

(42) 大背部発破によるトンネル上半覆工の動的挙動

神戸大学 大学院 工学の高谷 富也
神戸大学 工学部 正 北村 泰寿
神戸大学 工学部 正 桜井 春輔

1. まえがき

上半断面先進掘削工法の施工過程において、大背部掘削に使用する発破はトンネル上半覆工に対して安全に実施されているが、発破による上半覆工の振動性状を解析的に評価した例は見当たらない。筆者らは、大背部発破による上半覆工および大背部地盤の振動速度の測定を行った¹⁾。本文は、簡単な解析モデルを用いて大背部発破による上半覆工の振動性状を解析的に評価した。

2. 測定現場の概要

測定と実施したトンネルの上かぶり厚は約200mで、現場は新鮮な花崗閃緑岩からなり、弾性波速度は約4.7 Km/secである。トンネル断面の換振器の取り付け位置は図-1に示すとおりである。

第1回目の発破については、断面AA'において上半覆工および大背部地盤の振動の同時測定を行い、第2回目および第3回目の発破については、同図に示すように断面AA'より10m離れた断面BB'の位置に速度計のみを移動した。図-2は大背部の標準発破パターンを示したもので、発破諸元は表

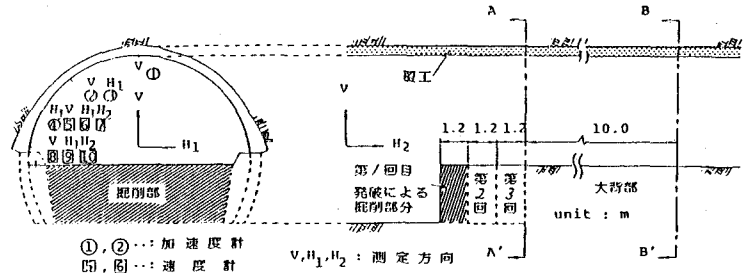


図-1 換振器の取り付け位置

表-1

-1に示す。なお、穿孔長は1.2m、各段は2穿孔、1孔当りの薬量は0.3kg(段当りの薬量の0.6kg)

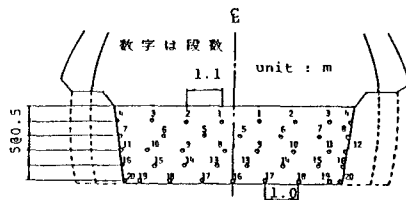


図-2 大背部標準発破パターン

表-1 発破諸元

爆薬	2号爆 0.1kg・スラリー 0.2kg
電気雷管	D S 1~20 段
断面積	18.4 m ²
岩質	花崗閃緑岩 (Ch~B級)
1発進行	1.2 m
破砕量	22.08 m ³
穿孔数	40 孔
爆薬使用量	12.0 kg

3. 測定結果と考察

発破各段に対応する波群中の最大振幅(振動速度)を読み取り、測定結果の整理を行った。なお、本文では、速度についてのみ整理を行った。加速度については文献¹⁾に譲る。

図-3は断面AA'における覆工および地盤の振動速度(測定成分⑤~⑦および⑧~⑩)と比較したものである。発破点より、約24mの断面AA'では覆工速度は地盤速度に比べて極めて小さく、そのピークを示す段数も異なる。一方、BB'断面では、図-4、5より覆工と地盤の速度差は小さくなる傾向にあり、またピーク位置もほぼ一致している。表-2は各発破の全段における最大値のみを示し

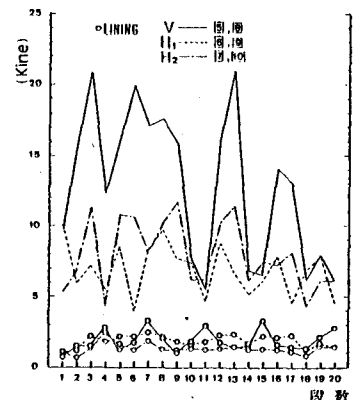


図-3 地盤速度と覆工速度(第1回目)

たものである。これより、
 発破点付近では覆工と地盤
 は異なる振動を呈すが、発
 破点より遠ざかるにつれて
 両者は一体となり、振動す
 る傾向にあると考えられる。
 発破点付近では地盤速度が
 大きいにもかかわらず、覆
 工速度が小さくなる、とい
 うことは従来大発破が上

