

不同方法估算路基最终沉降量的分析研究

⑤
17-24

吴 钰 徐泽中 陈景扬

(河海大学 南京 210098)

U416.102
U412.366

摘要 用 a_{v1-2} 法、 $e \sim p'$ 曲线法、 $e \sim \lg p'$ 曲线法、有限元法四种沉降计算方法分析沪宁高速公路典型软土路段不同堤高时的地基沉降规律,探讨在该地区考虑土的超固结特性及考虑土的侧向变形对地基沉降的影响程度,提出土的超固结影响修正系数 m_{11} 和侧向变形修正系数 m_{12} 的取值方法和取值范围。分析表明,忽略土层的前期固结应力的影响是造成沉降量估算过高的主要原因。

关键词 高速公路 地基 沉降 估算方法 固结 侧向变形

工程实践表明,软土路段及桥头路基的处理是高速公路工程建设成败的关键。为使高速公路建成通车后,确保路面的使用质量,必须重视软土路段路基的处治,而地基沉降估算,是决定软土地基是否需要处理的重要步骤。

影响地基沉降的因素很多,如荷载大小、土的性质、土层分布及土的应力历史等。鉴于沪宁高速公路各设计单位提供的土的压缩性指标主要是以快速法求得的压缩系数 a_{v1-2} (或 E_{s1-2}),而 $e \sim p'$ 曲线数量不到总数的 1/5,试验的最大压力一般只做到 400 kPa, $e \sim \lg p'$ 曲线更少;此外,A,B,C,D 四个标段 16 个断面的高压固结试验和三轴试验成果是河海大学补充试验的,因此要用较精确的计算方法来估算全线路基沉降,资料是远远不够的。本文的目的是运用有限个断面上的高压固结试验及三轴排水剪切试验资料,在用非线性有限元法与 a_{v1-2} 法、 $e \sim p'$ 法、 $e \sim \lg p'$ 法计算成果进行对比分析后,对工程上常用的一些沉降计算方法作一评估,选择较合理的沉降计算方法,供估算沉降时应用。

1 各种沉降估算方法评估

地基总沉降可分为瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降三部分。通常地基设计中只计算固结沉降,然后乘上一个综合影响系数 m ,作为总沉降量^[1]。

1.1 沉降计算方法讨论

目前关于沉降计算的方法很多,归纳起来有四类^[2]。

a. 以 $e \sim p'$ 曲线为依据的方法。根据确定压缩系数或压缩模量的压力范围的不同,又可分为取实际压力变化范围和仅取压力变化范围为 100 ~ 200 kPa 两类。

b. 以 $e \sim \lg p'$ 曲线为依据的方法。 $e \sim \lg p'$ 法考虑了应力历史对沉降的影响,这是一个很大的改进。试样从地基中取出,做试验时应力被释放,同时土样受到扰动,因此试验所得 $e \sim p'$ 或 $e \sim \lg p'$ 曲线是回弹再压线。图 1 表示了正常固结土的压缩曲线,实线为试验曲线,初始压力 $p'_1 = p'_c$,从试验曲线上看,它对应孔隙比 e_1 ,即 A 点。但在地层中, p'_1 实际上对应的孔隙比为 e'_1 ,如图 1 中 A' 点所示。

第一作者简介:吴钰,女,高级工程师,从事工程结构及地基处理研究,曾发表《台儿庄船闸下闸首及闸主结构补充分析》等论文。

e'_1 与 e_1 之差是土样扰动引起的。土样扰动得越厉害,其间差别越大。施加附加应力后,应力达到 p'_2 ,即图 1 中 B 点。它可能已回到了原压曲线上。按 $e \sim p'$ 计算沉降,用的是图 1(a)中 AB 线的斜率 a_r ,所得沉降相应于 $e_1 - e_2$;而用 $e \sim \lg p'$ 法计算沉降,用的是图中原压线 A'B 的斜率 C_c ,所得沉降相应于 $e'_1 - e_2$ 。两者是有差别的,正常固结土用 $e \sim p'$ 曲线算得的沉降偏小。

