

# Control of blasting vibration due to tunnel excavation for rock slope stability

|       |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | <p>言語: jpn</p> <p>出版者:</p> <p>公開日: 2012-01-25</p> <p>キーワード (Ja):</p> <p>キーワード (En):</p> <p>作成者: 甘利, 哲夫, 中川, 浩二, 大西, 有三, 荒井, 克彦, 亀岡, 友美, AMARI, Tetsuo, NAKAGAWA, Kouji, OONISHI, Yuuzou, ARAI, Katsuhiko, KAMEOKA, Tomomi</p> <p>メールアドレス:</p> <p>所属:</p> |
| URL   | <p><a href="http://hdl.handle.net/10098/4853">http://hdl.handle.net/10098/4853</a></p>                                                                                                                                                                   |

## ■山岳トンネル発破掘削における岩盤斜面の振動計測管理

Control of blasting vibration due to tunnel excavation for rock slope stability

甘利哲夫\* Tetsuo AMARI／株式会社キミコン Kmikon Co. Ltd

中川浩二 Kouji NAKAGAWA／山口大学 Yamaguchi University

大西有三 Yuuzou OONISHI／京都大学 Kyoto University

荒井克彦 Katsuhiko ARAI／福井大学 University Of Fukui

亀岡友美 Tomomi KAMEOKA／日本機械化研究所 Japan Construction mechanization Association

キーワード：山岳トンネル，発破振動，岩盤斜面，振動計測

Key words：tunnel, blasting vibration, rock slope, observation of vibration

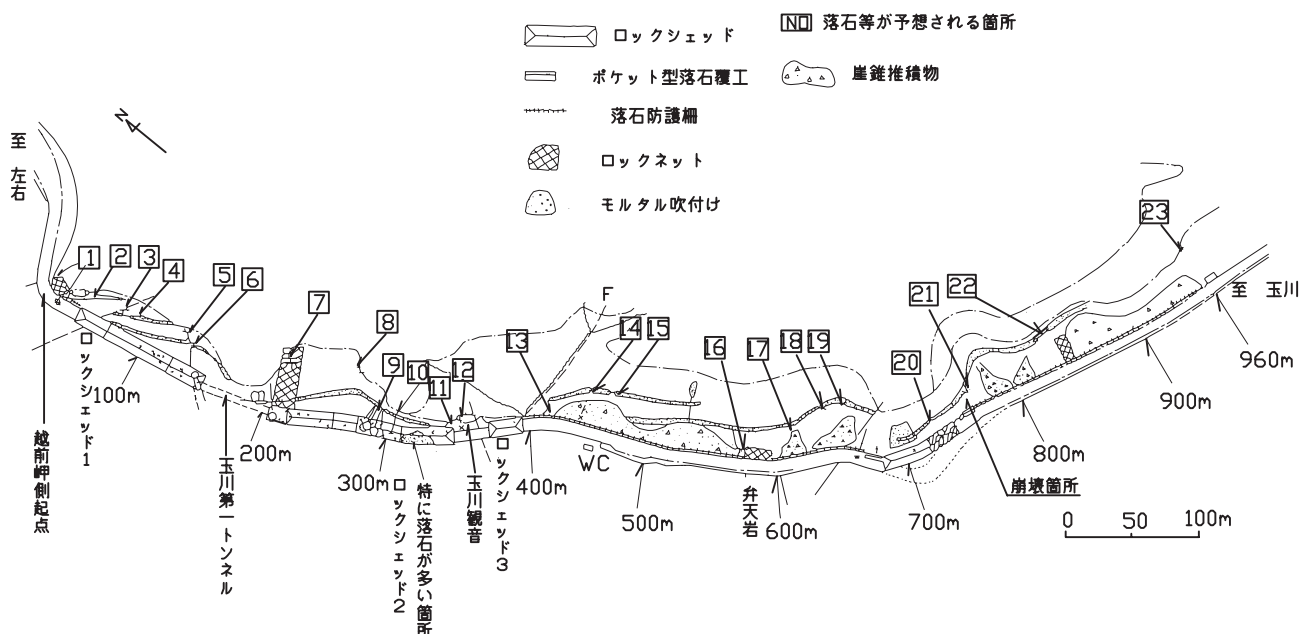
### 1. はじめに

山岳トンネルを発破掘削する際に発生する発破振動により，トンネル上部斜面の浮石・転石または斜面に対する安定性を確実に保つための発破振動の管理基準はない。本事例は，岩盤崩壊により通行不能となった区間を早期に機能回復するために，通行不能区間を仮設橋梁で迂回したうえで，恒久的な道路機能を確保するためにトンネルルート建設を行う必要があった。しかし，機能回復した現道沿いには多くの不安定斜面が存在していたため，トンネル掘削中の現道の安全確保が重要な課題となった。そこで，類似の施工事例及び研究成果をもとに発破振動の管理基準値を設定し，かつ，発破前後で現道への落石等がないかどうかを確認し，トンネル掘削中の全発破に対して設定した管理基準値が発破振動に対して浮石・転

石及び斜面の安定性を保つことを確認した。本報告は，今後の類似事例の参考となると考え，本トンネルの発破



図－1 位置図



図－2 特定急崖斜面（23箇所）と既往斜面对策工の分布図（出展：一般国道305号岩石崩落災害調査報告書）

\* 連絡著者／corresponding author  
〒542-0012 大阪市中央区谷町6-4-3  
6-4-3, Tanimachi chuouu, Osaka City, 542-0012, Japan

振動の管理手法とその結果について取りまとめたものである。

## 2. 現地概要

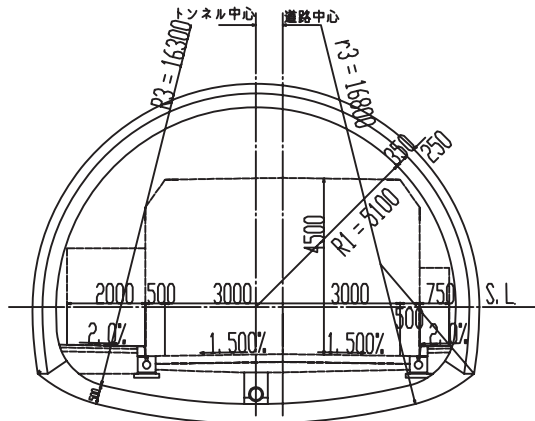
1989年7月16日, 一般国道305号の福井県越前町玉川

地係で大規模な岩石崩壊が発生し, 国道305号を走行中のマイクロバスに乗車していた15名全員が犠牲となった。この岩石崩壊箇所を含む, 斜面崩壊の恐れのある急崖斜面区間約1kmを迂回するとともに道路線形を改良するために, 図-1に位置を示す玉川トンネルが建設された。

表-1 23箇所の状況と対策工一覧表  
(出典: 一般国道 305号岩石崩落災害調査報告書)

