

心抜き自由面発破による発破振動の低減効果

若月 和人¹・木村 能隆²・多田 芳葉²・高橋 渉³

¹正会員 株式会社福田組 統括事業本部技術企画部 (〒951-8668 新潟市中央区一番堀通町3番地10)

E-mail:waka1950@fkd.co.jp

²株式会社福田組 横島トンネル作業所 (〒729-6141 広島県庄原市水越町字黒瀬谷2256-1)

³国土交通省 中国地方整備局 三次河川国道事務所 (〒728-0011 広島県三次市十日市西6-2-1)

民家等の制約物件に近接して発破掘削を行う場合、発破振動を極力低減して構造物および住民への影響を最小限に抑えることが重要である。このような場合、切羽外周部あるいは中央部に溝、すなわち自由面を形成することにより、発破振動を大幅に低減する制御発破（以下、自由面発破と呼ぶ）が行われるケースがある。自由面発破を実施した場合、装薬量および発破係数 K 値を低減できることから、振動速度を低減できることが知られている。しかしながら、人体に対する影響を評価する振動レベルの低減効果に言及した報告はほとんどない。

本稿では、民家直下を発破掘削する山岳トンネル工事において、発破振動の低減対策として実施した自由面発破による振動速度および振動レベルの低減効果について報告する。

Key Words : controled blasting, center cut, continuous slot, vibration velocity, vibration level

1. はじめに

制約物件に近接して発破掘削を行う場合、発破振動を抑えるため、多段発破による斉発薬量の低減対策が一般に行われている。さらに制約条件が厳しい場合には、機械掘削工法や割岩工法が採用されているが、経済性や工程に与える影響が大きい。最近では、割岩の自由面形成技術を用いて、切羽外周部あるいは中央部に自由面を形成することにより、発破振動を大幅に低減する制御発破が行われるケースがある。自由面発破のおおまかな適用範囲を図-1に示す。

ここでは、掘削効率を極力低下させないように、発破振動が最も大きくなる心抜き部のみに自由面を形成し、

発破振動を効果的かつ経済的に低減しようとする制御発破を心抜き自由面発破と呼ぶこととする。

自由面発破を実施した場合、装薬量および発破係数 K 値を低減できることから、振動速度を低減できることが知られている²⁾。しかしながら、人体に対する影響の評価基準である振動レベルについては、計測した事例はいくつか存在するものの、その低減効果に言及した報告はほとんどない。

本稿では、民家直下を発破掘削する山岳トンネル工事において、発破振動の低減対策として実施した心抜き自由面発破による振動速度および振動レベルの低減効果について報告する。

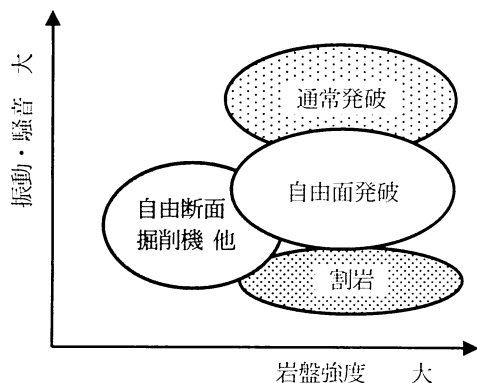


図-1 掘削方式の適用範囲¹⁾

2. 工事概要

尾道松江自動車道 横島トンネルは、広島県北部に位置する2車線道路トンネルである。中生代白亜紀の花崗斑岩がトンネルのほぼ全域に出現し、弾性波速度は両坑口部を除き $V_p=3\sim4\text{km/sec}$ であり、中硬岩～硬岩と想定された。

起点側坑口部より約100mの地表面に民家が点在しており、ここを最小土被り25mで発破掘削する計画であったことから、発破振動の低減対策が必要であった（図-2, 3, 4）。

