

III-B 145 凍結膨張による既設シールドトンネルの変形と膨張圧の推定

日本鉄道建設公団 大阪支社 正会員 小島月男
 鉄建建設 大阪支店 正会員 芝岡竹雄
 精研 技術本部 正会員 ○松岡啓次

1. はじめに

片福連絡線御幣島中間換気所接続工事において凍結工法が採用され、トンネルの内空変形及び水平・鉛直変位が測定された。一般に凍結膨張圧を直接測定するのは困難であるので、今回トンネルの変形量及び水平・鉛直変位量の計測結果から、セグメントにどの程度の凍結膨張圧が加わったかを推定した。膨張対策工としては、開口部補強桁及び変形防止工を設置した。

2. 工事概要

工事の概要は、図1、2のように上下2本のトンネル及び換気所立坑間を鉛直及び斜打凍結管により凍土壁を造成し、その内部を掘削し、構築するものである。

3. トンネル内空変形量及び変位量の測定結果

トンネルの内空変形量及び水平・鉛直変位量の測定位置を図1、2に示す。例として断面D1の内空変形量の経時変化を図3に、掘削開始前（凍結開始後48日目）の断面D1、U1の内空変形量①～③、水平・鉛直変位量を表1に、測定値による変形のイメージを図4に示す。

4. 凍結膨張圧の推定

図4の変形・変位量は、セグメント取外し前でほぼ最大値であったので、この時点での凍結膨張圧を推定する。

4-1 内空変形量の温度変化による補正

セグメント背面に埋込凍結管が取り付けられ、セグメントの温度降下による収縮が考えられる。ブライン及びトンネル内温度からセグメントの平均温度降下は、上下線で各々約27℃、34℃と推定され、温度降下と線膨張率からセグメント周長に対する収縮量が求まる。セグメントが同心円の縮みとすれば、内空変形量は上下線で各々約2mm、3mm収縮した状態で測定される。従って、膨張圧のみによる内空変形量を補正すると、図4、表1の()内の値となる。膨張圧の推定はこの補正值を用いた。

4-2 計測値から推定した膨張圧の荷重発生位置

図4の内空変形量及び変位量からトンネルにかかる膨張圧は、鉛直凍土壁側からトンネル全体を押す水平荷重 F_A と下り線の変位により発生する F_D があり、斜打凍結管の凍土壁側から凍土厚みの幅で押す局所荷重 F_B 、 F_C 、 F_E の2種類があると推定される。上部からの荷重は、凍土が軟弱粘土層にあり膨張量は大きい、膨張圧は小さいと考えられるので無視した。

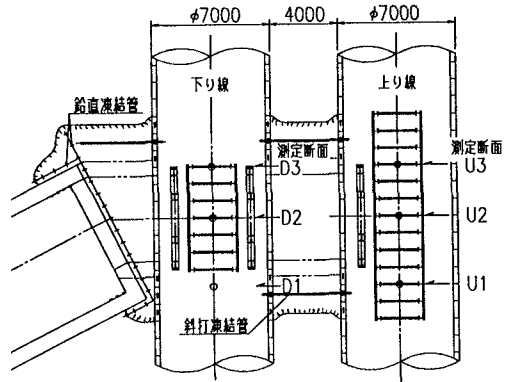


図1 平面図

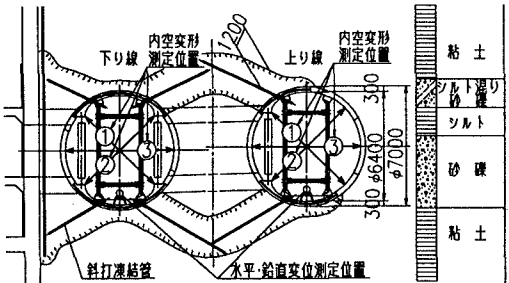


図2 断面図

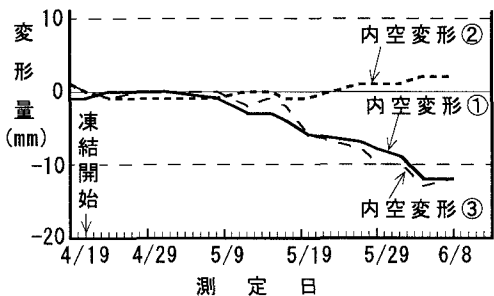


図3 D1断面の内空変形量の経時変化

4-3 単位膨張圧による内空変形量、変位量

セグメントを剛性梁とし、地盤バネで支持するモデルで考える。図4の荷重 $F_A \sim F_E$ の合成により変形、変位が生じると考えると、表2に示す6種類のモデルとなる。各モデルで単位膨張圧（1 ton/m²）をトンネルに載荷すると、その変形量と変位量を表2に、計算に使用した材料定数を表3に示す。横断モデルではセグメントの変形とそれによる水平・鉛直変位が発生する。縦断モデルでは、トンネル軸方向の凍結域（11 m）の膨張圧によりトンネル全体が移動変位する。

