

設計基準改訂による既設山留め壁補強工事 Strengthening Work for Existing Retaining Wall System due to Change of Design Principal

松下 圭志*	草野 孝三**
Keiji Matsushita	Kozo Kusano
上田 幸生**	浜田 透**
Yukio Ueda	Toru Hamada

要 約

2004年4月にシンガポールで発生した大規模な山留め事故に起因し、シンガポール政府は仮設山留め工の設計基準を大きく改訂した。この基準改訂により、「4m以深の掘削工事では、仮設構造物であっても、本設構造物と同等の安全率を確保した設計とすること。」という条項が明記された。本改訂は、新規工事だけでなく、施工中の仮設山留め工事にも適用され、掘削途中で2段目支保工架設中であった当工事も対象となった。基準改訂に伴う設計の見直しと施工においては、技術面や材料調達等で様々な困難に直面したが、多様な補強工事を採用し無事掘削工事を完了した。現在、躯体工事がほぼ完了し、引き続き軌道施設工事、駅構内設備など2010年2月開業目指し、工事が進められている。本報告書は、設計基準改訂の経緯、主な変更点、その対応策ならびに結果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 地質概要
- § 4. 代案による工事入札
- § 5. 設計基準の改訂と設計
- § 6. 山留工の見直し
- § 7. 補強工事の実施
- § 8. 実施工と設計との検証
- § 9. おわりに

§ 1. はじめに

シンガポールで現在施工中の地下鉄 C823 工事では、工事の途中段階において設計基準が改訂され、施工中の山留め仕様をグレードアップすることを求められた。

この基準改訂に対し、設計・施工の両面からどのように取り組み、対応したかについて報告する。

§ 2. 工事概要

工事件名：地下鉄環状線ステージ 2

地下鉄 C823 工事

発注者：LTA (Land Transport Authority)

陸路交通管理局

工事場所：シンガポール共和国

施工形態：西松・ラムチャン JV

工事内容：本工事は OAR 駅、TKT 駅、PYL 駅の 3 駅、開削トンネルおよびシールドトンネル（2 路線）を含む、全長 2,350 m の地下鉄を構築するものである。駅工事のうち、OAR 駅、TKT 駅は、防爆¹ 対応の構造となっている。

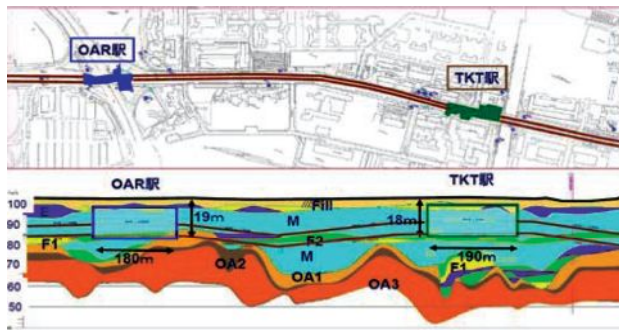
§ 3. 地質概要

図一に土質縦断図を示す。当該地質は、マリクレイとよばれる N 値 0~1 の沖積海成粘性土層が 10~30 m 堆積しており、F1 (沖積砂層)、F2 (硬質中間粘性土層)、E (腐植土層) が介在している。山留めは、OA (オールドアルビウム) 層とよばれる N 値 10~50 の洪積層に根入れしている。

