

トンネル掘削における発破振動の自動計測と管理

岡村 浩孝・陰野 浩・中村 進

広島高速4号線トンネルでは、低土被り区間の民家や社会福祉施設に対してトンネル掘削に伴い発生する発破振動が施工上の問題となった。このため効率的な制御発破を目的とした、詳細な発破振動が計測できる自動計測システムの構築を試みた。

計測システムは、多測点昼夜での長期無人計測と迅速なデータ処理、また計測位置から遠く離れた事務所で監視ができるものとした。振動管理は、制御で発破で重要となる k 値を事前の計測データから推定すると共に、対象区間内の全発破について計測と発破設計を実施した。

キーワード：トンネル掘削，発破振動，自動計測，振動管理， k 値，変位速度，振動レベル

1. はじめに

民家や重要構造物に近接する施工現場においての発破は、発生する振動について十分な配慮が必要となる。このため一般には、発破振動の計測や予測を行い、必要に応じて制御発破等を実施して振動を一定の大きさ以下に抑え、発破振動の低減が困難と判断されれば機械掘削等に変更することとなる。

広島高速4号線トンネルの掘削ルートには、最小土被り約40mで通過する地域に民家等が点在することから、無制限に発破を行うことは不可能である。また、民家周辺には活断層が存在し、非常に複雑な地層条件となっているため、発破振動の測定精度も通常より落ちると想定された。このため、民家等に対する影響を極力抑えつつ、効率的な施工を行うには、振動計測を多測点、多頻度で実施し、迅速なデータ処理を行う振動管理が必要とされた。また、振動計測自体も省力化する事が望ましいのは当然である。

このため、本トンネルの施工に当たっては、発破振動の自動計測システムを構築し、振動管理を実施した。

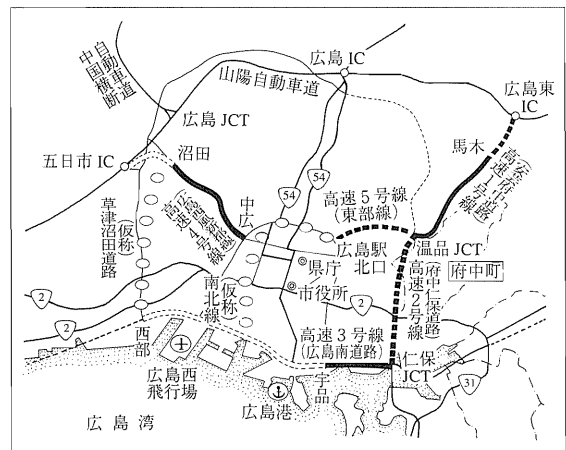
2. 工事概要

(1) トンネル工事概要

広島高速4号線は、広島市の都心部（西区中広

町1丁目）と郊外の西風新都（安佐南区沼田町）をトンネルと橋梁にて結ぶ、延長約4.9kmの4車線自動車専用道路である（図—1、図—2参照）。

- ・工事名称：広島高速4号線トンネル第2工区新設工事
- ・発注者：広島高速道路公社
- ・施工者：フジタ・奥村・伏光建設工事共同企業体
- ・工期：平成9年11月12日～平成13年3月25日
- ・道路規格：第2種第2級
- ・工事内容：上り線トンネル 1,285.0 m
下り線トンネル 1,184.0 m
作業横坑 638.6 m
掘削断面積 71.4 m²



