layers in each line.

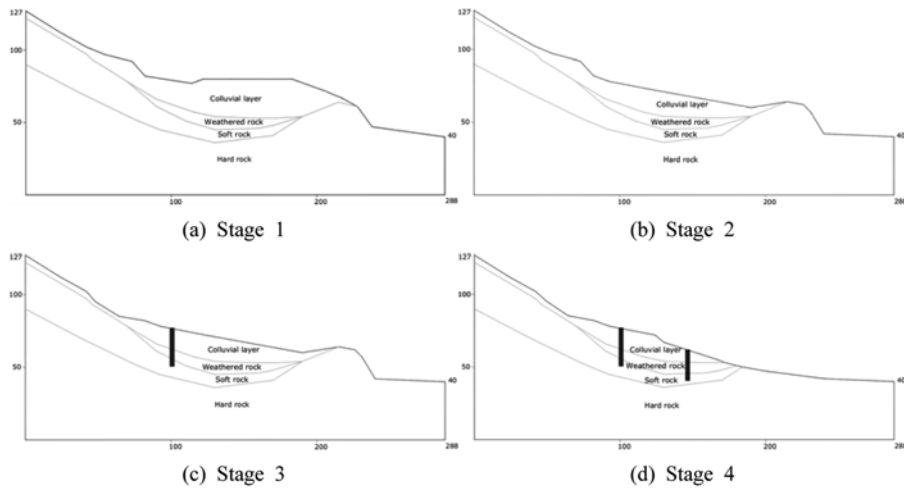


Fig. 5. Stages used in numerical simulations for slope stability analysis of Line 1.

피발생 이후 사면 상부에 발생한 인장 균열대 구간을 일부 절취한 상태에서 억지말뚝이 시공된 현재의 상태다. 억지말뚝의 보강심도는 최소 25 m 이상으로 연암 하부에 5 m 이상 근입되도록 하여, 억지말뚝 총 길이 ( $H$ )에 대한 활동면 하부 근입깊이( $D$ )의 비가  $D/H \geq 1/3 \sim 1/4$  이상을 만족하도록 설계되었다. 4단계(Stage 4)는 확장공사구간의 절취공사가 완료되고, 추가 억지말뚝이 시공되는 예정단계로서 최종 공사 후의 안정성을 예측하는 가장 중요한 단계이다. Fig. 5는 1번 단면에서의 1 단계부터 4단계까지의 단면을 나타낸 것이다.

각 단면에 대한 한계평형해석에는 Rocscience사의 Slide 5.0 프로그램이 사용되었고, 유한차분해석에는 Itasca사의 FLAC 4.0 프로그램을 사용하였다.

#### 지반강도정수의 추정

해석에 사용된 지반물성 중 경암층 및 연암층은 시추 시 채취된 시료의 실내시험 결과를 토대로 대푯값을 설정하여 사용하였으며, 풍화암층의 물성은 연암층의 물성을 감소시켜 유추하였다. 실제로 지반붕괴가 발생하는 붕적층의 경우에는 FLAC 프로그램 내의 데이터베이스(database)에서 제공하는 물성자료와 문헌자료를 이용하여 탄성상수를 추정하였고, 점착력과 내부마찰각은 한계평형해석을 이용한 역해석 방법으로 추정하였다. 역해석 방법은 점착력과 내부마찰각을 조금씩 변화시키면서 한계평형해석을 반복적으로 수행하여 임계안전율( $F_s=1$ )이 될 때의 점착력과 내부마찰각을 찾는 방법이다. 본 연구에서 수행된 역해석은 지반이 안정한 상태였던 1단계와

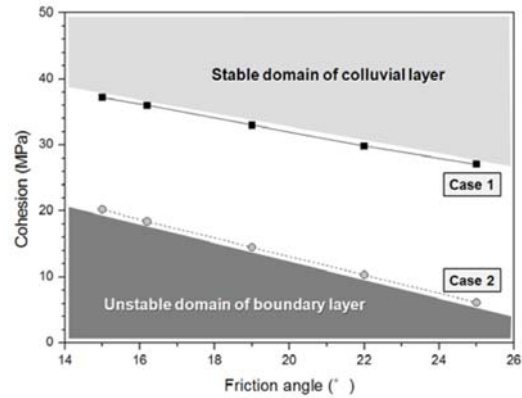


Fig. 6. Shear strength parameters estimated from back-analysis of Cases 1 and 2.

