

シンガポールの硬質粘性土に対するグラウンドアンカーによる大規模開削工法

Large Scaled Open Cut in Stiff Clay Using
by Ground Anchor in Singapore

藤井 利侑*
Toshiyuki Fujii

市川 寛**
Hiroshi Ichikawa

要 約

硬い粘性土を対象とした開削工法による地下鉄工事において、親杭・鋼矢板などの土留壁を用いず、コンクリート吹付けと腹起し及びグラウンドアンカーにより深さ約23mの施工を行った。

工事は当社の設計・施工で行われ、設計に際しては電子計算機を駆使して多角的な視点に立った解析を行った。工事中に部分的に土砂崩壊を生じたが、ただちに対策を講じ工事を進めることができた。本報文は入札から実施に至る過程の取りまとめである。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 地質
- §3. 計画と設計
- §4. 施工と計画
- §5. 考察
- §6. おわりに

§1. はじめに

シンガポール地下鉄公社発注の MRTC-C107B 工区は激しい国際競争入札の結果、1984年5月落札した。着工は同年6月、竣工予定は1987年9月で工期は約40ヶ月である。

工事はシンガポールのダウンタウンに位置する地下3階(掘削深さ GL-23m)のシティーホール駅と、そこから東側と北側へ進むそれぞれ2本のトンネル(総延長820m、土被り10~15m)の施工である。概略工事数量を Table 1 に示す。本体構造、仮設構造物共当社の設計によった。本体構造は対爆構造(将来の戦争のためのシェルター機能)であり、設計はその特殊性に対応するため英国のコンサルタント Mott-Hey Anderson 社の、また仮設構造物の計画変更後の代案詳細設計は下請である

*土木設計部設計課係長
**香港(支)工事部設計課課長

Gammon 社の協力を得た。激しい国際競争入札のため、設計・計画の段階から可能な限り安価な計画として受注できるように全力を傾注し、その請負金額は約85億円(契約時円換算)であった。

Table 1 107B工事概略工事数量

工 種		数 量
土 工	掘 削 工	156,000m³
	埋 戻 工	17,000m³
	残 土 処 理 工	156,000m³
基 礎 杭 工		φ1,500×ℓ33m 場所打杭59本
土 留 工	モ ル タ 吹 付	5,650m³
	鋼 矢 板	II型×5,300m²
	グラウンドアンカー	φ165mm×平均長18m
軀 体 工	コ ン ク リ ート	55,000m³
	鉄 筋	6,000 t
ト ル ン 工 ネ	シールドトンネル	仕上り内径 φ5,300mm×延長324m
	山 岳 ト ン ネ ル	内空断面29.92m²×延長496m

入札のための計画段階から最も苦心したのはシティーホール駅施工のための土留工事である。平面形状は長さ190m×幅29~42mで Fig.1,2 に同駅の平面図、断面図を示す。一般的な開削工事では土留壁として鋼矢板、親杭・横矢板、連続地中壁や柱列壁を採用して、支保工として切梁・腹起しかグラウンドアンカーを用いる。本工事においても入札段階では親杭・コンクリート吹付けと

