

珠江三角洲地区软土路基实用稳定性判别方法

黄 腾¹, 谭祥韶¹, 吴玉刚²

(1. 广东省航盛建设集团有限公司岩土分公司, 广东 广州 511442; 2. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510200)

摘 要: 在系统总结分析珠江三角洲地区近二十条高等级公路软基施工填筑监测资料的基础上, 结合珠江三角洲地区高含水率软黏土的变形破坏特征, 提出一种基于实测沉降数据的稳定性判别方法。使用这种方法不但可以利用表面沉降资料进行稳定性判别, 还可以利用分层(深层)沉降资料针对地基中的最软弱层进行稳定性判别。

关键词: 软基; 稳定性; 沉降

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)03-0391-07

作者简介: 黄 腾(1975-), 男, 高级工程师, 硕士, 现从事软基方面的科研与施工管理工作。E-mail: gdgzht@sina.com。

A practical stability analysis method for the soft soil foundation on Pearl River Delta

HUANG Teng¹, TAN Xiang-shao¹, WU Yu-gang²

(1. Guangdong Province Hangshen Construction Group Co. Ltd., Guangzhou 511442, China; 2. Guangdong Province Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 510200, China)

Abstract: Through the systematic analysis on the monitored data of the soft soil foundation of nearly 20 freeways constructed on the Pearl River Delta, a new method was developed to evaluate the stability of the soft soil foundation by the combination of the monitored data of settlement and deformation characteristics of the soft soil. The stability of the softest soil strata of the foundation could also be analyzed by the new method with the subsurface settlement.

Key words: soft soil foundation; stability; settlement

0 引 言

沉降观测操作简单, 精度较高, 故在工程中广泛使用。因此利用沉降观测数据分析地基的稳定性具有现实意义。在软基上筑路时, 人们常采用监测数据的“阈值”来判断地基的稳定性, 指导填土节奏。例如: 对于砂井地基, 当某级填土的沉降速率大于 10 mm/d 时, 就认为地基处于不稳定状态^[1-3], 此时, 应放慢填土速率或采取应急措施。实际上软土路基的沉降速率与地基处理方式密切相关。对于砂井地基, 采用加筋措施后, 填土沉降速率大于 10 mm/d 时地基也往往处于稳定状态^[4]。而当采用真空预压联合堆载法时, 沉降速率大于 20 mm/d 时地基也往往处于稳定状态^[5-6]。沉降大小和发展趋势与地基土性质、地基处理方式、填筑方式和速率密切相关^[4, 15]。因此, 就上述情况而言, 采用常规的“阈值”判断地基稳定性的方法在大多数情况下偏于保守。

Parry 和 Wroth 通过对软黏土室内外试验的研究, 认为基于孔压和填土荷载的稳定性判别方法($\sum \Delta U \sim \sum \Delta p$)比较合理^[7]。但是使用该法时, 需要及时准确捕获超静孔隙水压力的峰值, 这对于高速公路等线性工程而言, 工作量较大, 难度也较大。而且 Leroueil

(1980) 和 Ladd (1991) 等学者的研究表明, 孔压突变往往发生在地基失稳时刻, 采用这种方法判别稳定性不具备实时有效性^[8-9]。周小文等(2005)的离心机实验结果也证实了 Leroueil 和 Ladd 等学者的观点^[10]。Ladd 提出一种基于侧向位移和表面沉降的稳定性判别方法^[8]。由于侧向位移引发的沉降是表面沉降的组成部分, 因而侧向位移发生突变时, 表面沉降也会随之突变, 这为利用二者的关系进行稳定性判别工作带来一定难度。而且, 由于目前工程中采用的侧向位移测试方法尚不能克服软土与侧向位移管之间的刚度不一致和变形不协调问题, 因此其测试结果的准确性与精度尚有待进一步研究^[11-14]。

因此, 利用沉降速率分析特定场地软基的稳定性时, 应当从该条件下沉降速率自身的特点入手, 而不是以统一的标准评判。本文从这一角度出发, 在系统总结分析了珠江三角洲地区近二十条高速公路软基施工期监测数据基础上, 研究了如何利用沉降速率分析地基的稳定性, 提出了一种基于沉降资料的稳定性判

基金项目: 广东省科技厅科技项目 (2002-08); 广东省重点科技项目 (200401469); 广东省科技计划重点项目 (2004B32801002)

