

# 영구동토지역에서의 수준말뚝의 안정성 검토 및 설계방법 연구

A Study on the Method of Analysis and Design of Benchmark Pile  
in Permafrost Area

조 천 환\*<sup>1</sup> 이 원 제\*<sup>3</sup>  
Cho, Chun-Whan Lee, Won-Je  
Kuzmin, G. P.\*<sup>2</sup> 홍 성 원\*<sup>4</sup>  
Hong, Sung-Wan

---

---

## Abstract

Frost heave on foundation(or ice jacking) is defined that foundation is uplifted by heaving force exerted around foundation from freezing of soils. This phenomenon is often occurred in the light-weight structure e.g, small building, electro-telegraph pole, street light, pipe line, bridge and reference point of survey. Frost heave is the most important factor in design of foundation of structure and the key issue in understanding mechanism of foundation in permafrost area.

In this study is reviewed the state of the art on the analysis method of frost heave in USSR and is suggested the design method of benchmark pile. On the basis of above results, this study suggests a design chart able to design simply the benchmark pile in Yakutsk region.

## 요 지

기초 주위에 지반이 동결되어 발생하는 융기력에 의해 기초와 상부구조물이 들어 올려지는 것을 기초융기 현상이라 한다. 기초융기 현상은 비교적 구조물의 하중이 작을 때 자주 나타나며, 따라서 동토지역의 저층건물, 전신주 및 가로등, 관로, 교량, 측량기준점 등에서 기초가 융기하여 파괴된 사례를 많이 볼 수 있다. 기초융기는 동토지역의 구조물 설계에 있어서 반드시 검토해야 할 가장 중요한 사항이며, 또한 동토지역의 구조물 기초에 대한 역학적 개념의 이해에 있어 기본적인 사항이다.

본 논문에서는 이 분야에 대해 오랜 연구와 실무 경험을 갖고 있는 소련에서의 기초융기의 검토 방법을 고찰한 후, 소련의 "건설 기준 및 규정"에 의거 동토지역에서 수준말뚝을 설계할 수 있는 방법을 제시하고, 야쿠츠크 지역에 대해 간편하게 수준말뚝을 설계할 수 있는 도표를 제안하였다.

---

\*<sup>1</sup> 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

\*<sup>2</sup> 러시아 동토연구소 동토공학연구실 책임연구원

\*<sup>3</sup> 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

\*<sup>4</sup> 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 실장

## 1. 서 론

북방의 도시를 둘러보다 보면 가장 두드러지게 눈에 띄는 것이 있다. 즉, 많은 구조물이 당초에 건설했던 것과는 달리 선형을 유지하지 못하고 변형 또는 파괴상태에 이른 것으로, 대표적인 예로 도로변이나 들에 서있는 가로등이나 전신주가 수직을 이루지 못하고 춤을 추듯이 전체적으로 지그재그형으로 변형된 것을 들 수 있다. 츠또비치(Tsytoovich)는 이를 빼아니쯔(술 주정뱅이)라고 명명하였다. 이것은 지반의 동결로 인한 기초 주위에 작용하는 융기력(frost heaving force)에 의해 기초가 융기함으로써 상부 구조물에 영향을 준 것으로 기초융기(frost heave on foundation 또는 ice jacking)라고 불려진다.

기초융기 현상은 상부 구조물의 하중이 비교적 작은 저층 건물, 전신주 및 가로등, 관로의 기초, 말뚝기초로 된 교량, 측량 기준점(수준점) 등에서 자주 나타나며, 이 힘은 3층 이상의 건물을 들어 올리는 경우도 있다. 따라서 활동층(active layer, 계절 동토라고도 함)이 존재하는 지역에서 구조물의 기초를 설계할 경우는 융기력에 대해 반드시 검토를 해야만 하고, 융기 현상이 예상될 경우에는 이에 대한 대책을 수립하여야 한다.

소련의 경우 1920년대 후반부터 관련된 연구를 시작하여 1940년대 후반에 이르러서야 이에 대한 정확한 개념이 정립되었으며, 이후 1960년대까지의 많은 연구결과를 토대로 현재에 적용되는 검토 방법 및 설계 표준치가 건설기준 및 규정(SNiP)으로 제시되고 있다.

## 2. 기초융기 현상의 개념 및 원리

### 2.1 기초융기 현상의 개념 및 연구사

1920년대 후반부터 1930년대까지만 해도 동토(freezing soil)와 기초와의 동착력(adfree-

zing force)이나 융기력을 이해하는 데 있어 최대 강도(또는 저항치)가 관심사였고, 따라서 측정방법은 규정된 재하속도 하에서 최대 강도를 구하는 방식이었으며, 이 분야의 연구도 동토의 강도(동착력, 융기력 등)에 미치는 영향 요소(입자크기, 온도, 함수비, 재하속도 등)에 대한 연구가 주류를 이루었다<sup>(1)</sup>.

또한 초기 건설규정(OST 9032-39)상의 설계 방법에 있어서도 상기의 방법으로 얻어진 최대 강도를 이용하도록 되어 있다. 그러나 이러한 설계 제안치는 측정치 보다 수배나 큰 값을 주고 있다는 정보가 현장에서 자주 제시되었다<sup>(2)</sup>.

1940년 골드스테인은 최초로 장기 재하 상태에서 동착력이 저하한다는 사실을 발표하였으며, 그 후 1944년 살뜨코브가 골드스테인 등의 데이터를 이용하여 장기강도의 계산식을 제시할 때만 해도 아직 장기강도에 대한 개념이 통용되지는 않았었다. 1946년 골드스테인은 다시 동결강도의 감소는 장기적인 강도의 이완 뿐만 아니라 하중의 반복작용(혹은 기초의 지속변위)에 의해서도 영향을 받는다는 사실을 발표한 이후에야 동착력에 대해서는 장기강도를 고려해야 하고 융기력에 있어서도 전단변위에 따른 장기강도를 고려해야 한다는 개념이 도입되었다.<sup>(2)</sup> '50~'60년대에 달마또브, 비알로프, 오르로프 등의 많은 연구를 바탕으로 현재에 이용되는 건설기준 및 규정 "연구동토 지역에서의 기반 및 기초(SNiP 2.02.04~88)"<sup>(3)</sup>가 1970년대 초반에 작성되었다.

