

自然地盤の凍上力に関する実験的研究

鈴木輝之¹・朱 青²・沢田正剛³

¹正会員 工博 北見工業大学教授 土木開発工学科 (〒090 北見市公園町165)

²学生会員 北見工業大学大学院

³北見工業大学講師 土木開発工学科

自然地盤の地表面凍上力を測定する実験を行った。地表面に置いた円盤の持ち上げりを拘束した場合、円盤の下で発生する凍上力だけでなく、周辺地盤で発生する凍上力も凍土を介して円盤に伝達されるので非常に大きな力となる。本実験ではこの力を測定し、さらに力学的に縁切りとした領域を作ることにより単位面積当たりの地表面凍上圧を測定した。また凍上力が伝達して来る周辺地盤の範囲は、構造物の凍上対策を設計するうえでも重要である。本研究ではこの凍上力が伝達してくる範囲を実験的に求めた。

Key Words : field test, frost heaving force, natural ground, silty soil

1. まえがき

自然地盤の凍上に関する調査、研究はかなり以前から行われている¹⁾。当初の研究の対象は道路や鉄道の凍上被害対策に代表される。これらの構造物では、その基礎部分が凍結深さの範囲に収まること、路線としての広がりを持つことなどが凍上被害を生じ易くし、さらに凍上対策を困難にしている。しかし、これら道路や鉄道の凍上被害については、多くの研究を通して被害の機構が明らかにされ対策工法も確立されて来ている²⁾。一方、近年では社会基盤整備の進展とともに各種構造物が複雑化、高度化して、新たな観点からの凍上対策が課題となっている。たとえば道路側溝や用排水路側壁の凍上被害^{3)・4)}、雨水桝やマンホールなどの凍着凍上被害⁵⁾、さらに各種擁壁の凍結土圧問題⁶⁾などが挙げられる。これら最近の地盤凍上問題では凍上による変位よりも、凍上によって構造物に加わる凍上力が問題となる場合が多い。

地盤の凍上は凍結面で発生し、温度、水分、土質の3要素によって支配される。凍上はこれらの条件が揃えば無限に発生し得るが⁷⁾、この凍上量のある値に押さえるときに必要な力を凍上力とすることが出来る。木下は凍上量をゼロに押さえるときの力を凍上力と定義し、種々の土の凍上力を室内実験によって測定している⁸⁾。また、自然地盤の凍上力を求める屋外実験も行っている^{9)・10)}。自然地盤中に作られた実構造物においては、構造物自体の変形、

未凍土側への圧縮、および凍土のクリープ変形などによって凍上力が緩和されるために、一般的には上記の凍上力実験で得られるような大きな凍上力が加わることは無い⁶⁾。実構造物に加わる凍上力は非常に複雑な因子に支配され、このことが解析的な扱いを困難にしている。

本研究では、自然地盤が凍結した際に構造物に加える凍上力を定量的にとらえることを目的として、地表面に置いた直径10~20cmの円盤の変位をゼロに拘束したときに加わる凍上力を、いくつかの地盤条件の下で実測した。本報告中では、地表面と接している構造物の変位がゼロに拘束されているときに、地盤の凍上によって構造物に加わる力を(地表面)凍上力とし、凍結面で発生する力(ここでは凍結膨張圧と呼んでいる)とは区別している。実験の結果、単位面積当たりの地表面凍上力が測定された。また、地表面に置かれた円盤にはその下で発生する凍結膨張圧だけでなく、周辺地盤で発生した凍結膨張圧も凍土層を介して伝わるが、このときの地表面凍上力として伝達される力の大きさ及び伝達してくる範囲などが明らかにされた。

2. 実験内容

実験は平成元年11月~平成6年4月までの冬期シーズンに行った。この間、シーズンによって実験内容を変更しているが、ここでは5シーズンの全ての実験内容が含まれる平成4年11月~平成5年4月の実験

