

インド プルリア揚水式発電所工事

—海外地下工事における機械化—

柴田 勝実

インドのプルリア揚水発電所は、ODA 資金供与を受け、インド西ベンガル州電力公社（WBSEB）が発注した揚水式地下発電所（900 MW）である。土木・建築工事全体として、上池と下池の中央遮水式ロックフィルダム、掘削量 14 万 m³ の地下発電所、周辺トンネル、付帯設備等が 2001 年 6 月に一括発注された。本報文は、全体工事の内地下工事に関するものである。まず、工事概要とその特徴を示し、使用した建設機械、およびその選定理由について述べる。次に各論として、地下発電所、斜坑、ケーブルトンネルの掘削方法の特徴を詳細に述べ、本工事における主な機械化、また機械化を極力排した施工法について紹介する。また、コンクリート工事に係わる機械についても述べる。最後に、インドにおける建設機械の選定、取扱い、施工の特徴及び問題点を挙げる。

キーワード：地下発電所、トンネル、斜坑、大空洞、インド、アリマッククライマー、機械化

1. はじめに

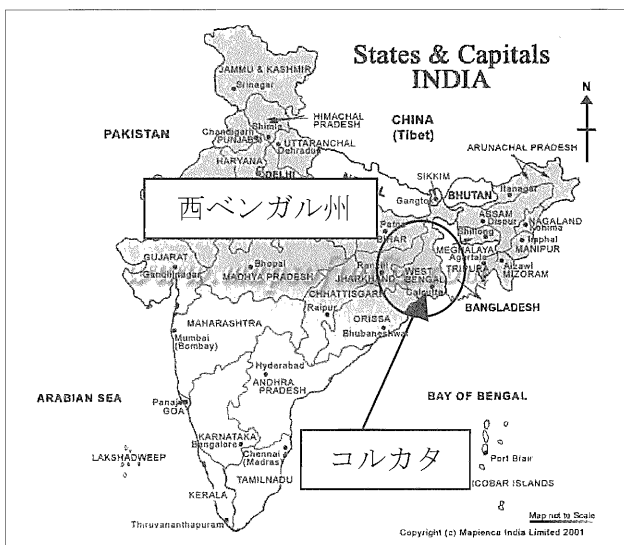
インドでは、夕刻時におけるピークの電力不足の解消、供給電圧の安定化が緊急の課題となっている。この問題を解決するために、新規の電源供給をもたらすとともに、90% 以上を占める石炭火力の効率的な運用を目的とし、ODA 資金供与を受け、最大出力 900 MW のプルリア揚水発電所が計画された。

本事業は、コルカタから北西に 300 km 内陸へ入った、西ベンガル州・プルリア地区の標高約 250~520 m の丘陵部に位置する（図—1、図—2）。発注者は西

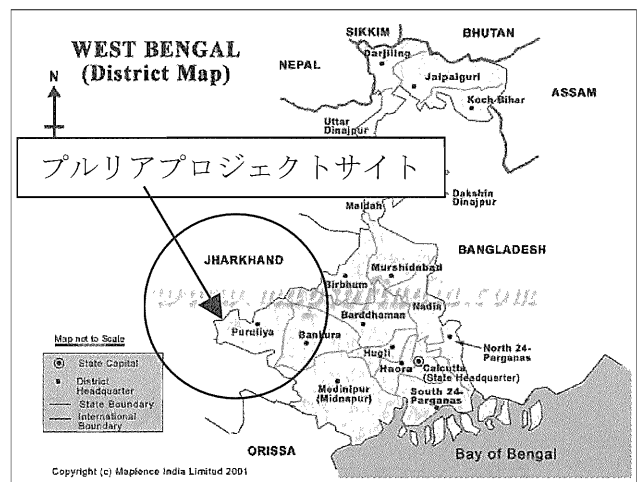
ベンガル州電力公社（WBSEB）で、エンジニアは発注者の内部組織である。また、エンジニアのコンサルタントとして、電源開発株式会社・WAPCOS（インドのコンサルタント会社）JV が設計・管理業務を行っている。