收稿日期: 2005-12-26

别方法。采用该法不但可以利用表面沉降数据判别软基的稳定性,还可以利用分层沉降(深层沉降)数据,针对地基中的最软弱层进行稳定性判别工作。

1 原理与方法

软基上筑路是分级填土加载。而每级填土一般在一天之内完成。因而每级加载的速率大大超过土中孔隙水压力消散的速率,形成了不排水剪切的作用。而淤泥等软黏土地基渗透性很差,孔隙水压力消散颇为缓慢,因而其不排水变形的结果就比砂、砾等粒状土严重得多。珠江三角洲地区软黏土的三轴不排水试验结果如图 1。图 1 中的曲线 1 可以简化为理想材料的应力应变曲线(图 2 曲线 1),即重塑软黏土的不排水剪切变形可分为两个阶段,弹性变形阶段和塑性变形阶段。 AC 代表弹性阶段的应力应变关系,这种关系是线性的。图中的 C 点成为屈服点,与此相应的应力 σ^* 成为屈服应力,过点 C 后,应力应变关系是水平线 CD ,该线代表塑性阶段,在这阶段,应力不能增大,而变形却渐增^[16]。实际上在进入塑性阶段前,存在一变形急剧增大的弹塑性变形阶段 BC ,即存在屈服“段”而不是屈服“点”。亦即扰动软黏土的不排水剪切变形分为弹性变形、弹塑性变形和塑性变形 3 个阶段^[17]。对于原状软黏土而言,其不排水剪切变形也可分为上述三个阶段(见图 1、图 2 曲线 2)。由于原状软黏土结构性的影响,进入塑性变形阶段时,其变形表现出卸荷的特点^[16]。屈服段(弹塑性变形)的出现往往标志着土体处于极限状态,处于失稳的临界状态。

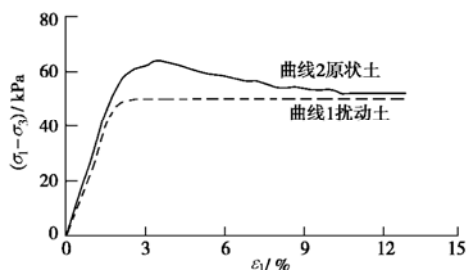


图 1 珠江三角洲软黏土三轴不排水实验结果

Fig. 1 Triaxial UU test results of soft soil on Pearl River Delta

对于分级加载的软基而言:在每级加载过程中,超静孔压既有增长也有消散。但是消散的速率不超过增长的速率,总体上表现为超孔压不消散(见图 3, 6)。定义该阶段为超孔压视不消散阶段。由于在超孔压视不消散阶段有效应力增长较少,此时土体的强度较低,地基的稳定性最差。因而,研究在超孔隙水压力视不消散阶段发生的沉降量随加载的变化规律对软基的稳定性判别有指导意义。称在超孔压视不消散阶段发生的沉降为视不消散沉降。采用上述思路,笔者对珠江

三角洲地区近二十条高速公路软基施工期监测数据进行了系统地总结与分析。研究表明:在超孔压视不消散阶段发生的沉降量骤然增大的“屈服段”可以作为地基稳定性的评判标志。在实际工程应用中,对每级加载所引起的在超孔压视不消散阶段发生的沉降量进行数据处理后,就可以揭示出土体“不排水”变形所隐含的信息。通过综合分析就可以判断土体所处的变形阶段以及稳定性。具体来讲,有以下几点:

(1) 将每级填土(Δh_i)时超孔压视不消散阶段内发生的沉降量看作“视不消散沉降量(ΔS_{ui})”(见图 3)。

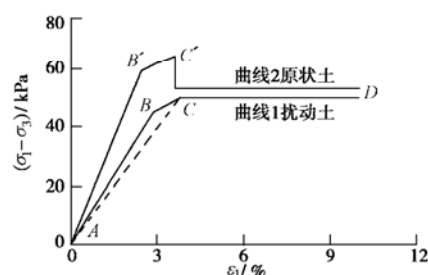


图 2 理想材料的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of elastic-perfectly plastic material