* 海外支店 シンガポール営業所 地下鉄 C823 出張所

** 土木設計部設計課

¹ 防爆：有事の際に、駅をシェルターとして利用できるよう爆弾に耐えうる構造。



図一 OAR 駅と TKT 駅付近の土層縦断面図

§ 4. 工事入札の経緯

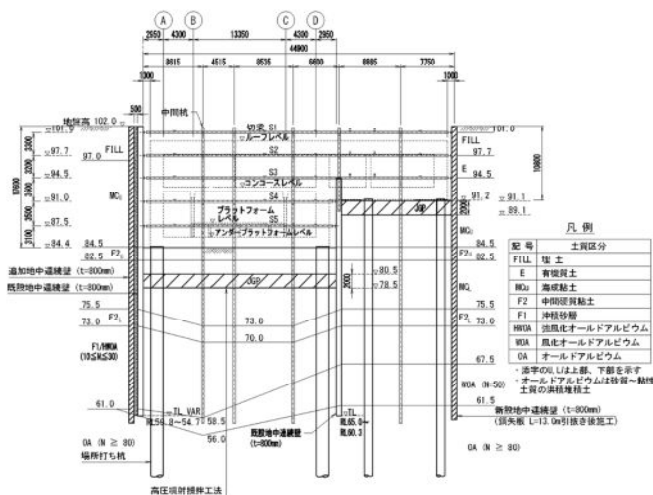
4-1 原案設計

入札図書では、山留め壁は地中連続壁を本体兼用とする構造で、設計は企業先により行われていた。地中連続壁は、山留め壁としての機能に加え、鉛直荷重を支持する構造となっていた。また、当該地質は軟弱なマリンクレイが大部分を占めているため、山留め壁は圧密に起因する負の摩擦力も考慮して設計され、地中連続壁の壁厚は 1.0 m ～ 1.2 m であった。さらに、防爆対応の OAR 駅、TKT 駅は、側壁（地中連続壁＋構造躯体壁）およびスラブの最小厚を 1.95 m にすることが規定されていた。

4-2 代案による工事入手

原案では、地中連続壁を駅舎構造物の支持杭として設計しているため根入れ長が長く、また地中連続壁を本体構造とし使用限界状態を考慮して設計されていたため相当量の鉄筋を配筋する構造となっていた。

そこで、地中連続壁を仮設山留め壁とし、安全率の低減、ならびに駅本体を場所打ち杭に代える提案により、全体工事費を抑え競争力のある提案とした。工事入札時にこの代案を提案し、これが企業先に認められ、工事入手に至った。図一2に TKT 駅部の標準断面図を示す。



図一2 横断面図（TKT 駅）
[代案に見直し後の補強壁も併せて図示]

§ 5. 設計基準の改訂と設計承認

5-1 山留め壁崩壊事故

2004 年 4 月 20 日に隣接工区にて大規模な山留め壁崩壊事故が発生した。このとき、当該工区は 3 駅とも掘削途中で概ね 2 段目支保工の架設中であつた。事故直後に、企業先より工事中止命令が出され、同時に仮設構造物に関する設計の再検討と支保工を中心とした設計の見直しを求められた。設計見直しの際の追加条件を以下に示す。

- ① 連続した腹起しを設置すること
- ② 火打ち梁を設置すること
- ③ 許容応力度の割り増しを禁止すること

上記指示に従い、山留め支保工の見直しを開始した。

5-2 アドバイサリーノートの公布

2004 年 9 月、事故調査委員会から中間報告書が出され、仮設構造物に対しても本体構造物同様の安全率を有することが望ましいとの内容が記載された。これにより、企業先より山留め支保工のみならず、山留め壁を含んだ全体的な設計の見直しを要求された。

さらに、事故発生より約 1 年を経て、事故調査委員会から最終報告書が出された。また、BCA (Building & Construction Authority：建築審査機関) より、アドバイサリーノートが公布された (2005 年 5 月)。アドバイサリーノートとは、日本で言う「法律」までの拘束力はないが、政府の要求事項であり、工事を行う上で大きな拘束力を持つものである。主な内容は、以下の通りであった。

- ① 4 m 以深の掘削に適用すること
- ② 仮設構造物も本体構造物と同様の安全率を有すること
- ③ 鋼構造物の設計は、BS5950 (限界状態設計法) に従うこと
- ④ 偶発的な荷重に対応した構造となっていること
- ⑤ 地盤改良を梁構造として考慮してはならないこと

