



# 卡塔尔多哈新港回填料 大型浸水模型试验膨胀性能研究

谢小明<sup>1</sup>, 梁小丛<sup>2</sup>, 陈 胜<sup>2</sup>

(1. 中交四航局第二工程公司, 广东 广州 510300; 2. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510288)

**摘要:** 为研究卡塔尔多哈港池开挖土体膨胀性能, 设计了两组不同细颗粒含量 (粒径小于0.063 mm) 的大型现场浸水模型试验, 模型大小20 m×20 m×1 m, 其中一半细颗粒含量小于20%, 另一半35%~45%。研究表明: 膨胀变形大致可分为初始快速膨胀、缓慢膨胀和稳定3个阶段; 膨胀变形速率在细颗粒含量少的部分呈现初期速率较大, 膨胀较快; 而细颗粒含量高的部分初期速率较小, 初期膨胀缓慢。两组不同细颗粒开挖回填料最终膨胀量均在9 mm左右, 表明回填料对细颗粒含量敏感性不强, 能满足膨胀量工程要求。

**关键词:** 大型浸水模型试验; 膨胀土变形特征; 港池开挖回填料

中图分类号: TU 433

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0034-05

## Large-scale flooded embankment test for swelling characteristics of excavated material in new Doha port, Qatar

XIE Xiao-ming<sup>1</sup>, LIANG Xiao-cong<sup>2</sup>, CHEN Sheng<sup>2</sup>

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

2. CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd, Guangzhou 510288, China)

**Abstract:** To investigate the settlement heave characteristics of excavated materials from the basin, we design the large-scale in-situ flooded embankment test. The model with dimensions 20 m×20 m×1 m includes two different parts of fine contents (passing through 0.063 mm): one part comprising fine contents less than 20%, the other part of 35%~45%. Based on the model test result, we conclude that the swelling process can be divided into three phases, i. e. the initial rapid swelling phase, the slowly increasing phase and the stable phase. The rate of swelling varies with the flooding time in such a pattern: maximum, low, gentle. The rate for fine contents less than 20% with a higher initiative rate is faster than the fine content 35%~45% in the first phase, and the excavated fill is non-sensitive to fine contents since the final heave of different fine contents are both 9.0 mm. The flooded embankment test may serve as reference for the design and engineering application of excavated fills in new Doha port.

**Keywords:** large-scale flooded embankment model test; swelling characteristics; excavated fill of basin

膨胀性土中黏粒成分主要由亲水性矿物质组成, 特有的矿物成分具有显著的吸水膨胀和失水收缩两种变形特性, 使得膨胀土具有会跟随土体含水量的变换而产生隆起或沉降变形的特征。目前国内外许多学者对土体膨胀性能主要从强度和

变形两方面设计了不同的试验方案, 做了大量有关膨胀土体变形机理研究<sup>[1-4]</sup>。针对变形特性, 国内学者王年香等<sup>[5]</sup>设计了模型试验, 研究可膨胀土变形特性, 结果表明土体干密度和上覆荷载对膨胀变形和含水量变化影响较大; 黄华县等<sup>[6]</sup>设

收稿日期: 2014-03-17

作者简介: 谢小明 (1984—), 男, 工程师, 主要从事港口与航道工程施工与管理。

计了两组室内模型试验, 研究了膨胀土变形随时间变化的特性规律; 周建普等<sup>[7]</sup>通过室内固结仪, 研究了膨胀土的膨胀力和膨胀量大小主要取决于土的含水量和干密度; 王亮亮等<sup>[8]</sup>通过原位大面积浸水试验, 研究了膨胀土浸水变形特性等。但由于条件有限, 现场大型的模型试验较少涉及。而本文主要依托卡塔尔多哈新港项目, 采用大型模型试验, 研究港池开挖弃料在不同黏粒含量下的浸水膨胀变形特性。

卡塔尔多哈新港地处 MASAED 工业城内, 离多哈市区 40 km, 该项目为内挖式港口, 该区域地层主要由表层的沉积土和底层强风化到微风化灰岩组成。沉积土为粉土质沙, 夹含少量 5% ~ 10% 的细颗粒, 局部地区细颗粒含量高达 70% ~ 80%; 沉积土下面局部地区为胶结性沙, 呈碎石状态。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验方案基本思路