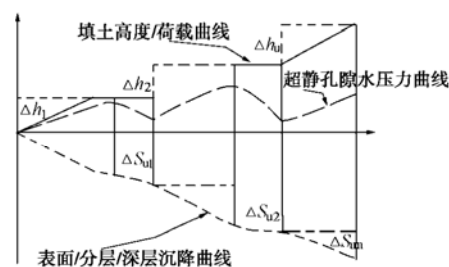


图 3 超静孔压不衰减阶段沉降量提取示意图

Fig. 3 Settlement without reduction excess pressure

(2) 经上述处理后得到的沉降量与加载量的随机性较强,规律性较差。图 4 是某高速公路软基试验段填土高度-视不消散沉降量散点图,从中难以发现较明显的规律。对于这样的位移监测数据可以采用累加生成处理。累加生成是灰色理论中一种数据处理方法。对原始离散位移监测序列进行累加生成处理(AGO 处理),可以使离散时间序列中的随机成分通过 AGO 处理而减弱或消除,并可使原始序列中蕴涵的确定性信息通过 AGO 处理而加强。可以证明一个波动起伏的曲线,经过反复的累加以后,最终会变成一条光滑曲线。在实际计算中,对原始数据进行 1 次处理后就能满足要求^[18]。对荷载与沉降速率数据进行 1 次 AGO 处理后的结果也有明显的物理意义,它符合应力-应变关系的本质,便于采用弹塑性力学的基本概念进行稳定性判别。

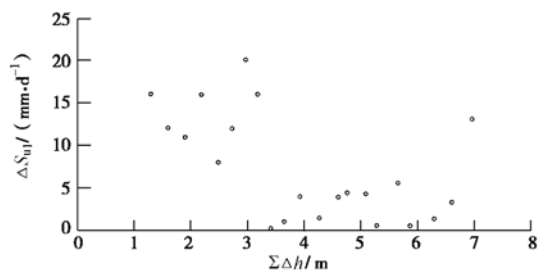


图 4 I 断面填土高度 - 日沉降速率散点图

Fig. 4 Scattering of embankment elevation and settlement velocity of section I

图 5 是对图 4 中的数据经过 AGO 处理得到, 显然其规律性明显增强。图 5 中曲线中的拐点 A 发生在 A 断面的第 8 级填土, 拐点 A 之前的 1 至 8 级填土历时 8 个月填筑完成。8 级以后的填土是在前 8 级填土等载作用 3 年零 5 个月后再开始填筑的。显然拐点 A 标志着: 经过 3 a 多的预压地基的刚度有所增加。

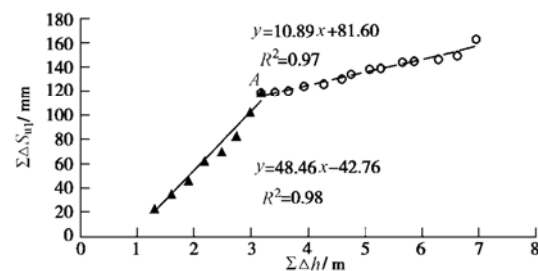


图 5 I 断面 $\Sigma \Delta h - \Sigma \Delta S_{ul}$ 图

Fig. 5 Curve of $\Sigma \Delta h - \Sigma \Delta S_{ul}$ of section I

一次累加生成的公式可以表达为

$$X_{(i)}^{(1)} = \sum_{j=1}^i X_{(j)}^{(0)}, \quad (X_{(j)}^{(0)} > 0).$$

$X_{(i)}^{(1)}$ 为一次累加生成数据, $X_{(j)}^{(0)}$ 为原始数据。

2 工程实例

2.1 工程概况

西部沿海高速公路二标软基试验段位于广东省西部沿海地带。地质钻探表明, 该试验段由上至下分布下列土层: ①耕植土: 呈浅黄色~黄褐色, 含有机质

及黑色腐殖质, 软塑, 厚 0.5~0.6 m。②淤泥: 浅灰~灰黑色, 夹少量贝壳及细砂, 含腐殖质, 饱和, 呈流塑状。含水率高, 平均达 80%。孔隙比平均为 2.22, 压缩系数平均为 2.92 MPa⁻¹ 平均十字板剪切强度仅有 5.5 kPa, 层厚 13~15 m。该层土属超软弱的高压缩性土, 是加固的主要层次。③亚黏土: 浅灰色~黑色或红黄色, 夹中细砂, 呈软塑~可塑状, 厚 0.5~5 m。往下土质更好, 是良好的持力层。

淤泥的十字板转角 - 抗剪强度曲线见图 6。图 6 表明, 该土的不排水变形具有典型的弹塑性变形特征, 符合理想材料的应力应变曲线特征, 适合采用本文提出的方法进行稳定性判断和分析。

