

长江下游桥梁工程地基土体渗透特性研究

李筱艳¹, 董学武², 陈志坚¹, 陈松¹, 孙英学¹

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省苏通大桥建设指挥部, 江苏 南通 226009)

摘要: 以江阴长江公路大桥北锚碇为例, 首先阐述了锚碇地基土孔隙水压力观测和渗透性分析的意义。并根据江阴长江公路大桥地基基础安全监测成果, 分析了孔隙水与长江水的水力联系。在比奥固结理论的基础上, 采用变尺度优化方法反演了土工有限元分析中北锚碇地基土的渗透系数。并利用该桥北锚碇沉井浇筑完成后的实测变形结果, 验证了反演参数的合理性。从而得知, 土体的应力状态发生变化后将响应为土体参数的变化。上覆巨型基础的静荷载使地基土体渗透性减小, 对基础的稳定性是有利的。

关键词: 桥梁工程; 江阴长江公路大桥; 锚碇; 比奥固结理论; 水力联系; 监测; 渗透特性

中图分类号: TU 441+.33; U 443.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)10-1692-05

STUDY ON PERMEABILITY OF FOUNDATION SOIL OF BRIDGES ON LOWER REACHES OF YANGTZE RIVER

LI Xiao-yan¹, DONG Xue-wu², CHEN Zhi-jian¹, CHEN Song¹, SUN Ying-xue¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Provincial Su-Tong Bridge Construction Headquarters, Nantong 226009, China)

Abstract: The importance to monitor the pore water pressure and to study the permeability of soil under the north anchorage of Jiangyin Yangtze River Highway Bridge is analyzed firstly. According to the observed data, the hydraulic connection characteristics of pore water and river water are analyzed. Then, based on Biot's consolidation theory, the permeability coefficient of the foundation soil under the north anchorage is obtained by back analysis and varying-scale optimization method. It shows that the permeability coefficient of the soil under the anchorage is 23 percent of the original value. Finally, the rationality of the parameter is verified by comparison between the straight analysis results and the observed displacement. Parameters of soil will change with the stress condition. Load of huge foundation will affect the permeability of soil. The reduction of permeability of soil is beneficial to the stability of foundation soil.

Key words: bridge engineering; Jiangyin Yangtze River Highway Bridge; anchorage; Biot's consolidation theory; hydraulic connection; monitoring; permeability

1 引言

在大江、大河的中下游, 往往都分布有深厚松散河床覆盖层。故跨越工程, 如输变电路工程中的跨越塔、桥梁工程中的塔墩和锚碇, 多以

深厚软土为地基。长江下游已建成的江阴长江公路大桥(以下简称江阴大桥)和正在建设中的润杨大桥、苏通大桥等, 桥址相距很近, 地质条件比较类似, 都是以深厚覆盖层作为地基土体。对于高、重、大建筑的软土地基, 其承载力、沉降和稳定问题均突出而复杂。为此, 往往都开展了土

收稿日期: 2003-12-24; **修回日期:** 2004-02-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707)

作者简介: 李筱艳(1974-), 女, 1995年毕业于河海大学地质工程系水文地质与工程地质专业, 现为讲师、博士研究生, 主要从事地质及岩土工程方面的教学和研究工作。E-mail: swallow@hhu.edu.cn.

工有限元分析研究。在工程实践中,基础和上部结构施工以及工程荷载的施加都是循序渐进的,故地基土的固结效应十分突出,地基土的沉降和稳定问题不仅取决于变形和强度参数,也在较大程度上受控于水理参数,尤其是地基土的渗透系数^[1]。变形参数和强度参数的确定已有许多成熟的方法^[2]。但是,目前分层准确测定地基土的渗透系数仍然是困难的。本文以江阴大桥北锚碇施工中软土地基实测资料为依据,进行地基土渗透系数的水力损失反分析。当然,影响地基土中孔隙水水力损失的因素很多,本文是在假定其他条件不变的情况下的一种工程近似。

