

トンネル掘削における超低振動制御発破工法の開発

THE DEVELOPMENT OF EXTREME LOW LEVEL VIBRATION BLASTING METHOD OF THE TUNNEL EXCAVATION

白木 英成*・内山 滋**・筒井隆規***

Eisei SHIROKI, Shigeru UCHIYAMA, Takanori TSUTSUI

This construction, which execute the tunnel just under the pharmaceutical company about 23 meters in depth, was planed to use the controled blasting method together with mechanical excavation in order to protect the vibration pollution. However, this method might cause the blasting vibration which influence badly on the pharmaceutical company , and the other methods such as mechanical excavation without blasting can not be used by the period and the cost problems of construction. This report introduces an example of the controled blasting method which extend low vibration area than usual by the prediction and the suitable control of blasting vibration.

Keywords:the controled blasting method,the vibration pollution,mechanical excavation,
low vibration

1. はじめに

山陽自動車道は、吹田市を起点とし、瀬戸内ベルト地帯の諸都市を結んで山口市に至る延長約460kmの路線であり、中国縦貫自動車道と並んで一般国道2号線の交通混雑を緩和することを目的に計画された自動車専用道路である。このうち入野トンネルは、東側坑口より70～200mにかけて製薬会社工場直下を最小土被り17mで施工するため、発破による振動等の影響が懸念される。そのため振動公害防止を目的とした機械掘削併用制御発破工法が計画されている。また、新広島空港開港に併せての道路供用を予定しており、効率的な施工を要求される工事でもある。

本報告書では、環境上問題となる製薬工場直下のトンネル掘削において機械掘削に伴う問題点を解決し、工程の確保と経済的かつ効率的な施工を追求した超低振動制御発破工法の開発について報告する。

