

降低压实度标准的高液限土填筑方案

程涛^{1,2},洪宝宁^{1,2},程江涛³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 安徽省质量技术监督局, 安徽 合肥 211167)

摘要:针对高液限土填筑时质量难以达到规范要求的问题,以实际工程高液限土直接填筑方案为例,通过碾压试验、晾晒试验、承载比试验、压缩试验和快剪试验研究了压实度对高液限土各项物理力学性能的影响,分析了不同压实度下高液限土的沉降变形情况。结果表明:在相同条件下,含水率对压实度影响最大,碾压次数次之,高液限土类别最小;压实度的降低对土体的承载比、压缩性能、黏聚力和摩擦角均产生不利影响;通过自密沉降量严格控制不同填土高度时的填筑厚度,高液限土采取包盖法处理及降低压实度标准至88%后的直接填筑方案是可行的。

关键词:高液限土;压实度;自密沉降量;承载比;碾压遍数

中图分类号:TU431 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)04-0070-05

Filling scheme of high liquid limit soil by reducing standard of compaction degree//CHENG Tao^{1,2}, HONG Baoning^{1,2}, CHENG Jiangtao³ (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geotechnical and Embankment Engineer, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Anhui Bureau of Quality and Technical Hefei, 211167, China)

Abstract: It is difficult to meet the specification requirements of the high liquid limit soil filling quality. Based on the background of direct filling project scheme of high limit liquid soil, a series of indoor and field tests (i. e., compaction test, fast drying test, CBR test, compression test, and shear test) was carried out and the influence of compaction degree on various physical and mechanical properties of high liquid limit soil was studied. Additionally, the settlement deformation of high liquid limit soil under different compaction degree was analyzed. The main influence factors of compaction degree are water content, compaction times and the type of high liquid limit soil, the reduce of compaction degree caused the adverse effect on the value of CBR, compression performance, cohesive force and friction angle. After strictly control the thickness under the different filling height, adopt the method of tundish ladle and reduce the standard of compaction degree to 88%, directly filling scheme of high liquid limit soil is feasible.

Key words: high liquid limit soil; compaction degree; settlement by weight; CBR; compaction times

广东云罗高速公路沿线分布着大量的高液限土,其具有弱膨胀性、裂隙性和崩解性等特点,若不进行处理就直接填筑会造成承载力小、稳定性差、透水性差、不易压实、干时坚硬不易挖掘、毛细现象显著以及浸水后能较长时间保持水分等问题^[1]。将高液限土全部作弃方处理显然不经济,且对环境的影响较大,不符合基本国策;而掺料改良势必增加成本,且填筑的效果难以保证。因此有必要对直接填筑的高液限土的物理力学性质进行研究,通过必要的工程措施和施工工艺来确保其满足工程的长期耐久性及水稳定性,从而保证工程的质量^[2]。

JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》^[3]规定高液限土可以直接填筑路基。当采用高液限土直

接填筑路基时,应按照设计要求在高液限土下设置0.4 m厚砂砾垫层及0.4 m厚亚黏土或黏土封层,在其上方设置1.5 m厚粗粒土封层,并设1.0 m厚亚黏土或黏土包边。包边土和高液限土同时填筑、压实。研究表明:在汽车荷载作用下,路基表层受行车作用最大,随着路基深度增加,受力急剧减小,一般影响深度为1.0~2.0 m,重载汽车的影响深度可达2.9 m,故路基主要承受自身重力。由于高速公路建成后重载车辆较多,汽车荷载的影响深度按3.0 m来考虑。因此高液限土应直接填筑在路基表面3.0 m以下的下路堤层。

本文通过现场碾压试验、晾晒试验、承载比试验、压缩试验、快剪试验、碾压试验^[4]研究了高液限土的

基本物理力学性质及工程性质,并通过积分法分析了填筑后的总沉降量随填土高度及压缩层厚度的变化关系,以更好地预测施工后土体的不均匀变形情况,从而为高液限土的设计及施工提供借鉴作用。

1 试验土样

选取广东云罗高速公路沿线多组土样进行室内液塑限试验,根据细颗粒含量和塑性指数是否大于 $0.73w_L-20$)将土样进行分类^[5]。本文将高液限黏土表示为 G1,高液限粉土表示为 G2。

