

グラウンドアンカーの凍上対策に関する研究

山本彰¹・鳥井原誠²

¹正会員 工博 (株)大林組 土木技術本部 (〒108-8502 東京都港区南港2-15-2)

E-mail : yamamoto.akira.ya@obayashi.co.jp

²正会員 工修 (株)大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail : toriihara.makoto@obayashi.co.jp

本論文は、グラウンドアンカー頭部に設置した皿ばねの凍上対策としての効果の検証を目的として実施した、模型地盤の凍上実験結果について述べている。実験ではアンカーを設置しないで地表面の拘束条件を変化させた場合、および模型地盤内にアンカーを設置し、その頭部に皿ばねを設置した場合と設置しない場合について実施した。その結果、以下の結論を得た。1)凍上時のアンカー緊張力と定着板の凍上変位は双曲線の関係にある。2)アンカー頭部に皿ばねを設置することによって、凍上現象に伴う緊張力増加は抑制されるという結果が得られ、皿ばねの凍上対策としての効果が検証できた。さらに、本論文ではグラウンドアンカーの凍上対策としての皿ばねの仕様の決定方法を示している。

Key Words : *ground anchorage, coned disk spring, frost heaving, model test, anchorage load, frost-heave-proofing*

1. はじめに

グラウンドアンカー（以下、アンカーと言う）は、防食技術の向上に伴い、二十年前ごろから永久仕様のアンカーに対する基準化^{1), 2), 3)}が各機関でなされてきた。それに伴って、数多くのアンカー工法が開発され、切土法面においてもアンカーを永久対策として採用することが多くなってきている。一方、寒冷地の切土法面では凍上現象に伴う法面工の浮き上がりやアンカー緊張力の増加が問題になることが多い^{4), 5), 6)}。特に、切土法面に打設したアンカーでは凍上現象によってアンカー緊張力が増加し、最悪の場合には tendon が破断に至ることがある⁷⁾。このため、アンカーを打設した斜面の安定性、維持管理およびライフサイクルコストの低減といった観点から、寒冷地におけるアンカーの凍上対策は極めて重要と考えられる。しかし、凍上現象に関する研究は数多くなされているものの、アンカーの凍上問題に着目した研究は少ない。

凍上現象に伴うアンカーの破断事例として、奈良⁷⁾の報告がある。奈良は凍上現象に伴ってアンカーが破断した事例について、原因を解明するため種々の調査を実施している。その結果、破断原因としてはアンカーの材質欠陥とともに、凍上による過大な外力の作用を指摘しており、凍上力は設計アンカー力135.2～210.7kN/本に対して、最大402.8kN/本に達していたと

している。

一方、金田ら^{8), 9), 10)}は凍上現象を考慮したアンカーの設計を行うための基礎資料を得るため、室内実験および現場での試験アンカーによる緊張力の計測を行っている。室内試験の結果、外気温が低いと凍上量は小さく、凍上圧は大きくなる傾向を示す。また、凍上変位を拘束した場合の凍上圧は0.3～1.47MPaであったと述べている。同様に、他の研究においても室内試験による凍上圧の計測がなされており、土の種類によって異なるが、凍上率をゼロに押さえた場合の凍上圧の範囲は0.09～2.25MPa程度となっている¹¹⁾。また、金田らによれば、現場の試験アンカーで得られた凍上圧は0.02～0.13MPaであり、地盤条件は異なるものの、室内試験で得られた凍上圧の1割程度であったと述べている¹⁰⁾。このような室内試験と現場での試験アンカーの凍上圧との相違について、金田らは凍上を完全に押さえ込むには大きな拘束力を必要とするが、ある程度の凍上変位を許容すると凍上力はかなり小さく、若干の変位を許容できるアンカーならば、凍上に対応した設計ができる可能性がある⁹⁾と述べている。このことは凍上率と凍上圧が反比例の関係にあること^{10), 12)}からも容易に理解できる。

著者らは既にアンカー頭部に皿ばねを設置して、その緊張力を保持する技術（緊張力保持技術）を提案しており¹³⁾、この技術は地盤変位を皿ばねによって吸収

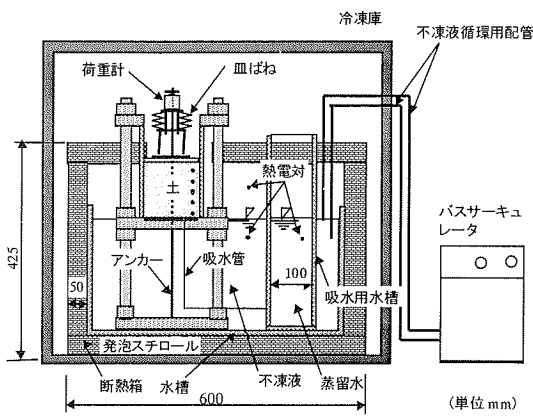


図-1 凍上実験の概要

し、アンカー緊張力が変化することを防止する効果を有していることから、凍上現象に伴うアンカーの緊張力増加の防止に対しても効果的であると考えられる。

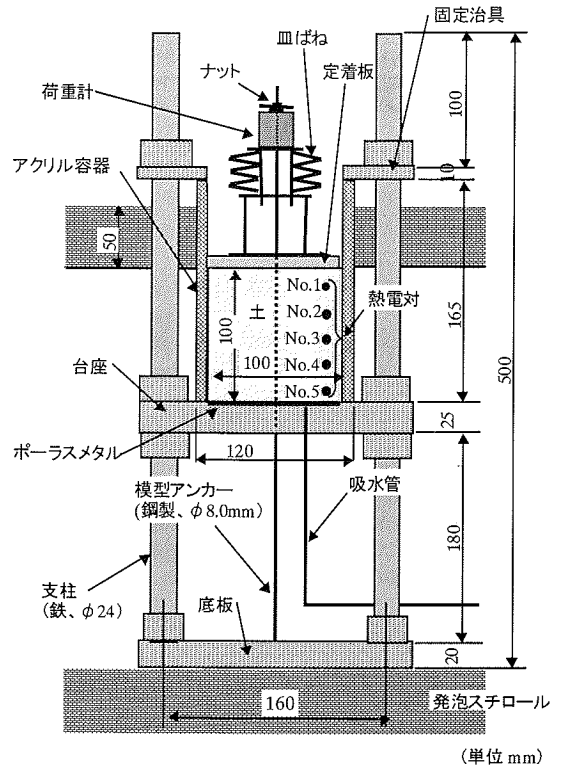
そこで、この論文ではアンカー頭部に設置した皿ばねの凍上対策としての効果を検証するため、模型アンカーを設置した土試料（模型地盤）の凍上実験を実施した。凍上実験ではアンカー頭部に皿ばねを設置した場合と皿ばねを設置しない場合について行った。また、アンカーの凍上対策としての皿ばねの仕様決定方法を示している。

2. 実験方法

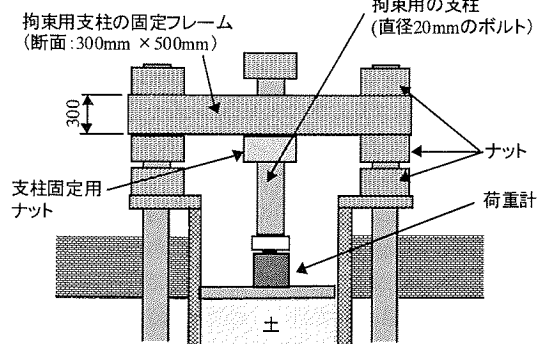
(1) 実験概要

図-1は凍上実験の概要を示しており、実験装置は凍上試験機、断熱箱、バスサーキュレータ、および冷凍庫で構成されている。凍上試験機は土試料を詰めるアクリル容器（内径100mm、高さ165mm、肉厚10mm）、アクリル容器を設置する台座、吸水用水槽等からなっており、図-2は土試料（模型地盤）、模型アンカー、皿ばねの設置状況を示している。台座上の土試料下端部に設置したポーラスメタルと吸水用水槽は吸水管で接続しており、土試料は実験中に水を吸排水できる構造となっている。土試料を入れたアクリル容器は台座上にセットし、土試料の凍上に伴ってアクリル容器が浮き上がりを生じないように上部を治具で固定している。断熱箱は厚さ5cmの発泡スチロールと水槽で構成されている。

実験に当たっては、断熱箱内の不凍液の温度が一定となるようにバスサーキュレータを用いて不凍液を循環させた。不凍液としてはエチレングリコールを蒸留



(a) 皿ばねとアンカーを設置した試験体の状況 (Case6~8)



(b) 地表面変位の拘束状況 (Case1)

図-2 土試料および模型アンカーの設置状況

表-1 土試料の物性値

土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.690
砂分 (%)	12.0
シルト分 (%)	69.0
粘土分 (%)	19.0
最大粒径 (mm)	0.425
液性限界 ω_L (%)	84.4
塑性限界 ω_P (%)	55.2
塑性指数 I_p	29.2

