

(66) 原位置計測による地山一支保特性曲線の 1 事例

京都大学工学部 (正) 足立 紀尚 (正) 田村 武
神戸市道路公社 (正) 大野 公男
(財)大阪土質試験所 (正) 〇 岩崎 好規 (正) 本郷 隆夫

1) まえがき: トンネルにおける地山一支保特性曲線は、トンネル掘削における地山と支保工との相互作用を表わす基礎概念図として設計上もその重要性が認識されているが、原位置における事例研究は計測の困難さもあって数少ないのが実状である。

今回の報告は、神戸市道路公社の布引トンネルの風化花崗岩の約70mの土被り深さにおいて村山 朔郎博士によって提案された凍結岩ルーフ工法による道路トンネルの掘削工事において得られた計測結果についてより詳しく検討を加えたものである。

2) 布引トンネル: 本トンネルは、国鉄山陽新幹線新神戸トンネル直下を壁間15mの離間距離でもっての近接施工であったので、凍結岩ルーフ工法が採用されたが、そのため、事前凍結～掘削～支保工設置～凍解の施工サイクルのなかで、地山と支保工の挙動が明確に計測されていることに特徴がある。図-1 に計測位置図、図-2 に施工断面図を示した。

計測された諸量のうち、ここで議論の対象となるのは、岩盤変位と載荷土圧を評価するための支保工ひずみ計である。岩盤変位は、隣接構造物の新神戸トンネル直下の本トンネル天端附近の地盤挙動を計測するために、凍結工開始以前に設置したもので、凍結基地方から水平斜孔に挿入型独立連通管を12点、また地山地表面から垂直ボーリング孔に設置したワイヤー式extensometer (一般部(SA点)と凍結部(SB点))を用いて計測した。支保工ひずみ計は、建て込みピッチ0.75mで設置された200Hに軸力及びモーメントの評価が可能のように1点5成分のひずみ計測を2断面(凍結工区の始点から15mおよび30m)

