

インドにおける用水路灌漑技術の確立過程 ーガンガー用水路の建造を中心にー (その二)

正会員 大東文化大学教授 多田 博一

DEVELOPMENT OF CANAL IRRIGATION TECHNOLOGY IN INDIA
- A CASE STUDY OF THE CONSTRUCTION OF THE UPPER GANGES CANAL -

By Hirokazu Tada

概 要

イギリス東インド会社は、インドの植民地領土の拡大にともない、1820年代以降貿易よりも組織的な植民地経営に力を入れるようになった。その中心になったのは、第一に、歳入の柱である地租の増収のもとになる農業生産の安定・増加、千魃の被害の軽減にとって欠かせない灌漑施設の整備、第二に、輸出入品および政府物資・人員ならびに軍隊の輸送・移動に不可欠の鉄道であった。技術史の立場からみて、この両者のインドにおける発展はきわめて対照的であった。灌漑についていえば、イギリス本国の農業は天水依存であり、当時のイギリス人技術者たちは大規模な人工灌漑施設の建造・維持管理の経験をもっていなかった。これに対して鉄道は、1825年にリヴァプール・マンチェスター間の鉄道路線が開業して以来19世紀を通じて、イギリス最大の輸出産業に成長していき、技術的にも世界の先端を切っていた。

本稿では、19世紀中葉世界最大の用水路工事といわれた上ガンガー用水路の建造工事を追跡しながら、当時のイギリス人にとって未知の領域であった用水路灌漑技術がどのようにして形成されていったか、を明らかにしようとするものである。(その一)では計画立案過程と事業計画概要を扱った。

本稿では、工事実施上の諸問題ならびに労働者・資材の調達の問題に触れたい。その中で、種々の構造物の案出、インド在来技術とイギリスの近代的科学・技術知識との融合の側面に着目して、イギリスの技術者たちがインドにおける用水路灌漑技術を確立していった過程を明らかにしてみたい。(海外土木、インド、灌漑)

1. 計画立案過程
2. 事業計画の概要 (以上第8回日本土木史研究発表論文集 1988年6月)
3. ガンガー用水路建造上の諸問題

ガンガー用水路の施工にあたって、イギリス人技術者を悩ませた大きな問題は4つあった。第一は分水施設の工事、第二は用水路の勾配、第三はシワリク丘陵から流れ出てくる季節的排水河川の横断、そして第四は配水路体系の整備であった。ここでは、はじめの3つを取り扱うことにする。

(1) 用水路分土工

分土工の設置地点に選ばれたハルドワールはヒンドゥ教の聖地である。この地でガンガー河はヒマラヤ山脈の南側に連なるシワリク丘陵地帯から抜け出て、ヒンドゥスタン平原に入る。急峻な丘陵に挟まれた峡谷から一挙に平原に出たガンガー河は多数の乱流を形成し、中洲があちこちに点在している。それらをうまく結びつけてガンガー用水路に分水する仮堰が造られた。河を横断する一つの長大な堰ではなく、河の中に点在するいくつかの中洲を繋ぎながら、最終的に対岸と結び付けているいくつかの堰から成っていた。

それは乾季の低水期の流量全体を堰止め、分水するが、雨季の洪水時にはその流れの邪魔にならないものでなければならなかった。このために洪水時には倒して、水を流下させる倒起式水門 (drop gate) を付けられた堰と毎年洪水終了後に造り直される仮堰とを組み合わせる方式がとられた。

ガンガー用水路の建造時のガンガー河の主流は左岸のチラ丘とチャンディ丘の方にあり、乾季にはあちこちで掘られた溝を通してわずかの水流がハルドワールの方へ流れてきていた。治水事業の目的は乾季に全水量をハルドワールの方に向けるが、同時に洪水時の主流路は中ほどから左岸の方に保ち、洪水が用水路に流れ込んでそれを破壊しないようにすることであった。

