

ソイルネイルを使用した大規模オープン掘削工法の設計・施工と計測結果

Design, Construction and Monitoring Result for Bulk Open-exca- vation Works Using Soil Nails

杵築 秀征*

Hideyuki Kizuki

上田 幸生*

Yukio Ueda

要 約

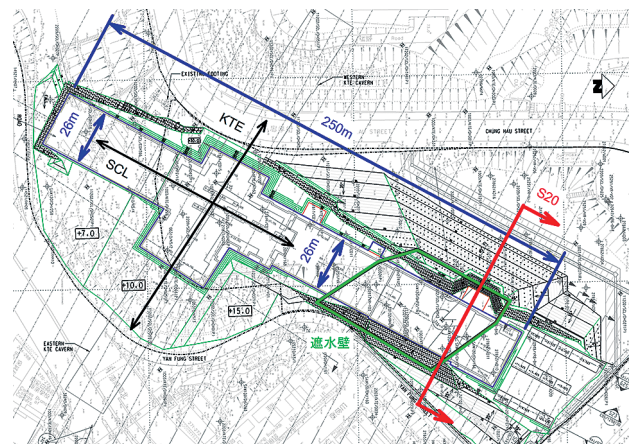
観塘延伸線工事（KTE）は、香港九龍地区を東西に走る既設の観塘線の油麻地駅から新設される黄埔駅までの延伸工事である。延伸工事により、新設される何文田駅舎部は、現況地盤からの掘削深さが約 50 m となり、土留め壁を用いた掘削が標準案であった。土質調査の結果から、表層以外は比較的良質の地山であったことに加え、工期短縮、経済性にも優れていたことから、ソイルネイルを用いた大規模オープン掘削工法を代案として提案し採用した。施工開始前の事前解析に基づき法面の計測管理を実施し、結果として法面の変状は発生せず、本工事の土質条件に対して合理的な設計であったと判断することができた。本論は、ソイルネイルを使用した大規模オープン掘削工法の設計、施工と計測結果について述べるものである。

目 次

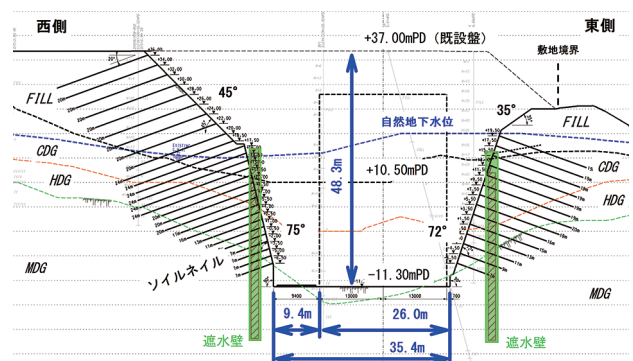
- § 1. はじめに
- § 2. 設計のための諸条件
- § 3. 斜面の安定検討および地盤変動予測解析
- § 4. 計測計画
- § 5. 計測結果および比較考察
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

何文田駅舎部の平面形状は、幅 26 m、延長 250 m であり、図一1に掘削平面図を示す。現況地盤からの掘削深さは約 50 m で、床付け地盤までの主な土層は、Fill（盛土）、CDG（完全風化花崗岩）および HDG（高度風化花崗岩）からなる（図一2）。なお、法面の最大勾配は 75 度であり、約 20 m の長尺ソイルネイルおよび吹付けコンクリートにて法面の安定を図りながら掘削を行う。このような急勾配かつ大深度の掘削に対し、ソイルネイルによる大規模掘削を適用した施工事例は少なく、安定計算、FEM 解析等の設計に基づいた慎重な掘削、多数の計測器機による計測管理と情報化施工が求められた。



図一1 掘削平面図（何文田駅舎部）



図一2 セクション 20 標準断面図

* 海外（支）観塘延伸線工事事務所

表一 設計土質定数

土層	単位体積重量 γ (kN/m ³)	内部摩擦角 ϕ' (度)	粘着力 c' (kN/m ²)	変形係数 E (MPa)	透水係数 k (cm/s)	一軸圧縮強度 qu (MPa)
Fill (盛土)	19	37	0	60	5.00E-04	-
CDG (完全風化花崗岩)	19	39	5	150	2.50E-04	-
HDG (高度風化花崗岩)	19	40	15	400	5.00E-05	-
MDG (中度風化花崗岩)	25	-	-	10,000	5.00E-07	12.5~50.0

