

砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率

朱伟¹, 李明东², 张春雷¹, 李红³

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 淮海工学院土木工程学院, 江苏 连云港 222005; 3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了明确击实含水率对砂土 EPS 颗粒混合轻质土的密度和强度的影响, 采用 2 因素 (水泥添加量和 EPS 颗粒置换率) 5 水平均匀试验设计确定了 5 个不同配比, 利用密度试验和无侧限抗压强度试验进行了研究。为了确定砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率, 引入了基于比强的最优击实含水率确定方法, 并采用二分法 (初始击实含水率设为 6.5% 和 13%) 寻求了每个配比的最优击实含水率, 基于物理分析和试验数据给出了最优击实含水率的计算式。研究发现: 击实含水率的增加有利于提高击实效果, 对水泥的胶结作用则是先提高后降低; 基于比强的最优击实含水率确定方法是适宜的; 最优击实含水率受到 EPS 颗粒置换率和水泥添加量的影响。

关键词: EPS; 轻质土; 最优击实含水率; 比强; 无侧限抗压强度; 密度

中图分类号: TU58

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)01-0021-05

作者简介: 朱伟(1962-), 男, 甘肃平凉人, 教授, 主要从事岩土工程及环境工程的教学和研究工作。E-mail: weizhu@hhu.edu.cn。

The optimum moisture content of sand EPS beads mixed lightweight soil

ZHU Wei¹, LI Ming-dong², ZHANG Chun-lei¹, LI Hong³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To investigate the effect of moisture content on the density and strength of sand EPS beads mixed lightweight soil, 5 mix proportions are defined based on uniform experimental design method considering the two factors, cement content and EPS beads content, at 5 design levels. Laboratory density tests and uniaxial compression tests are conducted on sand EPS beads mixed lightweight soil. To determine the optimum moisture content of sand EPS beads mixed lightweight soil, the specific strength is imported. The binary search method is used to determine the optimum moisture content of the 5 mix proportions. The results show that the increase of moisture content is beneficial to the effect compaction, and the specific strength method is satisfactory for the determination of the optimum moisture content. The optimum moisture content is affected by cement content and EPS beads content.

Key words: EPS; lightweight soil; optimum moisture content; specific strength; unconfined compression strength; density

0 前言

EPS 颗粒混合轻质土是一种密度小、强度高的改性土^[1-3], 其中以砂土为原料土的最多^[4]。砂土 EPS 颗粒混合轻质土是采用压实方法进行施工的^[5], 压实施工在室内利用击实来模拟。击实含水率既影响到击实的效果, 也就是砂土 EPS 颗粒混合轻质土的密实度, 又影响到水泥的胶结作用的发挥程度, 继而对强度产生很大的影响^[6]。可见, 明确击实含水率对砂土 EPS 颗粒混合轻质土的密度和强度的影响具有一定的工程参考价值。

砂土 EPS 颗粒混合轻质土的目标是密度小、强度高, 即轻质高强度。确定使砂土 EPS 颗粒混合轻质土

的轻质高强度达到最优的击实含水率具有重要的工程指导意义。需要说明的是, 为了保证水泥的胶结作用的完全发挥, 砂土 EPS 颗粒混合轻质土是在水泥初凝之前进行压实的。砂土 EPS 颗粒轻质土的水既有常规土的润滑土颗粒的作用, 又有提供水泥水化需水的作用, 水量在概念和数量上均不同于常规土的含水率。因此, 本文用击实含水率来表达, 即击实时水的质量占干土质量的百分比, 同时使其轻质高强度最优的击

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目资助 (2007AA11Z135); 水利部公益性行业科研专项经费项目资助 (200701045)

