

疏浚淤泥泡沫塑料颗粒轻质混合土的抗剪强度特性

朱 伟¹, 姬凤玲^{1, 2}, 马殿光³, 李明东¹

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 深圳大学 土木工程系, 广东 深圳 518060;

3. 交通部 天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 疏浚淤泥泡沫塑料颗粒轻质混合土是一种新型的轻质土工材料, 在轴向加载条件下, 轻质混合土试样内部微裂纹的发生是从 EPS 颗粒与固化土的结合面处开始的。随着水泥及 EPS 颗粒添加量的不同, 它的莫尔破坏包络线有折线型和直线型 2 种表现形式。与一般的土体不同的是, 其抗剪强度机理应考虑轻质混合土试样胶结结构的逐渐破损效应。

关键词: 土力学; 疏浚淤泥; 泡沫塑料颗粒轻质混合土; 轻质土工材料; 固化土; 聚苯乙烯泡沫塑料; 强度

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5721 - 06

SHEAR STRENGTH PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT BEAD-TREATED SOIL MADE FROM DREDGED SILT

ZHU Wei¹, JI Feng-ling^{1, 2}, MA Dian-guang³, LI Ming-dong¹

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Department of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

3. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Lightweight bead-treated soil made from dredged silt is a new type of lightweight geo-materials(LGM). The meso-cracks in lightweight bead-treated specimen are found to generate from the interface between expanded poly-styrene (EPS) beads and solidified soil particles. With the additive amounts of cement and beads of EPS, the Mohr-coulomb envelope curve of the lightweight bead-treated specimen has two types: folding line and straight line. Different from natural soils, the damage of cementation should be considered in the strength mechanics of lightweight bead-treated soil.

Key words: soil mechanics; dredged silt; bead-treated soil(BTS); lightweight geo-material (LGM); solidified silt; expanded poly styrol; strength

1 引言

疏浚淤泥泡沫塑料颗粒轻质混合土是一种具有高附加值的新型轻质土工材料^[1]。它是将疏浚淤泥作为原料土, 发泡聚苯乙烯泡沫塑料(expanded polystyrol, EPS)球粒(碎粒、片粒或废弃泡沫塑料)^[2~4]

作为轻质材料, 水泥、粉煤灰或石膏等材料作为固化材料, 三者是在搅拌机械中进行搅拌混合而制备出来的。它与一般的填土材料相比, 具有以下优点:

(1) 轻质、高强, 可根据具体工程需要来决定填土材料的密度、强度、压缩模量; (2) 具有快硬性, 可以缩短填土施工工期; (3) 减少地基处理费用, 节省投资; 能够大量处理废弃物(如疏浚淤泥、废弃

收稿日期: 2005 - 02 - 01; 修回日期: 2005 - 04 - 11

基金项目: 河海大学学生科技基金项目(2004 - 01)

作者简介: 朱 伟(1962 -), 男, 博士, 1997 于日本大学生产工学部土木工学科获博士学位, 现任博士生导师, 主要从事环境岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: weizhu@jlonline.com.

泡沫塑料、粉煤灰等),起到环境保护的作用等。正是由于轻质混合土的上述突出特点,在一些发达国家它已得到了深入研究和广泛应用^[5-6]。

我国对泡沫塑料颗粒轻质混合土的研究尚处于起步阶段。文[7,8]对以中砂作为原料土的轻质混合土试样,研究了 EPS 颗粒的形状对试样力学性能的影响及其轻质(密度)-高强(强度)-变形(压缩模量)间的相互关系,并对轻质混合土路堤和普通填土路堤的稳定安全系数和沉降量进行了比较。本文对疏浚淤泥泡沫塑料颗粒轻质混合土试样的细观变形特性、抗剪强度包络线进行了研究,并对其抗剪强度机理进行了初步探讨。

2 试验材料与试样制备

试验中所用疏浚淤泥取自广东省惠州市大亚湾石油化学工业区内,为典型海洋沉积淤泥,其基本参数如表 1 所示。所采用的发泡聚苯乙烯颗粒(EPS)为圆球状,粒径 2~3 mm, EPS 颗粒堆积体的密度 0.036 8 g/cm³,纯 EPS 颗粒的密度为 0.061 3 g/cm³。所采用的固化材料为“钟山牌”32.5R 普通硅酸盐水泥。

