

시공 중 비탈면의 붕괴 특성에 대한 충청지역 사례연구

A Case Study on Collapse Characteristics of Slope during Construction in the Chung-Cheong Area

이 준 대¹⁾ · 배 우 석[†]

Jundae Lee · Wooseok Bae

Received: July 9th, 2015; Revised: July 15th, 2015; Accepted: August 22nd, 2015

ABSTRACT : Most studies on slope collapsed have focused on collapse cases that occur on stabilized slopes in public use. Few studies have been conducted on the collapse characteristics of slopes that occur during construction before stabilization of the slope. In this study, detailed investigation was conducted for 79 sites where slope collapse occurred during or immediately after construction in the Chungcheong region, and their geometrical characteristics, collapse characteristics, design and reinforcement methods were evaluated. As a result of this analysis, it was found that the Chungbuk (CB) area was marked by plane-type collapse and surface layer collapse whereas the Chungnam (CN) area was marked by surface layer collapse or loss of sedimentary rocks. Furthermore, the major collapse factors of the Chungbuk region were joint alternations (53%) and weathering (25%), and the blocking due to multidirectional joints and foliation was also an influencing factor. In the phyllite area, too, the development of joints (55%) was a major factor, but the geological characteristics (36%) of sedimentary rocks such as faults and coaly shale also had considerable effects. Therefore, the geological, climatic, and environment characteristics were found to have affected the stability of slopes.

Keywords : Slope failure, Detailed investigation, Geological characteristic, Joint alternation

요 지 : 비탈면 붕괴와 관련된 대부분의 연구는 안정화되어 공용 중인 사면에서 발생하는 붕괴사태를 중심으로 이루어져 왔으며, 안정화가 이루어지지 않은 시공 중에 발생하는 비탈면의 붕괴특성에 대한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 충청지역을 대상으로 시공 중 또는 시공 직후의 비탈면에서 붕괴가 발생한 79개소를 대상으로 정밀조사를 수행하고 그 결과를 통해 기하학적인 특성과 파괴특성, 설계 및 보강방법 등의 특성을 평가하였다. 분석결과 충북권은 평면형 붕괴와 표층 붕괴가 두드러지며, 충남권은 평면형 붕괴가 대다수이나 충북권에 비해 퇴적암의 표층부 붕괴이나 유실이 큰 것으로 나타났다. 또한 주된 파괴인자는 충북권이 절리의 교호(53%)와 풍화(25%)로 나타났고 다방향 절리로 인한 블록화와 천매암 지역의 엽리가 영향을 미치고 있으며, 충남권도 발달된 절리(55%)가 주요요인이나 단층, 탄질세일 등 퇴적암의 지질학적 성인(36%)도 상당한 영향을 미치고 있어 지질학적, 기후적, 환경적 특성이 비탈면의 안정에 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

주요어 : 비탈면 붕괴, 정밀조사, 지질학적 성인, 절리 교호

1. 서 론

Hoek & Bray(1981)는 비탈면 붕괴에 강우와 지반상태가 가장 큰 영향을 미친다고 주장한 바 있다. 우리나라도 매년 우기와 해빙기를 중심으로 많은 자연사면과 인공사면에서 산사태가 발생하고 있어 이러한 비탈면 붕괴의 방재대책 수립을 위해서 국내에서 발생하는 비탈면 붕괴에 대한 연구는 붕괴사태를 통해 강우량이나 지질, 지반특성과의 연관성을 평가하는 방향으로 진행되고 있는 상황이다.

Kim & Jung(2000)은 대전 충남지역의 산사태에 관한 연구를 통해 금강유역권은 파괴 당일 강우량의 영향을 크게 받

으며, 최대 시간 강우량이 25mm가 넘거나 당일 강우량이 180mm 이상이 되면 대규모 산사태가 발생한 것으로 분석하였다. Yoo (2002)는 역해석을 통하여 암종과 불연속면의 상태에 따른 강도 정수를 제안하였고, Kim(2002)은 우리나라에서 기록된 10여 년 간의 산사태 자료 중 산사태가 많이 발생한 지역을 측후소별로 선별하여 분석한 결과 중부지방은 최대 시간 강우 강도가 피해규모에 큰 영향을 미치는 것으로 주장하였다.

Baek et al.(2005)은 집중호우 시 붕괴된 절토 비탈면 1,372에 대한 현장 조사자료를 토대로 국내 비탈면 붕괴의 주요 형태는 표층유실과 표층붕괴 등의 천부파괴가 주를 이루며 토층의 두께에 따른 지하수의 영향을 평가하였다. Yun et

1) Department of Civil Engineering, Semyung University

† NANO-GEO ENC Co., Ltd. (Corresponding Author : old1007@hanmail.net)

al.(2007)은 경기-서울-인천지역 구성암류에 대한 분포율과 분포특성 등을 지질시대와 암종 별로 분류하여 상세하게 보고한 바 있으며, Kim et al.(2008)은 충청도 지역의 국도면에 분포한 절토사면 현황조사 자료를 바탕으로 위험 절토사면 분포도를 작성하였다. 또한 Yun et al.(2008)은 충청지역의 구성암류를 지질시대와 암종 별로 구분하여 분포율을 결정하고 다양한 사업과 계획 시 지질정보 자료를 활용할 수 있도록 제시하였으며, Jung et al.(2008)은 경북지역의 산사태 발생지 172개소에 대해 산사태 발생특성을 요인별로 분석하여 예측을 위한 판정기준표를 제안하였다.

그러나 지금까지 진행되고 있는 연구는 대부분 시공이 완료된 후 공용 중인 도로 비탈면이거나 자연 비탈면의 붕괴 사례를 중심으로 이루어져 왔으며 시공 중에 발생되고 있는 비탈면의 붕괴사례나 붕괴특성에 대한 연구는 많지 않은 상황이다. 시공 중의 비탈면은 노두가 장기간 동안 불안정요인에 노출되어 비탈면 내의 응력을 증가시키며 노두의 보호나 보강이 시공되지 않은 상태이므로 시공 후에 비해 기상 조건이나 응력변화에 대한 저항이 매우 취약하며, 파괴시점도 굴착진행 정도에 따라 매우 불규칙하게 발생되어 붕괴가 반복되는 우를 범하는 경우도 많은 상황이다.