4-4 膨張圧の推定式と計算結果

上り線ではモデル1～4、下り線ではモデル1～6を用い、各々荷重（＝膨張圧）による変形量、変位量及び表1の測定値から、例えばU1断面の内空変形①は、

$$0.197 \cdot F_D + 0.359 \cdot F_E = 9$$

のような連立方程式が立てられる。

計算の結果、膨張圧の推定値とその平均値を表4に示す。下り線では、D1に比べD3断面の凍土量が多く、全体に膨張圧が大きい。又、上り線の F_D は、下り線トンネルにより緩和された為、トンネルへの荷重は小さくなった。計算による推定値は、多少のばらつきがあるが、測定誤差の1mmが膨張圧の1～2 ton/m²程度に相当することから、この推定値はほぼ妥当な値と考えられる。

5. まとめ

トンネル内の変形量、水平・鉛直変位量から凍結膨張圧を推定した。

鉛直凍土による膨張圧 F_A は平均で約11 ton/m²、斜打凍結管による膨張圧は、平均で約12 ton/m²、 F_D を除く全体の平均膨張圧は、約12 ton/m²と考えられる。

最後に、本工事の施工及び計測に御尽力された方々に紙面を借りてお礼申し上げます。

表1 内空変形量と変位量の測定値

()内：温度補正値、（単位：mm）

内空変形：+は内空増加、水平変位：+は右、鉛直変位：+は上

測定断面	D1	D2	D3	U1	U2	U3
内空変形①	-12(-9)	-9(-6)	-8(-5)	+7(+9)	+1(+3)	+1(+3)
〃 ②	+2(+5)	+3(+6)	+3(+6)	-13(-11)	-7(-5)	-6(-4)
〃 ③	-12(-9)	-14(-11)	-9(-6)	-6(-4)	+2(+4)	-7(-5)
水平変位	+2	+4	+4	+5	+6	+7
鉛直変位	+10	+8	+12	+3	+3	+5

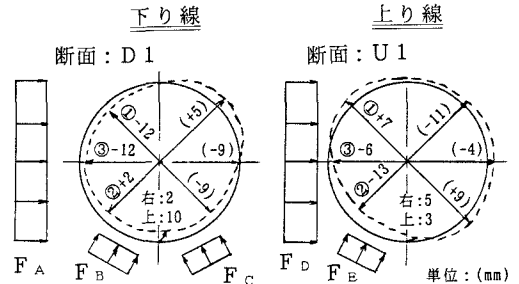


図4 D1、U1断面の内空変形量と荷重位置

表3 材料定数

	単位	横断	縦断
地盤バネ係数	(ton/m ³)	2.5・10 ³	
セグメントの線膨張率	(-)	1.1・10 ⁻⁵	
セグメントの弾性係数	(ton/m ²)	1.7・10 ⁷	
セグメントの断面2次モーメント	(m ⁴)	1.72・10 ⁻⁴	0.588
セグメントの断面積	(m ²)	2.37・10 ⁻²	0.105

表4 凍結膨張圧の計算結果（単位：ton/m²）

	D1	D2	D3	U1	U2	U3	平均
F_A	8.9	12.0	13.0	---	---	---	11.3
F_B	2.7	1.9	9.3	---	---	---	4.6
F_C	17.9	15.5	21.9	---	---	---	18.4
F_D	---	---	---	5.4	0.3	2.6	2.8
F_E	---	---	---	17.2	9.1	8.5	11.6

表2 解析モデルと凍結膨張圧1 ton/m²当たりの荷重による変形量及び変位量（単位：mm）

荷重	モデル1 (横断) $F_A, F_D: 7m \times 1m$	モデル2 (縦断) $F_A, F_D: 7m \times 5.5m$	モデル3 (横断) $F_B, F_E: 2m \times 1m$	モデル4 (縦断) $F_B, F_E: 2m \times 5.5m$	モデル5 (横断) $F_C: 2m \times 1m$	モデル6 (縦断) $F_C: 2m \times 5.5m$
モデル						
内空変形①	+0.197	---	+0.359	---	-0.612	---
内空変形②	+0.197	---	-0.612	---	+0.359	---
内空変形③	-1.152	---	+0.150	---	+0.150	---
水平変位	+0.855	+0.274	+0.300	+0.039	-0.300	-0.039
鉛直変位	-0.446	0	+0.370	+0.068	+0.370	+0.068