

地盤凍結の理論と実際

京都大学 正員 村山 朔郎
 東京都 正員 岡本 隆三
 “ 池原 透
 “ 〇正員 伊藤 良行
 精研冷機KK正員 高志 勲

(まえがき)

東京都営地下鉄1号線金杉工区に於いて、古川河底の横過を凍結工法にて施工しているが、地下鉄工事(以後本工事と記す)の着手前に現地に於て深礎の試験凍結を行い種々の実験を実施した。この資料を基にして本工事を進めており、現任一部の構築をしている。本文では金杉附近の地盤凍結速度、温度分布等について記述する。

(試験凍結について)

試験方法 図-1の様に長さ20mの凍結管(φ1060)を地中に埋込み、この中に -20 ± 1 ℃の塩化カルシウムブラインを循環させ、各深度に埋込んであるサーミスターにより地中温度等の変化を測定した。凍結管の傾斜は1.4~0.3%であった。測温管については確認出来なかつた。

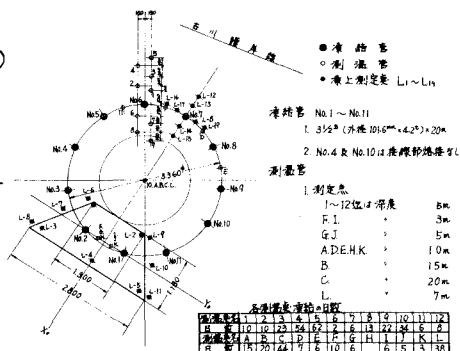


図-1 深礎配管平面図

測定結果及び考察

凍結前の地中温度は図-2の様な分布をしており、一般的な地中温度の分布とかなり異なっている。温度の降下状況、温度分布、凍結の進行状況についての測定結果は図-2~図-6のとおりである。

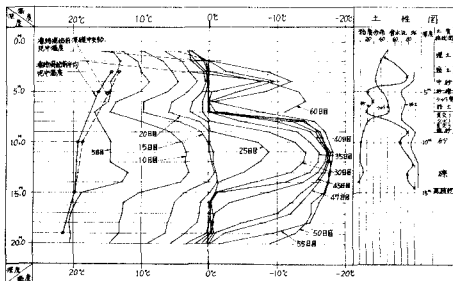


図-2 中央深度別温度降下図

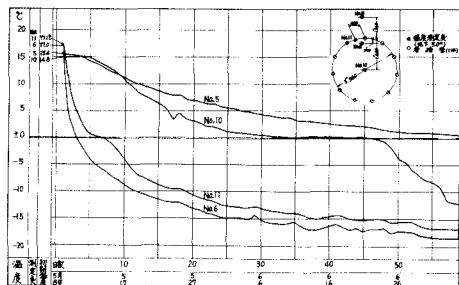


図-3 温度降下図

凍結速度について、深度5Mの位置に埋込んである測温点を凍結管群の内方向、外方向の二つに分けて考える。各測定点の凍結管からの距離を横軸に、温度を縦軸にとって地中温度勾配を求める。この温度勾配から曲線が0℃の線と交わる点を凍結面の位置とした。この様にして求めたのが、図-4の実測値である。理論値についての求め方は次の様にした。単管の場合は下記式から求まる。

$$k\theta_c \left[\frac{\partial F(k_1, a; r, t)}{\partial r} \right]_{r=R} + k_2 \theta_\infty \left[\frac{\partial F(k_2, a; r, t)}{\partial r} \right]_{r=R}$$

$$= L\rho_1 \left[\frac{\partial F(k_1, a; r, t)}{\partial t} \right]_{r=R}$$

(高志著、土壤凍結工法より引用)

これに、凍結管相互の干渉を次の様に考慮して求めたものが図-4の理論曲線である。まづ内方向については凍結管が960%の間隔で並んでおり、互いに他の1本に影響を与えるとす。このとき、凍結方向は凍結管の中心線を結ぶ線上にあるが、内方向もほぼ等しい(Lord Kelvinの線熱源干渉理論、Carslaw, Jaeger Heat Conductionより)ことが説明出来る。(厳密には等しくない)。単管の場合無限遠点の地中温度 $\theta_\infty = 18^\circ\text{C}$ として凍結面を求めているが、 θ_∞ が他の1本の影響により何度か下り、そのために凍結速度がはやまるものとした。又外方向については、3360%の間隔で2本の凍結管が並んでいるものと考えた。図-4をみると、内方向、外方向ともいづれも実測の結果は理論値を大きく上廻っている。単管の理論値に対する割合が図-4の干渉率曲線である。干渉を考慮した値と比較してみると、内、外方向の増加割合は20日目以内方向は約1.5、外方向は約1.7倍となっている。内方向の凍結進行が20日目以降更に速くなっているのは、凍結が進むにつれ、未凍結域の直径が小さくなり、相互干渉が増したためであらう。干渉を考慮した理論値に対し、外方向の増加の割合が内方向のそれに比べ大きく出ているが、凍結管が3360%間隔で並んでいるものとして求めたのに対し、実際には、960%離れた処にも凍結管があり、これら隣接凍結管の影響が大きく影響しているためと思われる。