收稿日期: 2007-06-11

实含水率叫做最优击实含水率,以区别于常规土的最优含水率。

目前国内外对于最优击实含水率的研究较少。马时冬对水泥添加量为 6%~8% 的砂土 EPS 颗粒混合轻质土进行了研究,发现水灰比为 1 时,其强度最高^[7]。顾欢达等在研究中进行两次加水,第一次按砂土的最优含水率添加,第二次加入“适量水”作为水泥水化需水,但未提及适宜量的确定方法^[8]。汤峻等对 EPS 颗粒添加比为 1 砂土 EPS 颗粒混合轻质土进行了研究,发现存在一个最优击实含水率,约为 13%,对应水灰比为 2^[6]。日本的规矩采用和顾欢达相同的二次加水的方法,第二次加水为水泥质量的 1.45 倍^[9]。

由上述可见:不同研究者对于砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率的存在具有共识,但是各研究者的表达方法不尽相同,研究结论也有很大差异。笔者认为:最优击实含水率受到水泥添加量和 EPS 颗粒置换率的影响,这是造成研究结论存在差异的主要原因。因此有必要研究材料对比对最优击实含水率的影响,并基于此确定最优击实含水率的计算方法。

本研究采用 2 因素(水泥添加量和 EPS 颗粒置换率)5 水平均匀试验设计确定了 5 个不同配比,研究了不同配比下击实含水率对砂土 EPS 颗粒混合轻质土的密度和强度的影响。引入了材料学中的比强确定了不同配比的砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率,基于物理分析和试验结果回归分析给出了最优击实含水率的计算式。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验所用原料土的颗粒级配如图 1 所示,为不良级配中砂;试验所用 EPS 颗粒为发泡球粒,粒径 1~3 mm,其自由堆积体的密度为 0.0368 g/cm³;固化材料为钟山牌 32.5# 普通硅酸盐水泥,其 28 d ISO 胶沙抗压强度为 40 MPa,水为自来水。

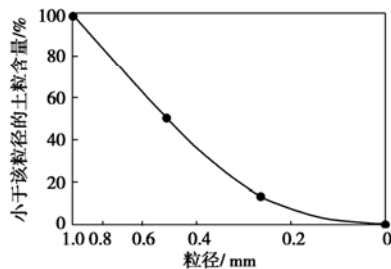


图 1 试验用砂土的粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of sand

1.2 试验方案

为了研究水泥添加量和 EPS 颗粒置换率对最优击

实含水率的影响,采用 2 因素 5 水平的均匀试验设计方法进行配比设计^[10],试验配比见表 1。其中,水泥添加量为每立方米砂土中添加的水泥的千克数, EPS 颗粒置换率为 EPS 颗粒占砂土和 EPS 颗粒总体积的百分率。对于其中任意一个配比,采用二分法寻优^[11]精确寻找最优击实含水率,初始值设为 6.5% 和 13%。

表 1 确定 EPS 颗粒混合轻质土最优击实含水率的试验配比

Table 1 Factors and levels for determining the optimum moisture

content of EPS beads mixed lightweight soil		
因素	水泥添加量/(kg·m ⁻³)	EPS 颗粒置换率/%
方案 1	40	0
方案 2	60	50
方案 3	100	33
方案 4	120	60
方案 5	160	67

1.3 试验方法

首先量取砂、EPS 颗粒,加入水泥后进行初步拌和,再加入水拌和至均匀。将拌和物采用分层击实的成型方法装入直径为 39.1 mm,高为 80 mm 的圆柱形三瓣模中。本试验的击实器为三轴击样器,分三层击实,每次击实的击实能为 21.7 kJ/m³,击实次数为 16 次。将制备的试样置入标准养护箱中(温度 20±2℃,湿度>90%)养护,24 h 后脱模。为了防止水分在养护过程中的改变,用保鲜膜进行密封后再放入标准养护箱内,养护至 7 d 龄期进行密度试验和无侧限抗压强度试验。

本文以饱和密度(最大密度)和干密度(最小密度)为参数。密度试验参照国家《土工试验规程》^[12]进行,浸泡 24 h 后量测高度和直径,称量饱和和质量,来计算其饱和密度;在烘箱(105℃)中烘干 8 h 后称量干质量并计算干密度。每组 3 个平行试样,取其均值作为轻质土的饱和密度和干密度。

