

깊은 풍화대 사면의 안정성 해석에서 물성치 산정 및 적용 Application of Geotechnical Properties to the Slope Stability Analysis in Deep Weathered Zone

김경태¹⁾, Kyung-Tae Kim, 박시범²⁾, See-Boum Park, 김창현³⁾, Chang-Hyun Kim,
이종범⁴⁾, Jong-Bum Lee, 윤여원⁵⁾, Yea-Won Yoon

- 1) 한국종합기술개발공사 지반부 차장, Deputy General Manager, Korea Engineering Consultants Corp.
- 2) 한국종합기술개발공사 항만부 대리, Assistant Manager, Korea Engineering Consultants Corp.
- 3) 한국종합기술개발공사 지반부 부장, Senior Manager, Korea Engineering Consultants Corp.
- 4) 한국종합기술개발공사 지반부 상무, Managing Director, Korea Engineering Consultants Corp.
- 5) 인하대학교 환경토목공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Inha University.

SYNOPSIS : Recently in spite of Development of Investigation machine, in Application of Geotechnical Properties by empirical recommendation to the Slope Stability Analysis. It is generally Application of convenience and conservative Geotechnical Properties by Borehole Shear Test(BST) in Representative Zone that Non-Division of Increase as the depth of Strength Parameters In Deep Weathered Zone. Therefore, it is become environment pollution and Non-Economical Slope Design to Application of convenience and conservative Geotechnical Properties. The production mechanism of Deep Weathered Zone is tend to Weathering Degree low and Strength increase by increase as the depth. it is realistic design that Division of Deep Weathered Zone and application Geotechnical Properties of Each Layer. In this Paper, Determined The Relationship of Strength Parameters between Standard Penetration Test(SPT), Borehole Shear Test(BST) and empirical recommendation also Applied each strength parameters of divided zone to the Slope Stability Analysis by continuous Borehole Shear Test(BST) in Deep Weathered Zone during design of The 2nd Bridge Connection Road of Incheon International Airport.

Key words : Weathered zone, Borehole Shear Test(BST), Slope stability

1. 서 론

일반적으로 풍화대구간에 대한 물성치는 수년전만하여도 특별한 시험 없이 문헌 제안치나 기 설계 적용사례를 분석하여 적용하여 왔으나, 최근에는 공내전단시험(BST)등 현장시험에 의해 강도정수를 산정하여 문헌 제안치와 비교분석하여 적용함으로써 보다 더 합리적인 물성치를 산정 적용하고 있다.

그러나 공내전단 시험장비등 풍화대의 물성치 산정을 위한 장비의 발전에도 불구하고 아직까지 깊은 풍화대의 경우 심도별 강도변화에 따른 지층분할 없이 대표지층에 대한 제한된 전단시험으로 보수적인 물성치를 산정 적용하고 있는 실정이다.

이러한 보수적인 물성치적용은 보강범위를 증가시켜, 환경훼손 및 경제적 비용의 증대를 초래할 수

있다. 또한 토사 및 풍화대의 붕괴사례 분석에 의하면 침식·세굴 및 유실의 유형이 붕괴빈도의 80% 이상을 차지하며, 원호활동이나 대규모 파괴는 퇴적암지역 등 일부 지역에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 따라서 깊은 풍화대 구간에 대한 보수적인 물성치의 적용이 최적설계라 할 수 없다.

특히 풍화대는 형성 메카니즘상 심도가 깊어질수록 풍화 및 변질정도는 낮아져 강도는 증가되는 특성을 보이는 것이 일반적인 특징이므로 층후가 두꺼운 경우는 지층을 분할하여 차등된 물성치를 선정 적용하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 인천 제2연육교 연결도로 설계시 확인된 깊은 풍화대구간에 대하여 시추조사, 표준관입시험(SPT) 및 심도별 연속적인 공내전단시험(BST)을 수행하여 다음과 같은 사항에 대하여 분석 검토하고자 한다.

