

文章编号: 0451-0712(2013)09-0056-06

中图分类号: U455.49

文献标识码: B

孔压静力触探(CPTU)计算软土固结系数及其在港珠澳大桥工程中的应用

王建军, 刘鑫, 王晨涛, 陈多才, 刘存林

(中交公路规划设计院有限公司 北京市 100088)

摘要: 介绍孔压静力触探(CPTU)原理,详细叙述了利用CPTU试验资料计算软土固结系数的方法和步骤。结合港珠澳大桥岛隧工程的CPTU试验进行了实例计算,结果表明:孔隙水压力静力触探测试求出的固结系数比室内固结试验所求固结系数大1~2个数量级;针对两种固结系数进行了大量统计对比研究,发现两者之间存在很好的线性相关关系。

关键词: 孔压静力触探; 固结系数; 回归分析; 港珠澳大桥岛隧工程

随着我国经济稳步快速发展,公路建设的步伐也逐步向大规模、高难度、新技术等方向迈进。苏通长江大桥、杭州湾跨海大桥、西堠门大桥、青岛跨海大桥等一批跨江、跨海大桥的建成通车,充分体现了我国经济与技术实力。目前正处于建设中的世界最长的跨海大桥—港珠澳大桥,其中“岛隧工程”是工程技术最复杂、建设难度最大的部分,要在软弱地基上建设至今世界上最长的海底沉管隧道,在水深10m且软土厚度达30~50m的海中建造人工岛,面临着复杂的软土问题,尤其是软土的固结。

固结是指由于振动或者外荷载的作用,土体内产生超孔隙水压力,在水头差的作用下,土体内部发生渗流,导致土中水排出,超孔隙水压力消散,土体孔隙比降低,因发生体积变化而压密的时间过程。固结系数是体现固结过程快慢的指标,作为软土地基变形分析和软土地基加固设计的关键参数,它的准确获取具有重要的工程实践意义。

目前,固结系数的获取方法主要有两种:第一种方法是通过现场取原状土样进行室内试验加以测定。但由于土样的获取和运输过程中受到扰动、室内试验的应力状态与土样原位的实际情况的差异以及土体各向异性等因素的影响,造成固结系数的室内试验值与原始真实值存在一定程度的差异;第二种方法是利用在施工期、预压期和营运期荷载作用下的沉降过程反算求得,此方法可以客观地反映土

体固结过程,但是只能用来验证设计参数的正确与否,无法在前期设计阶段利用该法得到固结系数,因此也就无法直接为设计提供准确可靠的土体参数。

孔隙水压力静力触探(CPTU)是近30年来发展起来的新型原位测试技术,可求取土的原位固结系数,有着室内试验和其他现场试验无法比拟的优点:试验时间短、扰动小、方便经济、快速准确,更能真实地反映土体的固结特性,日益受到我国学者和广大岩土工程师的重视^[1]。

1 孔隙水压力静力触探(CPTU)概述

1.1 孔隙水压力静力触探技术

孔隙水压力静力触探(Piezocene Penetration Test),简称孔压静探(CPTU),于20世纪70年代研制成功,我国从80年代初开始引进该技术,它是与标准的电测式圆锥静力触探贯入仪(CPT)相结合,在探头上安装滤水器及量测孔隙水压力的传感元件,使得在探头贯入饱和土体的过程中,连续测试探头锥尖阻力(q_c)和侧壁摩阻力(f_s),同时量测土的孔隙水压力(u),当在预定深度停止贯入时,还可量测因贯入产生的超孔隙水压力(Δu)随时间的消散过程,直至超孔隙水压力全部消散,达到稳定的静水压力(u_0)^[2],并由此探求软土的固结系数。

1.2 国内外研究概况^[3]

自20世纪80年代初,国外的Baligh等(1981)、

收稿日期:2013-07-15

Campanella 和 Robertson(1981)、De kuiten(1982)将孔隙水压力测试部分与电测静力触探仪结合,将其命名为孔压静力触探后,GuPta、Kabir 和 The 等先后采用 CPTU 求取了地基原位固结系数;1986 年 Baligh 和 Levadoux 发表了孔压静探估算固结系数方面的综合研究报告,主要结论为:(1)探头周围初始超孔压分布对消散过程有很大影响;(2)消散水平主要由水平向固结系数控制;(3)固结主要以再压缩模式进行,尤其在消散少于 50% 时。

