

路堤荷载下次固结沉降分析

刘开元 王 祥

(铁道第四勘察设计院地路处, 武汉 430063)

【摘要】 以广珠准高速铁路软土路堤试验的沉降测试结果为例, 对目前国内计算次固结沉降的方法进行了实例分析。提出对于工后沉降要求较高的情况下, 应考虑次固结沉降。

【关键词】 路堤荷载; 次固结; 沉降

【中图分类号】 TU433

Analysis of the Secondly Consolidation Settlement with Embankment Load

【Abstract】 Taking the results of the settlement of the test on the Guangzhou-Zhuhai Qusai-High-speed Railway for example, analyzing the ways of calculation on secondly consolidation settlement in our country now. With the high after settlement standard, the secondly consolidation settlement should be taken account.

【Key words】 embankment load; secondly consolidation; settlement

0 引言

通常认为软土地基在荷载作用下发生的沉降由三部分组成, 即瞬时沉降 s_d 、主固结沉降 s_c 和次固结沉降 s_s 。加荷的瞬间(短时间)主要是按弹性模式发生沉降, 然后按主固结沉降模式(通常认为指数函数规律)发展, 最后主要按次固结沉降模式(土骨架的蠕动变形等所引起的沉降)发展。对于瞬时沉降和主固结沉降已进行了大量的研究, 其计算方法和公式已被广大工程技术人员应用。但对于次固结沉降, 由于其量值较小, 并未引起工程技术人员的高度重视, 在许多工程设计中被忽略。随着高等级公路和铁路的兴建, 其较高的工后沉降标准, 如《京沪高速铁路路线桥隧站设计暂行规定》规定: 路基工后沉降量一般地段不应大于 10 cm, 桥台台尾过渡段路基工后沉降量不应大于 5 cm, 这使得考虑次固结沉降成为必要。

目前认为次固结沉降主要是在有效应力已经基本不变、但土的体积仍随时间增长而发

生的压缩^[1]。国内外对次固结已进行了大量的研究, 提出许多描述次固结沉降的模型和公式, 但由于模型及公式的复杂性, 工程中应用得较少。文中以广珠准高速铁路软土路堤试验的沉降测试结果为例, 以较为简单、易于应用的计算方法, 对次固结沉降进行了计算分析。

1 次固结沉降计算方法

目前国内应用于次固结沉降计算的方法, 主要有钱家欢-王盛源法^[2,3](以下简称钱-王法)、规范法^[4]、三模式法^[5,6]、 ds/dt 法^[7]。

1.1 钱家欢-王盛源法

用实测的沉降资料, 绘制 $\lg[(\epsilon(\infty) - \epsilon(t))/q_0] - t$ 关系曲线, 式中: $\epsilon(\infty) = s(\infty)/H$, $\epsilon(t) = s(t)/H$, $s(\infty)$ 、 $s(t)$ 分别为最终沉降和不同的 t 时的沉降, q_0 为路堤荷载, H 为地基压缩土层的厚度。可得到如图 1 所示的曲线, 图中 B 点以前为曲线段, 这段时间内的变形包含渗水固结和骨架的蠕动变形两部

分,但绝大部分为渗水固结变形;B点以后为直线段,这段时间内的变形几乎为骨架蠕动变形,总应力已接近骨架有效应力。因此可用B点判断主、次固结沉降的时间,从而由最终沉降减去B点对应时刻的沉降,可近似得次固结沉降值。

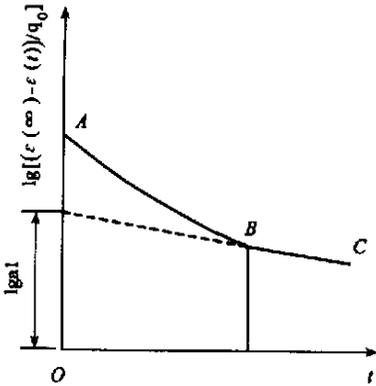


图1 主固结与次固结分界曲线图

1.2 规范法

方法1 次固结沉降用下述经验公式计算:

$$s_s = \beta \lg(t/t_0) \quad (1)$$

式中:β为s_s-lg t曲线上呈直线段的斜率,由实测沉降观测结果推算;t₀为s_s-lg t曲线上呈直线段开始的时间;t为需要计算次固结沉降的时间。

方法2 次固结沉降用下列公式计算:

$$s_s = \sum_{i=1}^n \Delta h_i \frac{C_{ai}}{1 + e_i} \lg\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (2)$$

