

ウォータータイトトンネルの早期地下水回復に向けた施工法

森安弘¹・中谷幸一²・森本精郎³・岡林福好⁴

^{1,2}非会員 佐藤工業株式会社 大阪支店 土木部門 (〒541-0041大阪府大阪市中央区北浜1-1-6)

^{3,4}非会員 国土交通省四国地方整備局高知河川国道事務所 (〒780-8023 高知県高知市六泉寺町96-7)

Key Words: ウォータータイトトンネル

1. はじめに

新宇治川放水路トンネル第一工事は、宇治川上流地域の床上浸水対策特別緊急事業の中核として建設される全長 2,365mのうち上流側(呑口側) 1,320mを施工するものである。

トンネル周辺の地下水位は全体に高く、生活用水・農業用水に広く利用されている。

このため、トンネル全線をウォータータイト(止水構造)として、工事完成後に最大水圧1.1MPaに耐えられるな構造である。なお、掘削方法は、地山を極力緩めないよう機械掘削工法を採用している。

2. 突発湧水区間の概要

坑口から 265mの切羽から前方探査を兼ねた先行ボーリングを施工中、18m掘進した段階で1孔から湧水量 2m³/min、水圧 0.7MPa の突発湧水が発生し、掘進の継続が不可能となった。その後、地下水位低下を目的として左右に 8 本先行ボーリングを追加し 8m³/min の湧水を排出し、2m/日の地下水位の低下を実施した。

当初、渇水対策による仮設水源施設の範囲は、トンネル掘削の影響予測地下水位を40mに設定していた。しかし、湧水の排水により地下水位の低下が影響予測地下水位に近付いたため、バルブによる湧水の排出を停止したところ、地下水位の低下は止まったが、切羽周辺の地下水圧の上昇により、切羽崩壊の兆候が表れた。このため、再度湧水の排水を開始し、切羽に厚さ50cmの鏡吹付けを行い、今後の対策を検討することになった。

3. 止水注入の計画と結果

(1) 突発湧水区間の調査・施工検討

切羽前方 150mの地質状況の把握として、高水圧、多量湧水に耐えるワイヤーライン式ボーリングを採用した。

ボーリングの結果

- ・切羽～12m: 破砕された頁岩層
- ・12 ～40m: 非常にクラッキーなチャート層
- ・40 ～60m: 石灰岩・輝緑凝灰岩・チャートの互層
- ・60 ～150m: 頁岩層(新鮮)

なお突発湧水の発生区間は 12～40mのチャート層区間に限定され、この区間の平均ルジオン値は 8.5(Lu)であった。

また、クラッキーなチャートを挟む前後の頁岩層は、ほぼトンネル方向に対して直角で傾斜が 80 度とほぼ直立しておりこの頁岩が不透水層となり、チャート層が帯水層として存在していた。

なお、帯水層の範囲は、奥行き 40m程度で左右に 200m、400m程度の範囲で広がっていると想定された。今回の突発湧水の発生は、その帯水層の底部をボーリングにて貫入させた結果によるものとされた。

上記箇所の対策として、経済性・工期・社会的影響について比較した。(表-1)

a) 止水工法(岩盤注入による止水)

経済性・工期面で劣るが、社会的影響で評価される。

b) 補助工法併用排水工法(岩盤固結工法)

経済性・工期面は優れるが、地下水利用・地下水回復に問題がある。

c) 排水工法(水抜き坑による地下水排出)

経済性・工期面は優れるが、社会的影響に問題を生じ、地下水回復に大きな遅れが生じる。

以上の結果から、工事の施工面では経済性・工期では後者2工法が優れる。しかし、湧水による追加事前対策に要する約半年以上の日数と、対策工事費を考えると計画地下水位回復に大幅な遅れを生じ地域社会への影響が大きい。よって、地下水位回復時期および地域社会影響を評価し、止水工法を選定した。

表-1 対策工法比較

	止水工法	補助工法併用 排水工法	排水工法
経済性比率	3.7	2+1(事前対策)	1+1(事前対策)
工 期	4.1ヶ月	1.4+6ヶ月	1.8+6ヶ月
地下水利用	現状の事前 対策範囲内	追加の事前 対策が必要	追加の事前 対策が必要
地下水位回復	計画通り	計画から 遅れる	計画から大幅 に遅れる
地域社会影響	影響なし	受入可能	受入られない

(2) 止水注入計画

a) 注入範囲

周辺地下水位の低下を抑え、切羽面の安定を確保する目的として、改良範囲の目安(1~2D)からトンネル掘削面から外周5.0mを改良する。また、改良縦断範囲は、破碎された頁岩層10m(前処理注入)とクラッキーなチャート層33m(本注入)を合わせた43m区間を改良する。(図-1)