융기력을 측정하는 방법은 실내 시험과 현장 시험으로 나눌 수 있는데, 앞에서 설명한 바와 같이 실험시에는 온도변화에 따른 기초의 변위, 강도의 이완, 온도변화에 의한 동결심도 그리고 함수비 및 함수상태 등 까지 고려해야 하므로 어느 방법으로도 간단하지 않다. 그러나 개략 현장시험의 경우 실물시험으로 최대 총합 융기력(변형을 제어하는 빔 방법이나 응력을 제어하는 하중균형법 이용)을 측정할 후(그림 1참조) 접촉면적을 고려하여 평균 융기력을 측정하는 방법을 택하고 있고, 실내시험의 경우

달마도브가 제안한 방법이 비교적 신뢰성있는 방법으로 알려지고 있다. 이 방법은 인위적으로 모형·말뚝을 변위(개략 2.2~20 mm/일) 시키면서 장기적으로 수렴하는 강도를 측정하는 방법<sup>(4)</sup>(그림 2참조)으로서 현장 실물시험과 유사한 결과를 주고 있는 것으로 평가되고 있다.

그러나 시험지역내의 한정된 조건 및 최소 두번이상의 동결기를 필요로 하는 장기측정에 대한 문제에도 불구하고 가장 신뢰할 수 있는 방법은 현장 실물 시험으로 받아들여지고 있으며, 따라서 오랫동안 많은 현장 실물 시험결과를 토대로 현재의 건설 기준 규정에는 흙의 종류 및 물리적 특성, 동결심도, 기초의 재료에 따라 용기력의 표준치(표 1참조)를 제시하고 있다.

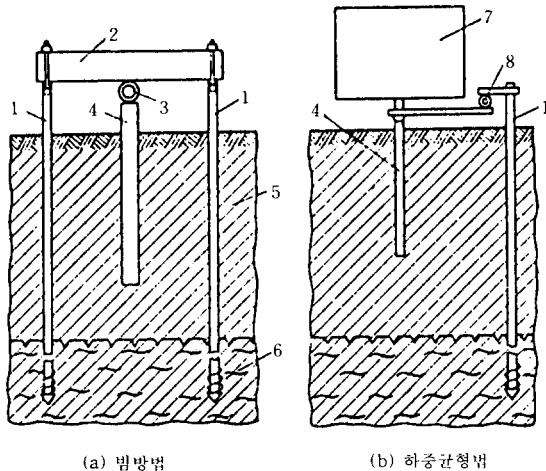
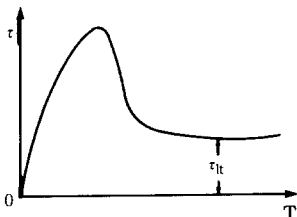
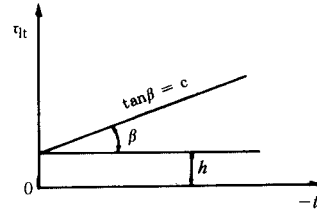


그림 1 용기력을 측정하기 위한 현장시험 방법  
(1) 양카 (2) 빔 (3) 하중계 (4) 기초 (5) 계절동토층 (6) 영구동토층 (7) 재하상자 (8) 다이알게이지

그림 1 용기력을 측정하기 위한 현장시험 방법



(a) 시간에 따른 장기 동결강도의 영향



(b) 장기 동결강도와 온도의 관계

그림 2 달마도브의 실내시험 방법으로 측정된 장기 수렴 동결강도<sup>(5)</sup>

## 2.2 기초응기 현상의 원리 및 사례

활동층의 흙이 동결할 때 이의 부피가 상승하게 되고, 흙 입자간 혹은 흙속에 매설되어 있는 기초와 흙입자 간에 동결력이 작용하게 되어 기초구조물을 상승시키는 용기력이 발생하게 된다. 따라서 활동층 이하에 영구동토가 존재하고 기초가 활동층 이하에 까지 매설되어 있는 경우는 2개층에 매설된 기초 주위에 상대적으로 변위가 발생하는데, 활동층의 기초 주위에는 용기력이 작용하게 되고 영구동토부의 기초 주위에는 용기력에 저항하는 동착력이 작용하게 된다.

흙이 동결할 때 흙의 용기력은 2개의 방향성이 있는, 즉 수직력(normal force)과 접선력(tangential force)으로 나눌 수 있다. 구조물별 주요인으로서 작용하는 힘을 살펴보면, 수직력은 동결면에 수직으로 작용하는 힘이므로 활동층에 매설된 푸팅기초의 저부에 작용하는 힘으로 설명될 수 있고, 접선력은 기초의 표면이 지반과 직접 접촉하는 면을 따라 발생하는 힘이므로 활동층 내 말뚝기초의 주면에 작용하는 힘을 예로 들 수 있다.

따라서 말뚝기초의 용기에 대한 안정성을 검토할 때는 접선력을 고려하게 되며, 전술한 바와 같이 이 값은 온도변화에 따른 말뚝의 변위 및 강도이완을 고려한 장기강도치이다. 동토에 설치된 말뚝에 작용하는 힘은 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며, 이의 용기에 대한 안정조건

은 식(1)로 표시할 수 있다.

$$P_1 - F \leq P_2 \quad (1)$$

여기서  $P_1$  : 말뚝의 용기력의 총합

$P_2$  : 용기력에 저항하는 힘의 총합

$F$  : 자중을 포함한 말뚝에 작용하는 하중

실제로 접선력은 그림 3에서와 같이 활동층의 전체에 걸쳐 작용하는 것이 아니며, 깊이에 따라 일정한 힘도 아니다. 흙이 동결할 때 흙속의 수분이 동결면으로 이동하게 되므로 활동층의 저부는 상대적으로 건조한 상태가 유지되어 접선력이 매우 작거나 작용하지 않게 되고 또한, 활동층의 깊이 방향으로 온도구배가 형성되어 접선력은 깊이에 따라 변화하게 된다. 츠또비치<sup>(4)</sup>는 접선력이 작용하는 깊이( $h_a$ )는 최대 동결깊이( $h_{max}$ )의  $2/3 \sim 3/4$  ( $h_a = 2/3 \sim 3/4 \cdot h_{max}$ ) 정도이며(그림 4참조), 깊이에 따른 용기력의 절대치는 흙의 물리적 특성, 동결속도, 흙의 온도 등에 따라 변화하므로 동결심도별 최대 접선력의 총합에 대한 평균치를 계산할 것을 제안하고 있지만, 실무적으로 이러한

