

それぞれの機械能力計算から必要延台数を求める。この延台数を工種別工程に機械を割付けて山積／山崩を行い、機械投入計画を作成する。最後に機械経費等を積算し、見積や実行予算書を仕上げる。

3. 運土計画

(1) 運土形態

土工事を分類すると、運土形態から線土工、面土工、塊土工に大別できる。道路・鉄道・堤防等の工事のような線状の運土工は線土工、宅地造成や敷地造成の多くは面状の運土となるので面土工である。また、フィルダム工事の原石山・コア山・ダム堤体等のような、塊状の離散分布は塊土工（マッシブな土工）になる。それぞれの運土形態には、各々適した土量計算法と土量配分法がある。

(2) DTM

まず、地形図は情報処理に適した DTM (Digital Terrain Model) として数値化する。

地形図の一次地形情報には、等高線、断面図、格子点標高、ランダム点標高等があり、それらから図-3 のような数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) を作成するが、相互変換も可能である。近年ではレンダリングに適した TIN (Triangulated Irregular

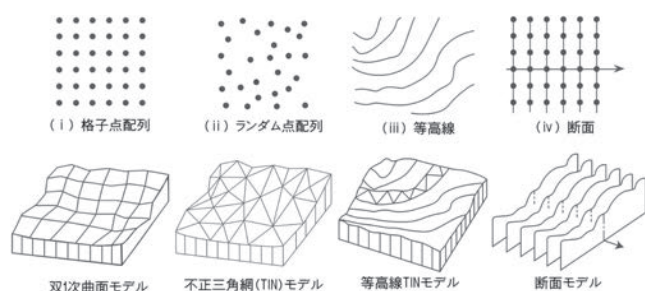


図-3 各種の DEM³⁾

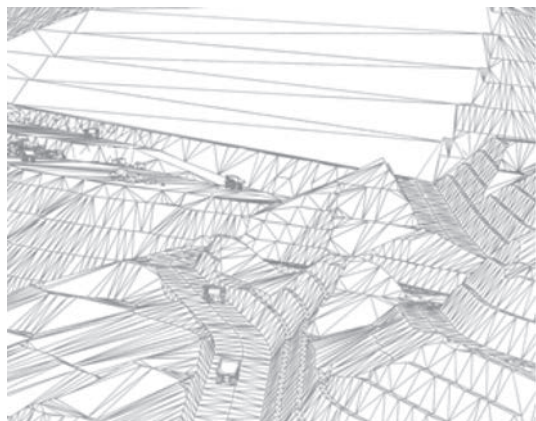


図-4 等高線 TIN によるモデリング例

Network: 不整三角網) によるモデリングが一般的となっている。図-4 は、原石山付近を俯瞰した等高線 TIN モデルの例で、工事用道路上には重ダンプを配置している。これにスムーズシェーディングを施すと陰影のある CG 鳥瞰図ができる。

(3) 土量計算と土量分布図

土量計算と土量配分は前述のように土工形態に適した方法を選ぶ。土量計算には線土工では線状の土量を捉え易い平均断面法、面土工では面状の土量把握に便利なメッシュ法（柱状法）を用いる。塊土工は塊状なので、採石計画や堤体盛立計画のように施工進捗に合わせて、標高毎の土量把握が行える等高線法が便利なが場合が多い（図-5）。

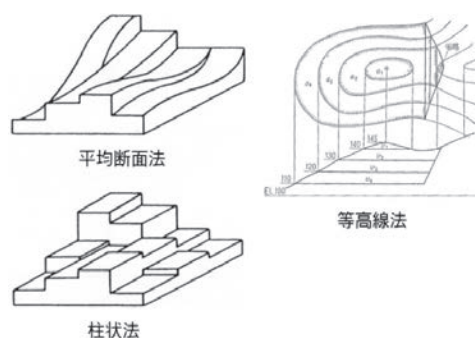


図-5 土量計算の模式図

(4) 土量配分法⁶⁾

①線土工の土量配分

線土工では、よく知られているマスカープ（土積図）を利用して土量配分を行う。マスカープは Excel で土積計算を行い、グラフ機能を利用して描き、平衡線を加えれば簡単に土量配分ができる（図-6）。

