

トンネル工事における地下水環境問題とその評価に関する一考察

An Aspect of Groundwater Environment Problems and Measures in Tunnel Construction

西垣 誠 Makoto NISHIGAKI (岡山大学大学院環境工学科)

入江 彰 Akira IRIE (中国電力株)

我国においてトンネルは水路や交通路といった一般的な構造物として日常生活で欠かせない土木構造物である。しかし、その公共的な特質からその経済効果についての議論はきわめて難しい。本研究では、トンネル工事に起因する地下水環境問題について事例を調査するとともに、収入が見込まれる発電用の水路トンネルの事例を用いて、地下水環境問題がトンネル工事に及ぼす影響について簡易な分析、評価および考察を行った。

キーワード：地下水、環境、トンネル、経済性

(IGC:H-5, B-12, E-7)

1. はじめに

山陽新幹線大阪～広島間のほとんどがトンネルであるような印象を受けるように、国内で最も丘陵な地形を呈していると思われる中国地方においてさえトンネルの数は少なくない。中国地方では、トンネルのほとんどは山地に位置するが生活圏も山地部まで及んでおり、トンネル工事において地下水環境問題が報告される例¹⁾が珍しくない。日本全体さらに世界に目を移すと、トンネルが位置する地域の地形や地質は中国地方のそれ以上に複雑なものもあり、トンネル工事により複雑かつ多岐にわたる地下水環境問題が発生していると考えられる。

トンネルは多くの場合、例えば道路トンネルのように何らかの目的をもった地上構造物の補完的な位置付けで設置される。しかし、トンネル工事における地下水環境問題がトンネルを含むプロジェクト本来の目的にどの程度の影響を及ぼすのかを把握することは一般的に容易ではない。したがって、本研究ではトンネル工事を対象として地下水環境問題の内容や関連する調査・対策方法の事例を調査・整理するとともに、地下水環境問題がトンネルを含むプロジェクトに及ぼす影響について、経済性の観点から簡易な検討・考察を行なう。

2. 地下水環境問題がトンネル工事に及ぼす影響

記録上、歴史の中で最も古いトンネルはメソポタミアの水底トンネル(紀元前2千年頃)であると言われる。これ以降、現在に至るまでトンネルは交通路や水路など様々な

用途で使用されている。特に我国は、その国土の80%以上が山地であり、鉄道トンネル総延長2,281.6km(2003.3現在)²⁾、道路トンネル総延長3,019km(2003.3現在)²⁾および発電用導水路トンネル4,662km(2003.3現在)だけでも合計が10,000km近くに達することが示す通り、世界でも屈指のトンネル大国であるといえる。

トンネル工事では、“目にみえる環境負荷”、例えば工事中の騒音、粉塵および通行阻害等が、いわゆる“明かり設備”の工事に比べて極端に少ない。一方、トンネル工事は地下水脈に影響を与えるため、水利用等の社会環境への影響や地表植生等の自然環境への影響など“目にみえにくい環境負荷”が少なからず発生していると考えられる。この“目にみえにくい環境負荷”と工事との因果関係については、地下水そのものが目に見えないことや地下水に関連する“環境負荷”が着工から竣工までという短期間には判明しにくいといった理由から、多くの場合、明確な評価が困難である。

古くからトンネル工事は地下水との戦いであると言われるように地下水との関連は高い。また、トンネルの公共性が高い構造物であるという特質から工事の進捗が第一に考えられてきた側面もあり、施工上の問題に対しては排水工法や止水工法など様々な対策工法(表-1)が開発されてきた。しかし、事前予測や工事との因果関係の評価が難しい地下水環境問題への対策・対応は“掘ってみてからの対応(問題発生後対策)”という事後対策が主体とならざるを得ない場合が多く、また社会的にもこれが容認されてきたといえる。

近年、設計や施工の技術の進歩により断面、延長とも大きなトンネルの施工が可能となっており、トンネル工事が

地下水分布に影響を与える可能性は従来にも増して高まっている。事後対策はもちろん重要であるが、トンネル工事における地下水環境問題の事前評価や検討はますます重要となっている。

トンネル掘削による主な地下水環境問題を表-2に示す。前述のとおり地下水の動きは直接目視できるものではないため、地下水環境問題は一般的に、井戸枯渇など直接見える形で表面化する。動植物への影響やヒートアイランド誘発などは、顕在化するまでに時間がかかり、現段階では定量的な把握が難しい。地盤沈下は地下水位低下も一因であると考えられるが、現段階では地盤内応力の再配分の観点から説明されることが多く、地下水位変動による影響が議論されることはあまりない。

