

## 단층대가 발달한 사면의 보강대책에 관한 사례 연구 A Case Study on Reinforcement of Cut Slope with Fault Zone

김정호<sup>1)3)</sup>, Jeong-Ho Kim, 박춘식<sup>2)</sup>, Choon-Sik Park, 김태성<sup>3)</sup>, Tae-Sung Kim,

<sup>1)</sup> 국립창원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Changwon

<sup>2)</sup> 국립창원대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Changwon

<sup>3)</sup> 한국농촌공사 창녕지사 지역개발팀 차장, Manager, Community Development Team, Changnyeong office, Korea Rural Community & Agriculture Corporation

**SYNOPSIS** : From the result of precise field investigation and stability analysis for the cut slope, following results were acquired.

1. The cause of the collapse of cut slope came from circle sliding collapse by fault zone which remained inner weathering zone.
2. The existing destructed soil and rock can be removed by reinforcement. And to prevent the additional destruction, it is judged that applying the method after relaxing the slope would be reasonable.
3. To make cut slope stable, soft rock layer should be done cutting 1:1.5 and 1:2.0 ~ 1:2.5 for weathered rock and soil layer.
4. Heavy water leakage section should be applied horizontal drain method so that water pressure should not act to the cut slope.

**Key words** : collapse of cut slope, circle sliding collapse, heavy water leakage section, horizontal drain method, fault zone

### 1. 서 론

사면안정에 있어서 과거에는 단순히 흙과 암반의 분류로 안정공법을 적용시켜 토목공사에 적용을 시켰지만, 최근에는 불균질하고 복잡한 지반을 다양한 지질학적 특성연구를 통해 토목공사에 반영을 하고 있다. 일반적으로 사면파괴의 발생원인은 내적요인과 외적요인의 두가지로 크게 나눌 수 있다. 내적인 요인으로는 지질, 토질, 지질구조, 지형 등의 취약성과 같은 잠재적 취약요인을 열거할 수 있고, 외적인 요인으로는 강우, 응설, 지하수, 하천해안의 침식, 지진 등의 자연적요인과 절토 등과 같은 인위적 요인을 열거할 수 있다. 산사태는 내적요인과 외적요인이 서로 구비되었을 때 발생되기 쉽다. 즉, 내적으로 취약한 구조를 가지고 있는 사면에 강우나 절토 등의 외적인 요인이 가해질 경우 사면파괴는 발생되기 쉽다.

이와 같이 사면활동의 직접적인 원인 분석, 사면 활동 지역의 지질 및 지층의 현황과 특성, 사면의 활동형태 그리고 불연속면의 특성 등을 프로그램 해석을 통해 안정성을 판단하고, 다양한 공법을 적용시켜봄으로써 그 공법을 제대로 이해하고 그 결과를 조사분석하여 유사 붕괴사면의 설계 및 시공 시 참고 자료로 활용되어 신속한 예비조치 및 영구대책이 강구될 수 있도록 하고자하는데 그 목적이 있다.

## 2. 대상 사면의 현황 및 조사

### 2.1 대상 사면의 현황

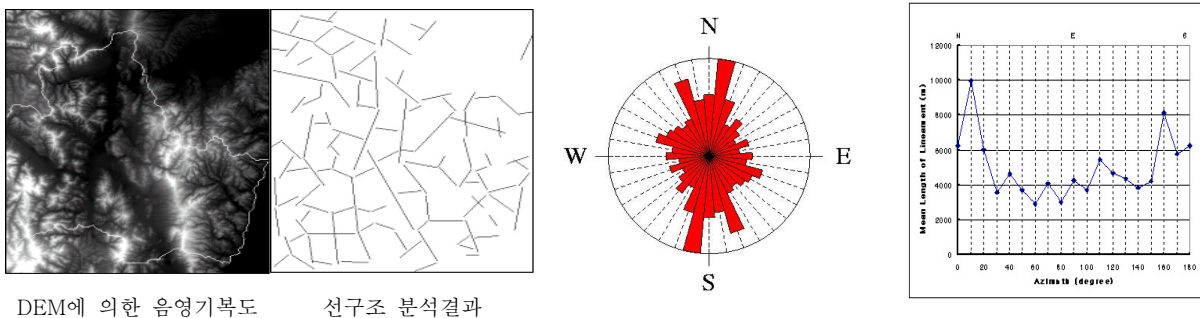
사면의 상당구간이 붕괴되어 대상사면을 구성하고 있는 암석분포는 정확히 확인할 수 없으나 현재 노출된 노두와 붕괴암괴로부터 추정할 때 사암, 역암, 역질사암, 미사암(siltstone), 이암(mudstone)등으로 구성된 것으로 판단되었다.