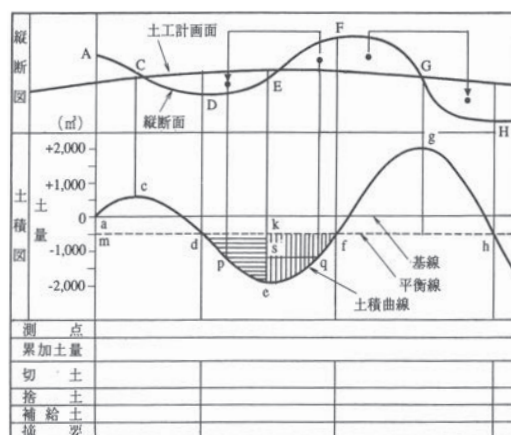


図-6 マスカープによる土量配分

②面土工の土量配分

面土工のような 2 次元的な拡がりをもつ運土形態で

の土量配分では、マスカープ手法が利用できない。このような土量配分は、輸送問題として線形計画法で最適化する。図-7の例では、メッシュブロック $m \times n$ 個間の運土の総仕事量 W_d ($m^3 \cdot m$) の最小化を図っている。

$$W_d = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} \cdot D_{ij} \quad (m^3 \cdot m)$$

V_{ij} : 各ブロックの土量

D_{ij} : 各ブロック間距離

図-7の運土矢線は最短直線距離を示しているだけなので、運土経路を考慮した実走行距離に置き直す必要がある。ソフトウェアで運土経路や経路障害を設定して、実際の迂回矢線を描くことも可能である。

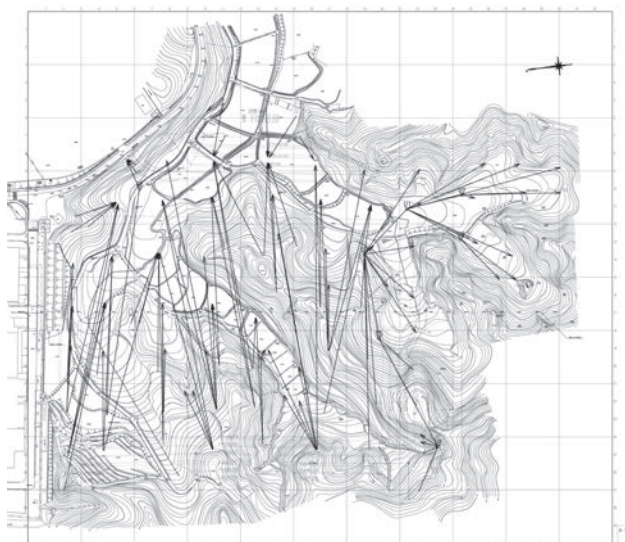


図-7 面土工の運土矢線図

③材料フロー図 (図-8)

塊土工は、フィルダム工事や採石工事が代表的で、材料をグリズリ等で選別して仮置き後に利用したりして、2次・3次運搬が発生する。このように煩雑な経路となる場合は、運土の流れを材料フロー図として表す。

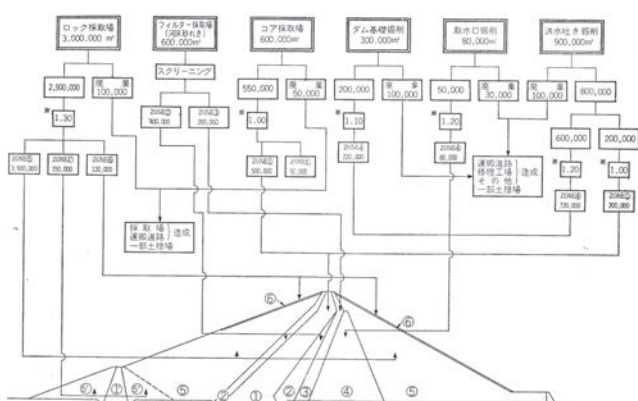


図-8 材料フロー図

(5) 工事用道路 (図-9)

①線形設定

土量配分が決まると工事用道路を設定する。経路の線形は、土取場と盛場の空間的位置関係と地形、機械性能等を考慮して決定する。特に縦断線形では、牽引力と制動力 (図-17) に配慮する。スクレーパ工法では経路設定のみで特段に工事用道路設計を行う必要性は少ないが、ダンプトラックの運搬で本格的な工事用道路を造成する場合は、工事用道路設計⁵⁾を行う。

