

文章编号: 0451-0712(2006)07-0029-06

中图分类号: U416.1; TU449

文献标识码: A

厦门集美大道高塑性粘土工程特性研究

颜永龙

(厦门市公路局 厦门市 361009)

摘 要: 通过对厦门集美大道高塑性粘土工程特性的室内试验分析研究, 得出高塑性粘土高稳定强度、低缩量的最佳状态, 使其在施工中得以实施, 并能满足高等级公路路基设计的要求。

关键词: 高塑性粘土; 工程特性分析; 击实功; 含水量; 最佳状态

厦门集美大道锦圆~兑山段路线总长 5.4 km, 路基填土总数量约为 120 万 m^3 , 其中 K2+500~K3+100 段开挖土方数量约为 24 万 m^3 。该路段挖方土体属于高塑性粘土, 在重型击实标准下, 其浸水 CBR 值不能满足 150 cm 以下路堤填料强度 CBR 值 > 3.0 的规定^[2]。本工程附近优质填筑土源较为紧缺, 且在福建省东南沿海及至全国许多地域高等级公路建设中频繁出现类似的高塑性粘土, 如简单地否定其在高等级公路路基填筑中的应用, 既浪费了资源又增加了投资, 因此决定对这段挖方土体开展专

题科学研究, 以探寻高塑性粘土稳定性差的本质原因。在此基础上, 对症下药, 探索其在不掺改良剂的前提下, 通过控制土的压实功、改进施工工艺, 解决稳定强度小这一影响其路用性能的关键技术问题。

1 研究的技术路线和依据

高塑性粘土是天然稠度小于 1.1、液限大于 40%、塑性指数大于 18 的湿性土、高液限土、红粘土、膨胀土等不稳定筑路材料的总称。

高塑性粘土的液限大、塑性指数高、水稳定性极

收稿日期: 2006-03-23

A Study on Mechanism of Karst Collapse of Subgrade Induced by Pumping and It's Control

XIE Zhong-qiu¹, WAN Zhi-qin², QIAN Hai-tao²

(1. School of Civil Engineering, CSFU, Changsha 410004, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing, China)

Abstract: The forming and expanding of a soil cavity are the base of the overburden karst collapse. For the purpose of the study of mechanism of karst collapse induced by pumping, the conditions of soil cavity expanding are analyzed by analytical method, and the concept of spalling force is put forward. The spalling force is the function of the time and space, the spalling forces caused by pumping water are different at different point around the soil cavity. When the soil cavity propagated outwards, the soil cavity become a accelerating development trend because of the increasing spalling forces. When pumping water makes the underground water drop, the spalling force increases. Therefore, the factors of pumping such as depression depth of water level and flow volume must be controlled in karstic area, so that the forming of soil cavity and the karst collapse of subgrade can be avoided.

Key words: soil cavity; condition of expanding; karst collapse; spalling force; analytical method

差,用这种土填筑的路堤,若施工处理不当,压实后即处于不稳定状态,粘土颗粒微观势能严重不平衡,极易受自然降水、地下水和地表水的影响,甚至强烈从大气中吸收水分,吸水后路基发生膨胀,密度下降,含水量升高,强度降低,在行车荷载和路堤自重压力作用下,路堤易发生不均匀沉降、横向位移,导致路面开裂,影响车辆正常高速行驶。正是高塑性粘土这种极差的水稳定性,影响了其在高等级公路路基填筑上的使用。

高塑性粘土在含水量上存在着最佳范围。在同一含水量下击实功同强度不成正比,即击实功大,强度未必高,这是因为对某一含水量来说,击实功过大会产生超压,破坏高塑性粘土的原状结构,导致强度下降,这一点在后面的室内试验结果中得以体现。所以,要想提高高塑性粘土的稳定强度,可以从击实功和含水量上进行探索。

综上所述,高塑性粘土存在这样一种状态,在该状态下其颗粒排列最优(击实功最佳),含水量最佳,稳定强度最大(即浸水 CBR 值最大),膨胀量最小,该状态我们称之为高塑性粘土的最佳状态,这也是我们解决问题的理论依据。室内以不同击实功和不同含水量分别制作试件,测其浸水 4 d 后的 CBR 值