§ 2. 設計のための諸条件

2-1 設計手法

香港においては、ソイルネイルを使用した法面掘削の設計手法は、GEO (Geotechnical Engineering Office) 発行の "Guide to Soil Nail Design and Construction" にて確立されており、本設計もこれに準じて行っている。具体的には、地山に設置されたソイルネイルは受動的に働くと仮定され、地山に変動が生じた際にソイルネイルに引張力が導入される機構として計算される。本工事の主な設計項目は「斜面の安定計算」ならびに「地盤変動予測解析に基づく変位量の算定」であり、詳細は後述する。

土層構成および法高等を考慮し、設計の観点からクリティカルと考えられるセクション 20 に対し検討を行った。セクション 20 の標準断面図を図-2 に示す。

2-2 地盤条件および地下水位

本工事の土層構成は、表層に Fill 層その下部には CDG 層および HDG 層が存在し、岩盤層である MDG 層が現れる。設計時に採用した各土層の設計土質定数を表一に、GEO による岩質および土質の参考写真を図-3 に示す。岩盤層の深さにはばらつきがあり、浅い箇所では地表面から 10 m、深い箇所では 50 m 以上で岩盤層が出現し、セクション 20 の岩盤層は、最終床付け面以深となる。

図-2 に示す青線は、設計に用いた自然地下水位である。企業先の要求事項に「敷地境界における地下水位低下量は 1 m 未満とする」と明記されており、水位低下抑制を目的としてグラウトによる遮水壁の造成を計画した。

2-3 ソイルネイルの仕様

本工事で適用している一般的なソイルネイルの仕様詳細を図-4 に示す。なお、駅舎周辺における将来の建築工事に対応する必要がある、ソイルネイルの芯材には、切削可能な GFRP を一部適用している。

岩盤層が深く、法面上段において岩盤層に定着できないソイルネイルは、CDG 層および Fill 層を定着層として考えている。岩盤の設計付着応力度は、香港の設計基準書 (Code of Practice for Foundation) に基づき 0.35MPa であるのに対し、CDG 層、HDG 層ならびに Fill 層におけるグラウトと地盤との設計付着応力度は、ソイルネイル中央付近に作用する有効応力により決定する。