表-2 実験ケース

実験 ケース	実験条件					凍上時			融解後			
	変位 拘束	変位拘束・ 載荷重なし	アンカー設置			初期荷重 Pi(kN)	荷重 Pmax(kN)	荷重比 Pmax/Pi	地表面 変位* (mm)	荷重 Pr(kN)	荷重比 Pr/Pi	地表面 変位* (mm)
			皿ばね 無し	皿ばね 有り	皿ばね 番号							
Case1	○					0	5.14	-	0	0		0
Case2		○				0	0	-	10.53	0		6.19
Case3			○			0.35	2.94	8.40	0.8	0.01	0.03	-0.32
Case4			○			0.78	2.85	3.65	0.29	0.05	0.06	-0.03
Case5			○			1.3	2.55	1.96	0.29	0.04	0.03	-0.76
Case6				○	1	0.35	0.57	1.63	3.9	0.17	0.49	-0.64
Case7				○	2	0.78	1.19	1.53	2.05	0.36	0.46	-1.21
Case8				○	3	1.3	1.58	1.22	0.74	0.99	0.76	-1.84

*地表面変位は (+) が膨張, (-) が収縮を示す。

表-3 実験に用いた皿ばねの仕様

皿ばね番号	外径Do(mm)	内径Di(mm)	有効高さh(mm)	厚さs(mm)	並列枚数m	直列枚数n
1	25	12.2	0.9	0.7	1	10
2	34	12.3	1.25	1	1	6
3	50	25.4	1.6	1.25	1	4

水で50%に希釈した溶液を用いた。なお、循環用の液体として不凍液を用いた理由は、図-1に示すようにバスサーキュレータと水槽の間の循環用配管が冷凍庫内を通ることから、循環用配管の凍結を防止するためである。また、実験では図-1に示すように土試料と模型アンカーをセットした凍上試験機のうち、土試料上端面（地表面）以外を断熱箱で覆い、外気（以下、外気とは冷凍庫内の冷却した空気、外気温とは冷凍庫内の温度をいう）と遮断した。

実験に用いた土試料は関東ロームであり、その物性値は表-1の通りである。土試料は液性限界の1.2倍の水を加えて練返した試料をステンレス容器（内径100mmの円筒容器）に詰めて、上載圧0.3MPaまで段階的に載荷重を増加させて圧密し、作製した。なお、土試料が飽和状態を保つように、圧密および除荷は土試料を水に浸した状態で行った。

圧密終了後、圧密用ステンレス容器と凍上実験用のアクリル容器を縦に連結し、抜き取り装置を用いて圧密用ステンレス容器から凍上実験用のアクリル容器に直接押し込み、土試料をアクリル容器にセットした。なお、アクリル容器へのセット時に測定した含水比を用いて算定した土試料の飽和度は98%以上であった。また、凍上実験では土試料とアクリル容器の間の凍着力や摩擦抵抗力が実験結果に影響を与えられことから、土試料とアクリルの凍着力および摩擦抵抗力を測定する試験（以下、凍着力測定試験および摩擦試験という）を実施した。その結果、土試料とアクリル板の凍着強度は 5.22 N/cm^2 であり、摩擦係数は0.349であった。凍着力測定試験および摩擦試験の結果については付録Iに示す。これらのことから、凍上

実験で得られる凍上変位や凍上荷重はやや小さ目に計測されると考えられる。しかし、いずれの実験ケースとも同様な温度条件、吸排水条件で実験を行っており、凍結深さもほぼ同じと考えられることから、各実験ケースの相対的な比較を行う上で、また皿ばねの凍上対策としての効果の検証（皿ばねの有無による比較）を行う上で、その影響は小さいと考えられる。凍結土とアクリル板の凍着力や摩擦抵抗力が実験時の凍上力に与える影響については付録Iで述べる。

(2) 実験ケースおよび実験方法

表-2は実験ケースを示しており、実験は地表面変位を拘束した場合（凍上率ゼロ）（Case1）、変位拘束および載荷重なしの場合（Case2）、アンカーのみを設置した場合（Case3~5）、およびアンカーと皿ばねを設置した場合（Case6~8）の8ケースである。アンカーとしては直径8mmの鋼製の全ねじボルト（有効断面積： 36.6 mm^2 ）を用いており、凍上試験機底板に先端を固定し、土試料を貫いて鉛直に設置した。アンカーを設置する場合には土試料の中央部に直径12mmの穴をドリルで空けて、アンカーと土が直接接触して摩擦抵抗を生じないように長さ90mmのアルミパイプを挿入している。図-2(a)は皿ばねを設置したケースの実験状況を示しており、アンカー頭部には定着板（反力プレート）、荷重計および皿ばねを設置し、上端部をナットで締め付けて緊張力を与える構造となっている。定着板にはアンカーに加えられた緊張力と同じ力が反力として伝達され、載荷重として土試料に付加される。

一方、図-2(b)は地表面変位を拘束したCase1の実験状況を示しており、定着板は凍上変位を生じないよう

に拘束用の支柱によって固定し、拘束用の支柱と定着板の間には荷重計を設置した。凍上実験では定着板と土試料を密着させるため、拘束用の支柱を締め付けて初期荷重0.10kNを与えた。

図-3は実験に用いた皿ばねの断面形状を示しており、表-3は実験に用いた皿ばねの仕様を、図-4は皿ばねの特性曲線を示している。皿ばねの仕様はアンカーの初期荷重に応じて変化させた。

凍上実験では、まず土試料をセットした凍上試験機を断熱箱内の水槽に設置し、アンカーに所定の緊張力を与えた。このとき、水槽内の不凍液の深さは土試料下端面の位置になるよう調整した。次に、凍上実験時における土試料内の温度を各実験ケースで同一状態にするため、凍上試験機を冷凍庫内にセットし、不凍液と外気温を2℃に設定して24時間冷却した。この状態で緊張力が低下する場合には再緊張した。

凍上実験は、断熱箱内の不凍液の温度を2℃に保った状態で、冷凍庫内を温度-10℃で冷却して土試料を凍上させた。その後、凍上荷重や凍上変位がほぼ一定となった段階で、外気温と不凍液の温度を上昇させて、土試料を融解（解冻）させ、鉛直変位がほぼ一定となった段階で実験を終了した。なお、実験は土試料の下端部と吸水槽を吸水管で接続し、土試料が常に下端部から水を吸排水できる状態で行った。

(3) 計測

図-2には皿ばねを設置した場合の実験時における各種計測用センサーの配置も併せて示しており、アンカーを設置した実験（Case3～8）では荷重計による緊張力の計測、土試料の上端部（地表面）に設置した定着板の鉛直方向の変位計測、および土試料内部の温度計測を行った。Case1では図-2(b)に示すように地表面変位を生じないように土試料の上端部を固定しているため、凍上に伴う荷重計測と土試料の温度計測を行ったが、地表面の変位計測は行っていない。Case2では地表面変位と土試料内部の温度計測を行った。また、不凍液の水温、断熱箱内の温度、冷凍庫内の温度についても併せて計測した。なお、凍上実験では吸排水用の水槽の水位が一定になるように水槽への給排水をスポイトを用いて行っており、土試料の吸排水量の計測は行っていない。

3. 実験結果

(1) 経時変化

図-5はCase8における土試料内、不凍液および冷凍庫内の温度変化を示している。図中には冷凍庫内の温

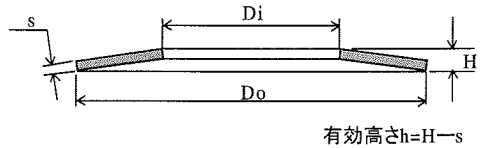


図-3 皿ばねの断面形状

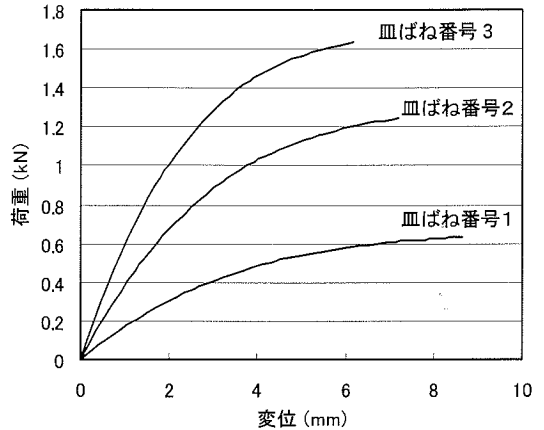


図-4 凍上試験に用いた皿ばねの特性曲線

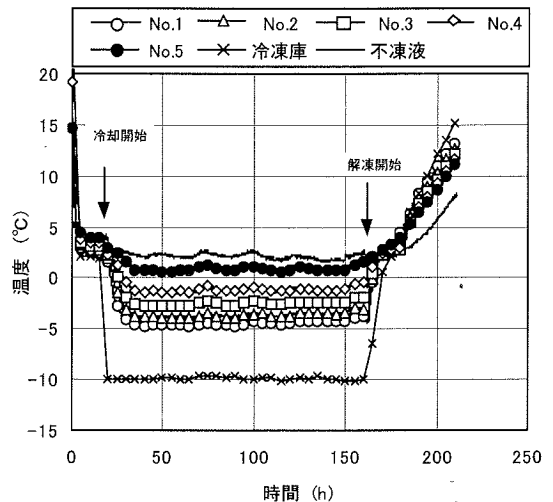


図-5 実験中における土試料内の温度変化 (Case8: 皿ばねあり、初期荷重1.3kN)