式中:C_{ai}为第i层土的次固结系数,无试验值时可近似取C_{ai}=0.018w,w为天然含水量;Δh_i为压缩土层中第i层土厚度,整个压缩土层厚度为H;t₀为主固结完成时的时间;e_i为第i层土的孔隙比,其他符号意义同方法1。

1.3 三模式法

基于沉降发生分三个过程,设想将其分成三部分,分别对各部分进行预测,对提高预测的精度可能会有所裨益。

具体过程为(其原理类似日本Asaoka

法^[5,6]):

1)根据沉降发展三过程的概念,把现场实测的沉降资料整理成沉降-时间对数曲线(s_s-lg t曲线)。如图2为根据广珠准高速铁路软土路堤试验段3[#]断面的实测沉降数据整理成的s_s-lg t曲线。

2)可近似把曲线分成三段直线:直线AB为以瞬时沉降为主;直线BC以主固结沉降为主;直线CD以次固结沉降为主,见图2。

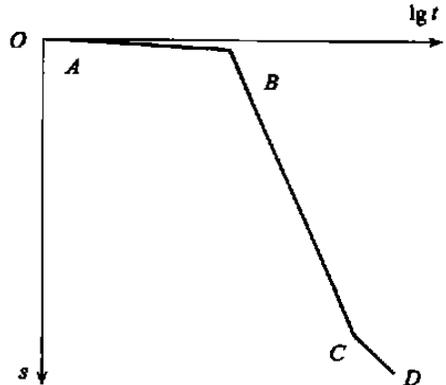


图2 s_s-lg t曲线示意图

3)按某一时间间隔ΔT得到沉降序列s₁, s₂, ..., s_n(s_n为时间为nΔT时的沉降), ...。当t→∞时, s_n=s_{n-1}。根据此原理,用图2中直线段AB、BC、CD中的数据,作s_n-s_{n-1}关系曲线图,这些点大致呈三条直线状,以这些点可作三条直线,分别交与坐标轴成45度角的直线,可得图3中的A点、B点、C点。其中:

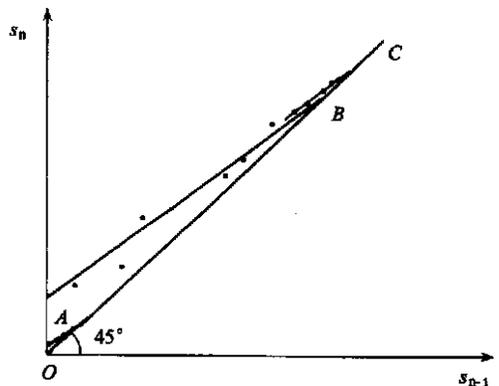


图3 三模式预测沉降示意图

A 点为瞬时沉降的预测值; B 点为主固结沉降的预测值; C 点为次固结沉降的预测。必须注意的是,在预测时对一些相关性较差的点应注意舍去,否则在作图时会产生较大的误差。

1.4 ds/dt 法

根据沉降观测资料进行整理与分析,取填筑到位后进入预压期的沉降速率 ds/dt 为纵坐标,取相应时间的累积沉降量 s 为横坐标,绘制 $(ds/dt)-s$ 曲线。根据次固结沉降为主固结沉降基本完成后由于土粒骨架蠕变产生的变形,可分辨出次固结沉降发生段的相应不同斜率的两条直线,分别相交于坐标横轴,得次固结沉降及最终沉降。图 4 为广珠准高速铁路软土路堤试验段 3[#] 断面实测沉降的预测,直线段 AB 交坐标横轴值为主固结沉降值 s_c ,直线段 BC 交坐标横轴值为最终沉降值 s_{∞} 。

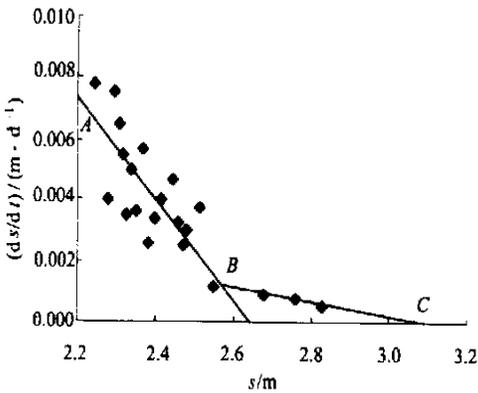


图 4 3[#] 断面 ds/dt 法预测沉降示意图

2 工程实例

2.1 工程概况^[8]