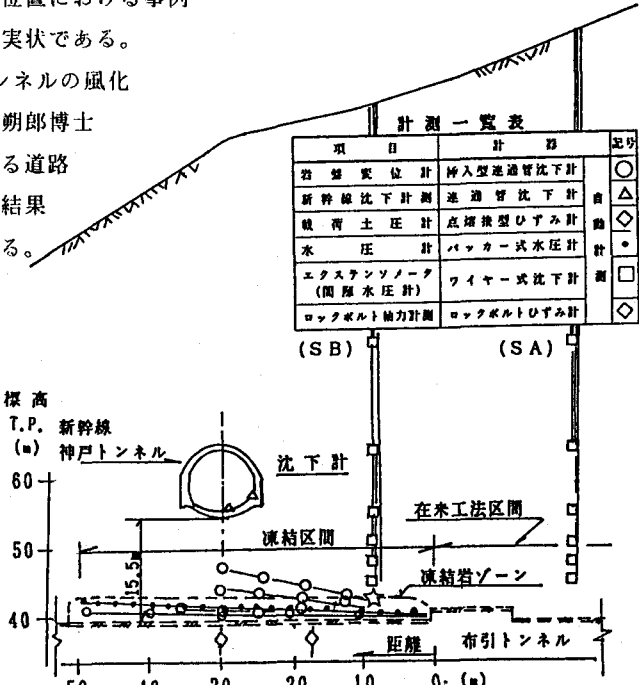


図-1 計器配置図

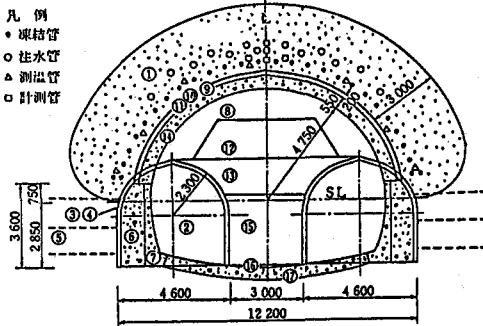


図-2 岩盤凍結ルーフ施工図

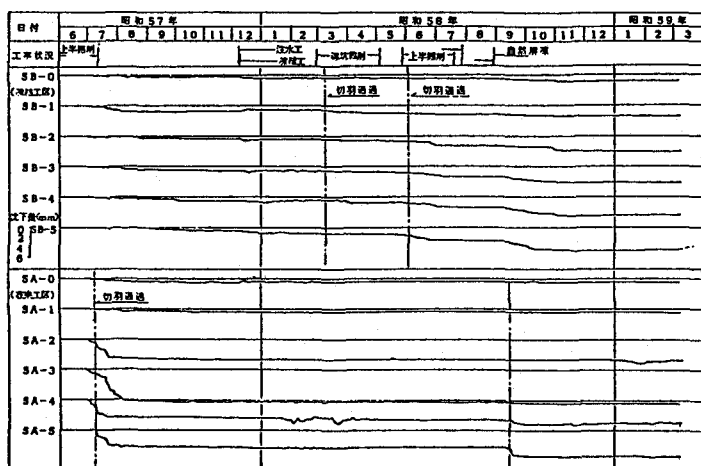


図-3 ワイヤ式エクステンソメーターによる岩盤沈下

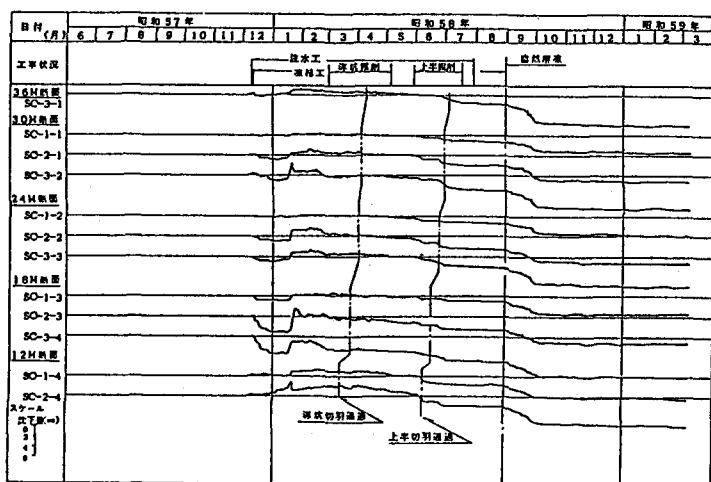


図-4 挿入型独立連通管沈下計による天端部の岩盤沈下

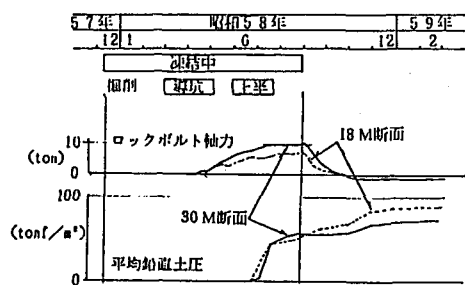


図-5 ロックボルト/土圧の経時変化

実施した。なお支保工ひずみ計測断面位置においては、側壁導坑部から施工したロックボルトの軸力の計測もあわせて行った。施工は、上半部分の凍結を行なってルーフ・アーチを形成せしめた後、側壁導坑を先進させ、ロックボルト工、側壁コンクリート打設の後に、上半リング・カット、支保工建て込み後、直ちに吹付コンクリートを打設し、中背、上半盤下げ、アーチコンクリート打設、大背、インバート部の掘削、コンクリート打設閉合の後、解凍という施工手順であった。3) 施工に伴うトンネル挙動の計測結果: 施工の進捗に伴う地山沈下、ひずみゲージの計測結果から推定された鉛直土圧、ロックボルトの軸力の経時変化を図-3～5に示した。

<側壁導坑掘削> 側壁導坑掘削時の地山変位は導坑切羽通過5～8m進行後、沈下が発生し通過後30m程度まで増加した。天端直上1.5m～2.5mの凍結ゾーンで0.4～2.0mmの沈下が見られた。

<上半掘削> 上半の切羽到達時点での天端凍結ゾーンでは、1～1.5mmの沈下が付随して上半掘削による最終沈下量は、1.8～2.5mmであった。側壁導坑掘削時にセットされたロックボルトの軸力は、上半掘削で6.0～9.5tf、又H鋼ひずみ計からの鉛直土圧は42～43tf/m²となった。

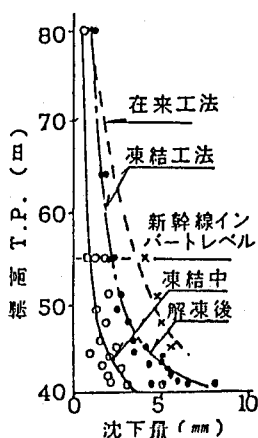


図-6 地中沈下曲線

<下半掘削>中背、大背の下半掘削時には大きな変化はなく、増加沈下量で0.8~1.3mm ロックボルト軸力、土圧で 7~11 tf, 49~57tf/m²とやや増大したのみであった。