따라서 본 연구에서는 충청지역을 대상으로 시공 중 또는 비탈면 보호·보강공법이 적용되지 않은 시공 직후의 비탈면에서 붕괴가 발생된 79개소를 대상으로 정밀조사를 수행하고 그 결과를 통해 비탈면 붕괴와 기하학적인 특성, 파괴특성 및 지질학적 특성과의 관련성을 분석하여 지역에 따른 파괴유형과 파괴원인을 평가하였다.

2. 연구대상 지역의 지질 특성

2.1 광역 지질 특성

한반도의 광역적인 지질은 Fig. 1(a)와 같이 선캄브리아대의 변성암류가 약 40%, 중생대와 그 후에 관입한 화성암류가 약 35%, 고생대 이후의 퇴적암류가 약 25% 분포하고 있다. 변성암류는 주로 북한과 한반도 중부지방에 분포되어 있으며 변성퇴적암과 화강변성암이 대부분을 차지하고 있다. 화성암류는 대부분 화강암으로 중생대에 관입한 것이며 화산암류는 대부분 백두산, 철원, 울릉도, 제주도에 분포하는 현무암이고 퇴적암류의 대부분은 고생대의 해성층과 중생대의 육성층이다.

암석의 공간적 분포상태를 거시적으로 보여주는 것은 Fig. 1(b)와 같은 지체구조(地體構造)로 우리나라를 암석의 연령, 종류 및 지질 구조 등과 같은 기준에 따라 여러 개의

땅덩어리로 나눈 것이며 육괴는 주로 선캄브리아대의 지층으로 이루어진 지역으로 고생대 이후에 대체로 육지로 노출되었고(남령 육괴, 경기 육괴, 소백산 육괴) 퇴적 분지는 육괴 사이의 낮은 지역으로 고생대 이후에 지역에 따라 바다나 호수가 형성되어 퇴적층이 쌓여 형성되었다(평남 분지, 경상 분지).

우리나라의 지체구조는 육괴와 퇴적분지가 교대로 분포하는 패턴을 보이고 있으며, 충청권은 Fig. 1(b)와 같이 경기 육괴와 옥천습곡대의 주를 차지하고 소백산 육괴가 일부 포함되어 있다. 경기 육괴는 영남 육괴와 더불어 남한 선캄브리아대의 기저를 형성하고 있으며, 구성암석은 대부분 편마암류와 이에 협재된 편암과 규암으로 이루어진 변성암 복합체로 하부로부터 경기편마암복합체, 춘천계 및 연천계로 구분된다. 이 중 경기편마암복합체는 호상편마암, 반상변정질 편마암, 미그마타이트질 편마암에 흑운모녹니석편암과 결정질 석회암 및 규암이 협재 되는 암체로서 심한 화강암화 작용을 받고 여러 번의 변성작용을 받아 암석의 변화가 대단히 심하다.

옥천습곡대는 한반도의 허리부를 북동-남서 방향으로 50km 이상의 폭으로 분포하는 지층으로 경기 육괴와 영남 육괴 사이에 위치한 지질학적 구조대로서 저변성 퇴적암류인 슬레이트와 편암, 천매암 등 이방성 암류와 석회암계의 암들이 분포하고 있다. 옥천대는 수차례의 단층 및 습곡 작용을 받아 지질학적으로 매우 불안정한 지반을 형성하고 있으며, 옥천층군은 연속적으로 퇴적된 것이 아닌 지질시대를 달리 하는 여러 지층이 상호 부정합관계를 가지고 교호층을 이루는 누층군이므로 매우 복잡한 지층을 형성하고 있다. 또한 옥천대는 한반도에서 지질 구조적으로 가장 복잡한 지층으로서 수차례의 변형작용으로 지층이 교란되어 있으며 면구조와 선구조(단층, 습곡, 엽리, 벽개)의 영향으로 다른 암석에

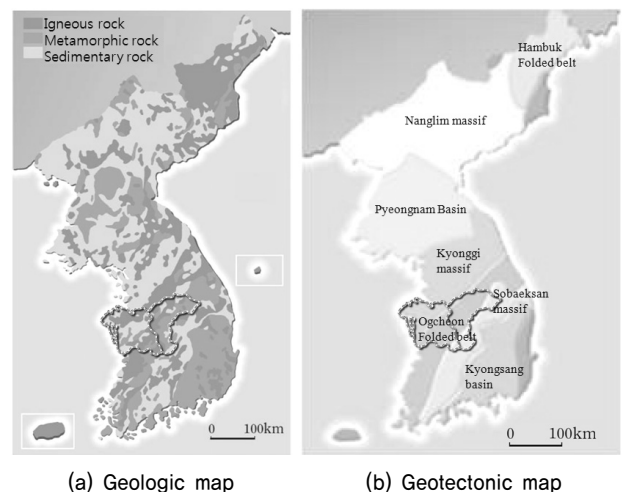


Fig. 1. The geology map of study area

비해 심한 파쇄양상을 나타낸다(Korean Geotechnical Society, 2009).

이상에서와같이 연구대상 지역은 편마암류 및 협재된 편암과 규암으로 이루어진 변성암 복합체와 저변성 퇴적암류인 슬레이트, 천매암, 석회암계가 주를 이루고 있어 지질학적 성인에 의한 붕괴의 가능성을 예상할 수 있다.

2.2 연구지역의 지질

Yun et al.(2008)에 의하면 충북지역(CB)은 64개의 구성암류로 이루어져 있으며, 크게 8개의 지질시대로 구분된다. 이 지역은 주라기의 대보화강암이 40.77%, 선캠브리아기의 호상편마암이 13.06%, 제4기 충적층이 4.45%, 캄브로-오도비스기의 대석회암층군이 3.78%, 시대미상의 옥천층군 내 하부천매암대와 변성사질암대가 3.57, 3.02%, 트리아스기의 청산화강암이 2.85%, 화강암질 편마암이 2.55%, 옥천층군 내 함력천매암대가 2.48%, 흑운모편마암이 2.39%의 순으로 분포한다.