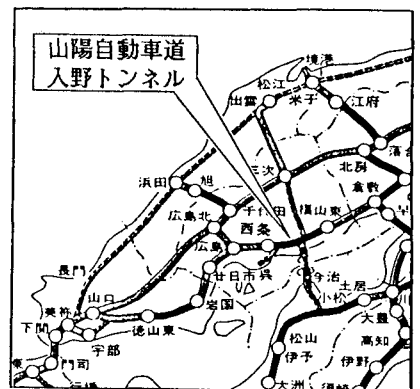


図-1 入野トンネル位置図

* 飛島建設株式会社 広島支店 入野作業所 所 長
** 正会員 飛島建設株式会社 広島支店 入野作業所 次 長
*** 飛島建設株式会社 広島支店 入野作業所

2. 工事概要

工 事 名：山陽自動車道入野トンネル東（その1）工事

発 注 者：日本道路公団広島建設局

工事場所：広島県賀茂郡河内町大字入野

(1) 地質地形

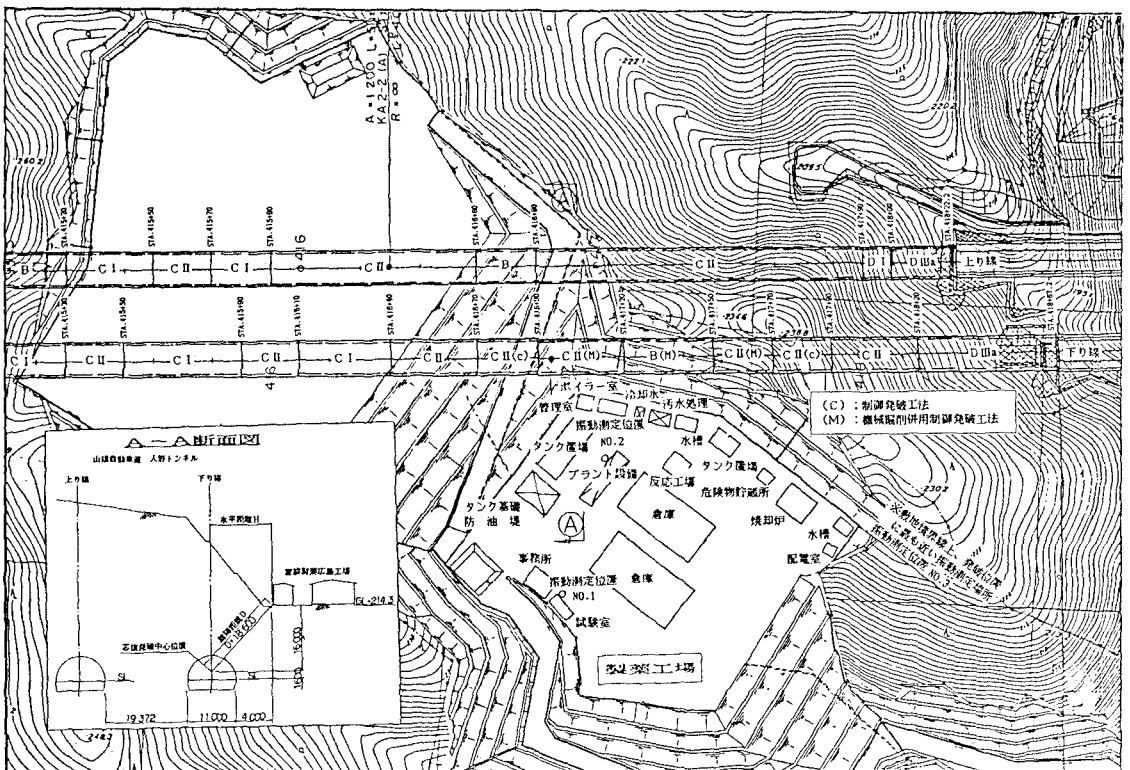
トンネル周辺はなだらかな丘陵地形で土被りは23m～70mと浅い。地質は、中正代白亜期の節理が発達した広島型花崗岩が主体であるが、部分的には流紋岩やヒン岩類の岩脈が貫入している。地山弾性波速度は、5.0km/s程度の堅固な地質である。

(2) 施工内容

トンネル掘削 上り線：L=763m、下り線：L=773m

(3) 施工概要

トンネル掘削工法は、全線NATMで施工し、坑口付近はショートベンチ工法、その他はロングベンチ工法（ベンチ長：100m）を採用した。掘削区間には、硬岩地山（広島型花崗岩）が多く発破時の環境対策上穿孔数が増えることが予想される。削岩機は大型油圧削岩機を搭載する2ブームホイールジャンボ（アスロコ H-135）を導入し余掘対策として外周仕上げ用ブレイカー（TNB-7）を配置した。ズリ出しは、サイクル効率、坑内環境及び安全性を改善するため、ベッセルによるTC（トンネルコンテナ）工法とした。吹付けコンクリートは、坑内機械類の簡素化と安全性の向上を目的として、一体型吹付けロボットシステムを採用した。坑内換気設備は、当工事が掘削工事のみであることから、可変ピッチコントラファン（2000m³/min）による送気方式とした。



図ー2 入野トンネルと振動対象物件の位置関係

3. 振動規制区間について

3-1 対象物件

トンネルルート上に位置する製薬会社工場敷地内の各種建物及び設備。（図-2参照）

3-2 振動管理目標値

対象物件に対する振動規制値は広島県消防防災課の行政指導により0.5カインと設定されており、規制値を厳守することを目的として管理目標値として0.3カイン以下での施工を条件とした。

