

新規埋立地における開削トンネル築造工事の計画および施工（香港）

Planning and Construction of Cut and Cover Tunnel in New Reclaimed Land

中島 豊*
Yutaka Nakajima

山内 悟**
Satoru Yamauchi

要 約

「香港西部海底トンネル」は、香港島と九龍半島を結ぶ片側3車線、香港で3番目の道路海底トンネルプロジェクトである。プロジェクトはBOT方式によって香港政庁から西部海底トンネル株式会社に工事から運営の一切が委託されており、このうち設計及び工事施工は当社をリーダーとする共同企業体によって一括で請け負われている。

九龍半島側に位置する当該工事区域は工事着手後に埋立てが完了し、埋立て後の土質調査により入札時の設計の変更を余儀なくされたが、地中連続壁を仮設山留として採用することによって切梁の段数を大幅に減らし、当初の工事費と工期を維持した。また弱齢地盤での大規模開削工事であり、山留工の安全性を確認する目的で計測施工を採用した。このことにより、問題の発生に速やかに対応することができ、工事を無事進めることができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 地質概要
- § 4. 取り付けトンネルの構造と施工方法の選定
- § 5. 山留工
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

1997年の中国返還を間近に控えた香港では総合インフラストラクチャー整備事業が精力的に進められている。「香港西部海底トンネル」は香港島と九龍半島を結ぶ片側3車線規格を適用した海底トンネルを建設するプロジェクトであり、西部海底トンネル株式会社（以下WHTC）が、BOT方式による建設から有料道路運営までを香港政庁から付与されたフランチャイズ権により請け負っているものである。

全体工事は図-1に示すように、海底部沈埋トンネル、陸上部開削取り付けトンネル、料金所、インターチェンジ等から構成されており、当社をリーダーとする熊谷組

* 香港(支)香港第三海底トンネル工事事務所

** 香港(支)土木部設計課

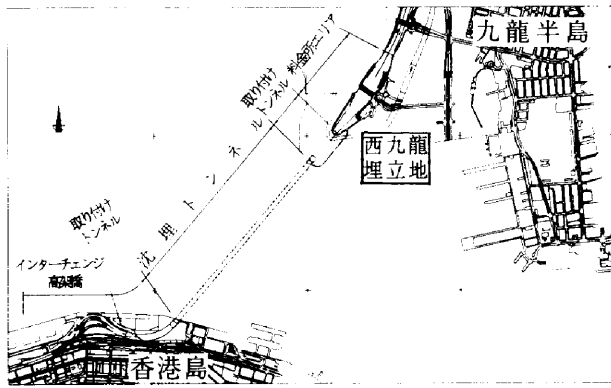


図-1 プロジェクト概要図

との共同企業体（Nishimatsu Kumagai Joint Venture 以下NKJV）がWHTCより請負金額約800億円で工事を請け負っている。

本報では、埋立て完了直後の西九龍埋立地に開削工法で建設された取り付けトンネルについて、掘削、山留方式の設計、選定、施工、計測及び問題発生時の対策について報告する。

§ 2. 工事概要

九龍半島側取り付けトンネルの工事概要を以下に示す。

- 工事名 : 香港西部海底トンネル工事
- 企業先 : 西部海底トンネル株式会社 (WHTC)
- 工期 : 1993年8月～1997年6月 (47ヶ月)
- 工事場所 : 西九龍埋立地

本文にて報告する取り付けトンネルは、地上部から沈埋トンネルへの進入路となる縦断勾配5%、延長210m、上り4車線、下り3車線のボックスカルバート構造からなる陸上部開削トンネルである。取り付けトンネルは、最深部で沈埋トンネル接続のための円形地下構造物であるトンネル換気立坑に、陸側は半地下式U型構造物であるオープンランプに各々接続されている。構造断面図を図-2に、主要工種とその数量を表-1に示す。

§ 3. 地質概要

工事箇所は、九龍半島突端部の西側に造成された西九龍埋立地に位置し、1991年から1993年にかけて海成堆積物の浚渫を行なった後、海砂によって埋立を行ない造成された弱齢地盤で、工事着手時には部分的に埋立てが完了していない箇所も残っていた。