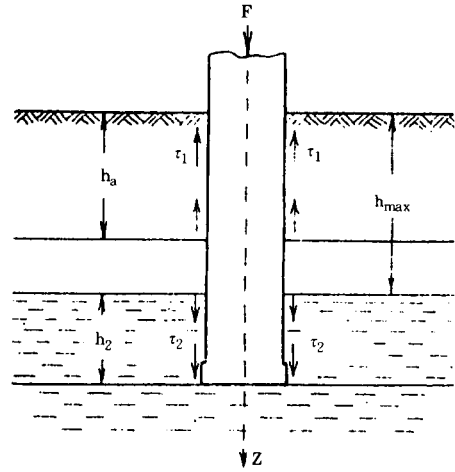


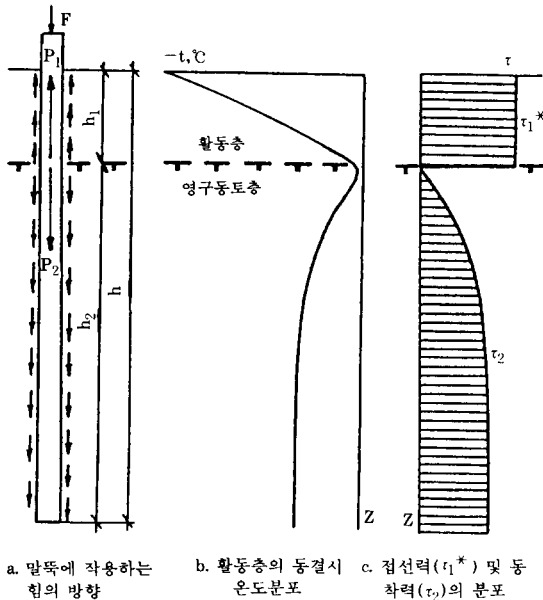
그림 4 기초의 용기력 계산 방법<sup>(2)</sup>

데이터를 얻기란 매우 어렵다.

따라서 건설 기준 및 규정에 제안하는 방법은 그림 3 c.에서와 같이 활동층의 두께 전체에 대해 일정한 접선력이 작용하는 것으로 가정하도록 되어 있다.

식(1)에서와 같이 기초의 용기현상은 용기력의 총합이 이에 저항하는 힘의 총합과 기초에 작용하는 하중의 합보다 클 때 발생한다. 그러므로 이 현상은 비교적 상부 구조물의 하중이 작을 경우 자주 나타나며, 다음과 같은 경우를 대표적인 예로 들 수 있다.

사례 1) 사진 1은 야꾸쓰고에서 흔히 볼 수 있는 목재 단층(혹은 2층) 주택으로, 기초로는 일반적으로 나무말뚝을 사용하고 있으며, 고층 건물과 달리 고상식 기초(또는 통풍식 기초) 형식을 적용하지 않는다. 따라서 건물의 중앙부는 주거열로 인해 영구동토가 녹으므로 융해침하가 발생하게 되고, 상대적으로 건물의 측부는 영구동토의 유지와 지반의 동결로 인해 미세한 융해침하와 함께 지반 또는 기초의 용기에 더욱 영향을 받게 된다. 이로 인해 건물의 지붕은 타원형으로 형성되어 있고 좌우 측부의 입구는 상대적으로 큰 변형이 생겨 거의 파괴 상태(사진 2참조)에 이른 것을 볼 수 있다. 사진 3은 이러한 목재 건물을 제거한 후 새로운 구조물을 축조할 때, 목재건물 밑의 나무말뚝



a. 말뚝에 작용하는 힘의 방향    b. 활동층의 동결시 온도분포    c. 접선력( $\tau_1^*$ ) 및 동차력( $\tau_2$ )의 분포

그림 3 동결용기시 말뚝에 작용하는 힘의 시스템

을 제거하지 않아 말뚝이 융기한 것으로 도로나 보도, 광장 등에서 흔히 볼 수 있다.

사례 2) 사진 4는 야꾸쯔끄 시내로 부터 약 1km 정도 떨어진 교외지역의 원경으로 융기현상에 의해 전신주나 가로등이 처음에 건설된 것과 달리 수직 상태를 이루지 못하고 산만하게 흐트러져 있는 것을 볼 수 있다.

사진 5는 동지역의 국부사진으로, 우측의 오래된 목재 전신주의 경우 융기에 의해 거의 파괴 상태에 이른 것을 보여주고 있으며, 좌측의 최근에 건설된 철재 가로등의 경우 안정된 상태를 유지하고 있음을 볼 수 있다. 일반적으로 철재 말뚝의 동착력이나 접선력은 동일조건하에서 시멘트나 목재 말뚝의 경우보다 약 30% 작게 나타난다.

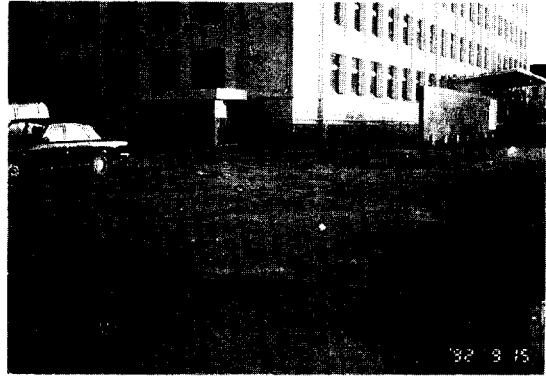


사진 3 나무말뚝의 융기현상(야꾸쯔끄 레닌 광장 옆)

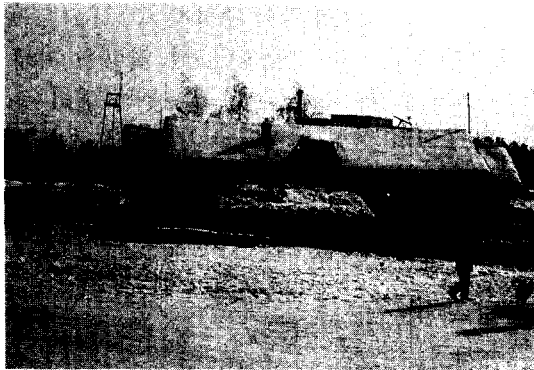


사진 1 지반의 동결융해로 변형된 주택(야꾸쯔끄)