4. 当初設計

当初設計では発破振動の対策として以下の工法が計画されていた。

① 制御発破工法 ② 機械掘削（割岩）併用制御発破工法 以下にその概要を述べる。

(1) 制御発破工法

事前の振動測定により、対象物件における発破振動を（1）、（2）式で推定したのち、試験発破を実施し装薬量の制限を図る。

・振動速度と振動レベルの関係式

$$VL = 20 \log V + 91 \quad \text{----- (1)}$$

VL：振動レベル（dB）

V：振動速度（カイン）

・発破振動推定式

$$V = K \cdot W^{0.75} \cdot D^{-2} \quad \text{----- (2)}$$

K：K値（定数）

W：段当りの装薬量（kg）

D：離隔距離（m）

さらに、発破振動発生源の抑制と振動伝達の軽減のために以下の方策を実施する。

- ① 掘進長の低減（標準支保パターンの進行長の $1/2$ とする。EX.CⅡ：掘削長 $L=60\text{cm}$ ）
- ② 多孔少量装薬による薬量の調整
- ③ D・S雷管の多段使用による段当り装薬量の調整

(2) 機械掘削併用制御発破工法

発破振動発生源として最も大きい芯抜部において、振動値が大きくなり、規制値以下での施工が不可となった場合、芯抜部を機械掘削により施工する。機械掘削は、大型割岩機（ビッカー等）とし、芯抜部の約 3m^2 、深さ $0.5\text{m} \sim 1.5\text{m}$ を割岩する。周辺部は、低爆速火薬による一発破進行長 0.5m で掘削する。

5. 当初設計における問題点

割岩工法について調査したところ、

- ① 大型割岩機による割岩深長は、最大 0.5m 程度であり、深さ 0.5m 、 3m^2 の芯抜きに、穿孔時間を含め $3 \sim 5$ 時間を要する。
- ② 現状の施工機械について、トラブル発生の事例が多い。
- ③ 割岩機の操作が複雑で専門操作員を必要とする。
- ④ 機械等部品の消耗が著しい。

等の事柄が判明し、当工事に適用するには以下の問題点があった。

① 1サイクルに占める割岩時間の比率が大きく

1～1.5m/日 程度の進行しか期待できない後工程からして工期内に掘削を終えることが困難である。

② トンネル作業員、割岩作業員ともに遊びが多く、効率的な施工が図れない。

そこで、受注後の施工計画段階において、制御区間における経済的且つ効率的な施工方法の検討を行った。

6. 対策の検討

6-1 機械掘削工法の検討

過去の施工実績等より、当工事における最適工法は、設計通りの割岩工法であると考えられる。

割岩機は、HRB-1000（ビッカー）、MTS800の2機種について検討した。ビッカーは、機動力向上を図るため、バースマシーンとの一体型に改良することを前提とした。MTS-800は割岩機を搭載し、一体型となったトンネル掘削用機種である。また、割岩用孔（φ100）の穿孔は、2ブームホイールジャンボの併用にて、削孔時間の短縮を図ることとした。しかし、割岩後の2次破碎においてブレーカによる作業は、騒音が大きく、場合によっては、夜間の掘削作業が出来なくなるような状態も生じかねない。以上、割岩工法について検討したが目的である振動を制御しながら施工速度の向上及び経済性の追求するといった根本的な問題解決策は見いだせなかった。

6-2 超低振動制御発破の開発

割岩工法において効率的な施工が期待出来ない現状において、芯抜部の掘削を制御発破の改良・改善によって発破工法による施工方法を検討した。

(1) 超低振動制御発破工法

超低振動制御発破工法とは、機械掘削併用制御発破工法に替わる低振動掘削工法をいい、問題となる発破振動発生源として最も大きい芯抜部に着目し、発破振動の低減を図るものである。具体的振動軽減対策検討事項としては、

- ① 芯抜部及び周辺部を分割して発破を行う。
- ② 使用する爆薬は、低爆速火薬とする。
- ③ 段発の増による1段当りの薬量の低減を図る。
- ④ 自由面増の工夫による薬量の低減を図る。

以上の項目について、試験施工を行い超低振動制御発破工法（芯抜分割制御発破）の開発に取り組むものである。

(2) 超低振動制御発破のメリット

- ① 現状の機械配置で施工可能である。
- ② すべてがトンネル作業員で行える作業となり割岩等による作業員のロスが低減出来る。
- ③ 割岩に比べ破壊効果が大きく施工性の向上が期待出来る。

