



セメント系固化材・事例紹介

## TNF工法

### ～軟弱地盤における格子状表層改良工法～

沖本 陽平 友納 康雄 高尾 健治

#### 1. はじめに

日本国内には、埋立地や粘土層が厚く堆積し、沈下を引き起こす軟弱地盤が多く点在する。軟弱地盤上の建設では、建物の沈下を防ぐため、多くはその基礎形式として杭工法または深層混合処理工法が選

択されてきた。杭工法では建物は杭を介して強固な深層の地層に支持されるため沈下は発生しない。しかし一方、建物の周辺の地盤では、盛り土重量などによって圧密沈下が進行し、建築物と周辺地盤に段差が生じる場合がある。また、杭頭が露出することもあり地震時の安全性の問題にもなり得る。

TNF Construction Method, shallow ground improvement  
formed as grid shape for buildings on soft ground  
(by OKIMOTO Youhei et. al.)



おきもと ようへい  
株式会社建設  
取締役建設部部长 1級建築士



ともなう やすお  
同上  
営業部部长 開発担当



たかお けんじ  
同上  
建設部次長

TNF工法は建物の沈下を許容し、周辺地盤と沈下を同調させ、かつ不同沈下を抑制する工法である。これは、在来の基礎補強方法にはない新しい考え方である。

本稿では、その新しい考え方を実践し実績を重ねている本工法の設計・施工の手法について概要を紹介する。

#### 2. TNF工法とは

##### 2-1. 概要

TNF工法は、一般の浅層混合処理工法を応用した

もので、改良層の底面を格子状に形成することで地中応力を分散し、軟弱地盤でも不同沈下を抑制する工法である。

浅層混合処理工法は、地表面から3mまでの地盤にセメントなどの固化材を混入して攪拌し、強固にする工法で、表層改良工法や浅層混合処理工法とも呼ばれる。

杭を用いない表層改良工法は、杭工法に比べて施工費を低く抑え、施工期間を短縮できるという長所を持つ。一方で地盤が極端に軟弱な場合、表層改良工法では、建物を支えきれず地盤沈下や不同沈下を起こす危険性がある。一般に表層改良工法は一定の地盤強度が必要とされているが、TNF工法は従来の表層改良工法を改良し、杭工法に対するコストの低減や工期の短縮を維持しつつ、軟弱な地盤上でも安定して建物を支えることができる工法である。

## 2-2. 施工実績

1993年以来、日本全国の軟弱地盤層で、工場や倉庫、小売店を中心に実績を重ね、2020年3月までの完工は1300棟に達した。東日本大震災の復興需要を受け、東日本で大きく実績を伸ばし、また、石狩平野など、軟弱地盤が広く分布する北海道でも近年実績を伸ばし、今日では年間約150件のペースで工事を進めている。工事のほとんどが、2000㎡から5000㎡の工場などの民間施設であるが、本工法の特徴である工期短縮への需要の高まりから1万㎡を超える大型工事も増えつつある。また、近年では、水素ステーションやシステム建築での採用も進んでいる。表1に、TNF工法の略歴を記す。

表1 TNF工法の略歴

1993年：初施工
2004年：特許取得
2007年：海外（ベトナム）案件施工
2011年：TNF工法協会設立
2013年：第21回中国地域ニュービジネス優秀賞受賞
2020年：実績1300棟達成

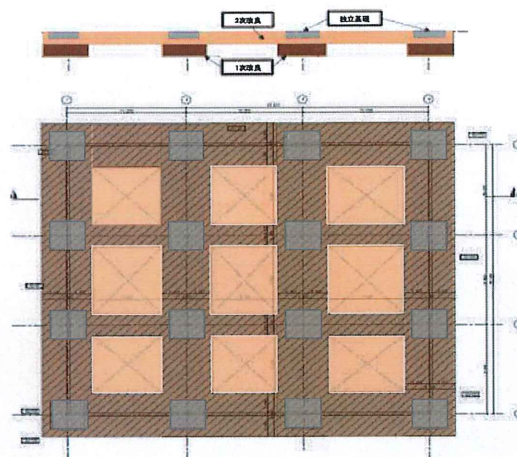


図1 一般的なTNF工法のストラクチャー

## 3. 工法の概要

### 3-1. ストラクチャー

図1は一般的なTNF工法のストラクチャーを示したものである。GLから約1mの深さまで建物下を全面改良し、さらに柱の基礎下深さ約1.5mを格子状に改良するものである。改良はセメント系固化材と原土をバックホウで攪拌混合し改良地盤を形成する。改良地盤の圧縮強度は、建物からくる設計荷重によって定まる必要強度を満足するように、セメント系固化材の添加量を調整する。