첫째, 토사 및 풍화암층 각각에 대하여 표준구배 및 일반적 문헌제안 강도정수 적용시 안정해석을 수행하여 한계안정 층후 판단 및 토층분할의 필요성을 확인한다.

둘째, 심도별 연속적인 공내전단시험(BST)을 수행하여 심도에 따른 N치와 BST 강도정수(c, ϕ) 분포 특성을 분석하여 토층을 구분한다.

셋째, 토층의 분할전·후 사면에 대한 안정검토를 수행하여 토층분할로 인한 영향을 정량적으로 확인하고자 한다.

2. 사례구간 현황

2.1 현장 및 지층개요

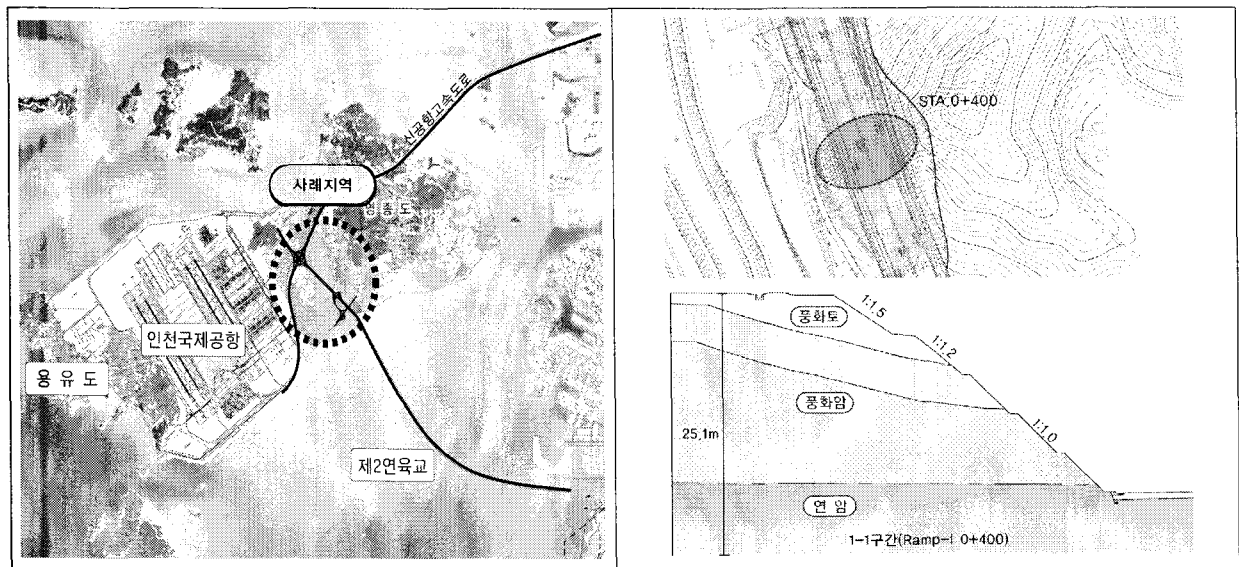


그림 1. 위치도 및 지층현황

본 사례지역은 영종도내 인천국제공항 인근지역으로 행정구역상으로는 인천광역시 중구 운서동~운남동을 연결하는 노선으로 깎기비탈면은 배후지원단지JCT 램프구간에서 형성된다.

지층은 표토, 풍화토, 풍화암, 연암의 층서를 보이며, 기반암은 변성암류로 석영편암과 이를 관입한 주라기 흑운모화강암으로 편리 및 파쇄대가 발달되었다. 풍화암은 5~22m 정도의 층후로 깊은 풍화대를 형성하고 있으며 표준관입시험결과 $N=2\sim50/2$ 로 심도가 깊어질수록 증가 하는 것으로 나타났다.

2.2 조사현황

풍화대가 20m 이상의 층후로 분포하는 구간에 대하여 심도에 따른 연속적인 강도특성 분석하기 위하여 다음과 같이 조사를 수행하였다.