7. 施 工

7-1 施工管理の概要

トンネル掘削の進捗に伴い製薬工場での振動レベルは大きくなり、振動管理目標値0.3カインを確保するために、当工事では一般掘削区間、制御発破区間及び芯抜分割制御発破区間に分割して施工管理を行った。

また、区間の推定及び決定は試験結果よりK値を推定して行った。

7-2 振動計測工

日常管理で対象物件の製薬工場における振動レベルの測定を行い、振動管理目標値に対する管理を実施した。また、(1)、(2)式より、K値を算出し、トンネル掘削の進捗に伴う各制御発破区間の推定及び振動公害防止を目的とした最適掘削工法を選定した。また、発破振動の監視を目的として、製薬工場内の重要な施設である試験室(精密機械配置)及びプラント設備にピックアップを設置した振動遠隔監視装置により24時間体制による監視を実施した。

7-3 試験発破

制御発破区間決定のための試験発破は、一般掘削区間で、芯抜分割制御発破区間決定のための試験発破は制御発破区間で実施した。

一般掘削区間における試験発破は、下表の要領で実施し、当工事においては、CⅡ(c)パターンが最適との結果を得られた。

表-1 試験発破結果表

発破 パターン	一発破 進行長	使用火薬	#1装薬量 (kg)	離隔距離 (m)	振動速度 (dB)	備 考
CⅡ	1.2m	普通火薬	3.60	50.6	72	
CⅡ(c)	0.6m	普通火薬	0.60	48.7	60	CⅡの約1/4の効果
CⅡ(c)TYPE1	0.6m	低爆速火薬	0.60	48.4	58	効果あり、施工性に問題
CⅡ(c)TYPE2	1.2m	低爆速火薬	1.20	48.0	72	効果なし、施工性に問題

また、芯抜分割制御発破区間の施工法については、離隔距離及び管理基準値の厳しさから、制御発破区間のように一定の施工パターンで施工するわけにはいかない。そこで制御発破区間で様々なケースでの試験施工を繰り返し行い、計測データと対比しながら、施工管理上の基本データの集積に努めた。

7-4 制御発破

制御発破区間については、試験発破より効果の確認されたCⅡ(c)制御発破により進めた。

また、CⅡ(c)制御発破によってCⅡ標準発破の約1/4の振動に抑えることが出来た。

7-5 芯抜分割制御発破(超低振動制御発破)

CⅡ(c)制御発破では、離隔距離が短くなることにより(D<3.8m)、管理目標値0.3カイン以下の施工が不可である。

(2)式より

$$\begin{aligned} D &= K \cdot W^{0.75} / V \\ &= 650 \times 0.6^{0.75} / 0.3 \\ &= 38.4 \text{ m} \end{aligned}$$

そこで、制御発破区間において芯抜部の試験発破を以下について実施した。その結果、機械掘削(割岩)に替わる超低振動制御発破は、下記の方法にて行えば、条件を満足するとの結論に至った。

(1) 低爆速火薬の使用

通常使用している2号梗ダイナマイト(爆速:5,300~5,800m/sec)に比べて爆速が約1/4と低い低爆速火薬(カヤソフト:爆速:2,300~2,300m/sec)を使用する事により、振動の軽減を図る。また、低爆速火薬の薬径は、18mmと非常に小さく、装薬孔の50mmに対してデカップリング係数が2.78と大きく大幅に爆速が低下する。よって、芯抜部の発破については、岩盤に亀裂を入れる事に主眼をおく。

