

# 岩盤用動歪計を用いた発破時の岩盤のゆるみ調査

小 出 忠 男      後 藤 洋 三

## Investigation by Dynamic Rock Strain Gage of Looseness due to Blasting

Tadao Koide      Yozo Goto

### Abstract

Blasting is often used in excavation of caverns in rock, but loosening of rock due to blasting is not yet clearly understood. Therefore, the authors endeavored to establish a method of directly measuring this loosening and to quantitatively analyze the mechanism of loosening. In the present investigation, dynamic rock strain gages were embedded in actual bedrock as a method of making direct measurements. As a result, it was found that observation loosening is possible with dynamic rock strain gages, and amplitude of looseness is increased in comparison with amplitude of velocity as the blasting point is approached.

### 概 要

岩盤内空洞の掘削に、発破工法が多く用いられるが、この発破によるゆるみについて未知な点が多い。そこで、発破によるゆるみを直接測定する方法を確立し、ゆるみのメカニズムを定量的に解析することとした。今回の調査では、直接測定する方法として、岩盤用動歪計を実際の岩盤に埋設し、発破振動を測定することができたので、その結果を報告するものである。測定の結果、岩盤用動歪計でゆるみ観測が可能であること、発破点近くなると振動速度振幅に比べ歪振幅が大きいこと、などが分かった。

### 1. まえがき

岩盤内空洞の掘削には、発破が多く用いられているが、その発破によって空洞周辺の岩盤がゆるむことはよく知られた現象である。このゆるみのメカニズムは、発破に伴う応力波やガス圧、自由表面近傍での衝撃波による引張力などによって説明されているが、これなどのメカニズムの定量的な分析は十分に行なわれていない。それは発破によるゆるみを直接測定する手法が確立されていないためと思われる。

一方、近年盛んに行なわれるようになった有限要素法による岩盤のゆるみ解析では、応力解放やクリープによるゆるみとは分離された発破による初期ゆるみを、入力条件として与える必要があり、発破によるゆるみの定量的な評価が要求されるようになった。

そこで、著者らは、岩盤用動歪計の開発を行ない<sup>1)</sup>、室内試験でその性能を確認した後、実際の岩盤に設置して発破時に生じる動的歪と残留歪の測定を行なった。

本報は、最初はその測定結果を紹介し、使用した岩盤用動歪計の信頼性に関する考察を述べる。次に、端緒的ではあるが定量的に求められた発破によるゆるみの状況

を報告する。

### 2. 試験場所

調査場所は、大阪市交通局地下鉄中央線と奈良県生駒市を結ぶ東大阪生駒電鉄線の生駒トンネル中工区建設現場である。同工区では近畿日本鉄道の旧生駒トンネルを利用して、本坑の掘削が行なわれており、測定を行なったのは、ズリ仮置用に旧生駒トンネルから掘られた2本の横坑の間の約11mの岩盤である。図-1、図-2に実施地点、横坑の断面形状を示す。

横坑付近の岩盤性状は領家変成帯に属する中～粗粒花崗岩で、圧縮強度は約2,000 kg/cm<sup>2</sup>、物理探査による弾性波速度(P波)は3,500 m/sec程度であり、地質分類(増田によるダム基石岩盤における分類法)ではC<sub>H</sub>級に属するかなりきれつがあるが中には充填物がほとんどない岩盤である。

### 3. 試験方法

#### 3.1. 計器配置と発破方法

図-2の横坑No.2から岩盤用動歪計の埋設と加速度計の設置を行ない、二つの横坑を結び連絡横坑が横坑

No. 1 側から発破で掘削される際の岩盤のゆるみへの影響を測定した。計測器の設置位置を図-3 に示す。連絡横坑の断面中央に岩盤用動歪計を3台、横坑 No. 2 の壁面（鋼線補強吹付コンクリート）に加速度計を1台設置した。連絡横坑の貫通までに9回の発破が行なわれ、8回までを計測した。各発破の掘削深さと使用薬量を図-3 および表-1 に示す。各発破は6段の段発で1段の時間が0.25 sec となる遅発電気 (D. S) 電管を用いている。また、一段目の使用薬量は1.2 kg とほぼ同量である。