표 1. 지반조사 및 시험현황

구 분	시추공수	공내전단시험	
		본 사례구간 시행개소	기 설계 사례 개소
토 사 층	5개소	7	24
풍 화 암		5	21

3. 표준구배 적용시 한계 안정깊이 판단

3.1 검토조건

표준구배적용시 토사 및 풍화암에 대하여 층후를 5, 10, 15, 20, 25m로 증가시키며, 물성치는 문헌자료 및 설계사례를 분석하여 가장 일반적인 값을 산정 적용하여 안정해석을 수행하였으며, 적용된 물성치, 검토단면 및 해석결과는 다음과 같다.

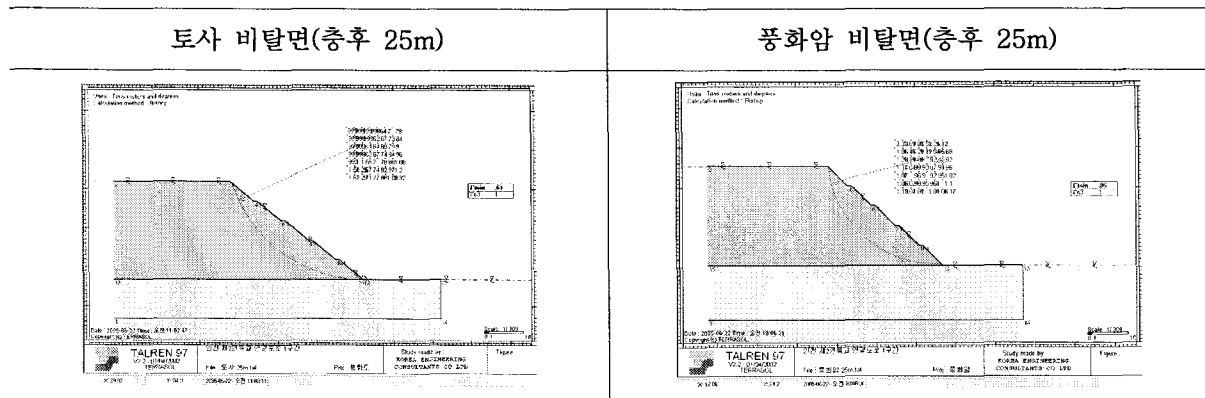


그림 2. 표준구배에 대한 안정성 검토결과

표 2. 지층별 해석에 적용된 물성치

구분	토사층	풍화암층	비 고
단위중량(tonf/m^3)	1.8	2.0	
점착력(tonf/m^2)	1.5	3.0	
내부마찰각(f)	30	32	

표 3. 지층별, 심도별 한계평형해석결과

구분 심도(m)	안전율(F.S)		비 고
	토사층	풍화암층	
5	2.18	3.45	
10	1.12	1.77	
15	0.85	1.21	
20	0.71	1.03	
25	0.61	0.86	

3.2 토층분할의 필요성 판단

표준구배에 대한 해석결과 토사층은 약10m, 풍화암층은 16m정도까지 기준안전율(Fs=1.2)을 만족하나 그 이상의 심도에서는 기준안전율을 불만족하는 것으로 나타나 한계안정심도는 토사 10m, 풍화암 16m 로 산정하였다.

따라서 시추조사결과 풍화대가 한계안정심도 이상 확인되는 경우에는 토층분할에 의한 강도정수의 차등 적용방안이 합리적인 것으로 판단되므로 심도별 연속적인 공내전단시험등이 수행되도록 단계별 조사계획이 수립되어야 할 것이다.