表 1 试验所用疏浚淤泥基本参数

Table 1 Basic parameters of dredged silt for the experiment

含水率 w/%	液限 ω _L /%	塑限 ω _P /%	塑性 指数 I _p /%	比重 G _s	容重 γ/(kN·m ⁻³)	孔隙比 e	pH	有机质 含量 /%
120	73	29	44	2.74	13.9	13.9	7.5	1.39

制备轻质混合土试样时,先按一定量取淤泥,按设计好的量加入水泥及 EPS 球粒,通过机械强制式拌和后,装入直径 3.91 cm,高 8 cm 的模具振动密实,置入标准养护箱中养护(温度(20±2)°C,湿度>90%),养护 24 h 脱模,再养护至设计龄期。图 1 为已制备好的不同 EPS 颗粒添加量的轻质混合土试样的断面图。文中水泥添加量是指 1 m³淤泥中的添加量,单位统一取 kg/m³。EPS 颗粒添加量是指 EPS 实体颗粒与淤泥的体积比。

3 试验方法

首先采用河海大学岩土工程研究所自行研制的“岩土微细结构光学测试系统”,在对轻质混合土试样进行无侧限抗压试验的同时,由 CCD 摄像机连续



图 1 轻质混合土试样

Fig.1 Specimens of BTS

拍摄经长距显微镜放大的的岩土微细结构照片。本次试验,所有图像的放大倍数为 30 倍。

参照国家《土工试验方法标准》(GB/T50123-99),三轴压缩试验在南京电力公司南京电力自动化设备厂所生产的 SJ-IA 型应变控制式常规三轴剪力仪上进行。将养护至 28 d 龄期的试样装入饱和器内,置于抽气缸内盖紧后抽气。当真空度接近一个大气压后,抽气 2 h 以上,抽气完成后,让试样在水中浸泡 24 h 以上。固结排水剪切试验的剪切应变速率为 0.015 mm/min,剪切中始终保持孔隙水压力为零,应变控制在 20% 以内。固结不排水剪的剪切应变速率为 0.072 mm/min,应变控制在 20% 以内。

4 试验结果

4.1 轻质混合土试样的细观破坏特性

图 2 为轻质混合土试样在单向加载条件下内部细观裂纹的产生、扩展情况。

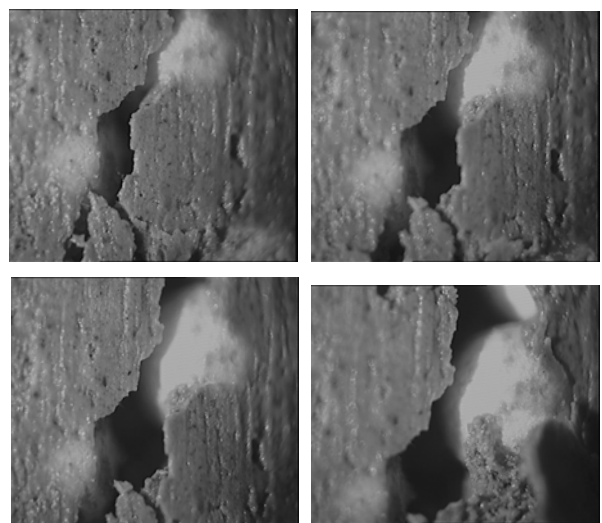


图 2 轻质混合土试样随荷载增加细观裂缝产生、扩展图像

Fig.2 Photos of meso-cracks generation and expansion with loading of the BTS specimens

从图 2 可以看出：(1) 轻质混合土试样剪切破坏时裂缝从 EPS 颗粒与固化土之间的界面产生；(2) 裂缝是沿 EPS 颗粒与固化土之间的界面扩展、延伸的；(3) EPS 颗粒本身并没有破坏；(4) 轻质混合土试样的破坏是一个逐步发展的过程。

此外，由于试样制备过程中不可避免地会使试样内部留有裂缝、孔洞，在试样养护期间，水泥水解、水化反应过程中会产生收缩，这也会在试样内部产生裂缝、孔洞。由于上述两方面原因而在试样内部产生的裂缝和孔洞，也是轻质混合土试样在受力时易发生应力集中而破坏的部位。

