

岩塊盛土の今昔

Introduction to Rock-fill Embankment

張 鋒 (ちょう ほう)

名古屋工業大学 教授 高度防災工学センター

古 屋 弘 (ふるや ひろし)

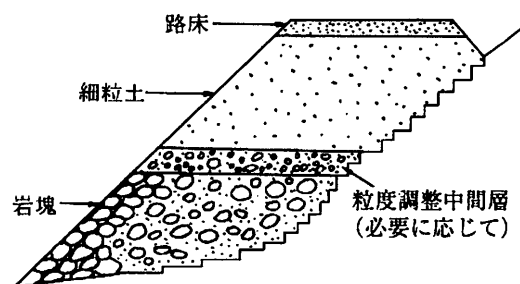
大林組技術研究所 生産技術研究部 主任技師

1. はじめに

土工においては、経済性のみならず環境保全の観点から、現地発生土を有効に利用することが望まれている。この発生土の利用の目安に関しては、詳細な工学的な判断によることはもちろん重要であるが、参考文献¹⁾に示されるように第1種または第2種建設発生土に分類され²⁾、その性状やコーン指数などにより判定し、この結果により適用用途を決定することが多い。岩塊に関しては、これらの基準により最大粒径及び粒度分布に注意することにより、工作物の埋戻し、構造物の裏込めをはじめ、ロックフィルダム、道路、鉄道などの路床、路盤、宅地造成などの工事に適用されてきた。

高度成長期（1950年代～1970年代）においては、インフラ整備が盛んに行われ、岩塊盛土の設計・施工・管理においてはいろいろな問題と直面した。例えば、扇状地・崖錐・段丘地帯を掘削した時に多量に発生する粒径の大きい転石を用いた盛土の施工；フィルダム岩石材料の耐久性評価手法の確立；細粒分を添加しない条件で、現地発生盛土材をどのような破碎方法（重機による破碎、乾湿繰返し自然風化など）で細粒化することによる低い透水係数の確保（止水効果が必要とされるアースダムやロックフィルダムの芯材として）；列車荷重による軟岩盛土の動的沈下；泥質岩碎の締固め特性に及ぼす粗粒分の影響評価などの問題が挙げられる³⁾。

近年では新しいインフラ整備の勢いは弱まってきているが、新たな道路や鉄道路線の建設なども進められている。それらは高規格なものとするため線形を維持することが求められ、また、山間部では橋梁やトンネルの施工が多くなってきている。このような場所では、切盛りが多く、長大トンネル掘削に伴い発生する岩碎なども、上述のような発生土の有効利用の観点から盛土材料としての適用が求められる。しかし岩塊は通常の盛土材料の粒度特性とは異なり、大粒径で粒度分布が悪い材料であることが多く、敷均しや締固め作業が難しく取り扱いにくい材料でもある。一方で岩塊は、使用に関して留意しながら施工を行うことにより軟岩材料を除いて、盛土としてできあがった時には安定性が高いことが特徴である。したがって、岩碎盛土の施工においては、岩塊の最大粒径を制限するとともに、できるだけ小割にして施工することが望ましい。図一1に示すように、盛土の下部やエロージョン防止のリップラップなどへの大塊を使用する



図一1 岩塊の有効利用の例（盛土体への利用）

場合には、岩塊の隙間を細粒土で埋めるなど盛土の密度を高めるための施工工夫により、安定性の高い盛土を施工する。

また、近年では締固め能力の高い重機（例えば300 kN級の振動ローラなど）が利用されるようになり、1層の締固めが60 cm程度の厚層締固めも行われ、岩塊の適用範囲も増加しつつある⁴⁾。

一方、盛土の品質を高めるためには、岩塊をなるべく小さくするよう自走式の岩碎機を使い、1層の仕上がり厚を小さくすること（仕上がり厚<30 cm）で、確実に高品質の盛土を仕上げる傾向も見られる。