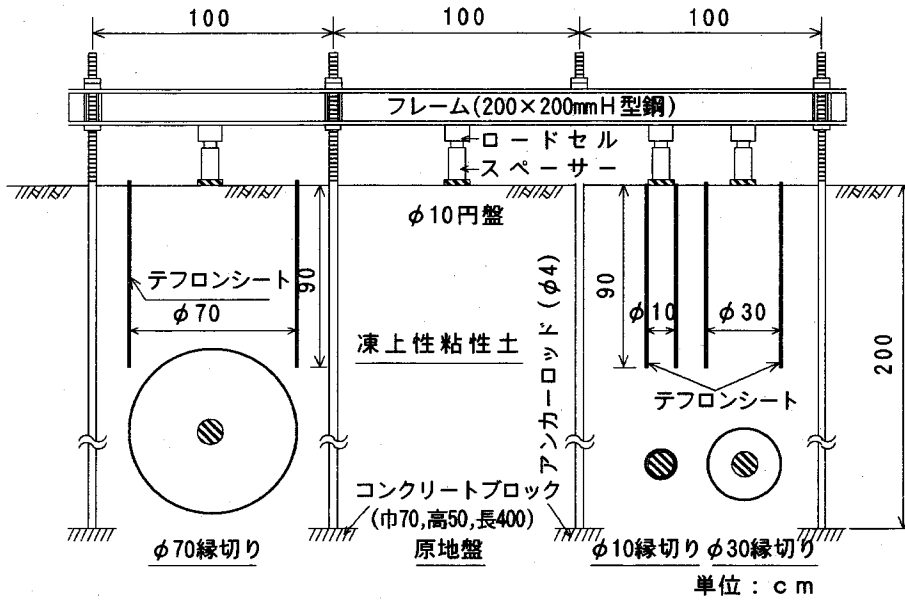


図-1 実験設備の概要

方法を中心に述べる。図-1に実験設備の概要を示す。図に示すように鉄製円盤を所定の地盤条件で地表面に設置し、その持ち上がりを拘束したときに円盤に加わる凍上力を測定した。円盤の拘束は地表面下2mの深さに埋設されたコンクリートブロックと連結した荷重フレームによった。

実験場所は深さ2mまでを凍上性のシルト質土と置き換えて造成されており、造成後20年以上経過している均一な平坦地である。地盤土の性質を表-1に示す。地下水位の正確な測定はされていないが、隣接地の地盤調査結果によれば-10m程度と推定される。また地表面の温度条件を均一にするため実験場所は常に除雪し、さらに地表面への直射日光は垂直壁によって常時遮断した。

図-1に示す各実験の地盤条件と目的は以下のようである。

a) 原地盤 地盤表面に置かれた直径10cm、厚さ2cmの円盤に加わる凍上力を測定した。この場合、地盤中の凍結面で発生した凍結膨張圧が凍土層を介して円盤に集中して来るので、円盤には非常に大きな凍上力が加わることになる。

b) 10cm縁切り 内径10cmのテフロンシート(厚さ1mm)の円筒を地盤中に90cmの深さまで設置し、その中で直径10cmの円盤に加わる凍上力を測定した。

テフロンシート内の土は周辺地盤と同様に締め固め、下端部は周辺地盤と連続している。別途行った屋外実験によれば、この場合のテフロンシートに加

表-1 実験地盤土の性質

比 重	Gs	2.56
粒 度	砂 分	47%
	シルト分	37%
	粘土分	16%
締め固め特性	最適含水比	26.1%
	最大乾燥密度	1.38g/cm ³
※凍上特性	凍上率	42%
	凍結様式	霜降状凍結
地 盤	平均含水比(夏期)	39.1%
	平均含水比(冬期)	52.1%
	縁切り内乾燥密度	1.12g/cm ³

※道路土工排水工指針¹¹⁾による

わる凍着力は 0~5kN/m²程度と小さいものであり、これを地中に埋設する事によって周辺地盤からの凍上力の伝達がない領域(以後縁切り領域と呼ぶ)が作られると見なしている。この場合、直径10cmの縁切り領域の内側で発生する凍上力が測定され、単位面積当たりの地表面凍上圧を求めることが出来る。

c) 30, 70cm縁切り b)と同様にテフロンシートを用いて直径30cmと70cmの縁切り領域を設け、その領域の中心で直径10cmの円盤に加わる凍上力を測定した。これは凍上力が円盤に伝達して来る範囲を限定した実験である。