### 3-2. 効果

低層の建物では、地盤が軟弱であっても土質の改良で十分に建物を支持することが可能な場合も少なくない。一方、杭工法では軟弱性の程度にもよるが、地下20mから50mを超える杭打設が必要になることも稀ではなく、工事は大掛かりなものになることも多い。表層のみを改良するTNF工法は杭工法に比べてさまざまなメリットを有するが、特筆すべきは、施工がシンプルなことによる施工工期およびコストの縮減が挙げられる。また、周辺地盤と一体となって挙動するTNF工法では、周辺地盤の沈下による建物の抜け上がり現象が発生しない。

写真1は同一の地盤条件上に隣接する商業施設の竣工後約一年の様子で、杭工法の建物では抜け上が



杭工法



TNF工法



写真1 竣工後約一年の様子



写真2 熊本地震発生数日後の様子

表2 TNF工法の効果

1. 施工工期を短縮
2. 使用する建築資材が少ない
3. 仮設費用を削減
4. 工種が少なく、各種作業の引継ぎ時間（オーバーヘッド）を削減
5. 汎用重機で施工が可能
6. 建設残土が少ない
7. 解体工事が容易
8. 抜け上がり現象が発生しない
9. 液状化を含む地震被害を緩和
10. 施工後の地盤が固く安定するため、後工事の効率が高まりかつ安全

りによる損壊が見られる。一方、TNF工法の建物では、異常は認められない。

また、軟弱な地盤では地震時に軟弱地盤層が地震動を吸収して建物への被害を軽減すると、土木学会「基礎構造形式の違いによる上部構造物の地震応答特性について」の報告で示されている。鳥取県中部地震（2016）、熊本地震（2016）で罹災の建物を当社が独自に調査した結果、TNF工法導入の建物の被害が他工法の建物に比して軽微であることが判明し、土木学会の報告を裏付けるものとなった。写真2はTNF工法導入の商業施設で、熊本地震発生数日後の

