

地表面掘削による既設トンネルの挙動計測結果について

Field Measurements for an Existing Tunnel Due to Ground Surface Excavation

保岡 哲治* 金田 勉*

Tetsuharu YASUOKA, Tsutomu KANEDA

Bench blasting operations were carried out above a lined tunnel in a land reclamation site. The 400m long, 5.5m wide tunnel was temporarily constructed for muck transportation. The ground was excavated by 3m-step bench blasting and the excavation ended at 1m above the tunnel crown. Various parameters were monitored during excavation. In this paper, the results of field monitoring are presented. It was observed that no cracks appeared in concrete lining at particle velocities of less than 40 kins(cm/sec) and the lining was damaged in the velocity range 40 to 100 kins. It was confirmed that the tunnel deformed elliptically towards the ground surface under the unloading conditions.

Keyword: field measurement, close blasting, ground surface excavation, particle velocity, damage of lining concrete

1. はじめに

最近、既設トンネルの上部を掘削したり超近接部で発破を行う工事がある。このような工事では、発破や掘削による既設トンネルへの影響を定量的に把握することが非常に重要となる。しかしながら、現状でこれらに関する十分な理論展開は成されておらず、また、実現場を利用した試験例も非常に少ない。

関西新空港建設に伴う阪南丘陵土取り工事において、最終的にベルコントンネル周囲の掘削を行い、解体することになった。この工事では、超近接発破によるトンネルへの動的影響および掘削除荷による静的挙動について現場計測を実施し、貴重なデータを得た。本報告は、これらの結果を整理・分析したものである。

2. 現場計測の概要

2・1 ベンチ発破の概要

トンネル周辺は、風化された砂岩、砂礫岩を主体とした和泉層群の中硬岩地山で、一軸圧縮強度は100~500kgf/cm²、静弾性係数は150,000~300,000kgf/cm²程度である。図-1にトンネルの縦断図を、図-2に各ベンチ発破ごとの掘削範囲を示す。なお、本トンネルは吹付コンクリートとロックボルトを主要支保とするNATMトンネルで、覆工コンクリートは無筋構造であった。

ベンチ発破は3m毎に行い、トンネルの土被りは10m、7m、4m、1mと減少した。各ベンチ発破実施後、破砕片は大型ブルドーザーで除荷した。ベンチ発破はMS電気雷管とDS電気雷管を組み合わせで行った。表一

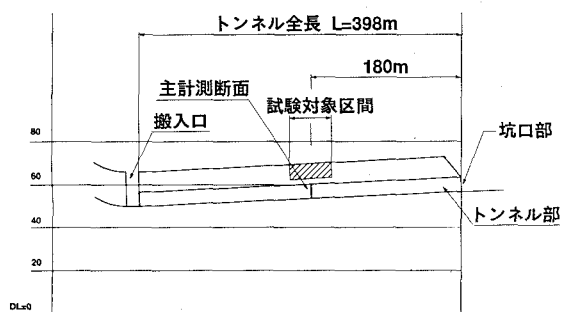


図-1 トンネルの縦断面図

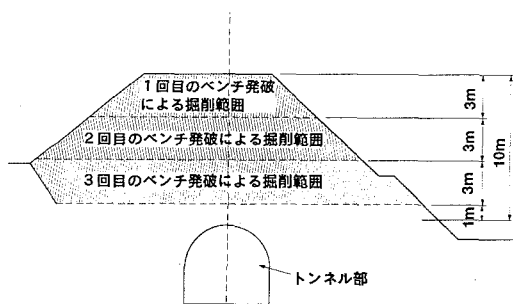
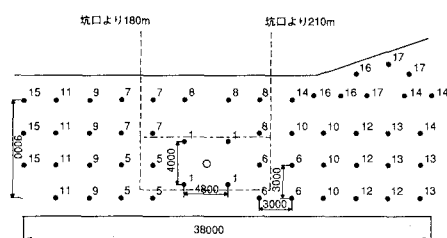