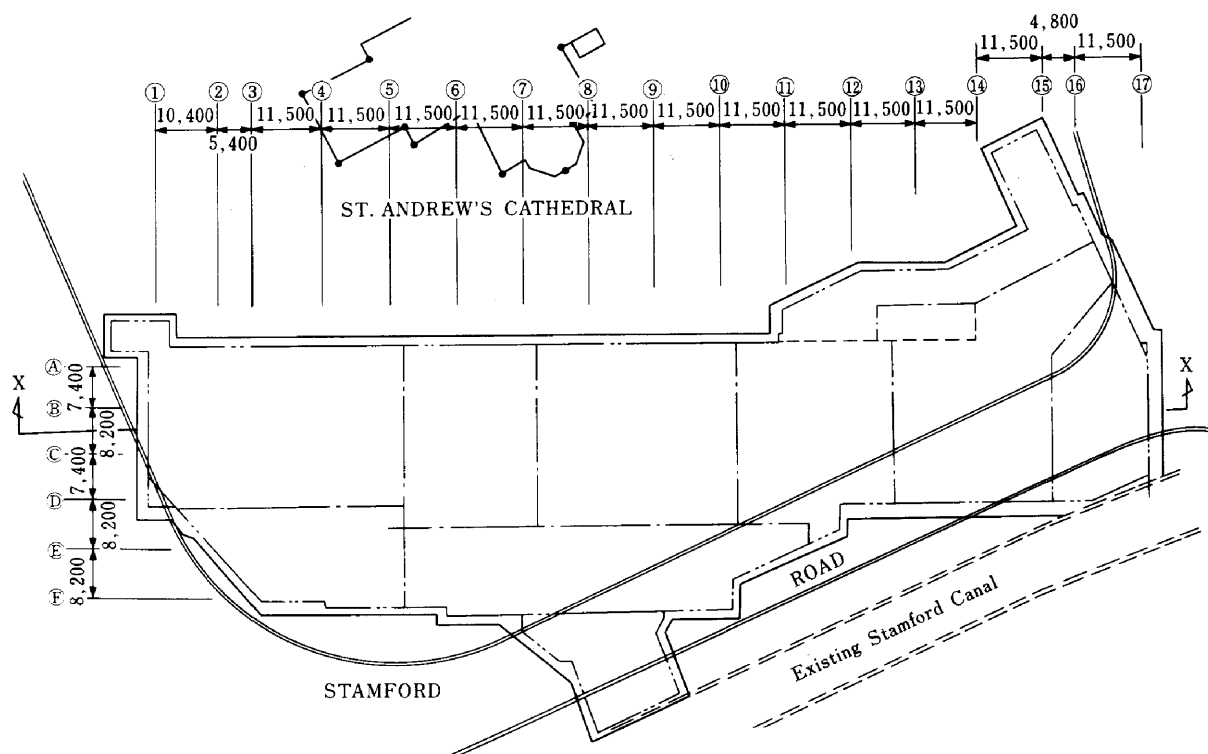


Fig.1 シティーホール駅平面図

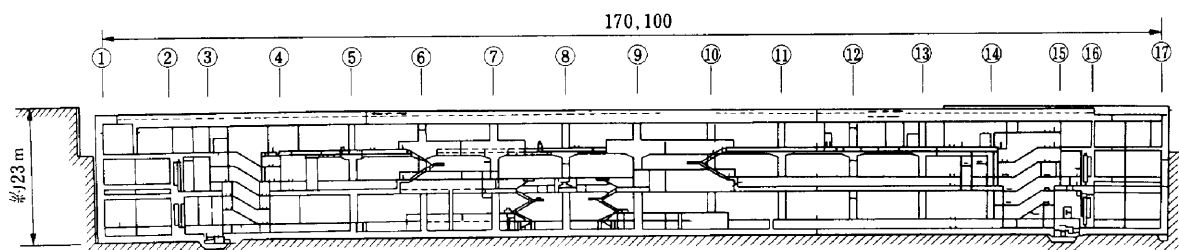


Fig.2 シティーホール駅断面図

グラウンドアンカーを使用する計画としたが、対象地盤がボルダー混りの極めて硬い粘性土地盤であり、親杭の施工が困難と考え、工事入手後に親杭を使用しないでコンクリート吹付けと腹起し及びグラウンドアンカーだけによる土留め工法を代案として提案し、採用されて実施した。

工事は着工から1985年5月まで順調に行われ、掘削面積の約1/5が最終床付まで行われたが、同月に北西側の地山が部分的に崩壊して工事が中断した。工事開始直後から傾斜計などにより地盤の変位を継続的に測定していたが、さらに観測体制を整え、崩壊部分は柱列壁を打設し、切梁工法を併用するなどの対策を行い工事を進めた。その後工事は順調に進み、1987年2月現在の工事進捗率は約70%に達し、内装工事のみを残している。

本文は上記土留め工に関する入札時の設計、工事入手

後の代案の設計に関する内容を中心に記し、さらに施工に関しても要約して取りまとめたものである。

§2. 地質

107B工区の地質断面を Fig.3 に示す。地盤は表層から埋土層(Fill)、海成砂層(B)、腐蝕土層(E)、砂層(F_1)、粘土層(S_4)、ボルダー混り粘土層(S_3)から構成される。これらをさらに大きく区分すると Fill, B, E, F_1 から成る比較的軟弱な地盤と、 S_4 , S_3 から成る固い地盤に区分される。軟弱な地盤の厚さは駅の南西端側では比較的薄く地表面から約3.5m、最も厚いところで約7mであり、本工事の掘削の大部分は S_3 , S_4 の固い粘性土(S_4 ; $N=15\sim30$)である。各土層の土質定数(設計採用値)を Table 2 に示す。

Fig.3 土質縦断面図

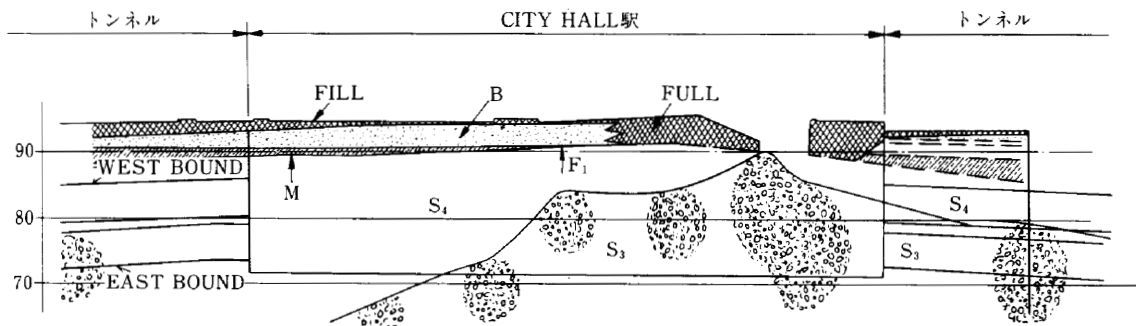


Table 2 土質定数

種 類	定 数
Fill B	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ $E_s = 10 \text{ MN/m}^2$ $\phi' = 30^\circ$ $k = 5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
E	$\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$ $C_u = 5 \sim 25 \text{ KPa}$ $E_u = 400 C_u$ $\phi' = 5^\circ$ $k = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$
F ₁	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $E_s = 10 \text{ MN/m}^2$ $\phi' = 30^\circ$ $k = 1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
M	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ $C_u = 10 \sim 60 \text{ KPa}$ $E_u = 200 C_u$ $\phi' = 22^\circ$ $k = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$
S ₃	$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ $C_u = 150 + 4z \text{ KPa}$ $E_u = 100 \text{ MN/m}^2$ $C' = 10 \text{ KPa}$ $\phi' = 28^\circ$ $k = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$
S ₄	$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ $C_u = 150 + 4z \text{ KPa}$ $E_u = 50 \text{ MN/m}^2$ $\phi' = 30^\circ$ $k = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$

掘削工事で最も問題となるのは S₃, S₄ の性質である。掘削深さ約 23m のうち 17~20m は S₃, S₄ であり、北東側半分の工事範囲では S₃ が、南西側半分の工事範囲では S₄ が卓越している。S₃ 層は Boulder Clay と称されるボルダー混りの固い粘性土で、色調は白~明茶~茶色を示

す風化岩である。ボルダーは砂岩、シルト岩、泥岩などで、 $q_u = 400 \sim 1000 \text{ kg/cm}^2$ であり、その混入率は 20~40% である。S₄ は S₃ の上層にあり、色調が白灰~白の風化した泥岩で、ボルダーは混入していない。

