

無導坑式めがねトンネルの発破掘削の振動測定

Measurement of blasting vibration in twin tube tunnel by no pre-advanced tunnel

澤田敦則¹・菊地富良²・蓮井昭則³・前原弘光⁴・古川幸則⁵

Atunori Sawada, Tomiyosi Kikuti, Akinori Hasui, Hiromitsu Maehara
and Yukinori Furukawa

¹正会員 国土交通省名四国道事務所 (〒467-0847 愛知県名古屋瑞穂区神穂町 5-3)

²正会員 (社) 施工技術総合研究所研究第一部 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

³正会員 工博 ハザマ 技術研究所技術研究部 (〒305-0822 茨城県つくば市刈間 515-1)

E-mail: hasui@hazama.co.jp

⁴正会員 ハザマ 名古屋支店土木部 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦 2-4-16)

⁵正会員 間・奥村特定建設工事共同企業体 (〒471-0815 愛知県豊田市大見町 1-107-1)

Itsutsugaoka tunnel is twin tube tunnel by no-advanced tunnel. This was made up a preceding tunnel and a posterior tunnel, and it excavated using together blasting and breaker machine. To decrease blasting vibration, we adopted multiple shot blasting that a shot hole was charged one delay type IC-detonator. For confirmation the effect of this method, we measured blasting vibrations and observed crack in shotcrete of the preceding tunnel when the posterior tunnel was excavated by blasting.

Key Words : twin tube tunnel, blasting, measurement

1. はじめに

近年、既設構造物に近接して建設工事を行うことが増えており、その場合には、近接構造物や周辺環境に影響を与えない工事が求められる。めがねトンネルにおいても同様で、既設構造物や周辺環境への配慮はもとより、後行トンネルの施工時に超近接となる先行トンネルに影響を与えないことが重要となる。特に後行トンネルを発破で掘削するときには、その発破振動を抑制し、先行トンネルの支保工などに影響を与えない配慮が必要である。

東海環状自動車道五ヶ丘トンネルは住宅地に近接して施工される無導坑式のめがねトンネルであり、地山の一部に硬質な岩盤が出現するため機械掘削と発破掘削を併用した掘削方法が採用された。そのため、周辺住宅への配慮と後行トンネル掘削時の先行トンネルへの影響を抑制するために発破振動をできるだけ軽減した掘削が採用された。本文では五ヶ丘トンネルの後行トンネル上半掘削での発破振動について報告する。

2. トンネル概要

東海環状自動車道五ヶ丘トンネルは愛知県豊田市南部に位置し、トンネル延長 321m、掘削断面積約 100m²～108m²、土被り厚が 1～28m の 2 車線道路トンネルで、上り線と下り線が非常に近接しためがねトンネルである。めがねトンネルの施工には従来から導坑方式が良くみられるが、本トンネルでは工期短縮を主目的として無導坑式が採用された¹⁾。五ヶ丘トンネルの施工断面を図-1 に、地質構造と発破振動測定地点を図-2 に示す。

トンネル周辺の主要地質は中世代白亜紀の領家伊那川花崗岩で強風化したマサ土、弱風化花崗岩と新鮮な花崗岩が混在している。この新鮮な花崗岩は一軸圧縮強度が 150MPa 程度と堅硬で、ブレーカ等による機械掘削が難しいため、機械掘削と発破掘削を併用した NATM を採用した。そして、後行トンネルでの発破掘削時には先行トンネルの吹付けコンクリート等へ影響を与えないために、IC 雷管を用いた 1 孔 1 段の発破および 1 孔当たりの装薬量を制限した発破パターンを設定し、発破振動の軽減を図った。

3. 発破パターンおよび発破振動の管理

(1) 発破パターン

発破パターンの設定に当たっては、まず、吹付けコンクリートの破壊限界の振動速度を推定した。推定には構造物の弾性係数と変位速度の関係から求める方法（式（1））と、ひずみとの関係から求める方法（式（2））の2つ方法を用い、その平均値から破壊限界での振動速度値を推定し、安全率2で除して許容振動速度値（23.3cm/s）をとした。ここに、 σ は吹付けコンクリートの引張強度、 ρ は密度、 C は弾性波速度、 ε は引張強度時のひずみ、 E は弾性係数であり、 V は振動速度である。

