

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

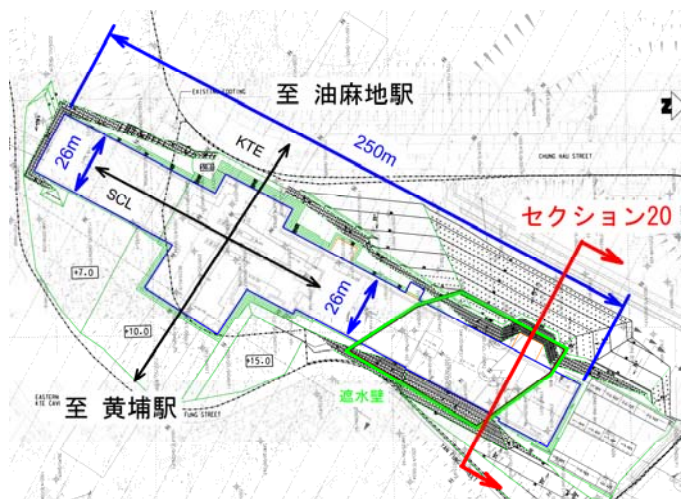
西松建設（株） 正会員 ○杵築 秀征
西松建設（株） 正会員 上田 幸生

1. はじめに

觀塘延伸線工事（KTE）は、香港九龍地区を東西に走る既設の觀塘線の油麻地駅から新設される黃埔駅までの延伸工事である。本工事の工事位置図を図－1に示す。延伸工事により、新設される何文田駅舎部の平面形状は、図－2の掘削平面図に示すように、幅 26m、延長 250m であり、現況地盤からの掘削深さは約 50m である。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。法面の最大勾配は 75 度であり、約 20m 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オープン掘削工法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。本稿では、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。



図－1 觀塘延伸線工事 工事位置図



図－2 何文田駅舎部 掘削平面図

2. 設計のための諸条件

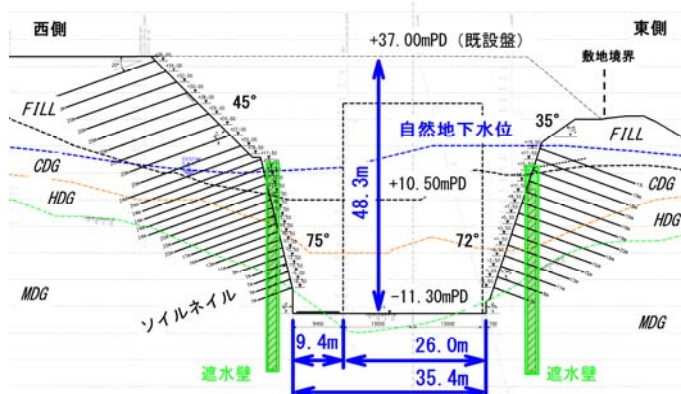
(1) 設計手法

香港での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働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。図－2中のセクション20の標準断面を図－3に示す。

(2) 地盤条件および地下水位

本施工箇所の土層構成は、表層にFill層、その下部に



図－3 セクション 20 標準断面図

キーワード ソイルネイル、大規模オープン掘削、計測、法面、香港

連絡先 〒105-6310 東京都港区虎ノ門1-23-1 虎ノ門ヒルズ森タワー10階 西松建設(株) TEL 03-3502-7693

表－１ 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

CDG層およびHDG層が存在し、岩盤層であるMDG層となる。設計時に採用した各土層の設計土質定数を表－１に、GEOによる岩質および土質の参考写真を図－４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10m、深い箇所では50m以深に岩盤層が出現する。セクション20の岩盤層は、最終床付け面以深に現れる。

図－３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1.0m未満とする」と明記されているため、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。

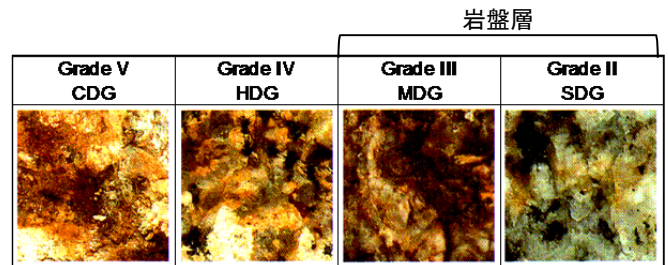
(３) ソイルネイルの仕様

本工事で使用している一般的なソイルネイルの仕様詳細を図－５に示す。なお、駅舎周辺には、将来建造物が構築される計画があるため、一部のソイルネイルの芯材には、切削可能なGFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer)を使用した。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の間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。