本文以无侧限抗压强度为强度参数,无侧限抗压强度试验参照国家《土工试验规程》^[12]进行,所用仪器为 SJT—201 型应变控制式三轴压缩仪。为了消除试样含水率对强度的影响,压样前将试样浸泡 24 h。试验所采用的应变速率为 1.18 mm/min。每组 3 个平行试样,取其均值作为轻质土的无侧限抗压强度。

2 击实含水率对物理力学性质的影响

击实含水率既影响到砂土 EPS 颗粒混合轻质土的压实效果,又影响到水泥的胶结作用的发挥程度,下面分别以饱和密度、干密度和无侧限抗压强度为参数来阐述击实含水率对物理力学性质的影响。

2.1 击实含水率对密度的影响

方案 1~5 的砂土 EPS 颗粒混合轻质土的饱和密度和干密度随击实含水率变化的情况分别如图 2, 3

所示。由图2可见,对于任何一个配比, EPS 颗粒混合轻质土的饱和密度随击实含水率的变化都仅有极小的变动,和试验误差的大小相近,而且没有明显的变化规律,这说明击实含水率对 EPS 颗粒混合轻质土的饱和密度影响很小。可见,在工程应用中,在进行密度设计时,可以忽略击实含水率的影响,只需考虑 EPS 颗粒置换率的影响,这与汤峻^[6]的研究成果一致。

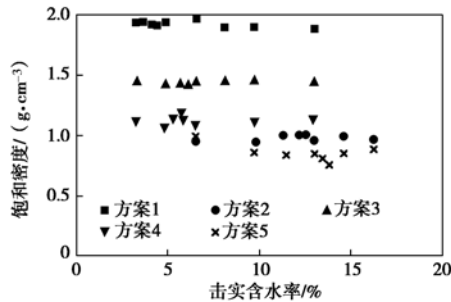


图2 击实含水率对饱和密度的影响

Fig. 2 Effect of moisture content on saturated density

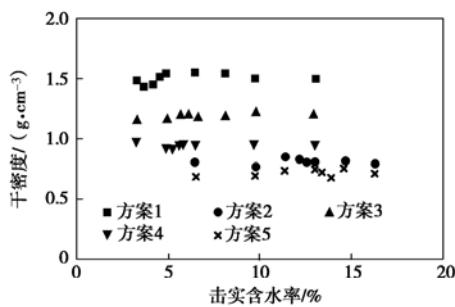


图3 击实含水率对干密度的影响

Fig. 3 Effect of moisture content on dry density

由图3可见,在含水率很小时,随着击实含水率的增加, EPS 颗粒混合轻质土的干密度随着击实含水率的增加而增加,这是因为水的添加对砂土颗粒和 EPS 颗粒起到了润滑作用,从而提高了击实效果,降低了孔隙率。

2.2 击实含水率对无侧限抗压强度的影响

方案1~5的砂土 EPS 颗粒混合轻质土的无侧限抗压强度随击实含水率变化的情况如图4所示。由图4可见,对于任何一个配比,其无侧限抗压强度随击实含水率的变化变化很大,可达30%以上,甚至超过100%;存在一个击实含水率,使得强度达到最大,但该击实含水率因配比而异。

产生上述现象的可能原因是:对于任何一个配比,当水不足以润滑砂粒和 EPS 颗粒以及提供水泥水化所需水分时,水泥不能完全水化,不能把胶结作用完全发挥出来,所以强度比较低。随着击实含水率的增加,水泥可以利用的水增多,产生的水化硅酸钙等胶结物质越多, EPS 颗粒混合轻质土的无侧限抗压强度逐渐

