



高坡缕石含量灰岩回填料工程适宜性

李松斌¹, 陈胜², 梁小丛²

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300;

2. 中交四航工程研究院有限公司 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 室内试验表明, 多哈新港码头灰岩回填料存在较高含量的坡缕石矿物, 具有一定的膨胀性和分散性, 且不能同时满足细粒含量小于15%、液限和塑性指数分别低于65%和35%的设计要求, 在技术规格书中属于不合格回填料。为合理利用这部分港池开挖料、减少弃土含量, 重新提出回填料碾压处理后孔隙率应小于10%、且浸水饱和后体积变化量不应超过回填厚度1%的要求。通过对回填料试样进行筛分和液塑限试验、土的颗粒密度试验、室内击实试验、X射线衍射试验、膨胀率室内试验, 建立了高坡缕石灰岩回填料膨胀性与细粒含量关系式, 得出细粒含量小于45%的回填料能够满足工程使用的结论, 并由室外大型浸水模型试验进行验证。但当细颗粒含量在20%~40%回填料使用时, 还应考虑黏土矿物分散性影响。

关键词: 坡缕石; 回填料; 孔隙率; 膨胀性

中图分类号: TU 52

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0154-06

Suitability study on filling material of limestone with high content of palygorskite

LI Song-bin¹, CHEN Sheng², LIANG Xiao-cong²

(1. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China;

2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The laboratory test reveals that the excavated rock materials with high content of palygorskite has potential problems with swelling and dispersion in New Doha port project. Most of the filling materials do not comply with the accepted criteria in specification and shall be considered as unsuitable filling materials. As per specification, the general reclamation fill shall have fine contents of less than 15% with a liquid limit not exceeding 65% and a plasticity index not exceeding 35%. To make full use of these materials and reduce the amount of surplus soil, the EDC has provided new criteria for the unsuitable material based on the structural function on the reclamation surface, i. e. the air void content shall be less than 10% after ground improvement and the volume change shall be less than 1% of the filling thickness. A series of laboratory test comprising particle size distribution test, hydrometer liquid and plastic limits test, swelling test and X-ray diffraction test etc. were scheduled and carried out by local laboratory to verify whether this new criteria has been met for unsuitable filling material. And a correlation has been built between the swelling and fine content. The test result indicated that the unsuitable fill material with fine content less than 45% can be used as general fill material and has been demonstrated by a large scale flooded embankment test. However, the prevention from dispersion should be considered when the filling material with fine content between 20% ~ 45% is used. The research may serve as reference for similar projects in the future.

Keywords: palygorskite; filling material; air void; swelling

收稿日期: 2015-10-19

作者简介: 李松斌 (1976—), 男, 高级工程师, 从事港口工程技术管理工作。

在多哈新港码头的场地地层中,基岩为第三系 SIMSIMA 灰岩。SIMSIMA 灰岩属于碎屑岩类,填隙物由粉土、黏土及半胶结的泥质粉砂岩组成。在港池基岩的开挖过程中,按业主要求对开挖料进行破碎、分类,将满足回填要求的开挖料作为将来码头其他区域的回填料使用。在技术规格书中,合格回填料的要求是细粒(粒径小于 0.063 mm)含量小于 15%,液限不超过 65%,塑性指数不超过 35。在开挖料的室内试验中发现,有很大一部分试样的细粒含量超过 15% 并且液塑性指数偏高,不能满足回填料的要求。X 射线衍射试验发现开挖料中黏土的主要矿物成分为坡缕石,具有一定的膨胀性与分散性。为了更加合理利用这部分港池开挖料,依据回填区上部结构功能需求提出了新的回填料合格标准:

- 1) 回填料在回填并碾压处理后,孔隙率小于 10% ;
- 2) 压实的回填土层在浸水饱和后体积变化量不超过回填土层厚度的 1% 。

为了分析和判断这部分港池开挖料的工程特性能否满足回填料功能使用,需对回填料取样进行一系列的室内试验和室外大型浸没堆载试验研究。

现场主要通过土的颗分试验、液塑限试验及 X 射线衍射试验分析不合格回填料的颗粒级配、液塑性指数及矿物成分,定性判别开挖料的岩土特性;并利用土的颗粒密度试验、含水率试验、室内击实试验分析回填料在自然状态下压实性;同时通过室内膨胀率试验与室外大型浸水模型试验,分析回填料在浸水饱和后膨胀性。为大面积回填施工工程的回填料工程特性研究提供一定借鉴意义。

1 回填料颗粒组成与矿物成份

1.1 细粒含量与黏粒含量

现场取 21 组试样分别进行筛分试验和比重计试验,获得土样的细粒(粒径小于 0.063 mm)含量及黏粒(粒径小于 0.002 mm)含量,见图 1。

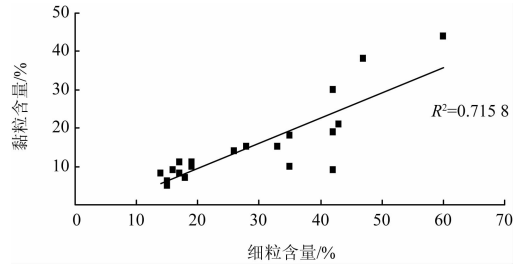


图1 试样的细粒含量与黏粒含量

从图 1 可得:试样中细粒含量最高达到 60%,最低为 14%,细粒含量小于 45% 的试样占总数的 90% 以上;试样中黏粒含量最高为 44%、最低为 7%,含量小于 21% 的试样占总数的 85% 以上;大多数试样的黏粒含量随着细粒含量的增加而增加,趋势线可以反映出大多数试样的细粒土与黏粒土之间的关系。

1.2 细粒土液塑限

如图 2 所示,各试样的液性指数和塑性指数值总体较高,液限全部大于 60%,塑性指数除 1 个试样为 31 外全部大于 35。9 个试样中,6 个试样点分布在 A 线以上,土类判别为黏土;1 个试样点在 A 线以下,土类判别为粉土;另外两个点在 A 线上,其土类介于粉土与黏土之间。因此,该回填料的黏粒含量均较高,其对应的液性指数和塑性指数值偏高,试样具有一定的分散性和膨胀性等工程特性。

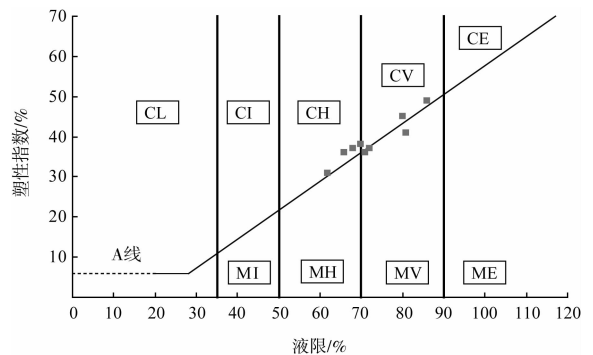
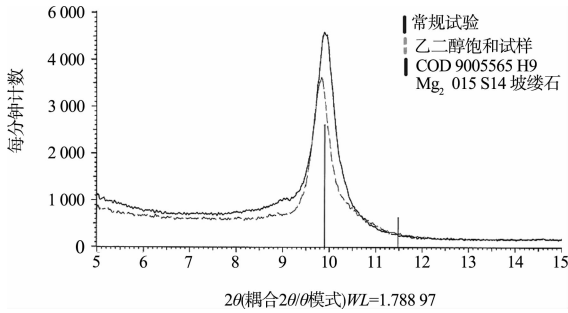