$$\sigma = \rho \cdot C \cdot V \quad (1)$$

$$\varepsilon = \sigma / E = V / C \quad (2)$$

一方、発破振動の推定式にはいくつかのものが提案されているが、近接発破を対象としたものはほとんどない。そのため、推定式の成立条件の範囲に比較的小葉量、近距離が入っている推定式²⁾を利用し、掘削前の試験発破結果から、初期の発破振動推定式を式（3）のように算定した。ここに W は装薬量、 D は爆源からの距離である。

$$P P V = 175 W^{0.75} D^{-2} \quad (3)$$

さらに、（3）式を用いて、先行トンネルの吹付けコンクリート位置で許容振動速度を超えないように1孔当りの装薬量を設定した。後行トンネル上半掘削の発破パターンを図-3に示す。発破孔数は137孔（段数137段）、装薬量は0.5～0.6kg/孔（含水爆薬

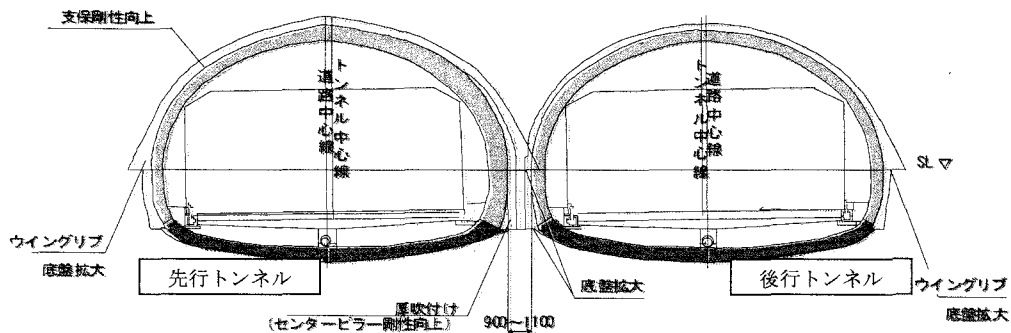


図-1 五ヶ丘トンネルの施工断面

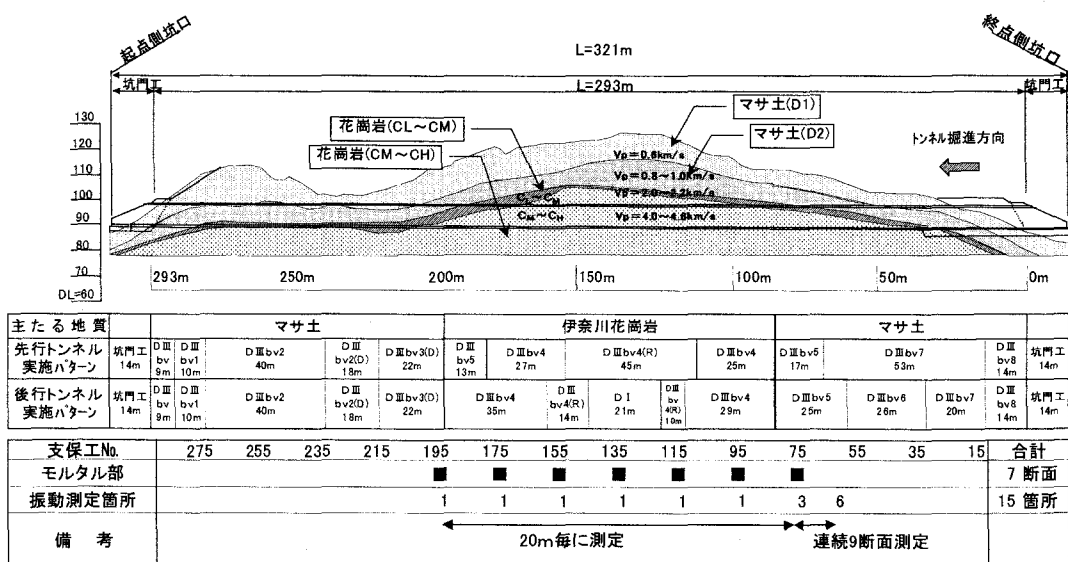


図-2 地質構造と振動測定地点

φ30×100 g) を使用し、先行トンネルに最も近い側の発破孔(発破列#17, A孔～I孔)は装薬量 0.2kg/孔とした。なお、一発破掘進長は1mで、図-3中の切羽左側 1.5m区間はブレイカによる機械掘削である。

