

文章编号: 1002-0268 (2003) 05-0027-04

# 路堤工程几种变形控制标准的比较

陈建峰, 石振明, 张雷, 沈明荣  
(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 变形控制是信息化施工中的重要环节, 对设计和施工起着控制作用。对于高填土的路堤工程, 比较有代表性的控制标准有规范中的变形速率控制方法、日本的松尾方法和杭甬高速公路经验方法。本文结合建在软土路基某高速公路路堤工程信息化施工对这3种控制标准进行了比较分析, 认为采用经验方法, 即路基内最大水平位移增量与路堤中心沉降增量之比值, 作为信息化施工计算程序的变形控制标准比较可靠, 该值适于判定软土路基的稳定性。

**关键词:** 路堤; 变形控制; 信息化施工

中图分类号: U416.12

文献标识码: A

## Comparison of Some Methods of Controlling Deformation in Embankment

CHEN Jian-feng, SHI Zhen-ming, ZHANG Lei, SHEN Ming-rong

(Dept. of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The method of Controlling Deformation is an important part in information-oriented construction, which controls the design and construction. In high filling embankment engineering, there are some representative methods of controlling deformation, i. e. the ratio of deformation to time suggested in Highway Specifications, Matsuo formula in Japan and an experiential ratio during expressway construction connecting two cities of Hangzhou and Ningbo. In this paper, the three methods of controlling deformation are analyzed and compared through one information-oriented construction case of an expressway embankment built on soft foundation. It's concluded that the experiential ratio of the maximum lateral displacement increment under the slope of embankment to the ground settlement increment at the middle of embankment is a reliable and stable critical value of controlling deformation.

**Key words:** Embankment; Controlling deformation; Information-oriented construction

## 0 前言

信息化施工是岩土工程发展的方向, 为岩土工程不确定因素引起的设计和施工的难题提供了一个合理的解决方法。对路堤工程而言, 信息化施工利用变形监测结果反分析路基的土性参数, 再用这些参数预测路基的变形, 按照变形控制标准判断路基的稳定性, 如果稳定则继续按原设计施工, 否则修改设计进行下一阶段施工。

可见, 变形控制标准是信息化施工中的重要环节, 对施工和设计起着控制作用。一般变形控制标准是根据地区施工经验获得的。对于高填土的路堤工

程, 目前比较有代表性的控制标准有3种, 即规范方法、松尾方法和经验方法。本文结合软土地区某高速公路路堤工程信息化施工分析, 对这3种控制标准进行比较, 以期寻求一个合理的适合软土地区路堤工程信息化施工的控制标准。

## 1 几种变形控制标准

### 1.1 规范方法

在路堤填筑中, 如果加荷过快, 当地基中一定范围内剪应力达到某一临界值时, 将使地基以弹性变形为主进入以塑性变形为主阶段, 此时侧向变形及沉

降将明显增大, 如果荷载再继续增加, 地基中塑性区将继续扩大, 以至于有可能发生地基的整体破坏。从地基变形看, 沉降和侧向水平位移的绝对值并不能很好地表明地基的稳定程度, 更重要的指标是地基的沉降速率和侧向水平位移速率。行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017-96)<sup>[1]</sup>中对地基稳定性的观测项目包括地表面位移边桩的水平位移观测、地面隆起量观测和测斜管水平位移观测。规范对稳定性的控制标准是: 沿路堤中心线地面沉降速率不宜大于 10mm/d; 坡脚水平位移速率不宜大于 5mm/d。《公路路基施工技术规范》(JTJ 033-95)对此也作了同样的规定。根据工程实践经验, 对砂井或塑料排水板地基, 中心地面沉降速率可放宽至 15~ 20mm/d。

### 1.2 松尾方法

松尾 (Matsuo) 和河村 (Kawamura)<sup>[2]</sup>通过统计分析多个地方的失效路堤工程的资料得出了一个路堤极限破坏的预测方法。该方法采用路堤中心地面的沉降量  $S$  和路堤坡脚处的水平位移量  $\delta$ , 不同应力水平 ( $q/q_f$ ,  $q_f$  为路堤破坏时的应力,  $q/q_f = 1.0$  表示处于极限破坏状态) 下  $\delta/S$  与  $S$  (单位: m) 之间的统计关系如图 1。图中三角形标记为观测值, 正方形标记为有限元方法分析值, 回归得到的公式表示如下

