

トンネルインバート上部の保水庫としての 活用法に関する提案

河原 幸弘¹・日根 幸雄²・榎田 敦之¹・森下 光治²・進士 正人³

¹正会員 ㈱エイト日本技術開発 関西支社 (〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39)
E-mail: kawahara-yu@ej-hds.co.jp

²非会員 ㈱エイト日本技術開発 関西支社 (〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39)

³正会員 山口大学教授 大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目-16-1)

(1) 地震等の自然災害時の非常用水源, (2) 道路路面の無散水融雪の水源, (3) トンネル火災時の非常用水源等の目的で, トンネルのインバートと舗装の間の空間を水槽構造として, そこにトンネルからの湧水を貯水することを提案する. 標準的な道路2車線トンネルとして延長1,000mのトンネルを例に取って試算した結果, 建設費(直接工事費)は約9,000万円で, 地震時の人命救助として, (1) 15,000人日分の必要生活水が確保出来, (2) 融雪に関しては115m分の道路の無散水融雪が可能で, (3) 防災等級Aのトンネルで17時間の消火活動可能な水量が得られる. したがって, ①地震が発生したときに孤立しやすい地域や, ②無散水融雪を必要とする道路に隣接するトンネルではインバート保水庫は検討に値する.

Key Words : tunnel, storage of tunneling spring water, earthquake, snow melting, emergency use

1. はじめに

トンネルのインバートと舗装の間の空間を水槽構造(以下, 保水庫)として, 保水庫にトンネルからの湧水を貯水すると, 以下のことに活用できる.

- (1) 地震等の自然災害時の非常用水源
- (2) 道路路面の無散水融雪の水源
- (3) トンネル火災時の非常用水源

そして, その建設費は効果に比べて以下のように比較的安価である. 保水庫の水源は地下水であるトンネル湧水のため無料であり, 保水庫はトンネル内に作られるため, 用地費も不要である.

建設費の詳細は, 2. で後述するが, トンネル構造上インバートを必要とする区間に保水庫を建設する場合はインバート掘削は不要であるため, 水槽構造構築費は約30万円/m(直接工事費)程度と考えられる.

また, 貯水される水の品質は以下のように良質である.

トンネル湧水は地下水であるので様々な性質はあるが, 日本の地下水は概ね飲用水に適している. トンネル構築後2~3年は吹付けコンクリート等の影響で強アルカリ性を示し飲用には適さないが, それ以降は飲用可能と思

われ, 水温も夏冬に関わらずその土地の平均気温より1~2℃高く, 西日本では1.5~1.7℃程度である. したがって, 冬は温かく夏は冷たい良質の水が確保できる.

以上のことから, インバート保水庫を実用化するには, 今後, 細部の検討が必要となるが, 安価で用地の制約もなく, 良質の水が得られるため, 実用化に向けた検討に値する自然エネルギー利用方法と考える.

2. トンネル保水庫の構造と建設費

(1) トンネルの仮定

まず, 議論を具体化するために, 図-1に示す標準的な道路2車線トンネルを例に記述する.

- a) トンネル延長 1,000m
- b) インバート区間延長は, 日本の標準的な地質を想定して, 以下の4箇所で計300mとする.

