

凍上量簡易予測方法の提案

(株)西村組 正会員 ○佐藤佳誉
北海道大学 正会員 赤川 敏

1. はじめに

北海道のような寒冷地域では、地盤の凍上によって道路に亀裂や不陸が生じるなどの被害が数多く発生し、これらの凍上対策工法として一般的に置換工法が採用されている。置換工法における置換の必要性や置換深さは、一般に土の凍上性や凍結深度を基準にして決められているが、実際には地盤の土質によって凍上性が異なるので、現地に適した凍上対策の決定には、対象となる場所の凍上量の定量的な予測が理想的である。そこで今回、過去の実験データや比較的容易に得られる諸物性値などを利用して、凍上試験を実施せず簡易的に現地の凍上量を予測する方法を提案する。

2. 凍上量簡易予測方法

(1) 対象地盤断面の各構成材料の物性値調査

対象断面を構成する各材料の土質試験結果から、土粒子密度、含水比、単位体積重量、コンシステンシー特性、粒度特性などを調査する。

(2) 実験定数 (ξ_0 、 σ_0 、 U_0) の決定

凍上率 ξ は一般に次式のように定義される。

$$\xi = \Delta H / H \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 H は凍上前の層厚、 ΔH は凍上量。

地盤の凍結に伴う凍上率は高志等により次式のように表せる。

$$\xi = \xi_0 + \sigma_0 / \sigma (1 + \sqrt{U_0 / U}) \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 σ は載荷応力、 U は凍結速度、 ξ_0 、 σ_0 、 U_0 は実験定数である。

これら実験定数は凍上試験¹⁾により求められるものであるが、例えば表-1 のような過去の凍上試験データを参考にして、(1) で調査した諸物性値と参考データの物性値とを比較し、これらが近似している試料の実験定数を推定することもできる。

