

コンペンセーショングラウトによるトンネル直上構造物の沈下防止対策 COMPENSATION GROUTING TO LIMIT SETTLEMENTS OF STRUCTURES FOUNDED ON THE ROOF OF TUNNELLING

森川 義人* ・ 依田 庸夫** ・ 増成 隆***

Yoshito MORIKAWA, Tsuneo YODA, Takashi MASUNARI

Generally, chemical grouting is used for cut-off and soil improvement and demands a technique of permeation grouting restraining from making ground distorted as minimum as possible. On the other hand, the technique meant that heaving up the ground by grouting is appropriated to compensate structures for settlement exists. This paper refers to compensation Grouting which is undertaken to limit settlements of viaduct piers during tunnel construction in London. Monitoring data of settlement of viaduct piers during running tunnel construction indicate that compensation grouting proved to be successful in limiting settlement less than a specified allowable settlement.

Keywords: settlement, grouting, tunnels, structure, heaving

1. ま え が き

一般に薬液注入工法は、地盤の隆起や構造物の変状を起こすことなく、薬液を地盤中に浸透させ固結させることが基本原理である。ところが、欧米では注入による地盤の隆起を積極的に、そして計画的に実施することによって、傾斜した建造物の沈下抑制や復元を行うという考え方があり、コンペンセーショングラウトとして注入の1分野をなしつつある^{1) 2)}。

この計画的な地盤隆起による注入は、既に沈下し傾斜した建造物を元の状態に戻す(復元)ことを目的とした場合と、トンネル掘削や開削工事によって発生することが予想される地盤の沈下、および建造物の不等沈下を工事期間中を通して繰り返し継続的に修復していき、許容値以内に抑えること(修復)を目的とした場合がある。本報文中で紹介する内容は後者の場合にあたり、トンネル掘削により生じる地盤沈下とそれに伴う構造物の沈下を修復するためのコンペンセーショングラウトの施工実績の一部である。この工法はグラウトによって強制的に地盤を隆起させ、構造物の沈下を許容値以内に抑えるのであるから、的確なモニタリング技術とそれに連携した制御注入によって実現されるものである。

工事は英国ロンドン市内を横断するロンドン地下鉄ジュビリー線延長工事の内、サザーク駅の新設を含む

* 正会員 (株)青木建設 施工本部土木設計部

** (株)青木建設 ロンドン支店 青木・ソレタンシュ建設共同企業体所長

*** 大和工業(株)技術部

2. コンペンセイショングラウトの概要

当工区の地層はおよそ GL-4.5m までが表土と沖積層であり、GL-4.5~11.0m はテラス礫層、さらに GL-11.0~36.0m はロンドン粘性土層、そしてそれ以下は粘性土、砂、礫層の互層となっており、トンネル掘削は工区内は全てロンドン粘性土層で行われる。図-2には土層構成、およびロンドン粘性土とテラス礫層の粒度分布を示す。

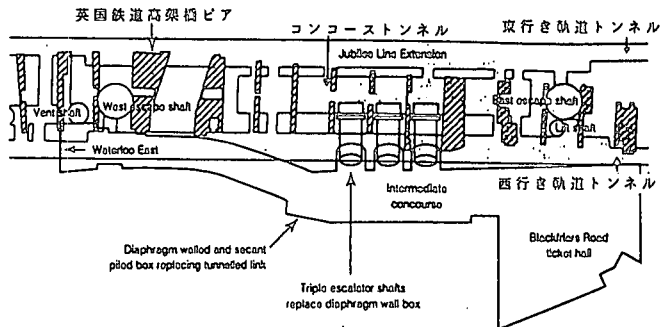
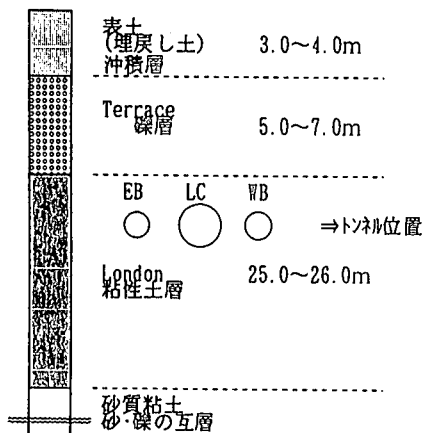


