

山区软土沉降计算与分析

孙 键 项 尚

苏交科集团检测认证有限公司 江苏南京 210000

摘 要: 根据山区软土的工程特性, 研究软土的沉降特点, 并提出一种基于面积应力法(规范法)进行修正的计算方法, 给出了修正系数的具体表达式, 以及适合山区软土的压缩模量计算方法, 提出的沉降修正计算公式, 对山区软土处理设计水平的提高有益。

关键词: 山区软土; 修正系数; 压缩模量; 沉降计算

目前, 应力面积法(即规范法)是应用较为广泛的一种计算地基沉降的方法, 其主要特点是计算时需要的参数较少, 且计算方便, 能够符合工程要求。对于不同特性的软土, 采用规范法计算时, 应该进行针对性的调整。其中, 需要调整的参数主要有两个: 修正系数、压缩模量。

针对平原地区软土, 修正系数主要影响因素为压缩模量、附加荷载及地基的承载力相关。当压缩模量在2.5~4Mpa且附加应力大于地基承载力时, 路基的压缩模量的分布范围1.3~1.4。但针对山区软土, 尤其是分布较为广泛的斜坡土, 利用上述规定进行计算, 计算所得沉降远远小于实际测得沉降。

故可知, 针对山区斜坡土, 影响修正系数的主要因素并非上述因素。通过应力面积法知, 修正系数的产生, 主要是由于侧向变形的原因。然而, 山区斜坡软土的侧向变形比一般平原地区大, 且影响因素为软土坡率及竖向荷载, 故山区软土修正系数的影响因素主要为软土坡率及荷载。

一、修正系数对沉降的影响

通过对已建山区软土路基的沉降监测数据的分析可知, 山区软土路基存在较大的侧向位移, 而平原地区的软土相比, 侧向位移较小。主要原因如下: (1) 平原地区的软土渗透系数一般在 10^{-6} cm/s, 而山区软土的渗透系数一般在 10^{-8} cm/s, 故相比平原地区软土, 山区软土在初期加载的过程中, 水更难排出, 土体无法被压缩, 因此土体从侧向挤出, 从而形成侧向位移; (2) 山区软土的路基一般是倾斜的, 有一定的倾角, 从而造成山区软土会沿着某一方方向滑动的趋势, 从而形成侧向位移, 故相比山区软土, 平原地区路基水平, 侧向位移较小; (3) 山区软土的强度参数与平原地区软土相比, 摩擦角与黏聚力较小, 使得土体的抗剪强度较小, 从而较易发生侧向变形。

然而利用应力面积法计算土体的沉降时, 前提假设是不考虑软土的侧向变形(侧向变形较小), 因此, 针对

山区软土的这一特性, 需要对应力面积法进行修正^[1-4]。目前, 通过对现有的工程数据及相关数值分析成果知, 影响山区软土的侧向变形的因素较多, 主要包括山区软土的填土高度 h_1 、软土路基的横坡坡率 i 。

利用有限元软件对不同工况下的山区软土路基进行模拟, 得出不同工况下土体的沉降量 S_1 。然后, 在对应的工况下, 增加侧向约束的条件, 即在计算域内的点侧向位移为0, 计算路基的沉降量 S_2 。最后, 令比值 $\frac{S_1}{S_2}$ 为修正系数。

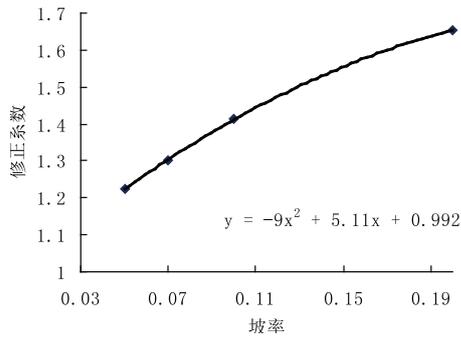
模拟的情况如下: 变量参数为路基的横坡坡率(1: 20、1: 10、1: 5)、路基的高度(1~6m); 拟定方法为单因素法。