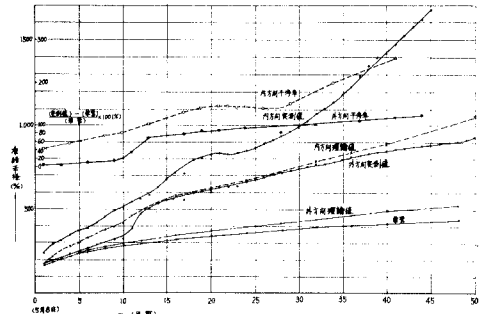


図-4 凍結面進行曲線

地中温度分布について、深度5Mに埋込んだ測温点の測定結果を図-5、6に示す。又 $\theta_\infty = 18^\circ\text{C}$ 、 $P=0.6$ として求めた理論値と、実測の結果の温度分布を図-7に示す。これからも温度の降下が理論値よりも早く進んでいることがわかる。内方向をみると、9日の温度分布は、理論値の36日の温度分布となっている。外方向では、9日目までは理論値と全く合致しているが、36日の温度分布は、理論値の73日以降の温度分布の状態になっていることを示している。図-4と合せて考えると、隣接管の影響が10日頃から顕著になって来ているのではないかと推定される。図-2から深さにより、温度降下の状況に著しい差が認められるが、これは土質による温度伝播率の違いによるものと思われる。含水比の小さい部分が温度降下が速い様である。図-5、6から凍結管からある距離以内の温度分布は直線的に変化し、この距離は凍結継続時間が長くなる程、遠くなる様である。実際に凍結工法を大

規模な工事に採用する場合、測温点を無数に設けることは困難である。従って地層別に必要凍土厚の確認出来る位置に温度計を設置しておき、その点の温度が氷点下になった後の凍結面は、凍結管（ブライン）温度と測定値との比例で推定してもよい様に思われる。

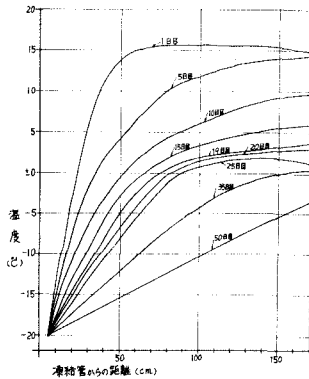


図-5 A(内)方向温度分布図

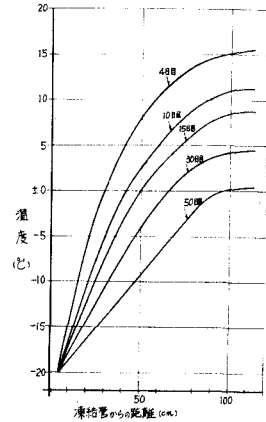


図-6 B(外)方向温度分布図

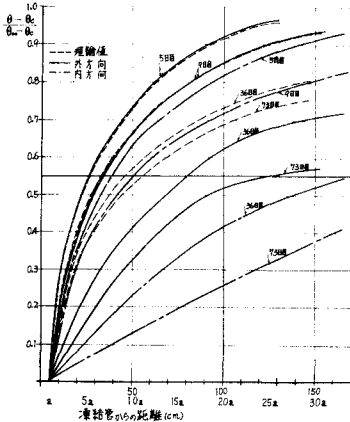


図-7 温度分布の理論値と実測値の比較

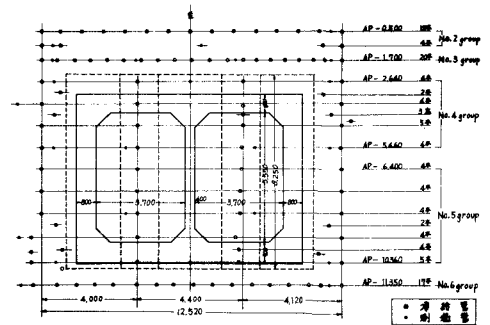


図-8 本工事に於ける凍結管・測温管の配置図

(地下鉄工事について)

