



某人工岛机场成层土地基沉降分析

齐彦博, 王 翠, 夏玉斌

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 以某人工岛机场项目为依托, 分别采用经典土力学理论和有限单元法分析了成层土地基施工期沉降及工后沉降, 为确定地基处理方案提供依据。通过计算结果对比分析, 表明采用化引当量层法计算成层土地基一维固结沉降能够满足工程精度要求。

关键词: 成层土地基; 经典土力学理论; 有限单元法; 沉降计算

中图分类号: TU 470

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0166-06

Calculation of layered clay foundation settlement of an artificial island

QI Yan-bo, WANG Cui, XIA Yu-bin

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Based on an artificial island project, this paper calculates the settlement of layered clay foundation during construction and after work by classical soil mechanics theory and finite element method separately. The results provide a basis for the determination of the technical scheme. The analysis results show that equivalent layer method gives pretty realistic results of the degree of consolidation for layered clay.

Key words: layered clay foundation; classical soil mechanics theory; finite element method; settlement calculation

1 工程概况

依托工程位于渤海湾海域, 距岸1.5 km。陆域形成面积20.87 km², 区域水域底高程-5.0~-6.0 m, 回填区陆域交工高程2.1~3.85 m。人工岛最终用途为机场, 新机场飞行区指标为4E或4F, 采用4条平行跑道、航站居中的布置形式, 其中2条主跑道中心距2 000 m, 主跑道和预留跑道中心距400 m, 跑道长度3 600 m。人工岛总体高程布置为中间高, 向四周降坡, 场地总体坡度取为1‰。其中, 机场道槽区地基处理要求工后沉降小于20 cm, 工后差异沉降小于0.15%, 设计使用期为100 a。依托工程平面布置见图1。