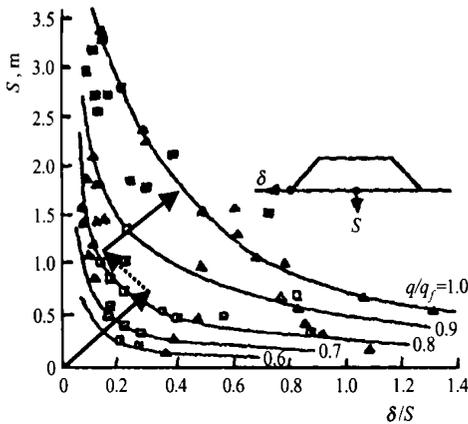


图 1 路堤工程极限破坏控制图 (据 Matsuo 等 1977)

$$S = a \exp \left[ b \left( \frac{\delta}{S} \right)^2 + c \left( \frac{\delta}{S} \right) \right] \quad (1)$$

式中, 待定系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  取值如表 1。

不同应力水平下  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的取值 表 1

应力水平 $q/q_f$	$a$	$b$	$c$	应用范围
1.0	5.93	1.28	-3.41	$0 < \delta/S < 1.4$
0.9	2.80	0.40	-2.49	$0 < \delta/S < 1.2$
0.8	2.94	4.52	-6.37	$0 < \delta/S < 0.8$
0.7	2.66	9.63	-9.97	$0 < \delta/S < 0.6$
0.6	0.98	5.93	-7.37	$0 < \delta/S < 0.6$

分级加荷路堤工程向极限状态的路径如图 1 中箭头所示。开始加荷时, 箭头从原点出发; 当处于间歇期时, 沉降量继续增加, 路堤趋向稳定, 如虚线箭头所示; 当水平位移量增长过快, 就很容易达到极限破坏曲线导致路堤失效。通过在极限破坏控制图上绘制坐标点, 可以估计施工过程中任意时刻路堤工程的安全程度。Matsuo 和 Kawamura 的路堤破坏预测方法在日本得到了广泛地应用。

### 1.3 经验方法

杭甬高速公路试验段观测结果分析表明<sup>[3]</sup>, 某一时段内坡脚下地基内最大水平位移增量  $\Delta \delta_{max}$  和路堤中心地面沉降增量  $\Delta S$  比值的大小同加载过程有着密切的关系, 表 2 是  $\Delta \delta_{max} / \Delta S$  随时间变化情况。

a 段处于加载前期, 路堤填土高度尚在临界高度以下; 进入 b 段后, 填土逐渐接近临界高度,  $\Delta \delta_{max} / \Delta S$  比值随之增大到 0.368; 进入 c 段后, 填土高度已达到临界高度,  $\Delta \delta_{max} / \Delta S$  比值急剧上升到最高点 0.460, 此时坡脚外地表已有外移和隆起现象, 表明路堤濒临破坏; 以后停载一段时间后, 地基固结度有了一定的提高, 土体强度增大, 限制了侧向变形, 故在以后区段, 随着加载和预压的反复交替,  $\Delta \delta_{max} / \Delta S$

$\Delta \delta_{max} / \Delta S$  随时间变化

表 2

区段	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$g$
日期 (月-日)	1-02~ 1-18	1-18~ 1-27	1-27~ 1-31	1-31~ 4-01	4-01~ 5-12	5-12~ 8-14	8-14~ 6-04
$\Delta \delta_{max} / \Delta S$	0.323	0.368	0.460	0.197	0.280	0.190	0.140

比值有明显的下降趋势, 表明水平位移衰减速度比沉降快, 地基已逐渐稳定。这说明, 当水平位移与沉降的比值相对急剧增大时, 地基就有失稳的危险。当沉降速率小于控制速率, 而水平位移速率超出了控制速率, 这时  $\Delta \delta_{max} / \Delta S$  比值会增大, 地基失稳的可能性较大。反之, 侧向变形很小, 沉降较大, 地基依然是不大可能失稳的。杭甬高速公路以  $\Delta \delta_{max} / \Delta S = 0.368$

作为路堤工程安全判断标准。

## 2 实例分析

### 2.1 概况

某高速公路路堤底宽 39m, 坡度 1: 1.5。路基采用 SPB-1 型塑料排水板, 长 10.0m, 正三角形分布, 间距 1.0m。地表面铺设了中粗砂垫层。地基土由

上而下为：粉质粘土，层厚 2.0m；淤泥质粉质粘土，层厚 7.5m；粘质粉土，层厚 0.75m；粉砂，较厚，未揭穿。

设计施加的预压荷载达 7m 左右，采用分级加荷，从开始填土到填土结束共历时 200 天。设计的荷载与时间过程线见图 2。荷载大致分为 4 级，其中第 3 级 (136~157d) 和第 4 级 (188~200d) 施加的荷载较大，分别为 43kPa 和 41kPa，历时也较短，有可能使土体达到极限状态。因此，这里采用笔者编制的路堤工程信息化施工程序 COMBAK<sup>[4]</sup> 对这两级荷载阶段进行位移预测。程序采用弹性模型，并与 Biot 理论耦合。预测的方法是采用 136d (188d) 的实测位移值反分析土性参数，再用反分析得到的参数正分析 (预测) 157d (200d) 时的位移值。