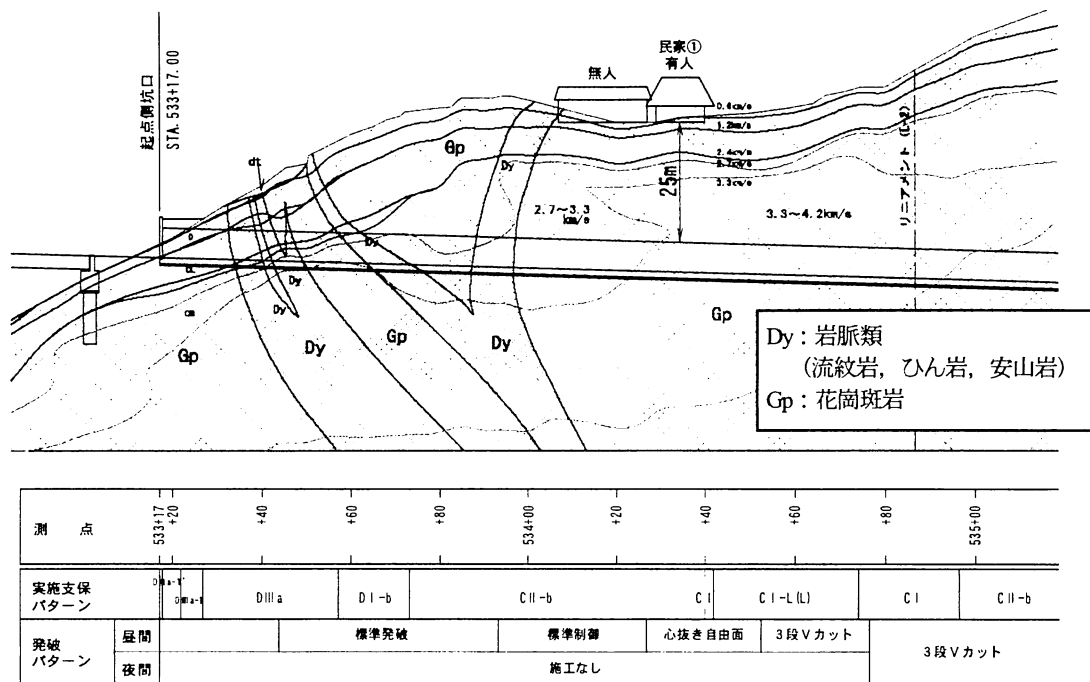


図-2 制御発破区間の地質縦断

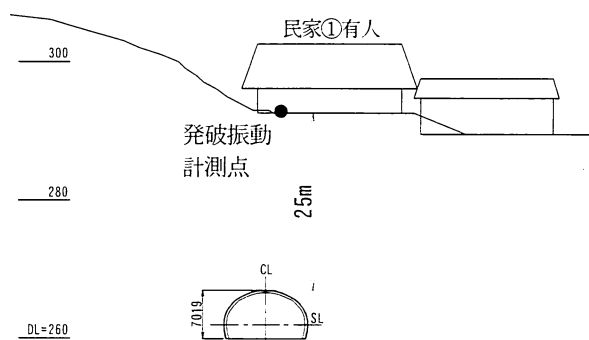


図-3 民家との最接近断面

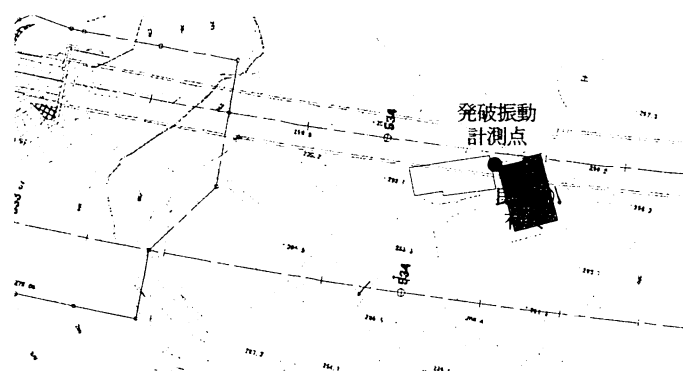


図-4 近接区間平面

表-1 近接区間で実施した振動低減対策

a) 標準制御	DS+MS雷管（最大23段）
b) ポアホール	a)に追加して心抜き周辺にφ100のポアホール10～50孔を形成
c)心抜き自由面1	a)に追加して心抜きに直線の自由面を形成（民家直下で採用）
d)心抜き自由面2	a)に追加して心抜き周辺に矩形の自由面を形成（試験施工）
e)3段Vカット	a)に追加して補助心抜きとして3段Vカットを形成（民家通過後）

3. 振動低減対策

(1) 振動低減対策の概要

事前に実施した発破振動の検討結果より、民家直下区間における発破振動の低減対策は、昼間のみの施工、上半下半の分割掘削および DS+MS 雷管による多段発破を標準制御発破として実施する計画とした。さらに、後述する発破振動の計測結果を以降の発破計画に反映させ、状況に応じて発破パターンの修正、変更を行う計画とした。

当初は事前の想定ほど振動速度が発生しなかったが、民家に到達する直前から急速に振動速度が増加する傾向を示したため、さらなる振動低減対策が必要となった。このため、心抜き対策として心抜き自由面あるいは3段Vカットを追加して実施した。民家との近接区間において実施した振動低減対策を表-1 に示す。

また、実施した主な発破パターンを図-5, 6, 7 に、心抜き自由面の形成状況を写真-1, 2 に示す。ただし、心抜き自由面 2 のパターンは試験施工として 2 回実施したのである。

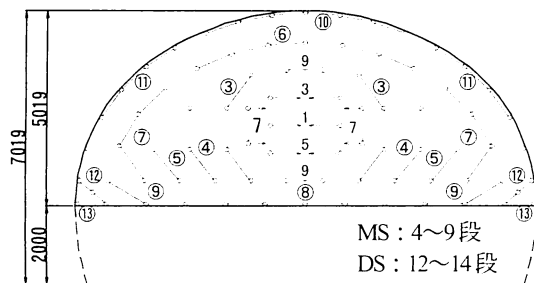


図-5 標準制御 (C II-b 上半)