S₃ のボルダー混入状況については、「シンガポール地下鉄 107B 工区トンネル工事」(第 5 回西松建設トンネルシンポジウム論文集、林・石井) に詳細に述べられているので一読されたい。

§3. 計画と設計

3-1 入札設計

(1) 基本方針

入札時の山留め計画にあたり慎重な検討が行われた結果、次の方針とした。

- ① 土留め壁は上部の軟弱層は鋼矢板、下部の固い粘性土は親杭方式
- ② 壁面はコンクリート吹付方式
- ③ 支保工はグラウンドアンカー方式

この方針において最も問題となった設計・施工上の課題は次の諸点である。

- ① 土留め壁に働く土圧の算定
- ② 吹付けコンクリートの設計方法
- ③ グラウンドアンカーの定着力
- ④ Boulder Clay に対する親杭の施工能率

本文では①に注目して検討結果を要約する。

(2) 設計測圧

入札設計の段階から最も重要な検討課題は土留め壁に作用する土圧の評価であった。土留め壁に働く測圧は、1948年 Terzaghi-Peck が示した台形土圧以来、多くの実測値、提案式が発表されている。我国においても建築学会、土木学会、日本道路協会などの諸機関ではそれぞれに設計規準なり指針なりを設けているが、各式はいずれも使用し易いように簡略化されていて、実際の適用に

際しては十分な工学的検討と経験が必要である。特に、本工事で扱う著しく固い粘性土を対象とした深い根切りでは、これまでの十分な研究データが少なく、従来の提案式に単純に諸値を代入して土圧を算定しても過大になる可能性があり、ひいては見積り金額の上昇、入札時の敗退となる。

本工事の標準的な断面に関して、代表的な土留め壁への土圧の提案式（以下経験式という）と理論土圧（ランキンレザール）式による結果を示したのが Fig.4 である。Fig.4 は GL±0～GL-6.0 を Fill, B とし、GL-6.0 以深を S_3 , S_4 としている。Fill, B は土圧と水圧を分離して計算し、 S_3 , S_4 は土圧と水圧を分離しないで求めた。なお、いずれも固い粘土として土圧係数の最も小さい値を採用した。図より、経験土圧の方が理論式に比べて著しく大きいことが判る。このような場合の設計土圧の決定に関しては大いに議論のあるところであり、特に本工事のように極端に強度、粒度組織の異なる複合地盤に関して報告例はない。そこで、本工事における設計では慎重な検討を行い次のように取り扱うことにした。

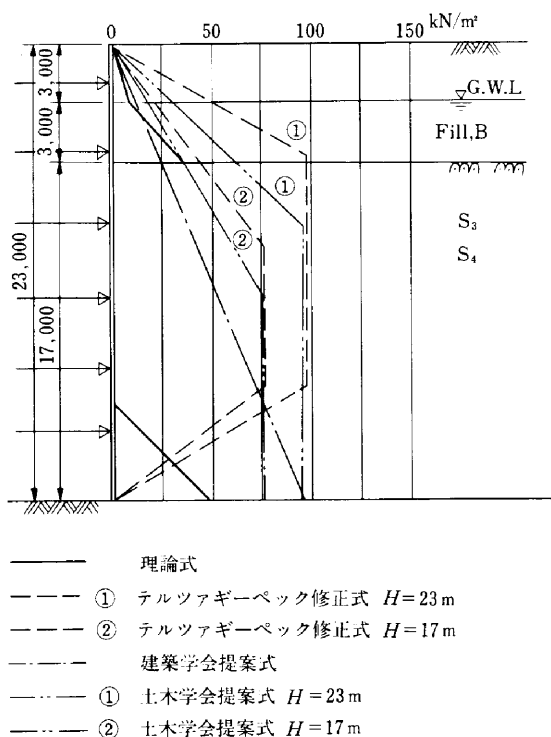


Fig.4 側圧計算値比較

- ①土圧分布は文献1), 3)を参考として台形分布を仮定する。
- ②土圧強度は文献3)の最も小さな値 $0.2\gamma H$ する。
- ③土圧強度を求めるための掘削深さ H は S_3 , S_4 層を

対象とし、上部の軟弱層は上載荷重として取り扱う。以上の方針に従って求めた土圧分布は Fig.5 のとおりであり、このような値を採用した理由は次のとおりである。

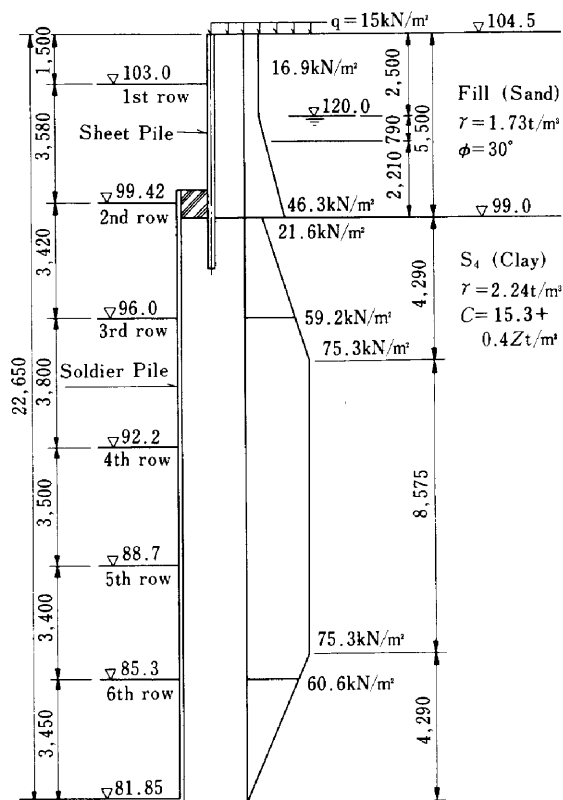


Fig.5 設計側圧分布図

- ①土留め壁に働く土圧は経験的に理論土圧を下回らなく、理論土圧に比べて極端に大きくないと考えられる。
- ②係数0.2は信頼性の高い経験土圧式の下限值として採用されており、それより小さな値を採用する根拠に乏しく、それより大きな値では理論土圧とさらに著しくかけ離れた値となる。
- ③結果的に側圧を過少に評価してグラウンドアンカーを設計した場合に、地山のゆるみにより硬質粘土にキレツなどが発生すると、表層の飽和砂の地下水の浸透による側圧の上昇、硬質粘土の強度低下などを招く恐れがある。

