（1-7）　盛雪を上載荷重とした真空圧密ドレーン工法による軟弱地盤の減容化試験施工

政田博康[1]・遠藤達也[1]・榊原司[2]・○白神新一郎[3]
[1]（株）中山組・[2]錦城護謨（株）・[3]真空圧密ドレーン工法研究会

1.　はじめに

札幌市を流れる豊平川の下流域では，図-1 のように流下能力の向上を目的として高水敷を切り下げる河道掘削工事の実施が計画されている[1)]。実施に当たっては，大量に発生する掘削土の処理方法が課題であり，処分費用を軽減する方策が求められている。

このような背景より，当該地区においてキャップ付ドレーンを用いた真空圧密ドレーン工法の適用により，粘性土を圧密沈下させることで圧密沈下分の掘削土量を減量化することを目的に，平成 21 年度および平成 22 年度に試験施工が実施された。

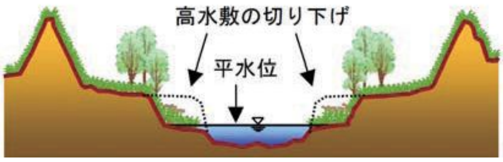

図-1　豊平川掘削断面

なお適用に当たっては地域特性を活かし，夏場には溶けて消滅する盛雪を上載荷重として減容化量の増大を図った。このうち平成 21 年度に実施された試験施工では，その結果より盛雪および凍土の剛性が沈下形状に大きく影響し，剛性が大きい場合は最終沈下量が小さくなることが指摘され，盛雪を圧密荷重として有効に利用するための方策が提案された[2),3)]。本文は平成 22 年度に実施された試験施工について，実測沈下と一次元圧密理論および FEM 解析との比較と，盛雪荷重についての考察を報告するものである。

2.　試験施工の概要

試験施工位置を図-2 に示す。試験場所は札幌市東区に位置する豊平川左岸の河川敷内である。

図-3 に試験施工模式図を示す。真空圧密による改良区域は幅 50m×延長 200m の範囲であり，負圧作用装置 1 台当たりの改良ブロックを 50m×50m とし，計 4 ブロックに分けた改良を行った。ドレーンピッチは 1.0m の正方形配置とし，作用負圧の設計値は-60kN/m^2 とした。真空載荷期間は真空単独載荷期間が 80 日，高さ 5m の盛雪期間が 12 日，その後の放置期間を 48 日とし，計 140 日とした。写真-1 に盛雪後の改良区域全景を示す。また図-4 に動態観測機器設置位置図を示す。

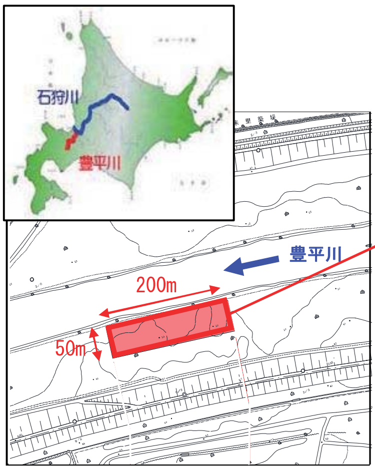

図-2　試験施工位置図

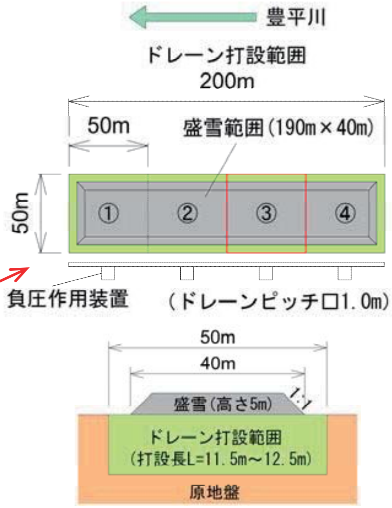

図-3　試験施工模式図

写真-1　盛雪完了後全景

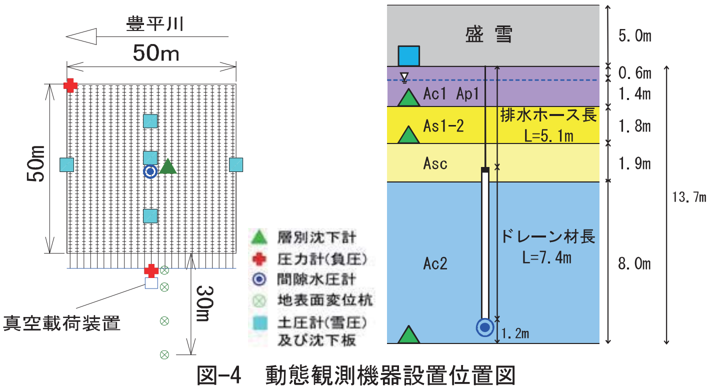

図-4　動態観測機器設置位置図

Examination for volume reduction of softclayey soil by combining snow embankment load and vacuum