综上所述，轻质混合土细观变形破坏过程为：

(1) 在外荷载的作用下，试样内部的孔洞及 EPS 颗粒与固化土的结合面处是最先发生应力集中的部位，破坏微裂纹首先从这些部位产生，并开始沿孔洞及结合面端部向前伸展；(2) 随着外荷载的增大，试样内部的破坏过程将进入固化土区域；(3) 在逐步增大的外荷载作用下，当固化土局部区域内贯通的裂纹达到一定数量之时，试样最终发生整体破坏。

4.2 轻质混合土试样的抗剪强度包络线规律

不同配比的疏浚泥泡沫塑料轻质混合土试样的固结不排水剪试验的莫尔破坏包络线如图 3~6 所示。图中实线为总应力莫尔破坏包络线，虚线为有效应力莫尔破坏包络线。

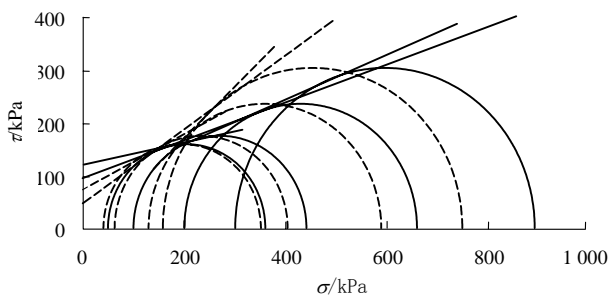


图 3 轻质混合土固结不排水剪强度包络线(水泥 100 kg/m³, EPS 颗粒 0.69)

Fig.3 Failure envelopes of BTS under consolidated undrained triaxial test (cement 100kg/m³, EPS 0.69)

图 3~6 表明不同配比的疏浚泥泡沫塑料轻质混合土试样的固结不排水剪试验的莫尔破坏包络线有两种表现形式：折线型和直线型。这是由轻质混合土试样的结构性所决定的。如图 3, 4 所示的结构性较强的试样，莫尔破坏包络线为折线型，当固结压力小于试样结构屈服应力，试样的胶结结构保

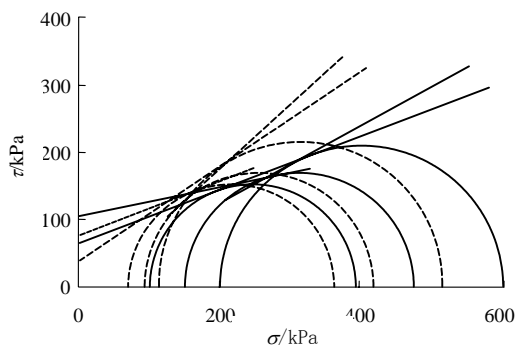


图 4 轻质混合土固结不排水剪强度包络线(水泥 75 kg/m³, EPS 颗粒 0.69)

Fig.4 Failure envelopes of BTS under consolidated undrained triaxial test (cement 75kg/m³, EPS 0.69)

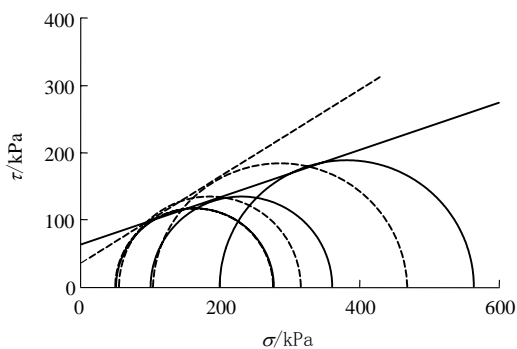


图 5 轻质混合土固结不排水剪强度包络线(水泥 75 kg/m³, EPS 颗粒 1.15)

Fig.5 Failure envelopes of BTS under consolidated undrained triaxial test (cement 75 kg/m³, EPS 1.15)

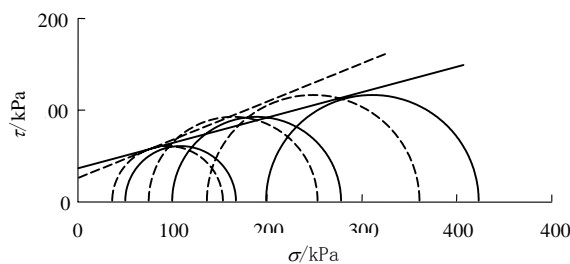


图 6 轻质混合土固结不排水剪强度包络线(水泥 75 kg/m³, EPS 颗粒 1.61)

