

## 土 の 低 温 特 性

きの した せい いら  
木 下 誠 一\*

土が0℃以下の温度になると、土の中の水分が凍る。この状態が凍土であるが、凍る前とは著しく異なった挙動を示す。体積膨張つまり凍上が起こること、諸物性が変化する事、特に硬くなる事が顕著である。土の低温特性ということで、凍上、凍土の諸物性、土の凍結が地形に及ぼす影響という三つの題目について、現在どういことが話題になっているか紹介しよう。

## 1. 凍 上

## 1.1 凍上の基本機構

冬に土が凍ると、地面が隆起することがある。これが凍上で、条件が備われば、何10cmも上がる。北大低温研の凍上観測現場<sup>1)</sup>では、凍上量が30cmにもなることがある。そのときの凍結深が60cmなので、凍る前に比べると、実に2倍に体積がふえたことになる。土が凍るときに、土に含まれていた水分がそのままの位置で凍るのであれば、その水分の体積の1割が体積増になるだけなので、土全体としては、たかだか数%の体積増にすぎないはずである。体積増が著しい凍土の断面を見ると、写真-1にあるように、レンズ状の氷の層が幾重にも見られる。その厚さは数mmから数cmで、一つの鉛直線にそって、これら氷の層の厚さを加え合わせたのが、全体の体積増つまり凍上量にほぼ等しい。

これらの氷の層が凍結前に水の層として、飛び飛びに土の中にあったわけではない。凍結するとき、水が未凍土側から移動して氷になったと考えられる。このことが、凍上の基本機構である。それを模式的に図化したのが図-1である。土粒の表面に吸着する水は、0℃では凍らない。これを不凍水と呼んでいる。凍結面へ向かって流れるのは自由水で、この自由水が凍結面で氷の層として析出する。不凍水分層の厚さは数10Åというきわめて薄いものなので、当然土粒の実体も図-1のような表現のできるものではない。図は凍上の基本機構の概念を図化したものである。

自由水が凍結面へ向かって流れる原動力はなにか。水、自由水、不凍水、土粒と並ぶ系のエネルギーが、自由水の薄い部分と厚い部分とで差があり、その差のためのエネルギーコウ配で自由水が移動すると解釈されている。系のエネルギーを $F$ 、凍結面へ向かう径路を $Z$ 、水分の移動速度