확장공사 중 사면붕괴가 발생되었던 2단계를 이용하여, 두 단계 모두의 상태를 만족시키는 점착력과 내부마찰각을 찾는데 첫 번째 주안점을 두었다. 또한 한계평형해석 결과 및 유한차분해석 결과와 실제 사면에서 발생된 붕괴이력이 서로 잘 일치하는 지반강도정수와 활동면(파괴면)의 위치를 결정하기 위하여 경우 1(Case 1)부터 경우 4(Case 4)까지 4개의 해석모델을 대상으로 단계적으로 역해석을 실시하였다.

#### ① 경우 1 모델

첫 번째 가정 모델인 경우 1은 토층에서 일반적으로 발생하는 원호파괴를 가정한 모델이다. 경우 1에 대한 역해석 결과, 붕적층의 점착력과 내부마찰각은 Fig. 6과

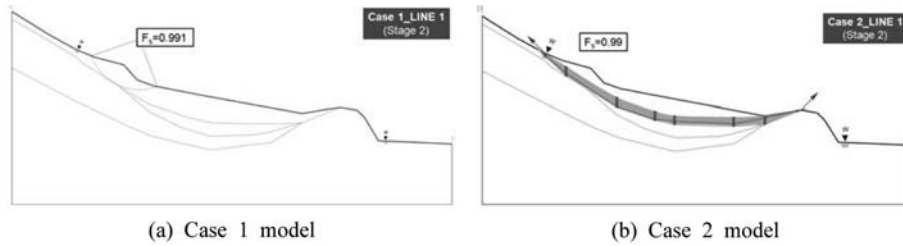


Fig. 7. Results of the limit equilibrium method analysis (LEM) for Line 1 showing the minimum factor of safety and the critical slip surface. (a) Case 1 model (circular slip surface). (b) Case 2 model (non-circular slip surface).

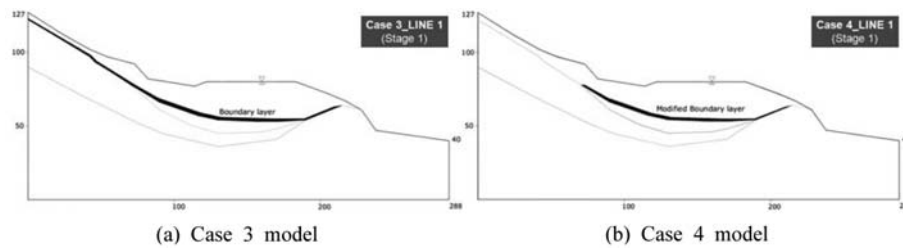


Fig. 8. Boundary layer models for Line 1. (a) Model for Case 3. (b) Model for Case 4.

같이 내부마찰각이 커질수록 점착력은 작아지는 반비례의 관계를 나타내고 있다. 임계안전을 만족하는 강도정수들을 연결한 선은 붕적층에서의 안정과 불안정 영역을 구분하는 임계선으로, 붕적층의 물성이 임계선 위의 영역에 위치할 경우 안정함을 나타내며, 임계선 아래의 영역에서는 불안정한 결과를 나타낸다. 그러나 경우 1의 역해석으로 도출된 강도정수를 2단계에 적용하면 연구지역에서 발생한 붕괴양상과는 다르게 Fig. 7(a)와 같은 사면 상부의 좁은 범위에서 파괴면이 형성되었다. 또한 유한차분해석에서도 실제 사면붕괴 이력과 달리 불안정상태로 가정된 2단계에서도 최대 3.8 cm 이하의 변위만이 발생하여 사실상 지반상태가 안정한 것으로 분석되었다.

### ② 경우 2 모델

두 번째 가정 모델인 경우 2에서는 경우 1에서 발생된 오류를 수정하기 위하여 사면파괴형태를 원호파괴가 아닌 비원호파괴로 가정하였다. 경우 2의 비원호파괴 해석모델에서는 실제 연구지역에서 관찰되는 인장균열의 발생지점 및 지반응기의 지점, 지반거동의 계측을 위해 설치된 지중경사계들의 최대변위발생 심도 등을 Slide 5.0에서 제공하는 구간탐색법(block search method)에 적용하여 Fig. 7(b)와 같이 최대한 실제와 유사한 파괴면을 유도하고자 하였다. 경우 2에 대한 역해석으로 도출된 강도정수들은 경우 1의 강도정수들에 비해서 상대

적으로 작은 값을 가지는 것으로 분석되었다(Fig. 6). 그러나 경우 2의 한계평형해석에서는 1단계와 2단계에서 모두 실제와 유사한 결과가 도출되었으나, 유한차분해석 결과의 경우에는 1단계에서는 실제 상황과 다르게 사면상부 구간에서 변위발생량이 수렴하지 않고 지속적인 변위가 발생하는 것으로 분석되었다.