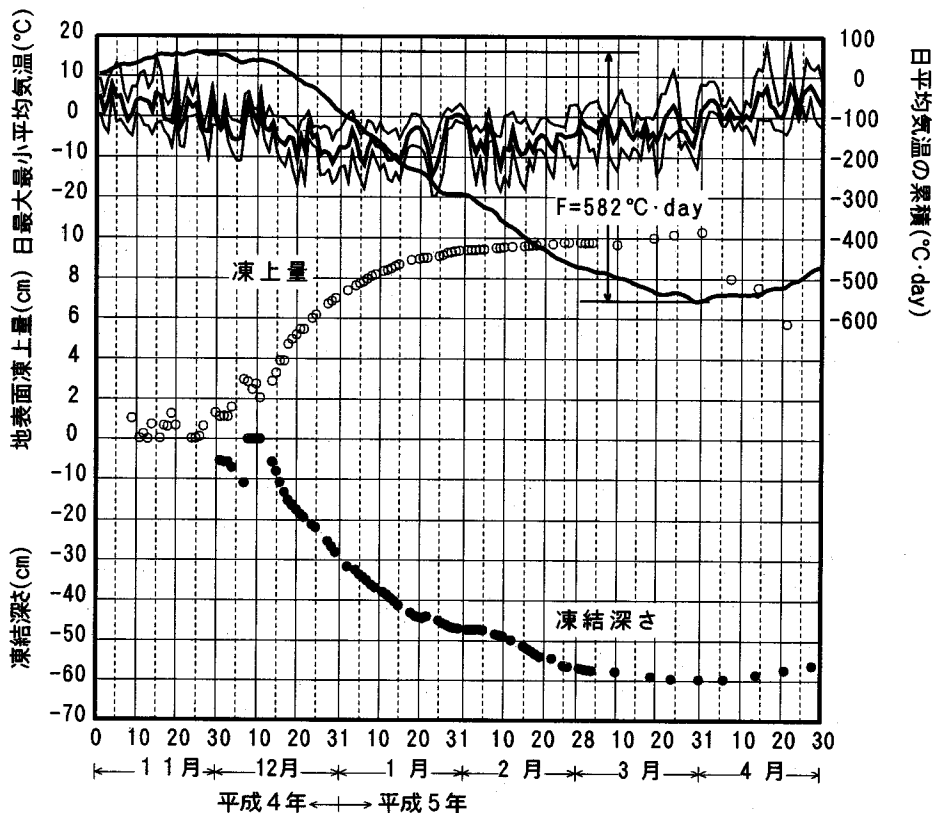


図-2 実験地盤における気温，凍結深さ，及び凍上量の推移

表-2 地盤凍結状況

	凍結指数 (°C·day)	最大凍結 深さ (cm)	最大凍上量 (cm)
平.元.11-平.2.4	633	70.0	8.2
平. 2.11-平.3.4	498	60.3	7.2
平. 3.11-平.4.4	744	72.0	7.4
平. 4.11-平.5.4	582	59.7	10.3
平. 5.11-平.6.4	684	70.0	6.6

これらの実験で，円盤の直径は木下⁹⁾らが行った凍上力実験を参考にし，また，縁切りの直径は，Penner¹²⁾らが行った実験の結果を参考に決めてきた。

以上の実験における測定の項目と内容は次のようである。

a) 円盤への凍上力 図-1に示すように，载荷フレームと円盤の間に挟んだロードセルで2時間間隔で自動測定した。ロードセルは最大容量2~5 tonのものを用いた。許容温度は-20°C~-30°Cで，-20°C

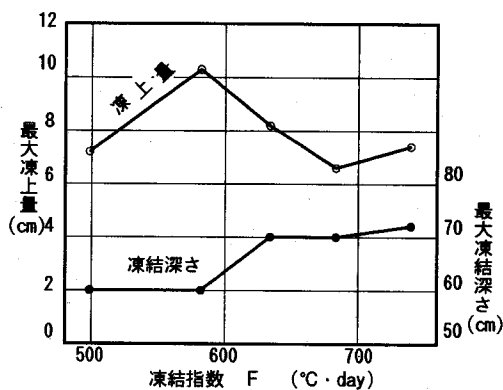


図-3 シーズン最大の凍結深さ及び凍上量と凍結指数の関係

までは正常に作動することを確認している。

b) 気温 気温は百葉箱中に設置した銅-コンスタンタン熱電対をセンサーとして2時間間隔で自動測定した。

c) 凍結深さ 載荷フレームから2mほど離れた実験フィールド内で、メチレンブルー凍結深度計によって測定した。

d) 地表面凍上量 地表面に置いた直径30cmの鉄製円盤の持ち上がり量を、図-1の載荷フレームを不動点として測定した。

以上の凍上力と温度は2時間間隔で自動記録し、凍結深さと地表面凍上量は1日1回測定した。

3. 測定結果

(1) 実験シーズンの気温及び地盤凍結・凍上

図-2に、平成4年11月～平成5年4月の気温、凍結深さ、および地表面凍上量の推移を示す。一時的な凍結・融解は11月から始まるが、継続的な凍結侵入及び地表面凍上は12月10日頃から始まっている。その後3月下旬に最大凍結深さ60cmに達し、同時に地表面凍上量も最大の10.3cmになっている。これら気温、凍結深さ、及び地表面凍上量の値は実験シーズンによって異なるが、推移の傾向は同じである。