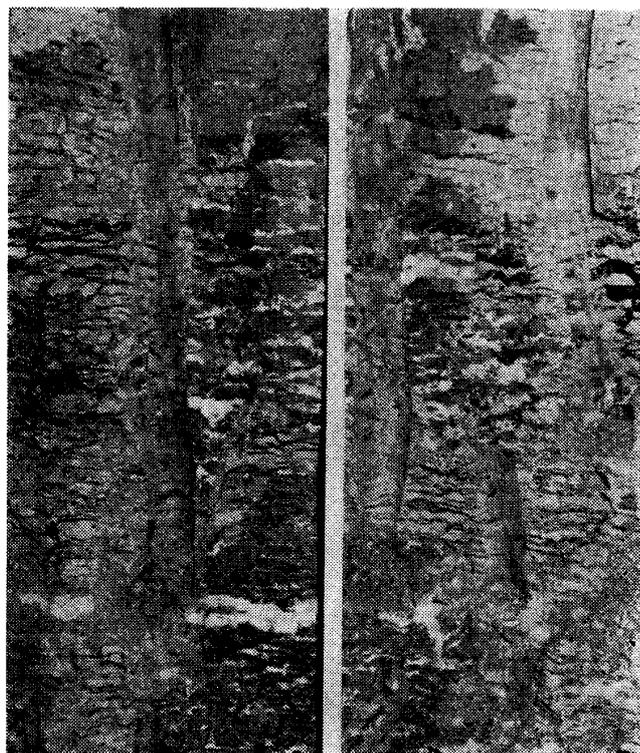


写真-1 ひどく凍上した土の断面

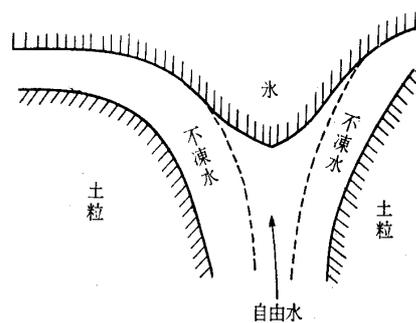


図-1 凍上の基本機構の模式図

を $v$ とすると、 $v \propto dF/dZ$  で表現される。凍結面で氷ができるときには、潜熱を発生するので、その潜熱を吸収するような熱流が氷の部分になければならない。問題はこのエネルギーであるが、土粒表面の曲率だけで考えられていたが、現在では土粒表面の物理化学特性に基づくという考えがある。根本的な解明はこれからであろう。凍結面へ向かう自由水は未凍土側から補給されなければならない。未凍土部

\* 理博 北海道大学教授 低温科学研究所

## 論 説

分の土粒間ゲキがその自由水の輸送路としての意味をもつ。

## 1.2 凍上を支配する三要素

## 1.2.1 土質

土粒表面の曲率だけでは決まらないことを指摘したが、普通の土については、規格の粒度分析で得られる土粒の大きさだけで経験的に判定されている。実用的には、まずこの経験則で十分とあってよいほどである。粒径が 0.1 mm 以上の砂では凍上が起こらない。0.05~0.1 mm の粒を含む土から凍上が起こり始め、以下粒径が小さくなるにつれ凍上性が強くなる。0.005~0.002 mm が最も凍上性が強い。これよりも小さくなると、土粒間ゲキが狭くなり、透水性が悪くなって、凍結面への水分補給がむずかしくなる。透水係数でみると、 $10^{-3}$ ~ $10^{-6}$  cm/sec の土が凍上を起こし、透水係数がこれよりも大きくても小さくても凍上は起こりにくい。このほかにも粒度による凍上性の判定の方法が数多く発表され、実用されている。

土でなくても、粒状体であれば凍上が起こる。活性炭、べんがら、粘土鉱物、ゼオライトなどの粉状物質について数多く実証されている。これらの中には、粒径の点で凍上性の中に入るものでも、粒表面の化学的性質を変えること、たとえば、粒表面に結合するイオンを交換させることによって、凍上性をなくすることもできる<sup>2)</sup>。したがって、粒子の表面の性質、特に不凍水のエネルギー状態が問題になる。この意味で、凍上性と粒の比表面積との関連が研究され、また不凍水のエネルギー状態をみるため、湿潤熱や NMR (核磁気共鳴分析—結合水や吸着水中の水素原子核の動きやすさをみる) による検討が最近研究されている。

## 1.2.2 寒さ

一般に、あまり寒いと、レンズ状の氷層ができずに、コンクリート状凍結と呼ばれる状態になり、ほとんど凍上が起こらない。これは、凍結の進行が速く、凍結面への水分の補給が間に合わないためである。地面の温度も問題であるが、直接凍上に関係するのは、凍結面での熱関係である。凍結面から凍土側へ取られる熱流を  $Q_1(=k_1(\delta T/\delta Z)_{Z=D})$ ,  $k_1$  は凍土の熱伝導率,  $T$  は温度,  $D$  は凍結面の位置, 未凍土側から凍結面へ向かう熱流を  $Q_2(=k_2(\delta T/\delta Z)_{Z=D})$ ,  $k_2$  は未凍土の熱伝導率) とすると,

$$Q_1 - Q_2 = L \frac{d(w-\alpha)D}{dt} + Lv \quad \dots\dots\dots(1)$$

で表される。 $L$  は潜熱,  $w$  は凍る直前の全含水比,  $\alpha$  は不凍水分の含水比, したがって  $w-\alpha$  は凍る直前に未凍土がもつ自由水の含水比である。 $v$  は凍結面への水分移動速度である。したがって体積増加速度, つまり凍上速度  $dh/dt$  はつぎの式で表わされる

$$\frac{dh}{dt} = \beta \frac{d(w-\alpha)D}{dt} + (1+\beta)v + \gamma \quad \dots\dots\dots(2)$$

