

報文

デリーメトロプロジェクト

鶴丸 雅徳*

1 はじめに

デリーメトロプロジェクトは、インドと日本の円借款の最も成功した例として取り上げられる機会の多いプロジェクトである。1995年末から弊社がコンサルタント業務に参入して20年以上が経過しているが、フェーズ1から始まった地下鉄工事は現在フェーズ3に入り、2017年秋の開業を目指して急ピッチで工事が進んでいるという状況である。

弊社はフェーズ1ではエンジニアの立場であったが、フェーズ2および3ではデリーメトロ公社のアドバイザーとして都市鉄道建設事業の施工監理に携わっている。建設工事の契約条件書は、FIDICのイエローブックを施主側で若干修正が加えられたものが使用されている。

表-1に示すように、フェーズ3の完成のときには合計で約350kmの鉄道ネットワークが構築されることになる。これは、全世界的に見ても非常に大規模な都市鉄道網を非常に短期間に整備した例として注目されている。これはひとえにインド政府側のやる気と、それに協力を

惜しなかった日本政府とJICAの努力の賜物である。それに微力ながら参加してきた弊社の一員として、筆者も誇らしく思うところである(図-1)。

2 デリーの地質状況

デリーの地質は、一般にデリーシルトと呼ばれる沖積層の砂質シルトである。普通地表面下20m程度でN値が30前後で、地下水位も地表面下10m以下の低いところが多い。地盤は比較的固く、実際10m程度なら直で切っても自立するような所が多い。したがって、民間企業の建築工事現場を覗いてみると、土留めなしで隣のビルの真横を掘削しているような施工状況を普通に観察することができる。つまり、一般の建設業者にとって土留めという観念に乏しいのが現状である。そのようなローカル業者に初めて地下鉄建設という高度な技術を要する施工を実施させることは大きな困難を伴うものであった。

図-2の黄色っぽい部分がデリーシルト層、赤色が岩層である。

地下鉄建設における地質条件で大きく工法を左右するのが岩の存在である。フェーズ1および2では工程を大きく左右するような岩掘削はほとんどなかったが、フェーズ3では岩掘削に困難を極めていた工区がある。それはデリー北部、いわゆるオールドデリー付近からニューデリー南部にかけて、帯状に深度10m付近から珪

表-1 デリーメトロプロジェクト出来高表

	期 間	高架 (km)	地下 (km)	計 (km)
フェーズ1	1998～2006	47.43	17.67	65.10
フェーズ2	2006～2012	74.38	33.18	107.56
フェーズ2 空港線	2007～2010	7.00	15.70	22.70
フェーズ3	2012～2017	100.63	53.78	154.41
		229.44	120.33	349.77