以上の判断に従って土圧を算出したが、この値は吹付けコンクリートの設計に対しては過大と考えられ、それに対しては別途考慮した。この点に関しては本文では省略する。

3-2 実施計画

(1) 基本方針

入札時は親杭・吹付け案で応札して落札したが、入札時から心配したボルダー混り粘土に対する親杭の施工性に関して、同じ土質に対して杭打設を行っている先行業者の実績を調査した結果、予想よりはるかに困難であるとの結論を得た。入札時の設計では約400本のH鋼による親杭が計画されていたため、そのままでは工程に支障があると判断し代案を検討した結果、親杭を使用せずコンクリート吹付けと腹起し及びグラウンドアンカーにより施工する案を試みることにした。親杭を使用しない工法において最も検討を要する課題は地山の安定である。この点に関しては電子計算機による慎重な検討を行い、最終的には掘削の南東面は高層ビルと主要道路が近接しているために、入札時の計画どおり親杭を採用することとし、南～南西面は親杭を用いない案を採用した。設計における基本的な考え方は以下のとおりである。

- ① アンカーの設計土圧は Terzaghi-Peck の経験式を用いる。
- ② 吹付けコンクリートはゆるみ土圧により設計する。
- ③ 掘削時における掘削底面の安定、掘削壁面の安定に関する照査を行う。

吹付け・アンカー案の標準断面図、施工手順図をそれぞれ Fig.6, Fig.7 に示す。

本文では以上のうち、③に関して述べる。

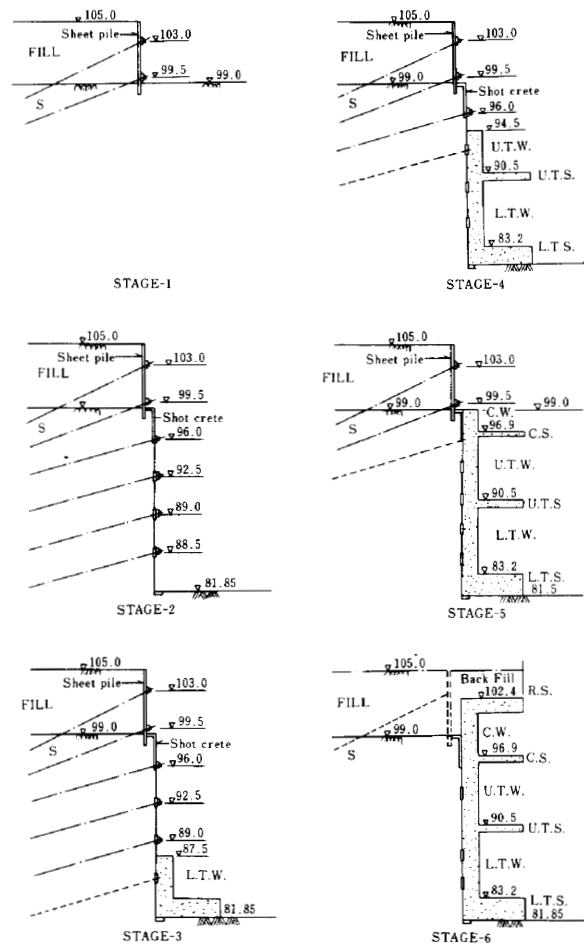


Fig.7 施工手順図

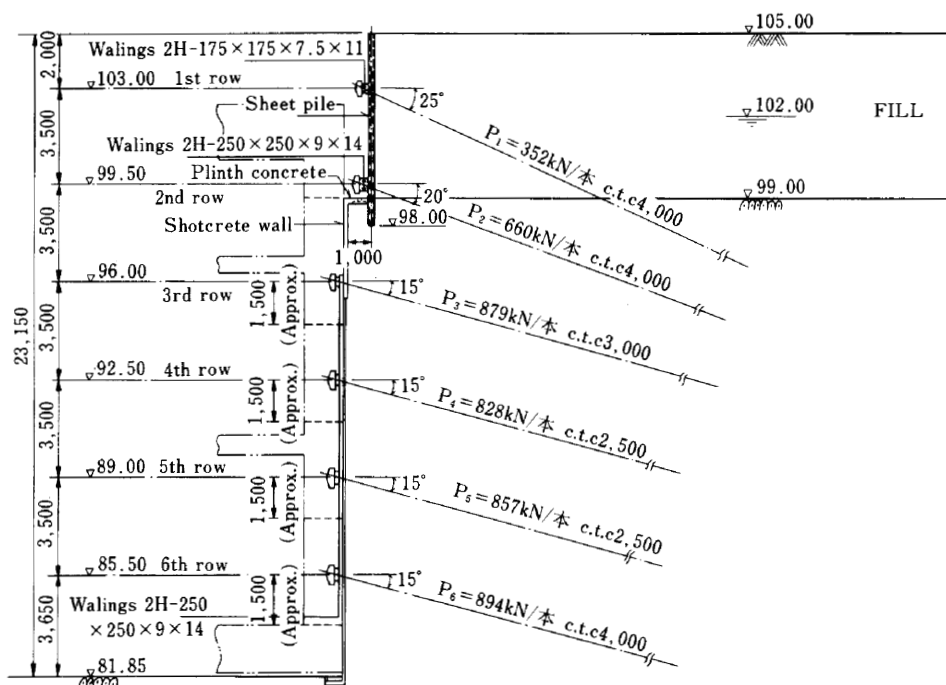


Fig.6 吹付けアンカー案断面図

(2) 掘削地山の安定

土留め壁として鋼材や鉄筋コンクリートを使用しない方法であるために、掘削地山の安定が問題となる。普通の土留工法では、Peck の提案した¹⁾安定係数(Stability Number)を安定性の指標とし、土留め壁の根入れ長さ・主働側、受働側の土圧・水圧によるモーメントのつり合いによって決定するが、本設計では次のような検討を行った。

