

文章编号: 1000-7598 (2011) 12-3642-05

卵石土等效弹性模量理论预测模型初探

马 辉¹, 高明忠², 张建康³, 余其福⁴

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065;
3. 成都市第七建筑工程公司, 成都 610051; 4. 四川兴达建设工程监理有限责任公司, 成都 610031)

摘 要: 卵石土是由卵石和土组成的、处于土和岩体之间的天然地质体, 但其宏观力学特性完全不同于土和岩体。通过对成都地铁 1 号线隧道掘进机 (TBM) 施工现场调查可知, 卵石地层可导致 TBM 刀具过量磨损、刀盘堵塞等非正常损坏, 极大地影响了 TBM 施工效率, 是 TBM 掘进极其不利的一种典型混合工作面。主要研究卵石土变形性能, 建立在均匀应变基础上, 假设卵石为理想圆形或椭圆形, 从理论上得到卵石土等效弹性模量的解析预测公式。并通过数值试验验证了理论预测模型的有效性。结果表明, 此模型预测结果与试验数据比较接近, 可用来初步判断卵石地层等效弹性模量, 有助于理解并提高该地层中的 TBM 掘进效率。

关 键 词: 隧道掘进机; 混合面; 卵石土; 等效弹性模量

中图分类号: U 25

文献标识码: A

Theoretical model developed for equivalent elastic modulus estimation of cobblestone-soil matrix

MA Hui¹, GAO Ming-zhong², ZHANG Jian-kang³, YU Qi-fu⁴

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. The Seventh Chengdu Construction Engineering Co., Chengdu 610051, China; 4. Sichuan Xingda Construction Supervising Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Cobblestone-soil is a natural geological situation consisting of cobblestones surrounded by soils. The mechanical performance of cobblestone-soil is between soil and rock mass and significant different from any component. Through the investigation in Chengdu Metro Line 1, the geological situation can result in a few non-normal damages (such as cutter wear, jam of roller cutterhead) and affects heavily the TBM performance. It is a typical mixed-face ground, which has an adverse influence on TBM tunnelling. This paper is intended to address the deformation problem of cobblestone-soil. Based on strain uniform assumption, analytic solutions were derived from the theoretical approach for equivalent elastic modulus while the cobblestone is assumed perfect circle and ellipse. The analytic solutions were validated by numerical modelling method. The results indicate that the equivalent elastic modulus derived from theoretical model and numerical is rather closely. The analytic solutions are helpful for improving the understanding of deformation for such ground condition and further to enhance TBM's performance.

Key words: tunnel boring machine (TBM); mixed-face ground; cobblestone-soil matrix; equivalent elastic modulus

1 引 言

卵石土混合地质材料, 是指仅由卵石和土组成。由于其力学分析的复杂性、不稳定性, 对于这种特殊的自然地质体, 目前国内外还没有发现系统的研究资料。卵石土在我国以至全球都有广泛的分布, 尤其在地下空间技术高速发展的今天, 极大地影响

着工程施工及基础设施建设^[1-2]。随着地下空间技术的发展, 隧道应用越来越广泛。在隧道施工中, 隧道掘进机 (TBM) 被当作经济高速开挖方法和有效支护工具^[3-4]。目前 TBM 可在不同地质条件下工作, 且取得了另人瞩目的成就。与此同时, 地质条件也极大地影响着 TBM 工作效率^[5]。

大量工程实践及相关研究已证实, 软硬相间的

收稿日期: 2010-05-27

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作研究项目 (No. 50620130440)。

第一作者简介: 马辉, 男, 1971 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程特殊地质方面的研究与应用。E-mail: mhuicd@126.com

通讯作者: 高明忠, 男, 1980 年生, 博士, 讲师, 主要从事 TBM 方面的研究与应用。E-mail: gaomingzhong@163.com

混合地层是 TBM 面临较大的难题。而卵石土地层正是一种典型的此类混合工作面, 已成为 TBM 施工中众所周知的突出问题^[6], 它可以导致刀具过量磨损、刀盘堵塞等非正常损坏^[7]。

图 1 为成都地铁 1 号线典型砂卵石地层的岩芯, 经笔者沿线的不完全统计, 卵石成分大都为花岗岩、闪长岩和石英岩, 基质为砂土。卵石直径几乎位于 10~80 mm 之间, 也随机分布有少量特大漂石, 统计中最大直径为 512 mm 的卵石。卵石尺寸近似服从截尾正态分布, 平均值为 38.23 mm, 接近椭圆形, 扁平度约为 1.5。在 1 号线 4 个标段的 TBM 施工中, 均遇到不同的问题, 最为常见的有刀具损坏、过量磨损、地表沉降, 导致长时间停工, 总体掘进速度低下。此类问题的发生, 在一定程度上是由于缺乏对卵石土地层力学性能的认识所致。