図-2 各ベンチ発破ごとの掘削範囲

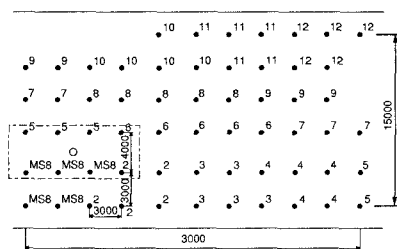
1に各ベンチ発破の段数の詳細を、図-3と図-4に各ベンチ発破毎の発破孔の位置（平面図）と瞬発発破孔の位置（横断面図）を示す。ここで、図-3の数字はDS電気雷管の段数を表す。なお、4回目のベンチ発破はデータ収集を目的として行ったものであり、発破後に除荷は実施しなかった。また、図-5にトンネル支保の標準断面図を示す。

2・2計測項目

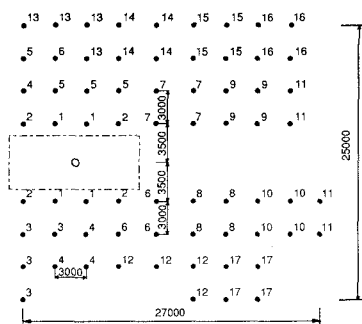
計測項目は、発破および除荷に関する項目と発破に関するものに分かれる。前者では、発破および除荷の前後に内空変位、天端沈下、インパート隆起、地中変位、覆工コンクリート応力、覆工コンクリートの変状を計測・観察（図-6）した。後者では、発破時に振動速度、覆工コンクリート応力を測定（図-7）した。表-2にトンネル縦断方向の計測位置および区間を示す。



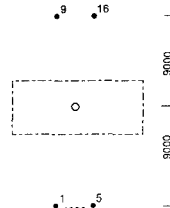
1 回目のベンチ発破



2 回目のベンチ発破



3 回目のベンチ発破



4 回目のベンチ発破

図-3 各ベンチ発破毎の発破孔の位置（平面図）

表-1 各ベンチ発破の段数の詳細

1回目のベンチ発破		2回目のベンチ発破		3回目のベンチ発破		4回目のベンチ発破	
段数	孔数	段数	孔数	段数	孔数	段数	孔数
DS-1	4	MS-8	5	DS-1	4	DS-1	1
DS-5	4	DS-2	5	DS-2	4	DS-5	1
DS-6	4	DS-3	5	DS-3	4	DS-9	1
DS-7	4	DS-4	5	DS-4	4	DS-16	1
DS-8	4	DS-5	5	DS-5	4		
DS-9	4	DS-6	5	DS-6	4		
DS-10	4	DS-7	5	DS-7	4		
DS-11	4	DS-8	5	DS-8	4		
DS-12	4	DS-9	5	DS-9	4		
DS-13	4	DS-10	5	DS-10	4		
DS-14	4	DS-11	5	DS-11	4		
DS-15	3	DS-12	5	DS-12	4		
DS-16	3			DS-13	4		
DS-17	3			DS-14	4		
				DS-15	4		
				DS-16	4		
				DS-17	3		

