

硬岩礫混じり地山での地山挙動予測手法の提案

林 久資¹・酒井 大輔²・森本 真吾³・進士 正人⁴

¹正会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 西日本高速道路株式会社 山口高速道路事務所

(〒754-0001 山口県山口市小郡上郷字二又川東1221)

E-mail: d.sakai.aa@w-nexco.co.jp

³正会員 ドボクリエイト株式会社 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台2-16-1 山口大学研究推進機構C206)

E-mail: charlie@dobocreate.jp

⁴正会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

硬岩礫混じり地山でのトンネル設計・施工は、トンネルを掘削した時の地山内での硬岩礫の挙動が不明確であるためこれまで多くの技術者が苦慮してきた。本研究では、有限差分法三次元数値解析コードFLAC3Dを用い硬岩礫混じり地山とトンネル掘削時の地山挙動を2種類の分割モデルで再現し、地山挙動予測手法の提案を行った。

その結果、トンネル未掘削地山では硬岩礫含有率が40%を超えると矩形分割モデル、60%を超えるとボロノイ分割モデルにおいてもモデル内の硬岩礫同士が接触する影響が見られることが分かった。加えて、硬岩礫混じり地山にトンネルを掘削する際は、ボロノイ分割法によって硬岩礫をモデル化することで、硬岩礫の押出し挙動がより現実的に再現できることがわかった。

Key Words : Gravelly rock, Tunnel, Numerical analysis, fall of loosen-rock

1. はじめに

山岳トンネルを施工する際には崖錐層や強風化地山などに遭遇することがある。このような地山では、地山の一部に硬岩礫が混じることがあり、場合によっては直径2mを超えるような巨礫が存在している箇所も見られる。例えば大天狗トンネル¹⁾では、トンネルが掘削される地山のうち崖錐堆積物が巨礫混じり砂礫によって構成されており、礫寸法φ5~30mm、一部数十cm超の礫が見られ、窪平トンネル²⁾では土被りの浅い区間にはルーズな転石・玉石混じりの堆積物が分布したと報告されている。

特に、硬岩礫周辺の地山が未固結軟弱地山で構成されている場合、技術者は設計・施工に苦慮することが十分想定される。著者らがトンネルの現場技術者に対し実施した硬岩礫混じり地山での設計、施工経験アンケート結果³⁾によると、硬岩礫混じり地山での設計、施工経験があると回答した技術者のうち、硬岩礫混じり地山で業務が難渋したり問題と感じている事項で最も多かったのは、支保パターン選定の選定、地山の力学的特性、地山物性の特定困難さなどであった。

これらの問題点は、硬岩礫混じり地山にトンネルを掘削したときの地山の挙動が設計・施工時に不明確であることから言及されたものと考えられる。そこで、硬岩礫混じり地山にトンネルを掘削したときのトンネル周辺地山に生じる力学的影響をまとめた既往研究を調査した。

岡田ら⁴⁾は、礫岩のような不均質な地山の強度特性を把握するために、人工岩礫を用いた実験的研究を報告している。永井ら⁵⁾は転石・玉石混じり層からなる地山を対象として、見かけの変形特性の簡便な評価法を提案している。しかしながら、硬岩礫の形状を数値解析モデル化していないため、硬岩礫の押出し等の再現は難しい。ほかにも、硬岩礫混じり地山での切羽安定などの対策工の効果を示した文献はいくつか見られる⁶⁾ものの、トンネル周辺地山の力学的影響を定量的に明らかにした研究はほとんどない。そこで本研究では、硬岩礫の形状・寸法、含有率、配置の違いを考慮したトンネル掘削解析により、地山挙動の違いを比較検討し、簡便に硬岩礫混じり地山を模擬する手法を提案する。

2. 硬岩礫混じり地山の数値解析モデル化

本章では、硬岩礫混じり地山を数値解析モデル化する手法について述べる。ここでは、硬岩礫とその周辺の砂質地山の配置・形状をモデル化するために図-1に示す矩形分割モデルとボロノイ分割モデルを作成した。図-1のモデルの解析領域はすべて高さ50m、幅50m、二次元平面ひずみの挙動を呈するように奥行き方向を0.25mに設定した。解析モデル内の要素の最小寸法は、縦0.2m×横0.2m×奥行き0.25mの矩形格子モデルであり、解析領域内に格子状に並んでいる。矩形分割モデルについては、縦0.2m×横0.2mの格子状の要素に、それぞれ縦0.2m×横0.2m、縦1.0m×横1.0m、縦2.0m×横2.0mの硬岩礫を模した領域（表-1）を配置し、その領域の入力定数は表-2に示す中硬岩に対応する値とした（図-1（a））。