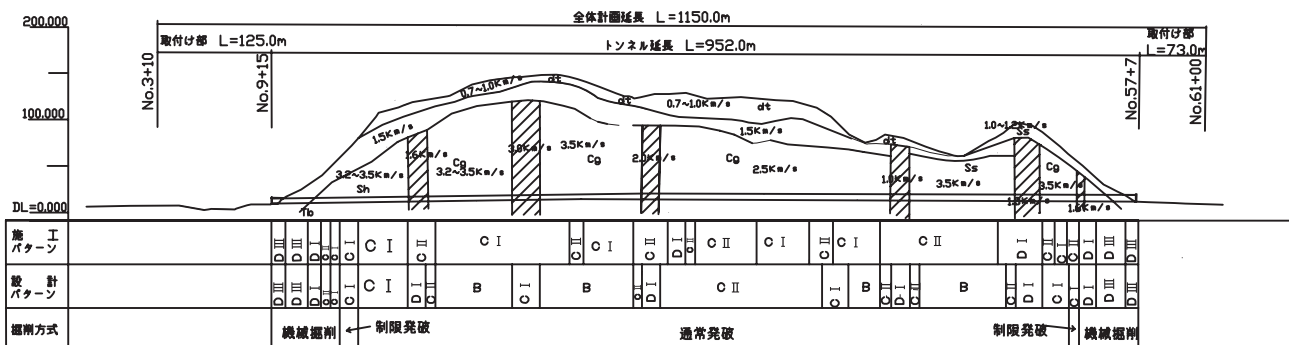
| 落石等<br>が予想<br>される<br>箇所 | 形 状                                    | 規 模                 | 浮石等の発生の可能性                |                               |                               |                               |                               |                               |                               | 道路から落石等の位置 |         |         | 現況の<br>落石防護<br>施設 | 現況の<br>防護<br>施設の<br>耐荷性 | 対策の<br>緊急性 | 備 考 |                                           |
|-------------------------|----------------------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|---------|---------|-------------------|-------------------------|------------|-----|-------------------------------------------|
|                         |                                        |                     | 浮石<br>の<br>発生<br>の<br>可能性 | 崖<br>面<br>の<br>崩壊<br>の<br>可能性 | 崖<br>面<br>の<br>崩壊<br>の<br>可能性 | 崖<br>面<br>の<br>崩壊<br>の<br>可能性 | 崖<br>面<br>の<br>崩壊<br>の<br>可能性 | 崖<br>面<br>の<br>崩壊<br>の<br>可能性 | 崖<br>面<br>の<br>崩壊<br>の<br>可能性 | 判定         | 高さ<br>m | 距離<br>m |                   |                         |            |     | 重量<br>(W)t                                |
|                         |                                        |                     |                           |                               |                               |                               |                               |                               |                               |            |         |         |                   |                         |            |     |                                           |
| 1                       | 凝灰岩上部のオーバーハング<br>している礫岩の崩落             | 幅 5m×高 3m           | ×                         | ○                             | ○                             | ○                             | △                             | ×                             | ○                             | 小          | 27      | 12      | 60                | ロックネット                  | 小          | 中   |                                           |
| 2                       | 凝灰岩上部のオーバーハング<br>している礫岩の崩落             | 幅10m×高 8m           | ×                         | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | ×                             | △                             | 小          | 25      | 10      | 320               | ロックシェッド                 | 小          | 中   | 縦亀裂は未発達                                   |
| 3                       | 凝灰岩上部のオーバーハング<br>している礫岩の崩落             | 幅 5m×高11m           | ×                         | ○                             | △                             | △                             | △                             | ○                             | ×                             | 小          | 33      | 16      | 110               | ロックシェッド                 | 小          | 低   | オーバーハング度は低い                               |
| 4                       | 凝灰岩上部のオーバーハング<br>している礫岩の崩落             | 幅 5m×高16m           | ×                         | ○                             | △                             | △                             | △                             | ○                             | ×                             | 小          | 31      | 15      | 320               | ロックシェッド                 | 小          | 低   | オーバーハング度は低い                               |
| 5                       | 凝灰岩上部のオーバーハング<br>している礫岩の崩落             | 幅 5m×高 5m           | ×                         | ○                             | ○                             | △                             | ○                             | ○                             | △                             | 中          | 46      | 23      | 100               | ロックシェッド                 | 小          | 中   | 礫岩の直下部には凝<br>灰岩層の存在                       |
| 6                       | 凝灰岩上部のオーバーハング<br>している礫岩の崩落             | 幅 7m×高12m           | ×                         | ○                             | ○                             | ×                             | ○                             | ○                             | △                             | 中          | 46      | 22      | 340               | ロックシェッド                 | 小          | 中   |                                           |
| 7                       | オーバーハングしている礫岩<br>の崩落                   | 幅20m×高43m           | △                         | ×                             | ○                             | ○                             | ○                             | ×                             | ○                             | 大          | 81      | 40      | ###               | ロックシェッド                 | 小          | 高   |                                           |
| 8                       | 直立壁状の礫岩の崩落                             | 幅 3m×高13m           | ×                         | ×                             | ×                             | ×                             | △                             | ×                             | ○                             | 小          | 79      | 32      | 160               | ロックシェッド                 | 小          | 低   |                                           |
| 9                       | 凝灰岩層及び上部からの落石                          | Φ1m 50m区間           | ○                         | ○                             | ○                             | ○                             | △                             | ×                             | ×                             | 大          | 34      | -1      | 2                 | ロックシェッド                 | 大          | 低   | 現状施設で対応可能                                 |
| 10                      | 凝灰岩上部の礫岩層の崩落                           | 幅 2m×高12m           | ×                         | △                             | ○                             | ○                             | △                             | ×                             | △                             | 中          | 53      | -6      | 99                | ロックシェッド                 | 小          | 中   | 現状施設で対応可能                                 |
| 11                      | ロックシェッド施工に伴ない<br>オーバーハングしている礫岩<br>層の崩落 | 幅 5m×高 7m           | ×                         | ×                             | ×                             | △                             | ○                             | ○                             | △                             | 大          | 10      | -1      | 140               | ロックシェッド                 | 小          | 高   |                                           |
| 12                      | 凝灰岩層及びその上位の礫岩<br>層からの落石、岩石崩落           | Φ50cm 30m区間         | ○                         | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | △                             | 大          | 54      | -2      | 0.3               | -                       | -          | 高   |                                           |
| 13                      | オーバーハングしている礫岩<br>の崩落                   | 幅 3m×高10m<br>(12m)  | ×                         | ×                             | △                             | ×                             | ○                             | ○                             | ○                             | 大          | 23      | 6       | 120               | 落石防護柵                   | 小          | 高   |                                           |
| 14                      | 凝灰岩層からの落石                              | Φ30cm～1m<br>10m区間   | ○                         | ○                             | ○                             | ○                             | ×                             | ×                             | ×                             | 大          | 62      | 44      | 2                 | 落石防護柵                   | 小          | 高   | 道路との間に崖錐斜面<br>存在                          |
| 15                      | 凝灰岩層からの落石                              | Φ50cm<br>20m区間      | ○                         | ○                             | ○                             | ○                             | ×                             | ×                             | ○                             | 大          | 73      | 45      | 0.3               | 落石防護柵                   | 小          | 高   | 道路との間に崖錐斜面<br>存在                          |
| 16                      | 礫岩層中の礫分が風化し、<br>浮石状となって落石する            | Φ30cm～50cm<br>20m区間 | ○                         | ×                             | △                             | △                             | ×                             | ×                             | ×                             | 中          | 14      | 5       | 0.3               | 落石防護柵                   | 大          | 中   | 道路に近接している                                 |
| 17                      | オーバーハング部分の礫岩の<br>崩落                    | 幅 3m×高12m           | ×                         | ×                             | △                             | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | 大          | 55      | 32      | 140               | 落石防護柵                   | 小          | 低   | 道路との間に崖錐斜面<br>存在。道路を直撃しない<br>方向をとる可能性もある。 |
| 18                      | 凝灰岩層からの落石                              | Φ1m<br>10m区間        | ○                         | ○                             | ×                             | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | 中          | 55      | 33      | 2                 | 落石防護柵                   | 小          | 中   | 道路との間に崖錐斜面<br>存在                          |
| 19                      | 凝灰岩層上部礫岩からの崩落                          | 幅 3m×高 5m           | (○)                       | ○                             | △                             | ×                             | △                             | ○                             | △                             | 中          | 55      | 37      | 60                | 落石防護柵                   | 小          | 中   | 道路との間に崖錐斜面<br>存在                          |
| 20                      | 凝灰岩層上部礫岩の崩落                            | 幅 7m×高12m           | (○)                       | ○                             | ○                             | △                             | ○                             | ○                             | ○                             | 大          | 50      | 25      | 280               | -                       | -          | 高   | 被災斜面の上方に位置<br>する                          |
| 21                      | 礫岩層中の縦亀裂に沿う崩落                          | 幅 5m×高 4m           | ×                         | ×                             | ×                             | △                             | ×                             | ○                             | ○                             | 中          | 9       | 8       | 80                | ポケット型<br>落石覆工           | 小          | 低   | 被災斜面の玉川寄りに<br>位置する                        |
| 22                      | 凝灰岩層からの落石                              | Φ50cm～2m<br>20m区間   | ○                         | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | ×                             | ×                             | 大          | 28      | 20      | 16                | 落石防護柵                   | 小          | 高   | 道路に近接している                                 |
| 23                      | 礫岩層の落石                                 | 幅 2m×高 1m           | ○                         | ×                             | △                             | ×                             | △                             | ×                             | ×                             | 小          | 36      | 27      | 20                | -                       | 小          | 低   | 道路との間に崖錐斜面<br>存在。道路を直撃しない<br>方向をとると予想される。 |