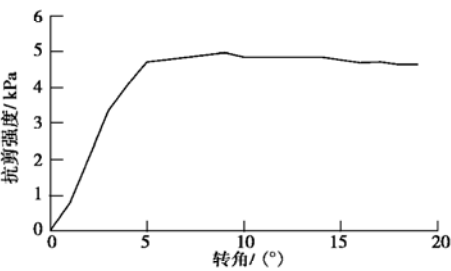


图 6 十字板转角 - 抗剪强度曲线

Fig. 6 Vane test result of undisturbed soft soil

该试验段采用由砂井和土工布组合而成的 5 种不同加固方案处理软基 (见表 1)。填土分级进行, 历时 6 a, 分两阶段进行。其间进行了连续的沉降观测。第一阶段从 1994 年 11 月至 1995 年 5 月, 填土高度为 3.96 m。第二阶段从 1998 年 9 月至 2000 年 11 月, 填土至设计标高 (见表 1), 平均高度为 6.8 m。这为利用沉降速率对比分析地基的稳定性提供了完整的原始试验数据。

2.2 数据分析

图 7 为 III 断面的荷载 - 单级孔压消散度时间曲线。图 7 表明每级荷载作用下所产生的超孔隙水压力在载荷作用一天后开始消散, 因此日沉降速率可以表征视不消散沉降量。

表 1 地基加固方案

Table 1 Treatment of soft ground

断面号	观测断面桩号	试验区段	淤泥厚度/m	填土高度/m	处理方式	加固深度/m	砂井间距/m	备注
I	K22+140	K22+090~K22+165	13.4	7.97	袋装砂井、一层预应力土工布	15.5	1.5	
II	K22+190	K22+165~K22+215	13.6	7.39	袋装砂井、一层土工布	15.5	1.5	各断面均设 0.5 m 砂垫层
III	K22+240	K22+215~K22+265	12.7	6.88	袋装砂井	15.5	2.0	
IV	K22+290	K22+265~K22+315	14.4	6.4	两层预应力土工布			
V	K22+340	K22+315~K22+390	12.8	5.34	天然地基			

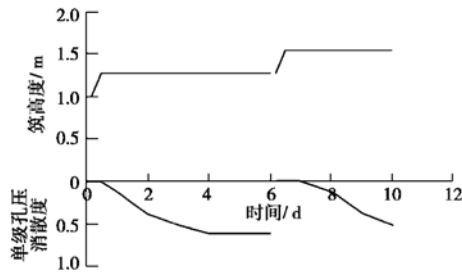


图7 单级超静孔压消散度-时间曲线

Fig. 7 Dissipation of excessive pore pressure in the ground

图8分别为I, II, III, IV, V五个断面的荷载-视不消散沉降量累加生成AGO分析曲线。这五条曲线均出现了第一个拐点A。IV, V断面两条曲线在后续填土中还出现了B, C两个“屈服点”。AB段的斜率明显小于OA段的斜率,如前文所言,经过了三年多的预压地基土的刚度有较大幅度的提高,抵抗变形的能力加强。但是没有打设砂井的地基IV, V两个断面在经历较低填土活动之后(亦即较短的AB段)后,很快出现了“屈服点”B,其后直线斜率陡然增大3倍以上。其中IV, V断面所在区域的路堤在出现屈服点B之后的第三级填土过程中,路基出现了开裂,沉降速率进一步增大的现象。这些现象说明地基土体已开始屈服破坏,处于失稳状态,此时采取了卸载的应急措施,卸载1.5 m后地基出现反弹现象,地基恢复稳定。出现裂缝的V区和IV区的大部分地段进行反压处理后,再进行填土活动时, $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 曲线斜率明显降低(CD段)。这说明经反压处理后,地基的临空面减少,侧向约束加强,瞬时变形量减少,地基的稳定性得到了大幅度提高。而采用砂井处理的I, II, III三个区的 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 曲线在拐点A之后,出现了平稳发展的AB段,没有出现类似IV, V两条曲线的陡然上升段。这充分说明了袋装砂井能加快地基的排水固结速率,能使地基的强度增长与较快的填土速率相匹配,具有较好的软基加固作用。分析表明, $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 曲线中,陡倾段的出现意味着地基已处于临界失稳状态,其拐点可作为处于极限状态的标志。

对不同变形阶段的填土高度与累加视不消散沉降量进行线性回归分析。对于IV断面, BC段与AB段的斜率之比为3.12。对于V断面由于其AB段仅有三级填土,而且其相关性较低,故选取BC段与OA段进行比较,此时,斜率比为3.64。在实际工程应用中,可以取斜率比等于3.0作为阈值判断地基的稳定性。

采用上述方法判断地基稳定性的最大优越性在于其结果考虑了数据的发展趋势,可以判断地基所处的变形阶段和稳定状态。而常规的沉降速率阈值则没有这种优点。以IV断面为例,其最大日沉降速率均不超

