

ローム盛土における擁壁の凍害防止の実証的研究

名久井 保*・塩井 幸武**・諸戸 靖史***・熊谷 浩二**

Empirical Study to Prevent Frost Heave Calamity on Retaining Wall with Earthfill of Loam

Tamotsu NAKUI, Yukitake SHIOI, Nobuchika MOROTO and Kouji KUMAGAI

Abstract

To study the causes of damage on precast retaining wall with backfilled loam, a series of freezing tests, site observations and loading test for retaining wall are conducted for Hachinohe loam. As results, it is found that fill of loam easily freezes comparing with original loam ground, content of pore water and bound water in particle and repeat of minus temperature greatly affect to amount of frost heave grow, earth pressure based on freezing. To prevent frost heave calamity, it is proved in full scale tests at site. Replacing backfill with crash stone and sand is most effective because of reduction of water content, shut-off of capillary phenomena, cushion of earth pressure, etc.

Key words: volcanic cohesive soils, frost heave test, rigidly held water, frozen earth pressure, replace method

1. はじめに

青森県八戸地方は、12月中旬～3月中旬にかけて寒気が土中に侵入し凍結する季節凍土¹⁾の地域に属する。積雪が少なく冬季の太平洋からの強い風により寒冷で凍結の強い地域である。そのため、水路や道路等の構造物及び宅地における小規模な擁壁に凍結凍上による浮き上がり、倒壊、ひび割れ等の凍害が起こることが少なくない。通常、地盤上の擁壁のように、設計計算に基づき構造物には顕著な被害は招いていないのであるが、この度、火山灰質粘性土（ローム土）の造成地におけるプレキャストL型擁壁に、施工後3年～4年で凍害により数箇所に変状を起すという事態が発生した。写真-1と写真-2に擁壁の変状と破損状況を示す。写真-1はプレキャストL型擁壁の傾斜を、写真-2は側壁と底版の付け根に発生したクラックを示す。

盛土材は八戸地方に広く分布する特殊土とされる八戸ローム、高館ロームである。プレキャストL型擁壁は図-1に示す断面を有し、コンクリート強度は30MPaで、ひびわれ曲げ耐力は4.3kN・m/mである。図-2に示す背面盛土の土圧に対しては十分な安全性が確保されている。しかるに、被害は施工後、数年で顕在化し、既設建物の北側のみに発生し、他では見られないことから凍害によるものと推定される。これら現象を検証し、具体的な対策を講じるため、その発生メカニズムの解明と対策の効果を検討した。

本研究では、凍結凍上の要因である気温、水分、土質

について凍上性の検証を行ない、次に閉式凍上方法による室内凍上試験で、同じローム土でも盛土材と地山材の違い、物理化学的性質の影響、凍結温度、載荷圧力に対する凍結凍上の特性を把握した。屋外凍上試験では現場での凍結凍上の挙動を観測し、凍上対策としての置換工法の有効性を検証した。一方、プレキャストL型擁壁の強度特性を確認するために載荷試験を実施し、破壊状況を検証した。これらより凍害の要因とメカニズムを考察し、凍害対策工法として置換工法の有効性を確認して結論とした。

2. 凍上に対する要因

土の凍上現象は温度、水分、土質の3つの要因に支配されている。この中の一つでも欠けると凍上は起こらないこととなる。この要因を八戸地方のローム土で考えると次のようになる。

(1) 温度

気温は過去10年間の八戸測候所観測データ(図-3)によると、12月中旬頃より日平均気温が氷点下となり、3月中旬頃まで続く。凍結指数は63.7～274.7°C・dayと年によって差はあるが平均137°C・dayである。理論凍結深さ D_{max} は次式により、八戸地方では30～73cmで、場所によっては77～98cmの報告もある²⁾。

$$D_{max} = C\sqrt{F_{max}} \quad (\text{cm}) \quad (1)$$

C : 定数

F_{max} : 現地での最近10ヶ年間の最大凍結指数 (°C・days)

また、降雪量も少なくその雪も強風により吹き飛ばさ

平成15年12月26日受理

* (株)田中組、博士課程後期修了

** 八戸工業大学教授

*** 元八戸工業大学教授



写真-1 プレキャストL型擁壁の変状状況



写真-2 プレキャストL型擁壁の破壊状況

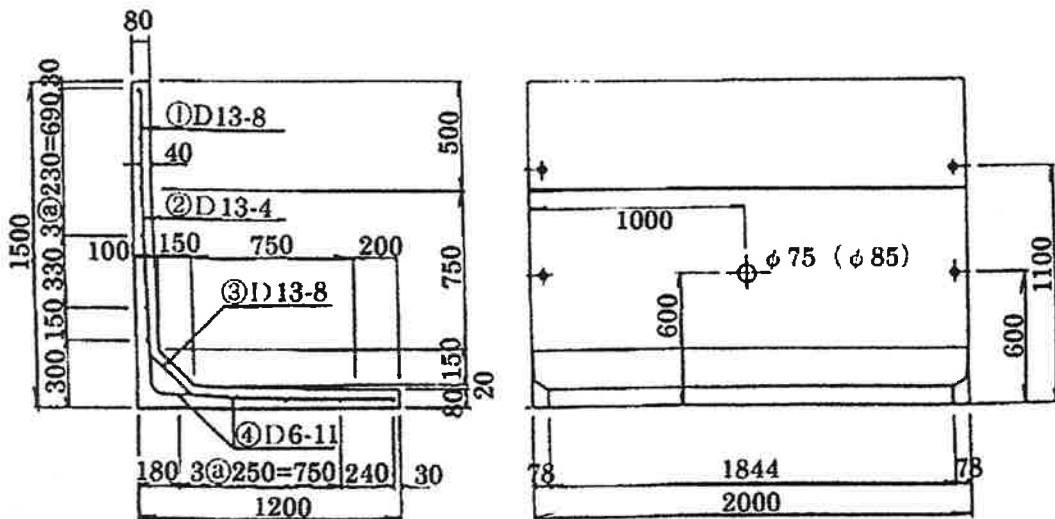


図-1 プレキャストL型擁壁の寸法

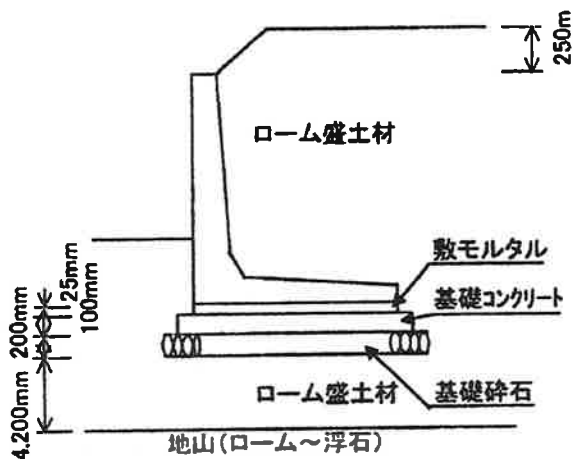


図-2 施工断面図

れて地面が露出し、保温材とはならない。

(2) 水分

凍上の特長は、凍結に伴って地下水の供給を受け、アイスレンズが生成・成長していく事であるが、地下水が

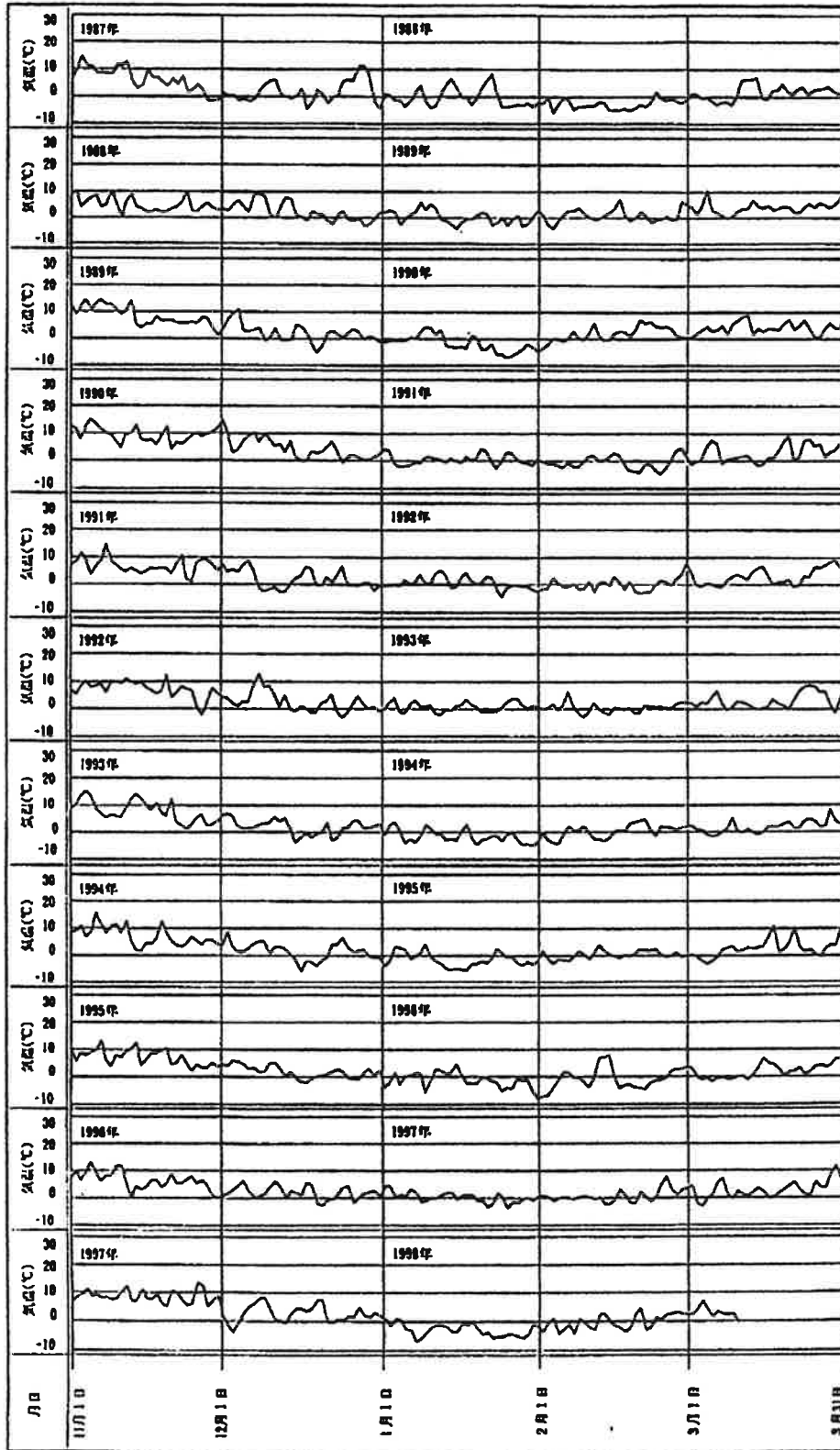
補給源とならないほど深い位置に存在するならば、凍上は土中の保持する水分のみの閉式凍上となり、凍上量は小さくなる。また、地下水が補給源となる浅い位置にあるならば開式凍上となり、大きな凍上量となる。そして水分の移動距離は、土中における水の毛管上昇高に等しい³⁾。凍害の発生した場所の最大毛管上昇高 hc_{max} は、Terzaghi, K. and Peck, R.B が提案する、粒径との間の近似式(1)⁴⁾ で算定される。

$$hc_{max} = c/e \cdot D_{10} \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

c : 粒子形状, 表面に関する係数 (10~50 mm²)

e : 間隙比 D_{10} : 10% 有効径 (mm)

c には安全側の 20 mm² を, e には凍害発生地域より採取した試料の平均値 1.809 を, D_{10} には 0.001 mm を使用すると, hc_{max} は 11.056 m となる。現地の地下水位は地表面より 0.6~6.4 m の位置にあり、凍結面への十分な水分補給源となるために、凍上量の大きい開式凍上となる条件にある。



