

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2013.06.029

# 路堤填筑速率控制与动态临界高度分析

李海龙<sup>1,2</sup>, 顾长存<sup>1,2</sup>, 张浩<sup>1,2</sup>, 曲晓凡<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 沿海地区高速公路建设迅速, 工程施工对于饱和软土路堤填筑速率不易控制。通过工程沉降观测曲线推求路堤填筑速率与沉降速率的关系, 并考虑在路堤填筑过程中土体固结的时间效应得到动态临界高度下的一般填筑速率公式, 结合青岛胶州湾地区工程实例, 得到该地区的合理填筑速率一般在 5 kPa/层, 加载间隔时间为一周, 此方法对该地区公路路堤填筑具有参考价值。

**关键词:** 软土地基; 填筑速率; 沉降速率; 动态临界高度

中图分类号: TU416

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2013)06-0139-04

## Control for Filling Rate and Analysis for Dynamic Critical Height of Highway Embankment

LI Hai-long<sup>1,2</sup>, GU Chang-cun<sup>1,2</sup>, ZHANG Hao<sup>1,2</sup>, QU Xiao-fan<sup>1,2</sup>

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

2. Geotechnical Engineering Research Institute of Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** The coastal express highway construction is developing rapidly, and in the engineering construction in saturated soft ground embankment, the filling rate is not easy to control. Based on settlement observation curve, the relationship between the filling rate and settlement rate is deduced, and considering the time effect of consolidation, the general formula of the filling rate under dynamic critical height is got; combined with the engineering practice of Qingdao Jiaozhou Bay area, the reasonable filling rate in this region is got to be 5 kpa per layer, and the time interval of loading is one week, all these as mentioned above would have reference value for the filling construction of the highway embankment in the area.

**Keywords:** soft soil ground; filling rate; settlement rate; dynamic critical height

## 0 前言

工程上通常采用现场实测表面沉降过程曲线, 通过曲线配合法(如双曲线配合法、指数曲线配合法等)、沉降曲线图解法(Asaoka法)、沉降速率法、灰色理论法等<sup>[1]</sup>推算土体最终沉降量、剩余沉降量、固结系数等。以上各种计算方法都有其优缺点, 但是都不可避免地受沉降曲线形状的影响, 尤其是沉降曲线前半段形状的影响更加明显。而沉降过程曲线的形状受土体沉降速率的影响<sup>[2]</sup>。大量的实测资料表明填筑速率与土体沉降速率之间是相关联的。由于土体物理力学性质的不同, 这种相互关联的关系有时存在一定的滞后性。但是从宏观上说, 填筑速率

的改变必然影响土体沉降速率。如果填筑速率太快, 导致填筑强度过高, 当填土高度达到软土地基所允许的临界高度值时, 软土开始发生塑性破坏, 即使填筑速率有所降低, 沉降速率依然会增加, 若不停止堆载, 极易导致沉降速率继续增大而使路基失稳破坏。因此在公路路堤填筑过程中应合理控制填筑速率, 避免因填筑速率过大导致路堤变形过大而失稳; 同时应考虑时间效应下路堤动态临界高度随固结度的变化以保证路堤加载的稳定性。

## 1 填筑速率与沉降速率的关系

《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》<sup>[3]</sup>

(JTJ017-96) 建议采用沉降速率法, 结合实测沉降过程曲线推算地基固结度、最终沉降量、工后沉降量和固结系数等。该计算方法假设:

$$S_{\infty} = m \times S_c \quad (1)$$

$$S_t = [(m-1) \frac{P_t}{P_0} + U_t] \times S_c \quad (2)$$

$$U_t = 1 - \alpha e^{-\beta t} \quad (3)$$

式中:  $S_{\infty}$  为最终沉降量;  $S_c$  为固结沉降量;  $m$  为综合修正系数;  $P_t$  为  $t$  时累计荷载;  $P_0$  为总的累计荷载;  $U_t$  为  $t$  时的固结度;  $\beta$  为回归计算得到的系数;  $\alpha$  根据地基固结排水条件取值。

在恒载条件下, 对式(2) 两边  $t$  求导得:

$$\begin{aligned} S'_t &= [(m-1) \frac{P'_t}{P_0} + \alpha\beta e^{-\beta t}] S_c \\ &= AS_c e^{-\beta t} \end{aligned} \quad (4)$$

$$A = \frac{8}{P_0 \pi^2} \sum_1^N q_n (e^{t_n \beta} - e^{t_{n-1} \beta}) \quad (5)$$