(2) 発破振動の管理

発破振動の測定は先行トンネルにより大きな発破振動が発生すると考えられる後行トンネルの上半掘削に着目し、その中でも前出のA孔～I孔に注目して管理対象とした。さらに先行トンネル吹付けコンクリート面ではクラック調査を行い、発破パターンの妥当性を確認するとともに、掘削が支保 No. 75 に達した施工途中で、その見直しを行った。発破振動管理の流れを図-4に示す。また、クラック調査では先行トンネルの吹付けコンクリート表面に厚さ約 2cm のモルタルを塗り、壁面に発生するクラックを見やすくした。

発破振動の測定は図-2で示したように先行トンネルの支保 No. 68～No. 195 間の 15 断面において実施し、掘削初期段階には切羽ごとに 9 断面で、支保 No. 75 以降は後行トンネル上半進行 20m 毎に測定を実施した。なお、先行トンネルの吹付けコンクリート面でのクラック調査は支保 No. 75～No. 195 の 7 断面で実施した。

4. 発破振動の測定方法

後行トンネル上半掘削の管理孔位置と先行トンネル側での受振位置との関係を図-5に示すが、測定は発破真横の先行トンネル側の吹付けコンクリート表面に3成分圧電型加速度計を5箇所(受振点①～⑤)に設置して行った。なお、設置位置がモルタル表面となるため、設置面をグラインダーにて平滑化し、アルミプレートに接着剤で固定した後に加速度計を設置した。図-6に加速度計設置方法を示す。

測定された加速度データは振動ユニットの積分回路により速度値に変換して記録した。測定システムの諸元を表-1に示す。

5. 測定結果および考察

(1) 測定結果

測定されたXYZ方向の測定振動の波形例を図-7(a)に示すが、1孔ごとの発破振動が明確に分離されて測定されており、ほとんどのケースで壁面に直交方向の振動成分が卓越していた。さらに3次元的に伝播する振動の大きさを評価対象とするため、XYZ方向の測定振動を式(4)により3次元ベクトルの大きさに合成した。その合成した波形例を図-7(b)に示す。

$$V = \sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} \quad (4)$$

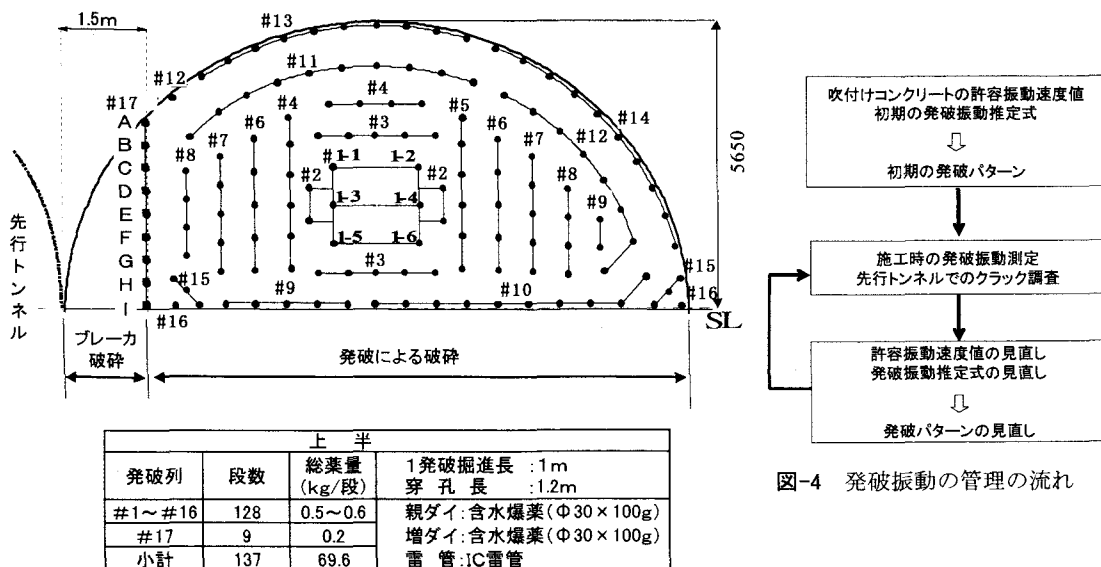


図-3 後行トンネル上半掘削の発破パターン

図-4 発破振動の管理の流れ

一方、管理孔A～I孔での発破に対して①～⑤の各受振点で測定された発破振動の分布を図-8に示すが、両図とも同じ装薬量でも発破孔によって測定される発破振動に大きな差が生じていることが分かる。図-8(a)は弱風化花崗岩と新鮮な花崗岩との混在および発破時の抵抗線長の違いにより差が生じたものと考えられた。また、図-8(b)は、D孔とG孔で奥鳴り現象が発生したため、振動が異常に大きくなったものと判断され、発破後の切羽観察でもこの現象が確認されている。

