

地盤凍上力と構造物の被害対策

北見工業大学 正会員 鈴木輝之

1. はじめに

水分を含む土が低温に曝されると土中の水分は凍結する。水分は凍結するときその凍着力によって土粒子間を結びつけるため、土は固結しその強度を著しく増加させる。これが土の凍結である。地盤中に形成される凍結面では 1) 水分条件、2) 温度条件、3) 土質条件の 3 つの条件が揃うと、そこに移動してきた水分が凍結するときに土粒子骨格から分離してアイスレンズを形成する。この現象は氷晶分離と呼ばれ、形成されるアイスレンズによって土の体積の膨張あるいは地盤の持ち上がりが発生する。これが土の凍上であり、このときの変位量が凍上変位あるいは凍上量と呼ばれる。

地盤の凍上変位を擁壁などの構造物によって拘束すると、その構造物には大きな力が加わる。この力が凍上力と呼ばれる力である。このように土の凍上力と凍上変位の関係は一般的な構造材料における応力-ひずみ関係とは基本的に異なるものである。

地盤の凍上発生の評価を凍上量（凍上変位）と、凍上力のどちらで行うかはその目的によることになる。たとえば地盤凍結工法や LNG 地下タンクなどに代表される、いわゆる人工凍結分野と呼ばれる構造物の設計においては、凍上量と凍上力ともに定量的な評価が行われている。この場合には、凍上現象を表す構成式も作られ実際に用いられている¹⁾。

一方、寒冷地の土構造物における自然凍結の分野においては凍上量によって凍上性を評価する傾向が強い。この背景としては以下のような状況が考えられる。1) 道路や鉄道など、いわゆる自然凍上が問題となる構造物では、凍上変位が実被害と結びつく場合が多い。2) 一般的に凍上力に影響する因子は、凍上量以上に複雑で定量的評価がますます困難である。3) 現在では、凍上対策においては定量的な凍上予測までには至らず、凍上発生を定性的にゼロに抑えることを前提としている場合がほとんどである。この場合は評価基準が凍上量であっても凍上力であっても結果は同じことになる。

近年、社会基盤整備の進展に伴って水路構造物、各種土留め壁、さらにはトンネル等の構造物に加わる凍上力による被害が目立ってきている。これら構造物に加わる凍上力は、水分、温度および土質のいわゆる凍上の 3 要素に加えて、構造物に許される変位量、未凍土側の圧縮性などに多くの因子が影響してくるため、それを定量的に推定することは非常に困難なものとなる。現在のところ、この場合の凍上対策工法の基本も凍上の発生を定性的にゼロに抑えようとするには変わらない。

一方、地盤の凍上力がどの程度の値になるかを知るための努力もいくつか行われている^{2) 3)}。本報では、北見工業大学構内で 9 年間に亘って行われてきた地盤の凍上力計測の結果を紹介する。また、試験設置した多数アンカー式補強土壁における凍結土圧の計測結果と、置換（裏込め）による凍上対策の設計法を示す。

2. 地盤凍上力の測定

2.1 測定内容と方法

地盤と接する構造物等に加わる凍上力は、その構造物で許される変位によって異なる。木下³⁾は地盤の凍上変位を全く止めてしまうのに要する力を凍上力と呼び、この力を測定するための現場を北見工業短期大学（現北見工業大学）構内に設け、昭和 36 年から数年に亘る凍上力測定を行っている。

著者の研究室では、大学構内に設けられた実験フィールドの平坦な地表面において、その上に置かれた円盤の持ち上がりをゼロに拘束したときに円盤に加わる凍上力を 9 年間に亘って測定した。測定は毎年凍結が始まる 11 月から凍結が終了する翌年 4 月まで行った。実験地盤の土は火山灰質土であり、その性質を表-1 に示す。

表-1 原地盤の土の性質

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.51
粒度試験	砂分 (%)	44.7
	シルト分 (%)	39.3
	粘土分 (%)	13.0
締め固め試験	Wopt (%)	26.0
	ρ_{max} (g/cm ³)	1.395
凍上試験	凍上速度(mm/hour)	0.48
	凍結様式	微細霜降状凍結

