

## 바쿰 가배수로 터널의 최적지보설계

지왕률<sup>1)</sup> · 유인항<sup>2)</sup>

### Rock Support Design of Bakun Tunnelling Project in Sarawak, Malaysia

Wang-Ruel Jee and In-Hang Yoo

**ABSTRACT** Ongoing huge Bakun Hydropower project is including the construction of a 210 m height hydroelectric rockfill dam with an installed capacity of 2,520 MW and a power transmission system connecting to the existing networks between Sarawak and peninsula Malaysia. In order to allow the main dam construction during the dry season, the Ballui river will have to be detoured through 3 concrete lined diversion tunnels with an internal diameter of 12 m and a length of 1,400 m each. The geology of Bakun site belongs to the several thousand meters thick Belaga formation deposited from the late Cretaceous to the early Tertiary in the Northwest Borneo geosyncline. The orientation of the bedding plane, strike at N55°E to N70°E and dip at 50°SE to 70°SE, is developed uniformly in Bakun sedimentary rocks. Rock mechanical characteristics of Bakun site have been classified into 4 rock mass types(RMT) depending on the degree of weathering and the occurrence of rock jointing with RMR. Graywacke(Sandstone) as well as Shale can take place together in the same rock mass type if their rock mass properties are similar. It was summarized the rock support type and support system design of underground diversion tunnels in view of rock mechanics.

**Key words** : diversion tunnel, rock classification system, rock support design

**초 록** 바쿰 수력발전 공사계획은 대형댐과 2,520 MW 출력량의 수력발전소를 건설하는 대형 터키 프로젝트이며 현재는 발전댐 건설에 앞서 3개의 가배수 터널이 시공중에 있다. 바쿰지역은 유기물 함량이 높아 쉽게 부서지는 퇴적지층으로 이러한 열대우림지역에서 가배수로 터널의 지보설계를 위해 전체적인 암층단위를 공학적인 목적과 역학적 거동양상을 토대로 주도적인 압중에 따라 분류하였다. 또한 이러한 암층단위를 기준으로 풍화정도와 절리의 빈도 및 특성을 고려하여 다시 4개의 암반유형으로 분류하였고 또한 가배수로 터널의 특성과 현지의 지반특성을 고려하여 지반내 swelling 광물의 존재를 확인하였다. 다양한 압반과 지보조건에 적합한 다양한 Swellex 록볼트를 적용하였으며 지지력이 낮은 록볼트를 사용할 때 발생하는 문제는 볼트의 면적에 따른 록볼트의 양을 조절하여 해결하였다. 또한 계측결과와 전산해석 결과에 따라 지보재의 설치간격, 수량을 조절하였으며 계측결과에 따른 역해석을 실시하여 최적의 지보패턴을 결정하였다.

**핵심어** : 가배수로 터널, 암반분류 시스템, 지보설계

### 1. 서 론

바쿰 수력발전 프로젝트는 2,520 MW의 발전 출력량을 갖는 높이 210 m의 사력 발전댐 건설과 말레이시아 반도와 사라왁크 지역에 전력공급을 위한 송전선 공사로 구성된 대형 민간발주 터키 프로젝트이다. 현재 발전댐 건설에 앞서 Ballui 강을 우회시키기 위한 내부 직경 12 m, 연장 1,400 m의 가배수로 터널 3개가 건설 중에 있다.

바쿰 프로젝트 지역의 지질은 북서 보르네오 지향사에

속하는 후기 백악기에서 초기 3기 동안 퇴적된 수 km 두께에 이르는 벨라가층(Belaga formation)으로 이루어져 있으며, 주향이 N55°~70°E이고 경사가 50°SE~70°SE 인 층리가 퇴적암층에 균일하게 발달되어 있다.

이 지역에서 설계시 적용된 지반공학적 변수들은 RMR system에 따라 암반의 풍화정도 및 절리특성을

- 1) 정회원, 동아건설산업주식회사, 바쿰 터널 프로젝트 설계책임자
- 2) 정회원, 동아건설산업주식회사, 토목설계팀 과장  
원고 접수일 : 1998년 10월 20일  
원고 심사 완료일 : 1998년 12월 10일

고려하여 4개의 유형으로 구분된 RMT(Rock Mass Type)에 의해 결정되었으며, 이 지역에 널리 분포되어 있는 잡사암(graywacke)과 셰일은 암반의 특성이 유사할 경우, 동일한 암반유형으로 분류하였다. 여기서는 퇴적암층에서의 가배수로 터널에 적용된 암반유형과 그에 따른 지보패턴에 대하여 정리하였다.

## 2. 프로젝트 개요

말레이시아 사라왁주에 추진중인 바쿰 프로젝트는 발전 출력량 2,520 MW의 수력 발전소 건설과 여기에서 생산된 전기를 사라왁주 및 말레이시아 반도로 공급하기 위한 송전선공사로 구성되어 있다. 현재 수력발전소 건설에 앞서 Ballui 강을 우회시키기 위해 내공 12 m, 연장 1,400 m인 3개의 터널(총연장 4,314.6 m)이 건설 중에 있다. 가배수로 터널 외, 주요 구조물로는 댐(dam), 여수로(spillway), 취수 구조물(power intake structure) 및 발전용 터널 등이 있다(Fig. 1 참조).

- 댐 : 높이 210 m의 콘크리트 지수관형 사력댐(concrete face rockfill dam)
- 여수로 : 연장 675 m, 높이 20 m, 폭 50 m 인 4개의 수문으로 구성

- 취수구조물 : 전체 구조물의 크기는 높이 72 m, 폭 60 m, 연장 170 m이며 6개의 취문(power conduits)으로 구성
- 발전용 터널 : 내공이 9.0 m 인 콘크리트 라이닝 터널과 7.0 m 인 스틸라이닝 터널 6개로 구성되어 있으며 터널 연장은 650 m
- 옥외 발전소 : 총 연장 325 m로 6개의 Francis 수차(출력량 420 MW), 6개의 발전기(360 MVA), 24개의 단상변압기(120 MVA)를 수용
- 그 외 댐에서 사라왁주의 서해안까지 길이 660 km의 500 kV 육상송전선 및 길이 670 km 인 3개의 500 kV 해저송전선 건설 등이 있다.

바쿰 프로젝트는 발전용량에서 세계 22위에 속하는 대형 수력발전 프로젝트로 동남아 최대 수력발전소 공사이며, 민간공사로는 세계 최대규모인 US\$70억의 총 공사비가 소요될 전망이다.