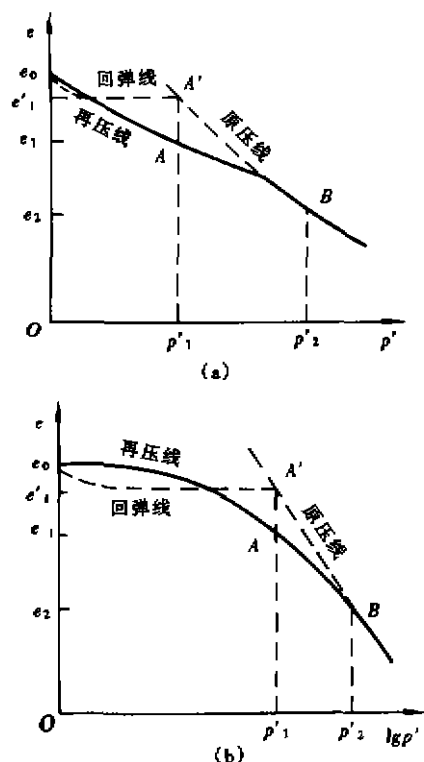


图 1 正常固结土压缩曲线
(a) $e \sim p'$ 曲线; (b) $e \sim \lg p'$ 曲线

对超固结土,两种压缩曲线示于图 2。试验得出的是图中的实线,而用 $e \sim \lg p'$ 方法可推得地层中应力变形实际所走的线路(图中虚线),在 $p' < p'_c$ 时沿 A'D 线,斜率 C_e , $p' > p'_c$ 时沿 DB' 线,斜率 C_c ,当应力由 p'_1 变化到 p'_2 时,用 $e \sim p'$ 曲线算得的是 $e_1 - e_2$ 所对应的压缩量,而用 $e \sim \lg p'$ 方法算得的是 $e'_1 - e'_2$ 所对应的压缩量。一般来说,后者小于前者,而

且超固结比越大,两者差别就越大。对超固结土, $e \sim p'$ 曲线方法算得的沉降是偏大的。

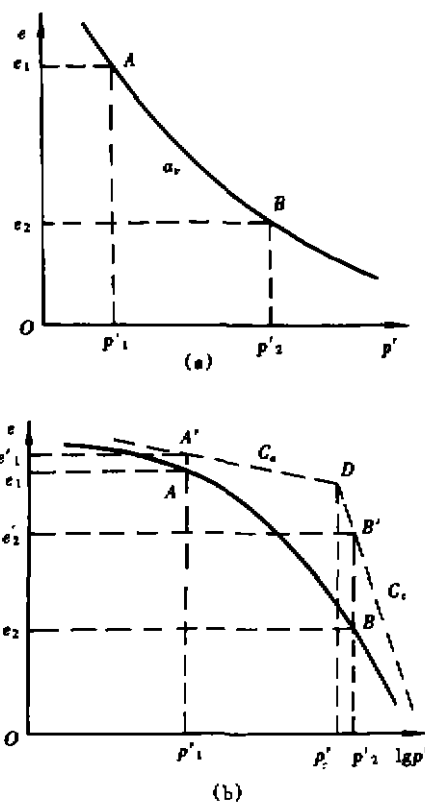


图 2 超固结土压缩曲线
(a) $e \sim p'$ 曲线; (b) $e \sim \lg p'$ 曲线

c. 考虑侧向变形的因素。侧向变形是引起沉降的重要因素。然而,上述两类方法所依据的试验都是侧向完全限制的压缩试验,沉降计算不能反映侧向变形的影响。工民建规范规定,沉降修正系数 m_s 随荷载而变,当荷载较大而接近或达到允许承载力时, m_s 较大。这在一定程度上体现了对侧向变形影响的考虑。因为荷载越大,侧向变形就越大。但这种规定只是经验性的,有待于在理论上加以发展。已经有一些考虑侧向变形影响的理论公式可供参考。

Skempton 和 Bjerrum 方法:

$$S' = C_p S \quad (1)$$

式中, $C_p = A + \alpha(1 - A)$, A 为孔隙压力系数,变化于 0.5 ~ 1.0, α 为系数,

$$\alpha = \int_0^H \Delta\sigma_3 dz / \int_0^H \Delta\sigma_1 dz$$

黄文熙方法:

$$S = \sum k \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} h \quad (2)$$

式中, $k = \frac{1}{1-2\nu} [(1+\nu) \frac{\sigma_2}{H} - \nu]$, ν 为泊松比, $H = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ 。

这些公式由于参数确定困难,尚未得到推广应用。

d. 有限元法。有限元法是将地基和结构作为一个整体来分析,将其划分网格,形成离散体结构,在荷载作用下算得任一时刻地基和结构各点的位移和应力。其中基础底面的竖向位移就是所要求的沉降。它所依据的试验是三轴压缩试验。