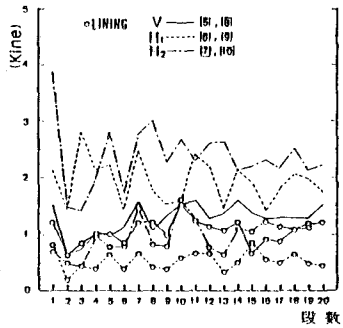


図-4 地盤速度と覆工速度(第2回目)

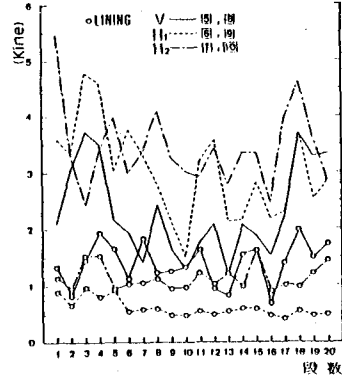


図-5 地盤速度と覆工速度(第3回目)

半覆工に損傷を与えること
 なく安全に実施されている事実と説
 明するものであろう。なお、図-3
 の速度計8の最大値が20 line 程度
 になっているが、これについては速
 度計の応答の直線性の面から多少問
 題はあろう。

表-2 各発破の最大振動速度の比較

発破回数	測定位置 測定距離	振 動 速 度 (kine)						覆工と地盤の比較		
		V 5	H 6	H 7	V 8	H 9	H 10	V 5	H 6	H 7
第1回目	2.4 m	3.32	2.46	2.45	20.92	10.13	11.44	0.16	0.24	0.21
第2回目	11.2 m	1.50	0.97	1.47	1.59	2.83	3.88	0.96	0.31	0.38
第3回目	10.0 m	1.84	0.97	1.54	3.74	4.78	5.48	0.52	0.20	0.28

4. 解析手法

図-6に示すように、上半覆工を半無限弾性体上に置かれた有限板と考
 え、半無限弾性体内部の加振源による有限板の振動を考える。板剛度が大
 きくなり、矩形底面をもつ剛体と考えられる場合には、底面下の接触圧分
 布を求むる問題としていくつかの研究結果が得られている²⁾。

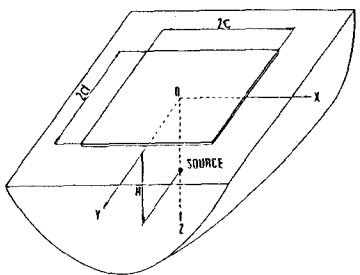


図-6 座標系

本解析では、接触面を有限個の要素に分割し、要素内での接触圧を一定
 として、影響係数の概念により変位を重ね合わせる。そして、接触面に
 ける変位の境界条件から、各要素の未知接触圧に関する連立一次方程式を解く問題に帰着させる³⁾。本解析では、
 有限板にFEMを適用し、一般によく知られている変位関数⁴⁾を用いた剛性マトリックスと質量マトリックスとを
 利用した。

正弦波外力による系全体の振動方程式は、時間項を省略して次のように表わされる。

$$-\frac{ab\pi f_p \omega^2}{25200} [M] \{\delta\} + \frac{D}{15ab} [K_p] \{\delta\} + \{Q\} = \{P\} \quad (1)$$

ここで、 a, b は分割要素の x, y 方向の辺長、 π, f_p はそれぞれ板の厚さおよび密度である。また、 ω は内部
 加振力の振動数、 D は板剛度($= E_p \pi / 12 (1 - \nu_p^2)$)、 E_p, ν_p はそれぞれ板の弾性係数およびポアソン比である。
 $\{\delta\}$ は節点変位、 $\{Q\}$ は節点反力、 $\{P\}$ は節点外力で、それぞれ鉛直成分と回転成分に分けて次式のようなになる。

$$\begin{aligned} \{\delta\} &= \{w_1, w_2, \dots, b\theta_{x1}, b\theta_{x2}, \dots, a\theta_{y1}, a\theta_{y2}, \dots\}^T \\ \{Q\} &= \{Q_{z1}, Q_{z2}, \dots, T_{x1}/b, T_{x2}/b, \dots, T_{y1}/a, T_{y2}/a, \dots\}^T \\ \{P\} &= \{P_{z1}, P_{z2}, \dots, M_{x1}/b, M_{x2}/b, \dots, M_{y1}/a, M_{y2}/a, \dots\}^T \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}$ は節点 i のたわみおよび回転角、 Q_{zi}, T_{xi}, T_{yi} は節点 i に働く反力および抵抗モー
 メント、 P_{zi}, M_{xi}, M_{yi} は節点 i に作用する外力および外モーメントである。

