

(1) 概要

神戸市の地下鉄は全体計画路線約36kmであるが、第一期線の建設計画としては本市が開発中の須磨ニュータウンの中心である石谷駅から板宿、新長田、三宮へつなぐ新幹線新神戸駅)に至る約13.4kmで、このうち石谷駅から新長田駅の5.7kmを第一期工事とし昭和47年11月着工、昭和52年3月営業を開始した。

第一期工事区間の石谷駅～妙法寺駅間は山岳トンネル工法で延長約1.2km、勾配24%、妙法寺駅～板宿駅間も同じく山岳トンネル工法延長約1.8kmと削制工法240mと単線並列シルド362mが続いており、勾配29%であり、板宿駅～新長田駅間は削制工法で施工した。この区間の地質と大別すると石谷駅～妙法寺駅にかけては第三紀中新世の神戸層で、砂岩、レキ岩、泥岩、凝灰岩の互層をなしており地下水に対して膨潤性を呈する。妙法寺駅～板宿山麓にかけては六甲花崗岩が主体で相当深層風化しておりもあり、板宿山麓～新長田駅にかけては沖積層、洪積段丘砂レキ層、大沢層となっており大きく3つに分類される。

(2) シルド付近の地質。

当シルドは神戸市須磨区に位置するが、標高300m程度の山にはさまれ石谷筋を流れる妙法寺川(現在川幅10m程度)によって形成された扇状地をなしており、全体としてシルド到達部より発達部に勾下り勾配となっている。

土層の構成であるが沖積層は発達部付近で層厚8m程度であり砂層、砂レキ層、粘性土層が入り組んだ層をなしN値は10～20程度で発達部にむかうにしたがってその厚さは薄くなり到達部付近で約5mとなっている。砂レキ層は粗砂が主体、砂層はN値5～10でゆるく粘性土はシルト混り細砂で腐食物を混入しN値は2～10である。洪積層上部は粘性土、砂質土層からなり粘性土層は暗灰色又は黒灰色でシルト、シルト混り砂でN値は10～15でシルドのカバーロックとして重要な役目をなすものであるが、層厚が0.5～3mと変化しており到達部付近にはほとんどない状態であり、砂質土層は層厚0.2～2mでN値は10～20である。洪積層下部は段丘砂レキ層で層厚13～18mと厚く存在しておりN値はほとんど50以上である。大沢層は砂レキ層、砂層、粘性土層の互層からなっておりN値はすべて50以上でよく締まっている。

以上より判断してシルドはほとんどの区間においてかなり締った砂レキ層を通過することになるが、地下水もこの付近では被圧水で湧水も多いと考えられるため補助工法としてパイロットシルド工法を採用した。

(3) 各種試験結果について。

まず現場透水試験の結果であるが揚水試験によるもの、単孔式ボーリングによる注水法、回復法によるものなどの結果から考察して、段丘砂レキ層の平均透水係数は 10^{-3} オーダーである。現場透水試験では1%で送気パイプのシルドコンクリートと粘性土層の境目より漏れが発生、1.27%では鋪設面のクラックや倒潰の境目から発生、1.5%では約10m程度のグラントでブロー現象が発生した。更に圧気に伴う酸欠の問題であるが、酸欠土層となり、更に洪積段丘砂レキ層を対象として調査した結果、送気圧1.6%、22m離れた地奥で酸素濃度3.5%の酸欠現象が発生したが、継続的に空気を圧送すれば酸化能力に限界があるのか酸素濃度は回復している。

(4) パイロットシルド

シルドにおける第一の問題点はやはり水であり、これに対応するには圧気工法が一般的であるが、土被り、地下水、透水係数、カバーロックの状態、酸欠土層等々から圧気工法を採用するにしても数制限とする必要がある。更にこの付近の地上条件が、大塚車交通規則、一方通行等の道路条件、民家、商店街が密集している等と悪く、地上からの補助工法の大々的な採用は困難であることから前述の如く、地下水位低下、地質確認の目的で