- ①起点側坑口(1箇所) 100m区間
- ②終点側坑口(1箇所) 100m区間
- ③中間部(2箇所) 2×50m=100m区間

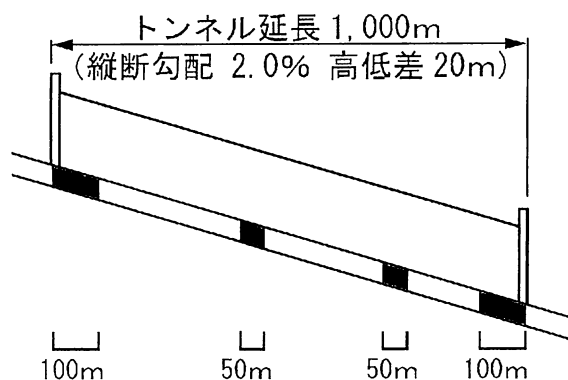


図-1 インバート区間

(2) トンネル保水庫の構造

図-2 に保水庫の構造を示す。

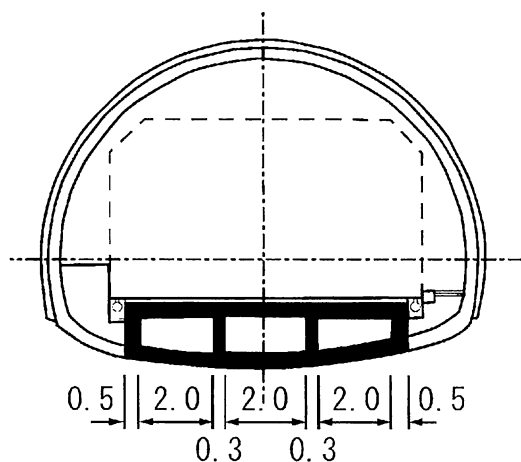


図-2 保水庫の構造

水槽断面積 5 m^2

水槽容積 $5 \text{ m}^2 \times 300 \text{ m} = 1,500 \text{ m}^3$

(3) トンネル保水庫の建設費（直接工事費）

鉄筋コンクリート構造断面積 $= 8 \text{ m}^2$

鉄筋コンクリート構築単価 $= 5 \text{ 万円/m}^3$

→ 建設費 $= 5 \text{ 万円/m}^3 \times 8 \text{ m}^2 = 40 \text{ 万円/m}$

【比較資料¹⁾：幅 4m × 高 4m の函渠費 $\approx 35 \text{ 万円/m}$ 】

トンネルインバート区間で本来必要となるインバートコンクリートと路盤、舗装の一部が保水庫建設により不要となるため、上記より 10 万円/m を控除する。

以上より、トンネル保水庫の建設費

$= 40 \text{ 万円} - 10 \text{ 万円} = 30 \text{ 万円/m}$

トンネル全体の保水庫建設費

$= 30 \text{ 万円/m} \times 300 \text{ m} = 9,000 \text{ 万円}$

3. トンネル保水庫の効果

(1) 地震等の自然災害時の非常用水源

日本ではいつどこで地震が起こるか判らない。地震が起こった時に一番必要なものは、水と言われている。飲み水、トイレの水、山火事の消火用水等々で、水は多くの用途がある。そのために、自動販売機に水を保存すればよいとか、学校のグラウンドの下に保水庫を作るとか種々の議論があるが、水の交換等の定期的かつ半永久的な維持管理を考えると決定的な名案がないのが現状である。

そこで我々は、トンネルのインバート部に水を保存し、トンネル湧水を利用して常時保水することによって、地震の被災時に救助として有効に活用できると考える。

a) 人命救助

仮に地震で被災し山中に人が取り残され、道路の分断により救助が出来ない状況を想定する。そのとき近くにトンネルがあり、そのインバート部に水が保水されており、水道の蛇口を設置して容易に利用できるとすると、人間の生活用水としては無尽蔵と思えるほどの水量が得られる。

人間一人当たり必要飲料水を 2 L/日

人間一人当たり必要生活水を 100 L/日

と仮定すると、上記の仮定したトンネルでは、

必要飲料水は、 $1,500 \text{ m}^3 \div 0.002 \text{ m}^3/\text{日} = 750,000 \text{ 人日}$

必要生活水は、 $1,500 \text{ m}^3 \div 0.10 \text{ m}^3/\text{日} = 15,000 \text{ 人日}$

しかも、冬であれば 15°C 程度の温かい水が得られるので、工夫をすれば暖を取ることもできる。

b) 火災消火

地震で山火事や家屋火災が発生したと仮定する。

消防隊が近づくことが出来ても、山中では一般に消火用水の確保が難しい。

保水庫下流側に水道の蛇口と同様に消防隊用の給水栓を設置しておけば消火用水として利用できる。防災等級 A 以上のトンネルでは両坑口付近に給水栓が設置されているため、それに保水庫を接続しておくだけで使用可能である。