※ 八戸測候所データより

図-3 八戸地方冬期気温図

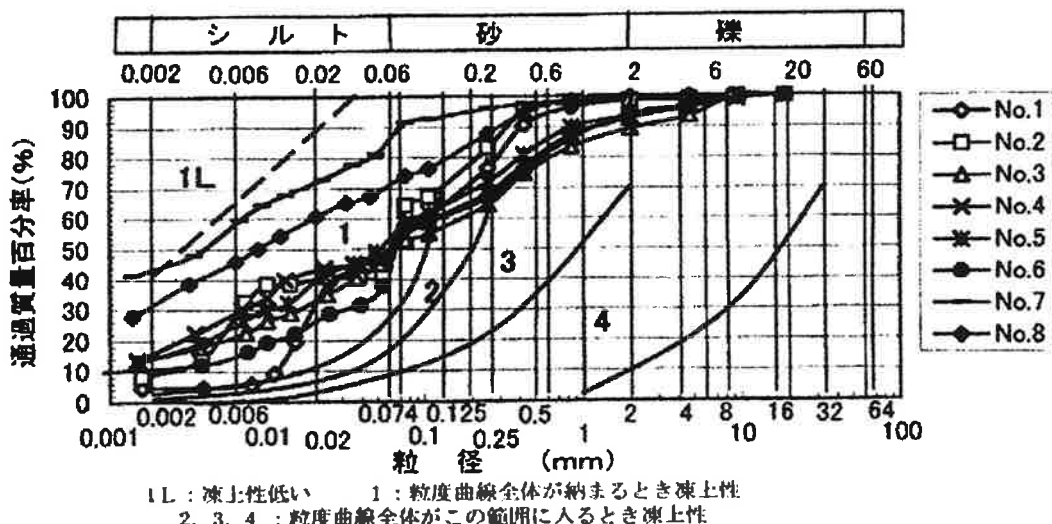


図-4 粒度分布による凍上性の判定図⁶⁾

(3) 土質

土質の凍上の要因としては、凍結部に供給する水分の流れやすさ（粒度分布）と吸い上げる力、土の持っている水分量（自由水、非自由水）が挙げられる。凍結凍上は、土粒子そのものが凍結するのではなく土粒子間、土粒子の周り及び内部の水分が凍結するので、凍結面への水分補給の無い閉式凍上の場合、特に保有水分量が問題となる。

青森県における凍上し易い土の条件⁵⁾として

1. 含水比 70% 以上
2. 液性限界 90% 以上
3. シルト含有量/74 μm 以下の量, 70% 以上
4. 非晶質鉱物含有量の多い二次堆積ローム

の4項目があげられている。

この項目に関する凍害の発生場所のデータを見ると、含水比(w)は48~72%, 液性限界(w_L)は60~80%と上記項目より低い値である。また、シルト含有量/75 μm 以下の量も51~91%と一部に低い値もある。非結晶鉱物量も1.5~4.9%であり、多くはない。しかし、各項目とも上記4項目に近い値である。さらに、ロームの非結晶鉱物含有部分については、強熱減量が5.6から3.2%であることから非自由水が保持されていることは明らかである。日本道路協会「道路土工排水工指針」での粒度による凍上性判定の図(図-4)⁶⁾では領域1に入り、凍上性があると判断できる。よって、凍害個所の土質は凍上の要因を持っていることとなる。

3. 凍害調査

凍害発生個所と発生しなかった箇所の土質の違いを把握するため、図-5の位置より試料を採取し、土質試験を行なった。その結果、自然含水比(w_n)は24~72%, 土

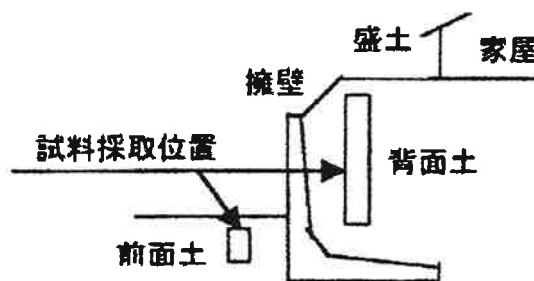


図-5 試料採取位置断面図

表-1 凍害土非圧密非排水三軸圧縮試験結果

	C_u (kPa)	ϕ_u (度)
背面土	45.0	21.04
前面土	39.0	15.31
基礎地盤	11.0	12.21

表-2 定温凍上試験試料物理特性

試料 No.	自然含水比 w_n (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)
凍害土	35.3	1.131	82.1	1.669	1.234
地山	35.5	1.267	76.9	1.641	1.211
含水比調整凍害土	40.0	1.169	90.0	1.697	1.212
	44.5	1.176	99.5	1.746	1.208
	50.0	1.349	97.4	1.679	1.119

粒子の密度 (ρ_s) は2.56~2.79 g/cm^3 , 塑性限界 (w_p) は33~54%, 液性限界 (w_L) は43~89%, 細粒分は25~78%と値にばらつきがあり、凍害土、無凍害土の明確な違いは現れなかった。このばらつきの原因は、盛土材を構成する地山材の混合割合と、試料採取位置の深さの違いに

よると考えられる。

凍害土について三軸圧縮試験(UU試験)を行なった結果は表-1の通りで背面土は $C_u=45$ kPa, $\phi_u=21^\circ$ という値が得られた。この値をそのまま用いると限界高は約6.5 mとなり、擁壁にはほとんど土圧が作用しないこととなる。さらに粘着力を無視しても作用土圧によるモーメントは3.8 kN・mとなり、安全性は確保されている。

(1) 室内凍上試験

土質の状態、物理化学的性質及び凍結温度、載荷圧等の条件の違いによる凍結特性を把握するために室内凍上試験を閉式凍上方法により行った。

a) 一定温度凍上試験

一定温度による凍上試験は、凍害の発生した場所のローム盛土材と地山材の凍結特性の違いと、ローム盛土材の含水比の違いによる凍結特性の違いを把握するために行った。

本試験に使用した試料は、凍害の発生したプレキャストL型擁壁の図-5に示す背面土(ローム盛土材)と、同地域の地山より採取した地山ローム及び含水比(w)を調整した5試料とした。物理的性質を表-2に示す。これら試料は自然含水比(w_n)がほぼ35%前後であり、飽和度

(S_r)77~82%, 湿潤密度(ρ_t)1.6 g/cm³と、凍害土、地山土の間に違いはほとんど見られない。

試験方法は、図-6に示す通り定温環境室に熱伝導の良い真鍮製のモールドに試料を入れ、凍上変位を上方のみに生ずるようにするものである。上載圧としてペロフラムシリンダーにより空気圧を載荷させ、変位計で凍結膨張量を、温度センサーにより室内・モールド表面・試料内部の各温度を測定した。

試験条件は、5つの試料について上載圧を無載荷、125 kPa, 250 kPaの3タイプとし、凍結温度は-10°C以下では凍上変位量は少ない⁷⁾ので-15°Cとした。

試験手順は、試料をモールドに挿入し、温度センサーを取り付け、載荷装置・変位計をセットし、0°Cで30分間の静置後-15°Cに低下させて18時間以上、試料の変位が一定に落ち着くまで計測した。

なお、サーマルショックは与えないように0°Cで30分の予冷を行った。

b) 繰返し温度凍上試験

凍害発生ローム土盛土材と無凍害ローム盛土材の凍結特性の把握と、自然状態に近い温度変化による繰返し凍結特性の把握、そして、八戸地方ローム盛土材と物理化学的性質の関係を把握することを目的として繰返し温度凍上試験を行なった。

本試験に使用した試料は、凍害の発生した場所のローム土の盛土材、地山ローム土及び、別の地域(三沢市春日台地区)の地山ローム土である。各試料の物理化学的性質を表-3に示す。試料No. 1, 2は図-5の凍害発生擁壁の前面土, No. 3, 4は凍害発生擁壁の背面土, No. 5は凍害の発生しなかった擁壁の背面土, No. 6は凍害発生場所の地山ローム土, No. 7, 8は三沢市春日台の高含水比ロームとその下層ローム土である。表-3より凍害発生場所のローム盛土、地山ローム土は自然含水比(w_n)48~72%, 液性限界(w_L)60~80%の範囲にある。三沢市のNo. 7高含水比ロームは、自然含水比(w_n)152%, 液性限界(w_L)157%と大きな値であったが、その下層ロームのNo. 8は凍害発生場所の試料とほぼ同じ範囲の試料

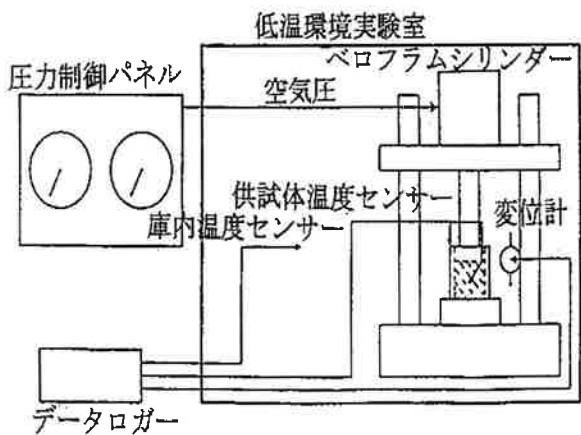


図-6 定温凍上試験装置全容模式図

表-3 物理化学試験結果

試料 No.	自然含水比 w_n (%)	塑性限界 w_p (%)	液性限界 w_L (%)	間隙比 e	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	強熱減量 (%)	非晶質物質質量 (%)	備考
No. 1	71.6	46.8	79.0	2.096	2.557	1.429	13.18	4.42	ローム・
No. 2	71.1	52.2	79.5	2.194	2.638	1.429	11.34	4.92	黒ぼく系盛土材
No. 3	47.9	40.7	67.5	1.890	2.621	1.339	7.33	2.62	
No. 4	58.2	54.2	73.1	1.948	2.656	1.425	7.27	2.85	ローム系盛土材
No. 5	52.3	49.7	61.2	1.851	2.643	1.413	7.35	2.28	
No. 6	57.2	32.5	60.0	1.545	2.642	1.603	5.57	1.54	
No. 7	152.4	120.8	456.5	4.756	2.666	1.169	10.64	8.09	ローム土地山材
No. 8	69.0	45.8	77.0	2.312	2.720	1.388	6.65	2.03	