表 1 为高液限土物理力学性质指标,图 1 为高液限土颗粒级配分布情况。从表 1 及图 1 中可以看出,高液限土具有细颗粒含量高、液限大、承载比小、压缩系数大等特点,且 G1 的细颗粒含量、液限、塑性指数、承载比、压缩系数、最大干密度均大于 G2,而对于最优含水率 w_{opt} 和塑限,情况则相反。

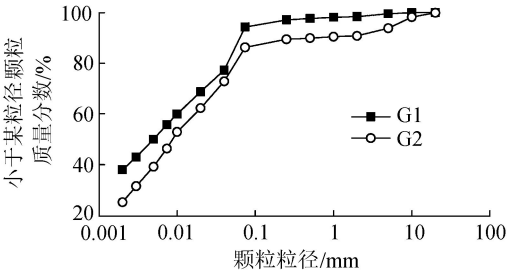


图 1 高液限土颗粒级配分布

2 试验研究

2.1 现场碾压试验

根据就近取材的原则,现场碾压试验土料分别为云罗高速 K27+300 和 K27+900 处的 G1 和 G2。由于碾压时的含水率对碾压效果影响较大,试验时按含水率分别为 w_{opt} 、 $w_{opt}+4\%$ 、 $w_{opt}+8\%$ 制备 3 组平行试验段;碾压机械采用 22 t 振动压路机;每层松铺厚度取为 35 cm。碾压工序为:静压 1 遍—振 2 遍—静压 n 遍—检测压实度(共碾压 9 遍)。分别在碾压 4、5、6、7、8、9 遍后测定试验段的压实度^[6],图 2 为试验段压实度与碾压次数的关系。

由图 2 可知:当含水率分别为 w_{opt} 、 $w_{opt}+4\%$ 、 $w_{opt}+8\%$ 时,高液限土所对应的最优碾压次数分别为 8、7、5,而 G1 的最大压实度分别为 93.6%、91.9%、90.1%;随着碾压次数的增加,压实度先大幅增大,后小幅减小,存在一个最大碾压次数,且最

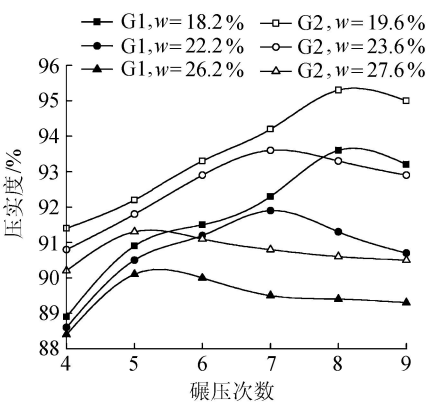


图 2 压实度与碾压次数的关系

优碾压次数随含水率的增加而逐渐减小,而最大压实度则随含水率的增大而减小;在相同的碾压次数下,G2 的压实度一般大于 G1^[7]。由此可见,碾压次数、含水率、高液限土类别均影响压实度,在条件相同的情况下,含水率对压实度影响最大,碾压次数次之,高液限土类别影响最小。JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》^[3] 规定路面 1.5 m 以下的压实度为 93%,即使在最佳碾压次数时,G1 的压实度均不能满足规范的最低要求;而 G2 在最优碾压次数时的压实度虽能满足要求,但其水稳定性较差,一般不能满足长期稳定性要求。因此,通过大量的专家讨论,确定高液限土直接填筑时的压实度控制标准为 88%,考虑到其水稳定性较差的特点,必须采取必要的工程措施及施工工艺。

2.2 现场晾晒试验

大量的现场实测数据表明广东地区高液限土的天然含水率普遍比最优含水率高 10% 以上,由于受现场条件限制,一般采取晾晒的办法来降低土体的含水率。广东地区地处亚热带地区,冬季天气干燥、降水少,但温度较夏季低,而夏季虽气温高,但降水多^[8],因此通过晾晒的方法很难在短时间内将高液限土含水率降到最优含水率的 $\pm 2\%$ 范围内。图 3 为 2011 年 7 月高液限土的含水率与晾晒天数的关系。

