III－152　発破振動の統計的性質について

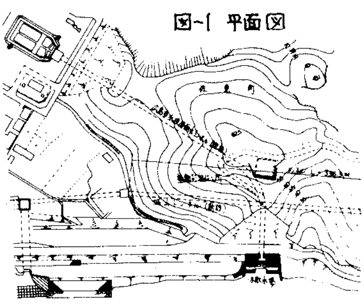
清水建設 土木技術部　正員　高崎 英邦
同上　正員 ○大槻 明
同上　正員　米田 吉男

1. はじめに　近年トンネル工事の増加とともに、市街地あるいは既設構造物に近接して構築されるケースが少なくない。発破による掘削を余儀なくされる場合においては、それによって発生する振動が大きな問題となる。例えば公害問題、既設構造物が振動することによって生じる構造力学上の問題などである。それ故え施工時はもちろん設計、施工計画段階での発破の計画と管理の検討は必要欠くべからざる重要項目である。筆者らは、一般に経験公式を用いて振動速度を推定する例が多く、また特に重要な構造物が近接する場合には、計測を行ないながら施工管理することが要求される。今迄の経験によると、予測値と実測値との間にはかなりの差が認められた。この報文の内容は、二つのトンネル施工現場を例にとって、そこで得られた計測値と経験予測式を対比し、式の精度や式中の未定係数の不確定性の程度、即ちそれらの統計的性質について検討している。その主なる目的は、発破振動の特性を理解する一ステップとし、ひいては施工管理の一助とすることである。

2. 施工現場の概要と測定方法　周辺環境による施工条件が悪く、特に慎重な管理を要した次の二現場を検討対象とした。
(1) 広島県太田川に建設された高瀬堰の附帯構造物である内水排除目的の城山トンネル。一部既設トンネルと立体交差(最短距離約70cm)している。
(2) 神戸市に建設中の、周辺には多くの構築物が存在している地下鉄用横尾トンネル。岩質は城山トンネルが弾性波速度で4～5 km/sの花崗岩、横尾トンネルは布引花崗閃緑岩と言われる3.1 km/s程度であるが、表層はかなり風化している。

(1) 城山トンネル

図-1 平面図



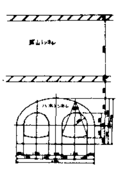
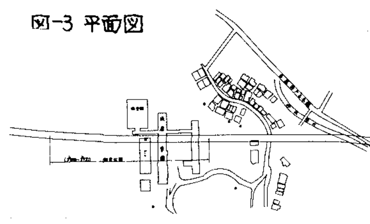


図-2 立体交差部断面図

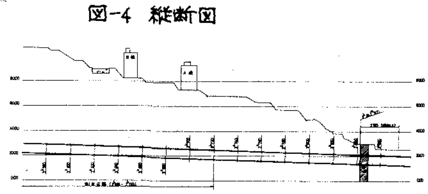
(2) 横尾トンネル

図-3 平面図



● 測定点

図-4 縦断図



使用計測器

換振器 VS-75型電磁式 (東京測振) 周波数特性 8～300Hz 平坦	増幅器 AL-120 (東京測振) 変位.速度.加速度 10万倍
記録器 (電磁オシロ) PR-101 6ch、(三栄測器) ガルバー G 500A (0～350Hz)	

3. 発破振動の統計的性質と考察　ここで用いる資料は、通常最大値を示す心抜き発破(一段目)を対象とし、その計測例の一部を表-1に示す。一般に発破振動を予測する経験式としては、(1)の式形が多く用いられる

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

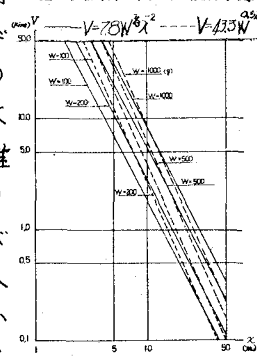
ここで V；振動速度(kine)　W；薬量(g)　X；距離(m)　を表わし、また K, m, n は未定係数である。通常は $m \fallingdotseq 2/3$　n は2～3の間と言われている。著者らの経験によれば、(1)式において通常使用されている係数値によって算出した振動速度と実測値と対比した場合、

表-1 振動計測

城山トンネル 年月日	時間	距離 (m)	薬量 (kg)	速度 (kine)	横尾トンネル 年月日	時間	距離 (m)	薬量 (kg)	速度 (kine)
47 11.30	5:45	30.0	2.0	1.36	44 12.20	10:00	154.7	0.4	0.01
12. 1	24:00	24.0	0.4	0.56	2.13	14:20	79.5	0.4	0.02
12. 8	4:50	19.2	0.4	1.28	3.29	10:25	55.6	0.1	0.07
12.13	9:00	15.0	0.2	1.81	3.31	9:35	49.5	0.2	0.19
12.14	22:30	12.0	0.2	2.29	4.7	15:40	39.5	0.3	0.38
12.14	22:50	12.0	0.2	1.64	4.7	13:47	37.6	0.3	0.38