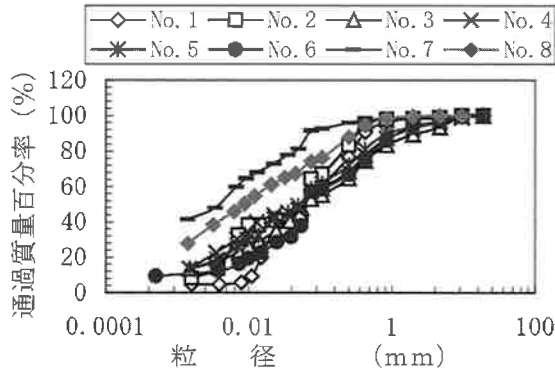


図-7 試料粒度分布図

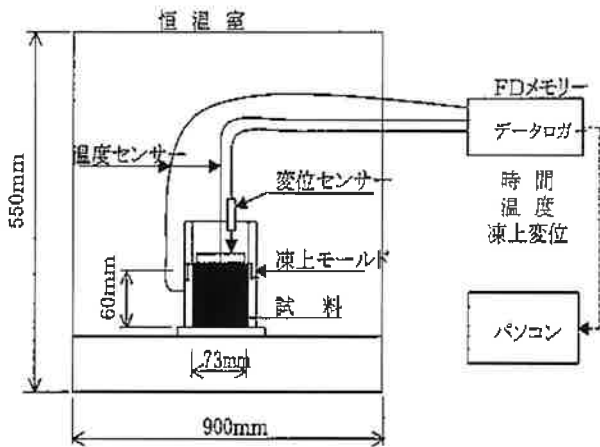


図-8 閉式凍上試験全容模式図

である。図-7の粒度分布より No.1~6 はほぼ同じ粒度範囲であることが解かる。

試験方法は、図-8に示す通り凍上試験装置に真鍮製のモールドに試料を入れ、載荷ヘッドにカウンターウエイト (4.9~78.5 N) を載せた上で変位計と温度センサーを試料中心とモールド表面に設置して計測を行うものである。

試験は、各試料に対して上載圧を盛土高に相当する 0.4, 15, 25 kPa で載荷し、凍結温度を -5°C ~ 3°C の日々の繰返しと、 -12°C ~ 3°C の日々の繰返し、2種類で行なった。さらに、化学的性質に支配される非自由水の影響を確認するため、 110°C で炉乾燥させた試料による凍上試験も -5°C ~ 3°C の繰返し試験で行なった。

試験手順は、一定温度凍上試験と同じように進めるが、試験開始時の温度設定は 15:00 に 3°C とし、1時間後の 16:00 に -5°C の設定とする。そして、翌朝 9:00 に 3°C に戻し、再度 16:00 に -5°C に設定して日々繰返し凍結膨張量が一定値に落ち着くまで継続した。 -5°C 、 3°C の温度設定は、冬期における八戸地方の昼夜の平均的気温として、 -12°C は冬期の夜間最低気温と同じ程度として設定した。

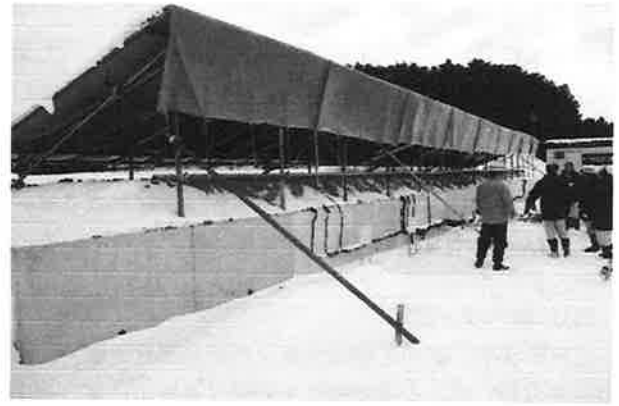


写真-3 屋外凍上試験試験ヤード

(2) 屋外凍上試験

凍害の生ずる現象を確認し、その凍害を防止するための対策を検討するため、実際のプレキャスト L 型擁壁を使用して、凍害の発生した場所と同じ地区に写真-3に示す試験ヤードを設けた。そして、同じローム盛土材を用いてプレキャスト L 型擁壁を設置し、温度センサーを擁壁の前面・下部・背面に、土圧計を擁壁背面に設置して挙動を観測した。

また、擁壁背面土及び基礎地盤の材料を変化させた場合の凍結凍上メカニズムの違いを調査するため、擁壁背面を砂で置換えた断面、ドレーン材として碎石を施工したもの、基礎をコンクリートと碎石で施工したもの、コンクリートと砂で施工したもの、コンクリートのみのもの等の断面を設置した。この断面を図-9に、配置位置を図-10に示す。

- ①~③の擁壁は埋戻し土をローム盛土材とし、水抜きのため碎石を $40 \times 40 \times 40$ cm の形状で背面の水抜き孔に施工した。基礎はコンクリートのみの断面とし③の擁壁に計測器を設置した。凍害を受けた断面である。
- ④~⑥の擁壁は①~③の擁壁と背面は同じ断面であるが、基礎にコンクリートと碎石を使用した断面とし、⑤の擁壁に計測器を設置した。基礎を改良した断面である。
- ⑦~⑪の擁壁の埋戻し土は①~⑥と同じであるが、擁壁背面に施工した碎石を擁壁背面のほぼ全体に施工し、基礎はコンクリートとその下を砂で置換えた断面とした。計測は⑨の擁壁で行なった。排水に重点を置いた断面である。
- ⑫~⑰の擁壁は埋戻し土を砂に置換え、碎石は⑦~⑪と同くし、基礎も⑦~⑪と同じ断面とした。計測は、⑭の擁壁で行なった。排水と土圧軽減を目指した断面である。

なお、試験期間は 1997 年 12 月 27 日から 1998 年 3 月 31 日までである。

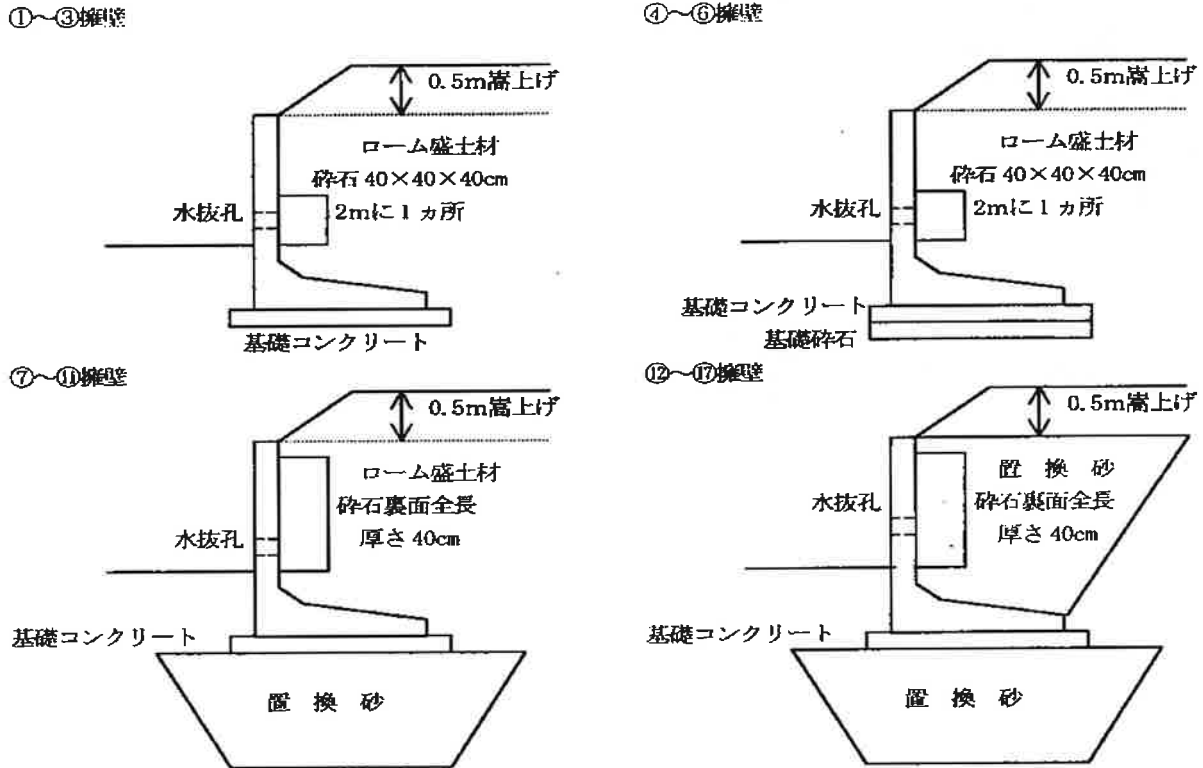
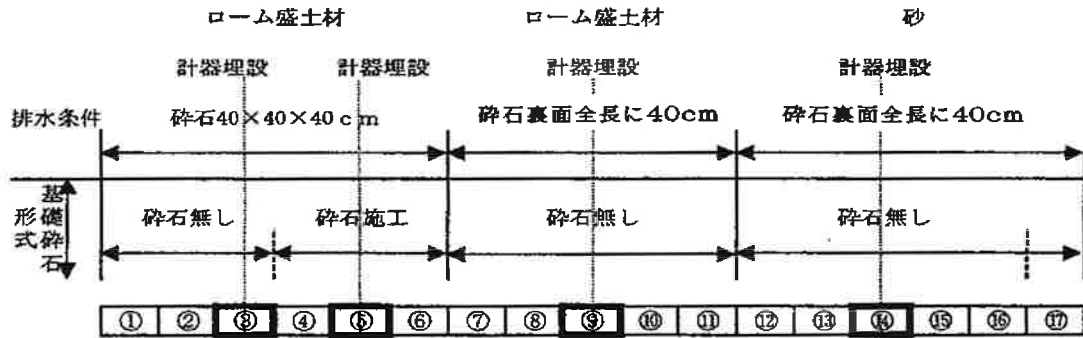