$\beta$  は水が氷に変わるときの体積増加率,  $\gamma$  は空気分の増減に関する量で, 水飽和の状態のときには  $\gamma$  は 0 である。

上の(1)式は、凍結面での境界条件を示すものであるが、この式に含まれる各量がそれぞれまた他の条件に支配される量である。したがって、凍上と寒さとの関係は簡単に規定できるものではない。

## 1.2.3 水分 (土粒表面に吸着する不凍水を除く)

凍結面へ向かう水が未凍土内にあらかじめ含まれていた水だけでまかなわれる場合を閉式凍上といい、未凍土内に地下水が流入して、補給源になる場合を開式凍上という。開式凍上ではいくらかでも膨張しうる。未凍土側を凍結面まで移動する水は、土粒間の毛管を通って行くわけであるが、移動しうる距離は、ほぼその土中における水の毛管上昇高に等しい。未凍土の毛管上昇高よりも地下水位が深ければ、その地下水は補給源にはならない。

## 1.3 拘束条件による影響 (凍上力の発生)

## 1.3.1 荷重の影響

建築で 2 階建のほうが平屋よりも凍上が少ないことが知られている。一般に荷重があると、凍上は減る。この関係を実験的に表現した式が幾つかある。古くはベスコウ (Beskow) の式で、凍上速度  $dh/dt$  と外圧  $p$  との間に

$$\frac{dh}{dt} = \frac{c}{p^2 + d^2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

の関係を導いている。 $c$  は定数,  $d$  は平均粒径を表わす。最近高志<sup>3)</sup> が凍上率  $\xi$  (凍上量と凍結土の凍結前の厚さとの比) と荷重  $\sigma$ , 凍結進行速度  $V$  との間に,

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left( 1 + \sqrt{\frac{V_0}{V}} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

の関係を導いている。 $\xi_0$ ,  $\sigma_0$ ,  $V_0$  は実験から導かれる定数である。外圧や荷重が凍結面近くのエネルギーコウ配を減少させることになり、水分移動速度  $v$  も減少する。荷重  $\sigma$  がある値  $\sigma_c$  を越すと、 $v$  が負になり、凍結面への吸水ではなく、凍結面からの排水が起こる。この限界の  $\sigma_c$  をしゃ断圧 (shut-off pressure) と呼んでいる。(2)式から  $v$  は負になっても、 $dh/dt$  は正のまま小さな値になる。シルト土で  $\sigma_c$  は質 1~2 kg/cm<sup>2</sup> ぐらい、また粘土で 3~5 kg/cm<sup>2</sup> ぐらいである。

## 1.3.2 完全拘束による影響

(3), (4)の実験式から、凍上速度または凍上率が 0 のときには、外圧または荷重が無限に大きくなければならない。もちろん両式は実験式なので、このような完全拘束のときに適用できるものではない。実験的にこの条件を作ってみる。体積増を起こさないように、土試料を剛体の枠の中に入れ、上面から冷やす。このとき剛体枠に力がかかる。これを凍上力と呼んでいるが、この凍上力は、時間がたつにつれ、つまり凍結が進むにつれ増大する。このときには、凍結面でわずかながらの体積増が起き、これが未凍土を圧縮することによって力が発生すると考えられている。一般に物体の温度上昇に基づく熱膨張を拘束するときに発生する熱応力と同じ概念である。したがって、拘束枠のスケー

ルが問題になってくる。一方、凍土、未凍土とも粘弾性体であるため、凍結の進行速度が遅いほど、発生凍上力は小さくなる。他の条件が同じなら、粒径が小さいほど、発生凍上力は大きい。高さ 10 cm の枠内の粘土が 40 時間で凍りきるとき、最大 5~7 kg/cm<sup>2</sup> の凍上力が得られている。

凍上による被害は、この凍上力によるものであるという観点から、土の凍上性の判定の試験法として、このような完全拘束時の発生凍上力を採用しようという試みが、最近アメリカで見られている。