工事は 1990 年より調査設計が開始され、国内入札も含め、目的により複数発注されている。大成建設株式会社（以下、当社）は 1999 年の国際入札を経て、2001 年 6 月に単独で土木・建築工事を受注した。その後、同年 8 月の契約、2002 年 3 月の着工を経て、現在、2007 年 2 月の竣工に向けて施工中である。工事概要を表—1 に示す。

上記工事のうち、上池と下池のダムは中央遮水式ロックフィルダムで、2005 年 7 月に堪水を開始している。



図—1 現場位置図（インド全土）



図—2 現場位置図（西ベンガル州）

表一 工事概要

上池ダム	総貯水容量 16.5×10 ⁶ m ³ , 堤高 71 m, 堤頂長 1,505 m, 盛立量 300 万 m ³
下池ダム	総貯水容量 16.0×10 ⁶ m ³ , 堤高 95 m, 堤頂長 310 m, 盛立量 180 万 m ³
地下発電所	225 MW×4 基, 弾頭型, 幅 24.5 m, 高さ 48 m, 長さ 157 m, 掘削量: 14 万 m ³
トンネル	総延長 5,973 m (導水路, 水圧管路, 放水路等)
明かり工事	洪水吐, 取水口, 放水吐, 開閉所
建築設備	発電所空調設備, 発電所管理棟, 開閉所管理棟等

当地域の気候は、10月から6月までの乾季と7月から9月までの雨季に分かれており、年間降水量は約1,700 mmである。日中最高気温は12月で25°C程度、5月で50°Cを超える猛暑も観測される。

本工事のうち地下・建築工事は、インドの大手ゼネコン (HCC (Hindustan Construction Co. Ltd.) と L&T (Larsen & Toubro Ltd.)) に JV 形式で発注した。インドでは現地企業同士で JV が構成されることは稀であるが、工事の規模、内容を考慮したうえで、

契約破棄等の大きなリスクを回避するために、敢えて JV 形式とした。明かり工事では西ベンガル州の有力企業に単独発注した。

本報文は、海外 (インド) の地下工事について、機械化の側面から事例を述べるものである。

2. 建設機械の選定

本地下工事は図-3に示すように地下発電所、周辺トンネル及び建築工事の構造物一切である。地下発電所の大きな特色の一つは、複数の切羽掘削とコンクリート構築が並行して行われることである。

本工事では掘削最盛期には17切羽と数箇所の覆工工事を広大な工事区域内で同時に進行させる必要があった(表-2)。計画時には、この並行作業を実現するための機械の選定、配置が最も重要な要素となった。使用した主要機械の一覧を表-3に示す。選定にあたり