度（外気温）を2℃から -10℃に冷却しはじめた時間（冷却開始）と冷却を中止して解冻しはじめた時間（解冻開始）を示しており、冷却を開始して15時間程度で土中の温度はほぼ定常状態となっている。通常、凍上ではアイスレンズの発達を観察することが多いが、今回の実験では凍上試験機を発泡スチロールで覆っていること、および融解時における荷重や地表面

変位の計測を行うことから、凍上中および凍上後のアイスレンズの観察は行っていない。

図-6は初期荷重1.3kNにおける、Case5(皿ばねなし)とCase8(皿ばねあり)の荷重の経時変化を示しており、図中にはCase1(変位拘束)の実験結果も併せて示している。この図から、いずれも外気温を2℃から-10℃に低下させた後、凍上によって荷重が急激に増加している。地中温度が定常状態となった後の経時変化に着目すると、Case1の荷重は時間の経過とともに大きく増加しているのに対し、Case5やCase8ではその増加量が小さいか、あるいはほとんど増加していない。また、Case1、Case5、Case8の凍上に伴う荷重増分はそれぞれ5.14kN、1.25kN、0.28kNであり、Case5とCase8の荷重増分はCase1のそれに比べて小さく、Case1の荷重増分に対するCase5とCase8のその比は1/4、1/18程度となっている。これらのことから、アンカーを設置した場合の凍上現象に伴う荷重増加は地表面変位を拘束した場合に比べて小さく、特に皿ばねを設置した場合には非常に小さくなるのが分かる。

一方、融解後Case1とCase5の荷重はゼロとなっているのに対して、Case8の荷重は凍上前に比べて低下しているものの、1.0kN程度の荷重を保持している。これはアンカー頭部に設置した皿ばねの伸び変位によって、融解に伴う地盤の鉛直変位(沈下)が吸収されたためである。その結果、皿ばねを設置したアンカーでは皿ばねを設置しないアンカーに比べて、融解に伴う緊張力の低下が小さくなったと考えられる。これらのことから、皿ばねは凍上に伴う緊張力の増加を抑制するだけでなく、融解後における緊張力の極端な低下を抑制する効果のあることが分かる。

次に、図-7は初期荷重1.3kNにおけるCase5とCase8およびCase2の地表面に設置した定着板の鉛直方向変位の経時変化を示している。この図から、Case2では外気温を2℃から-10℃に低下させた後、凍上現象によって10mmを超える凍上変位が生じているのに対して、アンカーに初期荷重1.3kNを与えたCase5とCase8の凍上変位はそれぞれ0.29mm、0.74mmとなっている。これらの結果から、アンカーの初期荷重の作用によって凍上変位が抑制されることが分かる。また、アンカーを設置したCase5とCase8を比較すると、Case8の凍上変位はCase5に比べ3倍程度大きくなっている。これは図-6からも分かるようにCase5では凍上に伴って荷重が大きく増加するのに対して、Case8では凍上に伴う荷重増加が小さいためである。

さらに、融解後Case2では正の残留変位を生じており、凍結前に比べて膨張したままの状態になっている。なお、高志ら¹⁹⁾によれば未凍結土とアクリルとの

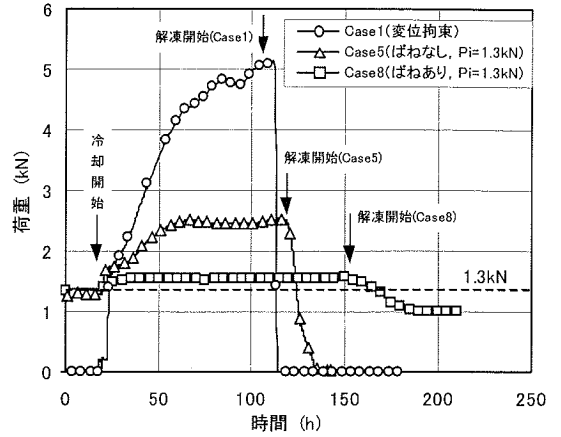


図-6 凍上荷重の経時変化

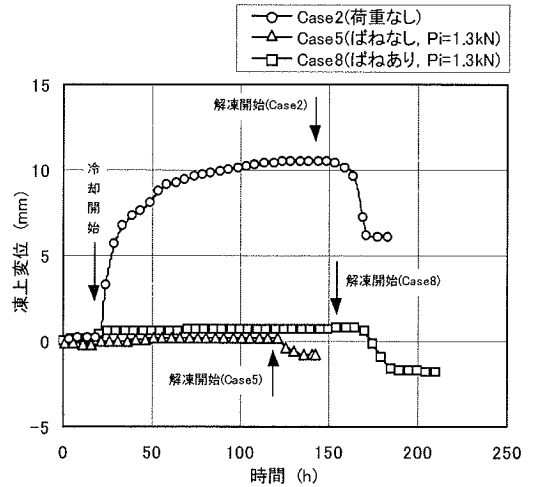


図-7 地表面の凍上変位の経時変化

摩擦抵抗力は小さいと言われているが、Case2の残留変位においては載荷重がほとんどないため、解凍後の土試料とアクリルの間の摩擦抵抗力の影響により残留変位がやや大き目になっている可能性がある。これに対して、アンカーを設置した場合にはいずれも負の残留変位を生じており、実験前に比べて土試料が収縮した状態となっている。これは、Case5とCase8の場合には凍結時に初期荷重に比べて過大な荷重が作用して土試料下端部の未凍結部分が圧縮されたためと考えられる。特に、Case8では融解後もなお大きな荷重が保持されるため、融解に伴って凍結部の土が圧縮され、Case5に比べ地表面の定着板の沈下が大きくなったと考えられる。

このように、凍上に伴う荷重と凍上変位は密接な関

係にあることから、図-8にCase5とCase8の凍上実験中の荷重と凍上変位の関係を示した。この図から、凍上時あるいは融解時におけるCase8の荷重増加はCase5のそれに比べて小さく、逆にCase8の凍上変位はCase5のそれに比べて大きくなっており、皿ばねを設置することによってアンカーのばね剛性が見掛け上小さくなっていることが分かる。図-8のグラフからCase8の剛性はCase5のその1/10程度となっている。このように皿ばねを設置したアンカーでは見掛け上の剛性が小さくなるため、凍上時や融解時にやや大きな地表面変位を許すことになるが、アンカー緊張力の変化は少なくなる。

(2) 凍上時の最大荷重と最大変位

表-2には各実験ケースにおける凍上時の最大荷重と最大変位等の計測結果も併せて示している。これらのうち凍上時に着目すると、皿ばねありの場合および皿ばねなしの場合とも、荷重の比 (P_{max}/P) と地表面変位は初期荷重が小さいほど大きくなっている。これらのことから、アンカーの仕様が同一の場合、アンカー緊張力の増加率および凍上変位は初期荷重が小さいほど大きくなると考えられる。

次に、図-9は各実験ケースで得られた最大凍上変位と最大荷重の関係をもとめて示している。図中の矢印は各供試体の初期状態から最大荷重（最大変位）の推移を示しており、実線はアンカーのみの実験ケース、破線はアンカー頭部に皿ばねを設置した場合の実験ケースを示している。この図から、凍上変位と凍上荷重の関係は凍上変位の小さい領域では急激に荷重（アンカー緊張力）が増加し、凍上変位が大きくなるほど荷重変化は小さくなる性質を有しており、凍上変位と荷重は概ね双曲線関係となっている。したがって、凍上荷重は地表面における凍上変位が大きくなるほど小さくなる事が分かる。これらの関係はこれまでの研究において、一定荷重下で実施された凍上実験結果と対応する結果となっている^{10,12}。そこで、凍上実験で得られた荷重と凍上変位の関係を式(1)によって近似した。図中にはこの近似曲線を併せて示している。

$$P = -0.2 + \frac{2.5}{u + 0.45} \quad (1)$$

なお、2.(1)で述べたように、凍上実験ではアクリルと土試料の間に凍着力や摩擦抵抗力が作用するため、表-2および図-9の最大凍上変位や最大荷重はやや小さ目になっていると考えられる。付録1の凍着力測定試験および摩擦試験結果によれば、凍上力は凍着力や摩擦抵抗力が作用しない場合に比べて、最大20%程度小さくなっていると推定される。