图2 Casagrande 塑性指数

1.3 黏土的矿物成分

土体遇水后的分散性与膨胀性直接与黏土矿物成分相关,通过确定黏土矿物成分来分析不合格料在浸水条件下是否会发生较大体积变

化是重要的室内判别方法。取开挖料的典型试样进行 X 射线衍射试验，试验的结果见图 3。



注：2θ 为衍射角；2θ - θ 联动模式即固定发射器使样品转 θ，相应接收器转 2θ 角。

图 3 不合格回填料黏土 X 射线衍射试验结果

X 射线衍射试验结果表明回填料中黏粒矿物的主要成分为坡缕石。坡缕石矿物具有特殊的纤维状结构，在遇水时，由于水和黏粒交界面上水分子间具有的吸附力使得黏土纤维相互排斥，因此具备一定的膨胀性和分散性。坡缕石黏土在工程活动等原因扰动后具有很强的吸水性，从而可能会导致土体分散、软化和膨胀。

2 回填料压实性

孔隙率指标常用于土体的压实性，国内外大量的研究^[1]表明：一般将孔隙率等于 10% 作为土体是否已达到压实状态的界限。孔隙率计算公式为：

$$N_a = \left\{ 1 - \frac{\rho_{dry}}{\rho_w} \left(\frac{1}{G_s} + w \right) \right\} \times 100\% \quad (1)$$

式中： N_a 为孔隙率； ρ_w 为水的密度； ρ_{dry} 为土的干密度； G_s 为土粒比重； w 为含水率。

从式(1)可知：在同种土中，不同试样的土粒比重与水的密度均一样，因此孔隙率指标由土的干密度与含水率两项参数确定。最大干密度随着含水率的增加而减小，在含水率增加、最大干密度减小的情况下，孔隙率可能会随着含水率的增大而减小。

本文研究回填料在碾压后是否可以满足孔隙率等于 10%，由于现场施工中含水率的控制标准一般小于最优含水率，因此首先对回填料在室内极限状态下即最优含水率和最大干密度状态下的

孔隙率进行分析。典型试样的室内试验结果及孔隙率见表 1。

表 1 土样室内压实试验结果及孔隙率

样品	最优含水率/ %	最大干密度/ (g/cm ³)	土粒密度/ (g/cm ³)	孔隙率/ %
A1	19	1.64	2.53	4.0
A2	18	1.68	2.47	1.7
A3	14	1.82	2.47	0.8
A4	16	1.84	2.67	1.6
A5	15	1.83	2.55	0.8
A6	12	1.94	2.71	5.1
A7	13	1.95	2.65	1.1
A9	12	1.91	2.55	1.4

从表 1 中可知，在达到最优含水率时，试样压实后的孔隙率均小于 10%，因此从理论上可认为回填料在合理的碾压施工下可以满足孔隙率小于 10% 的要求。

3 回填料膨胀性

由国外文献研究得知^[2]，一般回填料的稳定性要求其体积变化率不应大于 1%，即回填料浸水饱和后产生膨胀量不大于其回填厚度的 1% 即可认为是稳定的。

3.1 回填料室内膨胀性试验

在室内膨胀性研究中，进行了以下两种室内试验：1) 土样进行室内击实，到 95% 压实度后，在固结仪中进行自由膨胀率试验，试验中竖向荷载为 1 kPa (顶部透水石重度)；2) 土样进行室内击实到 95% 压实度后，在 CBR 试模内进行膨胀试验，试验中竖向加载为 45 kPa (试验总荷载)。试验结果见表 2。土样的两种膨胀率试验由于试验方法的不同出现不同的膨胀率值，两种膨胀率值之间的关系见图 4。

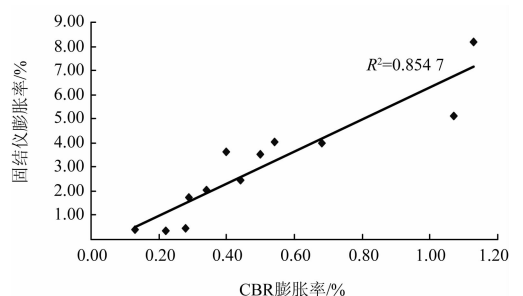


图 4 CBR 膨胀率与固结仪膨胀率关系

表2 室内膨胀率试验

样品编号	细粒含量/%	CBR 膨胀率/%	固结仪膨胀率/%
A10	18	0.44	2.45
A11	15	0.29	1.73
A12	17	0.50	3.52
A13	19	0.34	2.04
A14	17	0.28	0.47
A15	16	0.22	0.34
A16	47	1.07	5.11
A17	42	0.68	4.00
A18	33	0.40	3.65
A19	60	1.13	8.18
A20	42	0.54	4.05
A21	25	0.13	0.41

