

软路基沉降系数的影响因素分析

谭世霖¹, 罗志强²

(1 广东省航盛建设集团有限公司, 广东 广州 511442 2 广东工业大学 建设学院, 广东 广州 510090)

摘要: 结合软路基沉降计算的实际问题, 讨论公路工程中普遍应用的一种软路基沉降计算经验法, 分析路堤填土高度、地基处理方法、填土施工速率和地质条件对沉降系数的影响, 提出综合沉降系数的计算模式, 对保证软路基工程质量具有指导意义。

关键词: 软路基; 沉降计算; 经验系数; 影响因素

中图分类号: U416 文献标识码: A 文章编号: 1007-7162(2007) 01-0066-04

1 问题的提出

目前, 在软土地基路基沉降计算方法中应用最广泛的是分层总和法, 主要是计算软土地基的固结沉降。从公路工程实践的大量调查研究可知, 软路基沉降计算值和不同土质地区的实测值虽然各有不同, 但其差值和土质的关系却有一定的规律, 可以通过不同工程的实测资料积累和对比, 采用合适的经验修正系数的方法, 以满足公路工程的需要。因此, 根据统计分析提出了经验修正系数 m , 将计算结果按式 (1) 进行修正:

$$S = \sum m_s \Delta S_s \tag{1}$$

式中 ΔS_s 为该分层的压缩变形量; m_s 为沉降计算经验系数, 如表 1 所示^[1]。

表 1 不同压缩模量 E_s (MPa) 下沉降计算的经验系数

$E_s \leq 4$	$4 < E_s \leq 7$	$7 < E_s \leq 15$	$15 < E_s \leq 20$	$E_s > 20$
1.8~1.1	1.1~0.8	0.8~0.4	0.4~0.2	0.2

采用公式 (1) 计算总沉降是公路工程中普遍应用的一种经验法, 其包括瞬时沉降及次固结沉降。然而, 沉降系数的选取直接影响到设计计算的准确性和工程质量, 还影响到工程的造价。从工程实践可知, 软土路基工程沉降系数的影响因素包括填土高度 (H)、填料容重 (γ)、施工速率 (V)、地基处理类型 (N)、软土层厚度 (h_1)、硬壳层厚度 (h_2)、软土的强度及渗透固结性质 (Y) 等等, 可用式 (2) 表示。

$$m = f(H, \gamma, V, N, h_1, h_2, Y) \tag{2}$$

这些因素可以分为: ① 荷载因素, 包括路堤高度及填

土密度、填土速率; ② 地基因素, 包括软土的强度及渗透固结性质、地下处理类型对地基土性的改变、软土层厚度及位置、硬壳层厚度的应力扩散作用等。

2 路堤荷载对沉降系数的影响

软土地基在路堤荷载作用下, 会发生沉降与不均匀沉降。通常, 随着软路基路堤荷载的增加, 地基的固结沉降也增加, 同时在地基内产生的剪应力也增加, 使软土地基的瞬时沉降有所增大。而且随着软路基路堤荷载的增加, 在软弱层中塑性变形区有增大的可能性, 软土水平向的塑性挤出致使地基总沉降量增大。

在广深高速公路软基处理设计中, 曾按不同填土高度采用了不同的沉降系数, 如表 2 所示。采用表 2 比常用沉降系数 1.3 计算软路基路堤总沉降, 已是进一步满足了工程要求, 但是应该看到: 即使在同样的填土高度下, 随着其它影响因素的不同, 沉降系数也是不同的。

表 2 按填土高度 H (m) 取值的沉降系数

$H \leq 3.5$	$H = 3.5 \sim 4.5$	$H = 4.5 \sim 5.5$	$H \geq 5.5$
1.15	1.20	1.25	1.30

3 地基土的应力历史对沉降系数的影响

地基土的应力历史对沉降系数的影响较大, 原因在于正常固结土与超固结土的压缩性有很大差别, 即正常固结土在历史上没有受到比现在更高的压力, 超固结土在历史上承受过高应力。当超固结比

OCR 定义为式 (3) 时,

$$OCR = P_c / P \tag{3}$$

则 $OCR = 1$ 为正常固结土, $OCR > 1$ 为超固结土. 式 (3) 中, P_c 为前期固结压力, P 为当前有效应力. 同一土层若当前有效应力较高, 达到前期固结压力, 就是正常固结土; 若当前有效应力较低, 低于前期固结压力, 则成为超固结土. 因此, 为了说明土层是否正常固结土与超固结土, 确定前期固结压力 P_c 很有必要.