## 3. 지반특성

### 3.1 지질

바쿰프로젝트의 지층은 후기 백악기에서 초기 3기 동안에 퇴적된 벨라기층(Belaga Formation)으로 이루어

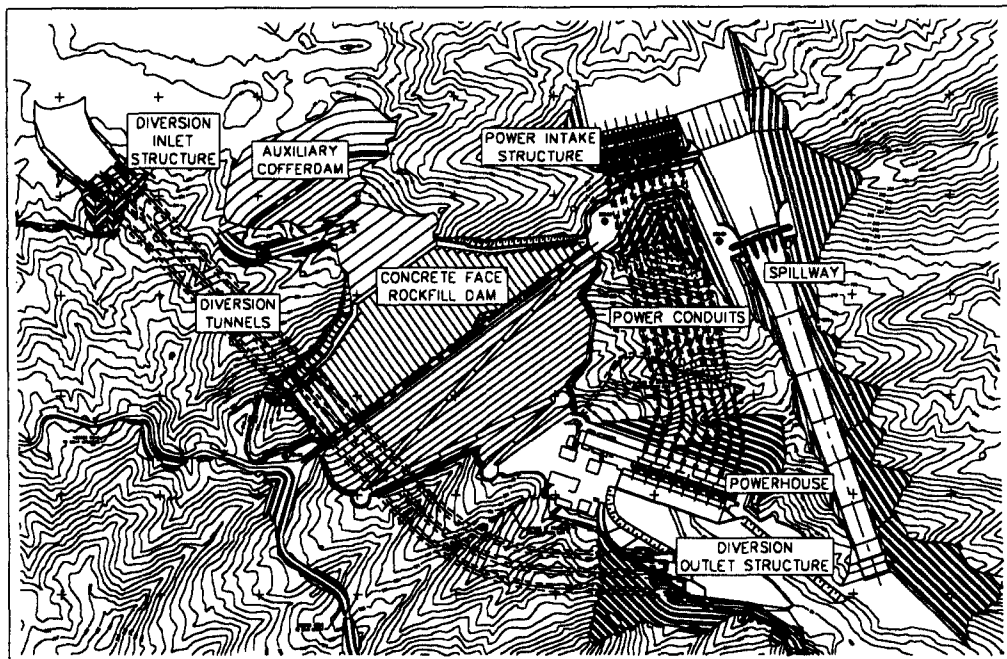


Fig. 1. Major Structures of Bakun Hydro Electric Project

어져 있으며 북서 보르네오 지향사(Northwest Borneo Geosyncline)에 속한다. 층리방향은 대체로 일정하며, 주향은 N55°~70°E이고 경사는 50°~70°SE 이다. 퇴적상은 기저에 역암질 사암이 분포하고 상부에 셰일(shale)과 이암(mudstone)이 분포하는 여러개의 퇴적단위(sedimentary rhythms)로 구성되어 있으며, 잡사암, 실트암(siltstones), 셰일, 이암이 대표적인 암종이다. 점진적인 퇴적상의 변화 및 불완전한 입자분급으로 인해 점토질 실트암에서 역암질 셰일까지 중간적인 암종이 존재하며 팽창성 광물은 존재하지 않는 것으로 조사되었다. 모든 암종은 조산작용의 영향으로 높은 압력을 받아 치밀화되어 있다. 점토 및 실트층이 일부 포함되어 있는 최대 100 m 두께의 잡사암층들이 Bukit Bayong과 Bukit Bakun 지역에 집중되어 분포하므로 이에 따라 주도적인 산맥의 방향은 잡사암층의 발달방향과 일치하고 있다.

지향사에 퇴적된 벨라가층은 구조적으로 가파른(60°~

90°) 등사습곡을 이루고 있으며, 소규모의 비조화 습곡과 역전습곡이 자주 발견된다. 습곡의 강도와 변성정도는 젊은 층으로 갈수록, 즉 북서쪽으로 갈수록 경감된다. 슬레이트 벽개(slate cleavage)가 점토질 퇴적층에 잘 발달해 있으며, 층리의 흔적이 보이며, 층리와 평행한 전단(shears) 단층이 광범위하게 발달하고 있다.<sup>1)</sup>

### 3.2 암반분류

가배수로 터널의 안정성 해석에 적용된 지반공학적 계수들은 현장에 분포하는 대표적인 3 종류의 암층에 대하여 공학적인 목적과 역학적인 거동양상을 고려하여 실내 및 현장시험을 통해 산출되었다.

- 잡사암이 주로 분포하는 암층
- 셰일/이암(대부분 실트가 포함됨)이 주로 분포하는 암층
- 셰일/이암, 실트암 및 잡사암이 얇게 교호하며 분포하는 암층

Table 1. Rock Mass Type(RMT) in the Project Area Bakun.

RMT	Description
RMT I Very Good Rock Mass (GW)	Thickly to very thickly bedded fresh greywacke. The greywacke is massive or only slightly jointed. Joints are generally closed and show rough surfaces. They are mostly free of clay fillings and show a low degree of separation. The spacing of the joints is greater than 1.50 m. The strength of the rock mass is high and the deformability low. This rock mass type is not sensitive to water and only little overbreak is expected during the tunnelling work.
RMT II Good Rock Mass (GW & GW/SH)	a) Fresh greywacke. The greywacke is medium to closely jointed with a moderate degree of separation.
	b) Massive, slightly jointed shale/mudstone with bedded greywacke intercalations. The rock mass might be occasionally slightly weathered and might contain some clay fillings or slickensides. The rock mass strength will be moderate to high and the deformability moderate to low. The rock mass is not sensitive to water only on fillings a minor influence of water might be possible.
RMT III Fair Rock Mass (SH)	a) Predominantly shale/mudstone with thinly bedded shale/greywacke. The shale/greywacke interbeddings which are medium to very closely jointed, loosened or contain a moderate number of shear zones and slickensides.
	b) Closely jointed greywacke which is moderately to highly weathered. The joints are smooth, of a high degree of separation and filled with clay. The rock mass strength will be moderate to low and the deformability moderate to high. In weathered zones the influence of water is moderate to high. Also a moderate to high overbreak is expected.
RMT IV Poor Rock Mass (SH)	a) Very closely jointed greywacke.
	b) Shale/mudstone with very thin greywacke intercalations and very closely to extremely closely joints. In both rock mass types the discontinuities show a nearly complete degree of separation with clay fillings, mylonitised faulted zones or frequent slickensides. The strength is low and the deformability high. This rock mass type is very sensitive to water. A high overbreak can be expected.