※1～3回目の発破での1孔当たりの薬量は5.2kgf
4回目の発破での1孔当たりの薬量は18.7kgf

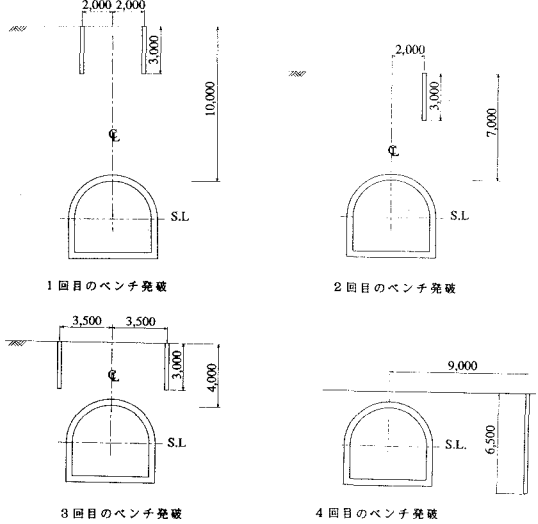


図-4 各ベンチ発破毎の瞬発破孔の位置（横断面図）

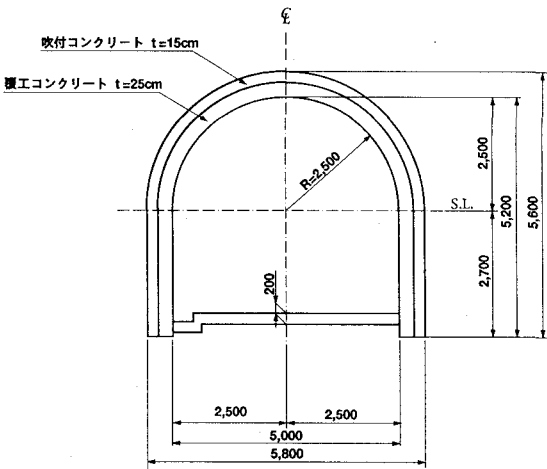
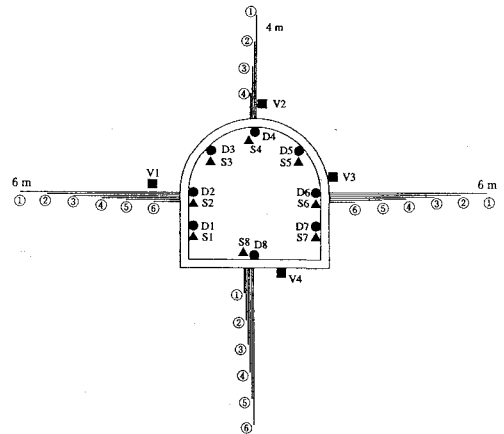
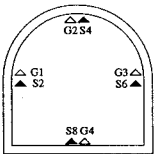


図-5 トンネル支保の標準断面図



符号	測定項目	記号	数量
●	内空変位測定	D1～D3、D5～D7	6ヶ所
●	天端沈下、インパト隆起測定	D4、D8	2ヶ所
▲	覆工コンクリート応力測定	S1～S8	8ヶ所
■	地中変位測定	V1～V4	4ヶ所

図-6 計測計器の配置（発破および除荷に関する計測）



符号	測定項目	記号	数量
△	振動速度測定	G1～G4	4ヶ所
▲	覆工コンクリート応力測定	S1～S8	4ヶ所

図-7 計測計器の配置（発破に関する計測）

表-2 トンネル縦断方向の計測位置および区間

計測項目	測定位置および区間
内空変位測定	坑口より180m、210m
天端沈下、インパト隆起測定	坑口より180m、210m
覆工コンクリート応力測定	坑口より180m
地中変位測定	坑口より180m
振動速度測定	坑口より180m
覆工コンクリートの変状観察	坑口より174m～186m