(一部はオーバーハングを示す)



図一 3 標準断面図

図-2に示すように、上記の急崖斜面区間約1kmには不安定な岩盤斜面が23箇所存在し、最大崩壊重量は86KNになることが事前調査で判明した。この23箇所の不安定斜面を「特定急崖斜面」と称する。特定急崖斜面について、既設の斜面対策工が不十分な箇所には、トンネル工事開始までにモルタル吹付けなどの応急対策工を実施した。表-1に特定急崖斜面の想定崩壊規模(目視で推定)と応急対策工を示す。玉川トンネル施工中にも、上記の急崖斜面区間の1km区間の通行を行う必要があり、トンネル発破振動により特定急崖斜面とその他の斜面の安定性が損なわれることによる国道通行の安全性が懸念された。このため、福井県は「一般国道305号玉川トンネル発破振動検討委員会」<sup>1)</sup>を設置して、発破振動に対す



図一 4 地質縦断面図

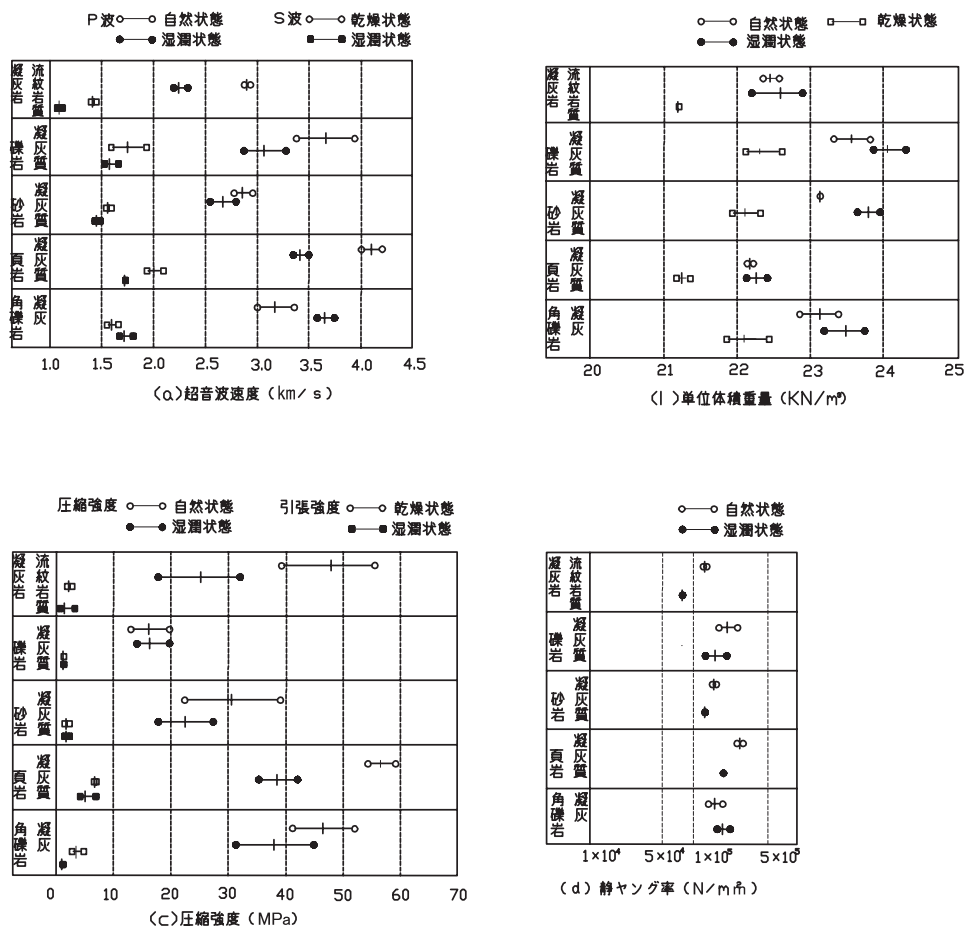


図-5 岩種ごとの室内試験結果

る規制値を設定し、発破振動と特定急崖斜面を含む不安定斜面の挙動に関する綿密な振動計測管理を行ってトンネル掘削を行うこととした。

### 3. 工事概要

#### 3.1 新設トンネル概要

トンネル延長: 952m

道路区分: 第3種第2級 (2車線)

設計速度: 40km/h

標準断面図を図-3に示す。

#### 3.2 地形・地質概要

玉川トンネルが位置する越前海岸沿いは日本海の荒波をともに受け、海蝕による岩壁、奇岩、岩礁が連続している。海岸直近には高さ100m程度の急崖斜面が続き、海岸と急崖斜面の僅かな平地沿いを一般国道305号が通過している。トンネル地質縦断面図を図-4に示す。

地質は、新第三紀中新世の火山碎屑岩（凝灰角礫岩、凝灰質礫岩、凝灰岩が主）から構成されている。各地質は岩相の変化が激しく、地層の連続性も不良な箇所がある。地層の走向・傾斜は斜面に対してN45°E10°~25°Nの受け盤構造である。岩種ごとの室内試験結果を図-5に示す。岩石の一軸圧縮強度は高いもので60MPaである。

広い範囲で分布する凝灰岩は安山岩の礫（礫径は5cmから1m程度まで不均等である）を含む塊状で、全般にやや緑色を帯びている。このうち礫分が密集している部分を凝灰質礫岩としている。凝灰質礫岩の基質は凝灰質砂岩であり、固結度は比較的良好であるが、基質の分布の連続性は不良である。凝灰質砂岩は粗粒~細礫質で淘汰が良く、葉理が発達しており、固結度は良い。

凝灰岩は、凝灰角礫岩・凝灰質砂岩の中に厚さ1~5m程度で2~3層狭在しており、比較的良好な連続性で分布するため鍵層となっている。この層は不規則な亀裂が発達して角礫状に割れる傾向があり、他の地層よりも差別浸食を受けやすく、落石の発生源となりやすい。この

他に流紋岩質凝灰岩、凝灰質頁岩が部分的にある。

#### 3.3 掘削方式

掘削方式は、①トンネル掘削中に一軸圧縮強度が60MPaを超える凝灰質砂岩に遭遇する可能性が高いこと、②災害復旧事業として施工しているため工期に制約があったことから、多様な地質に対応でき、確実に掘削工