Table 2. Parameters and Safety Factors for the River Diversion Works.

Parameter	Unit	Rock Mass Type(RMT)				Safety Factor
		I	II	III	IV	
<b>Rock</b>						
Density	ton/m <sup>3</sup>	2.60	2.60	2.60	2.60	1.0
Uniaxial Compressive Strength (UCS <sub>Rock</sub> )	MPa	200	100	60	35	1.0
Tensile Strength (TC <sub>Rock</sub> )	MPa	10.0	5.0	3.0	1.8	1.0
Poisson's Ratio (ν <sub>Rock</sub> )	-	0.20	0.2	0.25	0.30	1.0
<b>Rock Mass</b>						
Rating RMR	-	80	65	50	35	-
Deformation Mod(E <sub>p</sub> )	MPa	12000	8000	6000	2500	1.0
In-Situ Stresses(k <sub>0</sub> )	-	0.3	0.3	0.3	0.5	-
Peak Cohesion	MPa	8.0	3.5	2.0	0.7	1.5, 2.0
Residual Cohesion	MPa	2.67	1.2	0.35	0.1	1.5, 2.0
Peak Friction Angle	°	45	40	35	25	1.3, 1.1
Residual Friction Angle	°	40	40	35	25	1.3, 1.1

또한, 이러한 대표암층에 대하여 풍화정도, 불연속면의 분포 및 특성을 고려하여 Table 1과 같이 다시 4 종류의 암반유형(Rock Mass Type, RMT)으로 분류하였다.

터널 및 사면에 대하여 대부분 RMT I에서 III에 속해 있으며 RMT IV는 극히 일부 존재한다. Table 2는 암반유형에 따른 지반공학적 계수이며, 각 암반은 전단 (shearing)후 Table 2에 주어진 잔류값(residual value)으로 파괴에 저항하게 된다.

RMT I을 제외하고 잔류 마찰각은 최대 마찰각과 동일하며 잔류 점착력은 RMT I과 II는 최대점착력의 1/3, RMT III는 최대점착력의 1/6, RMT IV는 0.1 MPa로 각각 감소시켜 적용하였다. 또한 안정성 분석시 점착력 및 마찰각에 대한 안전율은 일반적인 경우와 점착력의 과대평가로 인한 파괴 가능성 최소화를 위한 경우로 나누어 각각 수행하였다.

3.3 불연속면의 특성

본 프로젝트 현장내에는 3개의 불연속면군이 존재하며 이들의 특성은 다음과 같다.<sup>2)</sup>

- J1 : 퇴적암의 층리로서 가장 중요하고 주도적인 역할을 하는 분리면이다. 괴상의 잡사암에서는 분리정도가 낮게 나타난다. 층리면은 대부분 밀착되어 있고 평탄하다.
- J2(i) & J2(ii) : 층리면을 가로 지르는 절리조로서 J2(ii)는 J2(i)보다 상대적으로 덜 발달되어 있다.
- J3 : 층리면에 다소 경사진 방향의 절리군으로 잡사암층에서 주도적으로 나타나며 절리면이 거칠고 평탄하다.

Table 3. Dip Directions and Dip (DD/D) for Stability Calculations.

Discontinuity	Right River Side DD/D
J1	150 / 55
J2(i)	265 / 60
J2(ii)	065 / 55
J3	040 / 30

Table 3은 가배수로 터널이 위치하는 강 우측의 불연속면 자료를 통계처리하여 얻은 방향성 자료로서 가배수로 터널 시공시 불연속면으로 인한 파괴가능성 분석에 사용된다. 안정성 분석시에는 주어진 범위내에서

Table 4. Spacing of Discontinuities as a Function of Rock Mass Types.

Rock Mass Type	Spacing of Discontinuities [meter]			
	J1	J2(i)	J2(ii)	J3
I	1.00~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.00~5.0
II	0.50~2.0	0.1~1.0	0.1~1.0	0.50~2.0
III	0.05~0.5	1.0~5.0	1.0~5.0	0.05~0.5
IV	spacing negligible			

Table 5. Spacing of Discontinuities as applied in Wedge Stability Analysis.

Rock Mass Type	Spacing of Discontinuities [meter]			
	J1	J2(i)	J2(ii)	J3
I	1, 2, 5	1, 2, 5	1, 2, 5	1, 2, 5
II	0.5, 1, 2	0.2, 0.5, 1	0.2, 0.5, 1	0.5, 1, 2
III	0.1, 0.2, 0.5	1, 2, 5	1, 2, 5	0.1, 0.2, 0.5
IV	no spacing			

Table 6. Peak Shear Parameters on Discontinuities.

Rock Mass Type	Safety Factor		J1(Bedding)		J2		J3	
	$\eta_{\tan \phi}$	$\eta_c$	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)
I	1.0	1.0	40	0.60	43	0.55	40	0.60
II	1.0	1.0	35	0.40	38	0.36	35	0.40
III	1.0	1.0	30	0.25	32	0.22	30	0.25
IV	1.0	1.0	20	0.05	20	0.05	20	0.05
I	1.3	1.5	32.8	0.40	35.7	0.37	32.8	0.40
II	1.3	1.5	28.3	0.27	31.0	0.24	28.3	0.27
III	1.3	1.5	23.9	0.17	25.7	0.15	23.9	0.17
IV	1.3	1.5	15.6	0.03	15.6	0.03	15.6	0.03
I	1.1	2.0	37.3	0.30	40.3	0.28	37.3	0.30
II	1.1	2.0	32.5	0.20	35.4	0.18	32.5	0.20
III	1.1	2.0	27.7	0.13	29.6	0.11	27.7	0.13
IV	1.1	2.0	18.3	0.02	18.3	0.02	18.3	0.02

Table 7. Residual Shear Parameters on Discontinuities.