和膨胀量,找出浸水 CBR 值最大、膨胀量较小的那一组试件的含水量和击实功,即为高塑性粘土击实的最佳含水量和最佳击实功,也就是高塑性粘土的最佳状态。

土类路用性能的好坏主要看其在公路运营期间是否能保持长久的稳定,低强度、高胀缩量都是公路路基病害的潜在因素,只要我们通过室内试验找出高塑性粘土高稳定强度、低缩量的最佳状态,并且在施工中使其得以实施,高塑性粘土的路用性能便会有很大程度的改善,并能满足高等级公路路基设计的要求。

2 室内研究成果

2.1 土体的主要物理性质

本项目取土料场地形为残坡积台地,位于 K2+500~K3+100 的西亭村附近。土体按地质成因因为花岗岩残坡积土,呈棕红夹灰白色,成分主要由粘粒和石英砂构成,其中砂含量为 42.05%,粉粒和粘粒含量为 57.95%,属于含砂高液限粘土(CHS)。

按照《公路土工试验规程》(JTJ 051-93)测得的主要物理性质指标及标准击实试验结果详见表 1。

表 1 高塑性粘土工程性质指标试验成果

天然 含水量/%	土粒 比重	液限 %	塑限 %	塑性 指数	轻型击实		重型击实		下列粒径颗粒含量/%		
					$\frac{\rho_{dL}}{g/cm^3}$	$\frac{w_L}{\%}$	$\frac{\rho_{dH}}{g/cm^3}$	$\frac{w_H}{\%}$	>2 mm	2~ 0.074 mm	<0.074 mm
20~26	2.65	53	28	25	1.65	18	1.80~1.84	12.6~15.6	8.31	33.74	57.95

注: ρ_{dH} 为重型击实最大干密度; w_H 为重型击实最佳含水量; ρ_{dL} 为轻型击实最大干密度; w_L 为轻型击实最佳含水量。

2.2 最佳压实状态探索试验成果

为了探索西亭高塑性粘土的压密机理与最佳压实状态,本项目在不同含水量、不同击实功下做了一系列 CBR 值对比试验。同时,为真实地模拟路堤施工时的现场工况,所有土样均采用湿法制样。现把试验结果综合分析如下。

2.2.1 高塑性粘土含水量、击实功与 CBR 值关系

本项目首先按重型 3×14 (层数 \times 次数,下同)、 3×22 、 3×41 、 3×60 、 3×79 和 3×98 等 6 种击实功组合,对不同含水量的高塑性粘土进行了系列化不浸水 CBR 值对比试验,试验成果详见表 2。根据不同含水量 w 、不同击实功 E_c (可用每层击数 n 表示)下的不浸水 CBR 试验结果,可绘制成图 1。由表 2 和图 1 可总结出如下规律。

(1) 在不浸水条件下高塑性粘土的强度均较大,

当含水量为 13.4% (接近重型标准下的最佳含水量) 时, CBR 值可达 32%。且含水量越小,高塑性粘土的最大强度 (CBR) 值越高。

(2) 这种土质在不同含水量下均有一个最大强度 (CBR) 值,含水量越小,最大强度越高。达到最大强度所需的击实功与含水量大致成反比,含水量越大,所需击实功越小。

(3) 在某一固定含水量下,击实功与对应的强度并不成正比,而是在某一击实功下有一个最大强度值,当大于或小于该击实功时,强度均会下降。这说明,对高塑性粘土而言,适度大小的外部作用功可以形成土的结构强度,但如外部作用功超过一定的限度,它就会使土体产生剪切破坏作用。这一对应最大强度的击实功即为该含水量下的最佳击实功。