実際の現場では、地面のごく一部だけが拘束を受けるといふ例が多い。たとえば、建築物の柱下の基礎などがその例である。そこで、地面に円板を置いて、円板の部分だけを完全拘束したときに、この円板にかかる力を測ってみた。まわりの地面が凍上するので、この円板の部分に応力集中が起こる。この力はまわりの地面の凍上速度に依存し、その凍上速度がゼロになると、力は減少を始める。これは、力を受けもつ凍土や未凍土が粘弾性体であるための応力緩和現象である。一般にこの凍上力は冬の間に増大減少を繰り返すのであるが、大きな力が現われた一例をあげると、まわりの地面が 10 cm 凍上し、凍上速度が 2 mm/day のときに直径 12 cm の円板にかかる力として 6 トンが得られた。円板の単位面積について 53 kg/cm<sup>2</sup> もの大きな値である。このときでも 60 cm 下の凍結面での圧力は 1.4 kg/cm<sup>2</sup> にすぎなかった。

凍上力の発生の源は凍結面での氷の析出である。すでに凍った土や未だ凍っていない土のなかからは凍上力をひき起こす原因となるものはなく、発生した凍上力を受けもつだけである。そこで凍結面において発生する凍上力の原因として、氷と水とが土粒間の小さな間ゲキ（半径  $r$ ）を界して共存するためであるという考えがある。それによると、圧力  $p$  は  $2\sigma_{iw}/r$  で表わされる。ここで  $\sigma_{iw}$  は水と氷との界面エネルギー 35 dyn/cm である。これから計算すると  $r=1$  ミクロンで  $p$  は 0.7 kg/cm<sup>2</sup> になる。

最近 LNG 地下貯蔵タンクの周辺の土が凍るために、タンク壁にかかる凍上力がどのように発生するかについて研究が進められている<sup>4)</sup>。本誌にもこの問題についての報告が載せられている。

#### 1.4 凍結進行と積算寒度との関係

凍上は、凍結の進行速度に依存するのではあるが、ある地域の土質、水分状況が決まれば、その地域の凍上量は、第一近似的には凍結深で決まるといってよい。また、凍結が起こらない限り、凍上は起こらないのであるから、凍結深は重要な要素である。凍上を考慮した土の凍結進行の理論計算は幾つかあるが、簡単には凍結深  $D$  cm と、地面の冷却に要した積算寒度  $I$  °C·day（日平均の気温の 0°C 以下の数値を積算したもの）との間に、 $D=a\sqrt{I}$  の関係が導かれている。この  $a$  は、土質、水分状況で決まる定数で、その地域で固有の値をもつことが知られている。凍上

が大きいほど、 $a$  の値は小さく、2~3 である。凍上小さい砂利道では、4~6 が用いられている。

地面に積雪があったり、植生があると、その断熱効果で、凍結深は減る。凍結深進行を自記できる装置が最近開発されている<sup>5)</sup>。

#### 1.5 凍上対策

道路、鉄道、建築、農水路などの凍上対策については、現在すでに多くの方式が検討されている。その方式については、本誌のなかにも述べられている<sup>6)</sup> ので、ここでは簡単に列記するにとどめよう。

##### 1.5.1 置換工法

凍上性の土を凍上し難い材料で置き換える方法で、置換への深さやその材質などについて、多くの調査がある。

##### 1.5.2 断熱工法

断熱材を地中に埋めて凍結深を減らす方法で、埋める深さや断熱材の厚さ、材質などについて研究されている。置換厚を減らしてその分を断熱材で補おうとする、置換工法との併用も考えられている。冷蔵倉庫の場合には、高床式といって、床面の下に空間を設ける方式があるが、これも断熱工法の一つである。

##### 1.5.3 その他

薬剤工法（塩溶液を土中に注入して融点降下を起こし、凍らないようにする）、土質改良法（薬剤を入れて粒度組成を変える）、シャ水工法（水の補給を断つ）などが考えられているが、いずれも実用化にはなっていない。