Rock Mass Type	Safety Factor		J1(Bedding)		J2		J3	
	$\eta_{\tan \phi}$	$\eta_c$	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)
I	1.0	1.0	35	0.20	38	0.18	35	0.20
II	1.0	1.0	35	0.13	38	0.11	35	0.13
III	1.0	1.0	30	0.05	32	0.04	30	0.05
IV	1.0	1.0	20	0.00	20	0.00	20	0.00
I	1.3	1.5	28.3	0.13	31.0	0.12	28.3	0.13
II	1.3	1.5	28.3	0.09	31.0	0.07	28.3	0.09
III	1.3	1.5	23.9	0.03	25.7	0.03	23.9	0.03
IV	1.3	1.5	15.6	0.00	15.6	0.00	15.6	0.00
I	1.1	2.0	38.3	0.10	35.4	0.09	38.3	0.10
II	1.1	2.0	32.5	0.07	35.4	0.06	32.5	0.07
III	1.1	2.0	32.5	0.03	29.6	0.02	32.5	0.03
IV	1.1	2.0	27.7	0.00	18.3	0.00	27.7	0.00

가장 불리한 방향이 적용되었다.

불연속면의 간격과 길이는 발생가능한 썩기의 크기를 좌우하는 요소로서 현장에서 측정된 암반유형에 따른 간격은 Table 4와 같고 썩기 안정성 분석에 사용된 자료는 Table 5와 같다.

불연속면의 길이는 파괴 가능한 썩기의 크기와 상관관계가 크므로 주어진 범위내에서 다양하게 변화시켜가며 적용하였으며, 모든 불연속면의 연장성은 100%인 것으로 가정하여 안전성을 도모하였다. 또한 터널 안정성 분석에 적용된 불연속면의 최대전단강도계수와 잔류전단강도계수는 암반유형별로 적용된 안전율에 따라 Table 6, 7과 같이 정리된다.

### 3.4 초기응력 및 상재하중

초기 응력값은 측정되지 않았으나, 현장이 위치한 사

라와주의 지진빈도가 매우 낮고 구조적인 응력을 거의 받지 않은 상태이므로 상재하중과 포아송비에 의해 초기 응력값이 좌우될 것으로 예상되었다.

지반을 완전 탄성체로 가정하고 시간 종속적인 거동을 고려하지 않는다면 기존 암반, 특히 잡사암의 경우에 초기응력비는 다음과 같이 추정될 수 있다.<sup>3)</sup>

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (1)$$

여기서,  $K_0$ : 초기응력비,  $\nu$ : 포아송비

적용된 포아송비가  $0.2 \leq \nu \leq 0.3$  이므로 초기응력비의 범위는  $0.25 \leq K_0 \leq 0.43$  임을 알 수 있다. 탄성적 매질이라도 발파도중에 대부분 약간의 소성변형이 발생되므로 안정성 해석시에는 초기응력상태를  $K_0=0.3$  및 0.5로 하여 적용하였다.

Table 8. Vertical and Horizontal Stress-State for different  $K_0$  Values.

	$\sigma_v$ [MPa]	$\sigma_H$ [MPa] ( $K_0=0.2$ )	$\sigma_H$ [MPa] ( $K_0=0.3$ )	$\sigma_H$ [MPa] ( $K_0=0.5$ )
200	5.20	1.04	1.56	2.60
100	2.60	0.52	0.78	1.30

Table 9. Test results of possible content swelling clay mineral of Bakun shale.

Samples Marked	S-1	S-2	S-3
Illite	21%	17%	22%
Chlorite	21%	22%	17%
Plagioclase	18%	13%	14%
Quartz	24%	31%	30%
Siderite	16%	16%	15%

터널 라이닝을 위한 암반지보유형(Rock Support Types, RST)의 분류를 위한 상재하중의 결정은 100 m 및 200 m의 두가지 경우를 고려하였으며, 이 때 초기응력은 Table 8과 같이 정리된다.

### 3.5 기반암 sample의 팽창효과(swelling effect)에 대한 광물학적 분석

바쿰 가배수로 터널에 있어 기반암인 셰일의 침식 가능성 또는 물과 접촉했을 때 안정성에 대한 분석은 매우 근본적인 문제이다. 주요설계표준(Principal Design Criteria)에 제시된 광물학적 분석에 따르면 셰일(shale), 이암(mudstones)은 팽창성 점토광물(smectites, montmorillonite, ...)을 포함하지 않는 것으로 나타났으나 안전성확보 측면에서 현장에서 채취된 표본에 대한 재확인 작업을 수행하였다. 재확인 작업을 위해 추가적으로 3개의 표본을 수집하여 노르웨이 국립 Trondheim 과학기술대학에서 분석하였으며, 이에 대한 결과는 Table 9와 같다.

## 4. 지보공

### 4.1 록볼트(Rock bolt)

록볼트는 전면접착형 록볼트(fully grouted rock bolt)와 스웰렉스 록볼트(Swellex rock bolt)를 사용하였다. 전면접착형 록볼트는 고장력 철근(Steel quality Grade 460)을 사용하며 지름은 28 mm 이다. 안전율은 하중과 재료에 대하여 각각  $\eta_L=1.4$ 와  $\eta_M=1.15$ 가 적용되며, 이

때 항복응력  $f_Y$ 과 지지력  $F_{RB}$ 는 다음과 같다.

$$f_Y = \frac{\sigma_Y}{\eta_L \cdot \eta_M} = \frac{460}{1.4 \cdot 1.15} = 285 \text{ MPa},$$

$$F_{RB} = f_Y \cdot A = 285 \cdot \frac{\pi \cdot 28^2}{4} = 175 \text{ kN}$$

안정성 계산시에는 지지력  $F_{RB}$ 을 150 kN(15톤)으로 하였고, 적용에 있어 시공기간이 부족한 문제로 인하여 가배수 터널공사에서는 전면접착형 록볼트 대신 스웰렉스 록볼트를 사용하였다.

#### 4.1.1 전면접착형 록볼트

· 하중-변형 거동

시멘트/몰탈 접착형 록볼트에 대한 전형적인 하중-변형 곡선은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 철근이 항복할 때까지 변형은 조금 증가하지만 볼트 하중은 탄성적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그 후, 철근에 경화가 일어나며 극한하중에 도달했을 때 파단된다. 일반적으로 이러한 형태의 록볼트는 약 180 kN(18톤)의 하중, 30 mm의 변형이 일어날 때까지 미끄러짐이 일어나지 않고 하중을 받다가 파단된다. 또한 전면접착형 록볼트는 경암에서 높은 지지력을 갖는다.<sup>4)</sup>

· 부식방지

영구 록볼트 시스템(바쿰 가배수로 터널에서는 콘크리트 라이닝이 시공되기 때문에 영구 볼트는 아님)으로 사용할 때, 일반적으로 록볼트는 부식방지를 위하여 아연도금을 하고 시멘트/몰탈 또는 수지(레진)로 전면 그라우팅을 하는 2중 방법을 사용한다.