ボロノイ分割モデル（図-1（b））は、次の手順で作成した。

①領域内に乱数発生によりモデル内にボロノイ母点を配置する。

②ボロノイ母点の近接する点同士を結び、ドロネー三角形網を作成する。

③各ドロネー三角形の辺の垂直二等分線を描きつなげることで領域をボロノイ分割（平面が多角形で分割）する。

④砂質地山領域および硬岩礫領域をランダムで設定し、硬岩礫にあたる解析要素の入力定数を中硬岩の値（表-2）に変化させた。本研究ではボロノイ母点数を500点、600点、800点の3通りとした（図-1、表-1）。

図-1（a）の矩形分割モデルはモデル作成が簡便である一方で、礫の形状が実地盤に含まれる礫の様子とは相違している。それに対し、ボロノイ分割モデル（図-1（b））は分割時のランダム性や、巨礫の形状のような不規則性を持った多角形を容易に生成でき、より現実的な硬岩礫混じり地山を再現できることが分かった。

次に、硬岩礫の形状や含有率によって解析モデル全体の变形特性がどのように変化するかを知るために一軸圧縮数値解析モデルによる検討を行った（図-2）。本解析は、上述した高さ50m、幅50m、奥行き0.25mの平面ひずみモデルを作成し、モデル底部に境界条件を与えた後、自重解析を実施した。自重解析が収束後、モデル上部に等分布荷重を载荷した。そのときにモデル上部節点に生じる変位（沈下量）とモデル上部要素に生じる鉛直方向応力を用い、モデルの等価弾性係数を算出する。

図-3に、地山内の硬岩礫形状および含有率が変化したときの等価弾性係数の関係を示す。ここで、硬岩礫含有率とは、硬岩礫の面積をモデル断面積で除した値の百分率である。図から明らかなように、すべての硬岩礫形状において含有率の増大に伴い等価弾性係数が大きくなる

