

水路トンネルの最小断面について

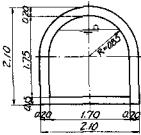
1. はじめに

水路トンネルにおいて計画通水量が少い場合設計断面は小型でその目的は達するが施工は困難となり極端な場合は施工不可能となる。このような場合施工上から経済的な最小断面を如何にすべきかについて、作業員、施工機械の稼働空間について検討しこれまでに施工した小断面トンネルの実績と踏まえ述べる。

2. 小断面トンネルの断面は通水量より施工計画により決まる。

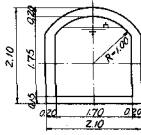
いま後述する堀削高2.10m、堀削中2.10m、覆工厚0.20m(但しインバート厚0.15m)の各断面について、標準的な水路勾配1:1,000、粗度係数を0.015とし検討してみると、

(1) 上部半円下部短形型



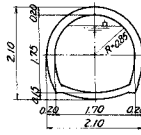
$$Q_{max}=3.416 \text{ m}^3/\text{s}$$

(2) 上部穴円下部短形型



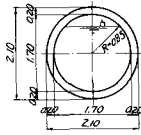
$$Q_{max}=3.549 \text{ m}^3/\text{s}$$

(3) 標準馬蹄形型



$$Q_{max}=3.097 \text{ m}^3/\text{s}$$

(4) 円形型



$$Q_{max}=2.921 \text{ m}^3/\text{s}$$

すなわち計画通水量が約300~350 m³/s以下のトンネルの断面は施工計画によって決る。

3. 小断面トンネルの経済的施工

一般的にトンネル堀削でいえることであるが特に小断面トンネルでは限られた稼働空間で施工機械と作業員によって月進を伸ばし単位長の工事費を最小にすることが必要である。このためにはずり積込、運搬と能率的に行うため機械化施工とならざるを得ないが、

- (1) 小断面トンネルの機械化施工では作業員の作業環境とともにずり積込機械とずり運搬機械の稼働空間および覆工時の作業空間によって断面が制約される。
- (2) 穿孔心抜きVカットは堀削中3.00m以上が望ましいが小断面の心抜きはノーカットに近くより火薬量も余堀余巻も増加する。
- (3) 多量の湧水がある場合の支保工区間は排水管、給気管、換気管、給水管および電力照明設備等の配管、配線のため施工に必要な作業空間が制約される。

ずり積込機の稼働高は大空650B級で1.97mであり(RS55 1.86m)余裕高を見込んで2.10m~2.20mの高さが必要である。ずり積込機はベルトコンベヤ付機種を選んだ方が高能率が期待できトンネル堀削のコスト引下げに役立てることができる。このベルトコンベヤ長を5.60m(水平長)にすると4.5m級ずり運搬鋼車(中150m、高さ1.35m、長さ5.25m改造率)1車をベルトコンベヤ下に挿入でき2車同時にずり積込みができる。

ずりを高能率搬出するには、このように4.5m級鋼車2車使用も1方法であるが、一般に小断面トンネルの1発破分のずり量は10m³程度であるのでクエリビッカーまたは待避線設置の1.5m³~2.0m³の鋼車の列車編成か10m³程度のシャトルカーあるいはエプロントレーン等により1発破分のずりを一挙に積込んで迅速なずり搬出を図ることがトンネル堀削の進行を伸ばすことになる。

4. 最近の実績

昭和48年の石油ショック後の水力の緊急開発として建設したK発電所のトンネルの最小断面は上部穴円下部短形型(地質粘板岩、砂岩互層)堀削高は前記により2.20m、堀削中は前記ずり運搬車の全中は1.40mであり、径3のパイプ支保工を使用し両側の余裕を0.15mとしかつずり積込機のステップ中を考慮して1.90m、覆工厚を0.15mとした。施工結果片口1,500mで堀削の平均月進150m、最高月進210m(ずり出し、エプロントレーン使用)で前期の目的は達したが、現在の施工機械で作業するには

- (1) ロッカーショベルのヘッドカバーをはずした状況の作業となり安全面で問題がある。(現実は無事故無災害であった。)