我国在 20 世纪 80 年代后期也开始研制和使用孔压静探技术,主要限制在少数大学和科研单位,如同济大学、中国地质大学、南京水力科学研究所以及铁道部第四勘察设计院等,对孔压静探在实际应用方面进行了有益的探索。但由于设备、造价、操作及规范制定落后等方面的原因,孔压静探在工程界未能大范围应用。进入 90 年代,随着孔压静探研究的深入和推广,我国已经能够自行研制生产出性能稳定可靠、价格经济合理的国产孔压探头,大范围推广和使用孔压静探成为可能。

实践证明,孔压静探特别适用于饱水软土地区,我国的沿海广大地区分布着大范围含水量很高的软黏土层,随着沿海地区基础建设的兴起,孔压静探迎来了一个新的发展契机,必将发挥越来越重要的作用。

2 利用 CPTU 求解固结系数

2.1 固结理论基础

太沙基(Terzaghi)在 1925 年提出,土体固结变形的特点和机理是:土颗粒压缩性很小,一般认为其不可压缩。土体的变形是孔隙流体的流失及气体体积减小、颗粒重新排列、粒间距离缩短、骨架体发生错动的结果。对于饱和的两相土,孔隙水压缩量很小,孔隙水体积的变化主要因为孔隙水的排出。由于孔隙体积变化和颗粒重新排列需要有一个时间过程,因此土体固结变形与时间有关。土体所受荷载(总应力)在作用瞬时,主要由孔隙流体承担,随后,由于孔隙流体逐渐渗出,孔隙压力逐渐消散,有效应力逐渐增加。土的变形速率取决于孔隙水排出的速率,即孔隙水压力消散的速率。在恒定外压下,当孔隙水压力消散完成,固结終了。为了便于分析和求解,达到解决问题和简化计算的目的, Terzaghi 作了如下基本假设^[4]:

(1)土是均质的各向同性、完全饱和的线弹性介

质;(2)土体变形是微小的;(3)土颗粒和孔隙水压缩忽略不计;(4)土中孔隙水渗流服从 Darcy 定律,渗透系数为常数;(5)荷载一次瞬时施加且恒定,土体承受的总应力不随时间变化。

2.2 固结系数计算方法

根据太沙基(Terzaghi)固结理论,应用 CPTU 求解固结系数的公式为:

$$C = \frac{T}{t} R^2 \quad (1)$$

式中: T 为时间因素; t 为消散时间; R 为探头圆锥半径。

时间因素 T 与超孔隙水压力之间的关系是由 CPTU 求解固结系数的关键^[5]。关于利用 CPTU 来确定土的固结系数的问题,在过去的 10~15 年中,提出了许多理论和经验的方法。Lunne 等对 CPTU 试验成果预测固结系数的方法进行了很好的概括^[6],结果见表 1^[1]。

基于对空穴类型、土类模型和消散过程的选择模型不同,所建立的计算固结系数的方法也不同,这里主要介绍 Torstensson(1977)提出的方法。Torstensson 基于孔穴扩张理论对孔压消散规律进行解释^[7,8],他用土的弹塑性模型和球形或圆柱形孔穴扩张理论计算初始超孔压,用线性单面排水条件计算超孔压的消散,建议使用消散 50% 的参数来计算固结系数,即:

$$C_h = \frac{T_{50}}{t_{50}} r_0^2 \quad (2)$$

式中: T_{50} 为理论解中的时间因素; t_{50} 为孔压消散 50% 时所对应的时间; r_0 为圆锥探头半径(圆柱形模型)或等价探头半径(球形模型)。