ボーリング調査結果によると土層区分は、地表面から海砂による埋土層、沖積砂層、風化花崗岩層であり、埋

表-1 取り付けトンネル主要工種数量表

工種	仕様	単位	数量
構築工	鉄筋工	D10～D50	t 3,800
	型枠工		m ² 18,850
	コンクリート工	圧縮強度35MPa～45MPa	m ³ 27,200
	防水工	厚さ1.5mm、瀝青系シート	m ² 18,500
	換気立坑接続部支持杭	場所打ち鉄筋コンクリート杭 断面6.02×1.2m、杭長33.7m	本 3
	可撓継ぎ手	伸縮ゴムシール	箇所 2
	換気ダクト用コンクリートパネル	厚さ200mm	m ² 5,750
山留工	舗装工	厚さ130mmアスファルト	m ² 5,300
	地中連続壁	厚さ1.2m、深さ24～40m 鉄筋量126kg/m ³	m ² 12,600
	中間杭	H-350×350×12×19 H-400×400×13×21	t 240
	切梁	H-350×350×12×19～ H-438×417×30×40	t 1,030
	切梁受け他	L-380×100×13×20他	t 280
	掘削	深さ12～22m	m ³ 131,700
	埋め戻し		m ³ 65,000

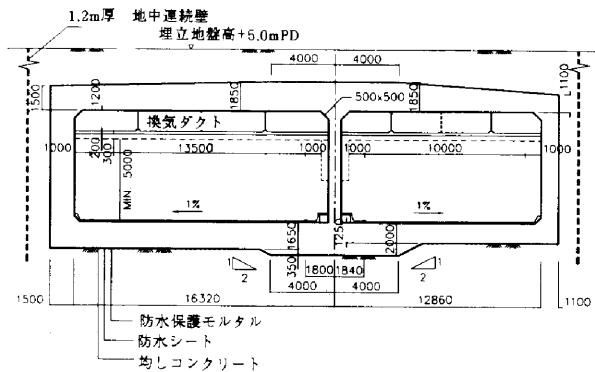


図-2 取り付けトンネル一般構造図

土層と沖積砂層との間に、1m程度の厚さの海成堆積物が残存する箇所が部分的に存在している。

地下水位は埋立地が面しているビクトリアハーバーの潮位に合わせて上下するが、仮設構造物設計時には+2.5mPD、(GL-2.5m)を使用した。土質縦断面図を図-3に、土質定数を表-2に示す。

§ 4. 取り付けトンネルの構造と施工方法の選定

4-1 設計施工一括請負の特徴

NKJVは当該プロジェクトのうち設計、建設部門を一括してWHTCより請け負っており、工事全体の計画、管理、調整を行っている。

工事は、ファーストラック方式と呼ばれる、設計と施工を同時進行的に進めていく方法で行われたが、この方式は入札時と施工時の工事内容の相違、設計承認及び資材発注に対する時間的制約等のリスクを含んでいる。

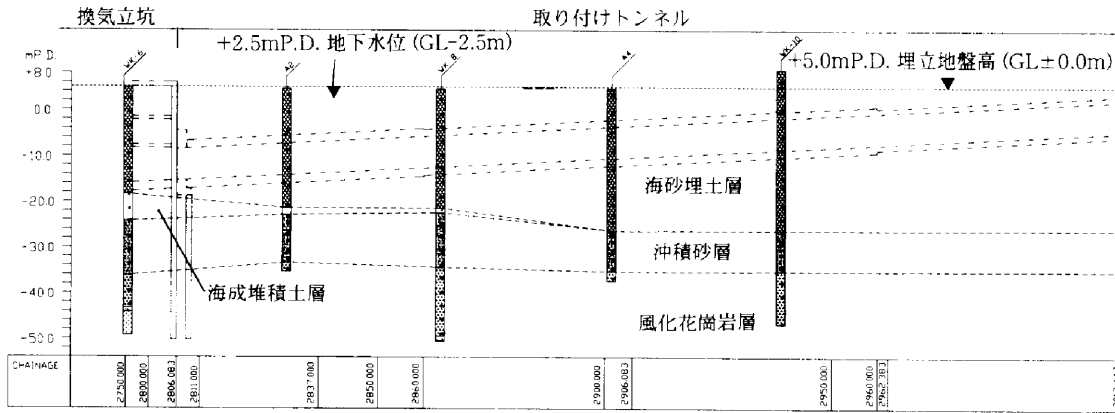


図-3 土質縦断図

表-2 土質定数一覧表

	単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (DEG)	変形係数 E (kN/m ²)	透水性係数 K (m/sec)
海砂埋土層	20.0	0.0	35	15 000	2.0×10 ⁻⁴
海成堆積層	20.0	0.0	30	10 000	2.0×10 ⁻⁴
沖積砂層	20.0	0.0	35	20 000	8.0×10 ⁻⁴
風化花崗岩層	19.0	5.0	35	70 000	2.0×10 ⁻⁴