上述规律提示:在高塑性粘土路堤碾压施工中,

表2 不浸水CBR值试验成果

平均含水量 $w/\%$	击实方式 (层数 \times 次数)	密度/(g/cm^3)		饱和度 $S_r/\%$	CBR 值/ $\%$	压实度/ $\%$		击实功 $E_c/(\text{kJ}/\text{m}^3)$
		湿	干			K_A	K_L	
13.4	3 \times 22	1.79	1.6	47	11.9	87	97	0.6×10^3
	3 \times 41	1.96	1.72	65.8	22	93.5	104.2	1.2×10^3
	3 \times 60	1.99	1.75	68.6	30.5	95.1	106.1	1.7×10^3
	3 \times 79	2.01	1.75	72.3	31.2	95.1	106.1	2.2×10^3
	3 \times 98	2.02	1.78	71.7	32.1	96.7	107.9	2.7×10^3
20.1	3 \times 22	2	1.66	89.6	15.2	90.2	100.6	0.6×10^3
	3 \times 41	2	1.66	89.6	14.8	90.2	100.6	1.2×10^3
	3 \times 60	2	1.68	86.1	16.5	91.3	101.8	1.7×10^3
	3 \times 79	2	1.66	88.1	16.4	90.2	100.6	2.2×10^3
	3 \times 98	2	1.68	85.9	15.9	91.3	101.8	2.7×10^3
23.3	3 \times 14	1.96	1.58	92.4	9.3	85.9	95.8	0.3×10^3
	3 \times 22	1.94	1.58	87.5	15	85.9	95.8	0.6×10^3
	3 \times 60	2	1.63	93.9	9.5	88.6	98.8	1.7×10^3
	3 \times 98	2.03	1.65	99.1	7.9	89.7	100	2.7×10^3

注:表中 K_A 为重型击实标准下的压实度; K_L 为轻型击实标准下的压实度。

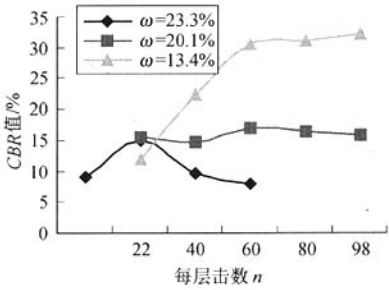


图1 不浸水时击实功与CBR值的关系曲线

应该尽量利用外部作用功的有利因素,减少由于超压产生的软弹、局部推剪等负面效应。

2.2.2 浸水CBR值试验的内在机理

试样浸水96 h的CBR试验值,从本质上反映的是路基填土在道路运行期受雨水入渗、浸泡等最不利条件下的土基稳定强度,它是评定土基长期稳定性的关键指标。浸泡96 h试样的饱和度一般可达75%~95%,见表3。

细粒土中的粉质土、某些黄土、南方的部分粘土(包括本项目的高塑性粘土),标准重型击实试件经96 h浸水后测定的CBR值通常在1%~3%之间,浸水强度低。这一室内试验结果与高等级公路路基的实际运行情况是一致的。

根据调查^[5],由于高等级公路路面的封闭作用,

路基、路面中聚积的水分得不到蒸发,即使施工时是干燥的路基,在使用过程中含水量也会迅速增大。对国内6条高速公路(广深、沪宁、石灵、淮宁、二汽高环、长农)的观测表明,通车1年后,路基含水量平均增加4.6%;高填路堤含水量增至塑限,稠度达1.0,路基已处于“中湿”状态。浸水CBR值试验是按浸水4昼夜作为设计状态,正是模拟了路基上述使用过程中所处的最不利状态,因此,用它来检测路基稳定强度是合理的。

2.2.3 高塑性粘土含水量与稳定强度的关系

西亭高塑性粘土湿法制件浸水96 h的CBR值试验结果详见表3。

根据图1分析,含水量越小,高塑性粘土的不浸水最大强度(CBR值)越高,但这是否表明高塑性粘土的稳定强度(浸水CBR值)也具有同样特性呢?按照表2与表3的成果,分别对接近重型标准下最佳含水量(13.4%与13.0%)的试件和接近天然含水量(23.3%与23.6%)的试件进行不浸水与浸水强度的对比(分别见图2和图3),可见接近重型标准下最佳含水量时的不浸水高强度是很不可靠的,浸水之后CBR值大幅下降到2.0%以下,完全无法满足下路堤CBR值>3.0%的强度要求。这是因为击实时,含水量低无疑会造成饱和度小(平均饱和度只有62.9%),浸水之后含水量增量很大,反映在其线膨胀率很大