式中:  $q_n$  为第  $n$  级的填筑速率;  $t_n$ 、 $t_{n-1}$  为第  $n$  级填筑的终点和始点时间。

由上面各式可知, 地基沉降速率  $S'_t$  与填筑速率  $q_n$  有关, 在相同的地质状况下, 填筑速率大则土体沉降速率也大。因此合理控制填筑速率, 可以加快软土固结速率, 在相同时间内地基完成较大沉降, 尽可能多地消除工后沉降。

## 2 考虑时效性的填筑速率

### 2.1 路堤动态临界高度

排水固结法在处理软土路基时, 路堤变形在预压荷载作用下具有时效性, 土体固结度随时间的变化也反映了路堤填筑临界高度随时间的变化。在保证软基土层不破坏和稳定的情况下, 使固结沉降完成得最快的填筑速率是最合理的, 但是当填土高度达到地基承载力极限值时, 路堤稳定性骤降, 此时应严格控制填筑速率, 根据沉降变形观测, 合理填筑间隔时间, 使路基有充分的应力扩散、传递和排水固结时间, 提高地基承载力。Leroueil 等人得出土体的十字板剪切强度  $C_u$  和前期固结压力  $p'_c$  之比是塑性指数  $I_p$  的函数, 关系式为  $\frac{C_u}{p'_c} = f(I_p)$ 。对于同一地区的软土, 其塑性指数  $I_p$  不随土体的固结而变化, 因此我们可以认为同一地区的软土其十字板剪切强度  $C_u$  和前期固结压力  $p'_c$  的比值是一定值, 由此可以得到下面公式:

$$\frac{C_u}{p'_c} = \frac{C_{u0}}{p'_{c0}}, \text{ 即 } C_u = \frac{C_{u0}}{p'_{c0}} p'_c \quad (6)$$

根据固结理论, 当地基的附加应力  $p$  大于其前期固结压力  $p'_{c0}$  时, 地基中将产生超孔隙水压力  $u = p - p'_{c0}$ , 而后随着时间的增长, 孔隙水压力将逐渐消散, 根据有效应力原理, 有效附加应力将逐渐增加, 并转化为土体前期固结压力增长的部分。表达式如下:

$$p'_c = p'_{c0} + uU = p'_{c0} + (p - p'_{c0})U \quad (7)$$

式中:  $U$  为地基土体的固结度, 由太沙基一维固结理论可知, 当地基土体为单面排水时:

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} + \frac{1}{9} e^{-\frac{9\pi^2}{4} T_v} + \dots \right)$$

其近似公式可选择指数函数形式如下:

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v}$$

式中:  $T_v$  为时间因数,  $T_v = \frac{C_u t}{H^2}$ 。

将式(6) 代入式(7) 得:

$$C_u = \frac{C_{u0}}{p'_{c0}} p'_c = \frac{C_{u0}}{p'_{c0}} [p'_{c0} + (p - p'_{c0})U] \quad (8)$$

考虑路堤临界填筑高度随时间的变化规律, 即路堤动态临界高度问题, 把原有各学者关于以稳定控制计算的临界高度公式中的不排水剪强度  $C_0$  替换为上述  $C_u$  即可。值得注意的是, 公式中的地基固结度  $U$  应取地基的平均固结度。

### 2.2 填筑速率的一般公式

由于软土地基存在临界高度的概念, 大量的研究成果表明, 临界高度前后路堤填筑速率对沉降变形的影响是不同的<sup>[4]</sup>。达到临界高度前, 沉降速率与填筑速率基本呈正比关系, 临界高度后, 即使填筑速率有所降低, 但是沉降速率依然会增加, 若不停止堆载, 极易导致沉降速率继续增大而使路基失稳破坏。由以上分析可知, 在临界高度前可快速堆载, 而后必须要减慢填筑速率, 即在路堤填筑过程中采用先快后慢的施工方法<sup>[5]</sup>。路堤填筑过程中, 由于临界高度前后路堤沉降有着不同的变化规律, 因此通过路堤动态临界高度确定填筑速率是有意义的。下面将运用路堤动态临界高度推导出路堤填筑过程中填筑速率的一般公式。