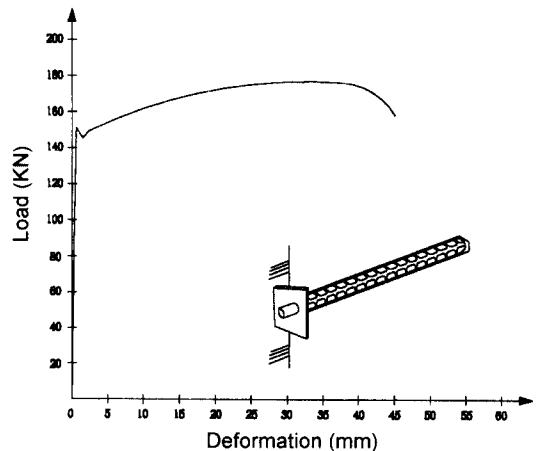


Fig. 2. Typical Load-Deformation-Curve of a Cement/Mortar grouted Rock Bolt

· 전단저항

전단저항에 대한 평가는 von Mises 항복기준을 사용하였다.<sup>5)</sup>

$$\sigma_Y = \sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2)$$

순수 인장일 경우 항복은

$$\sigma_Y = \sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2} = \sigma_x \quad (3)$$

이고, 순수 전단일 경우 항복은

$$\sigma_Y = \sigma_V = \sqrt{3\tau_{xy}^2} \leftrightarrow \tau_{xy} = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} = 0.577 \sigma_Y \quad (4)$$

이며, 여기서  $\sigma_Y$ 는 철근의 일축항복응력이다. 윗 식으로부터 록볼트의 이론적인 전단저항은 인장강도의 약 57% 이나 만약, 전단이 볼트축에 수직하게 일어나면, 이에 대한 영향을 고려하여야 한다. 대부분의 경우 Fig. 3에서 보는 바와 같이 전단과 인장이 조합되어 작용하기 때문에 이에 대한 고려가 필요하며 일축항복응력의 약 80%를 고려하여 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

· 부착길이

록볼트 저항력은 록볼트와 몰탈의 접촉면적, 몰탈과 암반의 접촉면적에 의하여 암반에 전달된다. 접촉면적의 지지력이 작기 때문에 요구되는 부착길이를 확보하

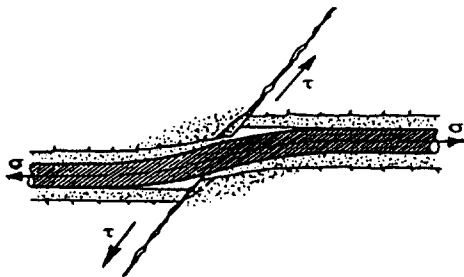


Fig. 3. Failure Geometry of Bolts as a Combination of Shear and Normal Stresses

여야 한다. 록볼트 저항력은 전단력(일정한 것으로 가정)으로 암반에 전달된다.

록볼트와 몰탈의 접촉면에서 허용전단응력은 철근콘크리트 봉이나 보에 대하여 독일 DIN1045에 규정된 1.8 MPa을 부착응력으로 하여 계산되며, 전면 그라우트될 확률이 철근콘크리트 구조물에 비하여 작기 때문에, 안전율( $f_{bo}=2.0$ )을 증가시킨다. 허용전단응력은  $\tau_{per} = 1.8/2.0 = 0.9$  MPa 이므로 부착길이  $l_{B,1}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$l_{B,1} = \frac{F_{RB}}{\pi \cdot d_{RB} \cdot \tau_{per}} = \frac{0.15}{\pi \cdot 0.028 \cdot 0.9} = 1.89 \text{ m} \quad (5)$$

여기서,  $F_{RB}$  : 볼트저항력, 여기서는 150 kN(15톤)

$d_{RB}$  : 볼트직경, 여기서는 28 mm

몰탈과 암반의 접촉면에서 허용전단응력  $\tau_{RM}$ 은 암반 분류에 따라 암반의 점착력과 동일한 것으로 보며 이 때 부착길이  $l_{B,2}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$l_{B,2} = \frac{F_{RB}}{\pi \cdot d_{BH} \cdot C_{RMT}} \quad (6)$$

여기서,  $d_{BH}$  : 보링직경, 여기서는 63.5 mm

$C_{RMT}$  : 안전율  $\eta_c=2.0$  일 때 암반의 점착력 (Table 2)

Table 10에 록볼트 저항력 150 kN, 직경 28 mm에 대한 부착길이  $l_{B,1}$ ,  $l_{B,2}$ 가 정리되어 있다. 일반적으로 천공직경은 볼트직경의 거의 2배인 56 mm 또는 2" 에서 2.5" 이다. 설계에서는 충분한 하중전달과 부식방지를 위한 부착길이  $l_{B,2}$ 를 확보하기 위하여 65 mm(2.5")를 천공직경으로 선택하였다.

Table 10으로부터 RMT I과 II의 부착길이는 볼트와 몰탈의 접촉면에 의하여 결정되고 RMT IV의 부착길이는 몰탈과 암반의 접촉면에 의하여 결정됨을 알 수 있으며 부착길이는 2 m가 적합한 것으로 판단되었다.

Table 10. Required Bond Length for fully grouted Rock Bolts.

Rock Mass Type [-]	Rock Mass Cohesion, $C_{RMT}$ [MPa]	Rock Bolt Capacity, $F_{RB}$ [MN]	Bolt Diameter $d_{RB}$ [m]	Borehole Diameter, $d_{BH}$ [m]	Bond Length		Chosen $l_b$ [m]
					$l_{B,1}$ [m]	$l_{B,2}$ [m]	
I	4.00	0.15	0.028	0.0635	1.89	0.19	2.00
II	1.75	0.15	0.028	0.0635	1.89	0.43	2.00
III	1.00	0.15	0.028	0.0635	1.89	0.75	2.00
IV	0.35	0.15	0.028	0.0635	1.89	2.14	2.00

