



海堤沉降计算中修正剑桥模型参数灵敏度分析*

李文翔¹, 刘曙光^{1,2}, 阮春生³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学水利工程系, 上海 200092;

3. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 采用数值方法分析软基上的海堤沉降问题时, 模型参数的确定是数值分析的重要内容之一。结合东海大桥港桥连接段的海堤工程数据, 对修正剑桥模型在海堤沉降计算中的参数灵敏度进行分析。结果表明, 初始压缩曲线的斜率 λ 和破坏曲线的斜率 M 对海堤沉降的影响最大, 当 λ 和 M 的取值在 $\pm 20\%$ 范围内波动时, 沉降的变化率也会在大概 $\pm 20\%$ 的范围内变化; 而回弹斜率 κ , 渗透系数 k , 泊松比 ν 和截距 e_a 对海堤沉降的影响非常小, 当这些参数在 $\pm 20\%$ 范围内波动时, 最终沉降的变化率只有 $\pm 1\%$ 左右; 另外, 渗透系数 k 虽然不能改变最终沉降, 但是却能对地基的固结性状产生较大的影响。所以为了能准确分析海堤沉降问题, 在参数取值中, 应当注意提高 λ , M 和 k 的精度。

关键词: 海堤; 沉降; 修正剑桥模型; 灵敏度分析

中图分类号: TU 43

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0032-05

Parameters sensitivity analysis of modified Cambridge model in settlement calculation of seawall

LI Wen-xiang¹, LIU Shu-guang^{1,2}, RUAN Chun-sheng³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: It is one of the most important steps in determining the value of model parameters in the analysis of the seawall settlement on the soft ground by numerical methods. Combining the seawall engineering data of the Donghai bridge, we analyze the parameter sensitivity of the modified Cambridge model in the calculation of seawall settlement. The results show that the slope of the initial compression curve λ and the slope of the failure curve M have the greatest influence on the seawall settlement. When the values of λ and M fluctuate in the range of $\pm 20\%$, the changing rate of settlement also fluctuates in the range of $\pm 20\%$. While the rebound slope κ , permeability coefficient k , Poisson's ratio ν and intercept e_a have very little influence on seawall settlement. When these parameters fluctuate in the range of $\pm 20\%$, the changing rate of final settlement only fluctuates in the range of $\pm 1\%$. Besides, although permeability coefficient k can't influence the final settlement, it has a great influence on the consolidation behavior of the foundation. As a result, in order to analyze the problem of seawall settlement more accurately, more attention should be paid on the values of λ , M and k .

Key words: seawall; settlement; modified Cambridge model; sensitivity analysis

沿海地区经济发达, 桥梁、港口、海堤等基础设施的建设活动频繁, 然而沿海地区的地质条件普遍比较复杂, 海相、滨海相淤泥和淤泥质

软土大量存在。为了在这样的地基上建设大型工程, 并保证其能正常使用, 如何控制和预测地基的沉降就成了一个重要的问题。特别是一些对沉

收稿日期: 2012-09-06

*基金项目: 科技部科技基础性工作专项重大项目(2007FY110300-03); 国家自然科学基金项目(50979071)

作者简介: 李文翔(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的工作。

降非常敏感的建筑,如跨海大桥、海堤、核电站等,沉降问题处理不好的话,可能会导致重大事故的发生。采用数值分析方法,能很好地解决包括沉降在内的一些复杂的岩土工程问题^[1-3]。然而本构模型的选择和模型参数的取值,是数值分析中的关键内容之一,能否合理选择模型并把握其各个参数,关系到分析的成功与否。就海堤沉降及其数值分析问题,国内外众多学者从多个方面进行过相应的研究^[4-6]。

彭劼等^[7]完成了某海堤工程的现场试验并进行了有限元反分析,指出在Biot固结理论反分析中采用修正剑桥模型可以考虑土体的弹塑性,能使反演分析更为合理。姜民等^[8]通过室内试验和数值模拟对海积软土的变形特性进行了研究,证明了修正剑桥模型能很好地反映地基的沉降和侧向变形,同时能较好地考虑地基不同深度处超静孔隙水压力的累积和消散过程。大量文献^[9-12]都证明,采用弹塑性模型来模拟软土地基更为准确,并能获得较为理想的结果。

虽然已经有了很多研究成果,但是由于软基具有明显的地域性特征,参数灵敏度也会因不同的问题而有所差异,一些经验并不能简单套用^[8-10]。为了研究修正剑桥模型在海堤沉降分析中的参数灵敏度,本文以东海大桥港桥连接段的海堤工程为例,建立了相应的数值模型,将模型计算结果与试验及工程实测数据进行了比较分析,并对数值模型中的各个参数对沉降的影响展开研究。