図1：ガンガー用水路分水工配置

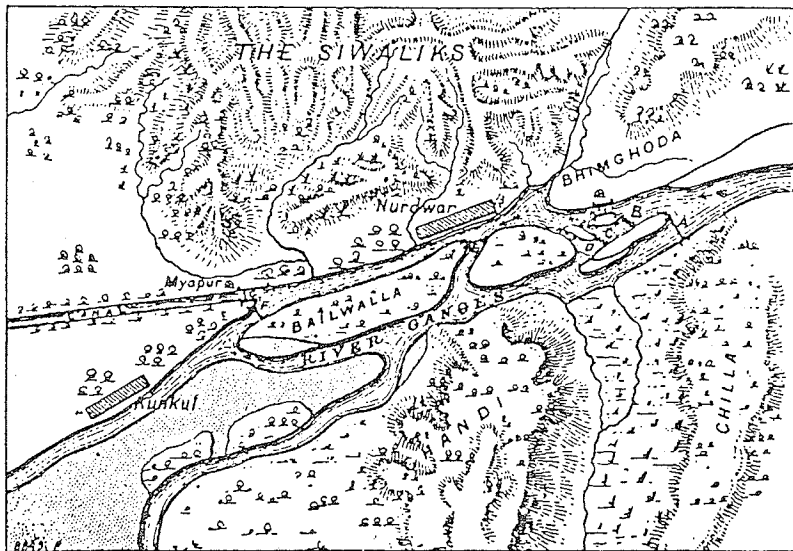


図1がチラワラー堰のものである。その中のAは丸石を詰めた四角な木箱からなる恒久堰であった。外部はモルタルで固められ、注意深く均等な高さになるようにされた。乾季の水流が左岸よりの流路に入らないようにするためのものであった。

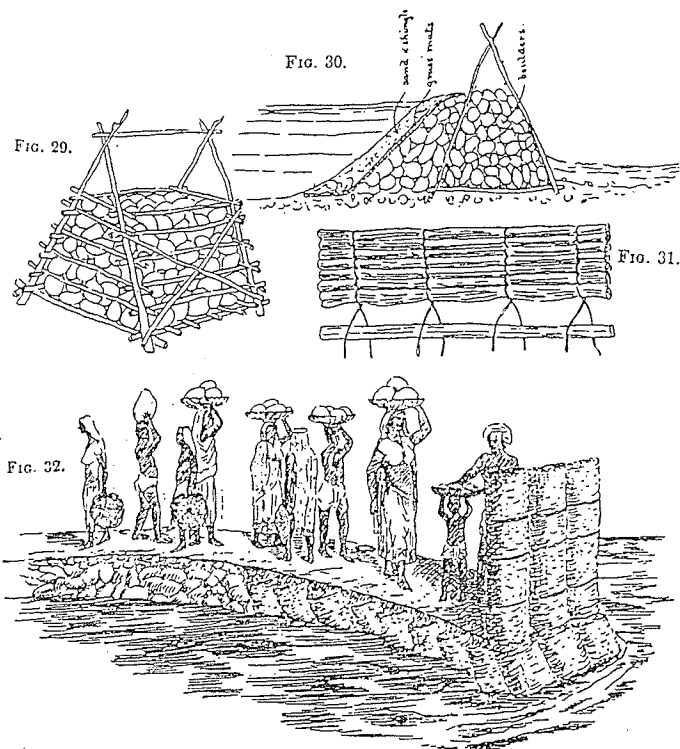
図2：仮堰の建造

Bは第1号堤であり、丸石を詰めた木枠からなっていた。それは乾季の水流をハルドワールの方向に向けるためのものであった。だが、洪水時に流されてしまうので、毎年秋になって洪水が引いたあとで造り直された。(図2参照)

Cは第2号堤で小石で造られており、第1号堤から漏れてきた水を堰止めるものであった。

Dは第3号堤であり、第2号堤から漏れてきた水を堰止めた。

Eはハルドワール堰で、石造の恒久的構造物であり、ハルドワール流路に入った水がバイルワラー中洲の流路を通して流れ落ちないように



出所：Engineering, July 6, 1888, pp.15, 17.