一般に消防隊のホースから放水される水量は $0.4 \text{ m}^3/\text{分}$ である。

$1,500 \text{ m}^3 \div 0.4 \text{ m}^3/\text{分} = 3,750 \text{ 分} \approx 62 \text{ 時間}$

すなわち、上記の 1km のトンネルでは 1 本のホースから 62 時間放水できる水量が確保できる。

(2) 道路路面の無散水融雪の水源

a) 積雪寒冷地のトンネル坑口付近の状況

トンネルの坑口付近は日陰等で凍結しやすい場所が多く、積雪地の道路では雪のないトンネル坑内から、積雪凍結のある坑外への走向環境が急激に変化するため、冬季は交通安全上の積雪凍結対策が必要となる。

多くの道路は除雪車による機械除雪で対応している

例が多いが、山間部では、連続するトンネル間の明り区間等のように、迅速な対応が困難であったり、機械除雪した雪の捨て場が立地条件からないのが実情である。

その代替設備として散水して融雪する方法もあるが、散水した水がその後凍結する場合もあるため、最近では舗装を温めて融雪する無散水融雪方法が着目されている。

b) 無散水融雪設備の概要

無散水融雪の熱源は電気・太陽熱・風力等の様々な方法が開発されているが、表－1に示すように、いずれもイニシャルコストやランニングコストが高く、十分に普及していないのが現状である。北海道や東北地方等の特別に寒い地域を除いては、地下水や地熱を利用する方法が現時点では最も安価であるため主流になりつつある。

表-1 自然エネルギー融雪のコスト²⁾

熱源	方式	イニシャルコスト 万円/m ²	ランニングコスト 万円/m ²
地熱	極浅層地中熱採熱方式	10	0.6
地下水	地下水循環還元方式	8	0.7
海水	海水熱源循環ヒートポンプ方式	10	2.6
空気	空気熱源ヒートポンプ方式	12	4
太陽	太陽熱温床循環方式	15	1.5
風力	風量発電ローターヒータリング方式	17	0.5

(注)ランニングコストは20年間の数値

しかし、地下水を利用する場合には、1 m² の路面を融雪するのに約 0.5ℓ /分の地下水が必要となる。

仮に、1 km のトンネルがあり、湧水量が 0.1 m³ /分とすると 200 m² (車道幅を 8 m とすると道路延長は 25 m) の路面しか融雪できない。

そのため、無散水融雪として使用した水を地中で循環して温める深層熱鋼管杭方式 (図－3) やトンネル路盤内で温める極浅層地中採熱方式が開発されている。

いずれもイニシャルコストは約 10 万円 / m² 程度必要である。

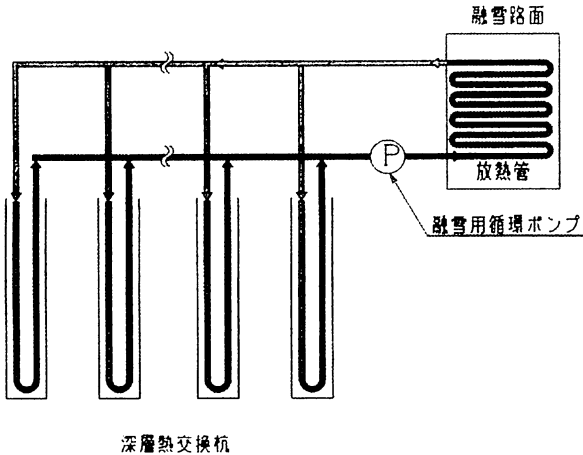


図-3 深層熱鋼管杭方式³⁾

c) 保水庫を利用した無散水融雪の効果

上記のとおり、概ね 1 km のトンネルでは約 1 500 m³ の保水が可能で、その水を使うことで

$$1\,500\text{m}^3 \div 0.0005\text{m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2 = 3.0 \times 10^6 \text{分} \cdot \text{m}^2 \\ \approx 5.0 \times 10^4 \text{時間} \cdot \text{m}^2 \approx 2\,080 \text{日} \cdot \text{m}^2$$

の融雪が可能である。

0.1 m³ / 分の湧水があると、1 500 m³ の保水庫を満水にするには

$$1\,500\text{m}^3 \div 0.1\text{m}^3/\text{分} = 15,000 \text{分} \approx 12 \text{日である。}$$