从图4可知, 趋势线对85%的试样有效, 这说明了两种膨胀率具有很强的相关性, 从而可认为采用室内膨胀试验对开挖料的膨胀性进行评估的方法较为合理。

CBR 试模的尺寸相比固结仪金属环要大, 而试样越大越具有代表性, 因此 CBR 膨胀率更加接近填土在压实并浸水后的真实膨胀率。

黏土成分是不合格料在泡水后发生膨胀竖向荷载的主要原因, 而细粒土与黏土之间很强的相关性(图2)使回填料中的细粒土含量可以与开挖料的膨胀性建立关系。CBR 膨胀率与细粒含量的关系见图5。

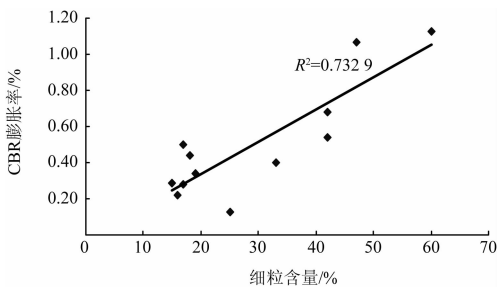


图5 细粒含量与 CBR 膨胀率关系

从细粒土与 CBR 膨胀率的关系可以得出以下结论: 1) 细粒土与 CBR 膨胀率具有较好的相关性, 超过70%的试样可以适用于图中的趋势线; 2) 细粒含量大于45%的试样浸水膨胀后的体积变

化率大于1%; 3) 细粒含量小于20%的试样浸水膨胀后的体积变化率小于0.5%。

3.2 回填料室外大型浸水模型试验

由于室内试验是在较为理想的条件下进行, 与实际的工程条件存在一定的偏差, 且试验样品尺寸相对较小。为了进一步验证回填料的浸水膨胀性, 现场进行了大型浸水模型试验^[3-4]。

大型浸水模型见图6, 为了进一步验证不同细颗粒含量浸水膨胀性, 该模型主要选取两组不同回填料进行碾压组成。一组为细颗粒含量小于20%, 另外一组为细颗粒含量35%~45%。模型试验尺寸为20 m × 20 m × 1 m。每组回填料各布置6个监测点, 其中监测点 E1 ~ E4(顶部)、G1 ~ G2(底部)为细颗粒含量小于20%一半模型; 监测点 E5 ~ E8(顶部)、G3 ~ G4(底部)为细颗粒含量为35%~45%另一半模型。