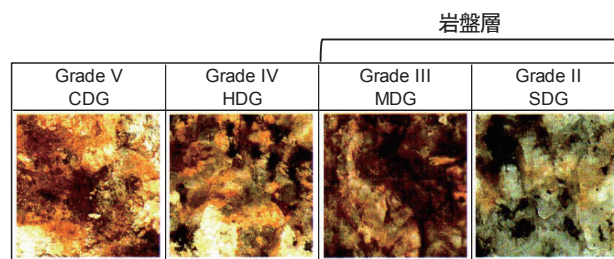


図-3 GEO による岩質および土質の参考写真

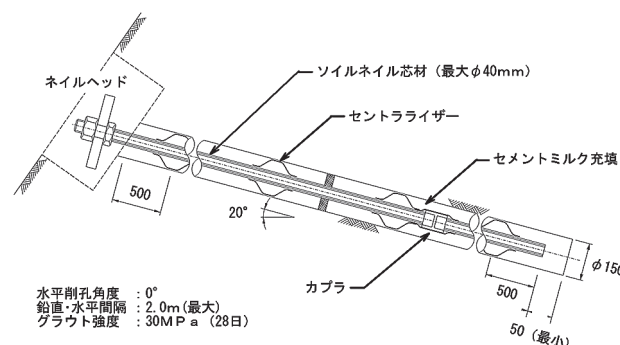


図-4 ソイルネイル仕様詳細図

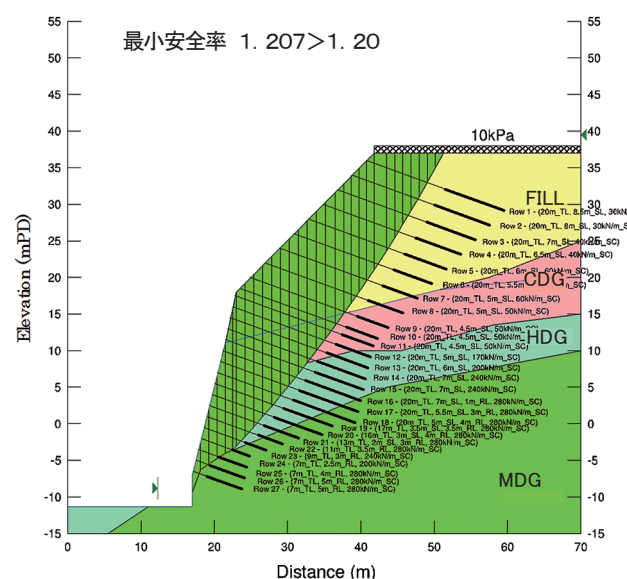


図-5 斜面の安定計算最終掘削時 (セクション 20 西側)

§ 3. 斜面の安定検討および地盤変動予測解析

3-1 斜面の安定計算

斜面の安定計算は、解析ソフト Slope W を用いて Morgenstern-Price 法により行う。ソイルネイルは、引抜き抵抗力を荷重として与えることで評価し、計算は各掘削ステージで行っている。最終掘削時に必要最小安全率 1.20 を満足するようソイルネイルを配置した。セクション 20 西側における解析結果を図-5 に示す。

先述のように、1 m 以上の自然地下水位の低下は許容されないことから、解析は地下水位が低下しない条件で行う。また、実施工ではソイルネイルの口元からグラウト材が流出することを確認しグラウト充填完了としており、自由長部にもグラウトは充填されるが、解析上、ソイルネイルのグラウトは安定計算で得られるすべり面よりも深部の定着部のみモデル化している。なお、地盤評価の妥当性、グラウトの充填性およびソイルネイルの健全性を確認することを目的として、現場では試験用ソイルネイルにて引張試験を行った。

3-2 地盤変動予測解析

斜面の安定計算で決定したソイルネイルの仕様に基づき、FEM 解析ソフトである PLAXIS により変位量の算定を行う。解析はソイルネイルを設置する各掘削ステージに対し行い、得られた解析値に基づき計測管理に用いる管理値を設定する。最終掘削時の解析結果を図-6 に示す。図-6 に示すように、最終掘削時における水平および鉛直の解析変位量は Fill 層で最大となり、それぞれ 87 mm、54 mm となる。

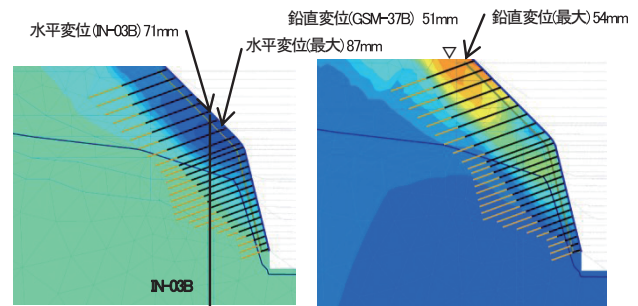


図-6 地盤変動予測解析結果（左：水平、右：鉛直）

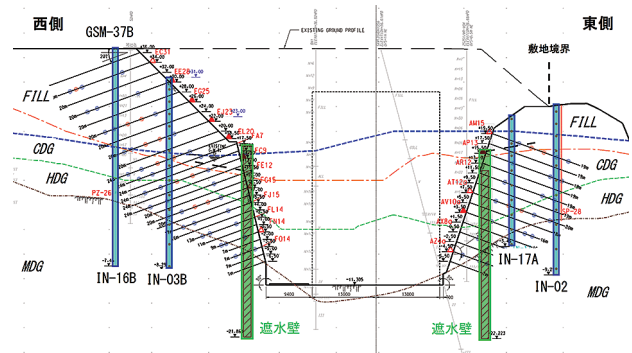


図-7 計測器機設置断面図（セクション 20）

表-2 計測器機一覧

計測器機	計測項目
傾斜計	地盤変動
プリズムターゲット (ソイルネイル頭部)	ソイルネイル頭部変位
ひずみ計 (ソイルネイル)	軸力
地表面沈下計	地表面沈下量
地下水位計測計	水位低下量