地下水環境問題に対する対策の現状としては、都市部ではシールド工法が用いられるほか地表部や地下の計測が密に行われ、種々の問題が解決されつつある。高圧湧水を伴うことが多い山岳トンネル工事では、施工性や安全性を確保する目的で排水工法が用いられるのが一般的であり、経済性と施工サイクルを低下させる止水工法が地下水環境問題発生防止のみの目的で採用されるケースは限られる。山岳トンネル設置に伴い発生した地下水環境問題の公表事例を表-3に示す。大規模な地下水環境問題はトンネルの経済性に大きな影響を及ぼすため、この可能性を考慮してルートが変更された例（山陽新幹線安芸トンネル、中部縦貫自動車道、九州新幹線八代～水俣間³⁾などや、影響評価に基づいて周辺環境への影響を回避した例（京都地下鉄烏丸線延伸工事（北山～国際会館）⁴⁾もある。

表-3に紹介した事例の多くは、高圧湧水や大量湧水への施工対策等の報告の一部として紹介されたものであるが、トンネルが水平井戸のようなものと考え、こういった事象が確認されなかった場合でも類似した事象が発生していた可能性がある。トンネルを計画する際には、通過点における水利用調査および影響度評価およびその対策方法について、十分な検討がなされるべきである。

以下、地下水環境問題に対する最近の対策事例について紹介する。

3. トンネル工事における地下水環境問題対策費

丹那トンネルは大規模な湧水問題が発生したことで有名であり、簡易水道の建設などの間接費を含めた補償費は全体工事費の6%に達した¹⁷⁾と言われている。しかし、昭和57年に運転開始した上越新幹線（大宮・新潟間）の工事でのその比率は、榛名トンネルで15%、中山トンネルで8%、

表-1 トンネル工事における地下水対策工法

分類	対策工法	具体的工法
地表における対策	排水工法	ディープウェル工法ほか
	止水工法	ベントナイト散布ほか
トンネル内における対策	水抜工法	先進水抜きボーリング工法ほか
	防水工法	先進グラウト工法（ケミカル、ウレタン、モルタル）ほか

表-2 トンネル工事における主な地下水環境問題

現象	影響
(1) 水位の低下 (2) 地盤の低下 (3) 水質・水量の変化	(1) 水利用（井戸、水田、溜池、沼、河川等）への影響 (2) 動物・植物への影響 (3) 既設構造物への影響 (4) 冷水による冷害 (5) 大量水による河川の排水能力への支障 (6) 汚染水による環境への支障 (7) ヒートアイランド現象

表-3 トンネルに伴う地下水環境問題の公表事例

名称	事象
中国縦貫自動車道牛頭山トンネル他 ¹⁾	かんがい用水減少
東海道本線丹那トンネル ³⁾ ・ ⁵⁾ 新丹那トンネル ⁵⁾	直上民家の亀裂・傾斜
京都地下鉄烏丸線トンネル ⁴⁾	—
湖西線雄琴第3トンネル	直上民家の亀裂・傾斜
東大阪生駒トンネル	直上地上部で直径約30mの陥没
名神高速道路新天王山トンネル	タケノコ生産量の低下
山陽新幹線六甲トンネル上ヶ原工区 ⁶⁾	地上部の沈下
山陽新幹線福岡トンネル ⁷⁾	地上部かんがい用水減少
上越新幹線中山トンネル ⁸⁾ ・ ⁹⁾	地上部での飲料用水・かんがい用水の減少、河川汚濁、養魚場への影響
神戸市道新神戸トンネル ¹⁰⁾	地上部飲料用水・かんがい用水の減少、リクリエーション用池水位低下
高千穂線高森トンネル ¹¹⁾	地上部飲料用水・かんがい用水・酒造用水等の減少
国道19号線新鳥居トンネル ¹²⁾	飲料用水減少、枯渇
JR中央線塩嶺トンネル ¹³⁾	生活用水、かんがい用水減少等
中央自動車道塩尻トンネル ¹⁴⁾	生活用水、かんがい用水減少、水田沈下等
主要地方道・湖陵掛合線才谷トンネル ¹⁵⁾	地上部生活用水の減少
中国電力新熊見発電所導水路トンネル ¹⁶⁾	地上部での飲料用水・かんがい用水の減少

その他月夜野トンネルの1%を除くと4~7%の割合となる（上越新幹線工事誌¹⁸⁾をもとに算出）。この比率の計算の際にどの費用を補償費とみなすかという基準は、比率を計

算する主体者により異なり、かつ一般的に規定されたものはないため、すべてのトンネル工事の率を並べて厳密に評価することは困難である。本研究では、以下のような考え方に基いて入手可能な資料をベースに地下水環境問題対策工事費の割合を計算し、その分析を行った。