2. 岩塊盛土の施工特徴

岩塊を盛土材料として利用する場合は、母材である岩の種類に留意して施工方法を決定する必要がある。異なる岩種の岩碎を盛土に利用する場合の施工の留意点を以下に記述する。

1) 硬岩による岩塊：

硬岩の岩塊そのものの性状は、転圧時の破碎や気象による細粒化などの変化が起きにくいいため、安定した材料であるといえる。一方でこのような性質から、採取時・産出時の岩塊の最大粒径が大きく、1層の仕上がり厚が30 cm以上となるように計画することが多い（日本においてロックフィルダムに使われる岩塊の最大粒径は約2 m）。施工時には敷均し厚の目安を最大粒径の1.0～1.5倍とすることが多く、このために上記の層厚での締固めを用いることもある。施工時の敷均し時には礫だまりによる空隙ができやすいことから、材料分離を起こさないようにブルドーザやバックホウで丁寧に敷き均すとともに、隙間への土砂充填も必要に応じて実施する必要がある。また、大型の振動ローラを用いて入念に転圧を行う必要があるが、使用機械及び転圧回数などを含めた施工

総 説

方法は試験施工により決定する必要がある。フィルダム等では水置換法による密度管理を行うこともあるが、一般的には試験施工による工法規定と締固め度（D 値）管理が主体となる。

2) 硬岩よりやや弱い岩塊（中硬岩）及び風化岩：

施工時に転圧破碎する岩であり、基本的には硬岩の施工に準じる。入念な施工を行うことにより安定性の高い盛土を造成できる材質である。品質管理は硬岩に準じるが、RI（ラジオアイソトープ）等の利用が行われている。

3) 軟岩，風化軟岩：

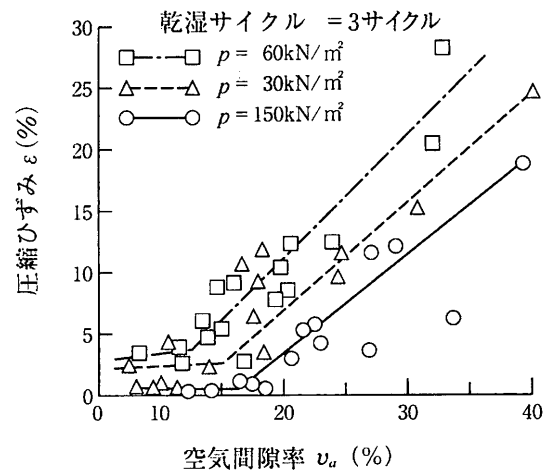
岩塊の分類⁵⁾で規定されている第三紀以降の堆積岩（泥岩，頁岩，砂岩など）のほか，風化した蛇紋岩，変成岩，結晶片岩，凝灰岩，安山岩など，膨潤性及びスレーキングを起こす材料である。これらの材料は盛土完了後に大きな圧縮沈下を起こすこともあり，さらにこのスレーキングに起因して地震時に崩壊した事例もある。このため，これらの材料を使用する場合は，材料採取場所においてできるだけ小粒径になるように掘削や産出方法を検討すること，また薄層まき出しでタンピングローラや大型振動ローラ等で転圧破碎を行い，空隙をできる限り小さくなるような施工方法を用いる必要がある。また，乾湿の繰返しにより細粒化が促進されることから，降雨対策や排水処理を入念に行う必要がある。

過去の研究成果によれば，軟岩・風化軟岩の岩砕が締め固めた後に，浸水及び風化により強度が著しく低下することがよく知られている。例えば，今川ら⁶⁾は各種軟岩の室内乾燥・水浸繰返し試験により，岩砕で締め固めたサンプルの体積変化を調べた。その結果，水浸時の強度低下は主に岩砕のスレーキングによるものであり，空気間隙率 $v_a \leq 15\%$ になると顕著な沈下が起きないことがわかった。また，磯貝⁷⁾は泥岩の風化による強度低下を明らかにするために，コンクリートの骨材安定試験と同様に，異なる拘束圧の下で，締固め度の異なる岩砕試料を硫酸ナトリウム溶液で水浸・乾燥繰返し過程（乾湿サイクル）を与えた後，三軸圧縮試験を行った。その結果，拘束圧と締固め度が高ければ，強度比（乾湿サイクル過程有無の場合の三軸圧縮強度の比）で評価した風化度が低くなることがわかった。また，同じ粒径分布であっても，最大粒径が大きければ大きいほど風化しやすいこともわかった。