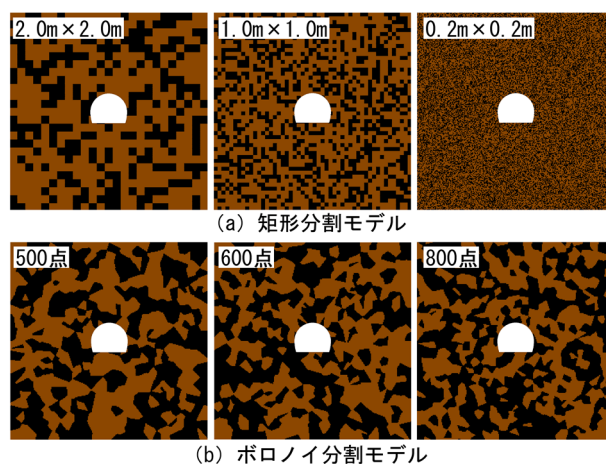


図-1 硬岩礫を模擬した数値解析モデル

表-1 硬岩礫の分割手法について

矩形分割モデル		ボロノイ分割モデル	
硬岩礫寸法	0.2m×0.2m 1.0m×1.0m 2.0m×2.0m	ボロノイ母点数	500点 600点 800点

表-2 地山入力定数

地質	単位体積重量 (kN/m ³)	弾性係数 E(MPa)	ポアソン比
砂質土	16	10	0.35
中硬岩	23	1000	0.30

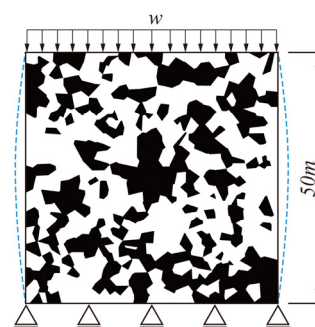


図-2 一軸圧縮数値解析モデル

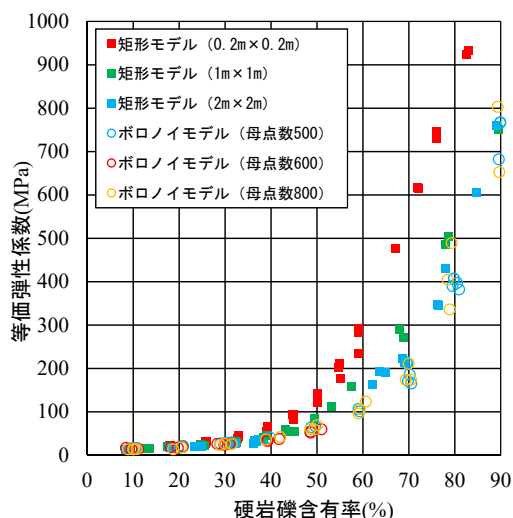


図-3 硬岩礫含有率が等価弾性係数に及ぶ影響

ことがわかる。また、矩形分割モデルとボロノイ分割モデルの硬岩礫含有率ごとの等価弾性係数を比較すると、硬岩礫含有率が約40%を超えると硬質岩同士が接触するため、等価弾性係数が大きくなり、矩形分割モデルの方が弾性係数のばらつきが大きくなることが分かった。つまり、矩形掘削モデルでは硬岩礫含有率40%を超えると、硬岩礫同士の接触による影響が現れていると判断できる。

図-3の結果から、ボロノイ分割モデルにおいても矩形分割モデルよりは微小であるが、硬岩礫含有率の増加に伴い等価弾性係数のばらつきが大きくなることわかる。そこで、図-4にボロノイ分割モデルの10%刻みの硬岩礫含有率ごとの平均弾性係数と標準偏差をもとにした誤差範囲をエラーバーの大きさとして合わせて示した。硬岩礫含有率が60%を超えると平均等価弾性係数にばらつきが生じ始めた。これは、硬岩礫含有率が60%を超えるとボロノイ分割モデルでも硬岩礫同士の接触が生じるため平均等価弾性係数がばらつく結果となったと考える。川崎ら⁷⁾は、実験で礫分含有率が40～60%の供試体では礫分含有率が礫岩物性に与える影響を小さいことを確認していることから、硬岩礫含有率60%以下の範囲では硬岩礫同士の接触が少なく、等価弾性係数のばらつきが小さいボロノイ分割モデルの方が硬岩礫混じり地山を適切に模擬できると考えられる。

3. 硬岩礫混じり地山でのトンネル掘削解析

前章では、硬岩礫混じり地山の力学特性について等価弾性係数を用いて論じた。本章ではこれらの地山にトンネルを掘削し、硬岩礫の形状・寸法・配置の違いがトンネルおよびトンネル周辺地山に及ぶ影響について調べる。

地山モデルは第2章でモデル化した矩形分割モデルおよびボロノイ分割モデル（図-1）を用い、トンネル天端部に250m分の土かぶりが働くように上載荷重を設定した後、初期応力解析および領域中央部に幅9.4m、高さ7.6mのトンネルを掘削した。まず一例として、2章における解析結果を踏まえ、①矩形分割モデル、ボロノイ分割モデルともに等価弾性係数に大きなばらつきが見られなかった硬岩礫含有率が40%以下の解析結果、②矩形分割モデルでは等価弾性係数にばらつきがみられた40～60%の解析結果、③両モデルの等価弾性係数にばらつきが見られた60%以上の解析結果を示す。

硬岩礫含有率が40%以下のケースとして、硬岩礫含有率10%程度の地山にトンネルが掘削されたときの影響について言及する。トンネル未掘削地山では両モデルとも砂質地山の物性に依存した等価弾性係数が得られる程度の硬岩礫含有率の領域である。図-5の矩形分割モデルおよびボロノイ分割モデルの硬岩礫配置を比較すると、矩