するものであった。それには倒起式水門が付けられており、ハルドワール流路への水量を調節する余水吐けの役割を果たしていた。

Fはミヤブル堰であり、一部には倒起式水門、一部には上下式水門 (lift gate)が付けられていた。用水路頭首の水深、したがって用水路の水量を調節するものであった。

Gは上下式水門をもつミヤブル制水工であり、用水路に入る水量を正確に調節するためのものであった。半インチの精度でもって調節できるようになっていた。

F、Gの2つが用水路本体の頭首工であり、高度に洗練されたものであったが、その上流のものは仮設のものであった。しかし、時とともにところどころで護岸工事も行われ、恒久的な性格のものになってきた。それでも、第1号堤から第3号堤までは毎年造り直されなければならなかった。

(2) 用水路の勾配

用水路の勾配を決定するにあたって考慮しなければならない要因は2つあった。一つは地形、他は用水路の水の許容最大流速であった。

地形との関係については、コートリーは用水路の勾配をできるだけ土地の勾配に比例することが望ましいと考えていた。1840年の最初の報告書では、用水路の頭首の方での勾配は18インチ／マイル、末端では14インチが適当であると結論していた。

表1：用水路勾配計画表

用水路区間	土地の平均勾配 (フィート/マイル)	調整後の勾配 (フィート/マイル)	用水路床の勾配 (フィート/マイル)
ルールキー・チトラ間の38マイル区間	2.403	$\frac{1.851}{7}$ の落差 $\times \frac{3}{1}$ 1.507	$\frac{1.5}{7}$ の落差 落差工で調整
チトラ・コエル間の 119マイル区間	1.507	1.507	1.5
コエル・マインブリ間78マイル区間	1.138	1.138	1.166

砂質の軽土壌の多いドアーブ用水路の勾配が17.6インチ／マイルで、なんら支障がなかった。そこで土壌のやや固いガンガー用水路上流部では18インチ／マイルで十分であろうと考えられた。用水路床の水の流速を算出する際には、Du BuaやProny などフランスの水利学者の公式が援用された。

しかし、工事中に表面の粘土層の下にかなり厚い砂質土壌があることがわかり、コートリーは勾配を 3インチ／マイルだけ減少させることにした。15インチ／マイルの勾配では、Du Buaの公式に基づいて水の平均流速は3.53フィート／秒と算出された。

だが、この決定がガンガー用水路通水後の落差工破損、用水路床損壊などの原因になった。

決定した勾配にするために、14の落差工が建造されることになった。形式はドアーブ用水路のものと同じくオギー曲線のものであった。落差工のシルは上手の用水路床と同じ高さ、同じ幅であった。ところが、大量の水がオギー落差工を流れ落ちるとき、流速が増加し、落差工の床に打ち当たり、その下手に波を生ぜしめて、両側の用水路堤を侵食することが明らかになった。何度か設計の変更が試みられたのち、後年大幅な改造工事が行われることになる。

3. 排水河川との交差

ガンガー用水路は最初の20マイルの間で多くの季節的排水河川と交差する。季節的排水河川は2種ある。第一は、小規模な河川で、その水量は傾斜をつけた単純な取水施設でもって用水路に取り入れても、下手のつぎの余水吐けで調節できるほどのものである。第二は、大規模な河川であり、雨季の増水期にはシワリク丘陵から大量の土砂を含んだ水を運んでくる。したがって、それと用水路との交差点にはなんらかの安全な流下施設を必要とした。

この種の河川は4つある。それらはラニブル、プトリ、ラトム、およびソラニ川である。はじめの2つは用水路の上を通るようにされ、三番目には平面交差施設を施され、最後のソラニ川にはインドのイギリス統治の記念碑として有名な用水路橋が架けられた。この区間がインドの水利工学の博物館と称される所以である。

a) ラニブル川との交差

ミヤブル制水工から5マイル下手の地点でガンガー用水路は砂質土壌を流れ下る急流排水河川ラニブルと交差する。川幅は約100フィートであった。最初の設計では、用水路堤に高さ12フィートの取水口を設けて、ラニブル川の水を用水路に入れ、反対側に幅131フィートの余水吐けをつけて、余分な水を流し出すことにしていた。だが、1849年の大洪水の際に2つの構造物がともに土砂に埋まってしまった。そこで、近くに予定されていた高さ9フィートの落差工をこの地点に移して、用水路をその分だけ低くして、ラニブル川が用水路を跨ぐ構造物 (super-passage) を通って反対側に流れ落ちるように設計変更が行われた。25フィート間隔の8つのアーチの上に幅200フィートの排水路橋が造られた。その橋の上手には、川の流れを制御するために両側に堤防が築かれた。サイフォン施設を用いて川の下を通すという考えは、コートリーにはなかったようである。