### 2.2 지표 지질 조사

현장의 지질조사는 지표에 분포된 토질과 암석의 분포양상과 불연속면의 특성분석에 대해 수행된다. 암반분포 구역에 대해서 암종, 풍화정도, 지하수 유출 상태들을 조사한다.

### 2.3 선구조 분석

추출된 선구조는 광역적인 단층/파쇄대의 위치, 발달방향, 길이/밀도를 파악하여 일반지질학적 연구, 광상탐사, 지하수 탐사 또는 댐, 도로 및 터널 등의 구조물계획지점에 대한 지질구조적 취약부를 파악하여 구조물의 최적위치선정, 재해 예측 등과 관련된 보강방안 및 차수대책 수립 등을 위한 설계 기초자료로 활용되고 있다.



DEM에 의한 음영기복도

선구조 분석결과

그림 1. 선구조 분석결과에의 예

## 2.4 분리면의 특성

### 2.4.1 개요

암반에서의 불연속면(discontinuities)은 암반 내에 발달하는 단층(fault), 절리(joint), 틈(crack), 균열(fissure)등을 총칭하는 용어이며, 일반적으로 절리로 표현된다.

### 2.4.2 불연속면의 특성

암반조사 시에 지표 혹은 지하구조물의 안정성에 가장 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단되는 절리 및 단층을 대표적인 불연속면으로 취급하며 현장암반 강도와 함께 불연속면의 방향성(orientation) 및 간격(spacing)의 측정이 필수적이다. 이 외에도 연장성, 간극, 블록의 크기, 충전물, 거칠기, 누수성, 절리의 풍화상태 등을 조사하며 강도정수를 산정하고, RMR값을 구하는데 이용한다.

## 2.5 슈미트해머시험(현장암반강도시험)

슈미트해머 시험은 특정 재료에 일정 재질의 추를 일정 높이에서 낙하시켜 반발로 튀는 높이를 반발경도로 표현하고 이를 측정하는 것이다.

## 3. 사면의 파괴형태 및 안정성 분석방법

### 3.1 사면의 파괴 형태

표 1. 암반사면 붕괴의 형태

붕괴형태		붕괴의 예	
Fails		Rock Fall	
Topples		Rock Topple	
Slides	Rotational Slides	Rock Slump	Few Units
	Translational Slides	Rock Block Slide	
	Translational Slides	Rock Slide	Many Units
Lateral Spreads		Rock Spread	
Flows		Rock Flow	
Complex		Multiple Retrogressive and Successive Slide	

### 3.2 암반사면의 안정해석법

암반사면의 안정해석법에는 평사투영해석법(불연속면이나 절개면과 같은 3차원적인 형태를 2차원적인 평면상에 투영하는 방법)과 한계평형해석법(사면의 안정성은 인장균열의 위치에 따라 두 가지의 경우, 즉 인장균열이 사면의 상부면에 존재하는 경우와 사면의 경사면내에 존재하는 경우를 구분하여 고려되어야 한다.)이 있다.

### 3.3 암반사면 해석시의 강도정수의 결정

R.M.R 분류결과를 이용하여 조사 암반에 대한 암반의 등급뿐만 아니라 암반의 변형계수, 암반의 점착력과 내부마찰각 등 암반의 물리적 성질의 값도 경험식에 의해 유도될 수 있으며 RMR분류법에 의해 분류된 사면의 암반평가 결과를 이용하여 암반의 강도정수는 다음의 상관식을 이용하여 산출할 수 있다.