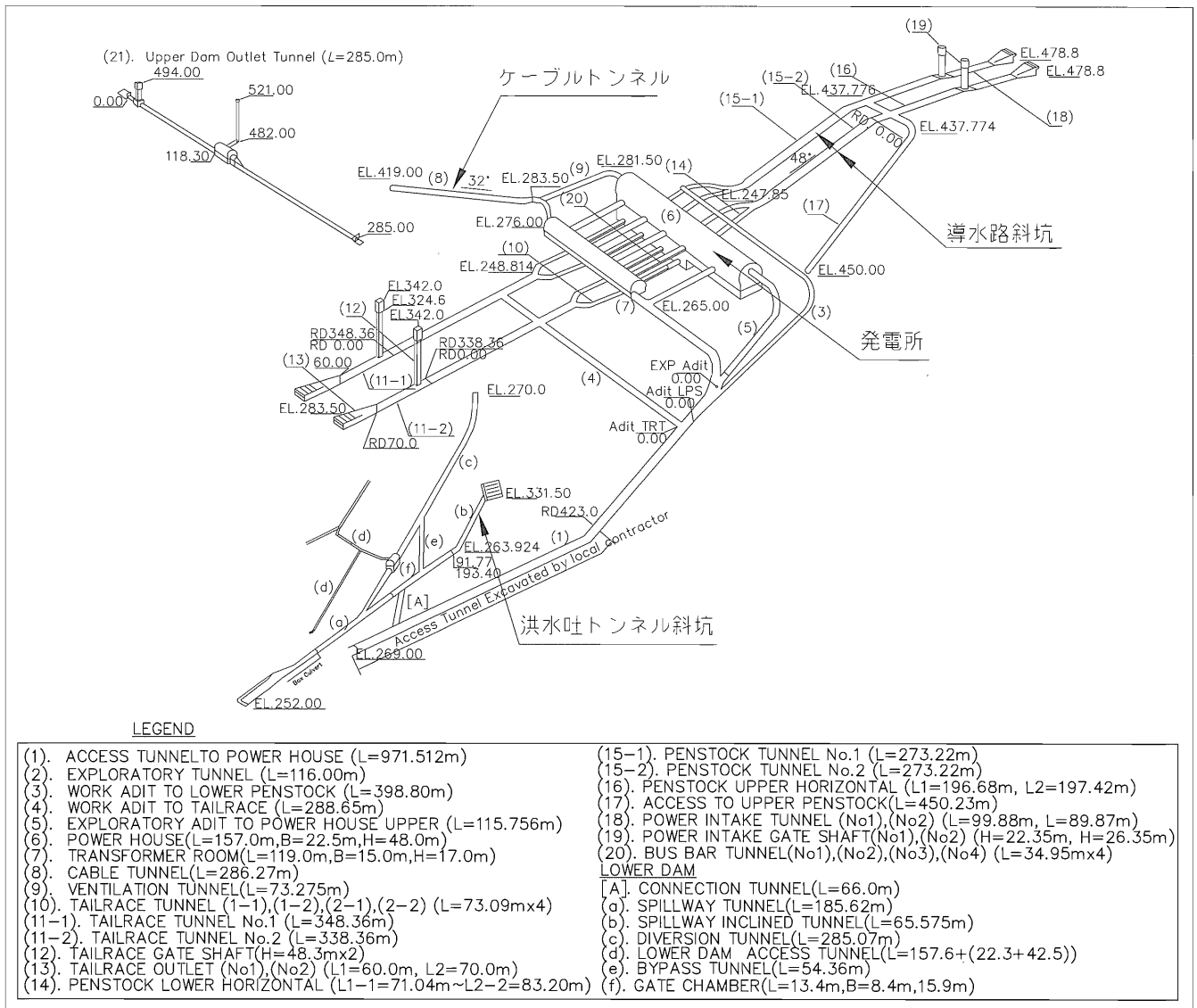
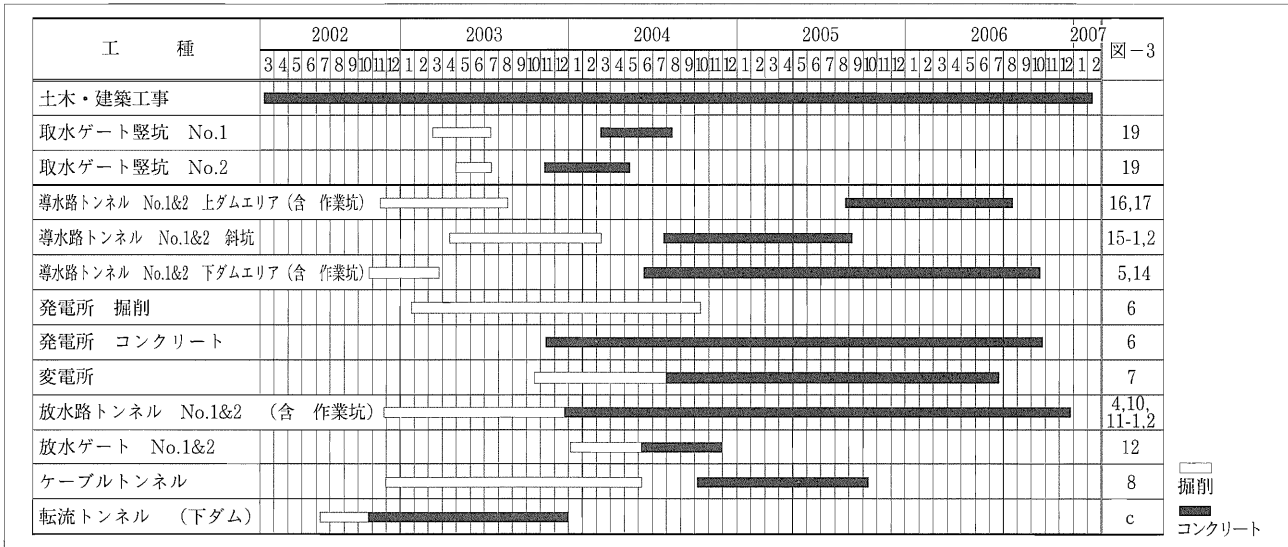