由于应力面积法在计算时, 侧向变形影响考虑较少, 结果与考虑侧向变形的有限元计算结果相比, 应力面积法的计算结果偏小。通过增加修正系数, 使得该法计算的沉降量更符合工程实际, 为施工及设计提供依据。

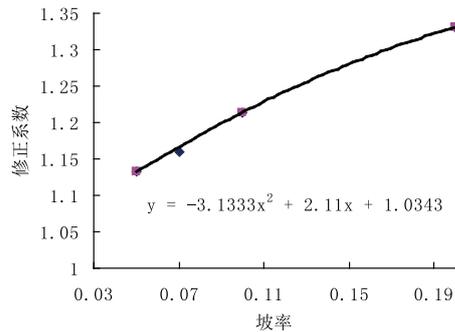
1. 软土横坡的影响

山区软土受地形条件影响, 软土路基的一般具有一定的倾斜, 而平原地区相比, 较为平缓。通过前面章节的有限元计算知, 软土地基的倾斜会加大侧向变形, 从而使常规的应力面积法(假定侧向变形较小)产生较大误差, 同时现有规范中的修正系数也仅仅是针对一般水平软土路基制定的, 未考虑山区这种特殊的地形。

通过图1.1可知, 在填土高度为1m时, i 增加100%, 修正系数从1.132增加到1.332(增加18%); 在填土高度为6m时, i 增加100%, 修正系数从1.225增加到1.654(增加35%)。通过数据分析知, 随着软土横坡坡率的增加, 修正系数在不断增加。随着填土高度的增加, 软土横坡坡率的增加对修正系数的影响会进一步加大。同时根据最小二乘法拟合知, 修正系数与软土横坡的坡率关系是非线性的, 且拟合曲线为二次抛物曲线。



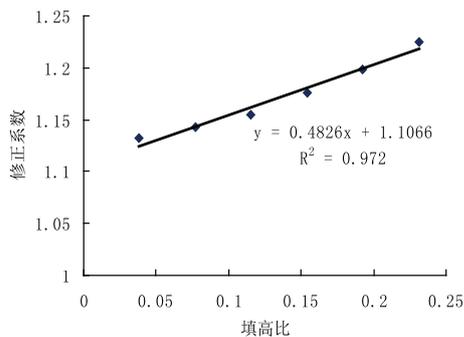
(a) 填土高度为1m



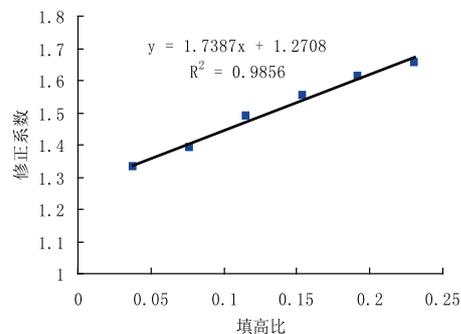
(b) 填土高度为6m

图 1.1 不同填土高度下修正系数随坡率的变化曲线

2. 填土高度比的影响



(a) 坡率 1: 20



(b) 坡率为 1: 5

图 1.2 不同坡率下修正系数随填高比的变化曲线

填高比为填土高度与路面宽度的比值。竖向荷载的增加，必然会导致土体的变形增加。变形包括X方向（侧向）变形和Z方向（垂直）变形。当不考虑水平方向的侧向变形时，必然会导致最终的结果偏小。因此需要研