すなわち、12 日で保水庫は満水になる。

一般に無散水融雪が適用される地域は、気温が氷点下以下となる時間は早朝の数時間程度の場合が多いため、

$$2\,080 \text{日} \cdot \text{m}^2 = 12 \text{日} \times 5 \text{時間} / 24 \text{時間} \times 8\text{m} \times 104\text{m} \\ (832\text{m}^2)$$

すなわち、104 m 程度の区間の融雪が年中、無料のランニングコストで可能となる。

費用対効果は、9 000 万円 ÷ 832 m² = 10.8 万円 / m² である。すなわち、一般的な無散水融雪設備と同程度の費用である。

保水庫を利用して水循環をすれば、より長い道路区間の融雪が安価で対応可能と考える。

現在開発済みの無散水融雪設備の発想は、融雪に必要な熱量を電気や地熱から「熱量採取と使用を同時期にする」ことであるが、保水庫の発想は、使わないときも絶えず湧いてくる地下水を大量の保水庫で保水し、「熱量を貯留する」ことである。

(3) トンネル火災時の非常用水源

消火設備の水槽は以下のような場合が多い。

a) 電気室がトンネル縦断勾配の下流側にある場合

①トンネル下流側にある電気室の下に主水槽を設置しトンネル湧水を自然流下で主水槽へ導く。

②火災時にはポンプで加圧してトンネル坑内の消火栓等へ送り出す。

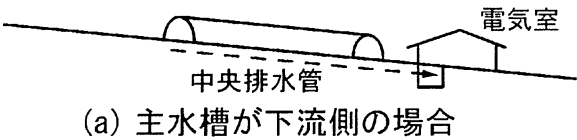


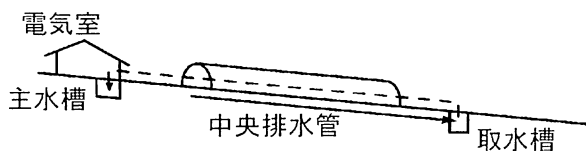
図-4 非常用消火水槽 (a)

b) 電気室がトンネル縦断勾配の上流側にある場合

①下流側に取水槽を設けて、トンネル湧水を取水する。

②取水ポンプで上流にある主水槽へ導水する。

③火災時にはポンプで加圧してトンネル坑内の消火栓等へ送り出す。



(b) 主水槽が上流側の場合

図-5 非常用消火水槽 (b)

道路トンネル非常用施設設置基準・同解説⁴⁾で、防災等級 A では一般に主水槽の大きさは消火栓、給水栓用として約 60 m³の水槽、防災等級 AA では消火栓、給水栓、水噴霧設備用として約 300m³の水槽規模と示されており、約40分間程度の消火活動を想定している。