### ③ 경우 3 모델

경우 2에서도 적절한 강도정수를 도출하지 못함에 따라 새로운 해석모델에 대한 가정이 필요하였다. 우리나라의 지질구조 특성상 토층의 수 미터 아래 암반이 존재하는 경우가 대부분이며 토층과 암반의 경계가 뚜렷한 것이 특징이다. 따라서 사면의 붕괴현상에 대한 안정성 문제를 다룰 때, 토층과 암반의 경계면에 대한 전단강도특성을 파악하는 것이 중요하다(Lee, 2001). 또한 붕적층 내에 점토층이 협재할 때, 점토층의 심도가 붕적층 하부에 위치할수록 침투속도가 빨라지고 압축비와 반응율이 높아지는 양상을 나타내므로(Lee, 1997), 세 번째 가정모델인 경우 3에서는 포화 시에 Fig. 8(a)와 같이 붕적층과 암반층 사이에 경계층을 갖는 수정된 모델을 역해석에 적용하였다. 경우 3에서의 파괴형태는 경우 2와 같이 비원호파괴로 가정하였으며, 경계층의 두께는 유한차분해석 시 충분한 유한차분망 구성을 위하여 2 m 내외로 설정하였다. 경우 3의 붕적층과 경계층의 강도정수는 경우 1 및 경우 2의 강도정수 범위를 이



용하여 각각 역해석으로 산정되었다. 경우 1의 강도정수는 파괴면의 형태를 원호파괴로 가정하였을 때 산출된 것으로, 임계선 위쪽 영역의 강도정수는 붕적층 내 국부파괴가 발생하지 않는 실제 사면의 붕괴특성을 반영하는 강도정수의 기준이 된다. 경우 2의 강도정수는 비원호파괴를 가정하였을 때 산출된 것으로, 임계선 아래 영역의 강도정수가 경계층의 파괴 기준이 된다. 따라서 경우 3에서 붕적층과 건조조건 시의 경계층은 경우 1의 강도정수 임계선을 기준으로 안정 영역에서, 포화조건 시의 경계층은 경우 2의 강도정수 임계선을 기준으로 불안정 영역에서 각각 강도정수를 선택하여 적용하였다. 경우 3에 대한 비원호파괴 한계평형해석 결과는 1단계와 2단계 모두에서 실제 연구지역의 붕괴특성을 잘 반영하는 것으로 분석되었다. 그러나 유한차분해석의 결과에서는 안정한 상태인 1단계에서 사면 상부에서 하부로 향하는 1 m 이상의 변위가 발생하여 지반이 불안정한 것으로 나타났다. 또한 상부 사면구간에 대하여 사면 붕괴 시 지반내의 파괴면을 지시하는 최대 전단변형률비(maximum shear strain rate)를 Fig. 9(a)와 같이 도시하여 확인하면 비교적 경사가 급하고 얇은 붕적층내의 경계면에서 파괴면이 형성되는 것이 확인되었다.

#### ④ 경우 4 모델

네 번째 모델인 경우 4는 경우 3의 오류를 수정하기 위하여 경계층을 경우 3의 유한차분해석 결과에서 관찰된 사면 상부의 파괴면 구간을 제외하고, Fig. 8(b)와 같이 풍화암이 시작되는 지점부터 지반 용기가 관찰되는 지점까지로 재설정하였다. 경우 4는 경우 3의 경계층만을 수정한 상태로 해석방법과 강도정수는 경우 3과 동일하다. 1번 단면에 경우 4의 해석모델을 적용하여 한계평형해석을 실시하였다. 1단계에서는 안전율이 1.71로 계산되어 원사면의 안정한 상태를 잘 나타냈으며, 2단계에서도 최소 안전율이 0.99로 계산되어 2단계의 불안정상태를 잘 반영하였다. 유한차분해석에서도 1단계에서 0.01 m의 변위발생 이후 수렴하여 한계평형해석의 결과와 마찬가지로 안정한 것으로 분석되었으며, 2단계에서도 Fig. 9(b)와 같이 실제 사면의 붕괴 시점과 거의 일치한 40 m 지점에서부터 파괴가 발생하여 한계평형해석의 파괴면 양상과 유사한 결과를 나타내었다. 그러므로 본 연구에서는 실제 사면의 붕괴특성을 반영할 수 있는 경우 4 해석모델을 4개 해석단면 모두에 적용하여 지반 굴착 단계별 안정성 검토 및 억지말뚝의 보강효과에 대한 검토를 수행하였다. 최종적으로 안정해석에 적용된 각 지층의 물성은 Table 3과 같으며, 3단계 및 4단계에