表-3 計測管理値（最終掘削時）および講じる対策

	計測管理値 (mm)	
	水平変位 (IN-03B)	鉛直変位 (GSM-37B)
1 次 (95%)	68	49
2 次 (100%)	71	51
3 次 (105%)	75	54

講じる対策	
1 次管理値	計測頻度の増加
2 次管理値	計測結果に基づく設計見直し、対策工の必要性の検討、追加計測箇所設置検討
3 次管理値	掘削中止、対策工の実施

§ 4. 計測計画

地盤変動予測解析の結果から計測管理値を設定しており、掘削に伴って生じる法面変形の動態観測を行うため、種々の計測器機を配置している。セクション 20 の計測器機設置断面図を図-7 に、また計測器機類を表-2 に示す。図-7 に示すように、計測器機は西側・東側の法面に設置する。各計測器機はほぼ同断面上に配置し、法面変形の傾向の把握および計測値の信頼性向上を図ることとした。上記に加え、法面保護の吹付けコンクリートにひび割れ等の変状が生じていないか目視により吹付けコンクリートの健全性確認を行う。計測管理値は3段階で設定し、1 次が解析値の 95%、2 次が 100%、3 次を 105% とした。表-3 に IN-03B (傾斜計) および GSM-37B (地表面沈下計) 位置における計測管理値と管理値を超過した際に講じる対策を示す。

§ 5. 計測結果および比較考察

5-1 初期段階における地山の变形

図-8 に示す計測結果は、上から、掘削進捗、傾斜計、地表面沈下計、日降雨量を表し、掘削中に特に顕著な動きを示した傾斜計 IN-03B ならびに地表面沈下計 GSM-37B に着目し抽出している。

計測結果の期間①が示すように、5～7段目（標高約26.0 mPD）のソイルネイル施工にあたり、傾斜計および沈下計の計測値が急進した。水平、鉛直変位は、当初定めた1次管理値および2次管理値を超過するには至らなかったが、この時点の掘削は45度の法面であったにもかかわらず、計測値に大きな変化が生じ、本掘削ステージにおける変形予測値を超過したため、次節で述べるように法面変形の要因を検証することとした。

5-2 変形要因の推定

はじめに降雨による影響を検証した。降雨により吹付けコンクリート背面の地下水位が一時的に上昇し、法面の滑動を助長させる可能性や、降雨など浸透水の影響により、見かけのせん断強度が低下する可能性が考えられる。しかし、日降雨量が50 mm以上の観測日は、変形が生じる以前にも確認されており、降雨による影響が法面変形の直接的な要因であるとは考えにくいと判断し、次にソイルネイルの削孔方法について検証を行った。

採用していたソイルネイルの削孔方法は、エアコンプレッサーによって排土する方法であり、図-9に示すように孔壁崩壊防止用のケーシングは使用していない。現場での施工状況から、想定以上にFill層は不均質であること、エアの高圧噴射によって本来排出すべき土量以上に排土が生じていることが確認され、削孔中に孔壁崩壊が生じ、ソイルネイル上部に空洞が生じた可能性が高いと推測された。この推測に基づき削孔方法を見直し、図-10に示すような孔壁崩壊防止用のケーシング併用法にて、以降のソイルネイルを施工するよう変更した。

5-3 設計の見直し

ソイルネイルの施工方法を見直した一方、設計の見直しも行っている。設計見直しの主な目的は、計測した法面変位量を考慮した新たな計測管理値を設けるためであり、併せて変形を抑制するための対策工を検討することにも目的としている。

まず、PLAXISにて感度解析を行い、解析による理論値と実際の変位量を相関させる。掘削による応力解放、降雨の影響による見かけのせん断力の低下を考慮し、Fill層の内部摩擦角の値を37度から33度に低減することで、変位量の相関を得た。図-11に土質定数再評価後のPLAXISによる解析結果を示す。水平方向および鉛直方向の変位量を管理するため、IN-03BおよびGSM-37Bの新たな計測管理値を表-4のとおり定めた。