广(州)珠(海)准高速铁路及珠海港支线穿越广泛沉积第四系松软地层的珠江三角洲平原地带,全线软土路堤长达 50.3 km。软土试验路堤位于珠海斗门县白蕉镇,北距斗门干道 700 m 左右,南邻通往新白蕉镇公路约 200 m。试验路堤范围选择在 DK122 + 366.02 ~ + 690 的直线地段,路堤长 323.98 m,路基面宽 12 m,设计路堤高约 6.4 m(含预压土高 1.4 m)。试验工作于 1995 年 11 月开始,1996 年 10 月完成预压土填筑,在预压荷载作用下观测至 1997 年 12 月,历时 2 年零 2 个月。

试验路堤地处三角州平原地区,地势平坦,场地及周围遍布渔塘、稻田。地质纵断面表明,地层土质分布较均匀,层位稳定。其地层上部为第四系近代滨海相特征显著的海相混合沉积的松软层,下部为寒武系八村群砂页岩。

试验断面土层物理力学指标统计见表 1,试验断面位置及处理方式见表 2^①。

2.2 计算结果分析

基于本文所述的方法,对广珠准高速铁路软土试验路堤塑料排水板处理段的实测沉降资料进行分析,结果见表 3。

从表 3 可知,ds/dt 法得出的次固结沉降量值最大,其值为 390~483 mm;钱-王法次之,其值为 266~385 mm;三模式法较小,其

表 1 试验断面土层物理力学指标统计

| 深度 h/m | 土层 | 含水量 w/% | 重度 γ/(kN·m ⁻³) | 孔隙比 e | 塑性 指数 I _p | 液性 指数 I _L | 压缩 模量 Es/MPa | 竖向固 | 径向固 | 固结快剪 | | 快剪 | |
|-----------|-----------|------------|-------------------------------|----------|----------------------------|----------------------------|--------------------|--|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | | | | | | | 结系数 C _v / | 结系数 C _h / | C _{cu} / | φ _{cu} / | C _u / | φ _u / |
| | | | | | | | | (10 ⁻³ cm ² ·s ⁻¹) | (10 ⁻³ cm ² ·s ⁻¹) | kPa | (°) | kPa | (°) |
| 0~14 | 淤泥质 粘土 | 54.50 | 16.7 | 1.501 | 23.9 | 1.34 | 1.79 | 1.385 | 1.930 | 15.1 | 17.7 | 8.86 | 3.56 |
| 14~26 | 淤泥 | 64.53 | 16.1 | 1.823 | 33.7 | 1.20 | 1.29 | 1.183 | 1.234 | 11.0 | 14.4 | 7.92 | 1.23 |
| 26~43 | 淤泥 | 51.10 | 16.6 | 1.600 | 26.0 | 1.12 | 1.92 | 4.545 | | 32.0 | 11.9 | 11.0 | 2.71 |

①王 祥·广珠准高速铁路软土路基填筑试验塑料排水板处理段的沉降分析·铁路地质与路基,2000(4):19~24

表2 试验断面位置及处理方式

| 断面号 | 断面位置 | 中心实际填高 H/m | 埋沉降板处软土厚度 d/m | 处理方式 |
|-----|-----------------|--------------|-----------------|--|
| 3# | DK122+470~510 | 8.54 | 33.5 | 二层土工布, 塑料排水板深 20 m, 间距 1.2 m |
| 4# | DK122+510~555 | 8.26 | 35.9 | 二层土工布, 塑料排水板深 20 m, 间距 1.0 m |
| 5# | DK122+555~600 | 8.38 | 40.2 | 三层土工布, 塑料排水板深 22 m, 间距 1.0 m |
| 6# | DK122+600~645 | 8.05 | 38.0 | 一层土工布及 5 m(宽)×2m(高)反压护道, 排水板深 20 m, 反压护道下排水板深 16 m, 间距 1.0 m |
| 7# | DK122+645~667.5 | 7.81 | 31.4 | 二层土工格栅, 塑料排水板深 20 m, 间距 1.0 m |
| 7# | DK122+667.5~690 | 8.23 | 31.4 | 二层土工网, 塑料排水板深 20 m, 间距 1.0 m |