2 工程概况

江阴大桥^[3]主体工程由五大部分组成,即主缆、箱梁、锚碇、塔墩和引桥。其中北塔墩、北锚碇和北引桥位于靖江市长江北岸高漫滩之上。根据勘探资料,北锚碇分布区地面高程约 2.4 m,地基由深厚河床覆盖层组成,地下水埋深仅 0.65~1.35 m,覆盖层厚 78~86 m,属全新统 Q₄和上更新统 Q₃地层,自上而下分别是 16~27 m 厚的薄互层状粉质粘土和粉细砂(层)、厚 17.6~27.7 m 的粉细砂层(层)、厚 9.9~17.6 m 的粉质粘土和亚砂土(层)以及厚 25~30 m 的含砾中粗砂(层),属复杂多元结构土层。基岩属三叠系灰岩。

江阴大桥北锚碇的主要功能是通车运营后能安全承受 6.4×10^5 kN 的主缆拉拔力和 2.04×10^5 kN 的散索鞍反力,并将其传递给地基岩土体。又因北锚碇分布区浅表土层厚度大,物理力学性质和透水性均较差,所以北锚碇的沉降、不均匀沉

降、水平位移、承载力和抗滑稳定问题十分突出^[4]。为此,北锚基础采用大体积沉井方案,沉井持力层取 层含砾中粗砂层,北锚碇采用现浇大体积钢筋混凝土重力锚,锚体自重约 1.6×10^6 kN。此外,从大桥安全运营的角度考虑,还必须将锚碇散索鞍的位移限制在设计允许值内(水平位移不超过 10 cm,沉降不超过 20 cm)^[4]。

3 地基土孔隙水与长江水水力联系

如上所述,沉井基底持力层为透水性较好的含砾中粗砂(层),其上覆为具有较好隔水作用、分布稳定、厚 9.9~17.6 m 的粉质粘土和亚砂土(层)。所以,沉井基底持力层处于相对封闭的水文地质条件。根据勘探资料,基底持力层在长江河床出露,出露点与锚碇的距离为 1 080 m,其孔隙水与长江水有一定的水力联系。由于长江江阴河段属于感潮河段,江水位的波动对北锚碇及沉井基础的沉降和稳定性均有较大影响,其影响程度取决于地基土层的渗透性。此外,地基土的渗透性对地基土的固结效应也有较大影响。所以,地基土渗透性的准确确定以及孔隙水与长江水水力联系的研究具有重要意义。为此,本次监测在沉井封底前于其基底土层中埋设孔隙水压力观测点(采用振弦式渗压计测试技术)9 个,并开展了沉井基底孔隙水与长江水位的联动观测,以查清其水力联系,并在此基础上反演沉井基底持力层的渗透系数。以其中 4 个测点为例,给出沉井浇筑完成后,基底孔隙水随长江水位波动的关系曲线(图 1),由图 1 可见,其水力联系是密切的,但具