これらの要求事項は、新規工事だけでなく既に着工した工事にも適用された。

また、企業先より上記のアドバイサリーノートの要求に加えて、以下の事項を満足することが盛り込まれた。

- ① 過度の山留め壁の変位の抑制
- ② 浮き鋼矢板の使用禁止
- ③ ヒーピングに対する安全率を 1.5 以上とする

上記要求により、本工事は仮設計画の大幅な見直しを求められた。なお、浮き鋼矢板とは鋼矢板先端を堅固な支持層まで延ばさず、床付け直下の地盤改良部で受働抵抗を確保した構造を意味している。

5-3 設計照査体制

従来であれば、図一3の左に示すように、当社が直接契約している設計チェックコンサルタントの照査を受け

た後、LTAが照査し、その設計図書をBCAのLTA出先機関であるBCUに提出することで、設計業務が完了していた。

この設計承認手順が変更となり、LTAが契約したコンサルタントとLTAが設計図書を照査し、さらにBCAもこれを照査する体制に変わった(図-3の右参照)。その結果、第三者照査の意味合いが強まり、設計承認を得るまでの期間も長くなった。

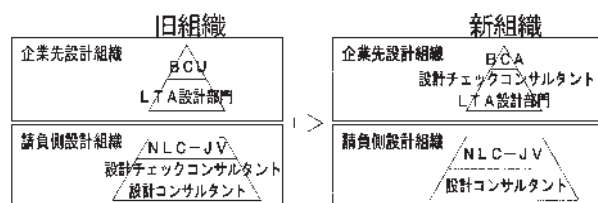


図-3 設計承認組織

§6. 山留工の見直し

工事中止命令が出された時点では、すでに山留め壁の施工を完了しており、各駅のほとんどのエリアで掘削を開始している状況であった。このような状況であったため、山留め工の見直しにおいて、山留め壁の補強が必要となる場合には、地下埋設管、プラントの設置スペース、施工機械の作業基盤、2階建てバスも走る幹線道路の切回し等、様々な制約を受けることとなった。図-4に設計見直しを行った過程を示す。

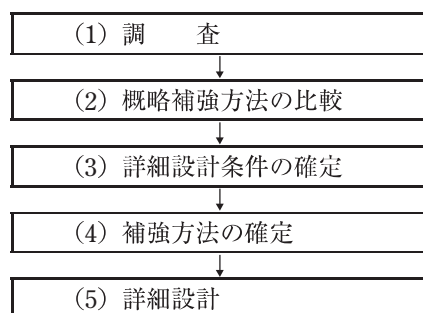


図-4 設計見直し過程

6-1 調査

設計の見直しに際して、土質条件や土層の変化に伴うリスクを最小限とするために、ボーリング間隔が離れている箇所では、これらを補完するために山留めライン沿いまた掘削エリアの内側で追加の土質調査を実施した。

調査の結果、一部山留め壁の根入れ不足が疑われる箇所が認められたため、これを考慮して再設計を実施した。

6-2 概略補強方法の比較

山留工の補強方法は、埋設物の移設、道路の切回し等の施工条件により、工事費・工期に大きく影響することが予測された。このため、埋設物、道路切回し方法につ

いて想定されるケースについて、課題、工事費、工期等を比較検討を行い、企業先と協議の補強方法の方向性を決定した。

TKT駅では、山留め壁のすぐ背面にある光ケーブルの移設に長期の時間を要することが判明したため、埋設物の大掛かりな移設は断念し、一部箇所では掘削側のみでの補強対策工に限定された。

6-3 詳細設計条件の確定

(1) 山留め壁の補強

上記、詳細設計条件に基づき、山留め壁の見直しをした結果、その補強の度合いならびに埋設物の有無、施工条件の制約などから補強方法を以下のように決定した。

- ① 既設地中連続壁の部分増打ち補強
 ② 追加場所打ち杭による壁補強
 ③ 追加地中連続壁の打設
 a) 既設地中連続壁の外側に追加地中連続壁の打設
 b) 既設地中連続壁の内側に追加地中連続壁の打設(壁背面に埋設物や施工条件の制約がある場合)