#### 1.6 融解時の軟泥化

凍上した土が大きな含水比をもつため、春に融解すると、軟泥化する。地盤改良されていない道路では、春には通行できないこともある。また、斜面の場合には、崩れ落ちることもある。

#### 1.7 凍着凍上

地中に鉛直に埋められた棒などが、周囲の凍土にくっついて、地面と一緒にもち上がる現象である。融解期には凍土は上の方から融けるため、地面は沈下しても棒は上がったままになる。これを幾冬も繰り返すと、棒が抜けて倒れることもある。地下に水平に埋設する管などは、凍結深よりも深く埋めることになっているが、地上に出る立上り部分では、この被害が現われる。物体の材質やその表面の滑らかさなどが問題になる。

## 2. 凍土の物性

### 2.1 凍土の構成要素

凍土は、土粒、氷、空気、土粒表面に吸着する不凍水とからなっている。これらが、凍土の中に一様に分散することは非常に少ない。一番問題なのが不凍水である。105°C で乾燥した土の重量を基準にして含水比を決める場合、ある粘土（砂分 7%、シルト分 34%、粘土分 59%）では、不凍水の体積含水比は、0°C で 24.5%、-1°C で 14%、-10°C で

## 論 説

3.3%, -29°Cで1.7%ある。この粘土の比表面積が  $77\text{m}^2/\text{cm}^3$  なので、0°Cのときには土粒表面に平均  $32\text{\AA}$  の厚さの不凍水層があることになる。含水比の値としては大きい、土粒表面の凹凸のため、不凍水分層の厚さはこのようにきわめて薄い。粒径が大きくなると、不凍水分量は減る。シルト質土では、0°Cで10~15%, 砂質土ではほとんど0%である。

土粒表面に物理的に吸着する水分だけが不凍水ではなく、表面の化学組成や、結合イオンなどのために起こる融点降下による不凍水もあり、その様相は単純ではない。凍上の基本機構が土粒、不凍水、水、氷という系のエネルギー状態に支配されるのであれば、この不凍水の挙動を把握することが大事になる。現在、X線、NMR、湿潤熱などの方法で、その解明がされつつある。

土粒の表面にばかり注目したが、不凍水分層の厚さが水分子で数えられるほどのものである、当然土粒の実質内に結合する水分子も関与するはずで、そうすると、105°Cで乾燥したものを基準として、含水比を論ずるだけで話がすまなくなる。このへんのことは、まだ暗中模索の段階である。

### 2.2 力学的性質

凍ることにより圧縮強度が著しく大きくなる。特に砂では、未凍結状態でほとんど0に近いものが、毎分1%のヒズミ速度のときの圧縮強度が、-10°Cで80~100 kg/cm<sup>2</sup>、-20°Cで150~200 kg/cm<sup>2</sup>、-30°Cで200~300 kg/cm<sup>2</sup>にもなる。シルトや粘土では、レンズ状氷の含み方で差異があるが、急速凍結させたコンクリート状のものでは、未凍結状態の0.2~0.8 kg/cm<sup>2</sup>に対し、-10°Cで50~60 kg/cm<sup>2</sup>、-20°Cで70~100 kg/cm<sup>2</sup>、-30°Cで100~150 kg/cm<sup>2</sup>にもなる。レンズ状の氷を数多く含む一様でない凍土についての実験例は少ないが、圧縮強度は、コンクリート状凍結のものに対して20~50%減少する。むしろ、クリープ性のほうに大きな影響があるようである。

凍土の圧縮強度は、氷の圧縮強度10~30 kg/cm<sup>2</sup>に比べて非常に大きい。土粒、不凍水、空気の部分は未凍結状態と変わらない。この部分だけでは圧縮強度は1 kg/cm<sup>2</sup>にもみえない。それに氷が加わるだけで、未凍結部分よりも、また氷よりもはるかに硬い状態になる。これが大きな特色である。