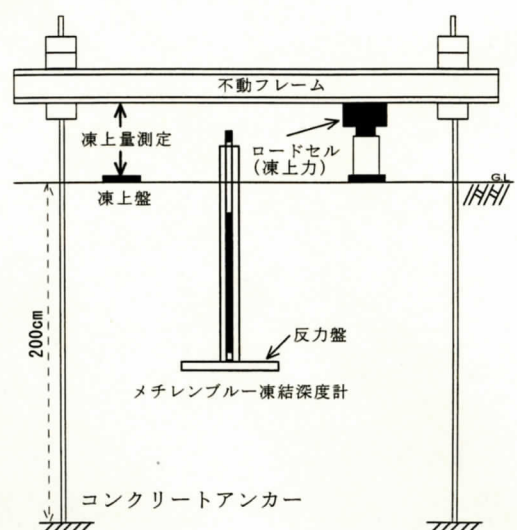


図-1 フィールド測定状況

表-2 計測結果(1994~2002 年度)

測定年度	凍結指数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)	凍結深さ (cm)	地表面凍上量 (cm)	原地盤凍上力 (kN)	縁切り地盤凍上圧 (kPa)		
					径 10cm	径 20cm	径 40cm
1994	714.6	73.7	5.1	24.1	376	105	49
1995	663.5	73.5	7.6	54.8	191	88	134
1996	714.5	74.6	5.6	37.5	145	76	98
1997	688.2	83.0	9.3	57.6	159	119	142
1998	738.8	75.2	10.1	65.7	199	191	159
1999	798.4	80.5	6.5	63.1	143	152	190
2000	1001.4	90.2	6.1	85.5	730	216	151
2001	654.9	67.5	11.8	56.2	248	166	232
2002	947.3	88.5	10.2	63.1	448	303	182

測定状況を図-1 に示す。ここでは地下 2m の深さに設置したコンクリートアンカーと連結された H 鋼を不動点としている。この H 鋼と地表面に置かれた凍上盤との距離の変化を凍上量としている。また、H 鋼と凍上盤（直径 10cm）の間にロードセルと鉄製のスペーサーを挟めて変位を拘束したときにロードセルによって測定される力を凍上力としている。図-2 は地表面に置かれた円盤に加わる凍上力が伝達する機構を示している。図-2(a) の場合、凍結面で発生する力すなわち凍結膨張圧力は凍土の層を介して円盤に伝達される。このときに伝達する力は円盤の直下で発生する凍結膨張圧力だけではなく、その周辺で発生する力も集中してくるため、円盤に加わる凍上力は非常に大きくなる。本文中ではこの凍上力を原地盤凍上力と呼んでいる。一方、図-2(b) の場合、円盤直下の地盤と周辺地盤との間を凍着力の小さいテフロンシートで縁切りしている。このときに円盤に加わる凍上力は縁切りの効果が十分であるならば、凍結面で発生する単位面積あたりの凍結膨張圧力に等しくなるはずである。本文中ではこのように測定された力を縁切り地盤凍上力と呼んでいる。

2.2 測定結果

図-3 は、2001 年度（2001 年 11 月～2002 年 4 月）に測定された日平均気温、凍結深さ、凍上量、および原地盤凍上力の経時変化を示している。日平均気温がマイナスとなり地盤の凍結が始まると同時に、凍上による持ち上がりりと凍上力の増加が始まっている。日々の気温は短期間の間に小刻みに変動する。これに対して、凍上量と凍結深さには短期的変動は明確には認められず、比較的滑らかに増加して行く傾向が認められる。一方、凍上力は短期的な気温変動に対して敏感に反応している。すなわち凍上変位とそれを拘束したときに加わる凍上力とは、対応したものにはなっていない。

前出の図-2 に示すように、凍上量は地盤中の凍結面付近における凍上発生を反映するものであり、短期的な気温変動の影響は、凍土層の熱伝導性の低さによって緩和されていると思われる。これに対して、凍上力は図-2 の凍結面で発生する凍結膨張圧が凍土層を介して円盤に伝達される。したがって凍上力は凍結面付近で発生する凍結膨張圧の大きさだけではなく、それを伝える凍土層のクリープ変形、さらには不動フレームの熱膨張・収縮などの影響も受けるため、気温変動を敏感に反映していると考えられる。表-2 に 1994 年度～2002 年度までの 9 シーズンに亘る地盤凍結・凍上測定の結果を示す。表中では、短期的に変動する凍上力について、シーズンを通しての最大値を示している。地表面に置かれた直径 10 cm の円盤に加わる原地盤凍上力の最大値は、測定シーズンによって 24.1～85.5kN の間で変化し、9 年間の平均値は 56.4kN であった。一方、縁切り地盤凍上力の測定は縁切りの直径を 10cm, 20cm, 40cm の 3 種として行った。この場合は、縁切りが十分に行われたとすれば、その直径にかかわらず単位面積あたりの凍上圧は同じになることが想定された。しかし表-2 の実測結果からすると、縁切り直径 20 cm と 40 cm の凍上圧はほぼ類似の値となったが、縁切り