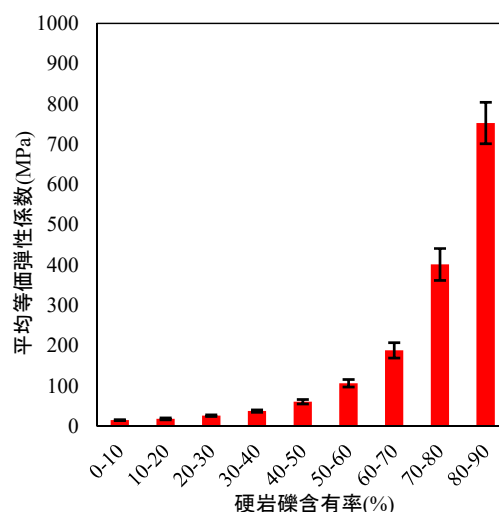


図-4 平均等価弾性係数のばらつき

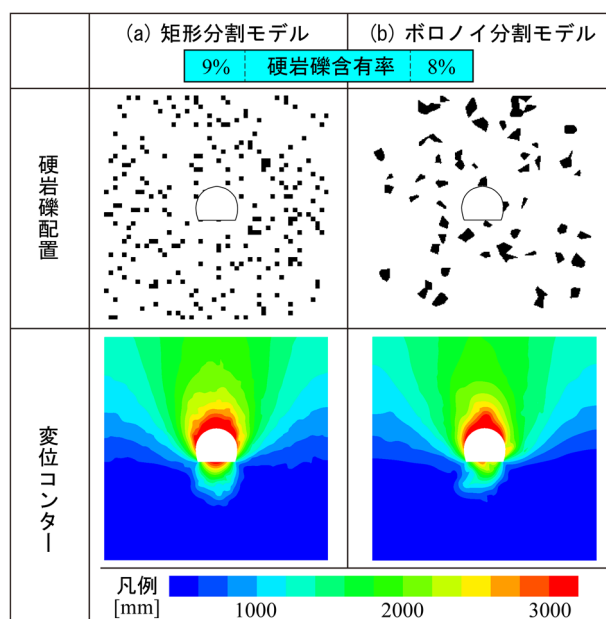


図-5 トンネル周辺地山の変位コンター
硬岩礫含有率約 10%

形分割モデルにおける硬岩礫要素よりボロノイ分割モデルにおける要素の方がよりトンネル掘削現場でみられる巨礫⁸⁾を含んだ地山に似た形状であることがわかる。トンネルが掘削された後の変位コンターに着目すると、トンネル近傍は硬岩礫の配置の違いによって両モデルの変位傾向が異なるが、地表面付近の地山変位には大きな違いはみられない。また、両モデルとも硬岩礫同士の接触の影響はみられなかった。

次に、硬岩礫含有率が40～60%の解析ケースの一例として硬岩礫含有率約50%の硬岩礫配置と、その地山にトンネルを掘削した時の変位コンターを図-6に示す。この範囲の硬岩礫含有率は、川崎ら⁷⁾が礫分含有率が礫岩物性に与える影響を小さいことを確認しているが、2章の矩形掘削モデル、トンネル未掘削地山では硬岩礫同士の