사진 4 전신주와 가로등의 융기현상(야꾸쯔끄 교외)



사진 2 지반의 동결 융해로 변형된 주택(사진 1의 국부확대)

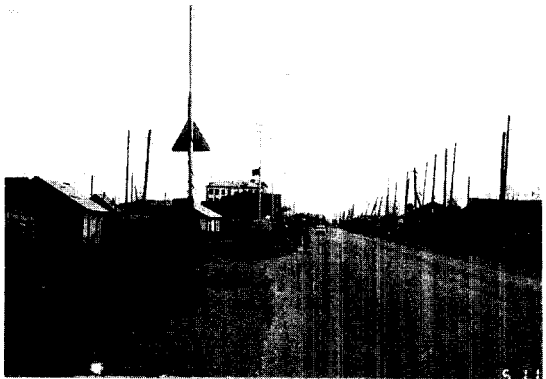


사진 5 전신주와 가로등의 융기현상 대비(사진 4의 국부사진)

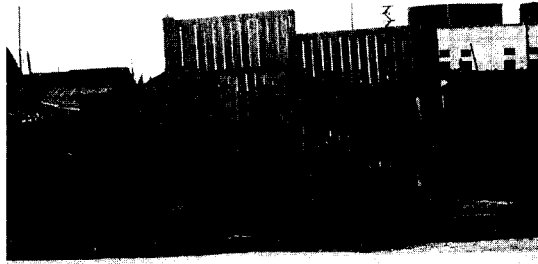


사진 6 대문과 담의 용기현상(야꾸쓰꼬 교외)

사례 3) 사진 6은 전형적인 야꾸쓰꼬 목재 집의 대문과 목재담으로 좌우측의 상대적 용기 현상이 뚜렷이 나타나고 있다. 용기현상의 3대 요인으로는 온도, 흙의 종류, 함수비 및 함수상태를 들 수 있는데, 이 경우 온도나 흙의 종류 보다는 함수비와 함수상태에 더 영향을 받은 것으로 볼 수 있다.

### 3. 수준말뚝의 안정성 검토 방법 및 설계 예

#### 3.1 안정성 검토방법

본 논문에서 수준말뚝의 안정성 검토에 대한 기본적 원리는 건설 기준 및 규정 “영구동토지역에서의 기반 및 기초”(SNiP 2.02.04~88)<sup>(2)</sup>에서 제시하는 방법에 의한다. 흙의 동결·용기 작용에 의한 수준말뚝의 안정조건은, 수준말뚝의 경우 말뚝에 작용하는 하중은 없으며 자중도 매우 작으므로 식(1)에서 자중을 무시하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1 \leq \frac{k_1}{k_2} P_2 \quad (2)$$

여기서  $k_1$  : 작업조건계수(일반적으로 1.0)

$k_2$  : 안전율(일반적으로 1.1이지만 중요구조물의 경우 1.3)

수준말뚝에 작용하는 힘의 조건은 그림 3에서 F를 제외한 경우와 동일하며 식(2)에서  $P_1$ 과  $P_2$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_1 = \tau_1 \cdot h_1 \cdot u_1 \quad (3)$$

$$P_2 = \sum_{i=1}^n \tau_{2iav} \cdot h_{2i} \cdot u_2 \quad (4)$$

여기서  $\tau_1$  : 용기를 일으키는 단위 용기력 (접선력)

$h_1$  : 활동층의 두께

$\tau_{2iav}$  : 영구동토의  $i$ 번째 층에서 수준말뚝 주위에 작용하는 평균 동착력(그림 5참조, 문헌 3에서 제시한 값을 회귀분석)

$h_{2i}$  : 활동층 이하에 존재하는 영구동토  $i$ 번째 층의 두께

$u_1, u_2$  : 활동층 및 영구동토층내의 수준말뚝의 주변장

용기를 일으키는 접선력( $\tau_1$ )의 결정을 위해서는 표 1에서와 같이 우선 활동층의 흙의 종류 및 물리적 특성(액성지수( $I_L$ ) 혹은 포화도(S))을 결정해야 한다(식 5, 6참조).

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (5)$$

$$S = \frac{w}{e} G_s = \frac{\gamma_d \cdot G_s}{G_s \cdot \gamma_w - \gamma_d} w \quad (6)$$

여기서  $w$  : 자연 함수비

$w_p, w_L$  : 소성한계 및 액성한계

$G_s, e$  : 비중 및 간극비

$\gamma_w, \gamma_d$  : 물 및 건조토의 단위중량

표 1의 접선력( $\tau_1$ )은 수준말뚝의 표면 재질이 콘크리트를 기준한 것이므로 다른 재료의 수준말뚝을 사용할 경우는 표 2에서와 같이 표 1의 값에 재료 계수( $k_3$ )를 곱해 주어야 한다.

식(2)에 식(3)과(4)를 대입하고 재료계수( $k_3$ )를 고려하여 수준말뚝의 용기에 대한 안정조건을 다시 나타내 보면 식(7)과 같다.

$$\sum_{i=1}^n \tau_{2iav} \cdot h_{2i} \geq \frac{k_2 k_3}{k_1} \cdot \frac{u_1}{u_2} \cdot \tau_1 \cdot h_1 \quad (7)$$

수준말뚝의 안정조건식(7)에서 좌우항을 등  
치로 놓고, 일반적인 수준말뚝의 조건인  $k_1 =$   
 $1, k_2 = 1.3$ , 그리고  $u_1/u_2 = 1$ 을 선택하여 수

준말뚝의 표면 재질 계수별로 도시하면 그림 6  
과 같다. 결국 그림 6은 수준말뚝이 용기를 일  
으키지 않는 최소의 조건이다. 따라서 활동층