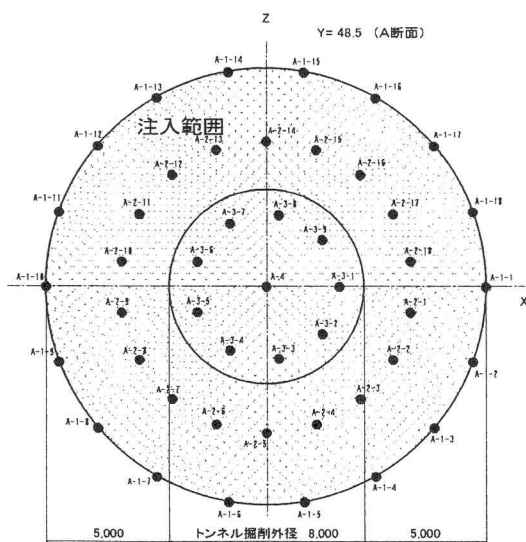


図-1 注入範囲

b) 注入工法

注入工法は、コアボーリング結果から比較的孔壁が安定するとして、パッカ注入を採用する。また削孔方法は、硬質クラッキーなチャート層の削孔能率を考え、ロータリーパッカッション方式を選定した。

c) 注入パターン

注入孔の配置間隔は、地山条件・注入材・注入方式の関連で一孔の分担する注入範囲で決定される。一般的な注入孔先端間隔は1.0~3.0m程度であり、最大間隔3.0mを選定し、同心円状千鳥配置とする。

d) ステージ長

前処理注入区間(L=10m)のステージ長は、1ステージ長3.0m未満にて4ステージのリポーリング方式で行う。

本注入区間(L=33m)のステージ長は、前処理区間を合わせ、前処理区間1ステージ長3.0m未満、本注入区間1ステージ長8.0m未満にて最大9ステージのリポーリング方式削孔・注入を行う。

(図-2)

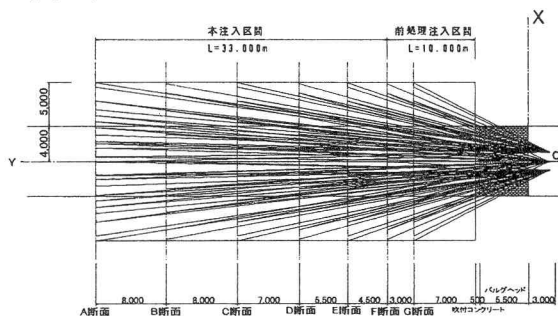


図-2 ステージ図

e) 注入材料

注入材料の選定には、岩盤の細かい亀裂への浸透、注入材の逸走防止としてのゲルタイム、水圧に抵抗できるホモゲル強度1.6N/mm²、覆工コンクリート完成までの1~2年間の耐久性の総合評価から、低モル比LW懸濁型注入材とした。なお、ゲルタイムは3~5分程度とした。

f) 規定注入率

規定注入率は、亀裂の多いチャート層の注入として5%に設定した。しかし、注入は圧力管理で実施することから、規定注入圧力に達しない場合は、注入を継続し1ステージ当りの最大注入量を規定注入量の2倍までとする。なお、注入圧力の最大値は以下のように設定する。

$$\text{前処理注入 } P = 0.3 + 0.2 = 0.5 \text{ MPa}$$

$$\text{本注入 } P = 0.3 \times 3 = 0.9 \text{ MPa}$$

(最終注入圧力 1.2 MPa)

g) バルクヘッド

バルクヘッドの検討として、バルクヘッドに作用する力Fと抵抗力H、安全率Fsの関係を下記に示す。

$$F = \text{湧水圧力} \times \text{トンネル断面} + \text{注入圧力} \times \text{注入断面} \\ = 30 \text{ t/f/m}^2 \times 50.3 \text{ m}^2 + 50 \text{ t/f/m}^2 \times 12.0 \text{ m}^2 = 2,109 \text{ t/f}$$

$$H=C \times Ae + V \tan \phi b$$

$$3,163.5 = 20 \times 8.0 \times \pi \times L + 8.02 \times \pi / 4 \times L \times 2.35 \times 0.6$$

$$L = 5.5 \text{ m}$$

$$\text{抵抗力 } H = Fs \times F = 1.5 \times 2,109 = 3,163.5$$

$$\text{コンクリートせん断応力 } C = 2.0 \text{ kgf/cm}^2 = 20 \text{ tf/m}^2$$

$$Ae = 8.0 \times \pi \times L \quad L = \text{バルクヘッド長}$$

$$\text{鉛直荷重 } V = 8.0 \times \pi / 4 \times L \times \gamma \quad \gamma = 2.35 \text{ tf/m}^3$$

