

永久凍土地帯の特徴的地形と構造物基礎の特殊性

Unique Foundation Design Approaches for Permafrost Regions Relating to their Geographical Features

赤川 敏 (あかがわ さとし)

清水建設㈱技術研究所地下技術研究部 主任研究員

1. はじめに

陸地の14%は永久凍土と呼ばれる1年中凍結したままの地盤に覆われている。永久凍土は主に北極圏内の陸上とその北沿の北極海海底、その南沿地域およびヒマラヤなどの高山地帯に分布している。南極大陸上には厚い氷床に覆われているため、土壌があまりなく土の凍結による永久凍土はほとんど存在しないと考えられている。永久凍土はおおむね年平均気温が -2°C 以下の、植生で区分するとツンドラ帯と亜寒帯樹林帯に存在する^{1),2),3)}。

永久凍土地帯は厳しい環境であるがゆえ人口が増えず近代化が遅れている。オイルショック以降、永久凍土地帯は石油資源を中心に温帯地域の資源開発が行き届くにつれて、残されたフロンティアとして次第に脚光を浴び出してきた。イヌイトなどの先住民族は軽量かつ小規模の建造物しか活用しなかったため、自然環境を乱すことなく長年に渡り環境と調和を保ちながら生活してきた。しかし、近代化された生活に慣れ親しんだ我々現代人は、温帯と同様な暮らし向きを必要とし、永久凍土地帯には不向きな基礎を持つ構造物を力任せに建造した時期が当初あった。この結果さまざまな不具合が顕在化し、永久凍土工学が発展してきた^{3),4),5)}。

永久凍土工学の特色はなんといっても一般の土質工学に温度という考慮すべき新しい物理量加わることであろう。永久凍土地帯では夏期には 40°C 近くまで気温が上昇し、冬期には -70°C まで気温の下がる地域がある²⁾。正の気温範囲では、いわゆる土質工学上一般に温度項は考慮する必要がないが、負の温度領域では間隙水の凍結がさまざまな新しい問題を引き起こすことになる。凍結膨張(凍上)は土の凍結に伴う最も代表的な現象であり、土中水が移動

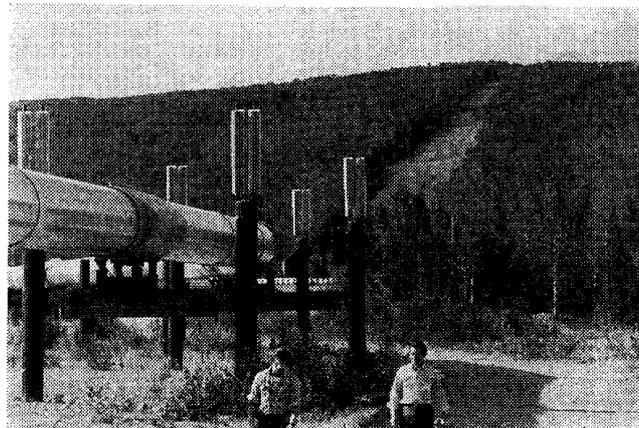
し純氷を形成し膨張を起し、更には融解した際に沈下を起こす場合が代表的な例である。

本報告ではこのような特殊な現象がどのような不具合を起し、その不具合をどのように対策しながら永久凍土上に構造物を構築して行くかを紹介する。不具合が顕在化しない山岳地帯および南極の永久凍土はここでは取り扱わないこととする。

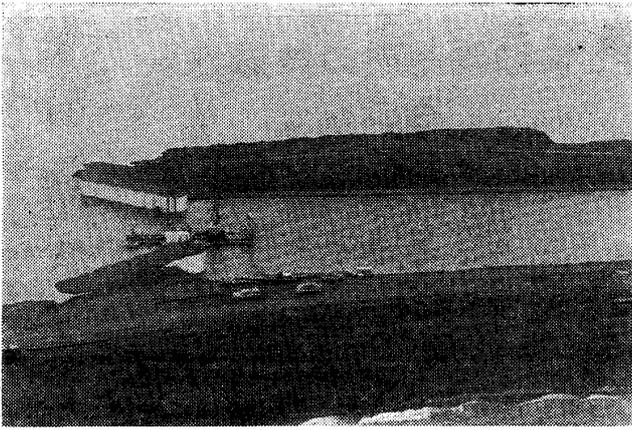
2. 永久凍土上の建造物と不具合発生事例

永久凍土上の構造物としては口絵写真—4、写真—1~4に示すような、地下資源を試掘するボーリング施設、立て坑および労働者用の居住施設、これら施設をサポートする各種パイプライン、道路、滑走路、港湾構造物、発電所、上下水、廃棄物処理場等のインフラストラクチャーがまず挙げられる。地下資源は海底にも存在するため海底下に存在する永久凍土上にも試掘、生産施設や海底パイプラインなどが建造されている。その他の代表的な構造物としては、国防上必要なレーダーサイトのような軍事施設が挙げられる。