- ①Peck の安定係数による判定
- ②複合すべり面を仮定した地山の安定
- ③円弧すべり面を仮定した地山の安定
- ④有限要素法による地山各部の破壊安全度
- ⑤Duncan-Chang の非線形モデルによる地盤の変形
- ⑥有限要素法を利用した非定常浸透流解析による有効応力解析

①～④に関する判定結果は以下のとおりである。

① Peck の安定係数

Peck の安定係数 $N_b (= \gamma t H / S_u)$ は0.63～2.02と小さく、掘削底面の変位は弾性的で十分に安定している。

② 複合すべり、円弧すべり

複合すべり、円弧すべりによる地山の安定計算結果(JANBU法)によれば、Fig.8 に示したように安定率が十分確保されている。

③地山各部の破壊安全度

有限要素法により地山各部の要素の主応力を求め、土の破壊規準式(Mohr-Coulombによる)により各要素の破壊安全度を計算し、それを図示したものがFig.9である。図では掘削底に近い壁面の一部に安全率が1を下回る部分が出現するが局所的であり、掘削地山全体の安定を損なうものでない。

以上のような総合的な技術的判断に基づいて、本工法の採用を決定した。

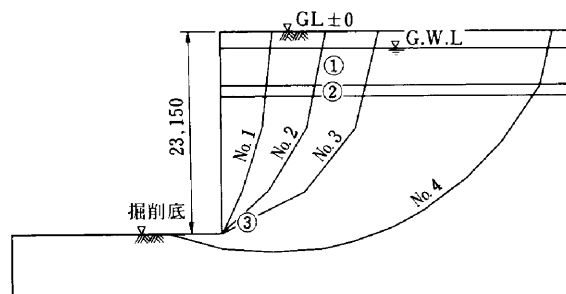


Fig.8 円弧すべり安全率図

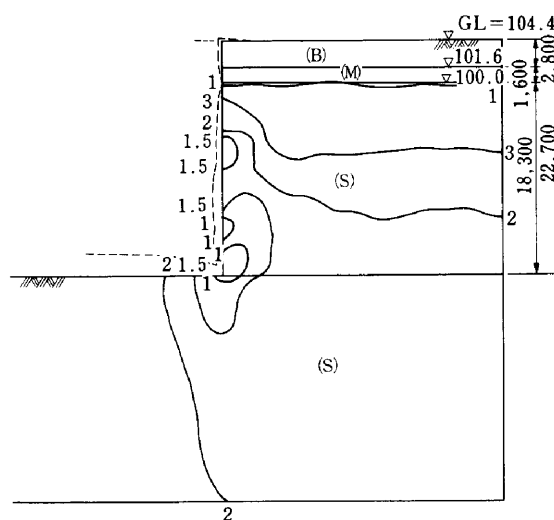


Fig.9 破壊安全度分布図

§4. 施工と計測

工事は着手後、全体の約1/5の床付が完了するまで順調に進んだ。Photo1 は最下段のアンカー施工状況である。

このまま掘削が順調に行われると記録的な工程の短縮

SLIP No.	S. F.	R.FORCE [t / m]	S.FORCE [t / m]
1	2.51	874.9	348.5
2	1.80	574.2	319.1
3	1.78	549.9	308.9
4	2.22	1287.8	579.3

土 質 条 件

局番号	飽和重量 [t / m³]	湿潤重量 [t / m³]	粘着力 [t / m²]	内部摩擦角 [DEG]
1	2.04	1.73	0.0	25
2	1.53	1.53	1.0	0
3	2.24	2.24	15.0	0

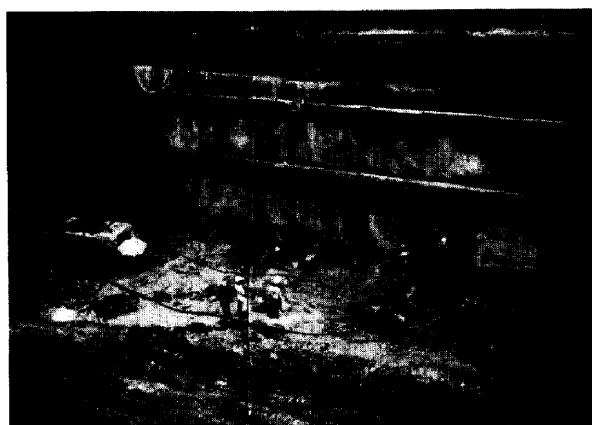


Photo 1 施工状況

になると考えられたが、1985年5月23日に掘削面北西側のほぼ中央部の第6・第7段アンカー間で幅約10mにわたり部分的に崩壊が生じた。さらにその後5月26日にその上部で幅40mにわたり、上部鋼矢板土留の根入れ部から第5段アンカー付近のレベルまで崩壊を起こした。崩壊部の平面位置を Fig.10、正面図を Fig.11、断面図を Fig.12 に示す。また工事中に掘削周辺で数ヶ所の傾斜

計による地盤変位の測定と地表面沈下の測定を行ったが、それらのうち崩壊部に近い点 (Fig.10 参照) の測定結果を Fig.13、Fig.14 に示す。測定は他にロードセルによるグラウンドアンカー反力も測定した。ロードセル測定結果は設計アンカー力に対して最大30%近く超えている値もあったが、概ね20%程度の超過荷重以内であった。