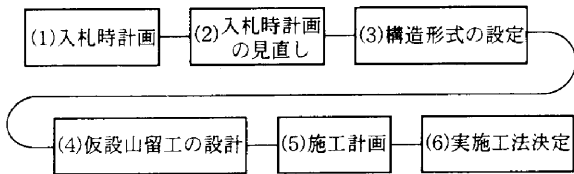


図-4 施工法選定までのフロー

反面、要求されている仕様を満足させていれば、設計と施工計画に関して、工費の削減及び工期の短縮を目的とした施工者の自由な発想を取り入れることが可能である。そのため常に設計部門と施工部門が一体となって意見を交換しあい、最善の工法を模索しながら工事は進められた。

4-2 設計施工体制

NKJVの下に施工部門として西松建設と熊谷組が、設計部門として設計コンサルタントJVが組織されており、各々の調整はNKJVのプロジェクト監理組織を通じて行われる。

本設構造物、設備については香港での大型工事の設計経験豊富なMaunsell・Acer・Parsons Brinckerhoffの3社の設計コンサルタントによるJV（以下MAPBJV）が設計をおこない、仮設構造物については、西松建設、熊谷組が各々の工区の設計を行うものとした。これら2部門は互いに協調して施工及び設計の合理化を図り、NKJVの監理組織を通じて香港政府の設計、施工承認を取り工

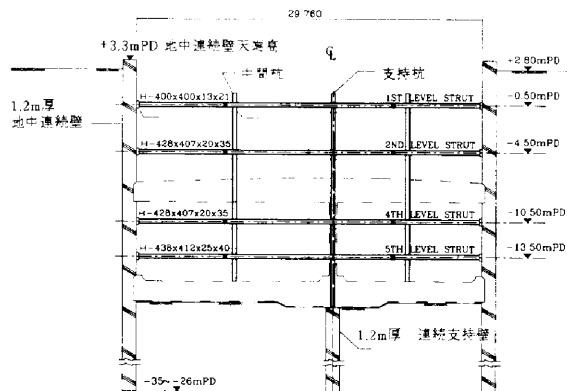


図-5 逆巻き工法山留工標準横断図

事を実施した。

4-3 構造と施工法選定までのフロー

取り付けトンネルの築造に際して、今回採用された構造と施工法選定までのフローを図-4に示し以下にその概要を記す。

(1) 入札時計画（逆巻き工法）

入札に際しては、施工条件に適すると考えられる数種類の工法が検討されたが、最終的に、香港の地下鉄等によく適用され、当社としても十分な施工経験のある地中連続壁を山留壁ならびに本体側壁として併用する逆巻き工法を適用することとした。

入札時における山留計画標準断面を図-5に示す。

(2) 入札時計画の見直し

入札時、当該工事区域は埋立て中であつたため、基本設計の土質定数は香港政府から与えられた資料に基づいて設定された。工事入手後、埋立ての完了を待って行われた土質調査の結果を使用して、MAPBJVにより入札時計画に基づいた詳細設計が行われたが、その初期検討の段階で、入札時に計画された逆巻き工法による地中連続壁と中間支持杭によって拘束されたボックスカルバー

ト構造では、沈下特性や支持力の分担等に関して構造的な矛盾が生じることが判明した。これを受けて、設計及び施工計画の見直しを行なうこととなった。

(3) 構造形式の設定

初期の段階で判明した構造上の問題点を解決するため、地中連続壁を本体構造物から分離し、掘削中における山留及び遮水効果のみを受け持つ仮設構造物とし順巻き工法にて施工する案を検討することとした。

仮設山留壁を鋼製切梁で支持しながら掘削するという方法はごく一般的な掘削工法であるが、香港においては地中連続壁を仮設としてのみ使用するという概念はあまり一般的ではなく、入札時計画の見直しに際しては、工費と工期の両面について十分に検討を重ねた上で判断を行うこととした。

見直し案の最大のメリットとしては、地中連続壁を仮設構造物として使用することによって沈下、変形に対する許容値を大きく取ることができ、切梁の鉛直方向間隔の拡大、切梁材の剛性の低減が可能であると考えた。

半面、トンネル換気立坑の地中連続壁が岩着しているため、換気立坑と取り付けトンネルとの間の不等沈下が問題となる。換気立坑とトンネルの接合部が固定された状態でトンネルが沈下を起こすと、トンネル縦断方向に応力が発生し、トンネルの施工継ぎ手部でズレが生じてしまう危険性がある。したがって、トンネルの施工継ぎ手のうち2箇所にかたまり継ぎ手を設けて、不等沈下によるズレを吸収させるものとした。