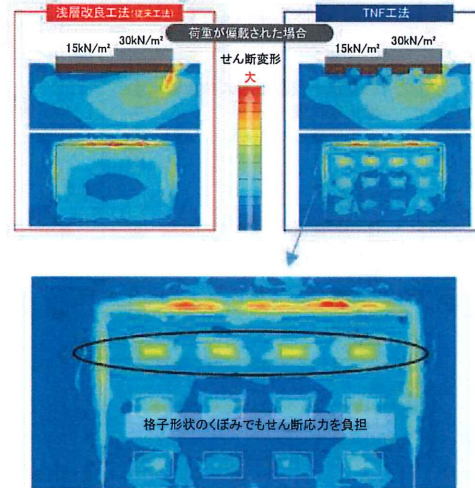


図2 浅層改良工法とTNF工法におけるせん断変形の数値解析比較

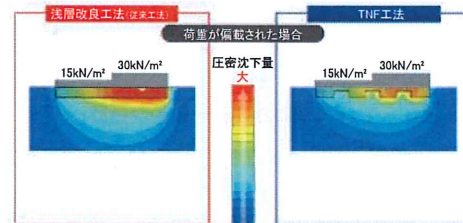


図3 TNF工法と従来工法における圧密沈下量の比較

様子である。内装、外装ともに大きな被害は認められず罹災の翌日から営業を再開していた。表2は杭工法と比較した場合の一般的なTNF工法の効果をまとめたものである。

### 3-3. 特徴

TNF工法の特徴は、改良底面の格子形状にある。底面を格子状に形成することで、上部からの応力



図4 TNF工法における一般的な設計・施工フロー

を分散し不同沈下を抑制する。図2は、通常の浅層改良とTNF工法の地盤の変形状態（せん断変形）を有限要素法（FEM）による数値解析で比較しもので、青→黄→赤の順に変形が多いことを示している。右のTNF工法の場合、左の従来工法に比べて赤い部分が全体に少なくせん断変形が小さいことがわかる。一方で、TNF工法の特徴である、底面の格子状のくぼみの部分でもせん断変形が発生している。これは、この部分がせん断応力を負担し、改良地盤縁端のせん断変形を緩和していることを示している。

次に圧密沈下を比較してみる。圧密現象は、軟弱

地盤で最も注意を要する現象で、被害が建物の竣工後数年を置いて発生するため、その予測や対策が困難なのが特徴である。図3に示す通り、上載荷重を分散するTNF工法では赤い部分が少ない。これは従来工法に比べて沈下量が少なく均等化していることを示している。

以上のように、TNF工法では一般の浅層改良に比べて軟弱地盤における建物の不同沈下を抑制し、ローコストで建物の安全性を高めることが可能で、これまで工法の限られた軟弱地盤条件下の建設計画で、一つの選択肢を与えるものである。



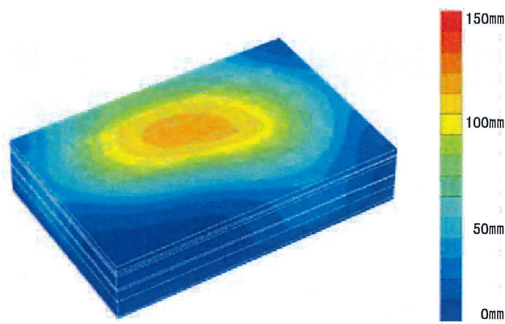


図5 CASE 1 直接基礎

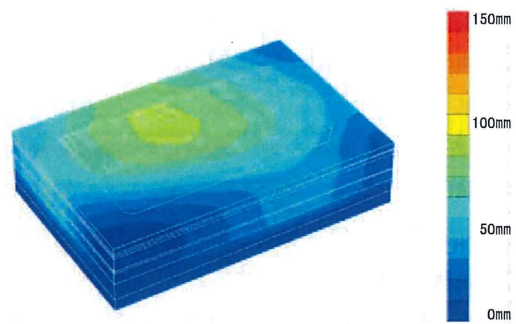


図6 CASE 2 TNF工法導入

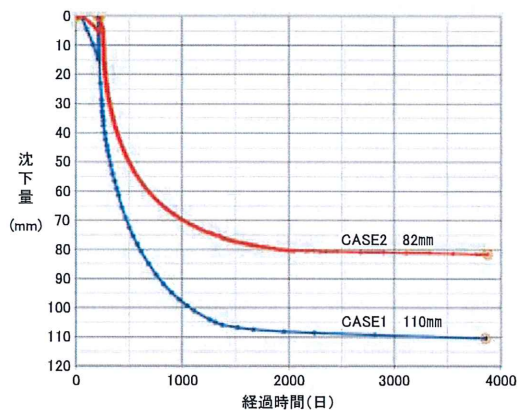


図7 TNF工法導入による10年間の圧密沈下変遷の比較

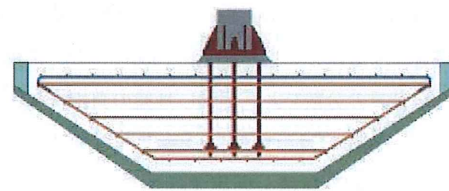


図8 基礎断面図(TNF-D工法)



写真3 ICT搭載の重機による台形基礎掘削の様子

### 3-4. 設計・施工手順

TNF工法における一般的な設計・施工フローおよび施工時の写真を図4に示す。

#### <調査・設計>

ボーリング調査、土質試験(三軸圧縮試験、圧密試験、粒度試験等)、建築物の上部構造資料を基に地盤改良および基礎の構造検討を行う。基礎設計では、改良地盤の強度をおおむね $100\text{kN/m}^2$ と仮定し、基礎形状と地盤改良の必要強度を決定する。その後室内試験で必要強度を満たす固化材の添加量を決定する。