3. 計測結果

3・1 除荷の影響

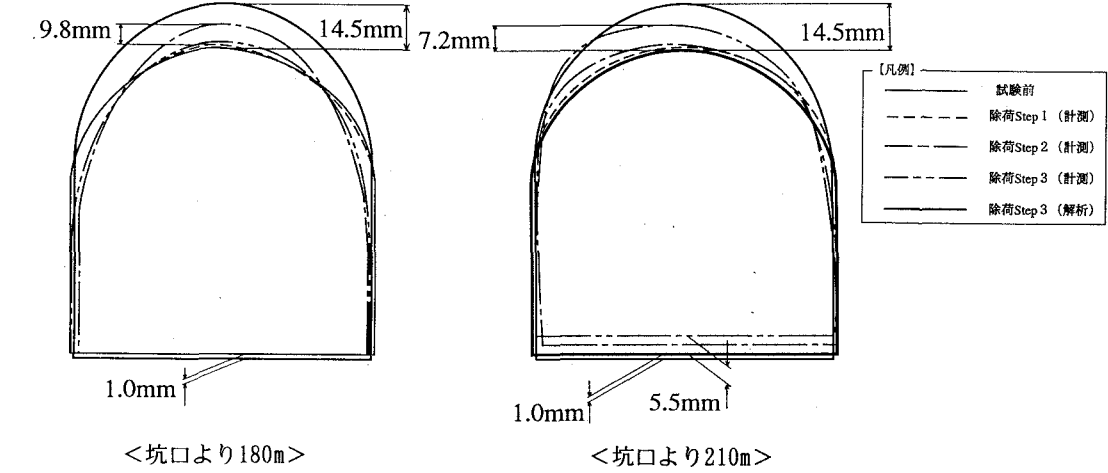
試験より得られた結果を以下にまとめて示す。ここで、土被りと除荷ステップの関係を表－3に示す。

①内空変位、天端沈下、インバート隆起

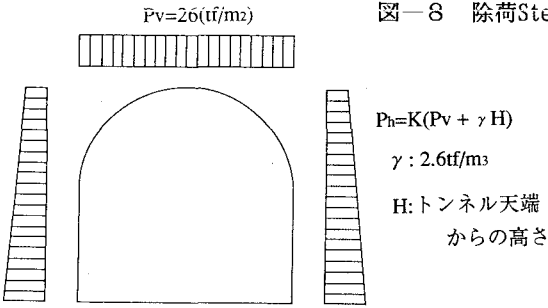
除荷ステップ毎の変形の傾向を図－8に示す。図では解析値と比較しているが、ここで言う解析とは、図－9に示すモデルに関する骨組み構造解析である。

骨組み構造解析では、10m分の土荷重を作用させた状態を初期状態とし、除荷工程を荷重の減少と捉えて、各除荷ステップ毎の増分変形量を求めた。地盤バネ定数に関しては、孔内載荷試験より得られた変形係数をそのまま用いた。また、部材厚さは吹付けコンクリートと覆工コンクリートの合計厚さ40cmとした。

計測結果による変形の傾向としては、概ねインバートが固定された状態でトンネル全体が鉛直上向きに伸びるような挙動となった。これと解析値を比較すると、鉛直上向き方向への移動量としては、天端部では計測値で8.5mm（2断面の平均）、解析値で14.5mm、インバート部では計測値で2.8mm（2断面の平均）、解析値で-1.0mm（下向き）となった。



図－8 除荷Step毎の変形の傾向



図－9 解析モデルと作用荷重

表－3 土被り厚さと除荷Stepの関係

除荷Step	除荷前の土被り	除荷後の土被り	除荷土被り厚
Step-1	10m	7m	3m
Step-2	7m	4m	3m
Step-3	4m	1m	3m

②地中変位

最大の区間変位は除荷Step-3にトンネルSL右側の位置で測定され、変位は縮む方向に0.6mm（内空側から1～2m区間で、地山のひずみに換算すると0.06%）程度であった。全体的に非常に小さい数値が測定された。

③覆工コンクリート応力

計測結果より、引張側および圧縮側の最大応力値は除荷Step-3で生じ、前者は17kgf/cm²、後者は13kgf/c

m²程度となった。全体的な応力分布の傾向としては、右下半部で引張が生じ、左SL付近で圧縮が発生した。

④覆工コンクリートの変状

除荷の前後で覆工コンクリートの変状を観察したが、除荷による影響は特に認められなかった。観察結果は後述する発破の影響の箇所と併せて示す。

3・2 発破の影響

現場試験より得られた発破の影響に関する知見を以下に示す。

①振動速度

各ベンチ発破毎の振動速度の最大値（大半が瞬発発破）を表一4に一覧する。この表でX方向はトンネル周方向、Y方向は縦断方向、Z方向は半径方向である。なお、発破位置と測点の距離は約12～4mであった。また、最大振動速度を発生した応力伝播波の周波数は、50～100Hz程度であった。