过10 mm/d(见图9),按常规标准(日沉降速率<10 mm/d)判断地基处于稳定状态。但在 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 曲线上却出现了标志着失稳的加速变形阶段(BC段),这一现象与工程实际情况吻合。

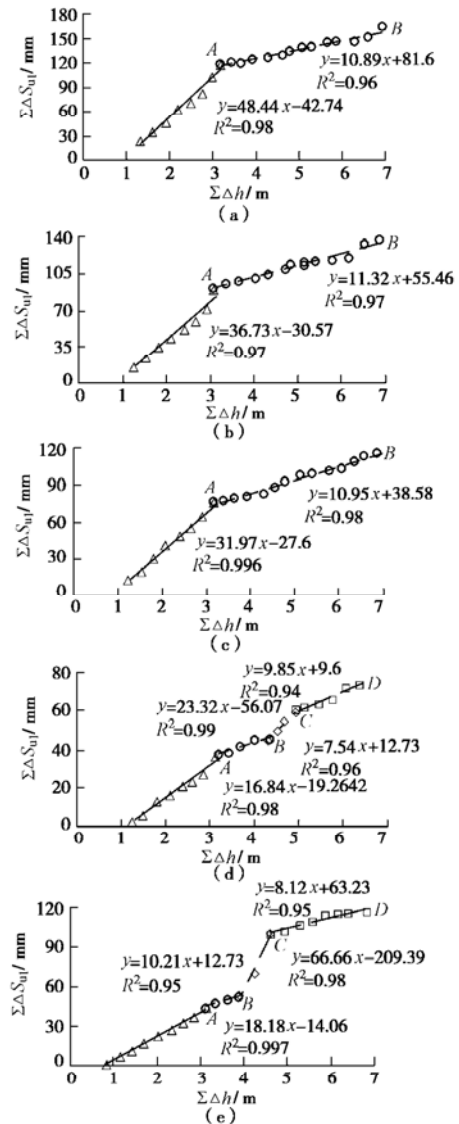
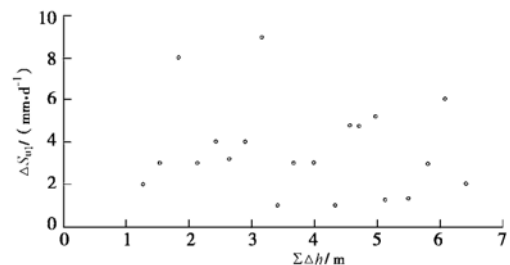
图8 I, II, III, IV, V断面 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 曲线Fig. 8 Curves of $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ of section I~V

图9 IV断面填土高度-沉降速率散点图

Fig. 9 Scattering of $\Sigma\Delta h - \Delta S_{ul}$ of section IV

2.3 真空联合堆载预压工程实例

图10为江中高速公路软基试验段软黏土的十字板转角-抗剪强度曲线和 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 曲线。该段软

基采用真空预压处理, 路基填土过程中最大沉降速率达到 40 mm/d。按常规标准判断地基处于失稳状态。但 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 散点具有良好的线性关系, 其相关系数达到 0.964。 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 曲线没有出现屈服点, 软基始终处于稳定状态。这一现象与工程实际情况吻合。

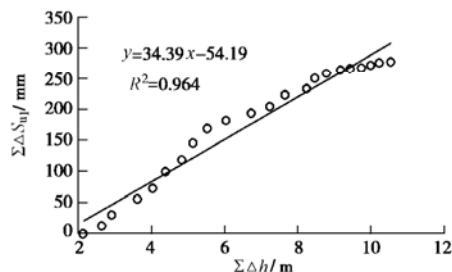


图 10 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 曲线

Fig. 10 Curve of $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$

显然本文的填土高度 - 视不消散沉降量 AGO 分析法更能反映数据蕴含的内在规律性, 更符合工程实际状况, 可以在工程实践中采用。

3 方法的简化处理

珠江三角洲地区高速公路软基监控采用主控断面与普通断面相结合的方式对整条线路的软基施工期稳定性控制。主控断面设置在地质条件和填土高度有代表性的位置, 数量较少。主控断面埋设有表面沉降板、孔隙水压力计、侧向位移管、分层深层沉降等仪器, 观测内容齐全。普通断面一般只设置表面沉降板, 断面数量较多, 观测内容较单一。采用这种布设原则, 目的在于通过较少的主控断面指导普通断面的填筑, 进而达到指导全线软基路段的填筑目的, 实践证明这种方法效果较好。