Fig.6 Failure envelopes of BTS under consolidated undrained triaxial test (cement 75 kg/m³, EPS 1.61)

持比较好，试样的粘聚力较大，强度包络线平缓；当固结压力大于试样的屈服应力时，在固结压力及剪应力作用下，试样的结构破坏较大，其粘聚力减小，相应的团粒间的摩擦力开始充分发挥出来。故此时强度包络线较陡。图 5, 6 中的试样结构性较弱，试验所选择的固结压力大于或接近于试样的结构屈服应力，故其强度包络线是一条不通过原点的直线。

这与一般重塑土的强度包络线为一通过原点的直线是不相同的，这是因为轻质混合土试样屈服后整体试样的胶结结构并未破坏，还有剩余的胶结力存在的缘故。

不同配比疏浚淤泥泡沫塑料轻质混合土试样固结排水剪试验的莫尔破坏包络线如图 7~10 所示。图 7~10 表明不同配比的疏浚淤泥泡沫塑料轻质混合土试样的固结排水剪试验的莫尔破坏包络线也有两种表现形式：折线型和直线型。这与固结排水剪切试验的规律一致。对于图 7, 8 中的结构性较强的试样，试验所选择的固结压力小于试样的结构屈服应力，故其破坏包络线为折线型。图 9, 10 中的试样结构性较弱，试验所选择的固结压力大于或接近于试样的结构屈服应力，故其破坏包络线是一条不通过原点的直线。

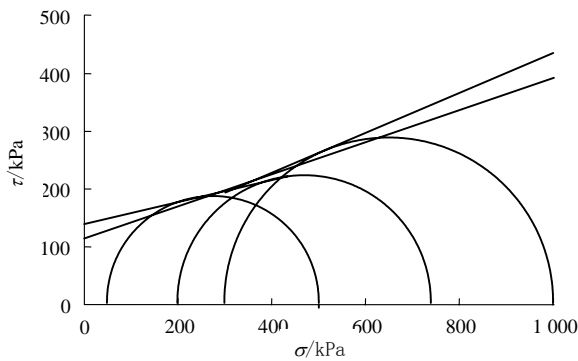


图 7 轻质混合土固结排水剪强度包络线(水泥 100 kg/m³, EPS 颗粒 0.69)

Fig.7 Failure envelopes of BTS under consolidated drained triaxial test (cement 100 kg/m³, EPS 0.69)

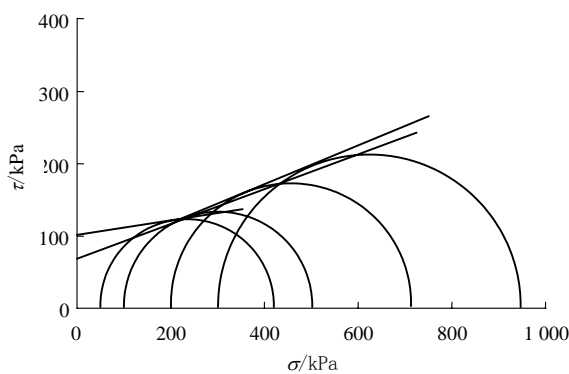


图 8 轻质混合土固结排水剪强度包络线(水泥 75 kg/m³, EPS 颗粒 0.69)

Fig.8 Failure envelopes of BTS under consolidated drained triaxial test (cement 75 kg/m³, EPS 0.69)

总而言之，轻质混合土试样的莫尔破坏包络线的形式是由轻质混合土试样的结构强度的大小及试

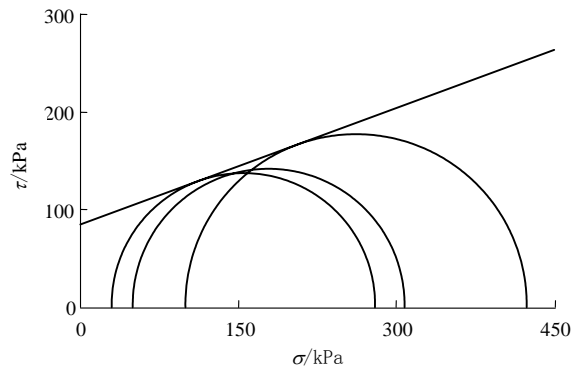


图 9 轻质混合土固结排水剪强度包络线(水泥 75 kg/m³, EPS 颗粒 1.15)

