



施工 制約条件の厳しい呉の市街地トンネル

国道185号道路改良休山トンネル西

山田 周一* 石川 庄嗣**
土屋 敏郎***

1. はじめに

休山トンネルは、国道185号における呉市内中心部と阿賀・広地区を結ぶ区間(通称、呉越峠)の交通渋滞の解消を目的とした延長1.7kmの市街地トンネルである。

トンネルの西坑口部は、市街地中心部に位置しているため、民家が密集しており、工事に伴う騒音・振動は極力抑制する必要がある。また、坑口より80m付近までは土かぶりが1D以下の地形で、この区間の地質は盛土・崖錐堆積物より構成されている。さらに路線には、民家や各種ライフラインが埋設されている呉市幹線道路や旧海軍墓地などがある。このため、トンネル掘削に伴う地表への影響を極力抑制する必要がある。

本稿では、市街地トンネルにおける坑口環境対策、および土かぶりの小さい軟弱地山におけるトンネル掘削時の周辺地山への影響を考慮した工法検討と施工結果を述べるとともに、市街地硬岩トンネルにおける制御発破について記述する。

2. 工事概要

2-1 地形・地質概要

休山トンネルは、呉市街東部に位置する休山(標高501m)山頂北側で現在施工中である(図-1)。

地質は、広島型花崗岩と呼ばれる粗粒花崗岩が主に分布する。地盤状況は、マサ状を呈する強風化層を伴う花崗岩で、部分的に花崗斑岩およびひん岩などの貫入岩類が貫入している。坑口から約80m区間は地表から5～7m付近まではルーズな盛土層、崖錐堆積物、強風化岩が分布し、トンネル通過部は粒子の粗いマサ土(いわゆるオニマサ)状のD_H級岩盤が分布している。220m付近を境にD_H級岩盤からC_L級岩盤の漸移帯となっている。300m付近には貫入岩類であるひん岩が出現し岩質は堅硬で

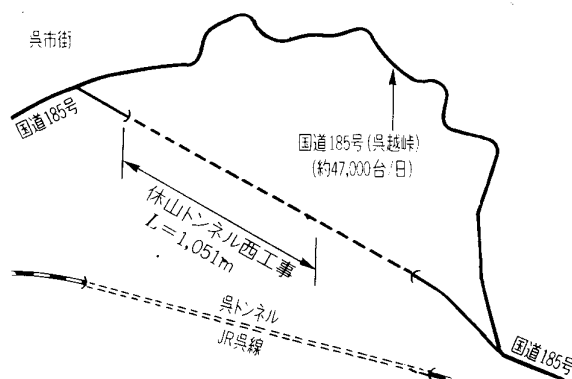


図-1 位置図

あるが冷却節理が発達する亀裂性岩盤である。380m付近から斜面勾配が急になり土かぶりも増大し、硬質な安定岩盤であるC_M級岩盤の土かぶりも厚くなる。トンネル通過部はおおむね新鮮・堅硬であるが全体的に潜在亀裂を含んでいる。600～820mは堅硬な岩盤であったが、小規模な破碎帯や変質岩部の存在が認められた。900m以降は花崗斑岩の岩脈で新鮮・堅硬な岩盤が出現した。

2-2 施工概要

休山トンネル西工事は、国道185号バイパスのトンネル工事1,706mのうち、延長1,051m(明かり巻き30mを含む)、幅員12m、標準掘削断面積97～134m²、偏平率0.57の2車線道路トンネルでNATMによって施工した。

周辺環境は、前述のように典型的な市街地である。したがって、トンネル掘削に伴う地表面沈下を極力抑制することが最重要課題であり、同時に、振動・騒音・粉塵対策といった周辺環境に配慮した設備・施工法も必要不可欠となる。

坑口付近の地質は、崖錐堆積物と強風化花崗岩からなっており、末固結で土かぶりも小さい状態である。このため、設計段階においては周辺地山の緩み、地表面沈下を考慮し補助工法として注入式長尺鋼管先受け工法および上半中壁分割(CD)工法が計画されていた。また、掘削工法は、DI区間までは機械掘削で他の部分は補助ベンチ付き全段面掘削による発破掘削となっていたがDI区

