

岩盤地下水資源の取水システムに関する基礎的検討 A fundamental study on the water-intake system of ground water in rock mass

竹中 久*，西 琢郎**，百田 博宣***，竹林 亜夫****

Hisashi TAKENAKA, Takuro NISHI, Hironobu MOMOTA, Tsuguo TAKEBAYASHI

Recently, there has been a trend of a long term shortage of rainfall. Therefore, this will likely to cause water shortage in areas relying on river and shallow ground water resources. Based on these factors, we have examined ground water resources in rock mass as an alternative water resource. The scale, durability and permeability of ground water in rock mass are investigated from case studies of tunnel discharge. 3-Dimensional numerical analysis were also used to evaluate the characteristics of discharge into a small excavation. From these results, we propose a protocol for efficient water-intake system in rock mass.

Key Words : groud water, rock mass, water-intake, tunnel discharge

1. はじめに

近年は長期的な小雨傾向で，異常小雨の発生は異常多雨の発生をはるかに上回っており，生活用水の基盤となる河川水資源が大幅に減少する渇水（水不足）が頻発傾向にある．特に，平成6年に西日本一帯を襲った「列島渇水」は福岡市や佐世保市で200日を超す給水制限を余儀なくするなど，社会生活に多大な影響を与えたものとして記憶に新しい．

従来から，水資源開発は河川水を取水するダムや堰が中心であり，これを補完するものとして井戸による土壤地下水の取水が行われている．河川水資源は現在および今後も主要かつ根幹的な水資源であるが，渇水は異常気象等による河川水資源の減少が原因であることが多く，利水安全度の確保が課題となっている．このため，従来の貯水容量に渇水対策分の容量をもつ渇水対策ダムも検討され始めている．また，新たに河川水を岩盤空洞に貯水する地下空洞ダムも提案されている²⁾．井戸等による土壤地下水の利用については，地下水位低下による井戸水量の低減や地下水塩水化などの地下水障害が生じる場合もあり，利用が制限される方向にある．また，不透水性基盤上の土壤地下水を遮水壁で堰き上げて取水する地下ダムもあるが，地質構造上の制約が多く適地が少ないのが現状である．これに対し，海水淡水化プラントは異常気象に左右されない最も確実な水資源開発手段で利用拡大の方向にあるが，他の水資源施設に比して利水単価が高い傾向がある．このような状況下において，社会生活・経済活動の基盤となる水資源を確実かつ永続的に確保することが急務と考えられる．

キーワード：地下水，岩盤，取水，トンネル湧水

* 正会員 工修 清水建設（株）技術研究所 特別プロジェクト部 主席研究員

** 正会員 理博 清水建設（株）和泉研究室 研究員

*** 正会員 工博 清水建設（株）技術研究所 特別プロジェクト部 主席研究員

**** 正会員 清水建設（株）土木本部 技術第2部 部長

本研究では、異常気象等に起因した渇水（水不足）に対して水資源の多様化が有効な方策と考え、岩盤地下水資源の利用の可能性とその取水システムを検討する。まず、渇水状況の分析とトンネル湧水事例から岩盤地下水資源の規模や特性を分析して、同資源の利用の必要性和可能性を検討する。次に、同資源を効率的に利用するため、既に提案されている岩盤地下水取水システム³⁾をとりあげ、システムの構造・取水原理、取水性能および特徴を示す。さらに、本システムの実現に必要な構成技術を示し、計画から施工までの各段階における技術上のポイントについて言及して実現可能性を把握する。

2. 岩盤地下水資源の活用可能性

2.1 既往渇水と渇水頻発地域の分析

平成7年・9年版の水資源白書²⁾より渇水の発生頻度と発生規模を整理し、表-1に示す。20年間で8回以上の発生地域は、南関東、伊勢湾周辺、四国、沖縄、奄美諸島や瀬戸内海の島しょ部であり、4～7回は大阪湾周辺や中国四国の瀬戸内海沿岸、北部九州地域などである。給水制限日数の多い渇水の発生地域は、利根川沿川、豊川用水域、愛知用水域、淀川沿川、高松市・松山市、福岡市、長崎県および那覇周辺であるが、利根川沿川、豊川用水域、愛知用水域、淀川沿川は比較的主要河川からの上水の取水制限率が低いことがわかる。したがって、発生頻度と渇水規模（給水制限日数、取水制限率）から総合的に渇水頻発地域をあげると、四国瀬戸内沿岸、北部九州、沖縄南部が代表的地域と考えられる。

表-1 既往の渇水発生状況³⁾

(1) 昭和52年～平成8年までの最近20年間に上水道の断減水があった年数

発生年	地 域 名
8ヶ年以上	東京都、千葉県一部、愛知県、三重県一部、香川県、高知県一部、愛媛県一部、沖縄県、淡路島、奄美諸島
4～7ヶ年	秋田県、山形県一部、茨城県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、長野県一部、岐阜県、石川県、滋賀県、大阪府、兵庫県、広島県、山口県、香川県、愛媛県、福岡県、佐賀県、長崎県

(2) 既往の主な渇水とその規模

地域名 (主要河川)	発生年 (渇水名称)	給水制限	取水制限率
東京都 (多摩川)	昭39 (東京五輪渇水)	84日	
東京 都 他 (利根川)	昭62	71日	30%
	平2	18日	20%
	平8	42日	30%
蒲郡市他の 豊川用水域 (豊川)	昭59, 60	154日	22%
	昭61, 62	152日	20%
	昭62, 63	274日	24%
東海市他の 愛知用水域 (木曾川)	昭59, 60	213日	
	昭61, 62	146日	
	昭62, 63	188日	
淀川沿岸の 都市 (淀川)	昭52, 53	134日	10%
	昭53, 54	161日	10%
	昭59, 60	156日	20%
	昭61, 62	117日	20%