(2) 発破パターンの見直し

本トンネルでの発破では、先行トンネル支保工への影響を極力抑制することが必要である。しかし、図-8で示したように、測定された発破振動には大きなバラツキがあり、測定されたデータを全て用いて発破振動推定式を想定すると発破振動を危険側に評価する可能性がある。そのため、発破振動推定式の

見直しでは、各測定断面において各受振点で得られた発破振動のうち最大値を整理対象とした。また、奥鳴り現象の防止に関しては、図-3における発破列#17(A～I孔)と発破列#8との間隔を短くすることで対応し、発破振動推定式の整理対象から除外した。掘削初期段階(発破振動測定:9断面)で得られた発破振動測定結果から見直した発破振動推定式を以下に示す。なお、推定では装薬量に対する係数は一定とした。

$$PPV = 219W^{0.75}D^{-1.184} \quad (5)$$

一方、先行トンネルのクラック調査では、壁面に平行する剥離クラックはなかったが、壁面に直交する水平あるいは鉛直方向のクラックがいくつか観察され、水平方向のクラックはトンネルSL付近に、鉛直方向のクラックは吹付けコンクリート中の鋼製支保工などによって発生した。ほとんどのクラック

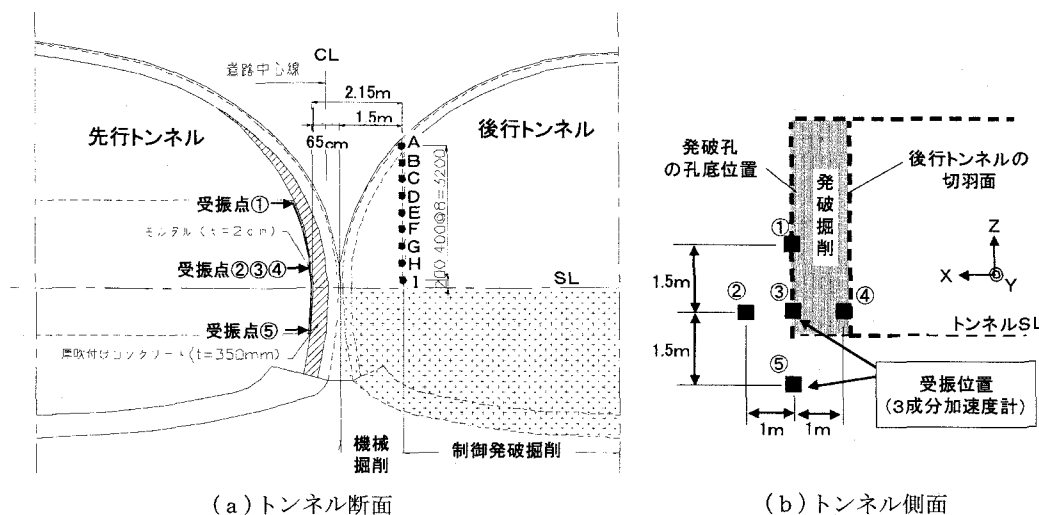


図-5 発破振動の受振点位置

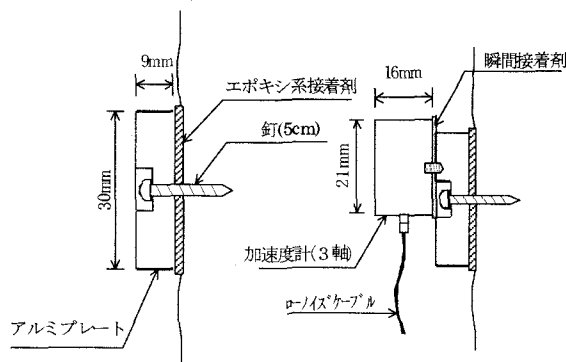


図-6 加速度計の設置方法

表-1 測定システムの諸元

計器名	仕様
圧電型加速度計 (3方向)	3方向成分、100G 共振周波数: 水平10kHz、垂直 30kHz
振動計ユニット	加速度→速度の積分回路内蔵 対応周波数: 3～3kHz
データアキュジション 装置	データ記録と記録紙への出力 最小サンプリングタイム: 1μs