図—1 広島高速路線図

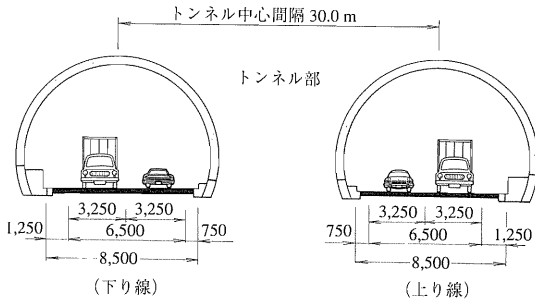


図-2 上下線の位置

(2) 発破振動の管理計画

発破振動の管理計画概要を以下に示す。

- ① 振動管理の対象地点として、トンネル掘削に最も近接する代表的な3測点を設定する(図-3参照)。
- ② 各測点での振動の管理基準値は、振動レベル(dB)で設定し、昼間65dB、夜間60dBとする。これは発破振動に対する法的規制基準が無いため、振動規制法に基づく道路交通振動の第一種区域要請限度を用いた。
- ③ 発破位置と測点までの距離が約250mとなったら計測を開始し、得られたデータを制御発破に反映させる。
- ④ 振動管理が必要とされる区間は、全発破について計測し、必要に応じ発破ごとに使用薬量等の検討を行う。
- ⑤ 振動計測は、変位速度(kine)と振動レベル(dB)について行い、鉛直成分(z)及び水平2成分(x, y)とする。
- ⑥ 制御発破が必要とされる位置に到達するま

での計測データで、振動レベル(dB)と変位速度(kine)の関係から、変位速度(kine)の管理目標値を設定する。

- ⑦ 管理基準は振動レベル(dB)で設定したが、一般的に使用可能な斉発薬量(kg)を求めるためには変位速度(kine)すなわち管理目標値が必要となる。なお、振動レベル(dB)と変位速度(kine)の換算式は幾つか提案されているが、精度が十分とは言えない現状である。

3. 発破振動の自動計測システム

(1) 振動計測システムに求められた機能

振動管理計画を実行するにあたり、発破の円滑な実行と全体的な計測費低減のため、自動計測システムの構築には以下に示す機能が求められた。

- ① 長期の無人計測(計測の省力化)
- ② 発破振動の自動計測(トンネル掘削に計測に関しての手間や時間的な制約を与えない)
- ③ 多測点での自動計測
- ④ 計測地点から遠く離れた事務所での振動監視(企業体事務所は約3km離れている)
- ⑤ 迅速なデータ処理(最大振動値、k値及び次回発破で使用可能な最大斉発薬量の算出)
- ⑥ 振動波形の表示(最大振動を生じた段数の推定のため必要)

(2) 振動計測システムの構成

図-4に振動自動計測システムの概念図を、図

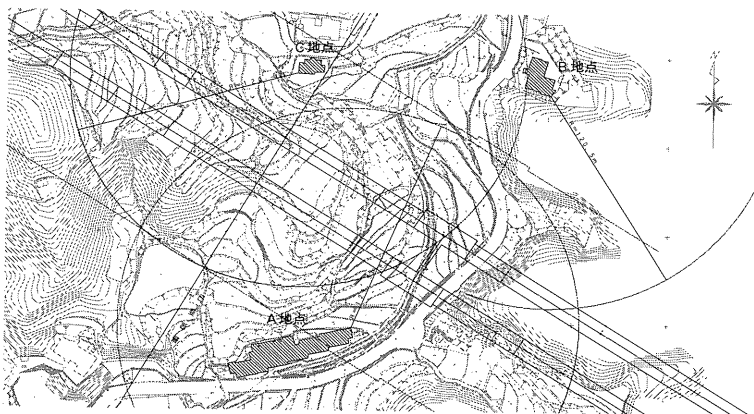


図-3 振動測定位置

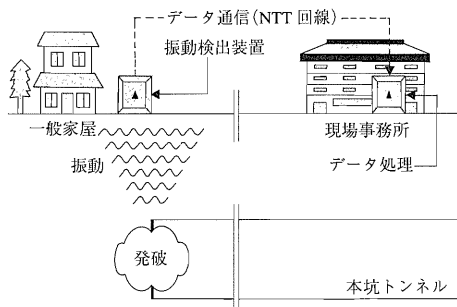


図-4 振動自動計測システムの概念図



写真-1 計測機器設置状況 (外観)

