

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

ESTIMATION OF THE DEFORMATION PARAMETERS FOR SHALLOW TUNNEL IN LOOSE AND COARSE SOILS

永井哲夫¹⁾・池尻 健²⁾・小谷野康之²⁾

Tetsuo NAGAI, Takeshi IKEJIRI and Yasuyuki KOYANO

In the case of shallow tunnel excavation in loose and coarse soils where boulders are present, it is impossible for engineers to gain the deformation parameters of such natural ground from in-site or laboratory tests. Therefore, it is extremely difficult to make an accurate prediction of the deformational behaviour of surrounding ground during excavation. In this paper, the authors model the modulus of elasticity of a hard soil using composite material theory which define as a two-phase material with gravel particles embedded in a sand matrix, and propose a new method in order to estimate the deformation parameters of such natural ground.

Key Words : loose and coarse soils, shallow tunnel, apparent modulus of elasticity, bond strength, composite material theory

1. はじめに

都市域などにおいて、土被りが小さいトンネルを掘削する際、地表面沈下が問題となることがある。そのような場合、トンネル周辺地山の挙動が重要な判断要素となり、設計および施工管理において有限要素法などの解析的手法がよく用いられる。有限要素法によるトンネルの掘削解析は、土被りが大きいものに関してかなりの実績が蓄積されており、地山挙動をある程度は表現できる。ところが、土被りが小さいものに関しては、掘削時の地山挙動を十分に表現できるとは言い難い。それに対して、著者らは、砂質地山を対象に、土被りが小さいトンネルの掘削時挙動を非線形有限要素解析により評価する方法を提案している¹⁾。地山の自重が掘削および地山のモデル化に及ぼす影響を考慮している点に特徴がある。

いま、転石や玉石混じり層からなる地山を対象として、土被りが小さいトンネルを掘削する場合、事前の調査や試験により地山物性値を適切に評価することが非常に難しい。そのため、有限要素法などの解析的手法により、地表面沈下などのトンネル周辺地山の挙動を的確に予測することが困難である。そこで本研究では、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、実務への適用を通してその妥当性を検証する。ここでは、硬質な転石・玉石混じりのルーズな砂礫層を、転石や玉石などの硬質な分散材と土よりなる軟質なマトリックスの2相複合材料として捉え、見かけの変形特性を間接的に評価している。付着状態を表すパラメータを用いている点に特徴がある。

1) 正会員 博士(学術) (株)青木建設 研究所 土木研究室

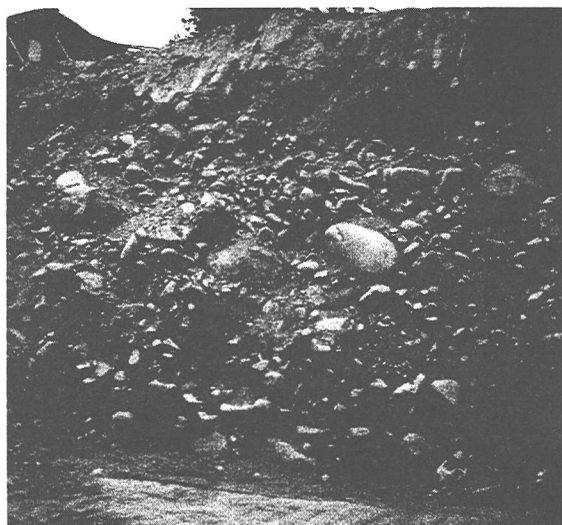
2) 正会員 (株)青木建設 研究所 土木研究室

2. 対象とする地盤

本研究では、写真－1に示すような転石・玉石混じり層からなる地山²⁾を対象として、見かけの変形特性の評価方法について検討する。

地山が硬質な転石・玉石混じりのルーズな砂礫層からなる場合、とくに寸法の大きな転石や玉石が多く混入していると、それらを含んだ形で乱さない試料をサンプリングすることは不可能である。1mを越える転石や玉石が存在する場合には、大口径の凍結サンプリングも無効である。また、このような地盤において、孔内水平載荷試験などのサウンディングにより求められる地山の変形特性は、試験箇所での局所的な影響を受けやすい。