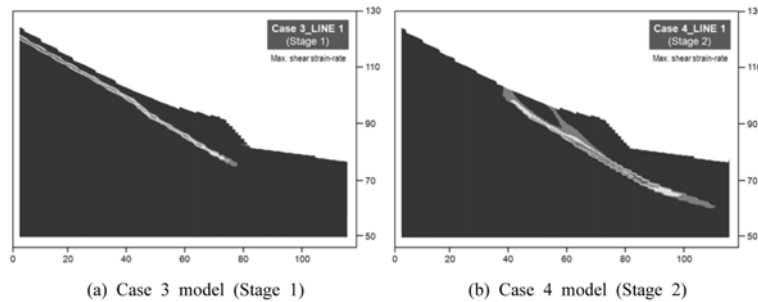


Fig. 9. Distribution of the maximum shear strain rate for Line 1.

Table 3. Properties of soil, rock masses, and piles.

	Density (t/m <sup>3</sup> )	Cohesion (Pa)	Friction angle (°)	Bulk modulus (Pa)	Shear modulus (Pa)	Tensile strength (Pa)
Colluvial soil	1.8(2.0*)	3.6×10 <sup>4</sup>	16.2	5.33×10 <sup>7</sup>	3.2×10 <sup>7</sup>	3.6×10 <sup>4</sup>
Boundary layer	2.0	1.7×10 <sup>4</sup>	13.3	5.33×10 <sup>7</sup>	3.2×10 <sup>7</sup>	1.7×10 <sup>4</sup>
Weathered rock	2.2	1.0×10 <sup>5</sup>	32	2.78×10 <sup>9</sup>	2.08×10 <sup>9</sup>	1.1×10 <sup>6</sup>
Soft rock	2.4	1.0×10 <sup>6</sup>	45	1.01×10 <sup>10</sup>	7.6×10 <sup>9</sup>	3.4×10 <sup>6</sup>
Hard rock	2.5	3.0×10 <sup>6</sup>	50	2.17×10 <sup>10</sup>	1.3×10 <sup>10</sup>	1.1×10 <sup>7</sup>
Pile	8.0	3.14×10 <sup>8</sup>	50.0	1.4×10 <sup>11</sup>	8.4×10 <sup>10</sup>	4.9×10 <sup>8</sup>

\*; Saturated unit weight



서 적용되는 강관말뚝의 물성은 직경 560 mm 규격 강관말뚝의 물성을 적용하였다.

**해석결과 및 검토**

1번~4번 해석단면에 대한 사면안정성의 평가 및 억지말뚝의 시공에 의한 안정화 효과를 검토하기 위하여 경우 4 해석모델을 적용한 한계평형해석과 유한차분해석을 실시하였다. 한계평형해석에서는 비숍(Bishop)의 간편법으로 계산된 최소 안전율을 바탕으로 사면의 안정성을 평가하였고, 유한차분해석에서는 최대 전단변형률비와 X 방향 변위분포도를 이용하여 파괴면을 확인하고 최대 변위량과 변위증가량의 수렴 여부 및 안전율을 바탕으로 사면의 안정성을 판단하였다. 1단계와 2단계에서는 한계평형해석과 유한차분해석을 모두 수행하였으나, 3단계와 4단계에서는 해석에 사용된 Slide 5.0 프

로그램 내에 억지말뚝의 적용 기능이 없기 때문에 유한차분해석만 실시하였다.