究在竖向荷载的影响下，土体的修正系数是如何变化的。针对上述问题，拟定的填土高度为1m、2m、3m、4m、5m、6m，计算不同的填高下，山区土体的修正系数。

通过对图1.2分析可知，山区软土的沉降系数（填高大于5m）大致分布范围为1.38~1.66。当软基横坡为1: 20时，填高增加500%，修正系数从1.132增加到1.225（增加8%）；当软基横坡为1: 5时，填土高度增加500%，修正系数从1.331增加到1.654（增加24%）。通过分析知，随着填高比的增加，修正系数在不断增加。随着软基横坡坡率的增加，填高比的增加对修正系数的影响会进一步加大。同时根据最小二乘法拟合知，修正系数与填高比的关系是线性的，且拟合较好。（3）软基横坡与填高比共同影响分析

通过表1.1可知，随着填高比的不断增加，修正系数在不断增加；同时随着软基横坡的增加，修正系数也在不断增加。当软基横坡为1: 20时，随着填高比的增加，路基的沉降修正系数为1.132~1.225；当软基横坡为1: 10时，随着填高比的增加，路基的修正系数为1.214~1.413；当软基横坡为1: 5时，随着填高比的增加，随着填高比的增加，路基的修正系数达到1.331~1.654。通过上述分析知，随着路基坡率的逐渐增大，路基的侧向变形增加，从而修正系数也在逐渐增加。根据分析，修正系数随着路基的填高增加，呈线性增长，相关性较高（ $R^2 = 0.999$ ）。随着孔隙比的增加，呈二次曲线增长。利用Matlab软件，对修正系数进行拟合，得出修正系数 ψ_s 与填高比及软基横坡坡率的关系。具体公式如下：

$$\psi_s = (1 + 0.3H') (156 + 9.65i + 41.34i^2) \quad (1.1)$$

表 1.1 修正系数随填高及边坡坡率的变化

H/L	i		
	1: 20	1: 10	1: 5
0.038	1.132	1.214	1.331
0.077	1.143	1.253	1.39
0.115	1.155	1.302	1.488
0.154	1.176	1.356	1.553
0.192	1.198	1.389	1.612
0.231	1.225	1.413	1.654

通过应力面积法算出土体的沉降量，然后根据土体的填高比及软基横坡坡率，获得修正系数，再对上述沉降量进行修正，从而得出路基的最终沉降量。

二、压缩模量对沉降的影响

根据工程勘测数据知，山区软土的压缩指标空间变异性较大。与山区软土相比，平原地区的软土的压缩模

量较为稳定，一般同一层的压缩模量变化不是很大。通过现有的工程数据分析知，对于同一层软土，其压缩模量的变化范围较大，部分压缩模量几乎增加了一倍，故针对山区软土的复杂性，获取山区软土的压缩模量应该与平原地区有所区别。本文建议，针对山区土，应该采用综合压缩模量的方法，即在同一断面，选取三处试样，计算其压缩模量的平均值，最终确定山区软土的压缩模量。

同时，压缩模量选取对沉降结果的影响较大，故对山区压缩模量的选取应当谨慎，尤其是针对一些特殊路段。在土力学中，压缩模量的公式为 $E_s = \frac{1+e_0}{\alpha_v}$ ，其中 e_0 为初始孔隙比， α_v 为压缩系数。

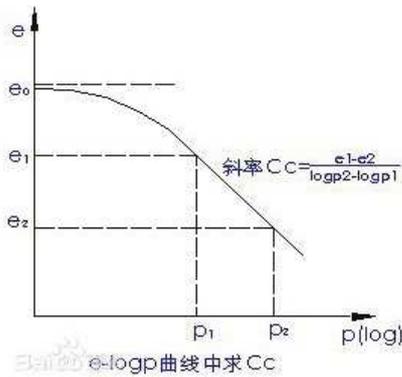


图2.1 压缩指数示意图

通过公式知，决定压缩模量的两个因素分别为 e_0 、 α_v 。压缩系数不是常量，一般在勘察设计报告中，提供的压缩系数为荷载在 100kPa~200kPa 下的压缩系数。