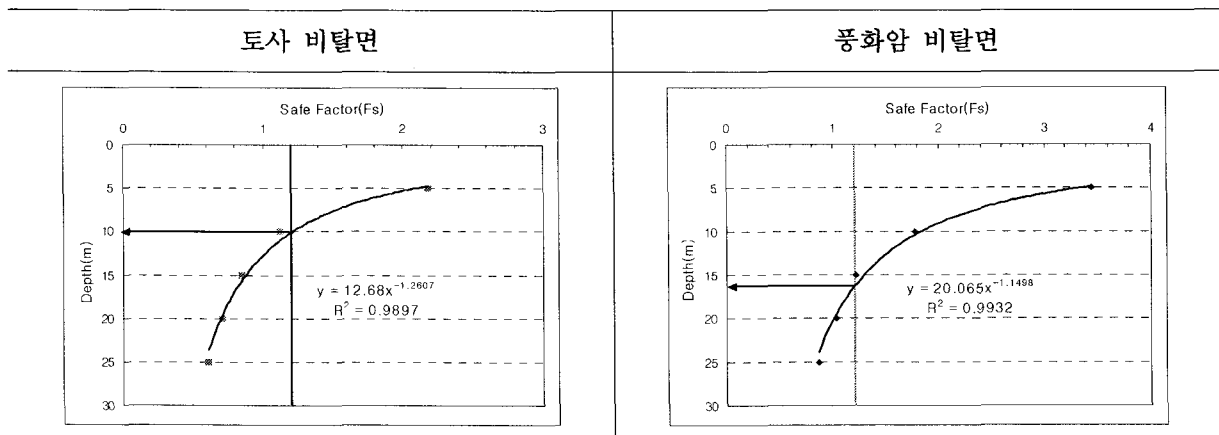


그림 3. 기준안전율(Fs=1.2)을 만족하는 지층별 풍화대 한계안정심도

이상과 같은 결과는 제한된 물성치에 의한 산정결과 이므로 현장 적용시 다음과 같은 사항에 유의하며 토층분할 계획이 필요할 것이다.

1. 차별풍화 및 관입암맥이 협재된 경우
2. 호층을 이루는 층리가 발달한 퇴적암지대
3. 지질 구조적으로 광역변성, 동력변성, 열변성 등의 지각변동을 경험한 지반

상기의 경우에는 심도별 강도특성이 불분명할 수 있으므로 적용시 유의 하여야 할 것이다.

본 사례에서는 토사층이 12m 및 풍화암층이 20m 이상으로, 시추조사결과 심도별 N치와 강도가 증가하는 특성을 보여 심도별 연속적인 공내전단시험(BST)을 수행하여 토층분할에 의한 안정검토를 수행하였다.

4. 연구대상구간에 대한 심도별 강도특성분석

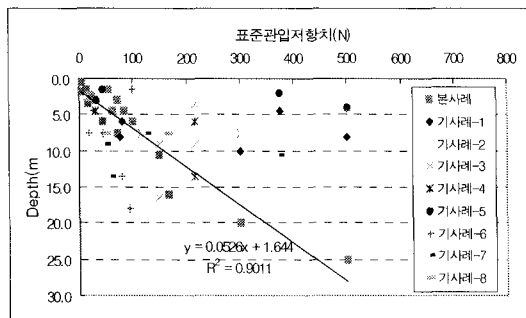
풍화대 구간에 대하여 심도별 강도특성을 분석하기 위하여 본 사례구간에 시행된 조사와 기 설계사례에 의한 표준관입저항치(N) 및 공내전단시험 결과에 의하여 산정된 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)의 심도별 분포특성을 분석하였다.

4.1 풍화대구간 대한 심도별 강도특성분석

공내전단시험등 현장시험계획은 시추조사시 병행되는 표준관입시험(SPT)의 저항치(N)로써 강도의 정성적인 분포특성을 파악한 후 계획되므로 심도에 따른 표준관입저항치의 분포특성 파악이 우선되어야 할 것이다.

그림 4.는 본 연구구간 및 기 사례에 대한 심도별 N치 분포특성을 나타낸 것으로 각 사례별로 심도가 깊어질수록 표준관입저항값($N_{\text{환산}}$)이 증가되는 경향을 보여주고 있다. 특히 본 연구구간의 조사자료에 의한 $N_{\text{환산}}$ 값의 증가는 $y=0.0526x+1.644$ 의 직선적 분포로 상관도($R^2=90\%$)를 보이고 있다.