Hiroyasu Masada[1], Tatsuya Endo[1], Tsukasa Sakakibara[2], Shinichirou Shiraga[3] ([1]Nakayama Gumi, [2]Kinjo Rubber, [3]Vacuum Consolidation Drain Method Association)

3. 盛雪施工の概要

平成 21 年度に実施された試験施工では，改良範囲外までの盛雪が施工された断面で，盛雪と凍土の剛性が大きい場合はドレーン改良部の沈下が進行するに従い，ドレーン改良範囲外の地盤が盛雪の荷重を支える傾向が生じるため，最終沈下量が小さくなることが報告され，盛雪荷重を有効に利用するための具体的な方策が提案された [2),3)]。本試験施工では，このうち地盤改良の範囲を盛雪の法部の外側にまで拡げて，盛雪の自重をすべて改良地盤に作用させる方策を適用し施工を行った。図-5 に盛雪の断面図を示す。

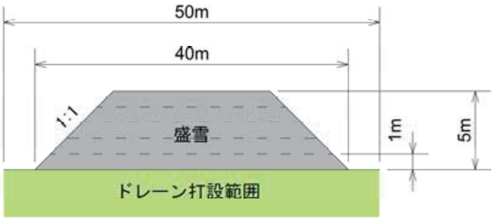

図-5 盛雪断面図

盛雪の範囲はドレーン改良範囲の 5m 内側とし，高さ 5m，法勾配 1:1 で築造した。施工は 1 層のまき出し厚さを 1m とし，湿地ブルドーザーにて転圧を行い密度 0.6g/cm^3 程度となるよう管理を行った。また盛雪に散水を行うことで密度を 0.7g/cm^3 程度に増大することが可能だが，平成 21 年度の試験施工結果より盛雪の剛性が大きくなり沈下への追随性が低下する可能性が考えられたことから，本試験施工では盛雪への散水は行わなかった。

4. 地盤の物性

この区域の土質状況は，高水敷表層に砂質シルト Ac1 層が分布しており，その下部に泥炭 Ap1 層，砂質土 As1-2 層，粘性土と砂質土の中間土である Asc 層，粘性土 Ac2 層の順で堆積している。

試験施工区域の近傍にて実施した調査ボーリングより得られた地盤の物性を表-1 に示す。

表-1 地盤の物性

土質区分	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	自然含水比 w_n (%)	初期間隙比 e_o	圧縮指数 Cc	圧密係数 c_v (cm^2/day)	圧密降伏応力 p_c (kN/m^2)	過圧密比 OCR
Ac1 Ap1	14.5	87.0	2.305	0.675	210	30.0	2.5
As1-2	18.0	−	−	−	−	−	−
Asc	17.6	43.7	1.177	0.349	2000	202.5	5.5
Ac2	15.7～16.3	61.2～72.4	1.652～1.889	0.591～1.056	40	82.3～109.9	1.7

(1) Ac1 層，Ap1 層：砂質シルト Ac1 と泥炭 Ap1 の互層となっており，泥炭部は薄く物性的には砂質シルトが卓越している。また過圧密比は 2.5 程度であり，これは当該区域が雪の排雪場として利用され，雪山荷重によって圧密が進行しているためと考えられる。

(2) Asc 層：過圧密比が 5.5 程度であり，今回の圧密荷重に対しては沈下が発生しないものと判断される。

(3) Ac2 層：当初圧密係数は c_v=90cm^2/day と推定されていたが，圧密試験の結果 c_v =30～50cm^2/day 程度であった。

地盤に作用する圧密荷重は図-4 に示すように Ac1 層，Ap1 層については盛雪荷重，Ac2 層については盛雪荷重と真空圧密ドレーンによる負圧荷重となる。

5. 改良効果

（1）作用負圧

図-6 にドレーン先端部に取り付けた間隙水圧計による作用負圧の経時変化図を示す。作用負圧は圧密期間を通して設計値の-60kN/m^2 以上を維持していることが確認された。なお，この間の真空ポンプ元圧は-85～-90kN/m^2，集水管端部における作用負圧は-80～-85kN/m^2 で推移していた。