但针对山区土来说，这种选取方法产生的误差较大。首先，山区土的压缩系数变化范围较大，根据现有的工程数据及相关其它文献知，其分布的范围 $0.5 \sim 2.4 \text{ MPa}^{-1}$ 。故相比而言，山区软土的系数变化较大，平原地区变化较小。因此针对山区软土的压缩模量的选择应该在对应的荷载下，而不是全部定在 100kPa~200kPa 下获得。同时，山区软土路基的填土高度一般较高，一般填土高度都达到 10m，转换之后，施加的荷载应经超过 200kPa，故施加在路基上的荷载已经不是 100kPa~200kPa，从而所得的压缩系数偏大^[5-9]。

因此针对山区软土，压缩模量的取法需要做适当的改变，下面根据现有的计算理论，进行推导，得出适合山区软土的压缩模量的计算公式。

在 (p_1, p_2) 之间，设此直线的斜率为 C_c ，如图 3.5，该直线的 $e \sim \ln p$ 截距为 B ，则直线方程可以写成：

$$e = B - C_c \ln(\sigma_z / \sigma_n) \quad (2.1)$$

其中， B 、 C_c 可通过压缩固结试验确定， σ_n 可在绘制曲线时任意确定， B 、 σ_n 参数是相互影响的， σ_z 为竖

向荷载。

同时，由土力学的定义知，

$$E_s = \frac{1+e}{-de / d\sigma_z} \quad (2.2)$$

将 (3.4) 两边对 σ_z 求导，化简结果为：

$$\frac{de}{d\sigma_z} = -C_c \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_z} \cdot \frac{1}{\sigma_n} = -\frac{C_c}{\sigma_z} \quad (2.3)$$

将 (2.3)(2.1) 代入 (2.2) 式，压缩模量的计算公式变为：

$$E_s = \frac{1+e}{C_c / \sigma_z} = \frac{1+B - C_c \ln(\sigma_z / \sigma_n)}{C_c} \sigma_z \quad (2.4)$$

$$E_s = \left[\frac{1+B}{C_c} - \ln(\sigma_z / \sigma_n) \right] \sigma_z \quad (2.5)$$

上述公式在实际的使用过程中，应用不是很方便，主要是因为 在勘测中所提供的资料仅仅是 E_{1-2} 。因此需要将公式进行改进，利用勘测资料中提供的 E_{1-2} ，同时考虑在不同的载荷下土体的压缩模量是变化的，建立一个包含 E_{1-2} ，同时又考虑不同荷载作用下的压缩模量。

压缩模量 E_{1-2} 是一个平均值。压力在 100kPa 与 200kPa 之间。现假定压力 σ_0 下对应的压缩模量 E_{1-2} 。将 (E_{1-2}, σ_0) 代入公式 (2.5) 得：

$$E_{1-2} = \left[\frac{1+B}{C_c} - \ln(\sigma_0 / \sigma_n) \right] \sigma_0 \quad (2.6)$$

化简公式 (2.6) 得：

$$\frac{1+B}{C_c} = \frac{E_{1-2}}{\sigma_0} + \ln(\sigma_0 / \sigma_n) \quad (2.7)$$

将公式 (2.7) 代入公式 (2.5) 中得：

$$\begin{aligned} E_s &= \left[\frac{1+B}{C_c} - \ln(\sigma_z / \sigma_n) \right] \sigma_z \\ &= \left[\frac{E_{1-2}}{\sigma_0} + \ln(\sigma_0 / \sigma_n) - \ln(\sigma_z / \sigma_n) \right] \sigma_z \\ E_s &= \left[\frac{E_{1-2}}{\sigma_0} - \ln(\sigma_z / \sigma_0) \right] \sigma_z \end{aligned} \quad (2.8)$$