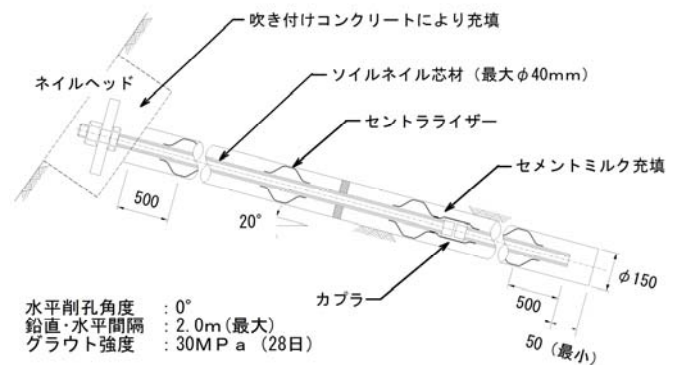
(４) 斜面の安定検討および地盤変動予測解析

１) 斜面の安定計算

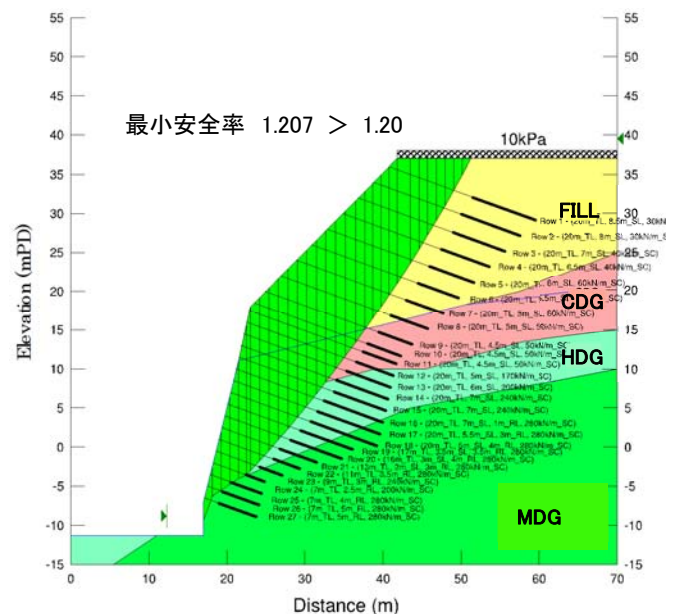
斜面の安定計算は、解析ソフトSlope Wを用いてMorgenstern-Price法により行った。ソイルネイルは、引抜き抵抗力を荷重として与えることで評価し、計算は各掘削ステージで行っている。最終掘削時にて、必要最小安全率1.20を満足するようソイルネイルを配置している。セクション20西側における解析結果を図－６に示す。前述したように、1.0m以上の自然地下水位の低下は許容されないため、地下水位が低下しない条件で解析を行った。なお、地盤評価の妥当性、グラウトの充填性およびソイルネイルの健全性を確認することを目的として、現場では試験用ソイルネイルにて引張試験を行った。



図－４ GEO による岩質および土質の参考写真



図－５ ソイルネイル仕様詳細図



図－６ 斜面の安定計算 最終掘削時（セクション 20 西側）

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および配置に基づき、FEM解析ソフトであるPLAXISにより変位量の算定を行った。解析はソイルネイルを設置する各掘削ステージに対して行い、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した。最終掘削時の解析結果を図-7に示す。図-7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87mm、54mmとなった。

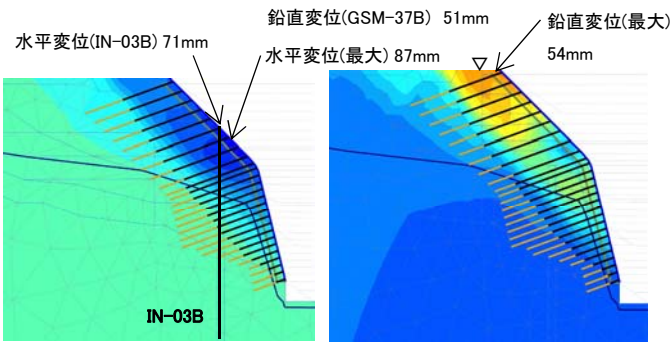


図-7 地盤変動予測解析結果（左：水平、右：鉛直）

3. 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、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た。セクション20の計測器機設置断面図を図-8に、また計測器機類を表-2に示す。図-8に示すように、計測器機は西側・東側の法面それぞれに設置した。各計測器機は、ほぼ同一断面上に配置させ、法面変形の傾向の把握と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の健全性、ひび割れ等の発生は目視により確認した。