地域名 (主要河川)	発生年 (渇水名称)	給水制限	取水制限率
高松市 (吉野川)	昭48 (高松砂漠)	48日	
	平2	23日	28%
	平6 (列島渇水)	67日	75～50%
松山市	平6 (列島渇水)	123日	42%
福岡市 (筑後川)	昭53 (福岡渇水)	287日	70%
	平6, 7 (列島渇水)	295日	50%
長崎市	昭42 (長崎渇水)	72日	
佐世保市	平6, 7 (列島渇水)	213日	
那覇市他	昭52, 53	239日	
	昭56, 57	326日	
	平3	64日	

注) 取水制限率は上水の取水制限率を示し、数値が分かるもののみを記入。

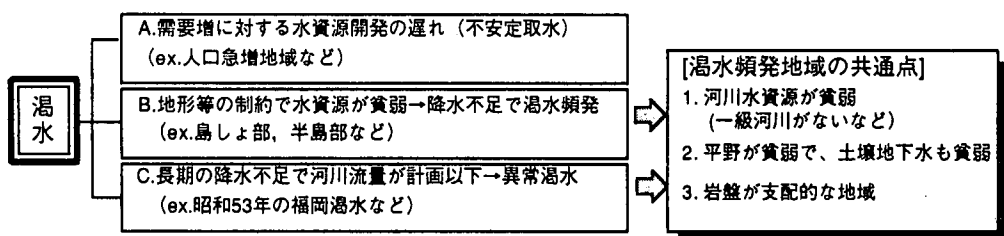


図-1 渇水（水不足）の発生パターン¹⁾と渇水頻発地域の共通点

水資源白書¹⁾によれば、渇水の発生パターンは図-1のように3タイプに分類できる。Aは人口の急増による需要増が渇水の原因であり、水資源開発の進捗に応じて水不足は解消されていくが、BとCは地形や水資源量などに係わる渇水発生パターンである。四国瀬戸内沿岸、北部九州、沖縄南部は程度の差はあれ、BとCに関連した渇水頻発地域であり、これらの地域の水文地質的な共通点を分析して図-1に示す。これらの地域は山地が人口集中部に近接しているため、小規模平野で河川も二級河川以下の小規模河川であることがほぼ共通している（表-1(2)で記載されている一級河川は用水路・導水路で渇水頻発地域に結ばれている）。これは、渇水頻発地域が河川水と土壌地下水資源に恵まれず、岩盤が卓越する地域であることを意味しており、地形地質的な特徴を活かした岩盤地下水資源の開発が想定できる。

我が国の岩盤は種々の地殻変動を受けて割れ目系が発達し、また糸魚川―静岡構造線の以西は中生代白亜紀以前のいわゆる古期岩類が支配的で基盤面の深度が比較的浅いため、渇水頻発地域での岩盤地下水利用の可能性はある。岩盤地下水資源は河川水資源に比べて量的規模はかなり小さいものと考えられるが、同資源の利用による水資源の多様化は渇水に対する危険分散に効果があり、需要地内の新規水資源開発は渇水頻発地域では特に有効と考えられる。

2.2 トンネル湧水事例から見た岩盤地下水資源の分析

(a) 岩盤地下水資源の規模、永続性、季節変動の特徴

岩盤内にトンネル等の空洞を掘削した際には、多かれ少なかれある程度の量の湧水に見舞われることは常であるが、時には毎分数トンを超えるような大量の出水が発生することもある。例えば、東海道線の丹那トンネルでは切羽より最大135 m³/minの集中湧水があり著しい難工事となったことはよく知られている。この様な集中湧水はやがて減衰し、トンネル掘削によって生じた新たな水文環境にバランスされた恒常湧水となる。この恒常湧水こそがトンネル周辺の岩盤が持つ地下水資源の量を表すものといえる。例えば、前述の丹那トンネルや山陽新幹線の六甲、福岡トンネル²⁾、高森・高千穂鉄道の高森トンネル³⁾では、一日当たり1万～10万トンを超える量の恒常湧水があり、丹那トンネルや高森トンネルでは周辺地域の飲料水や農業・工業用水に利用^{4),5)}されている。また上越新幹線大清水トンネルや黒部立山アルペンルートの立山トンネルの恒常湧水も、一日当たり2万～4万トンを超える量だけでなく、水質に優れた「おいしい水」として広く流通・利用^{7),8)}されている。一般に、恒常湧水量はトンネル完成時の湧水量から徐々に少なくなり、最終的に最大時の50～80%の量となるケースが多いとされているが、その低減には長年月を有するといわれている⁹⁾。上述のトンネルもほとんどが完成より20年以上経過したものである。また、恒常湧水量は、降水量や季節的諸条件の変化により20～30%程度の変動を示し、土被りが大きく透水性が低い岩盤に設置されたトンネルほどその変動幅が小さくなると指摘されている⁹⁾。

このように、岩盤地下水は地形地質的な条件がそろえば、量的規模、水質、安定性（経年変化、季節変動）の点からも良好な水資源になり得る要素を備えているといえる。

(b) トンネル湧水実績に基づく岩種別岩盤透水性の検討

石井・佐久間⁴⁾は1977年に全国の主要鉄道トンネル（273例）を対象として恒常湧水量の実態調査を行い、地形地質的分類によりトンネル単位長さ当たりの湧水量（比湧水量）と岩種との関係等について考察を行った。ここでは、石井・佐久間の実態調査結果を基本とし、比湧水量だけでなく土被り高さやトンネル断面積の情報も考慮したものとして、次に示すMuskatの集水暗渠の式を用いて比湧水量を透水係数に換算して岩種