以上のように、巨大な転石・玉石混じりのルーズな層からなる地盤に関して、事前調査や試験の結果から、見かけの変形特性を適切に評価できる方法が現状ではない。

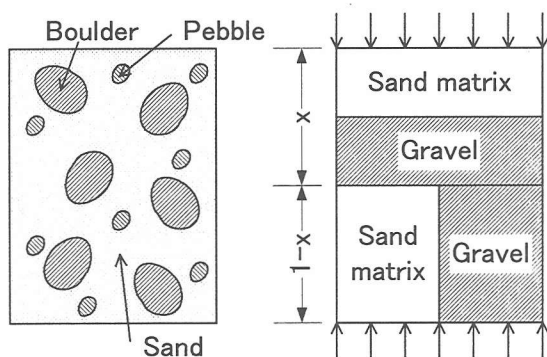


写真－1 本研究で対象とする地盤

3. 複合材料理論を用いたモデル化

(1) 定式化

前述のように、転石・玉石混じり層からなる地山の場合、見かけの変形特性を試験により直接求めることは非常に困難である。そこで本研究では、複合材料理論により見かけの変形特性を間接的に評価する。具体的には、まず、写真－1に示すような地盤を図－1のようにモデル化する。つまり、硬質な転石・玉石混じりのルーズな砂礫層を、転石や玉石などの硬質な分散材と土よりなる軟質なマトリックスの2相複合材料として捉える。そうすると、この材料の見かけの変形特性は式(1)のように表すことができる³⁾。



図－1 複合材料としてのモデル化

$$\frac{1}{E_h} = x \left(\frac{1}{E_g V_g + E_s V_s} \right) + (1-x) \left(\frac{V_g}{E_g} + \frac{V_s}{E_s} \right) \quad (1)$$

ここで、 E_h = 転石・玉石混じり層からなる地山の見かけの弾性係数

E_g および E_s = 転石・玉石（分散材）および土・堆積物（マトリックス）の弾性係数

V_g および V_s = 転石・玉石および土・堆積物の体積含有率（ $V_g + V_s = 1.0$ ）

x = 転石・玉石および土・堆積物間の付着状態を表すパラメータ

（ $x = 0$ の場合：付着なし⇒応力一定モデル、 $x = 1$ の場合：完全付着⇒ひずみ一定モデル）

(2)本提案式に関する考察

前節で示した提案式（式(1)参照）では、2相複合材料を構成する材料間の境界部分の付着特性に着目している。この点が、一般の複合材料理論による定式化と異なっている。そこで本節では、この付着特性を表すパラメータ x について考察する。普通コンクリートの場合、骨材を分散材、セメントペーストをマトリックスとする2相複合材料として捉えると、付着状態を表すパラメータ x は約0.5となることが分かっている³⁾。

ここでは、混合土および不均質性岩盤を対象として行われた実験的研究^{4)・5)}の結果を取り上げて考察する。前者は、炭化タングステンとコバルトよりなる混合体を用いた実験⁴⁾に関するものであり、分散材とマトリックスの弾性係数比は約3であった。後者は、石膏および粘土より作製した軟質材をマトリックスとし、セメントおよび砂より作製した硬質材を分散材とした不均質性岩質材料を用いた実験⁵⁾に関するものである。分散材とマトリックスの弾性係数比は約55であった。これらの実験では、分散材およびマトリックスの弾性係数および体積含有率が既知であり、それに対する複合材料の見かけの弾性係数が求められている。そこで、式(1)よりパラメータ x を逆算して求めることができる。その結果をまとめると図-2が得られる。この図より、分散材の体積含有率が増加するにつれて、付着状態を表すパラメータ x は増加する傾向にある。また、パラメータ x が分散材とマトリックスの弾性係数比によりほとんど影響を受けず、その値はほぼ0.3~0.6の間に分布していることが分かる。ただし、データが少ないため、十分な結論は導けない。このパラメータ x については、今後さらに検討が必要であると考えられる。

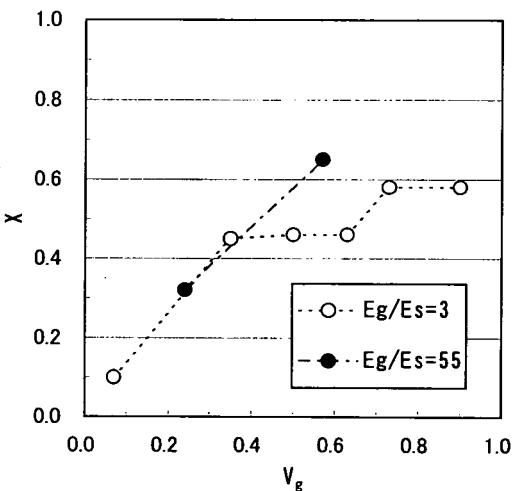


図-2 パラメータ x に関する検討結果

4. 妥当性の検証

本章では、転石・玉石混じり層からなる地盤を対象に提案した式(1)について、実地盤の物性値評価への適用を通して妥当性を検証する。ここでは、硬質な転石・玉石混じりのルーズな砂礫層におけるトンネル掘削工事のデータ²⁾を用いる。