*建設省広島国道工事事務所工務課長

** " " 建設監督官

***フジタ・日産特定建設工事共同企業体所長

間を過ぎてもトンネル直上に民家があり制御発破による環境対策(振動)を考慮して施工する必要があった。

3. 坑口周辺への環境対策

トンネル坑口周辺では、重機の往来、掘削ずりの積み降ろし、バッチャープラントの稼働に伴う振動・騒音、さらに重機の稼働に伴い周辺に粉塵が発生する。

本トンネルでは、これらの近隣住民への影響を考慮し、以下に示すような対策を講じた。

図-2に坑口周辺の坑外仮設備配置図を示す。この図に示すとおり、官民境界の全域にわたり万能板で取り囲んだが、とくに騒音が発生する場所には防音壁を用いた。また、夜間作業における騒音の発生を考慮し、夜間ずりビン、バッチャープラントを防音ボックスで囲った。

発生する粉塵に対しては、坑外ヤード全域を舗装することにより粉塵の発生・拡散を抑えた。また、工事現場における景観にも配慮し、工事ゲート外面に壁画を配した。

さらに、後述する制御発破の試験施工により、振動の発生は制御できたが、低周波騒音の発生が問題となった。ここで、一般的に低周波騒音とは、人の可聴域以下である20Hz以下の成分をいい、現象としては発破により発生した低周波が窓ガラスをがたつかせるといった場合が多い。さらにはがたつきに起因する心理的苦情、生理的苦情を引き起こす場合がある。発破に伴う低周波騒音は音源エネルギーが高く、伝播減衰がきわめて少ないことが特徴である。

試験施工の結果、電子雷管を用いた場合でも100dBを超過するため、坑内に6mm鉛板を2重に張り付けた防音扉を設置することにより低周波騒音を遮断する対策工を行った。これは、鉛板の重量によって伝播してくる低周波を遮断する法則を利用したものである(質量則)。設置後、低周波騒音測定を行ったところ、4.5~12.5dBの減音効果が確認された。

その後も施工中には、低周波騒音に関する苦情がなお見られたため、追加の対策工を行った。ここでは、坑内

の防音扉の増設も検討対象としたが、経済性を考慮して坑口防音扉の補強を行った。

具体的には、

- ① 坑口防音扉に吹付けコンクリートを施工し、重量を増加させるとともに坑門工との隙間も吹付けコンクリートにて密閉した。
- ② 防音扉の門扉に鉛板を張り付けた。

以上より発破に関する苦情も見られず対策工の効果があったことが確認されている。

4. 地表への影響を考慮に入れたトンネル掘削

本トンネルの坑口部における地質縦断図を図-3に示す。前述したように、坑口より80mにわたり1D以下の土かぶりであり、掘削対象地山も非常に軟弱である。また、本トンネルは掘削断面積100m²超、偏平率0.57の大断面偏平トンネルである。さらに、幹線道路に埋設された水道管(配水管φ600mm)および墓碑などの防護など、厳しい制約条件下における施工となる。

設計段階では学識経験者からなる「休山トンネル(仮称)施工検討委員会」による検討が行われ、施工に際しては地表面沈下制御を主眼に、種々の工法の検討と試験施工を行いながらこの区間を無事突破した。以下に、それらについての詳細を述べる。

4-1 上半中壁分割工法および注入式長尺鋼管先受け工法

本トンネルは、幹線道路交差部および旧海軍墓地まで上半中壁分割工法、補助工法として注入式長尺鋼管先受け工法(打設長6.5m、3mシフト)が計画されていた(図-4)。

上半中壁分割工法とは、トンネル上半を2分割して掘削する工法であり、掘削途中でも各々のトンネルが閉合された状態で掘削されるため、とくにトンネルの変形防止や切羽の安定に有効な工法である。

注入式長尺鋼管先受け工法とは、トンネル外周部に直径114.3mmの長尺鋼管を打設したうえで鋼管内から注入を行い、鋼管の剛性と地山改良効果により切羽の安定および地表面沈下を抑制する工法である。鋼管長さとして

