

붕괴된 암반사면에서 역해석에 의한 내부마찰각의 추정

Estimation of Internal Friction Angle by the Back Analysis on Collapsed Rock Slope

이 달 원* · 김 갑 중**

Lee, Dal Won · Kim, Kap Jung

Abstract

In this study, the back analysis was performed by means of stereo-net, plane failure and block failure method to collapsed fields among the rock slopes designed by standardized criterion, and the internal frictions from the back analysis were compared with those used to reinforcement design.

It was concluded that in the result of the analysis by means of stereo net, plain failure and block failure methods, the internal frictions used to re-design of collapsed slope underestimated 10°, 5° and 10° in average.

At present, the internal friction on the design is used the experience value according to the state of weathering, but internal friction angle by the back analysis on collapsed slope with various methods were more reliable values than those from the present method. And it was concluded that re-design was made extravagantly because the internal friction used to re-design for reinforcement of the collapsed slope was less than back analysis.

Keywords : Collapsed rock slopes, Stereo-net method, Plane failure method, Block failure method, Back analysis, Internal friction angle, Re-design

I. 서 론

최근 경제규모의 확대, 생활환경의 향상 및 지역간 균형발전 등 사회적 요구에 의해서 교통망의 확충, 기존 도로의 주행성 개선 및 수용능력을 확대

할 필요성이 지속적으로 요구되고 있다. 도로를 건설하기 위해서는 전국토의 70%가 산지로 형성되어 있는 우리나라 지형에서 터널, 교량 및 대절토 및 성토 사면이 나타날 수밖에 없는 형편이다.

그러나 오랜 시간이 경과되어 지각이 노령화되고 장기간동안 풍화되어 많은 절리와 파쇄대를 나타내는 절토사면에 정확한 지질조사 없이 각 기관의 일률적인 기준에 의거 암반사면, 리평암사면 및 토사사면으로 설계하여 시공함으로써 수 많은 절토사면의 붕괴가 발생되고 있다. 절토사면중 일부는 절취

* 충남대학교 농공학과
** 건설교통부 대전지방국토관리청
* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5793
fax: +82-42-824-0467
E-mail address: dwlee@cnu.ac.kr

직후에는 안정하나 절취 후 강우에 의한 유효응력의 감소 등에 의해서 붕괴가 발생되고 있고, 이렇게 일률적인 기준에 의해 설계·시공된 사면이 붕괴되었을 경우 보강을 위해 적용되는 일반적 Parameter는 대부분 경험에 의해 추정함으로써 비경제적 요인을 많이 내포하게 된다. 따라서 정확한 물성치를 측정하여 설계에 적용하는 것이 안전성을 확보하면서도 경제적인 도로건설을 위해서 필수 조건일 것이다.

사면 안정에 관한 해석기법은 흙 구조물은 흙의 전단응력에 의해서 전단파괴가 발생한다는 개념을 적용하여 초기에 Fellenius(1918), Taylor(1948), Bishop(1955), Spencer(1967, 1981)등에 의하여 토사 사면의 파괴면을 원호활동면과 비원호 활동면[Janbu(1954, 1973)]으로 가정한 절편법이 개발되었다. Srivastava(1966)는 암반의 불연속성을 기하학적인 형태를 고려하여 해석하는 평사투영해석(Stereo Net)방법을 제시하였고, Hoek 등(1981, 1997)은 암반의 종류에 따른 강도정수에 대한 경험치를 단위중량, 내부마찰각, 점착력을 기준으로 제시하였으며, 그 이후에도 암괴와 인장균열의 위치, 인장균열 내에 존재하는 지하수의 영향을 고려한 해석방법 등이 개발되었다.

Duncan과 Buchignai(1975)는 사면파괴에 따른 복구비용 및 인명과 재산피해 정도 그리고 전단강도에 관한 신뢰도에 따라 상이한 허용 안전율을 1.25~2.0 범위로 제시하고 있다. Goodman 등(2000)은 사면의 붕괴형태에 침식, piping, block 파괴, 활동 전도 등의 파괴모드에 대해서 세분화하고 사면의 구성 재료와 연관지어 재규정하였다.

기존의 암반사면에 대한 연구는 노출된 암반사면의 형태, 상태 및 시추조사 등으로부터 물성치를 추정하는 방법 및 붕괴의 원인 등에 관해 활발히 연구되고 있는 반면, 붕괴된 암반사면을 여러 해석 기법을 사용하여 역해석으로 물성치를 추정한 연구는 미흡한 실정이다.

암반사면 해석방법에는 평사투영법, 수치해석, 한

계평형 방법 등이 있으며, 이러한 방법들은 사면의 안정해석에 사용될 수 있을 뿐만 아니라 붕괴된 조건으로부터 역해석에 의해서 강도정수를 추정하는 방법으로도 사용될 수 있다.