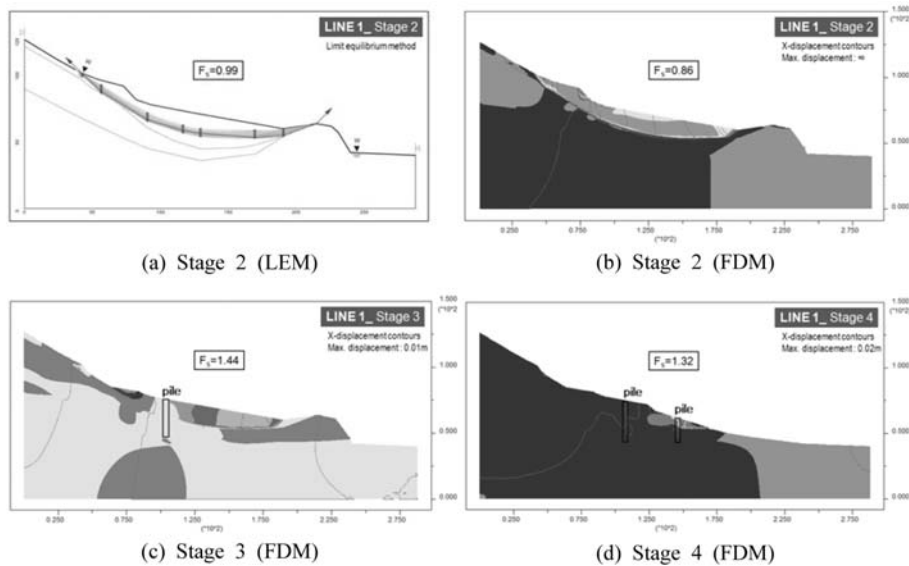
Table 4와 Fig. 10~13은 각 단계별 해석단면들에 대한 한계평형해석과 유한차분해석 결과를 정리한 것이다. 먼저 한계평형해석 결과를 보면, 1단계의 경우에는 포화조건 시에도 모든 해석 단면에서 1.0 이상의 안전율을 갖는다. 1번 단면과 2번 단면의 안전율은 각각 1.71과 1.42로 비교적 충분한 안정성을 확보한 것으로 분석되었고, 4번 단면도 허용안전율보다 큰 안전율을 갖고 있다. 그러나 가장 낮은 안전율을 갖는 3번 단면은 안전율이 1.04로 안정성이 거의 임계상태이다. 2단계의 포화조건 시, 모든 해석 단면이 안전율 1.0 이하로 불안정하고 이중에서 3번 단면의 안전율이 0.83으로 가장 낮아서 연구지역의 지반 중 3번 단면 주변구간의 안정성이 가장 취약한 것으로 판단된다.

유한차분해석에서 1단계의 포화조건 시, 모든 해석단

**Table 4.** Factors of safety and the maximum displacements of each line at each stage.

		Line 1	Line 2	Line 3	Line 4
Stage 1	LEM	1.71	1.42	1.04	1.27
	FDM	1.17 (0.01 m)	1.11 (0.11 m)	1.05 (0.21 m)	1.21 (0.03 m)
Stage 2	LEM	0.99	0.90	0.83	0.98
	FDM	0.86 ( $\infty$ )	0.83 ( $\infty$ )	0.76 ( $\infty$ )	0.92 ( $\infty$ )
Stage 3	FDM	1.44 (0.01 m)	1.22 (0.04 m)	1.25 (0.04 m)	1.12 (0.04 m)
Stage 4	FDM	1.32 (0.02 m)	1.15 (0.11 m)	0.98 ( $\infty$ )	1.29 (0.02 m)

\* Values in parenthesis are maximum displacement and  $\infty$  indicates divergence.



**Fig. 10.** Results of the LEM and FDM analysis for Line 1.

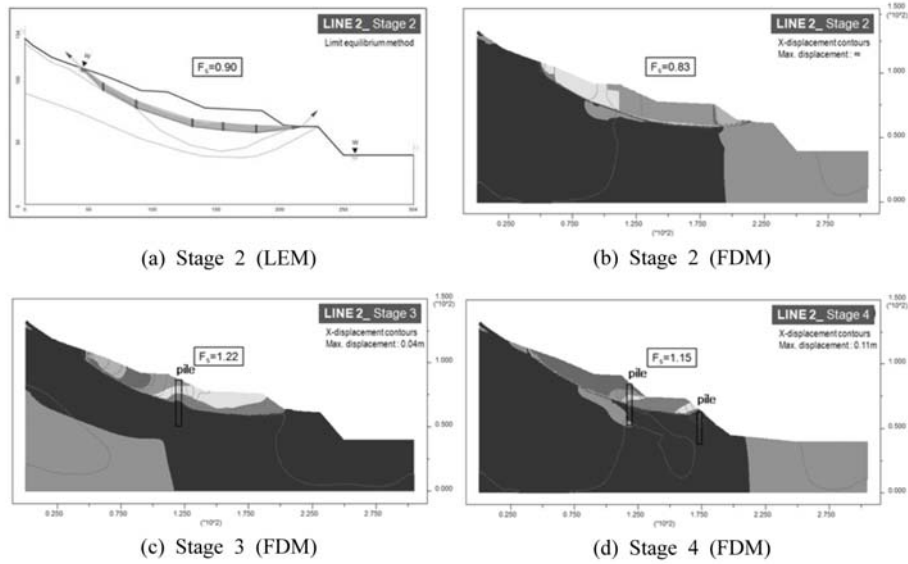


Fig. 11. Results of the limit equilibrium method (LEM) analysis and the finite difference method (FDM) analysis for Line 2.