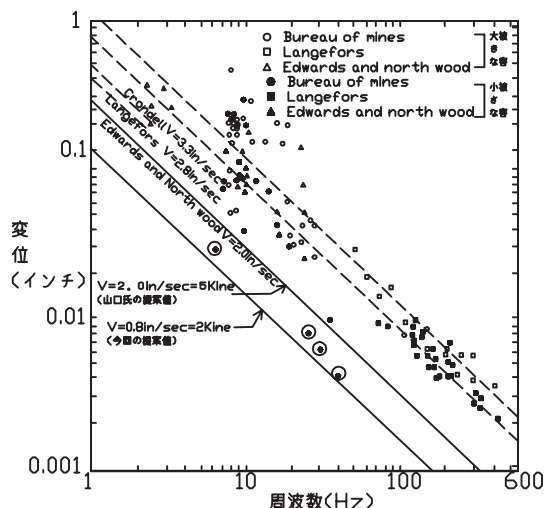


図-6 振動と被害の関係 (山口他の研究)<sup>1)</sup>

表-3 発破振動速度の予測結果

| 特定急崖斜面 | 切羽からの最短距離(m) | 推定振動速度(Kine) | 地山等級            |
|--------|--------------|--------------|-----------------|
| 1      | 122          | 0.29         | B               |
| 2      | 126          | 0.11         | C <sub>II</sub> |
| 3      | 136          | 0.23         | B               |
| 4      | 152          | 0.19         | B               |
| 5      | 161          | 0.17         | B               |
| 6      | 165          | 0.16         | B               |
| 7      | 154          | 0.07         | C <sub>II</sub> |
| 8      | 145          | 0.08         | C <sub>II</sub> |
| 9      | 154          | 0.07         | C <sub>II</sub> |
| 10     | 158          | 0.07         | C <sub>II</sub> |
| 11     | 155          | 0.07         | C <sub>II</sub> |
| 12     | 135          | 0.10         | C <sub>II</sub> |
| 13     | 136          | 0.09         | C <sub>II</sub> |
| 14     | 112          | 0.14         | C <sub>II</sub> |
| 15     | 110          | 0.14         | C <sub>II</sub> |
| 16     | 152          | 0.19         | C <sub>II</sub> |
| 17     | 138          | 0.09         | C <sub>II</sub> |
| 18     | 127          | 0.27         | B               |
| 19     | 123          | 0.28         | B               |
| 20     | 116          | 0.32         | B               |
| 21     | 114          | 0.13         | C <sub>II</sub> |
| 22     | 61           | 1.15         | B               |
| 23     | 48           | 0.56         | D I             |

表-2 振動被害に関する過去の類似事例と研究成果

| 施工事例または研究成果名称                  | 規制値または限界値(Kine) | 想定する対象物                       |
|--------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 施工事例<br>武田尾トンネル                | 3               | (兵庫県 JRトンネル) 斜面と斜面上の浮石を対象とした。 |
| 馬止トンネル                         | 2.5             | (北海道 道路トンネル) 斜面と斜面上の浮石を対象とした。 |
| 研究成果など<br>Oriard <sup>2)</sup> | 5               | ベンチ発破による斜面上の浮石を対象とした。         |
| 山口他 <sup>1)</sup>              | 5               | コンクリート構造物の発破による被害状況           |
| その他 <sup>3)</sup>              | 5~12            | 近接構造物への影響。                    |

程を確保できる発破掘削を基本とした。本工事は、その1（起点側からの掘削工事）、その2（終点側からの掘削工事）の2つの工区に分けて施工した。

4. 発破振動管理の計画

4.1 振動速度規制値の設定

発破振動管理の尺度として振動速度と振動レベルがある。前者は、古くから用いられてきた方法であり、振動速度と構造物などに生じる損傷の程度に高い相関<sup>2)</sup>があることから有用とされている。後者は公害振動に対する人体感覚の補正を考慮して定められている。今回の管理対象は発破振動による岩盤や岩塊の崩落であるから、振動速度で管理を行った。

斜面の安定性に影響する発破振動速度について明確な指標は与えられていないので、表-2に示す過去の類似事例と従来の研究成果に基づいて規制値を決定する。このうち、図-6に示す山口他<sup>2)</sup>はコンクリート構造物に被害を与える発破振動速度の限界値として、軽微な被害を除いた場合について5kine（cm/s）を提案しているが、軽微な被害を含めると2kineとなる。本工事では、

表-2中で最も厳しい数値である2kineを、対象区間の特定急崖斜面以外の一般斜面における振動速度規制値とした。

特定急崖斜面について、後述の方法で発破振動速度を予測した結果を表-3に示すが、予測の最大値が1.2kineであることと、特定急崖斜面はそれ以外の一般斜面よりも安定性が低いことから、特定急崖斜面における振動速度の規制値を一般斜面の半分の1kineとした。

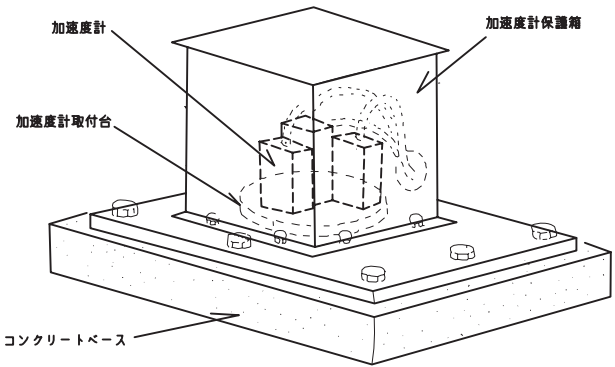


図-8 加速度計の設置方法

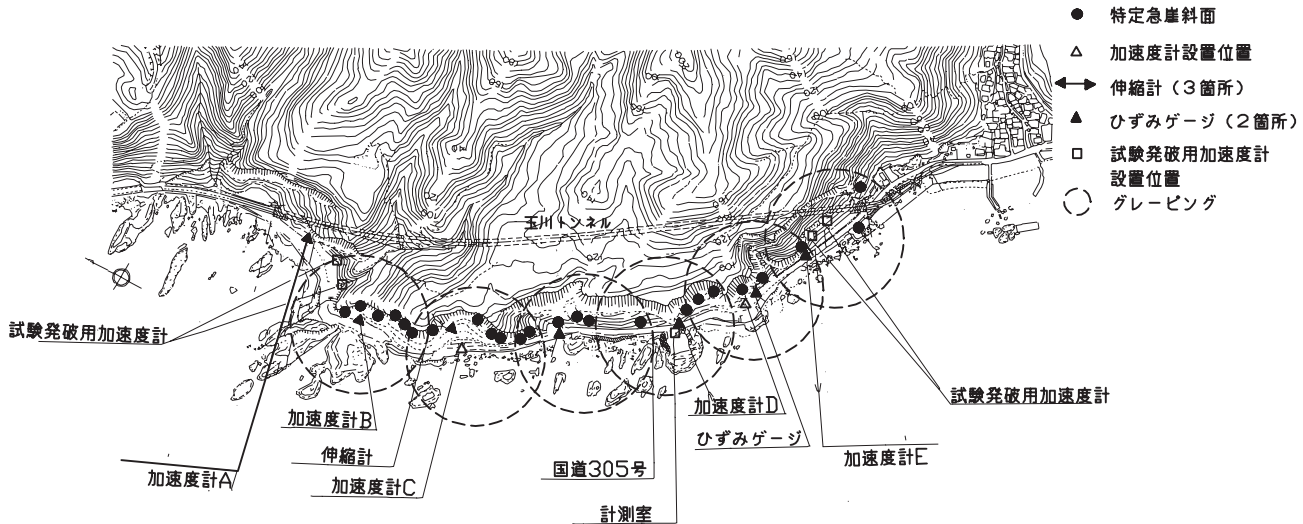


図-7 加速度計の配置図

表-4 計測器とシステムの仕様

| 計 測 器 名     | 仕 様                                                                      |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 加 速 度 計     | 100gal/1V、最大出力、±10V、最大伝送距離 1km<br>応答周波数 0.1Hz ～800Hz(-3dB)、耐水性 10kgf/am2 |
| 伸 縮 計       | 測 定 範 囲 50mm<br>許 容 過 負 荷 約110%<br>非 直 進 性 1%Ro以下                        |
| ひ ず み ゲ ー ジ | 容 量 ±1000×106 ひずみ<br>温度測定範囲 約110%<br>非 直 進 性 2%Ro以下                      |
| 項 目         | 仕 様                                                                      |
| サンプリング速度    | 1ms/15CH ただし、設計変更すれば40KHzまで可                                             |
| 加速度データ精度    | 10gal 以下をカット                                                             |
| 速度変換精度      | 0.1kine 以下をカット                                                           |
| 周波数解析機能     | 500Hz                                                                    |