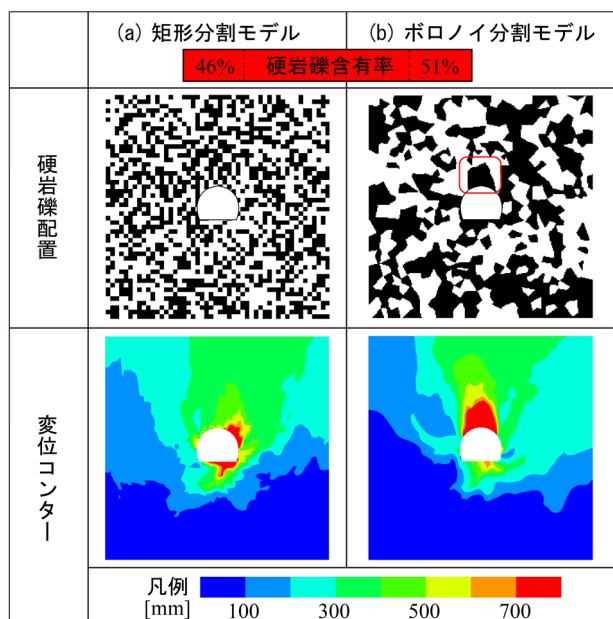


図-6 トンネル周辺地山の変位コンター
硬岩礫含有率約 50%

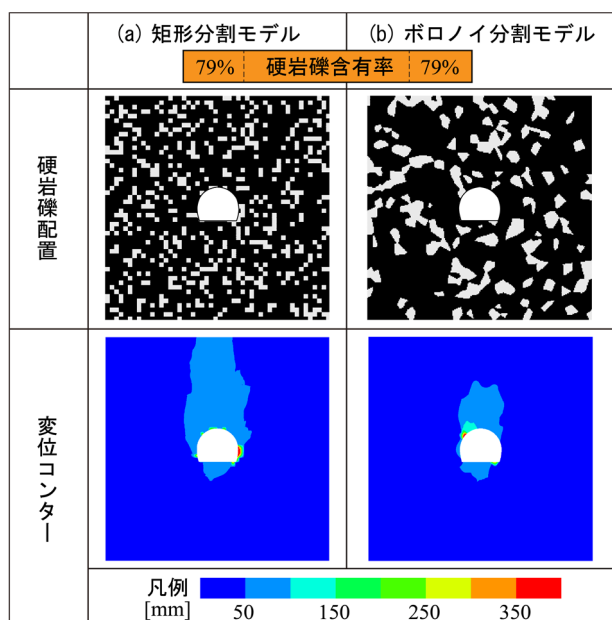


図-7 トンネル周辺地山の変位コンター
硬岩礫含有率約 60%以上

接触による影響が示唆された。

硬岩礫配置に着目すると、2つのモデルの硬岩礫含有率はほぼ同様であるが、硬岩礫の配置が大きく異なる。矩形分割モデルでは解析領域内にほぼ均等に硬岩礫が配置されている一方で、ボロノイ分割モデルではその配置状況により天端上部に抜落ち・崩落が想定できる大規模な硬岩礫（赤枠内）が見られた。

変位コンターに着目すると、最大変位領域を示す赤色の面積は、矩形分割モデルの方が小さくなった。矩形分割モデルは硬岩礫同士の接触の影響によって硬岩礫の押出しを表現できず、変位が小さく算出されたものと考え

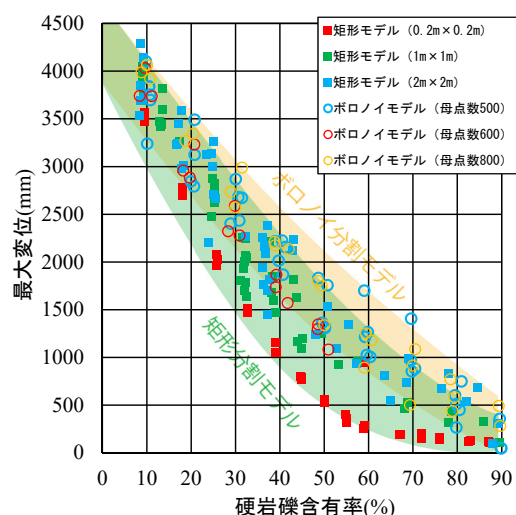


図-8 トンネルに生じる最大変位

る一方で、ボロノイ分割モデルでは、天端部の硬岩礫の押出しが見られた。硬岩礫混じり地山にトンネルを掘削すると、硬岩礫の押出しや、それに伴う砂質地山の崩壊が報告されている事例もあることから、本解析で用いた矩形掘削モデルは、硬岩礫混じり地山におけるトンネル掘削を模擬できているとは言えないが、ボロノイ分割モデルは硬岩礫混じり地山におけるシミュレーションを行う場合、有益なモデル作成手法であると言える。

次に、図-5、図-6よりもさらに硬岩礫含有率が増大した硬岩礫含有率約80%の地山についても述べる（図-7）。2章では、矩形分割モデル、ボロノイ分割どちらも硬岩礫同士の接触による影響が見られた硬岩礫含有率の範疇である。トンネル掘削後の変位コンターに着目すると、どちらのモデルとも硬岩礫が押出されるような変位は抑制されていることがわかった。

これらより、硬岩礫含有率が40～60%の結果を示した図-6では両モデルのトンネル周辺に生じる変位に大きな差異が見られたが、その他の硬岩礫含有率においては大きな差は認められなかった。そこで、さらに詳細結果を分析するために、硬岩礫の形状・配置・含有率の違いがトンネル変位に及ぶ影響をすべての解析ケースにて検討した。図-8に、それぞれのモデルの硬岩礫含有率と最大変位の関係を示す。この図からわかるように、硬岩礫含有率が増大するとトンネルに生じる最大変位は抑制される傾向が見られる。また、図中、矩形分割モデルとボロノイ分割モデルのプロットが分布している着色領域の違いに着目すると、それぞれの硬岩礫含有率ごとのトンネルに生じる最大変位は、矩形分割モデルの方が若干小さくなることがわかる。これらより、矩形分割モデルは硬岩礫含有率の多少にかかわらず硬岩礫の配置によっては、硬岩礫同士の接触による影響が見られることがわかる。矩形掘削モデルは硬岩礫同士の結合が実地山ではみられ