Fig.9 Failure envelope of BTS under consolidated drained triaxial test (cement 75 kg/m³, EPS 1.15)

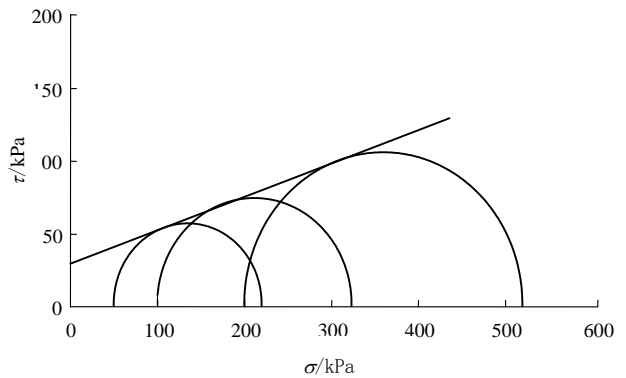


图 10 轻质混合土固结排水剪强度包络线(水泥 75 kg/m³, EPS 颗粒 1.61)

Fig.10 Failure envelope of BTS under consolidated drained triaxial test (cement 75 kg/m³, EPS 1.61)

验所选择的固结压力决定的：当固结压力大于结构屈服应力时，莫尔破坏包络线为直线。龚晓南、熊传祥等学者的研究表明，各种粘土都有结构性，其莫尔破坏包络线均为折线型，在土体结构屈服应力处有明显的转折^[9]。因此，轻质混合土试样的莫尔破坏包络线与一般结构性土体是一致的。

5 轻质混合土试样的抗剪强度机理

疏浚淤泥泡沫塑料轻质混合土试样由于其特殊的物质组成，决定了其结构性与大多数具有结构的天然土有所不同，它的高孔隙比主要是由于添加了 EPS 颗粒造成的，它的结构强度是由于所添加的固化材料(主要为水泥)的固化反应产生的，并且是随着试样的养护龄期而变化的。

轻质混合土试样的力学特性是试样胶结结构的

破坏、剪胀、颗粒(团粒)滑移三方面综合作用的结果。作为一种新型的土工材料,轻质混合土抗剪强度机理本质上与一般土体基本一致,同时又有其特性。综合轻质混合土微观及宏观力学特性,提出轻质混合土试样的抗剪强度机理如下:

轻质混合土强度 = 粘聚分量+摩擦分量±剪胀分量

采用图 11 来定性而形象地说明轻质混合土抗剪强度发展机理。

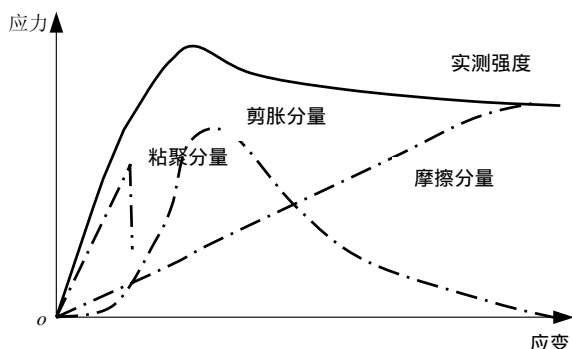


图 11 轻质混合土抗剪强度机理示意图

Fig.11 Sketch of strength mechanism of BTS

轻质混合土试样的强度机理与粘性土的强度机理有 3 点不同:

(1) 当轻质混合土试样开始受力时,首先产生作用的是试样的胶结结构,在较小的应变下,粘聚分量发挥到最大,随着荷载的增大,试样的胶结结构逐渐遭到破坏,粘聚分量开始逐渐减小。而粘性土的粘聚分量在较小的应变下,发挥到最大,当应变稍高一些就不产生粘聚分量了。

(2) 只有轻质混合土试样胶结结构开始破坏后,轻质混合土团粒之间才能产生剪胀、滑移,即轻质混合土的剪胀分量、摩擦分量是在一定的应变条件下才产生作用的。而粘性土的剪胀分量、摩擦分量在土体开始受力时就发挥作用了。