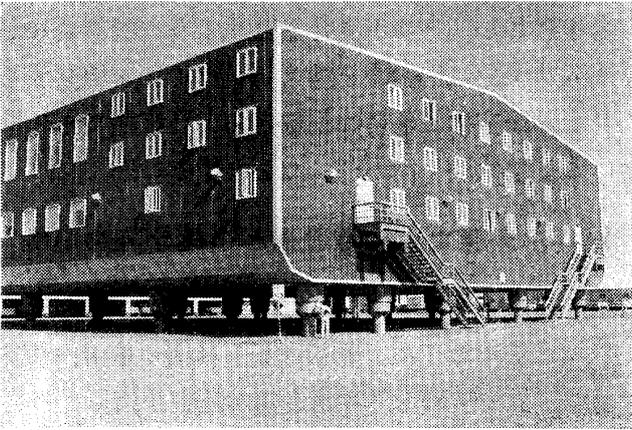
当初は永久凍土が安定して存在する条件や水平、



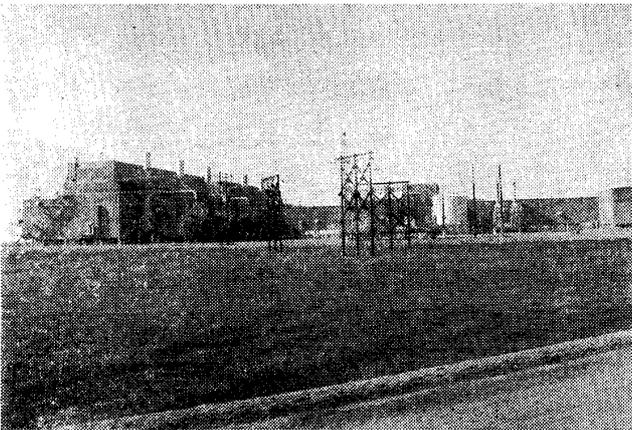
写真—1 アラスカ フェアバンクス 付近のアリエスカパイプライン(手前:地上式,奥の山腹:地中式)



写真—2 アラスカ プルードベイの港湾構造物

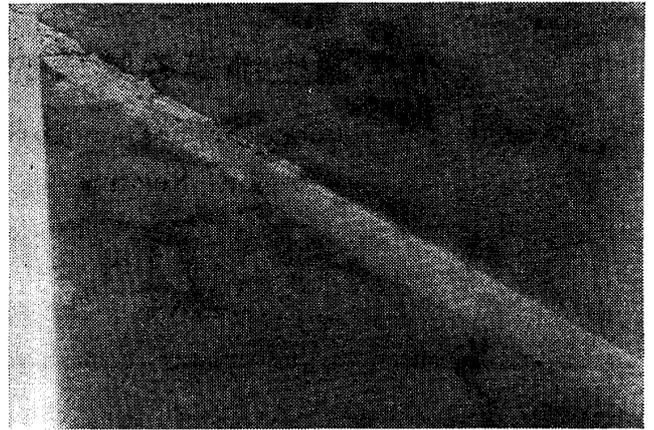


写真—3 アラスカ プルードベイの石油生産基地にある居住施設（キャンプ）

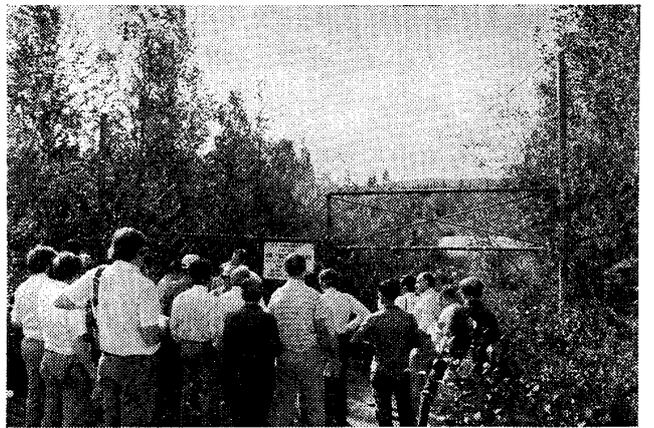


写真—4 アラスカ プルードベイの発電所

鉛直分布があまり理解されていなかったため口絵写真—5, 6, 写真—5, 6に示すような不具合があらこちらで起きていた。例えば、砂利を敷いて布設した道路は数年で沈下して川のようになってしまう、冬期雪上を走行した車両の通路は夏期には小川になってしまった。また、ある施設の入口に永久凍土の中まで埋設した門扉は片側だけせり上がり門として