表 3 浸水 CBR 值试验成果

平均含水量 $w/\%$	击实方式 (层数 \times 次数)	密度/(g/cm ³)		浸水前饱和度 $S_r/\%$	CBR 值/ $\%$	压实度/ $\%$		击实功 $E_c/(\text{kJ}/\text{m}^3)$
		湿	干			K_h	K_L	
13	3 \times 22	1.84	1.62	55.3	1.3	88	98.2	0.6×10^3
	3 \times 60	1.98	1.75	65.3	1.6	95.1	106.1	1.7×10^3
	3 \times 98	2.03	1.81	68.2	1.3	98.4	109.7	2.7×10^3
15.6	3 \times 22	1.89	1.64	63.9	1.7	89.1	99.4	0.6×10^3
	3 \times 60	2.02	1.75	77.8	1.9	95.1	106.1	1.7×10^3
	3 \times 98	2.04	1.76	81	2.4	95.7	106.7	2.7×10^3
17.5	3 \times 41	2.01	1.71	82.2	2.4	92.9	103.6	1.2×10^3
19.1	3 \times 22	1.96	1.65	79.5	2.3	89.7	100	0.6×10^3
	3 \times 41	1.99	1.64	89.1	2.7	89.1	99.4	1.2×10^3
	3 \times 60	2.03	1.7	88.9	3.1	92.4	103	1.7×10^3
	3 \times 98	2.03	1.71	87.8	3	92.9	103.6	2.7×10^3
22.2	3 \times 22	1.96	1.61	87.3	3.1	87.5	97.6	0.6×10^3
	3 \times 41	2.04	1.68	98.1	3.5	91.3	101.8	1.2×10^3
	3 \times 60	2.03	1.66	96.7	3.4	90.2	100.6	1.7×10^3
23.6	3 \times 22	1.95	1.57	91.7	3.2	85.3	95.2	0.6×10^3
	3 \times 41	1.99	1.6	95.7	3.3	87	97	1.2×10^3
	3 \times 60	1.98	1.61	92.2	3.5	87.5	97.6	1.7×10^3
	3 \times 98	1.98	1.61	92.8	3	87.5	97.6	2.7×10^3
24.9	3 \times 22	1.94	1.55	91.7	3	84.2	93.9	0.6×10^3
	3 \times 41	1.96	1.57	93.8	2.7	85.3	95.2	1.2×10^3
	3 \times 60	1.96	1.57	93.2	2.6	85.3	95.2	1.7×10^3

注:表中 K_h 为重型击实标准下的压实度; K_L 为轻型击实标准下的压实度。

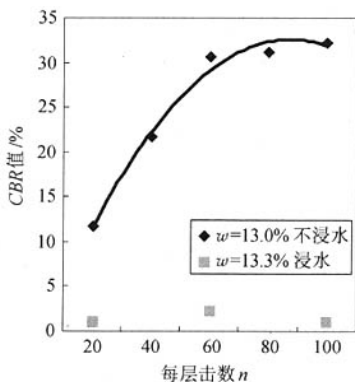


图 2 接近重型标准最佳含水量时的
浸水与不浸水强度对比

(平均值高达 9.1%), 远大于接近天然含水量试件的线膨胀率(平均值仅为 2.0%)。而含水量为 23.6% 试件, 因其初始饱和度大于 91%, 内部空隙小, 吸力值小, 浸水前后强度变化小, 其稳定强度值仍达到 3%

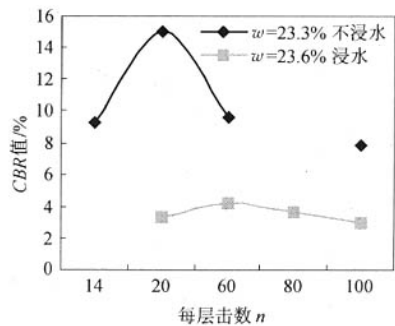


图 3 接近天然含水量时的浸水与不浸水强度对比

~3.5%, 远超过含水量为 13.0% 的稳定强度值。

上述结果充分说明, 高塑性粘土不同于其他土质, 其初期压实强度(不浸水 CBR 值)和稳定强度(浸水 CBR 值)并不在同一状态下达到最优。现行规范根据公路等级和路基土所处深度分别提出了压实度指标, 并强调采用重型击实标准, 其指导思想是路