このうち、地中連続壁の補強工事において、既設地中連続壁と新設地中連続壁間は、コンクリートで置換する計画とし、その離隔を500mmに設定した。しかし、壁面の凹凸を考慮した場合に、完全に土砂が除去できない可能性があった。設計上、この介在する土砂の影響をどう評価するかということが課題となった。この影響を評価するためにFEM山留め解析プログラム(PLAXIS)を用いて、500mm部の置換材料の性状の違いを表現するために、変形係数に着目してケーススタディを実施した。

CASE 1: コンクリート

CASE 2: 地盤改良相当

CASE 3: 原地盤相当

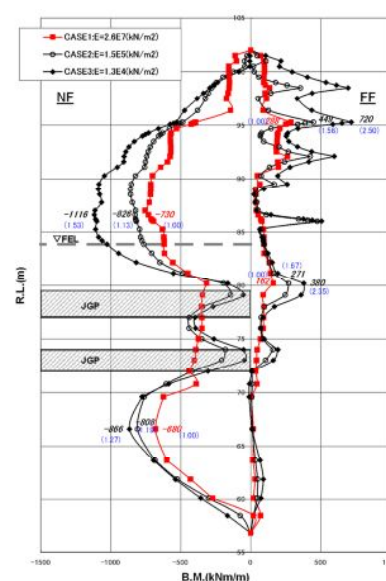


図-5 新旧連壁間の材料の違いによる発生断面力

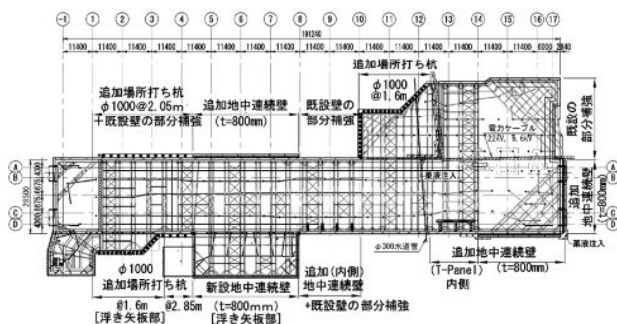
検討の結果、既設地中連続壁と追加地中連続壁間に原地盤材料が残った場合には、旧地中連続壁に大きな断面力が発生することがわかった（図－5）。このため、施工においては既設地中連続壁背面の土砂を除去する工夫が必要であると判断した。

(2) 支保工の補強

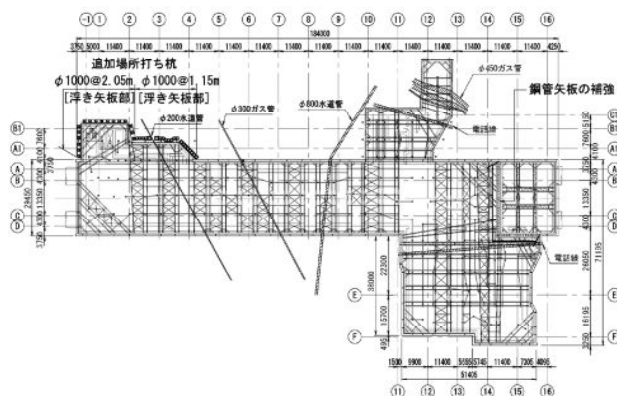
支保工設計については、当初より1ストラット・フェイリュアーと呼ばれる設計手法（1本支保工が破損しても、周辺部材が降伏応力を満足する設計）が求められていた。設計見直し時に、全段腹起し設置を要求されたことで腹起しには大きな部材を用いる必要が生じた。これに加え許容応力度の規定がより厳しくなったため、当初より大きな部材が必要となった。購入済みの材料を生かすために、水平継材やプレスの追加を基本として部材の耐力増加を図ったが、必要な箇所では部材サイズを増すことで対応した。