爆源（発破位置）からかなり遠い位置（通常、200～300m離れた位置）では下式に示す振動速度の推定式が一般によく用いられている。ここでは、次式を用いて超近接部（本試験では12～4m）の振動速度推定式を提案する。

$$V \text{ (kine)} = K \times W^a / D^b$$

V：振動速度 (kine)

W：薬量(kgf)

K：爆薬の種類や地山条件などから決まる定数

D：爆源と対象物までの距離(m)

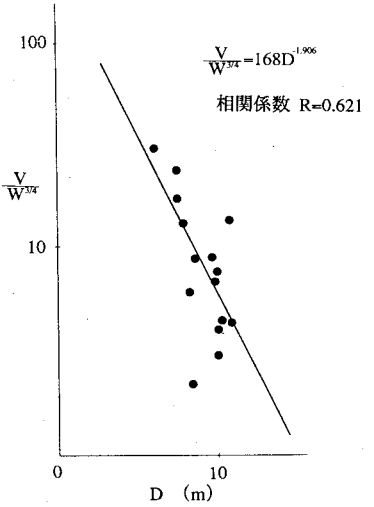
a、b：係数

近似にはべき乗回帰分析を用いる。薬量のべき乗を示す係数aについては、本試験で薬量が大きく変わらないため経験的に用いている数値(a=3/4)を用いる。分析の結果、Dと $(V/W^{3/4})$ は図一10に示すような関係があることが分かった。

$$(V/W^{3/4}) = 168 \cdot D^{-1.906} \quad \text{相関係数 } R = 0.621$$

表一4 最大振動速度測定結果の一覧表 (単位：kine)

		1回目	2回目	3回目	4回目
G-1 SL左	X	15.5	43.5	137.7	3.9
	Y	3.0	6.1	12.4	2.4
	Z	14.0	33.8	53.7	5.5
発破位置と測点の距離		10.2m	9.2m	5.5m	6.8m
G-2 天端	X	15.2	15.5	178.0	14.4
	Y	4.7	9.0	60.0	13.7
	Z	23.9	76.7	194.0	26.7
発破位置と測点の距離		7.8m	6.0m	3.9m	9.4m
G-3 SL右	X	13.1	43.7	90.0	7.3
	Y	4.1	7.9	16.3	20.5
	Z	12.2	28.1	57.9	59.3
発破位置と測点の距離		10.2m	7.3m	5.5m	11.7m
G-4 インバート	X	4.1	5.2	19.3	14.3
	Y	3.5	2.7	9.3	12.0
	Z	14.4	10.4	24.7	29.0
発破位置と測点の距離		12.2m	9.9m	6.9m	9.7m