写真—5 ツンドラ中に放棄された旧道路。路盤の断熱性が不足し、下部の永久凍土が解凍沈下した。



写真—6 凍着凍上により片側の門扉(向かって右側)が50cmほど引き抜かれた例(左右を比べると凍前凍上の場所によるばらつきが大きさが分かる)

機能しなくなってしまった。このような予想だにしない不具合の発生により永久凍土上での建設技術の難しさが認識され、永久凍土の工学的研究が開始された。

3. 永久凍土

ではなぜこのような不具合が起きたのであろうか。この原因を概説するために、ここではまず永久凍土の分布、温度および土の凍結に伴う代表的な現象を簡単に紹介し、これらをもとに永久凍土地帯に特有な地形の構造や成因を概説する。

3.1 永久凍土の分布

永久凍土は図—1に示すように北極海を中心にアラスカ、カナダ、グリーンランド、シベリアなどに広く分布している⁴⁾。広大な永久凍土は当然年平均

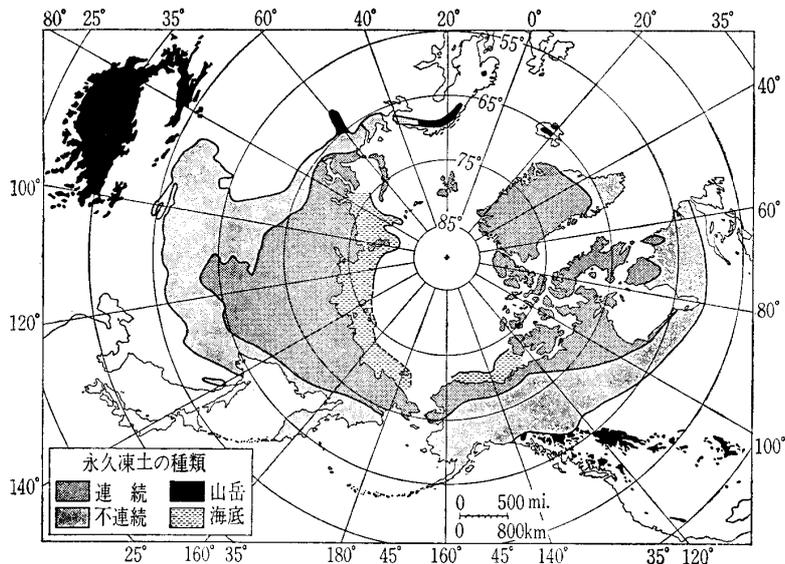


図-1 永久凍土分布⁴⁾

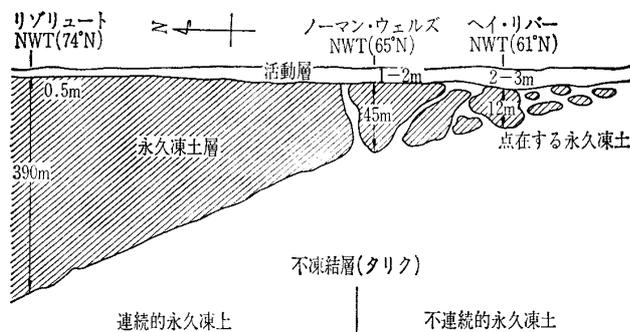


図-2 カナダにおける代表的な永久凍土の鉛直分布とその厚さ³⁾。南へ行くに従い厚さが減り、連続から不連続へと移行する。

気温の低い高緯度地域で厚く、南に下がるほどその厚さを減少させ、平面的にも鉛直方向にもその存在が不連続となり、ついには点在する程度になり消滅するという厚さ分布をもっている。この状況を図-2にカナダのリゾリユートから以南の鉛直断面分布として例示してある³⁾。この図で連続的に存在するリゾリユートからノーマン・ウェルズの地帯を連続的永久凍土地帯と呼び、それ以南の不連続に分布する地域を不連続的永久凍土帯と一般に呼んでいる。図-1には連続および不連続永久凍土の平面分布がそれぞれ示してある。同図にも示してあるように、北極海海底にも海底永久凍土が分布していることが知られているが、その北限は未だに未確認の部分が多い。永久凍土地帯も夏期には気温がプラスになるため地表付近数10cmから1mほど融解する。この部分を活動層とよび、永久凍土地帯での凍上による被害(凍上害)を引き起こす源となっている(図-