(4) 仮設山留工の設計

見直し案に対する設計は、地中連続壁の本設構造物から仮設構造物への変更により当社が独自で行ったが、工事施工を留意して以下の基本方針に則り行われた。

- ①山留壁は仮設構造物として大きな変位を許容する。
- ②支保工に腹起しを使用せず、かつ地中連続壁自体の回転を起こさないようにする。
- ③切梁は鉛直方向間隔をできるだけ広くして段数の減少を図る。
- ④躯体構築の際、躯体の中に切梁材を存置しない。

(5) 施工計画

山留工の設計は上述の基本方針を満足する形で仕上がった。これにより、通常考えられる地上部からのクラムシェル、クレーンによる掘削土の搬出及び切梁架設を掘削盤からじかに機械を用いて行なうこととして施工計画の作成を行った。

①掘削計画

掘削横断面の中央部分を先行掘削し、ダンプトラック通路としてバックホーによるダンプトラックへの掘削土

の直積、搬出を行なうものとした。

②切梁架設計画

材料搬入はダンプトラック通路を使用してクレーンローリーにて行い、架設は基本的に負荷表示器を取り付けたバックホーにて行なう。

③補助クレーン

50tクレーンを地上部山留壁背面に1台配置し、掘削土の直積み、搬出が困難な場合が想定される切梁の3～4段部分の掘削土搬出補助として、また切梁架設の補助として使用する。

(6) 実施工法決定

構造形式の計画変更を行うことにより、掘削山留工においては支持杭及び切梁の数量が大幅に削減された。逆に構築工では側壁構築とその防水にかかる費用が大きく増え、支持杭を無くしたことにより構築内の2ヶ所に可撓ジョイントが必要となった。工費については、逆巻き工法時に考えられていた掘削山留め工事費を100%とすると、このうち約5%を削減できる結果となった。また、工期については多少の伸延が予想されたが、切梁の数量の大幅削減等によって、作業性能が大きく改善されることにより、全体工程の中で十分これを消化できるものと判断された。

以上の理由により、実施工法は仮設地中連続壁使用の順巻き工法を用いることに決定し工事に着手した。

§ 5. 山留工

5-1 山留工の計画及び設計

本工事は既設構造物が周囲になく、山留壁背面の沈下などに対して配慮する必要がない。このため、かなり自由度の高い山留の設計が可能であった。山留工の設計は、工事の施工しやすさと、コストの低減を目標とし、§ 4にて述べられた基本方針に則り、山留壁には地中連続壁を採用し、切梁支保工を用いて山留壁を保持する構造とした。また、山留壁にかかる上圧を低減させ山留壁の設計を有利にするために、当該取り付けトンネルの周囲15mの区間の地盤をあらかじめ法切りオープンカットにて+2.8m P.D. (GL-2.2m) まで掘削しておくものとした。山留工の平面図、縦断図及び使用切梁材一覧を図-6に、代表横断面図を図-7に、また山留内でのダンプトラックによる掘削土直積、搬出状況を写真-1に示す。

(1) 山留壁

山留壁に用いる地中連続壁は、壁パネルの配置、切梁の間隔等の基本計画を行った上で、Bachy Soletanche社の設計施工とした。設計の結果、地中連続壁は引張り許

