

神戸市道路公社 ○正会員 田中 総
京都大学名誉教授 正会員 村山 朔郎
神戸市道路公社 正会員 大野 公男

1. まえがき

山麓バイパスの布引トンネルは、山陽新幹線神戸トンネルの直下15^mで近接交差する。このため、神戸トンネルの沈下をほとんど皆無にする目的で、風化岩盤を凍結させて、その凍結岩ルーフの保護のもとにトンネルを掘削するという、従来に例のない新しい工法を採用して工事を施工した。工事は、昭和57年8月に準備工事を開始、昭和58年8月末に掘削、覆工を終えて解凍を開始し、翌59年2月末には解凍を完了したが、神戸トンネルの沈下量は2.5^mであり、当初の予想どおりこの新しい工法の確実性、通用性を実証した。

本文は、この工法の適用の足掛りとなった試験工事の概要、試験工事に基いた本工事での予測と設計の概要について報告するものである。

2. 試験工事の概要

試験工事は、昭和54~55年にかけて、本工事箇所と土振りおよび岩質の類似している、新神戸トンネルの布引地下換気所通路トンネルを利用して行った。この内容は、図-2に示すように掘削面上部にアーチ状の凍結層を設け、凍結層のルーフの保護のもとに、間口3^m、高さ2^m、奥行12^mの試験坑を掘削し、地山内に設けた各種の計測装置を用いて、地山の力学特性、変位量等を計測するものである。この試験工事によって得られた結果は次のとおりである。

(1) 凍結前後の岩石または岩盤の力学特性

a) P波調査

図-3にボーリング孔を用いて行った凍結前後のP波調査の結果を示す。図でみられるように、P波速度は凍結前に比べ凍結時には約2.25倍となり、ガツ、ばらつきが少く均質になっている。

b) 弾性係数

地山の弾性係数は、凍結前はボーリング孔を利用した孔内載荷試験、凍結後は試験孔の天端を対象とした平板載荷試験によって測定した。試験の結果得られた弾性係数は、凍結前に比べて1.3~5.0倍となっており、凍結によって地山の剛性が増加していることが判明した。

c) 一軸圧縮試験

エフステンソメータ設置用ボーリング孔削孔時の凍結岩のコアを、試験温度を変えて一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮強度と弾性係数は、図-4に示すように、試料温度が低温になるに従って大きくなった。-10℃のコアの強度は108.3~291.0^{kgf/cm²}であり、常温の26.5~94.5^{kgf/cm²}に比べ3~4倍程度増加していることがわかった。

(2) 地山の変位

a) 凍結に伴う地山の変位

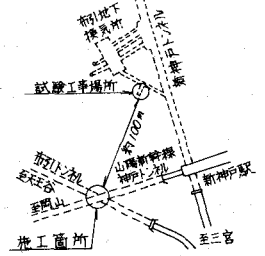


図-1 位置図

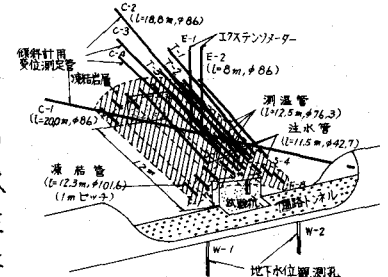


図-2 凍結試験工事模式図

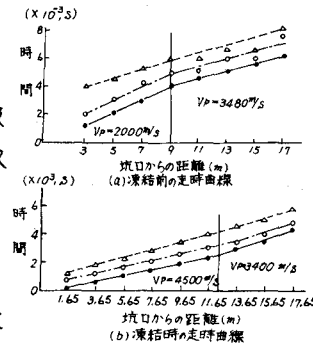


図-3 P波調査

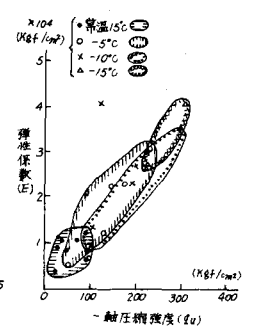


図-4 一軸圧縮試験

凍結開始から試験坑の掘削開始までの間、地山の変位はまったく認められなかったことから、凍結岩の成長に伴う地山の膨張は生じなかったといえる。

b) 掘削の進行および解凍に伴う地山の変位

試験坑の中央部付近で、エクステンソメータおよび傾斜計を用いて、鉛直方向の地山変位量を測定した。この結果を図-5に示す。掘削天端から0.5^m上方の変位量は、掘削完了時は約4^{mm}、解凍後は約6^{mm}である。また、変位の及ぶ範囲は、凍結中の掘削完了時は掘削天端より上方へ約2.5^mであったが、解凍完了時は約8^mに増大した。