—5 に振動自動計測システムの概略図を、表—1 に主な使用計器の一覧を示す。

また現地の計測機器設置状況は写真—1、写真—2 のとおりである。

(3) 振動計測の流れ

図—6 に振動計測の流れを示す。

- ① 各測点の振動計及びパソコンは、常時計測状態となっていて、増幅器から出力される信号 (アナログ電圧出力) は、AD 変換器を介

してパソコンに常時入力され監視されている。

- ② あらかじめ設定された値より大きな振動が検出されると、自動的に一定時間振動波形をパソコンが記録する。

記録開始の振動の大きさ、記録時間、振動

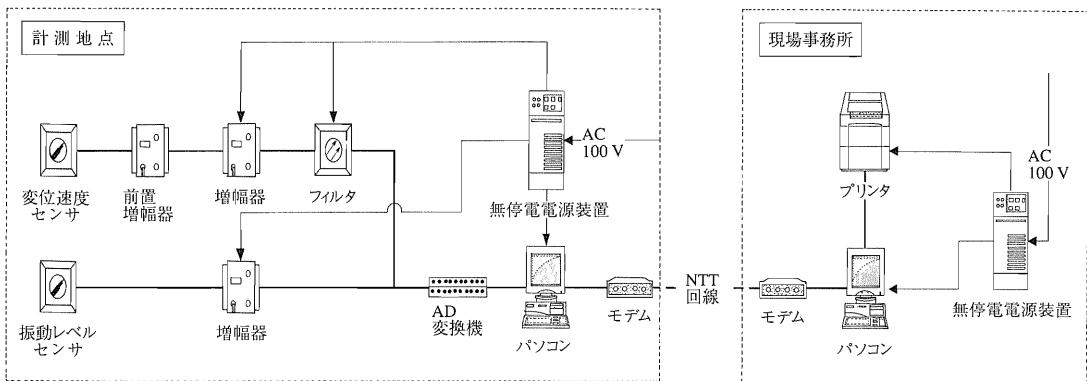


図-5 振動自動計測システムの概略図

表-1 主な使用計器の一覧

項目	計器名	型式	製造者	数量
変位速度 (kine)計測	振動計 (変位速度)	センサ PV-87	リオン	3台/測点
		前置増幅器 VP-26 A	リオン	3台/測点
		増幅器 VM-80	リオン	3台/測点
		本体 P 83	NF 回路設計	3台/測点
		メインフレーム MS-521	NF 回路設計	1台/測点
振動レベル (dB)計測	振動レベル計	センサ PV-83 A	リオン	1台/測点
		増幅器 VM-52	リオン	1台/測点
データ通信 データ処理	A/D 変換器	AD-16-16-(98) EH	コンテック	1台/測点
	パソコン	CPU 200 MHz 以上	—	1台/測点+1台
	モデム	—	—	1台/測点+1台
	プリンタ	LP-9200	キャノン	1台/測点
	無停電電源装置	FBK-SC-102 1 kV	サンケン	1台/測点+1台



写真-2 計測機器設置状況 (内部)

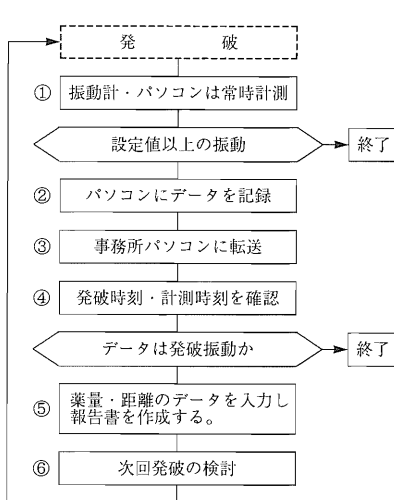


図-6 振動計測の流れ

波形のサンプリング間隔は任意に設定可能である。

- ③ 振動波形の記録が終了すると、NTT 専用回線を用いたパソコン通信で自動的に事務所パソコンにデータを送信する。

本現場の場合一般回線アナログ通信で、1 測点 1 発破当たり 15 秒程度で送信できた。

- ④ 事務所では職員が、発破時刻、計測時刻、振動波形から発破振動のデータであることを確認する。

本システムでは、設定された値以上の振動が検出されると、発破振動でなくても自動的に記録・転送を行うため確認する必要がある。

- ⑤ 事務所のパソコンに発破薬量 (kg) と発破位置から測点までの距離 (m) を入力し報告書を作成する。発破薬量 (kg) と発破位置は絶えず変化するため、データの手入力が必要となる。ただし、距離 (m) は、発破位置を入力すれば、各測点までの距離が自動的に算出されるようにした。