図—2 に異なる拘束圧の下で乾湿サイクルを受けた脆弱岩材料の三軸圧縮試験における圧縮ひずみの特徴を示す。この図からもわかるように，空気間隙率がある値より小さくなると，圧縮ひずみは小さい範囲に収まる。高速道路の盛土では，やむを得ず軟岩・風化軟岩の岩砕を盛土の路体に用いる場合，空気間隙率が15%以下となるような施工が望ましいとされている⁸⁾。このような材料の施工管理では，密度管理だけでなく，空気間隙率を用いた管理も重要である。

3. 岩塊盛土の品質管理に関する新手法の普及

岩塊盛土では，粒径により一般的な材料による盛土施



図—2 脆弱岩材料における圧縮ひずみの変化

工の品質管理で実施されている砂置換法などによる密度管理を適用できない場合が多い。さらに最大粒径が大きいことから，室内で実施する土の締固め試験（JIS A 1210）と現場での整合が困難な場合がある。このために，試験施工を行い「特別規定値」として施工仕様を決定することが多い。施工管理においては，この特別規定値による工法規定と水置換，RI などを用いた密度管理を実施することが一般的である。近年では，この工法規定の担保として，GNSS（Global Navigation Satellite Systems）を用いた転圧回数管理システムの導入や，一部で振動ローラの加速度応答を用いた施工管理が実施されている。

(1) 盛土の情報化施工（工法規定による転圧回数管理システム）：

盛土の締固め管理における情報化施工として，図—3 に示す TS・GNSS を利用した締固め管理システムが挙げられる。TS（Total station），GNSS による測位法を用いて締固め機械の走行軌跡を計測し，盛土地盤全体の転圧回数を管理するシステムであり，その原理と特徴を表—1 に示す。

このシステムでは，締固め機械に搭載したパソコンの画面に，規定の密度を得るために必要な所定の転圧回数（工法規定に従い，事前の試験盛土施工により求めておく）に到達するまで，現時点での転圧回数を段階ごとに色分けしてリアルタイムに表示する。図—4 にこの管理図の画面の一例を示す。盛土地盤全体においてこの処理を行うことにより，所定の転圧回数に達していないエリアをオペレータがその場で把握できるシステムで，面的な締固め管理が可能であるとともに，品質の担保（工法規定遵守の確認）が行えることから，工法規定を採用することの多い岩砕盛土において重要な品質管理のシステムとなりつつある。

(2) 振動ローラ加速度応答法の活用：

近年，岩砕のような粗粒材料を用いた盛土の締固めには，大型の高性能な締固め機械が多く用いられ，施工の効率化が図られる。施工中に盛土の品質を判定し，それを施工管理や締固め機械の制御に反映させることが重要

視されつつある。振動ローラの施工中に各種のデータを取得し、それを締め固めた土の品質管理を行う試みは Thurner and Sandstrom により本格化した⁹⁾。我が国で

表-1 TS・GNSSを利用した締め固め管理システム

	TSを利用した締め固め管理システム	GNSSを利用した締め固め管理システム
原理	重機にプリズムを設置し、作業領域外の視通の良い場所に設置した自動追尾式のトータルステーションで重機（プリズム）を追尾し、重機の位置情報を取得。一般的には300 m程度の範囲で利用。	重機に設置したGNSS(GPS)にて重機の位置情報を取得。補正情報が必要とし、現場に基地局のGPSを設置するか、仮想基準点(VRS)を利用する必要がある。一般的に基準局から2 km以内が望ましい。
重機の位置情報の取得場所	重機外のTSにて取得。位置情報を重機内の管理システム(PC)に無線または屋外LANにて転送。	重機に搭載したGNSSにて位置情報を取得し、データを車載の管理システム(PC)に転送。
転圧管理方法	軌跡管理/メッシュ管理（メッシュを通過回数に応じて色分け表示し転圧回数と通過場所を表示）	

