

防波堤土工织物加筋地基离心模型试验及数值模拟

胡红蕊, 陈胜立, 沈珠江

(清华大学 岩土工程研究所, 北京 100084)

摘要: 以黄骅港北防波堤工程为依托, 对土工织物加筋软粘土地基及斜坡式防波堤体系的固结过程进行了离心模型试验和有限元数值模拟, 通过分析地基土体固结过程中防波堤-加筋垫层-地基体系的位移场和应力场的发展及织物拉应力分布和发展, 验证离心试验及数值模拟方法的合理性, 并得出以下几点主要结论: (1) 土工织物加筋垫层的作用机理为其抗拉性限制自身横向变形, 通过与附近土体的摩擦作用限制其侧向变形; (2) 加筋减小防波堤-垫层-地基体系的高应力水平区, 避免堤身与地基高应力水平区域的连通, 增强系统稳定性; (3) 在离心试验采用的分层地基的条件下, 加筋减小了浅层软基和堤身的侧向位移量, 对系统总位移有抑制作用; (4) 试验中织物替代材料的极限拉伸强度发挥程度较低, 其与砂垫层间摩擦强度的发挥水平约为 23.8%。

关键词: 离心模型试验; 数值模拟; 土工织物; 防波堤; 软粘土

中图分类号: TU 411 **文献标识码:** A

Centrifugal & numerical modeling of geosynthetic reinforced embankments on soft clay

HU Hong-rui, CHEN Sheng-li, SHEN Zhu-jiang

(Institute of Geotechnical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The behavior of geosynthetic reinforced embankment on soft clay has been explored using the technique of centrifugal and numerical modeling. During the consolidation of foundation soil, the strain and stress of soil and geotextile are analyzed in the two ways above mentioned respectively. Two series of results are studied by the comparative method and show that (1) the work principle of reinforcement is its tensility limits its own deformation and reduces horizontal displacement of soil nearby through friction; (2) reinforcement dwindles and separates the regions of high shear stress level in embankment-reinforcement-soil system, therefore improves the global stability; (3) reinforcement reduces the whole deformation of embankment and foundation; (4) the mobilization of reinforcement's tensile strength is low and the mobilization of shear strength in the interface is about 23.8%.

Key words: centrifugal modeling; numerical modeling; geosynthetics; embankment; soft clay

1 引言

目前, 土工织物在堤坝加筋中得到普遍运用, 但对其作用机理的认识尚不清楚, 因而, 现有设计方法的合理性尚存争论, 国内外许多学者都进行了这方面的研究^[1~6]。针对工程实践要求与理论认识现状的矛盾, 本文对在土工织物加筋软粘土地基上修建的斜坡式防波堤的固结过程进行了土工离心试验模拟, 并通过非线性有限元方法进一步研究了加筋地基及堤身的位移、孔压及应力的时空分布规律和织物拉应力的分布与发展规律。为保证离心试验与工程实际的相似性以及离心模型试验与数值模拟的可对比性, 对模型试验地基制备采用的土体、试验中采用的土工织物替代材料、施工采用的土工织

物以及织物与垫层砂料的相互作用性质分别进行了系统的材料试验。材料试验结果与工程地质实测报告结合, 不仅明确了离心模型与工程实际的相似程度, 而且, 为数值模拟提供了可靠的模型参数, 保证了离心和数值模拟的可靠性和一致性。

2 离心模型试验

2.1 试验方法

模型试验是在清华大学岩土工程研究所的土工离心机上进行的, 该机容量为 50g-ton, 模型箱尺寸为 600 mm × 200 mm × 520 mm。为保证可能发生的整体滑裂面的充分发展, 并尽量采用较大的模型比尺, 根据工程基本条件, 模型试验采用两

收稿日期: 2002-04-27

作者简介: 胡红蕊, 女, 1977 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。

种防波堤-垫层-地基模型断面, 分别模拟不铺设土工织物和铺设土工织物的两种情况, 离心模型比尺均为 120。图 1 为不铺设土工织物的模型断面; 图 2 为在砂垫层中间铺设土工织物的模型断面, 几何尺寸等与图 1 完全相同。筋材的厚度很小, 在图中以线条表示。这一不对称的断面形式左侧滩地较长, 堤体断面完整, 对任意形式的滑裂面的形成和发展均无明显影响。