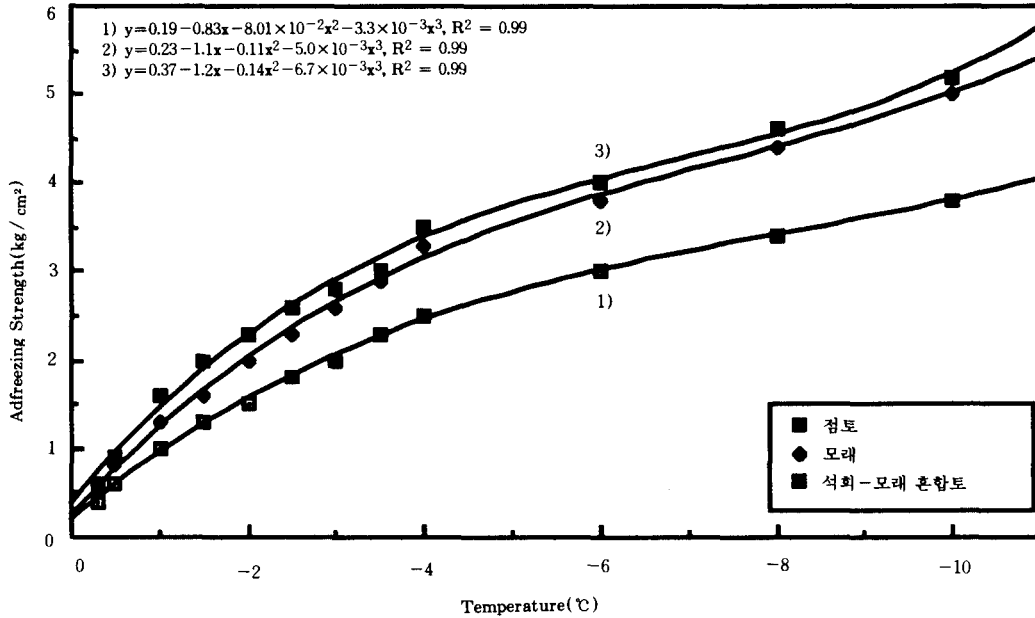


그림 5 영구동토내 말뚝주위에 작용하는 동착<sup>(3)</sup>

표 1 흙의 종류별 특성치에 따른 접선력<sup>(3)</sup>

흙의 종류 및 특성치	활동층 두께 ( $h_1, m$ )에 따른 접선력 ( $\tau_1, kg/cm^2$ )		
	1.0	2.0	3.0
점성토 $I_L > 0.5$ , 세사 및 풍화토 $S > 0.95$	1.3	1.1	0.9
점성토 $0.25 < I_L \leq 0.5$ , 세사 및 풍화토 $0.8 < S \leq 0.95$ , 세사, 풍화토, 점성토 등이 30% 이상 혼합된 자갈질 흙	1.0	0.9	0.7
점성토 $I_L \leq 0.25$ , 세사 및 풍화토 $0.6 < S \leq 0.8$ , 세사, 풍화토, 점성토 등이 10%에서 30%까지 혼합된 자갈질 흙	0.8	0.7	0.5

표 3 용기력에 저항하는 힘의 계산

$h_i (m)$	$h_2 = h - h_1 (m)$	$h_{z_i} (cm)$	$t (°C)$	$\tau_{z_i} (kg/cm^2)$ (그림 5참조)	$\tau_{2iav} = \frac{\tau_{z_i(i-1)} + \tau_{z_i}}{2} (kg/cm^2)$	$\tau_{2iav} \cdot h_{z_i} (kg/cm)$	$\sum_{i=1}^n \tau_{2iav} \cdot h_{z_i} (kg/cm)$
2.0	0.0	0	0	0	0	0	0
2.5	0.5	50	-0.3	0.4	0.2	10	10
3.0	1.0	50	-0.7	0.75	0.58	29	39
4.0	2.0	100	-0.9	0.92	0.84	84	123
6.0	4.0	200	-1.4	1.24	1.08	216	339

표 2 말뚝의 표면재질별 적용계수<sup>(3)</sup>

수준 말뚝 표면의 재질	적용계수, $k_3$
철재 형틀에서 만들어진 콘크리트 수준말뚝	1.0
나무수준말뚝 : 표면처리 하지 않은 보통 나무 부패방지를 위해 표면처리한 경우	1.0 0.9
철재 수준 말뚝	0.7

의 흙의 특성, 깊이 그리고 영구동토의 온도조건을 알면 그림 6으로 부터 활동층의 동결에 따른 수준말뚝의 용기를 막기 위한 영구동토층내의 최소 관입 깊이를 결정할 수 있다.

### 3.2 수준말뚝의 설계 예

#### 가) 설계조건

- (1) 활동층의 흙의 종류 및 물리적 특성치 : 점성토,  $I_L = 0.6$
- (2) 활동층의 두께 :  $h_1 = 2.0\text{m}$
- (3) 영구동토층의 온도조건 : 활동층이 모두 동결하고 영구동토가 최대 온도가 될 때의 온도 조건이며 일반적으로 12월에 나타난다.

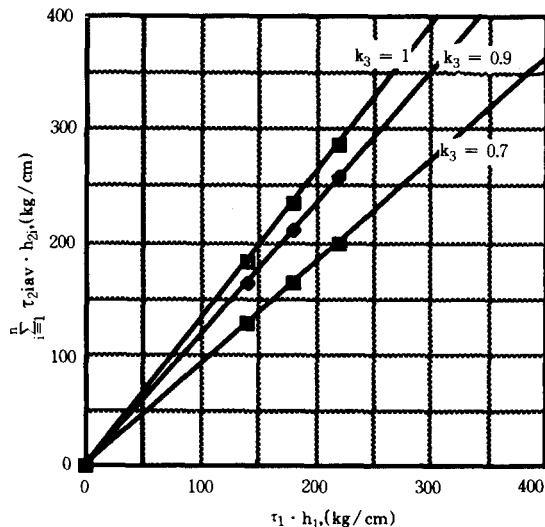


그림 6 수준말뚝의 용기력( $\tau_1 \cdot h_1$ )을 막기 위한 최소저항력( $\sum_{i=1}^n \tau_{2iav} \cdot h_{2i}$ )