図-3 鳥瞰図

表一2 主要工程



表一3 地下工事に使用した主要機械 (台数は累計, 輸入機械でも現地で調達したものは現地調達と表示)

作業名	機械名	仕様	*	台数	作業名	機械名	仕様	*	台数		
掘 削	ホイールジャンボ	3 ブーム2 バスケット	入	1	汎 用	吹付けロボット	ベース 0.45 BH	入	2		
	ホイールジャンボ	3 ブーム1 バスケット	入	3		一体型吹付けロボット	液体急結材用	現	1		
	ホイールジャンボ	2 ブーム1 バスケット	現	2		ロックボルト	グラウトポンプ	スクリュウポンプ	入	5	
	ホイールローダ	サイドダンプ式, 2.6 m³	入	3		コンクリート	トラックミキサ	6.0 m³	入	10	
	ホイールローダ	サイドダンプ式, 2.3 m³	入	1			パイプレータ		両	25	
	クローラドリル	エンジン, 油圧式	入	2			サイクルチェンジャ		両	14	
	バックホウ	0.9 m³	現	1			コンクリートポンプ	ブーム式 100 m³/h	入	2	
	バックホウ	0.7 m³	入	3			コンクリートポンプ	定置式 30 m³/h	現	2	
	バックホウ	0.45 m³	入	5			汎 用	高所作業車	タイヤ式 L=12.5 m	入	2
	バックホウ	0.1 m³	入	1				高所作業車	クローラー式 L=12.5 m	入	1
	ブレーカ	1,450 kg	入	1				高所作業車	リフトタイプ	現	2
	ブレーカ	940 kg	入	2				ウィンチ	電気式 75 kW	入	1
	ダンプトラック	低床 20 t	入	15				ウィンチ	電気式 63 kW	入	1
	ダンプトラック	10 t	入	3		ウィンチ		電気式 45 kW	現	2	
	レッグドリル		両	50		トレーラ		35 t	入	1	
	ロードホールダンプ	3.0 m³	入	1		ラフタークレーン	50 t	入	1		
	アリマッククライマ		入	1		ラフタークレーン	20 t	入	1		
吹 付 け	吹付け機	Aliva 285	入	5	コンプレッサ	電気式 20 m³/min	両	9			
	急結材添加装置	PAC 250 V	入	5	コンプレッサ	エンジン式 20 m³/min	両	6			
	トラック	4t, 上記マウント方式	現	2	発電機	450 kVA	入	4			

* : 入: 輸入, 現: 現地調達, 両: 両方

考慮した点は,

- ① 同型機種を選定する
 - ② 維持修繕が容易で、一般的で実績のある機種を選定する
 - ③ 現地で調達容易な機械 (部品含む) については現地で新品を調達する
- である。

これらは、部品供給の困難な外国で、機械稼働率を維持し、機械の故障による長期の作業の停止を最小にするためのものである。国内であれば、工法に応じて、最適な建設機械を選択できるが、海外工事においては、

最適な建設機械であると同時に、いかにその維持補修を迅速に行えるかが、工費、工期を考えるうえで重要だからである。

本工事では主要機械のほとんどをインド国外より輸入した。これは、インド国内でも地下工事用の建設機械の入手は可能であるが、市場が成熟しているとはいえず、十分な数や整備状況が望めないからである。

このため、基本計画を精査したうえで、主要工事で使用する機械については、原則として海外から中古建設機械を輸入し、それ以外の補助的な機械についてはインド国内から新品を調達した。

