

말레이시아 바쿰 가배수로 터널의 철근콘크리트 라이닝 설계

지왕률¹⁾ · 임태정²⁾

Design of the Reinforced Concrete Lining in Bakun Diversion Tunnels

Wang-Ruel Jee and Tae-Jung Lim

1. 서 론

말레이시아 보르네오섬 사라왁주의 바쿰 가배수로 터널(약칭 “바쿰터널”)은 본 댐 공사를 수행하기 위한 배수 터널로 터널의 완공시기는 바쿰 수력발전사업의 중요한 요인이다.

터널의 라이닝작업은 터널공사의 완료 단계로 공사비와 공기 면에서 굴착 및 지보작업과 같이 중요한 단계이다.

바쿰터널은 내부 직경 12 m의 유사연장 3개의 터널로 이루어져 있으며 총길이는 4314.6 m 이다. 내공 단면은 배수시 마찰을 감소시키기 위하여 원형단면으로 설계되었다.

철근콘크리트 라이닝 두께는 500 mm에서 700 mm로 구조적인 조건에 따라 변화된다. 바쿰터널의 당초 입찰설계에서는 전체 철근콘크리트 라이닝 설치에 5,985 ton의 철근이 필요하였다. 우리는 시공상세설계 과정에서 여러 가지 하중과 현지 암반의 조건을 고려하여 철근콘크리트 단면과 무근콘크리트 단면으로 분류된 5종류의 라이닝 단면을 설계하고 적용하였다.

이러한 라이닝 단면의 상세한 설계변경으로 입찰물량의 절반에 가까운 2,178 ton의 철근량을 줄일 수 있었고 공기 단축과 공사비 절감을 이룰 수 있었다.

2. 철근콘크리트 라이닝의 전산모델링과 해석

2.1 전산모델링

일반적으로 철근콘크리트 라이닝은 구조적으로 주변암반에 의하여 지지되는 단단하게 연결된 빔 요소로 모델링된다. 본 상세설계에서는 Fig. 1과 같이 라이닝 단면에 수직한 비선형 스프링요소로 지지된 64개의 빔 요소로 라이닝을 모델링하였다.

전산해석을 하기 위하여 사용한 프로그램은 GT-STRUDL로 상업적인 범용 구조해석프로그램이다.

GT-STRUDL은 빠르고 정확한 반복계산을 수행하여 빔 요소로부터 비선형 스프링을 제거하여 해석한다.

암반의 반발력에 의한 법선 방향의 탄성 강성 $K_{S,R}$ 은 다음과 같다.²⁾

$$K_{S,R} = C_R \cdot \frac{E_D}{R_0} \quad (1)$$

여기서

$K_{S,R}$: 라이닝의 수직방향의 탄성강성

E_D : 암반의 탄성계수

1) 정회원, 동아건설산업주식회사 토목설계팀 부장

2) 동아건설산업주식회사 토목설계팀 사원

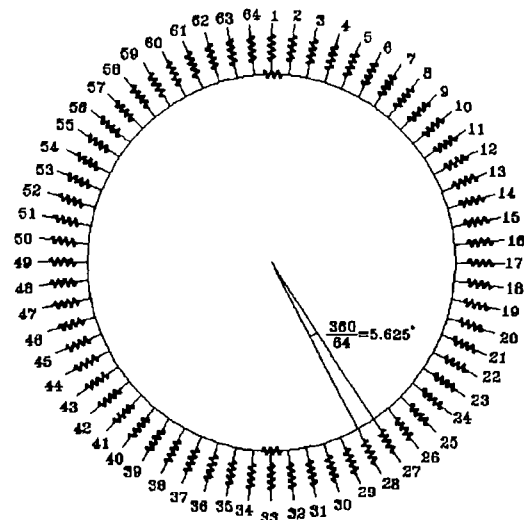


Fig. 1. Modelling of the reinforced concrete lining in the diversion tunnels

C_R : 이론적인 문헌에 의한 상수 0.67²⁾

R_0 : 터널의 반경(m)

2.2 라이닝 단면에 작용하는 하중

바른 가배수 터널의 상세 설계를 하기 위하여 적용한 하중은 다음과 같다.

- 라이닝 자중

- 암반 이완하중의 수직 · 수평성분 :

Table 1과 같이 터널굴착시 라이닝에 수직 · 수평으로 작용하는 암반의 이완하중¹⁾(Tender design)

- 외부수압 :

외부수압은 Plug(터널내의 유수의 흐름을 차단하는 철근콘크리트 블록)의 위치에 따라 3가지 경우의 외부수압으로 구분된다.