$$\text{摩擦角 } \tan \phi b = 0.6 \text{ (岩とコンクリート)}$$

以上の計算式よりバルクヘッド長は、コンクリート圧縮強度 18 N/mm^2 を使用して、 5.5 m とする。

(3) 効果確認目標値

注入効果の確認として施工途中に2回また、完了後に1回のルジオン試験とボーリング孔内湧水量の測定を行う。

管理目標は、湧水箇所で $0.50 \text{ L/min} \cdot \text{m}$ 、無湧水箇所では3ルジオンにて管理し、評価する。

(4) 止水注入施工

a) 施工経過注入実績

計画注入量に対する注入率は、前処理区間のG断面で43%、F断面で36%となり、本注入区間のE断面も32%と低い結果となった。

よって、D区間の1部を計画注入圧の2倍 (2.4 MPa) とした施工を行い、計画注入圧領域の透水試験結果と注入圧2倍領域の試験結果を基に注入計画の対策案の検討に役立てることとした。

b) 試験結果に基づく計画変更

D断面施工完了、注入効果の確認としてE断面までの区間をチェックボーリングによるルジオン試験と孔内湧水量測定で判定した。1孔当りの試験のステージ数は、1,2st がG断面区間、3st がF断面区間、4st がE断面区間で行った。なお、チェックボーリングの施工箇所は図-3 のように3点を限定した。

- ・最大 2.4 MPa ゾーン孔の間に行う。(NO.1)
- ・最大 1.2 MPa ゾーン孔の注入量の多い孔と少ない孔の間に行う (NO.2)
- ・最大 1.2 MPa ゾーン孔の注入量の少ない孔の間に行う (NO.3)

試験結果から、最大注入圧力 1.2 MPa ゾーンでは NO.2 ボーリングで 8.48 ルジオン、NO.3 ボーリングで 7.78 ルジオンであった。

しかし、最大注入圧力 2.4 MPa ゾーンの NO.1 ボーリングは 2.40 ルジオンと計画ルジオン値 3.0 を満足する結果となった。(表-2)

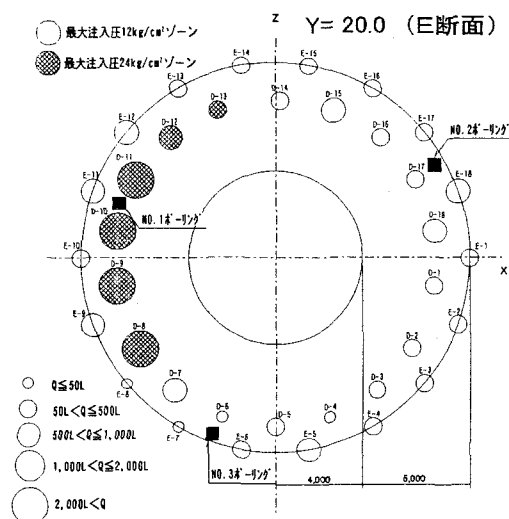


図-3 チェックボーリング位置図

表-2 試験結果表

試験 ステージ No.	岩 種	地 盤 注入区分	試験 項目	No.1	No.2	No.3		
1st	頁 岩	前処理 注 入	注入圧力	0.5MPa	0.5MPa	0.5MPa		
			湧水量	湧水なし	湧水なし	湧水なし		
			ルジオン値	0.00	0.76	0.54		
2st			湧水量	湧水なし	湧水なし	湧水なし		
			ルジオン値	0.45	1.58	1.48		
			3st	湧水量	湧水なし	湧水なし	湧水なし	
ルジオン値				0.29	2.86	1.16		
4st				頁岩 チャート	本注入	注入圧力	2.4MPa	1.2MPa
			湧水量			0.4L/分 0.09L/分/m	1.5L/分 0.32L/分/m	0.3L/分 0.06L/分/m
	ルジオン値	2.40	8.48			7.78		

その後、C断面施工の最大注入圧力を 2.0 MPa に変更して、注入を行い前回と同条件にてD区間 (5st) 3点のルジオン値を求めた結果、 $0.28 \sim 1.36$ ルジオンと計画値を満足する結果となった。よって、C断面以降の施工は最大注入圧力を 2.0 MPa として、1ステージ当りの最大注入量を規定注入量の4倍に決めた実施した。なお、最終ステージ (A区間) はカバーロックとして、最大注入量を規定注入量の6倍とした。(図-4)

(5) 試験結果

注入施工完了における最終チェックボーリングを行い、C・B・A断面の評価を行った。なお、試験条件は、これまでと同条件の3孔にて行った。(表-3)