采用本文的稳定性判别法时, 需要孔隙水压力资料以求得每级填土时视不消散阶段的累计沉降量。因而有必要研究如何利用主控断面较全的数据指导普通断面的稳定性判别工作。针对该问题, 笔者也进行了大量的总结分析工作, 以求得能否以部分视不消散沉降量代替全部视不消散沉降量进而判别软基的稳定性。实践表明, 上述思路可行性较强。

3.1 滑塌工程实例

开阳高速公路某软基加固段地层主要由淤泥组成, 含水率为 55.5%, 十字板抗剪强度为 8.1 kPa, 层厚 10 m 左右。该工程采用堆载预压排水固结法处理软基。填土高度至 4.9 m 时 (第十级填土), 路堤左边坡失稳。

图 11 (a) 为软基在超孔隙水压力视不消散阶段累计沉降量与填土荷载的曲线。该曲线在第八级填土时出现了拐点, 其后曲线斜率陡然增大为 3.17 倍。在

第十级填土时, 路堤左边坡失稳滑塌。图 11 (b) 和图 11 (c) 分别为在超孔隙水压力视不消散阶段二天、一天内累计沉降量与填土荷载的曲线。图 11 (b)、(c) 和图 11 (a) 的曲线形式完全一样, 都是在第八级填土时出现了拐点, 其后曲线斜率陡然增大为 3 倍以上。由上述分析可知, 采用超孔隙水压力视不消散阶段部分沉降量也能如实反映出地基土体的稳定状态。而且加载当天的沉降量数据相对齐全、数据整理也相对容易。在工程实践中, 即使在缺失孔隙水压力数据的情况下, 也可以运用本文提供的方法判断和分析地基的稳定状况。

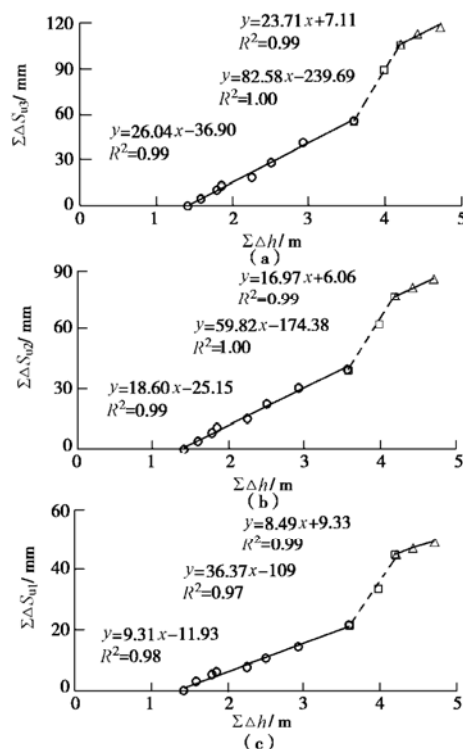


图 11 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$ 曲线

Fig. 11 Curves of $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_{ul}$

3.2 真空联合堆载预压工程实例

中江高速公路软基试验段位于中山市横栏镇 (珠江三角洲腹地)。软土厚度约为 27 m, 淤泥和淤泥质土是软基的主体组成部分。本文分析的路段采用真空联合堆载预压处理, 设计填筑高度 7.8 m, 并设计了 2 m 的超载。填土过程中地基没有出现失稳迹象, 处于稳定状态。

由于加载后地基的超静水压力常常是需要几天时间才消散得完, 因此, 为了进一步证实采用超孔隙水压力视不消散阶段部分沉降量代替超孔隙水压力视不消散阶段累计沉降量的可行性, 作者整理了路堤中间处超孔隙水压力视不消散阶段 3 d (累计沉降量) 和两天内的沉降量 (分别为 S_{u3} 和 S_{u2}), 并将它们和加载

当日沉降量 (S_{u1}) 进行了比较 (见图 12)。图 12 的三条曲线形态一致, 没有出现拐点。这表明地基的稳定性较好, 也与工程实际情况吻合。该例也证实了: 采用本文的稳定性判别法时, 可以用超孔隙水压力视不消散阶段的部分沉降量代替超孔隙水压力视不消散阶段的累计沉降量。

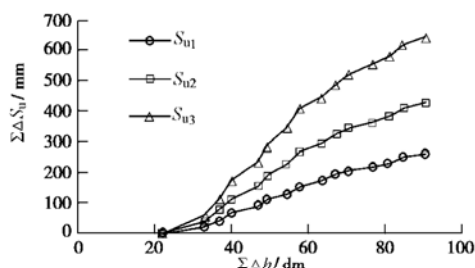


图 12 真空联合堆载下 $\Sigma\Delta h - \Delta S_u$ 曲线

Fig. 12 A case study of stability analysis with $\Sigma\Delta h - \Delta S_u$ (the ground treated by vacuum and pile preloading)