6－4 詳細設計

決定した補強方針に従い、詳細設計を行った。図－6、図－7にTKT駅及びOAR駅の補強仕様を示す。再掘削開始前には、工事停止期間中のクリープによる山留め壁の変形が生じていたため、残留変位および残留応力を考慮した設計を行った。



図－6 山留め壁補強仕様 (TKT 駅)



図－7 山留め壁補強仕様 (OAR 駅)

§7. 補強工事の実施

7－1 地中連続壁の補強工事

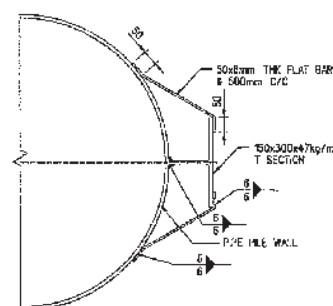
設計上は、解析モデル上介在した土砂を貧配合コンクリート程度と評価した。施工上は、介在土砂をなるべく除去し、追加地中連続壁打設時にコンクリートと置きかえることで発生断面力を抑制する配慮が必要であった。実施工においては、ワイヤブラシ付のバケット（写真－1）を用いて既設地中連続壁背面の土砂を除去することとした。



写真－1 ワイヤブラシ付きバケット

7－2 鋼管矢板の補強工事

鋼管矢板を使用していた箇所は、トンネルの発進立坑（OAR 駅）および到達立坑（TKT 駅）である。入札時には、駅舎開削部外からの発進・到達を計画していたが、企業先より地下埋設物の関係から、駅内から発進および到達することを要求された。トンネルの施工を先行できるように、駅内に鋼管矢板を打設し、発進到達立坑を設置していた。崩壊事故発生当時、発進および到達立坑は、既に最終床付けを完了し、シールドトンネルの施工を行っていた。アドバイサリーノートの公布を受け、設計見直しを行った際、OAR 駅に設置していた既設鋼管矢板が新基準に対し所要の安全率を満たしていなかったため、補強工事を求められた。補強対象箇所が掘削床付け面以浅であったため、T 型の鋼材を既設鋼管矢板に溶接することで、所要の安全率を確保した。補強仕様詳細図を図－8、補強後の状況図を写真－2 に示す。



図－8 鋼管矢板補強仕様



写真一2 鋼管矢板補強状況

7-3 鋼矢板の補強工事

鋼矢板の山留め部は、浮き鋼矢板の使用禁止命令とヒービングの安全率の変更要求に対して、鋼矢板背面に離隔 500 mm で場所打ち杭を柱列状に打設し、山留め壁全体の剛性を高め、所要の安全率を確保した。また、山留め壁全体の変形を少なくするために、柱列状に打設した場所打ち杭の杭頭を RC 梁により結合し剛性を高めた。

7-4 山留め支保工の補強工事

基準改訂に伴い、山留め支保工の仕様を大きく変更した。特に腹起しの仕様変更が大きく、再設計前に既に設置していた 1 段目の山留め支保工を取り替える必要が生じた。この作業に伴う山留め壁の変形を抑えるために、流動化処理土を用いて埋戻しを行った。その後、既設 1 段目支保工を撤去し、新設計に基づき 1 段目支保工の設置を行なった。

§ 8. 実施工と設計との検証

8-1 計測管理体制

計測管理を行なう上で、警告レベル、工事中止レベルを設定し、関係各所に計測結果を送り、管理を行なう体制を整えていた。しかし、本改訂により、工事中止レベルに達した場合には、BCA（政府）から工事中止命令が発令され、工事再開までに関係各所からの承認手続きに 1 ヶ月以上を要することが予想され、併せて対策工実施による工期の遅れが生じることから、全体工程への大きな影響が危惧された。また、工事中断中の軟弱地盤のクリープによる山留壁の長期的な変形は無視できないレベルであり、これを抑制する意味においても工事の中断を避けることが最大の課題であった。