붕괴된 암반사면에서 정확한 설계정수를 산정하기 위해서는 현장조건을 고려하여 시험을 수행하고 시험자료의 비교를 통한 공학적 판단이 필요하다. 그러나 다양한 암반조건에 대한 시험이 수행되지 못하고, 많은 수량의 시험이 곤란하기 때문에 대부분 다른 연구자들이 제안한 경험식에 의해 설계정수를 산정하고 있다. 이러한 설계정수는 암반조건이 양호하거나 불량한 조건일 경우에는 과대 또는 과소평가될 수 있으므로 신중한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 붕괴된 암반사면을 보강할 경우 가장 중요한 설계정수인 내부마찰각을 추정하기 위하여 경험식에 의해 일률적으로 설계된 현장 사면을 선정하여 평사투영, 평면파괴 및 Block 파괴방법으로 역해석 하고, 붕괴사면 보강시에 적용되었던 기존 내부마찰각과 비교 분석하여 암반사면 보강시 역해석 방법의 적용성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 현장대상 사면

충청지역에서 시행중인 도로건설현장 중에서 5개 지역 22개의 붕괴된 암반 절토사면을 분석하였다. A지역은 충청북도 음성지역의 산지이고, B와 C지역은 충청남도 공주와 연기지역으로 천안과 인접한 산지이며, D지역은 평야지대인 아산지역이고, E지역은 금강변에 위치한 공주지역의 도로현장이다. 붕괴 전 시공사면의 기울기는 Table 1과 같이 사면을 형성하고 있는 암석의 풍화도에 의한 기준에 따라서 $63^\circ(1:0.5)$, $55^\circ(1:0.7)$, $50^\circ(1:0.8)$, 및 $45^\circ(1:1)$ 로 시공되었다.

절취 완료 후 일정시간이 경과한 후에 파괴가 발생하였고, 파괴형태는 대부분 대규모 평면파괴 및

Table 1 The shape and material properties of the analyzed slope

Site	No. of slope	Date of fail-ure	The shape of slope				Rock slope parameters	The class of failure
			Length (m)	Height (m)	slope (Deg)	direction (Deg)		
Total 22 slope 5 sites								
A	A1	2000. 5.	360	42	63	230	$c: 6.0 \text{tf/m}^2$ $\phi: 40^\circ$ $\gamma_t: 2.3 \text{tf/m}^3$	plane
	A2		360	42	63	050		plane
	A3		220	28	63	070		plane & wedge
	A4		123	29	63	250		plane & wedge
	A5		136	23	63	225		plane & wedge
B	B1	2000. 8.	140	99	55	310	$c: 1.5 \text{tf/m}^2$ $\phi: 30^\circ$ $\gamma_t: 2.3 \text{tf/m}^3$	plane
	B2		300	48	55	315		plane
	B3	2001. 8.	200	57	55	309	$c: 3.0 \text{tf/m}^2$ $\phi: 35^\circ$ $\gamma_t: 2.3 \text{tf/m}^3$	plane
	B4		256	45	63	309		plane
C	C1	2000. 6.	220	27	55	060	$c: 1.0 \text{tf/m}^2$ $\phi: 25^\circ$ $\gamma_t: 2.3 \text{tf/m}^3$	plane & wedge
	C2		200	44	55	045		plane & wedge
D	D1	2001. 3.	220	30	50	270	$c: 1.0 \text{tf/m}^2$ $\phi: 29^\circ$ $\gamma_t: 2.0 \text{tf/m}^3$	plane
E	E1	1999. 3.	160	37	55	302	$c: 1.0 \text{tf/m}^2$ $\phi: 35^\circ$ $\gamma_t: 2.5 \text{tf/m}^3$	plane
	E2		120	29	55	306		plane
	E3		120	30	55	302		plane
	E4		200	33	55	315		plane & wedge
	E5		140	39	55	070		plane
	E6		100	23	55	318		plane
	E7	1998. 4.	160	95	45	306	$c: 2.0 \text{tf/m}^2$ $\phi: 20^\circ$ $\gamma_t: 2.65 \text{tf/m}^3$	plane
	E8		80	66	45	308		plane
	E9		120	65	45	308		plane
	E10		180	64	45	312		plane

일부의 쇄기파괴의 형태를 나타내었다. 사면의 높이는 23m~99m까지 분포하고 평균 45m 이상의 중대규모 사면이다.

A지역은 암의 풍화도가 낮고, 암질이 양호하여 $63^\circ(1:0.5)$ 의 경사를 이루고 있고, B, C, D 및 E 지역의 일부는 $55^\circ(1:0.7)$ 의 경사로 시공되었으

며, E지역의 나머지 사면들은 45° (1:1)로 시공되었다. A, B, C, D, E는 도로공사 현장별 분류로써, 지역별로 다른 지표 부근 지질의 풍화도 및 암, 리 평암, 토사사면에 대한 평균 기울기 적용으로 인하여 사면 기울기의 차이가 발생된 것이다.

2. 해석방법

암반사면의 해석에는 기하학적 방법인 평사투영법과, 주절리면과 균열로 둘러싸인 암괴의 무게와 균열에 채워진 수압에 의한 붕괴시키려는 힘과 암괴와 모암 사이에서 붕괴에 저항하려는 마찰저항력의 크기를 비교하여 해석하는 한계평형법이 있다. 해석 대상 사면들은 사면 절취후에 일정기간이 경과한 후에 붕괴된 경우들로 암반사면은 절취 직후에는 안전하였으나 유효응력이 감소하여 붕괴된 것으로 고려하였으며 이것은 시공된 암반사면은 절취 직후에는 붕괴되지 않았으므로 절취된 사면의 안정을 위해서는 내부마찰각은 주절리면의 경사보다는 크다는 것을 알 수 있다.