충남지역(CN)은 모두 35개의 구성암류와 6개의 지질시대로 이루어져 있으며, 주라기의 대보화강암이 30.31%, 선캠브리아기의 호상편마암이 12.93%, 제4기 충적층이 11.56%, 경기편마암복합체 내 화강편마암과 화강암질 편마암이 각각 7.17%, 5.05%, 백악기의 산성암맥류가 2.6%, 옥천층군의 하부천매암대가 2.43%, 그리고 4기의 매립지가 2.23%로 이들 암류가 74.28%의 우세한 분포를 이루고 있다. 특히 대전지역(DJ)은 모두 11개의 구성암류와 5개의 지질시대로 구분되며 주라기의 대보화강암이 60.86%, 제4기의 충적층 13.33%, 시대미상의 옥천층군 내 하부천매암대가 10.58%, 함력천매암대가 3.58%, 백악기 산성암맥류가 2.47%로 대부분을 차지하고 있다.

Fig. 2에서 지역 1, 2, 3은 각각 충북(CB), 충남(CN), 대전(DJ)을 지칭하며 암종 A~F는 주류 암종인 대보화강암, 호상편마암, 흑운모편마암, 4기 충적층, 대석회암층군, 천매암/변질사암, 함력천매암대, 화강암질편마암, 산성암맥류를 지

칭한다.

각 지역을 비교한 결과, 모든 충청권지역의 지질은 대보화강암이 많은 부분을 차지하고 있으며, 이를 제외하면 충북권은 호상편마암이 많은 영역을 차지하고 충남권도 유사성을 보이고 있다. 충남권은 타 지역에 비해 편마암류가 많은 부분을 차지하고 있으며 대전권은 천매암/변질사암이 주류를 이룬다. 충북지역의 경우에도 다양한 천매암대가 여러 지역에 분포되어 있다.

충북의 북부권은 조립질 화강암 또는 청주화강암류가 주를 이루고 있으며 특히 조립질 화강암의 경우 풍화진행속도가 매우 빨라 빠른 속도로 토사화되거나 입자화되어 대규모의 원형 붕락이 유발되거나 저항력을 잃은 지반의 블록형 파괴가 유발되는 특징을 보이고 있다. 또한 충북의 중남부 권에서는 옥천습곡대의 석회암이나 천매암 구간에서 대규모의 평면형 붕괴가 진행되고 있는 것으로 나타났다. 천매암은 명확한 엽리면을 따라 분리되는 특징을 보여 사면의 방향성이 불리하게 작용하는 경우 대규모의 붕괴를 유발하며 석회암이나 세일 등과 교호하여 불안정한 상태를 보

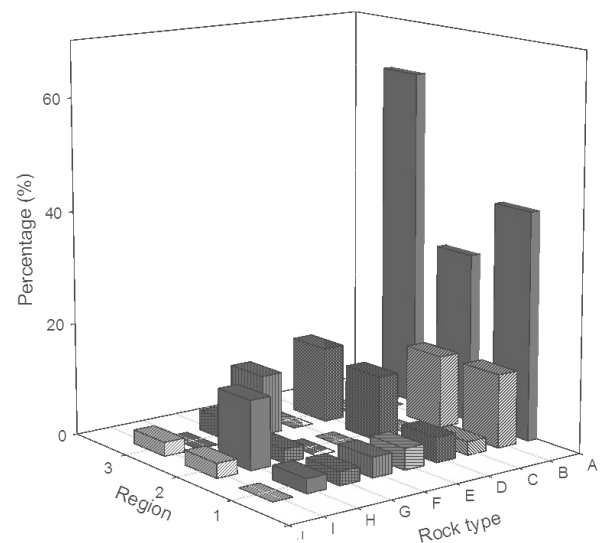


Fig. 2. Regional distribution of rock type

Table 1. Distribution of geological features of chung-cheong region

	Daebo granite (A)	Banded gneiss (B)	Biotite gneiss (C)	4th alluvial deposit (D)	Great limestone group (E)
1(CB)	40.77	13.06	2.39	4.45	3.78
2(CN)	30.31	12.93	0	11.56	0
3(DJ)	60.86	0	0	13.33	0
	Phyllite/sandstone (F)	Pebble bearing phyllite zone (G)	Granitic gneiss (H)	Acidic rock aneurysm (I)	
1(CB)	3.57	2.48	2.55	0	
2(CN)	0	2.43	12.22	2.6	
3(DJ)	10.58	3.58	0	2.47	

이고 있다.

파괴가 발생한 충남의 서안부는 호상편마암이 발달하여 있으며 세일과 사암이 호층을 형성하여 경계부를 따라 대규모 붕괴가 발생하거나 부분풍화 등으로 경계부의 저항력 저하가 두드러지게 나타나고 있다.

3. 붕괴 비탈면의 특성

Kim et al.(2008)은 대부분의 공용 중인 비탈면의 붕괴에 풍화도와 암석의 결, 지하수를 주된 원인으로 결정한 바 있으나 시공 중의 비탈면은 비탈면 보호공법이 적용되기 전이며 노두가 확인되지 않은 상태에서 설계가 이루어져 이러한

결정인자를 그대로 적용할 수 없는 특징을 가지고 있는 것으로 판단되어 본 절에서는 비탈면의 기하학적 형태와 파괴 시기, 파괴유형, 암종 등과의 관계를 평가하여 공용 전 비탈면의 파괴거동이 가지고 있는 특성을 파악하였다.