次に、見直した内部摩擦角33度に基づき、Slope Wによる斜面の安定計算を行う。内部摩擦角を33度に変更した場合でも最小安全率は1.203となり、必要最小安全率である1.20を満足する結果となった。しかし、著しい変形は45度法面掘削時に発生しており、残り20 m以上の75度法面の掘削が控えていることから、初期段階の変形と言えど無視できないと判断し、セクション20の6段目

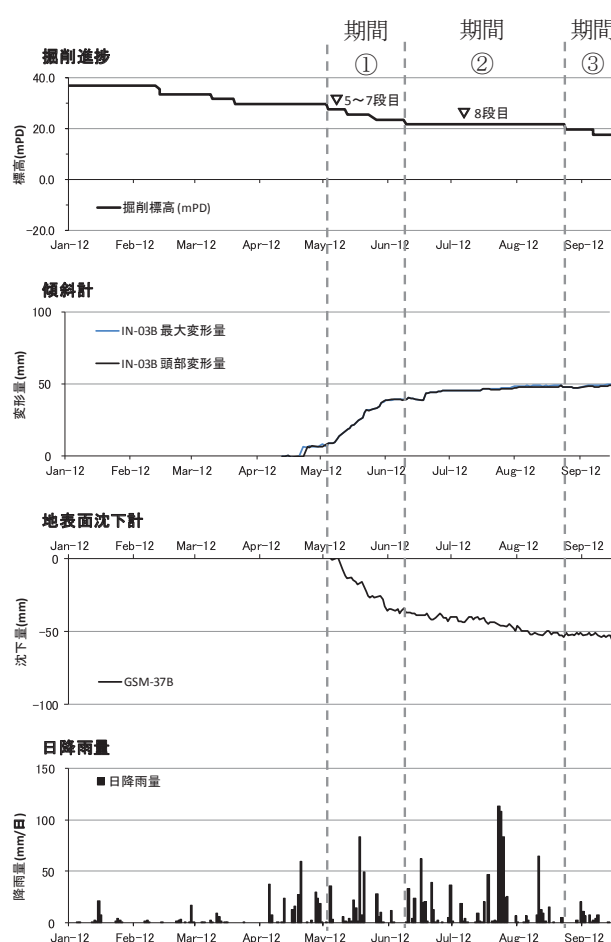


図-8 計測結果（2012年1月～2012年9月）



図-9 ソイルネイル施工状況（ケーシングなし）



図-10 ソイルネイル施工状況（ケーシング併用）

と7段目の間に12本のソイルネイルを追加打設することで、変形を抑制する対策を行った。図-8の期間②が、以上の検討および対策の実施時期を示しており、セクション20付近の掘削は約2ヶ月間中断している。

5-4 対策後の計測結果

図-12に対策実施後以降、床付完了までの計測結果を示す。図-12より、8段目以降の掘削では、傾斜計、地表面沈下計の計測値の漸増は確認できるが、急激な増加はなく、著しい変形は確認されなかった。

5-5 計測結果の考察

図-13および図-14に、IN-03B、GSM-37Bによる水平および鉛直方向の解析値と計測値の推移を示す。

各図ともに対策実施後からFill層下端までの掘削における計測値は、地盤再評価後の解析値と比較して、推移の傾向に乖離が認められ、むしろ原設計の解析値に近い傾向となっている。この差が生じた要因として、地盤の再評価にて低減した土質定数が安全側であったことが考えられる。初期段階の計測結果に合わせて土質定数の低減を行ったが、この初期段階での変形は、土質の過少評価によるものではなく、施工方法の違いにより生じたものである可能性が大きい。8段目以降のソイルネイルの施工方法を変更したことにより変形・沈下を抑制し、原設計と同様の傾向となったものと考えられる。