(2) ボアホールの設置

φ100のボアホールを中心部に設け、第一段でボアホール間にスリットを入れる。

(3) 多孔少量装薬による薬量の調整

D. S雷管による分割点火により段当り装薬量の低減を図る。

(4) 一孔当り2段装薬とし、芯抜きの掘削長を伸ばす。

以上の対策を行い、振動測定による管理・監視にあたった。

その結果、

(a) 振動値は、すべて管理目標値0.3カイン以下で抑えることが出来た。振動低減の効果は、CⅡ(c)制御発破に比べ1/5～1/8であった。

(b) 施工速度は、2.4m/日を確保する事が出来、機械掘削併用制御発破に比べ約半分の日数で製薬工場の下を通過することが出来た。

(c) すべてがトンネル作業員で行える作業となり割岩等による作業員のロスは発生しなかった。

(d) 掘削に要する直接工事費も機械掘削(割岩)工法に比べて経済的であった。

また、地山に応じてボアホールの増設、芯抜部周辺にボアホールによる、振動伝播抑制帯を設ける等の対策など汎用性がある。(図-3参照)

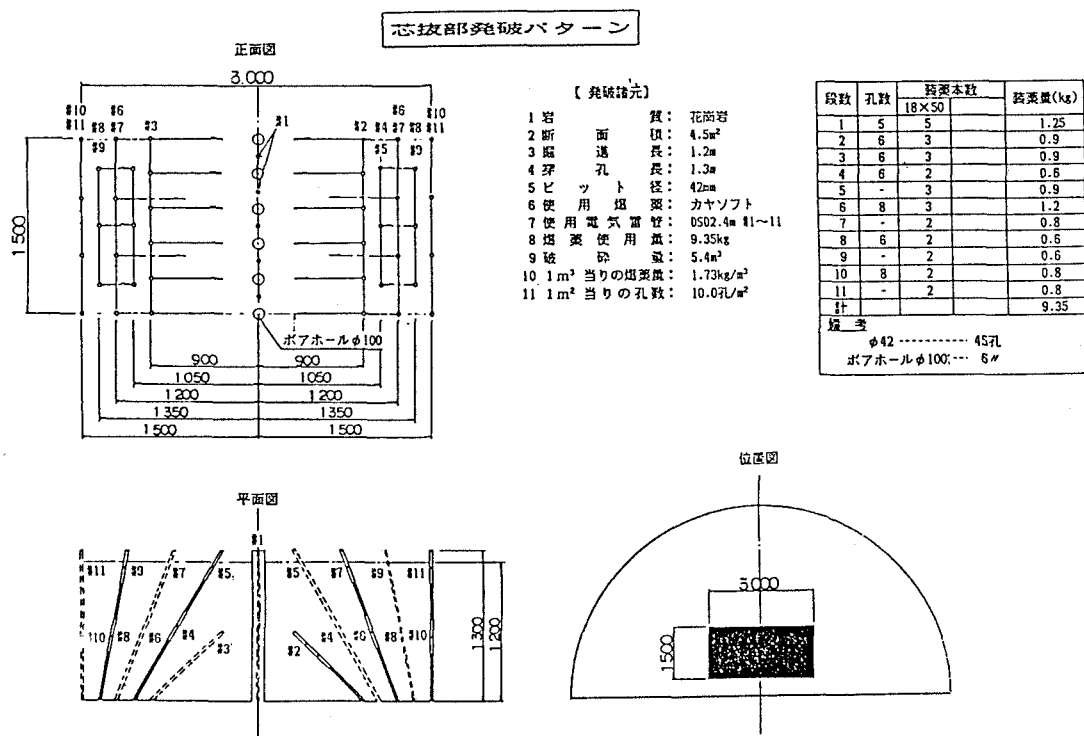


図-3 CⅡ(c)-1芯抜分割制御発破標準パターン

8. おわりに

入野トンネル東(その1)工事において、振動規制値0.5カインという環境問題該当区間において、超低振動制御発破工法を採用し、トラブルなく、工期内に工事を完了させることができました。また、低振動掘削については、一般に機械掘削を選定するケースが多い中、発破工法の改良によって、発破工法適用の範囲を拡大し、経済効果を得られる事を実証したものである。

このあと、(その2)工事において、家畜改良事業団 産肉能力検定場の直下を土被り約50mで通過することから、今回の経験を有効に生かしながら、振動規制値0.1カインによる低振動掘削工法の確立に向けて努力する所存であります。