b) プトリ川との交差

ラニブル川との交差点からさらに9.5マイル下手で今度はプトリ川と交差する。その流域は70平方マイルであり、広い川幅で用水路に接近してきていた。ここにも排水路橋が建造されることになった。25フィート間隔の9つのアーチをもつ幅300フィートのものであった。この地点から3マイル下手に予定されていた落差工がこの橋に一体化された。

図3：プトリ川の治水工事

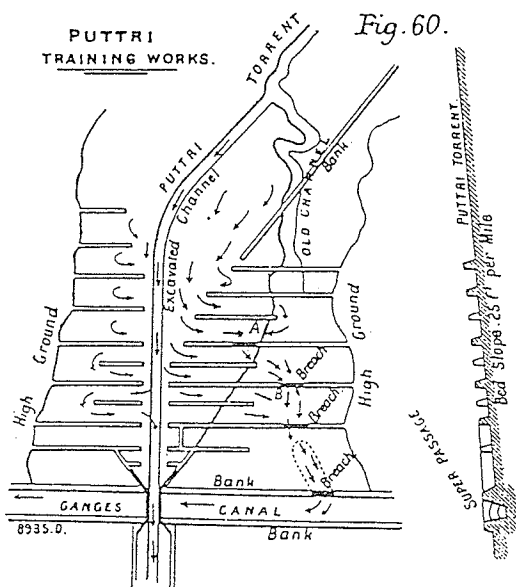
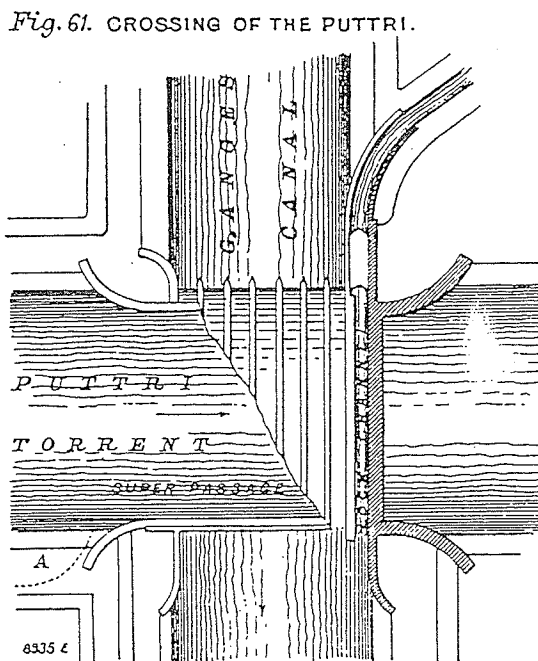


図4：プトリ川の排水路橋



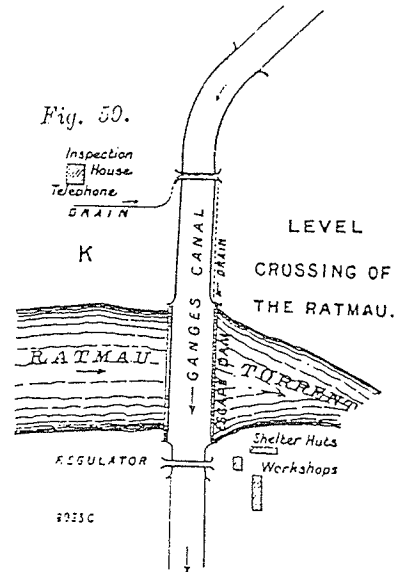
出所：Engineering, Sept. 7, 1888, p.224.

c) ラトム川との交差

さらに13マイル下手の地点ドゥノウリで、122平方マイルの流域をもつラトム川が用水路と同一平面で交差していた。これは周年河川であり、雨季には水位が大幅に高まった。これを処理するために、コートリーは平面交差工とでもいべき構造物を考案した。ラトム川を新しい河道に導く掘削や突堤、その川を横断する取水工、制水工付き橋梁、川の両側の護岸と排水施設などであった。取水工は用水路床より2フィート高い敷高に幅10フィートの開閉口が29付けられていた。さらに、左右両側に同じ幅の開閉口が14あり、側端には17フィートの歩廊が付けられていた。