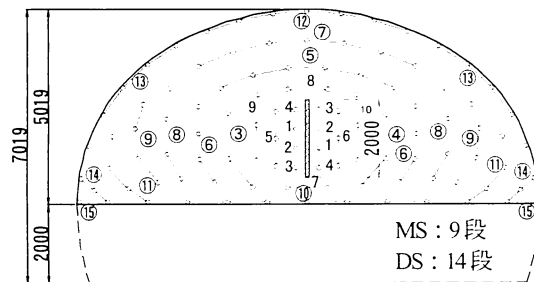


図-6 心抜き自由面1 (C II-b 上半)

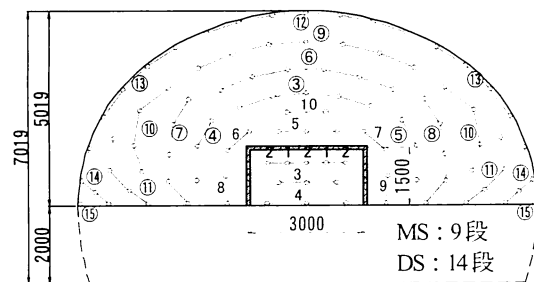


図-7 心抜き自由面2 (C II-b 上半)



写真-1 心抜き自由面1の形成状況



写真-2 連続孔による自由面の形成状況

(2) 心抜き自由面の形成

心抜き自由面の形成には、単一孔連続穿孔工法であるFONドリル工法を採用した³⁾。

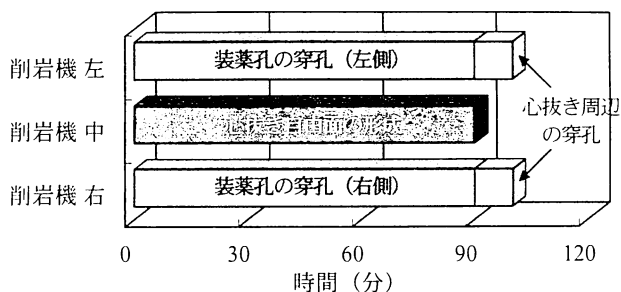


図-8 心抜き自由面1の穿孔時間例 (C II-b 上半)

表-2 計測機器

項目		機器, メーカー
振動速度	受振計	導電型速度計 GS-11D Geo-space 社製
	記録計	メモリハイコーダ 8808 日置電機社製
振動レベル	受振, 記録計	振動レベル計 VM-53 3方向振動ピックアップPV-83C リオン社製

自由面のパターンについては、自由面の形成量が多いほど振動低減効果は高いと考えられるが、掘削コストおよび工程に与える影響が非常に大きい。そこで本計画では、既往の施工実績を参考にしながら、掘削のサイクルタイムに与える影響を極力小さくするために心抜き部のみに自由面を形成するパターンを選定し、心抜き自由面の長さは約2mとした。

主に実施した心抜き自由面1では、削岩機3ブームのうち左右の削岩機は通常どおり装薬孔を穿孔し、中央の削岩機は心抜き自由面の形成に使用した。これにより、装薬孔の穿孔と心抜き自由面の形成を並行して行うことができた(図-8)。心抜き自由面の追加によるサイクルタイム増加は30~40分程度であり、掘削サイクルタイムに与える影響を極力小さくすることができた。

(3) 発破振動の計測体制

地表面の民家に対する発破振動の影響や制御発破の妥当性を確認するため、発破振動の計測を実施した。計測項目は振動速度および振動レベルとし、計測には表-2に示す機器を使用した。計測期間は発破掘削の開始から振動が十分小さくなるまでとし、1発破ごとに計測を実施した。民家に対する影響が大きい場合は、斉発薬量の見直しや発破パターンの修正および変更を適宜行った。

なお、発破振動に関する管理基準値は、振動速度で1.0cm/sec、振動レベルで75dBとしたが、住民の了解が得られない場合は、管理値を満足していたとしても発破方法の見直しを行うこととした。このため、発破の影響を直接住民に聞くためのアンケートを発破実施日ごとに行った。

表-3 使用薬量の実績（上半掘削）

区分	発破パターン	心抜き薬量	平均総薬量	標本数
CⅡ-b	標準制御	1.5 kg	43.4 kg	11
	ボアホール	1.1 kg	45.6 kg	8
	心抜き自由面1	0.6 kg	39.5 kg	6
	心抜き自由面2	1.2 kg	41.6 kg	2
CⅠ-L	心抜き自由面1	0.7 kg	69.1 kg	6
	3段Vカット	0.5 kg	69.1 kg	10

4. 薬量の実績

各発破パターンで使用した爆薬量の実績を表-3に示す。ここでは、同じレベルで薬量を比較するため、心抜きの装薬がほとんど必要なかったケースや当たりの発生したケース等は除外した。また、民家直下区間の地山状況は掘削時の切羽観察においてほぼ同じと判断された。