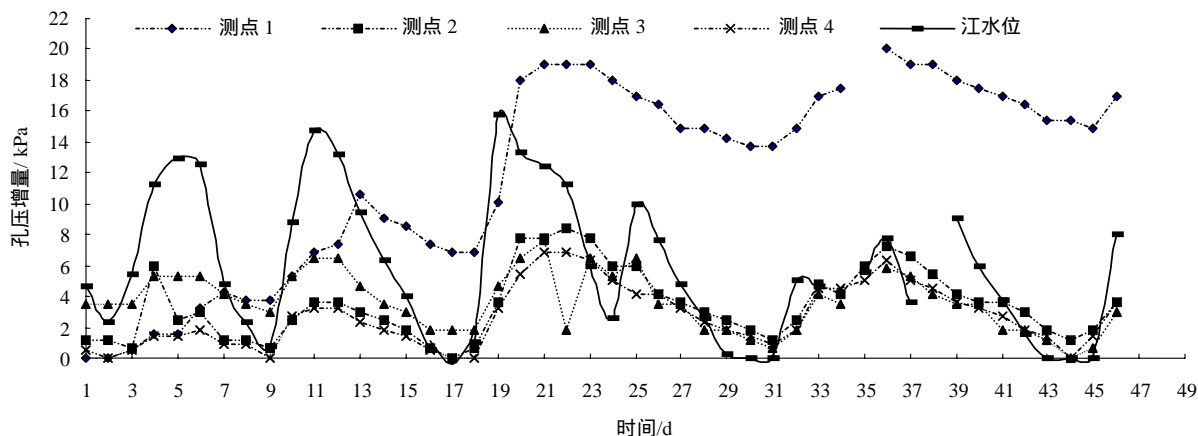


图 1 沉井基底孔隙水与长江水位的联动观测曲线

Fig.1 Curves for pore water pressure under the caisson and the river level

有一定的水力损失和时间滞后。

4 比奥固结理论及其应用

对于饱和土体，应力状态改变时，有建立在横观各向同性、骨架线性弹性、变形微小、渗流各向同性且符合达西定律等假定基础上的用位移和孔隙水压力表示的三维比奥固结理论的偏微分方程^[5, 6]：

$$\left. \begin{aligned} -G\nabla^2 w_x - \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ -G\nabla^2 w_y - \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} &= 0 \\ -G\nabla^2 w_z - \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} &= -\gamma \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{K}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2)$$

式中： ∇^2 为拉普拉斯算子； u 为孔隙水压力； γ 为土的重度； γ_w 为水的重度； G 为体积剪切模量； μ 为泊松比； w_i 为*i*方向的位移， $i = (x, y, z)$ ； K 为土体渗透系数。

从虚功原理可导出比奥固结理论有限元支配方程：

$$\begin{bmatrix} K^* & \bar{K} \\ \tilde{K} & K' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\delta \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R - R_i \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中： $[K^*]$ 为劲度矩阵； $[K']$ 为渗透矩阵； $[\bar{K}]$ 为与单元结点孔隙水压力所对应的那部分结点力劲度矩阵； $[\tilde{K}] = [\bar{K}]^T$ 反映了结点位移所引起的单元体积的改变； $\{R - R_i\}$ 反映结点力增量。求解式(3)还需满足初始条件和边界条件^[6]，土体变形参数由邓肯-张模型确定^[7]，应力状态对土体渗透性的影响见文[1]所述，地基土与混凝土的接触

面采用 Goodman 单元^[8-10]。

5 基于监测资料的参数反分析

本文旨在利用现场观测资料反演土工有限元分析中的地基土渗透系数，并采用罚函数法与变尺度法相结合的途径进行优化计算^[2, 11]。优化反演的基本思路如下：

输入原计算参数(据原勘察成果)，调用土工有限元正分析程序，计算锚体及沉井和地基土内各点(包括观测点)在各工况、各时刻(包括现场观测时刻)的响应量(如孔压、位移等)，将与各观测点和观测时刻相应的有限元计算值代入目标函数并计算函数值：

$$J = \sum_{i=1}^m [(u_{1i} - u_{1i}^*)^2 + (u_{2i} - u_{2i}^*)^2 + \dots + (u_{ni} - u_{ni}^*)^2] \quad (4)$$

式中： m 为观测次数， n 为观测点数， u_{ni} 为某观测点第*i*时刻的孔压计算值， u_{ni}^* 为某观测点第*i*时刻的孔压观测值。

将计算得到的目标函数值代入收敛判别式，若满足判别式，则输入的计算参数即为与实际孔压相适应的渗透系数；若不满足，则调用参数优化分析程序，调整计算参数，并将调整后的计算参数代入土工有限元正分析程序，将计算得到的上述有关结果代入目标函数，再次检验计算值与实测值的一致性。重复该步骤，直至计算值与实测值满足规定的一致性。将最后一次试算参数输出，即为与实测孔压相应的渗透系数。江阴大桥北锚沉井地基土可大致分为 4 层，初始计算参数由表 1, 2 给出。

表 1 混凝土计算参数

Table1 Material parameters of concrete

$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	$K_0/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
25.0	20	0.167	10^{-5}

表 2 地基土层材料参数

Table 2 Material parameters of foundation soils

地基土层	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	R_i	k	n	G	F	D	$K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	λ
层	18.7	30.0	9.0	0.75	300	0.45	0.35	0.05	4.5	0.10	0.010
层	19.4	34.0	4.0	0.75	500	0.50	0.30	0.05	4.0	1.00	0.030
层	19.7	28.0	12.0	0.80	400	0.50	0.32	0.05	4.0	0.01	0.001
层	20.0	40.0	0.0	0.70	600	0.55	0.20	0.05	3.0	180.00	0.100