① 25 m 수두 (터널라이닝 천단부 기준) : Plug의 하류부 (Drain Hole이 있을때)

② 68 m 수두 (터널라이닝 천단부 기준) : 터널 I에서의 Plug 상류부 평균해수면 기준 125 m(시공중)

③ 152 m 수두 (터널라이닝 천단부 기준) : 터널 II, III에서의 Plug 상류부 평균해수면 기준 209 m(공사완료)

- 내부수압 :

Plug 하류 영역은 Weephloe의 설치로 내부 수압이 작용하지 않는다. Plug 하류 영역은 내부수압이 클 경우

Table 1. Rock pressure applied to reinforced concrete lining of the diversion tunnels

Rock Support Type	Abbrev.	Unit	A	B	C	D	E	F
Item (RST)								
Rock Mass Type	RMT	-	I	II	III		IV	
Deformation Modulus	E_D	MPa	12,000	8,000	6,000		2,500	
Tunnel Radius	R_0	m	6.5	6.5	6.5		6.5	
Factor(radial)	C_R	-	0.67	0.67	0.67		0.67	
Mod. of Subgrade	$K_{S,R}$	MN/m ³	1236.9	824.6	618.5		257.7	
Vertical Weight	P_V	MPa	0.026	0.039	0.039	0.065	0.078	0.104
Horizontal Weight	P_H	MPa	0.013	0.020	0.020	0.033	0.039	0.052

Table 2. Rock Mass Type(RMT) in the project area Bakun

Rock Type	Description	
RMT I (A) 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 (B) Good Rock Mass (GW & GW/SH)	B1	Fresh greywacke. The greywacke is medium to closely jointed with a moderate degree of separation.
	B2	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)	C	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.
	D	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)	E	Very closely jointed greywacke.
	F	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.

철근 콘크리트 라이닝 단면 균열을 발생시키게 되며 라이닝과 암반표면은 수압이 동일하게 되어 라이닝에 별도의 수압이 작용하지 않게 된다. 장기적인 구조 안전성을 위하여 내부수압은 고려하지 않는다.

• 온도하중 :

당초의 설계규정에 의하여 암반의 온도하중은 +25°C를 적용하고 물의 온도는 최고 +30°C, 최저 +20°C이며, 온도변화는 $\Delta T = \pm 5^\circ C$ 를 적용하였다.

• 적용 지진하중 :

ah = 0.05 g, 수평가속도 계수

av = 0.10 g, 수직가속도 계수

하중조합은 “ACI code to design reinforced Concrete structures”, 규정에 의하여 적용하였고 Tender design에서 지진하중과 온도하중은 적용시 안전률이 감소하였으므로 본 설계에서는 Case 2, 3은 제외하였다.¹⁾

Load combination Case 1 : $U=1.4D+1.7L+1.4F+1.7H$

Load combination Case 2 : $U=0.75(1.4D+1.7L+1.4F+1.7W)$ or $0.75(1.4D+1.7L+1.4F+1.4T)$

Load combination Case 3 : $U=0.75(1.4D+1.7L+1.4F+1.7H+1.87E)$

여기에서,

U : 극한강도설계법에서의 하중조합

D : 사하중

- L: 활하중
- F: 유수압
- H: 토압
- W: 풍하중
- T: 온도, 크리프, 건조수축하중
- E: 지진하중

2.3 라이닝의 인장스프링 제거

일반적으로 라이닝 단면의 전산해석시 주변압반은 스프링요소로 모델링되고 스프링은 압축력에만 저항하고 인장력에는 저항하지 않는다. 따라서 인장력을 받는 스프링은 제거하여야 한다.

이러한 해석방법은 사용하는 전산프로그램에 따라 2가지로 나눌 수 있다.

첫 번째 방법은 라이닝 주변에 전체스프링을 모델링한 후 하중을 적용시켜 해석을 하고 해석결과를 참조하여 해석자의 판단에 의하여 인장력을 받는 스프링을 판별하고 제거한 후 재해석하여 반복적으로 스프링을 제거한다. 최종적으로 인장력을 받는 스프링이 없을 때까지 수행하여 해석결과를 얻는다.

두 번째 방법은 프로그램에 의하여 자동적으로 인장스프링을 제거하는 방법이다. 이 방법은 프로그램의 객관적인 기준에 의하여 첫 번째 방법 보다 정확하고 빠른 결과를 기대할 수 있다.

첫 번째 방법으로 해석시 제거되는 스프링의 위치는 설계자의 판단에 따라 다르게 결정된다. 즉 설계자의 개인적인 경험에 의하여 다른 결과를 만들게 된다.