2)。

3.2 永久凍土の温度分布

ところによっては数100mの厚さをもつ永久凍土の温度はどうなっているのだろうか。地下資源探査・生産を実際に行っている企業などは、かなりの量の永久凍土の温度分布データを持っているはずである。しかしながら、これらのデータは一般に未公開であるため、不明な点が多い。図-3にはさまざまな知見を基に推定したアラスカ中央部における地中温度分布を示してある。このように厚さ36mの永久凍土であっても、最も温度の低いところで年平均温度約-2℃と全深度をとおして非常に氷点に近く、

解けやすい状態にあることが分かる。このため、地表面での熱収支の微妙な変化で永久凍土の上部の活動層が厚くなったり薄くなったりする。

例えば、断熱性の高い地衣類に覆われたツンドラ地帯を、活動層が凍結し走行しやすい冬期に重量のある車両などが通行すると、地表の植生や有機物を圧縮し断熱性を低下させ、夏期の日射による放射熱を吸収しやすくしてしまう。冬期は日射が少なく地表での熱収支は例年とあまり変化しないため1年を通しての入熱量が増加する。結果として、夏期にこの部分の永久凍土上部が例年以上に融解してしまう。

別の例としては、ツンドラ帯以南の森林帯において、森林を伐採すると夏期の日射による入熱の増大や、直接暖気に接することにより大規模な融解が起きるという事例がある。更に、内部に熱源を持つ構

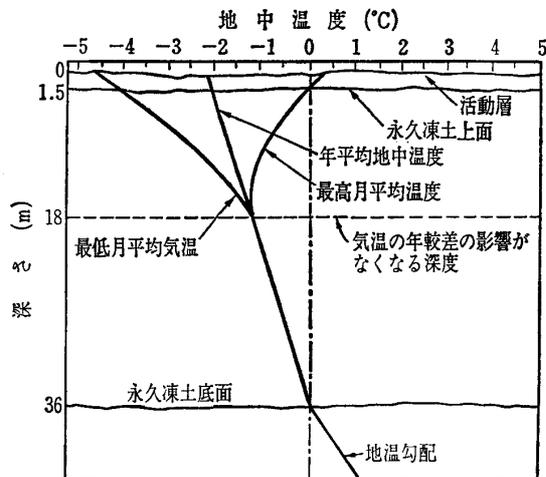


図-3 アラスカ中央における永久凍土の仮想温度分布⁴⁾

報告—1982

造物を永久凍土地帯に建造する場合は十分な断熱を施さないと確実に永久凍土の融解を起こす。

3.3 土の凍結に伴う諸現象

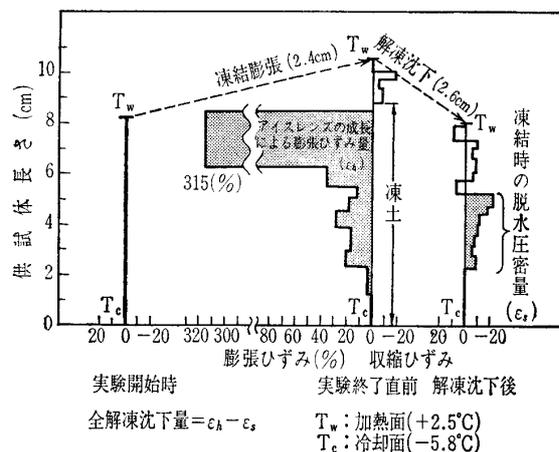
永久凍土の上部が融解しても、これだけではなんら問題は生じないはずだが、実際には融解に伴いかなりの沈下が生じる場合が多い。沈下の原因は主として凍結に際して成長する氷の融解によるため、ここでは土の凍結に伴い起こる凍上、解凍沈下、凍着凍上について概説する。