インバート保水庫があると以下の効果がある。

①消火活動時間が40分に限らず、さらに長く対応可能となり、

$1500\text{m}^3 \div 60\text{m}^3 \times 40\text{分} = 17\text{時間}$ (防災等級 A) ,

$1500\text{m}^3 \div 300\text{m}^3 \times 40\text{分} = 3\text{時間}$ (防災等級 AA) ,

の消火が可能となる。

②保水庫を主水槽として使うことで主水槽の建設が不要となる。

4. トンネル保水庫の技術課題

トンネル内に保水庫を建設することで、トンネル構造に対して以下の技術課題があると考えられる。

(1) 地震時のトンネル構造の挙動

水を蓄えた保水庫が地震時に挙動しトンネル構造に悪影響を及ぼすことが懸念される。

地質の良し悪しがあり影響の判定は難しいが、断層や特別に地質の悪い区間でその懸念を否定できない区間は設置を避けるのが望ましい。

(2) 地下水位の上昇

トンネル周囲での地下水位は中央排水管の水位と同じと考えられる。保水庫のある断面では地下水位は保水庫の水位と同じとなる。したがって、1m 程度地下水位は上昇する。

インバートがあるため、1m 程度の水位上昇はトンネル構造に悪影響はないと考えるが、(1)と同様に地質に不安がある区間は設置を避けるのが望ましい。

(3) 中央排水管の対応

中央排水管の水を直接保水庫へ導くと、インバートの

ない区間の地下水位が上述のように 1m程度上昇するため、保水庫の水位より上方の中央排水管のみが保水庫へ流入できるように工夫した構造にする必要がある。

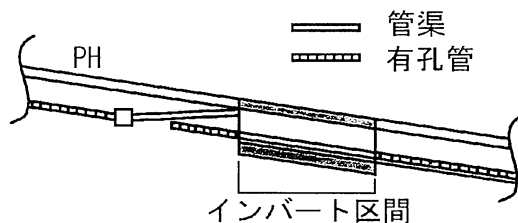


図-6 保水庫の集水

また、トンネル縦断勾配差による水圧が保水庫や送水管の内圧として作用する問題がある。この問題に関しては保水庫を 1 本の排水系統で結ぶのではなく、系統数を増やして、1系統の高低差を小さくする工夫が必要である。

以上のように、インバート区間に保水庫を建設するには、若干のトンネル構造上の技術課題はあるが、決定的な障害となるほどの課題は考えられず、設計上の工夫で対応可能と考える。

(4) 保水庫の設置箇所

保水庫の着想は以下の2点に基づいている。

①人里離れた山中でも、いつでも良質の水を得ることができる。

②保水庫建設は安価で、用地の制約がない。

したがって、トンネルのインバート区間に限定する必要はない。

a) 道路土工部

下図のように土工区間の路床、路体に保水する案も考えられる。

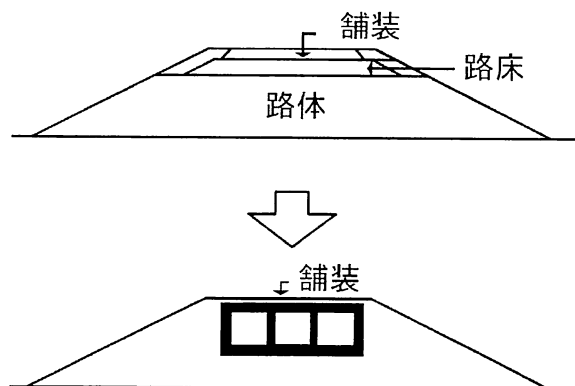


図-7 盛土区間の保水庫

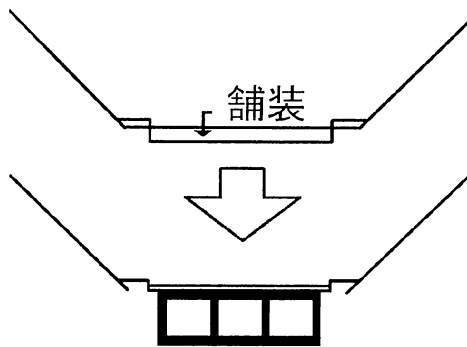


図-8 切土区間の保水庫

土工区間の保水庫には水源がないためトンネルからの湧水を利用すると考え、トンネルの縦断勾配の下流側に続く土工区間が対象になる。

この場合、道路の下が冬に温かい地下水の保水庫となるため、凍結融雪防止効果も期待できるものと思われる。

b) トンネル非常駐車帯部

トンネル内では図-9のように、良質な地質の区間、あるいは、トンネルの幅が大きい非常駐車帯に設置する案も考えられる。

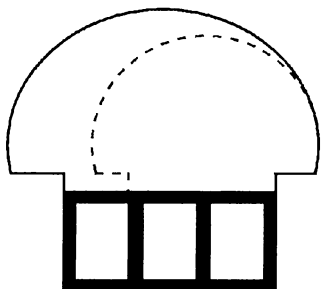


図-9 非常駐車帯部の保水庫

(5) 保水庫の形状と材質

保水庫は形状を比較的自由にできるため、現場打ちの大きな保水庫より、小さなプレキャストコンクリートまたは合成樹脂材質の小さな保水庫を作るほうが建設費が安くなる可能性もある。