이러한 이유로 바쿰 가배수 터널의 라이닝 해석에는 설계자의 개인적인 차이를 배제하기 위하여 자동계산 프로그램을 사용하였다.

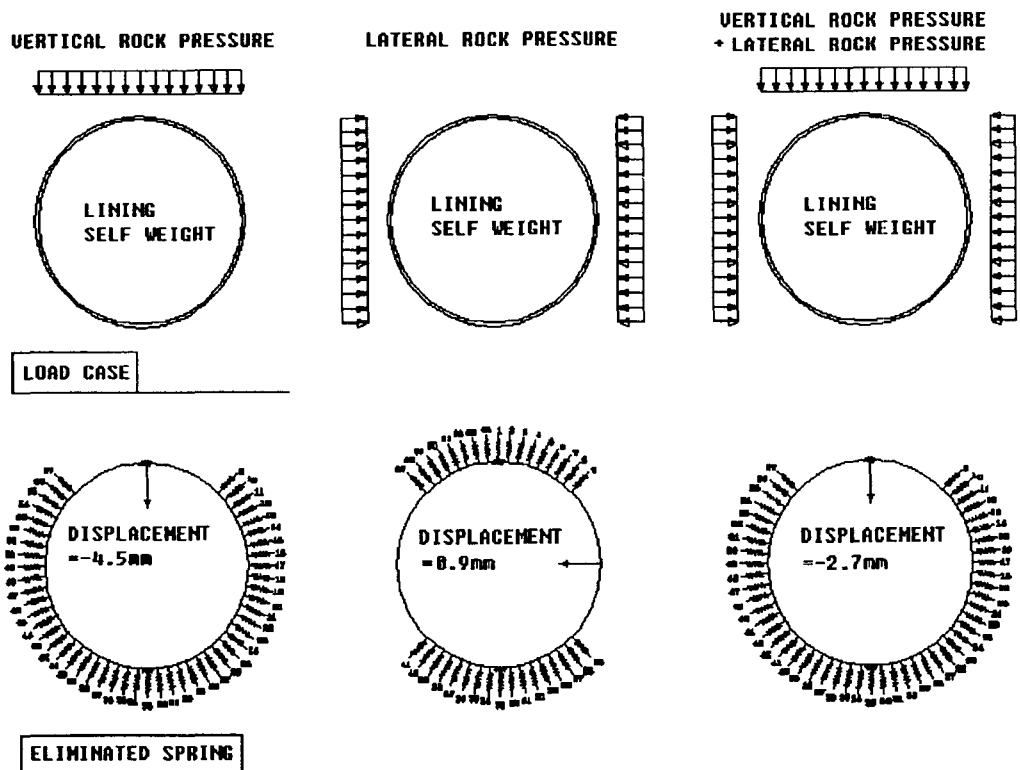


Fig. 2. Load combination cases without water pressure (Rock TYPE F)

2.4 안전률(γ)

철근콘크리트 라이닝 설계는 독일의 시방규정인 DIN 1045³⁾에 준하여 수행되었다.

직접구조물에 하중이 작용하는 경우

$$\gamma = 1.75 \text{ (연성파괴인 경우)}$$

$$\gamma = 2.10 \text{ (취성파괴인 경우)}$$

간접적으로 하중이 구조물에 작용하는 경우

$$\gamma = 1.00$$

3. 라이닝 단면설계와 해석결과

Fig. 2는 외부수압이 작용하지 않는 경우의 스프링이 제거된 상태와 변위를 나타내고 Fig. 3은 외부수압이 작용하는 경우를 나타내고 있다.⁴⁾

두 경우 모두 암반의 이완하중의 수직성분만이 작용하는 경우 최대변위가 나타나고 있다.

암반의 이완하중의 수직성분과 수평성분이 동시에 작용하는 경우 수평성분이 수직성분으로 인하여 Spring Line에서 발생하는 수평변위를 억제하기 때문에 수직변위가 감소하였다.

Fig. 4는 해석결과(Table 3)의 부재력으로 설계된 터널의 단면을 나타내고 있다.

