トンネル坑口部の落石耐力の評価

㈱荒谷建設コンサルタント　正会員　○川本　篤志
㈱荒谷建設コンサルタント　正会員　　久保　修治
㈱荒谷建設コンサルタント　正会員　　多賀谷宏三

１．はじめに

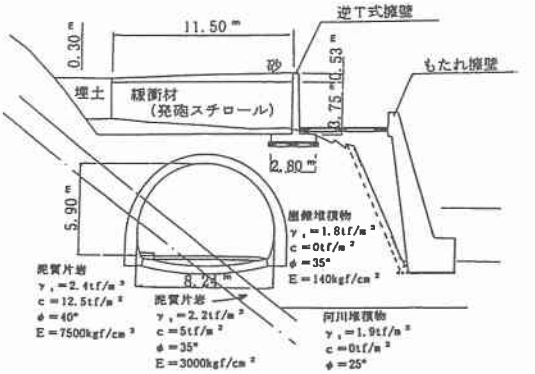
北海道豊平トンネル坑口崩壊事故以来坑口部の安全性の確保が望まれている。しかし、この問題を解決する工法及び解析手法に関する明確な仕様書は存在していない。本文では、坑口の解析手法として落石による衝撃荷重を静的荷重に置き換えるロックシェッドの設計手法を用い、トンネル坑口落石耐力の評価を行ったのでその結果を報告する。

２．坑口構造及び地盤特性

トンネル坑口の土被り2.0ｍでは、大規模な落石衝撃力に対しほとんど効果が無いので、ロックシェッドなどの落石対策として使用されている発砲スチロール緩衝材を用い、緩衝効果の向上を計る構造とした。

図－１に坑口断面形状及び地質概要を示す。

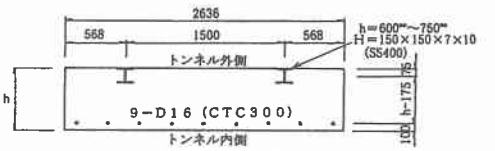
山側は泥質片岩がほぼ斜面に平行に確認でき、谷側は崖錐及び河川堆積物が存在する。この地質状態を踏まえ、道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造物編[1]により、地盤をバネに置き換えてモデル化を行った。



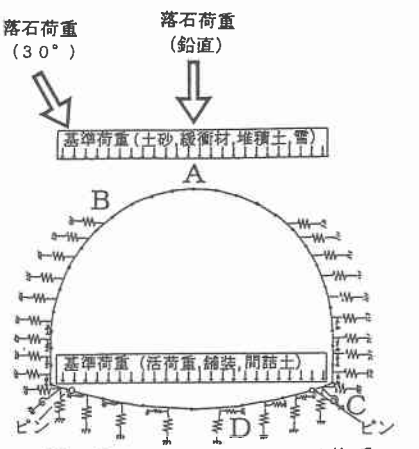
図－１　坑口断面及び地盤特性

３．解析法、解析モデル及び解析ケース

解析幅の覆工断面を図－２に示す。解析幅は落石の大きさより決めた。解析モデルを図－３に示す。坑口鉄筋コンクリートは折線の線材とし、地盤は鉛直・水平又は水平のみの線形バネとした。インバートアーチ両端部は鉄筋がつながっていないのでピン結合とし、隅角部は幅広で地盤反力が回転に効くので回転バネを設けた。上半分のバネは水平バネのみとし下半分は水平・鉛直バネ支持とした。荷重条件を表－１に示す。解析は二次元弾塑性骨組解析によった。鉄骨は等価な鉄筋におきかえ、Ｍ－φ曲線は鉄筋コンクリートのデータを引用した。なお、各ステップの緩衝材がある場合の落石荷重は文献[2]によった。



図－２　覆工構造（落石載荷幅）



図－３　解析モデル及び荷重

４．解析結果及び考察

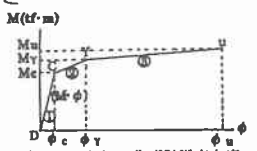
解析結果の代表例として、ステップ２の鉛直荷重のケースの変形・応力を図－４に示す。

１）変形，応力及び部材の塑性化

図－４より、鉛直荷重に対し頂部のへこみ、右下隅角部の沈下及びはらみ出しの様子がわかる。絶対値は小さいが、軟弱地盤側へ変形している。軸力はほぼ一様でアーチ効果がよく出ている。また、インバートアーチの軟弱地盤部に大きな曲げモーメント，及び隅角部に大きなセン断力が発生している。

