

珠江三角洲地区高速公路软基瞬时沉降计算方法探讨

马传明, 蔡鹤生

(中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 目前高速公路软基瞬时沉降尚无成熟的计算方法, 从产生剪切变形的主要因素入手, 同时考虑土体结构损伤、砂井加筋作用, 推导出珠江三角洲地区高速公路软基瞬时沉降的计算关系式。根据填土荷载大于或小于 P_c 的两类情况而得到各自的计算公式, 并利用实测资料进行反馈分析得到经验系数。5个断面的计算表明, 所得计算公式是可信的。

关键词: 高速公路; 损伤理论; 瞬时沉降; 结构性软土。

中图分类号: P642 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)02-0212-05

作者简介: 马传明(1975—), 男, 中国地质大学博士研究生, 主要从事软基处理、水资源评价方面的学习和科研工作。

土体宏观工程性状在很大程度上受微观结构的系统状态或整体行为控制^[1~5]。软基土受到扰动和加荷后发生变形是土体内部结构发生变化的外在表现, 同时也是土体结构发生损伤的过程^[6,7]。本文利用损伤理论研究受损结构性软土的变形计算, 推导珠江三角洲地区高速公路软基瞬时沉降计算的经关系式, 以提高沉降计算的可靠性。

软土地基的总沉降量 S 包括 3 部分:

$$S = S_d + S_c + S_s \quad (1)$$

式中: S_d 为瞬时沉降, 是施加外荷载后, 由于土体的侧向剪切变形而引起的附加沉降, 不是软土体体积压缩产生的沉降; S_c 为主固结沉降, 是加荷后软土体孔隙水压力逐步消散而产生的体积压缩变形; S_s 为次固结沉降, 是主固结沉降完成以后, 土骨架上的有效应力基本保持不变的条件下, 软土体随时间的增长而发生的沉降。

1 损伤理论简介

为了与土力学中的有效应力概念相区别, 本文称损伤力学中的有效应力为等效应力。

Lemaitre 等效应变原理^[8], 即应力作用在受损材料上引起的应变与等效应力作用在无损材料上引

起的应变等价, 受损软土的应力—应变关系为:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{E}} = \frac{\sigma}{E(1-I)} \quad (2)$$

式中: σ 为应力; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; E 为无损材料的弹性模量, 即初始弹性模量; \bar{E} 为受损材料的弹性模量, 即有效弹性模量; I 为损伤比。

I 定义为:

$$I = 1 - \frac{\bar{E}}{E}, \quad (0 < I < 1) \quad (3)$$

由式(3)可知:

$$\bar{E} = E(1-I) \quad (4)$$

用沉降表示, 式(2)改为:

$$S = \frac{P}{\bar{E}} \cdot h = \frac{P}{E(1-I)} \cdot h \quad (5)$$

式中: h 为土层厚度; P 为荷载。

2 瞬时沉降计算公式的推导

对于 S_d , 目前, 还尚未见到准确的计算方法。为解决这个难题, 通常采用沉降系数 m 与主固结沉降量 S_c 来计算最终沉降量 C_∞ ^[9,10], 即:

$$C_\infty = m \cdot S_c \quad (6)$$

式中: m 为沉降修正系数, m 为一经验系数, 考虑了剪切变形引起的附加沉降及其他因素(地基条件、荷载条件、加荷速率等)的综合影响。

该方法是目前国内最常用的方法, 它分析模式

简单,但计算结果可靠性很大程度上取决于经验系数的选取。 m 由国内的经验统计,其范围值为 1.1~1.7 左右,过于笼统,因而使设计带有不确定性。为克服上述缺欠,国内外学者建立了经验关系式直接计算 S_d 值。在这里值得介绍的有^[9,10]:

(1)日本《高等级公路设计规范》采用下述公式计算瞬时沉降(短期沉降,填土施工结束前发生):

$$S_d = \frac{1}{100} A \rho H. \quad (7)$$

式中: $A=12.4 \sim 0.44 E_{qu} (\text{cm}^3/\text{g})$; ρ 为填料单位密度(g/cm^3); H 为路堤填筑高度(cm); E_{qu} 由无侧限抗压试验得到的弹性模量的平均值(分层厚度的加权平均)(MPa)。