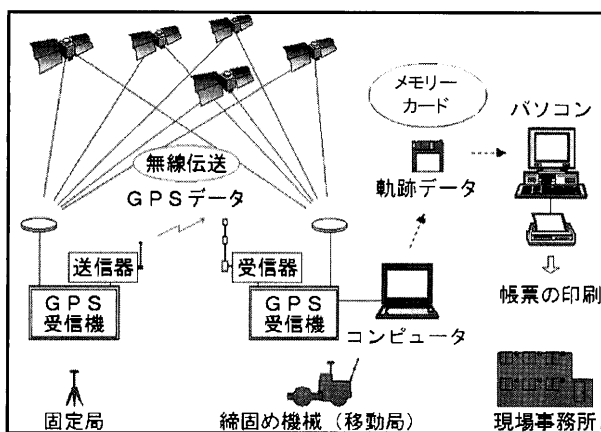


図-3 TS・GNSSを利用した締め固め管理システムの構成図

も1980年頃から検討が進められ^{10),11)}、地盤の剛性を計測する技術は確立されていた。しかし当時は広い現場内の位置座標を特定する技術がなかったため、実用化には至らなかった。1990年代後半になると、GPSを用いた位置特定技術と結びつけることにより、実用技術として現場での導入が検討されるようになった^{12)~14)}。

一例として、2000年初期に藤山・古屋らが開発した振動ローラ施工時の剛性管理を行うことのできる「 α システム」¹⁵⁾を紹介する。図-5にこの加速度応答法を用いた適用事例を示す。当初この手法は一部の工事における品質管理に用いられてきたが、一般的な品質管理が密度管理を基本とすることから普及には至らなかった。道路設計の性能規定化やICTの導入による高度な管理と品質の向上の要求により、2005年以降、再び脚光を集めつつある。すなわち、手法は面的な品質管理を実施することができることで施工中に相対的な弱部を発見でき、再転圧を速やかに実施することも可能となり、盛土の品質確保に関する信頼性の向上が期待できるから、道路の盛土施工に使われるようになった。

4. 近年の岩塊盛土におけるトピックス

前述のように、近年ではトンネルズリなどの利用が積極的に行われるようになった反面、それらに起因する問

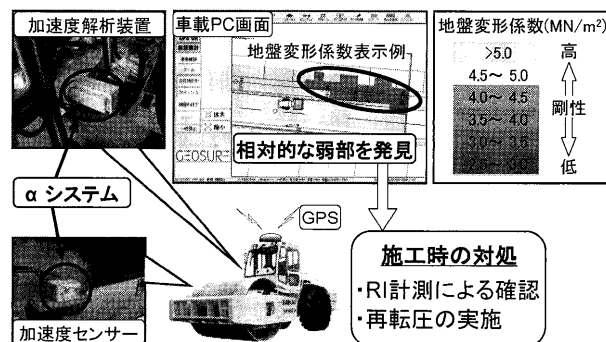
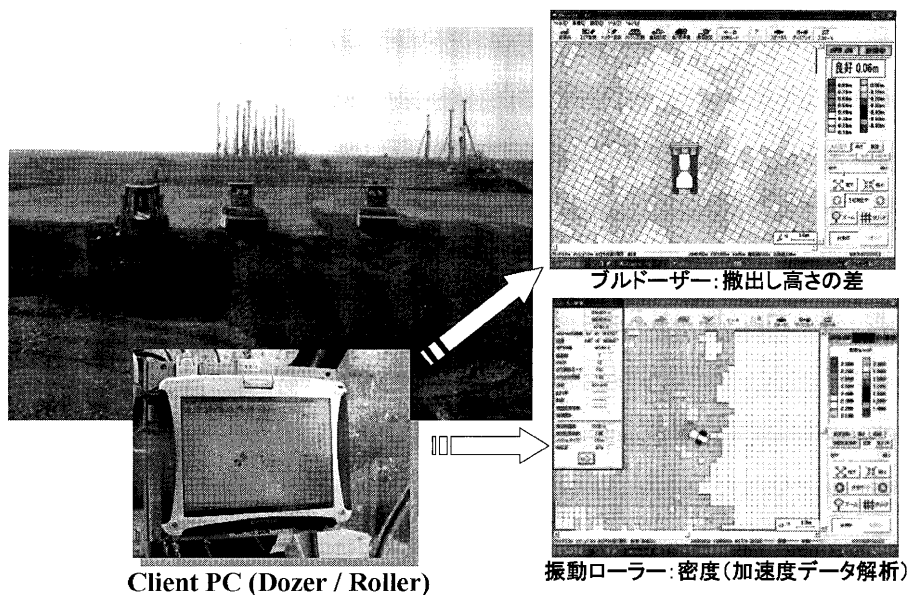
図-5 加速度応答法の適用例：「 α システム」