图 1 为土样试验所得出的一般原状软土的 $e - \lg p$ 曲线, e 为软土孔隙比, P_c 为历史上曾经受到过的最大有效压力, 试验曲线形状的变化是以前期固结压力 P_c 为转折点的. 从图中可见, 曲线的初始段为向下弯曲线, 而当压力较高时便接近为直线. 原因在于: 土样在地基中受到自重应力的作用, 取样做试验时应力释放, 成了超固结土, 在试验加荷的初期阶段为再压曲线, 故较平缓; 随着荷载的逐步增加, 曲线渐陡; 当达到前期固结压力 P_c 时就成为正常固结土, $e - \lg p$ 曲线转化为直线. 对于地层中的原状软土来说, $e - \lg p$ 曲线由再压转化为原压转折点处的压力, 就是前期固结压力. 然而, 试样在试验切削过程中受到扰动, 试验所得的 $e - \lg p$ 曲线由再压转化为原压不那么明显, 并且曲线斜率变化最剧烈处所对应力往往小于前期固结压力^[2].

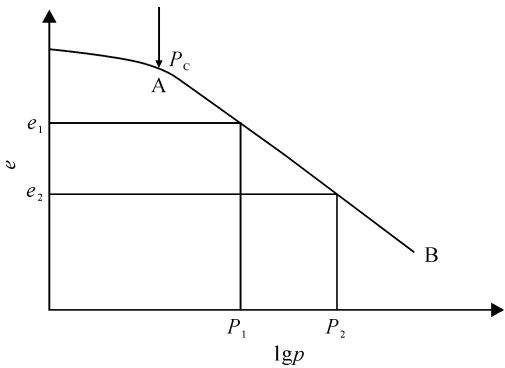


图 1 软土的 $e - \lg p$ 曲线

一般说来, 对于超固结土, 沉降系数较小; 对于欠固结土, 沉降系数较大.

4 地基处理方法对沉降系数的影响

一般软土地基处理方法有两种类型: 1) 提高软土本身的物理力学指标, 如排水固结方法, 包括堆载预压、真空预压、超载预压、加砂井或塑料排水板等; 2) 复合地基处理方法, 如碎石桩、砂桩、CFG 桩、石灰桩、土工布、土工格栅等.

地基处理可以改善地基土的工程性质, 提高承载力. 不同的处理方法对沉降系数有不同程度的影响, 即使是同一种处理方法, 由于其边界条件的千差万别, 也难得出处理方法与沉降系数的准确关系.

1) 对于排水固结方法, 运用分层总和法计算沉降时, 主要计算主固结沉降, 而未考虑软土的侧向变形和次固结沉降, 理论沉降值偏小, 所以沉降影响系数应取较大值. 然而, 对于砂井或塑料排水板, 在地基中能形成的良好排水通道, 加速了地基的固结, 在填土过程中地基土抗剪强度增长较快, 可以在一定程度上降低瞬时沉降.

2) 对于复合地基处理方法, 在荷载影响范围内形成复合土层, 相当于软土的硬壳层, 减少了地基侧向变形, 总沉降量减少, 从而理论计算值要大于实际发生沉降, 所以沉降影响系数应取较小值. 例如挤密砂桩类型, 砂桩与地基土共同构成复合地基, 荷载在砂桩上产生应力集中, 分担了地基土承受的荷载, 限制了软土的侧向变形; 同时, 砂桩的挤密作用增强了软土的承载能力, 砂桩在地基中形成的良好排水通道又加速了地基的固结. 所有这些因素大大减少了地基的瞬时沉降和塑性变形. 因此, 挤密砂桩类地基的沉降系数一般较小.

5 填土施工速率对沉降系数的影响

通常, 在采用排水固结方法处理软土地基的条件下, 当路堤填土速度缓慢时, 软土中水分慢慢排出, 孔隙中超静水压力转化为有效应力, 而且侧向变形较小, 实测沉降较小. 相反, 当路堤填土速度较快时, 地基土强度来不及增长, 沉降与侧向变形越大, 即沉降影响系数越大. 由此可见, 沉降系数随着填土速率的增长而呈增加趋势.