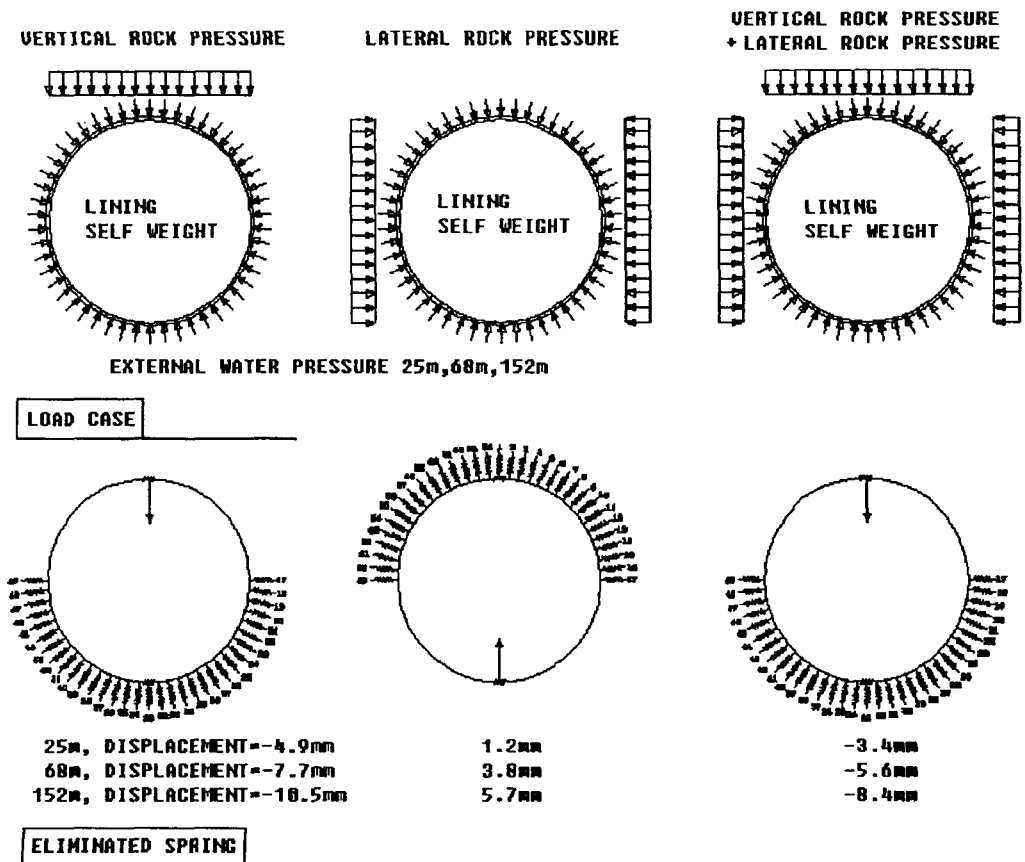


Fig. 3. Load combination cases with the water pressure (25 m, 68 m, 152 m) (Rock TYPE F)

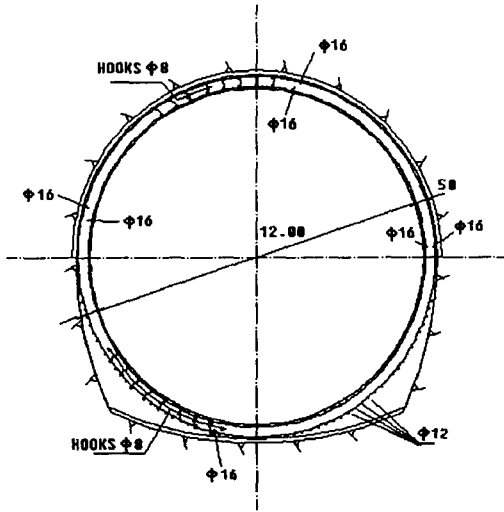


Fig. 4. Typical section of the reinforced concrete lining of Bakun diversion tunnel