表-2 計算に用いた水理パラメータと換算透水係数の岩種別一覧

		火山岩			深成岩 + 片麻岩			新期堆積岩			古期堆積岩 + 變成岩		
		比湧水量 (m ³ /min/km)	平均土柱 (m)	透水係數 (cm/s)	比湧水量 (m ³ /min/km)	平均土柱 (m)	透水係數 (cm/s)	比湧水量 (m ³ /min/km)	平均土柱 (m)	透水係數 (cm/s)	比湧水量 (m ³ /min/km)	平均土柱 (m)	透水係數 (cm/s)
破 碎 帶 多	偶數	16 個	14 個	問左	17 個	16 個	問左	12 個	10 個	問左	26 個	23 個	問左
	最小	0.17	25	1.8×10^{-6}	0.17	30	7.1×10^{-7}	0.04	20	7.4×10^{-6}	0.03	30	1.5×10^{-7}
	最大	9.23	340	1.3×10^{-4}	3.74	600	6.3×10^{-5}	2.39	150	5.2×10^{-5}	1.57	300	1.1×10^{-5}
	平均	2.06	116	3.0×10^{-5}	1.09	186	1.2×10^{-5}	1.13	65	2.3×10^{-5}	0.46	130	5.1×10^{-6}
破 碎 帶 少	偶數	28 個	18 個	問左	36 個	21 個	問左	59 個	31 個	問左	57 個	33 個	問左
	最小	0.003	15	2.9×10^{-8}	0.005	15	2.2×10^{-7}	0.003	20	2.2×10^{-7}	0.01	30	1.1×10^{-7}
	最大	0.47	450	2.6×10^{-4}	0.91	200	1.5×10^{-5}	3.50	150	1.1×10^{-4}	0.97	200	1.6×10^{-5}
	平均	0.20	98	1.8×10^{-5}	0.27	74	6.0×10^{-6}	0.37	76	8.8×10^{-6}	0.24	85	3.9×10^{-6}

や他の水文地質的特性との比較を行った。

$$Q = 2 \pi k \Delta H / \ln (2 d / r) \text{ ---- (1)}$$

(Q:湧水量, k:透水係数, ΔH :地下水面とトンネルの水頭差, d:深度, r:トンネル断面等価半径)

換算にあたっては、トンネル土被り高さは平均土被り高とし、地下水位は土被りに一致すると仮定した。またトンネルの断面積は在来単線において一律28m²、在来複線で58m²、新幹線で72m²とした。また岩種の区分は石井・佐久間によって分類された火山岩、深成岩(片麻岩を含む)、第三紀以降の堆積岩(以下、新期堆積岩と呼ぶ)、および白亜紀以前の堆積岩(以下、古期堆積岩と呼ぶ)と変成岩を一括した4岩種を、さらに破碎帯の多く発達するものとそれ以外に細分した合計8種を対象とした。表-2に得られた計算結果を示す。また表-3には石井・佐久間において比湧水量の多いトンネル例として挙げられたものから5例を取り出し、換算された透水係数を付記した。

表-2に示されるように、それぞれの岩種における平均透水係数は、破碎帯が多い場合は少ない場合に対して1.3~2.6倍程度大きな値となっており、破碎帯の多少により岩盤全体の透水性が左右されることが示唆される。そこでこれらの値の差に統計的有意性があるかどうかを検討するため透水係数の差に対するノンパラメトリック検定を行った。図-2に検定結果を示す。これより、火山岩と新期堆積岩においては、破

砕帯が多い場合には透水係数が大きくなるといえるが、その他の岩種では破砕帯の有無により透水係数に差があるとはいえないことがわかった。また破砕帯が多い場合における火山岩と新期堆積岩あるいは深成岩と古期堆積岩・変成岩の透水係数の差や、破砕帯が少ない場合の全ての岩種の透水係数の違いにも有意性があるとはいえない結果となった。すなわち、今回検討したトンネル恒常湧水量から換算される土被り 100 m 前後の岩盤の平均的な透水係数は、火山岩や新期堆積岩において破砕帯が多く発達する場合に最も大きくなり、その値は $2 \sim 3 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 程度、そうでない場合はどの岩種においても $4 \sim 10 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 程度と見なし得ることが明らかとなった。この値を逆に土被り高 100 m、トンネル断面積 28m^2 （在来単線に相当）として比湧水量に換算し直すと、破砕帯を伴う場合が $1.8 \sim 4.5 \text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 、伴わない場合が $0.4 \sim 0.9 \text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 程度と

表-3 比湧水量の多いトンネルの諸元^{*)}およびその換算
透水係数

	トンネル名	延長 (m)	岩質	破砕の多少	恒常湧水量 (m ³ /min/km)	比湧水量 (m ³ /min/km)	平均上抜 (m)	透水係数 (cm/s)
1	丹那	7800	火山岩	多	72.00	9.23	220	5.2×10^{-5}
2	山川	1060	火山岩	少	6.66	6.28	15	2.6×10^{-4}
3	釣鐘	1003	火山岩	多	4.42	4.40	23	1.3×10^{-4}
4	中山	1410	深成岩	多	5.28	3.74	50	6.3×10^{-5}
5	宮	2080	火山岩	多	7.50	3.61	120	3.2×10^{-5}
6	塩釜	1214	新期堆積岩	少	4.26	3.50	25	1.0×10^{-4}
7	新清水	13500	深成岩	多	40.80	3.02	550	8.1×10^{-6}
8	夜久野	1287	火山岩	多	3.30	2.56	80	3.1×10^{-5}
9	割石	2677	新期堆積岩	多	6.39	2.39	40	5.2×10^{-5}
10	大ヶ峠	1481	火山岩	多	3.36	2.27	60	3.3×10^{-5}