図-9 プレキャストL型擁壁条件別断面図



※ 各タイプ別の擁壁のつなぎ目にはジョイント材を施工しない。

図-10 プレキャストL型擁壁配置図

4. プレキャストL型擁壁の載荷試験

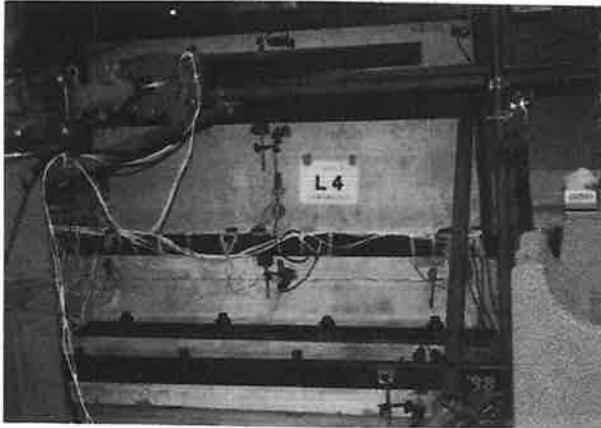
凍害の発生したプレキャストL型擁壁について、擁壁自体の抵抗を確認するために同型の擁壁(図-1, 壁高1.5m, 壁長2.0m, 底版幅1.2m, 厚さ8~10cmの鉄筋コンクリート)を試験体として載荷試験を行なった。

試験方法は、写真-4に示す通り擁壁底版をボルトナットで床に固定し、擁壁背面の天端より15cm下の位置に据えた長さ150cm幅10cmの三角治具に196kNジャッキにより水平荷重を載荷するものである。載荷は、連続載荷による方法(試験体1本:L1)と繰返し載荷による方法(試験体3本:L2, L3, L4)とし、載荷速度は0.2kN/sとした。試験擁壁が降伏し、変位が120mm(高

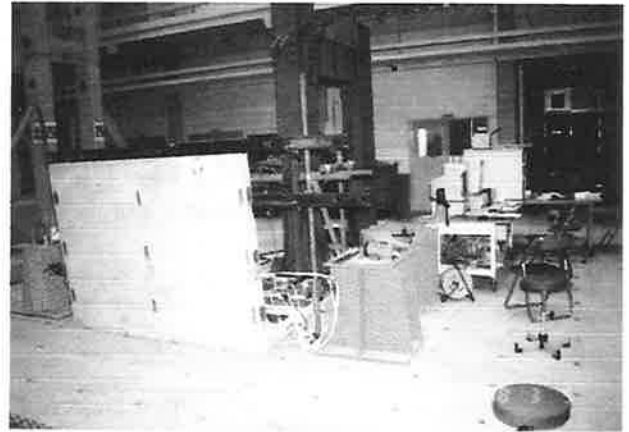
さの8%)に達した時点で終了とした。

繰返し載荷による方法では、載荷速度を0.2kN/sとして17kNに達した後に5kNに戻した。これを降伏するまで繰返した。そして、他の2試験体は載荷荷重の上限を18kNと19kNに変えて同様の試験を行なった。

ここで、変位の計測は図-11に示す通り擁壁天端より5cm下で左、中央、右と3点、天端より50cmと125cm下の中央に1点ずつ、底版の両端に垂直と水平の4点とした。ひずみゲージは、側壁表面、背面、両側面に縦横に3枚ずつ配置し、計36点の計測とした。これらの計測結果は、各測定器からスイッチボックスを通りデータロガーやコンピューターに記録、出力されるようにした。図-12に計測経路図を示す。



背面部



前面部

写真-4 プレキャストL型擁壁の載荷試験

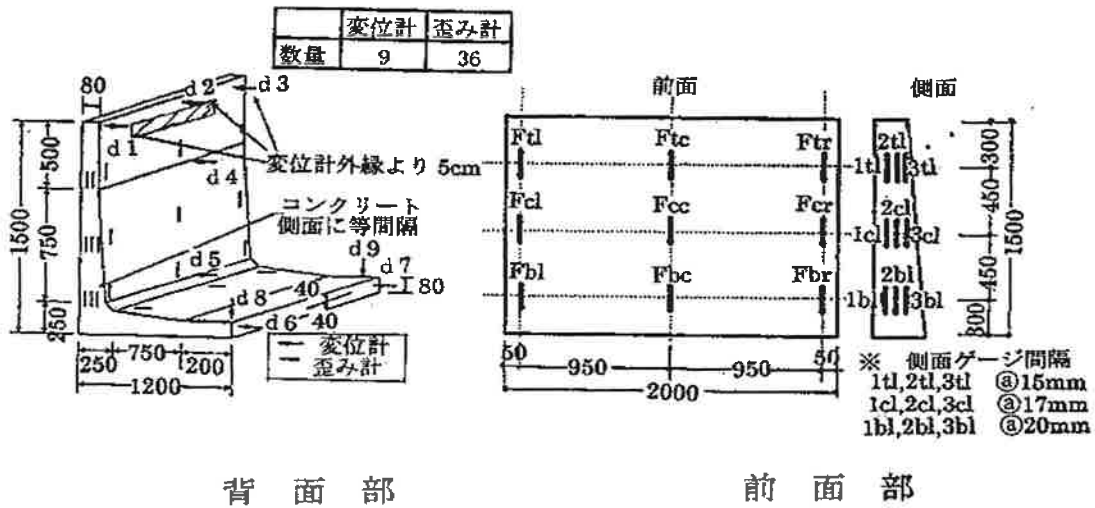


図-11 変位計・ひずみゲージ設置位置

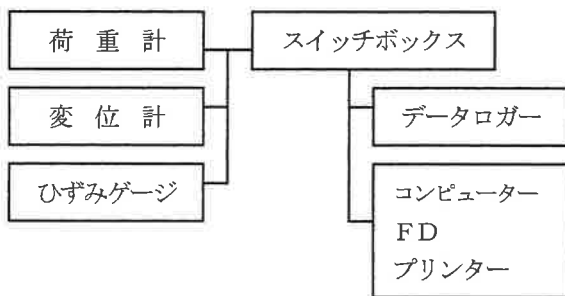


図-12 計測経路図

なお、繰返し荷重による試験は、「凍上に伴う凍上圧は一定圧ではなく、日々の繰返し圧力であること」⁸⁾が屋外凍上試験で確認出来たことによる。また、繰返す荷重の範囲を 12 kN とし、5 kN 程度の圧力を残したの、凍上圧の擁壁への残留圧力があるためである。

5. 計測結果

(1) 室内凍上試験結果

a) 八戸ロームの盛土材と地山材の凍結性状の相違

定温凍上試験の結果は、図-13のローム盛土材と地山ローム材の上載圧と凍結膨張量の関係図より、凍結膨張量は -2.5°C の凍結温度では変わらないが、それ以外の -7.5°C 、 -15°C では盛土材の方が0.3 mm程度大きな値を示している。また、膨張量がゼロの時の、上載圧の値を最大の凍結膨張圧(最大凍上圧)と考えると、図-13より凍結温度 -7.5°C では、盛土材 470 kPa、地山材 420 kPa、 -15°C では盛土材 650 kPa、地山材 600 kPaと盛土材の方が50 kPa大きな圧力となる。

以上の通り、ローム盛土材が地山ロームより凍結膨張量、凍上圧ともに大きいことが判明した。

b) 含水比の異なるローム盛土材の凍結膨張量

含水比の違いによる試験結果は、図-14の上載圧別の含水比と凍結膨張量の関係の通り、上載圧の大きさ及び

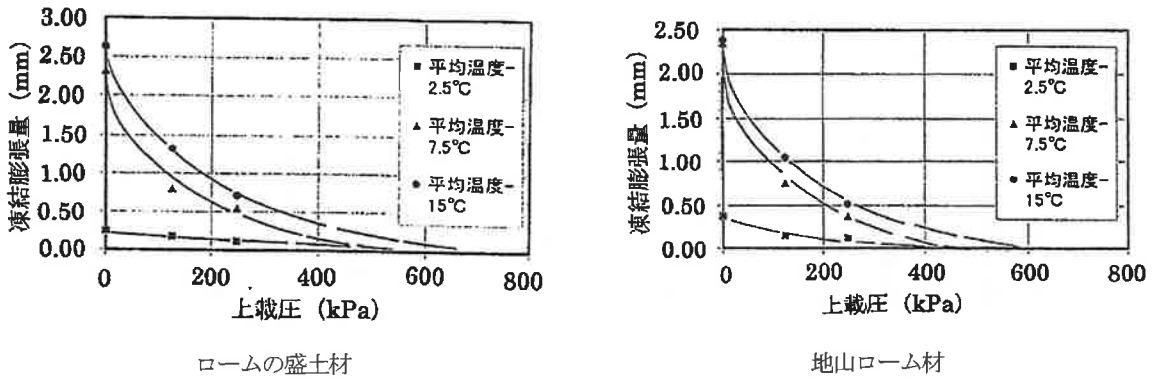


図-13 温度別上載圧と凍結膨張量の関係

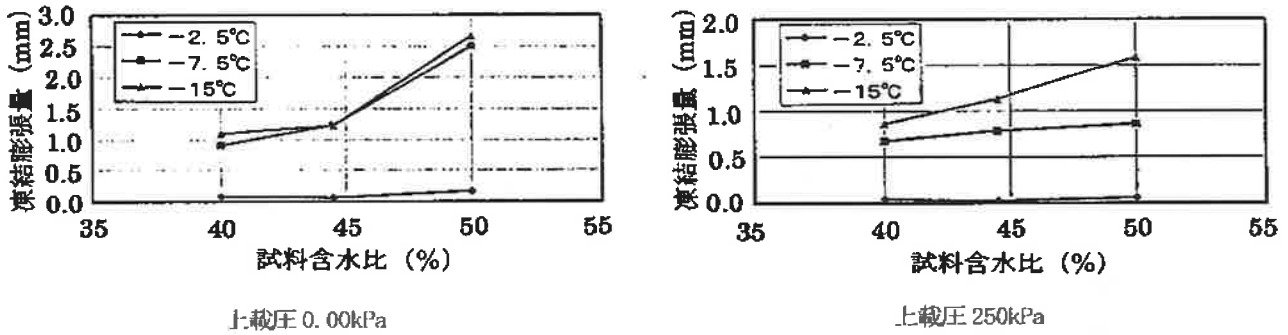


図-14 ローム盛土材の上載圧別の含水比と凍結膨張量の関係

凍結温度にかかわらず、含水比が大きい試料の方が凍結膨張量が大きい事が確認できた。

c) 凍結温度の違いによる結果

凍結温度と凍結膨張量の関係は図-15より、凍結温度が-5°C~-9°Cの間で急激な凍結膨張を示し、その後の温度の低下でも膨張量はほぼ一定値に落ち着いている。このことは、土の凍上変位は-10°C以下ではあまり変化しない⁷⁾ことを意味する。また、ローム盛土材も地山ローム材も一定温度凍結試験においては、凍結温度がマイナスになるほど、凍結膨張量が大きくなる事が判った。