또한 사면의 붕괴시 지하수위는 중요한 요소가 되겠지만 조사된 자료가 없어 건설교통부의 기준에 의거 인장균열의 1/2까지 지하수위가 상승하였을 때 붕괴된 것으로 가정하였다.

사면붕괴 원인에 대해서는 현재 정량적으로 해석 할 수 있는 방법들이 개발되어 있지 않고, 변수들이 많아지면 해석에 의한 사면의 강도정수를 찾을 수가 없으므로 단순화시켜서 고려하였다.

사면 설계시 요구되는 최소 안전율은 일반적으로 대상 사면이 붕괴되었을 때 발생할 수 있는 피해 규모가 커질수록 최소안전율도 높아지게 된다. 해석 사면은 붕괴력이 저항력보다 커지는 순간 붕괴되는 한계평형의 개념에 따라 붕괴된 순간의 안전율은 1.0으로 가정하였다.

가. 평사투영법

암반사면에서 평사투영해석에 의한 파괴형태는

원호활동 파괴, 평면파괴, 쪼개파괴, 전도파괴로 표현할 수 있고, 사면의 기울기와 주절리군 및 절리면의 마찰각으로부터 파괴형태와 안정성을 평가하게 되며 절리면의 기울기가 절리의 내부마찰각보다 크고 사면의 기울기보다 작다면 붕괴된다. 본 연구에서는 A1-E10 까지 22개의 사면에 대하여 파괴 형태를 해석하였고, 각각의 사면에 대하여 내부마찰각을 추정하였다.

나. 인장균열을 고려한 평면파괴

사면붕괴는 절리면으로 구성된 암반블록이 중력이나 기타 외력에 의하여 평형상태를 유지하지 못하여 발생한다. 즉 암반의 활동력이 저항력보다 커지면 유동이 시작된다. 이는 암반이 지니는 고유의 안정각과 마찰각 사이의 상호관련성과 지질공학적 특성들이 주변환경의 영향을 받아 복합적으로 작용하기 때문이다.

사면에 대한 인장균열 및 활동면에서의 수압분포를 고려한 안전율은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{c \cdot A + (W \cdot \cos \phi_p - U - V \cdot \sin \phi_p) \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \phi_p + V \cdot \cos \phi_p} \quad \dots(1)$$

사면의 상부와 사면내에 인장균열이 존재할 때 W는 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{1}{2} \left[\gamma \cdot H^2 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{Z_c}{H} \right)^2 \cdot \cot \phi_p - \cot \phi_f \right\} \right] \quad \dots(2)$$

여기서, U : 활동면에서 수압에 의해 위로 작용하는 힘, V : 인장균열에서의 수압, Z_c : Tension crack의 깊이, H : 사면의 절취고, ϕ_p : 활동면의 경사각도($^\circ$), ϕ_f : 사면의 경사각도($^\circ$), ϕ : 내부마찰각($^\circ$)이다.

절취 직후에는 안전하였으나 절취 후 강우에 의해서 붕괴되는 과정은 일반적으로 강우의 사면 내 유입으로 사면의 단위중량이 증가하고 강도가 저하되어 인장균열이 발생하고 균열 속으로 강우가 유

입되어 수압의 증가에 의한 유효응력의 감소로 붕괴된다. 따라서 절취 후 붕괴된 사면의 역해석에 있어서 인장균열의 위치와 깊이를 결정하는 것이 매우 중요하다.

인장균열의 한계깊이는 식(1)에서 조사면으로 고려하여 U 와 V 를 0으로 하고, 우변을 Z_c/H 에 대해서 최소화 함으로써 구할 수 있으므로 식(1)을 Z_c/H 와 b_c/H 에 대해서 미분하면 다음과 같은 식이 된다. (Hoek, E. & Bray, J. W., 1981)

식(3)과 (4)를 이용하여 인장균열의 위치와 깊이를 결정하였고, 그 결과는 block파괴에 대한 안정해석에 이용하였다.

다. Block 파괴를 고려한 한계평형해석

평면파괴해석에서 구한 인장균열의 한계깊이 Z_c 와 균열위치 b_c 를 사용하여 Block 파괴해석으로 안전율을 구하였다.

Block 파괴해석은 파괴형상이 임의의 블록으로 구속되는 것을 제외하면 Janbu의 간이법에서 사용하는 방법과 동일한 방법으로 절편력들을 계산한다. Janbu의 방법에서는 절편의 양측에 작용하는 수직력 X_L 과 X_R 의 합력은 0이라고 가정하면 안 전율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{\sum (c \cdot l + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi) \cdot \sec \alpha}{\sum W \cdot \tan \alpha} \dots (5)$$

Block 과괴해석에서는 지정한 Block의 사면 상부측에서 주동작용을 하고 사면 하부측에서 수동작용을 한다. 중앙블록의 임계면은 가장 약한 층이 존재하는 영역으로 미리 구속하게 된다. 암반사면 해석시 중앙 블록의 임계면은 절리면이 되고 사면

상부측 주동영역의 임계면은 인장균열 발생위치가 된다.