提高,直至最大。当拌和的含水率进一步增大时,就产生了多余的水分,这些水分会减小水泥浆的浓度,从而减小胶结物的浓度,减小 EPS 颗粒混合轻质土的粘聚力,最终导致强度降低。对于不同配比的 EPS 颗粒混合轻质土,由于 EPS 颗粒置换率和水泥的添加量不同, EPS 颗粒润滑需要的水分和水泥水化需要的水分的量不同,所以使得不同配比的 EPS 颗粒混合轻质土的无侧限抗压强度最高的击实含水率不同。

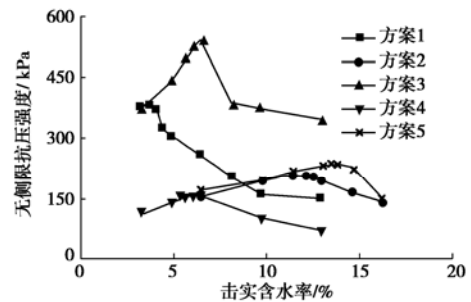


图4 击实含水率对无侧限抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of moisture content on uniaxial compression

3 最优击实含水率的确定

针对砂土 EPS 颗粒混合轻质土的轻质高强的目标,引入比强来表征轻质高强度性。对于一个配比的最优击实含水率,提出了基于比强的确定方法,并进行了确定。针对水泥添加量和 EPS 颗粒置换率对最优击实含水率的影响,根据设计的5个配比中的试验结果回归了最优击实含水率的计算式,并分析了其影响程度。

3.1 引入参数比强来表征轻质高强度性

由前述研究结果可见,在含水率较小时,击实含水率的增加既提高了砂土 EPS 颗粒混合轻质土的强度,也对干密度有一定的增加作用。但是,轻质土的目标是强度高而且密度小,即轻质高强度性,因此本文引入材料学中的参数比强^[13](即强度与密度的比)来表征这种特性,用符号 s_s 来表示, $s_s = \frac{q_u}{\rho_d}$ 。比强越大,轻质高强度性越好,比强越小,轻质高强度性越差。

3.2 比强与击实含水率的关系

方案1~5的砂土 EPS 颗粒混合轻质土的比强随击实含水率变化的情况如图5所示。由图5可见,对于任何一个配比,其比强随击实含水率的增加先增加后减小,存在一个击实含水率,使得比强达到最大。

3.3 基于比强的最优击实含水率确定方法

本文将使得比强最大(轻质高强度性最好)的击实含水率定义为砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率。采用该方法,得到方案1~5的最优击实含水率

如表 2 所示。

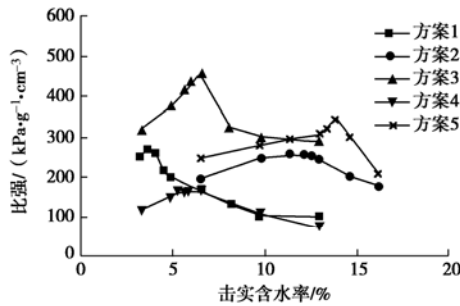


图 5 比强与击实含水率的关系

Fig. 5 The relationship between specific strength and moisture content

表 2 各试验配比的最优击实含水率

Table 2 The optimum moisture content for various cases

配比	水泥添加量 (kg · m ⁻³)	EPS 颗粒置 换率/%	试验结 果/%
方案 1	40	0	3.65
方案 2	60	50	11.36
方案 3	100	33	6.49
方案 4	120	60	6.09
方案 5	160	67	13.80

由表 2 可见, 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率随原材料配方的不同而不同。

3.4 最优击实含水率计算式

笔者认为砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率随配比变化而变化是因为水在砂土 EPS 颗粒混合轻质土中起到了润滑土颗粒、润滑 EPS 颗粒和提供水泥水化用水 3 个作用。