1 工程概况

本海堤工程位于杭州湾大乌龟岛与颗珠山岛之间,是集拦海大堤、堤防工程和高速路为一体的综合型工程。堤基除靠近颗珠山岛部分由于泥面较浅、软土层较薄采用全清淤外,其它海堤路段地基采用塑料排水板加固,利用堤身分级填筑作为预压荷载^[13]。工程中采用了C型塑料排水板对地基进行加固处理,正方形布置,间距为1.2 m。根据文献^[14],可以将塑料排水板转化为直径为6 cm的砂井考虑。海堤实际加载情况和计算加载情况见图1。

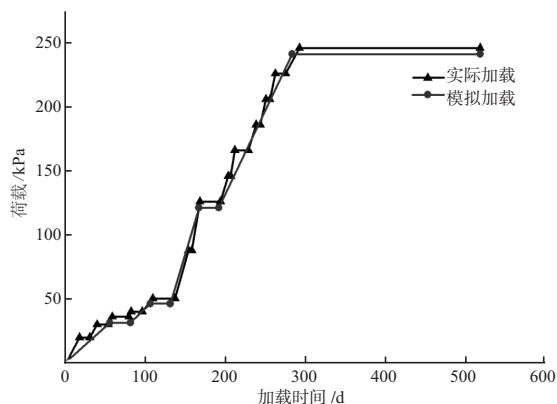


图1 海堤加载曲线

选取海堤某一断面中心处的钻孔数据,作为计算数据。该钻孔下土层分布情况如图2所示。

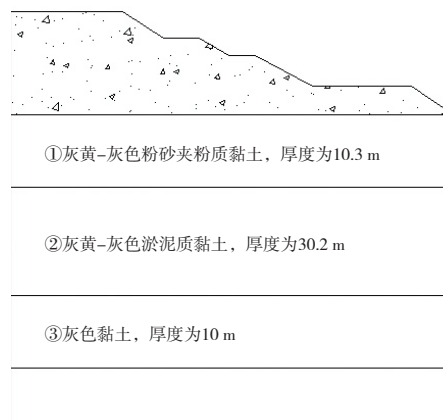


图2 海堤与地基断面

2 模型建立与计算

海堤荷载下软基沉降是一个伴随着弹性变形和塑性变形同时发生的过程,为更准确地对其进行数值模拟,应当采用弹塑性模型。20世纪60年代剑桥大学Roscoe等最先提出的修正剑桥模型是一个理论较为完善、应用最为广泛的土体弹塑性模型,经过人们在实践应用和研究中的检验,也证明了它能够准确反映软土地基沉降的特性。

修正剑桥模型屈服方程为^[12]:

$$p + \frac{q^2}{M^2(p + p_r)} = p_a e^{\left(\frac{1+e_a}{\lambda-\kappa} e_p^p\right)} \quad (1)$$

式中: p 为球应力; q 为偏应力; M 为 $q-p$ 平面内破坏线的斜率; p_r 为 $q-p$ 平面内破坏线在 p 轴上的截距; p_a 一般视为大气压力; e_a 为 $e-\ln p$ 平面内初始压缩曲线在 e 轴上的截距; λ 和 κ 分别是 $e-\ln p$ 平面内

初始压缩曲线和回弹曲线的斜率； ε_v^p 为塑性体积应变。本文运用大型有限元计算软件ABAQUS进行建模分析。模型中，将C型塑料排水板转化为直径为6 cm的砂井，构成砂井地基。根据海堤工程现场实测及室内试验数据，数值模型中修正剑桥模型参数取值见表1。

表1 修正剑桥模型参数

土层	ν	λ	κ	e_a	M	$k/(10^{-9}m \cdot s^{-1})$
①	0.294	0.04	0.006	0.85	1.29	6.56
②	0.416	0.11	0.005	1.30	0.51	8.88
③	0.360	0.10	0.010	1.35	1.20	13.20

为验证模型的正确性，将数值计算结果与规范计算方法和工程实测的结果进行比较。根据规范，用分层总和法计算海堤最终沉降^[14]：

$$S_{d\infty} = m_s \sum_{i=1}^n \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i \quad (2)$$