由图 3 可知,G1 和 G2 在晾晒 9 d 以后土的平均含水率分别为 25.2%、24.5%,仍高于最优含水率 5%,且易出现含水率反复。可见,采用晾晒的方法降低路基填料的含水率不理想。从施工的角度考虑,此法将大大延长施工工期,若期间遇到阴雨天气则更不理想。且本地区大部分高液限土塑限高于最优含水率,土体处于坚硬状态,难以压实;若加大压

表 1 高液限土物理力学性质指标

类别	天然含水率 /%	细颗粒含量 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	相对 密度	最优含水率 /%	最大干密度 /(g·m ⁻³)	承载比 /%	压缩系数 /MPa ⁻¹
G1	33.2	89.7	70.1	34.9	35	2.72	18.2	1.62	5.3	0.58
G2	34.1	84.2	65.4	39.5	26	2.70	19.6	1.47	3.0	0.54

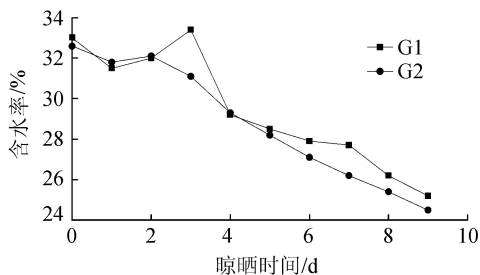


图3 含水率与晾晒时间的关系

实功,又有可能过压。因此,从施工实际及经济上考虑有必要对高液限土降低压实度标准填筑。

2.3 承载比试验

承载比试验是1928年美国加州公路局在进行沥青路面破坏调查时,为比较材料的强度而提出的,也是用以评价填料路用性能的最基本试验之一,其指标也是填料能否用作路基填料的重要评判指标之一^[9]。因此,降低高液限土压实度填筑,必须先测定降低压实度后的高液限土承载比。图4为承载比与压实度的关系。由图4可见,承载比随压实度的增大而增大,但应用于下路堤填筑时,承载比大于或等于3%即可。因此,单从承载比角度看,只要压实度大于88%,G2的承载比就能满足规范对下路堤的质量要求。但在相同压实度时不同类型土的承载比相差很大,G2的承载比明显大于G1,且G1的承载比一般小于3%,不能满足规范要求^[10]。

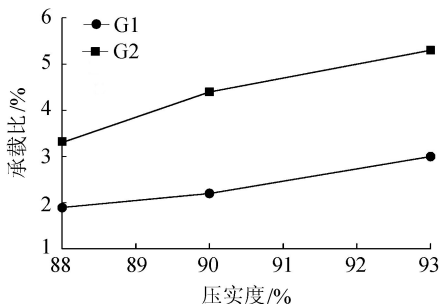


图4 承载比与压实度的关系

2.4 压缩试验

压缩系数是表征土体压缩性的重要指标之一,不同压实度时压缩系数可在一定程度上反映土体压缩性能,进而可以分析高液限土路堤的沉降变形情况,从而为降低压实度标准的高液限土填筑提供理论依据^[11]。图5为压缩系数与压实度的关系。从图5可见,压实度越大,压缩系数越小,且减小的幅度越大。当压实度从88%增加到90%时,G1的压缩系数从0.391减小到0.358,减小幅度相对较小;而当压实度从90%增加到93%时,G1的压缩系数从0.279减小到0.182时,减小的幅度非常大。而G1的压缩系数明显大于G2,因此填筑后的G1路堤沉降量将大于G2。因而提高高液限土的压实度会

明显减小土体的压缩系数,可减少不均匀沉降对路堤产生的不利影响。

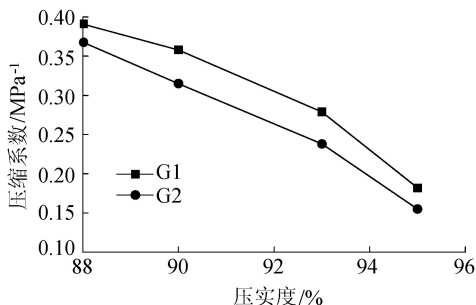


图5 压缩系数与压实度的关系

2.5 抗剪试验

抗剪强度是土的重要力学性质之一,可以通过不同压实度时的抗剪强度试验分析路堤的稳定性,进而为降低压实度标准的高液限土填筑提供依据。本文通过直接剪切试验分析土的抗剪强度。图6为黏聚力与压实度的关系。从图6中可以看出,该地区高液限土的黏聚力随压实度的减小而逐渐减小,但即使压实度减小到88%时,G2的黏聚力仍大于28kPa,使得土体获得相对高的抗剪强度;G1的黏聚力一般都大于G2,因为G1中亲水性矿物成分较多,且细颗粒含量较大,造成黏性土颗粒间的胶结力相对较大^[11]。