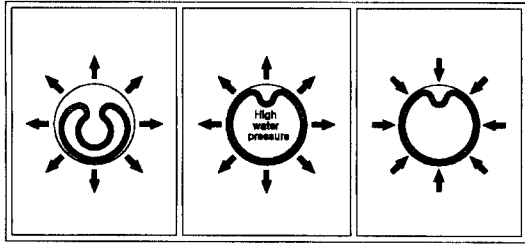


Fig. 4. Relationship between Rock and Swellex Bolt in Installation Process

4.1.2. Swellex Rock Bolts

스웰렉스 록볼트는 마찰앵커 록볼트의 형태에 속하고, 1977년과 1980년 사이에 스웨덴의 Atlas Copco에 의하여 개발되었다. 철관 형태의 볼트와 설치를 위한 장비로서 수압펌프가 필요하며 Fig. 4에서 보는 바와 같이 볼트의 직경을 줄이기 위하여 접은 원형철관(circular steel tube)으로 만들어졌다. 용접에 의하여 밀폐된 양단에서 볼트 내부로 고압의 물을 주입하면 볼트는 팽창하게 되고 팽창과정 중에 스웰렉스 볼트는 천공 주위의 지반을 압축시키면서 불규칙한 천공에 맞는 형태가 된다. 또한 축방향으로 볼트가 줄어들면서 암반면의 판을 끌어당기게 되어 약 2톤의 프리텐션을 일으키게 된다. 설치 후, 볼트와 천공의 불규칙면 사이에서 기계적인 맞물림이 생기고 마찰과 기계적 맞물림의 조합이 볼트전길에서 발생된다.

· 하중-변형 거동

표준형 스웰렉스 볼트에 대한 전형적인 하중-변형 곡

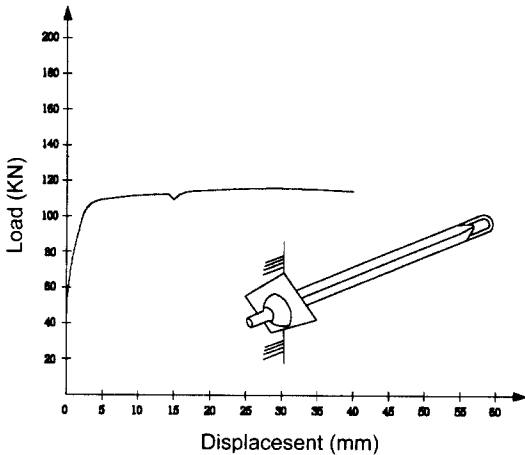


Fig. 5. Typical Load-Deformation-Curve of a Swellex EXL Rock Bolt

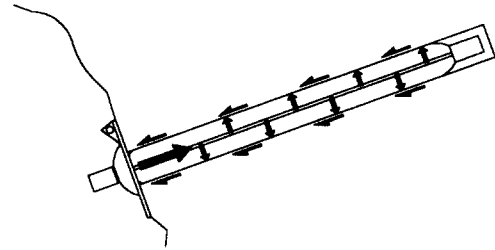


Fig. 6. Mechanism of Shear Strength Activation by increasing the Swellex Bolt Diameter

선이 Fig. 5와 같다. 초기에 하중 50 kN(5톤) 정도까지는 록볼트에 변형이 일어나지 않으며, 그 후 부착파괴(bond failure)에 도달한 점에서 국부적으로 볼트에 변형이 발생하기 시작한다. 하중이 115 kN 까지 증가하고 변형이 10 mm에 도달할 때 부착파괴가 진행되고 이 때, 볼트는 미끄러지기 시작하고 일정한 하중을 유지한다. 하중-변형 거동은 전면접착형 록볼트와 거의 비슷하지만 스웰렉스 볼트는 큰 변형이 올 때 미끄러짐만 일어나고 파괴되지는 않는다. 전단강도 발현에 대한 메카니즘은 Fig. 6과 같다.

· 부식방지

전면접착형 록볼트에서와 동일한 방식인 아연도금 스웰렉스 볼트가 사용된다.

· 전단저항

스웰렉스 볼트의 전단저항은 볼트가 순수 전단상태일 때에도 전단과 인장의 조합응력을 주기 때문에 볼트의 비어있는 단면(hollow cross section)에 의하여 전면접착형 록볼트보다 크거나 같다. 스웰렉스 록볼트의 파괴전단하중(failure shear load)은 전면접착형 록볼트보다 크며 평균적으로 인장전단하중(tensile shear load)의 93% 이다. 철의 종류에 의해 좌우되는 스웰렉스 볼트의 연성은 전면접착형 록볼트와 같고 20%에서 30%의 증가량을 허용한다. 인발저항은 잠사암에 대하여 50 kN/m(5톤/m)에서 80 kN/m(8톤/m)로 추정된다.

· 부착길이

스웰렉스 볼트의 필요 부착길이는 암반상태에 좌우되고 인발시험에 의하여 결정된다. 대부분의 주어진 암반조건에서 약 0.50 m의 부착길이이면 암반에서 마찰력에 의한 저항력을 충분히 전달할 수 있는 것으로 판단된다.

· 록볼트 형태

가장 일반적인 것은 튜브의 직경 41 mm, 두께 2



mm 인 Standard EXL Swellex 이다. 필요한 보링직경은 32 mm~39 mm 이며 기술적인 불리함이 없고 설치 시간이 훨씬 빠르기 때문에 본 공사에서는 전면접착형 록볼트 대신 이 형태의 스웰렉스 볼트를 사용하였다.

150 kN(15톤) 대신 100 kN(10톤)의 작은 지지력의 볼트를 사용함으로써 생기는 문제는 록볼트량을 조정함으로써 해결하였다.

$$A_{10} = A_{15} \frac{10_{\text{ton}}}{15_{\text{ton}}} \quad (7)$$

여기서,  $A_{10}$ 과  $A_{15}$ 는 10톤과 15톤 볼트의 각 면적이며 윗 식을 이용해 록볼트간의 대체를 수월하게 할 수 있다.

#### 4.2 슛크리트(Shotcrete)

일반스�크리트(SC), 와이어매쉬 보강스�크리트(RS) 및 강섬유보강 슛크리트(SFRS)가 사용되었으며 슛크리트의 등급은 Table 11과 같다.