式中： m_s 为沉降计算经验系数； h_i 为第*i*层土的厚度； e_{1i} 为第*i*层在平均自重应力 P_i 下，压缩稳定时的孔隙比； e_{2i} 为第*i*层在 $(P_i + \sigma_{zi})$ 下压缩稳定时的孔隙比； σ_{zi} 为第*i*层土的平均附加应力。在工程中，除了需要考虑最终沉降，沉降历程也是非常重要的。因为工后沉降的大小，影响着工程的正常使用情况，所以要对固结度进行计算。

分级加载条件下，地基对应于总荷载在*t*时刻的平均总固结度为^[14]：

$$U_{rz} = \sum_{i=1}^m U_{rzi} \left(t - \frac{T_i^0 - T_i^f}{2} \right) \frac{P_i}{\sum P_i} \quad (3)$$

式中： U_{rz} 为分级荷载条件下，地基对应于总荷载在*t*时间的平均总应力固结度； m 为加载级数； t 对应第*i*级分级加载起点计算的分级加载固结时间； T_i^0 为第*i*级荷载的起始时间； T_i^f 为第*i*级荷载的终了时间； p_i 为第*i*级预压荷载； $U_{rzi} \left(t - \frac{T_i^0 - T_i^f}{2} \right)$ 为瞬时加载条件下，第*i*级荷载*t*时刻的平均应力固结度。

图3为海堤沉降曲线。可见数值模拟所得到的沉降曲线与规范计算和工程实测所得的曲线是非常接近的。这说明，数值模型能较为准确地反映软土地基在海堤荷载下的沉降状况。

3 参数灵敏度分析

修正剑桥模型中各个参数的物理意义不同，

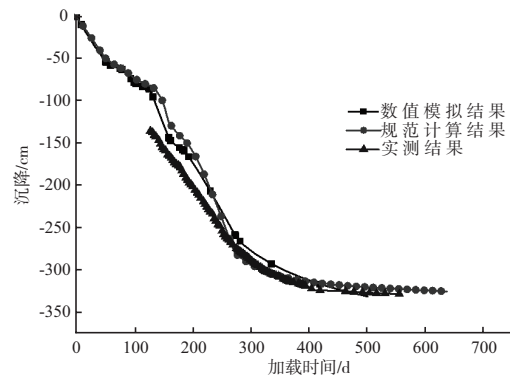


图3 海堤沉降曲线

对结果的影响程度也不同，在初始模型的基础上，分别对参数 ν ， λ ， κ ， e_a ， M 和 k 作 $\pm 20\%$ 及 $\pm 10\%$ 变化，考察其对海堤沉降的灵敏度。

泊松比 ν ，也叫横向变形系数，它是反映土体横向变形的弹性常数。图4是泊松比 ν 变化时的海堤沉降曲线。由图4可见，当泊松比在 $\pm 20\%$ 的范围内变动时，沉降曲线基本重合。这说明，在计算中泊松比对计算结果的影响是非常小的。

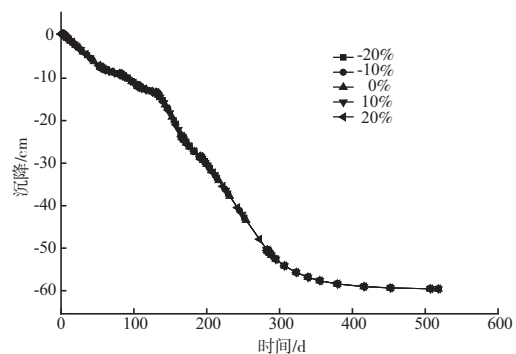


图4 ν 对海堤沉降的影响

参数 λ ， κ 和 e_a 在修正剑桥模型中反映了土体的硬化规律。图5是 λ 在 $\pm 20\%$ 范围内变化时海堤的沉降曲线，可见 λ 对沉降的影响是很大的。当 λ 值取原始数值的80%时，海堤的沉降值是原来的83.2%。当 λ 值取原始数值的120%时，海堤的沉降值是原来的112.6%。图6和图7分别是 κ 和 e_a 在 $\pm 20\%$ 范围内变化时海堤的沉降曲线，可见 κ 和 e_a 的数值大小对沉降计算结果的影响都非常小。

参数 M 是修正剑桥模型中与破坏准则相关的参数。所谓破坏准则，即强度准则，它反映了复杂应力状态对土体的抗剪强度的影响。修正剑桥模型采用的是Mises强度准则，其假定偏应力达