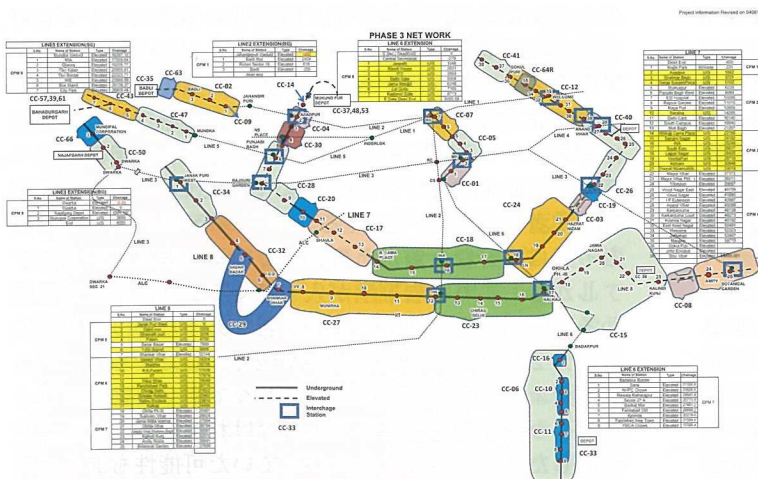


図-1 デリーメトロ・フェーズ3

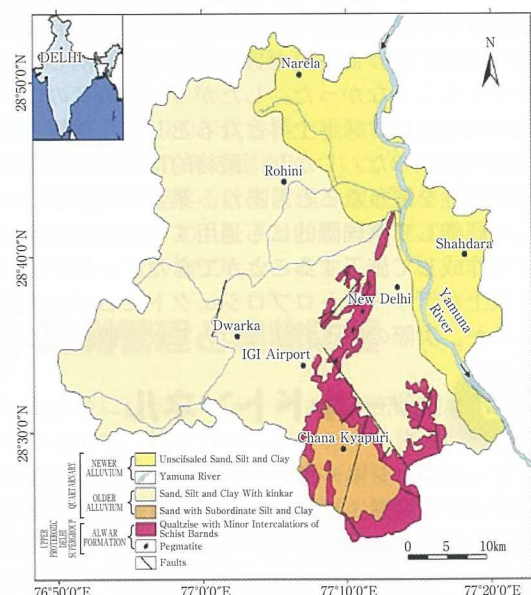


図-2 デリー地質図

* TSURUMARU Masanori (株)オリエンタルコンサルタンツグローバル 軌道交通技術部 プロジェクト部長, 技術士 | 東京都渋谷区本町3-12-1 住友不動産西新宿ビル6号館

岩の層が見られる場所である。これは非常に硬い岩で、一軸圧縮強度は100MPa以上もある。

特にデリー市内における岩についていえば、起伏が激しく20m離れれば、現れる岩の高さがかなり違う(写真-1)。例えば、駅の上り線側と下り線側で高さが10m違う場合がある(写真-2参照)。

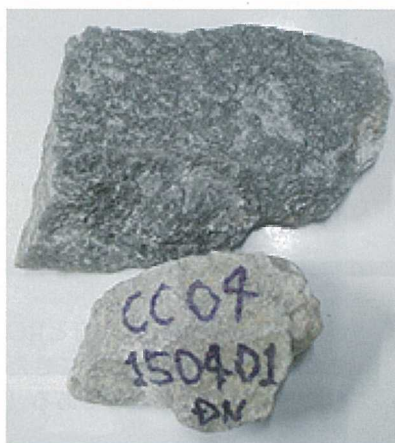


写真-1 岩サンプル



写真-2 ジャママスジッド駅土留め状況

トンネル施工の教科

書には200mごとに土質調査ボーリングを行う旨の記述があるが、これでは到底不十分と思われ、当プロジェクトのアドバイザーとしては50mに1ヵ所の調査ボーリングを提言している。さらに当地地下鉄建設の調査ボーリングの問題に、トンネル路線が住宅密集地帯の下部を通過することにある。日本では区分地上権が存在し、原則民地以外の道路下などに地下鉄路線を計画する。しかし筆者の経験では、先進国では知らないが、途上国では民地、すなわち住宅の下に地下鉄を通すことは普通に行われている。デリーメトロも特にオールドデリーの住宅密集地帯下部にトンネルが計画されたので、ボーリング調査を適切に行うことが不可能で、調査結果が現状と大きく相違する事例がたびたび発生した。

当地での筆者の困難に、こちらの技術者の岩に対する大きな認識不足があった。設計者から経験が不足している。岩に対するエンジニアリングが広く一般化していないので、岩掘削に対する系統だったエンジニアリングが全くない、貧弱な対応しかできない状況であった。ローカル業者に筆者が岩の定義について尋ねると、多くのエンジニアからの回答は「普通の機械で掘削できない土のこと」という答えでしかなかった。岩には分類があり、その強度に従って対処が異なることを説明しても全く分かってもらえなかった。したがって、筆者のコメントは工程を遅らせコスト上昇となるとして、理解されるまで時間がかかった。しかし、最終的には業者が経験のある設計会社を雇ったこともあり、業者が岩掘削について正しく認識して、国際的にも通用する岩掘削の評価スペックを作成して施工することができた。

以上がデリーメトロプロジェクトにおける土質状況であるが、実際の施工方法について以下概説する。

3 シールドトンネル

シールドトンネルについての一般的な常識は、シールドマシンの発進・到達には必ず土留め壁背面を地盤改良して、立坑側にはエントランス・パッキングを施すということである。これまで地下水位が高いのが当たり前のような地域で仕事してきたのがその理由になるかと思うが、デリーでは必ずしもそれらは不要であることを知ら