表-3 等価数値解析入力値

施工パターン	弾性係数 E(MPa)	ポアソン比	備考
D II	150	0.30	硬岩礫含有率 40～60% 程度の 等価弾性係数
E	80	0.30	

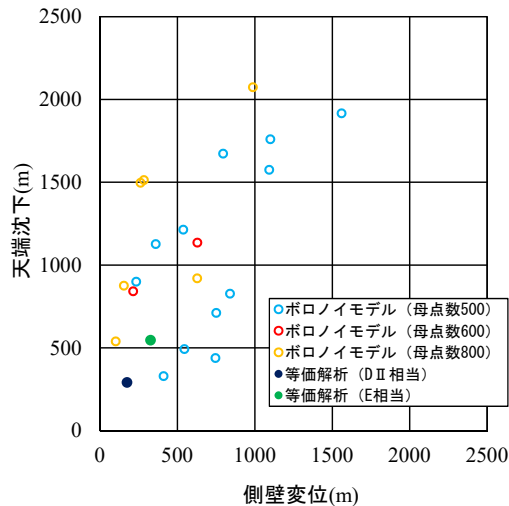


図-9 挙動予測手法の違いにおけるトンネル変位

ないような棒状や凹状，凸状形状になることもあり，トンネル周辺の地山変位を拘束しているため，生じる変位が小さくなったと考える。

4. 硬岩礫混じり地山でのトンネル挙動予測手法の一提案

ここまでで，矩形分割モデルに対しボロノイ分割モデルは硬岩礫同士の接触が少なく，硬岩礫の押出し挙動を再現出来ていることが分かった。しかしながら，硬岩礫による施工上のリスクが想定される地山において，硬岩礫の形状・位置を事前に調査し，硬岩礫を考慮した数値解析によるトンネル掘削シミュレーションを実施することが硬岩礫混じり地山でのトンネル施工上のリスクを低減できる手法であるか否かが不明確であるため，本章で検討する。ここでは，一例として硬岩礫含有率40～60%を対象とした検討結果を示す。

まず比較のために，硬岩礫を考慮しない簡便な手法として硬岩礫混じり地山を等価の弾性係数に置換えてトンネル掘削を行う。図-4より硬岩礫含有率40～60%の地山は平均等価弾性係数が約200MPa以下であることがわかるが，文献によるとこのような弾性係数の地山は，高速道路トンネルの施工パターン「D II」および「E」に該当する⁸⁾と示されているため，対応する入力値（表-3）を与えたトンネル掘削解析を実施した。図-9は，表-3の物性値を与えた場合と，ボロノイ分割モデルによって硬

岩礫を模擬した場合におけるトンネル掘削時の天端沈下と側壁変位の関係を示した図である。ちなみに両モデルの寸法，境界条件，トンネルの掘削手法等は3章と同様とし，ここでの天端沈下は天端部の鉛直変位，側壁変位はトンネルSLより約1m上部の左右側壁変位を平均した値とした。結果に着目すると，施工パターンD IIおよびEに対応した等価弾性係数を有する地山にトンネルを掘削した時に生じる変位よりも，ボロノイ分割によって硬岩礫を再現したモデルの方が，側壁変位・天端沈下ともに大きくなるケースが多く見られた。つまり，硬岩礫混じり地山を等価の地山強度に置換えた手法の結果は，トンネルに生じる挙動を再現出来ず，実現場で生じる硬岩礫の押出し挙動を過小評価する危険性を暗示していると言える。硬岩礫混じり地山において，施工が難渋することが予測される場合は，硬岩礫の形状・位置を事前に調査把握し，ボロノイ分割モデルなどの硬岩礫形状を模擬できる手法を用い，トンネル掘削シミュレーションを実施することが重要であると提案する。

5. まとめ

本研究では，硬岩礫の形状・寸法，含有率，配置の違いを考慮し，トンネル掘削前からトンネル掘削後までの地山力学挙動を有限差分法三次元数値解析コードFLAC3Dで解明し，硬岩礫混じり地山での挙動予測手法の提案を行った。