- (1) 中国地方の4つのトンネルの事例を対象とした。対象としたトンネルはすべて発電用の水路トンネルである。対象としたトンネルの概要を表-4に示す。
- (2) トンネルに関連するすべての費用を対象とした（ただし、発注者側の事務所経費・人件費等発注者側の経費を除く）。
- (3) それぞれの費用の背景を考慮して地下水環境問題対策費のグルーピングを行なった結果、表-5に示すグループに分けて費用を算定した。なお、調査費は、地表地質踏査費や弾性波探査費などトンネル工事において一般的に実施される一般調査費と、地下水位のモニタリング費、トンネル内湧水と地表水との相関関係の調査を目的とした水質調査費など地下水環境対策を目的として実施された地下水調査費に分類した。また、地上対策費には、トンネルが通過する溪流のうち影響圏内をコルゲートパイプでバイパスする対策工や井戸の設置費などが含まれている。地下対策とは主にトンネル内における先進注入工法の工事費である。
- (4) グループ毎に費用の合計を算出した。それぞれの工事費には精算額を使用し、調査や工事の間接工事費も含んだものとした。
- (5) 各トンネルの工事費の経時変化について整理した。トンネル工事費には、掘削、コンクリートなどの直接工事費に仮設備や現地事務所経費なども含んだものとした。

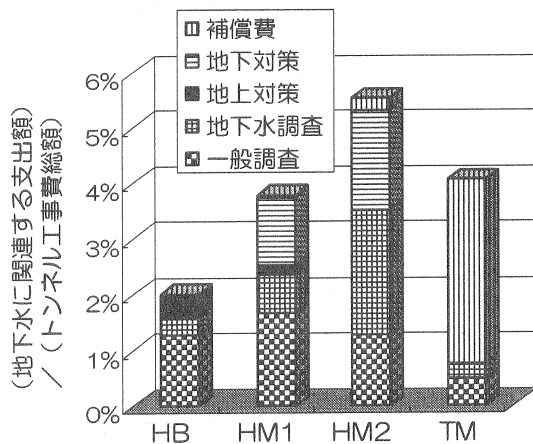


図-1 地下水環境問題における対策費用の内訳

- (6) 各トンネルの工法、進捗状況、周辺状況を踏まえた分析、考察を行った。

各トンネルの支出の総工事に対する割合を図-1に、ま

表-4 トンネルの諸元

名前	HB	HM1	HM2	TM
種類	水路	水路	水路	水路
用途	発電	発電	発電	発電
掘削工法	発破	TBM	発破	発破
支保工法	矢板	NATM	矢板	矢板
形状	幌形	円形	3R馬蹄形	3R馬蹄形
最大掘削内径(m)	2.4×2.7	3.9	3.7	3.8
巻立有無	あり(一部)	なし	あり	あり
供用後排水	下部よりトンネル内に排水	-	下部よりトンネル内に排水	下部よりトンネル内に排水
延長(m)	1,218	4,031	2,889	418
勾配	1/1,500	1/1,500	1/1,500	1/1,500
井戸溪流等利用戸数(戸)	11戸	7戸	30戸	5戸
灌漑面積(m ²)	432,000	343,000	1,764,000	90,000
地下水環境問題の有無	あり	あり	あり	あり
工期の変更	なし	なし	なし	なし

表-5 費用の分類基準

大分類	小分類	説明	主な内容
調査費	一般調査	通常のトンネル工事で行われる調査	地表地質踏査費 弾性波探査 ボーリング調査費等
	地下水調査	地下水環境問題のみのために行われる調査	電気探査費 ボーリング調査費 水質調査費 水位測定費 渓流量測定費等
対策費	地上対策	地上で行われる地下水対策工	溪流横断工費等
	地下対策	トンネル内における地下水対策工	先進注入工費等
補償費	事前	明らかに地下水環境問題発生前に実施される代替設備設置費や補償費	代替設備設置費等
	応急	地下水環境問題発生直後に応急的に実施される代替設備設置費や補償費	水配給費等
	事後	恒久的な代替設備設置費や補償費	代替設備設置およびその維持管理費補償費等