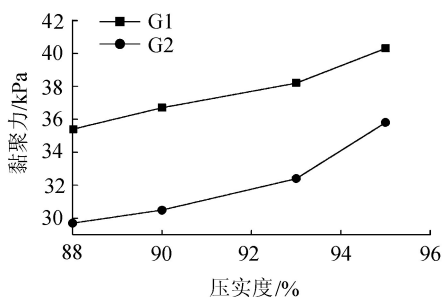


图6 黏聚力与压实度的关系

图7为摩擦角与压实度的关系。从图7中可以看出,随着压实度的减小,摩擦角逐渐减小,但即使压实度减小到88%时,G1的摩擦角仍达到15.3°,能有效阻止边坡产生失稳现象。G1的摩擦角小于G2,因为对于细颗粒含量较高的G1,细颗粒通过胶结作用堆积在一起,并附着在粗颗粒周围,当发生剪

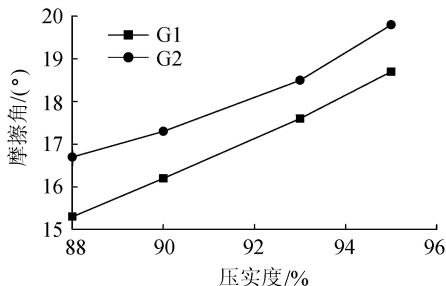


图7 摩擦角与压实度的关系

切位移时,黏性土颗粒的润滑作用得到发挥,因此 G1 的摩擦力较 G2 要小。因此高液限土经包盖法处理后直接填筑于路面 3.0 m 以下的下路堤,按 88% 的压实度标准控制的抗剪强度能满足路堤长期稳定性要求。

3 沉降分析

为分析压实度降低后路堤的自密沉降量情况,本文以 G1 为试验土样,基于固结试验中 4 种压实度(88%、90%、93%和96%)的压缩系数,采用积分算法计算不同填土高度、压缩层厚度、压实度时的路堤填土自密沉降量。根据高速公路一般路段工后沉降量不大于 30 cm 的规定来控制不同填土高度时的压缩层厚度,从而确定高液限土的填筑厚度。

为便于计算,将压缩层上部荷载等效为车辆荷载(25 kPa)+1 m 宽路面结构层荷载(20 kPa)+上层路堤荷载(20*H*₁,*H*₁为压缩层上部土体的厚度),记为 *p*_{等效}。根据条形基底竖向均布荷载作用模型,路面宽 24.5 m,路堤两侧坡比为 1 : 1.5。在计算压缩层内沿深度 *z* 取微小断面 *dz*,根据力的平衡原理,微小断面上部外荷载 *p*_n = 24.5*p*_{等效} / (24.5 + 2*z*),断面上部土体自重荷载 *σ* = 10*p**z*。断面所受总荷载 *p* = *p*_n + *σ*。根据实际情况,本次计算路堤填筑高度分别为 12 m、10 m、8 m、6 m,压缩层厚度分别为 10 m、8 m、6 m、4 m,有 10 种不同工况,见表 2。

根据地基分层总和法的计算原理,路堤自密沉降量 *S* 的计算公式为

$$S = \int_0^h \frac{a_v}{1 + e} p dz = \frac{a_v}{1 + e} \int_0^h (p_n + \sigma) dz =$$
$$\frac{a_v}{1 + e} \left(\int_0^h p_n dz + \int_0^h \sigma dz \right) =$$
$$\frac{a_v}{1 + e} \left\{ \frac{49}{6} p_{\text{等效}} [\ln(3h + 24.5) - \ln 24.5] + 5 \rho h^2 \right\} \quad (1)$$