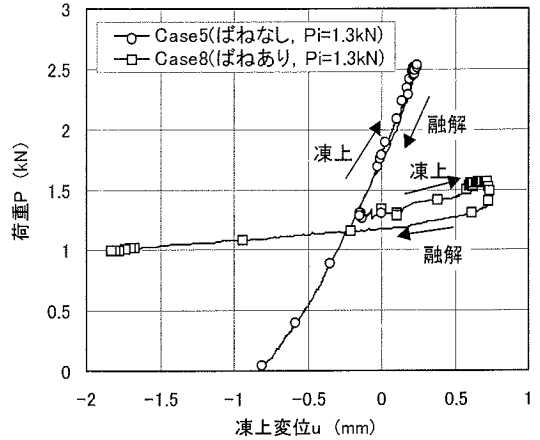


図-8 凍上変位と荷重の関係

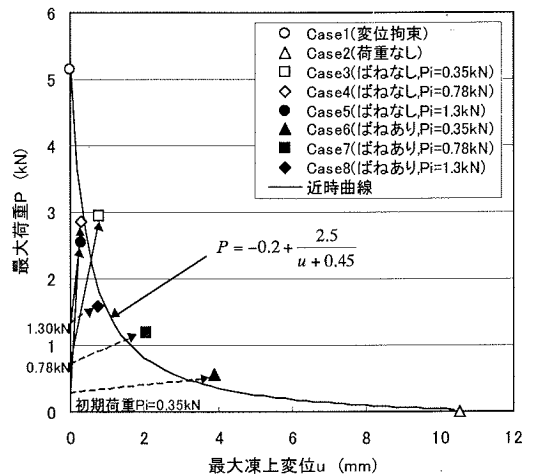


図-9 凍結時の最大荷重と最大凍上変位の関係

これら最大荷重と最大凍上変位の関係から、アンカーの凍上対策としてはできるだけ大きな凍上変位を許容できる構造にするのが、凍上に伴う緊張力増加を抑制する上で有効であると言える。一方、凍上対策としてテンドンの断面を大きくすることはアンカーの剛性を高くし、凍上変位を拘束することになることから、アンカーに大きな緊張力が作用することになると予想される。このため、アンカーテンドンの断面を大きくすることはアンカーの凍上対策として合理的とは言えない。ただし、表-2の結果から初期緊張力を大きくすることによって凍上に伴う緊張力増加をある程度抑制することは可能と考えられる。

また、図-9および表-2の初期荷重が同一の場合の実験ケースについて皿ばねの有無で比較すると、Case3の初期荷重 (0.35kN) に対する最大荷重 (2.94kN) の

荷重増加は2.59kNであるのに対して、Case6の荷重増加は0.22kNであり、Case3の荷重増加量に対するCase6のその比は1/11となっている。同様に、初期荷重が0.78kNのCase4の荷重増加量に対するCase7のその比は1/5、初期荷重が1.35kNのCase5の荷重増加量に対するCase8のその比は1/4.5となっており、初期荷重が同一の場合、皿ばねありの荷重増加量は皿ばねなしのその1/4.5~1/11となっている。

図-10は融解後における残留時の荷重と変位の関係を示している。この図から、皿ばねなしの緊張力はいずれも融解後ゼロになっているのに対して、皿ばねありの融解後の荷重は初期荷重の46%~76%となっている。一方、皿ばねありの融解後の地表面変位は皿ばねなしのそれに比べて大きくなっている。この融解時における残留緊張力の低下は主に凍上時における未凍結部分の圧縮によるものであり、皿ばねを設置したケースにおいて残留変位が大きくなっているのは融解後もなお大きな残留緊張力が保持され、融解部分の土が圧縮されるためである。これらのことから、土砂などの圧縮性を有する地盤では、アンカー頭部に皿ばねを設置することによって融解時の残留変位は大きくなるものの、残留時に大きな緊張力が保持されると考えられる。凍上現象は一般的に土砂層において生じることから、アンカー頭部に設置した皿ばねは融解後におけるアンカー緊張力の低下を防止するのに有効と考えられる。

以上のことから、アンカー頭部に設置した皿ばねは凍上変位や融解時の地表面沈下を吸収して、凍上時あるいは融解時のアンカー緊張力の変化を抑制し、緊張力を保持する機能を有しており、アンカーの凍上対策として極めて有効であると言える。

4. 凍上対策としての皿ばねの設計方法

(1) 凍上時のアンカー緊張力と凍上変位の算定方法

a) 凍上対策としての皿ばねの設計フロー

図-11は凍上対策としての皿ばねの設計フローを示しており、皿ばねの設計に当たっては地盤の凍上変位と上載荷重（凍上荷重）との関係を求める必要がある。地盤の凍上荷重と凍上変位の関係を求める方法としては実地盤において凍上荷重と凍上変位を計測する方法、と土の凍上特性（凍上圧と凍上率）から予測する方法が考えられるが、基本的に実地盤での計測によって求める。図中の凍上率とは、凍上変位を凍結深さで割った値である。また、凍結深さとは凍上の発生する地域における地盤の地表面からの凍結する深さであり、わが国の最大凍結深さは2.0m近いと考えられて

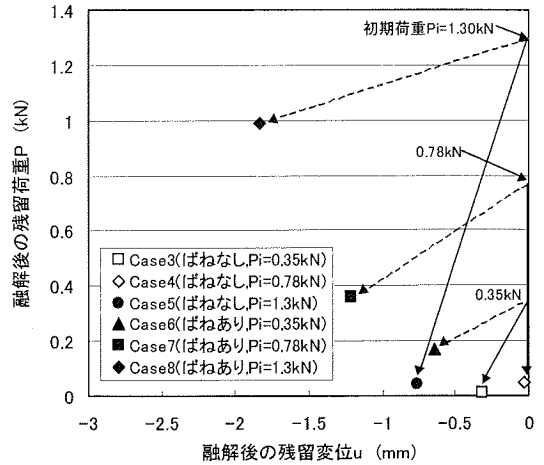


図-10 融解後の残留荷重と残留変位の関係

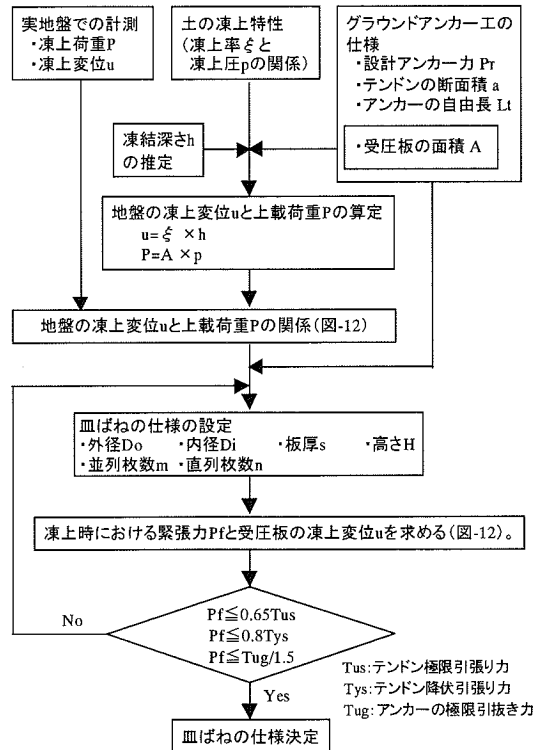


図-11 皿ばねの設計フロー

いる⁹⁾。なお、地盤の凍結深さの推定方法としては凍結指数を用いた方法がいくつか提案されている¹⁰⁾。

一方、グラウンドアンカーは、切土法面や斜面の設計によって決定された仕様をそのまま用いる。

次に、皿ばねの仕様を設定し、皿ばねに作用する荷重（凍上時における緊張力）と皿ばねの必要たわみ量

(凍上変位)を算定する。皿ばねに作用する荷重のうち、初期緊張力は設計アンカー力として与えられるもの、凍上によって増加する緊張力を予測する必要がある。一方、皿ばねの必要たわみ量については凍上に伴う受圧板(凍上実験では土試料上端面に設置してアンカー緊張力の反力を地盤に伝達する反力プレートを定着板と称していたが、実斜面に打設するアンカーでは反力プレートを通常受圧板と呼ぶことから、4章では反力プレートを受圧板と呼ぶこととする)の変位を想定する必要がある。図-12は地盤にアンカーを打設した場合のアンカー緊張力と凍上変位の算定方法の模式図を示している。凍上時のアンカー緊張力と凍上変位は、図-12に示すように地盤の凍上に伴う荷重と変位の関係(曲線①)、とアンカー緊張力と凍上変位の関係(曲線②)を同じグラフ上にプロットし、曲線①と曲線②の交点として求める。