た、その経時変化を図-2～図-5 に示す。また、地下水環境問題に要した費用の内訳を図-6 および図-7 に示す。

図-1～図-5 から判断できることを以下に列挙する。

(1) トンネル工事における地下水環境対策関連費用は、

トンネル全体の工事費の2～5%である。

(2) トンネル工事における一般調査費は全体工事費の0.5～1.5%である。

(3) TM トンネルでは、補償費の割合が大きく、調査費用

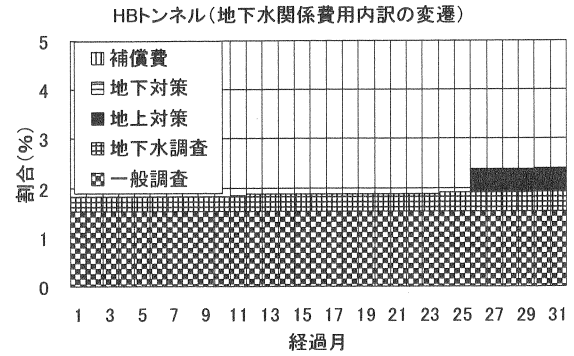
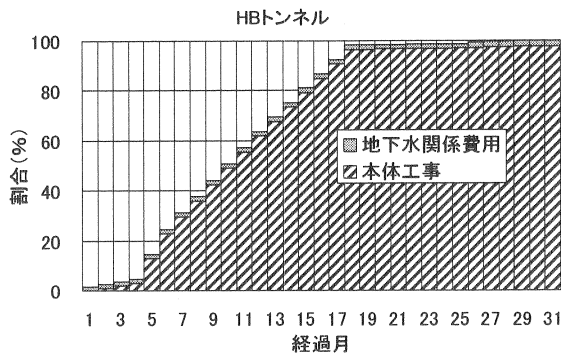


図-2 HB トンネル工事の費用支出割合の経時変化

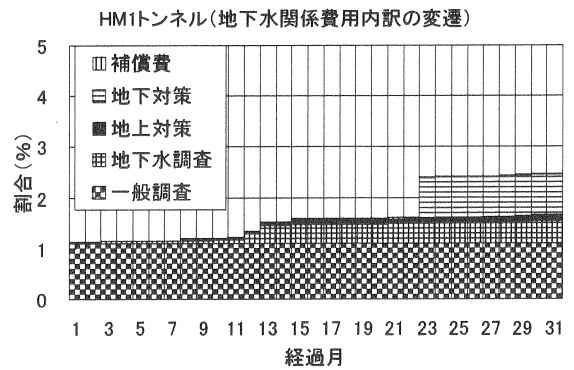
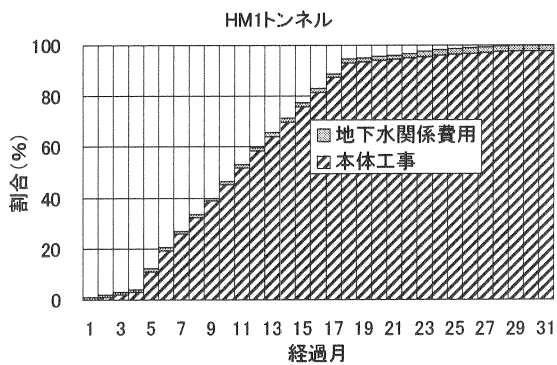


図-3 HM 1 トンネル工事の費用支出割合の経時変化

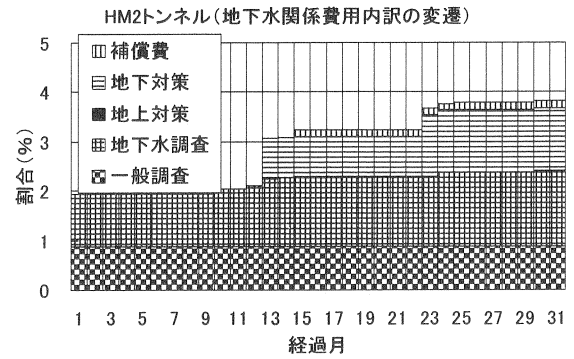
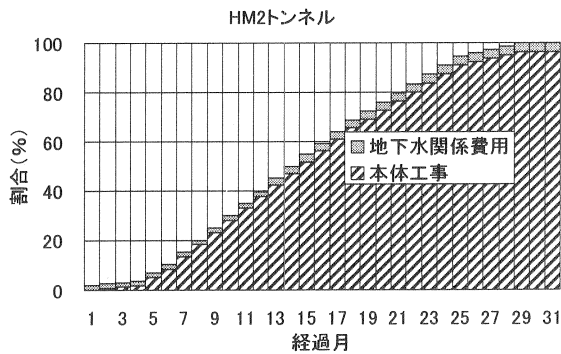


図-4 HM2 トンネル工事の費用支出の経時変化

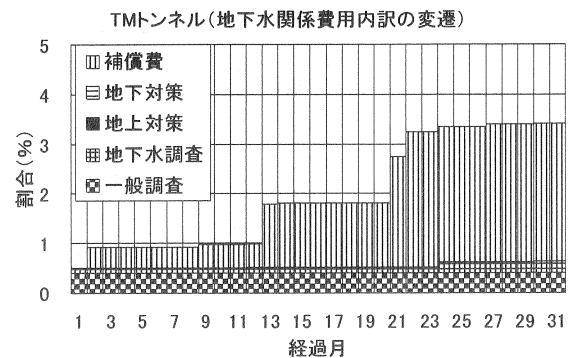
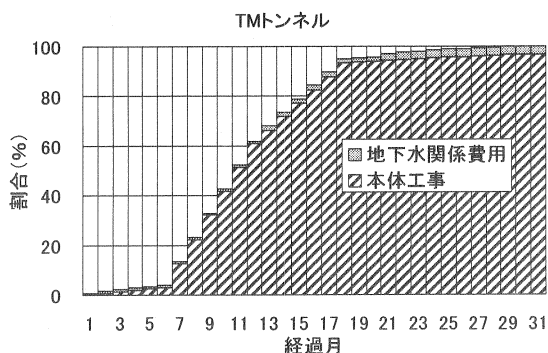