그러나 이상과 같은 심도에 따른 N치 분포는 정성적인 강도변화특성이며 또한 N치를 이용한 강도정수 산정, 경험적인 산정법 및 일반적인 문헌에 의한 방법 등은 암중, 변성작용정도에 따라 상대적 강도특성이 다르므로 신뢰성 있는 정량적인 값을 산정하기 위하여 공내전단시험등 현장시험이 필요하다.



- 사례1 : 경주~감포 국도건설공사
- 사례2 : 신분당선 민자구간
- 사례3 : 전라선 여천~여수간 철도공사
- 사례4 : 화원~삼포간 도로공사
- 사례5 : 도암~유치간 지방도로공사
- 사례6 : 경전선(온수~부평구청) 701공사
- 사례7 : 경주시 하수관거 정비공사
- 사례8 : 음성군 하수종말처리 건설공사

그림 4. 심도별 표준관입저항치 분포 경향

그림 5.는 공내전단시험결과에 의한 심도별 점착력 및 내부마찰각의 분포특성을 나타낸 것으로 점착력의 경우 N치의 분포특성과 유사하게 심도에 따라 전반적으로 증가되는 경향을 보이며 내부마찰각의 경우는 심도에 따른 일률적인 변화 없이 25~35° 사이에서 분산되는 분포하는 것으로 나타났다.

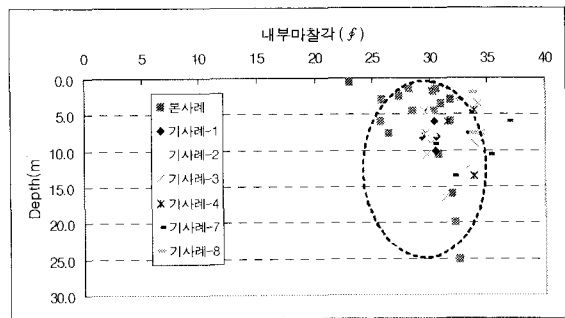
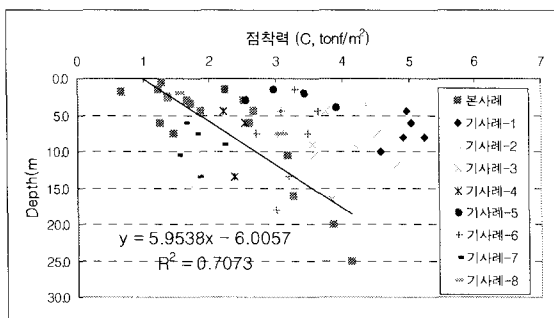


그림 5. 심도별 점착력 및 내부마찰각의 분포 경향

4.2 지층별 강도특성분석

그림 6.은 점착력에 대한 토사 및 풍화층에 대한 심도별 강도특성을 보인 것으로 토사층보다 풍화암층의 강도특성이 좀더 뚜렷한 경향을 나타내고 있다.

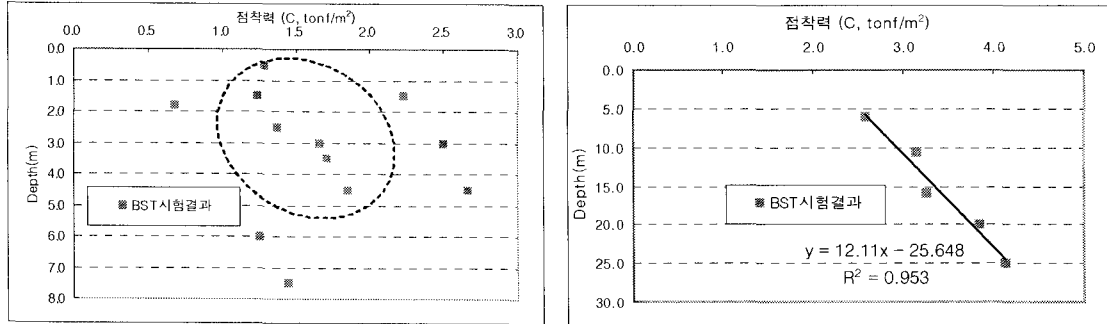


그림 6. 토사층(N<50/15) 및 풍화암층(50/15~50/2)의 강도특성

풍화암의 경우 상관성95%의 $y=12.11x-25.648$ 상관관계를 보이며, 토사층의 경우는 상부의 풍화 및 교란에 의하여 산란된 경향을 보이거나 전체적인 양상은 증가됨을 알 수 있다.