港池开挖的弃料为液限大于 65% 和塑形指数大于 35% 的粉土质沙。较高的液限和塑形指数主要是由于弃土中细颗粒含有较高的具有亲水性的矿物质黏土成分, 意味着土体具有较高的膨胀性

能。弃土浸水时, 体积膨胀并形成膨胀压力; 土体失水时, 体积收缩并形成收缩裂缝。而收缩变形强度与细颗粒含量具有较大的关系。因此为了研究不同细颗粒含量对弃土膨胀性能的影响, 根据世界著名水工设计方 Worley Parsons 要求按图 1 和 2 设计了模型试验。模型主要由两部分组成, 左边一部分为细颗粒含量为 35% ~ 45%, 右边半边细颗粒含量则控制小于 20% (细颗粒是根据英标 BS-5930, 颗粒粒径小于 0.063 mm 的土体)。

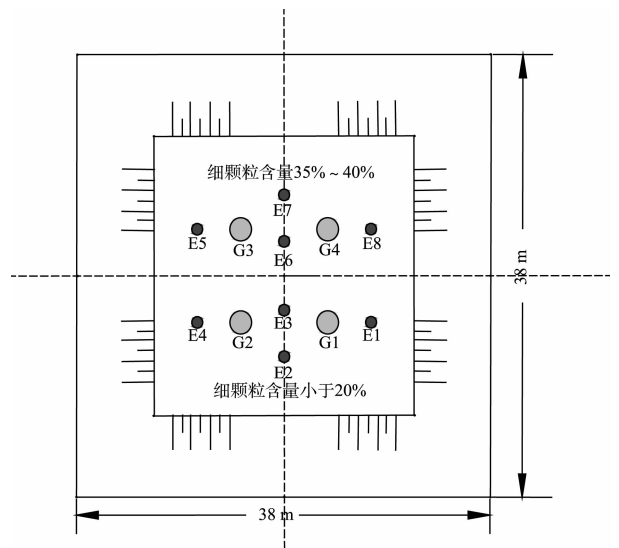


图 1 浸水模型平面图

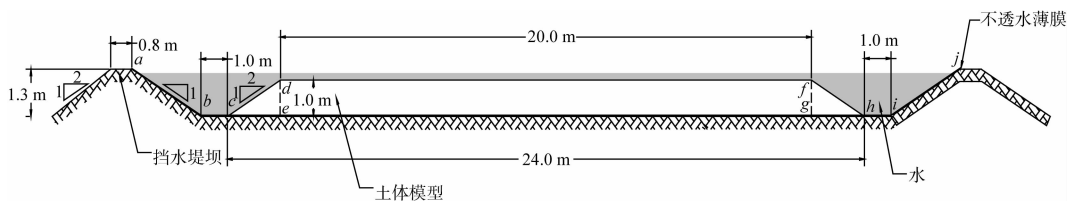


图 2 浸水模型剖面图

试验模型大小为 20 m × 20 m × 1 m, 细颗粒含量小于 20%。模型中 G1 和 G2 为位于模型底部监测点; E1、E2、E3、E4 为模型顶部监测点; 对于细颗粒为 35% ~ 45% 的模型, G3、G4 为位于模型底部监测点; E3、E4、E5、E6 为模型顶部监测点。

为了防止模型试验过程中水体的渗漏, 在碾压模型之前还应在土工织物上面铺设一层不透水薄膜。模型分两层进行碾压, 每碾压完一层需进行现场换水法密度试验并满足现场的回填料压实度要求: 最大干密度应达到室内击实试验最大干

密度的 95% 以上; 土体含水量应小于室内击实试验最优含水量; 土体孔隙率应小于 10%。

### 1.2 模型监测系统

根据细颗粒含量, 每半边模型底部应安装 2 个沉降观测尺, 模型顶面安装 4 个沉降观测尺。为了方便监测沉降观测尺的位移还应在沉降观测尺的上部贴上具有不同半径的焦点反光贴。监测仪器采用 GPS, 并在模型试验外侧建立一个固定基准点。

沉降观测尺的读数从开始安装之后按照每

天一次的频率进行观测，并在试验结束之后排干模型围堰内部的水，并按照每天一次频率持续观测2周。

### 1.3 模型浸水系统

为了研究模型在浸水条件下膨胀变形特性，围绕模型周边应建造一条高1.3 m的挡水堤坝，并且不透水薄膜要一直铺设到堤坝顶部。在试验过程中，为了保证水能充分渗透进试验模型，应始终保持试验模型具有一定的水头差，即水面高于模型顶部10 cm；并应在模型试验边配置两个备用水箱，当水体渗透进入土体模型、水头下降时，应及时给与补水，始终保持土体模型充分浸没在水中，模拟回填料充分浸没在水体中的极端条件。