(1) 土の凍結と凍上

土が凍結すると言うことは当然その間隙水が氷に相変化することである。砂のように比較的粒径が大きい場合は間隙水が氷点降下せずに 0°C で凍結し、凍結する間隙水の 9% に相当する氷（過剰間隙氷と仮称する）が間隙中に過剰に発生する。不飽和土の場合、この過剰間隙氷の発生によっても空隙を満たすことができない場合は、凍結による土の体積膨張は起きない。過剰間隙氷の発生で間隙が満たされる、あるいはもともと飽和状態の土でも、凍結面前面の凍結していない土（未凍結土あるいは未凍土）の透水性が高く、この過剰な間隙水の体積に相当する間隙水が十分逸散することができれば土は凍結による膨張を起こさない。粘性土のように砂に比べて透水性の低い場合は過剰間隙氷の発生による間隙水の逸散が十分できない場合があり、最大で間隙率の 9% の体積膨張が有り得る。しかしながら、この程度の膨張では一般に間隙氷は目に見えない⁶⁾。

凍上と呼ばれる現象はこれとは異なり、霜柱のようなアイスレンズと呼ばれる氷の薄層を土中に発生・成長させる現象をいう。凍上量を工学的に推定することは現在可能だが⁷⁾、凍上の機構は未だに科学的な研究対象である⁸⁾。現在分かっている範囲で凍上現象を概説すると以下ようになる。

粘性土のような凍上性の土には土粒子の表面に 0°C では凍結しない不凍水（吸着水）が多く存在する。いわゆる不凍水は、さまざまな物理・化学的力により 0°C では凍結せず、それよりいくらか低い温度で水-氷が共存している。この氷点降下を起こす源を、先の不凍水の圧力変化として解釈すると、巨視的には熱力学的に表現し得るという実験結果が得られている⁹⁾。このため不凍水の圧力変化（低下）が凍結面では発生していると考えられている。この圧力低



図—4 土の凍結による膨張ひずみ分布と解凍後の残留ひずみ分布の実測例¹⁰⁾

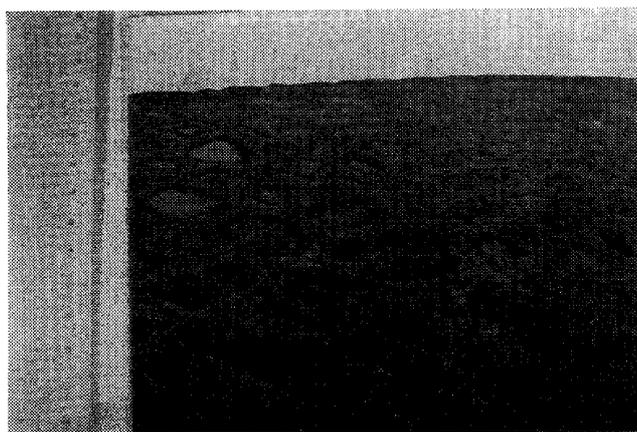
下により未凍土の中に間隙水圧勾配が生じ、この圧力勾配により間隙水が凍結面に吸引され氷に相変化しアイスレンズを形成するという実験結果が得られている¹⁰⁾。

(2) 解凍沈下

アイスレンズの成長は土中の水分移動を伴っており、アイスレンズの部分は極端に高い含水状態となっている。永久凍土上部が融解するということは、この高含水状態の凍土が融解しアイスレンズを形成していた水が逸散することで、非常に大きな沈下を起こす可能性を意味する。このような沈下を解凍沈下という。土の凍結による凍上、すなわちアイスレンズの成長、と解凍沈下による残留ひずみの実測例を図—4に示す。この場合、凍結前は 8.2 cm の供試体長であったが、凍結により 2.4 cm ほど膨張し、次いで解凍により 2.6 cm ほど収縮している。

(3) 凍着凍上

地盤が凍結するときは当然地表から下方へ凍結が進行する。このとき地盤に門柱や杭があると、これらの外周は地盤が凍結するときに凍土と強く付着（凍着）する。この凍着強度は約数 kgf/cm^2 から数 $10 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ と大きく、もし活動層が冬の凍結に伴って凍上すると門柱や杭は凍土と共に持ち上げられる。夏に活動層が解けるときは地表から解けるため、門柱や杭は持ち上げられたまま活動層が解け、結果的には門柱や杭は 1 年がかりで引き抜かれることになる。この現象を凍着凍上という。土と杭などの付着力は凍着凍上力に比べればはるかに小さいが、凍着凍上は杭に働くネガティブフリクションと類似