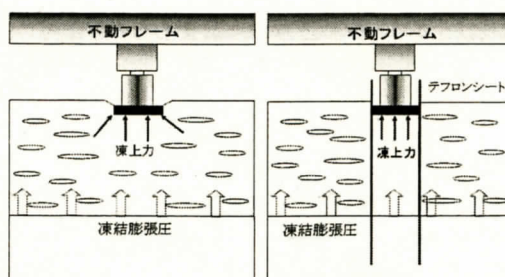


図-2 凍上力発生機構

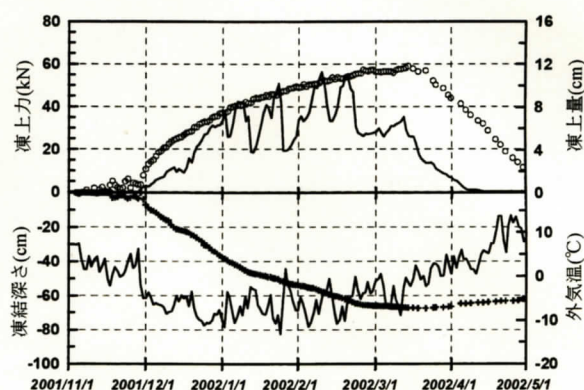


図-3 凍上力、凍上量、凍結深さ、及び日平均気温の推移

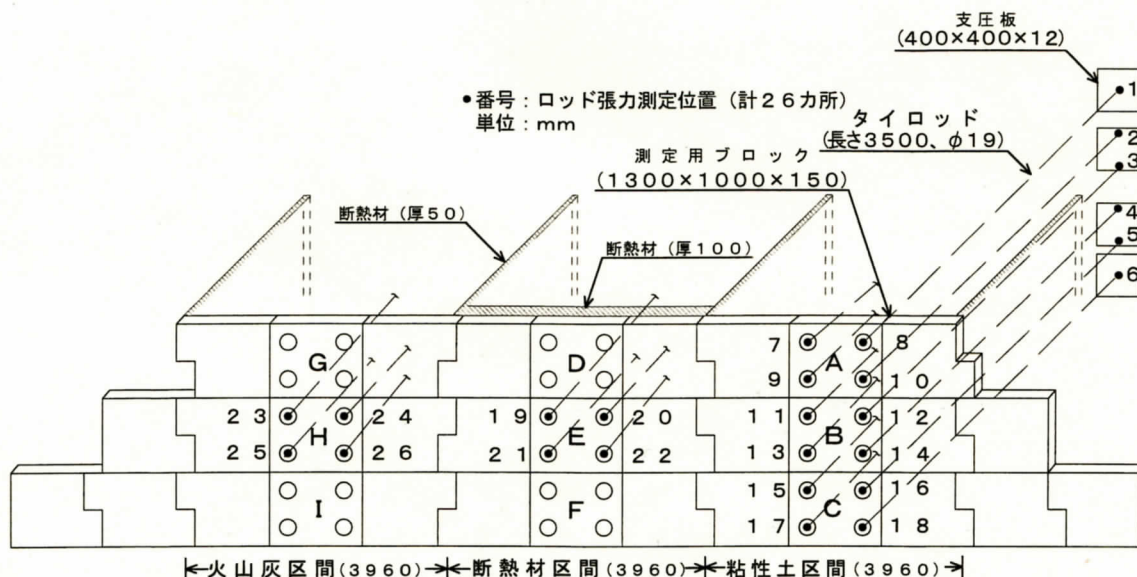


図-4 試験壁の概要

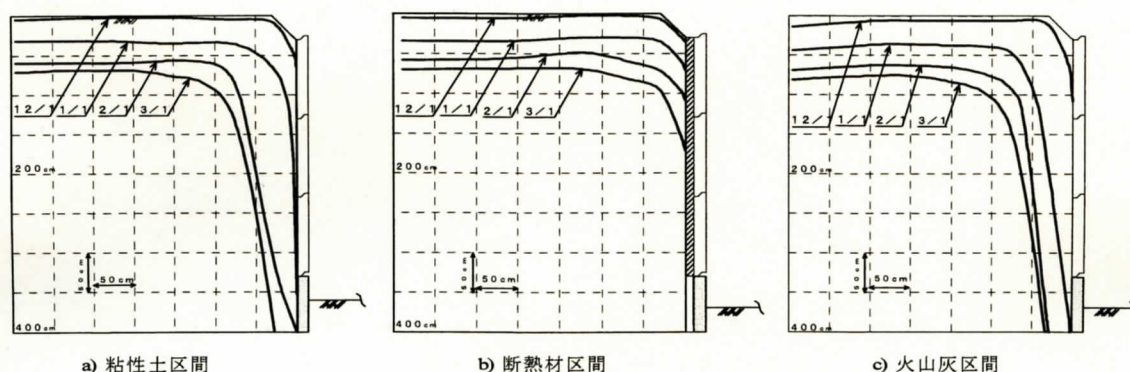


図-5 背面土中の凍結面(1991-1992)

直径 10cm の凍上圧は少し大きめの値となっている。10cm 縁切りでは、凍結面の深さに対して縁切り径が小さかったため作用する摩擦の影響が現れたことが推察される。ここでは、表-2 の縁切り直径 20cm と 40cm の値を参照すると、縁切り地盤の凍上圧力は 9 シーズンの平均値で 150kPa 程度であることが分かる。以上、本学構内で測定された凍上力あるいは凍上圧力を示してきたが、これらの値はあくまでも限られた条件下での 1 つの実測値であることに注意する必要がある。しかし土構造物に加わる凍上力は土圧などの外力に比べて非常に大きな値となることは間違いない。凍上力の定量的な推定が困難な現状においては、凍上対策の基本は凍上力に対抗するように構造物を強化することよりも、有害な凍上力が発生しないように周辺地盤を変えることにある。

3. 多数アンカー式補強土壁に加わる凍上圧力と凍上対策

3.1 試験壁

北見工業大学構内に試験設置した多数アンカー式補強土壁の概要を図-4 に示す⁴⁾。試験壁は次の 3 つの区間に分けて、各々で背面処理の条件を変化させている。