②工事用道路設計

工事用道路の設計は、専用の3D-CADを用いて行うと容易である。走路線形は、土量配分計画を基に地形や設計速度を勘案して、縦断勾配・曲率・視距等に配慮して計画する。工事用道路の基本諸元は、道路幅員を車両全幅の3.5倍以上、縦断勾配10%以下、最小曲率半径50m以上、片勾配は4%程度等とする。

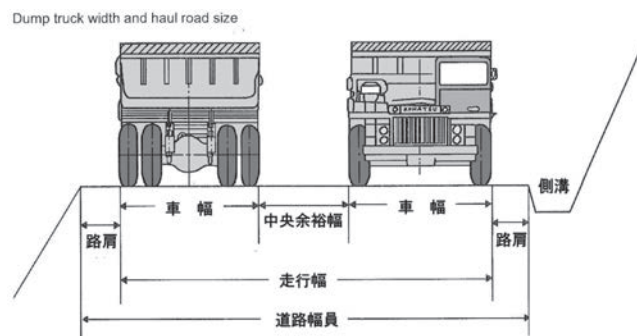


図-9 工事用道路

図-10はCADで作成した取付道路を示している。3Dモデルの表面には、レンダリングの他にテクスチャマッピングで図のような平面図や航空写真等を張付けることができる。

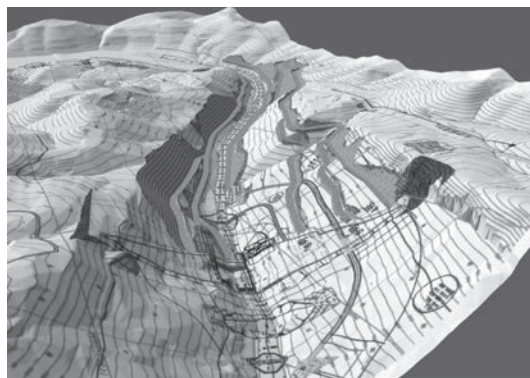


図-10 工事用道路の取付け例

③距離別搬土量

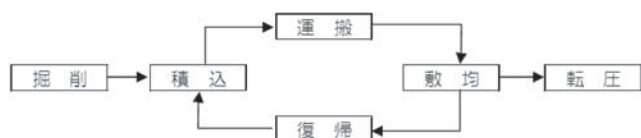
搬土経路を考慮した土量配分計画から距離別搬土量を求め一覧表にまとめる。この距離別搬土量を基に組

合せ機械をセットして作業能力を求める。

4. 機械計画

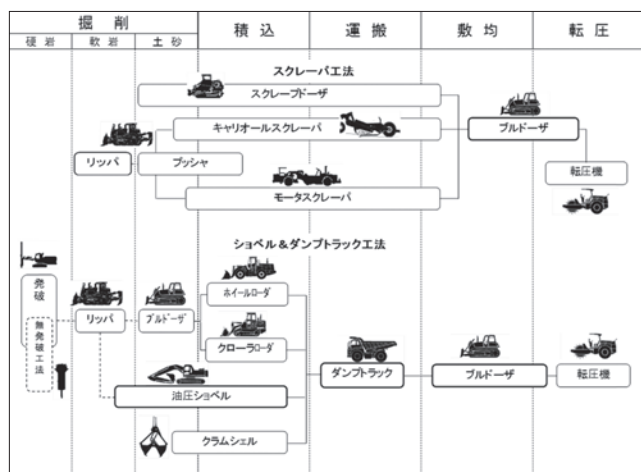
(1) 組合せと機種選定

機械土工は、切盛に伴う連続したダイナミックな作業であり、図—11のように掘削・積込・運搬・敷均・転圧を繰り返す、組合せ作業となる。



図—11 機械土工の作業

施工法は、大きく分けてスクレーパ工法とショベル&ダンプトラック工法に分類でき、一般的には図—12のような組合せから機種を選択する。

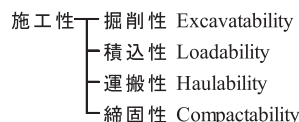


図—12 機械土工の組合せ

まず、工程が要求する施工速度 ($\text{m}^3/\text{月}$) からメイン機種の選定を行う。基本的にショベル&ダンプトラック工法では積込機を最初に決定し、スクレーパ工法では条件にあったスクレーパの機種を選ぶ。残りのセット機械は、メイン機械の作業能力に合わせて機種を選定する。