有限元法可以将地基作为二维甚至三维问题来考虑,反映了侧向变形的影响。它可以考虑土体应力应变关系的非线性特性,采用非线性弹性的本构模型,或者弹塑性本构模型。目前用得最广的是邓肯-张双曲线模型。它可以考虑应力历史对变形的影响,若应力低于或高于前期固结应力,则采用不同的弹性模量计算公式。它还可考虑土与结构共同作用,考虑复杂的边界条件,考虑施工逐级加荷,考虑土层的各向异性等。对土体的固结计算,可以用 Biot 固结理论,避免了一维固结计算的许多弊端。从计算方法上来说,是一种较为完善的方法。它的缺点是计算工作量大,参数确定困难,要做三轴排水试验,目前主要用于重要工程、重点地段的计算。

1.2 压缩层厚度 Z_n

考虑到沪宁高速公路沿线土层属成层地基,软弱土层分布在不同深度,且大都夹有砂质土层,为安全起见,建议先按地基附加应力 Δp 小于 0.2 倍自重应力 p'_0 确定压缩层 Z_n 的深度。如确定后的计算深度 Z_n 以下还存在软土时,应继续计算,直至地基附加应力 Δp 小于 0.1 倍的自重应力 p'_0 为止。

1.3 几种方法估算沉降的成果分析

α_{v1-2} 法和 $e \sim p'$ 法或 $e \sim \lg p'$ 法都是基于

单向固结试验结果采用分层综合法来计算地基的沉降量。前两种方法算得的沉降总值相差不大,这是由于沪宁高速公路平均堤高一般在 3.5 m,相应的地基压缩层深度为 20 ~ 25 m,此范围内的平均应力情况大致处于 100 ~ 200 kPa 之间的原故。对低于 3 m 的路堤,用 α_{v1-2} 法要比 $e \sim p'$ 法结果小,而当路堤高于 5 m 时,用 α_{v1-2} 法得出的沉降反而偏大。表 1 列出部分断面的计算结果。

表 1 沪宁高速公路部分断面 α_{v1-2} 法与 $e \sim p'$ 法沉降计算结果比较

桩号	堤高 H/m	α_{v1-2}/cm	$s_{e-p'}/cm$
K49+900	2.9	14.7	15.9
K108+410	3.0	25.0	28.4
K104+639	3.4	24.3	32.8
K105+918	3.5	20.9	22.7
K107+650	3.6	23.2	9.7
K119+615	4.2	47.1	37.4
K57+915	4.1	24.8	23.5
K61+900	4.6	26.0	27.0
K104+936	4.9	34.9	41.8
K100+500	5.1	37.5	33.7
K50+700	5.0	26.4	24.9
K106+596	5.3	15.9	21.0
K102+204	5.5	40.6	38.2
K120+080	5.2	43.7	46.6
K96+500	6.5	58.3	53.4
K108+651	7.9	70.2	51.8

$e \sim \lg p'$ 法仍然是以单向压缩结果为依据,能考虑应力历史对沉降的影响,适用于沪宁高速公路具有超固结特性地基的沉降计算。表 2 列举 $e \sim p'$ 法与 $e \sim \lg p'$ 法的沉降计算结果。一般说来,在堤高 3 ~ 4 m,用 $e \sim \lg p'$ 曲线计算沉降量约减小 20% ~ 30% 左右,原因是该地区超固结土层深达 10 ~ 20 m,

表 2 沪宁高速公路部分断面 $e \sim p'$ 法与 $e \sim \lg p'$ 法沉降计算结果比较

桩号	堤高(含路面) H/m	$s_{e-p'}/cm$	$s_{e-\lg p'}/cm$	$\frac{s_{e-p'} - s_{e-\lg p'}}{s_{e-p'}} (\%)$
K21+880	5.2	64.7	62.6	-3.0
K61+900	4.35	27.2	23.1	-15.0
K96+096	7.2	72.7	67.0	-7.8
K96+410	6.7	61.4	49.7	-19.0
K108+651	7.9	51.8	58.4	12.7
K119+000	3.6	49.7	39.2	-21.2

而对平均堤高为 3.5 m 的路堤,其压缩层深 22~25 m,在附加应力作用下,地基大部分土层的变形发生在回弹再压缩阶段,其压缩指数为 C_c 、 C_c' 远小于 C_c' 。路堤高超过 5 m 后,压缩层厚度可增至 32 m,深层土属于正常固结土,压缩变形采用 C_c' 计算,从而造成在高路堤情况下,两法估算结果比较接近,甚至用 $e \sim \lg p'$ 法计算沉降量要偏大。