上述实例表明: 以填土当日沉降量代替超孔压视不消散阶段的累计沉降量也可以准确地判别地基的稳定性。这为利用普通监控断面的表面沉降数据进行稳定性判别工作奠定了基础。同时也表明: 必须要对主控断面的数据进行全面分析, 以了解代表性地段的孔压增长消散规律, 从而准确的指导普通监控断面的稳定性判别。

从上述分析可以看出: ①当 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_u$ 曲线后一段的斜率小于前一段的斜率, 该软土路基是稳定的, 可将曲线突变点称为“拐点”; ②当 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_u$ 曲线后一段斜率大于前一段斜率的 3 倍, 软土路基处于失稳状态, 可将曲线突变点称为“破坏点”; ③当 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_u$ 曲线后一段斜率是前一段斜率的 1~3 倍, 该软土路基是否稳定需要密切监视, 可将曲线突变点称为“屈服点”。

4 利用分层/深层沉降数据判别地基的稳定性

分层和深层沉降的数据一般用于分析土层的压缩量和加固深度, 很少用于路基的稳定性分析中。事实上最软弱土层控制着地基的稳定性, 研究软弱土层的实用稳定性判别方法更有工程意义。笔者采用本文提供的方法整理和分析了实际工程中的分层和深层沉降数据, 得到了一些有意义的结论。

图 13 是中江高速公路软基加固试验段 K23+880 监控断面表面与地下 10 m, 21 m, 25 m 三个深度处的加载当日沉降量与累计荷载 ($\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_u$) 关系曲线。从图中可以看出: 几条曲线的变化趋势基本一致, 并且它们所反映出来的地基稳定性状况都是良好

的, 这与工程实际是相符的。

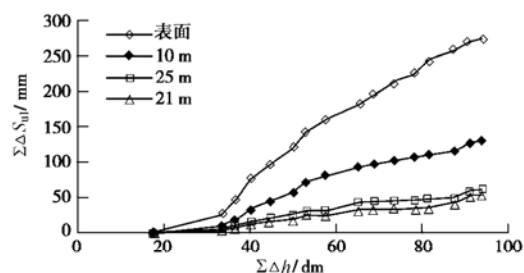


图 13 利用深层沉降数据进行稳定性分析

Fig. 13 A case study of stability analysis with subsurface settlement responses to embankment elevation

图 14 广珠高速公路西线某采用袋装砂井预压加固路段的分层沉降加载当日沉降量与累计荷载 ($\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_u$) 关系曲线。由图中可以看出, 各个深度的曲线变化趋势几乎是一样的, 并且深度越小的曲线斜率越大。此外, K7+600 断面前六级荷载的 $\Sigma\Delta h - \Sigma\Delta S_u$ 曲线比较平直; 在第七级荷载处有一明显向上的拐点 (B 点), 但对比前六级荷载的曲线斜率 (即 OA 段斜率), 第七级荷载之后的曲线斜率 (即 BC 段斜率) 增量并不大, 前后两段曲线的斜率比值仅为 0.73~1.05。第七级荷载作用后, 地基土体继续发生较快速的固结沉降, 在整个加载期间地基土体稳定性状况好, 上述数据分析结果与工程实际情况较吻合。

地基发生变形破坏主要是由于最软弱土层的塑性变形所引起。利用软土层的分层和深层沉降数据, 采用本文提供的数据整理与稳定性判别方法, 可以针对地基中的最软弱土层进行稳定性判别。

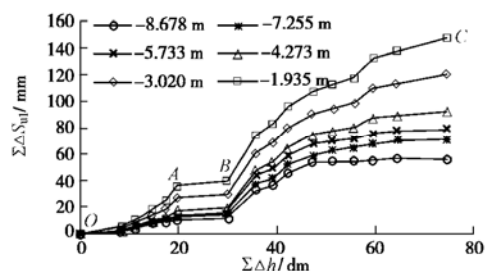


图 14 广珠高速公路西线软基加固段分层沉降稳定性分析

Fig. 14 A case study of stability analysis with subsurface settlement responses to embankment elevation

5 结 论

(1) 本文提出一种基于沉降资料的地基稳定性判别方法, 经过珠江三角洲地区天然地基、表面加筋地基、砂井地基、真空联合堆载预压地基等软基处理工程的大量检验, 尤其是经过软基滑塌事故的验证, 证明该法的实用价值较高。