- 1) 粘性土区間：凍上性の火山灰質粘性土で裏込めした区間で、これを凍上対策をしていない区間とみなしている。
 - 2) 断熱材区間：壁面ブロックの裏側に厚さ 100 mm の押出し発泡スチロールの断熱材を設置して壁面からの凍結侵入を防いでいる。これを断熱工法による凍上対策区間とみなしている。
 - 3) 火山灰区間：非凍上性の火山灰で裏込めした区間で、これを置換工法による凍上対策区間とみなしている。
- 計測の対象とした A-I の 9 個の壁面ブロックは、独立した 4 本のタイロッドによって水平方向に支持されている。タ

イロッドの直径は 19 mm, SS4000 の丸鋼で保障引張り強さは 113kN である。壁面ブロックに加わる土圧はタイロッド張力として測定した。タイロッド張力の測定点を図-4 中の●印で示す 26 カ所とした。測定点のうち No.1~6 の 6 カ所は支圧板との接続部に No.7~26 の 19 カ所は壁面ブロックとの接続部とした。

試験壁で用いた裏込めとした土は、未風化の火山灰と、火山灰質粘性土である。道路土工排水工指針の方法による凍上試験の結果、火山灰は非凍上性で、粘性土は明らかに凍上性と判定された。実験場所の地下水位は付近の地盤調査結果から-10m 程度と推定され、さらに浸透水などによる壁裏込めへの水分供給も認められない。この水分条件からして、本試験壁は大きな凍上の発生する条件にはないと考えられた。なお、計測は 1991 年~1995 年にかけての 4 シーズンに亘って行った。

3.2 背面土の凍結状況

壁面ブロックに加わる凍上圧力は、背面土中での凍結面形状に強く支配される。図-5 は、背面土中に設置したメチレンブルー凍結深度計の測定値から求めた凍結面の形状を示す。