对北锚碇及沉井基础的沉降和稳定性影响较大的地基土为沉井基底含砾中粗砂层(层), 且孔隙水压力观测点也位于该层。所以, 本次反演仅针对该层土。反演分析中输入的渗透系数初始值根据抽水试验和室内试验综合确定, 其值为 180 m/d。根据反演结果, 沉井基底第 层含砾中粗砂层的渗透系数降低到 23%, 其值为 41 m/d。

6 反分析结果的合理性检验

众所周知, 影响反分析结果应用的问题之一在于解的唯一性和合理性。本文将利用锚碇浇注完成后的沉降观测值来验证反演得到的沉井基底含砾中粗砂层(层)的渗透系数的正确性和合理性。将反分析得出的计算参数代入正算程序, 可得到位移结果, 与沉井控制观测点的实测沉降值进行比较, 如表 3 所示。

表 3 沉井基础位移计算结果与实测沉降值的比较
Table 3 Comparison between calculated displacement results and observed settlement values

工程部位	实测值/mm	计算值/mm
东北角	116.1	106.8
西北角	116.2	105.2
西南角	75.0	100.9
东南角	84.7	104.1

根据比较可知, 沉井基础的沉降实测值和计算值比较接近, 相差最小为 8%, 最大不超过 35%。从实测结果可以看出, 沉井北部实测值与计算值差异较小, 而沉井南部实测值与计算值差异较大, 这主要是因为沉井施工过程中采用了分区封底, 先封底的区域沉降多, 后封底的区域沉降少, 导致沉井在南北方向上有较明显的不均匀沉降, 而计算所采用的是沉井封底整体完成的时间。另外, 不考虑 ~ 层, 仅选取含砾中粗砂层(层)作为渗流耦合响应层也是实测值和计算值不能完全一致的原因。通过对沉井基础位移正分析计算结果和实测的竖向位移的比较和分析可知, 本文反分析得出的土体渗透系数是合理的、唯一的。

7 结 语

巨型基础下伏土体中存在饱和、强渗透性的砂土层时, 由于上部静荷载引起的土体应力状态改变后位移场和有效应力场的变化使下伏地基土体的渗透性减小, 减小的幅度与应力状态、砂土层的渗透性等因素有关。也就是说, 土体应力状态调整将引起渗透系数的变化。对于排水条件好的地基土体, 当渗透系数减小时, 其对基础的稳定性的影响是有利的。

参考文献(References):

- [1] 李筱艳. 基于位移反分析的深基坑渗流场与应力场完全耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 269-1 274.(Li Xiaoyan. Fully coupling analysis of seepage and stress for deep foundation pit based on displacement back analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1 269-1 274.(in Chinese))
- [2] 陈志坚, 游庆仲, 胡应德. 江阴大桥北锚沉井地基土邓肯参数的反演及反馈分析[J]. 固体力学学报, 1999, 20(增): 102-107.(Chen Zhijian, You Qingzhong, Hu Yingde. Inversion and back analysis of Duncan's parameters of Jiangyin Great Bridge's north anchorage sunk well foundation soil[J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 20(Supp.): 102-107.(in Chinese))
- [3] 周世忠. 江阴长江公路大桥建设中的重大技术问题[A]. 见: 江阴长江公路大桥工程建设论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 2000. 12-15.(Zhou Shizhong. Key technology problems in construction of Jiangyin Great Bridge[A]. In: Collective Papers of Construction of Yangtzi River Highway Bridge[C]. Beijing: China Communications Press, 2000. 12-15.(in Chinese))
- [4] 陈志坚, 游庆仲. 江阴大桥工程建设中的岩土工程问题[J]. 水利水电科技进展, 1998, 12(增): 30-34.(Chen Zhijian, You Qingzhong. Civil engineering problems in construction of Yangtzi River Highway Bridge[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 12(Supp.): 30-34.(in Chinese))
- [5] 邵松佳. 三维非线性比奥固结方程的有限元解法[J]. 水利学报, 1990, (3): 32-36.(Shao Songjia. Finite element method of three dimensional nonlinear Biot's consolidation equation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, (3): 32-36. (in Chinese))
- [6] 蔡新, 郭兴文, 沈培良, 等. 软土地基三维固结分析及其工程应用[J]. 河海大学学报(自然科学版) 2001, 29(5) 27-32.(Cai Xin, Guo Xingwen, Shen Peiliang, et al. Three dimensional consolidation analysis of soft soil and its application[J]. Journal of

Hohai University(Natural Sciences), 2001, 29(5): 27-32.(in Chinese)

[7] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, 96(5): 1 629-1 653.