図-5 TM トンネル工事の費用支出の経時変化

の割合が小さい。

- (4) HM2 トンネルでは、一般調査費に比べて地下水環境関連調査の割合が大きい。
 - (5) 地下水関連調査費は徐々に支出されているが、補償費の支出はある時点で突発的に発生する。
- 図-6 および図-7 より、以下のことがわかる。

- (1) 図-6 から、HB トンネルでは、一般調査費が 60%以上を占め、地下水関係の調査費の比率は小さい。また、図-7 から、地上対策も行われているが、補償費は発生していない。
- (2) 図-6 から、HM1 トンネルおよび HM2 トンネルでは調査費、対策費および補償費がほぼ均等に支出されて

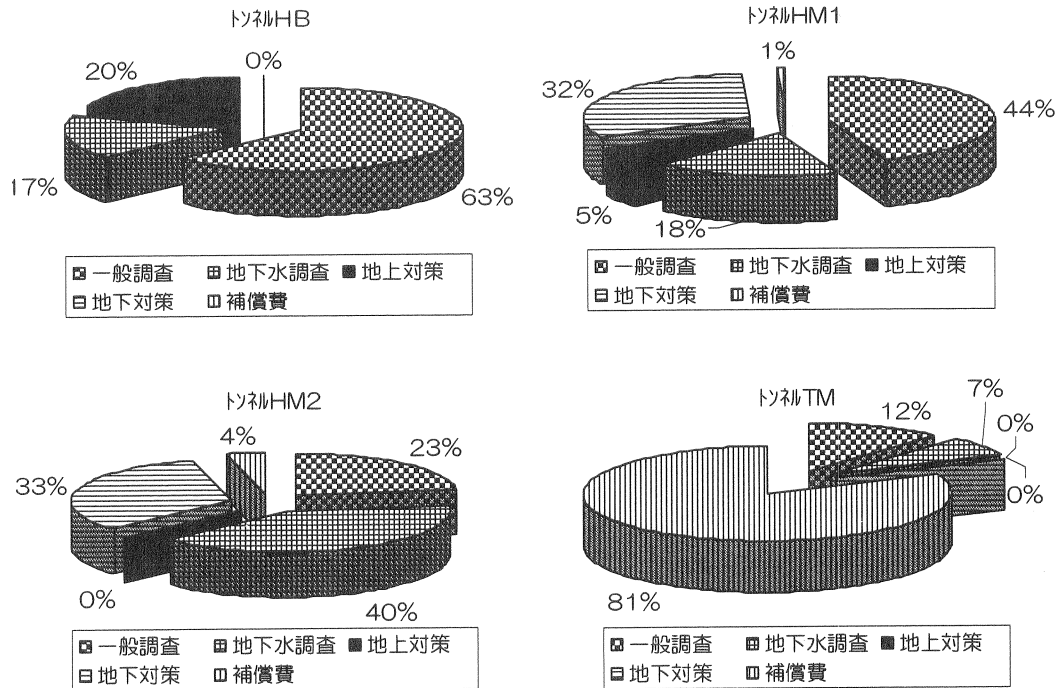


図-6 トンネル工事における調査費用の割合

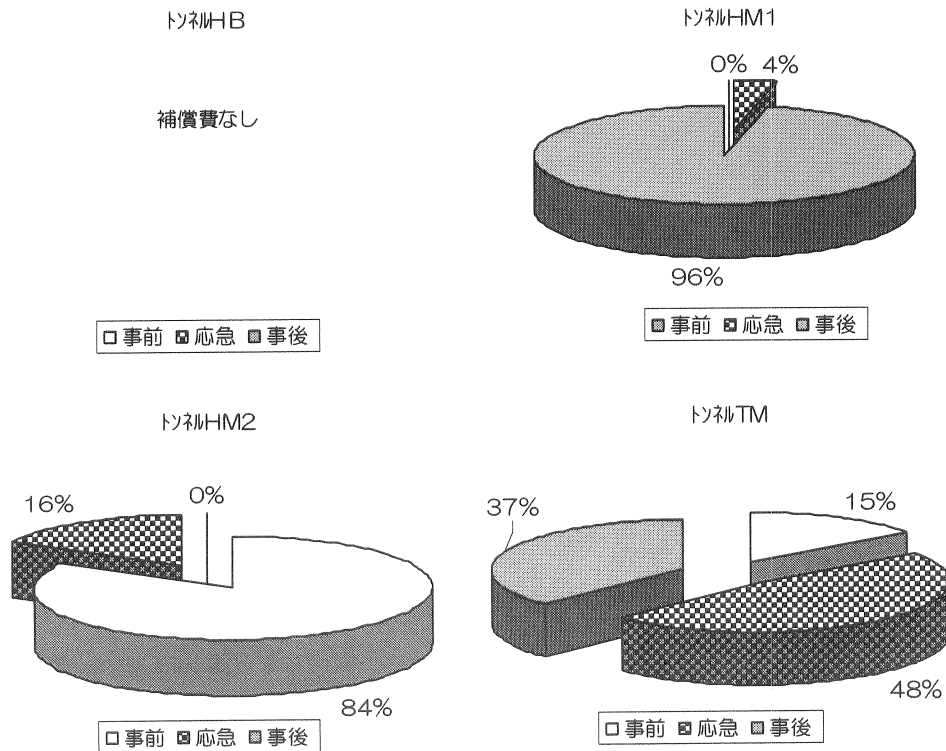


図-7 補償費の内訳

いる。しかし、図-7より、補償費はHM1トンネルでは事後補償費がほとんどであるのに対してHM2トンネルで事前補償費がほとんどである。

- (3) TMトンネルでは、対策費がほとんどなく、補償費が大部分を占めている。補償費のうち、応急処置が約半分を占め事後補償の割合も大きい。

これらの結果から明らかになった点を以下にまとめる。

- (1) HBトンネルでは、他のトンネルとは違って本体工事が大半を占め、地下水関連費用はほとんど発生していない。さらに地下水環境問題関連の費用のうち一般調査費用がほとんどであり、補償費も発生していない。このことから、事前の調査に地下水環境問題の発生は予測されず、また実際に発生しなかったものと推察される。
- (2) HM1トンネルとHM2トンネルでは、どちらも地下水調査費が支出された後、補償費や各対策費が支出されており、一般調査と地下水に関連する調査がなされた後、対応策が講じられたと考えられる。補償費は地下水環境関連費用の数%以内に抑えられているが、HM1トンネルでは事後補償が主体なのに対してHM2トンネルでは事前補償と応急補償が主体となっており、事前の調査結果の評価や意思決定プロセス等には違いがあったと推察される。