凍結面は寒気に曝される面に平行に形成される(図-5(a), (c))。一方断熱材の影響は非常に顕著で、壁面ブロック背後に入れた断熱材は、それに並行する凍結面の形成を止めていることが分かる(図-5(b))。

凍結面で発生する凍結膨張圧力は凍結面に垂直の方向に作用する。したがって、図-5(a), (c)におけるような形状の凍結面で凍上が発生すると、壁面ブロックを押し出すような水平方向の凍結土圧が作用する。一方、断熱材区間(図-5(b))では、中断と下断ブロックでの凍結土圧はゼロで、上段ブロックでも非常に小さな値でしかないであろうことは容易に想定できる。

3.3 壁面ブロックに作用する凍結土圧

図-4 に示すように計測対象の壁面ブロックは 4 本のタイロッドで独立して水平方向に支持されているので、これら 4 本のタイロッド張力を加え合わせた値をブロックに加わる全土圧とし、それをブロック面積 (1.3m²) で割った値を土圧としている。

図-6 は、計測対象とした A~H の 6 つの壁面ブロックに加わる土圧の経時変化を示している。凍結土圧が発生する粘性土区間の凍結土圧は地盤凍結が始まる 12 月上旬に増加し始め、2 月頃に最大値を示し、3 月下旬の地表融解の開始とともに急速に減少して未凍結期(夏季)の土圧に戻っている。凍結期の土圧は下方のブロック程大きく、その最大値は約 40kPa で、前出の表-2 に示す縁切り地盤凍上圧(平均 150kPa 程度)に比べても小さい値となっている。また、図-3 の凍上力に見られるような気温の短期的な変動に対応した凍結土圧の変動も見られない。

一方、凍上対策を行った区間と見なした断熱材区間(ブロック E)と火山灰区間(ブロック H)では、凍結期の

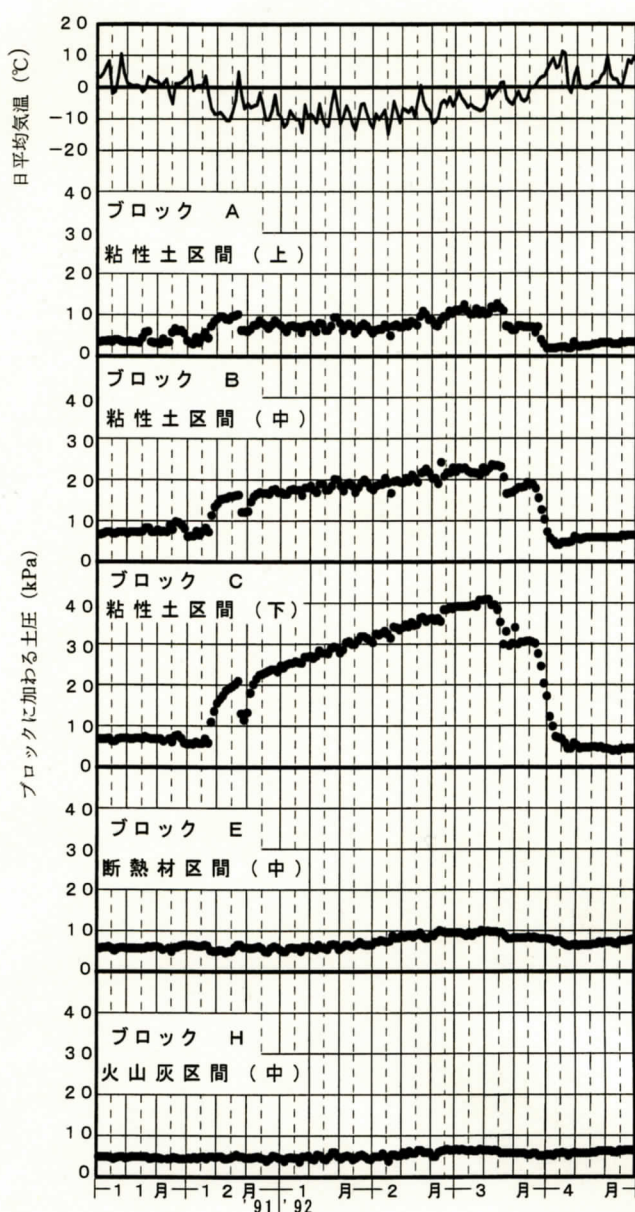


図-6 壁面ブロックに加わる土圧の経時変化(1991-1992)