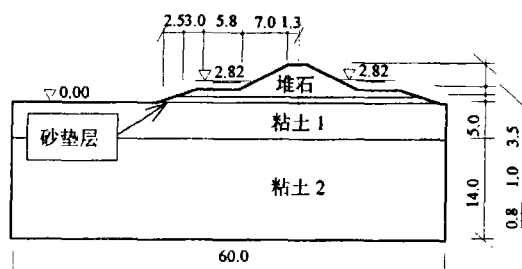


图 1 无织物模型断面示意图 (单位: cm)

Fig.1 Diagram of cross section of un-reinforced embankment (unit:cm)

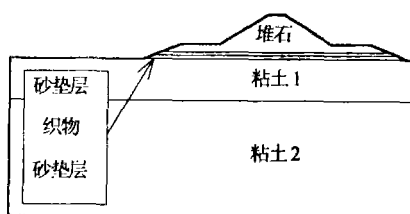


图 2 铺设织物模型断面示意图

Fig.2 Diagram of cross section of reinforced embankment

模型地基水平分为两层: 上层粘土 1 为高液限粘土, 取自黄骅港北防波堤附近海底表层; 下层粘土 2 为低液限粘土。两种土样的部分物理性质指标列于表 1。

实际工程中采用的土工织物为锦纶丝机织布, 重量为 700 g/m^2 。根据相似原理, 试验采用的确良布作为织物的替代材料。由窄条拉伸试验测定的织物与替代材料的单宽拉伸模量和单宽极限拉伸强度列于表 2。

离心模型试验过程如下:

(1) 土料加水至饱和, 浸泡 2 d 以上, 并排除土料内所含气体;

(2) 将低液限粘土放入模型箱, 四壁贴滤纸,

表 1 土料级配及物理性质指标
Table 1 Physical parameters of soils

土类	有效粒径 d_{10}/mm^{-1}	不均匀系数 C_u	比重 G_s	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 I_p
高液限粘土	0.001 7	2.88	2.62	55.5	33.2
低液限粘土	—	—	2.69	27.7	11.8

表 2 织物及替代材料拉伸试验结果
Table 2 Tensile test results of geotextile and substitute material

材料	单宽拉伸模量/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	单宽极限拉伸强度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
织物	496 000	173 000
的确良	98 000	17 000

在离心加速度 120 g 作用下进行第一次预固结, 然后停机; 将高液限粘土放于低液限粘土之上进行第二次预固结; 两次地基预固结完成后, 下层和上层地基的干密度分别为 $(1.70 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3$ 和 $(1.15 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3$, 厚度分别为 $(14 \pm 0.2) \text{ cm}$ 和 $(5 \pm 0.2) \text{ cm}$;

(3) 地基制作完毕后, 拆去模型箱侧壁的有机玻璃板, 在土体侧面嵌入小珠子作为土体位移的标志点, 标志点布置如图 3, 并记录各标志点的坐标;

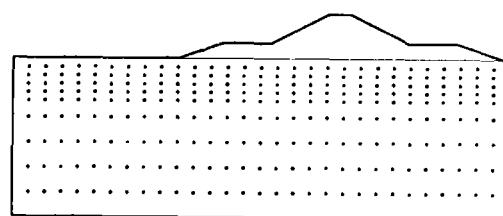


图 3 模型位移标志点分布示意图

Fig.3 Schematic map of layout of survey points

(4) 在有机玻璃板内侧涂抹硅油后, 装好玻璃板;

(5) 在制备好的地基土体上铺设砂垫层和土工织物替代材料的确良布 (模拟无加筋地基时, 仅铺设砂垫层) 之后, 堆筑碎石堤身;

(6) 为避免边壁效应的影响, 在模型箱中间安置位移及孔压传感器组, 监测堤轴线及堤趾处地基表面竖向位移发展历程;

(7) 运转离心机, 根据实际施工进度, 分 5 级加载, 离心加速度在 30 min 内达到 120 g , 相当原型三个月的进度, 之后稳定运行 72 min, 相当原型两年的进度; 加载过程中实时记录各位移和孔压传感器的读数;