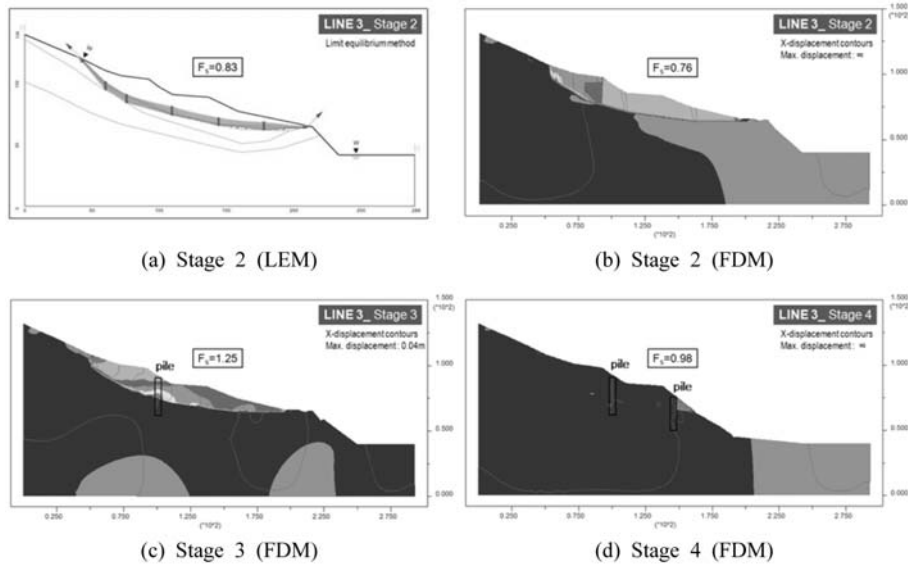


Fig. 12. Results of the LEM and the FDM analysis for Line 3.

면에서 비교적 적은 변위만이 발생하고 안전율도 1.0 이상으로 계산되었다. 그러나 한계평형해석 결과와는 달리 4번 단면을 제외한 1번, 2번 및 3번 단면에서 허용안전율을 1.2보다 낮은 안전율을 보이고 있어서, 연구지역의 지반 전체가 충분한 안정성을 갖고 있지 못한 것으로 나타났다. 이중에서 3번 단면은 가장 큰 변위량(0.21 m)과 가장 낮은 안전율(1.05)을 보여 유한차분법에서도 가

장 불안정 구간으로 분석되었다.

2단계의 포화조건 시에는 모든 단면에서 경계층을 따라 전단거동이 발생하며 변위증가량이 수렴하지 않고 안전율도 1.0 이하로 사면상태가 매우 불안정한 것으로 분석되었다. 2단계의 유한차분해석 결과도 한계평형해석 결과보다 다소 낮은 안전율을 갖는 것으로 나타났으나 파괴면의 형태는 서로 거의 일치하였다. 2단계에서 한

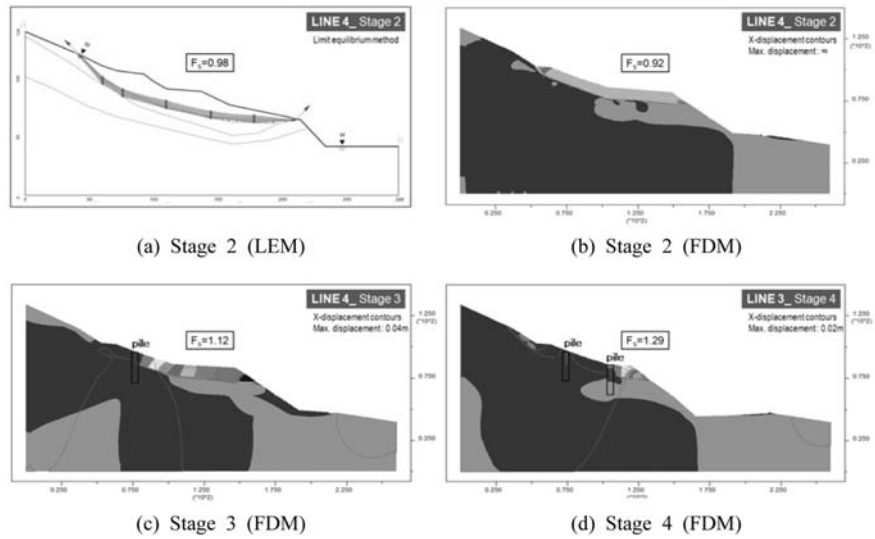


Fig. 13. Results of the LEM and the FDM analysis for Line 4.