## 4.2 その他の計測

特定急崖斜面NO20（1989年7月16日の岩石崩落被災地の直上）でオーバーハングした岩塊をワイヤーロープで固定して、玉川トンネル完成までの応急対策とした。このワイヤーロープを岩盤に固定するターンバックルにひずみゲージを取り付けて、岩塊の挙動を監視した。また、想定される崩壊規模が最大となる特定急崖斜面NO7で、伸縮計を設置して、この斜面全体の挙動を監視した。

これらのひずみゲージや伸縮計については定量的な規制値を設定せず、計測値の変化を監視することとした。

## 4.3 計測管理方法

発破振動速度を予測した結果、上記の規制値を超える起点側坑口から54m区間、終点側坑口から75m区間を機械掘削とした。

発破振動を計測するために、図-7に示す5箇所の位置に加速度計を配置した。計測器の選定にあたっては、発生する振動の周波数領域、大きさが不明であるので確実に振動波を計測できる加速度計を採用した。加速度計は図-8に示すように、国道沿いの斜面の岩盤上にコンクリートで平坦面をつくり、東西方向（トンネル横断方向）、南北方向（トンネル縦断方向）、鉛直方向の振動計測のために各箇所3台の加速度計を設置した。計測器とシステムの仕様を表-4に示す。

発破ごとに計測される振動加速度を振動速度に変換し、最大振動速度が管理値を超えないこと、ひずみゲージ（特定急崖斜面NO20）や伸縮計（NO7）が異常な数値を示さないかを確認しながら発破掘削を行った。また、図-9に示す管理体制に従って、発破の15分前に国道を通行止めにし、現道が無人であることを確認してから発破を行い、発破後の15分間で国道上に落石がないことを確認した後で交通開放した。

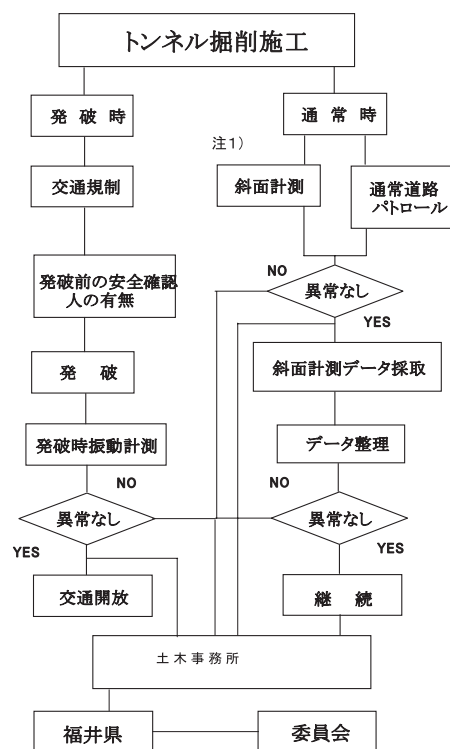
## 5. 発破振動管理の結果

### 5.1 試験発破

対象地区の地形・地質特性を踏まえて発破振動速度の

予測精度を高めるため、トンネル起点側と終点側で試験発破を実施した。試験発破による振動計測データを増やすため、図-7に示す起点側、終点側に2箇所ずつ加速度計を追加して配置した。

試験発破の設計は、地山等級CⅠに対応し、かつ、振動速度規制値を超えないようにするために、初回は掘進長1m、心抜きはWカット（図-11参照）とし、MS雷管を使用して発破段数を18段とした。発破ごとに、後述する式(1)におけるK値を算出して次回の発破の振動速度を予測し、規制値を超えないことを確認しながら、地山等級に応じた掘進長、心抜きをVカット（図-12参照）、雷管もDS雷管に移行し、段数も減らして通常発破に移



注1) 図7に示す特定急崖斜面No.7に設置した伸縮計、および図8に示す特定急崖斜面No.20に設置したひずみゲージの計測を表す。

図-9 管理体制

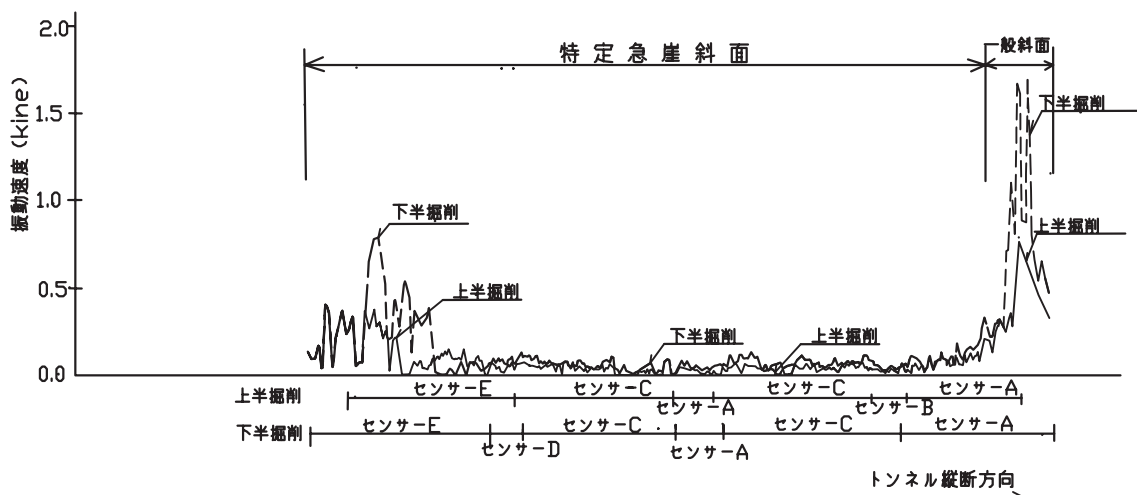


図-10 全発破の最大振動速度

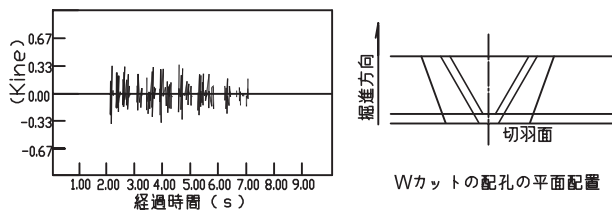


図-11 Wカットにした場合の振動波形

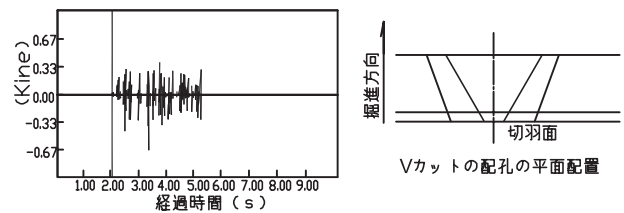


図-12 Vカットにした場合の振動波形

行した。

## 5.2 振動計測結果

トンネル掘削中の全発破の最大振動速度を整理して図-10に示す。上半掘削では0.5kine以下が大半である。下半掘削ではトンネル深部で0.5kine以下であるが、坑口部では上半掘削よりも大きな振動速度となっている。これは、①下半掘削は上半掘削に比べて掘削断面積が小さく、配孔数が少ないが、掘進長は上半掘削の2倍となるため1孔あたりの薬量が多くなること、②坑口部は土被りが薄く距離減衰効果が小さいことから振動速度が上半掘削より大きくなったと考えられる。