### 1.4 膨胀变形验收标准

根据设计方Worley Parsons的技术要求，对于不同的细颗粒含量，其膨胀性能不一致，不同的开挖料作为合适的回填料用于道路、码头后方堆

载场区应满足不同的膨胀条件：对于细颗粒含量小于20%的回填料，浸水模型膨胀量不应大于10 mm；对于细颗粒含量大约在35%~45%的浸水模型，膨胀量不应大于15 mm。

## 2 试验结果分析

### 2.1 室内土工试验

模型试验在开始之前，应在不同的细颗粒含量的开挖料堆放区取土样分别进行天然含水量、颗粒密度、液塑限、颗粒筛分和土体击实试验，从而获取土料试验前物理力学参数。

模型室内试验结果严格按照英标BS 1377-2<sup>[9]</sup>进行，试验结果见表1。由表1可看出，细颗粒含量小于20%开挖料，液限平均值97，塑性指数56；而细颗粒含量为35%~45%的平均液限值73，塑性指数35，都超出了回填料要求范围，均应作为弃料进行堆放。

表1 室内试验结果

细粒含量/ %	试样 编号	天然含水率/ %	液限/ %	塑性指数/ %	颗粒密度/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	细颗粒含量 (小于63 $\mu\text{m}$ 细颗粒)/%	最大干密度 / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	最优含 水量/%
<20	1	4.7	105	62	2.54	18	1.98	13
	2	4.6	109	63	2.55	20	1.96	12
	3	5.0	104	62	2.57	20	1.94	12
	4	4.8	108	63	2.58	20	1.89	13
	5	4.8	90	47	2.56	13	1.89	13
	6	6.3	80	40	2.57			
	7	5.0	100	58	2.55			
	8	4.6	69	39	2.56			
	9	4.8	101	59	2.57			
	10	4.7	104	63	2.58			
	平均值	4.93	97	56	2.56	18	1.93	13
35~45	1	5.6	69	33	2.59	41	1.95	14
	2	5.6	73	34	2.60	39	1.93	14
	3	5.4	76	40	2.63	42	1.91	13
	4	5.4	76	36	2.62	39	1.97	14
	5	5.4	74	35	2.62	42	2.01	14
	6	5.6	69	36	2.60			
	7	5.8	69	32	2.63			
	8	5.6	73	34	2.61			
	9	5.6	75	34	2.62			
	10	5.8	73	36	2.63			
	平均值	5.58	73	35	2.62	41	1.95	14

### 2.2 现场干密度试验

为了模拟现场碾压要求, 在进行分层碾压时, 还应进行现场换水法密度测试试验, 以验证碾压模型试验的碾压效果。现场换水法密度试验严格按照 ASTM-D5030—2004<sup>[10]</sup> 进行操作, 其中每层选取平均分布的 5 个测试点, 试验结果见表 2。由表 2 可以看出, 对于细颗粒含量小于 20% 的土体, 两次碾压的平均压实度为 98%, 平均孔隙率为 6.52%; 细颗粒含量在 35% ~ 45% 模型土体, 两次碾压的平均压实度为 99%, 平均孔隙率为 4.72%。可见细颗粒含量高土体模型在相同碾压条件下, 密实度高, 孔隙率低。

表 2 现场换水法密度试验

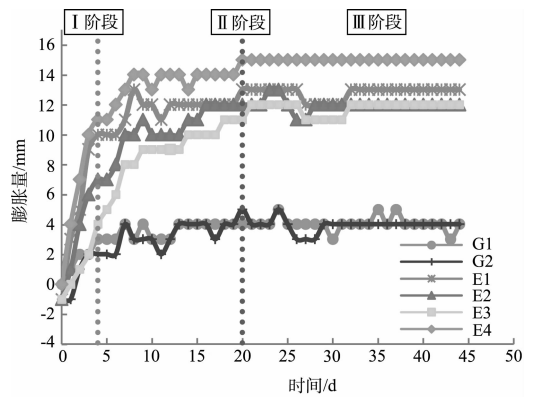
碾压层	试验编号	细颗粒含量/%	压实度/%	孔隙率/(%)	最大干密度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	最优含水量/%
第 1 层	1	<20	98	7.5	1.93	13.1
	2	<20	98	9.7	1.92	12.9
	3	35~45	100	5.1	1.90	13.4
	4	35~45	98	4.5	1.95	12.6
	5	35~45	99	3.6	1.89	14.1
第 2 层	1	<20	99	6.6	1.97	12.0
	2	<20	97	8.8	1.99	11.8
	3	35~45	99	5.4	1.95	12.3
	4	35~45	100	3.5	1.87	14.4
	5	35~45	100	6.2	1.91	12.4