図-1 サザーク駅周辺トンネル工事計画図

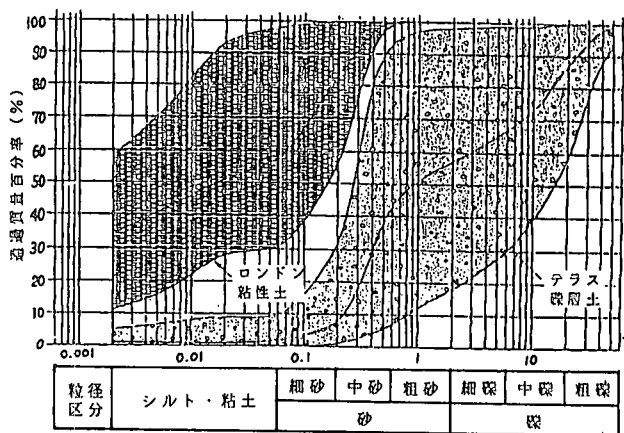


図-2 土層構成と粒度分布

一方、テラス礫層はN値が $5 < N < 125$ ではらつきがあるものの、比較的粒度分布の良い砂礫層であり、平均粒径 D_{50} が $0.3\text{mm} \leq D_{50} \leq 11.0\text{mm}$ となっている。透水係数は $9 \times 10^{-3}\text{m/sec} < k < 1 \times 10^{-6}\text{m/sec}$ （現場透水試験）であり、地下水位はGL-3mである。

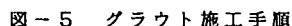
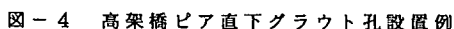
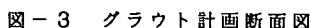
2・2 グラウト計画の概要

コンペンセーショングラウトは、ソレタンシュ工法（二重管ダブルパッカー工法）を用いてトンネル直上の構造物や周辺構造物の基礎底盤の下に繰り返し注入を行い、これらの構造物や地盤の沈下管理（モニタリング）のもとで注入箇所や注入量等の調整を行う。本工区で施工するグラウトは英国鉄道高架橋ピアやそのアーチ部の直下を含め、トンネル掘削により影響がある範囲に一定間隔で注入孔を配置している。また

コンペンセイショングラウトは施工期間中トンネル掘削に支障がない限りモニタリング結果を監視しながらほぼ毎日のように実施されるものである。また、当現場では高架橋ピアの下（テラス礫層下端から約1.5m 上部）にグラウトによるアップリフトを効果的に、バランス良く高架橋のフーチングに伝達するために、 10kgf/cm^2 以上のサンドゲル強度が見込める活性シリカ懸濁グラウトによるグラウト・スラブ(semi rigid slab)を厚さ約1.6m で構築している。コンペンセイショングラウトの施工手順は、各注入ポイン

トに対して3段階に分けられ、トンネル掘削中に行うグラウト以外に、トンネル掘削中の沈下の修復を効果的に行うための事前処理としてのグラウト、さらにトンネル掘削通過後の残留沈下の修復のための事後処理としてのグラウトも重要である。(図-5参照)

モニタリングは英国鉄道高架橋と周辺の構造物に設置された計測機器による構造物の挙動と、現場内外の中に挿入された計測機器による地盤の変形挙動、さらに構造物や地盤に設置された定点のレベル観測による挙動を毎日数回定期的に計測して、動態観測データとしている。これらのモニタリング結果を毎日検討することによって翌日のグラウトの施工位置（グラウト



ピア間限界変形角 θ	1/500 以下
隣接ピア相対沈下量 S	10mm 以内
レール間相対変位角 θ	1/1000 以下
軸直角方向水平移動量	5mm 以内
軸方向水平移動量	1mm の 0.05% or 5mm

1ステージ当たりの注入量	50 L/Stage
注入速度 v	250 L/hr
適正注入圧 p_{min} p_{max}	8 kgf/cm ² 12 kgf/cm ²

4. 沈下管理データによる考察

本現場で施工されるトンネルは、駅舎部のコンコース、エスカレータ部のトンネル、軌道トンネル等があり、コンペンセーショングラウトの評価は、最終的には全体のトンネル掘削を通して、比較的長期間のデータによって判断することになる。しかし、各高架橋ピアごとのグラウトはそれぞれのトンネル掘削の進行に合わせて適宜実施されることから、ある高架橋ピアに対するトンネル掘削の進行とモニタリングによる沈下量の動向を考察してみた。考察したケースは西行き軌道トンネルの掘削切羽の進行に伴う高架橋ピア(No.98,99)の場合である。