(8) 停机后, 观察模型位移场, 测量位移标志点的坐标;

(9) 根据位移标志点在地基变形前后的坐标, 绘制地基位移场和位移等值线图, 根据位移传感器数据记录, 整理堤轴线及堤趾处地基表面竖向位移量。

2.2 试验结果

离心模型并行试验的结果证实, 试验具有很好

的可重复性。为分析土工织物的加筋作用机理,在两种试验条件下各选一个试验,将试验结果换算为原型后示于图4~9中。

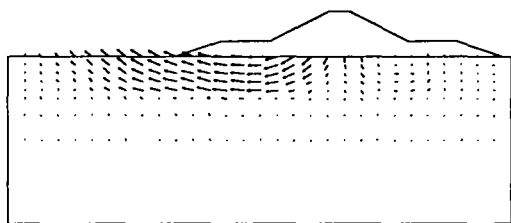


图4 无加筋防波堤体系位移矢量图

Fig.4 Vectograph of unreinforced embankment

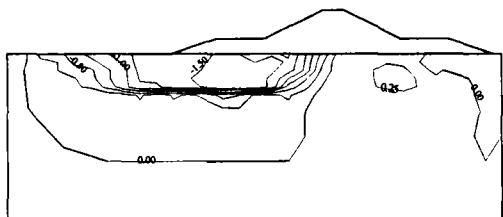


图5 无加筋地基防波堤体系水平位移等值线图(单位: m)

Fig.5 Horizontal displacement contour map of unreinforced embankment (unit: m)

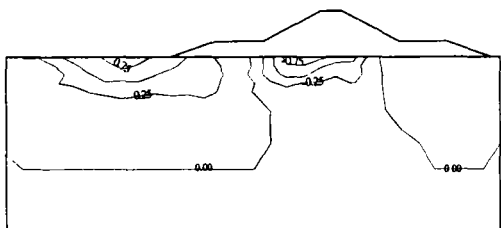


图6 无加筋地基防波堤体系沉降等值线图(单位: m)

Fig.6 Vertical displacement contour map of unreinforced embankment (unit: m)

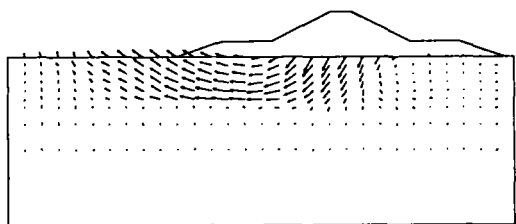


图7 加筋地基防波堤体系位移矢量图

Fig.7 Vectograph of reinforced embankment

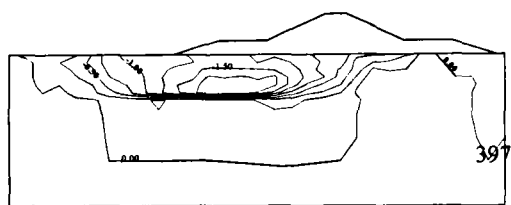


图8 加筋地基防波堤体系水平位移等值线图(单位: m)

Fig.8 Horizontal displacement contour map of reinforced embankment (unit: m)

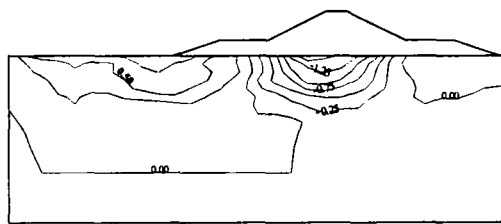


图9 加筋地基防波堤体系沉降等值线图(单位: m)

Fig.9 Vertical displacement contour map of reinforced embankment (unit: m)

3 数值模拟

3.1 数值模拟方法

在不考虑离心模型试验的空间效应,将防波堤-垫层-地基体系的变形问题简化为平面应变问题的条件下,采用二维有限元程序对离心试验进行了数值模拟。有限元计算中地基、堤身和垫层砂料都划分为4结点等参元;筋材用一维杆单元模拟;在筋材与砂料之间设置摩擦角接触面单元。