By R.M.R(Bieniawski)		By R.M.R(Trueman,1988)			
암반의 압축강도 점착력 $C = 5 \text{ RMR (Kpa)}$ 내부마찰각 $\phi = 0.5 \text{ RMR} + 5 (^\circ)$		$\sigma_{rm} = 0.5\exp(0.06\text{RMR}) \text{ (Mpa)}$ $C_{rm} = 0.25\exp(0.05\text{RMR}) \text{ (Mpa)}$ $\phi_{rm} = 0.5 \text{ RMR} + 5 (^\circ)$			
등 급	V	IV	III	II	I
RMR 값	100~81	80~61	60~41	40~21	20~0
점착력(t/m <sup>3</sup> )	<10	10~15	15~20	20~30	30<
내부마찰각	<30	30~35	35~40	40~45	45<

## 4. 사면의 안정해석

### 4.1 사면 붕괴 현황 및 원인

A 구역은 암반의 붕괴구간으로 단층선에 인접한 부분이 10°내외의 완만한 경사를 갖는 층리면과 수직 절리에 의해 사면으로부터 분리되어 1, 2, 3차에 걸쳐 파괴가 발생한 구간이다. 본 구간은 추가붕괴의 가능성이 있으므로 이완된 부분의 절취제거 및 보강이 필요한 구간이다.

### 4.2 암반사면의 사면안정검토

R.M.R 분류결과를 이용하여 조사 암반에 대한 암반의 등급뿐만 아니라 암반의 변형계수, 암반의 점착력과 내부마찰각 등 암반의 물리적 성질의 값도 경험식에 의해 유도될 수 있다.

표 2. RMR을 이용한 강도정수 제안식

적 용 식		제 안 자
$C = 5 \times RMR$	KPa	Bieniawski (1976)
$C = 0.25 \exp(0.05 RMR)$	MPa	Trueman (1988)
$C = 2 \exp(0.08 RMR)$	t/m <sup>2</sup>	김교원 (1993)
$\psi = 0.25 \times RMR + 27.5$	degree	김교원 (1993)
$C = \frac{RMR^{2.2}}{4.5}$	KPa	Stille

표 3. RMR 값 및 강도정수

RMRb	31	
강도정수	C(t/m <sup>2</sup> )	∅(°)
Trueman	120.1	20.5
Bieniawski	15.7	-
Stille	42.8	-
김교원	23.8	35.2
적 용	15.7	20.5

### 4.3 토사사면의 사면안정검토

본 제방의 안정해석을 위하여 사용한 program인 "TALREN"은 한계평형법에 의하여 흙과 암반사면의 파괴에 대한 안전율을 계산한다.

표 4. 강도정수의 적용

구 분		단위중량 γt (t/m <sup>3</sup> )	점착력 C (t/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 ∅ (°)
실내 시험	BH-1	1.7	1.36	22.7
	BH-2	1.8	1.67	23.6
역 해 석		1.8	0.05	20.5
적용강도정수		1.8	0.74	20.5

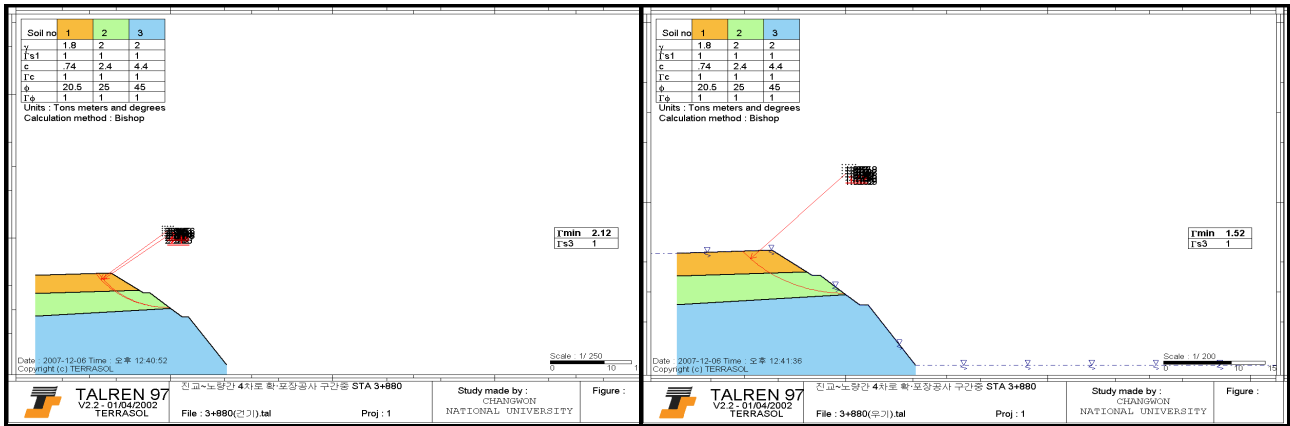


그림 2. STA.3+ 880 사면안정해석결과(건기)