地盤改良の設計に当たっては、改良層の形状(深さ、幅等)を決定するとともに、圧密沈下および液状化の照査を行うが、周辺地盤と一体化し沈下を許容する本工法では、正確な圧密沈下量の把握が欠かせない。

TNF工法の設計では、圧密沈下量の照査に際し、

建築指針の定める設計法に加えて、前述のFEMによる数値解析によって、最長30年間の圧密沈下量のシミュレーションを行っている。シミュレーションはPLAXIS社製地盤解析ソフト、「PLAXIS 3D」を使用している。本ソフトでは、複数の地盤調査データがあれば、立体的に対象地の土質状態を想定し、柱など建設用地内の任意の点における沈下量を算定できるのが大きな利点である。

図5、6は、当社が行った設計案件の圧密沈下解析のコンター図で、図5がTNF工法の導入を行わなかった場合の地盤沈下を示し、図6では、導入した場合の様子を、図7はこれらの10年間の圧密沈下変

遷の比較を示している。TNF工法の効果により沈下量は緩和され、本案件の10年後の沈下量として82mmを算定した。

TNF工法の特徴の一つに、改良地盤が基礎を強固に支持することから、地中梁を必要としない場合が多くなることが挙げられる。また、基礎のサイズも直接基礎に比べて小さくできることから、当社では基礎を台形に形成するTNF-D工法を開発した。図8は基礎の断面図を示したものである。

TNF-D工法では、通常施工される矩形の基礎に比べて、施工するコンクリート量を約30パーセント削減し、上載荷重の分散をより促進し地盤の負担軽減が期待できる。施工では、台形型の基礎掘削が必要となるが、ICT搭載の重機を使用することで工期の維持と出来型の精度向上を図っている(写真3)。

#### <施工計画>

はじめに現地試料土の採取と施工条件の調査を行う。採取した試料土を当社試験室に持ち帰り、室内配合試験と六価クロム溶出試験を実施、試験結果より施工計画を策定する。

室内配合試験では、改良層の原土の特性を把握し、所要の設計強度を発現するセメント系固化材の種類と添加量を決定する。手順は、試料土の含水比試験、湿潤密度試験を行うとともに、試料土とセメント系固化材をソイルミキサーで混合攪拌し、養生ののち一軸圧縮試験を行う。この時、固化材の種類と添加量は、試料土の物理特性、施工実績、施工時の気温等、外部環境から数ケースを選定し、一軸圧縮試験の結果から最適な添加量を決定する。

六価クロム溶出試験は、「セメント及びセメント系固化材の地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について」(国土交通省)の通達にもとづき、環境庁告示第46号溶出試験による六価クロム溶出量が、土壤環境基準値以下であることを確認する。

#### <施工>

1次改良の施工範囲の位置出しを行い、原地盤表層を1次改良天端まで格子状に鋤取る(①)。室内配



写真4 完成外観  
[JA全農ウィークリー ウェブサイトより引用]

表3 建物諸元

工 事 名:	JA全農山形 庄内南部ライスステーション新築工事
延べ床面積:	13,190㎡
建 物 用 途:	低温米貯蔵庫 収容量国内最大規模の約25,000t, 農産物検査場
施 工 期 間:	2019年1月10日～3月14日
施 工 面 積:	17,340㎡
使用固化材量:	5,514.35t
使用固化材:	ジオセツト200 (太平洋セメント(株))
使用重機:	0.8m <sup>3</sup> バックホウ5台, 0.45m <sup>3</sup> バックホウ2台, 0.28m <sup>3</sup> バックホウ1台, ブルドーザー1台, 振動ローラー1台