図-4 締め固め管理図の画面の例

総 説

題も発生するようになった。これは自然に含まれる重金属類が、掘削時や盛土施工時に溶出し環境に悪影響を及ぼし、「自然由来」と呼ばれる問題である。重金属そのものの毒性のほか、降雨などによる溶出に起因して酸性水も問題の一つとして挙げられる。これらの原因となる主な重金属類は、ヒ素、鉛、フッ素、ホウ素で、人為的原因による重金属汚染とは異なる特徴を持っている。例えば人為汚染は、一般的に汚染源で濃度が高く、そこから離れるに従って濃度が低下するが、自然由来の重金属類は、地層全体にわたって広く分布していることから、トンネル工事などのズリを利用する場合にこれらの地層にあたることもあるので対策に留意が必要である。例えば、硫化鉱物を含む地質でトンネルなどの掘削工事を行うと、地山内部の硫化鉱物が空気と水に触れて酸化し酸性水が発生することがあるが、これは硫化鉱物の代表的なもので黄鉄鉱（パイライト）が原因である。

このような自然由来の重金属類を含む岩石や土砂を対象に切盛り土工事を行う場合には、その特性に応じて安全性を評価し、必要な対策を実施することになる。安全性の評価は短期リスク試験と長期リスク試験で行い、この結果により基準を大幅に超える岩材料に関しては廃棄処分をする。しかし対策により封じ込めが可能な場合では、長期間水と空気に触れると酸性水が発生するような岩石に対して、土砂の受入れ地で締固めや被覆などを行って雨水を浸透させないよう、急激な酸化を防ぐ方法などを採用すれば、盛土材として使用することが可能となる。また、中和作用のある土砂と一緒に埋め立てることで、酸性水が発生してもすぐに中和させる方法も用いられている。さらに、遮水シートで包んで道路盛土内に封じ込める方法も採用されている。

もう一つの話は数値解析に関する最近の動向である。いままで岩砕盛土に関する数値解析の事例はほとんど聞こえてこなかったが、この原因はやはり岩盤力学の体系が軟弱地盤力学ほど理論・体系化されていないことにある。勿論個別要素法など不連続体のモデルで検討することは可能であるが、膨大な計算量と物理量の決定の難しさから、岩砕盛土の力学特性を数値解析手法で定量的に評価することは困難であった。一方、連続体力学の範疇で不連続岩塊の集合体の巨視的挙動を表現しようとしても、工学的にどれだけの精度で現場のデータを再現できるかについては常に現場技術者だけでなく、研究者の間でも疑問視されてきた。