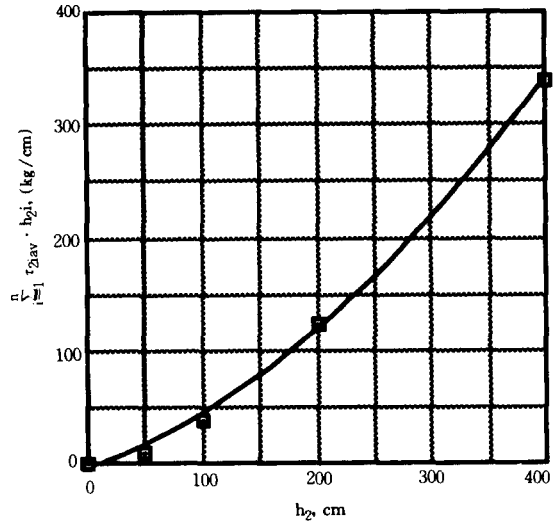


그림 7 저항력 ( $\sum_{i=1}^n \tau_{2iav} \cdot h_{2i}$ )과 영구동토내의 관입깊이( $h_2$ )의 관계

영구동토깊이 $h_2$ , m	2.0	2.5	3.0	4.0	6.0
온도 $t$ , $^{\circ}\text{C}$	0	-0.3	-0.7	-0.9	-1.4

- (4) 수준말뚝의 재질 : 철재 파이프

#### 나) 설계내용

- (1) 점선력 : 표 1로부터  $\tau_1 = 1.1\text{kg/cm}^2$
- (2) 수준말뚝의 재질계수 및 단면조건 : 표 2로부터  $k_3 = 0.7$ ,  $u_1/u_2 = 1$
- (3) 용기력에 저항하는 최소조건 : 그림 6에서의 조건(이때  $\tau_1 \cdot h_1 = 1.1 \times 200 = 220\text{kg/cm}$ )으로 또는 식(7)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \tau_{2iav} \cdot h_{2i} = \frac{k_2 \cdot k_3}{k_1} \cdot \frac{u_1}{u_2} \cdot \tau_1 h_1 = 200.0$$

(kg/cm)

- (4) 상기 주어진 자료를 이용하여 용기력에 저항하는 힘(영구동토내의 수준 말뚝의 동착력)을 계산하면 표 3과 같다.
- (5) 표 3의 데이터를 이용하여  $\sum_{i=1}^n \tau_{2iav} \cdot h_{2i} \sim h_2$ 의 관계를 도시하면 그림 7과 같다.
- (6) 수준말뚝의 관입깊이 : 그림 7에서 최소



저항치((3)의 결과)에 해당하는 영구동토 내의 관입깊이( $h_2$ )를 구하면  $h_2=280\text{cm}$ 가 된다. 따라서 지반내에 관입되는 최소소요 말뚝길이  $h=h_1+h_2=2.0+2.8=4.8(\text{m})$ 를 구할 수 있다.

#### 4. 야꾸찌야 소수지역의 수준말뚝 설계 대표 작성

전절에서 설명한 바와 같이 수준말뚝을 설계하기 위해서 필요한 조건은 말뚝의 재질 및 단면, 말뚝 설치지점의 흙의 물리적 특성치 및 강도 특성치 그리고 온도 조건이다. 일반적으로 말뚝의 재질 및 단면은 설계자가 임의로 선택할 수 있으며, 흙의 종류 및 특성치는 각종 지질 및 토질 조사 자료로 부터 가정한 후 설치 지역의 보링 시 확인 및 결정이 가능하다.

그러나 특정지점의 온도자료는 구하기가 쉽지 않고 또한, 수준말뚝을 설치하기 위해서 특정지역의 특정개소에 다년간 온도자료를 수집한다는 것도 용이하지 않은 일이며 경제적이 지 못하다. 따라서 수준말뚝을 설계하기 위해서는 설치지점을 포함하는 광역지역에 대한 온도자료를 수집한 후 이를 바탕으로 안정성을 검토한 후 적절한 안전율을 고려하는 것이 더

합리적일 것이다.

#### 4.1 온도 데이터의 수집 및 정리

일반적으로 소련의 기상관측소에서는 지중 온도의 측정기준으로서 지하 3.2m를 표준으로 하기 때문에 설계에 요구되는 지중온도를 구하기가 쉽지 않다. 따라서 요구되는 지하심도까지의 데이터를 구하기 위해서는 각종 논문의 온도자료를 찾을 수 밖에 없는데, 이 또한 야꾸찌야가 광활한 지역임을 고려할때 자료가 매우 부족하고, 있는 자료도 1년 또는 2년 정도를 측정한 것이 대부분이며, 장기적이고 신뢰도 있는 자료로서 충분하다고 볼 수 없다.

따라서 본 논문에서는 기상자료와 소수의 논문으로 부터 온도자료를 수집한 후 누락된 부분의 자료는 보간방법으로 보완하여 구한 야꾸찌야 2개 지역(스레드네 폴름스크, 야꾸찌야)의 데이터를 표 4, 5에 나타내었다. 표 5의 온도자료를 월별, 지중심도별로 도시하면 그림 8과 같다.

스레드네 폴름스크(북위 67°)는 북극권(66.3° 이상)에 포함되는 지역으로 야꾸찌야(북위 62°)보다 위도가 높아 연평균기온은 전자가 -12.5°C로 야꾸찌야(-10.3°C)보다 낮지만, 야

표 4. 스레드네 폴름스크의 월평균 및 연평균 온도<sup>(6)(7)</sup>(1953~1961)

월 깊이 (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	연평균	비 고
0.2	-11.6	-12.8	-12.6	-10.3	-3.9	3.0	9.2	8.1	3.2	-1.0	-5.3	-8.8	-3.6	최고평균융해깊이 (9월) : 148cm
0.4	-9.9	-11.6	-12.2	-10.6	-4.4	0.5	6.2	6.4	2.8	-0.1	-3.0	-6.8	-3.6	
0.6	-8.2	-9.9	-11.0	-10.1	-4.8	-0.8	3.2	5.5	2.3	0.1	-1.3	-5.0	-3.3	표토층의 최초 동결일 : 8월 20일
0.8	-7.1	-9.0	-10.3	-9.7	-5.4	-1.4	1.0	3.0	1.7	0.1	-0.4	-3.6	-3.4	
1.2	-5.7	-8.3	-9.6	-9.4	-6.4	-2.7	-0.9	0.3	0.5	0.0	-0.1	-1.9	-3.7	표토층의 최후 동결일 : 6월 10일
1.6	-4.6	-6.9	-8.5	-8.6	-7.0	-3.6	-1.8	-0.8	-0.4	-0.3	-0.4	-1.3	-3.7	
2.4	-3.3	-5.4	-6.9	-7.5	-6.8	-4.5	-2.9	-1.8	-1.3	-1.1	-1.0	-1.3	-3.6	표토층의 융해상태 지속일수 : 70일
3.2	-2.6	-4.3	-5.7	-6.5	-6.4	-5.1	-3.6	-2.6	-2.0	-1.7	-1.5	-1.6	-3.6	
6.0	-2.5	-2.9	-3.6	-4.3	-4.9	-5.0	-4.6	-4.0	-3.5	-3.2	-2.8	-2.6	-3.7	
기온	-37.6	-34.7	-26.4	-14.5	-0.7	11.0	13.6	9.8	2.9	-11.0	-27.1	-35.0	-12.5	