(2) 繰返し温度凍上試験結果

a) 凍害土と無凍害土の凍結膨張量と上載圧の関係

繰返し温度凍上試験の結果を図-16~図-18に示す。これらの図よりどの試料も1回の凍結膨張量より繰返し凍結することで凍結膨張量が大きくなる事が判る。また、上載圧が増加しても、凍結温度が低下しても同様である。この繰返し凍結で膨張量が大きくなっていく過程は図-19の温度と膨張量の変位図より、凍結を繰り返す度にひずみが累積して膨張量が大きくなっていることで判る。

図-20より凍害発生土 (No.1~4) と凍害の起こらなかったローム盛土材 (No.5) 及び地山ローム (No.6) の違いを比べると、最大凍結膨張量は凍害発生ローム盛土材が大きい値となり、地山ロームが最も小さい値であつ

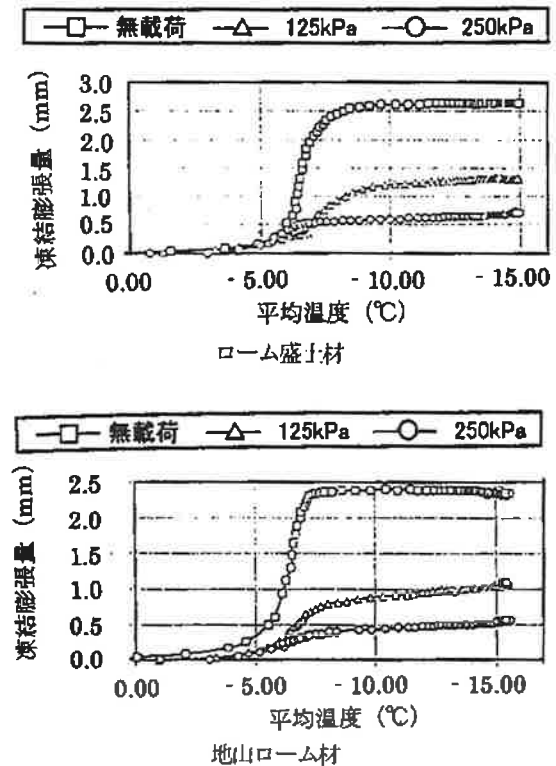


図-15 上載圧別の凍結温度と凍結膨張量の関係

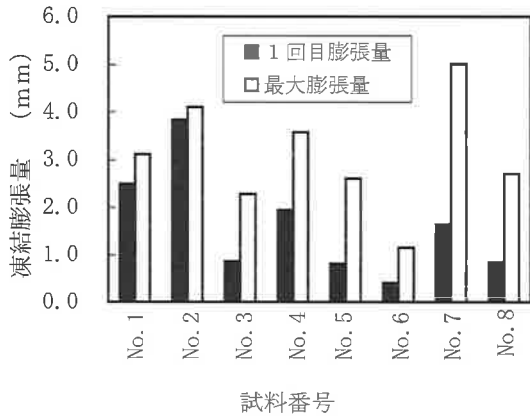


図-16 -5°C~3°C, 上載圧 0.4 kPa における凍結膨張量比較図

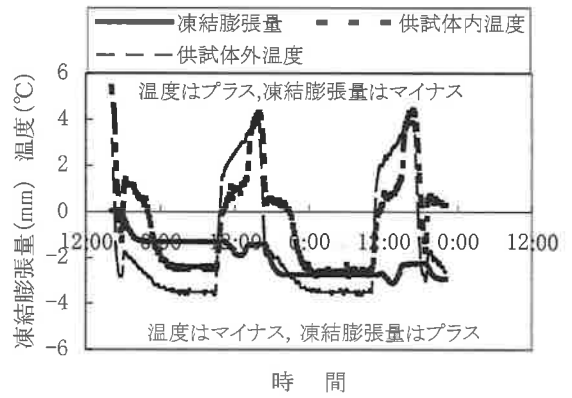


図-19 温度, 凍結膨張量, 変位の関係

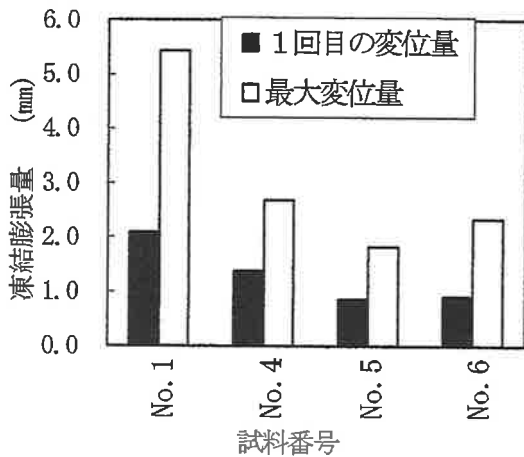


図-17 -12°C~3°C, 上載圧 0.4 kPa における凍結膨張量比較図

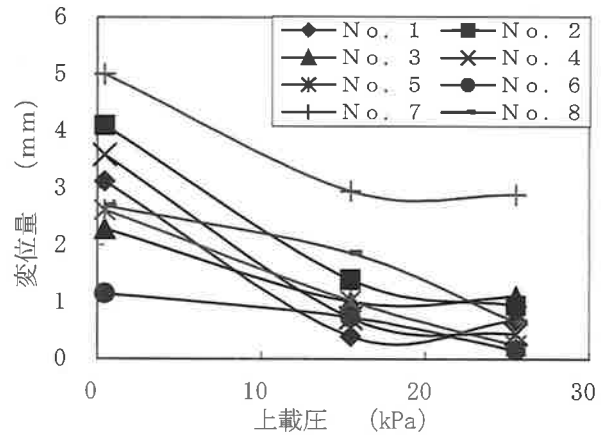


図-20 -5°C~3°C における上載圧と膨張量の関係

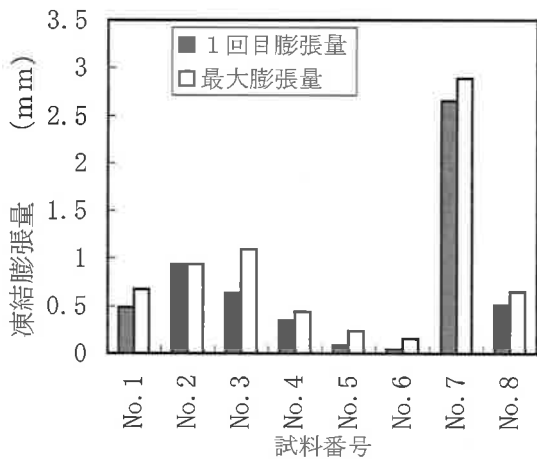


図-18 -5°C~3°C, 上載圧 25.4 kPa における凍結膨張量比較図

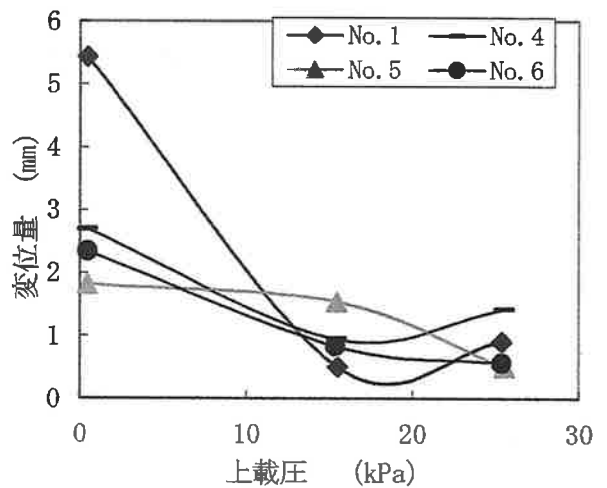


図-21 -12°C~3°C における上載圧と凍結膨張量の関係

た。そして、凍害の無かったローム盛土材 (No. 5) も条件次第で凍害を生じる可能性が示された。

なお、比較のために三沢市春日台地区より採取した高含水比ローム (No. 7) とその下層ローム (No. 8) の値も各図中に記してある。この高含水比ローム (No. 7) は水分

量が圧倒的に多いことより凍結膨張量は最も大きな値となった。

図-20 と図-21 は上載圧と凍結膨張量の関係であり、これらの図より凍害土 (No. 1~4) は上載圧 17~18 kPa を境として小さい上載圧の範囲では、凍結膨張量が上載圧