3.2. 使用計器と埋設方法

岩盤用動歪計は事前に行なった室内試験結果で優れた特性を示した改良型差動トランスタイプと光ダイオード

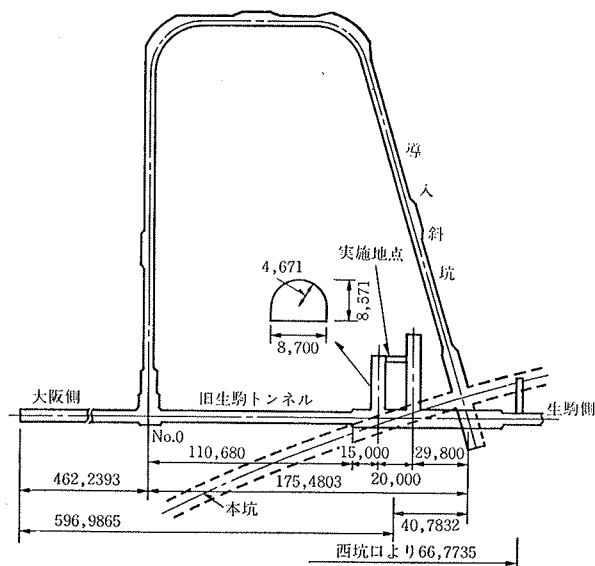


図-1 調査場所 (概要図)

タイプを使用した。外形は全長 500 mm、直径（両端定着部）38φ mm で、最大歪が  $7 \times 10^3 \mu$  (S-1),  $2 \times 10^3 \mu$  (S-2),  $1 \times 10^4 \mu$  (S-3) の3種である。

埋設にあたっては、せん孔を回転打撃式さく岩機（ビット径 42φ mm）で行ない、孔内掃除後、上記の岩盤用歪計を挿入し、特殊モルタル（エレホングラウト、圧縮強度 1,500 kgf/cm<sup>2</sup>）で空隙を孔口まで充填した。

加速度計は圧電型加速度計で、測定加定加密度最大 100G のものを使用し、岩盤用動歪計挿入穴近くの壁面に、感度方向を歪計の感度方向と一致させて、接着剤（リグラックセメント）で固着させた。

3.3. データ解析方法

現地では、加速度計と歪計の出力をデータレコーダーに収録した。この記録をシグナルアナライザー (SM2100 岩通電機製) でデジタル値に変換し、解析した。サンプル