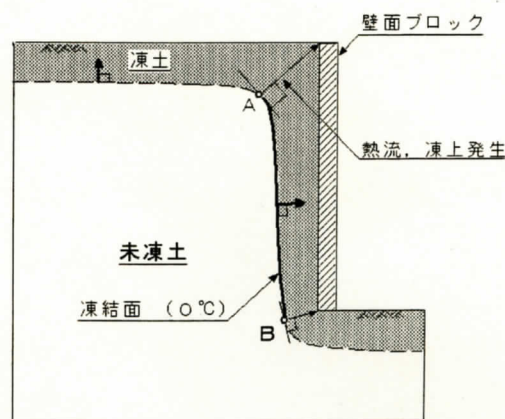


図-7 凍結面の模式図

る。さらに同論文中には排水性粗粒材料で構成された飛行場舗装下の凍結深さを実測した (ACFEL, U. S. A) 結果も示されている。図-11 中にはこれら 2 つの曲線も併記している。ともにバラツキの多い実測値を 1 本の曲線で代表させたものである。これら 2 本の曲線がシミュレーション手法で求めた曲線群の中間的な値を取っており、図-11 の妥当性を示唆している。

4. あとがき

地盤の凍結・凍上は、まさに古くて新しい課題である。昭和 27 年発行の土質工学会誌「土と基礎」の創刊号に故真内耕象先生の地盤凍上に関する論文が掲載されている⁸⁾。この論文の中では、本報告で取上げている凍上力による水路や擁壁の凍上被害が指摘されている。現在は問題点の指摘から、具体的な対策技術が揃いつつある段階と言える。しかし、ここで扱った自然凍結の分野でも構造物の凍上対策は、凍上発生を定性的にゼロに抑える技術の粋を出していない。今後自然凍結の分野においても人工凍結分野におけるような凍上現象を定量的に表す構成式が出来上がっていく必要があるし、その努力も始まっている。

参考文献

1. 凍上量予測のための土の凍上試験方法 (JGS0171-2003) 新規制定地盤工学会基準・同解説 VII (2003 年度版), 地盤工学会, 2003. 11
2. Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils, Kauko Kujala, ACTA Universitatis Ouluensis, series C Technica 58, 1991.
3. 凍上力 II, 木下誠一, 大野武敏, 大黒貢, 低温科学物理篇第 24 輯, 昭和 41 年.
4. 多数タンカー式補強土壁の背面凍結と凍結土圧, 鈴木輝之, 宇野裕教, 澤田正剛, 安達謙二, 土木学会論文集, No. 645/III-50, pp 281-290, 2003. 3.
5. 寒冷地における多数アンカー式補強土壁の凍上対策, 宇野裕教, 鈴木輝之, 澤田正剛, 安達謙二, 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp243-252, 2002. 3.
6. 凍上対策に用いる粒状材料の熱伝導率, 畢春雷, 鈴木輝之, 澤田正剛, 山下聡, 土木学会論文集, No. 785/III-70, pp 83-92, 2005. 3.
7. 北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究, 伊福部宗夫, 北海道開発局土木試験所報告, 1962.3.
8. 凍上被害とその対策について, 真井耕象, 土と基礎, 1 巻 1 号, 1952.

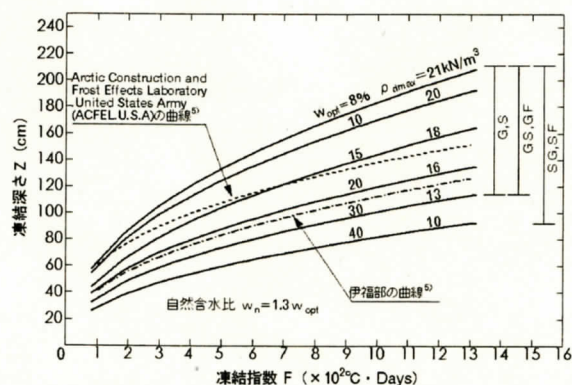


図-11 凍結指数と凍結深さの関係