パイロットシールドを採用した。

パイロットシールド施工に際しても、本線シールドと比較して断面的には $1/5$ と小さくはっているが、地中の条件に異なりはなく、やはり圧気圧(小さくせざるを得ないため)地下水を強制下げる工法として民衆が聚集しているセーパ公道上で362m間にわたって10本のデンプウエルを設置した。

一方パイロットシールドの主掘りは16~21mであるが、そのうちカバーロックとして期待していた粘土は、一軸圧縮強度2.3~2.5 kg/cm^2 、圧密降伏荷重4.9 kg/cm^2 であるから、水化後土による圧密降伏はほとんど判断されれば、施工地盤沈下は避けられないものと思われる。その主な原因はデンプウエルで掘削するがこの沈下対策としては1次注入を人工軽量骨材で毎日1mごとに進捗させ、2次注入でセメントミルクを1日の作業完了時に実施した。

次に施工実績であるが、土壌の水質から、掘進後80mは砂れき層(約20cm大のれき混入)と砂層の互層で、当初パイロットシールドの底部に現れた大砂層からの湧水が心配されたが、ほとんどなかった。80m~250mの間には調査で確認出来なかった粘土、シルト層が切羽の一部又は全面に現れ、層間の湧水が多くなった。崩壊はなく、更に掘進までの110m間は50~60cm大の角れきを含有段立砂れき層で掘進通りであった。掘進は深夜の静けさ下で進められたが、平均6.4m(8リング)、1日最大8mである。最大注入についての実績は人工軽量骨材の充填率79%、セメントミルクは134%で地盤沈下は観測の結果、掘進部(無圧気圧間)で最大8mm、平均3~5mm程度で沿道家屋の被害も皆無であった。なお圧気は計画通り0.3~0.7 kg/cm^2 で酸欠問題もなく施工された。デンプウエルによる地下水の揚水量は通常時で1本あたり35~45 l/min (max 70 l/min)でパイロットシールドクラウン上10m以下となった。

(4) 本線シールド

パイロットシールド掘進後デンプウエルの運転を中止し、セグメントの裏込め注入マラゲから地山に吸水パイプをとりつけ自然排水を行なった結果、セグメント目地からの湧水がめだせぬ排水量は350~400 l/min と少ないにもかかわらず地下水位を本線シールド下部付近まで下げることが出来た。しかし到達部付近80mについては、やはり地下水位が高いため、パイロットシールド内からのデンプウエルポイントを設置し強制排水を行なったが初期排水量100 l/min 、通常時20 l/min で水位低下はわずかであった。

本線シールドの補助工法としてはその地盤掘部から山陽電車橋脚部にかけて40m間を円型(一部全断面)にRC3尺以上の構造物は円型又は長方形型に、更に到達部80m区間については切羽の防護、荷重防止、地盤強化を目的として裏込め注入を実施した。特に全延長362m間ほとんど民衆下を通過するため、地盤の崩壊による施工家屋の二次災害を防止することを目的としてクラウン部120°厚さ2mの範囲で切羽注入を実施した。この切羽注入の施工にあたっては、地質、線型から掘進に伴う騒音、振動を考慮して昼間掘進、夜間切羽注入とした。

シールド掘進機は大径花りの砂れき層であることを考慮して掘削土砂とバルーンに攪き込むため、20%のバックホーを中央部に、最上段には浮動設計のローリングマシンを2台装備した。シールドジャッキは100t型3台を装備したが、地山貫入は困難で若干先掘りして排力2000t程度で掘進した。圧気は平均0.4 kg/cm^2 であったが付近の井戸で酸欠臭気が発生したため対策も行った。最大掘進長は4.5m(5リング)、平均で3.4mである。

本線シールド掘進に伴う地盤沈下は有限要素法で計算した結果では17.9mmの想定沈下量であるが実際の沈下量は最大30mmであり沈下の影響範囲はシールド外面からそれぞれ1.5m程度の範囲である。これは補助工法による地下水水位低下工法が効果的であったこと、地盤改良による切羽の安定があったこと等によるものと思われる。

おわりにあたりシールドの施工は始めての経験であるがうすい裏込め段立砂れき層中で地下水が豊富であることから一度は地盤崩壊がわくと覚悟をしていたが、それもなく更に地下水も地盤沈下も少なく順調に工事が完了したのは喜である。