3. 掘削工事

地質は、先カンブリア代の花崗岩や縞状片麻岩から成ることが予想されていた。実際は、一部坑口部を除き、圧縮強度 100~150 MPa の花崗岩が主で、一部変質した片麻岩が介在したが、おおむね CH 級の地山であった。また、湧水量は多いところで一時的に 20 L/min を観測した程度であり問題とならなかった。代表的な切羽での掘削方法について述べる。

(1) 地下発電所掘削

2003 年 1 月末に地下発電所の頂設導坑にアクセストンネルが到達し、発電所掘削を開始した。土被りは 220 m で、弱層が発電所横断方向に 1 箇所、変質帯が EL 246 m 付近に一部見られたが全体的には CH 級の良好な地山で、大きな変位は見られなかった。

発電所の加背割を図-4 に示す。掘削は、頂設導坑 (No.1 A)、アーチ切掘り (No.1 B)、ベンチ掘削 (No.2~16) の順に行った。支保はアーチ部で金網付き吹付けコンクリート (25 MPa) 16 cm とロックボルト 6 m を 1.5 m×3.0 m の間隔であり、側壁部で吹付けコンクリート 5 cm とロックボルト 6 m を 1.5 m×1.5 m の間隔であった。クレーンガーダ部に PS アンカを 6.5 m 間隔で 42 本施工している。

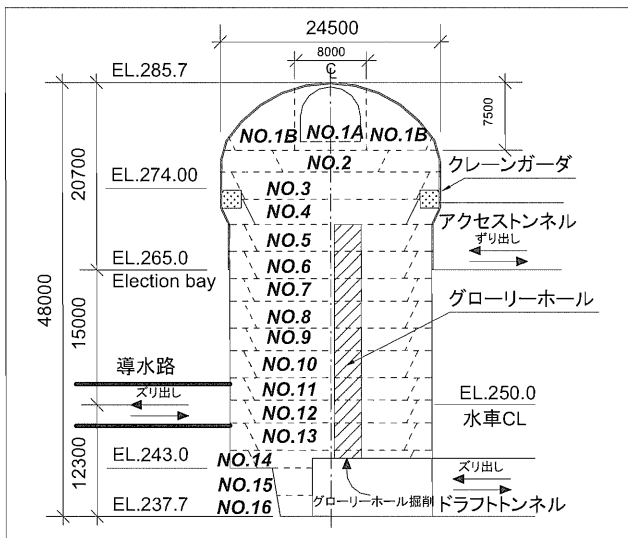


図-4 地下発電所断面図

頂設導坑、アーチ切掘りは、ホイールジャンボにより削孔を行った。ベンチ掘削については、当初、大背はクロラドリルによるベンチ掘削、側壁はホイールジャンボによる水平削孔を予定していた。しかし、クロラドリルによる掘削は、ホイールジャンボによる掘削に比べ、機械の配置、移動が複雑なことから、掘削、

ずり出しの並行作業に伴うオペレータの管理が困難なことから、工法を変更する必要があった。このため、日本人技術者をリーダーとした直備形態のクロラドリルチーム (ベンチカット担当) とインド人を中心としたホイールジャンボチーム (水平削孔担当) を編成した。これにより、クロラドリルチームが斜路掘削等の難しい部分の掘削を担当し、ホイールジャンボチームが切羽で掘削し進行を出すことができるようになり効果的であった (写真-1)。

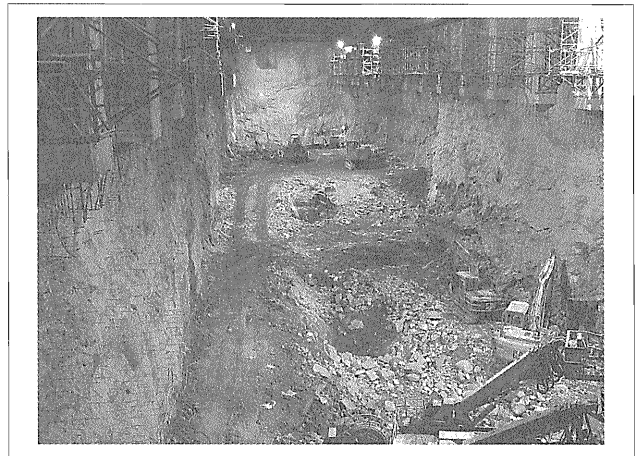


写真-1 地下発電所掘削

ずり出しは、タイヤ方式で、低床 20 t ダンプトラックとホイールローダの組合わせで行った。ずりの搬出経路は、発電所に取付くトンネルからと、グローリーホールを用いた発電所下部からの 2 通りがあり、両者を使い分けて搬出した。