次に、節点に働く反力については、抵抗モーメントを0として、鉛直方向の反力のみを考える。このとき、板
 と半無限弾性体との結合の形態を模式的に示すと図-7のようである。つまり、図に示すように、本解析では

板の節点と地盤の分割要素の中央点と直接一致させる方法を用いる。
影響係数の概念を用いると、節点変位の方向成分と節点反力の方向成分は次式で結びつけられる。

$$\{w\} = \frac{(1-\nu_s^2)\lambda}{\pi E_s d} [F] \{Q_s\} \quad (3)$$

ここで、 $\lambda = d/c$ 、 E_s 、 ν_s は地盤の弾性係数およびポアソン比である。また、 $[F]$ は無次元影響係数マトリックスであり、その詳細については文献2)に譲る。

式(3)を変形して式(1)に代入すれば、次式が得られる。

$$\left[-\frac{\mu \bar{a} \bar{b}}{25200} [M] + \frac{\lambda^2}{15 \bar{a} \bar{b}} [K_p] + \delta [K_s] \right] \{\Delta\} = \{\bar{P}\} \quad (4)$$

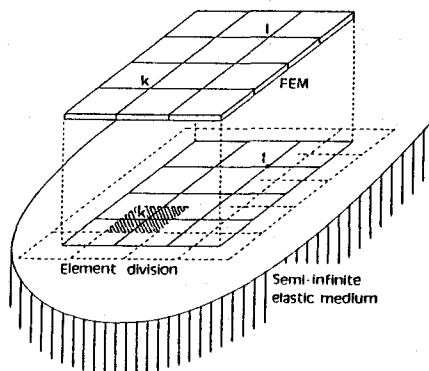


図-7 弾性体上の板モデル

ここで、 $\bar{a} = a/c = a\lambda/d$ 、 $\bar{b} = b/d$ 、 $\{\Delta\} = \{S\}/d$ 、 $\{\bar{P}\} = \delta [K_s] \{\bar{U}\}$ 、 $\{\bar{U}\} = \{U\}/d$

$$\delta = 12\pi \frac{1-\nu_s^2}{1-\nu_s^2} \frac{E_s}{E_p} \left(\frac{d}{\pi}\right)^3, \quad \mu = \frac{1-\nu_s}{2\pi} \frac{f_p}{f_s} \frac{\pi}{d} \left(\frac{\omega d}{f_s}\right)^2 \gamma, \quad [K_s] = \begin{bmatrix} [F]^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

また、 U_0 は地盤の横波の伝播速度であり、 f_s は地盤の密度である。 $\{U\}$ は半無限弾性体内部の点加振力による鉛直変位であり、次式のように与えられる⁵⁾。

$$U_z = -\frac{(1+\nu_s)Q_s}{2\pi E_s H} C_0 \int_0^\infty \left[\frac{\zeta W_1(\zeta)}{F(\zeta)} + \frac{\zeta W_2(\zeta)}{\beta F(\zeta)} + \zeta W_3(\zeta) \right] J_0(\zeta a_0) d\zeta \quad (5)$$

ただし、 $W_1(\zeta) = d \left\{ (2\zeta^2 - 1) e^{-\alpha C_0} - 2\zeta^2 e^{-\beta C_0} \right\} \left\{ (2\zeta^2 - 1) e^{-\alpha b_0} - 2\zeta^2 e^{-\beta b_0} \right\}$

$$W_2(\zeta) = \zeta^2 \left\{ 2\alpha \beta e^{-\alpha C_0} - (2\zeta^2 - 1) e^{-\beta C_0} \right\} \left\{ 2\alpha \beta e^{-\alpha b_0} - (2\zeta^2 - 1) e^{-\beta b_0} \right\}$$

$$W_3(\zeta) = d e^{\pm(b_0 - C_0)\alpha} - \zeta^2 / \beta e^{\pm(b_0 - C_0)\beta}, \quad F(\zeta) = (2\zeta^2 - 1)^2 - 4\zeta^2 \alpha \beta \quad (\text{Rayleigh 関数})$$

$$\alpha = \sqrt{\zeta^2 - \varepsilon^2}, \quad \beta = \sqrt{\zeta^2 - 1}, \quad \varepsilon = \sqrt{(1-2\nu_s)/2(1-\nu_s)}$$

また、 $a_0 = \frac{\omega r}{f_s}$ 、 $b_0 = \frac{\omega H}{f_s}$ 、 $C_0 = \frac{\omega H}{f_s}$ 、 $J_0(\cdot)$ は第0次のBessel関数である。なお、上式中の符号±はそれぞれ載荷面より上の部分および下の部分に対応していることを表す。