実験を行った5シーズンの凍結指数、最大凍結深さ、および最大地表面凍上量を表-2にまとめて、さらにこれらの関係を図-3に示す。凍結指数Fは498～744°C・dayの間で変化しており、平均616°C・dayである。北見市の過去10年間の凍結指数の最大値は1076°C・dayで、平均値は738°C・dayであり、実験期間中の凍結指数は最近の暖冬傾向を反映している。この寒さに対して、最大凍結深さは59.7～72.0cmの間で、最大地表面凍上量は6.6～10.3cmの間で変化している。

図-3によれば、最大凍結深さ、最大凍上量ともに凍結指数Fとの間に必ずしも良い関係は認められない。凍上量を支配する熱的因子は地盤中の温度勾配あるいは熱的バランスであり、シーズンを通しての寒さの程度を表す凍結指数と凍上量との関係は強くない。一方、最大凍結深さは凍結指数に強く支配されることが認められているが、この関係も一義的なものではなく凍上の発生などの影響を受ける。

(2) 凍上力

図-4～7は、平成4年11月～平成5年4月における凍上力の日最大値の推移を示す。図-4中には日平均気温の推移も併記している。円盤に加わる凍上力は、冬期シーズンを通して小刻みに変動している。詳細を見ると凍上力は気温の変化に対応しており、さらにこの対応は2日程度の時間的遅れを伴っていることも分かる。

継続的な凍上力の発生は、図-2の凍結侵入と同じ

ように12月10日頃から始まっている。その後、3月下旬には低下をたどり、4月中旬にはゼロになっている。凍上力が低下し始める時期には融解は全く生じていないことから、この凍上力の低下は、温度上昇による凍土層のクリープ変形に起因していると考えられる。凍上力は地盤の縁切りをしていない原地盤の場合に最も大きくなり、瞬間的な最大値は50kN近くに達している。また縁切りをした地盤では凍上力が小さくなるが、これは縁切り範囲より外側で発生する凍上力の伝達が遮断されるためである。

図-1中の10cm縁切り実験では、縁切りの直径と円盤の直径が同じになっている。この場合、限定された範囲内で発生する全地表面凍上力を測定することになり、円盤の直径にかかわらず、地表面での単位面積当たりの凍上力すなわち凍上圧を求めることが出来る。この縁切りをしたときの凍上圧と縁切りをしない原地盤での凍上力（この場合は円盤直径の影響を受ける）の二つは、平成元年～6年の5シーズンに渡って測定を行った。それらの結果の中で、各シーズンを通しての凍上圧及び凍上力の最大値と、1～2月の平均値を表-3にまとめた。

4. 考察

(1) 地表面凍上力

図-4～7に示すような小刻みに変動する力の一つの数値として表現する方法はいくつかあると思われるが、実務的には構造物の性格によって評価法が変わると思われる。ここではシーズンを通しての最大値と、比較的大きな力が継続する1～2月の平均値を表-3にまとめている。

表-3に示すように、原地盤におけるシーズン最大の地表面凍上力は直径10cmの円盤で39～49kNとなった。この凍上力は円盤の直径が大きくなるとさらに大きくなり、直径20cmの円盤では最大75kNとなった。また、直径10cmの円盤に加わる凍上力を比較して見ると、最大値、平均値ともに実験シーズンによらず比較的安定した値を示している。

木下⁹⁾らは、地表面に置かれた直径12cmの円盤に加わる凍上力を4シーズンにわたって測定し、シーズンの最大値として26～53kNの値を報告している。この結果は本実験の結果と同じと言える。

これに対して縁切り地盤での凍上圧はシーズン最大値で570～2160kPa、1～2月の平均値で280～1380kPaとなっており測定シーズンによるばらつきが大きい。本実験と同様の手法で自然地盤の凍上圧を測定した例は見受けられないが、室内実験によって土の凍上圧を測定した報告はいくつかある。その中で