写真-3 シールドマシンカッターヘッド

された。もしかしたら、日本のゼネコンが施工した場合、上述したような仮設構造物を普通に施工して、100%見事な発進・到達を演出するかもしれない。しかし、地下水位が低くて条件が許すのなら、発進・到達における地盤改良も到達におけるエントランス・パッキングも省くことが可能だということである。もし80%程度の発進・到達が可能なら、それぐらいのことを行ってコストを削減する努力をしないと、海外での競争には勝てないと感じている。

その他こちらの業者に多く雇用されているヨーロッパ人のやり方を見てみると、日本のトンネル工事における仮設備、例えばトンネル内に設置する作業ステージなど、省力化可能な余地もまだ残っていると思う。

トンネルマシンはすべて土圧バランスで、54kmの地下区間に36台のマシンが投入された。ほとんど外径約6.6m、セグメント内径は5.7mまたは5.8mを使用している。デリーシルトのトンネル掘進についていえば、月進300mで業者は見積もってくる。土圧バランスのマシンにとっては良好な土質だと理解している(写真-3)。

しかし、これに岩掘削が入ってくると状況が大きく変わる。前述のように非常に硬い岩であるため、掘進速度は毎分2mmというような状態が続く。したがって、カッターディスクの摩耗・損傷が激しくて、2日に一度カッターヘッドの点検修理を実施しなければならなかった。使用したマシンがパワーに劣っていた可能性もあるが、前述したように住宅密集地でも調査ボーリングをより精緻に行えば、マシンの選定、工期、コストなどで改善の



写真-4 カッターヘッド岩切削状況

余地があった可能性は高い（写真-4）。

ソフトグラウンドの掘進で何度か道路を陥没させた。大事には至らなかったが、1つの問題は水に乏しい高原台地上の古い町なので、井戸がいたる所にあった。民地にある井戸は徹底的に調査して埋めていったが、道路下に埋まっている井戸の情報はなく、マシンが井戸を直撃したことがたびたびあったのが原因である。あとボリュームロスの管理がたびたび疎かになったことがある。特に岩との境界付近では掘削土量の管理がうまくいかなかった。将来、筆者が地下鉄プロジェクトの入札図書を作製する機会が与えられれば、シールドマシンのスペックにボリュームロス管理が正確に行えるシステム導入を要求したいと希望している。

4 開削工法

デリーメトロの地下駅は多くを公園や緑地帯に建設できたので、複雑な道路移設計画は不要であった。地下に35駅が建設され、一般的に掘削幅80cmの地中連続壁による逆巻き工法を採用した。地中連続壁の安定液にはポリマーを使用して掘削したが、トレンチの崩壊はほとんどなかった。しかし安定液管理という品質管理において、掘削終了後のスライム処理が十分に行われたかどうかの疑問を持っている。スライム処理が不十分だと、生コン打設の際に生コンと安定液の交換が不十分となり、コンクリートにスライムが混入し不具合が生じる。スムーズではない連続壁のコンクリート面がたびたび観測されたことが、筆者の疑問に思うゆえんである。日本においては、生コン打設前に掘削トレンチと安定液タンクの間でいわゆるサーキュレーションを行い、スライムをふるい落とすことを行う。しかし、当地ではそういう設備がないので、掘削終了後バケットで底ざらいを繰り返すことでスライム処理としている。このことを除けば、地中連続壁による逆巻き工法はデリー地下鉄の標準工法として定着している。一方、岩掘削を伴う開削工法には苦労した。このときには2種類の工法が採用された。

1つは完全に順巻き工法で行うもので、これは用地に余裕がある場合に採用された。もう1つは逆巻き工法と順巻き工法の併用工法で、これは上記とは違って用地に限界がある道路下における駅建設において採用された。

