

卵石几何特性对其地层变形性能的影响

高明忠^{1,3}, 龚秋明², 赵 坚³

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124;

3. 瑞士联邦理工大学 (EPFL) 岩石力学实验室 洛桑, CH-1015 瑞士)

摘要: 成都地铁1[#]线穿越区域为典型卵石地层, 通过现场筛分实验及数字图像技术对卵石几何特性进行统计分析. 地铁沿线卵石直径和扁平度平均值分别为 38.23 mm 和 1.54, 都近似服从截尾正态分布, 卵石长轴与水平面的夹角平均为 32.72°. 通过数值实验研究了卵石几何特性对卵石地层等效弹性模量的影响, 结果表明: 随着卵石面积百分含量的增加, 等效弹性模量增加; 随着卵石主轴与水平面夹角的增加, 等效弹性模量增加; 随着卵石扁平度的增加, 等效弹性模量减小. 在应变均匀性假设的基础上, 推导出等效弹性模量理论预测公式, 理论分析与数值计算比较接近, 可以用来初步判断卵石地层等效弹性模量.

关键词: 卵石地层; 几何特性; 等效弹性模量

中图分类号: TU 454

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2010)03-0310-06

卵石地层是由卵石和细颗粒组成的天然地质体, 其力学分析行为不稳定. 随着地下空间技术的发展, 隧道应用越来越广泛, 如通讯设施、交通隧道等, 盾构机、掘进机施工已被当作高速开挖和有效支护隧道的常用掘进方法^[1]. TBM 从硬岩掘进到软土盾构, 在安全、经济、效率方面都已超过常规钻爆法及其他暗挖法施工^[2]. 当工作面软硬相间、变化较快时, TBM 就很难取得预期效果^[3].

成都地铁1[#]线4个标段的TBM施工中, 先后遇到动态土压平衡难以形成、刀盘扭矩过大、刀盘和刀具磨损过快、地表沉降等问题, 导致总体掘进速度较低^[4]. 此类问题的发生, 一定程度上是由于缺乏对卵石土地层力学性能的认识. 卵石地层已成为TBM施工面临的较大难题^[5].

本文针对TBM施工中出现的問題, 采用二维数字图像技术^[6], 在无法直接取样的施工现场, 采用数字拍照来研究卵石地层的卵石分布几何特性. 探讨了卵石地层等效弹性模量的变化规律. 基于应变均匀性假设, 通过理论分析, 建立了等效弹性模量的解析计算公式.

1 成都地铁1[#]线卵石地层几何特性

在成都地铁1[#]线4个车站, 每个车站进行3组卵石直接取样筛分实验, 每组10 kg. 同时, 每个站选高清晰照片20幅(如图1所示), 根据照片亮度不同转换原始图像为灰度图. 本文中采用256位灰度图, 即灰度水平从0到255变化. 卵石比基质具有更高的灰度值, 在卵石与基质的过渡接触面上灰度水平有较大的变化. 通过边界分割或分界检测法容易识别卵石和细颗粒的边界线^[7]. Medley^[8]认为二维信息得到的卵石直径符合真正卵石直径的概率仅为0.6, 三维直径分布的分形维数接近于二维分形维数加1, 目前还没有直接能将二维信息转化为三维的方法^[9-11]. 因此, 数字照

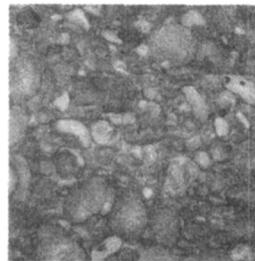


图1 现场数字图像

Fig. 1 The digital image in site

收稿日期: 2009-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作研究资助项目(50620130440); 北京市教育委员会科技计划项目(KM200910005010).

作者简介: 高明忠(1980—), 男, 山西吕梁人, 博士生.