グローリーホールは、水車センタ上に 4 本 (2.2 m×2.2 m, H=13 m~24 m)、アリマッククライマーにより掘削した (写真-2)。アリマッククライマーはドラフトトンネルから発進するため、発電所の掘削とは無関係に並行作業をすることができた。この施工は、過去に当社で経験のあった外国人 (インドネシア) を

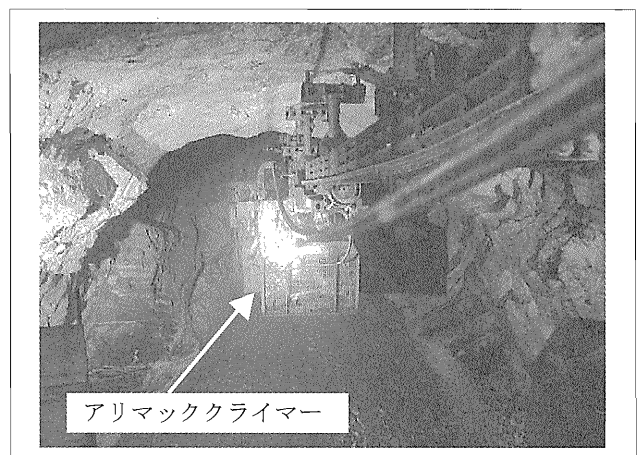


写真-2 ずり出し導坑掘削 (アリマッククライマー)

採用し、昼夜体制で施工した。1箇所当たりの施工はおよそ2週間であった。

(2) 斜坑掘削

48度の斜坑を3本、計612mを施工した(図-3(b), (15-1), (15-2))。斜坑掘削は下部から導坑の掘削を行い、上から切掘りを行った。導坑掘削では、図-5に示すように、アリマッククライマーを用い、2.2m×2.2mの導坑を斜坑下部から切上がり上部水平トンネルに貫通させた。切掘り掘削は、台車を設置し、ウインチで昇降させながら行った(写真-3)。