当金杉工区に於いては、凍土壁を外力に抵抗させる考えなので、凍土壁の成長状況等を正確に把握する必要がある。試験凍結の結果、このためには測温点を地層の変化に応じて設ける必要を認めたので、図-8の如く約100点の測温点を設けた。この測温点の測定結果から各点の温度が0℃となるまでの時間の遅速を、理論値及び試験凍結の結果との比較が下の表である。

測温点 番号	又	ル	オ	ワ	カ	ヨ	予-5	予-6	J	K	L	M	N	O	P	予-5	予-6	予-7
	A						B						C					
凍結までの日数	12	13	4	9	8	6	49	11	13	8	11	6	12	12	(-2)	49	61	68
実凍結面	600	700	500	500	500	500	250	275	450	500	500	600	500	500	1,000	266	500	500
単管理論値	360	370	200	330	325	300	600	350	370	325	350	300	360	360		600	650	670
干渉を考慮値	460	480	270	405	390	340	960	420	480	390	420	340	460	460		960		
試験凍結の結果	580	620	390	501	480	430		560	620	480	560	430	580	580				

この表から、No. 4、5グループの内側（構築方）への凍結は理論値と同じか、それより早く進んでいる。然し、No. 6グループでは、単管の理論値よりも大きく遅れている。これは地下水の局部的流動によるものと考えられる。これら温度降下の長くない箇所から漏水があったので、これを兼液注入（L.W. C.W.）して止水したら、凍結は急激に進行した。

次に、外側への凍結進行状況をみると、Pが極めて早く凍結しているが、これは河底に設置した断熱凍結板の影響によるもので、平板冷却による理論計算値とよく合致する。他の点は、単管の理論値と同じか、やや遅い程度である。これだけ多くの凍結管を配置してあるのだから、干渉がかなりあるはずである。この事を考えると外側への凍結の進行は遅れていることになる。これは、凍土壁の外側に沿って、地下水が堅坑へ流動（浸透）したためであらう。温度の降下が思わしくない所は、この附近に漏水があり、これに兼注したら、

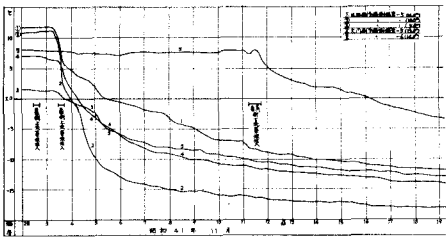


図-9 兼注後の温度降下の状況

やはり、温度の降下が認められた。この関係を図-9に示す。温度分布についてみると、No.3グループまでは、左岸の方が右岸の方より温度降下が早い。又当然ながら、上下流の境が中央より温度降下が遅い。これは主として地層の違い、施工の順序の影響によるものと思う。同一レベル、土質が同じでも、堅坑からの距離に従い温度分布が大きく変化している場合もある。（図-10）この様な状況は、

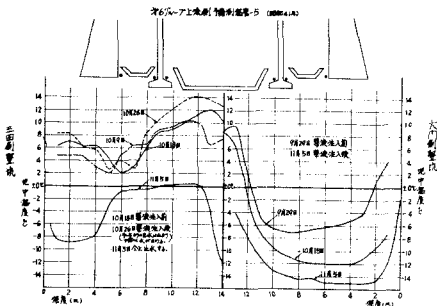


図-10 深度（堅坑からの）別温度分布図

確認試験を行う必要がある。（4）凍結途中で水が動くことは出来るだけさける方がよい。（5）地中温度の測定点の設置、測定は慎重に行う必要がある。終りに本工事の施工に努力されている西松建設K.K.、精研冷機K.K.の諸氏に謝意を表すると共に、特に本稿のための資料の整理に協力された、精研冷機K.K.谷口、杉田氏に厚く御礼を申し上げます。

凍結管設置のための水平ホーリング中に出水をみたが、その場合よくみられた。これはやはり、局部的な水の動きによるものであろう。凍結工法を採用する時には、特にこの点に留意して設計することが重要である。

（結 び） 試験凍結及び本工事から温度の分布等について次の様な事が言える様である。

- (1) 凍結は水（地下水）の動きさえなければ、理論値より非常に早く進む。
- (2) 土質の状況により地中の温度分布に大きな差異がある。
- (3) 伏流水のありそうな場合は、予め凍結するかどうかの確