合試験で決定したセメント系固化材の添加量を施工範囲ごとに散布し(②)、均一に敷き均した後、バックホウにて混合攪拌する(③)。次に、十分混合した改良土を敷き均し、ローラー等で転圧(④)を行った後、鋤取った土を2次改良天端まで埋め戻す。2次改良も同様にバックホウにて混合攪拌し(⑤⑥)、改良土の敷き均しを行ったのち転圧を行う(⑦)。一定の強度が得られるまで養生を実施しながら、基礎躯体の位置出しを行い、掘削位置縁端をコンクリートカッターにて5～10cm程度切削(⑧)、切削溝に沿ってバックホウにて基礎躯体部分の掘削を行う(⑨⑩)。※ )内番号は図4に示す写真に対応。

#### <品質検査>

1次改良、2次改良時に現場で混合攪拌された改良土を採取、供試体を作成し7日、28日養生後の一軸圧縮試験によって、所要の強度を発現しているかを確認する。

## 4. 施工事例

ここでは、建設用地が3万㎡、貯蔵物重量は㎡あたり約2tの、検査場を備えた大規模米保管倉庫での地盤改良工事の事例を紹介する(写真4、表3)。



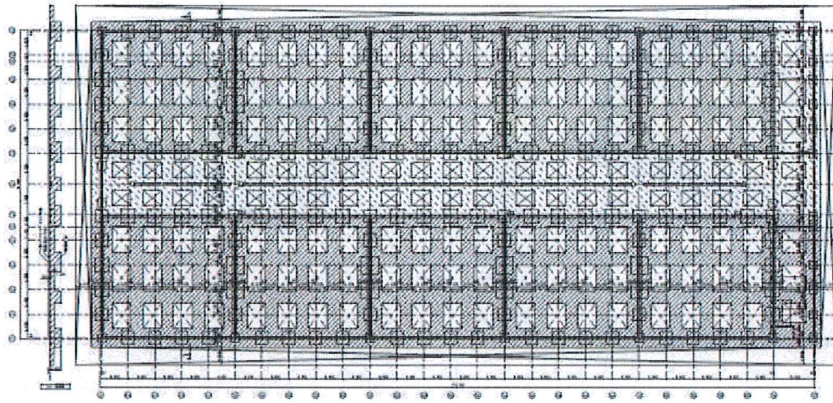


図9 地盤改良伏図

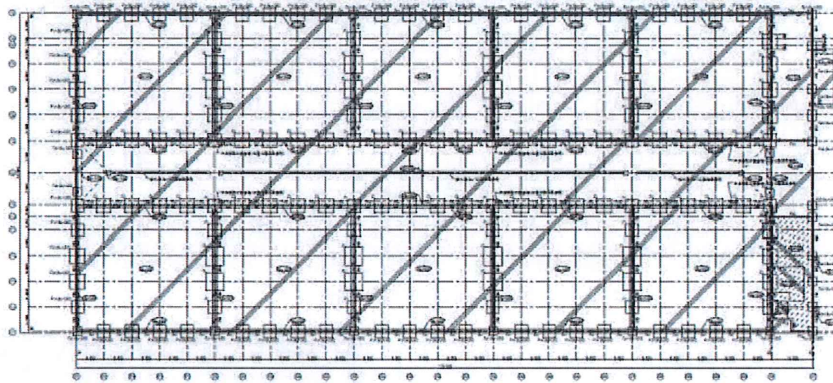


図10 基礎伏図

#### 4-1. 設計

本工事では、用地の四隅と中心1か所の計5か所で土質調査が実施された。N値=0~3の粘土を多く含む軟弱な地盤が砂質層に挟まるように存在し、その厚みが用地内で変化しているため、不同沈下が懸念された。また、設計積載荷重が $2.9\text{t}/\text{m}^2$ と大きく、施設の稼働中における荷重の偏載にも注意を払う必要があった。試験所において試料土の密度、含水比、間隙比、飽和度などの一般試験に加えて圧密試験およびせん断（三軸）試験が行われ、試験所より各土質パラメータを入手した。

設計は、土質パラメータをもとに「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針 日本建築センター・第3編浅層混合処理工法の設計・品質管理指針」に基づき行った。図9、10がその設計図である。