- (3) TMトンネルでは、事前調査の割合に対して、補償費が非常に大きい。補償費の中でも応急補償費が最も大きく、事後補償の割合も小さくはない。しかし、本体工費の割合から見るとHM1トンネルやHM2トンネルと大差はない。
- (4) 以上から、経済的な観点のみから地下水環境問題の影響を考えた場合、地下水関連調査に十分な調査を行っても地下水問題を回避できるとは必ずしもいえない。しかし、地下水環境問題に対しては、代替水源設置や金銭的補償だけではなく技術的な調査や対策により環境への影響の程度が抑えられる可能性があると言える。

5. トンネル工事における地下水環境問題対応シナリオ

地下水環境問題に要する費用は、トンネルの供用後の支出を含めて考えた場合、事前調査、事前補償、モニタリング、追加調査、対策工事、応急補償、事後補償、裁判、賠償に分けることができる。トンネルの計画から運用までの任意のステップにおいて、地下水環境問題の対策方法が検討され前述の内の1つが選択される。したがって、任意の

ステップ(k)における選択肢(j)に要すると想定される費用を $c_{k,j}$ とし、そのステップ(k)において選択肢(j)が選択される確率を $p_{k,j}$ とすると、ステップ(k)における地下水問題対策費の期待値(ΔC_k)は、次式により表される。

$$\Delta C_k = \sum_{j=1}^9 (p_{k,j} \cdot c_{k,j}) \quad (1)$$

ここでは、これらの地下水環境問題関連の支出がトンネルを含むプロジェクトの成立可否にどの程度影響するかについて簡易な考察を行なう。一般的にプロジェクトの投資の可否を判断する際には、キャッシュフローの分析、正味現在価値による評価、投資回収年数などの検討が行なわれる¹⁹⁾。本研究では、収入が得られるプロジェクトとしてトンネルを有する水力発電所を対象とし、この開発の評価指標の一つとして代表的なIRR(Internal Rate of Return, 内部収益率)について、(1)式で与えられる地下水問題対策費の期待値(ΔC_k)の影響の程度を考察する。なお、この際のステップは年単位とする。