3. 本工事の設計と変位の予測

(1) 凍土厚さの決定

試験工事の結果から、凍結岩は、均質で、弾性係数で 2.5×10^5 ㎏/㎠、一軸圧縮強度で200^{kgf}/㎠程度と、コンクリート並みの強度を有することゝわかった。このことから、簡略に、凍土の曲げ剛性に着目してコンクリート換算厚を求める。 $E_f I_f = E_c I_c$, $I_f = b h_f^3 / 12$, $I_c = b h_c^3 / 12$, ここに、 E_f : 凍結岩の弾性係数 (2.5×10^5 ㎏/㎠), E_c : コンクリートの弾性係数 (2.0×10^6 ㎏/㎠), いま、凍土厚 h_f を3^mとすると、上式より $h_c = 1.5$ ^mとなり、凍土厚3^mはコンクリート厚さに換算すると1.5^mに相当すると考えることができる。したがって、凍土厚3^mは土被り70^mの全荷重 (約175^{kgf}/㎠) が作用しても強度的に問題ははいと考えた。

(2) 変位の予測

試験工事の結果から本工事の地山変位を予測することは厳密には難しいが、ここでは簡略化して、掘削に伴う地山変位はトンネル掘削幅に比例するものとして予測した。

本工事のトンネル断面は図-6に示すものであり、掘削幅は試験坑の約4倍である。したがって、本工事での掘削後 (凍結時) の地山変位は、図-5の①の曲線を用いて、図-7の①の曲線として求めることができる。次に、解凍に伴う地山変位を求める。試験工事では覆工コンクリートを施工しはいて解凍を行なったが、本工事では覆工コンクリート完了後に解凍を行う。ここでも簡略化して、解凍に伴う覆工コンクリートの変形は無視できるものとし、地山の変位量は地盤の弾性係数が凍土から元の地山に戻るための弾性変形と考えると、地山変位量 $\delta = h \cdot P \cdot (1/E_0 - 1/E_f)$ 、として求めることができる。ここに、 h : 凍土厚 (3^m), P : 地山荷重 (175^{kgf}/㎠), E_0 : 解凍後の弾性係数 (80^{kgf}/㎠), E_f : 凍結時の弾性係数 (2.5×10^5 ㎏/㎠), これより求めた変位量 δ は45^{mm}であり、解凍に伴って布引トンネル天端から上方3^m付近で4.5^mの沈下を生じる。この結果に基づいて解凍後の変位曲線を求めると、図-7の②の曲線のようになる。以上より、布引トンネルを施工した場合の神戸トンネルの沈下は、凍結時にはほとんど生じず、解凍後の最終沈下量が2^m程度と推定した。

4 おわりに

この工事にあたって国鉄当局と協議した結果、新幹線神戸トンネルの許容変位量は3^{mm}以下という厳しいものであったが、許容値以内で無事工事を完了することができた。これは、この工事に関係した方々の力に負うところであり、厚くお礼申し上げます。

参考文献 1) 村山、大野: 風化岩中のトンネルに対する凍結工法の適用性 土木学会誌 1981. 9.

2) 増田、岩浪: 凍結工法適用の多角化 トンネルと地下 1981. 6.

- ①—傾斜計測定結果 (掘削完了時, 555.5.6.)
②—傾斜計測定結果 (解凍完了時, 555.5.19)
③—エクステンソメータ測定結果 (解凍完了時, 555.5.17)

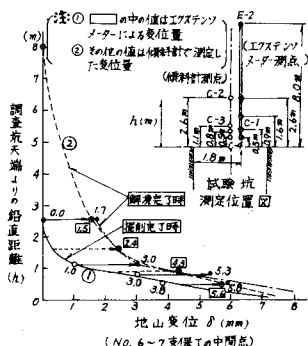


図-5 鉛直方向の地山変位 (試験工事)

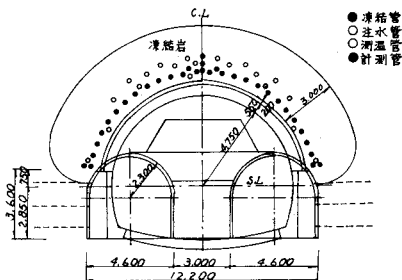


図-6 凍結岩ルーフ工法横断面図

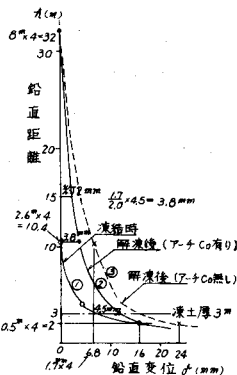


図-7 鉛直方向の地山変位 (本工事)