4.3 N치-점착력의 상관성 분석을 통한 지층분할

조사단계시 N치에 의한 정성적 분석 후 공내전단시험의 위치와 개소가 결정되어야 하고, 또한 심도에 따른 강도특성분석결과 N치와 점착력이 상관도 90%이상의 선형적 상관성을 보이므로 지층분할을 위하여 N치와 점착력의 상관관계를 분석하였다.

4.3.1. 토사층의 N-C상관관계

그림 7.은 토사층에 대한 N치와 c의 상관관계를 분석한 결과로 점착력은 1.2~2.6tonf/m²범위로 분포 하며, N치 40이전에서는 분산폭이 넓어 상관성이 낮으나 N치 40이후에서는 상관성 95% 이상으로 $y=63.9x-87.52$ 의 관계를 보인다. 따라서 N=40을 기준으로 강도변화가 크게 발생되어 지층을 분할하는 경계로 결정하였으며 물성치는 N=40을 기준으로 상부층(토사층-1)은 단위중량 1.7t/m³, 점착력 1.5t/m², 마찰각 25° 를 하부층(토사층-2)은 단위중량 1.85t/m³, 점착력 2.5t/m², 마찰각 30°로 산정하였다.

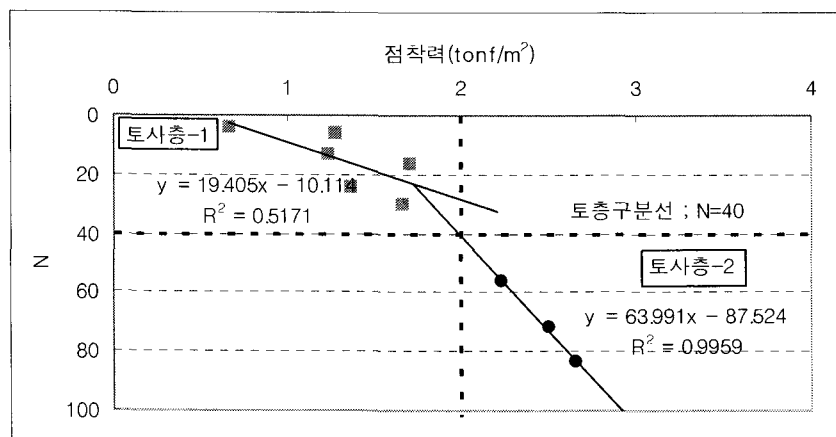


그림 7. 토사층의 점착력과 N치의 상관관계

4.3.2 풍화암층의 N-C상관관계

풍화암층에 대한 N치와 c의 상관관계 분석결과 그림8.과 같이 $N_{\text{환산}}=200(N=50/8)$ 부근에서 강도가 변화하는 변곡점이 형성되므로 $N=50/8$ 를 지층구분의 기준으로 선정하였다.