はクラックを見やすくするために塗布したモルタルにとどまるが、一部には吹付けコンクリートの鋼製支保工面まで達したのもあった。これらのクラックは鋼製支保工のような異物の存在や乾燥収縮による潜在的な引張応力状態下にあった吹付けコンクリートやモルタルに、発破振動が加わったために発生したものと考えられた。吹付けコンクリートの許容振動速度の見直しは、便宜的にこれらの壁面に直交するクラックを対象にして行った。そして吹付けコンクリート内に発生したクラック位置で測定された振動速度を基にして、吹付けコンクリートの許容振動速度 44cm/s と見直した。

このようにして得られた発破振動推定式と吹付け

コンクリートの許容振動速度から後行トンネル上半掘削の発破パターンを見直した。その結果、奥鳴り現象対策として孔間隔を短くする対策はあるものの、段数や装薬量は初期の発破パターンで継続可能と判断した。

見直し以後はトンネル延長 20m 毎に発破振動測定とクラック観察を行い、発破パターンの妥当性を確認しながら掘削を行った。そして先行トンネルに対してほとんど影響なく、後行トンネル上半部の発破掘削を完了した。

発破掘削終了時には発破パターンの妥当性を確認するために 15 断面での測定結果を用い、発破区間全体としての発破振動推定式を算定した。このときの

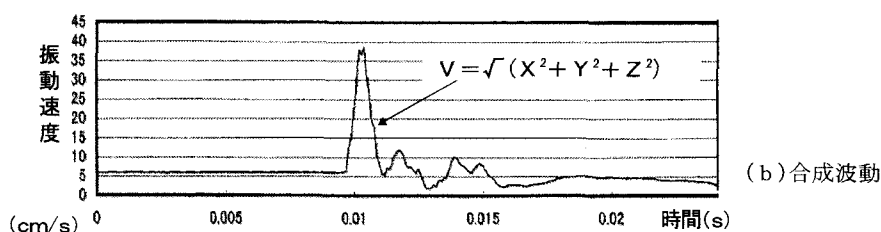
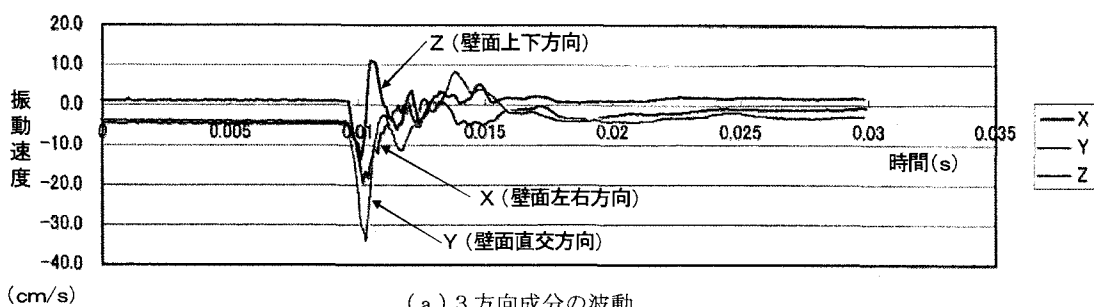