无论在硬岩或软弱地层, 都有大量关于 TBM 机器设计、TBM 性能预测及相关措施的研究成果。对 TBM 在卵石土地层的研究, 大部分文献集中在前期的研究上, 如分析存在的问题、被动提出一些对 TBM 机器的改进措施等, 但并没有从力学机制去解释相关现象^[8]。本文着力于卵石土混合材料的变形特性研究, 主要从理论上探讨卵石土等效弹性模量的相关规律。



图 1 成都地铁 1 号线卵石地层

Fig.1 Ground condition of Chengdu Metro Line No. 1

2 理论模型现状

Einstein^[9]于 1906 年开始研究混合材料等效物理属性, 随后不少学者建立在不同假设条件下提出了大量力学属性理论预测模型。然而分析和预测混合材料的宏观力学行为通常是比较困难的, 当几种简单材料一经混合后, 各组分间或多或少会有相互作用(这里仅指物理上的纯力学作用), 并在材料接触面上形成不同于任何组成材料的过渡区域^[10-11]。混合材料整体力学行为或宏观力学属性并不等同于任

一组分材料, 而是由各组分共同形成、共同发挥不同作用的复杂系统。

对于仅由两种材料组成的混合材料(MMTC), 具有代表性且最为常用的理论模型有并联模型和串联模型^[12], 该类模型对 MMTC 的很多物理属性提供了上下限边界^[13]。同时也是最简单、最直观的一种理论模型, 常常被应用来验证其他模型的有效性。

2.1 并联模型

对于 MMTC, 令 E 和 f 分别代表宏观等效弹性模量和卵石体积百分含量。下标 1 和 2 分别指基质土和卵石。很明显, 在任何情况下必须满足式(1)、(2),

$$E = E_1, f = 0 \quad (1)$$

$$E = E_2, f = 1 \quad (2)$$

假设各材料强度对 MMTC 变形性能所做贡献与其各自的百分含量成正比, 则满足以上两基本条件的最简单线性关系为

$$E = E_1(1-f) + E_2f \quad (3)$$

式(3)即为并联模型。若假设忽略泊松比影响, 则式(3)提供了弹性模量 E 的上限边界。

2.2 串联模型

同理, 显然 $1/E$ 也满足式(1)、(2), 则另一个简单的线性关系为

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_1}(1-f) + \frac{1}{E_2}f \quad (4)$$

式(4)由 MacDonald 和 Ransley^[14]首先提出, 通常叫做串联模型, 提供了下限边界。

由于以上并联、串联模型均为极端条件下的理论解, 即为混合材料宏观上力学属性的上下限边界, 因此, 很难应用于工程上预测 MMTC 的等效弹性模量。

3 新理论模型推导

等效弹性模量是 MMTC 中一个最为重要的整体变形性能参数。这里假设 MMTC 为宏观各向同性、均匀的混合材料, 即任何代表性体积单元和非均质体积单元尺寸相比足够大, 但与 MMTC 整体相比则足够小^[15]。所谓代表性体积单元(RVE), 可看作为统计均质材料的代表体积边界, 则 RVE 中应力、应变、位移及各组分百分含量平均值和 MMTC 中对应量的平均值相同^[9]。图 2 为 MMTC 中单位长度为 1 的 RVE 立方体单元^[16]。

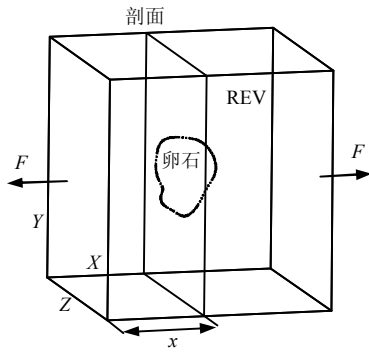


图2 MMTC中任一REV

Fig.2 Any REV in MMTC

如图2所示,建立坐标系,令 X 方向两拉力 F 作用于RVE两端面,距原点距离为 x 的任一横截面交基质土、卵石分别为 A_1 、 A_2 ,这里 A_2 可以是任意形状(见图3)。令 ε 为法向应变,由于应变均匀性假设则在 A_1 、 A_2 面上的法向应力可以表示为 $E_1\varepsilon$ 和 $E_2\varepsilon$,在此横截面上总拉力 F 为^[16]

$$F = E_1\varepsilon A_1 + E_2\varepsilon A_2 = \varepsilon [E_1 + (E_2 - E_1)A_2] \quad (5)$$