- ⑥ 作成された報告書 (図-7 参照) のデータ (最大振動値、 k 値、次回使用可能な最大斉発薬量) 等をもとにして次回の発破を行う。

k 値は、一般的に発破係数と呼ばれ、発破条件や岩盤特性によって変化する係数である。

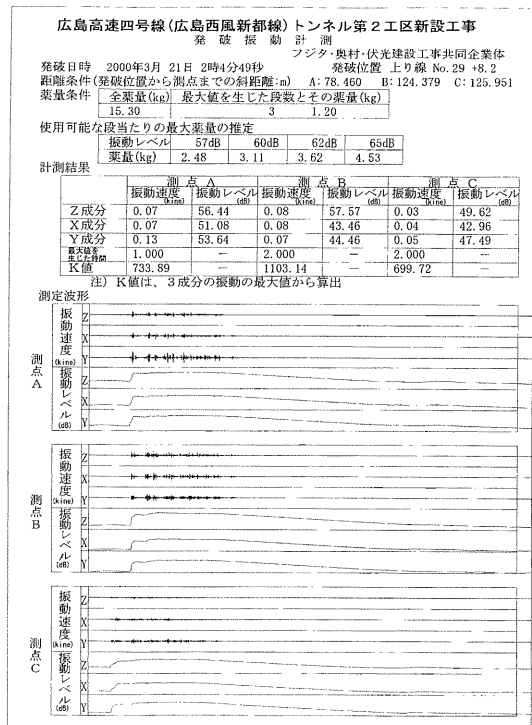


図-7 振動測定結果報告書

(4) 振動計測システムの設定条件

今回の振動計測システムにおける自動計測のための設定条件は以下の値とした。なお、これらの値は任意に設定を変更することができる。

- ① 振動波形の記録を開始する振動の大きさ
変位速度: 0.03 kine
振動レベル: 40 dB
(どちらか片方でも、振動値が設定値を上回れば記録を開始する)

- ② 振動波形記録時のサンプリング間隔
300Hz
- ③ 振動波形の記録時間
30秒
(振動検出の検出前1秒, 検出後29秒)

4. 計測管理の実施

(1) 変位速度 (kine) の管理目標値

掘削が制御発破区間に近接するまでに蓄積した実測データを基に、測点での変位速度 (kine) の管理目標値を設定した。以下に測点 B での算出例を示す。

変位速度 (kine) における目標値は、振動 (kine) と振動レベル (dB) の実測値の相関関係から推定式 (図-8 参照) を求める。得られた(1)式を用いて、夜間の振動管理基準値である振動レベル(60 dB)に相当する変位速度 V (kine) の値を算出する。

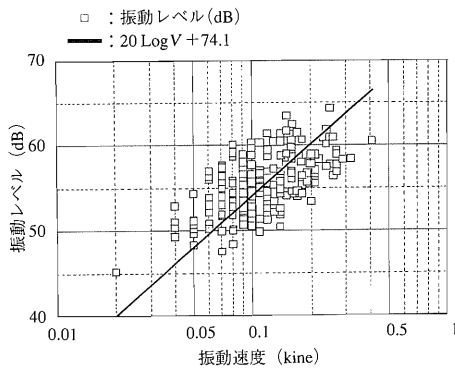


図-8 変位速度と振動レベルの相関

$$60(\text{dB}) = 20 \log(V) + 74.1 \quad (1)$$

$$\therefore V = 0.2 \text{ (kine)}$$

なお、変位速度における管理目標値は、計測のばらつきを考慮して25%低減させた変位速度0.15 kineを採用した。

(2) 制御発破における薬量の算出

使用可能な斉発薬量 (kg) は、以下に示す式で推定できる。

$$V = KW^{2/3}D^{-2} \quad (2)$$

ここで、

V : 変位速度 (kine)

K : k 値

W : 斉発薬量 (kg)

D : 距離 (m)

上記の(2)式で、 V =管理目標値 (0.15 kine), D =発破位置から測点までの距離 (m), となるの
では k 値を設定すれば薬量 (kg) が求まる。