(3) 日平均気温の入手

日平均気温を沿線の気象観測所 (AMeDAS) から入手。

(4) 積算寒度の算出

積算寒度の計算方法は様々あるが、ここでは日平均気温が負の温度を記録した日からの日平均気温を累計する。また、その最大値を凍結指数とする。

(5) 凍結深度推定式における係数 C の決定

凍結深度は、式 (3) で示す修正 Berggren の式を

表-1 土性値一覧表²⁾

土質	試料番号	土粒子の比重	自然状態			コンシステンシー特性			粒度特性			凍上特性					
			含水比 (%)	単位体積重量 (g/cm ³)	孔隙率 n	液性限界 WL (%)	塑性限界 WP (%)	塑性指数 IP	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	D ₅₀ (mm)	ε ₀ (kg/cm ³)	σ ₀ (mm/hr)	U ₀	n	σ ₀ /U ₀
砂質土	S-1	2.727	35.6	1.865	49.6				72.0	16.0	12.0	0.15	0.004	0.0029	1560	0.400	0.079
	S-2	2.780	26.8	2.020	42.7				60.0	35.5	4.5	0.088	0.0005	0.0010	0.560	0.383	0.0007
	S-3	2.719	25.5	1.771	48.1				78.0	10.0	10.0	0.20	0.0010	0.0010	1892	0.244	0.043
	S-4	2.669	19.9	1.680	47.5				76.0	26.0	0.0	0.085	0.0002	0.019	1	0.153	0.019
	S-5	2.664	41.3	1.750	54.0				89.0	11.0	0.0	0.11	0.001	0.0006	3192	0.189	0.107
	S-6	2.614	29.2	1.760	47.9				50.0	41.0	9.0	0.11	0.0025	0.004	272	0.3	0.066
	S-7	2.702	32.8	1.890	47.6				80.0	9.0	11.0	0.125	0.0025	0.0112	147.4	0.17	0.136
	S-8	2.618	34.8	1.860	47.2				67.0	25.5	7.5	0.15	0.004	0.011	407	0.178	0.222
	S-9	2.653	29.2	1.760	48.7				83.5	14.5	0.0	0.22	0	-		0.267	
	S-10	2.665	36.2	1.766	51.3				87.0	13.0	0.0	0.14	0	0.007	25	0.356	0.035
	S-11	2.646	31.0	1.887	38.9				95.0	5.0	0.0	0.2	0	-		0.472	
	S-12	2.685	35.0	1.843	49.2				95.0	5.0	0.0	0.26	0	-		0.383	
	S-13	2.636	33.4	1.783	49.3				80.0	17.0	3.0	0.17	0.004	0.012	23.4	0.467	0.058
	S-14	2.675	26.0	1.881	49.3				85.0	14.0	1.0	0.25	0	-	5.54	0.378	0.04
	S-15	2.728	31.8	1.803	49.1				91.0	9.0	0.0	0.27	0	-		0.372	
	S-16	2.663	25.8	1.900	43.3				91.0	5.0	4.0	0.22	0	0.008	25	0.406	0.03
	S-17	2.688	27.5	1.910	44.3				92.0	5.0	3.0	0.23	0	0.002	272	0.356	0.033
	S-18	2.777	17.5	2.011	38.4				82.0	13.0	5.0	0.25	0	0.002	702	0.533	0.053
	S-19	2.724	17.5	2.067	35.5				78.0	15.5	6.5	0.18	0	0.004	600	0.289	0.098
	S-20	2.729	23.5	1.960	40.9				88.0	8.0	4.0	0.24	0	0.004	36	0.35	0.024
S-21	2.764	19.5	2.040	38.0				85.0	9.0	6.0	0.27	0	0.005	144	0.294	0.06	
S-22	2.671	9.5	1.951	37.7				97.0	3.0	0.0	0.35	0.0005	0.006	11.67	0.372	0.02	
S-23	2.759	8.9	2.000	33.5				99.0	1.0	0.0	0.24	0	0	0	0	0	
S-24	2.774	9.2	2.041	32.6				95.0	5.0	0.0	0.36	0.002	0.0025	4.49	0.378	0.005	
粘性土	C-1	2.716	39.8	1.774	53.3	42.2	23.2	19.0	27.0	53.5	19.5	0.042	0.008	0.012	2.45	0.356	0.019
	C-2	2.719	71.3	1.592	65.8	86.9	39.6	47.3	14.0	49.0	37.0	0.015	0.005	0.034	115.2	0.611	0.365
	C-3	2.647	58.8	1.620	61.5	68.1	38.1	30.0	6.0	71.0	23.0	0.02	0.005	0.01	104	0.678	0.102
	C-4	2.688	48.7	1.710	57.2	38.2	24.5	13.7	24.2	57.8	18.0	0.038	0.006	0.005	2000	0.375	0.224
	C-5	2.635	52.9	1.702	58.0	74.0	27.6	46.4	5.0	72.0	23.0	0.015	0.005	0.019	1248	0.444	0.53
	C-6	2.651	68.1	1.585	64.4	98.8	36.0	62.8	10.0	55.0	35.0	0.008	0.005	0.015	361	0.51	0.285
	C-7	2.679	54.7	1.639	60.5	72.2	22.3	49.9	18.0	51.0	31.0	0.014	0.005	0.044	55.2	0.611	0.327
	C-8	2.696	58.5	1.540	64.0	52.5	28.4	24.1	38.1	39.9	22.0	0.038	0.004	0.273	0.896	0.156	0.258
	C-9	2.670	49.7	1.720	56.9	58.6	32.8	25.8	39.0	40.0	21.0	0.034	0.004	0.025	233	0.167	0.382
	C-10	2.691	59.5	1.671	61.1	120.4	30.9	89.5	19.0	52.0	29.0	0.0014	0.015	0.032	14.06	0.344	0.12
	C-11	2.600	78.3	1.561	66.3	81.0	38.5	42.5	14.0	33.0	53.0	0.004	0.01	0.34	2.34	0.444	0.52
	C-12	2.660	75.3	1.650	64.6	56.2	29.4	26.8	26.0	48.0	26.0	0.02	0.031	0.027	2.19	0.178	0.04
	C-13	2.626	37.6	1.740	51.9	41.1	23.3	17.8	22.4	61.4	16.2	0.035	0.007	0.035	14	0.214	0.131
	C-14	2.654	36.3	1.727	52.3	38.4	18.5	19.9	18.0	60.0	22.0	0.036	0.006	0.056	20.6	0.367	0.254
	C-15	2.716	37.7	1.822	51.3	39.0	20.4	18.6	41.0	36.0	23.0	0.048	0.004	0.018	49	0.4	0.126
	C-16	2.698	24.3	2.027	62.3	40.8	19.4	21.4	20.0	61.0	19.0	0.027	0.004	0.012	309	0.447	0.211
	C-17	2.710	34.8	1.808	50.5	52.0	26.2	25.8	34.0	51.0	15.0	0.042	0.004	0.036	6.04	0.478	0.088
	C-18	2.749	33.8	1.827	50.3	46.8	27.6	19.2	44.0	41.0	15.0	0.068	0.004	0.025	1.44	0.467	0.03
	C-19	2.620	34.4	1.802	48.8	57.8	27.7	30.1	47.0	40.0	13.0	0.065	0.002	0.015	196	0.478	0.21
	C-20	2.632	48.4	1.672	57.2	73.4	39.2	34.0	12.0	65.0	23.0	0.031	0.002	0.025	49	0.478	0.175
	C-21	2.720	34.2	1.798	50.7	48.9	28.0	20.9	50.0	34.0	16.0	0.075	0.008	0.02	10.6	0.422	0.065
	C-22	2.645	29.7	1.815	65.4	41.0	23.7	17.3	23.3	56.7	20.0	0.031	0.003	0.004	4900	0.333	0.28
	C-23	2.690	27.7	1.834	65.2	59.5	25.7	33.8	27.0	49.0	24.0	0.018	0.009	0.004	7921	0.378	0.356
	C-24	2.692	66.6	1.605	64.2	35.2	29.3	5.9	33.0	40.0	27.0	0.2	0.001	0.02	1.56	0.287	0.025
	C-25	2.586	37.4	1.760	50.5	43.1	21.1	22.0	40.0	46.0	14.0	0.053	0.005	0.015	1.63	0.344	0.019