### 2.3 膨胀量位移变化特征

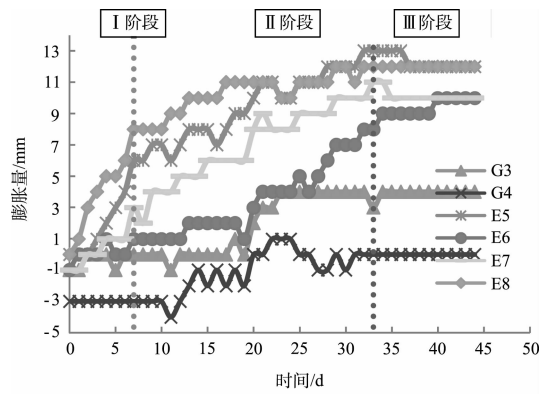
图 3~4 分别给出了两个不同细颗粒含量的监测点膨胀曲线。其中图 4 中 G-Ave、S-Ave 分别为对应细颗粒含量地表和底部监测点的平均值, 而 Heave 则为考虑底部监测点沉降位移的土体模型膨胀量。由图 3 可看出, 两个膨胀曲线大致可以划分 3 个阶段: 初始快速线性膨胀阶段、缓慢膨胀阶段和稳定阶段。

#### 1) I 阶段: 初始快速膨胀阶段。

由细颗粒含量小于 20% 的图 3a) 可看出, 在开始浸水的 1~5 d 内为初始快速膨胀阶段, 在此阶段, 土体的膨胀量基本呈现线性增长, 增长速度快, 土体膨胀较大。这主要是因为在此初始阶段, 模型土体中含水量较低, 表面积水在土体吸力作用和水头作用下, 沿着土体孔隙主动渗入, 使得单位时间内单位体积内产生的膨胀量较大。此阶

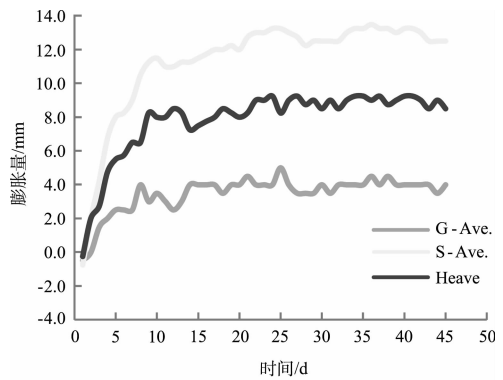


a) 细颗粒含量小于20%

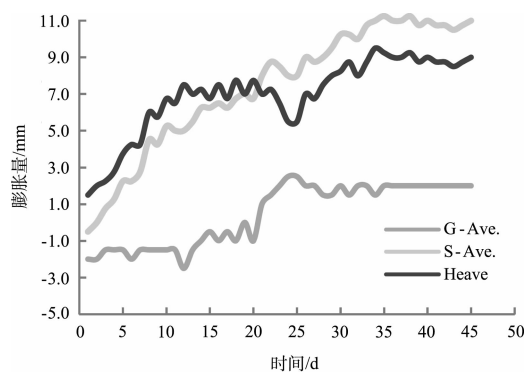


b) 细颗粒含量35%~45%

图 3 膨胀位移曲线



a) 细颗粒小于20%



b) 细颗粒含量35%~45%

图 4 平均膨胀位移曲线

段主要完成的膨胀量大约占到全部膨胀量的60%~80%。而对于细颗粒含量35%~45%的土体,由图3b)可看出细颗粒含量较高的土体模型,初始快速膨胀阶段持续时间较长,在0~9 d,增大速率相对较低,这主要是因为该部分土体细颗粒含量较高,孔隙率较低,土体渗透力相对较小所致,该阶段主要膨胀量约30%~50%。