地基粘土、堆石料和砂料都采用同一弹塑性本构模型,统一屈服面模型。这种本构模型采用水滴形封闭屈服面^[8],如图10所示。

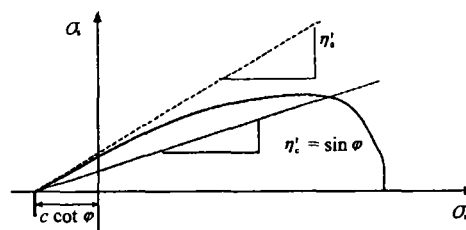


图10 水滴形封闭屈服面示意图

Fig.10 Schematic diagram of yield surface

屈服面方程为

$$f = \frac{\sigma_m}{1 - \left(\frac{\eta'}{\eta'_0}\right)^n} \quad (1)$$

$$\eta' = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_2 + \sigma_3}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}\right)^2} \quad (2)$$

$$\eta'_0 = \sqrt{n+1} \eta'_c, \quad (3)$$

n 在 1.2~2 间,硬化参数为

$$\varepsilon_v^p = (c_c - c_s) \ln \frac{p}{p_0} \quad (4)$$

式中 c_c, c_s 分别为 $\varepsilon_v - \ln p$ 体系中初始压缩曲线和膨胀曲线的斜率,即压缩指数和回弹指数; p_0 为初始围压; c, ϕ 分别为粘聚强度和内摩擦角。采用正

交流动法则, 弹塑性矩阵为

$$[D]_{ep} = [D] - \frac{A'[D]\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T [D]}{1 + A'\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}} \quad (5)$$

式中 $[D]$ 为弹性刚度矩阵, A' 的表达式为

$$A' = \left[\frac{\partial p}{\partial \epsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial \sigma_m} \right]^{-1} = \frac{(c_c - c_s)}{p \left[1 - \left(\frac{\eta'}{\eta'_c} \right)^n \right]} \quad (6)$$

π 平面上的破坏准则为三剪切角理论^[9], 其表达式为

$$\eta'_c = \sin \varphi \quad (7)$$

粘土模型参数主要依据土工试验确定, 同时, 参考离心试验的地基制备方法进行适当调整; 砂料和堆石的模型参数主要依据工程类比并参考试验方法确定; 计算采用的参数值列于表 3 中。

一般土工织物的力学模型 (拉伸应力-应变关系) 为

$$\sigma_t = a_1 \epsilon + a_2 \epsilon^2 + \dots + a_n \epsilon^n \quad (8)$$

式中 σ_t 为单位宽度的拉力; ϵ 为拉伸应变; $a_1, a_2, \dots, a_n$ 为拟合拉伸应力-应变曲线得到的参数, 由拉伸试验确定, 通常不考虑织物受压的情况。本文采用线弹性-理想脆性模型, 即筋材拉力达到极限拉伸强度值前, 模量为常数; 达到强度值, 筋材拉断, 以后模量为零。在数值模拟中, 织物替代材料的拉伸模量和极限拉伸强度取值见表 2。

表 3 粘土、砂料和堆石料的计算参数
Table 3 Physical-mechanical indexes of soils, sand and rockfill

	渗透系数 /m·s ⁻¹	密度 /kg·m ⁻³	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩指数	回弹指数	静止侧压力系数	孔隙率	饱和度
高液性粘土	1.0×10 ⁻¹⁰	1 731 (饱和)	0	29	0.15	0.05	0.5	0.611	1.0
低液限粘土	1.0×10 ⁻⁹	1 995 (饱和)	2.63	33.3	0.05	0.01	0.45	0.411	1.0
堆石	完全透水	2 000 (天然)	0	47	0.05	0.01	0.4	0.3	0.0
砂	完全透水	2000 (饱和)	0	35	0.05	0.01	0.4	0.5	1.0