表-5に試験発破時の最大振動速度、最大振動加速度とそれが発生した段数と使用薬量を示す。表-5の使用薬量は、計測した振動速度が最大となった段数の装薬量であり、南北方向はトンネル縦断方向にほぼ一致している（これは表-7,8でも同じである）。心抜きをWカットにした場合、図-11に示すように振動波形が平準化するため、心抜き（第1段目の発破）では最大振動速度は発

生しない。心抜きをVカットにすると、図-12に示すように心抜きで卓越した振動速度を示す。振動速度を低減する方法の1つとして、心抜きをWカットにすることが効果的である。

## 5.3 振動速度予測式におけるK値の設定

規制値を超えない発破設計を行うために、振動速度の予測式（式-1）を設定して発破振動管理を行った。

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

ここで、V：予測振動速度（kine）、K：定数（400～600）、W：段当たり薬量（kg）、D：爆心からの距離（m）、m、n：定数（ $m=2/3 \sim 3/4$ 、 $n=1.5 \sim 2.0$ ）である。本工事では、薬量が数kg～数十kg、距離も数十m～100mで変化の範囲が小さいため、試験発破で得られた少ない計測結果から定数K、m、nの全部を逆算すると、m、nが一般的な値からかけ離れる場合がある。ここでは $m=3/4$ 、 $n=2$ <sup>5)</sup>に固定して、K値のみにより地形・地質や発破の特性を表現することとした。

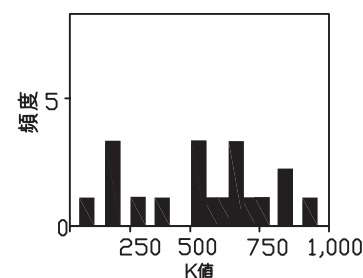
振動速度の計測結果からK値を逆算してヒストグラフにした結果を図-13に示す。K値のバラツキは大きく、単純平均したK値で振動速度を予測すると、かなりの確率で規制値を超える可能性がある。また、K値のバラツキをほぼ包括する平均値 + 3 × 標準偏差（99.5%）を採

表-5 試験発破時の最大振動速度、加速度

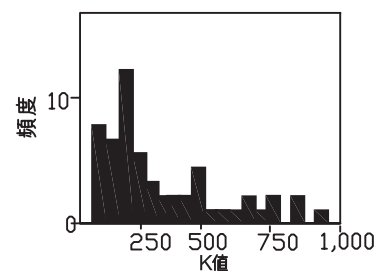
|      |           | 南北方向        | 東西方向        | 上下方向        |
|------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 第1回  | 速度 (Kine) | 0.45 (第17段) | 0.65 (第17段) | 0.42 (第6段)  |
|      | 加速度 (gal) | 410 (第20段)  | 539 (第20段)  | 180 (第19段)  |
|      | 薬量 (kg)   | 2.4 注2      | 2.4         | 3.2         |
| 第2回  | 速度 (Kine) | 注1          | 0.80 (第8段)  | 0.49 (第10段) |
|      | 加速度 (gal) |             | 127 (第14段)  | 121 (第7段)   |
|      | 薬量 (kg)   |             | 2.5         | 2.2         |
| 第3回  | 速度 (Kine) | 0.16 (第12段) | 0.42 (第6段)  | 0.30 (第2段)  |
|      | 加速度 (gal) | 147 (第18段)  | 177 (第13段)  | 158 (第5段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 2.4         | 3.2         | 2.4         |
| 第4回  | 速度 (Kine) | 0.16 (第2段)  | 注1          | 0.20 (第14段) |
|      | 加速度 (gal) | 106 (第6段)   |             | 88 (第9段)    |
|      | 薬量 (kg)   | 2.4         |             | 3.4         |
| 第5回  | 速度 (Kine) | 0.23 (第11段) | 0.22 (第11段) | 0.15 (第7段)  |
|      | 加速度 (gal) | 98 (第8段)    | 114 (第8段)   | 134 (第8段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 2.2         | 2.1         | 2.8         |
| 第6回  | 速度 (Kine) | 0.17 (第6段)  | 注1          | 注1          |
|      | 加速度 (gal) | 95 (第6段)    |             |             |
|      | 薬量 (kg)   | 3.2         |             |             |
| 第7回  | 速度 (Kine) | 0.14 (第10段) | 0.31 (第10段) | 0.12 (第7段)  |
|      | 加速度 (gal) | 82 (第2段)    | 100 (第1段)   | 100 (第6段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 2.7         | 2.7         | 1.8         |
| 第8回  | 速度 (Kine) | 0.14 (第8段)  | 0.12 (第6段)  | 0.17 (第6段)  |
|      | 加速度 (gal) | 86 (第15段)   | 64 (第6段)    | 126 (第14段)  |
|      | 薬量 (kg)   | 2.5         | 3.2         | 3.2         |
| 第9回  | 速度 (Kine) | 0.13 (第7段)  | 0.16 (第11段) | 0.13 (第6段)  |
|      | 加速度 (gal) | 90 (第4段)    | 81 (第10段)   | 94 (第6段)    |
|      | 薬量 (kg)   | 2.8         | 2.2         | 3.2         |
| 第10回 | 速度 (Kine) | 0.38 (第1段)  | 0.47 (第1段)  | 0.18 (第1段)  |
|      | 加速度 (gal) | 178 (第1段)   | 213 (第1段)   | 133 (第1段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 3.0         | 3.0         | 3.0         |
| 第11回 | 速度 (Kine) | 0.32 (第6段)  | 0.38 (第1段)  | 0.21 (第8段)  |
|      | 加速度 (gal) | 152 (第1段)   | 151 (第1段)   | 118 (第1段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 5.9         | 3.0         | 4.0         |

注1) 低周波波形が観測されているため、解析には用いていない。

注2) 最大振動速度値を発生させた段数の総薬量



(a) 第1段のみ心抜き発破と考えた場合 (Vカット)



(b) 第1段から第3段まで心抜き発破と考えた場合 (Wカット)

図-13 逆算したK値の分布

用すると、振動速度の予測値が大きくなりすぎて非効率な発破となる恐れがある。そこで、次の方法を採用した。「規制値」は振動速度が超えてはならない値とする。規制値を超えないための管理の目標値を「管理値」として設定し、安全率を2として規制値の50%とする。K値は図-13の平均値を採用し、求める予測振動速度が管理値を超えないように発破計画を立てることで、規制値を超えない発破振動管理を行う。採用したK値を表-6に示す。

#### 5.4 計測管理結果

前述のように、全部の発破の直後に実施した安全パトロールで、国道上に落石は一度も発見されなかった。

表-6 採用したK値

| 工区    | 発破の種別 | 管理値に対するK値<br>(平均値) |     | 規制値に対するK値<br>(平均値+3σ) |      |
|-------|-------|--------------------|-----|-----------------------|------|
| その1工区 | 心抜き   | Vカット               | 340 | Vカット                  | 790  |
|       |       | Wカット               | 200 | Wカット                  | 660  |
|       | 払い    | Vカット               | 120 | Vカット                  | 360  |
|       |       | Wカット               | 120 | Wカット                  | 350  |
| その2工区 | 心抜き   | Vカット               | 570 | Vカット                  | 1410 |
|       |       | Wカット               | 340 | Wカット                  | 1120 |
|       | 払い    | Vカット               | 130 | Vカット                  | 390  |
|       |       | Wカット               | 110 | Wカット                  | 320  |