III. 결과 및 고찰

1. 붕괴된 암반사면에서 평사투영법에 의한 역 해석

분석 대상 사면에서 조사된 절리의 주향과 경사로부터 평사투영 해석을 한 결과는 다음과 같다. 평면파괴가 발생한 지역으로 노출된 사면으로부터 조사된 A1사면의 절리면의 방향과 경사는 Table 2와 같다. 붕괴전 사면의 기울기는 63° (1:0.5)이고 주향은 230° 이었다. 평사투영에 나타난 절리면의 밀집도로부터 추정한 주절리면의 방향은 사면의 방향과 약 45° 정도 차이를 나타내고 있다. Fig. 1에서 IF1은 내부마찰각 40° 를 나타내는 원으로 사면 붕괴 후 보강시 재설계에 사용된 강도정수이며, IF2는 주절리군의 극점을 통과하는 원으로 주 절리군의 경사인 45° 를 나타내고 있다.

이 사면은 시공 직후에는 붕괴되지 않았고, 일정 시간이 경과한 후에 강우에 의해서 붕괴되었다. 이것은 주어진 사면과 절리면의 기하학적 형상으로부터 붕괴되지 않기 위한 내부마찰각은 적어도 주절리군의 기울기 이상이 되어야 한다는 것을 나타내고 있다. 그러므로 절리면의 내부마찰각은 최소한 주절리군의 기울기인 45° 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

A2~E10까지 21개의 사면에 대해서도 동일한 방법을 사용하여 내부마찰각을 추정하였다. 대부분의 사면이 기하학적 조건에 의해 붕괴를 일으킬 수 있는 주절리군이 발달되어 있었으며, B2, C1, C2 사면의 경우에는 쇄기파괴의 우려가 있는 것으로 나타났다.

Table 3은 이상과 같이 22개 사면의 주절리군으로부터 추정한 내부마찰각을 나타낸 것이다. 봉괴된 사면의 보강시 재설계에 사용된 내부마찰각보

Table 2 Strike and Dip on slope of A1

No.	Dip/Direction	No.	Dip/Direction
slope No.	63 / 230	discontinuity No. 6	65 / 218
discontinuity No.1	54 / 344	discontinuity No. 7	55 / 288
discontinuity No.2	45 / 188	discontinuity No. 8	57 / 252
discontinuity No.3	45 / 180	discontinuity No. 9	40 / 218
discontinuity No.4	80 / 270	discontinuity No.10	30 / 206
discontinuity No.5	45 / 180	discontinuity No.11	55 / 228

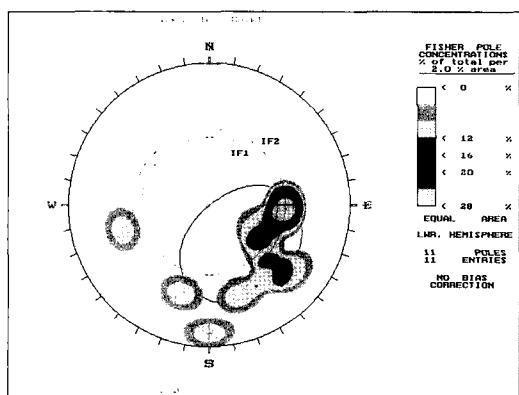


Fig. 1 The result of stereo net analysis on slope of A1

다 평사투영해석방법에 의하여 추정한 내부마찰각이 크게 나타났다.

Fig. 2는 봉괴사면의 보강 설계시 기준설계 기준에 의해서 추정한 내부마찰각을 가로축에, 평사투영해석 결과로부터 얻은 내부마찰각을 세로축에 나타낸 것으로, 역해석 결과 $0^\circ \sim 20^\circ$ 범위로 분포되고 평균적으로 10° 정도 크게 나타났다.

Table 3의 내부마찰각 산출 방법에서 대상 사면이 암반 사면임에도 불구하고 암에 대한 절리면 전단시험을 실시하여 합리적인 절리면의 내부마찰각을 판단한 경우는 2개 사면에 불과하였고, 흙에 대한 직접전단시험결과로부터 추정한 내부 마찰각이 사용된 경우도 있으며 대부분의 경우 RMR분류 및 Barton의 경험치를 이용한 경우도 간접적인 산출 방법일 뿐이며, 실제로 역해석에 의해 추정치보다

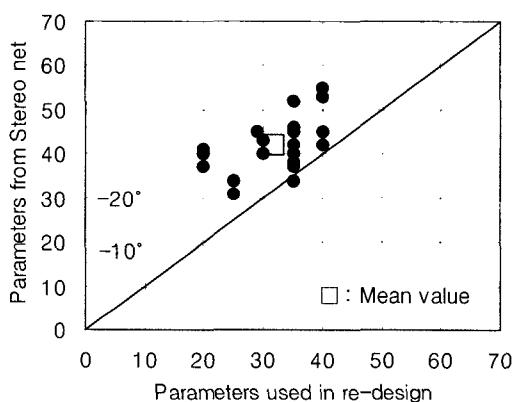


Fig. 2 Comparison of parameters from stereo net and that used in re-design

작게 나타났다.