3.1 대상 비탈면의 기하학적 특징

본 연구에서는 2009년~2014년 사이에 다양한 원인에 의해 붕괴된 비탈면을 대상으로 정밀조사를 실시하여 붕괴특성과 지반공학적 특성을 분석하였다. 분석에 사용된 비탈면은 시공 중이거나 시공 직후로 공용 전의 79개 비탈면을 대상으로 하였으며, 현장별로 기하학적인 제원과 현장의 세부 암종, 붕괴유형 및 붕괴부의 규모를 조사하였고 그 현황

Table 2. Investigation results for failure slope

No	Region	Rock type	Height (m)	Slope (°)	Length (m)	Collapse day	Collapsed type	Collapse section (m)			Collapse volume (m ³)
								Lr	Wr	Dr	
1	CB	DG	40	45	360	2009.07	P/W	15	10	1.5	225
2	CB	DG	21	45	250	2010.02	S				0
3	CB	DG	31.5	55	160	2009.07	P/W/S	13.5	20	1	270
4	CB	DG	20.3	55	140	2009.08	W/S				0
5	CB	DG	30	63	270	2010.04	P/W/S	13	5	1.5	97.5
6	CB	DG	27	63	200	2010.07	P/S	5	15	1.1	82.5
7	CB	DG	40	63	360	2010.08	P	30	50	3	4,500
8	CB	DG	27	55	420	2010.08	W/S				
9	CB	DG	27	40	200	2009.12	W/R				
10	CB	DG	20	55	140	2009.08	S				
11	CB	DG	50	55	160	2009.08	P/W	20	20	0.7	280
12	CB	DG	38	63	180	2009.07	P/W				
13	CB	DG	40	55	100	2011.04	P/W				
14	CB	DG	20	55	200	2011.04	C				
15	CB	DG	15	47	60	2011.09	P				
16	CB	DG	22	45	140	2010.03	C				
17	CB	DG	30	55	100	2009.09	P	25	80	15	30,000
18	CB	DG	28.5	55	180	2009.09	P				
19	CB	DG	30	51	80	2009.08	P				
20	CB	PR	42	55	150	2013.03	P				
21	CN	BG2	33.1	45	85	2013.08	S				
22	CN	SH	30	45	100	2013.08	S				
23	CN	SH	60	55	300	2013.07	P	20	80	1	1,600
24	CN	SH	27	55	220	2011.12	S				
25	CN	BG2	41	55	240	2010.09	P	15	40	1	600
26	CN	BG2	18	55	160	2013.02	P/S	6	22	1.3	171.6
27	CN	SH	37	55	340	2012.02	P	1.5	3	0.7	3.15
28	CN	SH	22.5	55	140	2011.12	P/S	2.5	5	0.5	6.25
29	CN	SH	41.7	55	300	2011.12	S				
30	CB	PR	30.8	55	260	2011.09	S				
31	CB	PR	25	55	60	2011.09	P	15	25	2	750
32	CB	PR	36.1	45	200	2011.09	S				

Table 2. Investigation results for failure slope (Continued)

No	Region	Rock type	Height (m)	Slope (°)	Length (m)	Collapse day	Collapsed type	Collapse section (m)			Collapse volume (m ³)
								Lr	Wr	Dr	
33	CB	PR	25.3	63	160	2011.09	S				
34	CB	PR	28	55	230	2011.09	S				
35	CB	PR	39.4	55	200	2011.09	P	30	25	3	2,250
36	CB	PR	52	55	200		P				
37	CB	CS	17	80	140	2011.01	P				
38	CB	CS	13.2	63	70		P				
39	CB	DG	18	55	100	2013.01	S				
40	CB	DG	41.4	63	180	2013.04	C				
41	CB	QP	23.4	63	180	2014.03	P/W				
42	CB	GG	32.7	63	100		S				
43	CB	GG	34.3	37	50		S				
44	CB	BG2	25.5	40	45		C				
45	CB	BG2	13.3	45	120		C				
46	CB	DG	30.9	60	111	2013.01	S				
47	CB	DG	26.2	55	202		S				
48	CB	DG	24.4	54	73		S				
49	CB	DG	30	68	80	2013.07	P/W				
50	CB	BG2	29.9	55	100	2013.06	P	9	50	2.5	1,125
51	CB	SH	39	45	157	2011.07	P				
52	CB	SH	40.9	45	210		P				
53	CN	GG	37.8	51	160	2013.05	P/W				
54	CN	GG	15.8	51	160	2013.05	W				
55	CN	BG1	19	55	120	2011.04	P/W				
56	CN	BG1	49	55	500	2011.04	P/W/T	4	5	0.9	18
57	CN	BG1	40	55	500	2011.04	W				
58	CN	BG1	28	55	100	2011.04	W				
59	CN	BG1	15	45	130	2012.03	C				
60	CN	DG	30.5	40	480	2011.10	S				
61	CN	DG	32.2	40	450	2011.10	S				
62	CN	DG	20.3	55	190	2011.10	S				
63	CN	DG	15.2	45	190	2011.10	S				
64	CN	DG	22.7	55	200	2014.04	P/W/T				
65	CB	DG	29	63	160	2011.04	P/C	5	1	0.8	4
66	CB	DG	14.5	63	200	2012.04	P/C	5	8	3	120
67	CB	PP	35	63	120	2009.10	P/W	9	14	4	504
68	CB	AT		63		2008.07	P				
69	CB	PR	22	55	200	2010.03	S	15	30	2	900
70	CB	SC	44	51	100	2010.06	W				0
71	CB	QP	33	63	80	2010.07	C	9	15	2.2	297
72	CN	SC	31	40	120	2011.06	S				
73	CB	SH	39	45	157	2011.07	P	11	10	1.3	143
74	CB	PP	30	60	280	2011.09	P/W	14	15	2.3	483
75	CB	PR	41.5	55	200	2011.09	P/C	40	60	4	9,600
76	CB	BG2	19.3	63	180	2013.05	C				
77	CB	DG	30	68	80	2013.07	P/W				
78	CB	DG	16.5	51	60	2013.02	P/C	6	30	1.5	270
79	CB	DG	19.1	40	127	2013.08	C	18	22	1.8	712.8

*Where, CB=Chungbuk, CN=Chungnam, P=Plane failure, W=Wedge failure, T=Toppling failure, C=Complex failure, S=Surface failure, DG=Daebo granite, BG1=Banded gneiss, BG2=Biotite gneiss, GG=Granite gneiss, PR=Phyllite rock, PP=Pebllic phyllite, SH=Shale, CS=Calcareous slate, SC=Schist, QP=Quartz porphyry, AT=Andesite tuff

은 Table 2와 같다.

비탈면의 제원은 파괴부의 안전성에 영향을 미치는 높이와 경사, 길이를 측정하고 파괴유형은 평면형과 썰기형, 전도형, 낙석으로 구분할 수 있으며 파괴부의 너비(Wr), 길이(Lr), 깊이(Dr)를 측정하여 파괴량을 산정하였다.