さらに、計測管理においては、工事中止レベルを設計値にすることを求められ、工事中止レベルに達するリスクも高くなった。

このため、工事中止を避けるべく、表一1 に示すように自主的に対策工実施レベルを設け、事前に対策を講じ

ることを基本とした。また、各掘削・撤去段階における解析値を管理目標として設定した。各計測レベルでの対応、および管理目標値を表一1 に示す。

表一1 計測レベルの定義

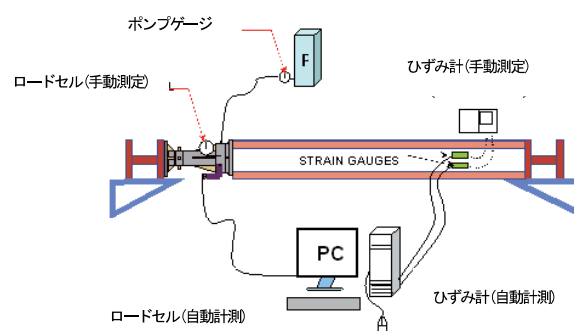
管理項目	警告レベル	対策工実施レベル	工事中止レベル
対応	関係各者への注意喚起、各業者・作業員への周知徹底	自主的な対策工の実施	BCA による工事中止命令工事再開のための対策工の実施
切梁軸力	設計荷重×70%	設計荷重×90%	設計荷重×100%
壁変位	最大変位量×70%	最大変位量×90%	最大変位量×100%
沈下	設計沈下量×70%	設計沈下量×90%	設計沈下量×100%

8-2 プレロード管理

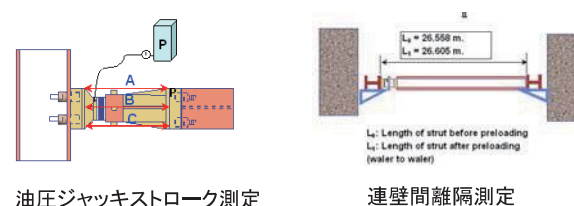
厳しい変形管理を求められる中、設計プレロードを現場レベルで確実に導入するためのプレロード管理手法が課題であった。

プレロード前後で、ひずみ計、ロードセル、油圧ポンプの読値を記録し管理した。自動計測の読みについては、現場にて手動計測した読値と比較し、その差が小さいレベルであることを確認した（図一9）。

また、プレロード導入後のプレロードロスの評価するために、油圧ジャッキストローク、腹起し間の距離を測定した。プレロード導入後の、山留め壁の変位にも着目し、プレロードが効果的に導入されたかを判断した（図一10）。



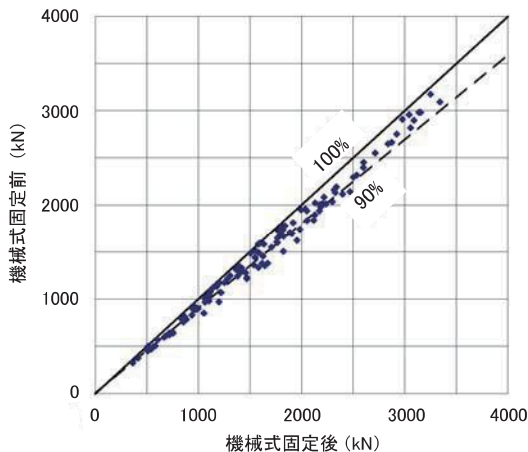
図一9 プレロード管理概要図



図一10 プレロード時測定項目

また、事前にプレロード導入後に実施する機械式固定の前後での軸力変化を測定した。図—11 に示すとおり機械式固定後に、10%程度の軸力低下が生じていることがわかった。施工時には、このデータを蓄積し、各ブロックにおけるプレロードロス率の傾向を把握し、次ステップにおけるプレロード導入率を補正した。