따라서 Fig. 2와 Table 3에 의하면 봉괴사면의 보강 설계시 사용된 내부마찰각은 실제의 내부마찰각보다 약 10° 정도 작은 값을 사용한 것으로 판단된다.

따라서 여러 가지 현장여건의 제한 사항에 의해서 절리면 전단시험이 불가능한 경우에도 봉괴된 사면으로부터 주향과 경사를 조사한 후 이를 자료로부터 역해석을 실시하여 절리면의 내부마찰각을 추정하는 것이 경험식에 의한 방법보다는 합리적인 산출방법으로 판단된다.

2. 봉괴된 암반사면에서 평면파괴에 의한 역해석

평면파괴 해석을 위해서는 각각의 사면의 형상에

Table 3 Comparison of parameters from stereo net, plane failure, block failure back analysis and that used in re-design

Notation of slope	Internal friction used in re-design (Deg)	Internal friction estimated by back analysis($F_s=1$)							F_s at block failure	* The method of estimating internal friction		
		Stereo net (Deg)	Plane failure (zw/zc when $F_s=1$)			Block failure (zw/zc when $F_s=1$)						
			0%	50%	100%	0%	50%	100%				
Total 22	31.8	42.1	29.9	36.3	47.4	30.3	42.6	60.7	0.8			
A1	40	45	29	37	53	30	49	67.5	0.867	△		
A2	40	45	29	37	53	27.5	41	67	0.985	△		
A3	40	53	19	26	42	18	28	49.5	1.195	△		
A4	40	42	21	28	43	19.5	32.5	50	1.114	△		
A5	40	55	11	16	31	12.5	22.5	39.5	1.237	△		
B1	30	43	29	35	44	27.5	44	50	0.666	□		
B2	30	40	36	43	53	35.5	46.5	74	0.680	□		
B3	35	45	35	43	55	32	45.5	60.5	0.776	□		
B4	35	46	39	48	62	22	37.5	90	0.964	□		
C1	25	34	30	36	46	33.5	50	67	0.577	○		
C2	25	31	29	34	43	31.5	56.5	81	0.627	○		
D1	29	45	31	39	52	30	44	70	0.744	□		
E1	35	37	34	40	49	36.5	47.5	59.5	0.684	△		
E2	35	34	31	36	45	33	44	55	0.758	△		
E3	35	42	38	44	54	39	47	64	0.706	△		
E4	35	38	35	41	50	36.5	47	59.5	0.699	△		
E5	35	40	37	43	53	38.5	44.5	62.5	0.740	△		
E6	35	52	22	30	44	36	43	63	0.795	△		
E7	20	37	33	38	45	32	39.5	52	0.554	△		
E8	20	40	31	36	43	32	42.5	51	0.481	△		
E9	20	41	29	34	41	32	42	51	0.484	△		
E10	20	41	29	34	41	31.5	43	51	0.477	△		

* Test : ○, Estimation by soil test : □, Estimation by experience : △

대해서 한계평형식의 최대 및 최소 조건으로부터 인장균열의 위치와 깊이를 각 사면별로 결정하였으며, 최소안전율이 1.0이고 인장균열내의 수두가 각각 0%, 50%, 100%일 때에 붕괴된 것으로 가정하여 내부마찰각을 역해석으로 구하였다. 역해석에 사용된 토질상수는 Table 1과 같고, A1~E10까지 22개 사면에 대한 평면파괴에 의한 역해석으로부

터 구한 내부마찰각은 Table 3과 같다. Table 4는 사면 A1에서 주어진 사면의 높이 (H)와 경사 (ϕ_f) 및 평사투영으로부터 찾은 주절리군의 경사 (ϕ_p)를 식(3)과 (4)에 대입하여 얻은 인장균열의 깊이와 위치를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 얻은 사면 불록의 형상은 Fig. 3과 같다. 전체 A2~E10 사면의 인장균열의 깊이와 위치도 동일한 방법으로 구

하여 해석시 적용하였다.

Fig. 4는 A1사면에 대한 인장균열의 깊이와 위치가 정해진 후에 암반사면의 평면파괴에 대한 한계평형식을 적용하여 내부마찰각의 변화에 따른 최소안전율을 나타낸 것이다. 이 때 인장균열 내의 지하수위의 위치를 인장균열 깊이의 비(Z_w/Z_c)로 나타내고 0%, 50% 및 100%일 때 각각의 조건에 대한 해석하였다.

본 연구에서는 붕괴시의 안전율을 1로 가정하였으므로 지하수위의 변화에 따른 내부마찰각은 Z_w/Z_c 가 0%, 50%, 100%일 때 각각 30°, 38°, 및 54°로 지하수위가 증가할수록 요구되는 내부마찰각은 급격하게 커짐을 알 수 있다.

인장균열의 최적 깊이와 위치로부터 균열내의 지하수위의 변화에 따른 내부마찰각을 구하였다. Fig. 5는 재설계에 사용된 내부마찰각과 지하수위가 인장균열 깊이의 50%일 때 역해석으로부터 얻은 내부마찰각을 비교한 것이다.