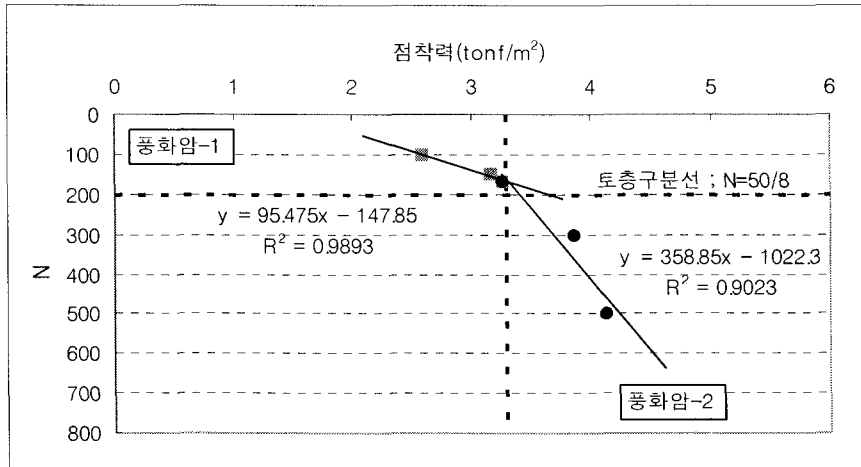


그림 8. 풍화암의 점착력과 N치의 상관관계

산정된 물성치는 $N_{\text{환산}}=200$ 을 기준으로 상부층(풍화암-1)은 단위중량 2.0t/m^3 , 점착력 3.0t/m^2 , 마찰각 30° , 하부층(풍화암-2)은 단위중량 2.1t/m^3 , 점착력 3.7t/m^2 , 마찰각 31° 로 산정하여 안정해석을 수행하였다.

5. 지층분할 전·후 비탈면에 대한 안정해석결과 분석

5.1 표준구배에 대한 안정성 분석

그림 9.는 깊은 풍화대 비탈면에 대하여 지층분할 전·후에 대한 한계평형해석 결과로 분할 전 안전율이 0.837에서 분할 후 0.954로 다소 증가한 것으로 나타났으나 기준안전율($F_s=1.2$)을 만족하지 못하므로 보강대책 방안이 필요한 것이다.

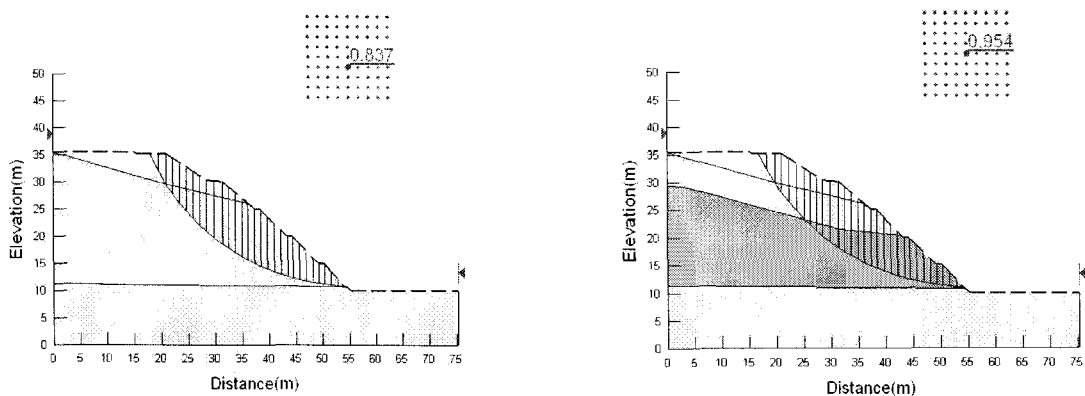


그림 9. 지층분할 전·후의 안정성 분석(Slope/w)

보강방안으로는 구배완화, 어스앵커, 소일네일링, FRP그라우팅 등을 비교 검토한 결과 구배완화공법이 적절한 것으로 판단되어 구배완화공법에 대하여 지층분할전후의 영향에 대하여 평가하였다.

5.2 지층분할에 따른 안정구배 검토

그림 10.은 지층분할전후에 대하여 안정성이 확보되는 구배를 나타낸 것으로 지층분할전은 1:1.8이상의 구배완화가 필요하나, 지층구분후에서 1:1.5구배로 기준안전율을 만족하여 사면은 안정한 것으로 나타났다.