표 5. 야쿠쯔끄의 월평균 및 연평균 온도<sup>(6)(7)</sup>(1951~1963)

월 깊이 (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	연평균	비 고
0.2	-19.2	-19.4	-16.2	-7.9	4.3	13.4	17.5	15.5	7.0	-3.1	-10.8	-15.6	-2.9	최고평균융해깊이 (9월) : 204.8cm  표토층의 최초 동결일 : 8월 27일  표토층의 최후 동결일 : 6월 9일  표토층의 융해상태 지속일수 : 78일
0.4	-16.8	-17.4	-15.2	-8.4	2.5	11.0	15.0	13.8	6.7	-1.9	-8.0	-12.9	-2.6	
0.6	-14.3	-15.3	-13.7	-8.5	0.2	7.9	12.1	11.8	6.2	-0.5	-5.2	-10.3	-2.5	
0.8	-12.4	-14.1	-12.7	-8.4	-1.4	5.0	9.4	9.6	5.3	0.0	-3.4	-8.1	-2.6	
1.2	-8.7	-10.2	-10.2	-8.0	-3.3	0.1	4.1	5.0	2.8	0.0	-0.9	-4.9	-2.8	
1.6	-5.6	-7.4	-7.9	-7.0	-4.1	-1.8	0.3	1.5	1.1	0.1	-0.1	-2.4	-2.8	
2.4	-2.6	-4.4	-5.4	-5.6	-4.4	-3.0	-2.0	-1.4	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-2.7	
3.2	-1.7	-2.6	-3.8	-4.4	-4.2	-3.4	-2.8	-2.3	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-2.7	
6.4	-2.2	-2.2	-2.4	-3.0	-3.4	-3.5	-3.3	-3.1	-2.9	-2.7	-2.5	-2.3	-2.8	
13.0	-2.8	-2.7	-2.6	-2.6	-2.6	-2.7	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.7	
가온	-43.2	-35.9	-22.2	-7.4	5.7	15.4	18.7	14.8	6.2	-7.9	-28.0	-39.8	-10.3	

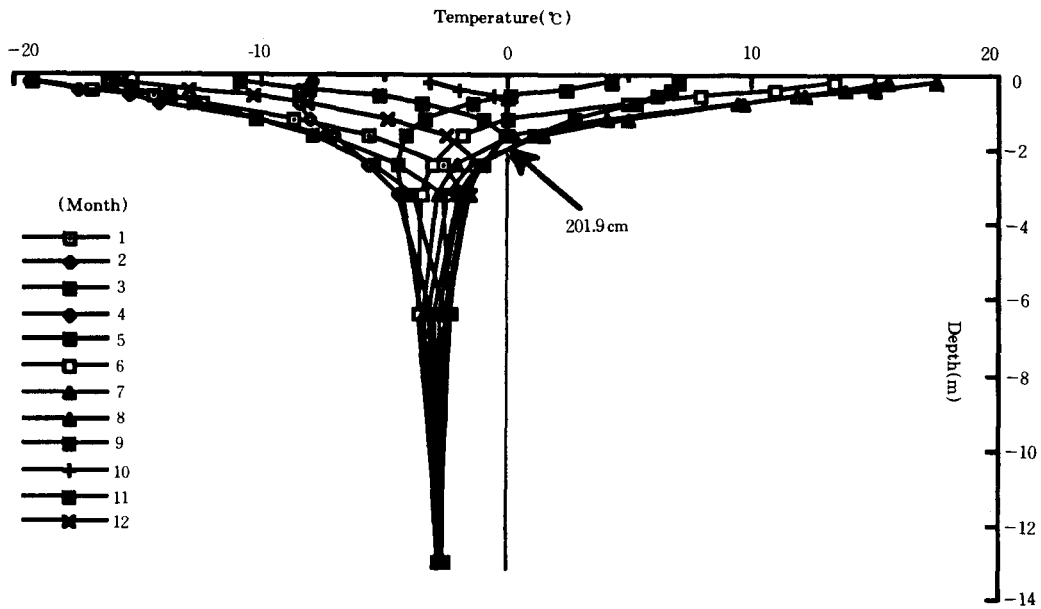


그림 8 야쿠쯔끄의 연중 월별 지온분포

꾸쯔끄의 경우 대륙성 기후가 특징적으로 나타나 여름과 겨울의 기온차가 심하고 기온의 절대치도 북극권에 속하는 스투드네 팔름스크 보다 훨씬 크다. 따라서 표와 그림에서 보는 바와 같이 활동층의 두께는 야쿠쯔끄가 깊다.

#### 4.2 설계도표 작성

그림 8에서 보는 바와 같이 활동층이 모두 동결하는 시기는 11월이다. 그러나 영구동토층은 12월까지 지온이 높아지고, 또한 12월에 활

동층의 온도도 급격히 낮아진다. 따라서 용기력이 가장 커지는 시기는 온도조건으로 부터 영구동토내의 말뚝과 지반사이의 동착력이 최소로 되고 활동층내의 접선력이 상대적으로 급격히 커지는 12월이 될 것이므로 자연히 용기력에 대한 검토시기가 결정된다.

건설 기준 및 규정 2.02·04-88에서 규정하는 강도특성치와 4.1 절에 주어진 온도자료로부터 다음 방법에 의해 야쿠쯔끄 지역의 수준말뚝에 대한 설계도표를 작성하였다.

1) 표 1과 표 2 그리고 식(7)을 이용하여 수준말뚝의 용기력을 막기위한 최소저항치를 계산하고 이를 토질조사 자료와 활동층의 깊이에 따라 쉽게 구할 수 있도록 도표로 나타냈다(그림 9의 좌측).