지하수위가 인장균열 깊이 50%일 때를 기준으

Table 4 The notation of parameters on tension crack of slope A1

$H(m)$	ψ_f (Deg)	ψ_p (Deg)	Z_c (m)	b_c (m)
42	63	45	12.02	8.58

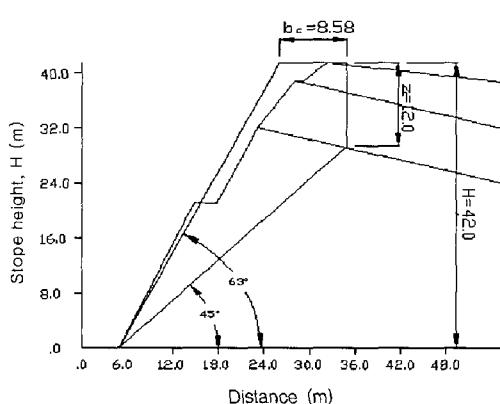


Fig. 3 The position of tension crack on slope of A1

로 하였을 경우에는 평균값을 기준으로 재설계에 사용된 내부마찰각은 역해석한 결과보다 약 5°정도 작게 나타났다.

재설계에 사용된 내부마찰각은 $Z_c/Z_w=0\%$ 인 경우에 해석된 결과보다 대략 $-10^\circ \sim +20^\circ$ 의 범위에 분포하지만 평균값들은 거의 같게 나타났다. 지하수위를 100%로 한 경우에는 약 15°정도 작게 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 A사면에서 내부마찰각이 과대추정된 원인은 붕괴전 암판정 결과가 발파암으로 추정되었기 때문에 크게 나타났고, 역해석시 기하학적 형상을 단순화시킨 요인도 과대평가의 원인이라고 판단된다.

이것은 재설계를 위해서 추정된 값들이 사면이 완전 건조상태에서만 안전하고 약간이라도 지하수위가 존재하면 붕괴된다는 것을 나타낸다.

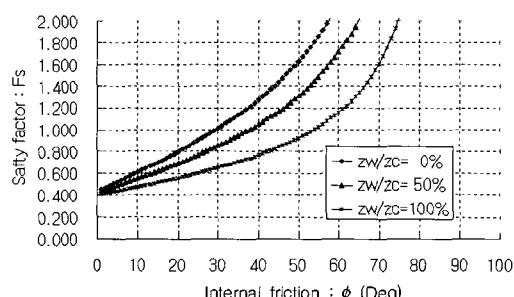


Fig. 4 The result from plane failure analysis in slope A1

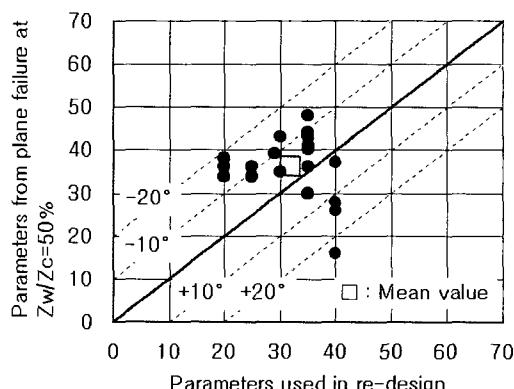


Fig. 5 Comparison of parameters from plane failure and that used in re-design (when $Z_c/Z_w=50\%$)

건설교통부 설계기준에는 우기시 지하수위는 인장균열 깊이의 50%를 기준으로 안전율을 1.2로 규정하고 있다. 본 연구는 안전율이 1.0일 때 사면 붕괴가 발생되는 것으로 가정하였기 때문에 건설교통부 설계기준인 안전율 1.2를 고려하면 지하수위가 인장균열 깊이의 50%보다는 큰 경우에 나타난다. 따라서 채설계에 사용된 내부마찰각은 5°이상 과소추정된 것으로 판단된다.

3. 붕괴된 암반사면에서 Block 파괴에 의한 역해석

평면 파괴해석으로부터 지하수위의 위치에 따른 내부마찰각을 얻었으나, 전술한 바와 같이 사면의 형상과 토층이 단순화되어 있으므로 Janbu 방법을 이용하여 좀더 실제 사면에 근접하게 해석할 수 있는 Block 파괴해석을 실시하였다. 해석 단면은 붕괴되기 전 시공단면을 사용하였고, 인장균열의 깊이와 위치는 평면파괴시 역해석에 의해 얻은 값을 사용하였다. 이것은 초기에는 일부 붕괴가 발생되지만 결국에는 주절리면과 인장균열의 수두에 의해 대규모 붕괴가 발생되므로 실제 붕괴형태와 가장 유사한 형태로 해석하기 위하여 앞에서 얻은 사면 상단의 인장균열 깊이와 위치를 고려하여 해석하였다. 그러나 일부사면의 경우 사면이 높고 소단이 많은 경우에는 풍화정도에 따른 사면경사가 다르므로 인장균열의 깊이와 위치가 실제와는 다르게 사면외부에 위치하게 되어 Block 파괴해석이 곤란하였다. 이런 경우에는 Block의 파괴형태와 가장 유사한 직선형태의 파괴를 보이는 Janbu 방법을 이용하여 Random 파괴형태로 해석하였다. 강도정수를 제외한 토질정수들은 실험결과를 사용하였고, 안전율이 1.0일 때 붕괴된 것으로 설정하여 지하수위의 변화에 따른 내부마찰각을 역해석하였다.