在一次加载结束后, 随着软土地基的固结, 地基强度增长, 路堤的临界填土高度也将随之增长。将路堤任意时刻的临界高度与其现有的填土高度之差定义为剩余临界高度。由此可知, 若一次加载的填土高度小于路堤的临界高度, 则剩余临界高度公式为:

$$\Delta H_1 = H_{cr} + \Delta H_{cr1} - h_1 \quad (9)$$

$H_{cr} + \Delta H_{cr1}$  即为路堤的动态临界高度,  $h_1$  为填土后的路堤高度。若一次加载的填土高度为此时的路堤临界高度,则在之后的过程中,剩余临界高度将从零开始增长:

$$\Delta H_1 = \Delta H_{cr1} \quad (10)$$

第一次填筑结束后,经历时间  $t_1$  后进行第二次堆载,若此时的填土高度小于  $\Delta H_1$ ,则可以一次性堆载,最大填筑速率为:

$$q_1 = \frac{\Delta H_1}{\Delta t_1} \quad (11)$$

$\Delta t_1$  为本次填筑所需要的时间。只要填筑速率小于  $q_1$ ,路堤就是安全的。第二次加载结束后,剩余临界高度公式为:

$$\Delta H_2 = H_{cr1} + \Delta H_{cr2} - (h_1 + h_2) \quad (12)$$

$H_{cr1} + \Delta H_{cr2}$  即为路堤的动态临界高度,  $h_1 + h_2$  为填土后的路堤高度。若经历时间  $t_2$  后进行第三次填筑,若此时的填土高度小于  $\Delta H_2$ ,则可以一次性堆载,最大填筑速率为:

$$q = \frac{\Delta H_2}{\Delta t_2} \quad (13)$$

$\Delta t_2$  为本次填筑所需要的时间。只要填筑速率小于  $q_2$ ,路堤就是安全的。以此类推,  $n$  次填筑后剩余临界高度公式为:

$$\Delta H_n = H_{crn-1} + \Delta H_{crn} - (h_1 + h_2 + \cdots h_n) \quad (14)$$

$H_{crn-1} + \Delta H_{crn}$  为路堤此时的动态临界高度,  $h_1 + h_2 + \cdots h_n$  为路堤此时的填土高度。若经历时间  $t_n$  后进行第  $n + 1$  次填筑,若此时的填土高度小于  $\Delta H_2$ ,则可以一次性填筑,  $n + 1$  次最大填筑速率为:

$$q_n = \frac{\Delta H_n}{\Delta t_n} \quad (15)$$

$\Delta t_n$  为本次填筑所需要的时间。只要填筑速率小于  $q_n$ ,路堤就是安全的。

由于高速公路软基处理工程中,进行加载时并非理想的大面积均匀加载,土体并不是处于理想半无限体状态,当路堤较高时,土体会发生明显的侧向位移,发生剪切变形,产生较大沉降,且受到路堤几何形状,软土厚度等因素<sup>[6]</sup>的影响,故应在路堤填筑的同时采取监测措施,严密监控路堤填筑过程中沉降、侧向变形等的变化,以确保路堤的安全。

### 3 工程实例

以青岛滨海公路为例,采用排水固结法处理软土路基,该路段广泛分布淤泥质粉质黏土和淤泥质黏土,厚度一般为 0.8 m ~ 9.3 m,软土的物理力学性能指标平均值见表 1,控制性断面实测沉降数据见表 2。

表 1 软土物理力学性指标

软土名称	含水率 /%	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	压缩模量 /MPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	粘聚力 /kPa
淤泥质粉质黏土	46.1	1.369	45.2	30.3	3.23	15.6	17.3
淤泥质黏土	51.4	1.277	43.9	25.8	3.72	9.8	13.4

表 2 青岛滨海公路各观测断面实测沉降资料与固结计算成果<sup>[7]</sup>

观测断面桩号	总荷载 /kPa	平均加载速率 /( $\text{kPa} \cdot \text{d}^{-1}$ )	平均沉降速率 /( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	实测沉降量 /mm	推算最终沉降量 /mm	推求固结度 /%	剩余沉降量 /mm
K14 + 175	92.6	6.2	4.8	286.0	308.5	92.7	22.5
K14 + 370	92.6	3.8	3.7	223.0	248.7	89.6	25.7
K15 + 970	98.0	7.5	3.1	187.0	200.3	93.3	13.3
K16 + 070	98.0	4.3	2.2	133.0	144.8	91.9	11.8
K16 + 300	90.0	12.9	3.7	224.0	255.5	87.7	31.5
K16 + 440	90.0	9.0	2.1	123.0	149.2	82.4	26.2