TH-20 t 大型土体与结构物接触面循环剪切仪上进行的常规压力条件下的土工织物与砂料的单接触面试验均表明: 织物与砂料接触面的剪切强度包线具有较好的线性规律, 符合摩尔-库仑准则, 可以采用一个摩擦角 φ 来描述其剪切强度规律。根据这一试验结论, 数值模拟在筋材与砂料之间设置无厚度的摩擦角接触面单元: 在接触面剪切强度未充分发挥时, 筋材和砂料不发生相对滑移, 在剪切方向筋材与砂单元的节点共有同一自由度; 当接触面的剪切强度充分发挥时, 筋材单元节点与砂料单元节点在剪切方向上可以自由滑动。这种接触面单元通过控制筋材单元和砂料单元节点自由度的方法来模拟两者接触面上的相对滑移和剪切, 避免对切向和法向刚度的人为赋值, 能改善有限元的计算精度。试验测得接触面峰值摩擦角为 36.7°。考虑到法向压力较大时, 切向应力-应变关系有明显软化, 计算采用的接触面摩擦角为 35°。

鉴于现场施工和离心机试验中荷载施加方法的不同, 数值模拟针对离心试验进行: 模拟对象为模型, 网格剖分如图 11 所示; 将模型箱底面对地基的约束简化为铰支, 侧壁对地基的约束简化为水平

向的滑动铰支; 地基上表面采用完全排水条件; 下表面为不透水边界; 设置于模型箱侧壁的滤纸渗透性很强, 由于厚度很小, 计算中采用等效厚度的方法进行模拟, 即将滤纸厚度放大, 渗透系数则按同样比例缩小; 计算中模拟地基在白重下分层预固结; 卸载并修筑堤身模型后, 再按离心试验的加荷历程逐级加载; 计算时间即为离心机运转的时间。数值模拟中, 由于离心加速度的变化, 土体渗透系数、重力荷载等都随之相应变化, 其变化依据为相似准则。计算结果中的位移场和筋材单宽拉力分布应依据相似准则转化后才对应原型, 本文给出的结果均对应于原型。

在地基土体采用修正剑桥模型, 堤身材料采用线弹性本构模型条件下, 本程序调试通过后, 与

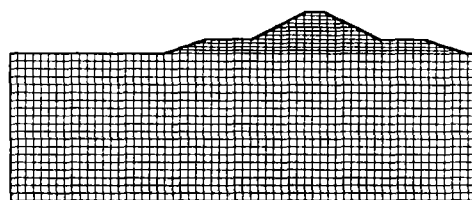


图 11 数值模拟网格示意图

Fig. 11 Finite element mesh of calculation profile

Marc 程序的计算结果进行了对比验证。

3.2 数值模拟结果

针对离心试验的2种方案,本文进行了相应工况的数值模拟,不同方案的地基最终位移矢量图和位移等值线分布分别示于图12~17中。

为分析两种工况下地基的变形情况,将两者堤轴线以左部分地基水平位移沿深度的分布绘于图18,图中以模型地基右上角点为坐标原点,以点表示无加筋地基位移分布,线表示加筋地基位移分布;为分析体系的破坏模式,将两种工况的应力水平等值线示于图19和图20中;方案2中筋材的单宽拉力分布示于图21中。

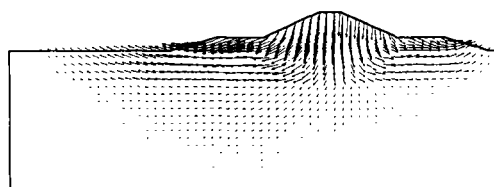


图12 无加筋地基防波堤体系位移矢量图
Fig.12 Vectograph of unreinforced embankment

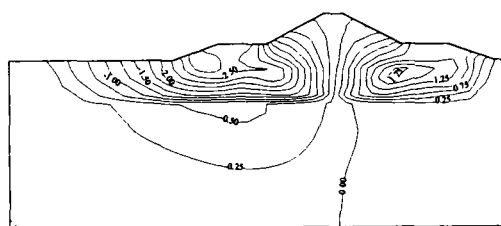


图13 无加筋地基防波堤体系水平位移等值线图 (单位: m)
Fig.13 Horizontal displacement contour map of unreinforced embankment (unit: m)