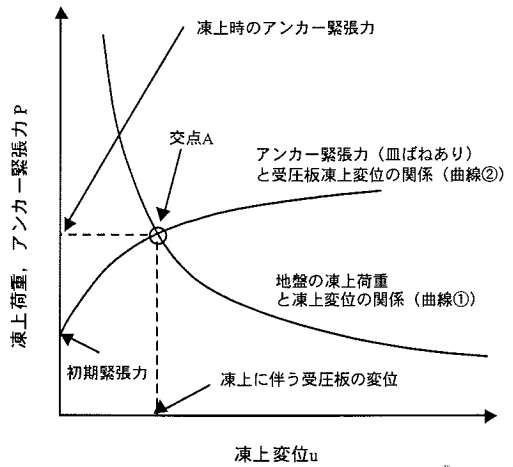


図-12 荷重(アンカー緊張力)と凍上変位の関係

さらに、凍上時のアンカー緊張力増加を短期的な問題と考え、グラウンドアンカー工の仮設時の基準を満足することを確認し、皿ばねの仕様を決定する。表-4、表-5は地盤工学会の「グラウンドアンカー工設計・施工基準 同解説」¹⁾に記載されている「テンドンの極限・降伏引張力に対する低減率」と「極限引抜き力に対する低減率」を示している。

表-4 テンドンの極限・降伏引張力に対する低減率¹⁾

	テンドン極限引張力 (Tus) に対して	テンドン降伏引張力 (Tys) に対して
仮設アンカー	0.65	0.80
永久アンカー	(常時)	0.60
	(地震時)	0.80

b) 実験結果による検証

図-13は凍上時におけるアンカー頭部の状況を模式的に示しており、皿ばねを設置したアンカーの緊張力 P と凍上変位 u の関係は式(2)~(5)を用いて求めることができる。一方、皿ばねを設置しないアンカーの緊張力と凍上変位の関係は式(2)において $P=P_t$, $u=u_t$ として与えられる。

表-5 極限引抜き力 (Tug) に対する低減率 (fs)¹⁾

	安全率 fs	
仮設アンカー	1.5	
永久アンカー	(常時)	2.5
	(地震時)	1.5~2.0

①アンカー緊張力 P と伸び変位 u の関係

$$P_t = \frac{E_t a}{L_t} u_t \quad (2)$$

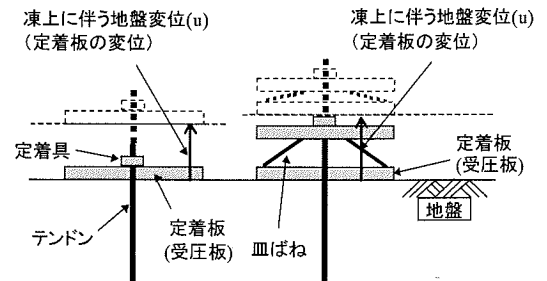
ここに、 E_t , a , L_t はアンカーテンドンの弾性係数、断面積、自由長である。

②皿ばねの荷重 P_s と変位 u_s との関係

皿ばねの荷重 P_s と変位 u_s の関係は弾性論に基づく近似解としてアルメンらによって求められており、次式で表される¹⁰⁾。

$$P_s = \frac{4E_s}{1-\nu^2} \frac{s^4}{C_1 D_o^2} \frac{u_s}{s} \left[\left\{ \frac{h}{s} - \frac{u_s}{s} \right\} \left\{ \frac{h}{s} - \frac{u_s}{2s} \right\} + 1 \right] \quad (3)$$

ここに、 E_s は弾性係数、 ν はポアソン比、 s は板厚、 D_o は外径、 D_i は内径、 C_1 は皿ばねの外径と内径の比 (= D_o/D_i) で決定される定数、 h は皿ばねの有効高さ ($h=H-s$) である。



(a) 皿ばねを設置しない場合 (b) 皿ばねを設置した場合

図-13 凍上時の模式図

③変位の適合条件

$$u = u_s + u_t \quad (4)$$

④力の釣り合い条件

$$P_s = P_t = P \quad (5)$$

図-14は凍上実験で得られた緊張力と凍上変位の関係および式(1)の近似曲線を示したグラフ上に、式(2)～(5)によって得られたアンカー緊張力と凍上変位の関係も併せて示している。この図から、近似曲線、とアンカーの緊張力と凍上変位関係の交点は概ね実験で得られた緊張力および受圧板の凍上変位と対応している。このことから、図-11、図-12に示した手法によって皿ばねを設置した場合と設置しない場合の凍上時のアンカー緊張力と受圧板の凍上変位は推定できると考えられる。そこで、(2)では具体的に図-11のフローに従い、実地盤を想定した場合の凍上時におけるアンカー緊張力と凍上変位を試算し、皿ばねの仕様を決定する手順を示すこととする。

(2) 実地盤を想定したアンカー緊張力の試算

地盤の凍上変位と凍上荷重の関係は、粒度など土特有の性質である内的な要因と温度や地下水などの外的な要因により影響を受けると言われており¹²⁾、地盤の凍上変位と凍上荷重の関係は時期や場所によって異なる。このため、実地盤の凍上変位と凍上荷重の関係は現地にて凍上試験を実施して求める必要がある。しかし、実地盤での凍上変位と凍上荷重の関係を求めた事例はほとんど見られない。

そこで、図-11の設計フローによる設計手法を具体的に示すことを目的として、高志ら⁸⁾および戒ら¹⁵⁾の凍上試験結果を基に凍上率と凍上圧の関係を求め、設計フローに従い皿ばねの仕様を決定することとする。表-6は試算に用いる地盤の凍上条件、アンカーの仕様および皿ばねの仕様を示している。なお、高志らおよび戒らの研究は凍結速度を一定として、飽和土に対して行った室内凍上試験に基づいて得られた結果であり、不飽和土や実地盤にそのまま適用することはできないと考えられる。

a) 地盤の凍上変位と凍上荷重の関係

高志ら¹²⁾は凍結膨張率 ξ を $\xi = \Delta V/V$ と定義し、水の出入りを一定有効応力 σ のもとで、一定凍結速度 U で凍結させると ξ と σ の間には式(6)の関係が成り立つことを示している。ここで、凍上を地表面に垂直な方向のみで考えるならば、凍上膨張率は図-11の凍上率と等しくなる。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \quad (6)$$

ここに、 ξ_0 、 σ_0 、 U_0 は実験から求まる土固有の定数である。なお、式(6)は有効応力 10kN/m^2 以下になると凍上膨張率 ξ が小さくなるといわれているが¹²⁾、凍

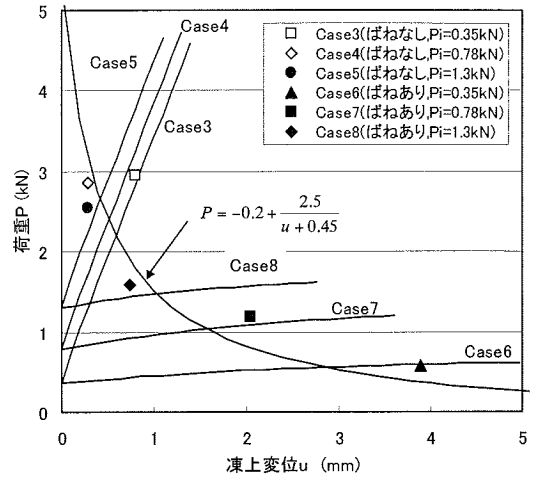


図-14 荷重と凍上変位の関係

表-6 試算例の条件

地盤の凍上条件	凍結深さ h (mm)	500
	凍結時間 d (日)	90
	凍結速度 U(=h/d) (mm/日)	5.56
グラウンドアンカー工の仕様 (直径23mm、PC鋼棒) ・耐力785N/mm ² ・引張強さ1030N/mm ² 以上	設計アンカー力 P _T (kN)	200
	受圧板の面積 A (m ²)	2.0
	テンドンの断面積 a (mm ²)	415.5
	アンカー自由長 (m)	10
皿ばねの仕様	外径 D _o (mm)	350
	内径 D _i (mm)	155
	板厚 s (mm)	9.3
	高さ H (mm)	22.3
	並列枚数 m	2
	直列枚数 n	4