∴ φ16 : 주철근 BSB460 철근지름 16 mm
Hooks φ8 : 간격유지철근 BSB460 철근지름 8 mm

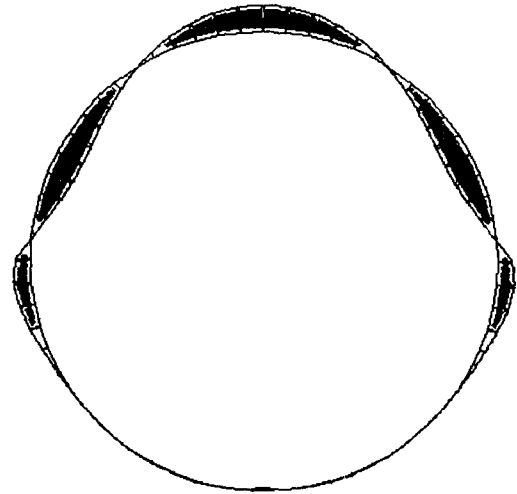


Fig. 5. Typical bending moment diagram of reinforced concrete lining section

Table 3. Result of structural analysis of the tunnel lining

External water Pressure	Rock Type	Rock Pressure	Displacement (mm)	Max. Moment (kN · m)	Max. Shear Force (kN)	Max. Axial Force (kN)	
Non external water pressure	A	Vertical	2.7(01)	107.42(01)	42.36(06)	1011.73(33)	
		V+L	0.9(01)	28.62(01)	26.43(06)	433.07(33)	
	F	Vertical	4.5(01)	148.97(01)	106.94(60)	983.58(33)	
		Lateral	0.9(17)	45.42(15)	41.13(19)	495.55(33)	
		V+L	3.7(01)	100.18(01)	82.36(06)	1072.52(33)	
		Vertical	3.7(33)	72.29(21)	145.77(18)	2203.29(33)	
25 m related to top of lining	A	V+L	3.3(33)	55.96(20)	125.52(18)	2228.08(33)	
		Vertical	4.9(01)	139.97(1)	194.85(16)	2234.23(33)	
	F	Lateral	1.2(33)	54.69(33)	131.25(27)	2316.71(33)	
		V+L	3.4(01)	57.56(13)	122.62(18)	2326.14(33)	
		A	Vertical	7.2(33)	113.10(20)	281.38(16)	4875.48(36)
			V+L	6.6(33)	96.28(19)	272.26(16)	4902.05(33)
68 m related to top of lining	F	Vertical	7.7(01)	163.00(13)	318.13(16)	4909.90(33)	
		Lateral	3.8(33)	74.50(13)	262.03(28)	4998.86(33)	
	V+L	V+L	5.6(01)	72.68(13)	255.41(18)	5008.91(33)	
		Vertical	8.8(33)	209.58(17)	566.07(13)	10249.21(35)	
152 m related to top of lining	A	V+L	8.2(33)	176.20(16)	550.23(11)	10286.90(33)	
		Vertical	10.5(01)	312.45(14)	595.77(08)	10362.70(33)	
	F	Lateral	5.7(33)	141.77(10)	537.88(15)	10409.00(33)	
		V+L	8.4(01)	158.84(15)	540.30(24)	10477.60(33)	

(·) : Node number (see Fig. 1)

전체 터널구간은 시공성을 고려하여 무근단면을 포함하여 5가지의 단면으로 구분 설계하였다. 5가지의 단면은 최적화 설계에 근접하기 위하여 암반의 구조적인 조건을 상세히 고려하여 설계되었다.

설계에 적용된 재료는 입찰기준에 따라 콘크리트, B35(DIN 1045)를 사용하고 철근, BSB460 BS(4449)를 사용하여 설계하였다.

4. 결 론

암반터널의 굴착단계시의 상태는 FLAC 프로그램을 사용하여 라이닝 구조계산을 하기 전에 수행하였으며 Rock Type A(Table 1)의 경우 암반의 자체지지력에 의하여 터널의 천단부에 이완영역이 나타나지 않았다.

이러한 FLAC 프로그램의 굴착단계 재해석을 통하여 Plug 하류부의 암반 상태가 양호한 부분은 기존의 철근콘크리트 라이닝 단면에서 무근콘크리트 라이닝 단면으로 변경하였다.

당초(입찰시)설계된 각각의 단면(라이닝 Type 1, 2, 3, 4)에 사용된 철근량은 1.209 ton/m, 0.990 ton/m, 1.004 ton/m, 1.676 ton/m로 설계되어 있었다.

시공단계의 상세 설계시에는 계산된 부재력을 만족하면서 사용철근량을 최소화하기 위하여 상세한 해석을 통하여 주철근의 간격과 크기를 조절, 당초 BOQ 전체 소요철근량 5,985 ton을 2,178 ton으로 변경하였다.

이러한 상세한 설계변경으로 전체공사기간을 단축시키고 공사비용을 크게 절감할 수 있었다. 그러나 시공중 계측결과와 암판정 결과를 근거로 역해석을 한다면, 불필요한 철근콘크리트 물량의 효과적인 절감이 가능하며, 이는 추후과제로 설계변경 실시하였다.

참 고 문 헌

1. EKARAN BERHAD, 1995, BAKUN HYDRO -ELECTRIC PROJECT Tender documents.
2. Dr. Bernhard Maidl, 1988, Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus (2).
3. Beuth Verlag, 1988, DIN 1045 Structural Use of Concrete. Design and Construction.
4. Dong-Ah const. 1996, Calculation Report of the BAKUN DIVERSION TUNNEL.