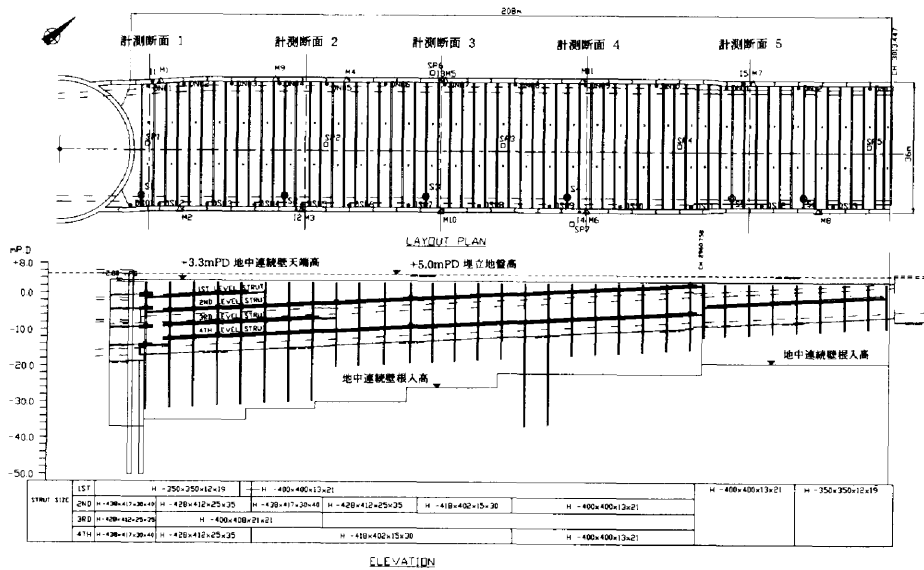


図-6 順巻き工法山留工平面・縦断及び計測位置図

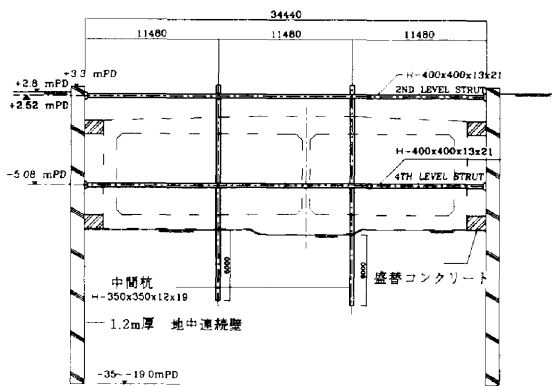


図-7 順巻き工法山留工標準横断図

表-3 計測項目一覧表

計測項目	計測機器	箇所数	頻度	凡例
連壁の変形	挿入式傾斜計	5	1回/5日	○I
切梁の軸力	ひずみ計	6	1回/5日	◎S
連壁の変位	測量	11	1回/5日	△M
連壁と中間杭の沈下	レベル測量	11	1回/5日	△M
地下水位	センサー付きメジャー	32	4回/1日	□SP, ●DN, DS



写真-1 工事施工状況

容応力度230MPaの鉄筋と許容曲げ圧縮応力度11.7MPaのコンクリートを使用し、1パネル6.5m、厚さ1.2mとした。コンクリートの1m³当たりの鉄筋量は126kg/m³となった。なお山留壁の設計に際しては、Bachy Soletancheは、自社開発の山留弾塑性解析プログラムを用い設計を行った。

(2) 切梁支保工

切梁の設計は、Bachy Soletanche社の山留弾塑性解析結果より、各施工段階に於ける切梁架設位置での支点反力を用いて行なった。設計に際して、以下の点に留意した。

- 掘削時において重機掘削を容易にするため、水平方向に3.0m以上、鉛直方向に3.5m以上の間隔を確保する。
- 躯体構築の施工手順が、最初に底床のコンクリートを打設し、次に側壁と上床を同時に打設することになることを考慮し、底床及び上床よりも1.5m上方に切梁を架設し作業性を確保するものとした。
- 躯体構築の際に、躯体の中に切梁が残らないように配置を決定した。

香港内には加工された切梁材が存在せず、また当該工事のように一度に多量の鋼材を使用する場合は、必然的に鋼材を海外から輸入することになる。こうした場合、切梁の設計は材料による制限がなくなるため、かなり自由に行うことができる。本工事では切梁材はH鋼を使用するものとし、設計荷重に対して必要な断面性能を有する生材を輸入、現場で加工して切梁として使用するものとした。