如表 2 所示,通过对比 K14 + 175 与 K14 + 370 断面、K15 + 970 与 K16 + 070 断面、K16 + 300 与 K16 + 440 断面,可知填筑速率对土体沉降有较大的影响。填筑速率快则土体沉降速率快,在相同时间内完成的沉降量比较大,土体固结速率也较快,可以更

多的消除工后沉降,即缩短了工期,又节省了费用。如图 1,由于受不同填筑速率的影响,K14 + 175 断面与 K16 + 440 断面的实测表面沉降过程曲线存在较大的差异。根据这样的实测过程曲线,用 SEP98 程序进行拟和计算得出的结果也较大的差异。填筑速

率控制比较合理的 K14 + 175 断面的计算结果与实测资料相符合,因此得出计算成果准确性和可靠性更高<sup>[8]</sup>,反之,其计算结果的准确性和可靠性就差些(如 K16 + 440 断面)。根据青岛滨海公路的经验,在青岛滨海地区进行公路软基处理施工时,填筑速率一般控制在 5 kPa/层,加载间隔时间一周较为适宜。

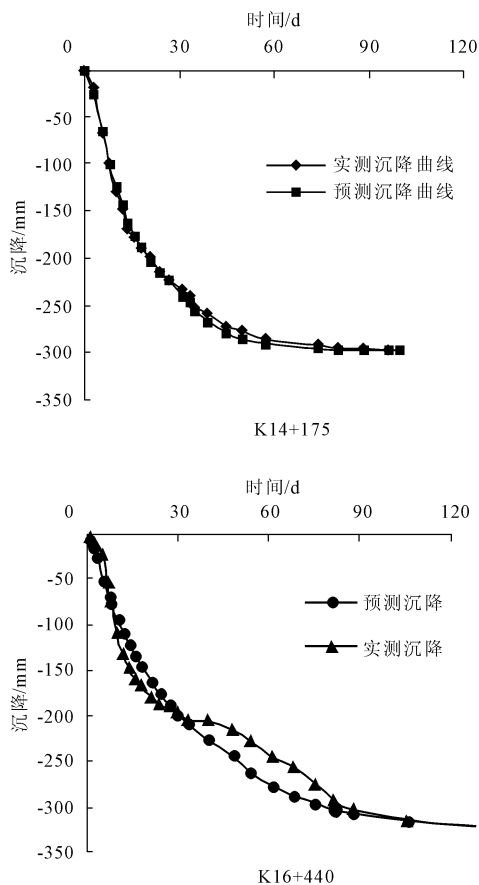


图 1 实测表面沉降过程曲线和推求沉降过程曲线图

## 4 结 论

填筑速率的大小对土体沉降有明显的影响。填

筑速率增大,地基的沉降速率也随之增大,地基的最终沉降量也可能增大。过大的填筑速率将使路堤沉降速率明显增大,并发生土体侧向挤出,甚至使路堤失稳。

考虑路堤临界高度随土体固结度的变化,确定合理填筑速率更能保证土体加载时期的稳定性。

要加快土体固结速率,同时防止因填筑速率过大而产生稳定问题,就需要加快地基排水固结速率,提高地基强度,同时严格控制填筑速率。

填筑过程会影响土体沉降过程,使得根据实测沉降资料预测固结度、剩余沉降量等的准确性和可靠性受到一定的影响。

### 参考文献:

- [1] 地基处理手册编写委员会.地基处理手册(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [2] 崔志方.沉降预测模型在高填方路堤中的应用研究[J].水利与建筑工程学报,2011,9(6):62-63,101.
- [3] 中华人民共和国交通部.JTJ017-96.公路软土地基设计与施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,1998:164-165.
- [4] 孟祥波.高速公路软土地基路堤填筑方法分析[J].路基工程,2006,(1):31-33.
- [5] 谢金红.薄层轮加法施工软土路堤稳定性确定应用[J].广东建材,2006,(5):72-73.
- [6] 郑晓国.高速公路软土地基路堤填筑临界高度研究[D].南京:东南大学,2004:23-25.
- [7] 曹国强,张仪萍,张士乔,等.地基沉降速率与沉降的关系研究及其应用[J].岩土力学,2003,24(3):467-470.
- [8] 陈忠求,叶曲成.排水固结法加固软土路堤合理填土速率的确定[J].铁道标准设计,2001,21(11):22-23.