工程所处区域为一原生构造型海岸, 岩性为下古生代板岩和泥灰岩。湾内海底地形平缓, 海

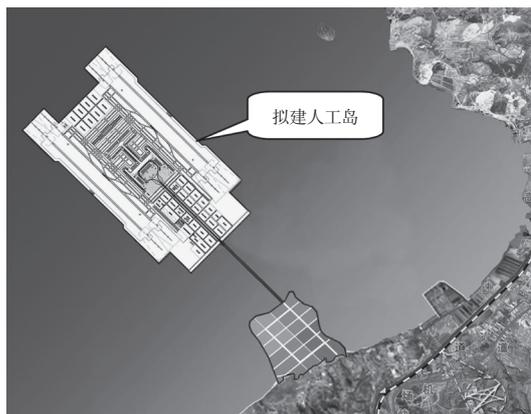


图1 依托工程平面布置

底坡度约0.18‰, 表层多为滨海相新近海积淤泥质土, 部分地段混砂。场区主要覆盖层为: ①₁粉土混淤泥, ①₂淤泥质土, ①₃淤泥, ②黏土, ③黏

收稿日期: 2012-06-01

作者简介: 齐彦博(1963—), 男, 高级工程师, 主要从事港口工程规划设计工作。

土, ④₁粉质黏土, ④₂黏土, ⑤₁粉质黏土, ⑤₂黏土, ⑥₁粉质黏土, ⑥₂黏土, 基岩为板岩。各可压缩层物理力学指标如表1所示。

表1 土层物理力学指标

| 层号 | 土层名称 | 含水率 $\omega/\%$ | 密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$ | 孔隙比 e | 液限 $\omega_l/\%$ | 塑限 $\omega_p/(%)$ | 快剪 | | 固结系数(0.1 kPa) | |
|----------------|-------|--------------------|-------------------------------|---------|------------------|----------------------|---------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | | | | | | c/kPa | $\phi/(^\circ)$ | $C_H/(10^{-3} cm^2 \cdot s^{-1})$ | $C_V/(10^{-3} cm^2 \cdot s^{-1})$ |
| ① ₁ | 粉土混淤泥 | 28.0 | 1.915 | 0.773 | 25.3 | 19.2 | 11.0 | 29.4 | 8.770 | 9.500* |
| ① ₂ | 淤泥质土 | 43.0 | 1.771 | 1.140 | 36.6 | 19.5 | 9.5 | 2.3 | 0.300* | 0.323 |
| ① ₃ | 淤泥 | 63.7 | 1.590 | 1.769 | 52.6 | 26.9 | 9.1 | 0.4 | 0.234 | 0.298 |
| ② | 黏土 | 36.7 | 1.825 | 1.018 | 51.1 | 26.8 | 65.0 | 10.0 | 4.169 | 2.194 |
| ③ | 黏土 | 42.8 | 1.755 | 1.190 | 52.4 | 26.6 | 45.0 | 4.5 | 2.138 | 2.178 |
| ④ ₁ | 粉质黏土 | 25.5 | 1.942 | 0.730 | 32.0 | 17.3 | 54.0 | 14.0 | 4.212 | 5.446 |
| ④ ₂ | 黏土 | 29.6 | 1.901 | 0.836 | 41.3 | 21.2 | 38.0 | 15.5 | 1.365 | 1.994 |
| ⑤ ₁ | 粉质黏土 | 24.0 | 1.971 | 0.680 | 32.8 | 17.7 | 74.8 | 13.3 | 6.137 | 4.938 |
| ⑤ ₂ | 黏土 | 27.6 | 1.925 | 0.782 | 40.1 | 20.9 | 86.5 | 7.6 | 3.168 | 3.765 |
| ⑥ ₁ | 粉质黏土 | 24.8 | 1.959 | 0.702 | 34.9 | 19.0 | 60.0* | 15.0* | 5.200 | 3.860 |
| ⑥ ₂ | 黏土 | 26.7 | 1.941 | 0.756 | 40.9 | 21.4 | 95.0 | 13.5 | 4.921 | 4.629 |

| 层号 | 土层名称 | 压缩系数 α_{1-2}/MPa^{-1} | 压缩模量 E_{s1-2}/MPa | 渗透系数 | | 前期结力 P_c/kPa | 超固比 OCR | 次固结系数 (0.1 kPa) $C_{\alpha\epsilon}/(10^{-3} cm^2 \cdot s^{-1})$ | 压缩指数 C_c | 回弹指数 C_s |
|----------------|-------|---------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|--------------|--|------------|------------|
| | | | | $k_H/(cm/s^{-1})$ | $k_V/(cm/s^{-1})$ | | | | | |
| ① ₁ | 粉土混淤泥 | 0.29 | 6.56 | $8.30 \times 10^{-7*}$ | $7.50E \times 10^{-7*}$ | | | $1.00 \times 10^{-3*}$ | 0.300* | 0.010* |
| ① ₂ | 淤泥质土 | 0.99 | 2.48 | $2.80 \times 10^{-7*}$ | $2.50E \times 10^{-7*}$ | 34.7 | 7.10 | $1.50 \times 10^{-3*}$ | 0.458 | 0.042 |
| ① ₃ | 淤泥 | 2.13 | 1.36 | $6.70 \times 10^{-8*}$ | $6.00 \times 10^{-8*}$ | 42.5 | 0.66 | $2.00 \times 10^{-3*}$ | 0.624 | 0.070 |
| ② | 黏土 | 0.36 | 6.04 | 5.10×10^{-9} | 8.20×10^{-8} | 353.5 | 4.29 | 9.23×10^{-4} | 0.268 | 0.045 |
| ③ | 黏土 | 0.42 | 5.10 | 2.08×10^{-8} | 1.37×10^{-8} | 287.9 | 2.54 | 1.21×10^{-3} | 0.481 | 0.063 |
| ④ ₁ | 粉质黏土 | 0.25 | 6.99 | 4.80×10^{-8} | 1.83×10^{-7} | 295.8 | 2.03 | 1.02×10^{-3} | 0.223 | 0.021 |
| ④ ₂ | 黏土 | 0.28 | 6.63 | 4.90×10^{-8} | 3.65×10^{-8} | 341.4 | 1.76 | 9.51×10^{-4} | 0.313 | 0.035 |
| ⑤ ₁ | 粉质黏土 | 0.22 | 7.83 | 1.59×10^{-7} | 8.17×10^{-8} | 395.5 | 1.46 | 4.89×10^{-4} | 0.225 | 0.021 |
| ⑤ ₂ | 黏土 | 0.24 | 7.63 | 5.81×10^{-8} | 4.50×10^{-8} | 395.3 | 1.44 | 4.13×10^{-4} | 0.265 | 0.032 |
| ⑥ ₁ | 粉质黏土 | 0.23 | 7.67 | 4.08×10^{-8} | 2.27×10^{-8} | 378.8 | 0.98 | 1.29×10^{-4} | 0.218 | 0.021 |
| ⑥ ₂ | 黏土 | 0.18 | 9.31 | 2.84×10^{-8} | 1.38×10^{-8} | 488.4 | 1.06 | 7.18×10^{-4} | 0.250 | 0.027 |