该公式的常量 σ_0 需要通过计算获得，具体的计算如下：

根据 $e \sim \ln p$ 知：

$$e_2 = e_1 + C_c \ln(\sigma_2 / \sigma_1) \quad (2.9)$$

令 $\sigma_1 = 100 \text{ kPa}$ ， $\sigma_2 = 200 \text{ kPa}$ ，故 (2.9) 式化简为：

$$e_2 - e_1 = C_c \times \ln 2 \quad (2.10)$$

同时根据公式 (2.3)，并令 $\sigma_z = \sigma_0$ 知：

$$\frac{de}{d\sigma_z} = -C_c \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_z} \cdot \frac{1}{\sigma_n} = -\frac{C_c}{\sigma_0} = -\frac{C_c}{\sigma_0} \quad (2.11)$$

因为当 $\sigma_z = \sigma_0$ ，在 $e \sim p$ 曲线中，其压缩系数与上式中的斜率相等。即

$$\alpha_v = \frac{de}{d\sigma_z} = -\frac{C_c}{\sigma_0} \quad (2.12)$$

将公式(2.10)压缩系数得:

$$\alpha_v = \frac{e_1 - e_2}{100} = -\frac{\ln 2}{100} C_c \quad (2.13)$$

将(2.13)代入(2.12)得:

$$-\frac{\ln 2}{100} C_c = -\frac{C_c}{\sigma_0} \quad (2.14)$$

即 $\sigma_0 = 100 / \ln 2 = 144.3 \text{ kPa}$

综上所述,压缩模量经过调整之后的公式如下:

$$E_s = \left[\frac{E_{1-2}}{144.3} - \ln(\sigma_z / 144.3) \right] \sigma_z \quad (2.15)$$

故通过上述计算发现,当土体所受的外部荷载约140kPa时,土体的压缩模量 E_{1-2} 与真实的压缩模量较为接近。土体在压缩模量在上述计算式中,主要由两个因素控制,第一个因素为勘测设计中,提供的土体的一个平均压缩模量;第二个因素为土体所受的荷载。与传统的沉降计算公式相比,本公式计算的压缩模量考虑了外部荷载的作用,同时又结合土体自身的压缩特性,能够更加真实地反映土体的压缩特性。

根据山区软土的压缩模量 E_{1-2} 主要分布在1Mpa~5Mpa,而堆土高度一般都会超过10m,填方较高,附加应力分布范围100kPa~400kPa,利用推导计算的压缩模量的计算公式,计算不同模量 E_{1-2} 及不同的压力下,土体的压缩模量值。计算结果见表2.1

表2.1 土体的压缩模量值

外荷压力 (kPa)	E_{1-2} (kPa)				
	1000	2000	3000	4000	5000
100	7230	1423	2116	2809	3501
150	1034	2073	3113	4152	5192
200	1321	2707	4093	5479	6865
250	1595	3328	5060	6793	8525
300	1859	3938	6017	8096	10175
400	2364	5136	7908	10680	13452

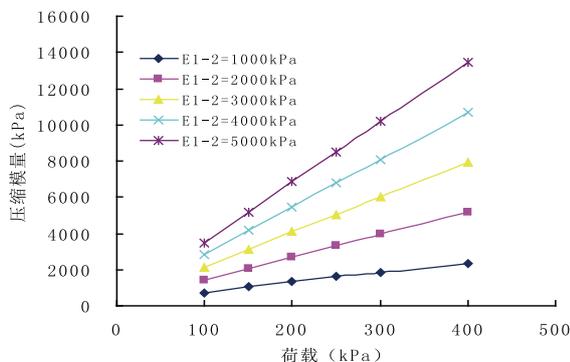


图2.1 荷载与压缩模量的关系图

通过表2.1知,当外荷载在150kPa时,土体的压缩模量与勘测资料中的模量值 E_{1-2} 较为接近,但随着荷载的持续增加,土体的压缩模量也是在逐渐增加的,主要是由于在加载过程中,孔隙水持续排出,土体不断压实,土体抵抗变形的能力不断增强。