[8] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(3): 637-660.

[9] Desai C S, Nagaraj B K. Modeling for cyclic normal and shear behavior of interfaces[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1988, 114(7): 1 198-1 217.

[10] 雷晓燕, Swoboda G, 杜庆华, 等. 接触摩擦单元的理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 23-32.(Lei Xiaoyan, Swoboda G, Du Qinghua, et al. Theory and application of contact-friction interface element[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 23-32.(in Chinese))

[11] 杨林德. 岩土工程问题的反演分析及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(Yang Linde. Back Analysis and Application of Civil Engineering Problems[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))

《岩石力学与工程学报》2005 年第 2 期被 EI 收录论文(26 篇)

No.	论 文 题 目	作 者 名	页 码
1	对 3 种著名边坡稳定性计算方法的改进	朱大勇 李焯芬 黄茂松等	183-194
2	双连拱公路隧道裂缝成因及防治措施	王建秀 朱合华 唐益群等	195-202
3	岩石力学参数反分析的变分伴随方法研究	徐卫亚 刘世君	203-206
4	基于模式搜索的岩石流变模型参数识别	陈炳瑞 冯夏庭 丁秀丽等	207-211
5	围岩变形的时效特征与预测的研究	杨林德 颜建平 王悦照等	212-216
6	压应力状态下断续节理岩体全过程应力-应变关系及其变形局部化分析	周小平 张永兴 朱可善	217-221
7	隧道的两种减震措施研究	高峰 石玉成 严松宏等	222-229
8	压力洞室围岩的高压透水性测试技术与应用研究	郭启良 丁立丰 张志国等	230-235
9	煤岩体孔隙裂隙双重介质逾渗机理研究	冯增朝 赵阳升 文再明	236-240
10	工程岩体随机结构面优势方向的表示法初探	陈剑平 石丙飞 王清	241-245
11	工程岩体抗剪强度确定综合方法——GMEM 研究	武雄 贾志欣 陈祖煜等	246-251
12	岩体风化程度两级模糊综合评判研究	刘春 白世伟	252-256
13	承压垫板法试验的研究	刘允芳 周密	257-262
14	基于 SVM 的煤与瓦斯突出区域预测研究	南存全 冯夏庭	263-267
15	加筋砂土地基中加筋宽板效果的数值解析研究	彭芳乐 龙冈文夫	268-277
16	露天转地下境界矿柱稳定性研究	李元辉 南世卿 赵兴东等	278-283
17	高速公路偏压隧道施工动态监测与有限元仿真模拟	王祥秋 杨林德 高文华	284-289
18	大跨超浅埋轻轨车站隧道开挖方法研究	朱泽兵 刘新荣 张永兴	290-295
19	溶洞上方圆形基础地基极限承载力有限元分析	阳军生 张军 张起森等	296-301
20	地下水影响下裂隙岩质边坡变形的 Fuzzy 测度分析	李文秀 梁旭黎 赵胜涛	302-306
21	高边坡安全监测的改进 GM 模型预测研究	唐天国 万星 刘浩吾	307-312
22	深厚软土地层地震破坏的作用机理研究	许建聪 简文彬 尚岳全	313-320
23	边坡角设计的支持向量机建模与精度影响因素研究	刘开云 乔春生 田盛丰等	328-335
24	关于龙游石窟斜顶“设计”中工程科学问题的探讨	李丽慧 杨志法 张路青等	336-343
25	基于响应面法的地下洞室结构可靠度分析	陈建康 朱殿芳 赵文谦等	351-356
26	孔压滞后现象及其对固结系数的影响	问延煦 施建勇	357-364