붕괴가 발생된 비탈면이 속해 있는 지역의 암종 분포는 충북지역의 경우 화강암지역이 58%, 변성암지역이 37% 정도를 차지하고 있으며, 충남지역은 화강암지역이 18%, 변성암지역이 55% 정도를 차지하며 퇴적암지역도 27%에 달하는 것으로 나타났다.

시공 중 붕괴가 발생된 비탈면의 기하학적인 현황을 분석해 본 결과 Table 2와 같이 붕괴 비탈면의 연장은 45~500m (평균 189m)로 다양하게 나타났으며, 50~200m 구간에 대부분이 포함되는 양상을 보이고 있다. 또한 붕괴 비탈면의 높이는 13~60m(평균 29.7m)로 넓게 분포하고 있으며, 20~30m 구간에 가장 많이 포함되어 있으나 특별한 상관성을 보이고 있지는 않은 것으로 나타났다.

붕괴 비탈면의 경사는 37~80°(평균 54°)로 Table 3과 같이 대부분의 붕괴 비탈면이 46~55° 구간에 50% 이상이 속해 있으며, 저각 비탈면에서도 약 19%의 파괴비율을 보여 시공 중 비탈면 경사와 안정성이 결정적인 관계를 보이는 것은 아님을 알 수 있다. 따라서 Baek et al.(2005)의 연구결과와 같이 급경사를 모든 붕괴의 주요 원인으로 단정할 수 없으며 동시에 비탈면의 경사완화만으로 다양한 비탈면 붕괴를 방지할 수 없다는 것을 확인하였다.

붕괴 비탈면은 NE 방향성을 가진 경우가 15개소, SE 방향성이 8개소로 SW 방향성이 12개소, NW 방향성이 18개소로 나타났으며, 충북지역에서 북향의 사면이 26개소, 남향이 16개소이고 충남지역은 북향의 사면이 7개소, 남향이 4개소로 두 지역 모두 북향이 약 60%를 보여 유사한 경향을

나타내었다. 또한 대부분의 비탈면이 1~8단의 소단이 시공되거나 시공 중에 있어 소단의 설치가 모든 파괴를 억지하거나 방지할 수는 없음을 알 수 있고 더욱이 많은 붕괴에서 파괴가 소단부에서 진행되고 있는 것으로 나타나 시공 중 소단부의 거동을 통해 파괴징후나 안정성을 유추할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 암종 별 파괴유형

Table 2에 주어진 바와 같이 붕괴가 발생한 비탈면은 화성암이 38개소(45%), 변성암이 32개소(43%), 퇴적암이 9개소(12%)인 것으로 조사되었다. 화성암의 경우 평면파괴와 평면/썰기 복합파괴가 전체의 51%를 차지하고 원형파괴와 표층 붕락이 각각 16%, 27% 정도를 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

조사분석 결과, 화성암 사면의 붕괴는 대부분이 절리의 교호로 인해 유발되고 그다음으로 암반의 풍화나 이완으로 인한 붕락이 주된 원인인 것으로 판단된다. 변성암은 평면파괴와 평면/썰기 복합파괴가 전체의 50%를 차지하고 표층 붕락이 28%로 화성암과 유사한 비율을 보이고 있으나 상대적으로 원호파괴 유형은 적은 것으로 나타났다. 변성암에서의 파괴는 절리를 제외하면 지질학적 성인이 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 퇴적암 지역은 대부분 평면파괴 유형을 보이는 것으로 나타나 세일 등의 암종의 형성조건에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 3과 같이 화성암의 경우(Rock type 1) 지각작용으로 인해 생성된 절리군이 다양한 파괴유형을 나타내며 붕괴가 발생하는 양상을 보인 반면, 변성암류(Rock type 2)는 천매암 등의 구조절리 영향으로 평면파괴 가능성이 크게 나타나고 있다. 또한 충청지역의 퇴적암(Rock type 3)은 변성암과 교호하며 발달해 있고 대부분 표층부에 세일이 발달해 있는

Table 3. Distribution of geometric factors

Length (m)	Collapsed cut slope		Height (m)	Collapsed cut slope		Slope angle (°)	Collapsed cut slope	
	No. of sites	Percentage (%)		No. of sites	Percentage (%)		No. of sites	Percentage (%)
0~50	2	2.5	0~10	0	0	~40	7	8.9
51~100	19	24.1	11~20	14	17.7	41~45	12	15.2
101~150	13	16.5	21~30	31	39.2	46~55	40	50.6
151~200	26	32.9	31~40	24	30.4	56~63	17	21.5
201~250	6	7.6	41~50	9	11.4	64~73	2	2.5
251~300	3	3.8	51~	1	1.3	74~	1	1.3
301~350	3	3.8						
351~400	2	2.5						
401~	5	6.3						
Total	79	100	Total	79	100	Total	79	100
Average	188.8 m		Average	29.7 m		Average	54.0°	

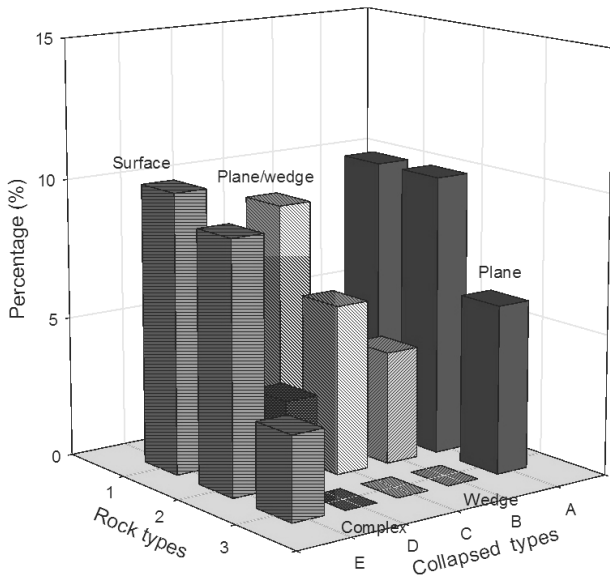


Fig. 3. Collapsed types related to rock types

것으로 조사되었다. 이러한 세일의 생성요인은 저각에서의 대규모 파괴를 유발하기도 하며 본 현장에서도 유사한 경향을 확인할 수 있다.