崩壊の直接の原因は、それより5日前のシンガポールとしては記録的な大雨によって、上部シートパイル根入れ部補強コンクリート部付近へ浸水したことによる粘土の強度低下と、一部アンカーの定着部モルタル填充不良のためと思われる抜け出しであったと推定されたが確定はできない。現場周辺はシンガポールの中心地で交通量が多く、北西隣には由緒ある教会が接していることを考

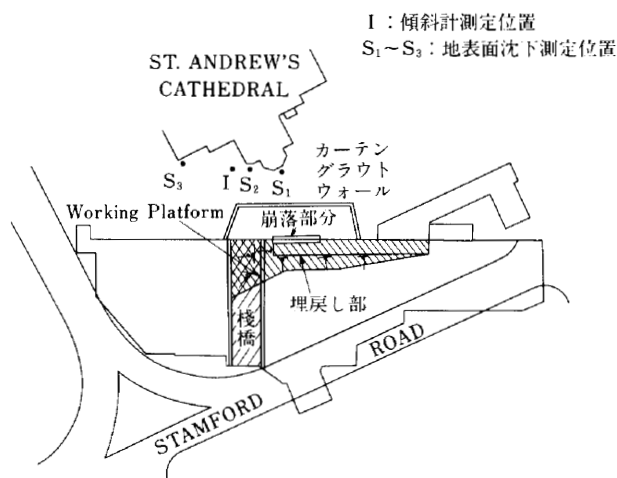


Fig.10 崩壊測定位置平面図

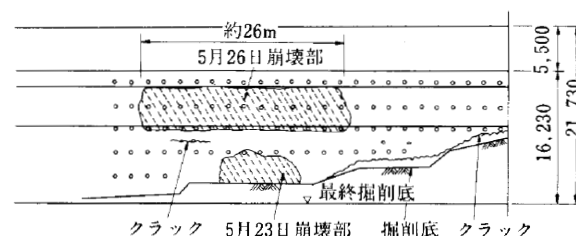


Fig.11 崩壊部分正面図

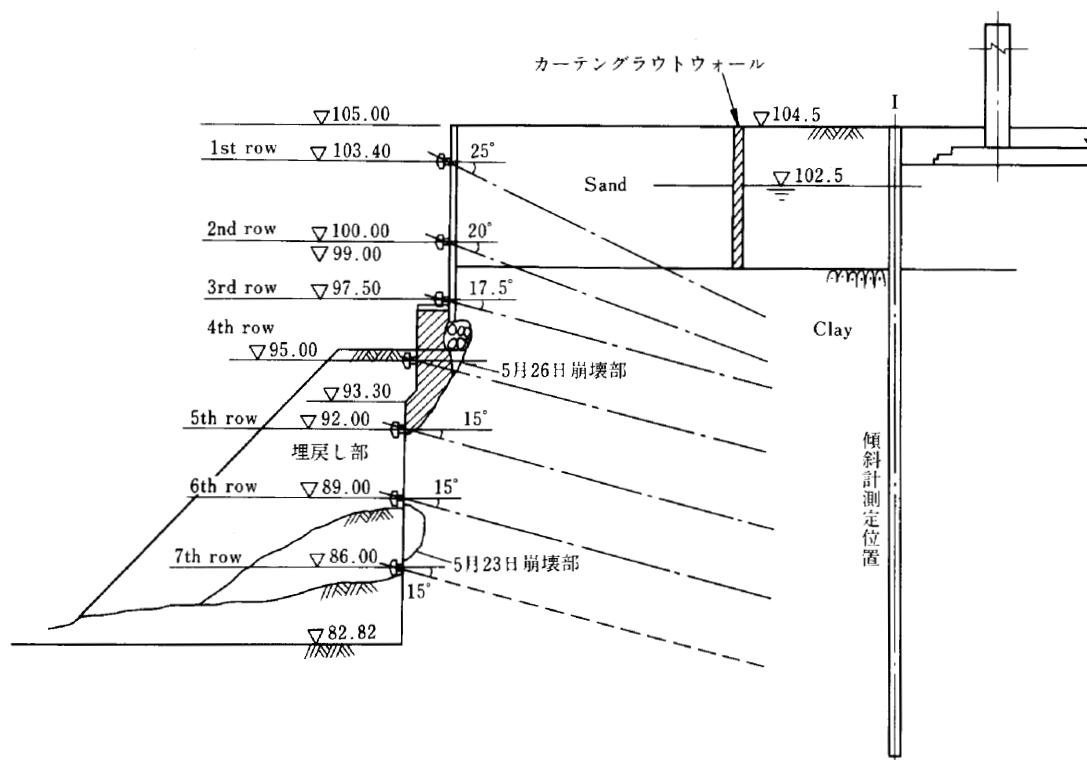


Fig.12 崩壊部断面図

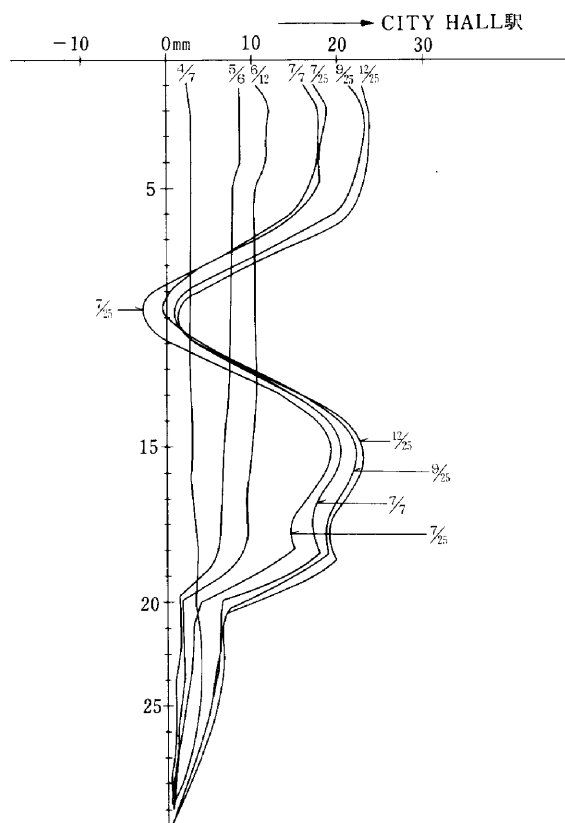


Fig.13 傾斜計による地盤変位測定結果

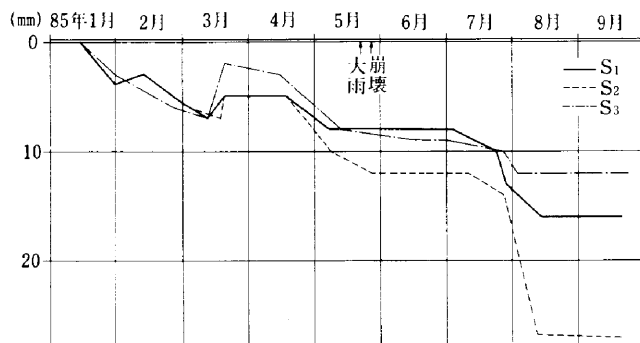


Fig.14 地表面沈下測定結果

慮して、十分安全と思われる範囲まで埋戻して、地山の安定を確認した後に崩壊部はマイクロパイルによる柱列杭を打設すると同時に上部の軟弱層に Fig.10 の要領でカーテングラウトを施して地下水を遮断した。また、それ以外の範囲も鉛直方向に鋼材により梁を設置してコンクリート吹付け面の崩壊を防ぐこととした。この状況を Photo2 に示す。さらにグラウンドアンカーの引張り試験を実施して十分な定着力が得られないと考えられる区間には支保工として切梁を設置した。この事故による工程遅延は余裕のあった工事工程を取り崩すこととなった。

本工法の管理にあたり最も注意を払うべき項目と考え

たのは以下の点である。

- ①グラウンドアンカーの確実な施工による地山の弛みの防止
- ②コンクリート吹付けの早期実施による掘削面の劣化防止