中央部開閉口の水門は急流の圧力で下手側に倒れ落ちるように設計されていた。その反対側には、用水路床と同じ高さの敷高をもち、幅10フィートの開閉口を47もつ制水工が造られた。両側に同じ幅の開閉口が65付けられた。その敷高の高さは6フィートであった。側端には用水路床から10フィートの高さのところに、17フィート幅の歩廊が設けられた。これで洪水時には、最大800フィート幅の排水路になった。これら2つの洪水制御の構造物の下手に、用水路への水流を調整する制水工付き橋梁が建造された。この制水工の基礎工事の下を通して、開閉機構のついた幅7フィートの排水路が2つ掘られ、排水工からでる水路につなげられた。

図5：ラトム川との平面交差

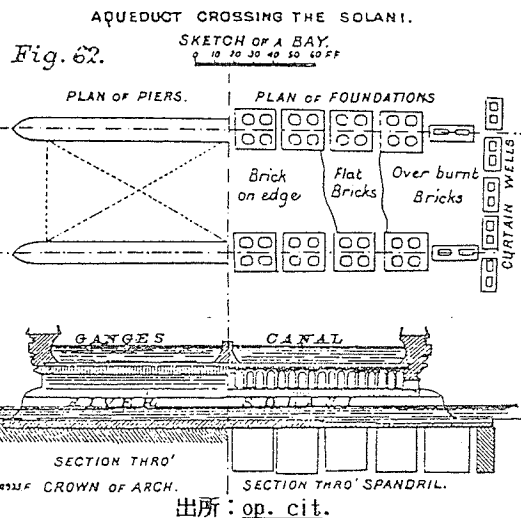


出所：op. cit.

d) ソラニ川との交差

最大の難関は流域面積216平方マイルのソラニ川であった。延長1万0713フィートの土盛り水路で川に接近し、川底より42フィートの高さのところを延長1110フィートの石・煉瓦製の水路橋で渡り、再び延長2723フィートの土盛り水路を通して、ドアーブの高台地に入る予定であった。水路橋は堅固な基礎工事の上に造られた。20フィート平方もある煉瓦製の柱が、インド在来の井戸掘り技術を用いて掘られた深さ20フィートの川底の穴に埋められた。基礎の埋め込みの柱の数は300本以上あった。水路橋上の用水路は幅172フィートであったが、別々の支柱の上に立つ2つの部分に分けられ、修繕またはその他の理由で一方が閉じられても、他方が機能するように工夫されていた。土盛り水路が石造水路と結合する地点での用水路堤の高さは、上手で37.25、下手ルールキー側では36.75フィートであった。土盛り水路の内側には段が付けられ、外側の法面には1000フィート毎に4フィート幅の段が付けられていた。水路底の幅は150フィートで、石造水路橋との接合点では172フィートになるように、扇形に広がっていた。

図6：ソラニ水路橋



出所：op. cit.

ソラニ水路橋は、将来イギリスがインドから退かざるをえなくなった際に、4世紀も前のフィーローズ・シャーの偉業である西ヤムナー用水路に劣らぬイギリスの善政の記念碑たらしめるべく念入りに設計された

ものであった。石造水路橋の両端に一對ずつ巨大な獅子像が建てられ、それぞれ上流側と下流側を見守っていた。また水路橋に付けられたもう一對は向かい会って、橋を護るようにされた。

4. ガンガー用水路の建造過程

ガンガー用水路の建造工事が実際にどのようになされたかについての記録は数多くない。そのなかでもっとも信頼できるのは、第一は、設計者であり、初期の工事責任者であったコートリーが書き残し、1860年に出版された『ガンガー用水路事業報告書—開始から1854年の用水路通水にいたるまで—』（全3巻）であろう。しかし、これは主として事業の開始にいたる事情、事業計画の内容に関する説明が多く、実際の工事の仕方についての記録は少ない。第二は、ロンドン発行の新聞『工学技術 (Engineering)』紙に1888年 4月 6日から11月16日にかけて12回にわたり無署名で連載された「インドの農業工学 (Agricultural Engineering in India)」と題する特集記事である。両者の刊行時期に約30年の時の経過があるが、ガンガー用水路は一挙に利用可能になったものではなくて、1854年の通水後もなんども改修、計画の手直しを必要としたことを考えると、この30年の間に実際の工事の仕方にさほど大きな変化はなかったものと推定される。