와이어매쉬는 슛크리트 두께가 10 cm와 15 cm 사이에서는 1겹, 20 cm에 대해서는 2겹으로 설치하며, 20 cm 슛크리트는 두 번으로 나누어 타설되므로 12 mm의 최대골재치수가 사용되었다. 또한 SFRS의 적용성을 확인하기 위하여 Fig. 7과 같은 시편을 제작하여 슬래브 시험과 시험보에 의한 3점 재하시험을 수행하였다. 슬래브시험을 위하여 치수 600×600×120 mm에 슛크리트가 뿌려진 시험판이 사용되었으며 충분한 시험을 통해 통계적으로 평가하였다. 단지 굴착기간동안 물성을 보증할 수 있는 품질관리를 위해서는 치수 600×100×100 mm를 가진 시험보를 슛크리트가 뿌려진 시험판으로부터 잘라서 사용하였다. 시험 평가법으로는 ASTM과 일본 평가법이 있으며, ASTM C 1018은 휨강도  $f_c$ (최초 균열이 일어나고 비선형 재료거동이 시작되는 하중)와 그에 따른 변형  $\delta(f_c)$ 에 기초한 인성지수  $I$ 를 정의하며, 일본기준은 측정된 변형이 자유보길이의 1/150 인 하중에 기초한 등가휨강도  $f_e$ 를 정의하는 차

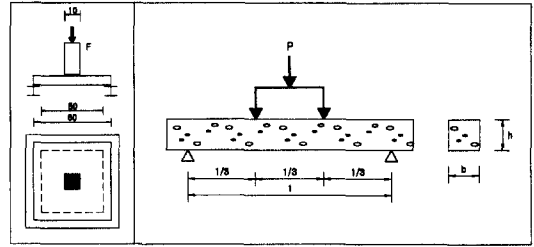


Fig. 7. Specimen Dimensions for Slab Tests and Flexural Strength Tests

이점을 갖는다. 시험 평가는 RS와 SFRS에 대한 하중-처짐과 에너지-처짐 곡선으로 주어지며, 3점 재하시험에서 특히 품질관리를 위해서는 ASTM 방법이 SFRS에서 최초 균열의 위치에 대한 문제, 최초 균열의 길이를 정의하기가 분명하지 않은 문제, 최초 균열을 일으킨 하중의 정의나 측정이 어려운 문제 등이 있으며 이에 비하여 일본평가법은 보길이 600 mm의 1/150 인 4 mm의 변형을 측정하기 때문에 보다 유리하다.

#### 4.3 계측 및 전산해석

터널을 시공하기 전에 지보패턴, 굴착과정을 고려하여 실시하는 전산해석 및 시공중에 실시하는 계측은 지보의 축력(axial forces)과 터널내 변위를 통해 터널의 안전성을 예측할 수 있는 매우 유용한 방법이다. 가배수로 터널의 전산해석에 적용된 지보패턴 및 대표단면은 각각 Fig. 8과 Fig. 9와 같으며, FLAC 2D(ver. 3.3)을 이용하여 수행한 전산해석 결과는 Fig. 10과 같다.

또한, 계측은 굴착기간중에 지질학적상태에 따라 Extensometer, Convergencemeter 및 load cell의 위치를 바꾸어가며 실시하였으며 이에 대한 결과를 Table 12에 제시하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 계측에 의한 변위량이 전산해석에 의한 변위량에 비해 작은 값을 보이며, 이는 전산해석시 지반의 이방성(anisotropy), 불균질성(heterogeneity)을 충분히 고려할 수 없는 한계에 의한 차이이다.

Table 11. Shotcrete Classes for the Bakun Project.

Class of Shotcrete [-]	Maximum Grain Size [mm]	Cement Content [kg/m <sup>3</sup> ]	Minimum Crushing Strength [MPa]		Thickness of Shotcrete Layer [cm]
			8 hours	28 days	
1	16	350	4.0	28.5	up to 5
2	12	380	4.0	28.5	5 to 10
3	8	400	4.0	28.5	over 10

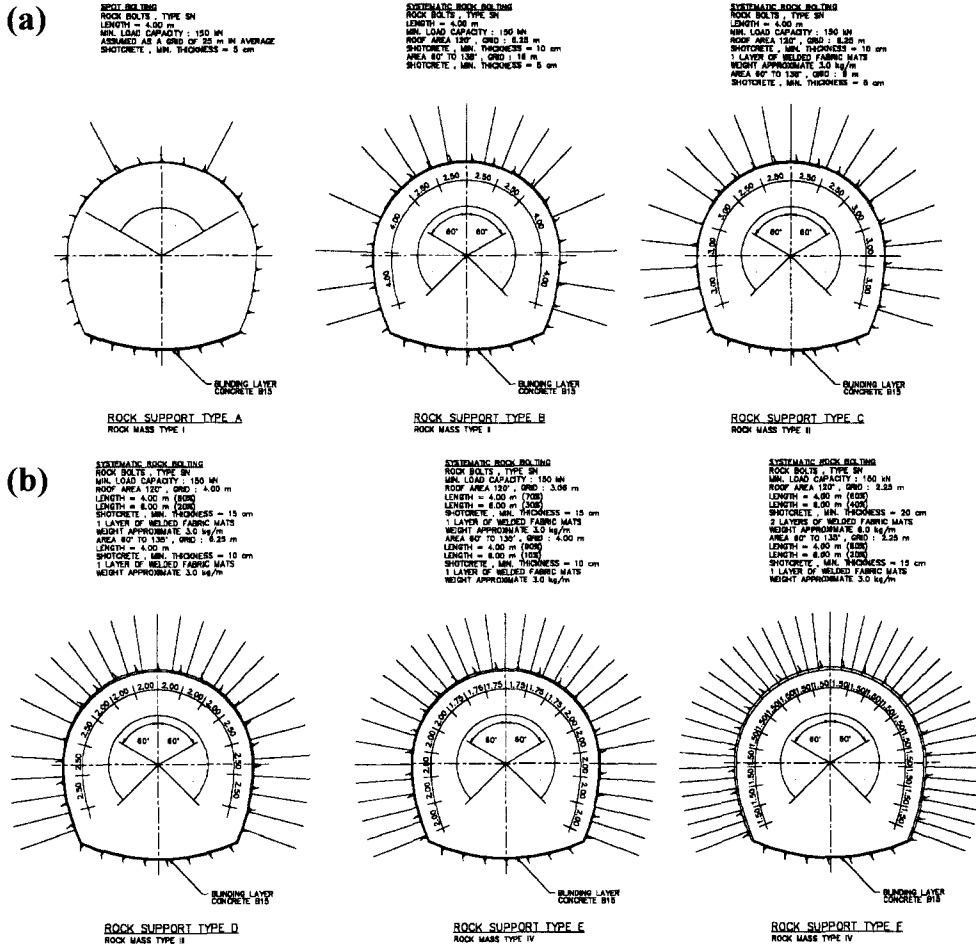


Fig. 8. (a) Rock Support Types (Rock Mass Type A, B, C), (b) Rock Support Types (Rock Mass Type D, E, F)