氷は特徴的な粘弾性物質である。氷河という現象もあるほどである。凍土も氷を含むため粘弾性の振舞を示す。クリープや応力緩和の現象が目立つ。これらは特に温度依存性が強い。また、前述の圧縮強度の値についても、ヒズミ速度を2倍の2%毎分にすると、25%ぐらい増大するという結果が得られている<sup>7)</sup>。

### 2.3 熱的性質

凍土の比熱、熱伝導率、熱膨張率などの熱的性質は、力学的性質とは違い、土粒、不凍水、氷、空気の構成各要素

の熱的性質の組合わせで決められる。その組合わせ方に若干の方法があるが、ともかく構成4要素の熱的性質を、それぞれの占める体積割合に応じて加え合わせたものにほぼ等しい。

比熱については、不凍水が温度低下とともに少しずつ氷に変わるための潜熱発生を考慮に入れて

$$C_f = C_c + C_i w + (C_u - C_i) \alpha + \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} L \frac{\delta w}{\delta T} dT \quad (5)$$

$C_f$ ,  $C_c$ ,  $C_i$ ,  $C_u$  はそれぞれ凍土、土粒、氷、水(不凍水)の比熱にそれぞれの体積割合をかけたものである。実際には、ほとんど0.16~0.25 cal/g·°Cの範囲にあり、砂では0.16くらい、シルトで0.18くらい、粘土で0.22くらいである。 $w$ だけの関数で表わした簡単な経験式もある。

熱伝導度は、同じ含水比の未凍土のその1.1~1.3倍である。凍土を構成する各要素が直列に一部結合し、残りの一部が並列に結合するという考え方の計算で実際と合うようである<sup>8)</sup>。レンズ状氷を多く含むシルト質の凍土(含水比140%)の実測値として、 $4.3 \times 10^{-3}$  cal/cm·sec·°Cが得られている。

熱膨張率については、不凍水が温度低下とともに氷に変わることや、土粒の実質内の水分子の移動などのため、単純なものではない<sup>2)</sup>。低温における熱膨張率を精密に測ることにより、逆に不凍水の挙動や土粒の内部構造を知ることできる。測定値の一例を紹介する。シルト質土では含水比43%で、 $2 \sim 2.3 \times 10^{-5}$  °C<sup>-1</sup>、66%で、 $1.6 \sim 1.8 \times 10^{-5}$  °C<sup>-1</sup>である。

### 2.4 電気的性質

電気抵抗や誘電率については、熱的性質と同じく構成各要素のその組合わせで考えられる。ただ、土粒表面に結合するイオンがあるため、かなり複雑で、現在新しい研究課題とされているものである。ここで一例を紹介する。-1.5°Cで長さ5 cmのシルト質土の試料の両端に5ボルトの静電圧を24時間かけたところ、最初の含水比が全体一様に30%であったものが、プラス極から1 cmの所が27%に減少し、マイナス極から1 cmの所が32%に増加した。これは、不凍水のなかにマイナスイオンが存在し、それがプラス極へ向かって動いたことを示すものである。

## 3. 土の凍結が地形に及ぼす影響

### 3.1 凍結融解による風化の促進

北海道宗谷地域に谷の浅い皿状地形がある。これは長年の凍結と融解の繰返しで破碎された岩石が、斜面にそって崩れ落ち、谷を埋めた結果できたこととされている。この地域の岩石(第三紀層泥岩と凝灰質砂岩、空ゲキ率20%くらいのもの)を採取し、 $5 \times 5 \times 5$  cmに整形して水飽和にしたものに、+15°Cから-10°Cまでの1日サイクルの温度変化を与えた。3日後には目に見える割れ目を生じ、10日後には数片の塊に分割し、30日後には完全に破壊された。これ

は1年間の季節変化を1日間で再現したため、破壊が速く起こったのであるが、長年にわたる凍結と融解の繰返しが風化を促進することを実証したものである<sup>9)</sup>。このような岩石内に破壊を起こす原因としては、水が閉じられた所で凍るときの体積膨張を抑圧したために起こる圧力発生と、水が開かれた空ゲキで凍るときに発生する凍上力とが考えられている。春先に岩盤の斜面が崩壊する例がよくあるが、このこともその因のひとつとなっているのであろう。