プロジェクトの実施年数(n)に対するIRRは、一般に次式を満たす*i*で与えられる。

$$\sum_{k=0}^n \frac{B_k - C_k}{(1+i)^k} = 0 \quad (2)$$

ここで、*k*はプロジェクト開始後の年数、 B_k はプロジェクト開始後*k*年目の便益、 C_k はプロジェクト開始後*k*年目の費用である。

ここでプロジェクトの建設期間を考慮せずプロジェクトの金額を0年目に一括して投資する場合には、地下水環境問題に関する費用が発生しないときIRR(*i*)は次式により与えられる。

$$\sum_{k=0}^n \frac{B_k - C_k}{(1+i)^k} = \frac{-C_0}{1} + \frac{B_1 - C_1}{(1+i)^1} + \frac{B_2 - C_2}{(1+i)^2} + \frac{B_3 - C_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{B_n - C_n}{(1+i)^n} = 0 \quad (3)$$

また、建設中に地下水環境問題に関する費用(ΔC_0)が発生した場合、IRR(*i'*)は次式により与えられる。

$$\sum_{k=0}^n \frac{B_k - C_k}{(1+i')^k} = \frac{-(C_0 + \Delta C_0)}{1} + \frac{B_1 - C_1}{(1+i')^1} + \frac{B_2 - C_2}{(1+i')^2} + \frac{B_3 - C_3}{(1+i')^3} + \dots + \frac{B_n - C_n}{(1+i')^n} = 0 \quad (4)$$

さらに建設期間が一年延び、その間に新たな支出(ΔC_1)が発生したときのIRR(*i'*)は次式により与えられる。

$$\sum_{k=0}^{n+1} \frac{B_k - C_k}{(1+i')^k} = \frac{-(C_0 + \Delta C_0)}{1} + \frac{-(\Delta C_1)}{(1+i')^1} + \frac{B_2 - C_2}{(1+i')^2} + \frac{B_3 - C_3}{(1+i')^3} + \dots + \frac{B_{n+1} - C_{n+1}}{(1+i')^{n+1}} = 0 \quad (5)$$

式(3)による*i*と式(4)あるいは式(5)による*i'*との差がプロジェクトへの影響度ということになる。

ここで、トンネル工事における地下水環境問題がIRRに与える影響の程度を具体的に検討するため、以下のような海外水力発電プロジェクト(実施期間50年)の開発を考

える。

- (1) 売電単価：10 円/kWh, 発電電力量 475GWh

$$B_i = (\text{売電単価}) \times (\text{発電電力量})$$

- (2) 投資額 (C_0): 250 億円

- (3) 維持管理費: $C_0 \times 0.4\%$ /年

- (4) 税金他支出: (B_i) $\times 12\%$

$$C_i = (\text{維持管理費}) + (\text{税金等関連支出})$$

なお、水路トンネルの工事費が全体工事費に占める割合については、国内の流込式の水力発電所において経験的に言われる中で最も大きい全体工事費の 50%を用いた。

前述の条件のもとでは、 $i=16.3\%$ である。また、建設工事開始後かつ運転開始までに地下水環境問題により工事費が 6%増加し、運転開始が 1 年遅れたときには、 $i=13.5\%$ (-2.8%)となる。工事費の増加分は同じでも運転開始が遅れなかったときには $i=15.8\%$ (-0.5%)となる。つまり、工事費増加分の影響は 0.5%であり、運転開始の遅れによる影響は 2.3%となる。近年水力発電プロジェクトへの投資が進みつつある途上国を対象とした場合、カントリーリスク等を考慮して、 $IRR \geq 13 \sim 15\%$ が、投資の妥当性を判断する際の一応の目安として使用される。前述の限定された条件のもとではあるが、工事費の増加のみに着目した場合、IRR の増加分が 0.5%程度であり、この投資基準の幅 2% (13~15%) に比べて小さいことから、地下水環境問題がプロジェクトの可否に影響を及ぼす可能性は限定的であるといえる。しかし、運転開始の遅れを考慮すると、工事には他に多くの不確実性要素があるにも係らず地下水環境問題の発生だけで投資基準に満たさなくなる可能性がある。

上記はトンネル工事の割合が 50%を占める水力発電所のトンネル工事に限定したものであるが、トンネルのみにより収入を得る場合にはこの影響度はさらに大きくなる。したがって、トンネル工事における地下水環境問題の影響度の事前評価には困難が伴うが、運転開始の遅れなど不確実性を包含して事前評価することは極めて重要であると言える。

6. 結論

本研究では、トンネル工事における地下水環境問題について、既存事例の調査および実際のトンネル工事費に占める地下水環境問題の対策費の分析を行なうとともに、この費用がトンネル開発の判断においてどのように影響を及ぼすかについて特定の条件を設けて検討を行なった。以下に本研究で得た結論を列挙する。