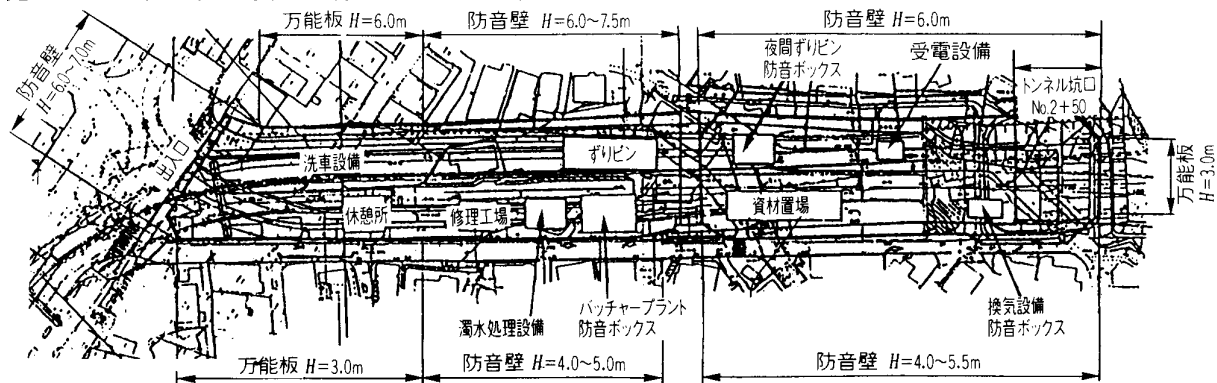


図-2 坑外仮設備配置図

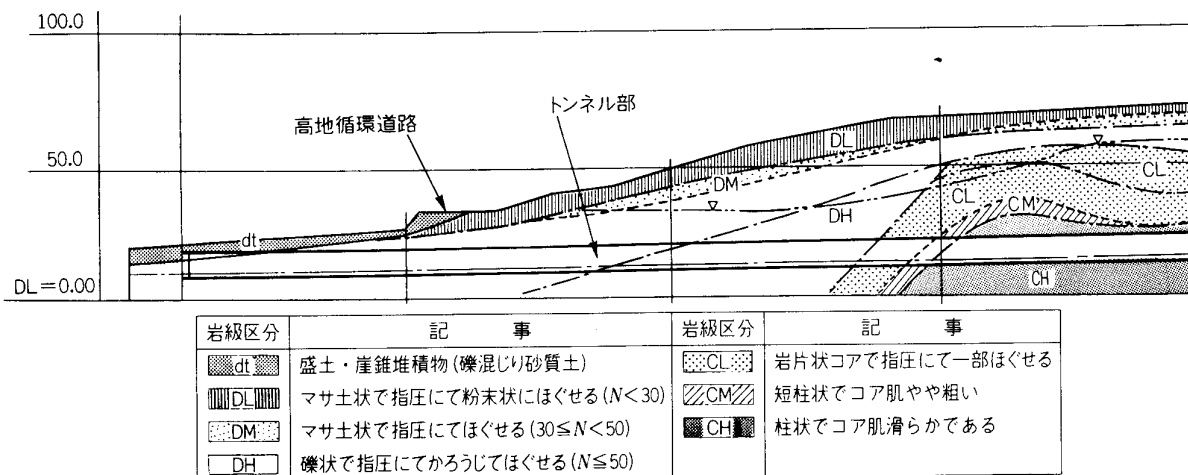


図-3 坑口部地質縦断面

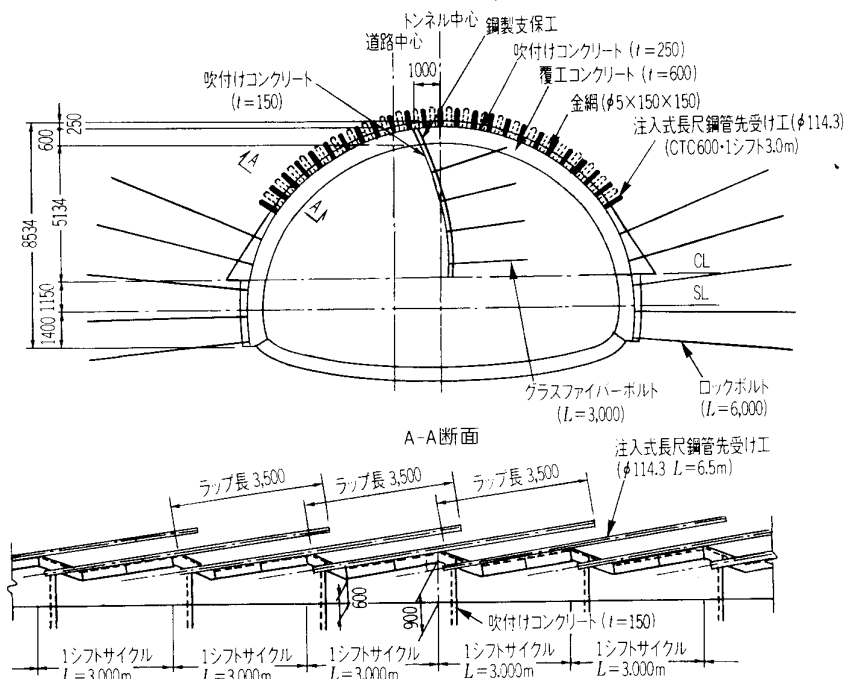


図-4 上半中壁分割工法および注入式長尺鋼管先受け工

は、中壁分割工法との併用のため、打設長6.5m、シフト長3mとした。坑口から14~23mの9m区間を施工した結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 地表面沈下量は中壁撤去後の上半掘削後で47.7mm(最終沈下量52.3mm)と大きな値となった。
 - ② 中壁の応力分担が大きく、中壁撤去時の地表面沈下が大きかった(約20mm)。
 - ③ 注入式長尺鋼管先受け工法との併用は、中壁の存在により天端部の鋼管打設が困難となる。
 - ④ 切羽の地山状況は比較的良好であり、上半先進ショートベンチカット工法でも切羽の安定を確保できる。
- 以上より、当初計画による掘削を変更し、掘削は上半先進ショートベンチカット工法を採用し、補助工法による

沈下抑制の検討を行うこととした。