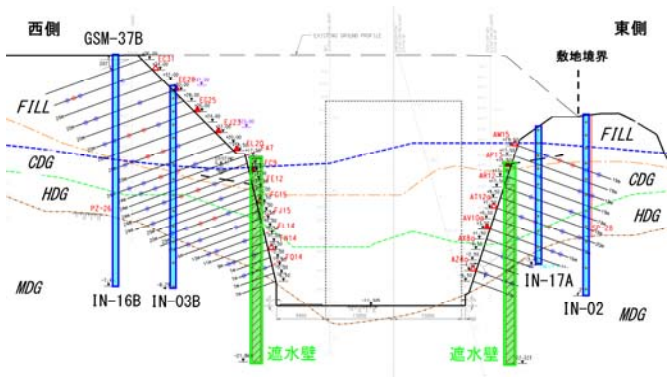


図-8 計測器機設置断面図（セクション20）

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

計測管理値は3段階に分けることとし、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。

4. 計測結果

(1) 初期段階における地山の変形

図-9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26.0mPD）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伸した。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、この時点では45度法面の掘削であったにもかかわらず、計測値が大きく変化し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。

(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、土の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50mm以上の観測日は変形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

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

な要因とは考えにくいと判断した。次にソイルネイルの削孔方法について検証を行った。

当初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-10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、Fill層は想定以上に不均質であることや、エアの高圧噴射によって本来排出すべき以上の排土が生じていることが確認された。このことから、削孔時に孔壁が崩壊し、ソイルネイルの上部に空洞が生じている可能性が高いと推測された。この推測に基づいて削孔方法を見直すこととし、図-11に示すような孔壁崩壊防止用のケーシング併用工法に変更した。

(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。設計の見直しの主たる目的は、実際に発生した法面変位の計測値を考慮した新たな計測管理値を設定することに加え、変形を抑制する対策工を検討することである。

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と、降雨の影響による土の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-12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監視ならびに管理するため、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 Fill 層の内部摩擦角の値を用いて、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あっても、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度法面の掘削時に発生し、後に75度法面の掘削が20m以上控えていたことから、この初期段階の変形は無視できないと判断し、変形抑制対策を講じた。具体的には、セクション20の6段目と7段目の間に、12本のソイルネイルの追加打設を行った。図-9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付近の掘削は途中約2ヶ月間中断することとなった。