注: *为经验值。

依托工程人工岛地基可压缩性土层总厚度大, 基岩面以上的第四系沉积层约为45~65 m, 表层为10.5~13.8 m厚的软土, 其下是以黏性土为主的第四系沉积层; 人工岛陆域形成回填厚度约为13~15 m, 附加应力高; 为满足机场用地需求, 地基处理标准高, 设计使用期长, 因此, 需深入分析人工岛形成和地基处理过程中上部软土和下部黏性土所产生的沉降及工后残余沉降、差异沉降, 为确定地基处理方案提供技术支持。

2 沉降计算方法及边界条件

本文分别采用经典土力学理论和有限单元法

计算机场道槽区的沉降。经典土力学理论中, 地基土总沉降量计算采用分层总和法, 上部软土层采用超载预压排水固结, 成层地基排水固结理论采用巴隆固结理论和太沙基单向固结理论。

2.1 经典土力学法

考虑到施工期地基的总沉降以主固结沉降为主, 而工后地基土体沉降中次固结沉降所占比例较高, 因此施工期沉降量和工后沉降量分别采用经验系数法和公式法^[1]。

$$\text{经验系数法的计算公式: } S = m_s S_c \quad (1)$$

$$\text{公式法的计算公式: } S = S_d + S_c + S_s \quad (2)$$

式中: S 为地基的总沉降(m); S_c 为主固结沉降

(m) ; m_s 为沉降修正系数; S_d 为瞬时沉降(m) ; S_s 为次固结沉降(m)。

本文所进行的沉降计算中,地基的最终主固结沉降量采用e-p曲线法计算,考虑到本工程天然地基为成层土,为提高计算精度,对于成层土的竖向固结度,分别采用化引当量层法和微分方程数值解法进行计算。

2.1.1 化引当量层法

目前,经典土力学理论计算土体排水固结沉降的解析解法仅适用于均质土层,即土体竖向固结系数 c_v 为定值,当地基土体为成层土,各层土的固结系数不相等时,无法采用解析法直接进行计算,此时,可采用化引当量层法、加权固结系数法或平均指标法将各土层固结系数转化为同一数值,然后按照均质土层的计算方法进行求解。在上述3种方法中,加权固结系数法及平均指标法只改变各层土的固结系数,而并不改变土层厚度,这将导致土体在某一时刻 t 的时间因数 T_v ($T_v=c_v t/H^2$)发生变化,进而影响固结度计算结果的准确性,而化引当量层法通过同时改变土层的固结系数 c_v 及厚度 H ,保证时间因数 T_v 不发生改变,进而保证固结度计算结果的准确性。