- ③傾斜計による地盤の変形や地表面沈下測定の実施による観測施工

崩壊後はさらに観測体制を強化し、その後は無事に構築を上げることができた。Table 3 に入札時、実施時(崩壊前、崩壊後)の土留工施工数量を示す。

§5. 考察

以上、グラウンドアンカーとコンクリート吹付けによる硬質粘土の開削工法に関して簡単にまとめた。本工法の採用に際しては本文では省略したが、入札時も含めて電子計算機により考えられる限りの検討方法を試みて、地盤の変形、地下水の浸透、吹付けコンクリートに作用する土圧などを決定して採用した。原因を特定できない部分崩壊はあったが、当工事のような市街地で硬質粘土とはいえ表層に地下水の豊富な飽和砂層があり、しかも約23mもの深い掘削をこの種の土留工法で行い成功させた例はないであろうと思われる。

アンカーにより地山を補強して掘削する工法には緊張アンカーにより切土法面を補強する工法が従来から行われており、また鉄筋アンカーによる補強土工法(ソイルネイリング工法)が最近実施されて来ている。本工法は前者をこれまでの採用条件から著しく飛躍させたものであり、今後更に研究を積んで実施される機会があるものと考えられるのでここに採り上げた。

今回の実績をベースに、類似条件の工事に当り、その経済性追求という面から、再度当工法を適用したいと考えるが、その際、本工事の経験から以下のような諸点をその改善点として取入れたいと考えている。

- ①今回の場合、土質がそれを許容したためもあるが、掘削土量及び埋戻しの条件などを勘案し、切土面を完全な垂直で計画した。

このためアンカーの打設角度を、杭がないゆえにアンカーからの下方鉛直分力を小さくなるように浅く押さえる必要が生じ、モルタルグラウト注入に種々の問題があったように反省される。

やはり切土面は、工事全体のバランスの中で許される限り角度をもたせた方がより良いと思われ、今回の経験からみて、切土面の斜角を4°~6°くらいとし、アンカーの打設角度を20°~25°くらいにした方