同じ支保パターンで比較すると、心抜き自由面1では心抜き部が2自由面発破となり、心抜きの負担を大きく低減できるため、心抜き薬量は標準制御発破の50%程度に減少している。ただし、この効果は心抜き近傍にとどまり、払い孔の薬量減少はわずかであるため、総薬量の減少は10%程度である。

心抜き自由面1と3段Vカットとでは総薬量に大きな差はなかった。

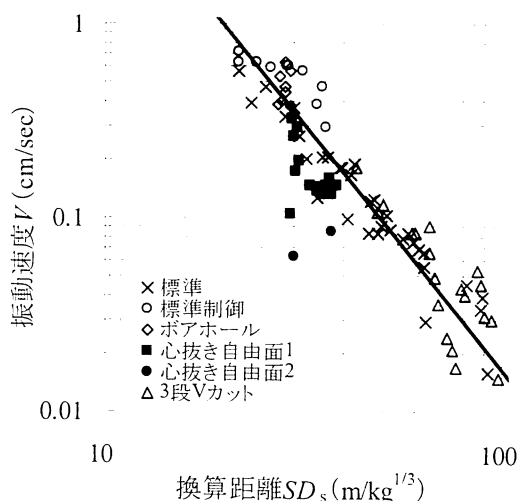


図-9 換算距離と振動速度の関係

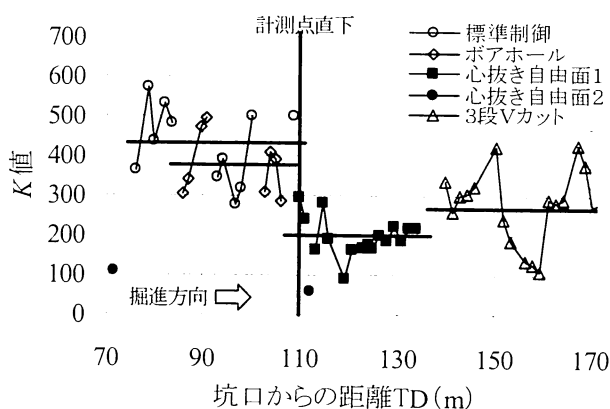


図-10 計測点前後のK値

5. 振動速度の計測結果

(1) 振動速度

装薬量の違いを考慮して振動速度の変化を検討するため、換算距離 SD_s と心抜きに伴う振動速度 V の関係を図-9に示す。ここで換算距離 SD_s は、装薬量が異なることによる影響を除くために、切羽から振動計測点までの距離 D を心抜き薬量 W_s の立方根で無次元化したもの $(D/W_s^{1/3})$ とした⁴⁾。ここでは、制御発破の効果を検証するため、下半やインバート掘削等の発破データは除外するとともに、心抜きの装薬がほとんど必要なかったデータは除外した。また、図中の太線は、標準発破（坑口部除く）の回帰曲線である。

標準制御、ボアホールおよび3段Vカットは、おおむね標準発破の回帰曲線上にあるが、心抜き自由面1および2は回帰曲線より下方にシフトしており、振動速度が低減されていることを示している。

地質条件や距離 D が同程度の民家直下付近で振動速度を比較すると、心抜き自由面1の振動速度は標準制御のおおよそ30%程度に低減されており、心抜き自由面2では標準制御の15%程度にまで低減されている⁵⁾。

表-4 各制御発破のK値

発破パターン	平均	標準偏差	備考
標準制御	430	96	MS+DS
ボアホール	376	79	10～50孔
心抜き自由面1	199	49	
心抜き自由面2	85	—	
3段Vカット	270	91	

(2) 発破係数K値

発破振動 V の推定には一般に以下の経験式が用いられている。

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

ここでは、心抜き自由面発破による振動低減効果を発破係数 K 値を用いて評価する。条件が比較的近い計測点前後の区間における K 値を図-10および表-4に示す。

心抜き自由面1の K 値は、標準制御と比較して50%以下と大きく低減されている。既往の文献⁶⁾では、切羽中央部に自由面を形成した場合の K 値は1/2～1/3に低減されているが、おおむね同程度の結果である。また、実施

当初は変動も見られたが、発破パターンの微修正により変動を小さくすることができた。標準偏差はほかの制御発破と比較して約半分である。

なお、心抜き自由面2のK値は、標準制御の20%程度にまで低減されている。

6. 振動レベルの計測結果

(1) 振動レベル計測結果の概要

振動レベルVLは人体が感じる振動の強さを表す指標であり、下式によりdB単位で定義される。

$$VL = 20 \cdot \log(A / A_0) \tag{2}$$

ここで、 A_0 は基準の振動加速度 ($=10^{-5} \text{m/sec}^2$) であり、 A は人体感覚に対して補正を行った加速度実効値である。

本工事において計測された最大振動レベルVL_{max}および心抜きに伴う振動レベルVL_sを図-11に示す。振動速度と同様に下半やインバート掘削等のデータは除外した。