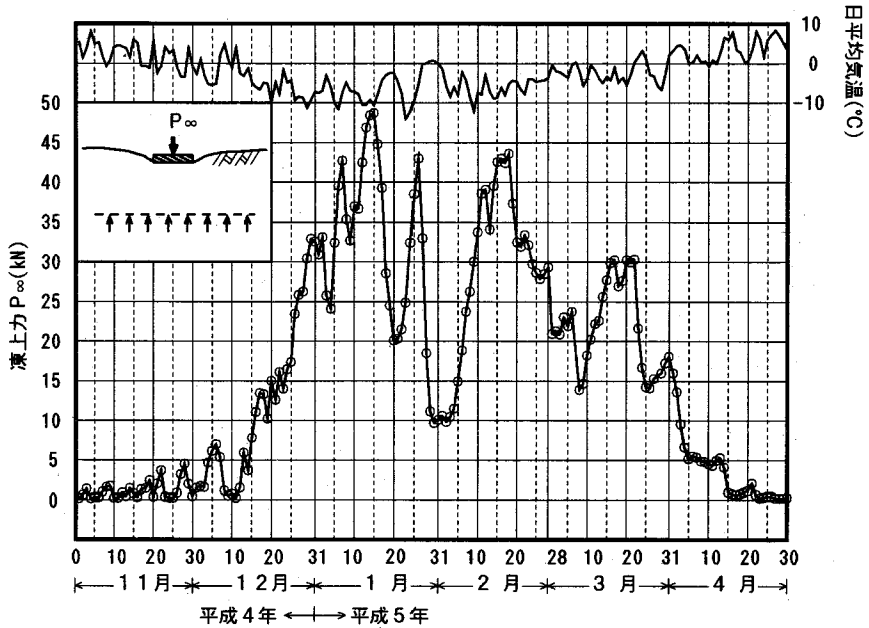


図-4 凍上力の推移 (原地盤)

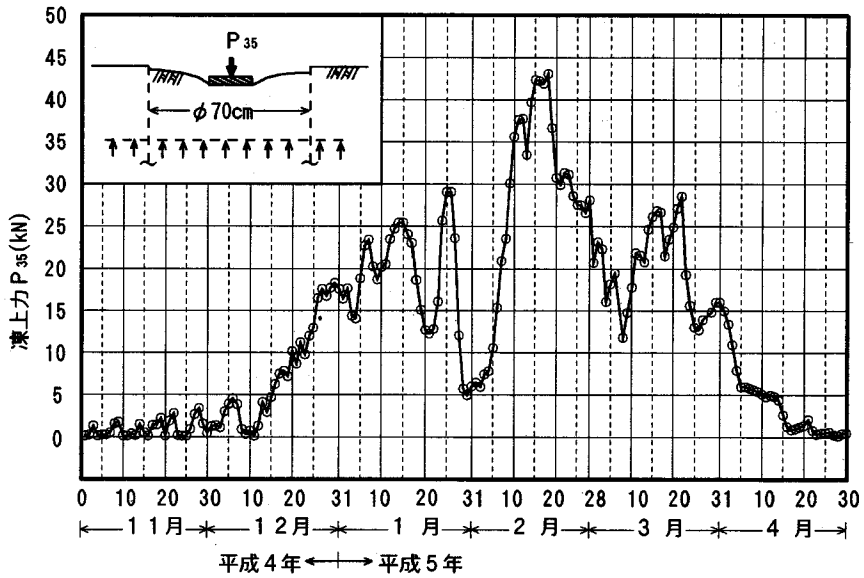


図-5 凍上力の推移 ($\phi 70\text{cm}$ 縁切り)

凍上変位をゼロとしたときの供試体表面での凍上圧を測定した例として、木下⁹⁾は砂質ロームで225～395 kPa、粘土で350 kPaの凍上圧を報告している。Kujala¹¹⁾は広範な土で凍上圧を測定しており、その中で14種類のシルト質土で86～1288 kPaの値を示

している。これら室内実験と本実験とは実験条件が異なるので、厳密には直接的な比較は出来ないが、結果的には類似の凍上圧が測定されている。縁切り実験では、テフロンシートへの凍着や摩擦があると周辺地盤での凍上力が円盤に伝達されてし