写真—7 地上数100mから見た構造土（アラスカ
バーロー付近）



写真—8 アラスカ コービル川沿いに露出している氷
楔

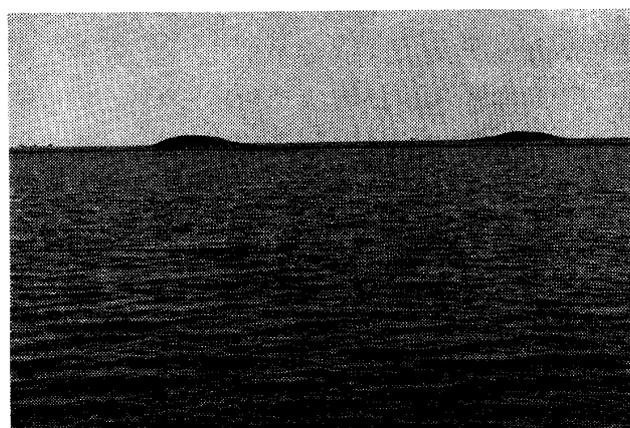
していると言える。

3.4 永久凍土地帯の特有な地形

土の凍結に際して凍上が起こると凍着凍上が起きたり、凍上により凍土中に析出した純氷が融解したときに解凍沈下が起こることが分かった。本節では写真—7～10に示すような「構造土」, 「氷^{けい}楔」, 「ピ^ンゴ」, 「集塊氷」といった永久凍土地帯の特徴的地形を紹介する^{1), 2), 3), 4), 5)}。

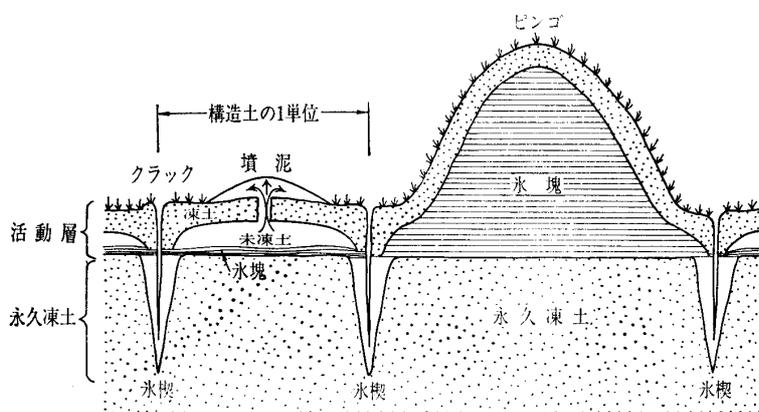
(1) 構造土

構造土は写真—7に示すような特有な模様を持っている。主に永久凍土地帯のような寒冷な地域に存在し、その模様は気候、土質、地形等でさまざまに変化するが基本的には多角形の模様を示す。模様の大さは10cmから数10mとさまざまであり、模様の形態も中央が盛り上がったものや逆に中央が低くなり水田のようになっているものなどがある。構造土の成因は以下のように考えられている。冬期、活動層が凍結する頃には図—3に示すような大きな温

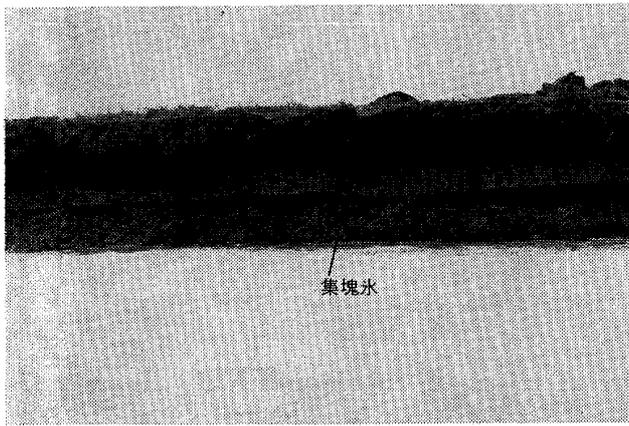


写真—9 プルードベイにある小規模なピngo

度勾配が活動層に存在し、この温度勾配に由来して活動層内には地表に大きく深部に小さいという引張り方向の熱応力分布が発生する。地表の熱応力が凍土の引張り強度を越えたとき活動層にはクラックが発生し、徐々に下方に進展する。平面的には熱応力は均一であるので、比較的大きさのそろった多角形にクラックは発生する。このクラックは活動層の新たな冷却面となり、図—5に示すように活動層の凍結は上から下へという平面的なものからクラックの背後へという凍結が加わり、未凍土を取り囲むように活動層の凍結は進行するようになる。このため、永久凍土と凍結中の活動層に取り囲まれた未凍土の内圧は活動層の凍結に伴って上昇する。その結果、活動層上面が膨れ上がったり、破裂して未凍土が吹き出し、未凍土の圧力を解放する。この状態は地盤の液状化に伴う噴砂現象と類似している。このようにし