本解析に用いる弾性体表面の鉛直変位は、上式に $z=0$ を代入すれば容易に得られる。

5. 数値計算結果と考察

本解析では、図-8に示すように第3象限と第4象限(x, y 平面)に有限板があると考えて、 y 軸の直下に上下点加振源を設定する。また、半無限弾性体内部の上下点加振力による板と地盤の鉛直変位の数値計算結果は次式の形で整理し、無次元係数項の実部 f_1 と虚部 f_2 および絶対値 $\sqrt{f_1^2 + f_2^2}$ に関して板と地盤の比較を行う。

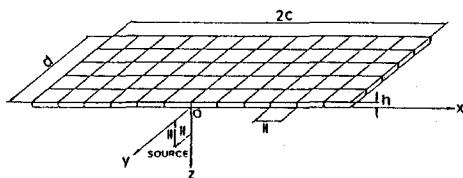


図-8 解析モデルと座標系

$$W = \frac{(1+\nu_s)Q_s}{2\pi E_s H} (f_1 + i f_2) \quad (6)$$

本文の数値計算は無次元化した式で行うため、計算条件は板と地盤のポアソン比 ν_p 、 ν_s と $\nu_p = \nu_s = 0.2$ 、密度比 f_p/f_s と $f_p/f_s = 1.0$ 、 $r/d = 0.2$ 、 $H/d = 1/3$ 、 $d/c = 1/5$ とし、無次元加振振動数 $\frac{\omega d}{f_s}$ と $\frac{\omega d}{f_s} = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の値に変化させた。また、板と地盤の剛性比 γ は $\gamma = 1000$ (板と地盤の弾性係数比 $E_p/E_s = 1/5$)とし、 μ は $\mu = (1-\nu_s) \left(\frac{\omega d}{f_s}\right)^2 \gamma / 10\pi$ として、 $\frac{\omega d}{f_s}$ 、 γ の値と代入して求めた。なお、本解析では y 軸に関する対称性が考慮できたため、計算結果はすべて第4象限についてのみ図示した。

図-9は無次元加振振動数 $\frac{\omega d}{f_s}$ の変化による板と地盤の鉛直変位の実部と虚部および絶対値についての比較を

示したものである。ところで、地盤の縦波の伝播速度 $V_p = 4.7 \text{ km/sec}$ より横波の伝播速度 V_s が 2.88 km/sec と求まり、 $d = 2.25 \text{ m}$ ($\tau = 0.45 \text{ m}$) とすれば、無次元加振振動数 $\frac{\omega d}{V_s} = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ はそれぞれ $f = 100 \text{ Hz}, 200 \text{ Hz}, 300 \text{ Hz}, 400 \text{ Hz}$ に相当している。また、横波の波長とすれば、無次元加振振動数 $\frac{\omega d}{V_s} = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の場合はそれぞれ $0.4L, 0.8L, 1.2L, 1.6L$ なる距離までの板と地盤の鉛直変位挙動を調べたことになる。これらの図より、加振源近傍においては地盤が大きく振動しているにもかかわらず、板の振動は小さく、加振源より遠ざかるにつれて両者は同じ大きさの振幅で振動していることが分かる。これは、図-3, 4, 5 に得られている測定結果と裏付けているものと考えられる。しかしながら、本解析に用いた解析モデルおよび計算条件は限られたものであるため、今後さらに解析モデルの検討および各パラメータを変化させて、板と地盤の変位挙動について検討を進める必要があると思われる。

参考文献

- 1) 桜井春輔, 高谷富也, 清水則一, 北村泰寿: 大背部巻破によるトンネル上半覆工の振動測定, 第38回年次学術講演会, III-69, 1983.
- 2) 北村泰寿, 桜井春輔: 剛基礎底面の複素剛性に関する一解析法, 土木学会論文報告集, No. 290, pp. 43~52, 1979.
- 3) 北村泰寿, 桜井春輔: 半無限弾性地盤上にある4辺自由板の振動解析, 土木学会論文報告集, No. 297, pp. 59~69, 1980.
- 4) Zienkiewicz, O. C.: The Finite Element Method (Third Edition), McGraw-Hill, 1975.
- 5) 高谷富也, 北村泰寿, 桜井春輔: 半無限弾性体内部の調和型点加振力による変位の解析, 建設工学研究所報告, No. 24, pp. 33~54, 1982.