最大振動レベルVL_{max}に着目すると、標準発破では離隔Dの増加とともにほぼ一定勾配で振動レベルが増加しているが、標準制御、ボアホールさらには心抜き自由面の採用により、VL_{max}の増加が抑制されているように見受けられる。また、心抜き振動レベルVL_sに着目すると、心抜き自由面の採用に伴ってVL_sが大きく低減されている。この傾向は心抜き振動速度Vとよく似た傾向を示している。

なお、振動レベル計測結果の最大値は標準制御を行ったときの70.8dBであったが、住民からの大きな苦情は発生しなかった。

(2) 振動レベルの低減効果

振動レベルVLは、離隔Dだけでなく薬量Wの影響も受けていることから、振動レベルVLについても薬量の影

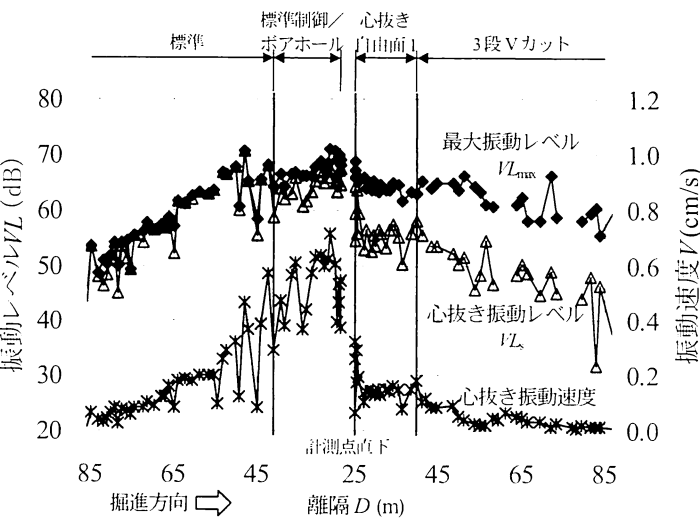


図-11 振動レベルと振動速度の推移

響を考慮するために換算距離SDを用いて整理する。換算距離SDと最大振動レベルVL_{max}との関係を図-12に示す。ここで、VL_{max}は総薬量に依存すると考えられることから、換算距離SDは離隔Dを総薬量の立方根で除したものとした。図中の太線は、標準発破（坑口部除く）の回帰曲線である。

各制御発破はおおむね回帰曲線より左下に分布しているが、心抜き自由面はほかの制御発破よりさらに左下に分布している。心抜き自由面が振動レベルの低減に対して一定の効果があることを示している。

さらに、段発発破の振動レベルは下式のように表すことができる⁷⁾。

$$VL_{\max} = VL_s + \Delta VL \tag{3}$$

ここで、VL_sは心抜きによる振動レベル、 ΔVL は後段の段発発破による振動レベルの増加を表す（図-13）。VL_{max}の低減はVL_sあるいは ΔVL を低減することにより可能になることを示している。