### 3.2 永久凍土

シベリアやアラスカ・カナダの北部には、土が永久に凍ったままの永久凍土が広く分布している。全体では、地球上の全陸地の14% (2千万平方キロ) もある。厚さは数百mもの所がある。しかし、地面近くは、夏融け冬凍るを繰り返す。この部分を活動層と呼ぶが、その挙動により樹林帯やツンドラ帯が生ずる。土の凍結時における水の特異な挙動が原因で、ピンゴ (小高い丘で中に氷が詰まる。氷は凍上現象でできたもの)、構造土、氷楔、地下集塊氷のような特異な地形ができる<sup>9)</sup>。

### 3.3 火星表面

火星表面は現在非常に低温で、表土は凍土である。数多くのクレーターやチャンネルが見られる。クレーターは昔はピンゴであって、その後の暖気で内部の氷が融けて山頂

部が陥没したもの、またチャンネルは、その氷の融け水が流れてできた水路であるという説がある。形態の解析や、火星が地球と同じような成因であるということから、このような説がでている。チャンネルは、地球上にあるグランドキャニオンの数倍もの規模のものである<sup>10)</sup>。

土の低温特性についてごく概略を紹介したにすぎない。紙面の都合で十分な説明ができなかったが、以下にかかげる著者の論文を参照していただければ幸いである。

#### 参 考 文 献

- 1) 木下誠一・鈴木義男・堀口薫・福田正己 低温科学
- 2) 堀口薫: 低温科学
- 3) 高志勤: 雪氷, 冷凍他
- 4) 液化天然ガス用貯槽保安調査委員会凍土専門委員会報告, 山田正男および榎戸源則 (本誌)
- 5) 矢作裕: 低温科学
- 6) 河野文弘: 本誌
- 7) 1973年ソ連ヤクーツクにおける Permafrost Conference の論文集
- 8) 福田正己: 低温科学
- 9) 木下誠一: 永久凍土調査報告
- 10) 1976年10月アメリカのハノーバーにおける Colloquium on Water in Planetary Regoliths の論文集 (原稿受理 1977. 4. 11)

技術手帳

## 岩 盤 内 の 初 期 地 圧

きた 北 原 よし 義 ひろ 浩\*

### 1. 工学的背景

土質力学のテルツァーギ, ランキンの土圧論は古くから土木技術者に知られており, 実際, 護岸, 擁壁などの設計に取り入れられてきた。これらの理論は, カブリの大きいトンネル掘削や, 鉱道の掘削に際しても支保工の設計に役立てられてきた。古典的な土圧の概念は, いわゆるカブリ圧に比例した静水圧的な応力状態を均質等方の理論から導くものである。

ここでいう岩盤の初期地圧は, 基本的には上述の概念と同じであるが, 近年の地下構造物の大型化 (特に揚水式地下発電所の建設) に伴い, 岩盤内地下数百mに丸の内ビルディング数個を呑み込むような大きな空洞を掘削する工事がつぎつぎと出現するに至り, 従来の土圧の概念とはやや

異なった見方で取り扱われるようになってきている。

すなわち, 岩盤の掘削が安全に行なわれるためには, 地形や地質年代的な地殻運動, 岩盤の非均質性など, たんなるカブリ圧以外の要因も含めた地圧の大きさと方向とをできるだけ正確に求めることが重要となってきた。

また最近の話題としては, 地殻ヒズミの解放を地震発生の根源とする考え方から, 地震予知の一つの手段として, 過去に累積された地殻ヒズミを測地学的に測定することが重要とされている。このような地球物理学的規模での地殻ヒズミと, ここでいう岩盤内の初期地圧を対比する試みも地震工学上興味を引く課題といえよう。

### 2. 測定手法<sup>1), 2)</sup>の特長と問題点

岩盤が現在受けているヒズミを解放し, 試験箇所を岩石素材のヤング率 $E$ , ポアソン比 $\nu$ を介して応力に換算する

\*電力中央研究所土木技術研究所 地盤基礎研究室長