## 2) II阶段:缓慢膨胀阶段。

细颗粒含量小于20%土体模型部分,位于浸水后第6~21 d,此阶段膨胀量随浸水时间增加而增大,但增长速度逐渐变缓,主要由于水膨胀之后含水量逐渐增大,土体吸水引起的膨胀力逐渐减小所致,此阶段约占膨胀量的20%~40%。但对于细颗粒含量在35%~45%的土体模型,由于土体细颗粒含量较高,土体孔隙率较小,水体渗透较为缓慢,该阶段持续时间较长,位于加水后第10~34 d,占全部膨胀量约50%~70%。

## 3) III阶段:稳定阶段。

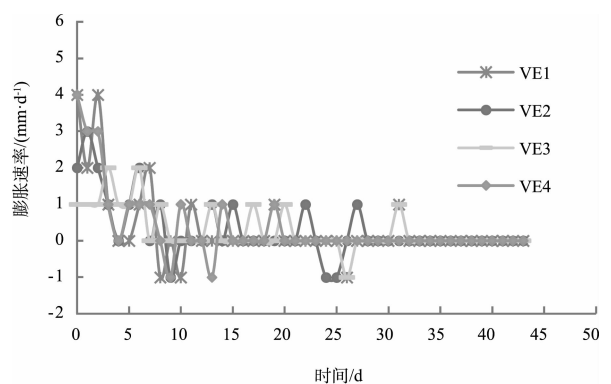
细颗粒含量小于20%土体模型部分,在浸水21 d之后,膨胀量很小,基本趋于稳定;细颗粒含量在35%~45%土体模型部分,在浸水34 d之后,膨胀变形量基本不再增加,也趋于稳定。

而由图4可看出,对于两组不同细颗粒含量土体模型,最终的平均膨胀量约为9 mm,均能满足设计方提出的膨胀量要求。由此可得出,港池开挖出来的弃料膨胀性能对细颗粒含量并不敏感,细颗粒含量中夹含蒙脱石、伊利石成分并不高,即使液限和塑限指数不满足要求,其膨胀性能仍能满足设计要求。

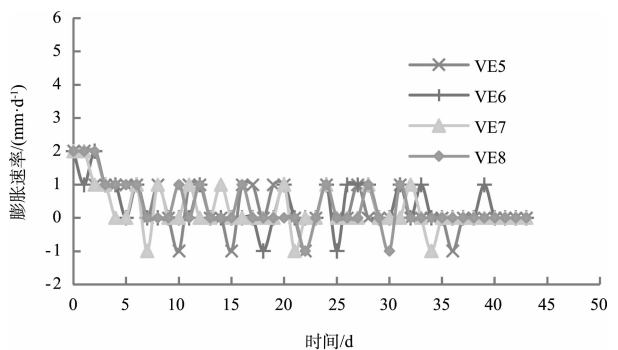
## 2.4 膨胀量速率变化特征

不同细颗粒含量膨胀量监测点的膨胀速率曲线见图5。

土体膨胀速率整体基本显现初期速率较大、中期增速平缓、到后期稳定的规律。由图5可知,细颗粒含量小于20%的土体模型,在初期的快速增长阶段0~6 d,膨胀速率最大为4 mm/d;此后,膨胀速率逐渐减低到2 mm/d;再到第21 d后基本呈现稳定阶段,速率徘徊在0 mm/d附近。



a) 细颗粒含量小于20%



b) 细颗粒含量35%~45%

图5 膨胀速率曲线

而对于细颗粒含量在35%~45%的土体,初期快速增长阶段速率仅为2 mm/d,并在第9 d后基本以1 mm/d速度持续增长到约第34 d,土体模型膨胀速率才基本维持在零刻度线附近。

## 3 结论

1) 大型模型试验中土体膨胀变形过程可划分为3个阶段:初始快速膨胀阶段、缓慢膨胀阶段和稳定阶段。对于细颗粒小于20%的土体模型,初始膨胀总量大且持续时间短,初始快速阶段完成膨胀量约占总膨胀量的60%~80%;而细颗粒含量35%~45%的土体模型,初始快速阶段完成膨胀量相对较少,约为30%~50%,剩余膨胀量则在缓慢膨胀阶段发挥。

2) 土体膨胀速率整体基本显现初期速率较大、中期增速平缓、到后期稳定的规律。细颗粒含量小于20%的土体模型,膨胀速率最大为4 mm/d,初

(下转第52页)