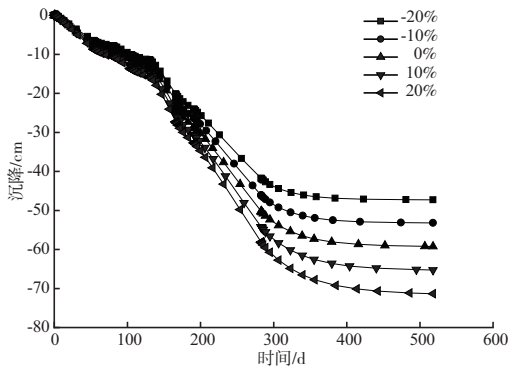


图5 λ 对海堤沉降的影响

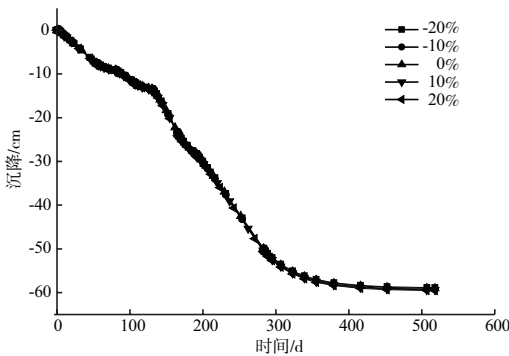


图6 κ 对海堤沉降的影响

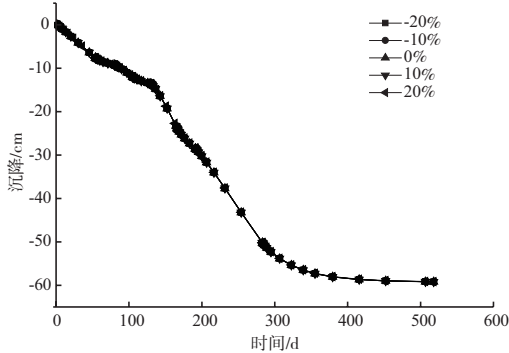


图7 e_a 对海堤沉降的影响

到一定的值时, 土体就会发生破坏。图8是 M 在 $\pm 20\%$ 范围内变化时海堤的沉降曲线, 可见 M 的取值对沉降计算的结果有很大的影响。当 M 从减少20%到增加20%变化时, 最终沉降也逐渐增大。

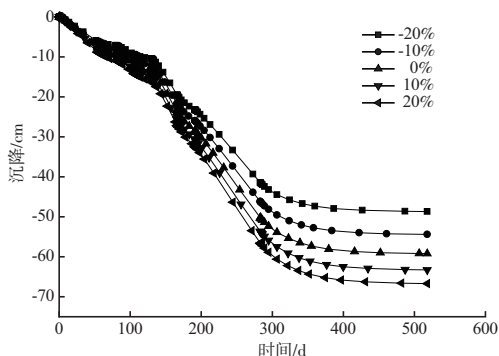


图8 M 对海堤沉降的影响

渗透系数 k , 反映了土体被水透过的能力, 它直接影响着土体的固结性状。由图9可见, 改变渗透系数, 最终沉降的变化不大, 但是对沉降历程会有所影响。渗透系数越大, 固结速率越快, 沉降越快。当渗透系数取原始数值的80%时, 完成固结只需要420 d天左右。当渗透系数取原始数值的120%时, 完成固结则大概只需要370 d。

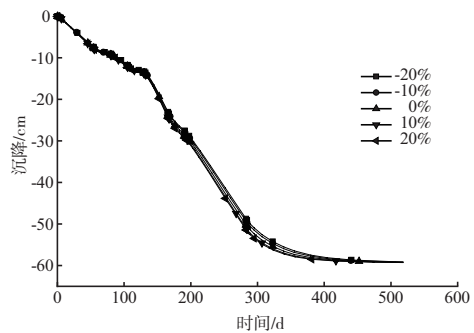


图9 k 对海堤沉降的影响

图10反映了修正剑桥模型各个参数对最终沉降的影响。可见, 参数中对最终沉降影响最大的是 λ 。当 λ 的取值减小20%时, 最终沉降的变化率为-20.196%, 当 λ 的取值增加20%时, 最终沉降的变化率为20.437%。基本上海堤的最终沉降与 λ 的波动情况相一致, 它是模型中最能左右海堤沉降的一个指标。其次是 M , 当 M 的取值减小20%时, 最终沉降的变化率为-17.777%, 当 M 的取值增大20%时, 最终沉降的变化率为12.625%。虽然 M 对沉降的影响不如 λ , 但也远大于其他的参数。模型中的 v, k, e_a 对最终沉降和沉降历程的影响都非常小, 当这3个参数在 $\pm 20\%$ 范围内变动时, 对最终沉降量的影响不超过1%。另外, 虽然渗透系数 k 对最终沉降的影响不大, 但是因为它直接影响着地基的固结性状, 从而也影响着地基的沉降历程。