4・1 グラウトしない場合の推定沈下量 コンペンセーショングラウトを施工しない

い場合の軌道トンネル掘削時の推定沈下量を図-8に示す。沈下量の計算は、FEM2次元弾塑性解析により、応力解放率を考慮しない素掘り状態での結果である。解析結果より地表面での沈下量は15.6mmを示した。

4・2 モニタリングデータの考察

高架橋ピアNo.98とNo.99のレベル測量とグラウトの施工実績を図-10、11に示す。沈下量は施工前を基準とする絶対沈下量で5日間の時系列である。また、グラウトは5日間の内中3日間の両高架橋ピア直下に関するグラウト孔についての実績数量を示しており、各グラウト手順(フェイス)毎に分けて表示している。また、それぞれのグラフの横には代表的なグラウト孔断面図を示し、各グラウトフェイズの実施ステージを明示した。図-9には期間中のトンネル切羽(西行き軌道トンネル)の進行状況を示した。図-10、11に示した高架橋ピアNo.98とNo.99それぞれのグラウトを図-5に示すフェイズ毎に示すと次のようになる。

PHASE1: テラス礫層とロンドン粘性土層の層境から、約1m下より駅舎部コンコーストンネルのクラウンの上約4mまでをグラウトステージ一置きに施工

PHASE2: テラス礫層とロンドン粘性土層の層境を中心に、層境から約1m下よりグラウト・スラブ下端までを連続したグラウトステージで施工

PHASE3: PHASE1で施工したのと同じ深度で、まだ実施していないステージで同様に施工する。

図-10、11から、PHASE2のグラウトを層境からグラウト・スラブの下端まで実施することによって、トンネル切羽通過時の急激な沈下を抑え、切羽が通過しセグメント構築直後に、PHASE3のグラウトをロンドン粘性土中に実施することによって、地盤を昂上させていることが観察される。PHASE3のグラウトは一度割裂注入により密実化し強度増加を図った粘性土層へ再度割裂注入することによってさらに土を強化し、割裂による昂上効果をあげている。その結果、翌日の相対沈下量はプラス方向へと転じており、図-8の沈下解析で予想された沈下量

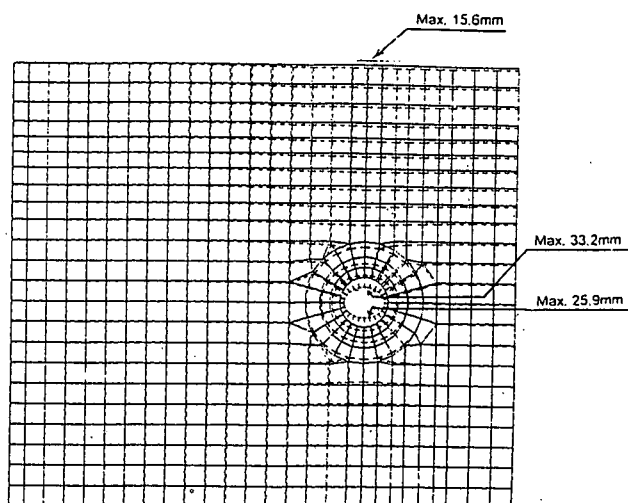


図-8 沈下量の解析

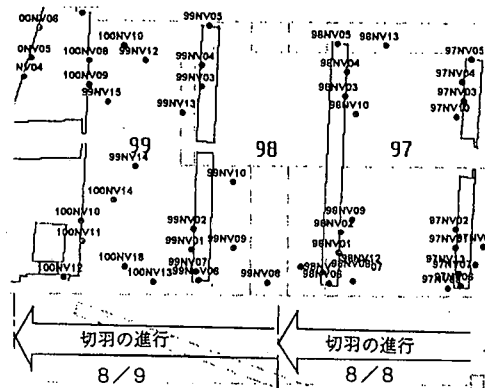


図-9 切羽の進行(西行き軌道トンネル)