切梁長さ、切梁サイズ、土質等で、その傾向に若干のばらつきがあった。特に、切梁長さが70 m 程度となるエントランス部では、このプレロードロスが若干大きかったためこれを考慮した。

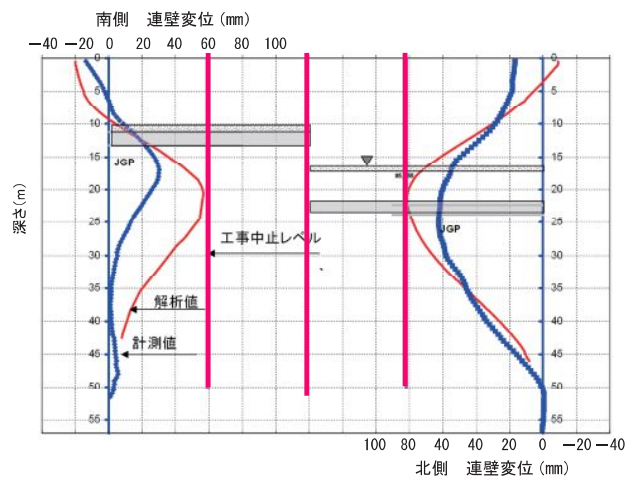


図—11 機械式固定前後の軸力のロス

8—3 計測結果

改訂基準で見直しを行なった際に、所要の安全率を確保するために追加地中連続壁にて補強した箇所において山留め壁の変位は設計値よりも少ない結果となり、効果的な補強が行なわれたことを実証している。その結果、最終床付までの掘削において、壁の更なる補強工事を行なわなくても、所要の安全率を確保できることを確認した。TKT 駅における設計値と計測値の比較を図—12 に示す。

実施工時には、計測結果を常に監視し、必要な箇所には以下に示す施工上の対応を行い管理した。掘削は、約20 m 毎のブロック施工を行なっていたが、隣ブロックの掘削の影響で、掘削を行っていない箇所の山留め壁の変位が増加する傾向が見られたため、設計上変位に余裕が無い箇所のブロックを先行掘削することにより、壁の変位を抑制した。さらに、段階掘削が終了した後、掘削床付け面に300 mm 厚のコンクリートを打設し、切梁支保工を架設するまでに増加する壁のクリープ的な変位の



図—12 設計値と計測値の比較 (TKT 駅)

抑制を行なった。また、切梁支保工の本数を増やし、支保工全体の剛性を高め、壁の変位の抑制を行なった。

上記対策を、適切なタイミングで関係各所へ説明し、実施することで、工事停止になることなく掘削工事を終了することができた。

§9. おわりに

今回、山留め崩壊事故が発生し、事故調査委員会の発足からアドバイサリーノートの公布まで、関係省庁をはじめ、多くの技術者が設計基準改訂に尽力した。日本では、設計基準が改訂された場合、通常、新規工事から採用されることが一般的であるが、シンガポール政府は、既発注の全ての工事に適用した。本工事も、この要求事項を満足するために、当社の技術を結集し対応することで、無事、掘削工事を完了することができた。掘削途中で設計を見直し、様々な制約の中で、必要な安全率を確保するように既存の山留め架構システムを補強することは、新規に設計を行なうのと異なり、施工の進捗に対応した設計・施工方法の採用、既設部の山留工安全性の確保等の多くの困難があった。

遅れた工程を取り戻すため補強範囲は最小限とし、緻密な計測計画により工事停止命令を事前に防ぐことに尽力した。施工途中での設計見直しということから様々な制約条件があり、その中で工費、工期とも最適な対策工を提案できた。

最後に、本工事において数多くのご指導、ご協力を頂いた全ての方々に心より御礼と感謝の意を表する。