4-2 注入式短尺鋼管先受け工法

採用する補助工法を検討するにあたり、地表面沈下の抑制とトンネルの施工性を考慮し、まず注入式短尺鋼管先受け工法(打設長は4m、シフト長1m)の試験施工を行った。これは、鋼管自体は短尺となるものの、トンネル断面方向で考えた場合、鋼管はほとんどの部分が3重となり、トンネル天端のアーチゾーンの剛性が確保されると考えたためである(図-5)。

実際の施工は23~34mの区間であり、以下のことが明らかとなった。

- ① 地表面沈下は上半掘削時に29.3mmと大きな値となった(最終沈下量56.3mm)。

- ② ①の理由としては、シフト長を1mとしたために鋼管打設角度がトンネル切羽に対して30度程度となり、短尺鋼管先受け工法自体が、今回の地山に対しては縦断方向の変形(先行沈下)抑制効果が発揮されていないためである。これより、注入式短尺鋼管先受け工法はこの時点で中止した。

4-3 注入式長尺鋼管先受け工法

先述の結果より、先受け工法として打設長12.5m、シフト長6mの注入式長尺鋼管先受け工法を採用することとした。さらに、鋼アーチ支保工のウイング部部の地山が風化花崗岩であることおよび湧水があることから、鋼アーチ支保工と地山の密着性を図るため、支保工脚部にプレロードシェル工法を用いた。プレロードシェル工