계평형해석과 유한차분해석으로 계산된 안전율을 서로 비교하면, 유한차분해석에서 계산된 안전율이 한계평형해석에서 계산된 안전율 보다 최소 6%에서 최대 13% 까지 작은 것으로 나타났다(Table 4). 한계평형법과 유한요소법 또는 유한차분법의 안전을 비교는 선행연구자들에 의해 연구된 바 있으며, 유한차분해석에서 계산된 안전율은 구성법칙 및 해석모델, 팽창각 등에 따라 한계평형법에 기초한 결과보다 5%~20% 정도 낮게 평가될 수 있는 것으로 보고되고 있다(Matsui and San, 1992; Park et al., 1999; Cheng et al, 2007). 그러므로 유한차분해석에서 계산된 안전율이 1.2 이상일 경우에는 충분한 안정성을 확보할 것으로 판단된다.

역지말뚝 1열이 시공된 3단계의 경우, 유한차분해석은 포화조건 시에도 모든 단면에서 변위증가량이 수렴하고 1.0 이상의 안전율을 갖는 비교적 안정한 상태를 나타내었다. 그러나 4번 단면의 경우에는 안전율이 허용안전율보다 작은 1.12로 계산되어 충분한 안정성을 확보하지 못한 것으로 분석되었다.

추가 역지말뚝 시공과 지반 절취에 따른 향후 사면의 안정성을 예측하는 4단계의 경우, 포화조건 시에도 1번 단면과 4번 단면의 안전율은 허용안전율보다 높은 1.32, 1.29로 비교적 안정한 상태로 분석되었으나, 2번 단면과 3번 단면에서는 이보다 낮은 1.15와 0.98로 계산되었다. 2번 단면에서 기존 역지말뚝의 좌측 구간은 최대 변위량이 0.1 m 이하에서 수렴하여 지반거동이 거의 없으나, 안전율은 허용안전율보다 낮은 1.15로 충분한 안정성을

확보하지는 못한 것으로 나타났다. 3번 단면에서는 추가로 설치된 역지말뚝 우측이 높은 경사로 인하여 절취되면서 이 구간에서 지속적인 변위가 발생하고 있으며, 안전율도 임계안전율보다 낮아 지반이 매우 불안정해지는 것으로 나타났다. 그러므로 향후 사면보강 및 지반절취 공사 시 역지말뚝의 추가 시공뿐 아니라 추가적인 사면안정화 공법을 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 결론 및 고찰

연구지역은 붕적층이 두껍게 분포하고 점토물질과 다양한 크기의 암괴가 협재되어 있어서 안정해석을 위한 해석모델 설정과 지반강도정수 추정이 쉽지 않다. 본 연구에서는 합리적인 안정해석모델을 설정하기 위하여 파괴면의 형상과 지층구조가 서로 다른 경우 1부터 경우 4까지의 해석모델을 단계적으로 가정하며 역해석을 실시하여 붕적층과 풍화암층 사이에 경계층을 가정한 경우 4 해석모델이 실제 연구지역의 붕괴이력을 가장 잘 묘사하는 것으로 판단하였다. 그러므로 경우 4 해석모델을 서로 평행한 4개의 해석단면(Line 1~4)에 적용하여 최초 원지반 상태인 1단계부터 최종 확장공사 완료 단계인 4단계까지의 사면의 안정성을 한계평형해석과 유한차분해석으로 평가하였다.

원지반 상태인 1단계에서 1번, 2번 및 4번 단면은 허용안전율 1.2 보다 큰 안전율을 갖고 있어 비교적 안정하였으나 3번 단면은 안전율이 1.04로 안정성이 거의