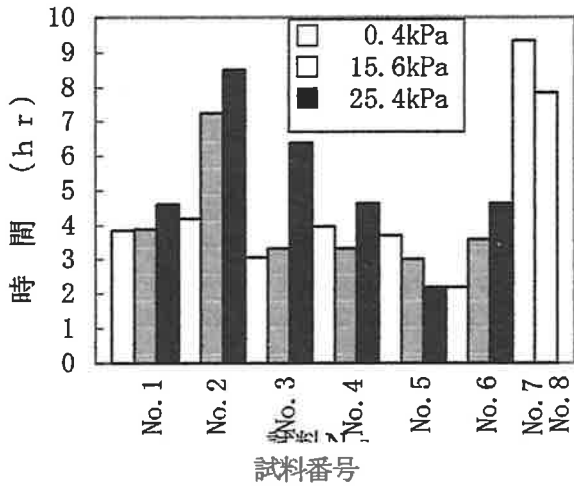


図-22 凍結膨張に費やす時間

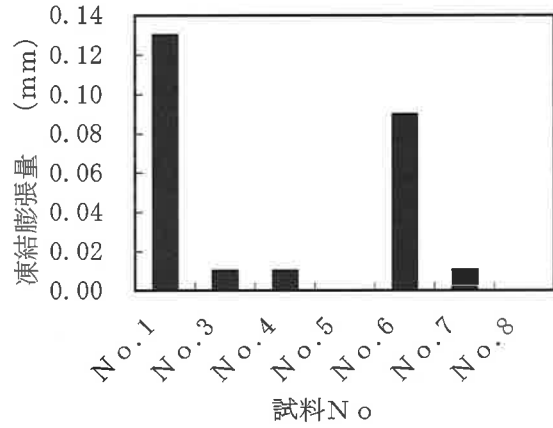


図-23 110°C 乾燥土凍結膨張量

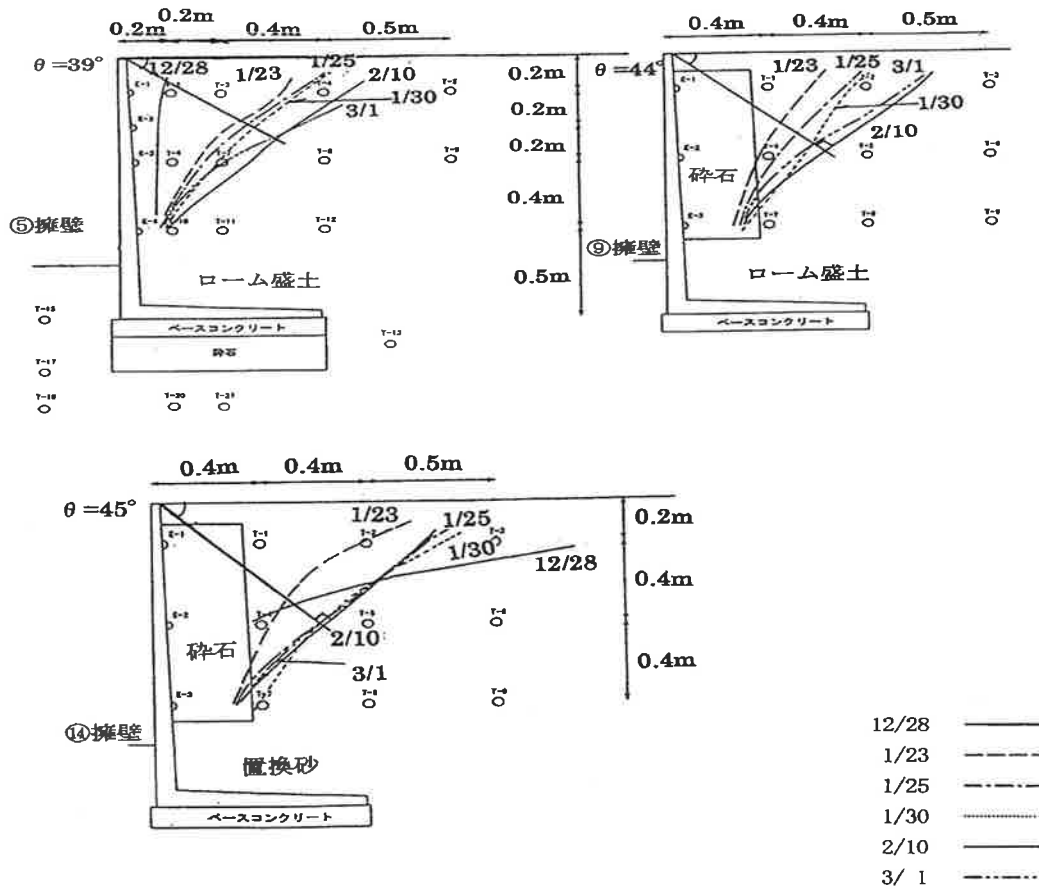


図-24 地中温度1°C線の経時変化図

増加と共に抑制されるが、17~18 kPa より 25.5 kPa までは載荷圧が増加しても凍結膨張量が減少しないという傾向が現れた。逆に凍害の発生しなかったローム盛土材 (No.5) は、上載圧 0.4 kPa より 25.5 kPa まで一方的に減少している。また、地山ローム土 (No.6) は、凍害の発生しなかったローム盛土材 (No.5) と同様の傾向を示した。全体の傾向として、上載圧の増加に従い、膨張量の範囲が狭い範囲にまとまっていくことが判る。

また、図-20 から一定温度凍上試験と同様に凍結膨張量ゼロの上載圧 (最大凍上圧) を推定してみると、凍害発生盛土材は約 40.5 kPa 以上で、凍害の発生しなかった盛土材は約 28.5 kPa となり、約 12 kPa の差が出た。より低温の凍結温度 (-12°C) での図-21 ではその差がさらに開いていくことが想定できる。

b) 凍結膨張時間の影響

各試料の凍結膨張に費やす時間を図-22 に示す。この

図はモールドの表面温度が0°Cになった時から、凍結膨張が一定値に落ちくまでの時間を表している。これより凍害発生土が凍結膨張に長い時間を費やしていること、逆に凍害の発生しなかったローム盛土材が短い時間で凍結膨張が一定値になること、上載圧によって凍結が遅延することなどが判った。

c) 110°C 乾燥土の凍上試験結果

図-23 に110°C で炉乾燥した各試料の凍結膨張量を示す。この結果、7 試料中5 試料で微小ではあるが、膨張が見られ、内2 試料では0.1 mm 程度の膨張が見られた。このことより、自由水が失われた状態でも凍結膨張は起こるが、その量は微小であることが判明した。

(3) 屋外凍上試験結果

a) 地中温度 (凍結) の推移

屋外凍上試験におけるプレキャストL型擁壁の盛土材の断面は4タイプに分れている。これらの断面への寒気の侵入形態を図-24 の地中温度1°C 線の経時変化で示す。この図より寒気が地中に侵入していく速度は、擁壁背面の盛土材を砂で置換えた擁壁⑭では早期に1°C のコンター線 (等温線) が1ヶ所に集まり、一定となる。これに対して背面土がローム盛土材の擁壁⑤、⑨は似たようなコンター線を描いているが、砕石を広く設けた擁壁⑨の方がやや深いコンター線となっている。このことは、砂や砂利 (砕石) の方が凍結速度、凍結面積ともに大きい¹⁰⁾ ことを実証している。

b) 凍上圧の推移と形態

外気温がマイナスになると凍上圧が発生する。1 日の最高、最低気温の変化に応じて、凍土の圧力 (凍上圧) にも

強弱の繰返しが起こっていること¹⁰⁾ が図-25 より確認できた。また、マイナスの温度が続くことにより凍上圧力も増加していくことも判った。図-25 は擁壁⑤における外気温と凍土圧の関係を4 個の土圧計で計測したものである。

擁壁断面別の最大の凍土圧の強さと分布を、図-26 の土圧分布図に示す。擁壁背面を砂で置換えた擁壁⑭と背面全体に砕石を施工した擁壁⑨が□形の土圧分布を示し、ローム盛土材の擁壁⑤が△形の分布となった。こ

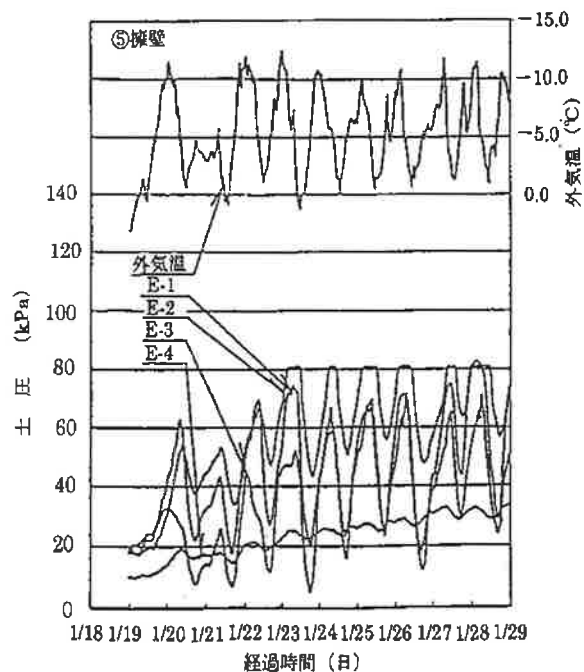


図-25 外気温と凍土圧の関係

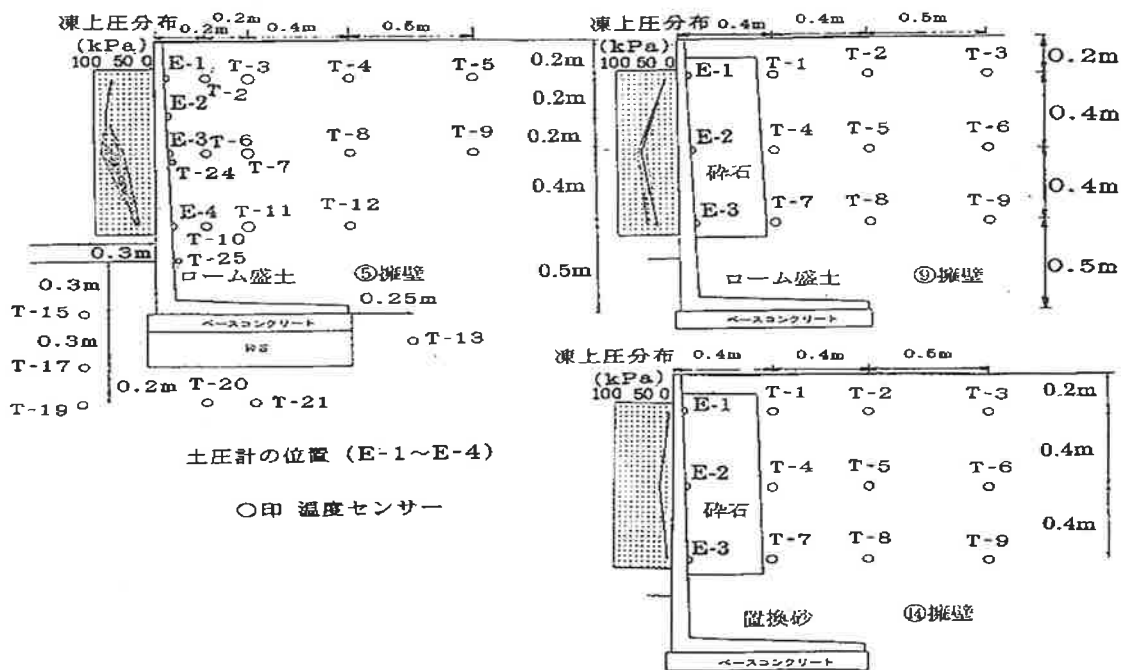


図-26 擁壁断面別の土圧分布図

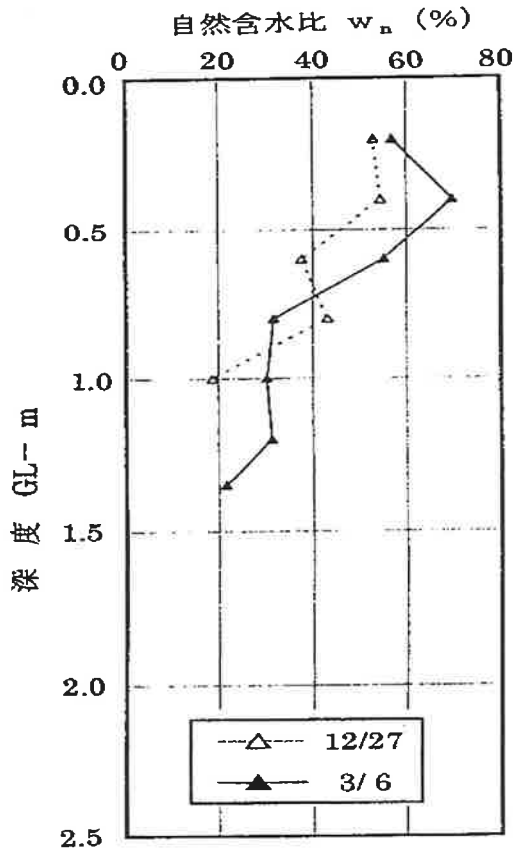


図-27 擁壁⑤における含水比変化

のことより、擁壁底面を支点としてローム盛土材の擁壁⑤が大きなモーメントを受けることが判った。そして、凍土圧の強度はローム盛土材の擁壁⑤が最も大きな値となり、次は擁壁⑨の碎石を背面に施工したもので最も圧力が小さかったのは背面を砂で置換えた擁壁⑭であった。

c) 含水比の変化

凍上の進行にあたり水分の補給が必要となる。水分補給の方法として前述した毛管現象を検証するために屋外凍上試験の擁壁施工直後の12月27日と、凍上がピークを超えたと思われる3月6日に含水比を擁壁⑤で測定して対比した。その結果は図-27に示す通り、含水比が3月6日測定の方が5~15%程度高い値となった。これは、毛管現象によるものか、あるいは非自由水の自由水化によるものと考えられる。