ある程度の誤差が認められていた。実測値（V, W, x）を(1)式に適用し、最小自乗法を用いて当現場に最適な係数を求めたのが表－2に示してある。nはほぼ妥当な値であるが、mは大きな差異を示しており、Kの不安定を引き起す要因の一つとなっている。この原因として、データー数が少ないためこれらの様相によっては、三個の係数は相互に大きく変動することが考えられる。またこの式形で係数を一意的に決定することは元来難しいのかもしれない。図－5は城山トンネルの実測値を使い最小自乗法と平均値Kより求めた予測式をグラフにしたものである。そこでこれらの定量性を見い出すために、べキ乗数m, nを最も多く使用される$2/3$, 2.0と各々設定して、V, W, Xに実測値を代入してKの値を逆算し、その分布を求めた。図中（図6）の分布は、χ^2適合度検定の結果いづれも5%有意水準で正規分布に近似できる。両現場における係数Kの分布を見て解ることは、いづれも標準偏差がかなり大きいことである。特に横尾トンネルの例（図－8）では、データー数の少ないことも一因であろうが、規則性が無くその分布形状は定まらない。この係数は一次で直接予測値に効いてくることから、精度良い予測を行なうことの困難性が解る。図－7,9は当現場における各々の平均値K 7.8，6.1を使って得た計算値と実測の差の分布を表わしている。城山トンネルの場合の計測値の範囲は、0.05～2.29で、その平均値は1.0 kineであり、横尾トンネルのそれは、0.01～0.38，0.08 kineである。各々の標準偏差と対比してみると、横尾トンネルは$\sigma=0.08$、城山トンネルは$\sigma=0.38$でありその誤差の大きさの程度が知れる。即ちK値を予め精度良く推定し得たとしても、予測値の誤差は相当大きいことを認識しておく必要がある。m, nをここでは固定したけれど、他の提案もなされている。これらの係数K, m, nが当現場においての最適値であっても、予測値の誤差は予想される。即ち発破振動に介存する因子として、地質、地層の多様性、断層破砕帯、自由面などいわゆる自然条件と発破パターンやストロークなど発破技術に関することが考えられ、これらの要因を考慮すると、特定の現場における施工管理計画を実施しようとする場合、全体の平均的な値を予測している種々の公式をそのまま適用することは危険な場合もあろう。今後以上の結果を考慮して、実験計測及び解析を行ない、資料の集積とともに各係数の特性を明瞭化し、予測式の精度を高めていく必要がある。また安全施工管理を目的とする場合の一法として、係数あるいは、予測値Vに確率の概念を導入し、信頼限界を定めて発破計画を立てる事も考えられる。

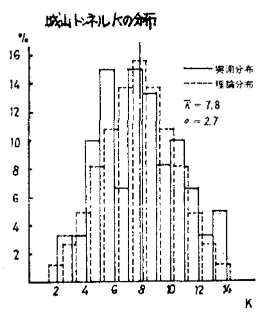
図－5 城山トンネル発破振動予測式



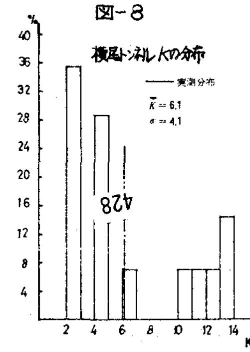
表－2

	最小自乗法により求めた式
城山トンネル	$V=43.3W^{0.5727}x^{-2.3063}$
横尾トンネル	$V=294W^{0.346}x^{-2.538}$

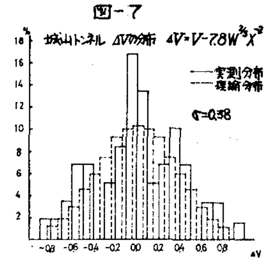
図－6



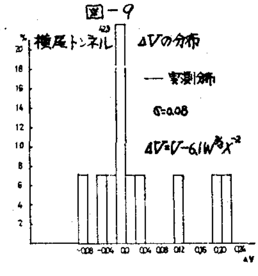
図－8



図－7



図－9



4. おわりに　以上発破振動を予測することの困難性について、二施工現場を例にとって述べた。信頼性の高い予測式を得るのが困難な現状では、試験発破あるいは計測を併行して施工することも必要であろう。

おわりに資料の作成をはじめ、種々の適切な御指導を賜わった中国地建太田川工事々務所、広島市水道局および神戸市交通局の皆様に深く感謝致します。