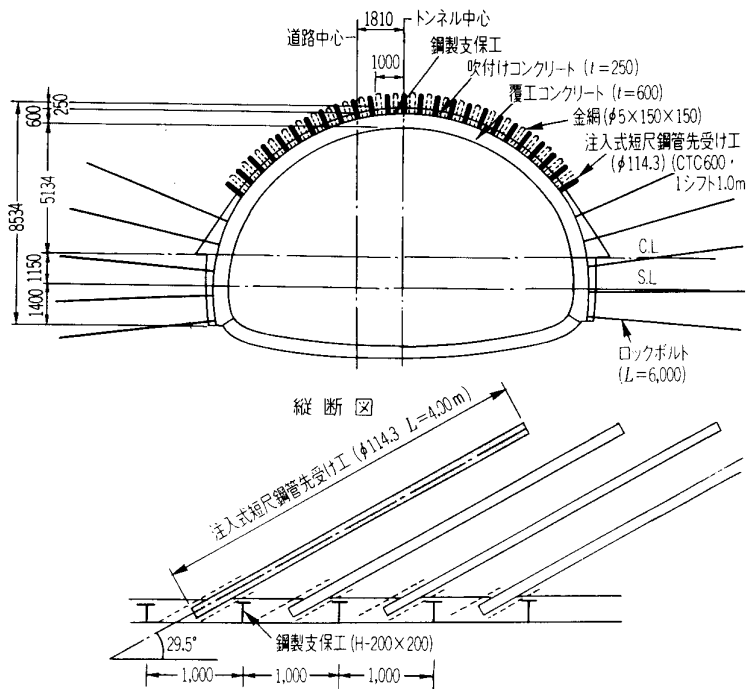


図-5 注入式短尺鋼管先受け工

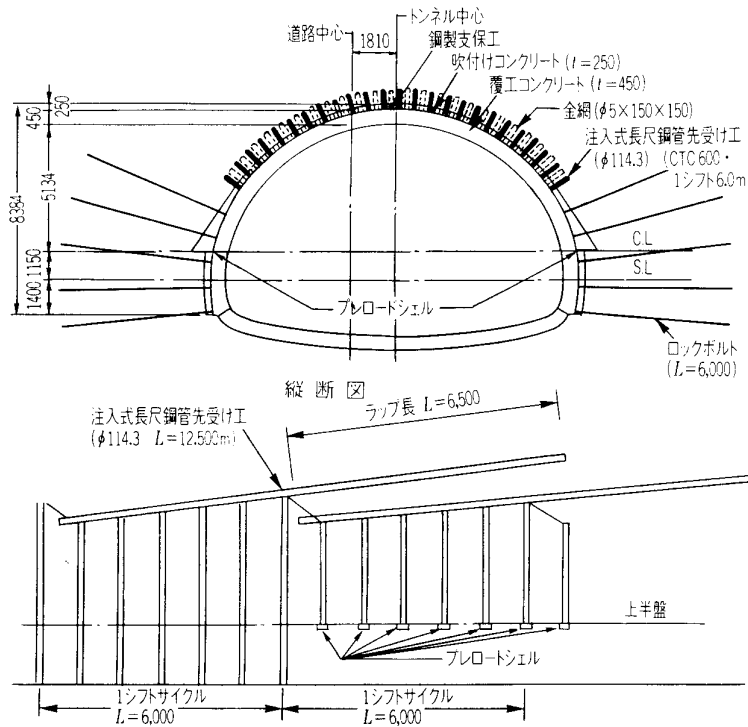


図-6 注入式長尺鋼管先受け工

法とは、支保工脚部と地山の間隙を、特殊グラウト材を充填・加圧することにより脚部地山を補強するとともに、支保工に上向きのプレロードを導入し、沈下を抑制する工法である。図-6に注入式長尺鋼管先受け工法の支保工パターンを示す。

実際の施工において、以下のことが明らかになった。

- ① もっとも地表面沈下量を抑制すべきトンネル上部幹線道路では先行沈下量17.5mm、最終沈下量49.7mmと他の工法に比べ沈下を抑制できた。なお、沈下図を図-7,8に示す。
- ② ①より、打設長12.5m、シフト長6mの注入式長尺鋼管先受け工法は今回の地山には非常に有効であることが判明した。
- ③ プレロードシェル工法の定量的な効果は現時点では判断できないものの、沈下抑制に効果を発揮しているものと推定される。

以上の結果より、補助工法は、先行沈下量をより抑制することができる注入式長尺鋼管先受け工法を採用し、十分な管理を行いながら、無事当区間の掘削を完了した。

5. 都市部における制御発破の検討

5-1 目的

本トンネルでは、前述したように進行に伴い土砂から岩盤へと遷移していき、坑口から約500m進行した段階で一軸圧縮強度150MPaを超える岩盤となり、自由断面掘削機では掘削が不可能となった。このため、発破工法の採用が適当となるが、トンネル切羽直上に人家(最小離隔距離約70m)があり、また、坑口との距離は500m程度であるので、普通発破工法では直上については振動、坑口付近については騒音による影響が懸念された。

このため、普通発破と制御発破などの各工法により発生する振動・騒音ならびに経済性を比較し、最適な掘削工法を選定するため、試験施工を実施した。

5-2 試験施工内容

制御発破の一般的な手法としては、①段数を増加する、②装薬量を低減する、③進行長を低減する、といった方法がある。

このうち、③の進行長を低減する方法は、今回の試験発破全般にわたり1進行長1mとしたため、通常のCI断面の1掘進長1.5mと比較して低減されており、普通雷管による普通発破といっても、試験施工全体が制御発破の一種といえる。

①の段数を増加する方法としては、最近EDD(電子)

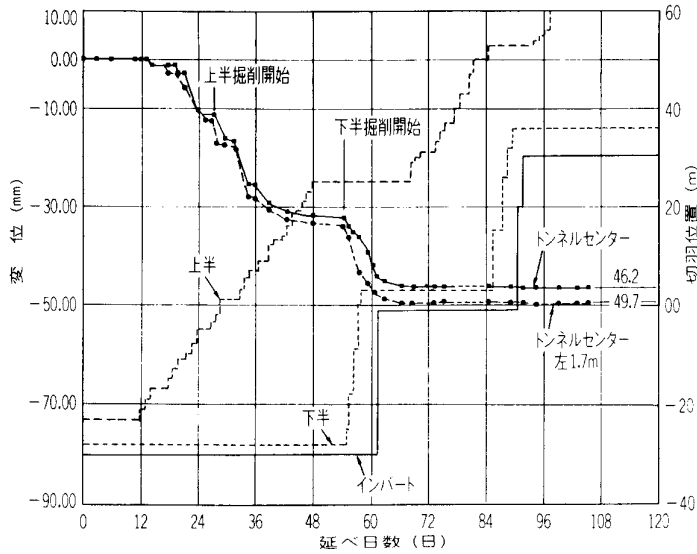


図-7 地表面沈下経時変化図(No.3 +14)