在 A、B、C、D 各标段,选择不同土质的 7 个典型断面,对每个断面都分别用 $e \sim p'$ 法, $e \sim \lg p'$ 法计算 2 m、3 m、4 m、5 m、6 m 共 5 组堤高的地基沉降量(表 3),进一步得到不同堤高下的沉降规律。

由以上分析可知,这两种方法的沉降差异,实际上反映了土的超固结影响,可以用系数 m_{s1} 来表示超固结影响,将堤高 H 与 m_{s1} 的关系绘成图 3。由表 2、表 3 及图 3 的统计得出,当堤高从 2 m 增加到 6 m, m_{s1} 在 0.5~1.1 之间变化。若地基表层为淤泥质土,且路堤较低, m_{s1} 可能更小,对深层埋有软弱土的高路堤地基, m_{s1} 会超过 1.1。因此,软土的层厚及分布部位亦对各种沉降计算方法的结果有不同影响。在土质较均匀的地区, m_{s1} 主要受堤高影响。

以上三种沉降计算方法,都没有考虑地

基加载后发生侧向变形引起的附加垂直沉降(即瞬时沉降),有限元法可将地基视为二维问题,考虑其侧向变形影响,用非线性本构模型(如邓肯-张双曲线模型)考虑土体应力应变非线性特性,根据应力的采用不同弹性模量计算公式,还可以模拟施工加荷过程,引入考虑水平渗透的二维比奥固结理论。从计算方法上来说,是一种较为完善的方法。

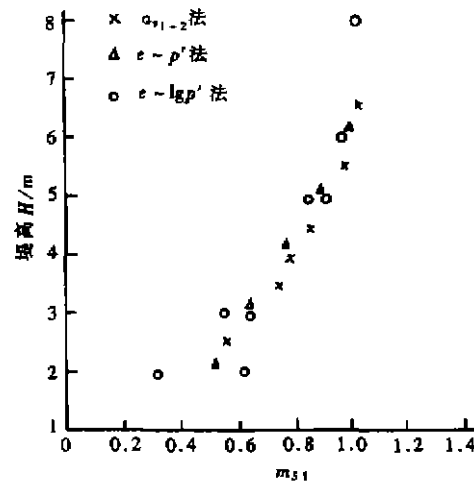


图 3 路堤高 H 与 m_{s1} 的相关关系

本文用有限元法对沪宁高速公路 8 个断面作了地基变形计算,并与 a_{v1-2} 法、 $e \sim p'$ 法、 $e \sim \lg p'$ 法计算结果进行比较(表 4)。由

表 3 不同堤高、不同计算方法地基总沉降量比较

堤高(含路面) H/m	K21+880			K51+900			K96+144		
	$s_{e-p'}$ /cm	$s_{e-\lg p'}$ /cm	$\frac{s_{e-\lg p'}}{s_{e-p'}}$	$s_{e-p'}$ /cm	$s_{e-\lg p'}$ /cm	$\frac{s_{e-\lg p'}}{s_{e-p'}}$	$s_{e-p'}$ /cm	$s_{e-\lg p'}$ /cm	$\frac{s_{e-\lg p'}}{s_{e-p'}}$
2.1~2.6	17.3	10.5	0.61	12.6	7	0.53	21.3	5.5	0.29
3.1~3.6	28.4	18.1	0.64	19.3	14.1	0.73	34.7	14	0.4
4.1~4.6	42.7	33.2	0.78	27	23.1	0.85	52.4	36.3	0.69
5.1~5.6	57.2	52.8	0.92	35.3	34.3	0.97	61.2	47.2	0.77
6.1~6.6	64.7	62.6	0.97	42.9	48	1.12	77.8	65.7	0.84

表 4 四种沉降计算方法求得的总沉降量比较

桩号	堤高(含路面) H/m	$s_{a_{v1-2}}$ /cm	$s_{e-p'}$ /cm	$s_{e-\lg p'}$ /cm	$s_{\text{有限元}}$ /cm	水平位移(有限元) /cm	$\frac{s_{\text{有限元}}}{s_{e-\lg p'}}$
K61+900	4.35	26	27	23.1	27.1	3.17	1.17
K119+000	3.6	42	49.7	39.2	44	5.98	1.12
K120+080	5.2	43.9	46.0	40.7	47.7	6.56	1.17
K110+150	6.15	76.6	72.5	57.3	67.8	13.2	1.18
K95+114	4.18	51.6	52.7	36.3	39.3	8.7	1.08