注:中心实际填高含沉降

值为 122~213 mm。而规范法得出的量值普遍偏小, 仅为 10 cm 左右, 这可能是由于计算时采用的次固结系数偏小或反映次固结的 β 值偏小的缘故; 规范法 2 中次固结沉降量值大小随不同断面里程的变化幅度较小, 这是因为相近里程的土层含水量变化不大, 而次固结系数又假定与含水量正相关有关。三模式法由于在其作图的过程中有一定的随意性, 因此用该方法进行计算时宜注意剔除相关性较差的点; 相比而言, 钱-王法和 ds/dt 法, 由于在作图中用及所有数据, 其可信度较高, 但往往需要较长的观测时间。因此在进行次固结沉降时, 宜根据工程实际, 选择不同的计算方法。

表3 各种方法计算的沉降分析(3#~7#断面)

| | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 7# |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| s_{∞}/mm | 3 012 | 2 768 | 2 684 | 2 518 | 2 685 | 2 580 |
| ① s_s/mm | 334 | 337 | 385 | 318 | 270 | 266 |
| $(s_s/s_{\infty})/\%$ | 11.1 | 12.2 | 14.3 | 12.6 | 10.1 | 10.3 |
| s_{∞}/mm | 3 012 | 2 768 | 2 684 | 2 518 | 2 685 | 2 580 |
| 1 s_s/mm | 104 | 111 | 116 | 115 | 111 | 118 |
| ② $(s_s/s_{\infty})/\%$ | 3.4 | 4.0 | 4.3 | 4.6 | 4.1 | 4.6 |
| 2 s_s/mm | 126 | 131 | 134 | 112 | 107 | 115 |
| $(s_s/s_{\infty})/\%$ | 4.2 | 4.7 | 5.0 | 4.4 | 4.0 | 4.5 |
| s_{∞}/mm | 2 978 | 2 672 | 2 744 | 2 644 | 2 568 | 2 547 |
| ③ s_s/mm | 159 | 137 | 164 | 213 | 122 | 140 |
| $(s_s/s_{\infty})/\%$ | 5.3 | 5.1 | 6.0 | 8.1 | 4.8 | 5.5 |
| s_{∞}/mm | 3 048 | 2 727 | 2 667 | 2 541 | 2 634 | 2 657 |
| ④ s_s/mm | 435 | 390 | 483 | 421 | 465 | 413 |
| $(s_s/s_{\infty})/\%$ | 16.6 | 14.3 | 18.1 | 16.6 | 17.6 | 15.5 |

注:1)①、②、③、④分别代表钱-王法、规范法、三模式法和 ds/dt 法;

2) s_s 、 s_{∞} 分别表示次固结沉降和最终沉降;

3) 钱-王法和规范法的最终沉降值为实测沉降经双曲线法推算而得^[9];

4) 规范法中计算次固结的时间以 20 年计;

5) 规范法 2 中计算次固结沉降的压缩土层厚度按《建筑地基设计规范》(GBJ7-89)取

图 5 为堆载高度 H 和软土厚度 d 与次固结沉降量 s_s 占最终沉降量 s_{∞} 比值关系曲线。从图 5 中可知, 无论用何种方法计算的次固结沉降, 其量值大致与软土深度及堆载高度成正比相关。

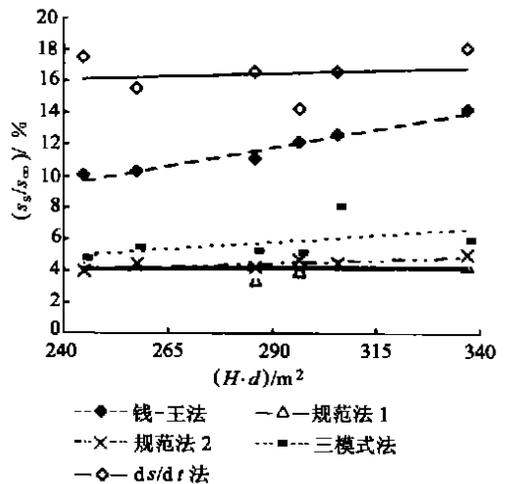


图 5 H 和 d 与 s_s/s_{∞} 比值关系曲线

综合几种方法推算的次固结沉降量占最终沉降量的比例为 10% 左右, 这个比例的沉降值还是比较大的。其他工程中亦大致测得该比值^[9]。因此, 在珠江三角洲的深厚软土上修建各种建筑物, 不计及次固结沉降是不合适的。研究表明: 通过加大堆载量和加长堆载的持荷时间, 可降低次固结系数并加快次固结沉降的发生^[10], 且通过超载预压可减少使用荷载下的次固结沉降^[11]。