5. おわりに

以上をまとめると表-2のとおりとなる。

表-2 効果と費用

効果	(1)地震等の被災時	a)生活用水確保 b)火災消火用水
	(2)冬季の積雪凍結時	無散水融雪
	(3)トンネル火災時	消火用水
費用	直接工事費 (1kmトンネルで300mの保水庫の場合)	9 000万円

直接工事費9 000 万円は1km トンネルのトンネル本体工と設備費の数%に相当する。

費用対効果の観点から高いのか安いのかは議論があるが、以下の地域では検討に値すると考える。

- ①地震が発生したときに孤立しやすい地域
- ②無散水融雪を必要とする道路

トンネル湧水は夏は冷たく、冬は温かい貴重な水であるが、ほとんどのトンネルはまったく利用せずにそのまま排水してしまっているため、考えようによっては大変な無駄をしている。

トンネル湧水は種々の用途に使用できるので、保水庫の容量は用途に応じて計画をすればよいと考える。たとえば、長い区間の無散水融雪が必要な場合はインバート保水庫の容量を大きくし、一方、被災時の生活用水確保だけならば、保水庫は必要なく、中央排水工の流末に水道の蛇口を付けるだけでよい。

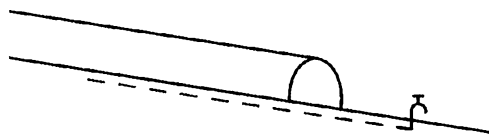


図-10 水道の蛇口

あるいは図-11 のように近隣する民家に冷暖房用水（最近、ビルの冷暖房熱源として地下水を活用する案が検討されている）としてトンネル湧水を供給する場合は、より大規模な保水庫を検討してもよい。

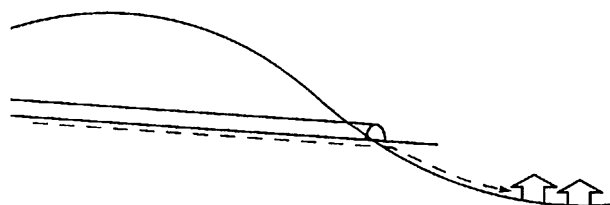


図-11 生活冷暖房としての利用

保水庫を建設することによって、冬は無散水融雪の水源地として、トンネル火災時は消火用水として、万一の地震時には救助用の水源地として、また、保水庫が満水になった後も湧き続ける余剰水は地域の冷暖房に活用可能である。

それらの目的のために、別途水槽を設けなくともトンネルインバートは水槽に近い構造になっており、そこには夏冷たく、冬温かい良質な地下水が絶えず流れ込んでいることに着目し、多角的に計画をすることは有意義と考える。

現在、まったく活用していないトンネル湧水の有効活用の糸口になれば幸いである。

参考文献

- 1) 近畿地方整備局 道路部 道路工事課：H17 年度 工事費概算単価表, p12, 2005.
- 2) 近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所：道の駅「ハチ北」融雪事業の軌跡 ～地中熱エネルギー活用への挑戦～, p84, 2006. 一部修正

3) 同上 p85

4) 日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説, 2001.

Suggestion about the utilization of the tunnel invert upper part as the storage of earth-water reservation

Yukihiro Kawahara, Yukio Hine, Atsuyuki Enokida, Mitsuji Morishita, Masato Shinji

I suggest that space between an invert and a pavement in a tunnel should be used as a storage and spring water in the tunnel should be stored for (1)emergency use source in case of natural disasters such as earthquakes, (2)water source for snow melting by sprinkling, (3)emergency water source in fighting for fire in the tunnel.

Under the condition with a typical 2 tracks-road tunnel with 1,000m in length, construction cost was calculated in this study. As a result, (1) necessary life water for 15,000 man-days could be secured, (2) the amount of the water could be enough for snow melting on 115m in road length, (3) the amount of the water could be possible for fire-fighting for 17 hours to a tunnel of disaster prevention grade A.

Therefore, I think that the invert water storage should be considered in case that (1)a tunnel is located adjacent to an isolated region for emergency such as earthquakes, and (2) a tunnel is located adjacent to a road where snow melting is needed without sprinkling water.