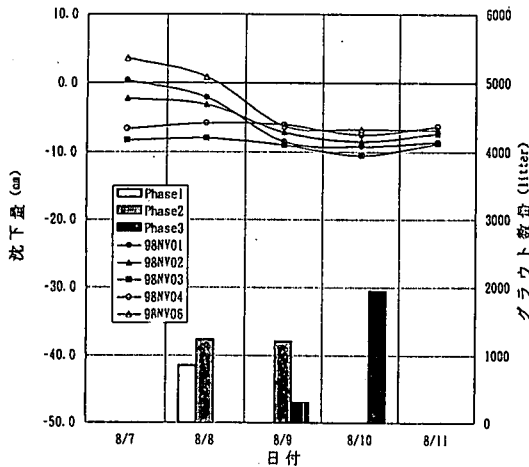


図-10 高架橋ピア(No.98)の沈下量とグラウト実績

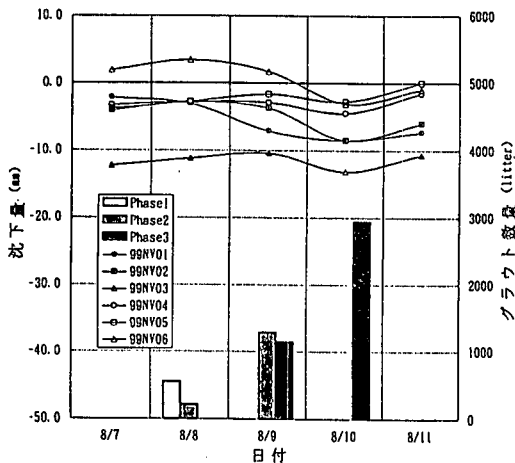
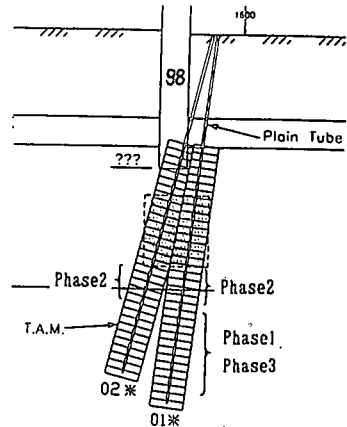
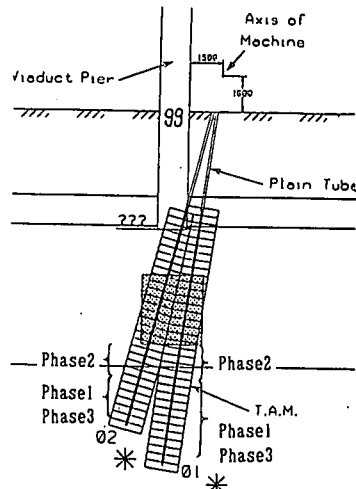


図-11 高架橋ピア(No.99)の沈下量とグラウト実績



を下回る結果となっている。さらに、高架橋ピアNo.98、99の両者の沈下量の差を比較しても、ピア間相対変位量管理基準値の10mmを十分順守する事ができている。また、両ピアのPHASE3のグラウトの数量と昂上量を比較すると、昂上量はグラウトの注入量に依存している傾向が見られる。

5. おわりに

本報告では、コンペンセーショングラウトの実施報告を5日間のデータについて行ったが、現場では複数のトンネル切羽の進行や拡幅施工に伴ってほぼ工期全体にわたって継続的に実施されている。今回紹介した西行き軌道トンネル切羽の進行は20m/日であった。しかし、例えば駅舎部コンコースの掘削では人力施工による拡幅が行われ、切羽の径も大きいいため切羽の進行はさらに遅くなる。従って、沈下の影響範囲や沈下量が大きくなることが予想され、グラウトの施工方法も異なるであろう。今後は、各種トンネル切羽の異なる場合の比較や、もう少し長期的な視野での考察で引き続き報告していきたい。

<参考文献>

- 1) Mair, R.J., Hight, D.W.: Compensation grouting, World Tunnelling (November), pp361-367, 1994.
- 2) Harris, D.I., et al.: Observations of ground and structure movements for compensation grouting during tunnel construction at Waterloo station, Geotechnique 44, No. 4, pp691-713, 1994.