（2）沈下量

図-7 に改良域中央における層別沈下量の実測値と双曲線法で解析した予測沈下曲線を示す。圧密期間 140 日での沈下量 S と圧密度 U は，Ac1，Ap1 層で S=5.8cm U=86.6%，Ac2 層で S=47.7cm U=78.5%，全層で S=56.2cm U=84.9%であった。また As1 層において 2.7cm の即時沈下が確認された。

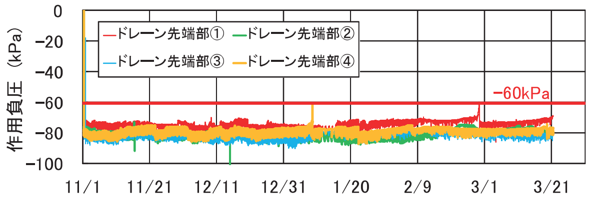

図-6 作用負圧経時変化

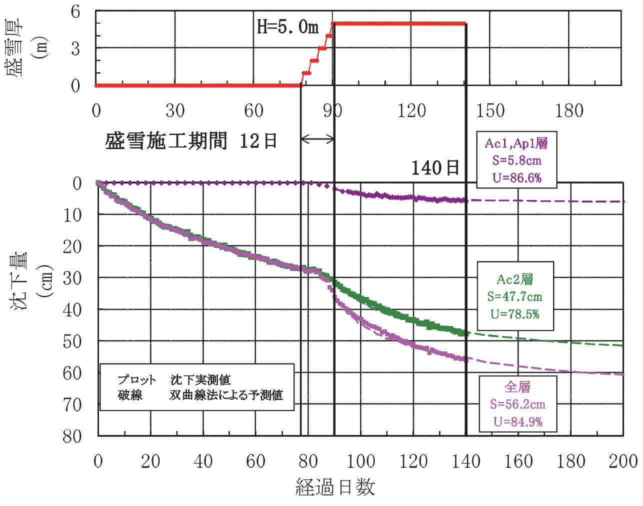

図-7 改良域中央部の沈下曲線

6. 実測沈下と一次元圧密理論および FEM 解析との比較

一次元圧密理論は Cc 法と Barron（バロン）の近似解により算出した。FEM 解析（プログラム名：Dacsar）における土の構成モデルは，Ap 層と Ac 層を関口・太田モデル，As 層と Asc 層および盛雪は線形弾性体と設定した。一次元圧密理論による計算では，圧密荷重の設定を作用負圧はドレーン先端の間隙水圧計測結果より 80kN/m^2，盛雪荷重は土圧計および雪密度の計測結果より 30kN/m^2（0.6g/cm^3）とした。図-8 に FEM 解析に用いたメッシュ図を示す。また土質定数および FEM 解析に用いた材料パラメータを表-1 および表-2 に示す。盛雪の弾性係数については，剛性の影響を検証するため表-3 に示す 3 ケースとした。PBD は排水境界としてモデル化し，改良範囲内に 5m ごとに排水境界を設けた（粘土の水平透水係数を平均圧密度 50%で一致するように調整)。また作用負圧は PBD の排水境界に-80kN/m^2 の負圧を与えることで設定した。