以上の試験結果からC・B・A区間のルジオン値は全て3ルジオン以下となり、湧水量もNO.1孔の7

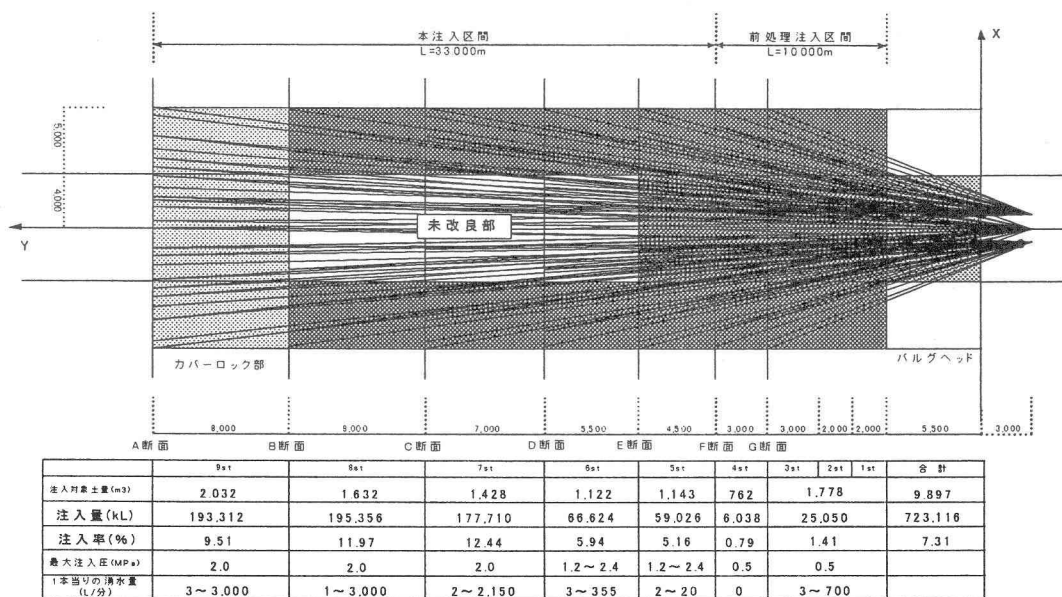


図-4 施工実績

stの1.0L/min/m程度だったことから、施工途中に注入圧力の変更が有効であったと考えられる。

表-3 試験結果表

試験 ステージ No.	岩 種	地 盤 注入区分	試 験 項 目	No.1 2.0MPa	No.2 2.0MPa	No.3 2.0MPa
6st	チャート	本注入	湧水量	湧水なし	湧水なし	湧水なし
			ルジオン値	1.52	0.32	0.32
7st	チャート・石灰 質粘結岩		湧水量	1.0L/分m	湧水なし	湧水なし
			ルジオン値	2.24	0.60	0.68
8st	チャート・石灰 質粘結岩		湧水量	湧水なし	湧水なし	湧水なし
			ルジオン値	1.80	0.56	1.04

4. 割岩併用発破工法の計画と結果

(1) 水区間のトンネル掘削方法

止水注入区間にけるチャート層の一軸圧縮強度は、120N/mm² から 200N/mm² である。このためトンネル掘削方法は、自由断面掘削機械 (330kw) での掘削が不可能になり、地山の損傷あるいは透水係数の増大を極力抑えた割岩併用発破工法を検討した。

一般に環境対策としての制御発破工法であれば、基準値などから定量的に対策が判断できるが、地山の損傷や透水係数といった定量化しにくいものに対しては、効果の判定が難しい。また、これまでの本

トンネルでの試験発破等の発破実績がないため、通常発破との違いがわからない。

よって、発破使用による岩盤への影響を考察し、トンネル掘削時における湧水量の観察から制御発破の評価を行う。

a) 発破工法の岩盤への影響

発破を行う場合、周辺地山の影響を与える要因として、2つの要因が考えられる。1つは爆薬近傍の岩盤が破壊され、またはゆるむことで物性値が低下することであり、この低下する領域を損傷領域と呼んでいる。もうひとつは掘削時の発破振動であり、振動が大きい場合には損傷を発生させることになる。

b) 爆薬近傍での損傷

爆薬近傍での損傷領域についての研究報告は、手塚1) 2) 等の数件あり、報告によると損傷領域はおおよそ1mの範囲と言われている。割岩併用発破工法は、スリットによる縁切工法であるため、発破による損傷領域は小さく、また直接岩盤が破壊することはない。

c) 発破振動に対する岩盤の限界振動値

Person, Holmberg and Leeらは、北欧の硬質岩盤で爆薬孔近傍の損傷領域の実験を行なった。その結果、損傷領域は発破振動値の大小に左右されると述べるとともに装薬孔近傍で計測可能な損傷が発生する振動値を70~100cm/sとしている。異なった装薬量に対する離隔距離・振動値の関係を示す(図-5)