3 结论

1) 通过对次固结沉降的分析可知, 软土较 (下转第 233 页)

弱进行补强计算和桩的设计,才会有最经济的复合地基。

6)在上部荷载作用下,地基土的压缩变形随各土层模量不同而各异。由于复合桩的植入,其压缩模量得到极大提高。因此,尽管原土层间模量有些差异,相比较于复合桩植入后的复合模量,这种差异可以忽略而取用整体复合模量。压缩模量应按实际应力状态下取值。

7)根据工程经验和试验研究资料,建议褥垫层采用 100~200 mm 厚的小碎石满铺而成,并无须过高的密实度,以保证褥垫层的调节能力。同时建议对加褥垫层后的复合地基承载力公式中桩承载部分进行适度的折减,例如考虑 0.8~1.0 的折减。

8)关于复合地基承载力基本值,按相对变形值 $s/b=0.004\sim 0.015$ 确定的问题。笔者

认为,复合地基毕竟不是桩基,其破坏或失效与普通地基土均多是由于上部荷载过大后基底进入塑性区过多而导致土体剪切破坏,变形超限。从大量的桩土复合地基变形资料看,建筑物的沉降量都很小,而与普通粘土地基上的建筑物沉降相比要小得多。因此,在确定基本承载力时按 $s/b=0.004$ 所对应的荷载值过于保守。建议至少按 $s/b\geq 0.008$ 所对应的荷载值确定。

由于半刚性桩是由注入地下的胶凝材料与地下土混合而成,因此,其强度及其它特性是有地域性的。本文资料及立论观点立足于内陆平原地区,对于山区及沿海土层情况当另论。

收稿日期 2002-04-08

(上接第 194 页)

深厚的珠江三角洲地区有一定程度的次固结沉降存在,其值占最终沉降值的比例为 10% 左右。对于工后沉降要求较高的工程,应该考虑次固结沉降,否则易产生较大的误差,甚至造成工程事故。次固结沉降量近似与软土厚度及堆载高度正相关。

2)为了满足较高标准的工后沉降要求,可通过加大堆载量及延长堆载时间来降低次固结系数,并加快速次固结沉降的发生,通过超载预压可减少使用荷载下的次固结沉降。

致谢:参加广珠准高速铁路软土路堤试验研究的人员还有杜文山、李小和、陈明德、陈占、吴东、李燕君、肖汉英、杨正发等,对他们的辛勤工作一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 1 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算(第二版).北京:中国水利水电出版社,1996.188~189
- 2 王盛源.饱和粘性土主固结与次固结变形分析.岩

土工程学报,1992,14(5):70~75

- 3 孙更生,郑大同.软土地基与地下工程.北京:中国建筑工业出版社,1984.56~59
- 4 JTJ017-96 公路软土地基路堤设计与施工技术规范
- 5 Akira Asaoka. Observational procedure of settlement prediction. Soils and Foundations, 18(4):88~101
- 6 蔡体楞主编.杭甬高速公路软土地基处理.杭州:杭州出版社,1998.151~152
- 7 倪一鸿.公路荷载作用下软土地基次固结.公路,1999(10):56~61
- 8 杜文山,李小和等.深厚层软土路堤控制后期沉降加固方法的研究.软土地基试验研究文集.武汉:中国地质大学出版社,2001.313~343
- 9 周虎鑫,陈晋国,陈荣生.强夯加固在高填方机场场道槽施工中的应用分析.公路,1995(10):5~8
- 10 朱向荣等.超载预压加固宁波机场场道软基.岩土工程学报,1992,14(增刊):30~38.
- 11 地基处理手册编委会.地基处理手册(第二版).北京:中国建筑工业出版社,2000.59~60

收稿日期:2002-04-04