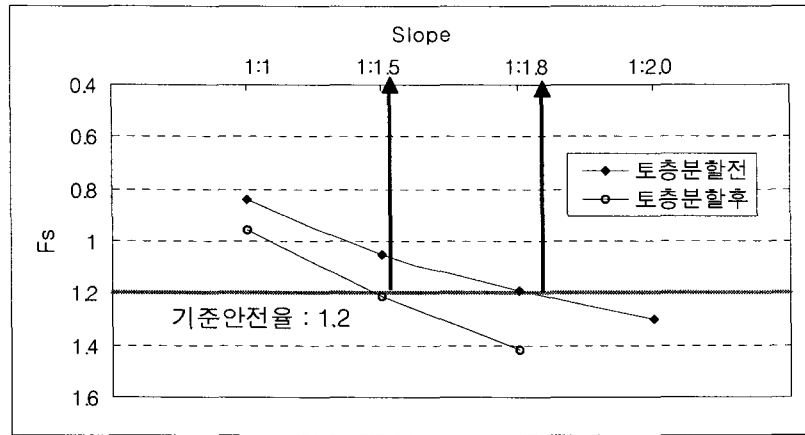


그림 10. 지층분할 전·후 안전율

따라서 지층분할에 따라 구배완화의 정도가 낮아져 깎기고의 감소, 깎기토량 감소 및 환경훼손 감소 등 경제적 설계를 유도하였다.

6. 결론 및 제언

20m이상의 깊은 풍화대 깎기비탈면 구간에 대한 현장조사 및 심도별 공내전단시험을 수행하여 차등물성치의 설계적용으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 첫째, 토층분할의 필요성을 확인하고자 표준구배에 대하여 일반적인 문헌 및 사례에 의해서 제안된 물성치를 적용하여 안정해석한 결과 토사층의 경우 10m 이상의 층후일 경우, 풍화암층인 경우 16m 이상의 층후인 경우에 기준안전율($F_s=1.2$)을 불만족하여 표준구배 적용으로 안정성 확보는 어려운 것으로 평가되었다. 따라서 대상토층의 심도가 깊고 심도에 따른 강도변화가 클 경우 토층분할이 필요할 것으로 사료된다.
- 둘째, 심도별 N 치와 c (점착력)의 상관관계를 분석한 결과 상·하부의 심도별 강도변화가 있는 토사층 ($N=40$) 및 풍화암층($N=50/8$)을 기준으로 토층 분할이 가능한 것으로 나타나, 강도정수를 차등적용하여 안정해석을 하였다
- 셋째, 지층분할 전·후에 대한 안정성 검토결과 토층분할전은 1:1.8이상의 경사완화가 필요하나 지층분할 후 차등강도정수 적용시에는 1:1.5 경사로 안정한 것으로 판단되었으며, 보강 적용공법 검토시 경제성(Value Engineering) 측면에서도 비용절감 및 자연환경훼손 저감효과를 기대할 수 있으리라 판단된다.

이상과 같이 깊은 풍화대 깎기 비탈면의 경우 우선적으로 시추조사결과에 의한 지층의 심도 및 심도별 표준관입시험(SPT)의 저항치(N)를 분석하여 지층의 분할여부를 결정하여야 하며, 지층 분할시에는 심도에 따른 연속적인 강도를 산정할 수 있는 공내 전단시험(BST) 등의 계획이 선행되어야 할 것이다. 또한, 지역, 기반암, 지질 구조적 특성 등에 따라 강도특성이 상이하므로 앞으로 지속적인 시험자료의 축적 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 유재일, 유병옥(1991~1993), 사면안정처리에 관한 연구(I,II,III) 한국도로공사.
2. 도로설계요령(2002), 제2권 토공 및 배수, 한국도로공사.
3. 도로설계실무편람(1996), 토질 및 기초, 한국도로공사.
4. 인천국제공항 2단계 건설 부지조성공사 기본 및 실시설계용역(2002~2003), "지반조사보고서" 인천국제공항공사.
5. Bishop, A.W.(1955), "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Geotechnique*, vol.5, pp.7~17.
6. Barton, N.(1973), "Review of a new shear strength criterion for rock joints.", *Engineering Geology*, vol.7, pp.287~33.
7. Fookes, P.G., Gourley, C.S. and Ohikerec.(1988), "Rock weathering in engineering time." *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol.21. pp.33~58.