总最优需水量:

$$m_{\text{wopt}} = m_{\text{wc}} + m_{\text{we}} + m_{\text{ws}} \quad (1)$$

最优击实含水率:

$$\begin{aligned} w_{\text{wopt}} &= \frac{m_{\text{wopt}}}{m_s} \times 100\% \\ &= \frac{m_{\text{wc}} + m_{\text{we}} + m_{\text{ws}}}{m_s} \times 100\% \\ &= \frac{\frac{m_s a_c}{\rho_s} k_c + \frac{m_s \rho_e a_e}{(1 - a_e) \rho_s} k_e + m_s k_s}{m_s} \\ &= \frac{a_c}{\rho_s} k_c + \frac{\rho_e a_e}{(1 - a_e) \rho_s} k_e + k_s, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, m_{wopt} 为轻质土需要的最优水量, m_{wc} 为水泥需水, m_{ws} 为土颗粒需水, m_{we} 为 EPS 颗粒需水, w_{opt} 为轻质土的最优击实含水率, m_s 为轻质土中土颗粒的质量, a_c 为水泥添加量, a_e 为 EPS 颗粒置换率, k_s 为原料土质量需水率, k_e 为 EPS 颗粒质量需水率, k_c 为

水泥质量需水率, ρ_e 为 EPS 颗粒的假比重, ρ_s 为砂土颗粒的比重。

对表 2 中的试验数据根据式 (2) 进行二元线性回归分析, 得到 $k_c = 49.5\%$, $k_e = 138.8\%$, $k_s = 2.05\%$ 。回归相关系数 $R = 0.996$, 这表明式前述物理模型是正确的, 水泥添加量和 EPS 颗粒置换率对最优击实含水率的影响没有交互作用。

由回归结果还可以看出: ①水泥的需水率与水泥沙浆的需水率相当, 是水化反应化学需水^[14]的 1.8 倍左右, 这是因为水泥除了水化需水, 拌和中也需要润湿; ②EPS 颗粒的质量需水率较大, 这是因为其密度小; ③原料土的需水系数只有 2.05%, 远小于砂土的最优含水率, 这说明砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率与原料土的最优含水率没有必然的联系。

4 结 论

(1) 在击实含水率较小时, 随着击实含水率的增加, 其干密度增加, 压实效果提高。无侧限抗压强度随击实含水率的增加先增加后减小, 存在最大值。

(2) 用比强表征轻质土的轻质高强度, 并基于比强确定最优击实含水率的方法是适用的。

(3) 最优击实含水率随水泥添加量和 EPS 颗粒置换率的变化而变化, 但两个因子的影响不存在交叉作用, 可以表达为式 (2)。

(4) 原料土在砂土 EPS 颗粒混合轻质土中的最佳需水系数与自身的最优含水率之间有很大的区别。

参考文献:

- [1] 姬凤玲. 淤泥泡沫塑料颗粒轻质混合土的力学特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (JI Feng-ling. Mechanical characteristics of EPS beads mixed lightweight soil made of dredged sediment[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [2] TSUCHIDA Takashi, PORBAHA Ali, YAMANE Nobuyuki. Development of a geomaterial from dredged bay mud[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001(2): 152 - 160.
- [3] MIHI Hiroshi. Cost reduction effect due to lightweight embankment[C]// Proceeding of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials (IW-LGM2002), Tokyo, 2002: 1 - 16.
- [4] 規矩大義, 吳智深, 林泰弘, 等. 輕量地盤材料の物性と評価法[C]// 輕量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム発表論文集. 东京, 2002: 55 - 78. (KIKU Hiroyoshi, WU Zhishen, HAYASHI Yasuhiro, et al. Evaluation of the