17 June '85

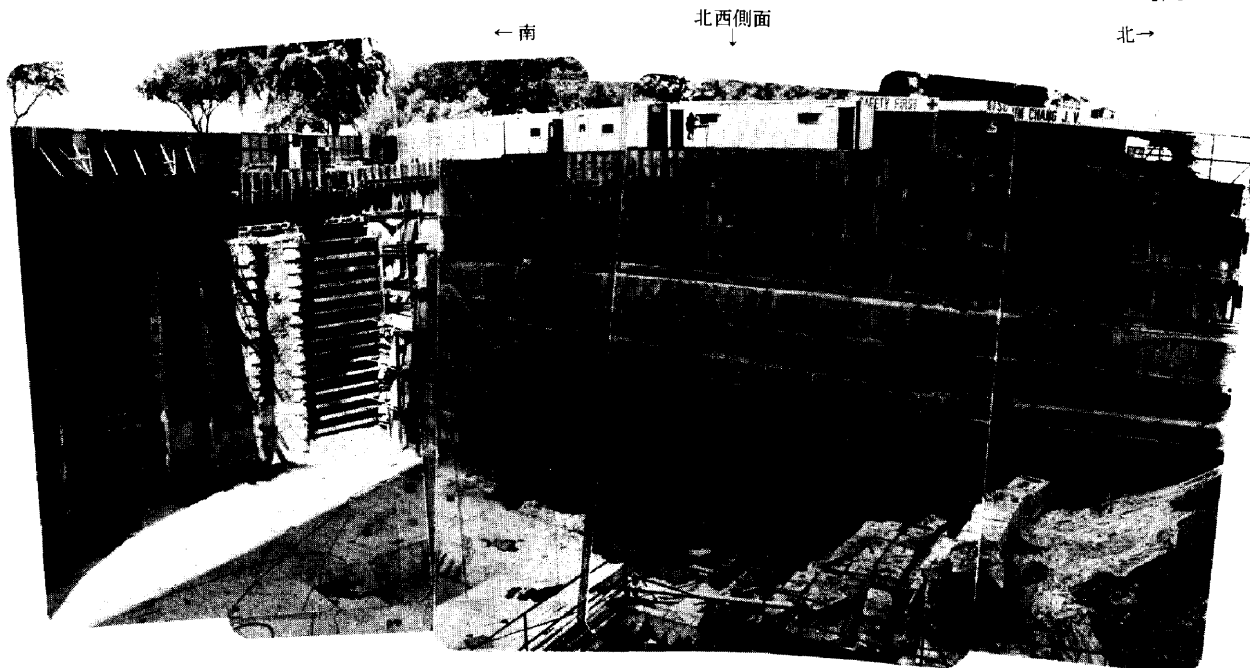


Photo 2 鉛直ブレースによる補強状況

Table 3 駅部土留工数量

工 種	入 札 時	実 施 時	
		崩 壊 前	崩 壊 後
土 留 杭	H-300 2,858m	場所打杭 $\phi 1.2\text{m} \times 33\text{本}$	場所打杭 $\phi 1.2\text{m} \times 47\text{本}$ ミニパイル $\phi 273 \times 72\text{本}$
	H-350 6,027m		
	計 8,885m (1,094 t)		
シ ー ト パ イ ル	II型 $\times 403\text{ t}$	III型 $\times 636\text{ t}$	III型 $\times 636\text{ t}$
支 保 工	1,400 t	10 t	401 t
グラウンドアンカー	422本	1,238本	1,300本
吹付けコンクリート	8,800 m^3	5,880 m^3	5,880 m^3

がよいと思われる。

②変更した構造は、既述の如くグラウンドアンカー、吹付け、水平腹起しの組合せであったが、前述の崩壊の如き不時の土質強度の劣化などに対して、小さな打設角度にもかかわらず、定着部のアンカーの下方鉛直分力が一種の薄肉構造体である吹付けコンクリートにかかり、その処理が問題となった。

①の考慮と合わせて、水平腹起しでなく、切土面に沿った上下方向の梁的なものにした方が良いのではないかと考えられる。

Fig.15 に、この考え方を示す。

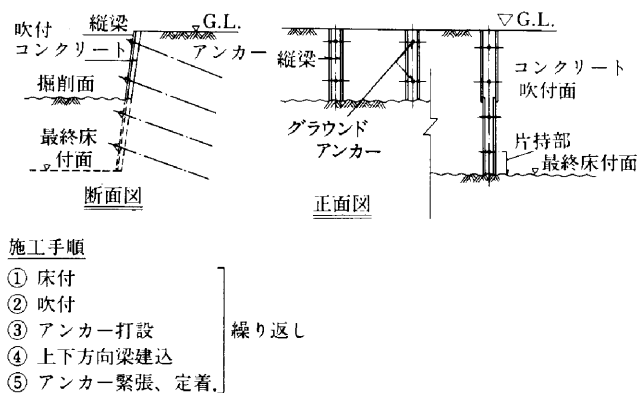


Fig.15 改良施工方案概念図

§6. おわりに

我社初めてのシンガポール進出となった今回の地下鉄工事は、前述のように完全な設計施工である。その入札に当っては、本社海外事業部を中心として多くの社内関連機関が必死の努力をし、幸いに落札に成功したものである。

これからも国際競争入札という特に厳しい環境の中では、本工法のように思い切って経済性を追求した工法が必然的に要求されることが当たり前となって来るであろう。しかしながら今回、この工法を採用するに当っては、その変更決定が落札直後のことであり、かつ入札時の土留工法が、契約条件の一部となっていたことから、企業先の承認を得るためには非常な努力が必要であった。

いわゆる国際契約約款の下で完全な双務性に基いてプロジェクトを遂行するに当り、当初の契約条件の一部の変更を申請するという事は、別の表現をすれば当方にとって都合のよい思想を相手方に無理に押つけることと変わらない。

こういった変更申請とか論争は国際的概念によるフェア精神に基く動きとはいえ、相手が完全に受け入れられる論理的整合性を、技術面、契約面そして土木技術者としての社会的責任面において要求されるものである。

今回このハードルをなんとかクリアすることが出来たが、その詳細なプロセスなどの発表は、現工事がまだ進行中という事情を考慮して、後日に公にしたいと考えている。いづれにしろ、こういった変更申請の前後、そして施工途中において我国では考えられないような理論的なぶつかり合いを施主及び管理コンサルタント、協力業者との間にあって行わなければならない中で、困難に会いながらもそれらを克服して工事を進めることができたのは、設計技術もさることながら、厳しい施工条件、品質管理に十分に対応してきた現場の技術力、管理力であり、それらの全てを含めた我社の総合力を誇れるものであると考えている。

紙面の都合もあり、現場サイドの考え方を十分に反映できなかったことをお詫びするが、それらの点は今後の発表を期待すると同時に、残された工期を無事に終え、工事全体が完全な成功裡に終わることを祈るものである。

参考文献

- 1) R. B. Peck ; Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground, 7th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering,

Mexico.

- 2) 仮設構造物設計分科会；土留め壁土圧実測データ調査結果・中間報告
土木学会誌 1981, 2
- 3) 仮設構造物設計分科会；土留め壁土圧実測データ調査結果・中間報告
土木学会誌 1983, 9