設計の結果切梁の水平間隔は3.25mとし、掘削深さに

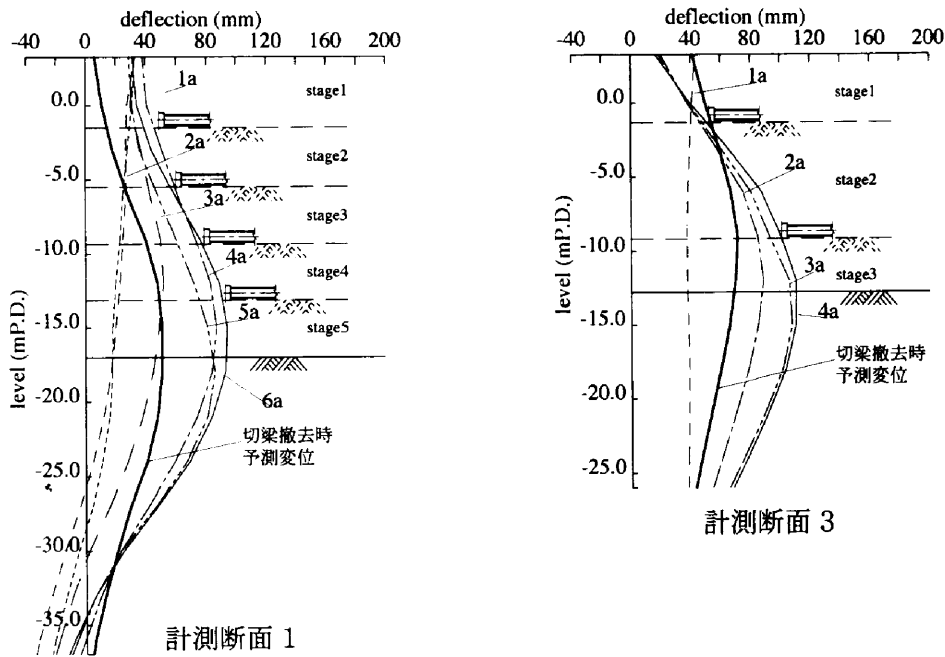


図-8 山留壁変位図

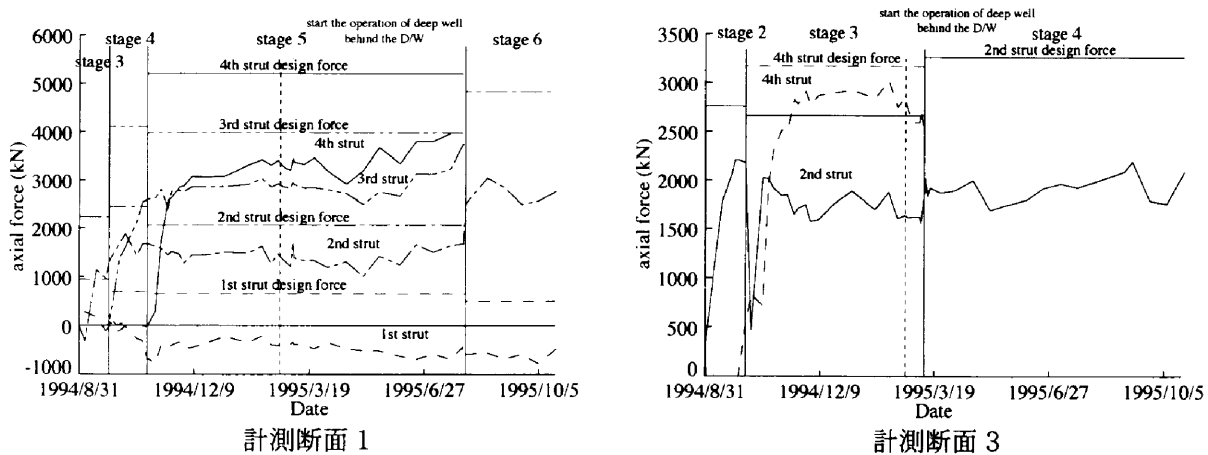


図-9 切梁軸力変化図

応じて1～4段架設するものとした。

(3) ディープウェル

山留壁の根入れを砂質地盤で止めるため、山留内の水位の低下と掘削地盤の安定を図ることを目的として、地下水位低下工法としてディープウェルを採用した。本工事は工事区間の周囲に既設構造物、埋設物等が存在しないため、掘削地盤の受働耐力の増加を図ることを目的に、掘削に先立ち山留内の水位を最終掘削時の水位まで一気に下げることとした。

5-2 計測計画

本工事では、山留工と掘削作業の安全を確認するために表-3に示す計測を行なうものとした。図-6に各計

測ポイントの配置を示す。

山留壁の変形、変位計測は計測値を設計変位量と比較することにより山留壁の安全性を確認することを目的とした。挿入式傾斜計では地中連続壁の下端からの相対的な変形を計測することになるため、挿入式傾斜計と地中連続壁頭部の変位計測結果とを合成し地中連続壁の絶対変位を求めるものとした。

切梁の軸力は、H鋼のフランジに2ヶ所取り付けたひずみ計の計測データから換算して軸力を求めるものとし、設計軸力の80%を管理目標値として定めた。

山留工の沈下については、切梁架設後に地中連続壁と中間杭とが不等沈下を起こした場合切梁に設計外の応力

が生じる結果となるため、地中連続壁と中間杭の沈下計測を行ない不等沈下の監視を行なうものとした。

5-3 計測結果

計測計画に基づき実施した計測の内、計測断面1及び計測断面3の結果を図-8及び図-9に示す。これら計測結果から本工事の山留工の挙動には以下のような特徴が挙げられる。