図一10 Dと $(V/W^{3/4})$ べき乗近似

※数値の下にアンダーラインを引いてあるのが、これは3方向(X,Y,Z)の最大値であることを示す。

②覆工コンクリート応力

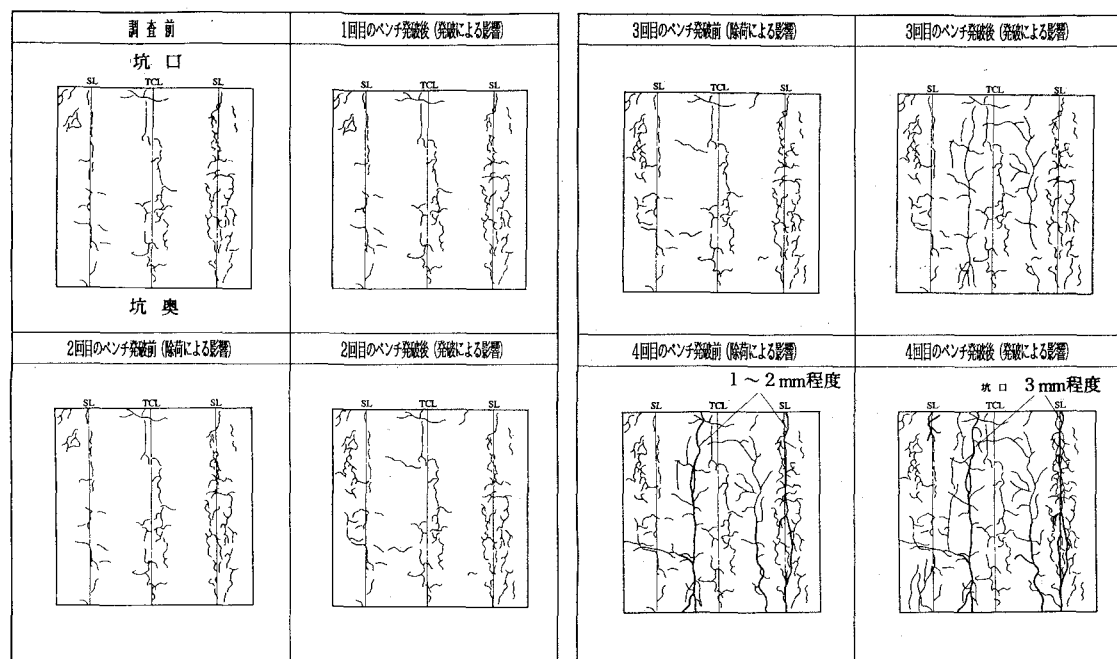
振動速度測定結果と同様に瞬発発破の応力が最も大きいケースが大半で、瞬発以外の段数でも振動速度の

最大値の段数は殆ど覆工コンクリートの最大値の段数と一致した。また、引張側の応力はベンチ発破の回数に係わらず数kgf/cm²程度の最大値を示した。圧縮側については、2回目と3回目のベンチ発破で大きな数値となり、特に天端部では、2回目のベンチ発破で100kgf/cm²を越える値が計測された。

③覆工コンクリートの変状

覆工コンクリートの変状観察結果を発破回数別に図-11に示す。観察は目視によったため、0.5～1mm程度以上のクラックを主に対象とした。

観察の結果、クラックの発生や進展が明瞭に確認できたのは3回目のベンチ発破後であった。また、4回目のベンチ発破によりクラック幅の増大が観察でき、最大で開口幅が3mm程度であった。



4. 結論

図-11 覆工コンクリートの変状観察結果

本試験の結果、以下の結論などが得られた。

- ①直径5.8m程度の規模のトンネルでは最小土被り1mまで除荷した場合、トンネル構造物の鉛直上向きに引き延ばされる方向への変形が確認できた。天端部の浮き上がり量は土被り9m分の除荷に対して8～9mm程度であった。天端の変位を含めて解析結果は計測結果を比較的良く再現できた。
- ②除荷によるトンネルや周辺地山の挙動よりグラウンドアーチの限界厚さについて検討する。計測結果では、明確な限界厚さを示す変位や応力の傾向は認められなかった。これは、本試験では発破を用いた掘削を行っているため、グラウンドアーチ自身が超近接発破により損傷を受けているなどの理由と考えられる。
- ③発破振動による覆工コンクリートの損傷の目安としては、目に見えるクラックが発生する振動速度の限界は38～97kine程度（天端部の鉛直方向）にある。また、覆工コンクリートの抜け落ちや側部からの転倒などの大規模な破壊に至るのは97kine以上と考えられる。
- ④従来からの発破振動推定式を用いて、本試験のような超近接発破（爆源と対象物の距離が12m～4m程度）での推定式を求めた。その結果、 $(V/W^{3/4}) = 168 \cdot D^{-1.906}$ （相関係数 $R = 0.621$ ）が求められた。

5. 終わりに

本試験の実施にあたり、ご協力頂いた大阪府企業局及び阪南整備事務所の御厚意に深謝致します。