表－1 解 析 条 件 及 び 変 位・応 力

解析ケース 緩衝材 [落石条件]	落石衝撃力		応力 (kgf／cm²)		変 位 (mm) 位置	破 壊 形 態				備 考
							M、φ	M－φ曲線上の位置		
ステップ1 発砲スチロール 厚さ：3.75 m 重量：1.5tf 落下高：40 m	鉛直	P＝31tf q＝11.76tf／m	σc	41.1(105.0)	2.92 C点 [1/1700]	A	21.76,	1.95×10⁻⁴	①	いずれも標準荷重に落石荷重を加えた。 ( ) 内：許容応力度（kgf／cm²） [ ] 内：変形率 頂部鉛直変位／内空高さ ，底部水平変位／内空幅
			σs	609.7(1800)		B	−28.15,	−2.31×10⁻⁴	①	
			τm	2.05(5.40)	3.21 A点 [1/1800]	C	−62.84,	−2.89×10⁻⁴	①	
				照査箇所C		D	35.99＞	(3.9) ※1	−	
	斜め (30°)	P＝31tf q＝8.70tf／m	σc	35.5(105.0)	2.58 C点 [1/1900]	A	18.87,	1.69×10⁻⁴	①	
			σs	521.3(1800)		B	−28.25,	−2.53×10⁻⁴	①	
			τm	1.91(5.40)	2.75 A点 [1/2100]	C	−54.21,	−2.49×10⁻⁴	①	
				照査箇所C		D	31.72＞	(3.9) ※1	−	
ステップ2 発砲スチロール 厚さ：7.00 m 重量：8.1tf 落下高：40 m	鉛直	P＝99tf q＝21.38tf／m	σc	48.4(105.0)	1.52 C点 [1/5400]	A	33.85,	2.92×10⁻⁴	①	
			σs	1071(1800)		B	−50.32,	−4.34×10⁻⁴	①	
			τm	0.51(5.40)	5.58 A点 [1/1100]	C	− 5.81,	−2.68×10⁻⁵	①	
				照査箇所B		D	※2		−	
	斜め (30°)	P＝99tf q＝16.40tf／m	σc	41.8(105.0)	1.53 C点 [1/5200]	A	28.67,	2.48×10⁻⁴	①	
			σs	989.8(1800)		B	−46.08,	−3.98×10⁻⁴	①	
			τm	0.39(5.40)	5.98 A点 [1/990]	C	− 6.23,	−2.76×10⁻⁵	①	
				照査箇所B		D	※2		−	



※1インバート部の曲げ引張応力度
※2曲げ引張応力度が許容値を大きく越えているので剛性をゼロとした。

この曲げモーメントの大きい部分をのぞけばこの程度の落石であれば応力及び変形に関し問題とはならない。

ただしインバート部は補強の必要がある。

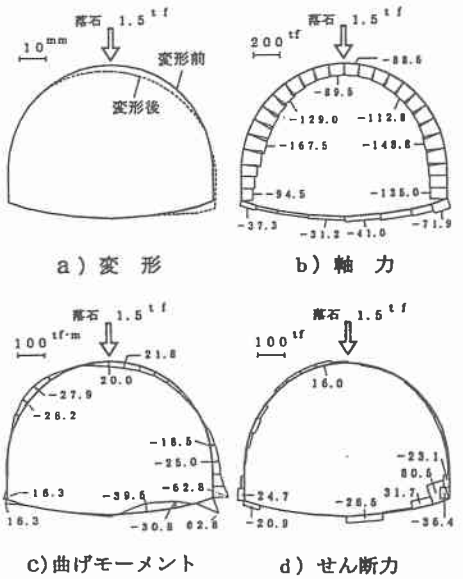
破壊形態より各部の部材はインバート部をのぞけば弾性域にある。

以上より、緩衝材としての発砲スチロールの厚さはステップ1，2に対し、それぞれ3.75 m，7.00 m程度あれば良い。

2）解析法について

(1)落石衝撃力

落石衝撃力は剛床上に設置した緩衝材上に岩が落下する場合の実験式として与えられている[2)]。変形しやすい構造物が下にあれば緩衝材と構造物が同時に変形し挙動は変わると考えられる。しかし、解析結果にも見られるようにトンネルの変形は小さいので落石荷重を静的荷重におきかえる解析法はほぼ妥当であると考えられる。



図－4 解 析 結 果（衝撃荷重条件）

(2)地盤の支持条件

地盤を線形バネとして解析した。変形が小さいこともあり、ほぼ妥当な取扱いと考えられるが、さらに大きな変形になる場合（落石が大きい場合，緩衝効果が少ない場合など）には非線形性を考慮する必要がありそのバネ定数の設定法に注意を要する。

5．おわりに

落石衝撃力がトンネル坑口部に作用した場合のトンネルの応力・変形などを2次元弾塑性骨組解析により求めた。発砲スチロール緩衝材の厚さも得られ、本解析ケースでは解析のモデル化もほぼ妥当と考えられる。しかし、大きな非線形性を考慮する場合の解析法及び地盤の取扱いには更に検討が必要である。

【参考文献】

1）日本道路協会，道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造物編，平成8年12月.

2）吉田博，松葉美晴，法貴貫志郎，久保田努，“発砲スチロールの落石に対する緩衝効果に関する実験的研究”，土木学会論文集 第427号，Ⅵ－14，1991年3月.