破碎带多	深+片	○								火：火山岩
	新	×	○							深+片：深成岩+片麻岩
	古+变	○	×	○						新：新期堆積岩
破碎带少	火	○	×	○	×					古+变：古期堆積岩 +变成岩
	深+片	○	×	○	×	×				
	新	○	×	○	×	×	×			
	古+变	○	○	○	×	×	×	×	×	
破碎带	岩種	火	深+片	新	古+变	火	深+片	新		
		破碎带多					破碎带少			

有意水準1%で、○：差がある、×：差がない

図-2 岩種による透水係数の差に対する検定結果

なる。

一方、図-3には岩種別の透水係数の全算出結果(図中○印)と既往文献^{10, 11, 12)}に示される原位置試験結果による岩盤の透水係数範囲(図中矢印)を示した。この図より、ほとんどの岩種において原位置試験結果から得られる透水係数の範囲は、トンネル湧水量から計算したものより1~3オーダー高い値を示していることがわかる。このことは既往文献に見られる透水係数はダム工事に伴う透水試験など比較的地表近辺で得られたものである可能性が高く、トンネル湧水から見た透水係数よりは地表付近の風化や亀裂の緩みの影響を受けていると考えられる。

次に、換算された透水係数(k)と石井・佐久間に記載されているトンネル湧水に伴う地下水流出影響範囲など他の水文地質的特性との相関を調べた。その結果、平均流出影響幅(W)との相関性が最も高く、全ての岩種で相関係数0.8程度の相関性が見られた。両者の関係を図-4に示す。この図より透水係数の増大に伴って影響幅は指数関数的に増大するが、特に火山岩の場合は、透水係数が 10^{-4} cm/sを上回れば影響幅が3kmを超えるものがあることが読み取れる。すなわちこの岩種で破碎帯を伴う高透水性の岩盤の場合、かなり遠方からの地下水をもトンネル内に引き込む可能性があると考えられる。

以上のトンネル湧水事例による換算透水係数の検討より、少なくとも今回検討した火山岩・新期堆積岩では破碎帯が多く発達する場合は少ない場合より明らかに岩盤の透水性は良く、その平均的な透水係数は 10^{-5} cm/sオーダーであることが把握された。さらに、透水性と平均流出幅の相関性が高いことが認められ、高透水性岩盤サイトであれば、広域の岩盤地下水を集水できる可能性があるものと考えられる。

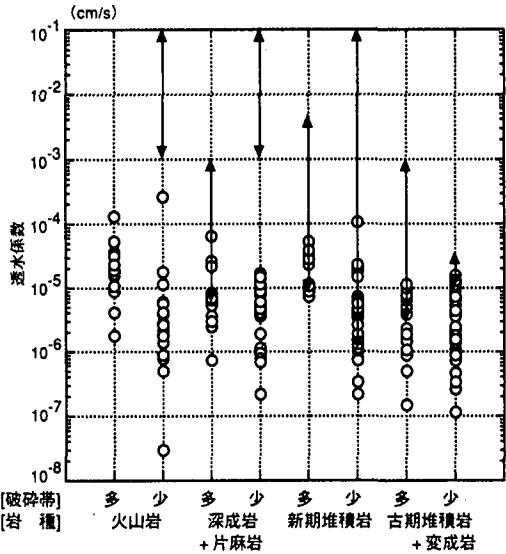


図-3 換算透水係数(図中○印)と現位置試験結果(図中矢印)との比較

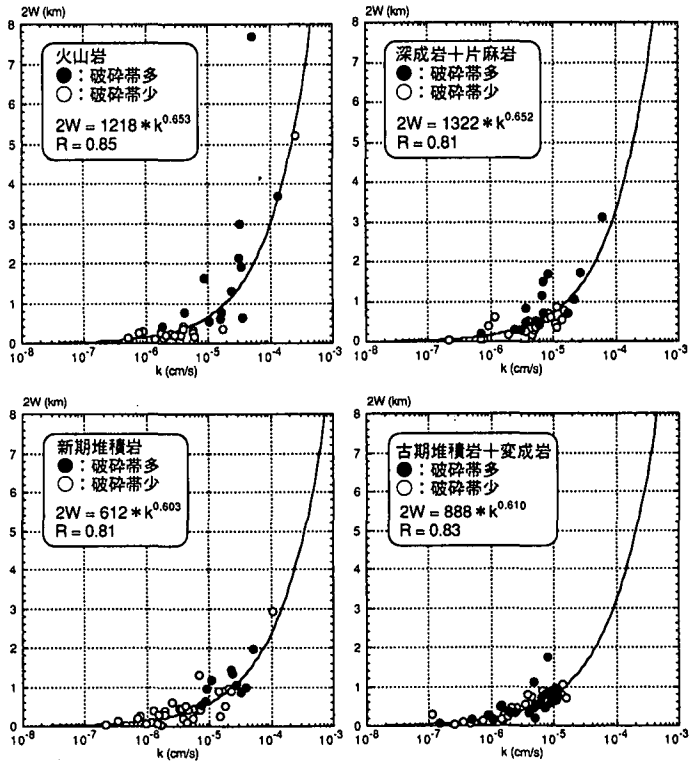


図-4 換算透水係数(k)とトンネル湧水平均流出幅(トンネル両側2W)との相関性

3. 岩盤地下水取水システムの提案

3.1 取水システムの構造と取水原理

地下水を取水する場合、通常、地表から井戸を設置することが一般的であるが、岩盤地下水を取水するには次のような問題点がある。①鉛直井戸では傾斜角の大きい破碎等を効果的に貫通することが難しく、岩