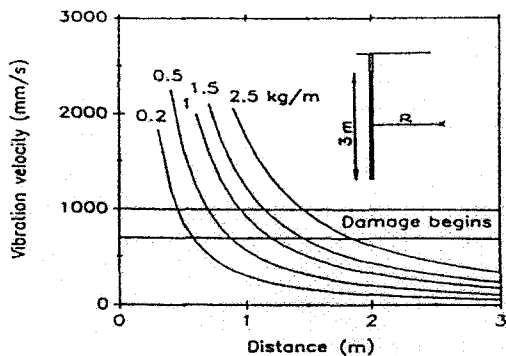


図-5 異なった爆薬量における離隔距離と振動値の関係

また、発破によって発生する動的なひずみの大きさの分布を検討し、地山強度との比較照査による安全性の評価を行う。

弾性波 $V_p = 4.2 \text{ km/sec} = 420,000 \text{ cm/s}$

密度 $\rho = 2.61 \text{ t/m}^3 = (2.61/980) \text{ gf/cm}^3$

一軸圧縮強度 $\sigma_c = 1200 \text{ kgf/cm}^2$ 以上

チャートの脆性度 (σ_c/σ_t) は、岩石の脆性度の下限値を 10 として、引張強度 σ_t は、

引張強度 $\sigma_t = \sigma_c/10 = 120 \text{ kgf/cm}^2 = 120,000 \text{ gf/cm}^2$

したがって、引張強度に達する限界振動値 $V_{\max}$ は $V_{\max} = \sigma_t \times (\rho \times V_p)$

$= 120,000 / ((2.61/980) \times 420,000) = 107 \text{ cm/s}$

よって、岩盤の限界振動値は、最小値の 70 cm/s とする。

(2) 発破振動低減対策

a) 発破振動

発破振動は、装薬量と爆源からの距離 D (m) によって変化し、一般に変位速度 V (cm/s) と段当たり薬量 W (kg) との間には次式の関係がある。

$$V = K \times W^m \times D^n \quad \text{----- (1)}$$

定数 m および n は、一般に 0.5~1.0 および -2 を提唱されている。本計画での m は、その中間の 0.7 を採用する。 K は岩質、地形、爆薬の種類、発破法、発破効果などによって定まる係数である。したがって (1) 式は、

$$V = K \times W^{0.7} \times D^{-2} \quad \text{----- (2)}$$

となる。よって、振動速度を低減させるには、爆薬からの距離 D は変わらないので、 W と K を低減させることが必要である。

b) W の低減

W の低減には、一発破の進行長および分割を変える方法と、通常より多くの段数を用いて段当たりの

薬量を低減する方法がある。

① 進行長と分割

いたずらに進行長を短くしたり発破回数を増やすことは、トンネル掘削サイクルに大きく影響を与えたり、逆に住民の苦情が生じる可能性がある。一般に C パターンの掘削工法は、補助ベンチ付全断面工法で掘削長は 1.2~1.5 m である。本計画では、 W の低減を目的として掘削長 1.0 m、上半と下半の分割して交互併進とする。

② 多段発破

段数を増やして各段当たりの装薬量を減らせば振動低減効果があるが、むやみに段数を増やせば現場の作業効率が低下したり煩雑になる。一般に、MS 雷管と DS 雷管を併用すれば、最大で 35 段発破程度まで段発破が可能である。

c) K 値の低減

K 値の低減には、使用する爆薬の変更、芯抜き発破方法の変更、および割岩工法による自由面形成との併用がある。

① 爆薬の種類

使用する爆薬は、爆速が大きいほど発破振動が大きい。爆速は岩盤の弾性波速度と同程度にするのがよいとされている。チャート層の弾性速度は、4200 m/s 程度である。このため、使用する爆薬の種類は、一般によく使用されている含水爆薬のスラリー爆薬を使用する。なお、振動測定結果等により、さらに K 値の低減をする必要がある場合は、スムーズ・プラスティングとデカップリング装薬を併用しながら、SB 用爆薬の使用を検討する。

(表-4)

表-4 トンネル用爆薬一覧表

名 称		爆速 (m/s)
ダイナマイト	2 号梗	5500~6500
	制御発破用爆薬	1800~2300
含水爆薬	スラリー爆薬	5600~6000
	エマルション爆薬	5200~6000
	SB 用爆薬	2700~3500
ANFO		2500~3000