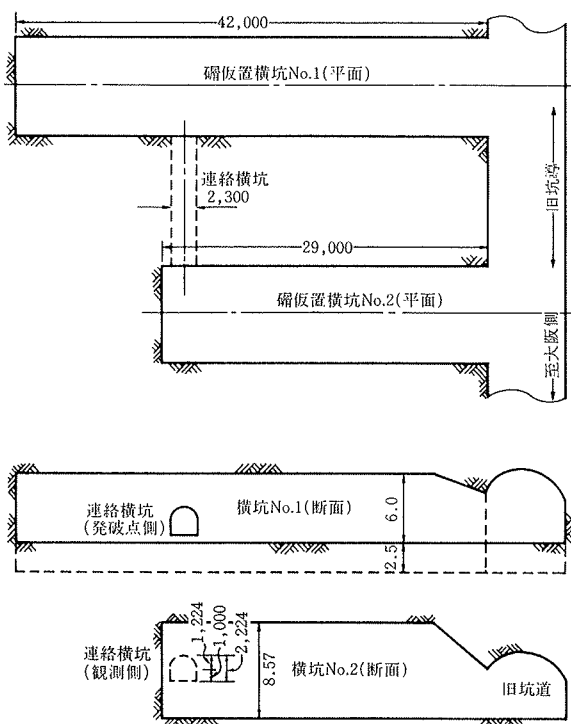


図-2 二つのズリ仮置横坑の断面形状

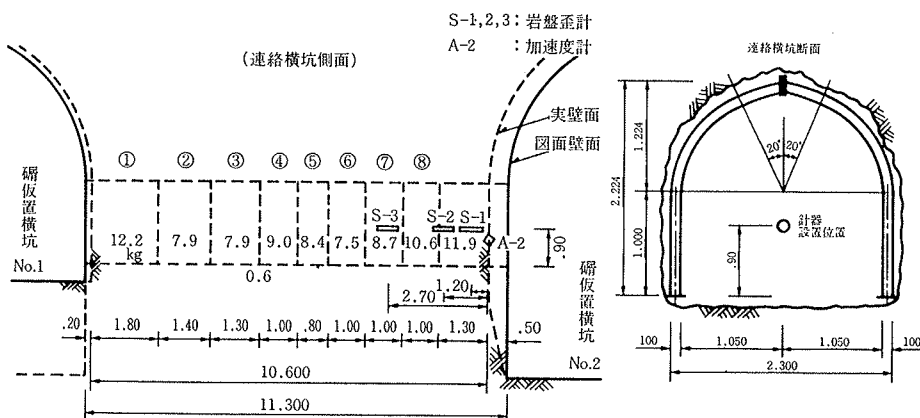


図-3 岩盤歪計の設置位置と発破内容

発破番号	掘削距離 (m)	ダイナマイト (本)	サンベック (本)
①	0.2~2.0	25	97
②	2.0~3.4	0	79
③	3.4~4.7	29	50
④	4.7~5.7	32	58
⑤	5.7~6.5	31	53
⑥	6.5~7.5	31	44
⑦	7.5~8.5	30	57
⑧	8.5~9.5	30	76

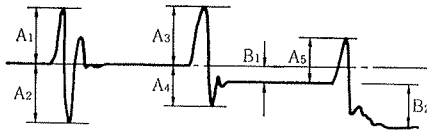
(100gr/本)

表-1 掘削深さと使用薬量

リング周期を  $4.8828 \times 10^{-4}$  sec として、一つの記録のデジタル値は 4,096 個、約 2 分のデータ長である。このデジタル値をフロッピーディスクに保存するとともに、パソコンと結合して各種のデータ処理を行なった。

岩盤用動歪計で得られた記録の読み取りに際しては、図一 4 の例のごとく各段発の発破により発生した交流波形の振幅  $A_1 \sim A_5$  を動的な歪とし、 $B_1$  や  $B_2$  のごとくドリフトした波形を静的な歪、すなわち、残留歪とした。また、歪波形は

解析の都合から圧縮側を正、引張側を負として整理した。



図一 4 波形読み取り方法

#### 4. 結果の検討

##### 4.1. 振動波形と歪波形の比較

加速度が近くにある岩盤用動歪計 (S-1) の記録を振動波形と比較検討するものとし、図一 5、図一 6 に 2 回目 (発破点から加速度計までの距離 8.1 m) と 6 回目 (同距離 3.8 m) の例を示す。図の縦軸は上側が加速度 (gal) 下側が歪 ( $\mu$ ) であり、横軸は時間である。この加速度波形の時間軸の上側に各段発に用いられた薬量も付記した。図一 15 では歪波形が初段で圧縮側にドリフトし、その後各段発ごとに加速度波形と時間的に対応した歪波形が得られている。一方、図一 6 では各段ごとに歪が引張側にドリフトする波形が得られた。歪波形との相関性が高いとされているのは振動速度波形であることから、

上記加速度波形をフーリエ解析による振動域の計算により積分し、卓越振動数以下の DC ~ 50 Hz までの部分を 0 ~ 1 の均等勾配のフィルターをかけて速度波形を求めた。そして図一 5 に示した 2 回目の発破を例に取りその初段の部分前半①と後半②に分けて拡大し、ドリフト分を原点移動した歪波形と重ねて示したものが図一 7 である。同図の縦軸は歪  $1 \mu$  に対し振動速度 5 kine を同じスケール