表-2 凍結指数に対する C の値³⁾

凍結指数 (°C・days)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
C (=Z/√F)	3.7	4.1	4.4	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.0	5.1	5.2

キーワード 凍上対策、凍上量、凍結深度、凍上試験

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北13条二丁目 北海道大学大学院工学研究科 TEL 011-706-7246

用いて推定する。

$$Z=C\sqrt{F} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、Zは凍結深度、Cは係数、Fは積算寒度である。この式(3)における係数Cは、(4)で求めた凍結指数を基に表-2より決定する。

(6) 凍結深度の算出

凍結深度は、(5)で決定した係数Cと積算寒度を用いて式(3)より算出する。

(7) 凍結速度の算出

凍結速度は、経過時間における凍結深度の進行深さより算出する。

(8) 載荷応力の算出

載荷応力は、対象となる層厚と各構成材料の密度より算出する。

載荷応力=対象層厚×密度

(9) 凍上率の算出

(1)~(8)で算出した載荷応力σ、凍結速度U、実験定数ξ₀、σ₀、U₀を用いて式(1)より、各層毎の凍上率を算出する。

(10) 凍上量の算出

各層の凍上量は、その層厚と凍上率ξから算出する。各層の凍上量の総和が、全体の凍上量となる。

表-3は、今回提案した方法において作成した凍上量算出表である。このように、表計算ソフトで簡便に凍上量を算出することができる。

表-3 凍上量算出表 (例)

構成	期間	対象層厚 H(mm)	層厚累計 (mm)	深度 (mm)	凍結速度 U (mm/h)	載荷応力 σ (kPa)	実験定数 ξ ₀	実験定数 σ ₀ (kPa)	実験定数 U ₀ (mm/h)	凍上率 ξ	凍上量 ΔH(mm)	凍上量累計 (mm)
表層	2004/11/1	0	0	0	0	0.000	0	0	0	0	0	0
基層	2004/11/26	47	47	-24	1.96	1.105	0	0	0	0.000	0	0
上層路盤	2004/11/27	90	137	-92	3.75	3.220	0	0	0	0.000	0	0
下層路盤	2004/11/28	64	201	-169	2.67	4.540	0	0.0637	2.75	0.014	0.9	0.9
下層路盤	2004/11/29	36	237	-219	1.5	5.283	0	0.0637	2.75	0.014	0.51	1.41
下層路盤	2004/11/30	12	249	-243	0.5	5.530	0	0.0637	2.75	0.019	0.23	1.64
下層路盤	2004/12/1	23	272	-261	0.96	6.005	0	0.0637	2.75	0.014	0.33	1.97
下層路盤	2004/12/2	-10	262	-267	-0.42	5.798	0	0.0637	2.75	0	0	1.97
下層路盤	2004/12/23	12	583	-577	0.5	12.420	0	0.0637	2.75	0.009	0.1	5.46
下層路盤	2004/12/24	10	593	-588	0.42	12.627	0	0.0637	2.75	0.009	0.09	5.55
下層路盤	2004/12/25	13	606	-600	0.54	12.895	0	0.0637	2.75	0.008	0.1	5.65
下層路盤	2004/12/26	17	623	-615	0.71	13.246	0	0.0637	2.75	0.007	0.12	5.77
下層路盤	2004/12/27	20	643	-633	0.83	13.658	0	0.0637	2.75	0.007	0.13	5.9
凍上抑制層	2004/12/28	21	664	-654	0.88	14.006	0	0.0637	2.75	0.013	0.26	6.16
凍上抑制層	2004/12/29	21	685	-675	0.87	14.355	0	0.0637	2.75	0.012	0.26	6.42
凍上抑制層	2004/12/30	20	705	-695	0.83	14.686	0	0.0637	2.75	0.012	0.24	6.66
凍上抑制層	2004/12/31	21	726	-716	0.87	15.034	0	0.0637	2.75	0.012	0.25	6.91
凍上抑制層	2005/1/1	8	734	-730	0.33	15.167	0	0.0637	2.75	0.016	0.13	7.04
凍上抑制層	2005/2/10	14	1162	-1155	0.58	22.263	0	0.0637	2.75	0.009	0.13	12.08
凍上抑制層	2005/2/11	12	1174	-1168	0.5	22.462	0	0.0637	2.75	0.009	0.11	12.19
凍上抑制層	2005/2/12	10	1184	-1179	0.42	22.628	0	0.0637	2.75	0.010	0.1	12.29
凍上抑制層	2005/2/13	12	1196	-1190	0.5	22.827	0	0.0637	2.75	0.009	0.11	12.4
凍上抑制層	2005/2/14	12	1208	-1202	0.5	23.026	0	0.0637	2.75	0.009	0.11	12.51
原地盤	2005/2/15	11	1219	-1214	0.46	23.301	0.002	0.025	4.49	0.006	0.07	12.58
原地盤	2005/2/16	10	1229	-1224	0.42	23.551	0.002	0.025	4.49	0.007	0.07	12.65
原地盤	2005/2/17	13	1242	-1236	0.54	23.876	0.002	0.025	4.49	0.006	0.08	12.73
原地盤	2005/2/18	11	1253	-1248	0.46	24.151	0.002	0.025	4.49	0.006	0.07	12.8
原地盤	2005/2/19	4	1257	-1255	0.17	24.251	0.002	0.025	4.49	0.008	0.03	12.83
原地盤	2005/3/30	3	1438	-1437	0.13	28.776	0.002	0.025	4.49	0.008	0.02	14.06
原地盤	2005/3/31	2	1440	-1439	0.08	28.826	0.002	0.025	4.49	0.009	0.02	14.08
原地盤	2005/4/1	1	1441	-1441	0.04	28.851	0.002	0.025	4.49	0.012	0.01	14.09
原地盤	2005/4/2	0	1441	-1441	0	28.851	0.002	0.025	4.49	0	0	14.09
原地盤	2005/4/3	0	1441	-1441	0	28.851	0.002	0.025	4.49	0	0	14.09