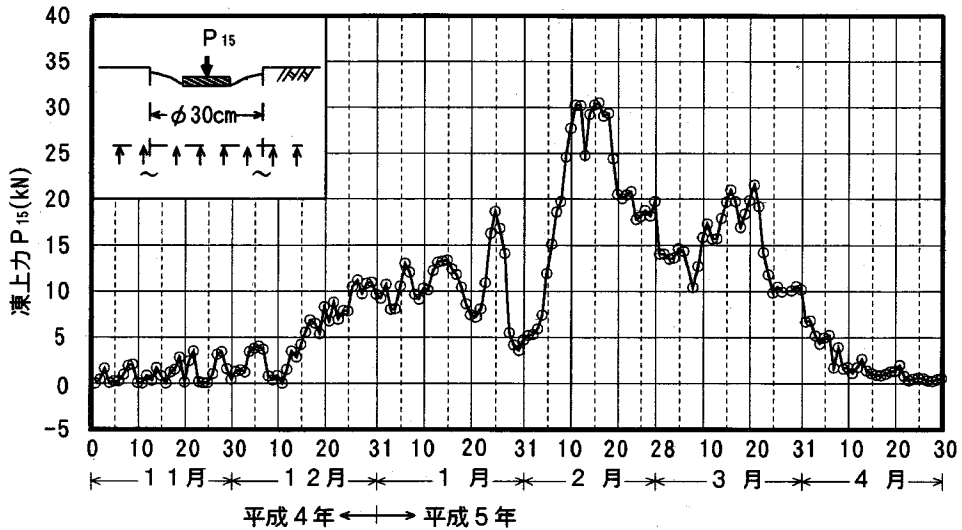


図-6 凍上力の推移 (φ30cm縁切り)

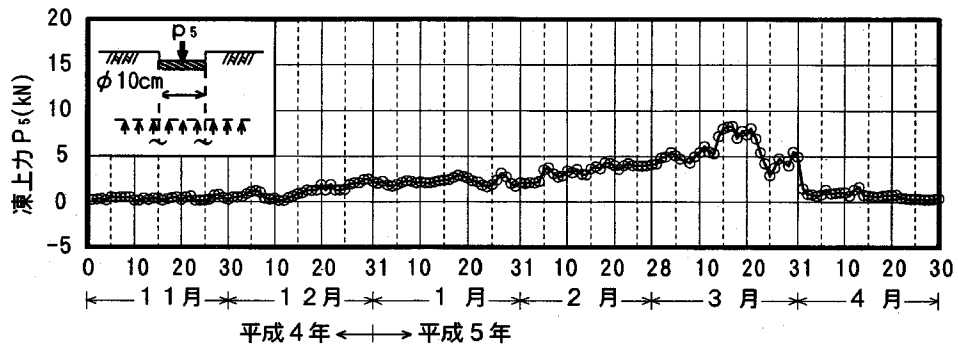


図-7 凍上力の推移 (φ10cmの縁切り)

まうために、凍上圧が大きく現れることになる。本実験では平成4年からの2シーズンはテフロンシートを二重にして縁切りをより確実になるようにしている。その結果、比較的小さく、かつ上記の室内実験の結果ともよく対応した、凍上圧が安定的に得られている。以後においては、この2シーズンの凍上圧は正しく測定されているものとして考察を進める。

(2) 周辺地盤凍上力の影響範囲

実際の構造物では、その下で発生した凍結膨張圧に加えて、周辺地盤で発生した凍結膨張圧も凍土の層を介して伝達される場合が多い(図-8)。このとき凍上が発生する地盤が無限に広がっていても、凍上力が伝達してくる距離すなわち図-8の影響範囲 r は限られ、この範囲内では地表面は曲面となる¹²⁾。

この影響範囲は構造物の設計において凍上対策を考慮する上で重要である。以下においてこの影響範囲の考察を進める。

図-4~7は直径10cmの円盤に加わる凍上力を示しているが、各実験では縁切り半径 r を変えている。このことは凍上力が伝達してくる範囲を強制的に設定していることになる。したがって、 r が小さい程伝達してくる凍上力が小さくなる。いま縁切り半径 r の地盤で測定された凍上力を P_r とし、縁切りをしていない原地盤での凍上力を P_0 とすると、 $(P_0 - P_r)$ は半径 r より外側から伝達してきた凍上力と言うことになる。いま、図-8の影響範囲 r を求めるために、 $(P_0 - P_r)$ を P_0 で割って無次元化した値を影響率 R と定義する。