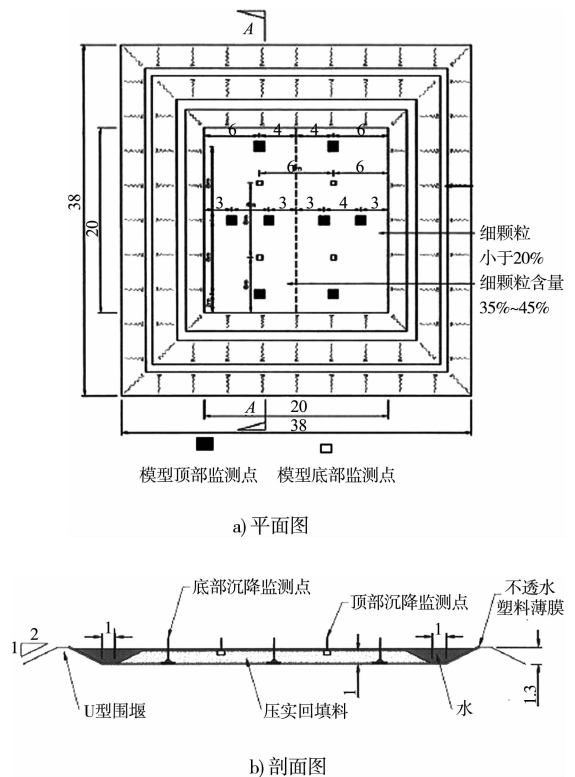
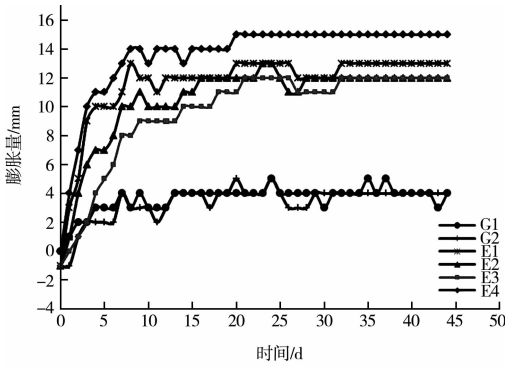
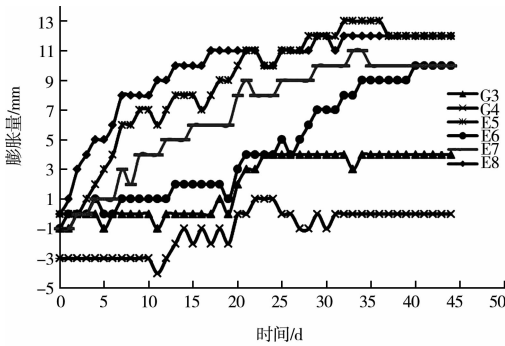


图6 大型浸水模型(单位: m)

模型试验共进行了44 d, 沉降曲线见图7, 由图可知, 所有监测点膨胀量均已达到稳定。



a) 含量小于20%



b) 含量35%~45%

图7 细颗粒膨胀曲线

由上述两组不同细颗粒含量模型试验结果得到的各个监测点位移结果见表3。

表3 监测点位移

细颗粒含量	监测点	监测点位移	位移均值/mm	平均膨胀量/mm
< 20%	E1	13	13	9
	E2	12		
	E3	12		
	E4	15		
	G1	4	4	
	G2	4		
35% ~ 45%	E5	12	11	9
	E6	10		
	E7	10		
	E8	12		
	G3	4	2	
	G4	0		

由表3可知，不同细颗粒含量模型分组平均膨胀量差别不大，约为9 mm，小于回填厚度1%，满足回填料稳定性要求。理论上，细颗粒含量越高，对应的黏土颗粒含量愈高，意味土体

膨胀性能越大，但实际土体的最终膨胀量主要取决于土体中具有—定膨胀性能的黏土矿物含量高低。经现场取样验证分析，对于细颗粒含量小于20%区域，局部土体可塑性相对细颗粒含量为35%~45%区域高，由此分析可知，这主要是导致两组不同细颗粒含量模型最终膨胀量比较相近的原因。

4 回填料分散性控制措施

尽管对于细颗粒含量小于45%回填料，其浸水后体积变化率能满足工程要求，但对于细颗粒含量大于20%的回填料，其作为回填使用时，还应考虑由于黏土矿物含量较高而导致的分散性和水溶性。

黏土的分散性或水溶性会导致黏土颗粒的流失，是土体体积发生变化的主要原因之一。填料中的砾石或者更大粒径的颗粒在堆填过程中会形成良好通道，为黏土颗粒分散后的流动形成一定的条件，回填料中不同细粒含量造成分散性不同。细粒含量太高，则容易造成体积变化率过大、不能满足使用要求，细粒含量太低，则由于黏粒含量太少分散性难以体现。根据现场施工经验得知，当细粒含量在20%~45%，其分散性作用相对更为显著。而在回填之后，表层再回填—层砂，砂粒可以作为类似筛子的作用限制溶解的黏粒发生迁移，并能有效包裹住黏粒，则黏土矿物的分散作用可以被有效地限制。因此在使用细颗粒含量在20%~45%的回填料时，应在该层的顶部再回填—层砂层(如1 m厚细粒含量少于20%的砂料)，能有效地降低因黏土分散性而造成的土体体积变化的风险。