(2)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》采用下式计算:

$$S_d = F \frac{PB}{E}. \quad (8)$$

式中: P 为路堤底面中点的最大垂直荷载; E 为无侧限抗压试验得到的弹性模量的平均值(分层厚度的加权平均); F 为中线沉降系数; B 为荷载有效宽度。

逐渐加荷条件下的瞬时沉降:

$$S'_d = S_d \frac{P_t}{\sum \Delta P}. \quad (9)$$

式中: S'_d 为计算时刻 t 的累计荷载下的瞬时沉降; P_t 为 t 时的累计荷载; $\sum \Delta P$ 为总的累计荷载。

但上述公式计算瞬时沉降时有较大的局限性。因此,本文依据京珠高速公路广珠段灵山试验工程、广东省西部沿海高速公路台山段试验工程、深—汕汽车专用公路(龙岗—潭西)第四合同段软基试验工程的观测成果,考虑珠江三角洲地区软土特性和软基处理方案,建立该地区计算高速公路瞬时沉降的经验关系式。

软基上筑路堤时,在坡角附近的一定范围内,剪应力可能会超过抗剪强度,土体呈塑性变形。之后,随着荷载的增大,塑性变形区会逐步增大。在体积不变时,软基因形状改变而侧向挤出,产生附加沉降。此沉降维持时间很短,所以常成“瞬时沉降”。实际上,它也是随路堤增高而增大,越接近极限高度,增长的数值越大。瞬时沉降是荷载施加的瞬时发生的,一般认为与时间无关,为弹性变形。在分析瞬时沉降时主要考虑下述因素^[11~14]:(1)在填土荷载作用下软基内产生的附加剪应力,其值与各深度的附加应力 ΔP_i 成正比;(2)软土层厚度 Δh_i ;(3)荷载有效宽

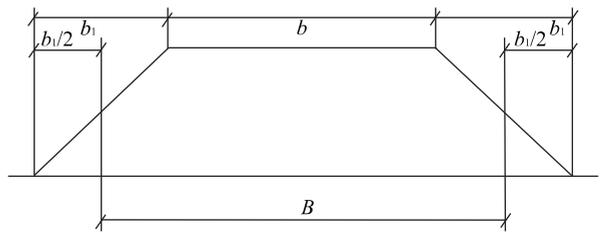


图 1 荷载有效宽度计算

Fig. 1 Calculation of the effect breadth of loading

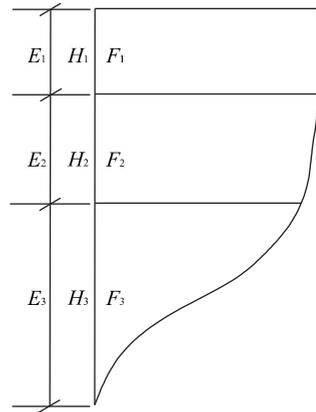


图 2 侧向位移

Fig. 2 Lateral displacement

度 B ,其值可取路堤顶宽 b 与一个边坡 b_1 之和($b+b_1$),见图 1;(4)土的初始弹性模量 E_i 。

在路堤荷载作用下,每延米土体侧向挤出体积与土的初始弹性模量成反比,与附加应力、土层厚度、荷载宽度呈正比。土体侧向挤出水平位移所包括的面积 F ,能代表每延米软基长度内土体的侧向挤出体积(图 2)。对中心线一侧的软基而言,则有:

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{k \cdot \Delta P_i \cdot \Delta h_i \cdot B/2}{E_i}. \quad (10)$$

路堤中心所产生的附加沉降,可近似的按下式考虑:

$$S_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{B/2} = 1.5 k \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \cdot \Delta h_i}{E_i}. \quad (11)$$

式中: n 为地基分层层数; ΔP_i 为土层中心高程处的附加应力(kPa); Δh_i 为土层厚度(m); E_i 为无损伤软土的弹性模量,即各土层初始弹性模量(MPa); k 为综合位移系数。

3 考虑土体结构初始损伤的瞬时沉降计算公式

事实上,软土体在路堤荷载作用下,除了土骨架

的弹性变形外,还发生损伤变形. 打设袋装砂井是珠江三角洲地区高速公路软基处理中最常用的方法之一. 作为高速公路软基的珠江三角洲地区的结构性软土发生结构损伤主要来自两方面:(1)填土加载前,袋装砂井打设过程中对软土体的挠动而造成的软土结构损伤,称为初始损伤;(2)填土加荷过程中,土体内部结构发生不可逆的变化而导致土体结构破损,称为受荷损伤. 考虑土体结构初始损伤的影响,根据(2)式可得路堤中心所产生的附加沉降计算式为:

$$S_d = 1.5 k \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{\bar{E}_i} = 1.5 k \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{E_i(1-I_i)}. \quad (12)$$

式中: \bar{E}_i 为各土层结构初始损伤土的弹性模量(MPa); I_i 为初始损伤比.

4 考虑袋装砂井的瞬时沉降计算公式

工程实践表明:袋装砂井对侧向位移起约束作用,且间距越小、袋装砂井打设的越密集,越有利于提高软基的整体抗剪强度,对水平位移的约束越强. 因此,在瞬时沉降计算公式中必须考虑袋装砂井对软基侧向位移的约束作用.