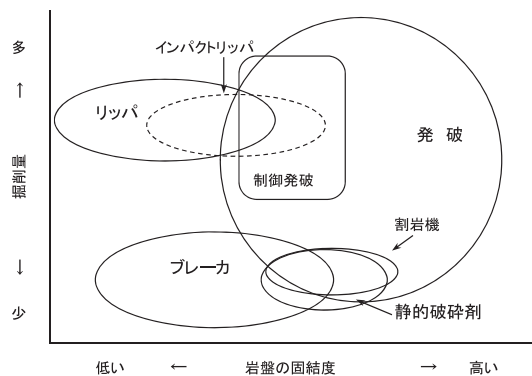
作業能力以外には、それぞれの作業での適合性、即ち施工性を考慮する必要がある。その施工性をそれぞれの作業に対応して分解すると、掘削性・積込性・運搬性・締固性となる。従って、掘削作業では掘削性を検討し、掘削能力やリッパビリティ等を調べ、積込作業では積込性として、積込材料の粒径や運搬機とのマッチングをチェックする。運搬機では、運搬距離の経済性の他にトラフィカビリティ、牽引力等の登坂性にも配慮し、締固作業では締固性を検討し、締固機械

の土質に対する適応性と締固能力を調査する。



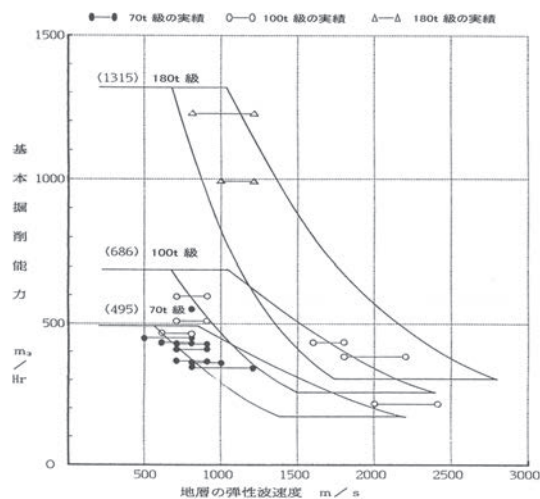
①掘削性 Excavability

岩掘削工法の適用範囲は概ね図—13のようになる。



図—13 岩掘削法の適用

軟岩掘削では、リッパビリティを弾性波速度で示すが、大型バックホウの場合も同様に図—14のような掘削性を調べて判断することができる。他の機種でも同様な掘削性資料を選定の参考にする。



図—14 大型バックホウの掘削性

②積込性 Loadability

ローダの選定では、バケット幅を運搬機の荷台幅の3/4以下とし、図—15のようにダンピングクリアランス等の運搬機とのマッチングを考慮する。また、破碎岩の粒径による積込み性の違いやローディング法の長短も理解しておく。

バックホウ積込みでは、積込み位置と旋回角度等を考慮する。

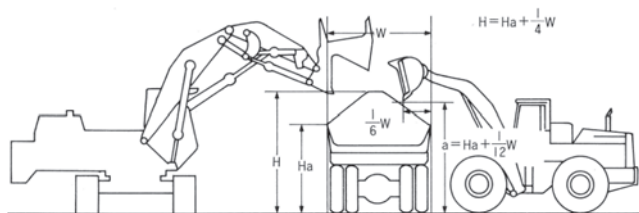


図-15 積込機の組合せ

③運搬性 Haulability

搬土機械については経済的搬土距離を考慮して、使用する機種を決定する。適用範囲は概ね図-16のようになる。

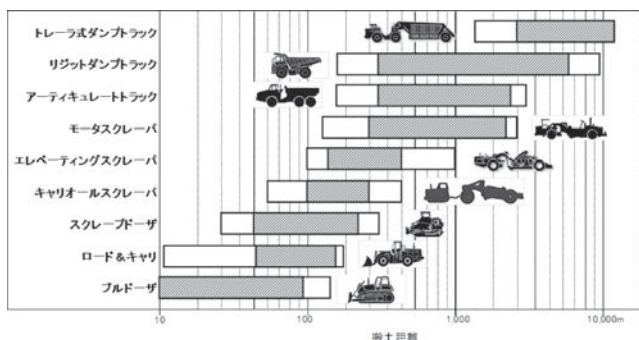


図-16 経済的搬土距離

走路の縦断勾配と走行速度の関係は、図-17のような牽引力曲線やブレーキ性能曲線から求めることができる。また、長距離高速運転する場合は、タイヤのヒートセパレーションにも配慮する必要がある。