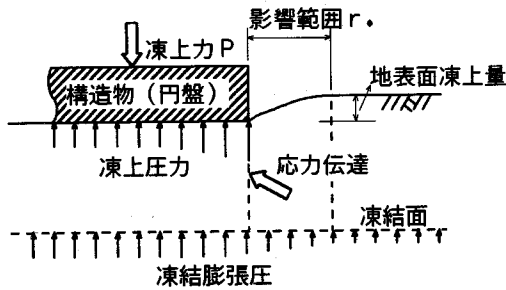


図-8 構造物(円盤)に伝達される凍上力の模式図

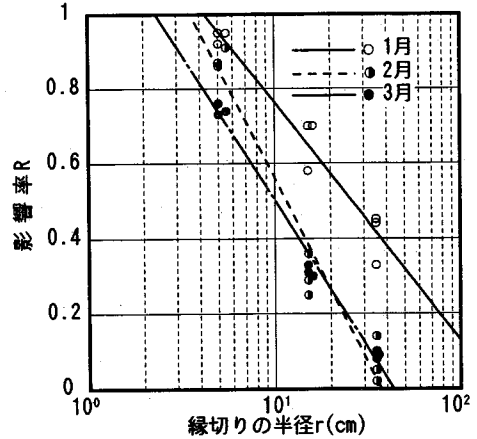


図-9 縁切り半径と影響率の関係

表-3 シーズン最大凍上力及び凍上圧

	円盤直径 (cm)	原地盤凍上力(kN)		縁切り地盤の凍上圧(kPa)	
		最大	1~2月平均	最大	1~2月平均
平.元.11-平.2.4	15	43	33	810	510
平.2.11-平.3.4	10	48	28	1520	650
	20	75	44	570	280
平.3.11-平.4.4	10	39	30	2160	1380
平.4.11-平.5.4	10	49	30	1010	340
平.5.11-平.6.4	10	41	29	1460	360

$$R = (P_0 - P_r) / P_0$$

縁切り半径 r が大きくなると P_r は P_0 に近づき、 R はゼロに近づく。ここで、 $R=0$ のときの r を r_0 とすると、この r_0 は円盤の中心から凍上力が伝達される限界までの距離を表すことになる。 r_0 から円盤の半径5cmを引いた値が影響範囲 r となるが、この r は凍上力が伝達してくる限界から円盤あるいは構造物の縁までの距離を表し、円盤あるいは構造物の大きさとは無関係となる。ここで継続的に凍上力が発生する1月~3月の90日間において、10日毎の P_r および P_0 の平均値から影響率 R を求めて、縁切り半径 r に対してプロットしたのが図-9である。図中で R と r の間に直線を当てはめて $R=0$ のときの縁切り半径 r_0 が求められる。

図-9によれば、1月は R の値が大きく現われて r_0 は1mを越える。しかし、この時期であっても、たとえば伝達してくる凍上力の約70% ($R=0.3$) は円盤の中心から半径 $r=50$ cmの範囲内で発生したことになる。一方、2月と3月は r の増加に対する R の低下が著しく、 r_0 も40~50cm程度の小さい値となってい

る。この r_0 は凍土層を介しての凍上力の伝達距離であるから、周辺地盤の凍上速度とその変位を吸収する凍土層のクリープ変形速度との相対的な関係が強く影響する。図-2から分かるように、1月は凍上速度が大きいため r_0 が大きくなり、2月と3月は周辺地盤の凍上速度が小さく凍土層のクリープ変形が追従出来たために r_0 が小さくなったと考えられる。このことから以下のことも言えよう。すなわち、図-4の原地盤の凍上力は凍上速度の大きい1月に大きく現れ、一方、周辺地盤からの凍上力伝達のない10cm縁切りでの凍上力(図-7)のピークは必ずしも凍上速度の大きい時期には現れていない。

前述のように r_0 から円盤半径5cmを引いた値が図-8に示す影響範囲 r となるが、1月に r_0 が大きいことを考慮して、実務的には、影響範囲 r を50cmと見なすので妥当な処と考えられる。Penner¹²⁾ は模型コンクリート壁を用いた屋外凍着凍上実験を行い、伝達される凍着凍上力の分布の解析結果が地表面形状の実測結果を良く表すことを示している。この実験によれば、伝達してくる凍上力の大部分は模型壁面から60cm~70cm程度の範囲で発生している。