令 $k = \alpha \cdot F(D, H)$,

式中: $F(D, H)$ 为袋装砂井间距、长度对位移影响函数, $F(D, H) = D/\sqrt{H}$; α 为其他位移影响系数; D 为砂井间距; H 为砂井长度.

那么式(12)则可变为:

$$S_d = 1.5 \cdot \alpha \cdot \frac{D}{\sqrt{H}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{E_i(1-I_i)}. \quad (13)$$

当初始弹性模量、土层厚度、路堤荷载、初始损伤比、砂井间距和长度确定后,上式系数中只有系数 α 是未知数. 根据实测的侧向位移量、附加应力、土层厚度、路堤宽度及其初始弹性模量、初始损伤比,反算各处理方案的 α 值,如果各处理方案的 α 值变化幅度不大,则关系式(13)成立.

5 α 值的确定

系统整理珠江三角洲地区京珠高速公路广珠段灵山试验工程、广东省西部沿海高速公路台山段试验工程、深—汕汽车专用公路(龙岗—潭西)第四合同段软基试验工程的观测成果资料,利用实测的侧

表 1 各处理方案的 α 值

Table 1 Values of α of each treatment plan

处理方案	处理方案		累计厚度 < 2 m	累计厚度 > 2 m
	D/m	H/m		
1	1.0	10	0.186	0.350
2	2.0	20	0.190	0.425
3	2.0	15	0.172	0.377
4	1.5	15	0.181	0.369
5	1.0	15	0.174	0.349
平均值			0.181	0.374

向位移量、土层厚度及初始弹性模量、路堤荷载引起的附加应力、路堤宽度、初始损伤比,分别计算出各处理方案的 α 值. 根据地基的应力水平(即按路堤填土荷载是否超过土体的结构强度(P_c),结构强度相当于路堤填土厚度为 2 m 时的荷载,也就是说是否发生受荷损伤)分为两组,一组地基的应力水平大于土体的结构强度(即填土厚度大于 2 m 时);另一组地基的应力水平小于土体的结构强度(即填土厚度小于 2 m 时). 各处理方案的计算结果见表 1.

利用表 1 中的 α 值,按软基所受应力水平的不同瞬时沉降计算公式有下述两种情况,即:(1)路堤填土荷载小于土体结构强度时:

$$S_d = 0.272 \cdot \frac{D}{\sqrt{H}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{E_i(1-I_i)}, \quad (14)$$

(2)路堤填土荷载大于土体结构强度时:

$$S_d = 0.561 \cdot \frac{D}{\sqrt{H}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{E_i(1-I_i)}. \quad (15)$$

6 成果可靠性判断

以京珠高速公路广珠段灵山试验工程作为工程实例. 由于目前还没有准确的计算 S_d 方法,笔者试图用间接的方法来判断本文所推导公式的可靠性,即利用本文推导公式计算 S_d ,以分层总和法计算主固结沉降 S_c ,求其和 S_∞ ,再与推测的实测最终沉降量 S_∞ 相比较. 由于京珠高速公路广珠段灵山试验段路堤填土高度远超过 2 m,因此,计算 S_d 时利用式 15. 计算结果见表 2. 由表 2 可知本文所推导的计算高速公路软基瞬时沉降公式是可信的.

7 讨论

(1)高速公路软基在路堤荷载作用下,产生剪切

表2 计算值 S_{∞} 和实测值 S_{∞}^* 的比较Table 2 Comparison of calculated S_{∞} with measured S_{∞}^*

断面	I	II	III	IV	V
S_d/cm	6.54	13.26	13.50	11.16	5.93
S_c/cm	184.29	180.03	172.50	178.67	227.10
S_{∞}/cm	190.83	193.29	186.00	189.83	233.03
S_{∞}^*/cm	197.81	221.43	219.60	195.00	241.69

$$S_{\infty} = S_d + S_c$$

变形引起附加沉降 S_d 。目前,还缺乏成熟的计算方法,研究其计算方法有实用意义。(2)本文从产生瞬时沉降的主要因素入手,同时考虑土体结构损伤、砂井加筋作用,推导出珠江三角洲地区计算高速公路软基 S_d 的简单关系式。(3)公式中所用的软土特性参数可由常规试验测定,各项应力可由常规计算方法确定,计算是很方便的。(4)本文推导的方法是半经验关系式,虽然以5个断面验证是可行的,但还有待今后进一步积累使用。

参考文献:

- [1] 胡瑞林,李向全,曾国林. 土体微观结构力学——概念·观点·核心[J]. 地球学报,1999, 22(2): 150—156.
HU R L, LI X Q, ZENG G L. Concept, viewpoint, core of soil mass microstructure mechanics [J]. Geosciences Transaction, 1999, 22(2): 150—156.
- [2] 周萃英. 土体微观结构研究与土力学的发展方向——若干进展与思考[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(2): 215—220.
ZHOU C Y. Research into soil mass microstructure and some progresses on soil mechanics [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(2): 215—220.
- [3] 徐辉,杨志波,王初生. 湖北省襄荆高速公路与汉十高速公路膨胀土膨胀特性的对比研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2001, 26(4): 395—397.
XU H, YANG Z B, WANG C S. Comparative study on swell soil in Xiangjing and Hanshi highways [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(4): 395—397.
- [4] 张嘉翔,姜淑花. 浅谈当宜高速公路膨胀土性质与路基稳定问题[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2001, 26(4): 424—428.
ZHANG J X, JIANG S H. A brief discussion on properties of swell soil and stability of foundation in Dangyang-Yichang speedway [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(4): 424—428.

- [5] 余宏明,严春杰,王环玲. 岷山垭公路路堑滑坡膨胀土特性及机制探讨[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(4): 429—432.
YU H M, YAN C J, WANG H L. Swell soil characteristics and forming mechanism on chasm landslide of Xiangfan-Yichang highway [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(4): 429—432.
- [6] 马传明. 珠江三角洲地区高速公路(预压排水处理)软基变形研究[D]. 武汉:中国地质大学,2001. 28—43.
MA C M. Deformation research into freeway soft foundation treated with preloading and drainage method in Zhujiang Delta area [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2001. 28—43.
- [7] 陈少平. 软土地区小桥涵桥台路基沉降拟合处理方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2001, 26(4): 365—367.
CHEN S P. Subgrade settlement fitting between small bridge abutment and bridge culvert in softsoil areas [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(4): 365—367.
- [8] 余庆天. 损伤理论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1993. 41—42.
YU Q T. Mar theory and its application [M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1993. 41—42.
- [9] 杜坤乾,刘术湘,刘敬先,等. 武汉绕城公路东北段主要工程地质问题研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2001, 26(4): 368—372.
DU K Q, LIU S X, LIU J X, et al. Study on main problems of engineering geology for northeast area of Wuhan rounding highway [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(4): 368—372.
- [10] 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[M]. 北京:人民交通出版社,1997. 25—30, 112—116.
Ministry of Communications, the People's Republic of China. The technology criterion of designing and constructing the roadbed on the highway soft foundation [M]. Beijing: People Communication Publishing Company, 1997. 25—30, 112—116.
- [11] 张诚厚,袁文明,戴济群. 高速公路软基处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997. 63—68.
ZHANG C H, YUAN W M, DAI J Q. Freeway soft foundation treatment [M]. Beijing: China Construction Industry Publishing Company, 1997. 63—68.
- [12] 胡新丽,唐辉明,陈建平. 高速公路顺层路堑边坡优化

设计方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(4): 363-376.

HU X L, TANG H M, CHEN J P. Optimum design method for bedding slope of expressway [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(4): 363-376.

[13] 安关峰, 李红, 施建华. 软土地基上填土桥坡工后沉降三维有限元研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(6): 638-642.

AN G F, LI H, SHI J H. 3D FEM research on post-

construction subsidence of fill bridge-slope on soft clay basement [J]. Earth Science — China University of Geosciences, 2001, 26(6): 638-642.

[14] 邓谊明. 枝万线选线中的主要工程地质问题研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(4): 419-423.

DENG Y M. Study on main problems of engineering geology for Zhi-Wan railway [J]. Earth Science — China University of Geosciences, 2001, 26(4): 419-423.

Calculation Method of Instant Settlement of Freeway Soft Foundation in Zhujiang Delta Area

MA Chuan-ming, CAI He-sheng

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: At present, no perfect calculation method has been found for the freeway soft foundation instant settlement quality. This paper tries to establish a calculation formula of the freeway instant settlement quality in Zhujiang delta area by starting with the main factors leading to shear deformation, and considering soil structure damage and sand well restraining displacement of soft foundation. Two calculation formulas have been obtained according to the loading larger than P_c and the loading smaller than P_c . Also experience coefficient was attained by the analysis of the practical data. The engineering example proves that this method is credible.

Key words: freeway; mar theory; instant settlement; structural soft soil.

(上接 211 页)

foundation pits in Hankou district, which demonstrates that the intensity of resistive shearing has a not-to-be-neglectable effect on resistance. So the stability analyses of abrupt gush concerned about intensity of the soil body are relatively close to engineering reality.

Key words: building foundation pit; abrupt gush of soil and water; strength of soil body; partial safety factor of resistance.