(1) 変位計測結果

掘削に先立ち、ディープウェルによって山留内の地下水位を最終掘削段階の計画水位まで一気に下げたため、掘削以前に山留壁の変位が生じている。計測断面1については3次掘削時から、計測断面3については2次掘削時から山留壁の変形は急速に進行し、予測値を大幅に上回る変形を示す結果となった。

(2) 切梁の軸力計測

切梁軸力は掘削の進行に伴い増加し、次段の切梁架設後の掘削に伴って減少している。特に計測断面3においては、切梁の軸力増加は2段目切梁架設のための掘削時に急速に増加し、80%を上回る軸力が計測されている。反面、最下段切梁は軸力が予測値の60%程度にしかなくなっている。

(3) 沈下計測

地中連続壁の沈下はディープウェルの運転と同時に始まっており、山留内の水位が平衡状態になるのと同様に沈下も止まっている。問題視していた、地中連続壁と中間杭の不等沈下は起きておらず、中間杭も地中連続壁と

同様に沈下していることが解った。

5-4 地中連続壁のクラック発生と対策

4次掘削が完了した時点で、山留壁表面にクラックが発生しているのが発見された。クラックの大半はヘアークラックであるが、特に深さ-10mP.D.付近に、幅0.9~2.5mmのクラックが水平方向に連続して発生している。クラックの発見後、山留壁全体に渡って毎日クラックの発生状況を目視観測すると共に、特にクラック幅の大きい箇所については、マーキングを行ない、クラック・ルーラー（最小読み値0.05mm）を用いてクラック幅の計測を行った。その後の計測では、クラック発見当初からクラック幅の増加は見られず、最終掘削完了の段階で測定は中止した。

(1) 原因の調査

クラック発生の原因として、余堀量が設計の切梁中心から50cm下までとしていたのに対して、実施工では1.0~1.5mと大きかったため、山留壁の変形が設計よりも大きくなっているものと考えた。従って、クラックの発生がもっとも顕著であった計測断面3について、実際の余堀量を用いて弾塑性解析を行い、余堀量の増加によって生じる山留壁の断面力の増加、切梁撤去時の断面力の検討を行なった。計測断面3について、余堀量を考慮して山留弾塑性解析を行った結果を図-10に示す。

クラックが発生したと考えられる2ステップ目について解析結果と設計値とを比較すると、最大曲げモーメントが45%増加している。さらに地中連続壁のコンクリー

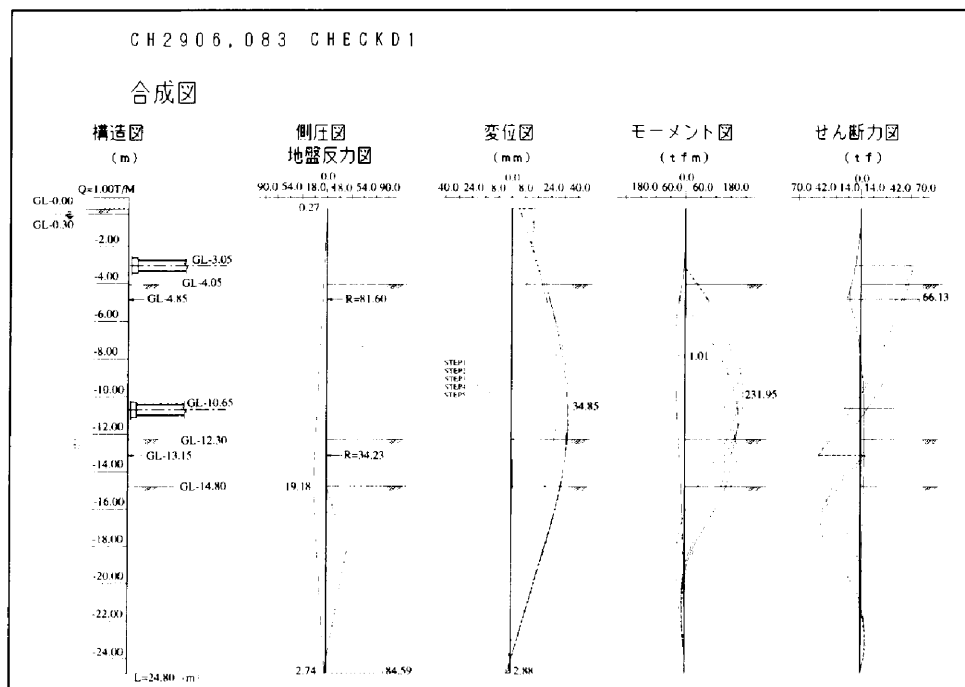


図-10 余堀を考慮した山留弾塑性解析結果図

ト断面応力計算を行なった結果、鉄筋の許容引張応力の90%の応力が発生している結果となった。クラックの状況から判断すると、山留壁の一部のパネルでは鉄筋の降伏～応力の再配分という経過を経たものと思われる。この結果山留壁にクラックが発生し、剛性の低下を引き起こし設計値と比較して大きな変形が生じたものと考えられる。