为了能使软基路堤的填筑施工处于稳定状态, 填筑路堤时可以将填土速率分为 3 个档次: 1) 慢速填土, 表示分期加载或填土速率 $< 0.02 \text{ m/d}$; 2) 一般填土, 表示填土速率在 $0.02 \sim 0.07 \text{ m/d}$ 之间; 3) 快速填土, 表示填土速率 $> 0.07 \text{ m/d}$. 采用加荷速率这一指标, 实际上只是把分期加载和快速填土两种极端情况与一般正常速率的填土加以区别.

6 地质条件对沉降系数的影响

从理论上和工程实践可知, 公路软土地基路堤的工程地质条件, 如软土的沉积时间、软土结构性、软土固结状态等对软土地基沉降影响较大.

6 1 硬壳层

一般将覆盖在软土层之上的强度稍高的表层称为“硬壳层”. 这种土层靠近地表, 历史上并未受到过大的荷载, 但表现较强的超固结性. 硬壳层在没有破坏的情况下, 一般具有应力扩散作用. 硬壳层越厚, 其应力扩散作用越明显, 致使地基土承受的附加应力降低, 沉降减少, 沉降系数也减少. 对于厚硬壳层上的低路基, 其沉降系数可能小于 1. 硬壳层的厚度在一定程度上决定了软土层的位置, 利用硬壳层厚度这一指标, 可以粗略地把表层软土、一般软土和深层软土区别开来.

目前软基处治设计一般都采用 $e-p$ 曲线计算沉降, 压缩模量仅在粗略计算或缺少 $e-p$ 曲线试验资料时才使用. 从采用 $e-p$ 曲线计算的沉降系数与经验公式计算的结果比较来看, 即使有较厚的硬壳层作用, 只要路堤填筑高度超过极限高度 1 m 以上, 沉降系数仍应修正.

6 2 原状土与扰动土具有不同的曲线形态和结构性

对原状土以及同一种土的扰动土样分别做压缩试验, 绘制 $e-lp$ 曲线. 从 $e-lp$ 曲线可以看出, 原状土与扰动土具有不同的曲线形态, 即原状土在前期固结压力附近转折明显, 扰动土转折不明显, 曲线的斜率自始至终逐渐变化, 且曲线位置在原压曲线的下方. 究其原状土与扰动土具有不同的曲线形态的差别, 主要是结构性不同: (1)原状土的结构就象一种构架, 能承受一定荷载, 所引起的变形较小, 此时压缩性较低. 当荷载接近前期固结压力时, 结构逐渐破坏, 因而压缩性逐渐增大, 到超过前期固结压力时压缩性陡增; (2)扰动土的结构已经受到破坏, 抵抗外荷载的能力减弱, 因而在同一荷载作用下孔隙比较小, 荷载增加引起孔隙比改变趋于平缓. 其实原状土样也已受到扰动, 取土、切土等都会扰动土的结构, 只是扰动的程度较小. 天然土层中的土才真正保存原状结构, 当荷载超过前期固结压力时, $e-p$ 曲线基本上是一条直线.

6 3 灵敏粘土的压缩曲线

灵敏粘土的含水量较高, 经常超过液限, 在前期固结压力之前的再压曲线较为平缓, 一旦达到前期固结压力, 曲线急剧下降, 再略转平缓而接近直线. 这种土往往是絮状或绒团状结构, 颗粒接触点有一定的胶结力, 能随一定的压力而变形较小, 使初期加荷阶段曲线平缓; 当荷载超过前期固结压力, 土的结构

破坏后, 土粒排列改变, 孔隙比就急剧下降而出现陡峭的曲线形状.

7 综合沉降系数的计算模式

7 1 影响沉降系数的诸因素评价

根据工程实践和上述分析, 可以得出各种因素对沉降系数影响的大致规律性, 如表 3 所示.