(3) 轻质混合土试样团粒之间的滑移产生的摩擦分量则随着应变的增加而增加,而这种增加趋势随着轻质混合土试样胶结结构的逐渐破损所导致的试样团粒尺寸的减小而减小,而粘性土的摩擦分量随着应变的增加而线性增加。

(4) 轻质混合土试样的强度机理与无粘性土的强度机理相比,同样也存在颗粒破碎和重排效应。随着外荷载的增大,轻质混合土试样某些部位应力

集中,试样内某些较软弱的胶结结构开始破坏,使试样内大的团粒变为小的团粒,并产生相对位移和重新排列。这一点与无粘性土的颗粒破碎和重排效应一致,即轻质混合土强度机理中的粘聚分量考虑了团粒的破碎和重排效应。

根据上述机理,当试样在无剪胀(零体变)破坏时(如固结不排水剪试验),轻质混合土的抗剪强度将只由摩擦分量和粘聚分量组成;当试样有体变发生时(固结排水剪试验),轻质混合土的抗剪强度将由粘聚分量、摩擦分量和剪胀分量三者组成。

6 结 论

(1) 在外荷载作用下,轻质混合土试样微裂纹的产生、扩展、延伸开始于轻质混合土试样内部的孔洞及 EPS 颗粒与固化土的结合面处。随着外荷载的增大,试样内部的破坏过程将进入固化土区域。

(2) 疏浚淤泥泡沫塑料轻质混合土试样的固结不排水剪试验、固结排水剪试验的莫尔破坏包络线都有两种表现形式:折线型和直线型。这是由轻质混合土试样的结构强度的大小及试验所选择的固结压力决定的。轻质混合土试样的莫尔破坏包络线与一般结构性土体是一致的。

(3) 轻质混合土试样强度是由粘聚分量、摩擦分量、剪胀分量组成,粘聚分量随着荷载的增大、试样的胶结结构的破坏而逐渐减小。粘聚分量中同时也考虑了试样内部团粒的破碎和重排效应。

参考文献(References):

- [1] Takashi T, Minsoo K. Use of lightweight treated soil method in seaport and airport construction project[A]. In: Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-materials[C]. Tokyo, Japan: [s. n.], 2002. 215 - 228.
- [2] 例えば, 浜野正光, 今井五郎, 等. 发泡ビーズを混合した軽量安定処理土の力学特性[A]. 見: 第 27 回土質工学研究発表会演講集[C]. [s. l.]: [s. n.], 1992. 2 515 - 2 518.
- [3] 加藤俊昭, 大野陸夫, 長坂勇二. 廢棄発泡スチロール破砕片を用いた軽量盛土の施工[A]. 見: 第 26 回土質工学研究発表会[C]. [s. l.]: [s. n.], 1991. 49 - 50.
- [4] 棚橋・陣野, 黒瀬・石崎, 杉山・茂山. 廢棄発泡スチロールの軽量积层材としての再利用に關する基礎的研究[A]. 見: 第 34 回地盤工学研究発表会講演集[C]. [s. l.]: [s. n.], 1999. 965 - 966.

- [5] 菊池嘉昭, 梅原靖文, 白井朗, 等. 浚渫土を用いた發泡ビーズを混合處理土の材料特性[A]. 見: 第 30 回土質工學研究發表會演講集[C]. [s. l.]: [s. n.], 1995. 2 549 - 2 550.
- [6] 土田孝, 横山佑二, 水上純一, 等. 港灣.海洋.環境における輕量混合處理土の用途と現地打設實驗[R]. [s. l.]: 港灣技術研究所報告, 1996.
- [7] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)的特性[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 245 - 248.(Ma Shidong. Properties of stabilized light soil(SLS) with expanded poly styrol[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 245 - 248.(in Chinese))
- [8] 马时冬. SLS 路堤稳定性及沉降分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 331 - 334.(Ma Shidong. Stability and settlement of embankment filled with stabilized light soil(SLS)[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 331 - 334.(in Chinese))
- [9] 熊传祥, 周建安, 龚晓南, 等. 软土结构性试验研究[J]. 工业建筑, 2002, 32(3): 35 - 37.(Xiong Chuanxiang, Zhou Jian'an, Gong Xiaonan, et al. Experimental study on soft clay structure property[J]. Industry Construction, 2002, 32(3): 35 - 37.(in Chinese))