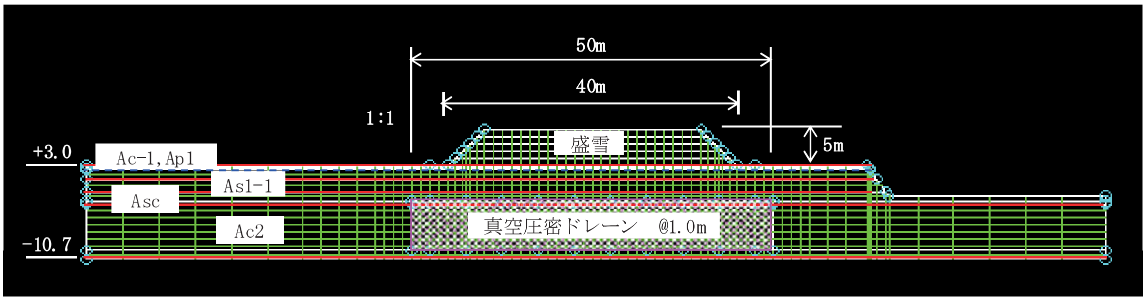

図-8　FEM 解析に用いたメッシュ図

表-2　FEM 解析に用いた材料パラメーター

領域名	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	初期間隙比 e_0	限界応力比 M	非可逆比 Λ	ダイレイタンシー係数 D	静止土圧係数 K_0	ポアソン比 ν	透水係数 k (m/s)
Ac-1, Ap1	14.5	2.305	1.20	0.686	0.0507	0.50	0.33	1.27E-08
As1-2	18.0	-	弾性係数：E = 16000 (kN/m^2)				0.33	1.00E-06
Asc	17.6	1.177	1.20	0.686	0.0398	0.50	0.33	2.61E-08
Ac2	16.0	1.775	1.22	0.695	0.0734	0.50	0.33	5.73E-10
盛雪	6.0	-	弾性係数：Case-1～Case-3の3ケース				0.33	1.00E-06

表-3　FEM 解析ケース

ケース	雪の剛性	弾性係数 E(kN/m^2)	備　考
Case-1	小	1,000	
Case-2	小	7,000	一般的な盛土と同程度の剛性
Case-3	大	90,000	平成21年度試験施工の散水を行った盛雪の評価数値[3]

図-9 は地表面沈下形状について，実測値と FEM 解析の比較を示したものである。盛雪の剛性が小さい Case-1，Case-2 が実測沈下と一致する傾向を示し，N 値 10 相当の盛土と同程度の剛性である Case-2 で地盤の挙動が精度よく再現できていると判断される。

図-10 は Case-2 における改良域中央の実沈下と一次元圧密理論および FEM 解析との比較を示したものである。なお実測沈下については双曲線法による解析により，将来の沈下予測値を表記した。実測沈下と理論値，FEM 解析値はよく一致していると判断される。

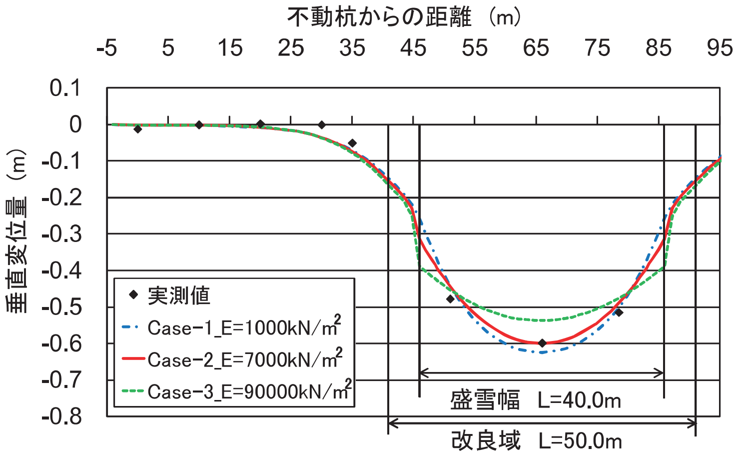

図-9　圧密後の地表面沈下形状

図-11 は改良域から 10m 離れた位置での変位量について，実測値と Case-2 における FEM 解析との比較を示したものである。地盤の変形形状については概ね類似しているが，実測値が全深度で改良域側に引き込まれる挙動を示すのに対し，FEM 解析では GL-3m～-7m 付近において改良域の外側へ押し出される方向への変位を示している。これは FEM 解析においてモデル化した横断方向の地層分布および盛土荷重と作用負圧の地盤内応力分布が実際と異なり，作用負圧による改良域側への水平変位に対し，盛土荷重による改良域外側への水平変位が卓越したことが要因であると推察される。