(1)地質概要

対象地点の地質は、第三紀の泥流や火砕流堆積物などの土流堆積物上に分布する更新世の段丘堆積物を主体とし、安山岩・花崗閃緑岩よりなる硬質な転石・玉石混じりのルーズな砂礫層である。巨大な転石・玉石の混入率が高く、多いところでは60%以上と推定される地山であった。また、1mを越えるような大きさの転石や玉石も見られた。

各地層の土質定数は、ボーリングコアから判断される土質の状態や標準貫入試験、孔内水平載荷試験、現場透水試験などの原位置試験および室内での土質試験の結果を総合的に評価して求められた（表-1参照）。

表-1 各地層の土質定数

Type of Ground	C (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)
T1gu	30	25	28
T1gm	20	35	55
T1gL	30	40	260
T2g	10	40	75

なお、表－１において、各地層の記号に対応する土質・岩質はそれぞれ次のようである。

- ・ T1gu : 礫混じり粘土～粘土混じり砂礫
- ・ T1gm : やや凝固した転石・玉石混じりの砂礫
- ・ T1gL : やや固結した転石・玉石混じりの砂礫
- ・ T2g : 砂・砂礫、転石・玉石

(2)適用結果および考察

本節では、提案式を用いて地層ごとの見かけの弾性係数を求め、前述の土質定数（表－１ 参照）と比較する。その結果をもとに、提案式の妥当性を検証している。

いま、提案式に必要なパラメータの入力値を表－２に示すように設定した。ここでは、マトリックス部分からサンプリングした試料による土質試験結果、露頭調査などによる地盤の観察結果、岩種に対応した過去の物性値データベースなどからこれらの値を選定している。なお、付着状態を表すパラメータ x については、前章での考察結果や地盤の観察結果などを総合的に評価して決めた。そこで、表－２の値を式(1)に代入して対象とする地層の見かけの弾性係数を求め、表－１に示した土質定数と対比してまとめると図－３が得られる。この図から、提案式によると、転石・玉石混じり層からなる地盤を対象として、設計に必要な土質定数（ここでは、見かけの変形特性）を精度よく予測できることが分かる。

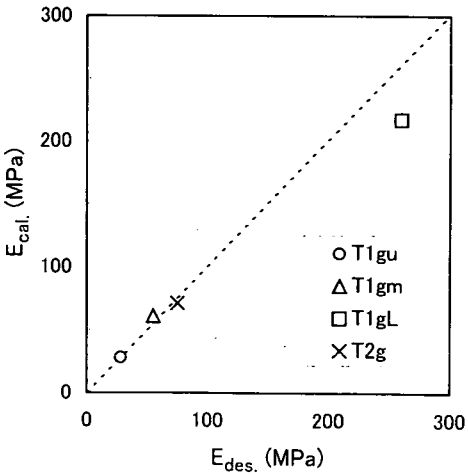
さらに、本提案式から求めた見かけの弾性係数と土被りが小さいトンネルを対象に著者らが提案した非線形有限要素解析法¹⁾を用いて、当トンネルの地表面沈下量を予測し、良好な結果を得ることができた⁶⁾。

【参考文献】

- 1) 永井哲夫・張 玉軍・小谷野康之：有限要素法によるトンネル掘削解析における掘削および地山のモデル化について、トンネル工学研究論文・報告集第7巻，pp.99-104，1997。
- 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ビチューブ工法で施工－国道140号 窪平トンネル，トンネルと地下，pp.15-20，1996。
- 3) Hirsch, T.J.: Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate, *Journal of American Concrete Institute*, Vol.59, No.3, pp.427-452, 1962.
- 4) 大嶺 聖・落合英俊：二種混合体の応力－ひずみ関係と混合土の一次元圧縮特性への適用，土木学会論文集，No.448 / III-19, pp.121-130，1992。
- 5) 櫻井春輔・土原久哉・土田 晃：不均質性岩質材料の限界ひずみに関する実験的研究，第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.216-220，1990。
- 6) Amamiya, H., Miyagawa, Y., Kawakami, E., Nagai, T. and Sakurai, S.: Field measurements and numerical assessment of deformations induced by tunnel excavation in loose and coarse soils, *Proc.2nd Int. Sympo. on Hard Soils and Soft Rocks*, Napoli, Italy, 1998.

表－２ 解析入力値

Type of Ground	E_g (GPa)	E_s (MPa)	V_g	x
T1gu	10	20	0.1	0.3
T1gm	10	30	0.3	0.3
T1gL	10	40	0.7	0.4
T2g	10	30	0.4	0.3



図－３ 土質定数と提案式による計算結果