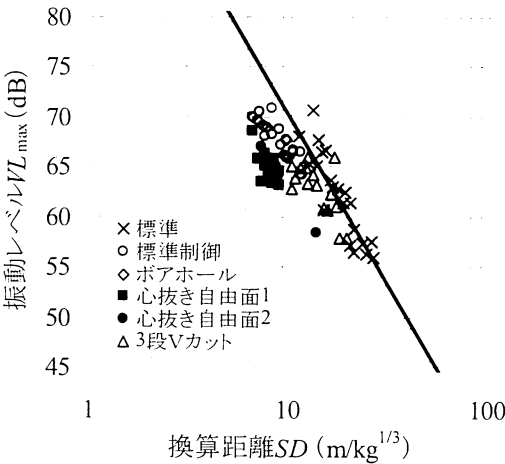


図-12 換算距離SDと振動レベルVL_{max}の関係

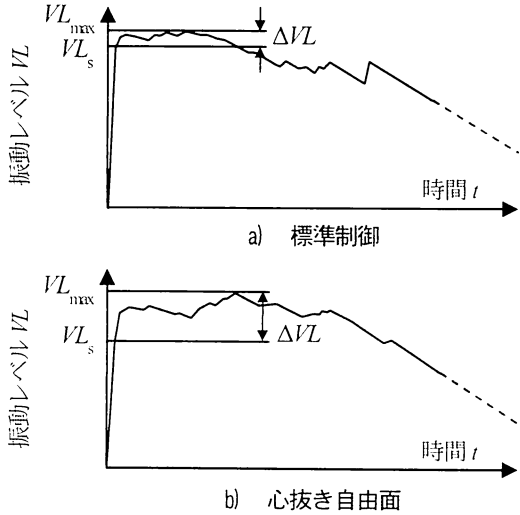


図-13 振動レベルのイメージ

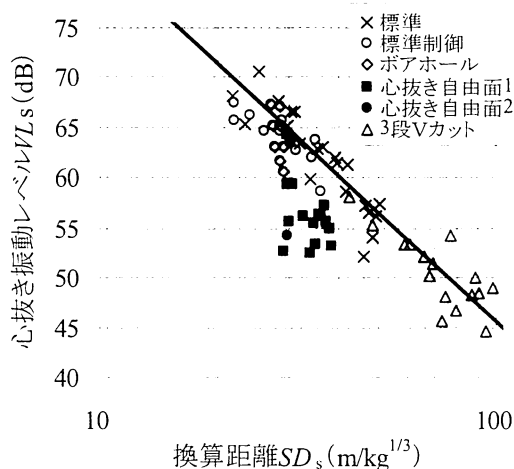


図-14 換算距離 SD_s と心抜き振動レベル VL_s の関係

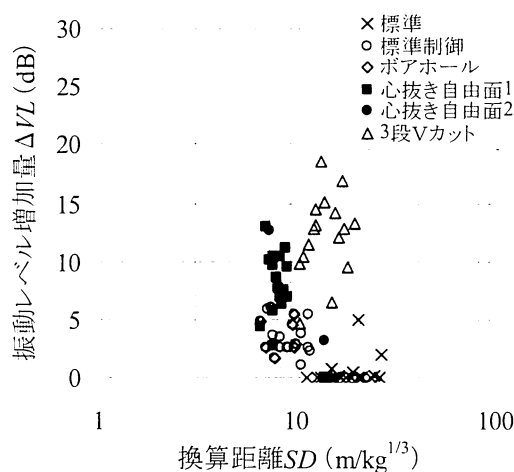


図-15 換算距離 SD と増加量 ΔVL の関係

そこで、心抜き振動レベル VL_s と後段の増加量 ΔVL について検討するため、換算距離 SD_s と VL_s との関係を図-14に、換算距離 SD と ΔVL との関係を図-15に示す。ここで、 VL_s は心抜き葉量に、 ΔVL は総葉量に依存すると考えられることから、換算距離はそれぞれ心抜き葉量 W_s あるいは総葉量 W を考慮したものとした。

心抜き振動レベル VL_s では、心抜き自由面以外はおおむね標準発破の回帰曲線上に分布しているが、心抜き自由面は回帰曲線の下方に分布している。

一方、後段の増加量 ΔVL では、換算距離との相関性がほとんど見られない。図-13に示すとおり、標準制御では VL_s が卓越し ΔVL は抑制されているが、心抜き自由面では VL_s が相対的に抑制され、2段目以降の段発発破によって徐々に ΔVL が増加して最大値 VL_{max} に達している。このように、 ΔVL は離隔 D や葉量 W 以外に、発破パターンの違いによる影響が大きいと考えられる。

ここで、地質や離隔等の発破条件が比較的近い計測点前後のCⅡ-bパターンにおいて、標準制御と心抜き自由面1の振動レベルを表-5および図-16で比較する。心抜き自由面の存在により VL_s は約7.5dB低減されているが、逆

表-5 計測点前後の振動レベル (CⅡ-b)

発破パターン		標準制御 (a)	心抜き自由面1 (b)	(a)-(b)
VL_{max} (dB)	平均	67.6	64.8	2.8
	標準偏差	2.0	1.4	
VL_s (dB)		64.1	56.6	7.5
ΔVL (dB)		3.5	8.2	-4.7
$\Delta VL/VL_{max}$		5.2%	12.7%	

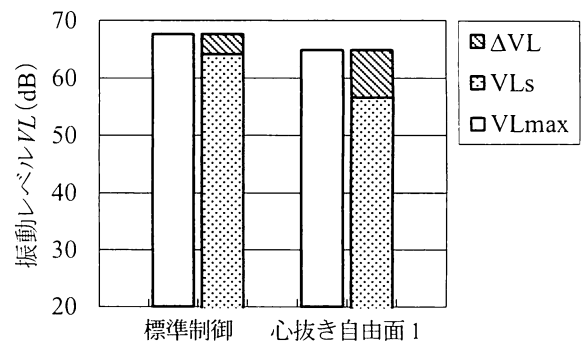


図-16 計測点前後の振動レベル (CⅡ-b)

に ΔVL は約4.7dB増加している。ただし、 VL_{max} に対する ΔVL の比率は10%前後と小さく、しかも ΔVL の増加量は VL_s の低減量よりも小さくなっている。最終的に VL_{max} は約2.8dB低減されている。

なお、この両者の振動レベルについて統計的に有意な差があるのか検定を行ったところ、有意水準1%以下で有意差があると認められた。また、振動レベルは式(2)で定義されているとおりdB単位であることから、約2.8dBの低減はパワーとして約40%の低減に相当する。したがって、上記の振動レベルの差は十分に有意な低減効果であると判断できる。

心抜き自由面発破においては、5.で示したとおり心抜き葉量および K 値の低減効果によって心抜きに伴う振動速度を低減できることから、これが VL_s の低減となり、ひいては VL_{max} の低減につながっていると考えられる。振動速度の低減効果ほどは大きくないものの、振動レベルにおいても一定の低減効果が確認された。