采用化引当量层法进行计算时,从各分层中选取某一土层的固结系数 c_{vc} 作为整个土层的竖向固结系数,即各土层的竖向固结系数采用定值。将某土层的固结系数 c_{vi} 改变为 c_{vc} ,为使其在同一时刻 t 达到同样的固结度,则其原厚度 H_i 需改变为换算厚度 H'_i ^[2]。

$$H'_i = H_i \sqrt{\frac{c_{vc}}{c_{vi}}} \quad (3)$$

式中: c_{vc} 为用于计算的土层固结系数(m^2/s) ; c_{vi} 为第 i 层土的实际固结系数(m^2/s) ; H_i 为第 i 层土的实际厚度(m) ; H'_i 为第 i 层土的换算厚度(m)。

此时,各土层的总厚度 H_c 由下式计算:

$$H_c = \sum_{i=1}^n H'_i \quad (4)$$

经过上述计算,原成层土地基可得转化为固结度为 c_{vc} 且厚度为 H_c 的均质土层,此时成层土地

基的竖向固结度可按照均质土进行计算。

2.1.2 微分方程数值解法

采用经典土力学理论计算土体排水固结沉降时,亦可采用解析法得到成层土的固结度。

地基土单向固结的微分方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial Z^2} \quad (5)$$

式中: u 为地基中任意点的超静水压力(kPa) ; t 为时间(s) ; Z 为地基中任意点到天然地面的高度(m) ; c_v 为土的固结系数(m^2/s) ;

根据差分法求解上述微分方程,其边界条件为 $u|_{z=0} = u_0, u|_{z=H} = 0$ 及 $\frac{\partial u}{\partial Z}|_{z=H} = 0$ 。求解该微分方程,即可得到任意点在任意时刻的超静水压力 u_t ,则该点的固结度为:

$$U_t = \frac{u_0 - u_t}{u_0} \quad (6)$$

式中: u_0 为地基中任意点原始的超静水压力(kPa) ; u_t 为地基中任意点在任意时刻的超静水压力(kPa) ; U_t 为地基中任意点在任意时刻的固结度。

2.2 有限单元法

采用蠕变模型模拟土体单元,计算过程中考虑了地下水的渗流过程,采用流固耦合法模拟土体的超孔隙水压力消散、有效应力增大的排水固结过程,此外,针对土体沉降后部分回填料沉入水中,导致有效密度由天然密度变为浮密度的情况,采用重新定义网格及水压力的方法模拟这一变化。

理想高压固结试验的应力-应变曲线如图2所示,其中蠕变模型的计算参数 A, B, C 可采用压缩系数、压缩指数和回弹指数换算得出^[3]。

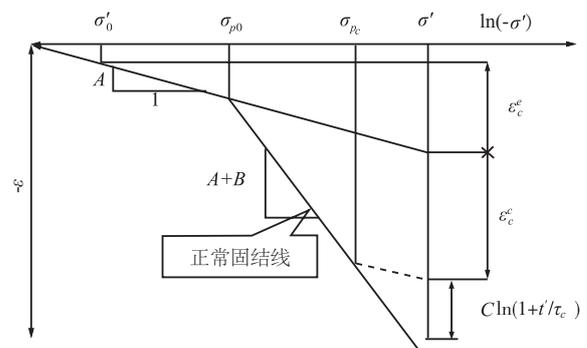


图2 高压固结试验中理想的应力-应变关系

2.3 计算边界条件

对飞行区道槽区在地基处理过程中及工后一定年限的沉降进行了分析,地基处理方法按超载预压法考虑,预压荷载80 kPa,满载时间150 d。沉降计算分析过程中,计算水位取设计低水位,场区结构层厚度取70 cm,使用荷载为30 kPa,地基处理深度至①₃淤泥层底。

3 沉降计算结果及分析

3.1 施工期沉降计算结果分析

分别采用经典土力学理论及有限单元法对本

依托工程道槽区的施工期沉降量进行计算。图3给出了采用有限单元法进行沉降量计算的计算模型及施工期结束时地基中的竖向位移及超孔隙水压力分布云图。不同计算方法所得施工期沉降量计算结果如表2所示。