表 3 填土自密沉降量计算结果

工况	G1 自密沉降量/cm				G2 自密沉降量/cm			
	压实度为 88%	压实度为 90%	压实度为 93%	压实度为 96%	压实度为 88%	压实度为 90%	压实度为 93%	压实度为 96%
1	28.59	27.09	22.28	15.28	25.58	22.69	18.06	12.38
2	25.31	23.89	19.54	13.33	22.97	20.30	16.07	10.96
3	21.41	20.15	16.40	11.14	19.68	17.33	13.66	9.27
4	16.44	15.42	12.50	8.46	15.26	13.40	10.52	7.11
5	20.73	19.62	16.09	11.02	18.66	16.53	13.13	8.98
6	17.72	16.70	13.62	9.27	16.20	14.29	11.28	7.67
7	13.77	12.93	10.49	7.10	12.74	11.20	8.80	5.96
8	14.04	13.25	10.84	7.40	12.73	11.25	8.91	6.08
9	11.10	10.43	8.48	5.75	10.23	9.00	7.09	4.80
10	8.43	7.94	6.47	4.40	7.72	6.80	5.37	3.65

表 2 填土自密沉降量计算工况

工况	填土高度/m	压缩层/m	车辆与结构层荷载/kPa	路堤荷载/kPa	上部荷载/kPa
1	12	10	45	40	85
2	12	8	45	80	125
3	12	6	45	120	165
4	12	4	45	160	205
5	10	8	45	40	85
6	10	6	45	80	125
7	10	4	45	120	165
8	8	6	45	40	85
9	8	4	45	80	125
10	6	4	45	40	85

式中:*e* 为土粒初始孔隙比;*a_v* 为压缩系数,MPa⁻¹; *ρ* 为土体密度,kg/m³; *h* 为计算压缩层厚度,m。

不同工况下、压实度分别为 88%、90%、93%、96% 时填土自密沉降量计算结果见表 3。由表 3 可知,在各种工况条件下,随着压实度的增加,土体的自密沉降量逐渐减小,且 G2 的自密沉降量明显小于 G1。且填土高度及压缩层厚度对沉降量均有较大影响。

对于 G1,在工况 3 条件下,压实度为 90% 时 G1 的自密沉降量为 20.15 cm,压实度为 93% 时的自密沉降量为 16.40 cm,考虑下层路基的变形量,自密沉降量将超过 30 cm,因此在填土高度为 12 m 时,G1 的填筑厚度应小于 4 m;在工况 6 条件下,压实度为 90% 时 G1 的自密沉降量为 16.70 cm,因此在填土高度为 10 m 时,G1 填筑厚度应小于 6 m;对于填筑高度小于 8 m 的路堤,G1 采取必要的工程措施填筑在 3.0 m 以下的下路堤即可。

对于 G2,在工况 2 条件下,压实度为 90% 时 G2 的自密沉降量为 20.30 cm,压实度为 93% 时的自密沉降量为 16.07 cm,考虑上层填土自密沉降量,自密沉降量将超过 30 cm,因此在填土高度为 12 m 时,G2 填筑厚度应小于 6 m;对于填筑高度小于 10 m 的路堤,G2 采取必要的工程措施填筑在 3.0 m 以下的下路堤即可。根据云罗高速实际工程,高液限土的填筑压

实度标准为 88%, G1 填筑于云罗高速 K27+100 处, 填土高度为 9.3 m, 其中 G1 填筑厚度为 2.8 m; 而 G2 填筑于云罗高速 K28+200 处, 填土高度为 10.4 m, 其中 G2 填筑厚度为 2.8 m; 采取河海大学自主研发的分层自密沉降仪开展观测工作, 其填土累计自密沉降量与时间的关系如图 8 所示。

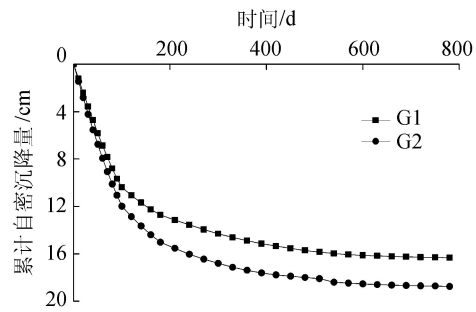


图 8 填土累计自密沉降量与时间的关系

由图 8 可知, 在不同时间段内填土累计自密沉降量随时间的增加而增大的幅度不同, 均存在明显拐点, 其拐点时间为 180 d; 当固结时间小于该拐点时, 累计自密沉降量增加幅度明显; 大于该拐点时, 累计自密沉降量增加幅度较小, 且 G1 和 G2 分别趋于 16 cm 和 19 cm 稳定值。故填土在施工期的自密沉降量已基本完成, 施工后自密沉降量满足规范对高速公路一般路段的要求。