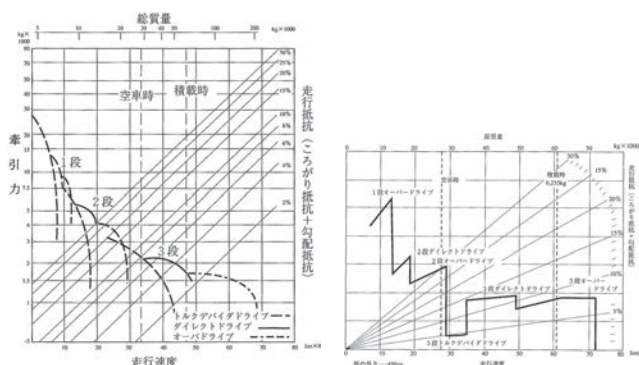


図-17 牽引力とブレーキ性能曲線

(2) 作業能力の算定

①組合せ作業能力

ショベル&ダンプトラック工法では、基本的に積込機の能力に見合うセット機械を選定する。従って、セット機械は同一以上の能力を求められ、セット機械の組合せ能力は積込機の能力と同じになる。多少の能力差は稼働時間で調整できる。

②積込機の作業能力計算

積込み作業は単独作業ではなく、ダンプトラック

(DT) との組合せ作業になるので、作業能力算定において q を別々に設定して計算すると整合性がとれなくなる。そこで、DTの積載量 q_h を基準に、その積載量 q_h を満たすために必要な積込み回数を設定して、積込み能力を算定するとよい。

$$Q = \frac{3600 \times q_h \times f \times E}{C_s \times n}$$

Q : 積込機の作業能力 (m^3/h)

q_h : ダンプトラックの積載量

f : 土量換算係数

E : 積込機の作業効率

C_s : 一杯の積込サイクルタイム (秒/杯)

n : 積込回数 (杯/台)

③走行シミュレーション

搬土機械の作業能力は、平均走行速度から求める方法が一般的であるが、アップダウン等の変化に富む走路の場合には、牽引力と制動力(図-17)から走行速度を合理的に求めて、サイクルタイムを決定する走行シミュレーション¹⁰⁾を利用できる。また、これは設計した工事用道路の評価にも利用できる。

④待ち行列の考慮

組合せ機械の施工においては、積込場や盛場で積込待ちやダンプアップ待ちの行列が発生する。DTの所要台数を決定する場合、通常作業量算定式で計算を行うと図-18のグラフの実線のように、DTの台数増加に比例して搬土量(グラフではショベル効率で表示)は直線的に増加し、積込機の作業能力を限界として頭打ちとなる。しかし、実際にDTの台数を変化させて運搬量を測定すると破線のような曲線になる。増車に伴って待ち行列が発生するからである。

搬土機械の待ち行列モデル⁷⁾は循環型待ち行列となり、その確率分布はアーラン分布となる。待ち行列

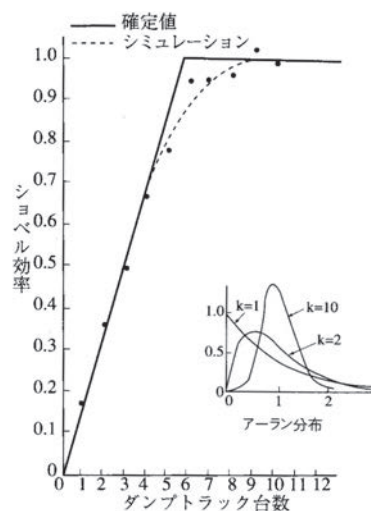
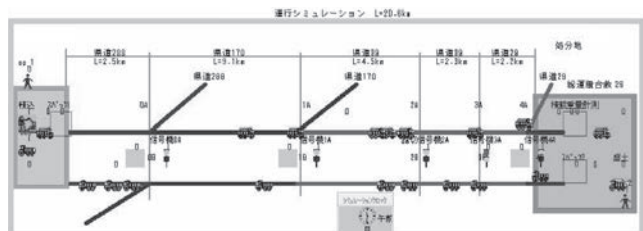