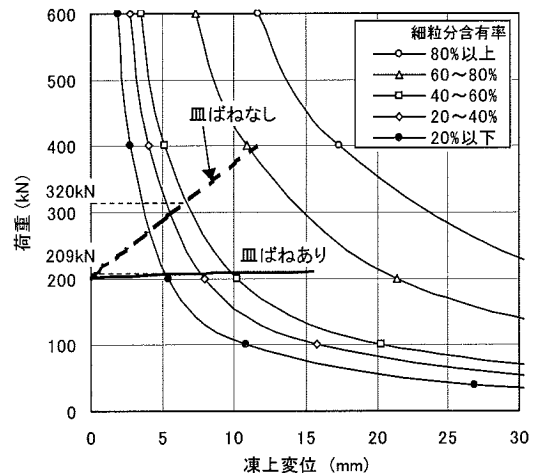


図-15 荷重と凍上変位の関係

上実験時の荷重はいずれもこの有効応力を満足することから（初期荷重0.35kNで44.6kN/m²），式(6)をそのまま適用することとした。一方，了戒らは数多くの土について凍上試験を実施し，式(6)の定数を種々の粒度特性をもつ土に対して求めている。また，粒径が0.1mm以下の土において凍上を生じることが知られており⁴⁾，田中ら¹⁷⁾は細粒分含有率と凍上膨張率は強い相関性を示すと述べている。

そこで，地盤の凍上荷重と凍上変位の算定に当たっては，まず了戒ら¹⁸⁾の求めた土試料毎のパラメータと表-6の凍結速度を式(6)に代入して，各土試料毎の凍上率と凍上圧の関係を求め，土試料毎の細粒分含有率毎にグループ（細粒分含有率0～20%，20～40%，40～60%，60～80%，80～100%）分けして，各グループ毎に凍上圧と凍上率の関係（近似曲線）を求めた。なお，了戒らの試験結果では凍上膨張率が細粒分含有率と強い相関性を有することから，細粒分含有率でグループ分けすることとした。次に，表-6の凍結深さと受圧板面積を用いて各グループ毎の凍上荷重と凍上変位の関係を算定した。図-15は受圧板面積を2.0m²，凍結深さを50cmと仮定して算定した各グループ毎の凍上荷重と凍上変位の関係をプロットしたものである。

b) 凍上に伴う緊張力の算定

図-16は表-6に示したアンカーと皿ばねの仕様に基づいて求めたアンカー緊張力 P と変位 u の関係を示しており，図中には(a)皿ばねの寸法と(b)皿ばねの組み合わせを併せて示している。図-15には初期緊張力200kN（設計アンカー力）におけるアンカーのみ（皿ばねなし）と皿ばねを設置したアンカー（皿ばねあり）の荷重と変位の関係も併せて示している。この図から，アンカー緊張力と凍上変位の関係，と地盤の凍上荷重と凍上変位関係の交点として，皿ばねを設置しない場合および皿ばねを設置した場合の凍上時におけるアンカー緊張力と凍上変位が得られる。たとえば，細粒分含有率40～60%の土試料で構成された地盤を想定した場合，皿ばねなしの緊張力は約320kNまで増加することになるのに対して，皿ばねを設置した場合には約209kNとなり，皿ばねを設置することによって凍上に伴うアンカーの緊張力増加を大幅に軽減できることになる。ちなみに，表-6に示すアンカーが仮設時に満足すべき引張力は式(7)，(8)の通りである。

$$0.65T_{us} = 0.65 \times 1030 \times 415.5 = 278.2kN \quad (7)$$

$$0.80T_{yu} = 0.80 \times 785 \times 415.5 = 260.9kN \quad (8)$$

したがって，皿ばねを設置しない場合には仮設時の

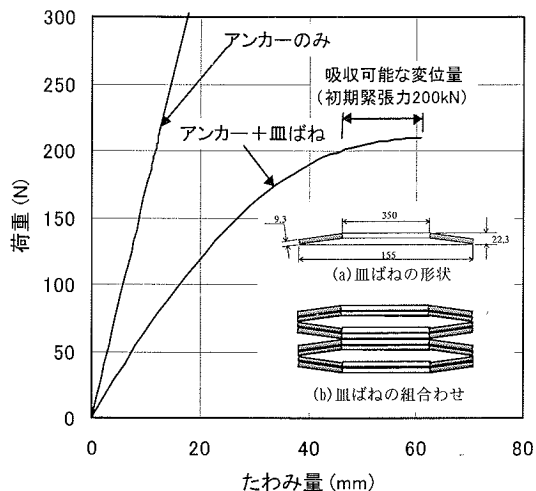


図-16 アンカーのみおよび皿ばねを設置したアンカーの荷重変位関係

条件を満足することができない。一方，皿ばねを設置した場合には仮設時の条件を十分に満足する結果となる。

同様に，地盤の細粒分含有率を40～60%と仮定すると，受圧板の凍上変位量（必要たわみ量）は図-15から皿ばねありの場合には約10mm，皿ばねなしの場合には約6.5mmと求まる。図-15あるいは図-16から，皿ばねを設置したアンカーは初期緊張力200kNに対して15mm程度の凍上変位を吸収できるたわみ量を有していることから，皿ばねは凍上時の必要たわみ量(10mm)を満足するものとなっている。

以上のように，アンカー緊張力に対する基準および必要たわみ量を満足するように皿ばねの仕様を決定する。

5. おわりに

本論文では，アンカー頭部に皿ばねを設置した場合の凍上対策としての効果を検証するため，アンカーを設置した模型地盤の凍上実験を実施した。

その結果，以下の結論が得られた。

- (1) アンカーを設置した場合，凍上現象に伴う荷重増加は地表面変位を拘束した場合に比べて小さくなる。特に，皿ばねを設置したアンカーでは非常に小さくなり，今回の実験では初期荷重が同一の場合，皿ばねを設置したアンカーの荷重増加は皿ばねを設置しないアンカーのその1/4.5～1/11であった。

(2) アンカーの荷重は融解時に極端に低下する可能性がある。皿ばねはこのような融解後における緊張力の極端な低下を抑制する効果がある。今回の実験では皿ばねを設置しないアンカーの荷重はいずれも融解後ゼロとなっているのに対して、皿ばねを設置したアンカーの融解後における荷重は初期荷重の46%~76%であった。これらのことから、皿ばねは融解後におけるアンカー緊張力の低下を防止するのに有効であると言える。

(3) アンカーを設置した場合の凍上変位は、地表面の変位拘束や載荷重なしの場合に比べて小さくなる。また、皿ばねを設置した場合の凍上変位は皿ばねを設置しない場合に比べて大きくなる。

(4) 皿ばねを設置したアンカーの融解後における受圧板の鉛直変位（沈下）は皿ばねを設置しないアンカーのそれに比べて大きくなる。

(5) 皿ばねを設置することによって、アンカーのばね剛性は見掛け上小さくなる。今回の実験うち初期緊張力1.3kNにおける皿ばねを設置したアンカーの剛性は皿ばねを設置しないアンカーのその1/10程度であった。このように皿ばねを設置したアンカーでは見掛け上の剛性が小さくなるため、凍上時や融解時にやや大きな地表面変位を許すことになるが、アンカー緊張力の変化は小さくなる。これがアンカーの剛性で見た場合の皿ばねの効果と言える。一方、皿ばねの機能で見た場合、アンカー頭部に設置した皿ばねは凍上変位や融解時の地表面沈下を吸収して、凍上時あるいは融解時のアンカー緊張力の変化を抑制し、緊張力を保持する機能を有していると言える。

(6) 凍上時の最大荷重に対する初期荷重の比 (P_{max}/P) と地表面変位は皿ばねありの場合および皿ばねなしの場合とも、初期荷重が小さいほど大きくなる。これは、アンカーの仕様が同一の場合、アンカー緊張力の増加率および凍上変位は初期荷重が小さいほど大きくなることを示していると考えられる。

(7) 凍上変位と凍上荷重の関係は凍上変位の小さい領域では急激に荷重（アンカー緊張力）が増加し、凍上変位が大きくなるほど荷重変化は小さくなる性質を有しており、凍上変位と荷重は概ね双曲線関係にある。このため、アンカーの凍上対策としてはできるだけ大きな凍上変位を許容できる構造にするのが凍上に伴う緊張力増加を抑制する上で有効であると言える。

(8) 凍上対策としての皿ばねの仕様は図-11に示した手順で求めることができる。すなわち、皿ばねを設置したアンカーの凍上時の緊張力と皿ばねの必要たわみ量は凍上時の地盤の凍上に伴う荷重と変位の関係、とアンカー緊張力と凍上変位の関係と同じグラフ上にプロットし、その交点として求めることができる。な

お、本論文では図-11の設計フローによる設計手順を具体的に示すことを目的として、凍上力と凍上変位の関係を高志らの研究¹²⁾と了戒ら¹⁵⁾の研究結果を用いて求めたが、これらの研究は凍結速度を一定として、飽和土に対して室内凍上試験で得られた結果であり、不飽和土や実地盤にそのまま適用することはできないと考えられる。このため、実地盤への適用に当たっては現場にて凍上試験を実施し、凍上荷重と凍上変位の関係を求める必要がある。