図-7 測定波動の例

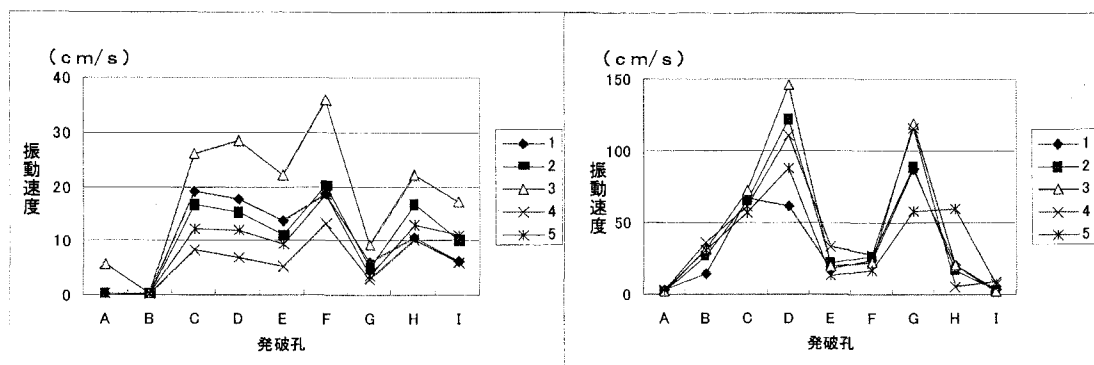


図-8 受振点で得られた発破振動の分布

算定にはA～I孔での発破ばかりでなく、切羽中央付近での発破孔（一般孔）による測定結果も加味した。なお、A～I孔での装薬量は200g/孔であるのに対し、一般孔の装薬量は500g/孔であり、両者の測定結果は直接比較できない。装薬量の異なる発破を同列に評価する場合、装薬量Wと爆源からの距離Dを1つの因子として表現した換算距離⁴⁾の概念がよく用いられるが、ここでは爆源からの距離を明確にするため、装薬量500gの測定値を装薬量200gに換算してデータを整理した。初期時、見直し時および発破掘削の最終時での発破振動推定式（装薬量200g）を測定結果とともに図-9に示す。

6. おわりに

後行トンネルの超近接発破では先行トンネルの支保工にほとんど影響を与えることなく掘削を無事完了することができた。このことから先行トンネルの支保工観察と発破振動測定により、管理を行いながら効率的な掘削ができたと考えている。また、近接する住宅地に関しても管理基準値65dBに対して、実測振動値59～63dBで施工を進めることができた。本トンネルで得られた知見は今後の超近接工事で発破掘削を実施する場合に役立つものと考えている。

最後に、本トンネルの発破について、五ヶ丘トンネル技術検討委員会（今田徹委員長）、施工技術総合研究所をはじめ、多くの方の多大なるご指導とご支援に謝辞を表します。

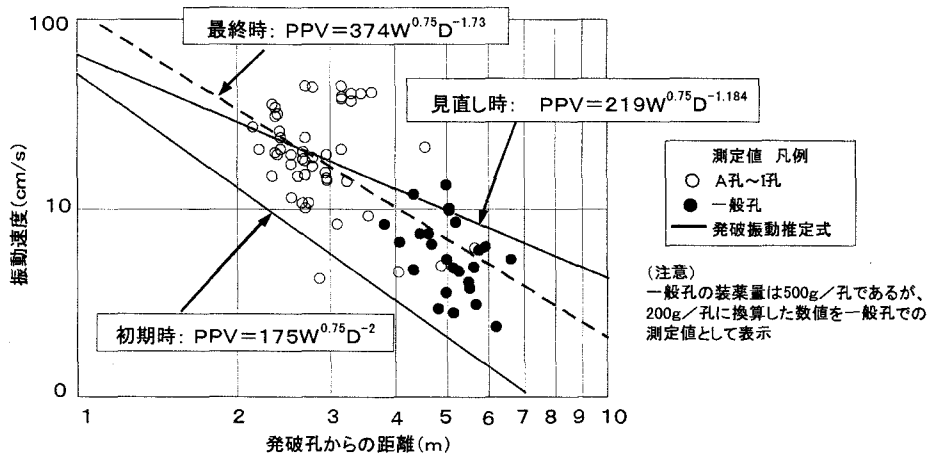


図-9 初期時、見直し時、最終時における発破振動推定式（装薬量W=200g）

参考文献

- 1) 古川幸則, 黒田二郎, 前原弘光, 鈴木雅行: 無導坑めがねトンネルの設計と施工, (社)日本トンネル技術協会第52回施工体験発表会(山岳), pp. 49～56, 2003.12
- 2) 日本トンネル技術協会: トンネル工事の発破振動および騒音対策に関する調査報告書, 日本トンネル技術協会, 1977
- 3) 中野研一郎, 岡田秀, 古川浩平, 中川浩二: トンネル掘削における超近接発破に関する研究, 土木学会論文集 No. 462/VI-18, pp. 53～62, 1993.3
- 4) チャールズH. ダウディン: 発破振動の測定と対策, 山海堂, 1995.12