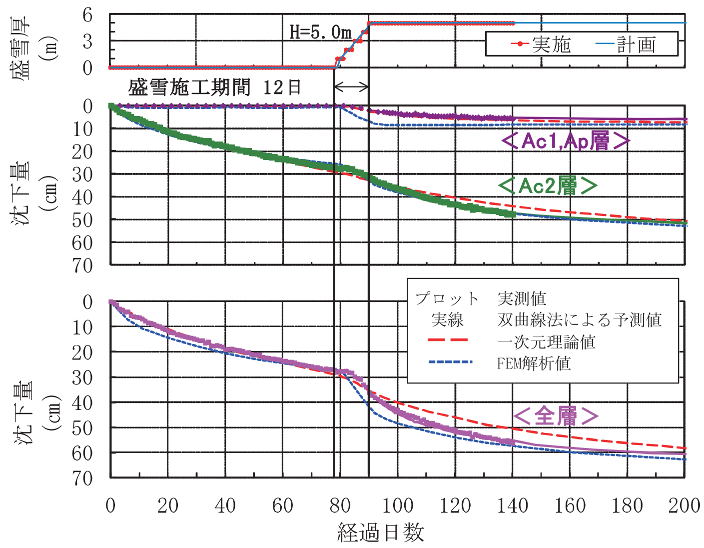

図-10　沈下実測と理論値および FEM 解析値との比較

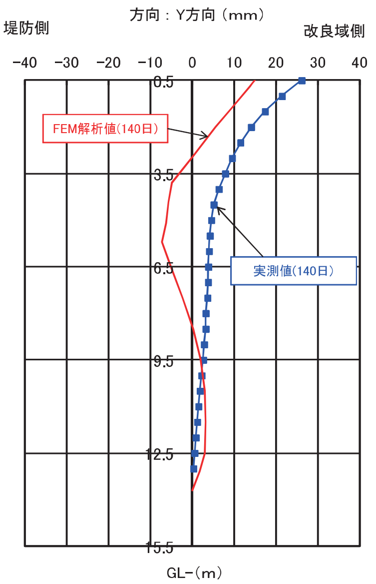

図-11　変位実測と FEM 解析値との比較

7. まとめ

平成 22 年度に実施された，盛雪を圧密荷重に併用した真空圧密ドレーン工法の試験施工では，平成 21 年度に実施された試験施工結果より提案された，盛雪を圧密荷重として有効に利用するための方策を実施し施工を行った。実測沈下と一次元圧密理論および FEM 解析を比較し，盛雪による圧密荷重について考察した主な結果をまとめると次のようである。

(1) 作用負圧は圧密期間を通して設計値の-60kN/m^2 以下（-68～-85kN/m^2）を維持していることが確認された。
(2) Ac1 層，Ap1 層は盛雪による 60 日間の圧密改良で 5.8cm 沈下し，推定圧密度は 86.6%であった。
(3) Ac2 層は盛雪と負圧による 140 日間の圧密改良で 47.7cm 沈下し，推定圧密度は 78.5%であった。
(4) 実測沈下と一次元圧密理論および FEM 解析との比較を行った結果，動態観測値から得られた作用負圧：-80kN/m^2，盛雪荷重：30kN/m^2 を用いた解析から沈下形状の再現ができた。
(5) 盛雪による圧密荷重について，FEM 解析で盛雪の剛性（弾性係数）を N 値 10 相当の盛土と同程度の E=7000kN/m^2 とすると実測沈下とよく一致することから，剛性の影響による沈下量の低減は極めて小さかったと判断され，盛雪荷重を地盤に有効に作用させる方策が有効であることが確認された。
(6) 盛雪の範囲をドレーン改良範囲の 5m 内側としたこと，盛雪に散水を行わなかったことにより，盛雪の剛性を N 値 10 相当の盛土と同程度とすることができた。

なお平成 23 年度においては，2 回の試験施工の結果を反映し本施工が実施され，年度内に工事が完了している。

謝辞

本報告をまとめるにあたり，北海道開発局札幌開発建設部には貴重な資料を使用させていただいた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

1) 渡辺雅裕，高橋慶久，平塚修二：豊平川下流部における河道掘削について－真空圧密工法による掘削土砂の減量化の検討－，北海道開発技術研究発表会，2010.
2) 新舎博，河村健輔，椎名貴彦，大久保泰宏，鈴木健治，渡辺雅弘：盛雪と真空圧密を併用した軟弱地盤の減容化施工，地盤工学ジャーナル，Vol.6，No.3，pp.427-438，2011.
3) 新舎博，椎名貴彦，鈴木健治，渡辺雅裕：盛雪と真空圧密併用による軟弱地盤の減容化施工（その５）－盛雪と凍土の剛性が地盤変形に及ぼす影響－，第 46 回地盤工学研究発表会，pp.851-852，2011.