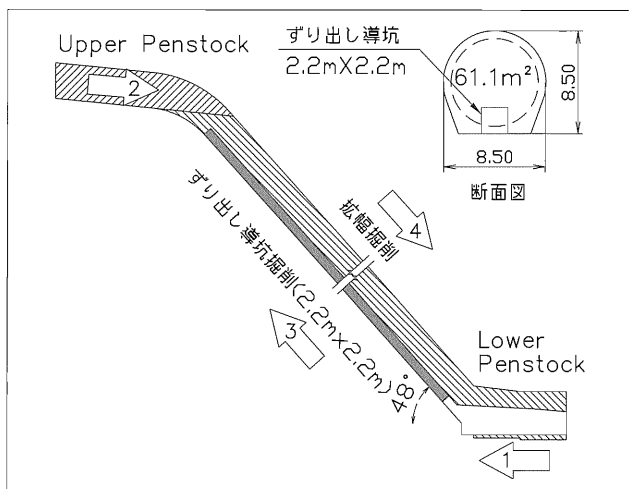


図-5 斜坑掘削模式図

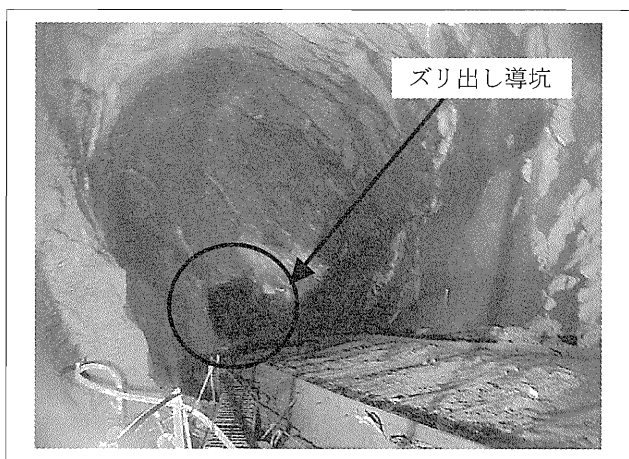


写真-3 斜坑拡幅掘削

削孔はレッグドリルにて行った。拡幅掘削の約80%のずりは、発破時に自動的にずり出し導坑を通して下部に自由落下する。切羽踏前に残った20%のずりは人力で導坑に落した。斜坑下部のずり出しは、斜坑切羽作業の合間をぬってホイールローダと20tダンプにて行った。2本の導水路斜坑を並行して掘削していたこと、また48度の坑内の行き来が労力と時間を要することから、斜坑上部に技術責任者を配置し、発破時の退避、資材の搬入の指示、切羽からの報告等

を無線を用いて行った。

吹付けコンクリート(25MPa)は湿式にて行った。上部より6インチの鋼管(出口部は塩化ビニル)にて、吹付け機の隣に設置したタブまで送り、タブから人力で吹付け機に投入し、手吹きにて吹付けた。

導坑掘削は日進約4m、拡幅掘削はレッグドリルを8台用いて日進約2mであった。

(3) ケーブルトンネル掘削

ケーブルトンネルは、32度の傾斜、延長250mのトンネルである(掘削面積25.0m²)。32度の傾斜では、ずり出し導坑によるずりの自由落下は不可能である。このため、ずり出し方法が課題となった。安全面、コスト面、工期面で検討した結果、発破後、人力によりトロッコ(4m³)に積込みを行い、ウインチでそのトロッコをトンネル上部まで引上げることに決定した(写真-4)。

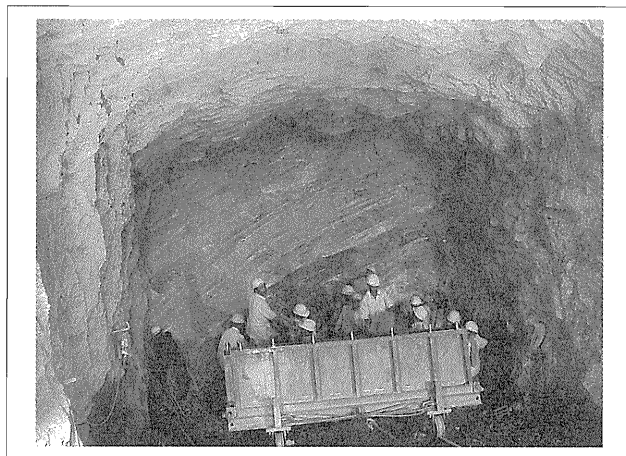


写真-4 ケーブルトンネル掘削(人力積込み)

削孔、装薬、ずり出し全てが人力によるものであったため、労働者の労働意欲の維持が最も重要な課題であった。ずり積込み時に音楽を切羽で流したり、節目ごとにインセンティブを与えたり、人員配置を考慮したりするなど、細かい配慮が必要であった。月進はコンスタントに約15mを維持することができ、工期内に掘削は完了した。

インドに限らず、海外工事においては労働賃金が日本に比べ極めて安価である。一方で、機械費は維持費を含めて非常に高価であることが多い。このため、安全性、工期等を勘案のうえ、人力に頼ることも非常に有効である。

4. コンクリート工事

明かり工事、地下工事を合わせた全てのコンクリー

トは骨材生産を含め、現地プラントにて生産した。コンクリート最大使用量は6,000 m³/週である。クラッキングプラントはダムの盛立て材料の生産が主たる目的である。そのため、上ダムと下ダムに150 t/hを1基ずつ設置した。バッチャプラントは60 m³/hを2基、下ダムヤードに設置した。各プラントとも、下請けJVがインド国内より調達したものであったが、大きな故障もなくほぼ順調に生産できている。

セメントは、バラセメントが入手困難なため、全て袋セメントを使用した。工場より車で現場から2時間の町まで搬送、仮置きし、その後使用状況に応じて、トラックにて現場まで搬送した。