図—5 代表的永久凍土地帯の地形の模式断面図（活動層が凍結中の冬期）



写真—10 河川に洗い出された集塊氷（コービル川）

て中央が盛り上がった構造土が形成される。

(2) 氷楔（ひょうけい）

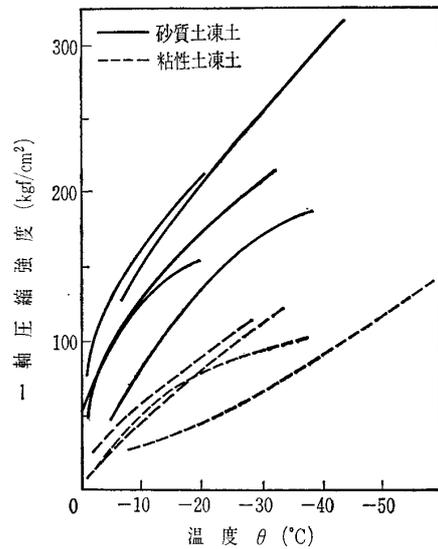
氷楔とは写真—8に示すように、永久凍土中に楔（くさび）を打ち込んだような形で存在する氷のことをいう。大きいものでは楔の背の幅が1から3 m、高さが1から6 m程である。氷楔は構造土の模様に沿ってその下の永久凍土中に存在する（図—5）。成因は冬期の引張りクラックによる構造土の模様と同様であるが、活動層の凍結および冷却に由来する熱応力による引張り亀裂が永久凍土をも引き裂いた場合に成長する。夏期に活動層が融解し未だに閉じ切れないクラックに土中水が流れ込み、そこで凍結する。このような一連の作用が毎年繰り返されるために、氷楔は成長する。

(3) ピンゴ

ピンゴとは写真—9に示すような円錐形の小丘のことである。これも活動層の凍結に伴う凍上現象に伴う氷の析出によるもので、小丘の内部は氷で形成されている（図—5）。ピンゴの高さは、条件さえ整えば数10mに及ぶが、この成長には数千年という長い期間が必要である。

(4) 集塊氷

集塊氷とは写真—10に示すように活動層および永久凍土中に広く分布した氷塊のことをいう。集塊氷の成因には諸説あり明らかになっていないが、厚さ10 m、長さ数 km といっ



図—6 一軸圧縮強度と温度の関係⁷⁾

たものも存在する（図—5）。

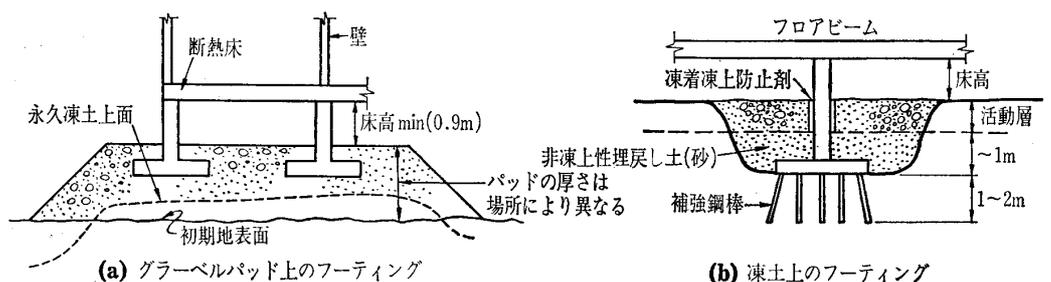
4. 永久凍土における基礎設計上の考え方

これまで述べてきたさまざまな事象は、永久凍土の上面付近がさまざまな理由で多くの氷を含んでいることを示している。例え凍結した土や、氷が図—6に示すように未凍結の土より硬く強度があるとはいっても、凍土が融解し解けた水が逸散すれば大きな沈下が起こることは容易に想像できる。また、活動層における凍着凍上害は凍結・融解を繰り返すほど悪化することも容易に想像できる。

永久凍土地帯ではこのような特殊性を考慮して基礎の設計を行う必要がある。基礎の設計において代表的な4つの考え方を以下に示す¹¹⁾。

(1) 永久凍土の温度環境を乱さない

永久凍土の融解により有害な沈下が予想される場合は、さまざまな方法で永久凍土の温度環境を乱さないように対策する。この考え方の根底には永久凍土の解凍沈下を抑止するという目的のほか、不規則な氷の分布をあらかじめ十分知り得ないことに由来