制御発破の区間に到達するまでに蓄積した k 値と、離隔距離 (D) の実測データから相関式 (図-9 参照) を求めた。

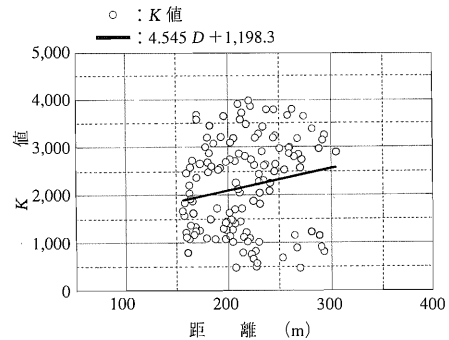


図-9 k 値と離隔距離の関係

$$K = 4.545 D + 1198.3 \quad (3)$$

よって、

$$VD^2 - 4.545 W^{2/3} D - 1198.3 W^{2/3} = 0 \quad (4)$$

(4)式に任意の距離 D を当てはめ、 $V \leq 0.15$ kine となるよう薬量 (kg) を設定する。

(3) 制御発破の実施

前述の予測結果を基に、5段階の制御発破パターン (斉発薬量1~3 kg) を用意し制御発破区間の施工に取りかかった。しかし、図-9を見ても分かるように、本工事での k 値は、極めて大きなばらつきを示している。このため、当初の計画通り全発破の計測を行い、発破ごとに振動値と k 値を確認し、次回の発破の薬量、発破パターンの検討を行った。また、振動波形から最大振動値を示す発破段の薬量を使用雷管で調整し、最大振動値の低減を図った (図-10 参照)。

この結果、発破による振動レベルは、管理目標値 (振動レベルで昼間 65 dB, 夜間 60 dB) を満足し、周辺の居住者からの苦情も無く、無事にトンネル掘削を終えることができた。

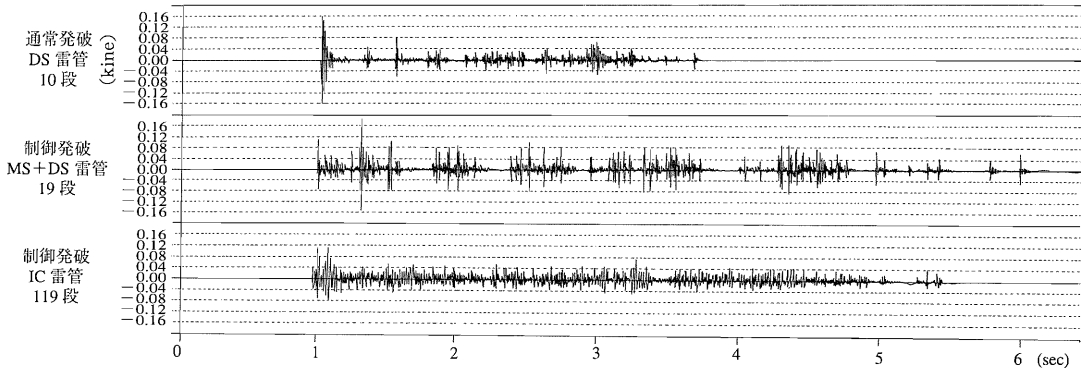


図-10 制御発破による振動波形

5. おわりに

本計測で得られた k 値は、当初想定された以上に大きなばらつきを見せた。すなわち同じ薬量による発破でも、生じる振動の値が大きく異なり、薬量調整による振動制御の不確定要因となった。

しかし、本計測システムは対象区域の全発破に対する計測を可能とし、さらに最大振動値のみでなく振動波形の表示も出来るシステムとしたため、きめ細かな対応が可能になり、結果として円滑な施工実施に貢献出来たと考える。

住宅や重要構造物に近接したトンネル施工における振動管理で、本工事のように原則として全発破について振動計測を行った例はそれほど多くない。全発破の計測が行われない理由の中には、計測とデータ処理に要する時間及び費用の増加といった問題がある。

しかし、住民の環境意識への高まりと、住居地域に接した大型土木工事の増加により、適切な振動管理は重要度を増している。本工事における自動計測システムの導入は、これに対応するものであり、トンネル掘削技術に情報技術をうまく活用できた一例と言える。

最後に、本計測システムの計画と運用にご指導ご協力頂いた株式会社計測リサーチコンサルタント、旭化成株式会社、有限会社ウシオ及びフジタ・奥村・伏光建設工事共同企業体の関係各位の皆様方に誌面を借りて厚くお礼申し上げます。

J C M A

【筆者紹介】

岡村 浩孝 (おかむら ひろたか)
広島高速道路公社
建設部建設第二課
主任



陰野 浩 (いんの ひろし)
広島高速道路公社
建設部建設第二課
主任技師



中村 進 (なかむら すずむ)
広島高速道路公社
建設部建設第三課
技師