(3) 心抜き自由面による効果の検証

振動レベルに対する心抜き自由面の効果を検証するために、振動レベル計と等価な応答を示すシミュレーション手法^{7,8)}を適用し、心抜き対策による振動レベルの影響を検討した。具体的には、今回の施工で計測された振動速度波形を時間積分して得た加速度波形を参考にしてモデル波形を作成し、心抜きの加速度振幅のみを変化させた場合の振動レベル応答を比較した。

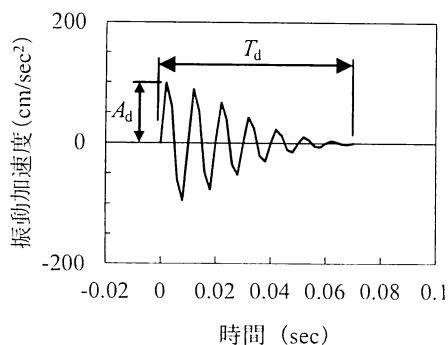


図-17 単発のモデル波形

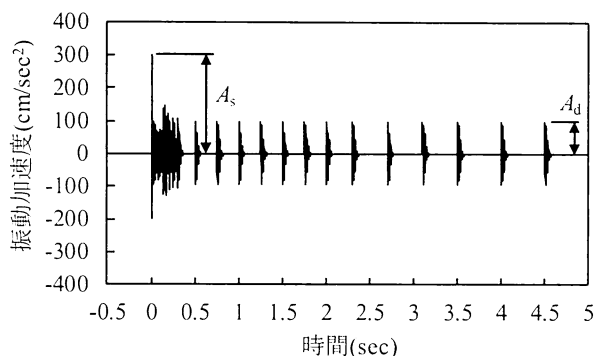


図-18 段発発破のモデル波形

モデル波形の作成にあたって、まずは得られた加速度波形から単発波形をサンプリングし、これを模して単発のモデル波形を作成した。実測振動波形の卓越周波数が100Hz 付近であったことから、100Hz の正弦波をガウス関数で減衰させて継続時間 T_d = 約 0.07 秒となるように調整した。払いの加速度振幅 A_d は、実測が 100cm/sec^2 前後であったことから $50, 100, 150\text{cm/sec}^2$ となるように振幅調整した。同様に、心抜きの加速度振幅 A_s は $50 \sim 400\text{cm/sec}^2$ となるように振幅調整した。この単発波形を雷管の規準秒時ごとに合成して段発発破のモデル波形を作成した（MS 雷管 9 段、DS 雷管 14 段）。単発のモデル波形と段発発破のモデル波形を図-17, 18 に示す。

$A_d = 100\text{cm/sec}^2$ とし、心抜きと払いの振幅比 A_s/A_d を変化させてシミュレーションした振動レベルを図-19 に示す。振幅比 A_s/A_d が小さくなるにつれて心抜き振動レベル V_L は小さくなり、逆に後段の増加量 ΔV_L は大きくなっているものの、最大値 $V_{L_{\max}}$ が小さくなっている様子が示されている。

また、 $A_d = 50, 100, 150\text{cm/sec}^2$ の場合に振幅比 A_s/A_d を変化させて求めた $V_{L_{\max}}$ を図-20 に、 $A_s/A_d = 1$ のときの振動レベル $V_{L_{\max}}$ を規準として求めた変化量 Δ を図-21 に示す。振幅比 A_s/A_d によって変化量 Δ はおおむね決定されることが示されている。すなわち、心抜きの加速度振幅 A_s を小さくすることにより振動レベル $V_{L_{\max}}$ を低減できることが示されている。ただし、 $A_s/A_d < 1$ としても $V_{L_{\max}}$ の低減にはあまり効果的ではない。

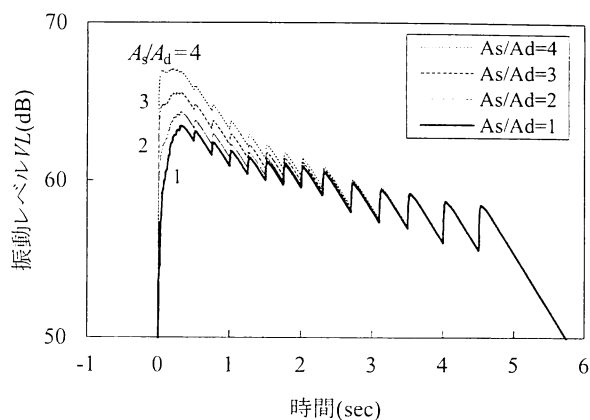


図-19 モデル波形の振動レベル ($A_d = 100\text{cm/sec}^2$)