8段目以降のCDG層、HDG層の掘削における計測値は、水平変位および鉛直変位ともに著しい増加はみられず、原設計、土質定数再評価後の解析値と比較して、値の傾きが緩やかである。この要因としては、CDG層、HDG層の土質定数が実際に設計で採用した値より大きな値であったことが想定される。またセクション20は岩盤レベルが最も低い箇所であり、その両隣は、比較的浅い位置に岩盤レベルが確認されている。したがって、2次元の断面解析では考慮することのできない縦断方向の3次元的な影響により、解析値と計測値の差異が生じたものと考えられる。一般的には簡易な2次元モデルで設計を行うことが多いが、今後は3次元効果の影響が大きいと想定される場合は、3次元モデルにて検討する必要があると考える。

5-6 施工方法の考察

今回の施工を踏まえ、設計に加え、施工方法の選定も十分な検討が必要だと考える。5-2でも述べたように、当初エアコンプレッサーによって排土する工法を選定したことが不均質なFill層での孔壁崩壊を招いた主要因と推測される。

今回の経験から、Fill層やCDG層のように、削孔時に孔壁の自立が困難と予測される土層に対しては、あらかじめケーシング併用工法を適用する必要があると考える。一方、HDG層のように、地盤自体が粘着力を有し、孔壁

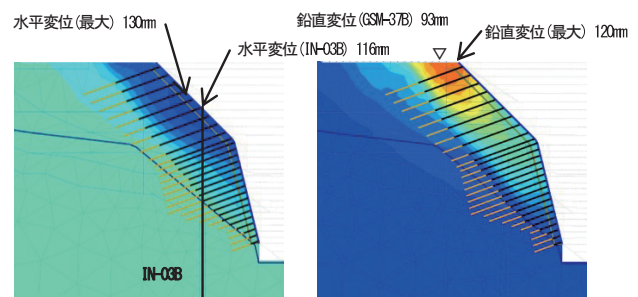


図-11 地盤変動予測解析結果—土質定数再評価後
(左：水平、右：鉛直)

表-4 計測管理値（最終掘削時）—土質定数評価前後比較

	計測管理値 (mm)			
	原設計		再評価後	
	水平変位	鉛直変位	水平変位	鉛直変位
1次 (95%)	68	49	110	88
2次 (100%)	71	51	116	93
3次 (105%)	75	54	122	97

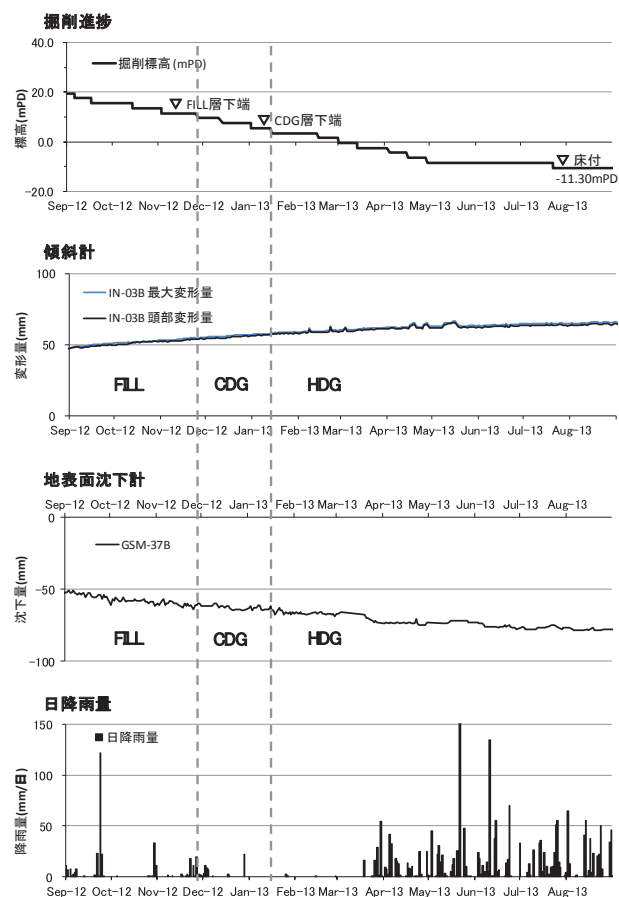


図-12 計測結果 (2012年10月～2013年8月)

の自立が期待できる地山では、ケーシング併用工法は工程を遅らせる結果をもたらすと考えられる。ただし、粘着力のみに限らず、土層構成、土被り厚、ソイルネイルの削孔径、遮水壁の影響など他の要素も複合的に作用し