図—7 軽量な建物基礎の例¹¹⁾

する。写真—3のキャンプあるいは図—7に示すような建造物では構造物を高床式にし床からの生活廃熱を遮断し、また通風による地表からの冷却を可能にしたり、活動層の上部に十分な断熱性を確保できる厚さの礫層や断熱材を施すことが多い。場合によっては、活動層の中に凍結管を埋設し、冷凍機あるいはヒートパイプにより強制的に地盤を凍結させることもある。ただし、このような場合は運転および保守管理にかなりの費用がかかる。

(2) 永久凍土の解冻を許す

構造物の基礎が基盤岩や軽微な解冻沈下しか予想されない場所においては、十分な現地調査および解冻沈下の予測の基にこの方法が可能である。

(3) 基礎の支持層を改良する

永久凍土を支持層とする杭基礎を施工する場合は、余掘りをし、既製杭を挿入した後に非凍上性である砂と水の混練りしたものを投入する事が多い。これにより埋め戻した水混じりの砂は永久凍土の持つ冷熱で凍結し、杭は永久凍土内に固定され高い支持力が期待できる。このように、基礎の支持地盤を非凍上性の砂などで置換し、場合によっては積極的に水を添加し支持地盤を改良する方法が適宜採用されている。

(4) 従来の方法

構造物を岩盤や砂礫層などの解冻沈下が予想されない支持層に建設する場合は、温暖な地域で一般に行われている従来の設計方法を当然採用する。

5. おわりに

永久凍土地帯はその過酷な気象条件がゆえに豊かな地下資源を守り続けてきた。人類の持つ技術力が向上し、またより多くの地下資源を必要とする21世紀にはさまざまな資源探査・生産活動がこの永久凍土地帯に展開されることであろう。しかし、永久凍土は非常にきわどい環境状態でバランスが保たれ存在しているため、永久凍土の特徴を熟知し、現地の諸条件を十分把握し、適切な設計を行わなければ多大の不利益をもたらすことが多少でも分かっていたら、本報告の本意は達したものである。

なお、永久凍土工学に関するより詳しい解説は文献 Johnston (ジョンストン)³⁾, Péwé (ペウエ)⁴⁾, Jordan (ジョルダン)¹⁴⁾, Berg (バーグ)¹³⁾, Phukan (プーカン)¹¹⁾, Crory (クローリ)¹²⁾を参照されたい。

今後世界の経済活動に大きく影響を与え続けるであろう我が国の、土と基礎にかかわる技術者が永久凍土に関心を持っていただければ幸いである。

参考文献

- 1) 福田正己・小疇 尚・上野道男：寒冷地域の自然環境，北海道大学図書刊行会，pp.99~122，1984.
- 2) 木下誠一：永久凍土，古今書院，pp.1~202，1980.
- 3) Johnston, G.H.: Permafrost—Engineering Design and Construction—, John Wiley & Sons, pp.1~529, 1981.
- 4) Péwé, T.L.: Geological Hazards of the Fairbanks Area-Alaska, Geological & Geophysical Surveys Special Report 15, pp.1~109, 1982.
- 5) Williams, P.J.: Pipelines & Permafrost, Carleton University Press Inc., pp.1~129, 1986.
- 6) Akagawa, S.: Experimental Study of Frozen Fringe Characteristics, Cold Regions Science and Technology, Vol.15, pp.209~223, 1988.
- 7) 木下誠一ほか：土の凍結—その制御と応用（土質基礎工学ライブラリー No.23），土質工学会，pp.1~268，1982.
- 8) Kay, B.D. and Perfect, E.: State of the Art: Heat and mass transfer in freezing soils, 5th International Symposium on Ground Freezing, pp.3~21, 1988.
- 9) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純：土の最大凍上力に関する実験的研究，雪氷，43巻4号，pp.207~215，1981.
- 10) Akagawa, S.: X-Ray Photography Method for Experimental Studies of the Frozen Fringe Characteristics of Freezing Soil, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory Special Report (to be published), 1989.
- 11) Phukan, A.: Frozen Ground Engineering: Prentice-Hall, Inc., pp.1~236, 1985.
- 12) Crory, F.: Construction Guidelines for North Alaska, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report(to be published), 1990.
- 13) Berg, R.L. and Wright, E.A.: Frost Action and Its Control, American Society of Civil Engineers, pp.1~143, 1984.
- 14) Jordan D.F. et al.: Cold Regions Construction, American Society of Civil Engineers, pp.1~121, 1983.

(原稿受理 1989.10.19)