<解凍>インパートコンクリート打設閉合後に、解凍を開始したが、それに伴って地山の沈下が発生し天端直上で約 6mmとなった。鉛直土圧は、解凍によってルーフ部のアーチで受けていた土圧が直接的に覆工に作用したため大きく増加し、77~97tf/m²となったことが計測結果から判明した。またロックボルト軸力は、解凍とともに減少していることが理解できるが、これは上述の応力再配分に従って、凍土アーチの基礎部分となっていた側壁背面部分の鉛直圧が減少したためである。

4)地山-支保工特性曲線: 以上の原位置計測の結果にもとずいて地山-支保工特性曲線を求めてみる。地山-支保工特性線は、2つの特性線(characteristic line)の組み合わせである。1つは、地山特性線でトンネル周縁応力とトンネル周縁変位の関係であるが、普通鉛直土圧と天端沈下量で代表させる。

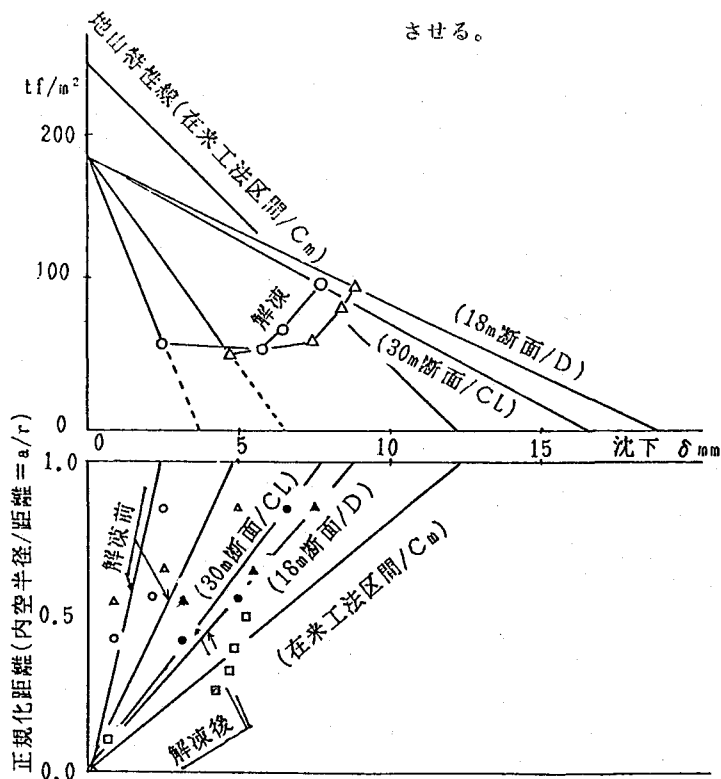


図-7 計測結果から推定される地山-支保工特性線

他の1つは支保工特性線で、支保反力と支保工の変形の関係であるが支保工の基礎地盤まで含めた鉛直支保反力特性である。図-6に沈下計測結果を横軸に正規化半径距離 (a/r ; a : トンネルの等価半径) をとって岩盤内の沈下分布を示した。ここで沈下分布が直線になる場合には、 δ が $1/r$ に比例していることになり、無限円孔に等方外力 P 、円孔内圧 P_i が作用している時の変位分布状況に等しい。この時の変位 δ は次のように表わされる。

$$\delta = ((1 + \nu)/E) * (P - P_i) * a(r) \quad \dots \dots \quad \textcircled{1}$$