(4) 対策後の計測結果

図-13に対策実施以降、床付完了までの計測結果を示す。図-13より、8段目以降の掘削では、傾斜計、地

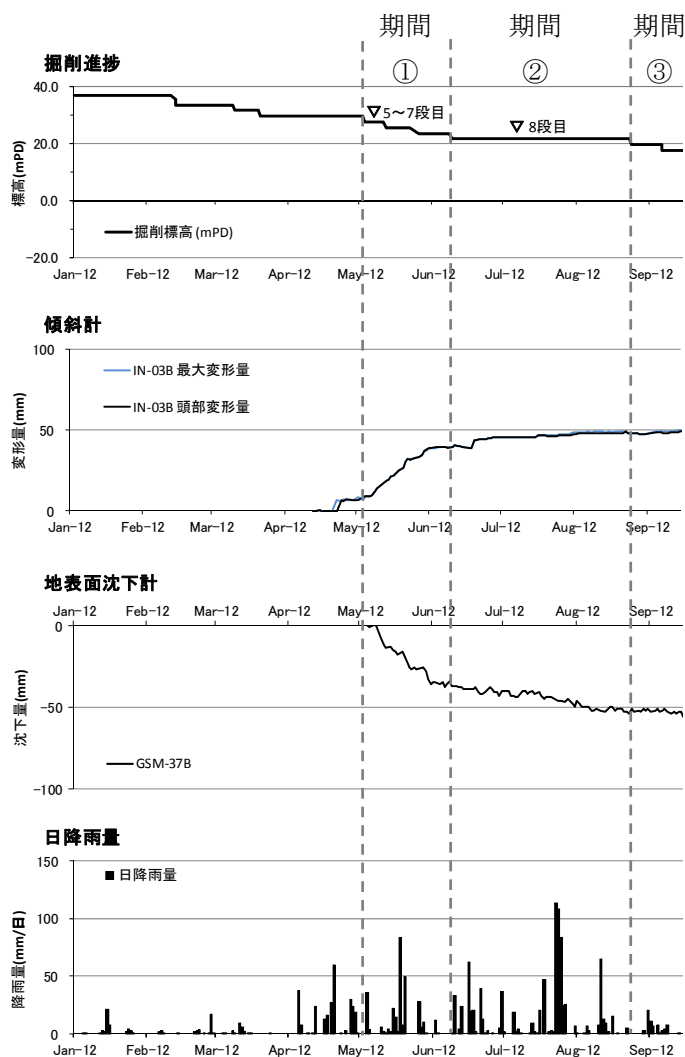


図-9 計測結果(2012年1月～2012年9月)



図-10 ソイルネイル施工状況(ケーシングなし)



図-11 ソイルネイル施工状況(ケーシング併用)

表面沈下計ともに、計測値の漸増は見られるが、急激な増加はなく、著しい変形は確認されなかった。

5. 計測結果の考察および対策

(1) 計測結果の考察

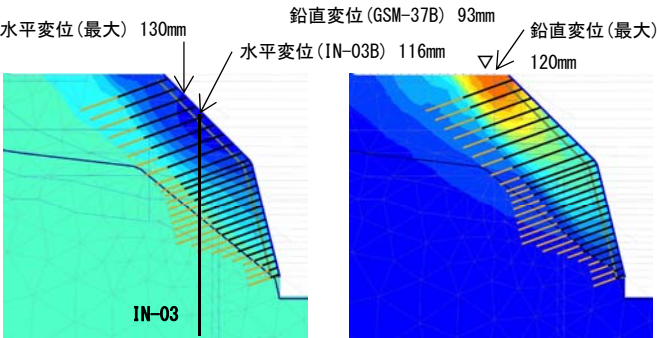
図－１４および図－１５に、IN-03B, GSM-37Bにおける水平および鉛直方向の解析値と計測値の推移を示す。

各図ともに、対策実施後からFill層下端までの計測値は、地盤再評価後の解析値とは推移の傾向に乖離が見られ、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、初期段階に生じた法面の変形は、土質の過大評価によるものではなく、施工方法の違いによって生じた可能性が大きい。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って変形および沈下を抑制し、原設計と同様の傾向となったと考えられる。

8段目以降のCDG層, HDG層掘削時の計測値は、水平変位および鉛直変位ともに著しい増加は見られず、原設計ならびに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、設計で採用した値より大きな値であったことが考えられる。また、セクション20は岩盤レベルが最も低い箇所であり、その両隣の断面で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、解析値と計測値に差異が生じたと考えられる。本工事のような事例では、簡易な2次元モデルを用いて解析を行うことが一般的である。しかし、3次元効果の影響が大きいと想定される場合は、必要に応じて3次元モデルにて検討する必要があると考える。

(2) 施工方法の考察

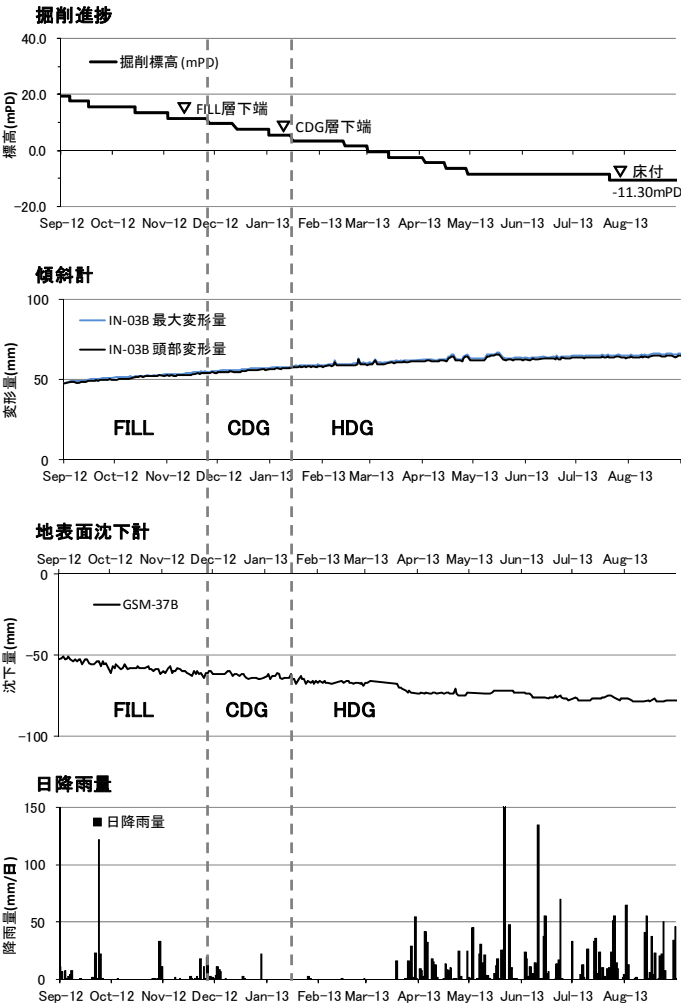
今回の施工を踏まえ、設計に加え、施工方法の選定も十分な検討が必要だと考える。前述したように、当初エアコンプレッサーによって排土する工法を選定したが、不均質なFill層での孔壁崩壊を招いた主要因と推測される。今回の経験から、Fill層やCDG層のように、削孔時に孔壁の自立が困難と予測される土層に対しては、あらかじめケーシング併用工法を適用する必要があると考える。一方、HDG層のように、地盤が十分な粘着力を有し、孔壁の自立が期待できる地山では、ケーシング併用工法は工程を遅らせる可能性がある。ただし、孔壁の自立については、粘着力に限らず、土層構成、土被り厚、ソイルネイルの削孔径、遮水壁の影響など、他の要素も複合的に