基密实度越大,强度就越高。然而如前所述,由于高塑性粘土的强亲水性,按重型击实标准控制压实,虽然可以获得很大的初期强度,但这一强度并不稳定,一旦进入正常使用期,路基土会不可避免地吸收周围的水分而迅速丧失高强度;另外,高塑性粘土的天然含水量一般远大于重型击实的最佳含水量,工程实践中将其晾晒以接近重型击实标准下的最佳含水量往往也是很困难的。

因此,必须寻找合适的压实标准以及相应的压实工艺,使高塑性粘土在最佳状态下压实,压实后的路基土不仅具有较高的强度,而且有较好的强度稳定性,以满足工程设计和长期使用的要求。

2.2.4 高塑性粘土的最佳压实状态分析

(1)当含水量较小时(如13.0%,即接近重型标准下的最佳含水量),无论采用多大的击实功,其浸水CBR值均较小($<2.0\%$),而且其线膨胀率都很大(平均值高达9.1%),也即稳定性变差。这种状态对于要求极高的高等级公路路基来讲,可用性差。

(2)当含水量 $w=(19\sim25)\%$ 时,浸水CBR $>3\%$ 的范围较大。这说明在这一状态下易于采用适当的击实功使这种高塑性粘土用于高等级公路路基下路堤(1.5 m以下)的填筑。

为了深入分析在可用含水量范围($w=19\%\sim25\%$)内相应的最佳击实功大小,可将表3数据绘制成一定击实功下的 $w\sim CBR$ 值关系曲线,如图4~图7所示。可见,在一定击实功下的 $w\sim CBR$ 值呈近似的抛物线关系,其CBR值有一个峰值,说明它在某一特定的含水量下达到最优(即最大)。这与沪杭高速公路(上海段)填料的CBR值特性是一致的^[4]。综合分析这4个图,可以得出室内试验最佳压实状态时的量化指标,如表4所示。