表 4 可知,有限元法的总沉降量比 $e \sim \lg p'$ 法普遍要大,增加的部分主要是土侧向位移产生的附加沉降量。我们仍定义一个反映土的侧向变形对沉降影响的修正系数 m_{s2} 。计算表明, m_{s2} 因路堤增高而加大,这是由于土层在地基高应力水平下(高路堤)要比低应力水平下(低路堤)侧向变形大。如表 4 所示,路堤由 4 m 增至 6 m, m_{s2} 在 1.08 ~ 1.18 之间变化。即附加沉降量在 8% ~ 18% 间变化。除了堤高因素外,侧向位移还因土质软弱程度而变,如表 4 中, K110+150 断面,在 6.2 m 路堤荷载作用下,地基上部有 3 m 厚淤泥层,该层内发生 13.2 cm 的侧向位移。

2 沉降估算方法建议

a. 通过上述四种方法估算沉降的成果分析,可得出以下修正系数,供地基沉降估算使用。

m_{s1} 为土的超固结影响修正系数,近似可等于 $e \sim \lg p'$ 法与 $e \sim p'$ 法或 a_{v1-2} 法计算沉降量的比值。用公式表示为

$$s_1 = m_{s1} s_{e-p'} \quad (3)$$

式中 $s_{e-p'}$ 为 $e \sim p'$ 法计算沉降量; s_1 为考虑土超固结影响的总沉降量。对沪宁地区一般软土地基,堤高由 2 m 增大至 6 m, m_{s1} 约从 0.5 增加至 1.1。

m_{s2} 是考虑土的侧向变形的修正系数,令其近似等于有限元法与 $e \sim \lg p'$ 计算沉降量的比值,用 $e \sim \lg p'$ 法计算值,乘以 m_{s2} ,即为包括侧向位移所产生的沉降在内的总沉降量 s_2 。用公式表示为

$$s_2 = m_{s2} s_{e-\lg p'} \quad (4)$$

式中 m_{s2} 为土的侧向变形及非线性特性影响修正系数; $s_{e-\lg p'}$ 为 $e \sim \lg p'$ 法计算沉降量。对沪宁地区较均质地段,当堤高在 4 ~ 6 m 时, m_{s2} 约在 1.08 ~ 1.18 之间变化。

综合上述,当用 a_{v1-2} 法或 $e \sim p'$ 法估算沉降时,可以用 m_{s1} , m_{s2} 两个系数综合修正,得出考虑土的超固结特性、非线性特性以及侧向变

形等影响的总沉降量 s_g 。用公式表示为

$$s_g = m_{s1} m_{s2} s_{e-p'} = m_s s_{e-p'} \quad (5)$$

b. 地基沉降量大小,不仅取决于土质、荷载等自然条件,还受人为因素影响,如过快的施工速率、地基处理中土的扰动,都会明显加大沉降量,这些人为影响,不包含在 m_{s1} 和 m_{s2} 修正系数范围中。

c. 对无法获得高压固结试验、三轴试验资料的工程设计,用简便方法,通过修正系数 m_{s1} 和 m_{s2} 调整,不乏为简易实用而较接近实际的沉降估算方法。但修正系数都有一定的适用范围,且只是粗略的修正办法,因此应力求用比较精确的方法计算并用实测资料进行检验,以得到符合实际沉降的修正。

d. 由于收集的资料还不够多,目前现场实测也尚未结束,本文提出的修正系数有待更多的现场资料积累后的验证。

e. 各标段补做的三轴排水剪试验,为用非线性弹塑性比奥固结平面有限元法评估常规沉降计算方法存在的问题提供了科学依据。

参考文献

- 1 孙更生等. 软土地基与地下工程. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984. 142 ~ 149
- 2 钱家欢等. 土工原理与设计. 北京: 中国水利电力出版社, 1996

(收稿日期: 1997-12-15 编辑: 马敏峰)

· 简讯 ·

我国高速公路世界排行第九

我国高速公路从 80 年代实现零的突破后, 发展极为迅速。截止 1996 年底, 全国高速公路通车里程达 3422 km, 在世界高速公路排行榜中列第九位。

在收费技术更新中, 山西省第一条高速公路——太(原)旧(关)高速公路已在国内率先使用非接触 IC 卡, 为中国高速公路收费管理进行了有益的探索。在监控技术方面, 京津塘高速公路是国内首条配备具有国际先进水平监控系统的高速公路, 能有效地收集交通事件、交通流量、气象数据等有关信息。

(摘自 1997 年第 12 期《科技简报》)