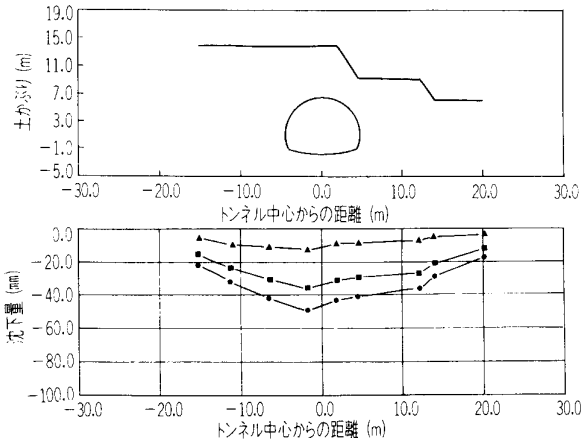


図-8 地表面沈下横断図(No.3 +14)

雷管の技術が発達してきており、30msの時間差により最大200段まで段発を行うことが可能である。このEDD雷管を用いることにより、制御効果が期待できる。

②の装薬量を減少するには、一般的には切羽を分割し、1回の発破体積を減少させる方法が採用される。試験施工としては、この分割発破を実施するとともに、まだ一般的な手法ではないが、トンネル外周に人工的に自由面を形成することにより発破全体を払い発破とする試験施工も実施した。これは、もっとも装薬が必要となる芯抜き発破を省略することが可能となり、全体の装薬量を低減することにより、制御効果が期待できるという考え方である。今回の試験施工では、トンネル外周に単一孔連続穿孔方式²⁾によるスリットを設け、発破時には普通雷管を用いた制御発破による試験施工

を実施するとともに、外周にスリットを設けた後に①のEDD雷管を用いることにより、もっとも振動・騒音の低減可能であると考えられる制御発破についても試験施工を実施した。

さらに、無発破工法である蒸気圧破碎工法による試験施工も実施した。

以上の方法と普通雷管による通常発破を実施し、発破(破碎)時の振動・騒音を計測することにより制御効果の比較を行うとともに、各方法の経済性についての検討を実施した。表-1に今回実施した試験施工をまとめたものを、図-9に分割発破を除いた各方法の施工パターンを示す。

5-3 試験施工における計測項目および計測位置

(1) 試験施工において計測した項目

- ・変位速度(kine)
- ・振動レベル(dB)
- ・普通騒音(dB(A))
- ・低周波騒音(dB)
- ・近隣の聞き取り調査

(2) 計測位置

発破振動および発破音の測定位置を表-2、図-10に示す。

表-1 試験施工内容

試験方法	使用雷管	スリットの有無
EDD制御	EDD	なし
EDD+スリット	EDD	あり
スリット	普通	あり
切羽の4分割	普通	なし
普通	普通	なし
蒸気圧破碎	ダイレックス	あり

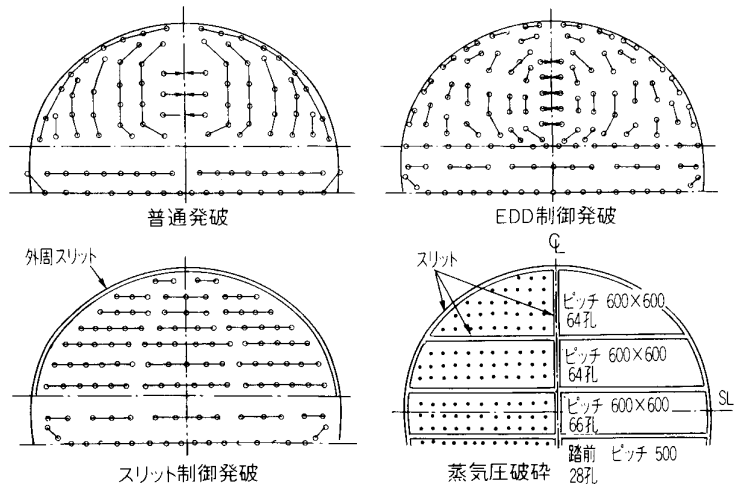


図-9 試験施工パターン

5-4 試験施工結果

表-3に試験施工時の近隣住民の聞き取り調査結果を、表-4に騒音・振動測定結果を示す。また、振動計測より求められた振動速度を表-5に示す。

5-5 結果に対する検討

(1) 騒音に対する検討

計測された騒音値より制御発破については、当初の予想どおりEDD雷管+スリットがもっとも低く、EDD雷管+スリット+普通雷管・分割発破がほぼ同レベルであった。これに対して普通発破はもっとも大きな値であった。