図-18 DT台数と待ち行列

シミュレーションを利用すれば、より正確なサイクルタイムや所要台数の決定に利用できる。

また、運行経路上の交差点や離合箇所待ち行列が発生する場合のサイクルタイムや所要台数の算定にも有効である。このプログラミングにはシミュレーション言語（SLAM II 等）を用いたが、近年ではパソコン用の簡易ソフトウェア（図—19）が利用できる。



図—19 簡易ソフトによるモデリング例

⑤必要延台数

工種別の組合せ機械セットが決まると、工種毎の各機械の必要延台数を求めておく。

5. 工程計画

工程計画では、最初に工期と気象データや環境制約から施工速度（ $m^3/月$ ）と稼働日数を求めておき、機械計画での機種選定と必要延台数の算定に供した。

（1）必要延台数の利用

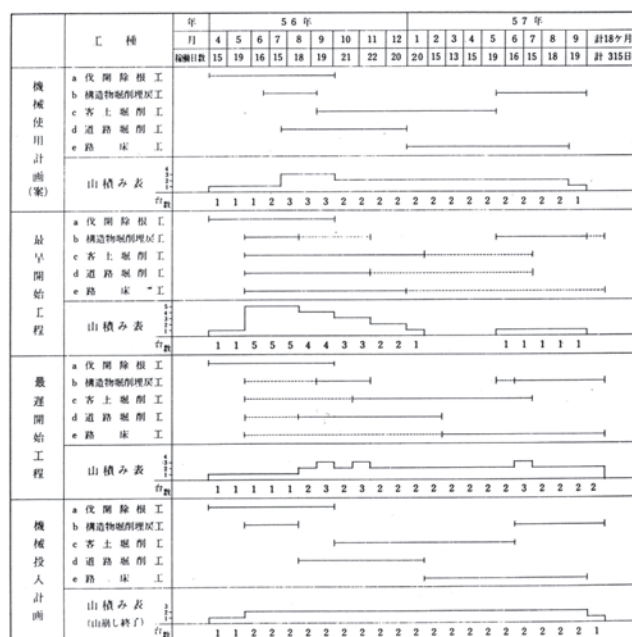
機械土工の工程計画は、工種別工程に機械を割付けることである。そのために機械計画で求めた必要延台数を利用して、工種別工程表に機械を展開する。

（2）山積／山崩

工種別工程表に機械を割付けると機種別投入台数の合計にムラができる。機械台数のムラは工程途中の搬入出を増加させるので、投入台数の平準化が求められる。そこで山崩を行う。山崩は、図—20のように最早開始工程と最遅開始工程の間で調整する。

6. CIM について

近年、建築の BIM（Building Information Modeling）に刺激されて、土木分野でも CIM（Construction Information Modeling）の導入が検討されている。機械土工の施工計画の作成においては、前述のように 3D-CAD 等を活用している。地形 CAD はサーフェスモデルで、地層は多層化して表現できるが、複雑な地

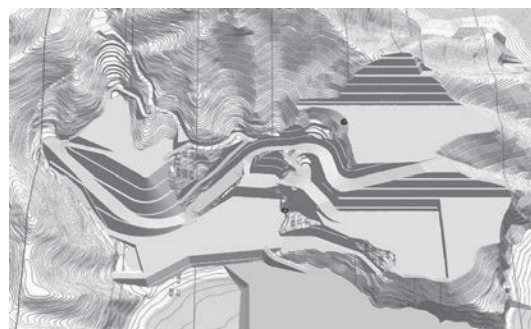


図—20 山積／山崩

質はモデリングが難しいので、地質構造をソリッドモデルとして埋込み、属性情報として地質・土質データをもたせたい。その他に施工段階を迅速に検討できる 4D-CAD 機能が望まれる。