にとっている。図一 8 には縦軸に歪を、横軸に速度を取ったオービットを示す。これらの図から、歪波形に生じるドリフト成分を除けば、振動速度波形はよく対応していることが明らかとなる。

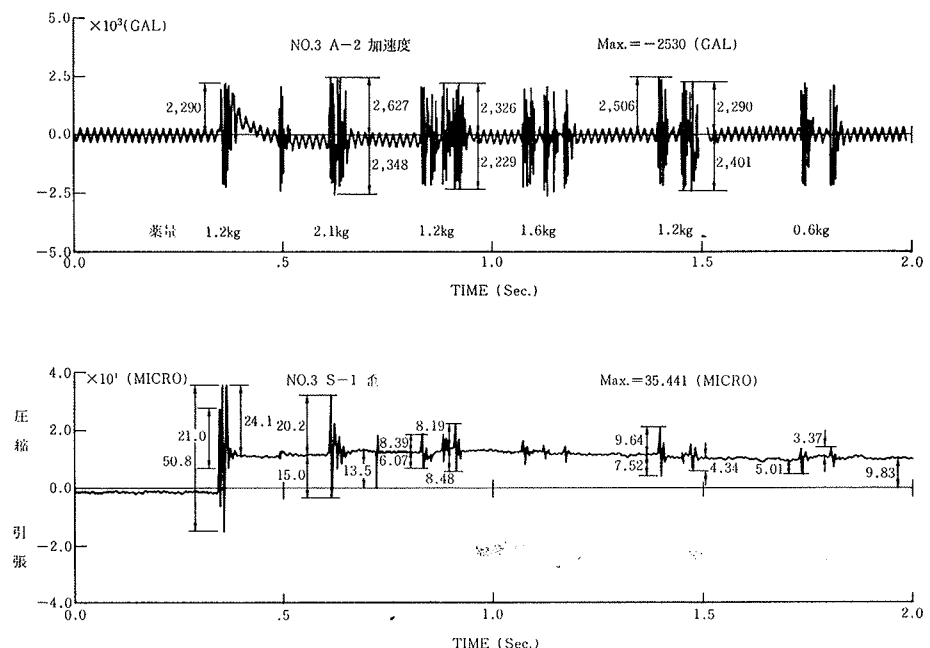
##### 4.2. 岩盤の縦波伝播速度の変化

軸方向振動速度  $v$  と軸方向歪  $\epsilon$  の間には伝播速度  $V_P$  の縦波が伝播するとして、 $\epsilon = v/V_P$  の関係がある。岩盤の物理探査より得られている縦波の伝播速度  $V_{P0} = 3 \times 10^3$  m/sec として、 $V_P = aV_{P0}$  とすれば  $a = v/\epsilon V_{P0}$  である。 $\epsilon/v$  は測定データから求めることができる。図一 9 に各発破の 1 段目のオービットを示す。同図中にはオービットから読み取った勾配  $\epsilon/v$  とそれをもとに計算した  $a$  の値も示した。勾配の取り方は波形の後半を重点に置いた。3 回目から 5 回目の発破では  $a$  が大きくなる傾向を示し、5 回目以降は  $a$  が反対に小さくなる傾向を示す。

一般に、岩盤の割れ目指数  $k$  と岩盤の伝播速度  $V_P$ 、および岩石の伝播速度  $W_P$  の間には  $k = V_P/W_P$  なる関係があるとされている<sup>2)</sup>。この場合、 $V_{P0} \approx W_P$  であるので、 $a \approx k$  であるが、 $a$  が大きくなれば割れ目が小さくなることは明らかである。したがって、5 回目の発破までは初めにゆるんでいた空隙が発破によって小さくなる方向に進行し、5 回目以降は発破点が接近してきて逆にゆるむ方向に進行したことになる。