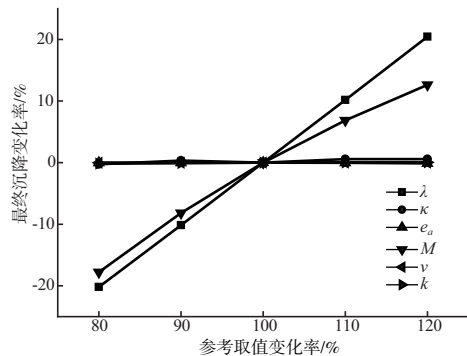


图10 沉降与参数之间的关系

4 结论

在海堤沉降的数值分析中,合理选择本构模型,正确把握各个参数的灵敏度,并准确选取相应的数值,是解决问题的关键。

1) 在采用修正剑桥模型对海堤沉降进行数值分析时,模型参数中对最终沉降的影响最大的是 λ ,其次为 M ,其余参数对最终沉降量的影响非常小,依次为 κ, k, e_a, v_o 。

2) 渗透系数 k 虽然对最终沉降的影响非常小,但是却能直接改变地基的固结性状。因为实际工程中常常需要考虑工后沉降,所以在数值分析中要准确选取 k 的数值。

3) 采用修正剑桥模型分析海堤沉降时,要注意提高 λ, M 和 k 的精度,以保证分析结果的准确性。

参考文献:

[1] Tang A M, Cui Y J. Experimental study on hydro-mechanical coupling behaviour of highly compacted expansive clay [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010 (1): 39-43.

[2] 林庆. 海相软土的固结试验与现场原位分析[D]. 上海: 同济大学, 2008.

[3] 李世明. 海堤工后沉降规律调查及预测方法研究[D].

合肥: 合肥工业大学, 2011.

[4] 王志亮, 宋茂天, 殷宗泽. 路堤沉降计算中邓肯-张模型参数灵敏度分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 135-1 138.

[5] 孙立强, 闫澍旺, 何红娟, 等. 吹填土地基真空预压加固过程分析及有限元研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 3 878-3 884.

[6] 张云. 修正剑桥模型参数对计算结果的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 441-444.

[7] 彭劼, 刘汉龙. 深厚软基上海底工程现场试验及有限元返分析[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 37-45.

[8] 姜民, 边学成, 吴建国, 等. 海堤荷载下海积软土沉降的现场测试和数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1 060-1 067.

[9] Indraratnab, Balasubramaniam, Balachandrans. Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992(1): 12-13.

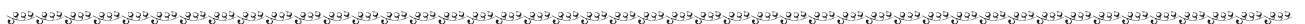
[10] 阮春生. 大乌龟岛至颍珠山岛海堤沉降分析[J]. 水运工程, 2008(10): 170-175.

[11] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.

[12] 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, 2010.

[13] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].

(本文编辑 武亚庆)



(上接第31页)

参考文献:

[1] 吴华林, 严以新, 周宜林. 抛泥运动研究述评及展望[J]. 泥沙研究, 2008(5): 76-80.

[2] 南京水利科学研究院. 连云港港30万吨级航道一期工程波浪要素推算补充报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.

[3] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 连云港港30万吨级航道一期工程潮流泥沙数模研究补充报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2010.

[4] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 连云港港30万吨级航道工程抛泥扩散观测研究[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2011.

[5] JTS/T 23-2—2010 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规范[S].

[6] 陈祖华, 王光谦, 王志石. 河口抛泥数学模型及应用[J]. 水利水运工程学报, 2003(1): 44-48.

[7] 赖永辉, 谈广鸣, 王军. 深圳港西部港区进出港航道工程疏浚泥水抛泥沙输移扩散规律研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2006, 39(3): 41-45.

[8] 李蓓. 疏浚土吹填泥沙输移扩散数值模拟研究及应用[J]. 中国港湾建设, 2003(2): 17-20.

[9] 孙毛明, 吴修广, 倪勇强, 等. 疏浚土倾倒后悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 海洋学研究, 2009, 27(3): 22-30.

[10] 吴修广, 杨润伟, 史英标, 等. 外海抛泥过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(3): 236-241.

(本文编辑 武亚庆)