- (2) 湧水が多いとき(最大 $6.5\text{ m}^3/\text{min}$)支保工区間の排水、給気、換気の各配管、配線が困難であった。
- (3) 支保工は径3のガス管で岩盤の支持はできるが覆工計画で巻厚を 0.15 m とすると支保工前面より型枠まで正規に建込んで 0.05 m で至難の業となりコンクリートの打設作業も困難であるとともに打設結果も良くない。等のためKに続くF発電所のトンネルの最小断面の掘削中は 2.10 m とした。(上部半円下部短形型、地質粘板岩、砂岩の互層、掘削高 2.45 m 覆工厚 0.20 m インバート 0.15 m)施工結果同一片口 $1,000\text{ m}$ 級の掘進長に対し
- (1) 設計掘削断面積で約20%、設計コンクリート断面積で約35%の増量となったが施工性は向上した。
- (2) 掘削の月進はF発電所が相当少いが(平均 $105\sim 110\text{ m}/\text{月}$ 、最大 $155\text{ m}/\text{月}$)、このことはこのトンネルが発電所工事の内て工程上フリチカルになっているかどうかで決まるもので、この場合ずり運搬車の機種選定によりK発電所なみの掘進はできるが掘削コストは高くなる。
- (3) 断面の増中、増高による余堀、余巻に大差はなく、大葉使用量はK発電所で $390\text{ kg}/\text{m}^3$ 、F発電所で $250\text{ kg}/\text{m}^3$ で約36%減少したがこのことは同一地質でも掘削岩盤の硬さの差、作業員の熟練度もあり一概に言えない。

5. これまでの小断面トンネル

いま九州電力(株)の明治40年以来建設された水路トンネルのうち通水量が $3.00\sim 3.50\text{ m}^3/\text{s}$ 以下の小断面トンネルの径間長 $1,000\text{ m}$ を超える10例(T.4.~S.57.)、同 $1,000\text{ m}\sim 500\text{ m}$ 17例(T.6.~S.32.)、同 $500\text{ m}\sim 200\text{ m}$ 28例(M.40.~S.57.)計55例について検討してみると

- (1) 径間長 500 m を超える小断面トンネルの掘削は高さ $2.00\text{ m}\sim 2.20\text{ m}$ 、中 $1.70\text{ m}\sim 2.00\text{ m}$ のトンネルが非常に多い。坑内排水を下げ越しによって行い、覆工は簡易なセメントルにより平行作業で施工したと考えられる。
- (2) 施工機械の検討とK、F発電所の実績と踏まえ筆者は片口 $1,000\text{ m}$ 級の水路トンネルの経済的な施工の最小掘削断面は高さ $2.10\text{ m}\sim 2.20\text{ m}$ 、中 2.10 m を提案しているが、その施工計画が昭和30年代までの掘削と覆工の平行作業および下げ越しによる坑内排水と最近の機械施工による能率的なトンネル掘進のためのずり積込機の稼働空間、支保工区間の運搬車の稼働空間および覆工時の作業空間の確保と異なっているが、トンネルの最小掘削断面の寸法は、ここ80年の間に大きな変化はなく、径間長 $1,000\text{ m}$ 級についてはその感が深い。
- (3) 径間長 500 m 以下の小断面トンネルの掘削は高さ $1.70\text{ m}\sim 2.00\text{ m}$ 、中 $1.50\text{ m}\sim 1.70\text{ m}$ のトンネルが大部分である。工程と掘削、覆工の分離施工に支障がない限り経済的な施工の最小断面は中空 500 m 級(全高 1.70 m)のずり積込機、ずり運搬機として $1\sim 3\text{ m}^2$ (全中 $1.15\text{ m}\sim 1.30\text{ m}$)を使用すれば高さ 2.00 m 、中 1.90 m (覆工 0.20 m 、インバート 0.15 m)まで縮小することが可能と考えている。

6. むすび

片口 $1,000\text{ m}$ 級以上のトンネル掘削の最小断面として高さ $2.10\text{ m}\sim 2.20\text{ m}$ 、中 2.10 m 、片口 500 m 以下のそれは高さ 2.00 m 、中 1.90 m を提案したが、この断面ではずり運搬機の中を 1.20 m 以下(後者の場合 1.00 m 以下)としなければ掘削と覆工の平行作業はできない。ずり運搬機の改造により運搬容量が減少すると掘削の進行に支障を来しますので、この最小断面では掘削の進行に重点を置き分離作業を原則としている。覆工に対する考え方として地山荷重は短期的には鋼製支保工で対応させることにより脱枠も早期にできるのでより速い進行が確保でき、掘削と覆工の平行作業で互に能率を阻害するより分離作業の方が経済的にも工程上も有利なことがある。また最小断面は施工計画で決まったものであり、その通水量は断面の通水能力より少ない。通水量が側壁部分のみで足りる場合トンネルのアーチ無巻区間ではその設計水位に 0.20 m の余裕をもった高さまでの側壁コンクリートの覆工で足りる。