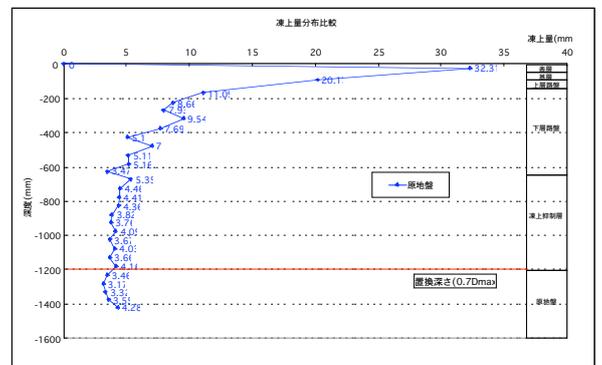


図-1 凍上量分布図 (例 置換深さの検討)

3. 活用例

表-3の凍上量算出結果から、図-1のような現地の凍上量分布図を作成することができる。このような図から、現地に適した置換深さの検討や置換材料の選定などに利用でき、効果的な凍上対策を実施するための検討資料として十分活用できると思われる。

4. おわりに

既往のデータベースを活用し簡易的に凍上量を予測する方法を提案した。そのフローを図-2に示す。

ここに提案する簡易凍上量予測法はこれまでも筆者等が活用し、概ね良好な結果を得てきたものである。また、表-1に示す高志の式の諸定数を求める試験法が現在地盤工学会により基準化³⁾されており、この方法によるデータベースの充実により益々本提案法の信頼性が向上するものと思われる。

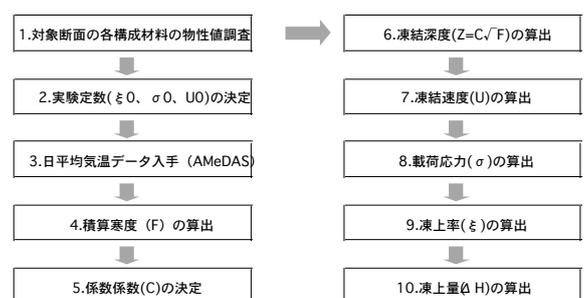


図-2 凍上量簡易予測方法フロー

参考文献

- 1) 盤工学会：凍上量予測のための土の凍上試験法、JGS 0171-2003、
- 2) 了戒公利、後藤茂、赤川敏：「一定拘束応力下における飽和土の凍上特性」清水建設研究所報 第33号、
- 3) 社団法人日本道路協会（1987）：道路土工-排水工指針、pp165