② 芯抜き発破方法

三谷 3) らは試験用トンネルでの実験データから芯抜き発破方法の違いにより定数 K が異なることを確認している。表-5 より V カットをダブル V カットにすることで K 値を 45% に低減できる。よって、本発破による芯抜きは、ダブル V カットの発破パターンを採用する。(図-6)

表-5 芯抜き発破パターンごとの定数K

芯抜き発破パターン	実験条件	定数K
Vカット	瞬発4孔	913
ダブルVカット	MS2孔+MS4孔	495
φ100mmバーンカット	MS2孔+MS2孔	551

表-7 装薬量と発破振動値

発破区分	W:装薬量 (kg)	D:発破源と外周 壁の距離 (m)	V:振動値 (cm/s)
芯抜き	0.8	3.5	22
払い	0.4	0.8	70

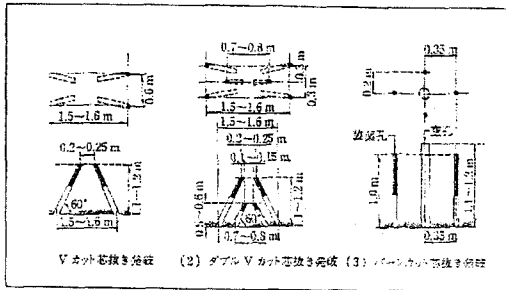


図-6 芯抜きパターン

③割岩工法による自由面形成

K値を低減するための有効な方法として、トンネル外周に割岩工法により自由面を形成して発破をする。ジェオフロンテ研究会4)によると、外周に自由面を設けた場合のK値は、芯抜きの場合のK値に比べて1/5~1/10程度に低減していると記載されている。

(3) 計画発破パターン

a) 基本条件

止水注入区間の発破パターンは、外周にスリットを形成する割岩併用発破工法を基本として以下の条件で計画を行った。

- ・1サイクル長は、1.0mとする。
- ・最大20段まで対応ができるDS雷管を使用する。
- ・爆薬は、スラリー爆薬を基本とする。なお、試験施工等によりK値の軽減が必要な場合は、SB用爆薬の検討を行う。
- ・芯抜き発破パターンでは、ダブルVカットを採用する。

b) K値と発破振動値

下の表-6は、発破区分別に対する一般的なK値と本トンネルで採用する制御発破のK値を示す。

表-6 装薬量とK値

発破区分	一般付K値	本トンネルのK値	備考
芯抜き	450~900 (100)	700×0.45~315	三谷らの検討より0.45
払い、天端	200~600 (100)	700×1/8~85	スリット設置の場合K値は芯抜きの1/5~1/10程度

表-7は、各発破区分における装薬量(W)と発破源とトンネル外周壁の距離(D)に対する発破振動値(V)を式2より推定する。

(4) 試験発破

a) 試験方法および計器設置

試験発破の目的は、発破の振動値とその伝播状況を把握し、限界振動値70cm/sに達する震源地からの離隔距離を求め計画発破パターンの評価を行う。

試験方法は、発破点近傍(1.5mおよび4.0m)に3軸型振動速度計(HSJ:ジオスペース社製)を設置し、MO記録型デジタルレコーダ(DR-M 2a:ティアック社製)で1kHzのカプリング周波数で記録した。測定振動の方向は、Z:鉛直方向、X:トンネル軸方向、Y:トンネル断面方向とした。(図-7)