（1）施工段階図

3D-CAD で作成したモデルは、鳥瞰図や完成パースを自由な視点で表示でき、ウォークスルー機能で自由に動き回ることできる。また、レイトレーシング等の高描写画像や重機稼働は、コマ落としによりアニメーション化が図れる。ウォークスルー機能も時間軸の一種であるが、工程を加味した 4D 機能が望まれる。施工計画では施工段階図を作成し、切羽展開や取付道の検討を行うが、この作業に図—21 のような地形 3D-CAD を利用すると曖昧さがなくなり、早期により実地的な検討（フロントローディング）が行える。しかし、3D-CAD を利用しても力仕事となり、効率化を図りたいが、自動化が難しいプロセスである。



図—21 施工段階図

近年、実際の施工段階での出来形測量に3D レーザスキャナや写真測量解析の利用が容易になってきている。特に最近の技術革新により、廉価な自律型マルチコプタ等の小型 UAV（無人航空機）による航空写真測量が可能となり、高精度な現況地形モデリングによる照査が行え、残工事の施工計画の再検討に利用できるようになった。

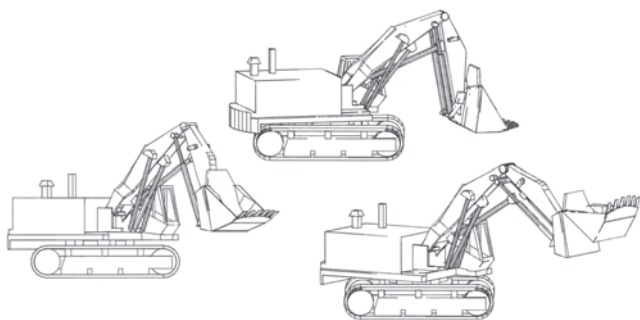
施工法の検討や施工の進捗をリアルに表現するには、地形の施工シミュレーションと重機稼働表示が不可欠であろう。究極的には、VR（Virtual Reality）や AR（拡張現実感）、MR（複合現実感）の仮想空間に入り込み、仮想体験的に施工検討を行えることである。技術的には現在技術で実現可能であるが、非効率なモデリングとコストが課題である。

(2) 重機稼働アニメーション

図—22 は CG で作成した重機の例である。重機稼働のアニメーション⁹⁾は、図—23 のように関節を可動にしておけば、コマ落として作成できるが、多彩なシナリオが求められる。



図—22 CG 建機



図—23 重機アニメーション

7. おわりに

最近の土工事に関する参考書は、土工を静的というか、切土や盛土構造物としての捉え方が多く、ダイナミックに連続した切盛作業として捉えたものが殆どなくなっている。また、近年の官側の積算は簡素化が図られ、作業量算定式等が明示されなくなり、応用が利かなくなっている。道路土工指針の今回の改訂でも施工指針が廃され、機械土工の記述が減少している。

官積とは積算方式や施工計画の組立方に違いがあるが、専門工事業者による実際的な機械土工の施工計画作成法を紹介した。幾ばくかの参考になれば幸いである。紙幅の関係で概要しか記せなかったが、詳細は以下の参考文献等を参照して頂きたい。

《参考文献》

- 1) 日機協、登録機械土工基幹技能者テキスト、2013.5
- 2) 岡本、連載 土工機械の話 1～6、月刊土木施工 2009.7～12、インデックス出版
- 3) 岡本：デジタルアースムービングによる施工計画、建設機械、日本工業出版、2009.11
- 4) 岡本：デジタルアースムービング、建設の施工企画、JCMA、2009.3
- 5) 岡本：工事用道路の設計と安全、建設の施工企画、JCMA、2008.7
- 6) 岡本：4章 土量配分計画、環境土構造工学（1）、電気書院、2006.4
- 7) 岡本：情報化土工、環境土構造工学（2）、電気書院、2005.11
- 8) 村井俊治：空間情報工学、日本測量協会、2002.8
- 9) 岡本・田中：重機稼働アニメーションについて、第17回土木情報シンポジウム講演集 1992.10
- 10) 岡本・大下：搬土機械の走行シミュレーションにおける走行速度の合理的決定法、第9回建設マネジメント問題に関する研究会・討論講演集、1991.12
- 11) 「土工教室」<http://www.yamazaki.co.jp/data/school/edc.htm>
- 12) 「土工塾」<http://hw001.spaaqs.ne.jp/geomover/index.htm>

【筆者紹介】

岡本 直樹（おかもと なおき）
（一社）日本機械土工協会
講習委員会 専門テキスト作成部会
座長