コンクリートの運搬は生コンクリート車を用いている。バッチャプラントからの運搬距離は、遠い箇所では約10 kmあり、1台で1.5時間、1往復のサイクルで計画を行った。生コンクリート車は全体で20台あり、そのうち明かり工事分の10台は現地で調達した。稼働率は8割程度で特に大きな支障はなく工事は推移している。コンクリート打設は、輸入した100 m³/hのブーム式ポンプ車と現地調達した30 m³/hの定置式ポンプを使用している。

5. インド国内における施工の特徴

インドでは、各々の作業に各々のオペレータや作業員が必要であり、日本のように一人が数種類の作業をこなす例は少ない。このため、日本と比べ4倍から5倍の数のオペレータや作業員に対して、作業指示、またその変更指示をどのように出すかが課題となった。この対策として、朝晩のミーティングで詳細なスケジュールと機械配置を検討し、各切羽の下請け責任者に徹底させると共に、直備の現場技術者を各切羽に配置し、現場の変化に迅速に対応できるようにした。

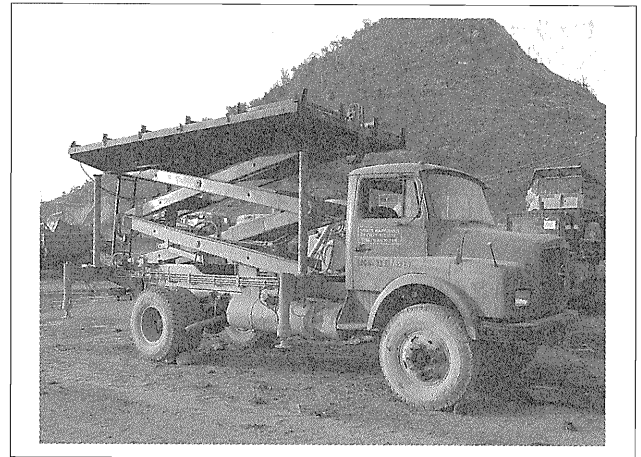
また、下請けJV自体の施工班、機械班、電気班が完全に分化しており、セクション間の連絡伝達方法の改善も課題であった。そのため日々のマネージャー会議への出席を義務付け、全員が工事に参加することにより、プロジェクトが一体となるような工夫を行った。

インドでは、ホイールローダは多数存在するが、フロント式であり、サイドダンプ式は皆無に近い。サイドダンプ式を輸入したことで、インドの平均的な地下工事現場に比較して、サイクルタイムを短くすることができた。また、硬岩用ずり出しに対応する重ダンプトラックも性能、数とも十分といえず、輸入した20tダンプトラックは非常に有効であった。

吹付け機械については、インドではヨーロッパから

の業者の台頭により、比較的充実している。本工事では、輸入した吹付け機（Aliva 285）と吹付けロボットの組合わせでほとんどの吹付けコンクリートを施工したが、地下発電所の一部では、サイクル向上を目的に一体型吹付けロボット（液体急結材仕様、CIFA製）もインド国内から調達した。一体型吹付けロボットの能力は最大突出量18 m³/hで、非常に有効であった。本工事では粉体・液体急結材の両方を用いたが、インド国内では液体急結材が主流である。急結材自身の品質はばらつきがあり、選定、採用については、現場試験による十分な確認が必要であった。

高所作業をどのような機械で行うかも課題であった。輸入した高所作業車に加え、現地で調達したリフトタイプの高所作業車も使用した。また、より多くの箇所で行う作業を効率よく安全に行う必要があったため、各種建設機械に装備する多くのアタッチメントを考案し、その時どきに応じて使用した（写真—5）。



写真—5 高所作業車（リフトタイプ）

6. おわりに

最後になりましたが、計画および施工にあたり御協力を賜っている国際協力銀行（JBIC）、発注者側のコンサルタントである電源開発株式会社ならびに関連コンサルタントの皆様には、深く感謝の意を表します。

JCMA

【筆者紹介】

柴田 勝実（しばた かつみ）
大成建設株式会社
土木本部土木技術部
トンネル技術室
課長代理