总伸长 δ 为

$$\delta = \int_0^1 \varepsilon(x) dx = F \int_0^1 \frac{dx}{E_1 + (E_2 - E_1)A_2} \quad (6)$$

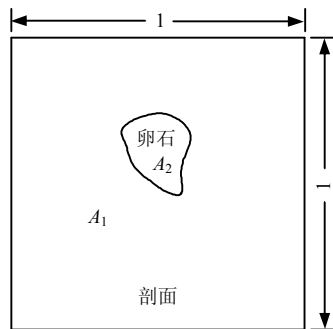


图3 RVE中任一剖面

Fig.3 Any section in RVE

若以 S 代表拉力作用面积, l 代表REV长度,则RVE宏观等效弹性模量 E 可表示为

$$\frac{1}{E} = \frac{\delta/l}{F/S} = \frac{\delta/l}{F/(1 \times 1)} = \frac{\delta}{F} = \int_0^1 \frac{dx}{E_1 + (E_2 - E_1)A_2(x)} \quad (7)$$

以上推理过程在二维时仍然适用,式(7)中, A_2 的面积为 x 的函数,只要求出 $A_2(x)$ 面积表达式,即可计算等效弹性模量。在二维计算中,交面 A_2 退化为线段,式(7)中 A_2 面积以线段长度代替(即

图4中 mm' 的长度)。

令二维RVE中包含一理想椭圆(见图4),且中心与坐标原点重合。长轴平行于 X 轴,以下为椭圆几何参数及椭圆基本方程:

$$f = \pi ab \quad (8)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (9)$$

式中: a 为椭圆主轴(长轴); b 为椭圆短轴; f 为RVE中椭圆球体积百分含量。

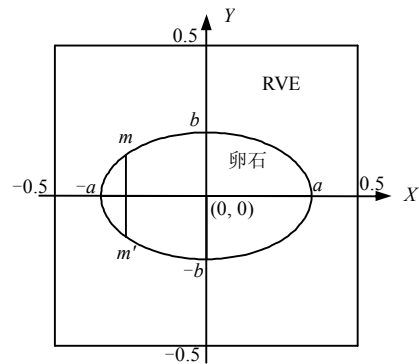


图4 椭圆模型

Fig.4 Ellipse model

在二维时 a 与 b 的比值叫做椭圆的扁平度, A_2 面积转化为图4中线段 mm' 的长度,根据式(9)可得

$$L(x) = |mm'| = 2|y| = 2b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(7)得

$$\begin{aligned} \frac{1}{E} &= \int_{-0.5}^{0.5} \frac{dx}{E_1 + (E_2 - E_1)L(x)} = \int_{-0.5}^{-a} \frac{dx}{E_1 + (E_2 - E_1) \times 0} + \\ &\int_{-a}^a \frac{dx}{E_1 + (E_2 - E_1)2b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} + \\ &\int_a^{0.5} \frac{dx}{E_1 + (E_2 - E_1) \times 0} = \\ &\frac{ma}{E_1} \left[\pi + \frac{m \ln \frac{1 - \sqrt{1 - m^2}}{1 + \sqrt{1 - m^2}}}{\sqrt{1 - m^2}} \right] + \frac{1 - 2a}{E_1} \quad (|m| < 1) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $m = \frac{E_1}{2b(E_2 - E_1)}$ 。

式(11)便是椭圆长轴水平放置(长轴平行于荷载方向)时,卵石土混合材料等效弹性模量的计

算公式。由于力学作用机制不同,当椭圆长轴平行或垂直于荷载方向放置时,宏观力学特性将有较大差别。事实上通过数值分析得出 MMTC 等效弹性模量随椭圆长轴与荷载方向夹角的增大而减小。当椭圆长轴垂直于 X 轴放置时,预测公式可通过将式 (11) 中 a 与 b 位置互换而得。

特别地当椭圆扁平度为 1 时,椭圆将变为圆形,此时公式简化为

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2(E_2 - E_1)} \left(\pi + \frac{2m \ln[(1 - \sqrt{1 - m^2})/m]}{\sqrt{1 - m^2}} \right) + \frac{1 - 2r}{E_1} \quad (|m| < 1) \quad (12)$$