クラックの発生位置が、最下段切梁架設のための掘削時での最大曲げモーメント発生位置と一致することから、最終掘削の段階ではクラックの発生した位置での曲げモーメントは減少するものと考えられる。また、切梁の軸力が予測値の80%程度であるため、山留壁そのものが掘削段階で崩壊する危険性は無いと考えた。しかし、切梁の撤去時には底盤スラブと1段目の切梁とのスパンが10mと非常に広く、かつ最大曲げモーメントがクラックの入った場所に再度発生することになり、計算では鉄筋の許容引張応力を超える結果となるため、安全性を考慮して対策工の必要性があるものと考えた。

(2) 対策工

切梁撤去時に発生する曲げモーメントの増加を抑制するために、山留壁背面にディープウェルを設置し山留壁に作用している水圧を低減させるものとした。対策工による山留壁の曲げ応力及び切梁の軸力の低減効果を表一4に示す。

この結果、山留壁の曲げ応力は掘削時に問題となった4段目切梁架設時の掘削で生じた応力とほぼ同等となり、切梁軸力に関しては設計軸力の78.7%まで低減することができることが解った。したがって、山留壁背面の水位を2.0m低下させるのに必要なディープウェルの計画をおこなない対策工として実施した。

(3) 対策結果

表一4 対策工による山留弾塑性解析結果

		STEP 1		
		設定値	対策工	
		(kN/m)	(kN/m)	(%)
支点反力 (kN/m)	1	635	500	78.7
	2			
	Base	529	356	67.2
	Roof			
Smax	(kN/m)	571	171	82.6
Level	(mPD)	-0.25	-0.25	
Mmin	(kN・m/m)	-115	-151	106
Level	(mPD)	-18.20	-18.20	
Mmax	(kN・m/m)	2273	2110	92.8
f _{st}	(N/mm ²)	227	211	92.9
Level	(mPD)	-7.20	-7.70	

切梁撤去前は、地下水位の低下に伴う切梁軸力の低下及び変形の減少は見られなかったが、切梁撤去後の切梁軸力は、設計値の40～60%程度の軸力しか発生しておらず、対策工の検討結果である設計値の78.7%を大きく下回る数値となった。また、掘削時に発生したクラックの調査を行ったが、クラックの進行は見られなかった。

以上の結果から、山留壁の背面の水位を低下させることにより山留壁の安定に大きな効果があることが確認された。

§ 6. まとめ

本報告は、大規模で公共性の高い土木工事の一括請負方式による設計施工工事について、入札から施工までの一連の流れを一例を用いて概略的に述べた。

香港で地中連続壁は通常本体構造物の側壁として使用し、本工事のように仮設山留壁としてのみ使用することは極めてまれである。また、掘削深さが13m～22m程度の仮設山留でありながら、1.2mと比較的厚い地中連続壁を採用し、切梁の段数を減らすといった大胆な設計を採用した。このことによって、入札後の諸条件の違いによる計画の変更に対応することができた。工事対象地盤が弱粘地盤であり、かつ切梁鉛直スパンがかなり大きく、かつ経験のない山留工となったが、計測施工を取り入れることにより、安全性の確保と問題発生時の速やかな対策が可能であった。このように本工事では一連の工事を、設計・施工の両面から取り組むことによって、様々な問題に対して柔軟に対応し、設計施工の一括請負方式によるメリットを十分に得ることができたものと考えられる。日本においてはまだ馴染みのうすいBOT方式であるが、香港等の先進国のみならず政府財源の乏しい発展途上国においても、今後の発展を企図したインフラストラクチャー整備の要求に基づき、BOT方式による工事やそのもとの一括設計・施工での工事が増えていくものと思われる。本報で述べた当該工事の設計、施工一連の流れが今後の参考になれば幸いである。

最後に、当工事に際して日々尽力頂いている現場のスタッフ一同、またご協力、御指導頂きました本社土木設計部、技術研究所の方々にこの紙面を借りて深く感謝の意を表します。