단,  $k_1$ ,  $k_2$ 는 각각 건설 기준 및 규정에서 제안하는 값인 1, 1.3을 이용했고,  $k_3$ 와  $u_1$ ,  $u_2$ 는 설계자가 임의대로 선택할 수 있도록 하기 위해  $k_3$ 의 경우 각각 다른 그래프  $u_1$ ,  $u_2$ 의 경우 변수로 두었다.

2) 지온데이터(표 5, 그림 8참조)와 건설 기

준 및 규정에서 제안하는 영구동토의 동착력 값(그림 5 참조)을 이용하여 용기력에 저항하는 힘을 계산하였다. 단, 전술한 바와 같이 지온데이터는 12월의 값을 이용했고, 강도치는 보링공의 충전토에 따라 임의대로 선택할 수 있도록 각각 계산 하였다.

3) 최종적으로 2)항의 계산치를 이용하여 간편하게 수준말뚝의 관입깊이를 결정할 수 있도록  $\sum_{i=1}^n \tau_{2iav} \cdot h_{2i} \sim h$  관계를 충전토의 종류에 따라 도시하였다(그림 9의 우측).

## 5. 결 론

1) 수준말뚝의 용기에 대한 검토를 위해서 필요한 자료는 말뚝의 재료 및 형상, 흙의 물리적 특성치 및 강도특성치 그리고 온도조건이며, 또한 수준말뚝을 설치하기 위해서 이 모든 자료를 직접 구하는 것은 매우 어렵다는 것도(특히, 온도자료) 이미 고찰한

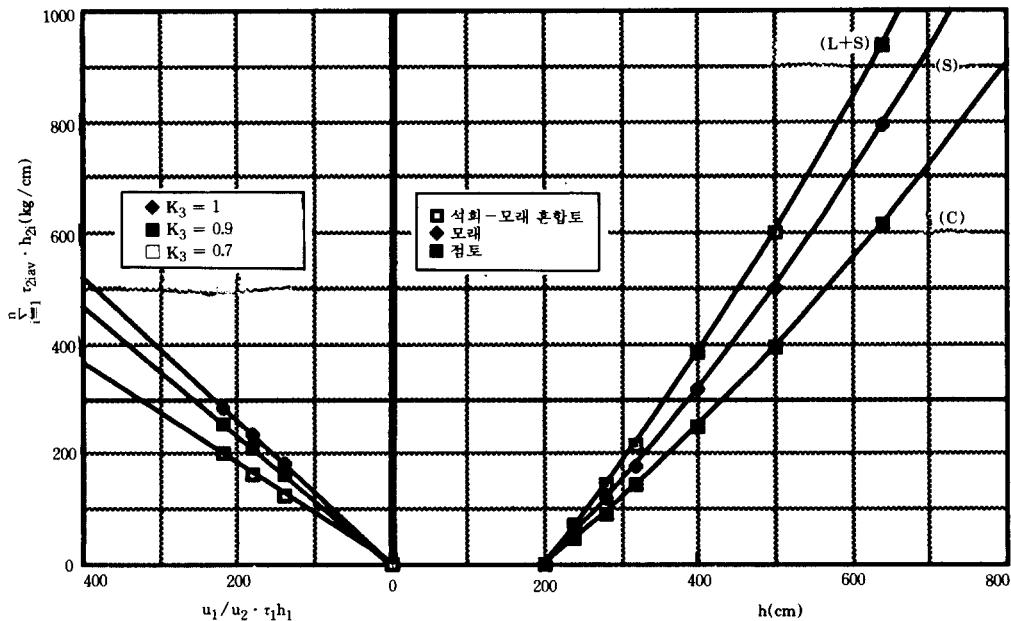


그림 9. 야쿠쯔끄 지역의 수준말뚝의 설계도표

바와 같다. 그러나 강도특성치는 건설 기준 및 규정에서 제안하는 값을 이용할 수 있으며, 온도데이터는 설치지점에서 근접한 규정에서 제안하는 값을 이용할 수 있으며, 온도데이터는 설치지점에서 근접한 기상관측소를 선정 후 특성치가 유사한 자료를 선택할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 야꾸쯔끄 지역에 대해 토성치 ( $I, S$ )만 가지고 설계자의 판단( $u_1, u_2, k_3$ )에 따라 간편하게 수준말뚝을 설계할 수 있는 도표를 제시하였다.

- 2) 다만 수준말뚝의 중요성을 감안하여 적절한 안전율을 적용할 수 있는데 실제로 안전조건설 자체에도 이미 안전율이 반영되어 있고, 또한 건설 기준 및 규정에서 제안하는 방법은 물론 강도특성치에도 안전율이 반영된 상태이므로 별도의 안전율은 고려하지 않아도 될 것으로 생각된다. 그러나 온도 자료의 신뢰도 부족 등을 예상할 수도 있으므로 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 보강방법, 즉 케이싱 설치, 충전재료의 선택, 수준말뚝 하단부의 확대 등을 적절하고도 확실하게 실시하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.
- 3) 기 제시한 절차는 수준말뚝의 설계에만 적

용되는 것이 아니고 동토지역에서 구조물의 기초 설계시 필수적으로 검토해야 할 기초의 용기에 대한 안정성 검토에도 적용할 수 있으며, 또한 같은 방법으로 필요한 다른 지역에 대해서도 설계도표를 작성할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 츠또비치(1993), 영구동토에서의 기초 설계 강의, 레닌그라드 구조물 연구소 출판사, 레닌그라드, 54 pp.
2. 츠또비치(1958), 동토에서의 기초 및 기반, 연방과학 아카데미 출판사, 모스크바, pp. 138~150.
3. 연방정부 건설위원회(1990), 건설기준 및 규정 - 영구동토에서의 기초 및 기반, SNiP 2.02.04-88, 모스크바, 51pp.
4. 츠또비치(1973), 동토역학, 고등교육 출판사, 모스크바, pp. 58~106.
5. 달마또브(1981), 토질역학 및 기초역학, 건설출판사, 모스크바, pp.279~283.
6. 기상출판사(1966), 소련의 기후 정보, 발행번호 24-야꾸찌야 공화국(2권)-온도와 토양, 레닌그라드.
7. 가브릴로바(1973), 중부야꾸찌야의 기후, 야꾸쯔끄 도서출판사, 야꾸쯔끄.

(접수일자 1993. 2. 6)