表2 施工期沉降分析结果

| 沉降量计算方法 | 上部软土层 | 下部黏土层 | 施工期 总沉降/m |
|----------|---------|---------|--------------|
| | 施工期沉降/m | 施工期沉降/m | |
| 化引当量层法 | 2.023 | 0.059 | 2.082 |
| 微分方程数值解法 | 2.000 | 0.132 | 2.132 |
| 有限单元法 | | | 2.540 |

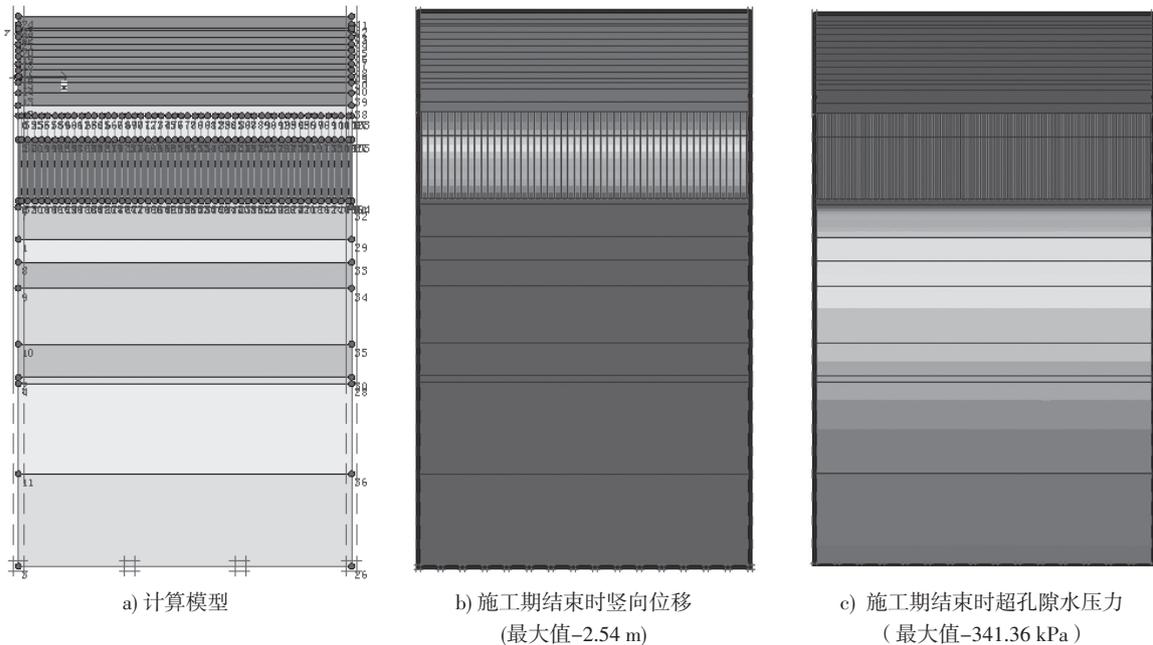


图3 有限元分析模型及施工期结束时的计算结果

可以看出,采用经典土力学理论计算土体沉降是工程界常用的计算方法,其计算结果比较符合工程实际。本次分析计算中,经典土力学理论的固结度推算分别采用化引当量层法及微分方程数值解法,采用微分方程数值解法所得结果接近精确解(2.132 m),采用化引当量层法所得为近似解(2.082 m)。而采用有限元分析的方法所得的施工期沉降大于采用经典土力学理论所得计算结果,其原因主要是由于目前有限元计算所采用的本构模型与土体的应力-应变特性并不完全一致;若当地地区经验丰富时,可采用反分析法结合工程经验精细调整计算参数,以使计算结果更加符合工程实际;但当缺乏地区经验时,有限元分

析结果仅可作为参考。

3.2 工后残余沉降计算结果分析

采用经典土力学理论计算时,主、次固结最终沉降计算采用 $e-p$ 曲线法,固结度计算分别采用化引当量层法及微分方程数值解法。

由于本工程实施时上部软土层所采用的地基处理方法为超载预压法,处理深度范围内软土层的主固结沉降在施工期基本已经完成,故可考虑其工后残余主固结沉降理论计算结果为0,因此,本次计算仅考虑处理深度以下的可压缩土层由排水固结所产生的沉降造成的残余主固结沉降情况。工后残余沉降计算结果如图4及表3所示。