まず，トンネルが掘削される前の硬岩礫混じり地山をモデル化し，一軸圧縮数値解析を行ったところ，硬岩礫含有率40%以下の場合は硬岩礫周辺の砂質地山の物性に依存した地山弾性係数を有する一方で，40%を超えると矩形分割モデル，60%を超えるとボロノイ分割モデルで硬岩礫同士が接触し，地山の等価弾性係数がばらつく傾向が見られた。

硬岩礫混じり地山を模擬した地山にトンネルを掘削したところ，次のことが分かった。まず，硬岩礫含有率の大小にかかわらず，矩形分割モデルは硬岩礫の配置によってトンネルに生じる変位を拘束することがわかった。特に，実験⁹⁾より示されている礫分含有率が礫岩物性に及ぼす影響が小さい硬岩礫含有率60%以下においても矩形分割モデルはトンネル変位の抑制がみられたため，矩形分割モデルは硬岩礫混じり地山におけるトンネル掘削を適当に模擬できているとはいいたい。一方で，ボロノイ分割モデルは，硬岩礫含有率60%以下では矩形掘削モデルと比べ硬岩礫同士の接触による影響が抑えられていた。

また，地山全体を等価の弾性係数に置き換える手法でも硬岩礫の押出し等の挙動を再現出来ず，硬岩礫の抜け

落ちを過小評価する危険性があるが、ボロノイ分割によるモデルは硬岩礫混じり地山での巨礫の押し挙動を数値解析で再現することが出来る。硬岩礫の形状・位置を事前に調査・把握し、ボロノイ分割モデルによって硬岩礫をモデル化したトンネル掘削シミュレーションを実施することは硬岩礫混じり地山での地山挙動把握の一手法となり得ることが分かった。

参考文献

- 1) 関根和一，角丸義浩，小野寺正：巨礫混じり崖錐層のトンネル施工と計測管理について，土木学会第47回年次学術講演会，VI-120，pp.262-263，1992.
- 2) 雨宮弘行，宮川祐治，河上英二，井脇康人：巨大な転石・玉石混じり層をトレヴィチューブ工法で施工，トンネルと地下，Vol.27，No.8，pp.15-20，1996.
- 3) 酒井大輔，進士正人，森本真吾：巨礫混じり地山におけるトンネル掘削時の問題点とその解決法に関する研究，NPO法人臨床トンネル工学研究所報告書，2016.
- 4) 岡田哲実，野崎隆司，伊藤洋，中村敏明：礫岩の物性評価に関する研究-礫と基質の境界面のせん断強度に着目した強度評価-，電力中央研究所報告，U00024，2000.
- 5) 永井哲夫，池尻健，小谷野康之：転石・玉石混じり層での土被りの小さいトンネル掘削における地山物性値の評価法，トンネル工学研究論文・報告集，第8巻，pp.113-116，1998.
- 6) 岩本義隆，河南幸治，木梨秀雄，伊藤哲，中島純也：玉石混じり土石流堆積物でのトンネルの施工，土木学会第68回年次学術講演会，VI-391，pp.781-782，2013.
- 7) 川崎了，中川加明一郎，江藤芳武，野崎明人，小泉和広：方解石含有率に着目した大深度堆積礫岩の物性に関する検討，応用地質，第38巻，第5号，pp.252-264，1997.
- 8) 土木学会トンネル工学委員会：トンネルライブラリ 16 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務，pp.152-159，2006.

(2018.8.10 受付)

A PROPOSAL OF PREDICTION METHOD OF TUNNEL DISPLACEMENT IN GRAVELLY ROCK

Hisashi HAYASHI, Daisuke SAKAI, Shingo MORIMOTO and Masato SHINJI

In the tunnel excavation of gravelly rock, the behavior of the ground is unclear. Therefore, engineers think that tunnel design and construction with gravelly rock is difficult. In this research, we will elucidate the tunnel behavior in gravelly rock and propose a method of forecasting the behavior of the ground. Finite difference method Numerical analysis code FLAC 3D was used. Numerical analysis before tunnel excavation revealed that hard rocky gravel content is more than 40% in the rectangular division model and more than 60% in the Voronoi division model, it is found that the hard rock gravels are in contact with each other. Furthermore, when excavating a tunnel to gravelly rock, it was found that gravel behavior can be reproduced by modeling gravel by the Voronoi division method.