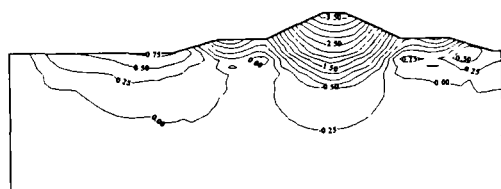


图14 无加筋地基防波堤体系沉降等值线图 (单位: m)
Fig.14 Vertical displacement contour map of unreinforced embankment (unit: m)

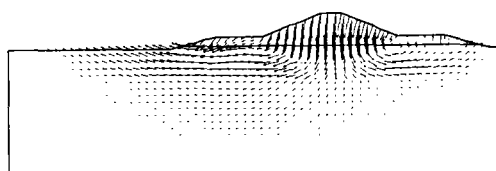


图15 加筋地基防波堤体系位移矢量图
Fig.15 Vectograph of reinforced embankment

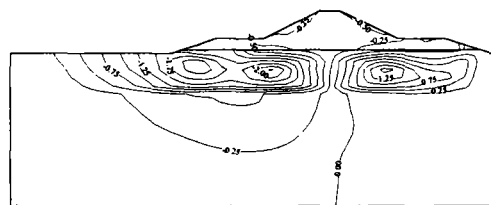


图16 加筋地基防波堤体系水平位移等值线图 (单位: m)
Fig.16 Horizontal displacement contour map of reinforced embankment (unit: m)

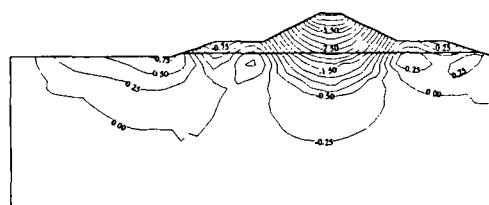


图17 加筋地基防波堤体系沉降等值线图 (单位: m)
Fig.17 Vertical displacement contour map of reinforced embankment (unit: m)

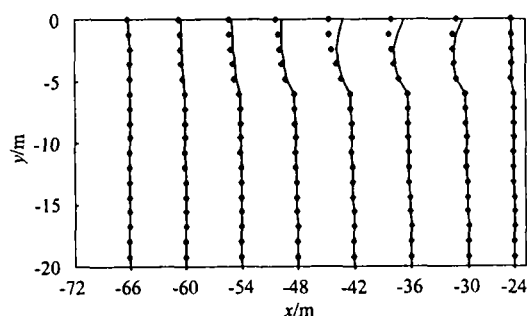


图18 地基水平位移沿深度分布图
Fig.18 Distribution of horizontal displacement with depth

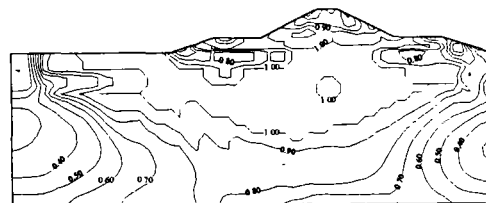


图19 无加筋地基防波堤体系应力水平等值线图
Fig.19 Shear stress level contour map of un-reinforced embankment

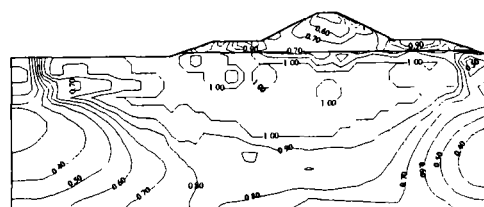


图20 加筋地基防波堤体系应力水平等值线图
Fig.20 Shear stress level contour map of reinforced embankment

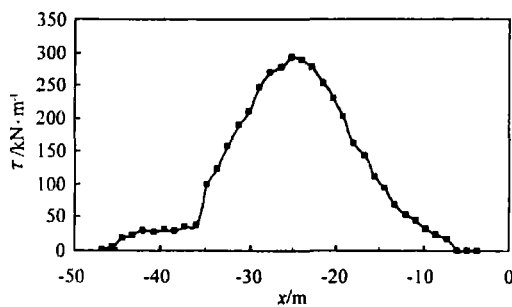


图 21 筋材单宽拉力分布示意图
Fig.21 Distribution of tension per unit width of reinforcement

4 离心模拟与数值模拟比较分析

比较离心模拟和数值模拟的结果可见,两者在位移场分布上基本一致;由图 22 可见,在无边壁效应影响条件下,试验与计算结果中位移数量符合较好;综上所述,数值模拟方法具有较好的可信度。