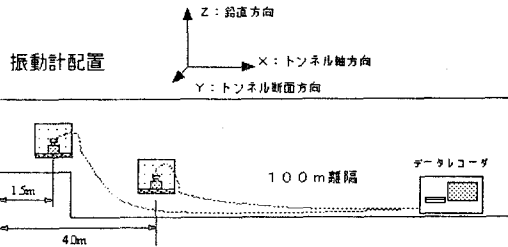


図-7 振動計配置図

b) 発破および振動測定

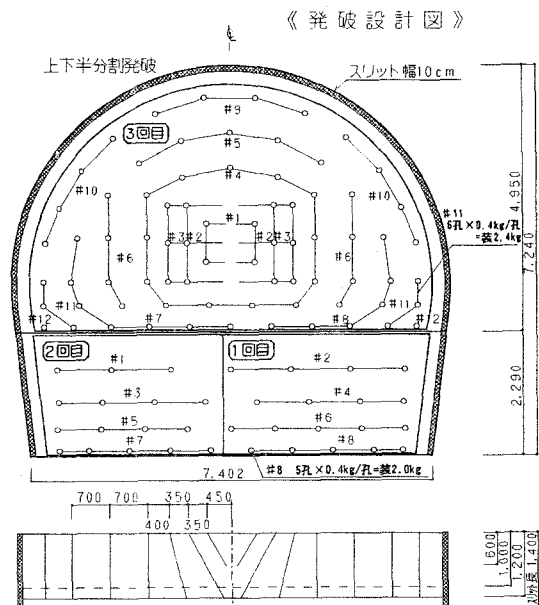


図-8 発破パターン図

上半右半分の外周スリットを設けた、1 k 716～717 切羽で最大斉発薬量 2.0～3.2kg の試験発破を行い振動速度を計測した。

試験発破は、

1 回目：下半右側断面（計器と同じ側）

2 回目：下半左半断面（計器と逆側）

3 回目：上半全断面

と、3 回実施した。（図－8）

c) 測定結果

最大振幅をともなう振動成分は多くの場合、計測点に斜めに入射すると考えられるため、測定結果は、3 軸方向の振動速度の瞬時値（ V_z 、 V_x 、 V_y ）を、ベクトル合成した値（ V_{xyz} ）で評価した。

（図－10）ここで、ベクトル合成の計算式は、

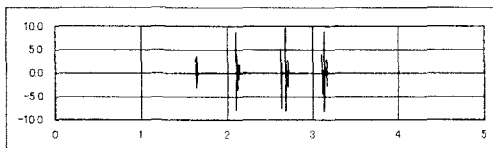
$$V_{xyz} = \sqrt{V_z^2 + V_x^2 + V_y^2}$$

となり、1.5m 地点での測定結果は、1 回目発破（下半右側）では 27cm/s（図－10）、2 回目発破（下半左側）では 5cm/s、3 回目発破（上半）では 14cm/s（図－11）であった。振動値と離隔距離から図－12 に示す幾何近似により求めた限界振動値 70cm/s に達する離隔距離（損傷領域）は、下半発破で 0.6m、上半発破で 0.2m の範囲であった。

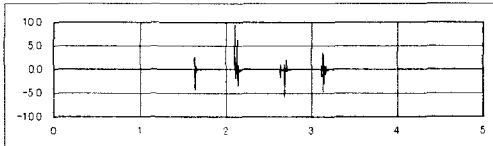
上半発破と下半発破の比較では、振動値は 1/2、損傷領域は 1/3 で小さい値を示した。これは、上半の全周にスリットが存在することによって岩盤が破壊しやすくなり、またスリット背面の岩盤では回折によって波動の伝播距離が長いと考えられる。これに対して下半の側壁にはスリットを設けたが下半盤にはスリットがないため波動が下半盤から伝わったと考えられる。

2003/4/8 10:01:05 下半右 発破				
項目:	VIZ	VIX	V1Y	V1XYZ
単位:	kine	kine	kine	kine
最大値:	9.720	9.368	26.367	27.236

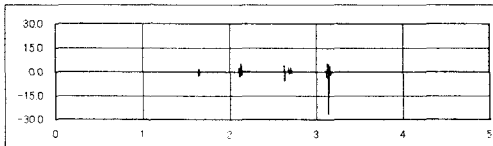
VIZ 鉛直方向



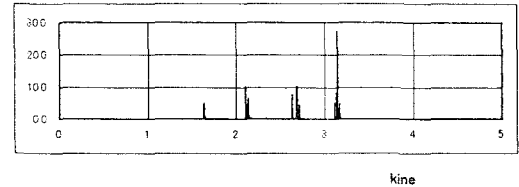
VIX トンネル軸方向



V1Y トンネル断面方向



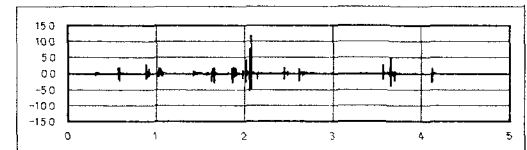
V1XYZ 3方向ベクトル合成値



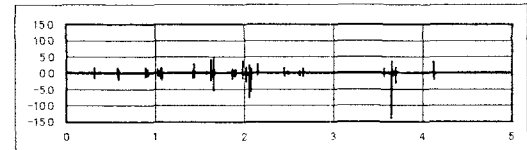
図－10 振動速度波形（下半 1 回目）

2003/4/8 16:01:04 上半発破				
項目:	VIZ	VIX	V1Y	V1XYZ
単位:	kine	kine	kine	kine
最大値:	11.776	13.864	7.853	14.193