片主要用于卵石方位及数量的研究, 直接取得的卵石样本用于研究卵石形状和尺寸分布。

1.1 卵石直径

卵石土属于广义的土石混合体, 土与石的区分一直是一个比较模糊的概念, Dearman 将风化岩土分成了土、土石混合体、石 3 大类, 仅根据石类含量的多少进行了简单的划分, 并没有考虑性质上的异同. Little^[12]把含石量小于 10% 的土石混合体划分为土体的一种, 当含石量低于 10% 时, 砾石在其中的影响非常小, 可以将其看成均质体. 而当含石量大于 90% 时, 可以把它看成节理岩体. 关于具体数值来区分土与石, 在我国 2 mm 是通用粒组的原定界限值, 也是国际普遍采用的标准. 但是国内也有单位采用 5 mm 作为砾石粒径界限的, 其最主要的好处是统计比较方便. 试验证明, 对均质土就粒径与力学性质的关系而言, 以 2 mm 或以 4.76 mm 为界并无明显差异^[13]. 本文中 5 mm 以下颗粒被认为是基质.

卵石直径 d 统计分布如图 2 所示, 其分布为近似截尾正态分布, 平均值为 38.23 mm, 方差为 26.50. 统计结果与成都地铁地质初勘报告一致, 卵石直径位于 10 ~ 80 mm, 也随机分布有少量特大漂石. 实验中遇到最大直径漂石 512 mm.

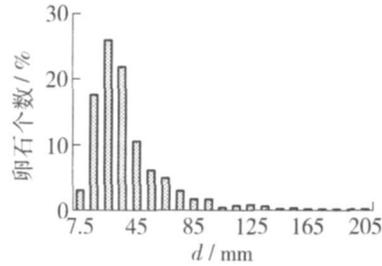


图 2 卵石直径分布图

Fig. 2 The distribution of cobble diameter

1.2 卵石扁平度

经河流长期冲刷过的卵石大都为椭圆或近椭圆形, 取卵石的最长轴(即主轴)与短轴的比例(扁平度)作为衡量标准. 很明显扁平度越大则卵石越扁长, 扁平度为 1 时卵石为理想圆形. 图 3 为扁平度统计图, 若假设此分布仍为截尾正态分布, 则其平均值和方差分别为 1.54 mm 和 0.34.

1.3 卵石主轴倾角

卵石随河流的运动具有间歇性, 运动一段距离后在一定的水流条件下产生堆积, 表层常呈现排列状与松散状, 排列状又有鱼鳞式、叠瓦状和列队式等几种^[14]. 经水流的分选和堆挤, 扁平度较大的卵石极易形成排列状. 鱼鳞式排列的卵石, 彼此交错挤压, 扁平面互相搭叠, 增加了卵石的稳定性, 列队方向与水流方向一致, 卵石之间紧密相靠, 与松散堆积的卵石相比, 水流作用面大为减少, 也增加了卵石在床面的稳定性^[15].

卵石方位的统计主要依据现场数字图像, 从二维图像计算得到卵石的主轴, 并计算出该主轴与水平面的夹角 ϕ , 以此夹角来表征卵石的方位. 图 4 为主轴倾角 ϕ 的统计结果, 其中水平方向排列卵石为 11.46%, 比例最大, 平均夹角 32.72°. 统计曲线随着角度的增加卵石数呈近似指数下降. 从数字图像表面看成都卵石地层的排列应属鱼鳞式排列, 较密实.

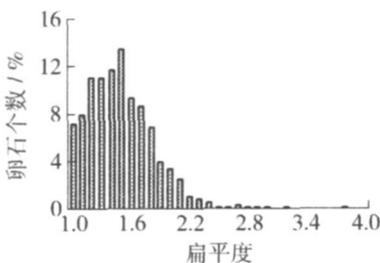


图 3 扁平度统计图

Fig. 3 The distribution of the length ratio of the major axis to shorter axis of cobble

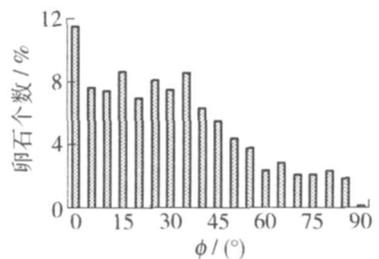


图 4 卵石主轴与水平面的夹角

Fig. 4 The angle between the cobble major axis and level direction

2 对卵石地层变形特性的影响

2.1 计算条件

生成卵石的数字模型由自编 Visual Basic 程序自动完成,卵石间不允许相交,卵石大小分布与现场统计数据一致,最大粒径 60 mm,根据土石混合体试验规范,模型不能小于最大粒径的 5 倍,且模型高宽比为 2.0~2.5,所以,模型大小采用 300 mm × 600 mm. 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,本文模拟了卵石体积含量从 0%~60%.