図－１２ 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－１３ 計測結果 (2012年10月～2013年8月)

作用していると考えられる。そのため、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た。それに伴い、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ためと考えられる。以上より、日降雨量が100mm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

(1) まとめ

現時点では、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といえる。大規模かつ急勾配の法面掘削では、慎重な計測管理を継続して行い、日々の施工管理に加え、計測結果を素早く入手し、計測結果の評価から設計、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が必要である。また、法面変状等の発生時には、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。

(2) おわりに

セクション20付近は、2013年9月に床付けが完了した。図-16に当時の状況を示す。現在では駅の構築作業もほぼ完了を迎え、躯体と法面の間の埋戻しを行っている。地山の計測を継続的に行い変形の有無を確認しているが、大きな変動は見られず法面は安定していると判断できる。

今後は、本工事と類似の現場において計測データを蓄積し、より合理的な設計・施工方法の確立を目指したい。

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

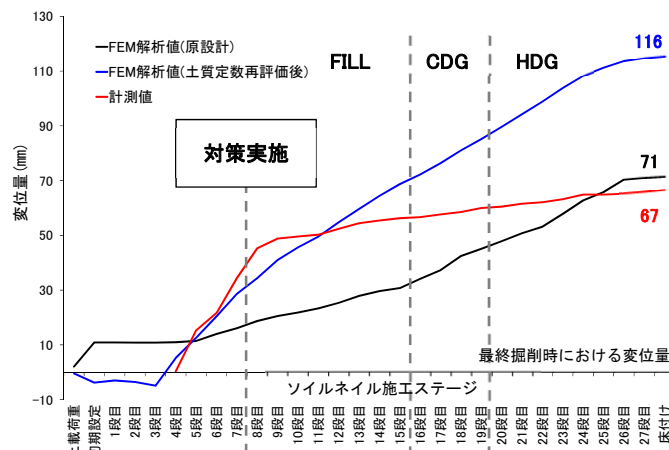


図-14 水平変位量 (IN-03B) の推移

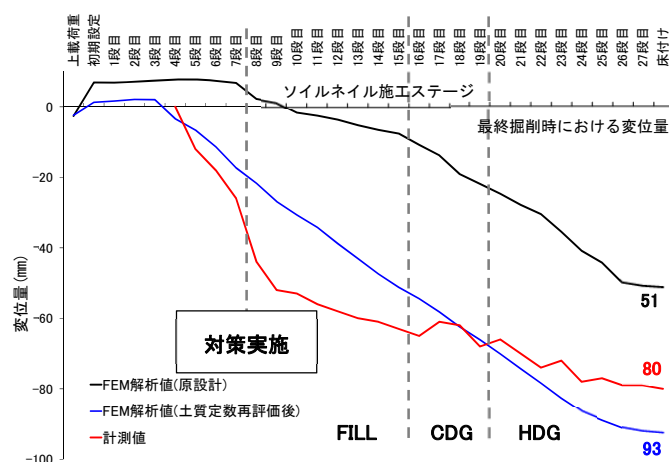


図-15 鉛直変位量 (GSM-37B) の推移



図-16 何文田駅全景(上:北から南, 下:南から北を望む)