지역별로는 Fig. 4에 보여지는 바와 같이 충북지역은 화성암과 변성암 비탈면의 붕괴가 각각 58%, 37%를 차지한 반면 충남지역은 변성암 비탈면이 50%, 퇴적암, 화성암 비탈면이 각각 27%와 23%를 차지하여 확연한 지역별 붕괴 특성을 나타내는 것으로 분석되었다. 또한 충북지역은 평면(Collapsed type A)이나 평면/썩기파괴(Collapsed type C)가 약 70%를 차지하고 있으며, 충남지역은 73%로 나타나 대체적으로 유사한 파괴경향을 보이고 있다. 이것은 충북지역의 경우 화성암의 절리특성이나 천매암의 지질 특성에 영향을 크게 받고 있으며, 충남지역은 편마암계의 암반이 세일층과 교호하는 지역에서 붕괴가 많이 발생되고 있는 것으로 분석되었다.

충북권역은 평면형 붕괴와 표층 붕락이 두드러지는 것으로 분석되었고 이러한 경향은 다절리로 인한 블록화와 천매암 지역의 엽리발달이 주요 원인인 것으로 나타났다. 반면 충남권역은 충북권에 비해 평면이나 다절리 교호로 인한 원호형 붕괴가 적으나 표층부의 붕락이나 유실이 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 충북에 비해 퇴적암 비탈면에서 두드러지는 것으로 나타났다.

3.3 파괴유발 인자 분석

일반적으로 비탈면의 파괴를 유발하는 인자는 내적 요인(지질 등)과 외적 요인(강우, 지진 등)으로 나눌 수 있으며 시간에 따른 변화도 그 원인이 될 수 있다. 그러나 시공 중인

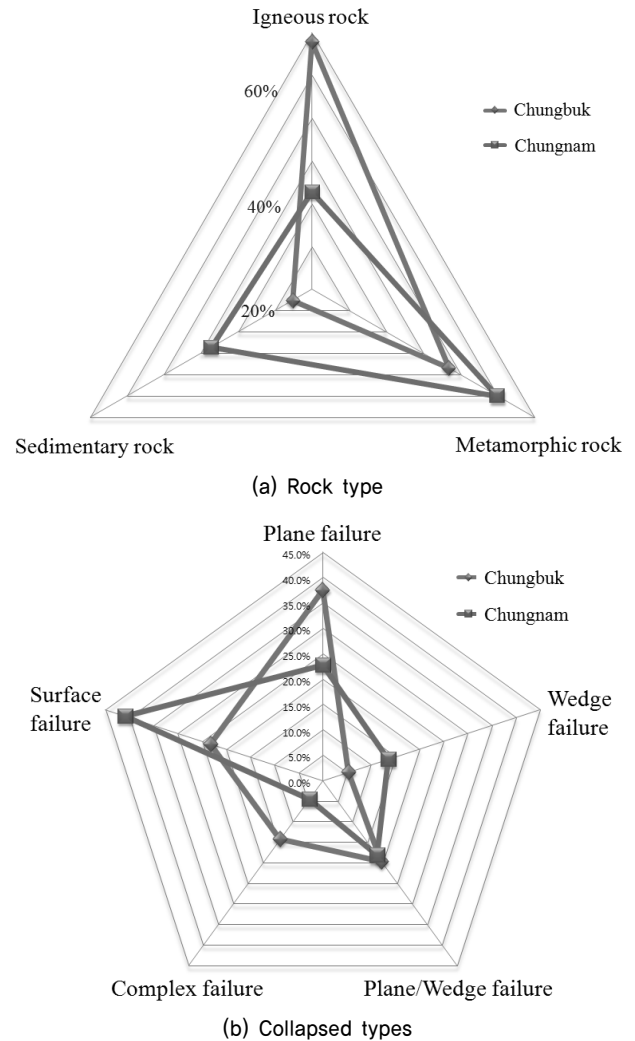


Fig. 4. Weights of regional characteristics for collapse slope

경우 공용 후와 달리 안정화가 이루어지지 못해 상이한 결과를 나타낼 수 있어 다음과 같이 붕괴 특성을 분석하였다.

파괴가 발생된 비탈면의 파괴시점에 대해 분석을 수행한 결과, 건기이며 해빙기인 12~3월에 붕괴가 발생된 경우는 총 16건으로 23%에 해당되며 4~5월에도 19건, 27%로 조사되었고 우기이며 태풍의 영향을 받는 6~9월에 34건으로 50%를 차지하는 것으로 나타났다.

충북지역은 55개소 중 29개소가 우기에 붕괴되었으며, 충남지역은 25개소 중 5개소가 우기에 붕괴되어 파괴를 유발하는 주요요인이 발달한 절리로 침투되는 우수 등으로 인한 간극수압의 증가나 스웰링 등의 영향을 많이 받고 있는 반면 충남지역은 단층, 습곡, 탄질 세일 등 지질학적 약면의 발달이 큰 영향을 미쳐 다소 상이한 붕괴 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 파괴사면의 주된 파괴인자의 기중값을 지역별로 분석한 것으로 충북지역의 경우 다방향 절리의 교호로 인한 파괴(53%)가 주를 이루고 풍화로 인한 붕락(25%)과 더불어

대부분의 붕괴를 유발한 것으로 조사되었으며, 충남지역도 발달된 절리(55%)가 주요요인이나 지질학적 성인(36%)도 상당한 영향을 미치는 것으로 나타나 지역의 지질학적, 기후적, 환경적 특성이 비탈면의 안정에 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Kim et al.(2008)은 붕괴가 발생된 약 300여 개소 공용 중인 절토 비탈면의 현장조사 자료를 근거로 절토 비탈면의 붕괴 요인을 분석하여 붕괴 요인을 파쇄대, 나무의 기울어짐, 절토사면 상부 측구배수로의 손상 등은 풍화로도, 지표수 집중유출 등은 지하수로, 절토사면 하부손상 등은 암석의 결로 대표 시켜 크게 3개 요인으로 대분하였다. 이러한 결과는 발달된 절리와 지질 구조적 원인, 풍화로 대별되는 Fig. 5의 파괴인자 가중치 분석결과와도 상당 부분 일치하는 것으로 시공 중이거나 공용 중인 비탈면에서의 붕괴가 상호 유사성을 가지고 있음을 알 수 있다. 단 시공 중인 비탈면의 경우 적극적인 표면보호공이 부재하므로 풍화속도를 늦추거나 유입수를 차단하는 등의 붕괴원인에 대한 저항이 약해 좀 더 파괴에 민감할 수 있는 특징을 예상할 수 있을 것이다.