模型左右边界为自由边界,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. 模型网格优先化分为四边形,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. 基质土与卵石弹性模量分别取 9.25 MPa 和 50 GPa,泊松比分别取 0.35 和 0.15.

2.2 卵石扁平度影响

椭圆扁平度越大椭圆越成细长形,当扁平度等于 1 时为圆. 数值实验中分别模拟了扁平度等于 1.0、1.2、1.5、2.0、2.5 和 2.8 的情况,卵石在模型中随机放置,方位服从指数分布. 图 5(a) 为面积百分含量等于 50%,扁平度等于 1.5 时的数值计算模型.

不同卵石百分含量下,扁平度与弹性模量 E 的关系曲线如图 6(a) 所示,弹性模量随着百分含量的增加而增加,随着扁平度的增加,弹性模量减小. 但扁平度对弹性模量影响较小,随着百分含量的增加,扁平度对弹性模量的影响逐渐增大.

2.3 椭圆主轴倾角影响

椭圆方位的不同将形成不同的排列、不同的受力原理. 卵石主轴与水平方向夹角以 15° 为间隔,取值为 $0^\circ \sim 90^\circ$. 为研究卵石方位对整体变形性能的影响,椭圆扁平度固定为 1.5. 图 5(b) 为体积百分含量等于 50%、倾角 ϕ 等于 45° 时的数值计算模型. 其计算结果如图 6(b) 所示,从图中可以看出:a) 随着主轴倾角的增加,弹性模量增加;b) 随着卵石面积百分含量的增加,主轴倾角对弹性模量的影响增大;c) 主轴倾角对弹性模量的影响随着角度的增大越来越显著.

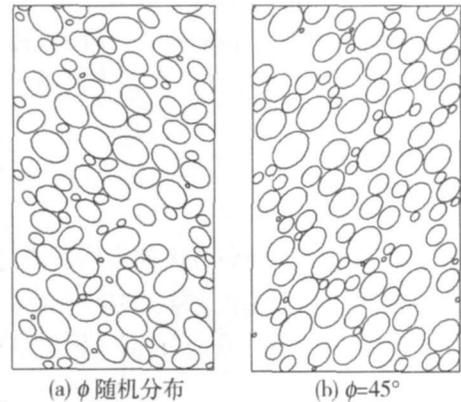


图 5 数值计算模型

Fig. 5 The numerical model

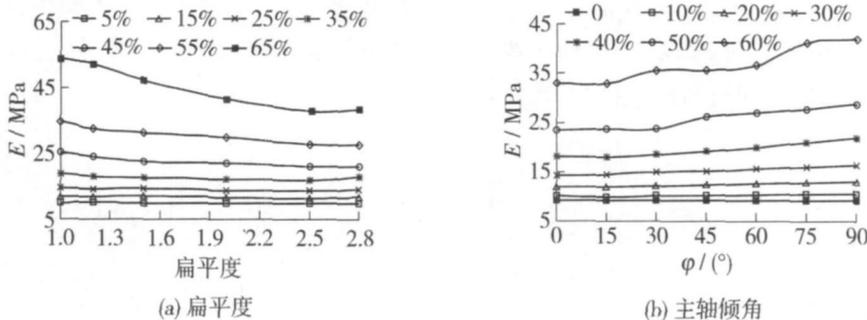


图 6 弹性模量随卵石几何特性的变化

Fig. 6 Elastic modulus variations influenced by cobble geometrical

3 等效弹性模量理论计算模型

混合材料等效物理属性的预测研究开始于 1906 年^[16]. 混合材料整体力学行为或宏观力学属性并不

等同于任一组份材料,而是由各组份共同形成、共同发挥不同作用的复杂系统^[17-18]. 对于仅由2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和串联2种模型^[19],他们对MMTC的很多物理属性提供了上下限边界^[20].

3.1 公式推导

假设MMTC为宏观各向同性、均匀的混合材料,则任一代表性体积单元(RVE)可以看作统计均质材料的代表体积边界,其中应力、应变、位移及各组份百分含量平均值和MMTC中对应量的平均值相同^[16].图7为MMTC中单位长度为1的RVE正方形单元^[21].