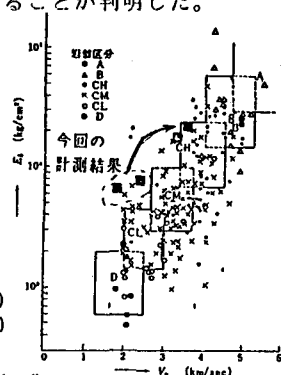
ここで E:地山の弾性係数, P,等方外力(=土被り圧 $2.5\text{tf/m}^3 * 70\text{m} = 175\text{tf/m}^2$), (r;トンネルの半径距離) さて, 計測された18m, 30m断面, 在来工法断面(土被り高さ;約95m)及び凍結岩ルーフの場合の地山特性線を図-7に示したが, この図の特性線の勾配と土被り圧から①式によって地山の等価弾性係数を求めることができる。このようにして求めたものをこれらの地点での実測あるいは推定される弾性波速度とともに表-1に示した。既往の文献からと本現場で得られたEb(孔内載荷試験から評価された地山弾性係数)と特性線から評価されたEを 図-8に示した。地山特性線に整合するEはEbと比較して良く似た傾向にあるが数倍高い値になっていることが分かる。支保工の特性線は, 解凍直後に鉛直土圧が一定のままですぐ2~3mmの沈下が発生しその後支保工反力係数25~50tf/m²/mmで増加荷重を受けながら1~2mmの沈下が発生している。別途行ったFEM解析によれば, 支保工反力係数として40tf/m²/mm程度の値が得られておりこの後半の立ち上がりの勾配に相当している。このことから推定すると, 解凍直後に発生した沈下は解凍に伴って側壁部背面および基礎地山が軟化すると共に応力の再配分によって生じた1種の緩み変位であると考えられ, この緩み変位の占める支保工特性線の勾配への寄与は無視しえないものである。

5)結論:風化花崗岩のC~Dクラスの布引トンネルの凍結工に際して得られた地山-支保工特性曲線から① 地山特性線に整合する等価弾性係数は, Vp~Eb関係から得られるものよりやや高いが良く似た傾向にある。また支保特性線については地盤との緩みも相当寄与していることが判明した。

表-1

計測断面	弾性波速度 Vp(km/sec)	岩盤等級	等価弾性係数 E (kgf/cm ²)	変位量 δ (mm)
凍結 18M	1.8	D	6.3×10^3	19.4
工区 30M	2.5	CL	7.0×10^3	16.4
凍結時	3.5		$28.8 \sim 17.8 \times 10^3$	4~6.5
在来工法	3.0	CM	13.3×10^3	12.2

図-8 弾性波速度とボーリング孔内変形係数 Ed(kgf/cm²)
(土質工学会編 岩の工学的性質と設計, 施工への応用)



参考文献

- ① S.Murayama,etal "Tunneling through weathered granite roofed by freezing"
Proc.of the ISRM, Tokyo, Sept. 1981 PP.1039~1044
- ② 村山,大野, "風化岩中のトンネルに対する凍結工法の概要性" 土木学会編 1981年9月 PP.25~30
- ③ 田中,村山,大野, "布引トンネル新幹線直下交差部凍結岩ルーフ工法・1 予測と設計"
第39回土木学会年次公演会, 1984年10月 PP.399~400
- ④ 内田,衣笠,山口, " 同上・2 施工" 同上 , 1984年10月 PP.401~402
- ⑤ 後藤,村山,谷口, " 同上・3 注水凍結工法" 同上 , 1984年10月 PP.403~404
- ⑥ 本郷,甲斐,岩崎, " 同上・4 計測" 同上 , 1984年10月 PP.405~406
- ⑦ 足立,大野,田村, " 同上・5 シミュレーション" 同上 , 1984年10月 PP.407~408
- ⑧ 村山,大野, "布引トンネルにおける凍結岩ルーフ工法の設計,施工" 土木学会誌,1984年12月 PP.51~58
- ⑨ S.Murayama,etal "Behaviour and Simulation of weathered granite tunnel roofed
by freezing" Proc.of the International Conference on Numerical
Methods in Geomechanics. Nagoya, April 1985 PP.1119~1126
- ⑩ 村山,大野,足立,岩崎, "岩盤凍結ルーフ施工における現場計測工法" 土質工学会
土の凍結に関するシンポジウム 1986年2月 PP.59~66

(66) Case Study on a Characteristic line determined by In-situ Measurements

Kyoto Univ. dep. of civil T.Adachi, T.Tamura

Kobe Local Public Road Corp. K.Ohno

Geo • Research Inst. Y.Iwasaki, T.Hongo

The authors present a case study of tunneling characteristic lines determined by field measurements of ground settlements and tunnel support loads during and after the excavation of Nunobiki tunnel in Kobe.

The site geology is weathered granitic rock with V_p from 1.8~3.0 km/sec.

The estimated elastic moduli obtained by the ground characteristic lines are found to correspond to the highest portion of the scattered relationship between the V_p and the moduli by the bore hole load tests in the past reported data.

The supporting characteristic lines are found to be greatly affected by the vertical load reaction characteristics of the foundation ground.