式中: $m = \frac{E_1}{2r(E_2 - E_1)}$; r 为圆半径。

4 理论模型与数值试验结果对比

虽然采取特殊措施可以通过试验手段获得混合材料等效物理属性,但由于一些理论公式假设(如卵石形状、空间分布等)往往试验无法实现。而数值分析则几乎可以做到与理论模型同样的计算条件。为得出卵石土混合材料等效弹性模量,本文在有限元软件 ANSYS 平台下,在理想弹性范围内进行了圆形和椭圆形卵石数值试验,模拟过程未考虑卵石与基质土的界面接触效应。模型尺寸为 300 mm×600 mm。关于模型中土与卵石的尺寸区分,经试验证明,对均质土就粒度与力学性质的关系而言,以 2 mm 或 4.76 mm 为界并无明显差异^[17]。因此,为方便计算本文中土与卵石暂定以 5 mm 为界。为能有效研究卵石对宏观材料变形性能的影响,卵石直径不能超过 1/5 模型大小^[18],故生成卵石范围为 5~60 mm,扁平度固定为 1.5。卵石在数值模型中随机分布,卵石间不允许相交;为与理论解进行比较,椭圆形卵石长轴平行于 X 轴;直径按成都地铁统计数据服从截尾正态分布,平均值与方差分别为 38.23 mm 和 26.5。以上数字模型生成过程可以由作者自编的 Visual Basic 程序自动执行,结果文件包括 DWF 矢量文件(图 5 为卵石百分含量等于 50% 时,圆形与椭圆形的数值模型)及 ANSYS 命令流文件,此命令流文件可以直接在 ANSYS 下运行,以划分网格、分析计算。

模型左右边界为自由边界条件,上边界施加法向位移荷载;下边界法向位移约束,下边界中点固定约束。模型网格优先划分为四边形,大小为 5 mm,划分过程中若遇到较小卵石或特殊情况时,程序将

自动调整。计算参数根据成都地铁 1 号线相关地质资料得到,详见表 1。

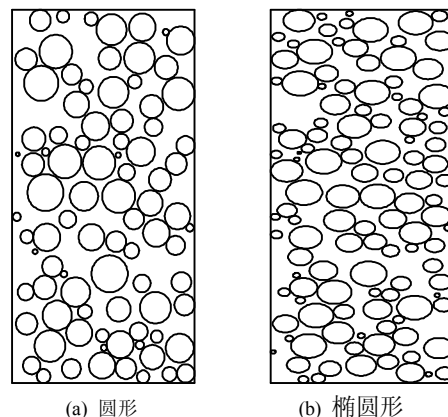


图 5 数值模型

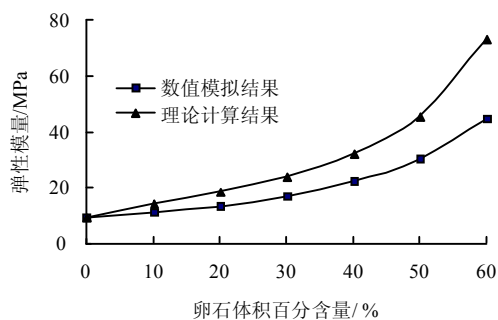
Fig.5 Numerical models

表 1 计算参数

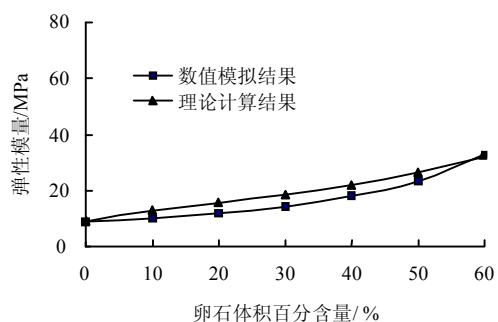
Table 1 The Parameters of materials

材料名称	弹性模量 / MPa	泊松比
基质土	9.25	0.35
卵石	50 000.00	0.15

由于数学算法和拓扑分析原因,当卵石体积百分含量大于 60% 时,卵石生成速度明显变慢,故本文仅模拟了卵石体积百分含量从 0%~60%。计算结果见图 6。



(a) 圆形



(b) 椭圆形

图 6 理论与数值试验对比

Fig.6 Comparison of theory with numerical modelling result

从图6中可以看出,等效弹性模量随卵石体积百分含量的增加而呈二次曲线型增加,理论计算结果与数值模拟数据非常接近,总体上理论解大于数值模拟结果,这是由于在理论推导中忽略了接触面的影响所致。