그림 3. STA. 3+ 880 사면안정해석결과(우기)

표 5. 보강 전 사면안정해석검토결과

단면	안전율		비고
	건기	우기	
STA. 3+ 880	2.12	1.52	O.K
STA. 3+ 900	1.42	0.86	N.G
STA. 3+ 920	1.36	0.83	N.G
STA. 3+ 940	1.52	0.93	N.G
STA. 3+ 960	1.33	1.01	N.G
STA. 3+ 980	1.26	0.74	N.G
STA. 4+ 000	3.42	2.78	O.K

## 5. 사면의 안정대책 공법

### 5.1 설계일반

비탈면 붕괴의 원인으로서는 지질구조, 지질, 토질 등이 있으며, 직접적인 원인에는 강우, 융설, 지진, 절토, 성토 등이 있다. 비탈면의 안정의 검토 이외로 자연 사면을 포함한 전체로서의 사면 안정의 검토가 필요하다.

### 5.2 사면안정 공법의 분류

사면안정공법은 안전율 유지법(억제공)과 안전율 증가법(억지공)으로 구분된다.

- 안전율 유지법 : 강우, 융설수의 침투나 비탈면의 풍화라는 붕괴요인을 제거하여 사면 안전율이 감소하는 것을 방지하는 방법(일시적)
- 안전율 증가법 : 불안정하게 판단되는 사면의 안전율을 구조물 공(말뚝, 앵커 등)의 저항력을 이용하여 사면안전율을 증가시키는 방법(반영구적)

### 5.3 사면안정공법의 개요

사면의 표면보호공법으로는 배수공법, 식생공법, 피복공법, 뽕기공법, 붙임공법, 격자틀공법 등이 있으

며, 사면의 보강공법으로는 압성토 공법, 옹벽공법, 보강토 공법, 활동방지 말뚝공법, 앵커공법, 소일네일링공법 등이 있다.

### 5.4 배수공

산사태지나 사면 등에 있어서의 물의 영향은 대단히 크다. 그것은 지반의 강도를 저하시켜서 땅사태의 활동을 촉진한다. 그러므로 이 원인이 되는 물이 지하에 침투되지 않도록 하는 방법으로서 지하로부터 배제하는 방법이 취해진다. 전자를 지표수 배제공, 후자를 지하수 배제공으로 한다.

### 5.5 사면의 안정대책 수립

STA.3+ 880구간은 원호활동검토에 의한 안전율은 만족하였으나, STA. 3+ 900~STA. 3+ 980구간의 구배조정에 따라서 사면의 구배를 조정하여야한다.

그리고 STA. 4+ 000구간은 원호활동검토에 의한 안전율은 만족하였으나 풍화암층에서 파괴로 인한 인장균열이 발견되어 원호활동검토 결과에 상관없이 구배조정을 하여야하는 것으로 판단된다. 따라서, 각 단면에 대한 보강방안을 정리하여 대표단면을 다음에 나타내었다. 보강 후 사면안정해석은 그림 4.와 그림 5., 표 6.에 나타내었다.

표 6. 사면 보강대책방안

단 면	사면 구배		구배선정
	종횡비	수직비	
STA. 3+ 880	풍화암 및 토사층	1:2.0	타 구간 구배에 따른 조정
	연암층	1:0.7	
STA. 3+ 900	풍화암 및 토사층	1:2.5	절토법면 유실부 제거
	연암층	1:0.7	
STA. 3+ 920	풍화암 및 토사층	1:2.5	절토법면 유실부 제거
	연암층	1:1.5, 1:2.5	
STA. 3+ 940	풍화암 및 토사층	1:2.0	절토법면 유실부 제거
	연암층	1:2.0	
STA. 3+ 960	풍화암 및 토사층	1:2.0	절토법면 유실부 제거
	연암층	1:1.8, 1: 2.0	
STA. 3+ 980	풍화암 및 토사층	1:2.0	절토법면 유실부 제거 , 인장균열제거
	연암층	1:1.8, 1:2.0	
STA. 4+ 000	풍화암 및 토사층	1:2.0	인장균열 제거
	연암층	1:1.5, 1:2.0	