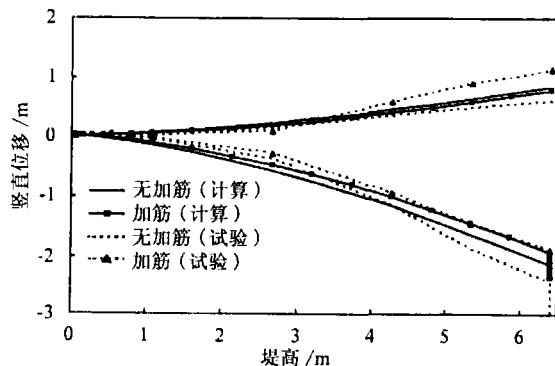


图 22 位移传感器测定结果与计算结果比较图
Fig.22 Comparison of displacement values measured by sensors and calculated

由图 18 可见,加筋地基水平位移图中出现明显拐点,加筋减小了浅层软基的水平位移量。比较图 5、图 8、图 13 和图 16 可见,加筋对堤体及地基总体水平位移有抑制作用。当防波堤-垫层-地基体系中应力水平为 1 的区域较大、且形成连通带时,所对应的位移场已经很大,认为系统破坏。对比图 19 和图 20 可见,加筋减小了体系高应力水平区域的分布范围,避免了堤身与地基高应力水平区域的连通,增强了系统稳定性。由图 21 可见,筋材最大单宽拉力出现在堤体对称轴处,最值约为 293 kN/m,其极限拉伸强度($17 \times 120 = 2040$ kN/m)发挥水平为 14.4%;计算表明,筋材与砂垫层间摩擦强度的发挥水平约 23.8%。

5 结 论

(1) 并行试验证实,离心模型试验具有很好

的可重复性,试验方法可行,试验结果可信。

(2) 比较离心模拟和数值模拟的结果可见,两者在位移场分布和数量上较为一致,数值模拟方法具有较好的可信度。

(3) 织物的加筋机理为:其抗拉性能限制自身横向变形,通过与附近土体的摩擦作用限制其侧向位移。

(4) 在现有地基土性分布和垫层及织物替代材料性质的条件下,加筋可减小防波堤-垫层-地基体系的高应力水平区范围,避免堤身与地基高应力水平区域的连通,增强系统稳定性。

(5) 在离心试验采用的分层地基的条件下,加筋减小了浅层软基和堤身的侧向位移量,对系统总体位移有抑制作用。

(6) 试验中织物替代材料的极限拉伸强度发挥水平约为 14.4%,织物替代材料与砂垫层间摩擦强度的发挥水平约为 23.8%。

参 考 文 献

- [1] 俞仲泉,李少青.土工织物加固地基的离心模型试验[J].岩土工程学报,1989,11(1):67-72.
- [2] 丁金华,包承纲.软基和吹填土上加筋堤的离心模型试验及有限元分析[J].土木工程学报,1999,32(1):21-25.
- [3] Sharma J S, Bolton M D. Centrifuge modelling of an embankment on soft clay reinforced with a geogrid[J]. *Geotextile and Geomembranes*, 1996, 14: 1-17.
- [4] Palmeira E M, Pereira J H F, Silva A R L. Back analyses of geosynthetic reinforced embankments on soft soils[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1998, 16: 273-292.
- [5] Rowe R K, Skinner G D. Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19: 387-412.
- [6] 陈环,邓卫东,郑玉琨.土工织物加筋堤坝的非线性有限元分析[A].全国土工合成材料技术协作网.全国第二届土工合成材料学术会议论文集[C].[s.l.]:[s.n.]1990.296-303.
- [7] 沈珠江.理论土力学[M].北京:中国水利水电出版社,2000.37-50.
- [8] 沈珠江. A Stress-strain model for sands under complex loading[J]. *Advances in Constitutive Laws for Engineering Materials*, 1989, 1: 303-308.