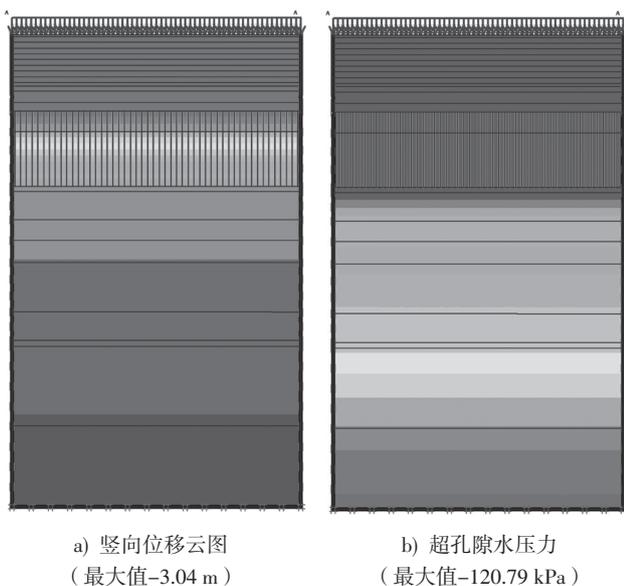


图4 工后100 a有限元分析结果

表3 3种方法残余沉降分析结果

| | 使用期/a | 残余主固结 沉降/m | 次固结 沉降/m | 残余沉降/m |
|------------|-------|---------------|-------------|--------|
| 化引当量层 法 | 5 | 0.000 | 0.046 | 0.046 |
| | 10 | 0.003 | 0.066 | 0.069 |
| | 20 | 0.024 | 0.088 | 0.112 |
| | 50 | 0.117 | 0.120 | 0.236 |
| | 100 | 0.243 | 0.145 | 0.387 |
| 微分方程法 | 5 | 0.026 | 0.046 | 0.072 |
| | 10 | 0.066 | 0.066 | 0.132 |
| | 20 | 0.143 | 0.088 | 0.231 |
| | 50 | 0.294 | 0.120 | 0.414 |
| | 100 | 0.433 | 0.145 | 0.578 |
| 有限单元法 | 5 | | | 0.040 |
| | 10 | | | 0.090 |
| | 20 | | | 0.170 |
| | 50 | | | 0.340 |
| | 100 | | | 0.500 |

由上述计算结果可以看出，采用化引当量层法所得的残余沉降计算结果小于采用微分方程数值解法所得结果，而采用有限单元法的分析结果介于两者之间，表明蠕变模型较适用于类似工程的工后残余沉降分析。

经典土力学理论计算结果表明，采用超载预压法处理上部软土层后，消除了大部分主固结沉降，但由于本依托工程地基土体下部的可压缩性土层总厚度大，加之本工程的使用期长达100 a，采用该地基处理方案仍无法满足工后残余沉降对

使用的要求。如增加地基处理深度，将大幅提高地基处理难度及工程造价。考虑到机场跑道在使用期主要是对差异沉降要求较高，因此设计上可以通过预留沉降、定期维修的方式满足地基处理对工后残余沉降的使用要求。

在固结度的计算过程中，为了简化计算，公式推导过程中取固结系数为常量，而在地基实际加固过程中是变量，这导致了工后主固结残余沉降量计算结果偏大^[4-5]；此外，有关研究表明，土体的次固结沉降量与荷载大小及加荷方式有关^[6]，依托工程可压缩性土层中，除第1大层及第6大层外，均为不同程度的超固结土，采用超载预压法进行地基处理后，第1大层土也可视为超固结土，而常规的次固结计算中无法考虑应力历史对次固结的影响，导致工后次固结沉降量计算结果偏大。深圳盐田二期集装箱堆场软土地基采用堆载预压法进行地基处理，30 a工后沉降控制30 cm，实测5 a残余沉降小于5 cm；深圳大铲湾集装箱码头后方陆域软土地基采用真空联合超载预压法进行地基处理，工后25 a控制沉降25 cm，实测3 a残余沉降小于1 cm^[7]，这2个工程实例的实测工后沉降均小于经典土力学理论计算结果。