ていると考えられるため、現時点でケーシングの要否を定量的に判断するには、データが乏しく困難である。今後、同種のソイルネイルを使用した掘削工事からデータを収集することにより、安全かつ工期短縮可能な工法として確立が望まれる。

なお、自然地下水位が掘削高上部に位置していることから、計画当初はソイルネイルを高水圧下で施工する必要があると考え、グラウト材を孔内に留めるための逆流防止弁を備えた装置を計画していたが、実際には使用する機会はなかった。これは、吹付けコンクリート被覆面に設置された水抜き孔によって、法面付近の自然地下水位が低下していたこと、また CDG 層および HDG 層の透水性が低く、地山内に水みちが発生していなかったことによると考えられる。このことから、日降雨量が 100 mm を超えるような大雨が観測された日であっても、水平および鉛直方向の計測値に目立った変化は見られず、法面に与える影響は軽微であったことがわかる。

§6 おわりに

6-1 まとめ

長尺ソイルネイルによるオープンカット工法は、本現場に類似の条件下で設計、施工することが可能であるが、大規模かつ急勾配の法面においては、施工に伴い、慎重な計測管理を継続することで、本工法が適用可能と考えられる。日々の施工管理に加え、計測結果を素早く入手し、計測結果の評価、設計および施工の見直しを一連で行う情報化施工のシステムを確立すること、ならびに法面変状等が発生した際には、対策の要否を迅速に判断することが、本工法の適用に際し要求される。

6-2 現況について

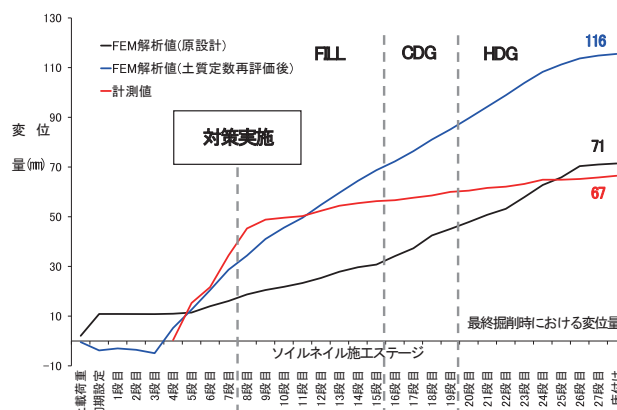
図一15に示すように、現在、法面掘削箇所は床付けまで完了しており、引続き躯体構築作業を行っている。継続的に計測を行い地山変形の有無を確認しているが、現時点で大きな変動は確認されておらず、法面は安定している状態と判断できる。

6-3 謝辞

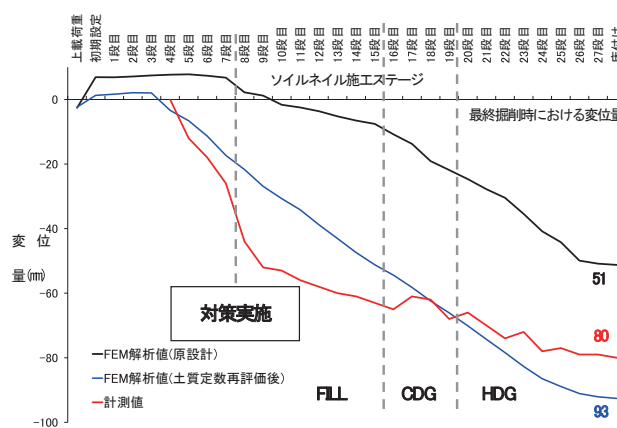
当現場に対し、本社技術研究所ならびに土木設計部の方々には多くの支援を頂いた。ここに謝辞を述べるとともに、今後の技術確立および発展に努める次第である。

参考文献

- 1) GEOGUIDE 7 Guide to Soil Nail Design and Construction : Geotechnical Engineering Office, The Government of the Hong Kong
- 2) Code of Practice for Foundation : Building Department, The Government of the Hong Kong



図一13 水平変位量 (IN-03B) の推移



図一14 鉛直変位量 (GSM-37B) の推移



図一15 何文田駅全景