最初の完全順巻き工法での掘削状況は、前掲の**写真-2**



写真-5 デリーゲート駅岩掘削状況

（ジャママスジッド駅土留め状況）を参照願いたい。これは上部を親杭横矢板／アースアンカー工法、下部を吹き付け／ロックアンカー工法で掘削して下から順巻きでの構築を行うもの。これは岩着までH鋼杭を削孔して横矢板とアースアンカーで押さえながら掘削して、岩が露出してくるとロックアンカーと吹き付けコンクリートを併用しながら掘削するものである。

2つ目のそれは地中連続壁工法で、可能な限りバケットで掘削して、少なくとも中床スラブまで逆巻き工法で打設する。その下の岩の部分（これは連続壁のバケットで掘削不能であった部分）は、ロックアンカーと吹き付けで連続壁下を掘削しての順巻きで下床スラブから構築して、壁を中床スラブまで立ち上げるというものである。

写真-5を参照いただきたい。連続壁の鉄筋かごに直径30cmのさや管を設置して、コンクリート打設終了後、そのさや管内をダウンザホールで下床スラブ下まで削孔して、中にモルタルを打設して仮の柱とした。連続壁下部は写真のように吹き付けと岩の状況に従ってロックアンカーを打って固めていった状況である。最初、ドバイに水平多軸のマシンがあるということで輸入することも考えたが、コスト高に加えて、筆者が調べた限りでは掘削可能な岩の一軸圧縮強度の限度が30MPaということで断念した。

この工法は筆者が1980年代香港で経験した工法であったが、250m長の駅の70%の掘削についての採用は初めてであったため、後述する計測管理を徹底して行い、駅の長手方向の掘削長を20m以下とした分割施工を行う、細心の注意を払っての施工となった。

5 計測管理と建物防護

前述したように、デリーメトロは住宅密集地地下を走る場合もあるので、特にシールドトンネル施工時の計測管理と建物防護には大きなエネルギーが注がれた。さらにデリー市内に多数存在する文化遺跡の近傍もトンネル掘進が行われたので、同様の対応が求められ、24時間体制のオンラインモニタリングが行われた。このモニタリング手法は、インドにおいてはデリーメトロプロジェクトで初めて導入された。その後、現在ではインド国内各



写真-6 建物補強状況（屋外）



写真-7 傾斜および沈下計測ポイント設置状況



写真-8 三次元ターゲット設置状況

地のメトロプロジェクトにおいてスベックインされて、標準手法となっている。

今回問題になったのは、現場がオールドデリーの非常に貧弱なレンガ作りの建物密集地下をシールドマシンが掘進したことである。行ったことは、まずトンネル影響範囲内のすべての建物の調査を行い、避難すべき建物と補強が必要な建物の特定である。写真-6は建物の補強状況である。

さらにトンネルの影響範囲内のすべての建物に対して、傾斜・沈下・クラック・振動の計測を原則毎日2回行った。シールドマシンの影響範囲については4時間に1回の計測を行った。

写真-7の左壁面の黒色の円盤に専用の機械を設置し



写真-9 自動傾斜計設置状況



写真-10 オンラインモニタリングデータ送信装置設置状況

て傾斜を、コーナー右の鉄にスタッフを置いて沈下を計測した。ちなみに、この建物のコーナーはトンネル掘削後19mm沈下した。

写真-8の建物のコーナーに設置された黄色の三次元ターゲットは、そのセンター点の座標をセオドライトで計測することによって、建物の三次元の動きを管理した。

写真-9、写真-10は文化遺跡の計測状況である

この自動傾斜計は文化遺跡の上に設置され、24時間オンラインで計測結果を事務所のPCにインターネット回線を使って送信し、そこからさらに関係者の携帯電話に送信して管理した。

6 おわりに

当プロジェクトのフェーズ3が終わりに近づき、施主のデリーメトロ公社（DMRC）はフェーズ4を予定している。次の計画では高架および地下区間合計で約100kmの延伸を計画している。今後どのように進んでいくか不明であるが、技術的には既存地下鉄路線との交差も増え、地下も深くなる可能性もあり、岩掘削や建物防護などさらなる難しい問題も抱えることになると推測される。そこで、個人的にはこれまで得た知見を活用して、施主のデリーメトロ公社に対してさらなる細やかなコンサルタントサービスを実施することにより、さらなる延伸事業にも寄与したいと希望している。