蒸気圧破砕については、普通発破よりも大きく、今回の試験施工中で最大値となった。これは、自由面で形成したブロックの面積が大きく、過装薬のためと考えられ

る。ブロックの面積を削減することにより騒音を低減することは可能であるが、当然サイクルタイムに大きな影響を与える。

(2) 振動に対する検討

普通発破では、振動値は芯抜き時のピークから徐々に低下していくのに対し、EDD雷管を用いると振動レベルのピーク値は普通発破より低くなるものの、発破時間が長いため一定レベルの振動が長時間(4~5秒)持続する傾向が見られる。

普通雷管+スリットでは、立ち上がりピーク時の振動が最大となるが、その後急激な減衰が見られた。

表-3 近隣の聞き取り調査の結果

試験種別	住民の意見
EDD雷管	直上部では発破感は感じない。低い音なり音がやっと聞こえる。坑口脇民家では防音壁の揺れる音が聞こえる。
EDD雷管+スリット	直上部では発破音がやや聞こえる。坑口脇民家では防音壁の揺れる音が聞こえる。
普通雷管+スリット	直上部では発破音は地盤から響く。音は小さい。坑口脇は音が大きい。
分割普通発破	坑口脇は音・防音壁の揺れ激しい。直上部は振動はあまり感じない。
普通発破	直上部はかん高い音が聞こえる。坑口脇は防音壁がすごく揺れる。
蒸気圧発破	坑口脇は防音壁、ベランダの窓も大きく揺れる。

表-2 発破振動および発破音の測定場所および距離

測定場所	発破地点と民家までの距離(m)	測定機器
民家	直上 70	変位速度 振動レベル計 普通騒音計
	前方斜距離 100	変位速度 振動レベル計
	後方斜距離 100	同上
坑口部	水平距離 500	普通騒音計 低周波騒音計
	坑口部より 約40	低周波騒音計