(1) 用水路の土工工事

用水路の掘削工事は、2つのやり方でなされた。請負制と政府による直接雇用である。前者の方が一般的であったといわれる。

110マイル地点までの北部の土工工事は主としてオード (Oades) と呼ばれる遊牧的種族によって行われた。かれらはサトレジ河とヤムナー河の間の地帯の出身であった。家族とともに牛、山羊、ろばなど家畜を引き連れて、仕事のある場所に近いところに、仮住まいを設けて移り住んだ。飲料水用の井戸に近い、耕作されておらず、家畜が自由に草を食べることのできる場所が選ばれた。かれらが土を掘るのに用いる大型の唐鍬 (phaora) の柄には彫刻や飾りがつけられていた。土の運搬はもっぱらろばの背に積まれてなされた。

かれらは文盲で、賃金の勘定には小商人 (Lalla) の中から選んだ者に依頼していた。小商人は通常少額の前貸しをしており、賃金の支払い日にそれを清算していた。オード種族内部の揉め事の調停には、長老たちで構成されるバンチャヤトが当たっていた。ガンガー用水路の掘削に携わった者の多くは、東ヤムナー用水路で働いた者の子孫であったといわれる。かれらに関するコートリーの評価はきわめて高く、ヨーロッパの土工に比して、信じ難いほど従順で、物静かである。ヨーロッパ人監督者の測量を信じて、争うことがない、と賞賛している。請負契約は口頭でなされていた。

土工工事を請け負うオードの代表者は、用水路を50—100フィートの区間に分け、それぞれの区間の掘削を請け負っていた。仕事の内容は掘削、用水路堤の均平、法付けなどのすべての作業を含んでいた。請負料は掘削の深さにより異なっていた。掘り出す土の量1000立方フィートにつきいくらかというやり方で請負料が定められ、月に1—2回まとめて支払われた。請負業者はそれから20—25パーセントをビンハネし、残りを実際に仕事をする者に渡していた。

110マイル地点から下手の地方では、耕地の割合が大きくなり、オードが住みつく場所がなかった。そのために請負業者はいろいろな種類の者を選ばなければならなかった、といわれるが、具体的なことは知られていない。オードの場合よりもトラブルが多く、請負契約も成文で交わされた、といわれる。また、請負料を支払う際には、その12—20パーセントを未払いにしておき、業者が契約通りに仕事をする保証金にしていた。カーンプル支線用水路沿いの村々では、耕作が安定しており、土工を集めにくかったと報告されている。また、農繁期、祭り、結婚式などで一時的に仕事を休む者も多かった。総じて、ドアーブ南部の請負業者に関するコートリーの評価は厳しく、仕事をよく知らないのを、監督・巡視が必要であると警告している。

土工で注目すべき方法は、トロッコと蒸気機関車の導入であった。ソラニ水路橋の両翼の土盛り水路部分は、用水路堤を高くするために大量の土の移動が必要であった。手押し車や籠だけでは能率があがらなかつ

たので、鉄製レールを敷いた軌道の上を走るトロッキが導入された。それもはじめは人が押していたが、のちには馬が引くようになった。1851年12月22日にはインドでは最初の蒸気機関車が用いられるようになった。それは1時間につき4マイルの速度で、180-200トンのトロッキ列車を牽引する予定であった。ところが、故障つづきで、思ったほどの働きをしなかった。「植民地向け輸出用」型の機械であると、コートリーはいまいましげに書き留めている。

(2) 専門職人

残念ながら、コートリーの報告書には、用水路建造工事に雇われた石工、煉瓦工、大工、鍛冶工など職人に関する記述はきわめて少ないが、『工学技術』紙の記事と合わせて、つぎのようになっている。