令X方向两端均匀作用于拉力F,距原点距离为x的任一纵截面交卵石分别于m、m'.令代表法向应变,E₁、E₂分别代表基质土与卵石的弹性模量,由于应变均匀性假设则在截面上的法向应力可以表示为E₁ε和E₂ε,在此截面上总拉力F及总伸长量δ可以表示为^[21]

$$F = \varepsilon [E_1 + (E_2 - E_1) l_{mm'}] \quad (1)$$

$$\delta = \int_0^1 \varepsilon(x) dx = F \int_0^1 \frac{dx}{E_1 + (E_2 - E_1) l_{mm'}} \quad (2)$$

则等效弹性模量为

$$\frac{1}{E} = \frac{\delta/1}{F/(1 \cdot 1)} = \int_0^1 \frac{dx}{E_1 + (E_2 - E_1) l_{mm'}} \quad (3)$$

根据椭圆基本方程,a、b分别为椭圆长、短轴,则mm'长度为

$$l_{mm'} = 2|y| = 2b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (4)$$

式(4)代入式(3)可求得

$$\frac{1}{E} = \frac{ma}{E_1} \left[\pi + \frac{m \ln \frac{1 - \sqrt{1 - m^2}}{1 + \sqrt{1 - m^2}}}{\sqrt{1 - m^2}} \right] + \frac{1 - 2a}{E_1} (|m| < 1) \quad (5)$$

其中 $m = \frac{E_1}{2b(E_2 - E_1)}$.

特别地当椭圆扁平度为1时,公式简化为

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2(E_2 - E_1)} \left[\pi + \frac{2m \ln \left[\frac{1 - \sqrt{1 - m^2}}{m} \right]}{\sqrt{1 - m^2}} \right] + \frac{1 - 2r}{E_1} (|m| < 1) \quad (5)$$

其中, $m = \frac{E_1}{2r(E_2 - E_1)}$, r为圆半径.

3.2 与数值计算结果比较

由于椭圆倾角会极大地影响宏观变形特性,为与理论解进行比较,模型中卵石长轴平行于X轴,并假设扁平度等于1.5,数值分析结果与理论对比如图8所示.等效弹性模量随卵石面积百分含量的增加而增加,理论计算结果与数值模拟结果总体上非常接近.但理论解总大于数值模拟结果,这是由于在理论

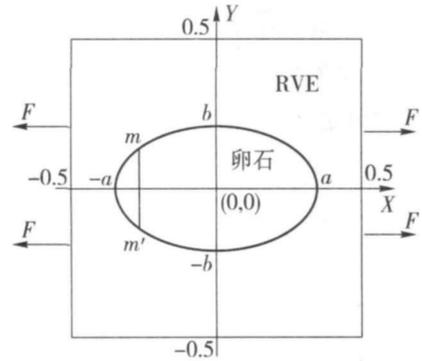


图7 MMTC中任一REV
Fig. 7 Any REV in MMTC

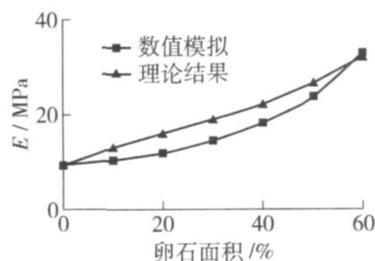


图8 弹性模量理论与数值试验对比
Fig. 8 Elastic modulus comparison of theory with numerical modelling result

推导中忽略了接触面的影响.

4 结论

卵石地层弹性模量随着卵石百分含量的增加而增加. 随着卵石扁平度的增加, 卵石地层弹性模量减小. 随着卵石主轴与水平轴夹角的增加, 卵石地层弹性模量增加.

在宏观各向同性、应变均匀性假设的基础上, 推导出椭圆形卵石地层中卵石长轴水平排列时的等效弹性模量理论预测公式, 与数值模拟结果非常接近. 其结果有助于理解及计算类似地层的变形性能, 有利于TBM在该类地层开挖参数的设置以及此类地层的变形计算.