Fig. 6은 A1사면에 대해서 각각 인장균열의 깊이에 대한 지하수위의 비율이 50%일 때의 Block 파괴 해석결과이고, Fig. 7은 이 결과로부터 지하수위의 변화에 0%, 50%, 100%일 때의 내부마찰

각의 변화를 나타낸 것으로 안전율이 1.0이 되는 내부마찰각은 각각 30°, 49°, 67.5°로 나타났다. 이 결과로부터 안전율이 1.0이 되려면 요구되는 내부마찰각도 증가하여야 하므로 지하수위의 변화에 따른 내부마찰각의 관계는 선형 비례관계가 있는 것으로 판단된다.

A1~E10까지 22개 사면에 대한 Block 파괴에 의한 역해석으로부터 얻은 내부마찰각은 Table 3에 나타냈고, Fig. 8은 붕괴된 사면의 보강설계에 사용된 내부마찰각과 지하수위가 인장균열 깊이의 50%일 때 역해석으로부터 얻은 내부마찰각을 비교한 것이다.

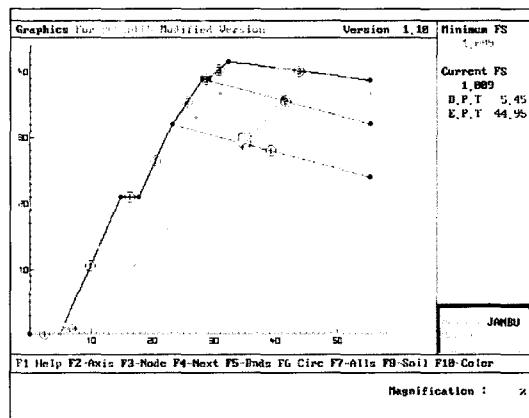


Fig. 6 Block failure on slope of A1 ($Zw/Zc=50\%$)

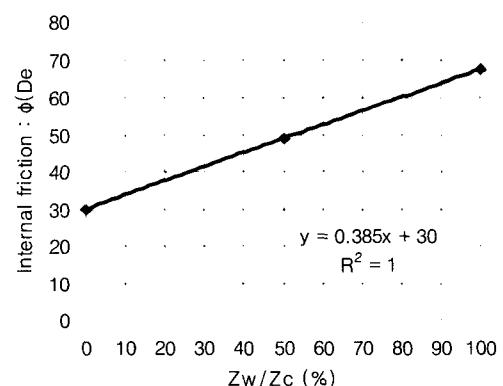


Fig. 7 The variation of internal friction according to Zw/Zc at $F_s=1$ on slope of A1

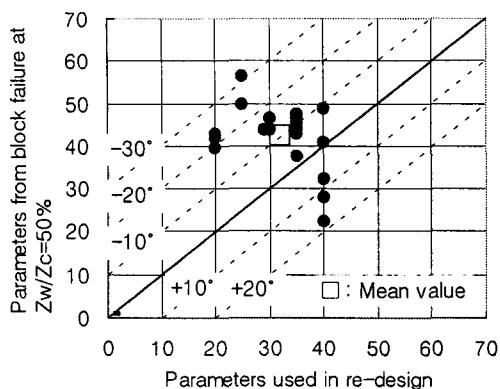


Fig. 8 Comparison of parameters from block failure and that used in re-design (when $Z_w/Z_c=50\%$)

지하수위가 인장균열 깊이 50%일 때를 기준으로 한 경우에 A 사면을 제외하고는 평균값을 기준으로 재설계에 사용된 내부마찰각은 역해석한 결과보다 약 10°정도 작게 나타났다. $Z_c/Z_w=0\%$ 인 경우에는 평균값이 대략 45° 대각선상에 놓여 있고 재설계 사용된 내부마찰각이 대략 $-10^\circ \sim +20^\circ$ 의 범위에 분포하지만 평균값들은 유사하게 나타났고, 지하수위를 100%로 한 경우에는 약 30°정도 작게 나타났다.

이는 평면파괴 역해석과 같이 재설계를 위해서 추정된 값들이 사면이 완전 건조 상태에서만 안전하고 약간이라도 지하수위가 존재하면 붕괴된다는 것을 의미한다.

평면파괴해석 결과와 비교하면 지하수위가 0%일 경우에는 Block 파괴의 해석과 평균적으로 근접하였고, 지하수위가 50%일 경우에는 평면파괴해석에서는 5°이고 Block 파괴해석 결과에서 10° 정도로 나타났다. 지하수위가 100%일 경우에도 역시 평면파괴해석 결과에서는 15°로 Block 파괴해석에서 더 큰 차이를 나타내고 있고, 전체적으로 Block 파괴는 평면파괴해석보다 약 2배 정도 크게 나타났다.