本論文では地盤工学会の「グラウンドアンカー工設計・施工基準 同解説」に従って施工されたグラウンドアンカーを想定しているが、自由長部が十分に設けられていない場合には引張り試験などによって自由長を調査し、適切に評価した上で皿ばねの設計を行う必要がある。

また、本論文で実施した模型実験は地表面全体が受圧板で覆われている場合に相当する。しかし、実斜面に設置される受圧板は地表面全体を覆うように配置することは少なく、アンカーの緊張に伴って受圧板がめり込みを生じたり、受圧板を設置している地表面部と設置していない地表面部で凍上変位の不整合を生じることがある。このため、今後実際の受圧板の設置状況に応じた凍上荷重と凍上変位の関係に対する評価方法の検討とそのデータ収集が必要と考えられる。さらに、本論文では1サイクルの凍上実験（凍結・融解）を実施し、皿ばねの仕様の設計方法を示したが、実斜面では毎年繰返し凍結・融解を生じることから、今後凍結・融解の繰返しによる影響についての検討が必要である。

付録 I

実験時における土試料とアクリル板の凍着強度および摩擦係数を調べるため、簡易せん断試験装置を用いた凍結土とアクリル板の凍着力測定試験および摩擦試験を行った。

図-A1は凍着力測定試験および摩擦試験に用いた簡易型せん断試験装置¹⁹⁾であり、摩擦試験の状況を示している。この試験装置はアクリル板を固定した台座上に土試料を詰めたセルをせん断箱の内側に設置し、せん断箱を水平方向に移動させることによって土試料とアクリル板のせん断抵抗力を測定する構造となっている。

(1) 凍着力測定試験

凍着力測定試験では、まず凍上実験と同様に圧密して作製した土試料をセル（内径60mm、高さ20mm）に詰

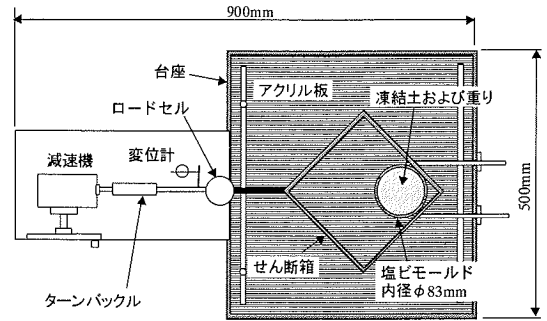
め、簡易せん断試験装置の台座に取り付けたアクリル板上にセットし、温度を -10°C に設定した冷凍庫内で24時間冷却し、土試料とアクリル板を凍着させた。このとき、セル内の試料は土試料のみがアクリルと接触するように3mm程度セルの下端部から突出させるとともに、アクリル板に接触する面を水に浸した後、アクリル板上にセットした。その後、凍着した状態でせん断箱をせん断方向に水平移動させ、凍結土とアクリル板の間の凍着強度を計測した。なお、凍着力測定試験は土試料の上部に重りを載せない状態で行った。

図-A2は凍着力測定試験結果を示しており、この図から凍着強度は $4.84\text{N}/\text{cm}^2$ である。同様に実施した2回の凍着力測定試験において凍着強度 $5.36\text{N}/\text{cm}^2$ 、 $5.47\text{N}/\text{cm}^2$ が得られており、3回の試験結果の凍着強度の平均値は $5.22\text{N}/\text{cm}^2$ であった。凍着強度の測定結果としては吉田¹⁹⁾や朱²⁰⁾の研究がある。吉田¹⁹⁾はアクリル表面に凍着した水の凍着強度を測定する試験を実施しており、凍着強度は $46.256\text{N}/\text{cm}^2$ であったという結果を得ている。また、朱の研究²⁰⁾によれば、スレート円柱杭に作用する凍着凍上圧を自然地盤において屋外で計測しており、その結果によればスレート円柱杭に加わる凍着強度は $5.0\text{N}/\text{cm}^2 \sim 12.8\text{N}/\text{cm}^2$ であったと述べている。吉田らや朱の研究で得られた凍着強度に比べて、今回の凍着力測定試験で得られた凍着強度はやや小さ目となっているが、吉田らの試験は水(氷)のアクリル板への凍着強度、朱の試験は粘質土地盤におけるコンクリート杭への凍着強度であり、凍着する試料(水、粘質土、ローム)および材料(アクリル、コンクリート杭等)が異なるためと考えられる。吉田らは種々の材料についての凍着強度の測定を実施しており、凍着強度は材料表面の粗さ(材料表面の凹凸の山と谷の平均高さ)、山と谷のピッチや勾配に依存するという結果を得ている¹⁹⁾。

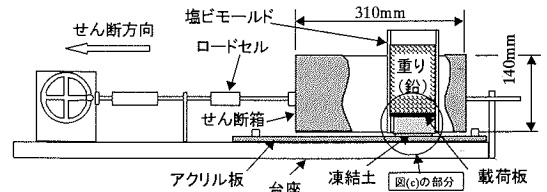
(2) 摩擦試験

摩擦試験では土試料を作製するため、まず凍着力測定試験と同様にして土試料をセルに詰め、テフロンシート上にセットした状態で、温度を -10°C に設定した冷凍庫内で24時間冷却し、凍結させた。その後、テフロンシートを剥がし、凍結した土試料をアクリル板上にセットし、せん断箱をせん断方向に水平移動させ、凍結土とアクリル板の間のせん断抵抗力を計測した。摩擦試験では図-A1に示すように土試料上の重りを段階的に増加させた試験を3回実施した。

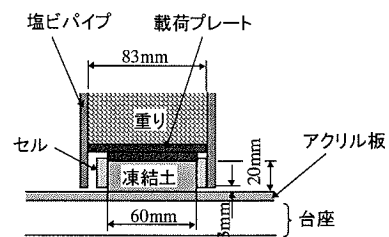
図-A2は摩擦試験結果を示しており、図中には最小2乗近似直線を示している。この図から、凍結した土試料とアクリル板の間の摩擦係数は0.349であった。



(a) 平面図



(b) 断面図



(c) 土試料の設置状況(断面図)

図-A1 簡易せん断試験装置および摩擦試験の状況

(3) 凍着力と摩擦抵抗力の影響について

(1)(2)の凍着力測定試験結果および摩擦試験結果から、凍上実験で得られた凍上荷重(あるいはアンカー緊張力)および地表面の凍上変位は凍着力や摩擦抵抗力の影響を受けるため、やや小さ目に測定されていると考えられる。

そこで、凍着力測定試験結果および摩擦試験結果に基づき、凍着力および摩擦抵抗力が本論文で得られた凍上力に与える影響について考察する。なお、(1)(2)の試験で得られた結果は凍着力と摩擦抵抗力であり、凍上変位に与える影響を考察することは難しいことから、凍上力に与える影響についてのみ検討することとした。

凍上実験において計測された凍上力を R_u 、アクリル容器への凍着力を R 、アクリル容器の摩擦抵抗力を P_f とすると、凍着力や摩擦抵抗力が作用しない場合の凍上力 P は式(A1-1)で表されると考えられる。

$$P = P_m + P_0 + P_\eta \quad (A1-1)$$

ここで、摩擦抵抗力は拘束圧に依存することから、計測された凍上力によって式(A1-2)で表すことができると仮定する。

$$P_\eta = \alpha P_m \eta \quad (A1-2)$$

ここに、 η は摩擦係数である。また、 α は定数であり、凍上実験時の定着板の面積を A_1 、アクリルと土試料凍結部の接触面積を A_2 、凍結した試料のポアソン比を ν とすると、式(A1-3)で表される。

$$\alpha = \frac{A_1 \nu}{A_2 1-\nu} = \frac{2h \nu}{r 1-\nu} \quad (A1-3)$$

ここに、 r は供試体の半径、 h は凍結深さである。

式(A1-2)を式(A1-1)に代入すると、凍着力や摩擦抵抗力が作用しない場合の凍上力 P は式(A1-4)で表される。

$$P = P_m + P_0 + \alpha P_m \eta \quad (A1-4)$$

定着板を変位拘束した実験 (Case1) ではアクリルと土試料の間に主に凍着力が作用すると考えられる。一方、変位拘束していない実験 (凍上変位を生じる実験) (Case2~8) ではアクリルと土試料の間に相対変位を生じるため、アクリル容器と土試料の間には主に摩擦抵抗力が作用すると考えられる。なお、凍上変位を生じる実験においても凍結線付近では凍着を生じると考えられるが、ある時刻で考えた場合の凍結線付近での凍着部の面積は小さく、凍上力や凍上変位に与える影響は摩擦抵抗力に比べて少ないと考えられる。したがって、変位拘束したCase1と変位拘束していないCase3~Case8に分けて凍着力と摩擦抵抗力の影響を考察する。なお、Case2については荷重計測を行っていないため、凍着力や摩擦抵抗力が凍上力に与える影響については検討していない。