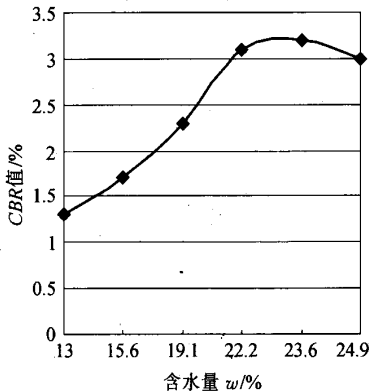


图4 3×22 击实功下 $\omega\sim CBR$ 值关系

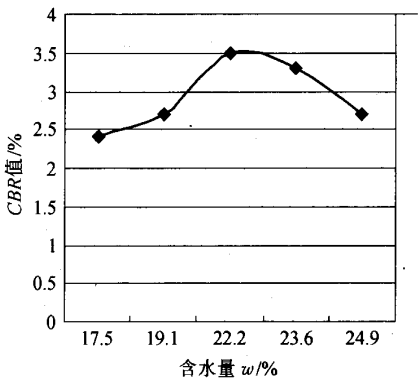


图5 3×41 击实功下 $\omega\sim CBR$ 值关系

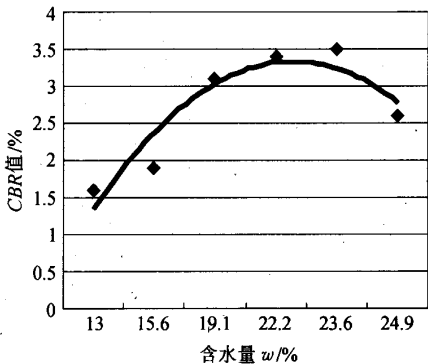


图6 3×60 击实功下 $\omega\sim CBR$ 值关系

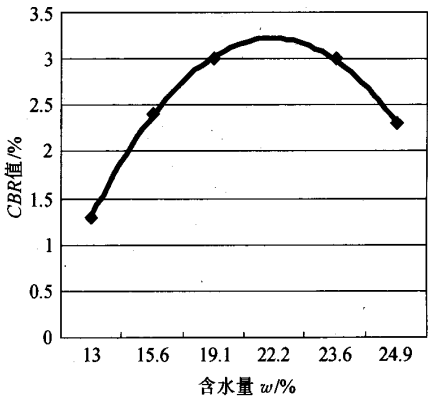


图7 3×98 击实功下 $\omega\sim CBR$ 值关系

根据表4,至少能得出以下2个结论。

表4 室内击实试验最佳压实状态的量化指标

击实功大小(重型, 层数×次数)	3×22	3×41	3×60	3×98
CBR 值 $>3\%$ 时的含 水量范围 $w/\%$	2.17~ 25.0	20.0~ 24.4	19.0~ 24.3	18.0~ 23.0

(1)随着最佳压实状态下特定含水量的逐渐增大,所采用的击实功宜相应减小。

(2)施工含水量 $w=21.7\%\sim 25.0\%$ 时用重型 3×22 击实功、施工含水量 $w=20.0\%\sim 24.4\%$ 时用重型 3×41 击实功、施工含水量 $w=19.0\%\sim 24.3\%$ 时用重型 3×98 击实功击实的试件都能得到 CBR 值 $>3\%$ 的稳定强度,能满足下路堤的强度要求。这就是西亭高塑性粘土的最佳压实范围。这也说明,这种土质通过含水量和击实功的适当控制,完全可用于拟建道路的下路堤填筑。

2.3 确定最佳压实状态的技术路线

根据以上分析结果,可总结出确定高塑性粘土最佳压实状态的技术路线如下。

(1)在稠度为 $1.0\sim 1.3$ 范围内,用湿法对高塑性粘土制备不同含水量的系列土样,相邻两组土样的含水量差以 2% 为宜。

(2)进行不同含水量、不同击实功下的 CBR 值浸水前、后系列化试验,对比分析浸水前后土体的强度、变形等特性。

(3)绘制出每一击实功下的浸水 $w\sim CBR$ 值关系曲线,并依据这些曲线判定浸水 CBR 值 $>3\%$ 或浸水 CBR 值 $>4\%$ 的含水量范围,作为现场用土的含水量范围。

(4)通过现场施工工艺试验,确定合适的压实机

具、碾压方式和碾压遍数等碾压参数,使路基土达到最佳压实状态。施工中要求压实度等指标满足相关控制标准,且压实后的路基表面平整密实,无局部推剪、鼓起等现象。

3 结论和建议

经室内试验分析,厦门集美大道锦圆~兑山段西亭高塑性粘土存在最佳压实状态。在该状态下,这种土体能满足下路堤的稳定强度要求(浸水 CBR 值 $>3\%$),完全可用于本项目下路堤(路床顶面以下深度 $>1.5\text{ m}$)的填筑工程。建议施工时做好各项检测工作,以全面提高集美大道高塑性粘土路堤的填筑质量。

参考文献:

- [1] JTG F10—200X,公路路基施工技术规范(送审稿)[S].
- [2] JTG D30—2004,公路路基设计规范[S].
- [3] 沙庆林.公路压实与压实标准(第三版)[M].人民交通出版社,1999.
- [4] 张奎鸿,等.沪杭调整公路(上海段)路堤材料 CBR 值以及相关因素研究[A].沪杭高速公路(上海段)论文集[C].1999.
- [5] 王革,孙国杰,等.浸水 CBR 试验检测路基承载力的探讨[J].山西建筑,2003,(4).

Research on Characteristics of High Plastic Clay Project of Jimei Artery in Xiamen City

YAN Yong-long

(Xiamen Bureau of Highway, Xiamen 361009, China)

Abstract: An optimal state of its highly stabilized intensity and low shrinkage of the high plastic clay is obtained through the indoor experimental research on the characteristics of the high liquid-limit clay project of Jimei Artery in Xiamen City, which can be applied to the construction and meet the criteria of the design of expressway subgrade.

Key words: high plastic clay; analysis of project characteristics; compactive effort; water content; optimal state