このような困難の局面の中に、この難題を果敢に挑む研究者がいることも否定できない。特に、最近軟弱地盤における構成式とそれに基づいた数値解析手法が飛躍的な発展を遂げてきたことで、地盤力学の論理的解析手法が確立されつつある。これらの岩盤力学への応用の一歩として、堆積軟岩の岩砕盛土のスレーキングによる地盤の沈下と地震時挙動を数値解析で評価する研究が行われるようになり^{16),17)}、注目を集めている。

5. あとがき

岩塊盛土は地盤力学と岩盤力学の古い問題として、古くから注目されてきた。しかし、岩塊盛土の元となる岩石の種類、施工工法、使用目的によって、その力学挙動は千差万別であり、「放之四海而皆准」（どこにでも適用できるという意味）の評価手法は存在しない。しかし、施工経験や施工機械の発達など実績の積み重ねにより、高品質の岩塊盛土の施工は可能となってきた。今直面している問題はいかに実情にあった施工と品質管理方法を膨大な知識情報データから選り出し（基本的に綿密な地質調査と試験施工が必要となる）、経済的かつ高品質（相容れないように見えるが）のものを造るかである。また、環境問題や今まで無縁だった高度な数値解析手法の利用など様々な課題があるものの、発展性のある工学問題として注目すべきと認識する次第である。

参 考 文 献

- 1) 鈷土木研究所：建設発生土利用マニュアル（第3版），2004.
- 2) 国土交通省令59号，60号，平成13年3月29日．
- 3) 小特集：岩塊を用いた盛土の諸問題，土と基礎，Vol. 32，No. 7，pp. 3～60，1984.
- 4) 益村公人・三嶋信雄・三浦清一：厚層締固めによって生じる道路盛土内の密度勾配と圧縮沈下挙動に及ぼす影響，土木学会論文集，No. 672，VI-50，pp. 155～167，2001.
- 5) 木村敏雄・速水 格・吉田鎮男：日本の地質，東京大学出版会，pp. 180，1993.
- 6) 今川・大根・後藤：岩ずりを用いた盛土の圧縮特性，第17回土質工学研究発表会，1982.
- 7) 磯貝洋尚：築堤材料としての泥岩の特性，土質工学会中部支部第2回地盤研究会，1981.
- 8) 東日本高速道路㈱・中日本高速道路㈱・西日本高速道路㈱：設計要領，第一集，2009.
- 9) Thurner H. and Sandstrom A.: A New Device For Instant Compaction Control, *Proceedings International Conference on Compaction*, Vol. 2, pp. 611～614, 1980.
- 10) 嶋津晃臣・見波 潔・中田公基・嶋田 功・足立賢一：振動ローラによる盛土の締固めに関する調査，土木研究所資料，第2184号，pp. 37～76，1985.
- 11) 建山和由・藤山哲雄・西谷誠之：締固め施工における振動ローラの振動挙動に関する考察，土木学会論文集，No. 544，III-37，pp. 231～237，1996.
- 12) 北村佳則・西尾貴至・内山恵一：ローラ振動加速度応答を用いた盛土品質評価，2003，第25回日本道路会議．
- 13) 北村・藤岡・内山ほか：ローラ加速度応答法を用いた道路路床の品質管理に関する研究（その2），第39回地盤工学研究発表会，pp. 1345～1346，2004.
- 14) 月本行則：米国における舗装の締固め管理技術の動向とICT技術の活用，建設の施工企画，pp. 34～38，2010.
- 15) 藤山哲雄・古屋 弘：振動ローラ加速度応答を利用した地盤剛性評価装置の開発，平成16年度近畿地方整備局管内技術発表会，2004.
- 16) 中野正樹・中井健太郎：初期構造が第三紀泥岩の粘土化に及ぼす影響，応用力学論文集，Vol. 6，pp. 419～426，2003.
- 17) 中野正樹・中井健太郎：粘土化のしやすさの異なる第三紀泥岩粉砕砕石集合体の一次元圧縮挙動，応用力学論文集，Vol. 7，pp. 419～426，2004.

（原稿受理 2012.5.14）