##### 4.3. 発破振動と動歪の距離減衰

歪、加速度とも測定点は固定されているが、発破点が接近してくるので、発破点から測定点までの距離を横軸に取れば距離減衰図を作成することができる。図一 10 に



図一 5 加速度波形と歪波形 (2 回目の発破時)

は、加速度の積分により求められた振動速度の距離減衰を、図-11には動的歪振幅の距離減衰を示す。薬量や岩質など、各発破で条件が一定しないが、各回の初段に注目すれば薬量はほぼ一定であり、芯抜き発破であるので振動も大きい。この初段について図-10では距離が小さくなると距離減衰勾配が小さくなる傾向は明らかである。それに対し、図-11では距離が小さくなっても距離減衰勾配が変わらない傾向を示している。この傾向は5章2節で示した  $\epsilon/v$  の変化と傾向と一致しており、5回目以降で発破点が接近してくると空隙がゆるむ方向に進行したことを示すものである。

4.4. 残留歪

発破点から測定点までの距離を横軸に、その発破による残留歪および1回目からの累積残留歪を縦軸に取って示したのが図-12である。1回目の発破から3回目までの間は圧縮側に残留歪が生じ、4回目以降は引張りとなって急激に残留歪が大きくなる結果となった。発破点の遠い間が圧縮側となる傾向は5章2節で述べた傾向と一致する。これは、2本のズリ仮置横坑は発破で掘削されており、横坑間の岩盤が発破と応力解放によって今回の測定以前にゆるんでいたと考えれば説明がつく。最初から岩盤がゆるんでいたのであるから、本測定の結果は無垢の岩盤のゆるみの問題にそのまま適用できない可能性がある。しかし、引張り側の残留歪増大は明確かつ急激であるから、それを一つの目安とすることはできよう。す

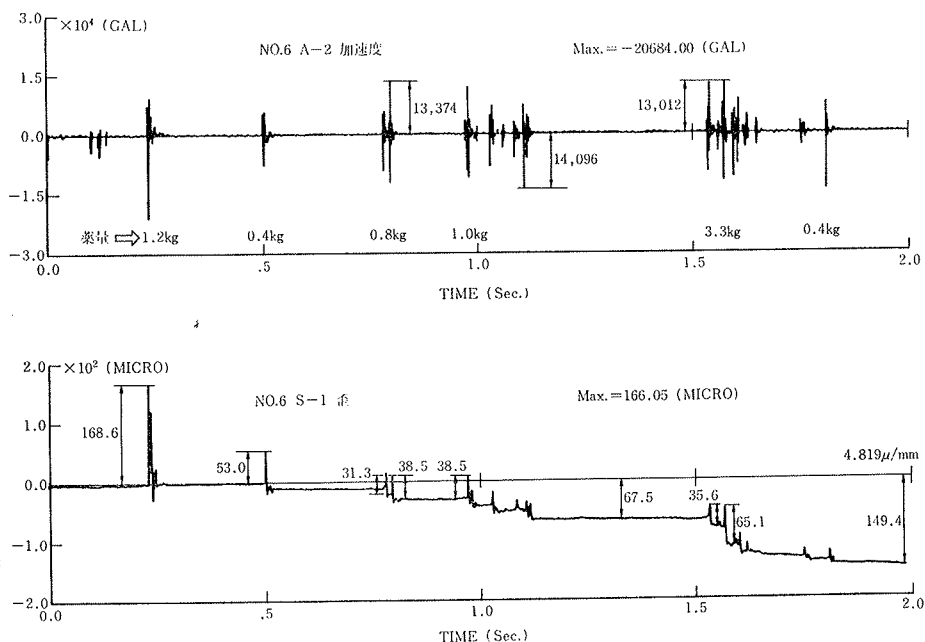


図-6 加速度波形と歪波形 (6回目の発破時)