三、修正计算公式的可靠性论证

1. 验证思路

结合某一山区已建高速公路工程,利用数值分析软件,模拟工程现状,获得路基的侧向变形,并与现场监测结果进行比较。当两者相差较小时,说明应力面积法中的压缩指标是可信的,也说明压缩模量的修正时可行的;利用应力面积法计算土体的沉降量,并进行修正,与现场所测沉降量进行对比分析。当两者相差较小时,说明修正系数的可行性较高,修正系数公式是可行的。

2. 工程实例

结合已建山区工程,选取典型的断面进行沉降计算。该断面的现场的相关情况如下:地基处理方式为袋装沙井,同时填筑分10次,每次填筑为1m。同时,利用现场监测数据,制得地基中心的沉降-时间的图形。路基的侧向位移随时间变化图如图3.1。

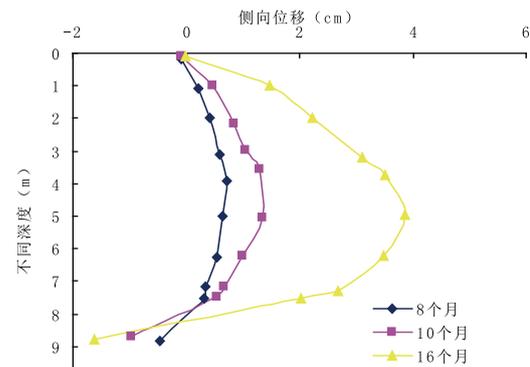


图3.1 侧向位移图

3. 根据观测的结果,侧向变形稳定时间为16个月。

其中,土层参数如下第一层为淤泥质土层,重度 $19.8 \text{ KN} \cdot \text{m}^{-3}$,深度0~5.8m,孔隙比1.5,压缩模量 2.1 MPa ,液限30%,塑限20%,黏聚力 9 kPa ,摩擦角8;第二层为粉质黏土层,重度 $18.7 \text{ KN} \cdot \text{m}^{-3}$,深度5.8~11m,孔隙比1.03,压缩模量 7.5 MPa ,液限20%,塑限15%,黏聚力 20 kPa ,摩擦角10;第三层为强风化岩,重度 $19.5 \text{ KN} \cdot \text{m}^{-3}$,深度11~22m,压缩模量 100 MPa ,黏聚力 15 kPa ,摩擦角10。

根据上述修正压缩模量公式

$E_s = \left[\frac{E_{1-2}}{144.3} - \ln(\sigma_z / 144.3) \right] \sigma_z$,对各土层的压缩模量进行修正,其中 E_{1-2} 是设计资料中选用的压缩模量, σ_z