(4) プレキャストL形擁壁の荷重試験の結果

図-28にプレキャストL型擁壁に対する、連続荷重による変位と荷重の関係図を示す。この図より14kNで弾性限界となり、19.5kNで最大耐荷力に達した。図-29に繰返し荷重による変位と荷重の関係を示す。この図は17kNから5kNで荷重を繰返した結果で、繰返し回数82回で耐荷力が低下した。同じように、18kNから6kNで荷重を繰返した場合、22回の繰返しで耐荷力が低下し、

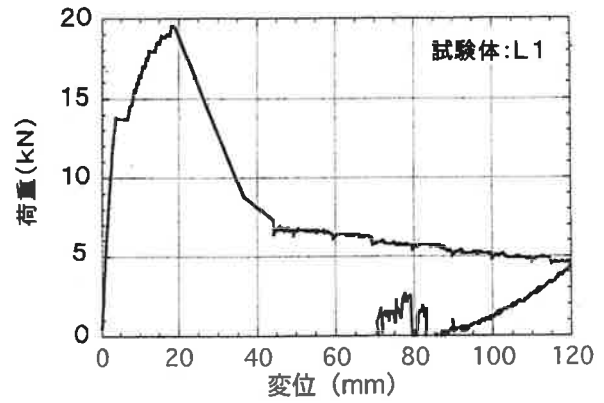


図-28 連続荷重による変位と荷重の関係

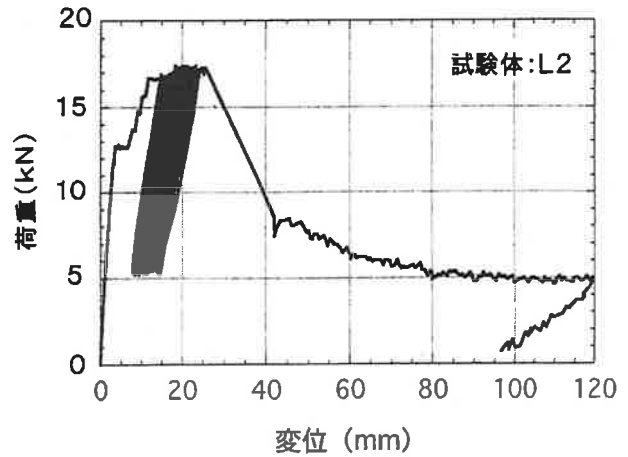


図-29 繰返し荷重による変位と荷重の関係

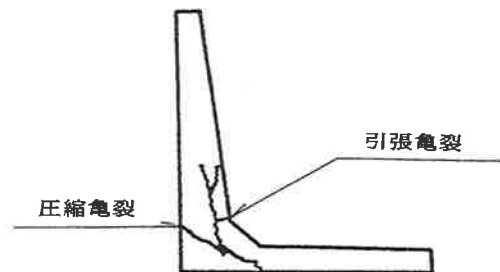


図-30 プレキャストL型擁壁クラック発生状況

19kNから7kNの荷重の繰返しでは12回の繰返しで耐荷力が低下した。

この試験による曲げモーメントは、最大値で12.2 kN・m/m、降伏値は8.7 kN・m/mであった。

荷重による変位に伴うプレキャストL型擁壁のひび割れ発生状況は、図-30に示すように荷重14kNから15kNで擁壁鉛直壁下部のハンチ取付部に、擁壁幅全体に引張り亀裂が発生し、荷重を15kNから16kNまで増加させると、亀裂は主鉄筋の位置まで達する。そして、荷重の繰返しにより亀裂は主鉄筋に沿った圧縮亀裂の形で上下方向に進行し、圧縮破壊した。この結果よりプレ

キャストL型擁壁は最大耐荷力に達しなくても、繰返し荷重をかけ続けることで耐荷力が低下することが判った。

6. 考 察

(1) 八戸ロームの凍害土と非凍害土の比較

土の凍結凍上は土中の水分の凍結による。図-14 に見るとおり、含水比の高い試料で凍結膨張量が大きくなっている。室内凍上試験の8試料の自然含水比 (w_n) と凍結膨張量の関係を図-31 に整理した。その結果、盛土材と地山材の各相関函数の間で明らかな差が生じた。盛土材の凍結の方が含水比に敏感に反応している。その理由として、火山灰質粘性土に共通するセメンテーションによる拘束効果が挙げられる。セメンテーションの崩れた盛土材では凍結膨張を妨げる拘束力は無く、凍結土の凍結最前線（フローズンフリンジ）への間隙水や吸着水等の移動も容易となるからである。

次に、塑性限界 (w_p) と凍結膨張量の関係を整理したものが図-32 である。この場合も、盛土材と地山材の各相関函数の間に図-31 と同じような傾向がみられる。一旦弛めて締め固めたロームは、同じような塑性限界 (w_p) であっても凍結膨張しやすいことを示している。

一方、ロームの化学的組成すなわち非晶質物質の量と凍結膨張量の関係を図-33 に示す。盛土材、地山材にかかわらず両者の関係を次式で近似でき、非晶質物質量の凍結膨張量を推定できる可能性を示している。

$$y = -0.054x^2 + 0.998x + 0.399 \quad (3)$$

ここで y : 凍結膨張量 (mm)

x : 非晶質物質量 (%)

非晶質物質量は比表面積が大きく、粒子は中空で非自由水が多いと言われ¹¹⁾¹²⁾、Al (アルミニウム)、Fe (鉄)、Si (珪素)の量を測定してその比率を求める。屋内凍上試験に用いた八戸ロームの6試料のうち、非凍上土の試料 No. 6 の非晶質物質は少なく (表-3)、多い試料では凍結膨張量も大きい (図-16)。すなわち、非自由水の凍結が地中からフローズンフリンジへの吸着水補給拡大の原因になっていると推定される。

b) 凍結に費やす時間と上載圧の影響

室内繰返し凍上試験は $-5^{\circ}\text{C} \sim +3^{\circ}\text{C}$ 、 $-12^{\circ}\text{C} \sim +3^{\circ}\text{C}$ で行われた。その結果、定温凍上試験と比べて大きな変位量が発生している。また、繰返しによって最大膨張量が1回目の凍結時の膨張量より大きくなることも検討された。増加のメカニズムは、図-19、図-25 に見るようにマイナス温度の繰返しによるが、増加比率にはバラツキが大きく定量的な説明はしがたい。凍結に対する上載圧の影響は定温試験とは異なり、繰返し試験では鋭敏で図-20、21 にみるとおり 20 kPa 程度で膨張量は急速に拘束

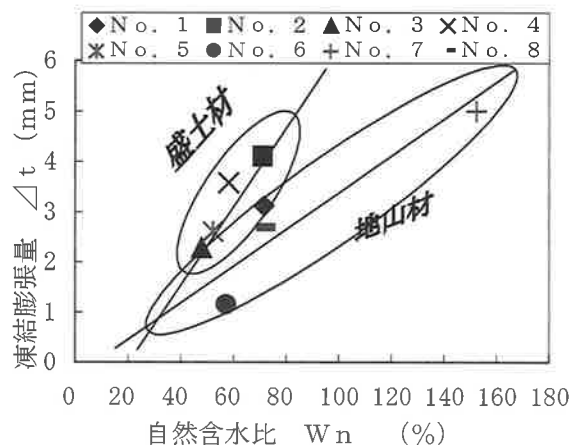


図-31 盛土材と地山材における自然含水比 (w_n) と凍結膨張量の関係

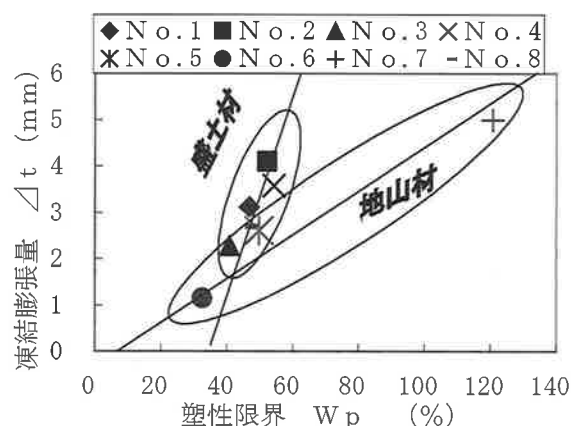


図-32 塑性限界と凍結膨張量の関係

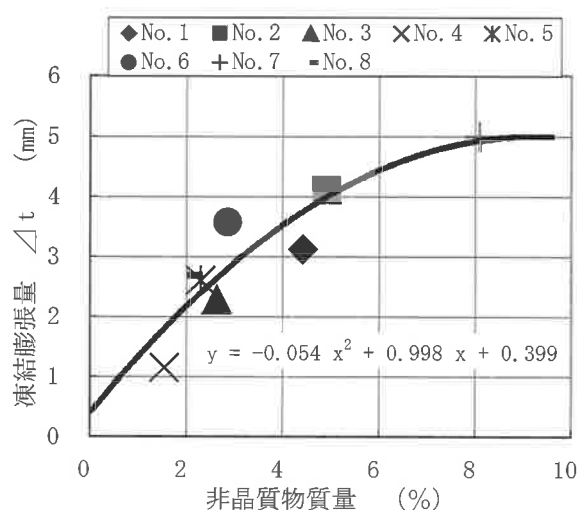


図-33 非晶質物質量と凍結膨張量の関係

される。また、比較的低い凍結温度でも繰返し作用はローム土の膨張量を増大せしめていることが判る。凍結深の進行もロームの盛土は図-24 のように比較的緩やかであるが、毛管現象の影響もあって長期にわたって継続する。