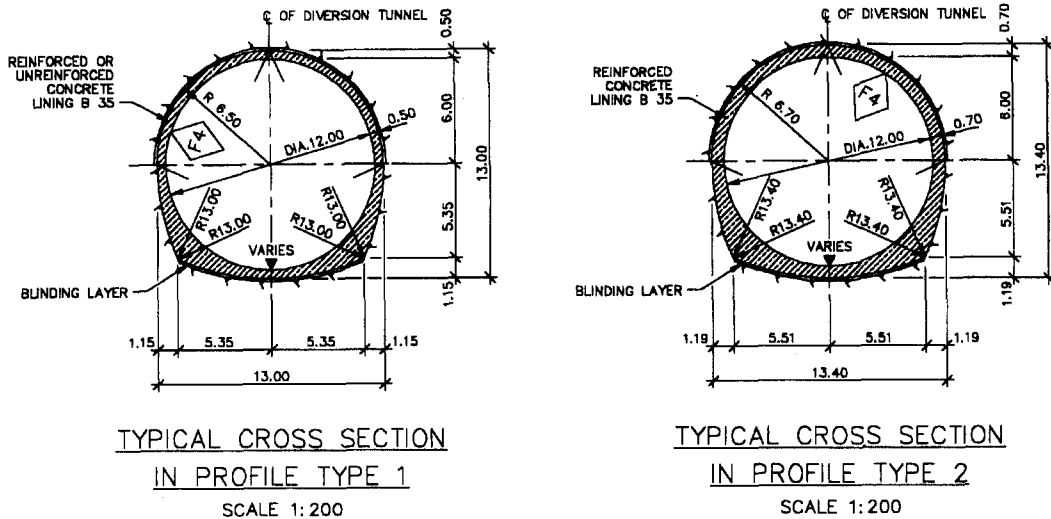


Fig. 9. Typical Cross Section of Diversion Tunnel

Table 12. Results of convergence measurement of rock type B of diversion tunnels.

Tunnel	Direction	Rock Type	Station	Displacement(mm)		
				B-F	A-F	A-B
T2	Adit to Outlet	B2	1+086	3.03	2.46	3.71
	Adit to Inlet	B1	0+633	0.93	1.26	1.20
	Inlet to Adit	B1	0+026	0.10	0.08	0.09
T3	Adit to Outlet	B2	1+054	2.24	2.97	2.22
	Inlet to Adit	B2	0+046	5.53	5.15	5.38
	Adit to Inlet	B2	0+533	1.77	1.96	1.92

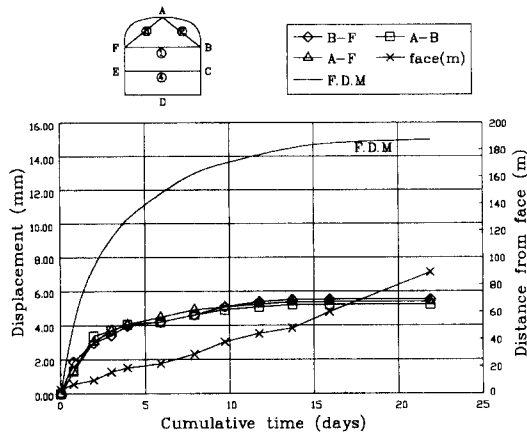


Fig. 10. Results of Convergence Measurement of Rock Type B2(Inlet to Adit) and the Results of F.D.M. Analysis

## 5. 결과 및 분석

말레이시아 사라왁의 연중 강우량은 약 4,100 mm 이나 현재 시공중인 댐지역은 4,500 mm 정도이며 지층은 유기물함량이 높아 쉽게 부서지는 퇴적지층이다. 이러한 열대우림지역에서 가배수로 터널의 지보설계를 위해 전체적인 암층단위를 공학적인 목적과 역학적 거동양상을 토대로 주도적인 암중에 따라 3종류로 분류하였다. 또한 이러한 암층단위를 기준으로 풍화도와 절리의 빈도 및 특성을 고려하여 다시 4개의 암반유형 (rock mass type)으로 분류하였으며 또한 수로터널의 특성을 고려하여 지반내 swelling 광물의 존재를 확인하였다. 이러한 일련의 과정을 통해 얻은 자료는 가배수로 설계 전반에 걸쳐 해석 및 안전성 평가에 효율적으로 적용되었다.

지보재에 있어 순수전단인 경우의 록볼트의 이론적인 전단저항은 본문에 제시된 바와같이(Eq. 4) 인장강도의 약 57% 이나 이 값은 전단이 볼트축에 수직하게

발생되는 경우에 대해서는 보정되어야 한다. 일반적으로 록볼트에는 전단과 인장이 조합되어 작용하므로 일축 항복응력의 약 80%를 고려하여 적용함이 타당한 것으로 판단되었다. 록볼트의 부착길이는 독일 DIN1045에 규정에 따라 산출되었으며 산출된 결과로부터 RMT I과 II의 부착길이는 볼트와 몰탈의 접촉면에 의하여 결정되고 RMT IV는 몰탈과 암반의 접촉면에 따라 달라짐을 확인할 수 있었다. 다양한 암반과 지보조건에 적합한 여러종류의 Swellex 볼트를 적용하였으며 지지력이 낮은 볼트를 사용할때 발생하는 문제는 볼트의 면적에 따른 비례식을 사용하여 록볼트의 양을 조절함으로써 해결할 수 있었다.

계측결과와 전산해석 결과에 따라 지보재의 설치간격, 수량 등 콘크리트 라이닝의 지보재 물량을 조절하였으며 이에 대한 검증을 위해 계측자료를 이용한 역해석을 실시하여 원지반의 특성을 파악한 후, 재해석을 실시하여 최적의 지보패턴을 결정하였다.

## 참고 문헌

1. DongAh Construction Industrial Co. Ltd, 1995, Privatization of the Bakun Hydroelectric Project. Principle Design Criteria. Bakun Management SDN. BHD., Kuching.
2. DongAh Construction Industrial Co. Ltd, 1995, Privatization of the Bakun Hydroelectric Project. Technical Specification. Bakun Management SDN. BHD., Kuching.
3. Hoek, E., Brown, E.T., 1980, Underground Excavations in Rock. Institution of mining and metallurgy, London.
4. Hoek, E., 1995, Strength of Rock and Rock Mass, ISRM News Journal Vol. 2, No 2.
5. Maidl, B., 1988, Handbuch des Tunnel-und Stollenbau Band II. Verlag Glückauf GmbH, Essen.