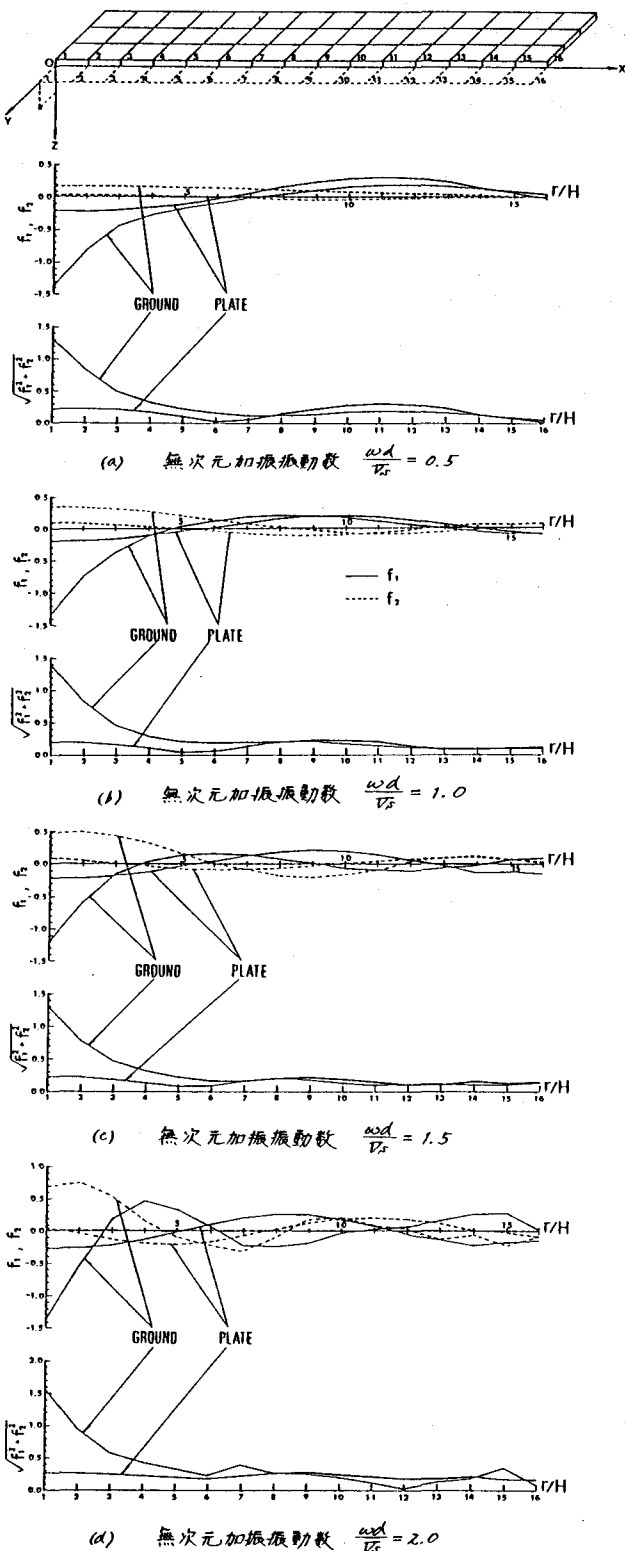


図-9 地盤と板との鉛直変位の比較

(42) Dynamic Behaviours of Tunnel Lining for Upper-Half
due to Blasting of Bench Excavations

by Tomiya Takatani*
Yasutoshi Kitamura**
Shunsuke Sakurai***

SUMMARY

In the conventional tunnelling method of upper-half headings, few works concerning the vibration characteristics of linings for upper-half due to blasting have been done so far. The authors carried out the experiment of measuring the vibration of concrete linings for upper-half as well as the surrounding ground due to the blasting of bench excavations. The following results are obtained from the experiments.

In the vicinity of blasting point, the particle velocity of the concrete lining is smaller than that of the ground, while both the velocities tend to be identical as a blasting point locates far away from the measuring points.

In order to analyze the problem theoretically, the authors assumed as a simple vibration model of linings a free rectangular plate resting on a semi-infinite elastic medium. The plate is excited by a harmonic vibration source locating underneath the plate. The following results were obtained from numerical analyses (FEM).

The vertical displacements of the semi-infinite elastic medium become larger than those of the plate in the vicinity of excitation, while they tend to be the same to those of the plate as the vibration source locates far away from the reference points.

It is understood that these computer results can well demonstrate the experimental results.

* Graduate Student of Kobe University

** Associate Professor of Kobe University

*** Professor of Kobe University