4. 추정된 내부마찰각에 대한 적용성 검토

평사투영해석, 평면파괴해석 및 Block 파괴해석으로부터 얻은 지하수위의 위치가 인장균열 깊이의 0%, 50% 및 100%일 때 전체사면에 대한 역해석 결과와 재설계에 사용된 내부마찰각에 대한 적용성을 검토하였다.

지하수위의 위치가 인장균열 깊이의 0% 일때 대부분의 사면들에서 역해석 결과와 재설계에 사용된 내부마찰각이 약 $-10^\circ \sim +20^\circ$ 정도의 범위로 서로 다르게 나타나지만 평균치로 표시하면 거의 근접한 결과를 나타낸다. 평면파괴해석과 Block 파괴해석으로 역산한 내부마찰각은 유사한 경향을 나타냈는데 이것은 평면파괴해석시 사면의 형상이 단순화되고 암반의 토층을 균일하게 하여 해석하였음에도 불구하고 Block파괴와 비교적 근접한 결과를 나타내고 있다. 그러나 Block파괴에 의한 역해석 결과에서 나타낸 바와 같이 안전율이 1.0보다 큰 사면 A3, A4 및 A5에서는 재설계에 사용된 값이 역해석된 값보다 더 큰 값을 나타내고 있다. 다른 대부분의 사면에서도 비록 재설계에 사용된 내부마찰각이 지하수위가 0%인 경우와 근접하게 나타나서 과다설계가 된 것으로 판단되고 각 사면별로 일관된 경향을 나타내고 있다.

본 연구에서 주어진 조건에 대해서 3가지 방법으로 내부마찰각을 역해석한 결과, 붕괴된 사면의 보강시 재설계에 사용된 내부마찰각은 작게 추정된 것으로 판단된다. 암반사면의 강도정수는 실험에 의하여 구하는 것이 가장 정확하지만 실험방법에 따라 다르고, 붕괴된 위치에서 많은 양의 시험을 할 수 없기 때문에 대표성이 있는 값을 선정하기 어렵다.

따라서 이 연구에서 사용된 것과 마찬가지로 다양한 방법을 사용하여 각 지하수위의 위치에 따른 내부마찰각을 역해석하여 사면붕괴가 발생된 많은 시공현장에 대해서 적용한다면, 붕괴사면의 강도정수의 적정성을 합리적으로 평가할 수 있는 하나의

기법으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 경험식에 의해 일률적으로 설계된 암반 사면 중에서 붕괴된 현장을 중심으로 평사투영법, 평면파괴 및 Block파괴 방법 등에 의하여 내부 마찰각을 역해석 하고, 사면 보강시에 사용된 절리면의 내부마찰각과 비교분석 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 붕괴된 사면에서 재설계에 사용된 내부마찰각은 평사투영 역해석에 의한 내부마찰각보다 약 0~20°정도 적게 나타났고, 평균적으로 10°정도 과소 평가된 것으로 판단된다.

2. 붕괴된 사면에서 재설계에 사용된 내부마찰각은 건설교통부의 설계기준을 고려하였을 경우 평면파괴 역해석에 의한 내부마찰각보다 약 ±20°의 범위로 나타났고, 평균적으로 5°정도 과소평가된 것으로 판단된다.

3. 붕괴된 사면에서 재설계에 사용된 내부마찰각은 Block파괴 역해석에 의한 내부마찰각보다 약 +20°~-30°의 범위로 나타났고, 평균적으로 10°정도 과소평가된 것으로 판단된다.

4. 암반 사면에서 절리면의 내부마찰각을 추정하는 방법은 암질의 상태에 따라 경험식에 의한 방법이 사용되고 있으나, 붕괴된 사면조건으로부터 평사투영, 평면파괴, Block 파괴방법등에 의해 역해석한 결과 더욱 신뢰성 있는 내부마찰각을 얻을 수 있었고, 붕괴사면의 보강시 재설계에 사용된 내부마찰각은 작게 추정하여 비경제적으로 설계된 것으로 판단된다.

References

1. Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering rock mass classification*. John Wiley and Sons. New York.
2. Bishop, A. W. 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slope. *Geotechnique* 5(1): 7-17.
3. Duncan, J. M. and A. L. Buchignani. 1975. An engineering manual for slope stability studies. *University of California*. Berkeley.
4. Goodman, R. E. and D. S. Kieffer. 2000. Behavior of rock in slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(8): 675-684.
5. Hoek, E. and E. T. Brown. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal for Rock Mechanics and Mining Science* 34(8): 1165-1186.
6. Hoek, E. and J. Bray. 1981. Rock slope engineering, *The Institution of Mining and Metallurgy*. London. pp. 23-168.
7. Korea Highway Corporation. 2002. Highway design criterion(Vol. 2)
8. Ministry of Construction and Transportation. 2000. Design criterion of road construction (2002).
9. Spencer, E. 1967. A method of analysis of the stability of embankment assuming parallel interslice forces. *Geotechnique* 17: 11-26.
10. Srivastava, L. S. 1966. Stability of rock slopes and excavations. *Journal of Engineering Geology* 1(1):57-72.
11. Taylor, D. W. 1948. *Fundamentals of soil mechanics*, John Wiley and Sons, New York.