또한 지질 구조적인 원인이나 지역적인 특성이 붕괴규모에 미치는 영향을 평가하기 위해 파괴의 규모를 파괴면의 너비, 길이, 깊이로 정의하고 그 크기를 측정하여 부피를 예상하고 비교하였다. 조사결과 붕괴부의 길이(Lr)는 4~40m 범위로 평균 13.7m를 보였으며, 너비(Wr)는 1~80m(평균 25.4m)로 다양한 규모를 보였고 파괴면의 깊이(Dr)는 0.5~15m(평균 2.3m)를 보였다. 비탈면의 붕괴규모는 Fig. 6과 같이 탈락 수준의 소규모가 전체 붕괴의 67%를 차지하고 중규모가 25%, 대규모가 7%를 차지하는 등 다양한 규모를 나타내고 있다. 이러한 경향은 시공 중인 경우 비탈면의 붕괴가 전면적으로 발생하기 전 소규모 붕괴 시점에서 확인조사나 정밀검토가 이루어지므로 상대적으로 중대규모의 비

율이 작게 나타나는 것으로 판단된다.

붕괴 시점과 주변현황을 고려한 분석결과, 충북지역은 화강암의 풍화가 발달한 지역과 저각의 천매암이 발달한 지역에서 6~9월의 우기에 대규모의 붕괴(9%)가 발생하고 있는 것으로 분석되었으며, 충남지역은 지질학적 약대가 분포한 지역에서 우기에 대규모 붕괴(8%)가 발생한 것으로 나타났다.

본 연구에 대상이 된 비탈면은 시공이 완료되지 않고 비탈면 보호공법이 제대로 역할을 수행하지 못하는 조건이므로 분석결과 절대적으로 강우에 의해 붕괴가 좌우되고 있음을 알 수 있다. 단 시공 중 비탈면이므로 우기에 노출되는 정도가 달라 강우와 절대적으로 비례하지는 않으며, 1차 붕괴 후 행정절차로 인해 장기간 파괴부가 노출되는 경우 2, 3차의 붕괴로 이어지는 사례가 많으므로 이에 따라 조속하고 단순화된 행정절차의 정비도 시공 중 파괴를 막을 수 있는 필수 요건으로 판단된다.

3.4 비탈면의 보강설계

본 연구에서는 유사지역에서의 설계나 안정검토 시 활용할 수 있는 자료를 정리하고 그 특성을 분석하기 위해 붕괴 비탈면의 설계자료를 수집하였으며, 안정해석 시 붕괴 비탈면 중 24개소는 실시설계 값을 그대로 적용하고 18개소에서는 파괴부의 지표지질조사 결과를 활용하여 역해석을 수행하였다. 또한 14개소는 기존의 경험식, 현장실험 결과를 활용하는 방법을 선택하여 해석을 수행하였다.

분석결과, Table 4와 같이 파괴가 발생하지 않은 암반에 대해서는 33~40°의 내부마찰각과 20~200kPa까지 광범위한 분포를 보이고 있으며, 파괴를 유발하는 불연속면에 대해서는 5~30kPa까지 일정 범위 내의 값이 사용되어지고 있는 것으로 나타났다. 설계 정수의 결정은 주절리면의 붕

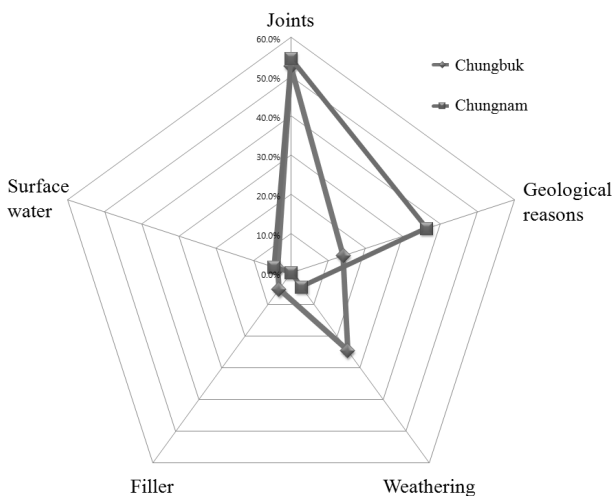


Fig. 5. Weights of collapse factors

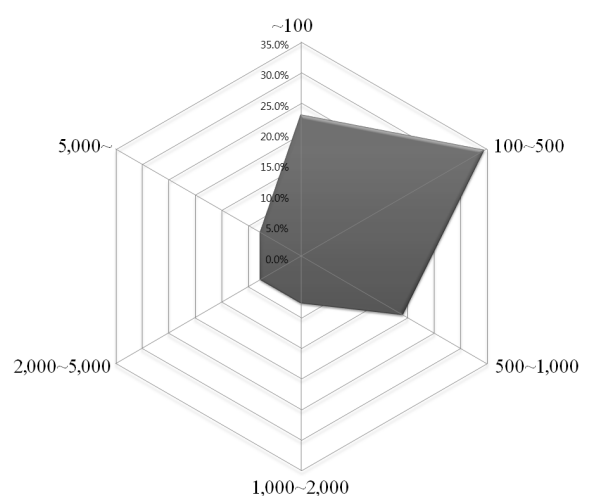


Fig. 6. Distribution of collapse volumn for slope (unit : m³)

Table 4. Parameters using slope stability analysis

Method	Region	Bedrock			Discontinuous plane	
		Unit weight (kN/m ³)	Friction angle (°)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Cohesion (kPa)
Enforcement design	CB	25	33~35	100~150	26	10~20
	CN	23~25	35~40	60~150	27~32.2	20~30
Backanalysis	CB	23~25	35	80~100	21~31	5~30
	CN	22	35	20~30	27	10~15
Bibliographic data	CB	24~25	34~38	100~200	27~32	10~15
	CN	22	35	20~30	27	10~20

과 여부와 시추시행 여부, 실시설계조건 등 현장의 여건에 따라 다양성이 존재하므로 여건에 부합되는 적절한 방법을 결정하는 것이 합리적으로 판단된다.