表-7 最大振動速度、加速度（その1工区）

|      |           | 南北方向        | 東西方向        | 上下方向        |
|------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 第1回  | 速度 (Kine) | 0.45 (第17段) | 0.65 (第17段) | 0.42 (第6段)  |
|      | 加速度 (gal) | 410 (第20段)  | 539 (第20段)  | 180 (第19段)  |
|      | 薬量 (kg)   | 2.4 注2      | 2.4         | 3.2         |
| 第2回  | 速度 (Kine) | 注1          | 0.80 (第8段)  | 0.49 (第10段) |
|      | 加速度 (gal) |             | 127 (第14段)  | 121 (第7段)   |
|      | 薬量 (kg)   |             | 2.5         | 2.2         |
| 第3回  | 速度 (Kine) | 0.16 (第12段) | 0.42 (第6段)  | 0.30 (第2段)  |
|      | 加速度 (gal) | 147 (第18段)  | 177 (第13段)  | 158 (第5段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 2.4         | 3.2         | 2.4         |
| 第4回  | 速度 (Kine) | 0.16 (第2段)  | 注1          | 0.20 (第14段) |
|      | 加速度 (gal) | 106 (第6段)   |             | 88 (第9段)    |
|      | 薬量 (kg)   | 2.4         |             | 3.4         |
| 第5回  | 速度 (Kine) | 0.23 (第11段) | 0.22 (第11段) | 0.15 (第7段)  |
|      | 加速度 (gal) | 98 (第8段)    | 114 (第8段)   | 134 (第8段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 2.2         | 2.1         | 2.8         |
| 第6回  | 速度 (Kine) | 0.17 (第6段)  | 注1          | 注1          |
|      | 加速度 (gal) | 95 (第6段)    |             |             |
|      | 薬量 (kg)   | 3.2         |             |             |
| 第7回  | 速度 (Kine) | 0.14 (第10段) | 0.31 (第10段) | 0.12 (第7段)  |
|      | 加速度 (gal) | 82 (第2段)    | 100 (第1段)   | 100 (第6段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 2.7         | 2.7         | 1.8         |
| 第8回  | 速度 (Kine) | 0.14 (第8段)  | 0.12 (第6段)  | 0.17 (第6段)  |
|      | 加速度 (gal) | 86 (第15段)   | 64 (第6段)    | 126 (第14段)  |
|      | 薬量 (kg)   | 2.5         | 3.2         | 3.2         |
| 第9回  | 速度 (Kine) | 0.13 (第7段)  | 0.16 (第11段) | 0.13 (第6段)  |
|      | 加速度 (gal) | 90 (第4段)    | 81 (第10段)   | 94 (第6段)    |
|      | 薬量 (kg)   | 2.8         | 2.2         | 3.2         |
| 第10回 | 速度 (Kine) | 0.38 (第1段)  | 0.47 (第1段)  | 0.18 (第1段)  |
|      | 加速度 (gal) | 178 (第1段)   | 213 (第1段)   | 133 (第1段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 3.0         | 3.0         | 3.0         |
| 第11回 | 速度 (Kine) | 0.32 (第6段)  | 0.38 (第1段)  | 0.21 (第8段)  |
|      | 加速度 (gal) | 152 (第1段)   | 151 (第1段)   | 118 (第1段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 5.9         | 3.0         | 4.0         |

注1) 低周波波形が観測されているため、解析には用いていない。

注2) 最大振動速度値を発生させた段数の総薬量

ひずみゲージで計測管理を行った特定急崖斜面NO20は最大で0.28kineの発破振動を受けたと推定されるが、ひずみの変動は200μ～300μでほとんど変動はなかった。計測全期間中のひずみは50μ～100μ増加しているが、ワイヤーロープが外気温で伸縮した結果と推定される。

伸縮計で計測管理を行った特定急崖斜面NO7は最大で0.2kineの発破振動を受けたと推定されるが、計測結果は計測期間中0mm～3mmでほとんど変動していない。

#### 6. 発破振動管理の評価

今後の類似の発破振動管理を行う際の参考として、今回の発破振動管理の全体的な評価を試みる。

##### 6.1 振動管理の方向

振動速度の計測管理を行った結果を東西方向（トンネル横断方向）、南北方向（トンネル縦断方向）、鉛直方向でまとめて表-7,8に示す。土被りの浅い区間で実施した試験発破では、最大振動速度を示す方向は必ずしも一定でないが、土被りが大きくなるにつれて最大振動速度は上下方向が卓越してくる。この結果から、発破振動管理のための振動計の計測方向は、土被りが浅い場合は3方向で行う必要があるが、土被りが大きい場合は上下方向のみの計測に簡略化することも許容されと考えられる。

##### 6.2 規制値と管理値による管理

地盤特性により発破振動速度が大きく変動することから、前述のように規制値を確実に守るための管理値（規制値の1/2）を設定し、管理値を目標値として各切羽の発破設計を行なった。本工事は2つの工区に分けて施工

表-8 最大振動速度、加速度（その2工区）

|      |           | 南北方向        | 東西方向        | 上下方向        |
|------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 第1回  | 速度 (Kin)  | 0.33 (第2段)  | 0.23 (第2段)  | 0.56 (第2段)  |
|      | 加速度 (gal) | 340 (第2段)   | 220 (第2段)   | 432 (第2段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 0.8         | 0.8         | 0.8         |
| 第2回  | 速度 (Kin)  | 0.36 (第10段) | 0.33 (第7段)  | 0.57 (第7段)  |
|      | 加速度 (gal) | 450 (第13段)  | 318 (第7段)   | 517 (第7段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 3.3         | 3.0         | 3.0         |
| 第3回  | 速度 (Kin)  | 0.40 (第10段) | 0.29 (第10段) | 0.58 (第11段) |
|      | 加速度 (gal) | 497 (第10段)  | 245 (第10段)  | 532 (第11段)  |
|      | 薬量 (kg)   | 3.3         | 3.3         | 3.0         |
| 第4回  | 速度 (Kin)  | 0.39 (第4段)  | 0.35 (第9段)  | 0.59 (第9段)  |
|      | 加速度 (gal) | 502 (第4段)   | 274 (第10段)  | 540 (第4段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 2.1         | 2.7         | 2.7         |
| 第5回  | 速度 (Kin)  | 0.57 (第6段)  | 0.43 (第6段)  | 0.63 (第8段)  |
|      | 加速度 (gal) | 535 (第6段)   | 324 (第7段)   | 547 (第2段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 3.6         | 3.6         | 4.5         |
| 第6回  | 速度 (Kin)  | 0.55 (第2段)  | 0.42 (第4段)  | 0.83 (第4段)  |
|      | 加速度 (gal) | 551 (第2段)   | 356 (第4段)   | 723 (第4段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 2.4         | 5.2         | 5.2         |
| 第7回  | 速度 (Kin)  | 1.46 (第1段)  | 0.98 (第1段)  | 0.93 (第1段)  |
|      | 加速度 (gal) | 961 (第1段)   | 542 (第1段)   | 899 (第1段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 3.0         | 3.0         | 3.0         |
| 第8回  | 速度 (Kin)  | 1.12 (第1段)  | 0.52 (第1段)  | 0.58 (第8段)  |
|      | 加速度 (gal) | 727 (第1段)   | 379 (第5段)   | 641 (第5段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 3.0         | 3.0         | 4.0         |
| 第9回  | 速度 (Kin)  | 0.79 (第4段)  | 0.50 (第4段)  | 0.46 (第10段) |
|      | 加速度 (gal) | 684 (第12段)  | 393 (第4段)   | 539 (第13段)  |
|      | 薬量 (kg)   | 6.3         | 6.3         | 4.2         |
| 第10回 | 速度 (Kin)  | 0.69 (第2段)  | 0.60 (第9段)  | 0.52 (第10段) |
|      | 加速度 (gal) | 572 (第2段)   | 372 (第3段)   | 569 (第9段)   |
|      | 薬量 (kg)   | 3.6         | 4.2         | 4.2         |
| 第11回 | 速度 (Kin)  | 0.73 (第6段)  | 0.52 (第2段)  | 0.48 (第1段)  |
|      | 加速度 (gal) | 652 (第13段)  | 387 (第2段)   | 317 (第13段)  |
|      | 薬量 (kg)   | 5.9         | 3.6         | 0.6         |