5. まとめ

構造物に加わる地盤凍上力を評価するために必要な基礎データとして、自然地盤の地表面凍上圧と構造物(円盤)への凍上力の影響範囲について実験的に検討した。主な結果をまとめると次のようになる。

(1) 自然地盤の凍上力は、気温の変化に対応して冬期間を通して小さく変化し、このとき凍上力の変化は気温の変化に対して2日程度の時間的

遅れを伴って現れる。

(2) 地表面に置かれた直径10cmの円盤に加わる凍上力は5シーズンにわたって測定したが、シーズンの最大値で39~49kN, 1~2月の平均で28~30kNの凍上力が加わった。この凍上力は円盤の直径が大きいとさらに大きくなり、直径20cmの円盤では最大75kN, 1~2月の平均で44kNとなった。これらの大きな凍上力は、凍土の層を介して周辺地盤の凍上力が円盤に伝達されることに起因している。

(3) 地表面凍上圧も5シーズンに渡り測定したが、シーズン最大値で570~2160kPa(1~2月の平均で280~1380kPa)であった。この値は実験方法から少し大きめに測定されている可能性があるが、これまでに行われているいくつかの室内凍上力実験の結果と類似である。

(4) 縁切りをしない原地盤で円盤に加わる凍上力の中で、所定の半径 r (縁切り半径)より外側から伝達される凍上力の割合を表す影響率 R を定義した。この R は縁切り半径 r の対数とほぼ直線関係を示す。凍上速度が大きい1月に R が大きくなるが、凍上速度が低下する2~3月では R が小さくなる傾向がある。

(5) 周辺地盤で発生した凍上力が凍土層を介して円盤に伝達してくる影響範囲は比較的狭く、伝達される凍上力の大部分は円盤中心から半径50cm程度の円周内で発生する。

参考文献

- 1) 真井耕象：凍上被害とその対策について，土と基礎，第1巻，第1号，pp.7-13, 1953.
- 2) 土質工学会編：土の凍結—その理論と実際—，土質基礎工学ライブラリー 23, pp.173-226, 1994.

- 3) 佐藤裕一：農業用・排水路の凍上防止に対する一試案，凍害対策と寒さの利用に関するシンポジウム発表論文集，pp.57-64, 1992.
- 4) 鈴木輝之，山田利之：小型Uトラフの凍上被害対策に関する屋外実験，土木学会論文集，No.418/Ⅲ-13, pp.163-171, 1990.
- 5) T.Suzuki, S.Sawada and C.Liu: Field and laboratory tests on adfreeze strength of ground to model piles, *Proc. of 2nd. Int. Sympo. on Frost in Geotechnical Engineering*, pp. 103-109, 1993.
- 6) 鈴木輝之，沢田正剛，上野邦行，安達謙二：多数アンカー式補強土壁の凍上対策に関する実物大模型実験，土と基礎，第42巻，第3号，pp.51-56, 1994.
- 7) 武田一夫：アイスレンズの形成条件に基づく凍上性判定の試み，雪氷，49巻，2号，pp.75-85, 1987.
- 8) 木下誠一：凍上力実験，低温科学，第30輯，pp.191-201, 1973.
- 9) 木下誠一，大野武敏，小黑貢：凍上力Ⅱ—現場の測定結果について—，低温科学，第24輯，pp.285-279, 1966.
- 10) 鈴木輝之，沢田正剛，尾中 孝美：地盤の凍上特性に関する屋外実験，土木学会論文集，No.430/Ⅲ-15, pp.107-114, 1991.
- 11) 日本道路協会：道路土工排水工指針，昭和62年版，pp.238-243, 1987
- 12) E. Penner: Uplift forces on foundations in frost heaving soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.11, No. 3, pp.323-338, 1974.
- 13) Kauko Kujala: Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils, *ACTA University of Oulu*, 1991.

(1994.11.16 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON FROST HEAVING FORCE OF NATURAL GROUND

Teruyuki SUZUKI, Qing ZHU and Seigo SAWADA

Frost heaving forces on circular steel plates which were set on ground surface was measured in field test. The large amount of uplift force on the plate were arised, because the frost heaving force concentrated to the plate. The frost heaving force arised at freezing front propagates to the structures through frozen soil layer. In the design of frost heave prevention measure of practical structures, following two factors were important. 1) the arised frost heaving force with in a unit area of ground. 2) the region of the ground where the frost heave action take effects to the force on structures. In this study these two factors were experimentally determined.