かれらの多くはアワド、ラーズブータナ、サトレジ河北部の地方の出身であった。確かなことはわからないが、ハルドワールへ巡礼に来た折に仕事のことを知り、同郷の者を呼び寄せたのではなかろうか。石工たちの間には同胞組織(brotherhood)、つまり一種の組合があり、お互いにきわめて忠実であった、と描かれている。職人たちの多くは故郷の村で零細な耕地をもっており、かれらが仕事に出ている間は息子や兄弟たちが面倒をみている。仕事が済めば、村に戻っていくけれども、必要があればすぐにまた集めることができたと伝えられている。石工、煉瓦工の多くはイスラム教徒であった。

優秀な大工はバンジャープ出身の者に多かった。体力があり、信頼でき、明るい性質であり、ユーモアのセンスに富み、東部のヒンドゥ教徒とは非常に異なっている、と評されている。潜水夫としても、また泥水の中の仕事にしても、かれらは拔群であった。

高所の仕事や足場組みではボンベイから来たカラシ(Khallassies)にかなう者はいなかった。イギリス人の目からみたインドの職人たちに対する評価は決して低いものでなかった。

石運搬に雇われた者はブンダニ(bundanis)と呼ばれていた。かれらは屈強な男どもであり、機械力を借りるよりも、肉体力で石を運搬することを好んだ。石の重さに合わせて棒をうまく組み合わせ、2人、4人、8人、16人、あるいは32人で運んだ。

インドの職人たちは総じて、無学な者にありがちなことであるが、新しい考えや新しい作業方法に対し偏見を抱いてはいるが、学ぼうとする意欲があり、教えれば、飲み込みが早い、と評されている。

中には熟練工もいた。ガンガー用水路工事の当初から雇用されていたクシアル(Kusial)と呼ばれる職人は仕事をよく知っており、ミストリー(Mistree -マイスタの意)と称されていた。かれの助言で石切りに型板が用いられるようになった、といわれる。その助言にはイギリス人技術者も耳を傾けた。