盤地下水取水区間の井戸長さに占める割合が小さい、
 ②広範な領域からの取水を行うには複数の井戸が必要であり、各井戸毎に水中ポンプが必要で設備コストと管理・運転上の難点がある、などである。そこで、本研究では岩盤地下水の効果的な取水方法として、既に提案されている図-5の立坑・集水トンネル・集水孔で構成された岩盤地下水取水システム³⁾を取り上げる。立坑は所定の深度の岩盤まで到達するための作業坑、立坑最深部の吸水槽に集水された岩盤地下水を揚水装置で地表に送水する揚水管設置坑であり、集水トンネルや集水孔に作用させる水圧を調整するための水位調節坑でもある。集水トンネルは立坑最深部より僅かな上り勾配で設置され、集水孔を多連設置するための作業坑と同時に本施設内に湧出した岩盤地下水が吸水槽まで自由流下する経路でもある。集水孔は岩盤地下水の取水用井戸の役割を担い、図-5では水平井戸を例示しているが、集水トンネル掘削時の壁面観察結果から水みちとなる割れ目系に効果的な配置をすることが可能なものである。

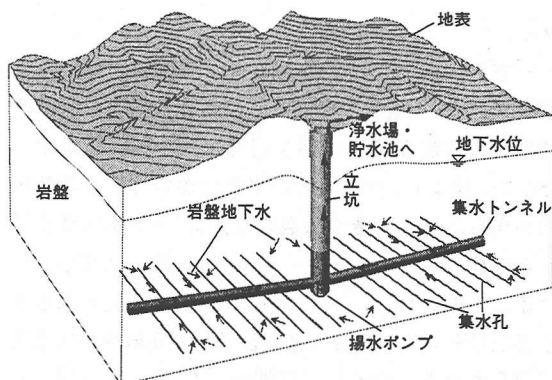


図-5 岩盤地下水取水システムのご概念図

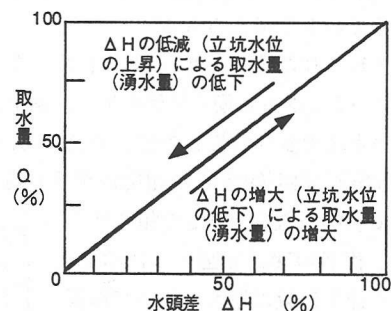


図-6 地下水位と立坑水位の水頭差 (ΔH) と取水量との関係。
 注) Q , ΔH 共に最大値を100%にて表示

本システムでは、岩盤地下水は集水孔や集水トンネルに湧出する自然湧水として得られる。すなわち、本システム内の水頭は立坑水位であるから、周辺地下水位より立坑水位を低く保てば、両者の水頭差 (ΔH) により自然湧水が生じる。また湧水量は、図-6のように水頭差 (ΔH) に比例するため、揚水量の増減による立坑水位の調節によって所要の湧水量に制御が可能である。湧出した岩盤地下水は集水孔から集水トンネル最深部の立坑底部の吸水槽まで自然流下し、揚水装置で揚水して地表に搬出される。地表に揚水された岩盤地下水の送水先は主に浄水場または貯水池と想定され、新設貯水池送水の場合は貯水運用による利水性の向上、既存貯水池送水の場合は渇水時に貯水量が低減した貯水容量の有効利用にもつながる。

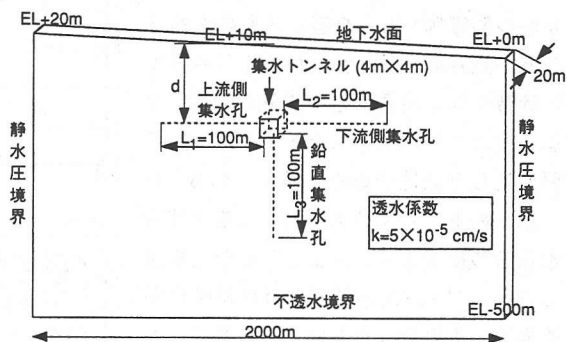


図-7 集水孔1ピッチ幅の有限要素モデル

3.2 取水性能の評価および特徴

取水システムの取水性能を定量把握するため、集水孔が一定間隔 ($A=20m$) に設置された条件に対して三次元地下水解析を行った¹³⁾。解析モデルは集水孔の1ピッチ幅 (20m) を考慮した図-7であり、透水係数は $5 \times 10^{-5} cm/s$ 、地下水面は固定で立坑水位がない条件 (集水トンネル・集水孔は大気圧) とした。解析ケースは、Case-a, bは集水孔が無いケースで Case-aは $d=60m$ 、Case-bは $d=110m$ とし、Case-cは $d=60m$ で $L1=L2=100m$ (鉛直集水孔無し)、Case-dは $d=60m$

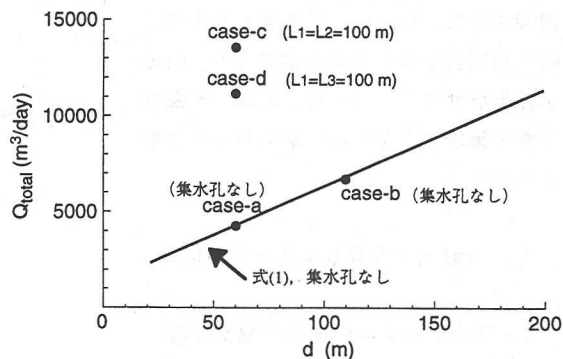
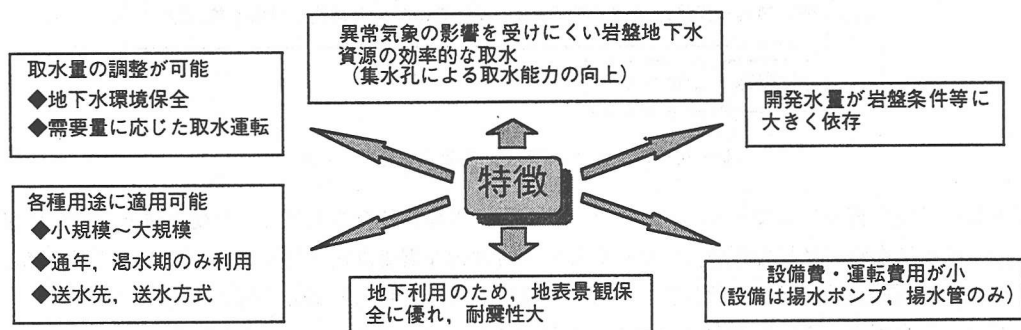