①変位拘束した場合

凍結した部分では相対変位をほとんど生じないと考えられる。未凍結部分では圧縮されるためにアクリル容器に対して相対変位を生じることになるが、高志ら¹²⁾の研究結果からその影響は小さいと考えられる。したがって、式(A1-4)は式(A1-5)で表される。

$$P = P_m + P_0 \quad (A1-5)$$

凍着力測定試験結果より、凍着強度 p_0 は 5.22N/cm^2 であり、凍結深さ h は実験結果より 8cm 程度と推定されることから、Case1における凍着力は式(A1-6)で表される。

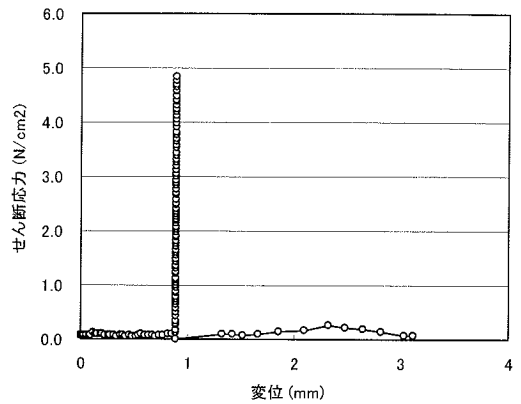


図-A2 せん断応力と変位の関係

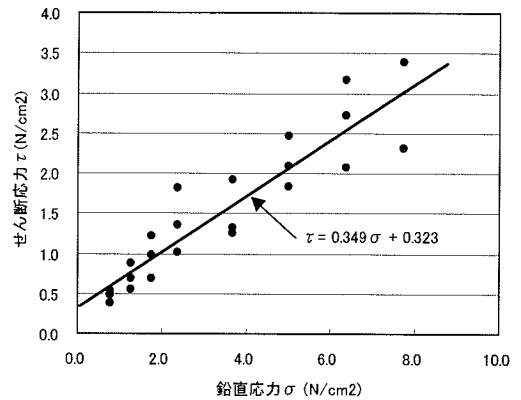


図-A3 摩擦試験結果

$$P_0 = d \times \pi \times h \times p_0 = 10.0 \times 3.14 \times 8.0 \times 5.22$$

$$= 1311\text{N} = 1.311\text{kN} \quad (A1-6)$$

ここに、 d は凍上実験におけるアクリル容器の直径である。

Case1の凍上力の最大値は $P_{m(\max)} = 5.14\text{kN}$ であるから、凍着力に対する比は $P_0/P_{m(\max)} = 0.203$ である。したがって、Case1の実験で得られた凍上力はアクリル容器と土試料との間に凍着力が作用しない場合に比べて20%程度小さくなっていると推定される。

②変位拘束しない場合

図-8から、凍上変位量に差はあるものの、凍上に伴って凍結部分はいずれもアクリル容器に対して相対的な変位を生じるため、アクリル容器との間には主に摩擦抵抗力が作用すると考えられる。したがって、式(A1-4)は式(A1-7)で表される。

$$P = P_m + \alpha P_m \eta \quad (A1-7)$$

凍結温度-10℃でのシルト質ロームの凍土のポアソン比は0.10~0.13（ここでは $\nu=0.115$ と仮定する）程度と推定される²⁾。また、凍上試験結果より凍結深さは8cm程度と推定されることから、 α の値は式(A1-3)に代入すると $\alpha=0.416$ となる。摩擦係数は図-A3から、 $\eta=0.349$ である。これらの値を式(A1-7)に代入すると、式(A1-7)は式(A1-8)で表される。

$$P = P_m + \alpha P_m \eta = P_m + 0.416 P_m \eta$$

$$= P_m + 0.145 P_m = 1.145 P_m \quad (A1-8)$$

したがって、摩擦抵抗力が作用する場合の凍上力はアクリル容器と凍結土の間に摩擦抵抗力が作用しない場合に比べて、15%程度小さくなっていると推定される。なお、先にも述べたように凍上変位を生じる実験では、凍結線が上部より下部に移動するため、ある時刻で考えた場合既に凍結した部分ではアクリルと土の間に摩擦抵抗力が作用し、凍結線付近では凍着力が作用すると考えられる。しかし、摩擦抵抗力の影響は摩擦試験結果から15%程度であり、凍着力による影響は凍着力測定試験結果から20%程度であることから、凍上変位を生じる実験において摩擦抵抗力および凍着力が凍上力に与える影響は最大でも20%程度であると考えられる。

以上のことから、凍上実験で得られた凍上力に与える摩擦抵抗力や凍着力の影響は変位の拘束条件によらず最大20%程度であると推定される。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤工学会基準 グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説（JGS4101-2000），2001。
- 2) 日本道路公団：グラウンドアンカー工設計指針，1993。
- 3) 日本建築学会：建築地盤アンカー設計施工指針・同解説，2001。
- 4) 土質工学会編：土の凍結—その理論と実際—（土質工学会），pp.172-248，1996。
- 5) 佐々木晴美：寒冷地ののり面保護，土木技術資料，Vol. 22，No.8，pp.18-30，1980。
- 6) 西川純一：寒冷地におけるのり面安定工法，土木技術，Vol.49，No.2，pp.51-56，1994。
- 7) 奈良義明：主として凍上作用によって破断したグラウンドアンカーの事例について，地盤工学シンポジウム論文集，pp.35-38，1998。
- 8) 金田尚，西川純一，多田秀一：アンカーの凍上に関する室内実験，第33回地盤工学研究発表会講演集，pp.1767-1768，1998。
- 9) 金田尚，西川純一，多田秀一：アンカーの凍上力に関する室内実験，地盤工学会北海道支部技術報告集，第37号，pp.147-150，1997。
- 10) 金田尚，西川純一，多田秀一：土の凍上試験と凍上を考慮したグラウンドアンカーの設計，開発土木研究所月報，No.541，pp.24-31，1998。
- 11) 磯田卓也，鈴木哲也，疋田貞良：路床の凍上と上載荷重の影響，開発土木研究所月報，No.515，pp.2-9，1996。
- 12) 高志勉，益田稔，山本英夫：土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度，有効応力の影響に関する研究，雪氷，36巻，2号，pp.1-20，1974。
- 13) 山本彰，鳥井原誠：グラウンドアンカー工の緊張力保持技術に関する研究，土木学会論文集，No.694/III-57，pp.141-151，2001。
- 14) Almen, J.O. and Laszlo, A. : The Uniform-Section Disk Spring, Trans. ASME, 58, pp.305-314, 1936。
- 15) 了戒公利，後藤茂，赤川敏：一定拘束圧下における飽和土の凍上特性，清水建設技術研究所報，第33号，pp.27-36，1980。
- 16) 前掲 4)，pp.79-94，1996。
- 17) 田中益弘，中飯勇，柏木智文：土の細粒分含有率と凍上率の相関について（2），第35回地盤工学研究発表会講演集，pp.589-590，2000。
- 18) 三木博史，鳥井原誠，山本彰，井上秀治：地すべり対策としてのジオメンブレン降雨浸透防止工法に関する研究—ジオメンブレンと砂の摩擦抵抗特性について—，第30回土質工学研究発表会講演集，pp.1773-1774，1995。
- 19) 吉田光則，大市貴志，山岸暢，金野克美，後町光夫，平野徹，藤野和夫，堀口薫，水野悠紀子，山岡勝，近藤孝，浅井規夫，佐竹正治：着雪氷防止技術に関する研究（第1報）—各種材料の着氷力について—，北海道立工業試験場報告，No.292，pp.13-22，1993。
- 20) 朱青：地盤の凍結・凍上特性の解明に関する研究，長岡科学技術大学博士論文，1998。
- 21) 前掲 4)，pp.40-62，1996。

(2002.11.7 受付)

A FROST-HEAVE-PROOFING TECHNIQUE FOR GROUND ANCHORAGES

Akira YAMAMOTO and Makoto TORIIHARA

This paper describes the results of a frost-heaving model test with anchorage in order to verify the frost-heave-proofing effect of a coned disk spring on the anchor head. The tests were carried out for changing restricted conditions without an anchor, and for changing initial working load condition of anchors with and without a coned disk spring on the anchor head. The following conclusions were obtained. 1) The anchor-working load and the displacement of an anchor plate at the time of frost heave have a hyperbolic relation. 2) A coned disk spring on an anchor head greatly decreased the working load during the frost heaving model test and also improved the anchorage frost heaving resistance. This paper also proposes a method for designing the coned disk spring on the anchor head.