综合上述理论分析和工程实测数据，可以看出，对于超载预压的软土地基和超固结土的理论计算的工后残余沉降计算结果往往偏大。在保证地基处理质量的前提下，依托工程地基处理后的工后沉降量实测值应小于理论计算结果。

4 结语

1) 本工程仅对上部软土层采用排水固结法进行处理，从理论计算结果看，使用期100 a时的残余沉降数值较大，还无法满足人工岛机场跑道地基处理技术要求，设计上可采用预留沉降、定期维修的方式来满足地基处理对工后残余沉降的要求，较经济合理。

2) 采用经典土力学理论进行残余沉降的计算，成层土的固结度计算分别采用化引当量层法和微分方程数值解法两种方法，由于二者求解方法不同，导致最终的计算结果有所不同。根据大量类似工程地基处理期间及工后沉降的观测数据

分析,采用化引当量层法计算成层土地基的一维固结问题所得出的计算结果更加符合实际情况,并且计算方法简单,因此较适用于此类地基沉降量计算分析。

3)采用有限单元法计算分析施工期沉降所得数值较大,需要结合当地工程经验反向分析调整计算参数才能得到较准确结果;但工后残余沉降的计算分析结果与经典土力学理论计算结果接近,表明蠕变模型较适用于类似工程的工后残余沉降分析。

4)机场跑道主要是对差异沉降要求较高,根据其他机场经验,在满足差异沉降要求的基础上,可适当放宽对工后沉降量的要求,以降低工程造价。

地基沉降计算的影响因素非常复杂,如计算参数的准确性、计算假设条件的符合性等,加之地基处理原材料及施工质量的控制也会对实际沉降产生影响,因此沉降计算结果往往与工程实测数据存在一定的偏差。本文仅针对所依托的人工岛工程,从理论计算角度对地基沉降结果进行了

分析讨论,就目前技术水平而言,地基沉降难以做到准确计算,其结果一般是理论计算结合当地经验综合分析判断。由于本文所依托的人工岛工程目前尚未实施,所得结论尚有待于工程实践的检验和完善。

参考文献:

- [1] 常士骠,张苏民. 工程地质手册[M]. 4版.北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [2] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [3] 张学岩,闫澍旺. 岩土塑性力学基础[M]. 天津:天津大学出版社,2006.
- [4] 周琦,刘汉龙,陈志波. 考虑固结参数变化时砂井地基的非线性径向固结[J]. 岩土力学,2007,28(S1):865-868.
- [5] 吕卫清,董志良,陈平山,等. 正常固结软土渗透系数与固结应力关系研究[J]. 岩土力学,2009,30(3):769-773.
- [6] 余湘娟,殷宗泽,董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(6):124-127.
- [7] 深圳研究设计院工程检测中心. 深圳港大铲湾港区集装箱码头一期工程监测总报告[R]. 深圳:深圳研究设计院工程检测中心,2011.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

## · 消 息 ·

### 惠州港加快发展铁水联运

日前,广东省惠州市政府与广州铁路(集团)公司签订惠州港铁水联运战略合作框架协议,助推惠州港成为京九铁路南端的便捷出海口。

惠州市副市长王胜表示,市委市政府将与广州铁路(集团)公司共同推进惠州港铁水联运的发展,助推惠州港做大做强,更好地为惠州市经济社会发展服务。

惠州港铁水联运战略合作框架协议的签订,不仅可以减少运输环节,提高运输效率,降低物流成本,而且有利于优化运输通道布局,扩大港口经济腹地范围。通过铁水联运,惠州港的腹地可延伸至江西、湖南乃至云贵川等内陆地区,为惠州港的发展提供广阔空间。

来源:《中国交通报》