図-8 深度 d と集水トンネル1000m当たりの湧水量 Q_{total} の関係

で $L1=L3=100\text{m}$ （下流側集水孔無し）である。解析結果として図－8には集水トンネル長 $1,000\text{m}$ 当たりの湧水量を示すが、Case-aに対してCase-c, dの湧水量は3.2倍、2.6倍に大幅に増大しており、集水孔の設置によって本システムは取水能力を大幅に向上させていることがわかる。また、湧水量は岩盤の透水性および水頭差（ ΔH ）に比例するため、任意の透水係数や水頭差における湧水量を図－8より算出でき、本システムの取水性能が把握できる。

次に、本システムの特徴をまとめて図－9に示しているが、①異常気象の影響を受け難い岩盤地下水資源の取水性能の向上、②取水量の制御が可能、の2点が最大の特徴である。特に②の特徴は地下水環境保全に有効で、かつ需要量の変動に対応した取水運転を可能にする。また他の特徴として各種の規模や用途に対応可能なこと、地下利用であることなどがあげられる。さらに大きな特徴として設備費・運転コストが極めて安いこともあげられる。これは本システムの設備は揚水管と揚水ポンプのみであり運転コストもこれらの維持管理費と動力費のみであるためである。



図－9 岩盤地下水取水システムの特徴

本システムの建設費・設備費・運転費等を考慮した利水単価（円/ m^3 ）は、地下水開発量に依存するため一概に他施設とは比較はできないが、特徴の一つである設備・運転費が極めて安価である点是有利な点であろう。しかし、本システムの場合、開発水量が岩盤条件等に大きく依存しているため、利水単価が他の水源開発施設に対して同等またはそれ以下の条件を満たし得る為には、渇水頻発地域のような河川水利用が割高な地域であり、かつ後背地に豊富な涵養域をもつ高透水性岩盤で多量湧水が比較的低コストで得られる地域を選定することが重要である。

4. 計画・調査・設計・施工に必要な技術

岩盤地下水取水システムの計画から管理・モニタリングまで必要となる構成技術を図－10にまとめ、技術の現状やポイントをまとめる。

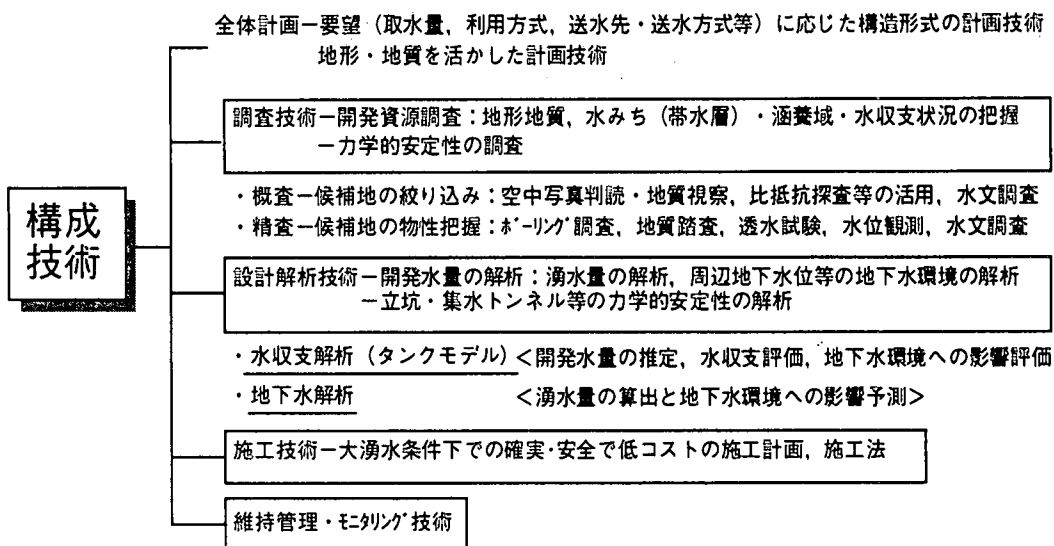
4.1 全体計画

開発水量、利用方式（通年利用、渇水期のみ利用など）、送水先（浄水場、貯水池など）および送水方法等の開発条件が明確になれば、地形地質条件に応じた最適な構造形式を決める計画技術が必要である。図－4のように本システムは簡単な構造であるため、新規の機能・機構の追加も比較的容易と考えられる。

4.2 調査技術

立地を計画する場合、力学的安定性と水文・水理特性の調査・分析により岩盤地下水の取水可能な地点を絞り込むことが必要である。特に、開発水量の正確な推定や地下水環境への影響を評価するための水文地質情報の取得が必須であり、特に水みち情報（地形地質、割れ目系分布、透水係数）、涵養域情報（後背地地形地質・割れ目系分布、水位分布）および水収支情報（降水量、河川流量）が重要である。

また、一般に調査は、概要調査→詳細調査→基本設計→立地決定にそったフローで行われるが、概要調査は広域の対象領域から地下水補給量が多く透水性の高い候補地の絞り込み、詳細調査は設計解析に必要な水