- (1) 地下構造物として代表的なトンネルを対象に既存事

例を調査し、その特徴を整理した。

- (2) 地下水環境問題の対策費がトンネル工事費に占める割合について実例を用いて分析し、その割合が全体工事費の 2~5%となるが、その費用の内訳はトンネルにより大きく異なることを示した。
- (3) 地下水環境問題の対策費がトンネルプロジェクトに及ぼす影響について、条件を限定した水力発電プロジェクトを対象として、投資基準の指標として一般的な指標の一つである IRR (内部収益率)を用いて簡易な考察を行った。地下水環境問題に関連する費用として、トンネルの総工事費が本研究で調査したトンネルと同程度 (トンネルの総工事費 6%) 増加した場合、IRR への影響は 0.5%程度となった。また、地下水環境問題の発生により運転開始時期が 1 年間遅れたには IRR は 2.3%となった。この結果、地下水環境問題に対する対策費に比べ運転開始時期の大きな重要な要素となり得ることを示し、トンネルプロジェクトにおいて地下水環境問題の事前評価が重要であることを示した。

本研究では、トンネル工事に伴い発生する地下水環境問題に焦点をあてて既存事例を調査したほか、トンネルの経済性におよぼす効果について考察を加えた。経済性については、どのような費用までをコストとして考慮に入れるか、また、どこまでの範囲を便益とするかにより、評価結果が異なる。例えば、費用として構造物の運転開始の遅延に伴い返済ができない場合の違約金などさらに詳細な条件を考慮したり、収入源の単価を変化させたりすることにより、トンネル工事における地下水環境リスクがさらに明確になっていくと考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、玉川清、野田博章、内田毅、山田喜四夫：トンネル坑外仮設備と環境対策 中国縦貫道牛頭トンネルほか、トンネルと地下、125 号、pp. 21-29, 1981.
- 2) 社団法人日本トンネル技術協会：トンネル年報、2005.
- 3) 例えば、大島洋志：私の地質工学随想、土木工学社、pp. 48-49, 2002.
- 4) 梅田雅弘、井戸澄夫、出口惇一、若林良二：環境保全対策を充分考慮した大規模都市型トンネルの施工 京都地下鉄烏丸線延伸工事、トンネルと地下、318 号、pp. 25-33, 1997.
- 5) 村上郁雄、大島洋志、塚本正雄：丹那トンネルの湧水・湧水はどうなっているか、トンネルと地下、86 号、pp. 41-52, 1977.
- 6) 高山昭、芦田雄太郎：ウエルポイントによる洪積層の

- 掘さく, トンネルと地下, 21号, pp. 7-16, 1972.
- 7) 大島洋志: 毎分 23t の異常湧水に挑む 山陽新幹線福岡東工区, トンネルと地下, 36号, pp. 12-21, 1973.
- 8) 平沢市郎, 飯田茂, 森喬, 山本松生: 立坑の多量湧水と対策 上越新幹線中山トンネル四方木立坑, トンネルと地下, 41号, pp. 46-57, 1974.
- 9) 串山純孝, 小林素一: 湧水と闘う立坑工事 上越新幹線中山トンネル, トンネルと地下, 58号, pp. 15-25, 1975.
- 10) 岡本利彦: 新神戸トンネルの施工 土木編, トンネルと地下, 183号, pp. 41-48, 1976.
- 11) 篠崎知己: 異常出水とその対策 高千穂線高森トンネル, トンネルと地下, 71号, pp. 7-14, 1976.
- 12) 前田武雄, 亀沢勝治, 田中伸夫: 国道 19 号のネックを解消 新鳥居トンネル, トンネルと地下, 99号, pp. 25-30, 1978.
- 13) 早川敏彦, 原繁之, 西川直輝: 地下水盆下のトンネル施工と水文調査 中央本線塩嶺トンネル, トンネルと地下, 114号, pp. 25-34, 1980.
- 14) 牛越博, 望月孝利: 二大構造線の湧水地帯を貫く 中央自動車道長野線塩尻トンネル, トンネルと地下, 210号, pp. 15-24, 1988.
- 15) 遠藤徹: 膨張性・高圧多量湧水地山におけるトンネルの設計・施工事例 主要地方道・湖陵掛合線「才谷トンネル」.
- 16) 山本健, 澄田信夫, 玉井信也: 新熊見発電所新設工事における水源枯渇対策, 電力土木, No. 263, pp. 16-22, 1996.
- 17) 土木学会中部支部: 国づくりの歴史—中部の土木史—, 名古屋大学出版会, pp. 103-111, 1988.
- 18) 日本鉄道建設公団: 上越新幹線工事誌, p. 709, 1984.
- 19) 例えば, New Energy Foundation: Guide Manual for Development Aid Programs and Studies of Hydro Electric Power Projects, pp.13-1 - 14, 1996.

(2006年6月30日 受付)