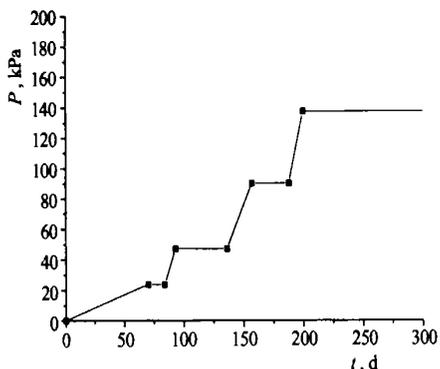


图 2 设计的荷载-时间过程曲线

## 2.2 结果分析

表 3 是根据堆载 136d、188d 实测和用 COMBAK 程序预测 157d、200d 时的路堤坡脚处水平位移  $\delta$ 、最大水平位移  $\delta_{\max}$  和路堤中心地面处垂直位移  $S$ ，以及采用这些预测和实测值计算的位移速率  $\Delta\delta/\Delta t$ 、 $\Delta S/\Delta t$  和水平位移 (增量) 与垂直位移 (增量) 之比  $\Delta\delta_{\max}/\Delta S$ 、 $\delta/S$ 。

预测结果及计算的位移速率和比值 表 3

项目	136d	157d	188d	200d
	(实测)	(预测)	(实测)	(预测)
$\delta$ (cm)	3.5	6.0	6.5	9.8
$\delta_{\max}$ (cm)	6.7	9.6	12.0	16.4
$S$ (cm)	42.0	60.2	59.4	72.1
$\Delta\delta/\Delta t$ (mm/d)*		1.2		2.8
$\Delta S/\Delta t$ (mm/d)*		8.7		10.6
$\Delta\delta_{\max}/\Delta S$		0.16		0.35
$\delta/S$ (预测)		0.10		0.14

注：\* 平均位移速率，两个预测阶段  $\Delta t$  分别为 21d 和 12d。 $\delta$  为路堤坡脚处地面水平位移， $\delta_{\max}$  为坡脚处测斜管最大水平位移， $S$  为路堤中心沉降。

从表中数据可以看到：

(1) 从表中位移速率预测值  $\Delta\delta/\Delta t$ 、 $\Delta S/\Delta t$  来看，如果认为每天的实测位移速率无大的变异，则显示这两个堆载阶段路堤是稳定的，平均水平位移速率和垂直位移速率分别小于规范控制标准 (或放宽的控制标准)。

(2) 从路堤坡脚处水平位移增量与中心沉降增量比值  $\Delta\delta_{\max}/\Delta S$  看，第 4 级堆载阶段比值增大较多，是第 3 堆载阶段比值的 2.2 倍，与杭甬高速公路控制标准 0.368 很接近。

(3) 将预测的  $\delta/S$  与  $S$  点绘到图 1 路堤工程极限破坏控制图，发现第 3 堆载阶段预测值基本对应应力水平为 0.6 的回归曲线，第 4 堆载阶段预测值基本对应应力水平为 0.7 的回归曲线。根据公式 (1) 采用应力水平 0.6 和 0.7 时的系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  计算得到第 3 和第 4 堆载阶段的  $S$  分别为 47.2cm 和 79.6cm，这两个堆载阶段预测的  $S$  夹于 47.2~79.6cm 之间，说明采用松尾方法判断这两个堆载阶段的应力水平在 0.6~0.7 之间，路堤是安全的。

从实际的施工情况看，第 3 堆载阶段路堤是稳定的；而第 4 堆载阶段地基侧向挤出严重，坡脚外地表面已有较明显的隆起，据此可以判断在该阶段路堤已接近或达到极限状态。因此可以采用  $\Delta\delta_{\max}/\Delta S = 0.35$  作为该路堤安全控制标准。

实际上，沉降和水平位移是地基变形的两个方面，它们之间一般表现出一种近似线性的关系，但当地基承受的荷载达到一定程度，地基接近失稳时，地基内的软土明显地向外挤出，从而使地基内的水平位移显著增大，并使原来的沉降与水平位移关系发生突变。水平位移相对于沉降越大，表明软土的侧向挤出越严重，地基越有失稳的危险；越小则表明地基变形以固结为主，稳定性好。因此，沉降与水平位移关系的变化可以反应出地基的稳定情况。而路堤的破坏首先是从路基内部某些点受剪达到极限破坏状态，产生很大的剪切变形 (水平位移)，周围点又相继破坏最后延伸到地表形成贯通面而导致整体滑移破坏。因此，路基内部最大的水平位移能指示出土体的受剪程度和破坏面位置。