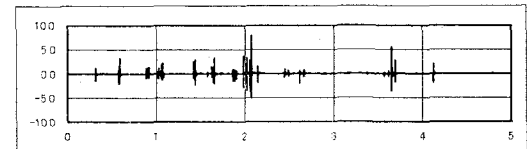
VIZ 鉛直方向



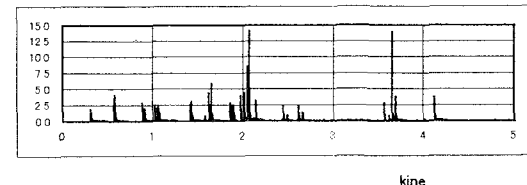
VIX トンネル軸方向



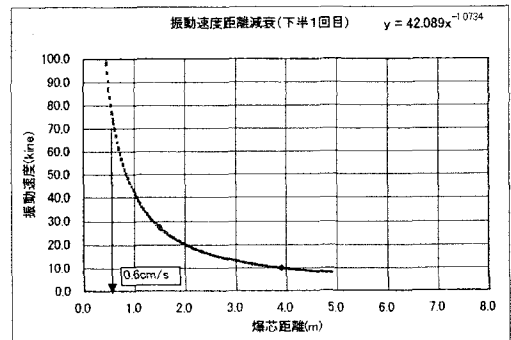
V1Y トンネル断面方向



V1XYZ 3方向ベクトル合成値



図－11 振動速度波形（上半）



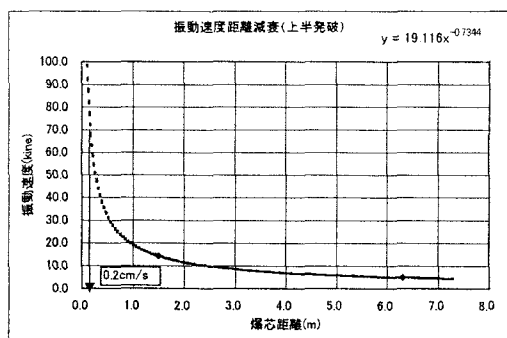


図-12 振動速度距離減衰

5. まとめ

止水注入と割岩併用発破の最終評価として、ボーリング孔からの管理目標であった湧水量 $0.50\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}$ をマスカットの公式によりトンネル掘削断面に置き変えると2.7倍 ($1.35\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}$) となる。

これまでの前方探査ボーリング孔からの湧水量とトンネル掘削により発生した湧水量を比較するとボーリング孔の約2.6倍程度であった。

よって、最終評価は止水注入施工区間の43.0mにおけるトンネル掘削に伴ない発生する湧水量で評価する。

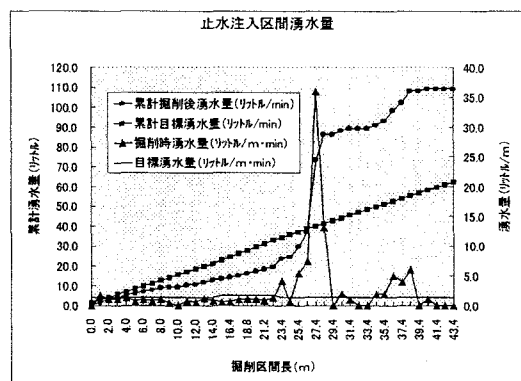


図-13 止水注入区間湧水量

図-13から、止水注入区間におけるトンネル掘削後の湧水量は $109\text{L}/\text{min}$ で、管理目標湧水量 $62\text{L}/\text{min}$ の1.8倍となった。

しかし、目標値を越える湧水発生箇所は一部であり、止水注入区間の内、72%は目標値以下の結果である。

また、地下水位の動向は、突発湧水発生直後に地下水位の追加調査として、影響予測地下水位範囲内に、観測ボーリングを地上から6箇所の施工を行い、

地下水位の調査を継続した。

結果、影響予測地下水位40m付近まで低下した地下水は止水注入の完了後、回復傾向を示し、トンネル掘削完了後も徐々に地下水位は回復している。

以上をまとめると、一部目標を達成できなかった湧水の発生箇所は、割岩併用発破による緩みによる影響として考えられず、その湧水は地下水位に影響されず地下水位は徐々に回復していることから、止水の完成割岩併用発破による緩みの制御は、目標を達成したと考えられる。

ウォータータイトトンネルとしての早期地下水位の回復を目的とした施工法において、今回の報告が今後のトンネル施工における対策案として検討されれば幸いである。また、今回は帯水チャート層からの突発湧水を事前予知として実施された前方探査ボーリングが、トンネル掘削施工の安全性を見出したことは事実であり、その調査を了解して頂いた発注者ならびに工事関係者に感謝を表す。

6. 参考文献の引用とリスト

参考文献

- 1) 手塚昌信・蓮井昭則・工藤洋三・中川浩二：土木学会論文集No. 602
- 2) 手塚昌信：大規模岩盤地下空洞の合理的な設計・施工に関する研究
- 3) 三谷健：発破騒音、振動を軽減するトンネル掘削の研究(2)、建設の機械化P56～64、1988. 5
- 4) ジェオフロンテ研究会：岩盤工法および割岩工法併用発破に関する技術資料、2002. 11