図－10 岩盤地下水取水システムに必要な技術

文量や地質物性値を得るものである。これらはボーリングや地質踏査を主体とした従来技術で調査可能であるが、特に概要調査時点は対象領域は広域であるため合理的な調査計画が望ましい。ここでは概要調査を対象に、空中写真判読、地質視察、比抵抗探査および水文調査を活用した調査の考え方を示す。

空中写真判読は従来から地形地質の概況を知る目的で使われてきたが、水みちの把握を目的とした割れ目系分布、風化状況等を記載した水文地質図の作成に利用できる。判読結果は簡単な踏査（地質視察）を行えば、更に信頼性が高いものとなり、対象領域から本システムの候補地の絞り込みに有効である。また、比抵抗探査は現在でも地下水関係の調査に広く用いられているが、比抵抗値そのものは後工程の設計解析等に直接使えるものではない。このため、Archieの式等の既往の研究成果を用いて、比抵抗値から空隙率・飽和度を算出する評価システムを開発しており¹⁴⁾、透水係数分布も推定すれば、候補地の絞り込みに有効である。

次に、水文調査では、長期間の降水量と河川流量を観測する。観測結果は水収支計算やタンクモデル等に用いられ、開発水量の推定や水収支機構の推定に役立つ。また地下水補給量の推定では、溪流没出点の調査が有効で、地下水面分布を把握して地下水流動を推定することが重要である。

4.3 設計解析技術

ここでは、立坑や集水トンネルの力学的な安定性に関する設計解析は省略し、開発水量の推定と周辺地下水環境への影響評価に利用可能なタンクモデル¹⁵⁾と地下水解析に関する設計解析技術について述べる。

タンクモデルは水収支領域内の降水量と河川流量の時系列測定結果より、地域の水収支状況を解析するものである。タンクモデルの解析結果は、河川流量に占める各タンクの流量成分やタンク水位の経時変化が得られ、地下水開発水量の推定や概略の水収支把握に役立つ。

次に、地下水解析は多岐にわたる検討が可能になっており、湧水量の算出による開発水量の推定、周辺地下水位と地下水流の算出による地下水環境変化の評価に利用する。本システムは集水孔をもつ構造であるため、三次元解析が理想的であるが、広域を対象とするため実質的な三次元モデルの構築が困難な場合もある。その場合、湧水量の算出には図－7のような集水孔1ピッチ分の厚さを考慮した三次元解析で可能であるが、地下水位分布等の検討には広域的なモデルが必要なため準三次元解析が有効と考えられる。準三次元解析は深さ方向の物性変化は考慮して平面地下水流を算出するもので、湧出量を入力すれば平面地下水流と地下水位分布が得られると共に、水収支・河川流出量への影響もある程度検討可能である¹⁶⁾。

4.4 施工技術

本システムの候補地は大湧水が想定される条件下である。このため、立坑は内径5m程度、集水トンネルは

断面が4m×4m程度、集水孔はφ100mmで長さ100m程度とし、これらを確実に施工する考え方を述べる。

(a) 施工に関する基本的な考え方

岩盤地下水の主な流動経路は節理や断層等の割れ目系であるが、ある程度広域かつ大量の取水を期待するとすれば、破碎帯を伴うような大規模な割れ目系が取水の主対象になる。一般的には、破碎帯等はある地域内において特定の方向性を持って分布することが多く、取水施設の建設候補地においても主要な卓越方向があると想定できる。この場合、図-11のように立坑・集水トンネル等は主要な破碎帯を貫通しない位置に配置し、取水の大部分は集水孔が担うようにすることが基本となる。この配置条件の場合には、立坑・集水トンネル共にNATM工法を主にして施工できる。また集水孔は、集水トンネル施工完了後、トンネル内にロータリーパーカッションドリル等を数台投入して同時掘進することを想定している。

(b) 立坑・集水トンネルの湧水対策

前述した図-11の配置が施工計画上の基本であるが、破碎帯等が集中する地点に立坑や集水トンネルを計画せざるを得ない場合も想定される。そこで、施工時のトンネル比湧水量が2～3m³/min/km程度の地質条件を対象に、湧水対策の考え方を下記に示す。

立坑施工の場合、止水を目的とした事前グラウト工法や湧水削減を目的とした水位低下工法(ディープウェル等)が対策としては一般的と考えられるが、前者は確実なグラウト計画の立案が難しいことやコスト上昇が課題であり、後者は強制的な水面低下による環境への影響等が懸念される。そこで、ここでは掘削・覆工を同時施工するショートステップ工法の適用を基本工法と考える。しかし、さらに大湧水が想定される場合には、一つの対策として図-12に示すような周辺補助坑を用いた湧水削減方法も考えられる。本法は先進補助坑に発生する湧水を最深部から揚水して、補助坑壁面の水圧が大気圧になる区間を大きくとり、補助坑壁面の大気圧区間と立坑(大気圧)の間の地下水の水圧を大幅に低減することで立坑湧水を低減させるものである。本法の場合、地下水面は補助坑湧水による自然低下であり、水位低下工法のように地下水面そのものを立坑最終掘削面より低下させる必要はない。

次に、集水トンネルの場合には、止水グラウトと水抜きボーリングが主対策となるが、集水トンネル壁面から次工程で集水孔を削孔して湧水を集めるため、取水性能の阻害要因となる懸念があるグラウト工法より、水抜きボーリング工法を採用する方が望ましいと考える。同工法を適用すれば、ボーリング孔に湧水が集中して集水トンネルの切羽湧水を削減できるため、吹付けコンクリートやロックボルトの施工が比較的容易になる。また、吹付コンクリートは急結剤の対セメ