参考文献:

- [1] ZHAO J. Keynote: Tunnelling in rocks-present technology and future challenges [C] // Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress. Prague: Taylor and Francis, 2007: 22-32.
- [2] 习仲伟. 我国交通隧道工程及施工技术进展[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(2): 35-40.
XI Zhong-wei. Advance of transport tunnel engineering and construction technique in China [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2005, 31(2): 35-40. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 龚秋明, 高明忠, 姜厚停. 成都地铁卵石地层盾构施工浅析[J]. 市政技术, 2009, 27(增2): 184-186.
GONG Qiu-ming, GAO Ming-zhong, JIANG Hou-ting. Analysis of shield tunnelling in sandy cobble strata for Chengdu subway project [J]. Municipal Engineering Technology, 2009, 27(S2): 184-186. (in Chinese)
- [5] 张明聚, 由海亮, 杜修力, 等. 北京地铁某车站明挖基坑施工监测分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(10): 874-878.
ZHANG Ming-ju, YOU Hai-liang, DU Xiu-li, et al. Construction monitoring analysis for an open excavated foundation-pit of a subway station in Beijing [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2006, 32(10): 874-878. (in Chinese)
- [6] CHEN S, YUE Z Q, THAM L G. Digital image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(6): 939-957.
- [7] YUE Z Q, CHEN S, THAM L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5): 375-397.
- [8] MEDLEY E W. Estimating block size distributions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [C] // Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS). Toronto: University of Toronto Press, 2002: 509-516.
- [9] SAMMIS C G, BIEGEL R L. Fractals, fault-gouge, and friction [J]. Pure and Applied Geophysics PAGEOPH, 1989, 131(1-2): 255-271.
- [10] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B2): 1921-1926.
- [11] DEARMAN W R. Description and classification of weathered rocks for engineering purposes: the background to the BS5930: 1981 proposals [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1995, 28(3): 267-276.
- [12] LITTLE A. Engineering classification of residual tropical soils [C] // Proceedings of the 7th international conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: [s. n.], 1969: 7.
- [13] 罗国煜, 李生林. 工程地质学基础 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1990: 13-14.
- [14] 张之湘. 卵石推移质输移随机性研究 [D]. 成都: 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 2005.
ZHANG Zhi-xiang. Study on stochastic nature of gravel bedload transport [D]. Chengdu: State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, 2005. (in Chinese)
- [15] 刘兴年. 沙卵石推移质运动及模拟研究 [D]. 成都: 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 2004.
LI U Xing-nian. Gravel bed-load transport and its modelling [D]. Chengdu: State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan university, 2004. (in Chinese)
- [16] HASHI N Z. Theory of mechanical behavior of heterogeneous media [J]. Applied Mechanics Reviews, 1964, 17(1): 1-9.

- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] WANG M, PAN N. Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials[J]. *Materials Science and Engineering R*, 2008, 63(1): 1-30.
- [20] 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.
- [21] PAUL B. Prediction of elastic constants of multiphase materials[J]. *Metallurgical Society of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers-Transactions*, 1960, 218(1): 36-41.

Influence of Cobble Geometrical Properties on Deformation Performance of Cobble Stratum

GAO Ming-zhong^{1,3}, GONG Qiu-ming², ZHAO Jian³

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Rock Mechanics Laboratory, CH-1015 Lausanne, Switzerland)

Abstract: The ground of Chengdu Metro Line No 1 alignment is typical cobble stratum and the cobble geometrical properties are analyzed statistically through on-the-site screening experiments and digital image technique method. Its average value of the diameter of the cobble of the Mtro Line No.1 alignment is 38.23 mm and the average value of the length ratio between the longest axis and the shortest axis is 1.54. The average angle between the cobble long axis and horizontal direction is 32.72°. The cobble geometrical shape is assumed to be an ellipse. Based on the numerical modeling, the influence of cobble geometrical properties on the equivalent elastic modulus of cobble stratum was studied. The numerical results show that the equivalent elastic modulus increases with increasing of cobble percentage content. The equivalent elastic modulus increases with increasing of the angle between the cobble longest axis and horizontal direction. While the equivalent elastic modulus decreases with increasing of the length ratio between the longest axis and the shortest axis of cobble. On the basis of uniform strain assumption, analytic solutions are derived from the theoretical approach for equivalent elastic modulus. The analytic solutions were validated by the numerical modelling method. The results indicate that the equivalent elastic modulus derived from the theoretical and numerical model is closely matched. The analytic solutions are helpful for improving the understanding of deformation for such ground condition.

Key words: cobble stratum; geometrical properties; equivalent elastic modulus

(责任编辑 张士瑛)