(2) 在采用本文提出的方法判别地基的稳定状况时, 可以用超孔压视不消散阶段部的分沉降量代替超

孔压视不消散阶段累计沉降量。

(3) 对于珠江三角洲地区正常固结软黏土, 参照 $\Sigma \Delta h \sim \Sigma \Delta S_u$ 曲线后一段的斜率 k_2 和前一段的斜率 k_1 , 稳定性的判别准则为: 当 $k_2 < k_1$ 时, 软土路基是稳定的, 对应的突变点是“拐点”; 当 $k_2 > 3k_1$ 时, 软土路基是不稳定的, 对应的突变点是“破坏点”; 当 $k_1 \leq k_2 \leq 3k_1$ 时, 软土路基是否稳定需要密切监视, 对应的突变点是“屈服点”。该准则是否适用于欠固结土、超固结土有待于进一步研究。

(4) 采用本文的数据整理与稳定性判别方法, 利用软土层的分层和深层沉降数据, 可以针对地基中的最软弱土层进行稳定性判别。

(5) 本文提出的地基稳定性判别方法比较适用于珠江三角洲软黏土的稳定性分析。对于其他地区, 还有待于必要的工程验证。

参考文献:

- [1] JTJ017—96 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S]. (JTJ017—96 Technical specification for design and construction of highway embankment on soft ground[S].(in Chinese))
- [2] TBJ1—96 铁路路基设计规范[S]. (TBJ1—96 Technical code for design of railway embankment[S].(in Chinese))
- [3] JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. (JGJ79—2002 Technical code for ground treatment of buildings[S].(in Chinese))
- [4] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.(Manual of ground treatment [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1994.(in Chinese))
- [5] 娄 炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.(LOU Yan. The vacuum preloading technique for improving soft soil[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.(in Chinese))
- [6] 黄 腾, 等. 真空联合堆载加固软基的抗滑稳定性模型及研究[J]. 水运工程, 2001, 25(2): 11 - 15.(HUANG Teng, et al. A model on stability of soft foundation improved by vacuum-pile preloading method[J]. Port & Waterway Engineering, 2001, 25(2): 11 - 15.(in Chinese))
- [7] Edward Brand, R P Brenner. Soft clay engineering[M]. Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, 1981.
- [8] LADD CC. Stability evaluation during staged construction: 22nd Terzaghi Lecture[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, 117(4): 537 - 615.
- [9] LADD C C. Stress-deformation behavior of an embankment on Boston Blue Clay: Invited Lecture[C]// Proceedings, Specialty Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, Settlement '94, GSP40, ASCE, College Station, 2: 1730 - 1759.
- [10] 周小文, 等. 软土地基路堤施工的离心模拟试验研究[C]// 土工测试技术实践与发展. 郑州: 黄河水利出版社, 2005. (ZHOU Xiao-wen, et al. A centrifuge test of embankment construction on soft foundation[C]// Practice and Development in Geotechnical Soil Testing. Zhengzhou: Yellow River Water Resources Press, 2005.(in Chinese))
- [11] TAVENAS F, et al. The stability of stage-constructed embankments on soft clays can[J]. Geotech, 1978, 15: 283 - 305.
- [12] 周 镜. 软土沉降分析中的某些问题[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(2): 17 - 29.(ZHOU Jing. Settlement analysis of embankment on soft clay[J]. China Railway Science, 1999, 20(2): 17 - 29.(in Chinese))
- [13] 刘增贤, 汤连生. 路堤荷载下软土侧向挤出沉降分析[J]. 工程勘察, 2003, 2: 1 - 4.(LIU Zeng-xian, TANG Lian-sheng. Analysis on lateral squeeze settlement of soft clay foundation under embankment[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2003, 2: 1 - 4.(in Chinese))
- [14] 李 飞, 程鹏环, 等. 软土路基侧向变形测试分析与研制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2114 - 2117.(LI Fei, CHENG Peng-huan, et al. Testing study on lateral deformation of soft road ground and its control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2114 - 2117.(in Chinese))
- [15] TERZAGHI Karl, PECK Ralph B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 1967.
- [16] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HUANG Wen-xi. The soil engineering properties[M]. Beijing: China Water Power Press, 1983.(in Chinese))
- [17] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1996.(QIAN Jia-huan, et al. The principle and calculation for earthwork[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.(in Chinese))
- [18] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1986. (DENG Ju-long. The prediction and decision by gray theories[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996.(in Chinese))