5 结 论

建立在宏观各向同性、应变均匀性假设的基础上,得出MMTC等效弹性模量的理论预测公式。在MMTC中卵石被近似为椭圆或圆形。从公式的推导过程中不难看出,此解析解数学模型是以RVE为基础,且只包含一个卵石而得出的。这使得卵石体积百分含量受到一定限制,如当包含物为球体时,最大体积百分含量为52.3%;为圆时为78.5%;而当卵石为椭圆时,体积百分含量则随卵石扁平度的增加而减小。因此,当某一卵石体积百分含量在工程上确实存在,但已超过一定值时,此理论预测模型将不再准确或已失效。从公式推导过程及其表达式中,认为该理论模型仍存在以下不足:①泊松比的影响被忽略;②当 E_1 与 E_2 相差极大时, E_1 对结果的影响很小;③卵石百分含量受到限制。

通过比较数值模拟与理论计算结果发现,数值试验与理论得出的等效弹性模量非常接近。此理论模型在一定程度上可以对MMTC等效弹性模量做出预测。这将有助于理解类似地质的力学变形性能,更进一步去提高TBM应对类该地层的能力。

致谢:非常感谢成都地铁所有承包商对现场数据收集的大力支持。

参 考 文 献

- [1] 胡斌,黄润秋.地质环境因素对成都市土地利用规划的影响[J].四川大学学报(工程科学版),2008,40(3):59—64.
HU Bin, HUANG Run-qiu. The impacts of geo-environmental factors on the land use planning in Chengdu[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2008, 40(3): 59—64.
- [2] 台佳佳,邓建辉,谢和平,等.汶川大地震中映秀-虹口地区的地表破裂[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):109—118.
TAI Jia-jia, DENG Jian-hui, XIE He-ping, et al. Surface ruptures induced by associated Wenchuan earthquake in Yingxiu and Hongkou area[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(3): 109—118.
- [3] ZHAO J. Keynote: Tunnelling in rocks — present technology and future challenges[C]//Underground Space. London: Taylor and Francis, 2007: 22—32.
- [4] 杨兴国,王烈恩,曹鹏飞,等.大型地下洞室群施工交通运输仿真分析[J].四川大学学报(工程科学版),2008,40(2):49—52.
YANG Xing-guo, WANG Lie-en, CAO Peng-fei, et al. Construction traffic and transport simulation of large scale underground adits[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2008, 40(2): 49—52.
- [5] ZHAO J, GONG Q M, EISENSTEN Z. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22 (4): 388—400.
- [6] STEINGRIMSSON J H, GRV E, NILSEN B. The significance of mixed-face conditions for TBM performance[C]//Mixed Face TBM Performance. Sydney: World Tunnelling, 2002: 435—441.
- [7] BLINDHEIM O T, GRØV E, NILSEN B. The effect of mixed face conditions (MFC) on hard rock TBM performance[C]//Mixed Face TBM Performance. Sydney: World Tunnelling, 2002: 400—407.
- [8] GONG Q M, ZHAO J, ZHANG X H. The influence of mixed face ground on TBM performance[C]//The 2nd International Geo-Changsha Conference. Singapore: CI-Premier Conference Organisation, 2007: 117—123.
- [9] HASHIN Z. Theory of mechanical behavior of heterogeneous media[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1964, 17(1): 1—9.
- [10] BISHOP C M, TANG M, CANNON R M, et al. Continuum modelling and representations of interfaces and their transitions in materials[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 422 (1—2): 102—114.
- [11] LEE H K, PYO S H. Multi-level modeling of effective elastic behavior and progressive weakened interface in particulate composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68 (2): 387—397.
- [12] WANG M, PAN N. Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials[J]. *Materials Science and Engineering: R*, 2008, 63 (1): 1—30.
- [13] WONG C P, BOLLAMPALLY R S. Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, 74 (14): 3396—3403.
- [14] VEKINIS G, SOFIANOPOULOS E, TOMLINSON W J. Alumina toughened with short nickel fibres[J]. *Acta Materialia*, 1997, 45 (11): 4651—4661.
- [15] HASHIN Z, SHTRIKMAN S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1963, 11 (2): 127—140.
- [16] PAUL B. Prediction of elastic constants of multiphase materials[J]. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 1960, 218 36—41.
- [17] 罗国煜,李生林.工程地质学基础[M].南京:南京大学出版社,1990.
- [18] HOLTZ W G, GIBBS H J. Triaxial shear tests on pervious gravelly soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division, ASCE*, 1956, 82 (1): 1—22.