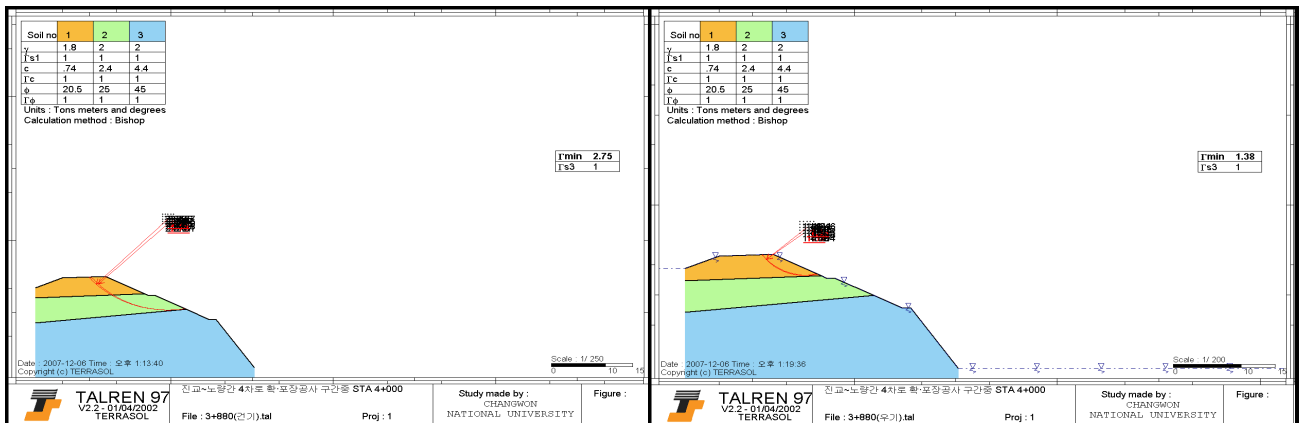


그림 4. STA.3+ 880 사면안정해석결과(건기)

그림 5. STA. 3+ 880 사면안정해석결과(우기)

표 7. 보강 후 사면안정해석 결과

단면	안전율		비고
	건기	우기	
STA. 3+ 880	2.75	1.38	O.K
STA. 3+ 900	3.79	2.88	O.K
STA. 3+ 920	1.91	1.2	O.K
STA. 3+ 940	1.88	1.21	O.K
STA. 3+ 960	2.13	1.49	O.K
STA. 3+ 980	3.03	2.39	O.K
STA. 4+ 000	3.26	1.93	O.K

## 6. 결론

현장 조사 결과 A, B 구역에서 사면파괴가 발생하였으며, A 구역은 최근 붕괴가 다시 발생하였고, C,D구역에 단층파쇄대가 위치하여 소규모의 사면붕괴가 예상되는 것으로 판단된다.

따라서 본 대상사면에 대해 정밀한 현장조사 및 안정성 검토를 실시하여 장기적인 안정성을 확보할 수 있는 보강대책을 수립하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

### 6.1 지형 및 지질

본지역은 전술한 바와 같이 하산동층의 자색세일과 담회색~회백색의 사암이 호층을 이루며, 수조의 단층에 의해 지층은 측면으로 단속되어 분포한다.

기반암 상부는 풍화대(풍화토 및 풍화암) 및 표토가 분포하며, 사면을 횡단하거나 사교하는 수조의 단층이 발달한다. 단층에 의해 지층이 전이되고 파쇄 및 변질대를 수반한다.

풍화대중 사암의 풍화대는 모래층으로, 세일의 풍화대는 점토층으로 분포하며, 사암이 세일에 비하여 풍화에 대한 저항도가 크다.

### 6.2 불연속면의 특성

본 지역의 주요 불연속면은 1조의 층리와 2조의 주절리군이 발달한다. 단층면 내에는 점토가 협재되며, 절리면은 충전물이 발달되지 않거나 철산화물이 피막되었으며, 경암의 풍화도는 약간풍화 연암의 풍화도는 보통풍화, 풍화암의 풍화도는 심한풍화의 상태이다.