임계상태이었다. 확장공사 중 사면붕괴가 발생한 2단계에서 모든 해석 단면이 안전율은 1.0 이하로 계산되었으며 경계층을 따라 수렴하지 않는 전단변위가 발생하여 지반상태가 매우 불안정하게 되었다. 특히, 2단계에서 3번 단면의 안전율이 가장 낮아서 연구지역의 지반 중에서 3번 단면 주변구간의 안정성이 가장 취약하였다. 억지말뚝이 1열 시공된 현재 상태인 3단계에서는 모든 단면에서 최대 0.04 m 이하의 변위만이 발생하고 변위 증가량도 수렴하는 비교적 안정한 상태를 나타내고 있다. 그러나 4번 단면에서는 안전율이 허용안전율보다 작은 1.12로 계산되어 충분한 안정성을 확보하지 못하고 있다. 향후 확장공사와 보강공사가 추가로 진행되는 4단계에서 1번 단면 및 4번 단면은 비교적 안정한 상태로 판단되나, 2번 단면 및 3번 단면의 안전율은 허용안전율 보다 낮은 1.15와 0.98이다. 특히 3번 단면에는 추가로 설치된 억지말뚝 우측이 높은 경사로 인하여 절취되면서 이 구간에서 지속적인 변위가 발생할 것으로 예측되며, 안전율도 임계안전율보다 낮아 지반이 매우 불안정해질 것으로 판단된다. 그러므로 향후 사면보강 및 지반절취 공사 시에는 억지말뚝의 추가 시공뿐 아니라 추가적인 사면안정화 공법을 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

종합적으로 볼 때 경우 4의 해석모델을 적용한 안정 해석 결과는 실제 연구지역의 과거 붕괴이력과 현재 지반상태를 잘 묘사하고 있으며, 이런 결과를 바탕으로 볼 때 예측단계인 4단계의 해석결과를 설계의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 부족한 조사자료와 지층구조의 복잡성으로 인해 해석에 많은 가정이 적용되었고 사면의 침수능력에 의한 수리특성을 반영하지 못하였기 때문에 안정해석 결과에 많은 불확실성이 내포되어 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 2013년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호-120121241).

## References

- Anderson, M. G. and Richards, K. S., 1987, Slope stability, John Wiley, 11p.
- Chen, W. F., 1975, Limit analysis and Soil Plasticity, Amsterdam, Elsevier, 403p.
- Cheng, Y. M., Lansivaara, T. and Wei, W. B., 2007, Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods, Computers and Geotechnics, 34, 137-150.
- Daewoo Institute of Construction Technology, 2009, Slope monitoring report for apron site in the High 1 Resort, Korea, 19p (in Korean).
- Fredlund, D. G. and Krhan, J., 1977, Comparison of slope stability methods of analysis, Canadian Geotechnical Journal, 14, 429-439.
- Geological Society of Korea, 1962, Report of Underground Resources Research in Taebaeg Mt. Region, 107p (in Korean).
- Griffith, D. V. and Lane, P. A., 1999, Slope stability analysis by finite elements, Geotechnique, 49, 387-403.
- ISRM, 1978a, Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15, 47-51.
- ISRM, 1978b, Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 16, 135-140.
- Lechman, J. B. and Griffiths, D. V., 2000, Analysis of the progression of failure of earth slopes by finite elements, Geodenver 2000 ASCE special Publication, 250-265.
- Lee, K. J., 1997, A study on the effects of pore water pressure in the failure face due to infiltrating into the clay layer of colluvium, Journal of Engineering Research, 28, 103-114 (in Korean with English abstract).
- Lee, S. G., 2001, A study on characteristics of shear strength in rock-soil contacts, Journal of Korean Society of Environmental Restoration Technology, 4, 49-54 (in Korean with English abstract).
- Matsui, T. and San, K. C., 1992, Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique, Soils and Foundations, 32, 59-70.
- Park, Y. J., Chae, Y. S., You, K. H., and Paik, Y. S., 1999, Slope stability analysis by slice method and finite difference method - A Comparative Study, Journal of Korean Geotechnical Society, 15, 263-272 (in Korean with English abstract).

**장현식**

강원대학교 지구물리학과  
200-701 강원도 춘천시 강원대학길 1 자연대학3호  
관 305호  
Tel: 070-7843-3329  
Fax: 033-244-9276  
Email: whitenull@kangwon.ac.kr

**이주용**

한국시설안전공단 시설안전연구소  
411-758 경기도 고양시 일산서구 고양대로 315  
Tel: 031-910-6713  
Fax: 031-910-4181  
Email: niitzsche@naver.com

**서용석**

충북대학교 지구환경과학과  
361-763 충북 청주시 서원구 충대로 1 S1-6동  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-276-9645  
Email: ysseo@chungbuk.ac.kr

**장보안**

강원대학교 지구물리학과  
200-701 강원도 춘천시 강원대학길 1 자연대학3호  
관 305호  
Tel: 033-250-8583  
Fax: 033-244-9276  
E-mail: bajang@kangwon.ac.kr