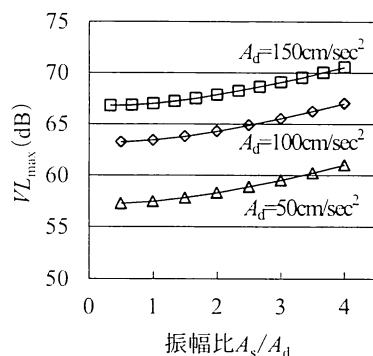


図-20 振幅比 A_s/A_d による振動レベルの変化

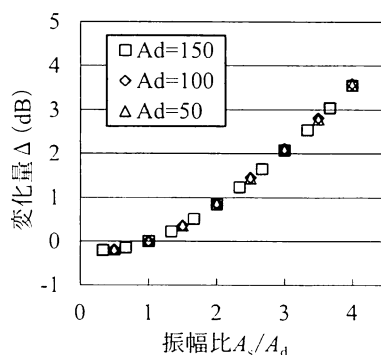


図-21 振幅比 A_s/A_d と振動レベル変化量

今回の実測波形では、標準制御で $A_s = 300 \sim 350\text{cm/sec}^2$ ($A_s/A_d = 3 \sim 3.5$) 程度に対して、心抜き自由面1では $A_s = 100\text{cm/sec}^2$ ($A_s/A_d = 1$) 程度であったことから、シミュレーション結果より振動レベル差は約2～3dBになると想定される。実測の両者の振動レベル差は約2.8dBであったことから、おおむね近い結果である。

振動レベル V_L は、段発の間隔や継続時間等の発破パターンの影響を受けるものであるが、心抜き自由面発破のように心抜きの振動のみを低減することによっても一定の振動レベル低減効果が得られることを示している。

7. おわりに

発破振動の低減のために心抜き自由面発破を実施した結果、以下のような効果が確認された。

- 1) 切羽の心抜き部のみに自由面を設ける心抜き自由面発破を採用することにより、掘削のサイクルタイムに与える影響を極力小さく抑えたうえで効果的に振動を低減することができた。
- 2) 心抜きの斉発薬量を 50%程度低減できるとともに、総薬量を 10%程度低減できた。
- 3) MS+DS雷管による多段制御発破と比較して、心抜きの発破係数 K 値を50%程度に低減できた。低減された K 値は払いの K 値と同等であり、負荷の小さな心抜きであったことを示している。また、 K 値の標準偏差はほかの制御発破の約半分であり、変動の小さな安定した振動低減効果が得られた。
- 4) 心抜きの振動速度が低減されることにより心抜きに伴う振動レベルが低減できる。後段の段発発破によるレベル増加量は大きくなるものの、MS+DS雷管による多段発破と比較して最大振動レベルを3dB弱低減できた。

心抜き自由面の形成パターンについては、既往の実績を参考にして決めており、必ずしも最適なパターンであったとは言えない。今後は、より効率的かつ効果的な自由面パターンについて検討したいと考えている。

最後に、本報告が発破振動低減対策の一助になれば幸いである。

謝辞：心抜き自由面発破の実施にあたり、NPO法人臨床トンネル工学研究所の中川理事長に有益な助言を頂きました。また、各関係者の皆様から多大なるご指導、ご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会 割岩工法 WG：割岩工法便覧 割岩工法に関する技術資料（総集編），p.1, 2006.
- 2) 萩森健治，竹知芳男，古川浩平，中川浩二：スロット工法を用いた低振動発破工法に関する研究，土木学会論文集，第 391 号／VI-8，pp.142-150，1988.
- 3) 野間達也，上野博務，土屋敏郎，波田光敬，川崎俊彦：連続孔穿孔による新しい自由面形成工法—F O Nドリル工法—，土木学会第 51 回年次学術講演会，VI-322，pp.644-645，1996.
- 4) 社団法人 日本騒音制御工学会技術部会 低周波音分科会編：発破による音と振動，山海堂，pp.52-53，1996.
- 5) 若月和人，木村能隆，多田芳葉，高橋渉：民家直下における心抜き自由面発破の振動低減効果，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-387，2011.
- 6) ジェオフロンテ研究会 割岩工法 WG：割岩工法便覧 割岩工法に関する技術資料（総集編），p.190，2006.
- 7) 国松直，中川浩二，三浦房紀，今村威：発破振動における振動レベルの推定，土木学会論文集，第 367 号／VI-4，pp.45-51，1986.
- 8) 北村泰寿：発破振動における振動速度と振動レベルの対応について，土木学会論文集，第 362 号／I-4，pp.481-484，1985.

REDUCTION EFFECT OF THE BLASTING VIBRATION BY THE CONTROLLED BLASTING WITH CONTINUOUS SLOT

Kazuhito WAKATSUKI, Yoshitaka KIMURA, Yoshiba TADA
and Wataru TAKAHASHI

When blasting work carry out near structure and inhabitants, it is important to restrain the vibration at the minimum level. In this case, controled blast which reduced the vibration in large scale, carry out by making a slot at outer portion or central portion of the face. Here, it will be called as “controled blasting with continuous slot”. It is known that, decrease of vibration velocity can be done by reducing the charging volume and the blast coefficient K . However, there is no report referred about reduction of the vibration level.

In this paper, we describe the effect of the reduction of the vibration velocity and vibration level by carrying out “controled blasting with continuous slot” in the mountain tunnel blasting method under the private house.