一軸圧縮試験の結果、地盤改良への固化材添加量

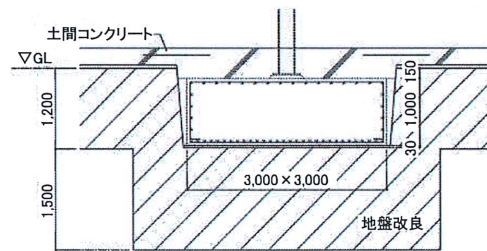


図11 一般部の基礎断面図

は、 $120\sim 170\text{kg}/\text{m}^3$ 、設計基準強度 $F_c=390\text{kN}/\text{m}^2$ （長期支持力は $130\text{kN}/\text{m}^2$ ）とした。

原地盤の地耐力から改良厚は、1次改良 $1500\text{mm}$ 、2次改良を $1200\text{mm}$ の合計 $2700\text{mm}$ とした。TNF工法の基礎では改良地盤が強固に基礎を支持するため、地中梁を要さず基本的に独立基礎を採用する。本工事でも平面サイズ $4200\times 4200\text{mm}$ を最大に、外側一般部で $3000\times 3000\text{mm}$ とし基礎高が $1000\text{mm}$ の独立基礎とした。図11に一般部の基礎断面図を示す。

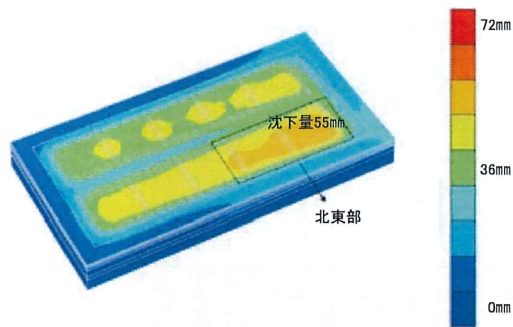


図12 FEMの解析モデルおよび圧密沈下の結果

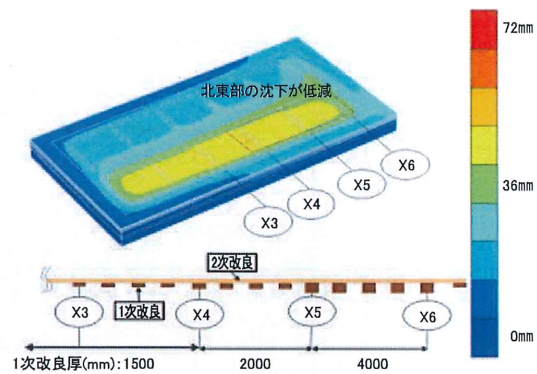


図13 一時改良厚を増厚した場合の圧密沈下の結果



写真5 試料採取の様子

前述の指針による設計結果からFEMによる圧密沈下の検証を行った。図12がPLAXIS 3Dで作成した解析モデルおよび圧密沈下量の結果である。解析結果から建物の北東部に当たる図内右下部の地盤が弱く、最大55mmの沈下が発生することが判明した。不同沈下の指標となる部材変形角は $2.2 \times 10^{-3} \text{rad}$ となり、指針で定める基準値  $2.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  を超えることが分かった。

上記結果から対策として、北東部の1次改良厚を1500mmからX4-X6にわたって徐々に4000mmまで増厚、部分的に木杭によって補強し沈下量を再度解析したところ、最大沈下量は48mmに減少、東部のみに積載荷重を載荷した場合でも沈下量が全体に均等化し、部材変形角は $1.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで低減、指針の基準値を満たした(図13)。

#### 4-2. 施工計画

##### <試料土採取>

2018年8月、建設予定地内の5か所に加え、盛土用

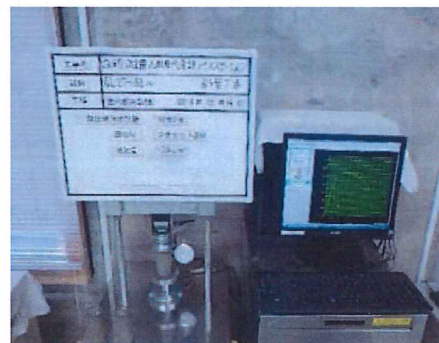


写真6 一軸圧縮試験

客土の採取も行った。現地土の土質状態は上層がシルト、深層部はシルト質細砂であり客土は礫質砂であった。写真5は予定地内における試料採取の様子である。

##### <室内配合試験>

過去の実績や供給条件から配合するセメント系固化材を、太平洋セメント(株)製ジオセット200に選定し、現地で採取の試料土を当社内の試験室において配合試験(一軸圧縮試験)を実施した(写真6)。