表 3 影响沉降系数 m 的诸因素评价

影响因素	因素变化	m 的变化趋势
填土高度	随着高度的增加	增大
填土密度	随着密度的增加	增大
填土速率	随着速率的增加	增大
地基处理类型	不处理类型→砂井类型→挤密砂桩类型	减少
硬壳层	随着硬壳层厚度的增加	减少
软土厚度	随着软土层厚度的增加	增加
软土强度	随着强度的增加	减少

7 2 沉降系数的综合计算公式

从施工实践分析可知, 沉降系数是由各种因素的组合与相互作用决定的, 其数值是千变万化的, 虽然有大量实测资料亦很难统计出一个关系式. 此外, 沉降系数是一个较小范围内的比较粗略的数字, 变化范围一般在 1. 1~ 1. 7, 极端条件下略有扩大, 其精度在 $\pm 0. 05$ 范围内一般满足工程要求. 因此, 可以选择取某一地区的地质条件作为标准地层, 找出沉降系数与其他因素的量的关系, 对其他地区则按地质条件进行修正, 得出一个近似值. 例如, 根据某高速公路软基试验工程实测沉降系数, 结合沉降系数与各影响因素的一般关系, 并参考国内其它一些工程的实测资料, 经过统计计算, 得出沉降系数的综合计算公式^[3]:

$$m = 0. 123r^{0. 7}(\theta H^{0. 2} + V) + Y \tag{4}$$

式中, H 为路堤高度, m; r 为路堤填料的容重, kN/m^3 ; θ 为地基处理类型系数, 取值如表 4 所示; V 为填土速率修正系数, 取值如表 5 所示; Y 为地质因素修正系数, 取值如表 6 所示.

表 4 地基处理类型系数修正值

挤密砂桩类	砂井类	地基未处理
0. 70	0. 95	1. 10

表 5 填土速率系数修正值 ($m \cdot d^{-1}$)

分期加载或率 < 0. 02	一般填土率 0. 02~ 0. 07	速率 > 0. 07
0. 005	0. 95	1. 10

表 6 地质因素修正值

地质因素	修正值 Y
软土层中夹有明显的排水层	- 0.1
软土层中没有明显的排水层	0
软土层平均不排水强度 > 25 kPa	- 0.1
< 25 kPa	0
软土层厚度 > 5 m	0
3~ 5 m	- 0.05
< 3 m	- 0.1
硬壳层厚度 < 2.5 m	0
2.5~ 5.0 m	- 0.1
5.0~ 7.0 m	- 0.2
> 7.0 m	- 0.3

7.3 沉降系数计算式应用比较

按式 (4)对某高速公路软基试验工程进行试算,如表 7所示.通过比较可以看出,采用综合计算式 (4)得到的沉降系数与实测值的误差大部分在 ±0.1 之内,完全能够满足实际设计计算的需要.

表 7 不同断面号的沉降系数计算值与实测值比较

断面号	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
实测沉降推算值	1.39	1.47	1.65	1.53	1.79	1.06	1.33	1.24	1.07
按经验式计算值	1.35	1.36	1.57	1.58	1.77	1.23	1.26	1.21	1.05

8 结束语

在高等级公路路基设计中,当沉降系数 $m > 1.7$ 时,说明软土地基有较大的水平向塑性变形,实际上已为不稳定状态,应在设计方案上采取稳定措施.

从上述分析可知,沉降系数计算式是以各种影响因素的分析为基础,以某高速公路软基试验工程实测资料为依据,并参考其他有关资料而得出的.必须注意的是,实测资料是最终沉降 S 的计算依据,一般根据一年或数年的实测资料推算,观测时间越长,推算的 S 越可靠.但是,有部分资料的 S 是根据一年或更短时间的观测资料推算的,其可靠性往往较差.推算沉降的方法有双曲线法、星野法等多种,各种方法所得结果也有一定的差别,所以在使用计算式验证有关资料时,必须具体分析.

参考文献:

[1] 刘玉卓.公路软基处理[M].北京:人民交通出版社,2004.
[2] 罗志强.填海造陆区路基工程的设计与施工[J].公路,2001(10):124-127.
[3] 张留俊,王福胜,刘建都.高速公路软土地基处理技术[M].北京:人民交通出版社,2002.

Analysis of Affecting Factor of Settlement Coefficient
for Subgrade on Soft Soil Base

TAN Shi-lin¹, LUO Zhi-qiang²

(1 Guangdong Provincial Hangshen Construction Group Limited Cooperation, Guangzhou 511442, China
2 Faculty of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract According to the actual problems of the settlement calculation of the subgrade on the soft soil base, an experience method commonly used in the highway engineering is discussed. The influence of the embankment filling height, base treatment method, filling construction rate, and geology conditions on the settlement coefficient is analyzed, and calculation model of the comprehensive settlement coefficient is presented, which has instructive meaning to ensure the subgrade engineering qualities on the soft soil base.

Key words soft soil base; settlement calculation; experience coefficient; influence index