を行ったが、ここでは2工区のデータのみ取り上げて、このような発破振動管理を検証する。

2工区の振動管理におけるK値（心抜き：570）、払い（心抜き以外の発破）：130）を用いた予測値と計測値の比較検討を行う。図-7に示す計測点Aと計測点Cにおける上下方向振動速度の予測値と計測値の比較を図-14に示す。図-7からわかるように計測点Aは切羽との距離が小さく、大きな注意払われた地点である。計測点Cは切羽との距離が大きく、大きな注意を必要としなかった区間である。

図-14(a)に示す計測点Aでは、初期には計測値が予測値よりも大きくなり、切羽との距離が190m付近で両者が同程度の値を取っている。また、計測値は管理値以下であったことから振動管理は全体的に成功したと言える。図-14(b)に示す計測点Cでは、計測値が予測値に対して大きく変動しているが、K値の平均値を採用したことによる。この結果は、発破振動が大きくばらつくことを考えて、規制値と管理値を設けて管理した正しさを示している。

計測点Aにおける予測値と計測値を心抜き発破と払い発破に分けて示した結果を図-15に示す。心抜きでは、計測値が予測値を概ね下回っている。払いでは92.5m～120mまで計測値が予測値より大きい、その後は逆になっている。この結果は、初期には心抜きの発破振動をできるだけ抑え、以降は徐々に心抜きを大きくして発破の効率化を図ったことによる。

## 7. 結論

本報告で述べた発破振動管理を行なった結果、落石や斜面崩壊はなく、全発破で規制値を超える振動速度が計測されることなく無事にトンネルを貫通できた。本トンネルの発破振動管理を通じて得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 落石、斜面崩壊に対する発破振動管理では振動速度での管理が妥当である。落石、斜面に対する発破振動速度の規制値を2kineと設定したこと、特に不安定な斜面について応急対策を実施した上で、規制値1kineとしたことは概ね適切であった。
- 2) 発破振動速度はバラツキが大きいため、管理値を規制値の1/2とするなど、そのバラツキを考慮した発破設計を行う必要がある。また、予測においては計測結果から逆算した予測振動速度式のK値の平均値を採用する等が考えられる。
- 3) 振動管理のための振動計の計測方向は、土被りが浅い場合は3方向で行う必要があるが、土被りが大きい場合には上下方向のみに簡素化することも許容されると考えられる。
- 4) 心抜き発破をWカットにすると、各段の振幅が平準化されて振動速度を低減できる。
- 5) 上述の発破振動管理に加えて、発破前に道路を通行

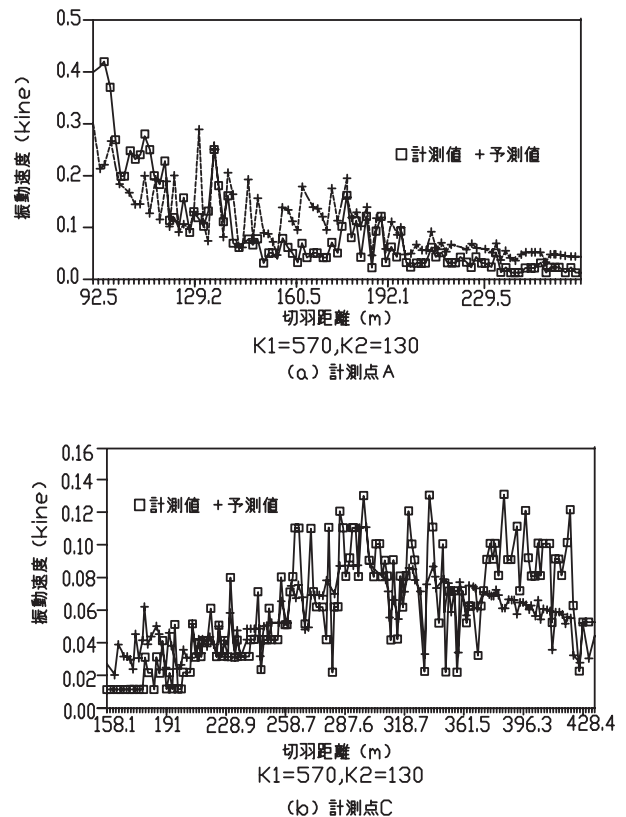


図-14 上下方向の振動速度の予測値と計測値の比較

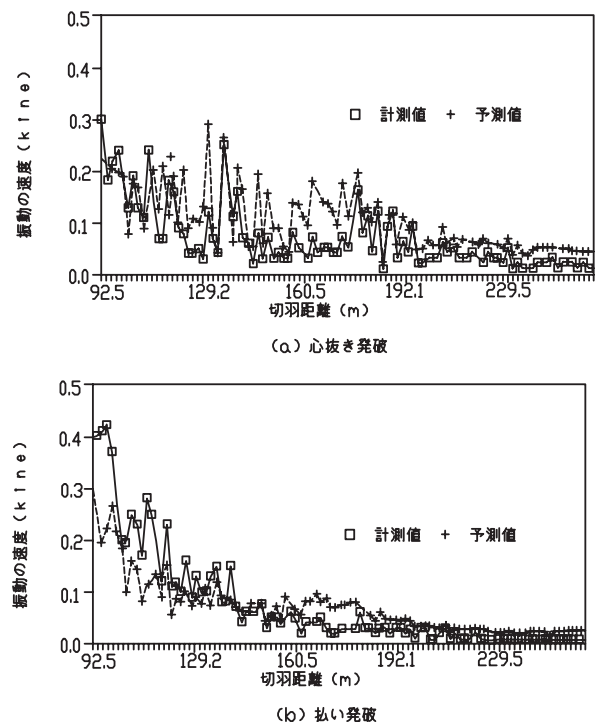


図-15 振動速度値の予測値と計測値の比較（計測点A）

止めにし、現道が無人であることを確認した後で発破を行い、発破後に道路上に落石等がないことを確認した後で通行を開放する交通管理が重要である。

- 6) 近年では、IC雷管を使用して発破段数をより一層増やすことや、切羽周辺に孔を掘って自由面を増や

して発破振動の軽減を図るなどの技術が開発されている。本工事でも、発破振動を軽減するために、心抜き発破にMS雷管を使用し、発破段数を増やして段当たりの薬量を減らす工夫を行った。

## 8. あとがき

トンネル周辺に浮石・転石が多い不安定斜面がある場合に、斜面の安定性を保持するための明確な発破振動基準は示されていない。本報告は、種々のタイプの崩壊の可能性のある多数の岩盤斜面の近傍を通過するトンネルについて発破振動の規制値を設定し、全発破に対して振

動計測管理を行った事例を報告した。

## 参考文献

- 1) 福井県土木部 (1992): 一般国道305号玉川トンネル発破振動検討委員会報告書
- 2) 山口梅太郎 (1979): 爆破による振動とその測定 石灰岩 NO 176号PP12-20
- 3) 下村弥太郎 (1979): 露天掘における斜面安定 石灰岩 NO 178号pp28-38)
- 4), 5) 日本火薬工業会 (2002) あんな発破 こんな発破 発破事例集 PP 3-PP 6  
(原稿受付2010年4月13日, 原稿受理2011年5月14日)