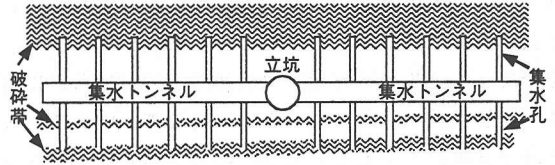


図-11 岩盤地下水取水システムの平面配置に関する基本概念

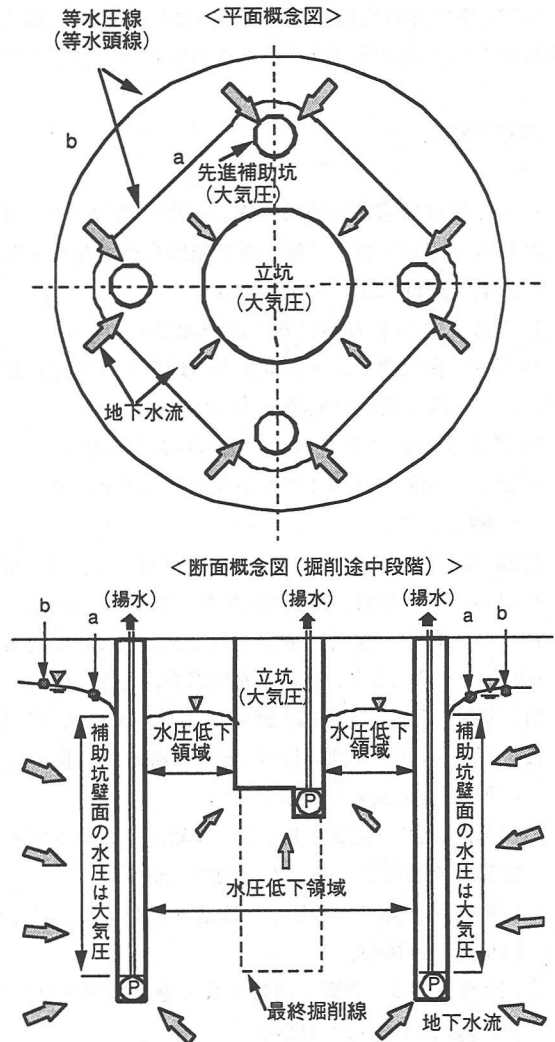


図-12 先進補助坑を用いた立坑施工時の湧水削減対策の概念図

ント比を上げて凝結時間を短縮し、ロックボルトは従来のミルク充填式タイプに替えて、ロックボルトの内部に高圧水を注入しボルト自体を膨張させて壁面に密着させるスエレックスボルトの採用を想定している。

5. まとめ

本研究は、渇水（水不足）に対して水資源の多様化が有効な方策と考え、岩盤地下水資源の利用の可能性を検討したものである。まず、既往の渇水状況の分析では、渇水頻発地域の地形地質の特徴をまとめ、同地域での岩盤地下水利用の有効性を示した。また、トンネル湧水事例から岩盤地下水資源の規模や特性を示すと共に、新たに事例に基づいて透水係数を算出して岩種毎の透水性の分布範囲や透水性と影響範囲の相関性を分析した結果、岩盤地下水は適地を選べば利用に値する資源であることが理解できた。次に、すでに提案された岩盤地下水取水システムに対して、同システムが効率的な取水が可能であること、立坑水位制御による湧水量調節が可能なこと等の特徴を示した。さらに、本システムの実現に必要な構成技術を示す共に、計画・調査・設計解析・施工における技術の概要とポイントをまとめ、基本的には岩盤地下水取水システムの実現可能性を示しえたものとする。

なお、本研究の実施に際し、九州大学 工学部 神野教授、清水建設（株）和泉研究室の鈴木誠氏・本多眞氏・奥野哲夫氏、土木技術第二部の山田俊子氏・長谷川誠氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土庁長官官房水資源部編：平成7年版・9年版 水資源白書，大蔵省印刷局
- 2) 江崎・宮永・蔭・三谷：地下空間を利用した水資源開発に関する研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，3，pp. 261～267，1998.
- 3) たとえば 日経産業新聞：1997.08.07.
- 4) 石井・佐久間：トンネル湧水の地形・地質的分類—全国主要鉄道トンネルの恒常湧水の実態調査をもとに—，鉄道技術研究所報，(1041)，1977.
- 5) 高森町（編）：高森町・湧水館パンフレット.
- 6) 村上・大島・塚本：丹那トンネルの湧水・渇水はどうなっているか，トンネルと地下，8 (10)，pp. 685～695，1977.
- 7) JR 東日本：名水「大清水」，JR ガゼット，(32)，pp. 6～7，1989.
- 8) 日本地下水学会（編）：名水を科学する，pp. 116～117，技法堂出版，1994.
- 9) 高橋・菊地・吉川・桜井：建設工事における地質工学，鹿島出版会，1985.
- 10) 土木学会（編）：ダムの地質調査，p. 92，1977.
- 11) 佐藤・渡辺・小田部：断層のトンネル湧水に与える影響，埼玉大工学部地盤水理年報，4，p. 64，1978.
- 12) 平間・丸山・桑原・鈴木：母岩・破碎帯・断層粘土に見られる岩盤の工学的特性の変化，土木学会第42回年講，pp. 388～389，1987.
- 13) 鈴木・百田・山田・長谷川・神野：岩盤地下水取水システムの取水量に関する基礎検討，土木学会中部支部研究発表会，pp. 273～274，1998.
- 14) 西・竹中・坂下・吉田：岩盤地下水開発における比抵抗探索結果の評価システムの検討，土木学会第53回年講，投稿中.
- 15) 鈴木・百田・神野・河村：GAを用いたタンクモデル同定に関する統計的検討，水工学論文集，第42巻，pp. 115～120，1998.
- 16) 百田・鈴木・神野・河村：準三次元浸透流解析による流出解析の試み，土木学会第53回年講，投稿中.