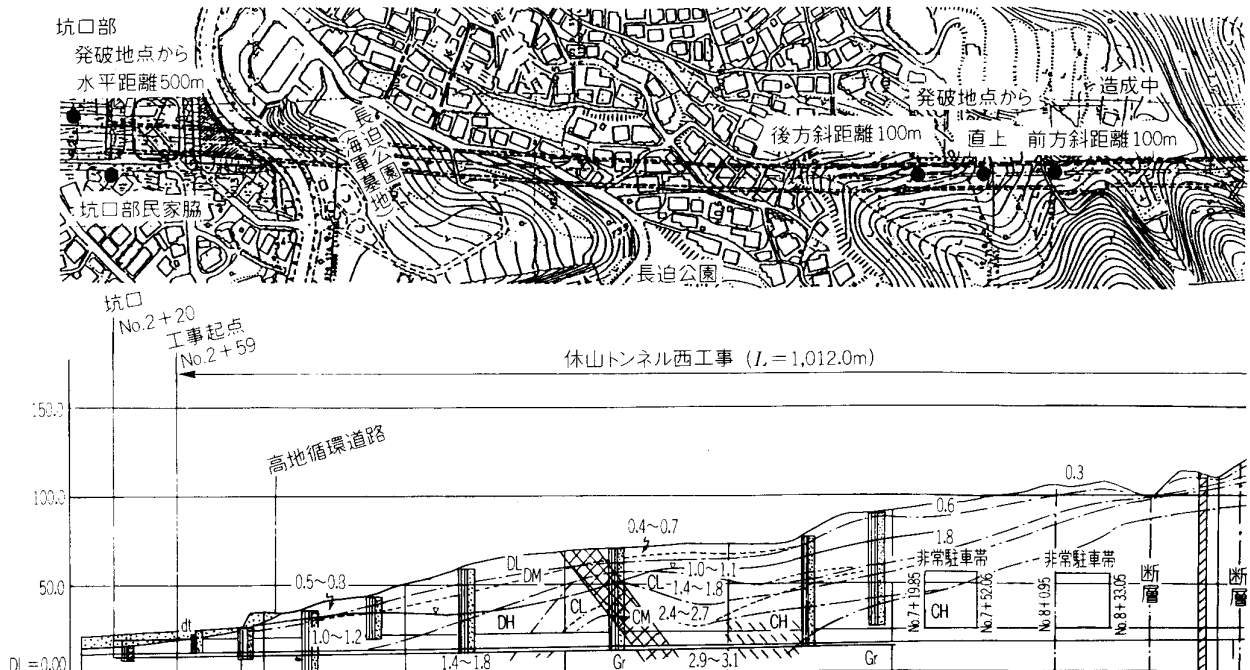


図-10 試験発破平面図

表-4 振動・騒音測定結果

試験種別	振動測定(dB)			低周波騒音(dB)		騒音(dB)	
	-100m	直上	+100m	坑口	民家	坑口	直上
EDD 雷管	50	52	54	116	101	77	47
EDD 雷管 +スリット	43	48	47	113	100	75	53
普通雷管 +スリット	50	52	53	118	111	79	52
分割発破	52	50	53	122	112	78	50
	50	50	52	118	108	76	50
	47	46	50	118	108	78	50
	50	50	51	117	110	79	51
最大値	52	50	53	122	112	79	51
普通発破	56	57	57	122	117	82	51
蒸気圧発破	50	56	52	130	122	90以上	46

表-5 振動速度結果

試験種別	振動速度(kine)		
	-100m	直上	+100m
EDD 雷管	0.022	0.019	0.026
EDD雷管+スリット	0.016	0.017	0.019
普通雷管+スリット	0.026	0.034	0.041
分割発破	0.020	0.026	0.023
普通発破	0.040	0.045	0.065

蒸気圧破砕については、当初振動値は発破と比較して1/10と予想されていたが、制御発破と同レベルであった。

(3) 低周波騒音についての検討

低周波騒音については、スリットの有無に係わらずEDD 雷管と普通雷管では明瞭な差があり、EDD 雷管による顕著な低減が認められた。蒸気圧破砕は、普通発破よりも大きな結果となった。

(4) 経済性についての検討

各工法についての経済性をみると、EDD 雷管+スリットがもっとも高価になり、分割発破、普通発破+スリット、EDD 雷管、普通発破という順番になった。

蒸気圧破砕については、他の工法と比較してかなり高価であるが、振動・騒音の低減効果が今回の試験施工ではほとんど見られなかった。

図-11に今回の試験施工から得られた振動低減と工法の経済性の関係を示す。なお、この図で示した経済性は

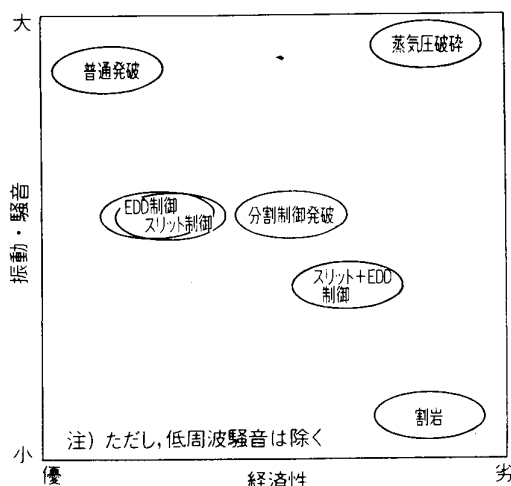


図-11 経済性と振動・騒音値の比較

あくまで当トンネルを対象とした相対的なものであり、トンネル断面・対象地山によって異なる結果となる。

5-6 試験施工のまとめ

試験施工結果より、振動低減効果および経済性についてはEDD 雷管、普通雷管+スリット、分割発破と大差はないものの、EDD 雷管の低周波騒音低減効果を考慮して、採用する掘削工法としてはEDD 雷管に決定した。なお、この時点ではEDD 雷管を用いても坑口脇の民家で100dB程度が計測され、一般的に不快感を覚えるといわれる90dBを超過していたため、3章で述べた対策を講じた。

6. おわりに

休山トンネルは、市街地におけるトンネル掘削に伴い、環境面・施工面での制約が厳しい条件下で種々の検討を行いながら施工を進めてきた。

西工事は平成12年3月に無事に完成を迎えている。今後はこれまでの経験を生かしながら、東工事の施工を進め、休山トンネルの早期完成を目指す予定である。

最後に本トンネルの設計・施工に際し、ご意見・ご指導を頂いた「休山トンネル(仮称)施工検討委員会」に厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 玄道高穂・藤本利夫・野間達也・土屋敏郎：連続孔の新穿孔工法による硬岩部の機械掘削—主要地方道呉平谷線 上二河トンネル、トンネルと地下, Vol.28, No. 6, pp. 23~31, 1997.