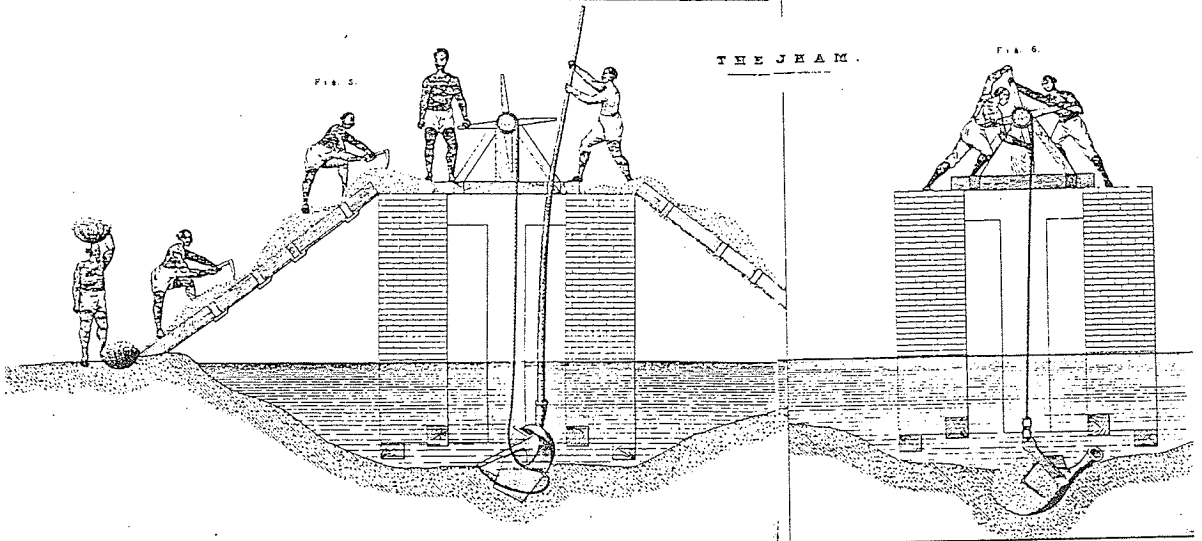
(3) 井戸掘り人

熟練者の不足で困ったのは、制水工、橋梁などの構造物の基礎に採用された在来の井戸掘り式基礎工事に必要とされる井戸掘り人であった。このインド在来の基礎工事の方法はイギリス人にとって驚異であったとみえて、当時のイギリスのいくつかの雑誌にそれに関する記事・論文が公表されている。河岸などの軟弱地盤の上に石・煉瓦製の重厚な構造物を建築する際に、インドでは周りを煉瓦で舗装した井戸をまず掘り、その中に砂利や砕いた煉瓦を詰め、さらにカンカルと称されるコンクリートを流し混んで固めた上に、構造物の柱を立てていた。

イギリス工兵将校たちは、用水路の構造物の基礎建設にこの方法を採用したのである。井戸掘りを伝統的職業とする者たちはチャークン(Chahkun)と呼ばれ、北インドの村々に散在していた。かれらの用いる道具はファラオ(唐鋸)とジャム(大型唐鋸)であった。ジャムの大きさは一般に横幅27インチ、縦36インチであった。井戸掘り人はこれをもって井戸の中に降り、水面下の土砂を掘り出して籠にいれ、外にいる者が滑車と綱を用いてそれを引き上げる。井戸が深くなるにつれて、井戸掘り人は水の中に潜って、土砂を掘り出さなければならなくなる。そのような熟練した井戸掘り人が不足していたために、ガンガー用水路工事に際

しては、井戸掘り人が水中に潜らずに、土砂を掘り出す方法が考案された。ジャムに長い木の柄をつけ、井戸の外からそれを操って掘るように工夫された。直径 6フィートの井戸枠を一日に2.5 - 4フィート、多い時には10フィート掘下げることができた。(図7参照)

図7：井戸掘り式基礎工事



出所：Davies, F. C., "Engineering in India," in Society of Engineers, Transactions for 1868, London, 1869, Figures 5, 6.

(4) 煉瓦製造

原材料でもっとも重要なのは、構造物のための煉瓦とそれを焼く薪であった。良質の煉瓦を造るのに、イギリス人は大変苦労したようである。煉瓦をもっとも多く用いるソラニ水路橋の位置するルールキーに工作所が開設され、そこで種々の試みがなされた。恐らくは、ハルドワールに順礼に来た者を雇って試みたものであろう順礼方式、その外にベナレス方式、スィンド方式、ルーディアナ方式など在来の煉瓦焼製方式が試験され、ついにスィンド方式に改良を加えた、新ルールキー方式が完成された。材料となる粘土、燃料となる木材の質に適合する方式であった。

焼窯に入れる前の煉瓦の型作りがまた大変な作業であった。その仕事に雇われた者たちは割り当てられた仕事量をこなさず、賃金の引き上げを要求した、といわれる。時々、全体で仕事を休むこともあった。このため1848年10月にイギリスからホール社製の煉瓦型作り機を取り寄せることになった。それは本国では馬を動力とするものであった。ルールキーでは馬ではうまくいかず、雄牛2頭がそれを動かし、粘土を攪拌し、型に入れるようにされた。1対が夜明けから正午まで、他の1対が午後2時から日暮れまで働き続けた。イギリス人監督が機会の操作を習熟したのち、インド人土工の団を訓練した。最初の3カ月間はうまくいかなかったが、その後は一日平均11,000個作ることができるようになった。これはイギリスやアメリカでの成績に匹敵するものであると、担当官が誇らしげに記している。

1882年に着工された堰や堤の改修工事に際しては、煉瓦製造はイギリス人経営の会社に請け負わされた。この会社はブル (Bull) が特許をもつ溝式窯 (trench kiln) を利用しており、政府がその使用のローヤリティを支払った。

石と石、または煉瓦と煉瓦を接着させるコンクリートにあたるものは、インド在来の建築においても用いられていた。その原料は、インドに特有の沖積石灰岩カンカル、川石を砕いたもの、石灰の焼き屑ガッターおよび煉瓦を砕いた粉スールキーを混ぜて、捏ね合わせたものであった。ヒマラヤ山麓地帯からデリーにいたる地方に産する種々の石灰岩は水利工事にとくに適していたと記録されている。