불안정성이 확인된 비탈면에 대해서는 보강해석이 수행되었으며, 해석방법은 한계 평행해석기법을 이용한 원호와 비원호해석으로 수행되었다. 기 붕괴가 발생된 암반사면의 경우 비원호해석을 통한 해석결과는 현장과 부합되는 결과를 확인하였으며, 해석결과 대부분의 비탈면이 건기 시 평균 1.568(기준안전율 이하 45%), 우기 시 평균 1.06(기준안전율 이하 54%)으로 건기 시에는 비교적 기준안전율을 만족하고 있으나 우기 시 많은 비탈면이 안정성을 확보하지 못하는 경향을 보이고 있다. 실제 파괴 비탈면의 붕괴 시점도 우수와 관련된 경우가 많아 이를 뒷받침 해주고 있다.

기준안전율을 만족하지 못하는 경우에 적용된 안정대책은 Rock anchor 공법이 49%를 차지하고 있으며, Soil nailing과 경사완화가 각각 27%, 20% 정도를 보이고 있다. 지역별로는 충북의 경우 Rock anchor 공법의 비율이 58%에 달하며 충남지역은 Soiling nailing과 경사완화가 각각 35%로 비슷한 비율을 보여 파괴유형이나 지질 및 풍화조건의 영향이 반영된 것으로 판단된다. 이상의 설계 정수 및 안정해석, 보강대책 적용 결과는 유사지역의 설계 및 시공계획 수립 시 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결 론

본 연구에서는 충청지역을 대상으로 공용 중인 아닌 시공 중 또는 시공 직후의 비탈면에서 붕괴가 발생한 79개소를 대상으로 정밀조사를 수행하고 그 결과를 분석하였다.

(1) 분석결과, 충북지역은 화성암과 변성암 비탈면의 붕괴가 각각 58%, 37%를 차지하고 다절리로 인한 블록화와 발달된 엽리구조에 의한 평면형 붕괴가 두드러지며 반면 충남지역은 변성암 비탈면이 50%, 퇴적암, 화성암 비탈면이 각각 27%와 23%를 차지하고 층복권에 비해

평면형 붕괴가 대다수이나 퇴적암 비탈면의 대규모 붕괴가 특징인 것으로 나타나 확연한 지역별 붕괴 특성을 나타내었다.

- (2) 대부분의 붕괴 비탈면 경사가 46~55° 구간에 50% 이상이 속해 있으며, 저각비탈면에서도 약 19%의 파괴비율을 보여 시공 중 비탈면 경사와 안정성이 결정적인 관계를 보이는 것은 아님을 알 수 있으며, 이는 지질학적 성인에 기인하고 있는 것으로 판단된다.
- (3) 붕괴 시점과 주변현황을 고려한 분석결과, 층복권은 화강암의 풍화가 발달한 지역과 저각의 천매암이 발달한 지역에서 6~9월의 우기에 대규모의 붕괴가 발생하고 있는 것으로 분석되었으며, 층남권은 지질학적 약대가 분포한 지역에서 우기에 대규모 붕괴가 발생한 것으로 나타났다.
- (4) 시공 중이거나 시공 직후인 비탈면은 노두면의 보호가 이루어지지 않거나 안정화되지 않은 상황에서 다양한 외부요인에 노출되고 저항성이 낮으므로 지역의 지질학적, 기후적, 환경적 특성이 비탈면의 안정에 영향을 미치며 잦은 소규모 파괴가 대규모 파괴로 진행되는 경우가 빈번한 것으로 분석되었다.

향후 공용 중인 비탈면의 안정화 절차와 같은 시공 중 비탈면에 대한 기술적 또는 행정적인 관리대책안의 수립이 필요하며 본 연구가 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 세명대학교 지원에 의해 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

1. Baek, Y., Kwon, O. I., Kim, S. H. and Koo, H. B. (2005),

- Characteristics of slope failure due to local downpour and slope stability analysis with changing soil depth and groundwater level, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 15, No. 1, pp. 57~66 (in Korean).
2. Hoek, E. and Bray, J. W. (1981), *Rock slope engineering*, Revised 3rd edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 1~351.
 3. Jung, K. W., Park, S. J. and Lee, C. W. (2008), Development of the score table for prediction of landslide hazard-a case study of gyeongsanbuk-do province, *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 97, No. 3, pp. 332~339 (in Korean).
 4. Kim, G. Y. (2002), A study on the slope failures and appropriate countermeasures in Korea, Master's thesis, University of Yonsei, pp. 1~96 (in Korean).
 5. Kim, J. H., Koo, H. B., Rhee, J. H. and Yoon, C. J. (2008), Study on danger cut slopes distribution area based on inventory data in chungcheongdo, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 18, No. 1, pp. 37~44 (in Korean).
 6. Kim, Y. M. and Jung, S. W. (2000), A study on the rainfall-triggered landslides in taijon-chungnam area, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C*, Vol. 20, No. 4, pp. 341-355 (in Korean).
 7. Korean Geotechnical Society (2009), *Geology and rock mechanics for geotechnical engineering*, CIR, Seoul, pp. 1~49 (in Korean).
 8. Yoo, B. O. (2002), Assumption of shear strength on failed discontinuities due to back analysis, *The proceeding of Korean Geotechnical Society*, pp. 213~227 (in Korean).
 9. Yun, H. S., Lee, J. Y., Yang, D. Y. and Hong, S. S. (2007), Areal distribution ratio of rock types with geologic ages in the gyeonggi-seoul-incheon areas, *The Journal of Patrological Society of Korea*, Vol. 16, No. 4, pp. 208~216 (in Korean).
 10. Yun, H. S., Lee, J. Y., Yang, D. Y. and Hong, S. S. (2008), Areal distribution ratios of the constituent rocks with the geologic ages and rock types in the chungbug-chungnam-daejeon areas, *The Journal of Patrological Society of Korea*, Vol. 17, No. 4, pp. 191~205 (in Korean).