为土体所受附加应力。通过计算，各土层的压缩模量为2.7、7.5及100Mpa。

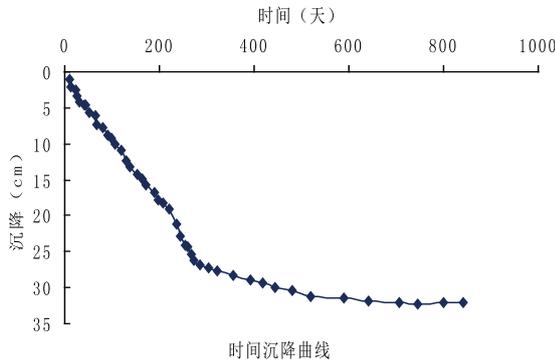


图 3.2 累计沉降位移图

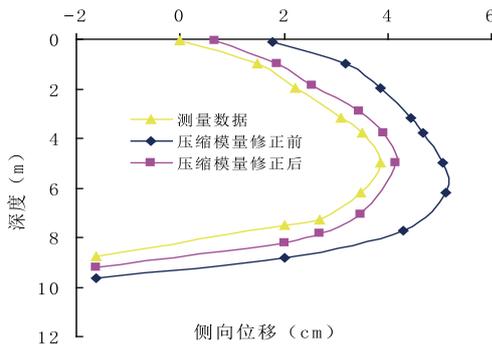


图 3.3 有限元软件计算值与实测值对比

利用有限元软件Plaxis，进行数值模拟。通过模拟两种不同的压缩模量（修正前后的压缩模量），并与观测的侧向变形进行对比分析。

通过图3.3分析知，实测所得数据与压缩模量修正后的侧向变形数据较为接近，误差在5%以内，而与压缩模量修正前的结果相比，误差较大。同时，当外荷载大于200kPa时，修正后的压缩模量大于修正前的压缩模量，使得修正后的土体抗变形能力提升，这也解释了图中修正前的侧向位移大于修正后的侧向位移。依据上述的分析知，修正之后的压缩模量与山区软土的压缩模量更为接近，从而证明了公式的可行性。

利用应力面积法，土样的计算深度为11m，根据表中的参数，计算土体的沉降量为24cm，与实测沉降35.2cm相比，理论计算所得结果偏小。主要原因是山区软土的侧向变形一般较大，如果不考虑这部分的变形，将会使得最后的计算结果偏小。故根据上述的公式 $\psi_s = (1 + 0.3H')(1.56 + 9.65i + 41.34i^2)$ ，对土体的沉降进行修正，其中软土路基的横坡坡率为0.09，而填高比为0.385，代入修正系数的公式，修正系数为1.35。

经过修正后，土体的沉降位移为32.4cm，根据观测资料知，土体的实测沉降为35.2cm，修正后的结果与实测沉降比较接近，说明修正系数的合理性，同时证明压

缩模量的正确性。

综上所述，针对山区软土，分层综合法的修正公式为

$$S = \sum_{i=1}^n s_i = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{P_0}{E_{s_i}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (3.1)$$

$$S = \left[(1 + 0.3H')(1.56 + 9.65i + 41.34i^2) \right] \times \sum_{i=1}^n \frac{P_0}{\left[\frac{E_{i-2}}{144.3} - \ln(\sigma_{z_i} / 144.3) \right] \sigma_{z_i}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1})$$

四、小结

(1) 针对应用较为广泛的应力面积法，对公式进行了修正，提出了决定修正系数的因素，其中填高比与修正系数呈线性关系，而横坡坡率与修正系数呈二次曲线关系，并提出了山区软土修正系数公式。

(2) 针对山区软土，进行压缩模量的推导，提出了公式 $E_s = \left[\frac{E_{i-2}}{144.3} - \ln(\sigma_z / 144.3) \right] \sigma_z$ ，该公式充分考虑了勘测设计中提供的 E_{i-2} 及附加应力值，使得压缩模量值与实际值更加接近。

(3) 针对山区软土，提出了沉降计算公式，并通过工程实例进行了验证。

参考文献：

- [1]赵明华.土力学与基础工程[M].武汉：武汉工业大学出版社，2000.
- [2]殷宗泽，朱泓，吴钰.沪宁高速公路地基沉降有限元计算分析[J].水利水电科技进展，1998，18（2）：22-26.
- [3]王永和，李珍玉，胡萍等.地基沉降修正系数的Bayes概率推断[J].岩土力学，2009，30（2）：323-327.
- [4]刘汉龙，彭吉力，陈永辉.真空-堆载联合预压的地基沉降简化计算方法[J].岩土力学，2006，27（5）：745-748.
- [5]杜兆成.土压缩模量计算公式的探讨[J].工程勘察，2009，16（3）：16-21.
- [6]王玉锁；王明年；童建军；魏龙海等.砂类土体隧道围岩压缩模量的试验研究[J].岩土力学，2008，29（6）：1609-1610.
- [7]张振南；茅献彪；葛修润等.松散岩块侧限压缩模量的试验研究[J].岩石力学和工程学报，2004，23（18）：3049-3054.
- [8]梅国雄，宰金珉，赵维炳.土体侧限压缩模量简易计算方法及其应用[J].岩土力学，2003，24（6）：1058-1064.
- [9]陈念军；李方柱；刘益平等.土的变形模量和压缩模量[J].工程勘察，2010（s1）：192-195.