### 6.3 사면현황 및 붕괴원인

본 과업의 주요 대상 사면은 길이 약 260m, 최대사면고 22m의 복합사면이며, A, B 구역은 3차, 2차에 걸쳐 사면파괴 발생하였으며 그 내용은 다음 표와 같다.

표 8. 구역에 따른 사면구성과 붕괴원인

구분	붕괴위치	규모	사면구성	붕괴원인
A구역	3+ 950~3+ 970	L=20m, H=10m	암반	단층면에 인접한 암반구간의 붕락
B구역	3+ 900~3+ 950	L=50m, H=15m	토사	풍화대 내에 잔존된 단층에 의한 균열+ 원호활동파괴
C구역	3+ 860 부근	L=5m, H=15m	암반 및 토사	단층파쇄대
D구역	3+ 840 부근	L=3m, H=15m	암반 및 토사	단층파쇄대

연암인 세일과 경암인 사암의 경계부에서 주로 누수가 진행중이며, 풍화토~풍화암의 경계부에서도 누수진행 중이다.

## 6.4 사면의 안정대책

현장조사 결과에 의하면, 본 사면의 파괴예상 구간은 크게 4영역으로 구분된다. STA. 3+880~STA. 4+000 구간에서 2차레('07.7.28 및 '07.8.28)에 걸쳐 사면파괴가 발생하였으며, STA. 3+960~STA.4+000 구간은 최근('07.10.31) 붕괴가 다시 발생하였다. 이와는 별도로 STA. 3+840~STA. 860구간의 2개소에 단층파쇄대가 위치하여 소규모의 사면붕괴의 우려가 있다. 그리고 A, B구역에는 사면파괴로 인한 인장균열에 의한 추가사면파괴가 예상된다. 따라서 안정대책공법 중 기존에 파괴가 일어난 토사나 암괴를 제거할 수 있고 추가 파괴를 예방하기 위하여 절토공법으로 구배완화를 하는 것이 타당하다고 판단된다.

## 6.5 추가 보완대책

1. 보강단면에 표시된 암반층과 절토법면유실부는 추정선이기 때문에 시공 중 변경상황이 발생할 가능성이 있다. 따라서 이러한 경우 의지식 옹벽(계단식 옹벽), 계비온 옹벽 등의 구조물설치가 필요할 수도 있다. 따라서 이러한 판단은 향후 사면완화과정을 지켜보면서 판단하여야 한다고 사료된다.

2. 누수가 심하게 일어나는 STA. 3+860~STA 3+944 구간까지 연암인 세일과 경암인 사암의 경계부에서 주로 누수가 진행 중이며, 풍화토~풍화암의 경계부에서도 누수가 진행되고 있으므로 수평배수공의 설치가 필요한 것으로 판단된다. 따라서, 본과업에서는 수평배수공의 간격은 2m×2m이며, 총 개수는 98공이며, 시공깊이는 12m로 결정하였으나 시공 시 필요한 경우 시공깊이, 간격 및 개소수를 적절히 조절하여야 한다.

## 참고문헌

1. 김교원, “지공학적 암반분류의 재평가” 한국과학기술정보연구원, 1993
2. 김상규 외 1인, “우리나라에서의 사면 안정화 대책공법” 사면안정학술발표회, 1997
3. 김태성, “수직단층대가 발달한 사면의 붕괴 및 보강대책에 관한 사례연구” 석사학위논문, 창원대학교, 2008
4. 구호본 외 2인, “붕적토 사면의 안정성 해석과 보강대책에 관한 연구” 한국 지반공학회 논문집, 2000
5. 양종훈, “지하수위가 높은 절토사면의 안정성에 관한 연구”, 공학석사 학위논문, 동아대학교, 1999
6. 박춘식, 장정옥 共譯, “토질역학”, 엔지니어즈, 1999
7. Braja M.Das 저, 신은철 역 “토질역학”, 구미서관, 1999
8. Bieniawski, Z. T, "The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications." Proc. 4th Int. Congr. Rock Mesh. ISRM, Montreux, 1979
9. Stille H, "Experiences of design of large caverns in Sweden." Proc. International Symposium on Large Rock Carverns. ISRM. Helsinki, 1986
10. Trueman, R., "An evaluation of strata support techniques in duel life gateroads" Ph.D. Thesis, University of Wales, Cardiff, 1988