基于上述分析, 通过自密沉降量严格控制不同填土高度时的填筑厚度, 降低压实度标准的高液限土填筑方案是可行的, 但考虑其水敏感性较强, 应采取包盖法的施工措施, 并兼顾其各项物理力学性能。

4 结 论

- a. 随着碾压次数的增加, 压实度并不是一直增大, 而是存在一个最大值, 所对应的最优碾压次数随含水率的增大而逐渐减小, 且压实度不能满足要求。
- b. 随着含水率的增大, 土体的最大压实度逐渐减小, 而广东地区很难通过晾晒办法来降低土体的含水率, 且压实度一般均小于 93%, 不能满足规范要求, 故高液限土填筑时的压实度标准应降低到 88%。
- c. 碾压次数、含水率、高液限土类别均影响填筑时高液限土压实度, 在条件相同的情况下, 含水率对压实度影响最大, 碾压次数次之, 高液限土类别最小。
- d. 压实度的降低对填筑时高液限土的承载比、压缩性能、黏聚力、摩擦角均产生不利影响, 但抗剪强度能满足路堤长期稳定性要求。
- e. 通过自密沉降量严格控制不同填土高度时的填筑厚度, 高液限土采取包盖法处理及降低压实度标准后直接填筑的方案是可行的, 能满足长期稳定性及变形要求, 可以推广到实际工程的施工与设计, 对

合理利用当地的既有资源具有巨大的实用价值。

参考文献:

[1] SAND U, SANDBERG J. Numerical prediction of the transport and pyrolysis in the interior and surrounding of dry and wet wood log[J]. Applied Energy, 2008, 85(12): 1208-1224.

[2] ESTABRAGH A R, PARSAEI B. Stabilised expansive soil behaviour during wetting and drying [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013, 14(4): 418-427.

[3] JTG F10—2006 公路路基施工技术规范[S].

[4] JTJ 051—1993 公路土工试验规程[S].

[5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

[6] 李书华. 高液限土填筑及压实控制标准研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[7] 程涛, 洪宝宁. 高液限土最佳掺水泥比的确定[J]. 四川大学学报, 2012, 44(2): 64-70. (CHENG Tao, HONG Baoning. Determine the best ratio of cement for improving high liquid limit soil[J]. Journal of Sichuan University, 2012, 44(2): 64-70. (in Chinese))

[8] 郭士升, 高萍. 基于层次分析法的高液限土改良方案的确定[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(6): 52-55. (GUO Shisheng, GAO Ping. Determine of improvement method for high liquid limit soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(6): 52-55. (in Chinese))

[9] 朱志铎, 郝建新, 黄立平. CBR 试验影响因素及在工程中应注意的几个问题[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1593-1596. (ZHU Zhiduo, HAO Jianxin, HUANG Liping. Influential factors in CBR test and several problems to be noticed in engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1593-1596. (in Chinese))

[10] 杨广庆, 高民欢, 张新宇. 高速公路路基填料承载比影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 97-100. (YANG Guangqing, GAO Minhuan, ZHANG Xinyu. Study on influence factors of California bearing ratio (CBR) of expressway subgrade materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 97-100. (in Chinese))

[11] 吴立坚, 钟发林. 高液限土的路用特性研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 193-195. (WU Lijian, ZHONG Falin. Study on road made by high liquid limit soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 193-195. (in Chinese))

[12] 程涛, 洪宝宁. 云罗高速公路沿线高液限土承载比影响因素分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 434-438. (CHENG Tao, HONG Baoning. Analysis of factors influencing California bearing ratio of high-liquid limit soil along Yunluo expressway [J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2013, 41(5): 434-438. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-05-30 编辑: 周红梅)