六価クロム溶出量試験、試料土の含水比、湿潤密



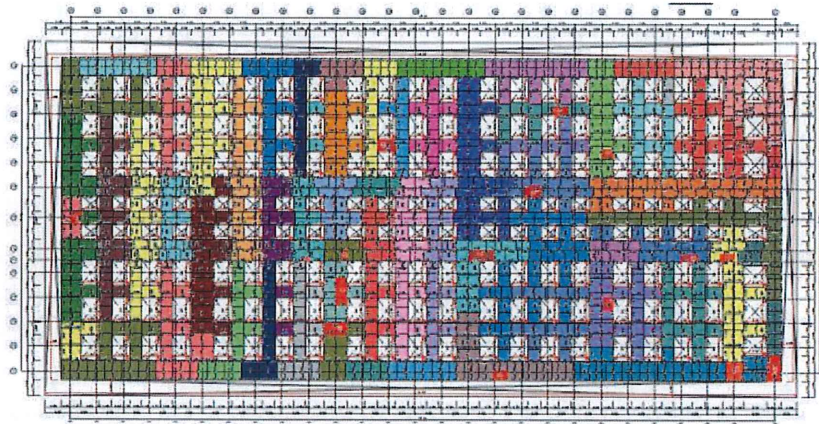


図14 施工計画図



写真7 固化材散布, 攪拌の様子

度、乾燥密度等の物理試験を行うとともに、特に地盤の弱い南東部の改良深さを5.2mとしたことから、深層部改良にあたって、地下水位、1次改良部スキ取り時の現地土の自立性等、種々の施工条件を総合的に判断し、固化材添加量は改良部位によって120～170kg/m<sup>3</sup>を適用、施工は北東部から行うなどの施工手順を含む改良計画を策定した。

図14は施工計画図で、一日あたりの改良ブロックを色分けしたものである。誌面の都合で詳述はしないが、改良深さ、体積、固化材添加量、重機台数の条件を勘案し策定したものである。

#### 4-3. 施工

1次改良時は、シルト層上での重機作業を繰り返すため、敷鉄板を敷設してトラフィカビリティを確保しながら改良を実施した。写真7は固化材散布、攪拌の様子である。



写真8 覆土養生実施の様子

2次改良時には、寒冷時期であることから、温度低下による固化不良が懸念されたため、規定高さより10cm程度高めに改良土を敷き均した上転圧し、固化が確認された後に、規定高さまで改良土を除去する「覆土養生」を実施した(写真8)。

覆土養生を行うことで、改良地盤に十分な強度が発現し、基礎掘削においては、鉛直の掘削壁面がく



写真9 基礎掘削における鉛直の掘削壁面形成の様子



写真10 基礎掘削完了

ずれる事なく形成された(写真9)。

写真10は基礎掘削が完了しアンカーボルトを施工する様子である。

## 5. おわりに

軟弱地盤での建築物の基礎工法は、建築物の重要度、構造や地盤の状況によって、最適な工法が選択されることが望ましい。加えて、建設工事でも環境への配慮が重要な課題となっているなか、特に建築物の基礎工事は、地盤という自然に手を加えることから、より環境への配慮が求められる。また、完成

時には埋設されて環境への意識も薄くなりがちな基礎躯体であるが、撤去時には地盤の現状復帰に多大なコストと、環境負荷をとまうことが懸案となっている。

TNF工法では、工事を浅層に限ることから基本的に地盤への環境負荷は少なく、撤去コストも他工法に比べて低く抑えることができる工法である。当社では、TNF工法の他、TNF工法に木杭を併用する基礎工法、地盤改良による地下貯留施設、土嚢による減震工法など、いずれも環境に配慮した工法の開発を進めている。