- characteristics of lightweight geo-materials [C]// Proceeding of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials (IW-LGM2002). Tokyo, 2002: 55 - 78. (in Japanese))
- [5] 李明东, 朱伟, 马殿光, 等. EPS 颗粒混合轻质土的施工技术及其应用实例[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 533 - 536. (LI Ming-dong, ZHU Wei, MA Dian-guang, et al. Construction technology and application in-situ of expanded polystyrene treated light soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 533 - 536. (in Chinese))
- [6] 汤峻, 朱伟, 李明东, 等. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的物理力学性质[J]. 岩土力学, 2007(5): 1045 - 1049. (TANG Jun, ZHU Wei, LI Ming-dong, et al. Physico-mechanical properties of sand EPS beads-mixed lightweight soil[J]. Rock and Soils Mechanics, 2007(5): 1045 - 1049. (in Chinese))
- [7] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土 (SIS) 的特性[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 245 - 248, 314. (MA Shi-dong. The properties of stabilized light soil (SLS) with expanded polystyrene[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 245 - 248, 314. (in Chinese))
- [8] 顾欢达, 顾熙, 申燕, 等. 发泡颗粒轻质土材料的基本性质[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2003, 16(4): 44 - 48. (GU Huan-da, GU Xi, SHEN Yan, et al. basic mechanics properties of EPS beads treated light soil[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2003, 16(4): 44 - 48. (in Chinese))
- [9] 規矩大義, 大嶺聖, 川野整, 等. 輕量混合土靜的強度全國一齊試驗[C]// 輕量地盤材料的開發と適用に関するシンポジウム発表論文集. 東京, 2002: 3 - 22. (KIKU Hiroyoshi, OMINE Kiyoshi, KAWANO H, et al. Experimental study on static strength of lightweight soil in Japan[C]// Proceeding of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials (IW-LGM2002). Tokyo, 2002: 3 - 22. (in Japanese))
- [10] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (ZHAO Xuan-min. Test design method[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [11] 施光燕, 董加礼. 最优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. (SHI Guang-yan, DONG Jiali. Optimum method[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. (in Chinese))
- [12] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50123—1999 Code for test of soil mechanics[S]. 1999. (in Chinese))
- [13] 赵龙, 何德坪, 单建. 高比强度高孔隙率泡沫铝合金三明治梁[J]. 材料研究学报, 2004(5): 485 - 493. (ZHAO Long, HE De-ping, SHAN Jian. Study on compressive deformation of porous aluminum alloy with high specific strength[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2004(5): 485 - 493. (in Chinese))
- [14] LEE F A. The chemistry of cement and concrete[M]. New York: Hodder Arnold, 1970.

第四届全球华人岩土工程论坛第一号通知

“第四届全球华人岩土工程论坛 (4th World Forum of Chinese Scholars in Geotechnical Engineering)”由长江水利委员会长江科学院和中国科学院武汉岩土力学研究所共同主办, 将于 2009 年 8 月 20 日~22 日在武汉召开。

本届论坛宗旨是: ①加强全球华人岩土工程学者的学术交流, 将海外华人岩土工程学者的最新研究进展及时介绍到中国, 同时也促进海外华人学者对祖国大陆岩土工程建设发展的了解; ②促进全球华人岩土工程学者之间的联系, 探讨岩土工程研究的重大基础性问题, 提高试验技术装备开发与应用水平, 争取开展联合研究, 增强华人学者在国际岩土工程界的影响。

会议主要议题: ①非饱和膨胀土特性及工程处理技术; ②地下工程中的岩土力学问题; ③深厚软土地基上建(构)造物

沉降变形规律与灾害控制; ④地震作用下土工建(构)造物破坏机理与灾害控制; ⑤高土石坝工程中的岩土力学问题; ⑥海洋土的工程及力学特性。

重要日期: ①返回会议回执截止日期: 2009 年 3 月 31 日; ②论文提交截止日期: 2009 年 5 月 30 日; ③会议报到日期: 2009 年 8 月 19 日; ④会议学术报告: 2009 年 8 月 20 日~22 日。

联系方式: “第四届全球华人岩土工程论坛”组委会, 湖北省武汉市黄浦大街 23 号, 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 电话: 027 82829818, 传真: 027 82926040, Email: liqingyun6396@126.com。

(第四届全球华人岩土工程论坛组委会 供稿)