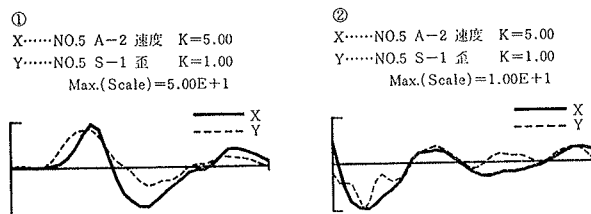


図-7 振動速度波形と歪波形の比較

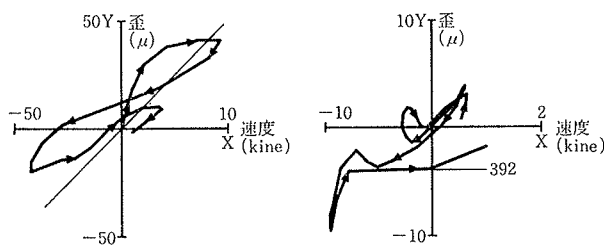


図-8 振動速度波形と歪波形のオービット

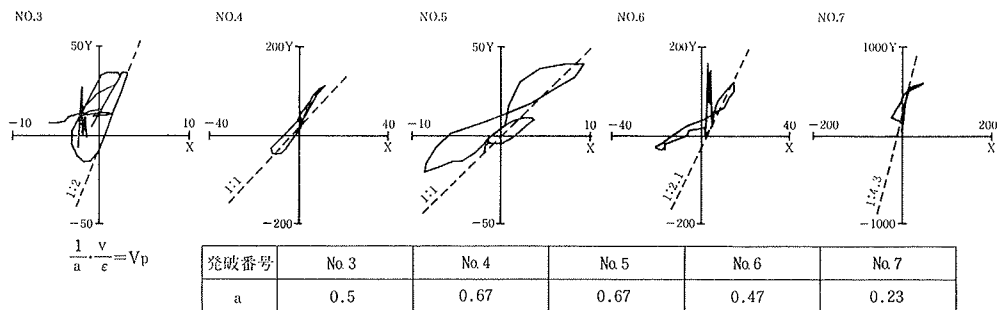
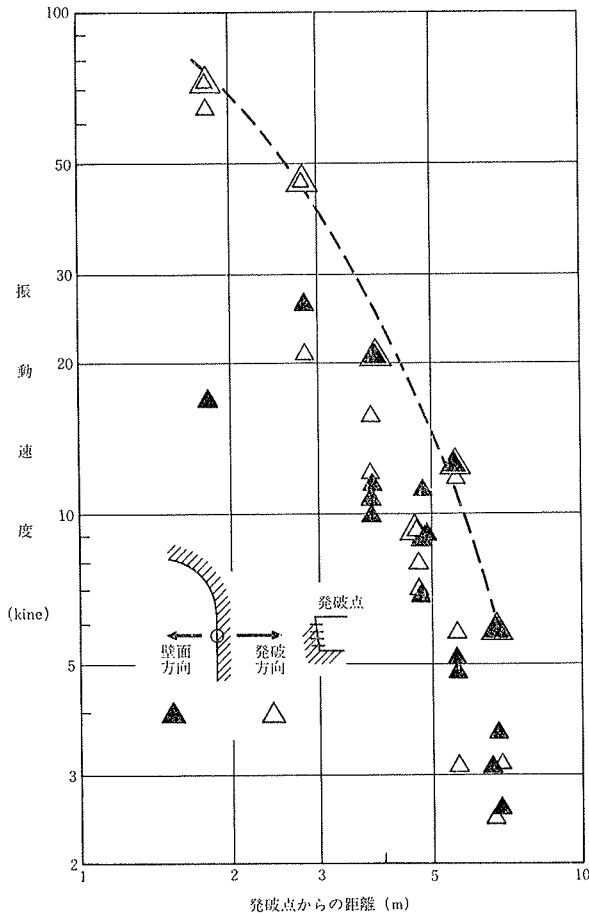
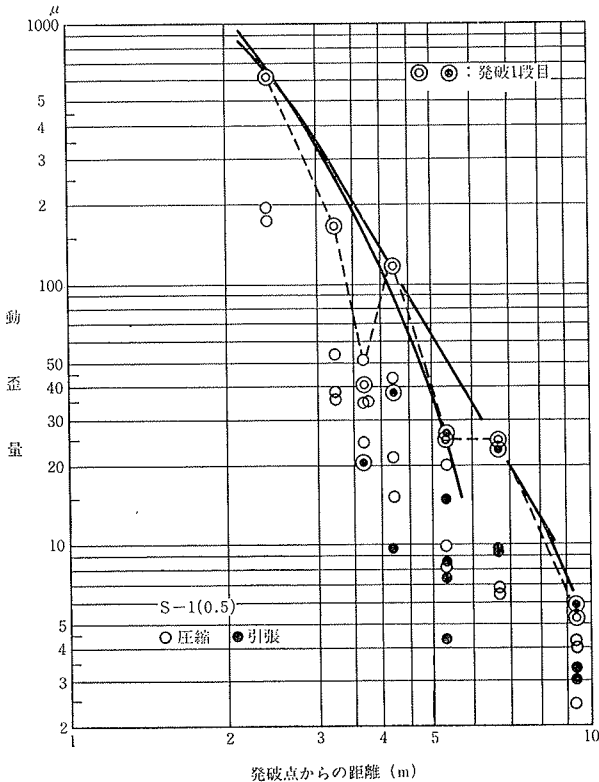