需要说明的是，本文没有因此否定规范中位移速率控制方法和日本的松尾方法。由于本文程序预测的时间较长，没有计算每一天路基产生的位移值，而只计算了平均的水平位移和垂直位移速率。而规范中的位移速率是实际每天量测得到的地面垂直位移和水平位移速率。如果实际的位移速率没有大的变化，那么采用平均速率是可以的。但是实际每天的位移速率会

有一定的变化,某一天的位移速率可能已经超过了控制标准,而平均位移速率可能还低于控制标准。当预测时间较短时,平均位移速率跟实际每天的位移速率将会比较接近,这时平均位移速率起到了一定的参考作用。事实上,若不考虑针对砂井地基沉降速率的放宽值,第4堆载段预测的路基中心地面平均沉降速率已超过 $10\text{mm/d}$ 的标准。

松尾方法在日本的应用比较广泛,但在中国软土路基进行稳定性预测的适用性还有待于继续探讨。

本文提出的路基内部最大的水平位移增量与路堤中心地面垂直位移增量的比值 $\Delta\delta_{\max}/\Delta S$ 在杭甬高速公路建设中得到了成功应用。由于该比值在路基失稳以前每一堆载阶段都保持了一种近似的线形关系,因此更适用于路堤工程信息化施工计算程序的变形控制标准。至于 $\Delta\delta_{\max}/\Delta S$ 的大小应与土性及其分布有关,不同的土性和分布该比值是不一样的。

#### 4 结论

信息化施工为路堤工程的设计和施工提供了一个

新的思路,是今后路堤工程施工的发展方向。鉴于变形控制标准是信息化施工的一个关键环节,本文结合软土地区路堤工程实例分析了几种代表性的变形控制标准,认为信息化施工中路基稳定性预测采用路堤坡脚处最大水平位移增量与路堤中心沉降增量之比值 $\Delta\delta_{\max}/\Delta S$ 作为安全控制标准比较可靠,该值适于判断软土路基的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部.公路软土地基路堤设计与施工技术规范(JTJ 017-96) [S].北京:人民交通出版社,1997.
- [2] E Wakita, M matsuo. Observational Design Method for Earth Structures Constructed on Soft Ground [J]. Geotechnique, 1994, 44 (4) 747 - 755.
- [3] 蔡体楞,主编.杭甬高速公路软土地基处理[M].杭州:杭州出版社,1998.
- [4] 陈建峰.基于遗传算法的反分析方法及其在路堤工程中的应用研究[D].同济大学博士学位论文,2001.

(上接第23页)之间时,边坡坡度对在坡脚处水流速度的影响较小,这也是现行边坡常采用1:1.5或1:2.0的原因之一。但当边坡坡度不在此范围内时,出现了使边坡流速增大的现象。这种现象比较合理的解释为:当边坡坡度陡于1:1.0时,雨滴所受的重力可能起主要作用,使得流速加快;而当边坡坡度缓于1:2.0时,雨滴的运动惯性可能起主要作用,因此随着运动距离的加大,其流速也加快了。

#### 3 结论

(1) 路面纵坡 $> 1\%$ 的情况下路面纵坡对路面及对边坡的水流流速的影响明显,路面纵坡越大,在路肩及坡脚处的水流速度越大。

(2) 在路面横坡为 $2\%$ 、纵坡大于 $3\%$ 的情况下,施工期间土路肩存在受冲刷的问题,应采取导流或适当防护措施,防止雨水的冲刷。

(3) 边坡有草防护时的水流速度比边坡无草防护时降低了 $7\% \sim 14\%$ ,边坡植草能大大改善边坡抗冲

刷的性能。

(4) 在边坡植草的情况下,路堤高度对边坡流速的影响不明显。

(5) 当边坡坡度采用1:1.5~1:2.0的情况下,对边坡流速的影响不明显,且边坡的流速不大。因此,在公路建设征地有限的情况下,尽可能采用此坡度范围值。

本文提供的路面及边坡流速的计算方法,对于边坡采用其它防护类型也同样适用,也可以通过比较流速计算值与各种防护类型的允许流速值的大小,来确定不同防护类型的边坡抗冲刷的能力与效果。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部.公路设计手册——路基[M].北京:人民交通出版社,1998.
- [2] 中华人民共和国交通部.公路排水设计规范[M].北京:人民交通出版社,1998.