凍結に要する時間には、図-22より試料 No.5を除いて上載圧の影響がみられ、深い位置では凍結の進行が遅いこと(図-24)、凍結の影響が浅い位置に集中しやすいこと(図-25)などが判明した。

c) 擁壁の破損

凍害で破損したプレキャストL型擁壁の形状と配筋は図-1に示すように、高さ1.5m、底面幅1.2m、延長2.0mで、鉄筋は断面中心に径13mmのものが12本配置されている。載荷試験の結果も写真-2と同一の破壊状態で、破壊は擁壁背面鉛直壁とハンチの取付部より通常の引張り亀裂より始まるが、途中より圧縮破壊へと変化している。これは、ハンチとハンチ筋の存在が引張側の曲げ抵抗を高め、圧縮破壊へ変化進行させたものと考えられる。因みに本供試体の設計曲げモーメントは4.3kN・mであるが、試験では最大値が12.2kN・m/m降伏値は8.7kN・m/mで設計値を満足している。その破壊は写真-2に見るように、隅角部に集中している。また、繰返し試験の結果、耐荷力が載荷の繰返し回数で低減することが明らかになった。試験体L1~L4の繰返し載荷回数と降伏荷重の関係を図-34に示す。これより繰返す回数が増えると疲労により最大耐荷力が低下することがわかる。そして、対数化した繰返し回数と降伏荷重の係数に線的な関係の近似式が求められ、次の式となる。

$$\log_{10} Y = 0.0302 \log_{10} N + 1.2964 \quad (4)$$

ここで、 Y: 最大耐荷力 (kN)

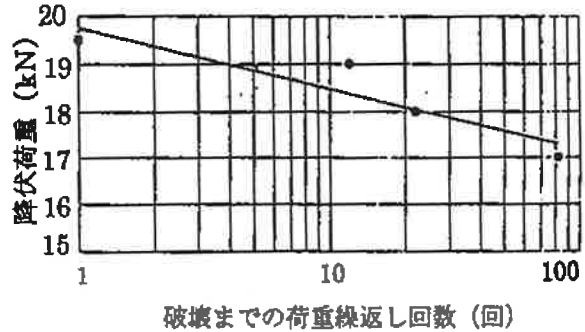
N: 載荷繰返し回数 である。

すなわち、凍結土圧による初期の載荷には健全であっても、凍結土圧が繰返し作用することによって破壊する可能性が明らかになった(図-28, 29)。これにより、擁壁の破壊が、土地造成後数年間経過して顕在化した理由も説明することができる。

(2) 凍害発生メカニズム

これまでの各試験より、八戸ローム土の凍結の過程と凍土圧によるプレキャストL型擁壁の破損のメカニズムを、次のように整理できる。

ローム土への寒気の侵入は、冬期間マイナスの気温の繰返し(図-25)により、図-16, 17, 19に示すように凍結膨張量を累積するとともに、図-24, 25の⑤擁壁のように、冬期間中に凍結範囲を次第に拡大している。一方、八戸ロームは地山の状態よりも盛土の状態では凍結膨張が起こりやすく(図-13, 15, 31, 32)、含水比が大きいほど膨張量が増大する(図-14)。この傾向は、繰返し凍上試験でも同様の傾向が見られ、図-16, 17のNo.5は含水比が小さいので膨張量が小さく被害が無かったと思われる。また、八戸ロームの非晶質物質の中に取り込まれている非自由水も凍結膨張することが判明し(図-23, 33)、ローム土のまわりの自由水と一体となって凍結すること、地中



近似式₁₀ $\log_{10} Y = 0.03021 \log_{10} N + 1.2964$

図-34 荷重繰返し回数と降伏荷重との関係

から吸着水を集める核となることが示された。そのことと地盤の毛細管現象によって、図-27に示されるように、冬期間を通じて擁壁背面の含水比が高まると推定される。

擁壁背面の凍結は図-20, 21, 22に見る通り上載圧の影響を受け、地表面近くから凍結が進行する。凍結深の深いところは擁壁表面からの寒気による凍結と推定される(図-24)。その結果、図-26の⑤擁壁にみる凍結による台形の土圧が発生し、大きなモーメントが擁壁の直壁に作用することになったと推定される。このモーメントの繰返し作用による擁壁背面の微小変位と、融解時の空隙へのローム粒子の崩れ込みによる充填が、年毎に進行することも想定されるので、実際の凍結土圧は計測されたものより大きくなっていることも考えられる。

擁壁の破壊形態は載荷試験によるものと同一であることから、回転モーメントによる曲げ破壊と考えられる。水平移動の拘束は、擁壁前面地盤が凍結によりストラットの役割を果たしたものと推定される。

以上のように、ローム盛土材の凍害発生メカニズムは定性的には理解できた。そして、定量的に説明されるためにはロームの土質(物理化学的性質)、置かれている地盤状況等の違いを考える必要があることから、今後のデータの蓄積が必要である。

(3) 凍結対策

八戸ローム土の凍結によるプレキャストL型擁壁の破壊を防ぐために、図-9に示すモデルが比較検討された。①~⑥は被災したものが基本となっており、⑦~⑩は基礎を置換砂として下方からの給水を断ち、排水性を良くするとともに背面全体に碎石を配して背面の排水を完全なものにする対策である。⑪~⑭はさらに背面土を碎石と砂で置換えて排水とともに給水の無いようにしたものである。これらの現場試験は、1998年の冬期に実施され、その結果は図-24, 26の通りとなった。

背面がローム土の場合は、凍結範囲が上方から時間経過とともに拡大し、凍結圧による土圧は台形となっている。背面に碎石を配置したものは碎石を通して寒気が

ローム土に伝えられ、ローム土の凍結深さはローム土のみより拡大しているが、その進行はある時期で止まり、土圧も下部の方が大きい逆台形となり、モーメントは小さくなっている。土圧が低減した理由は碎石のクッション効果によると考えられ、下部の土圧は通常の土圧と凍結圧によるもので、ローム土のみの場合とほぼ同じである。背面を碎石と砂で置換えたものの凍結範囲は更に拡大しているが、凍結の進行はある時期で止まり、土圧は更に小さくなっている。土圧の低減は碎石や砂のクッション効果とロームの土圧が擁壁にほとんど作用しないことによると推定される。また、各ケースとも2月10日前後で凍結の進行が止まっているのは上載圧の影響と立春以降の気温の上昇にあると考えられる。

図-24の地中1°Cの凍結曲線に擁壁天端より垂線を下ろすと水平線となす角度は40°C, 44°C, 45°Cと変化する。このことは擁壁に作用する凍結圧の方向が緩やかになることを意味し、土圧の測定結果と符合するものである。

以上から、フーチング下面の基礎地盤の置換え、擁壁背面への碎石の配置、背面土の砂との置換え、いずれも効果を発揮している。今後、同様の被災を防止するには背面土の置換えが最も効果が高いと考えられる。

7. 結 論

一連の試験研究を通じて、八戸ロームの凍結によるプレキャスト擁壁の破壊の原因を究明することができ、その防止対策も講じることができたと考えられる。本研究を通じて、ローム土を対象とした擁壁の凍害防止に関し、次のような知見を得ることができた。

- (1) ロームは盛土材となると地山材よりも凍結しやすくなる。その原因はセメンテーションの破壊にあると考えられる。
- (2) 凍結膨張量は含水比の大きいロームほど大きく、凍結温度が下がるほど大きくなる。
- (3) ロームの非晶質物質に含まれる非自由水も凍結し、間隙水の凍結と一体となり凍結層(アイスレンズ)を形成する。凍結層には地下の水分が毛管上昇作用で供給される。
- (4) 凍結は気温の日変化に応じて、寒気の繰返しによって進行する。また、上載荷重が大きいほど凍結は抑制され、凍結に費やす時間が長くなる。
- (5) 凍結は、地表、擁壁前面から進行し、凍結深さは三角形のすべり面に近い形状となる。それによる擁壁への凍結圧の形状は、ローム土の場合は逆台形、背面に碎石を配置すると台形、碎石と砂で置換えると薄い三角形となり、順次小さくなる。
- (6) 工場製品であるプレキャストL型擁壁といえども、荷重の繰返し回数によって曲げ耐力が次第に低下する。そのために、作用する荷重が破壊荷重

以下でも損傷する可能性があり、その時期は特定しがたい。

- (7) 一連の現場計測を通じて、擁壁背面を碎石と砂で置換えることによって、ロームの凍結圧の擁壁前面に及ぼす影響を著しく低減することができる。そして、本研究を通じて、ローム土地盤の擁壁等に作用する土圧の性状とその対策に関し、一般的に次のようなことが言えよう。

- (1) ローム質土の凍結は表層から盤状のものになりやすく、大きな凍結圧を発生しやすい。凍結層は地中水分の毛管上昇作用によって更に発達することになる。
- (2) 凍結は一時的な寒気よりは、寒気の繰返しによる方が膨張量は大きくなる。また、上載圧の大きさによって抑制される。
- (3) 凍結圧を緩和するには、背面を碎石または砂で置換えるとともに、地中水分の供給を断つために基礎底面に遮断層を設けるのがよい。

今後は、多くの計測データの蓄積を行い、凍結圧を評価し、置換工法の置換材料別の挙動と置換厚さの違いによる挙動を調べる必要がある。それにより最適な置換材料、置換厚さを選定できることを期待したい。

謝辞：本研究をまとめるに当たり、貴重な試料及び資料を提供頂いた地域整備公団並木信也、松川重則様、応用地質(株)内藤秀信様、研究の遂行にあたり、指導、便宜、助言をいただいた八戸工業大学教授長谷川明、庄谷征美先生に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 木下誠一編著：凍土の物理学、森北出版(株)、pp.1-28, 1982
- 2) 諸戸靖史：土の凍結・凍上及び青森県における路床構造の設計、八戸工業大学構造工学研究所紀要 創刊号別冊 第1巻、pp.19-29, 1994
- 3) 土質工学会：土の凍結—その理論と実際— 第1回改訂版、pp.1-172, 1994
- 4) 諸戸靖史：土質工学、現代工学社、pp.43-79, 1991
- 5) N. Moroto, T. Sakurada: Frost susceptibility of soils in Aomori province, Japan., VTT SYMPOSIUM, Frost in geotechnical engineering., pp.547-556, 1989
- 6) (社)地盤工学会：地盤工学ハンドブック 6-3 寒冷地の開発と冷熱の利用、pp.1499-1520, 1999
- 7) 酒井 晃、鈴木輝之、澤田正剛、宇野裕教：土の凍上性判定試験の開発(2)、(社)地盤工学会北海道支部(2)技術報告集第38号、pp.35-40, 1998
- 8) 斎藤三哲、宗 好秀、森井 徹、吉富和男：用水路凍結対策工法について(第一報)、第17回北海道開発局技術研究発表会論文集、pp.407-413, 1974
- 9) 森井徹、高田健治、津田進：用水路凍害対策工法について(第3報)—天塩川上流地区の観測結果から—、第19回北海道開発局技術研究発表会論文集、pp.436-445, 1976
- 10) 斎藤三哲、宗 好秀、森井 徹：用水路に作用する側圧荷

- 重の実測例, 第22回農業土木学会北海道支部研究発表講演会講演要旨, pp. 47-50, 1973
- 11) (社)地盤工学会: 地盤工学ハンドブック 2-6 地盤材料学, pp. 290-350, 1999
- 12) 久保 博: 2. 火山灰質粘性土の物理・化学的性質, 火山灰質土の性質とその設計施工に関するシンポジウム, (社)地盤工学会火山灰質土の工学的性質とその利用に関する研究委員会, pp. 4-13, 1995