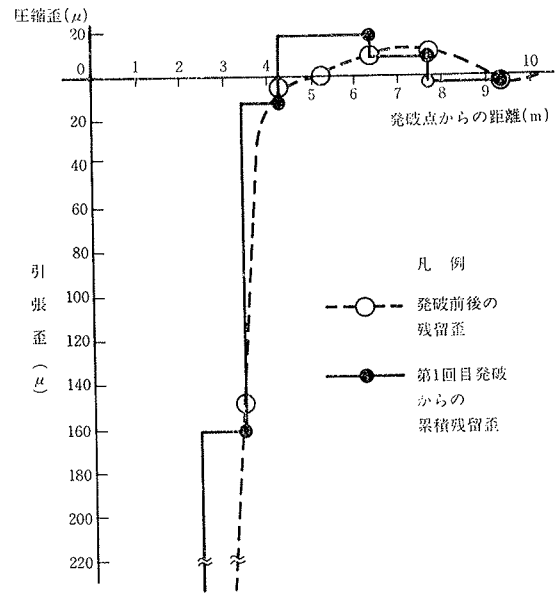
図-9 各発破の1段目のオービット



図一10 振動速度の距離減衰



図一11 動的歪振幅の距離減衰



図一12 残留歪と発破距離

なわち、残留歪が大きくなるのは発破点から4~5mでその時点の最大加速度は10G程度、振動速度は15kine、動的歪振幅は100μ程度である。

### 5. まとめ

今回の調査から、以上のことが明らかになった。

(1) 歪波形と振動速度波形の最初の部分がよく対応しており、本調査に用いた岩盤用動歪計で、発破による岩盤歪の測定が可能と判断される。

(2) 歪との振動速度の比較から、発破が近づくると岩盤の伝播速度、ヤング率の低下する傾向を得た。

(3) 残留歪は、発破点4~5mに近づくると引張り側に大きくなり、その時の最大加速度は10G、振動速度は15kine、動的歪は100μ程度であった。

おわりに、本調査に協力いただいた 東大阪生駒電鉄 関の方々および当社、石沢 宏所長をはじめ菊地 功所長代理、渡辺和憲主任、綿谷昭夫、若林良二両職員に深く感謝します。

### 参考文献

- 1) 小出忠男, 後藤洋三: 岩盤用動歪計の信頼性についての検討(室内性能試験結果), 大林組技術研究所報告, (昭和58)
- 2) 池田和彦, 他: 土木弾性波探査法, 物理探査技術協会, (1977), pp. 404~438
- 3) 須藤秀治, 他: 発破ハンドブック, 工業火薬協会, (1978), pp. 355~403