5 结语

- 1) 当采用高坡缕石含量的灰岩作为回填料使用时，可以满足孔隙率小于10%工程碾压要求。
- 2) 回填料细粒含量小于45%可满足体积变化率小于1%要求；但采用细粒含量为20%~45%

的开挖料作为回填料使用时, 应采取一定措施避免因黏土矿物含量过高造成的表层土的分散性。

3) SIMMA 灰岩随着深度变化可能会出现不同的岩性, 导致一定深度以下开挖料的工程性质发生变化, 同时现有回填料的某些统计数据的相关性在 70% 左右, 说明了有接近 30% 左右的样品不适用于目前的评价方法。因此, 依据细粒含量评价回填料膨胀性具有一定的局限性。

4) 土体膨胀的宏观功能特性不能由室内试验的膨胀率完全表示。为查明回填料是否能满足土体浸水后体积变化程度的要求, 还应进行大型浸水模型试验。

5) 试验研究成果可以作为卡塔尔及其他波斯湾地区 SIMMA 灰岩开挖料填土工程性质的参照, 并为卡塔尔及其他波斯湾地区码头回填及地基处

理设计提供参考性基础资料。试验研究方法可为其他类似填海工程提供借鉴。

参考文献:

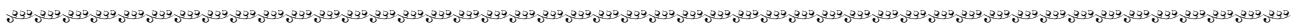
[1] Macklin S, Gaba A, Macklin S, et al. Engineering in the Barzaman formation, coastal Dubai, UAE[J]. Civil Engineers, 2009, 162(6): 2009: 18-24.

[2] Simpson B, Blower T, Craig R N, et al. The Engineering Implications of Rising Groundwater Levels in the Deep Aquifer Beneath[M]. UK: Ciria Special Publication, 1989.

[3] Brocklebank H T, Sharp P. Study of carbonate sedimentary rocks as engineered dry fills[J]. Geotechnical Engineering, 2011, 164(2): 127-138.

[4] Mesri G, Pakbaz M C, Cepeda-Diaz A F. Meaning, measurement and field application of swelling pressure of clay shales[J]. Geotechnique, 1994, 44(1): 129-145.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 153 页)

参考文献:

[1] Fellenius W. Calculation of the stability of earth dams[C]// Transaction of 2nd Congress on Large Dams. USA: ASCE, 1936: 445-462.

[2] Bailey W A, J T Christian. A Problem Oriented Language for Slope Stability Analysis [M]. England: MIT Soil Mechanics Publication, 1969.

[3] Bishop A W. The use of slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17.

[4] Seed H B, Sultan H A. Stability analysis for a sloping core embankment [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(4): 60-84.

[5] Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis[C]//European Conference on Stability of Earth Slopes. Sweden: [s. n.], 1954: 220-271.

[6] Morgenstern N. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown[J]. Geotechnique, 1963, 13(2): 121-131.

[7] Morgenstern N, Price V E. The analysis of stability of general slip surfaces[J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79-93.

[8] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限单元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报,

2003, 23(3): 1-8.

[9] 李宁, 许建聪. 基于场变量的边坡稳定分析有限元强度折减法[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 314-318.

[10] 程曦. 基于 Abaqus 的内河航道岸坡稳定性分析[J]. 水道港口, 2012, 33(2): 152-158.

[11] 孙永福. 风暴潮作用下黄河水下三角洲斜坡稳定性研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 582-587.

[12] 姜海西. 波浪作用下水下岩质边坡的稳定性[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(9): 1 165-1 173.

[13] 胡涛骏, 叶银灿. 海底边坡稳定性分析中波浪力的求解[J]. 海洋学报, 2007, 29(6): 120-125.

[14] 王长海. GOCAD 与 Abaqus 的数据接口实现[J]. 测绘信息与工程, 2008, 33(5): 41-42.

[15] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.

[16] 费康, 张建伟. Abaqus 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

[17] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑出版社, 2004.

(本文编辑 武亚庆)