基于贯入时孔压的大应变有限元分析结果和孔压消散的有限差分分析, Houlsby 和 Teh 提出了一个解译方法^[9],采用 Levadoux - Baligh 相似的理论,考虑了刚度指数 I_r 的变化效应。研究表明,由于初始孔压分布取决于刚度指数 I_r ,因此提出应采用修正的时间因素 T_{50}^* 取代原时间因素 T_{50} ,其定义如下:

$$T_{50}^* = \frac{C_h t_{50}}{r_{50}^2 \sqrt{I_r}} \quad (3)$$

$$C_h = \frac{T_{50}^* r_0^2 \sqrt{I_r}}{t_{50}} \quad (4)$$

2.3 各参数的确定

(1)半径 r_0 的确定。

表 1 采用 CPTU 孔压消散资料预测固结系数方法汇总^[1]

作者与时间	空穴类型	土类模型	初始超孔压 Δu_i	备注
Soderberg ,1962	圆柱形	弹塑性	$\Delta u/\Delta u_i = R/r$	桩周一维固结,有限差分
Torstensson ,1975,1977	圆柱形,球形	弹塑性	$\Delta u_i = 2S_u \ln(r_p/r)$ $\Delta u_i = 4S_u \ln(r_p/r)$, r_p 为塑性区半径	无剪应力,有限差分
Randolph 和 Wroth ,1979	圆柱形	弹塑性	$\Delta u_i = 2S_u \ln(r_p/r)$	桩周一维固结
Baligh 和 Levadoux ,1980 Levadoux 和 Baligh ,1986	孔压触探模型	非线性	应变路径方法	总应力土模型
Battaglio 等,1981	圆柱形,球形	弹塑性	$\Delta u_i = 2S_u \ln(r_p/r)$ $\Delta u_i = 4S_u \ln(r_p/r)$	经验法,有限差分
Jones 和 Van Zyl ,1981	试验	经验法	测试	t_{50} 和 C_h 关系
Kavvasdas ,1982	孔压触探模型	非线性	应变路径方法	有效应力—应变模型
Senneset 等,1982	圆柱形	弹塑性	$\Delta u_i = 2S_u \ln(r_p/r)$	
Tumay 等,1982	孔压触探模型	线性	应变路径方法	试验资料
Gupta 和 Davidson ,1986	孔压触探模型	弹塑性	修正孔穴扩张理论,部分消散	各向同性、各向异性
Soares 等,1987	孔压触探模型	非线性	肉眼鉴别修正和衰减分析	
Whittle ,1987	孔压触探模型	非线性	应变路径方法	有效应力—应变模型
Houlsby 和 Teh ,1988 ; Teh 和 Houlsby ,1991	孔压触探模型	非线性	应用大应变有限元分析与应变路径法预测	有限差分
Elsworth ,1990 ,1993	点位错	弹塑性	利用点位错理论	不采用 u_2 测试
Aubeny ,1992	孔压触探模型	非线性	应变路径方法	耦合固结;有效应力—应变模型
Sully 和 Campanella ,1994	孔压触探模型	非线性	应用大应变有限元分析与应变路径法预测	确定超固结土消散经验法
Burns 和 Mayne ,1995 Burns ,1997	球形	弹塑性	$\Delta u_{oct} = a S_u \ln(r_p/r)$ $\Delta u_{shear} = \sigma'_{v0} [1 - (OCR/2)^{0.8}]$	超固结土消散不相容剪应力模型;有限差分

不同型号的孔压探头对应不同性质的土层。根据土层性质确定探头型号后,探头半径 r_0 值也就确定了。若已知探头锥底面积 S ,半径 r_0 可由公式(5)确定。

$$r_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \tag{5}$$

(2)消散时间 t_{50} 的确定。

要确定 t_{50} 的值,应首先将实测的孔压消散数据 u 归一化为 U 。定义为:

$$U = \frac{U_t - U_0}{U_i - U_0} \tag{6}$$

式中: U_t 、 U_i 及 U_0 分别为相应某时的、起始的及静孔隙水压力。以时间 t 为横坐标,并采用对数坐标形式,以归一化孔压 U 为纵坐标作图得到归一化孔压消散曲线,如图 1 所示,消散度为 50% 时对应的消散时间为 t_{50} 。

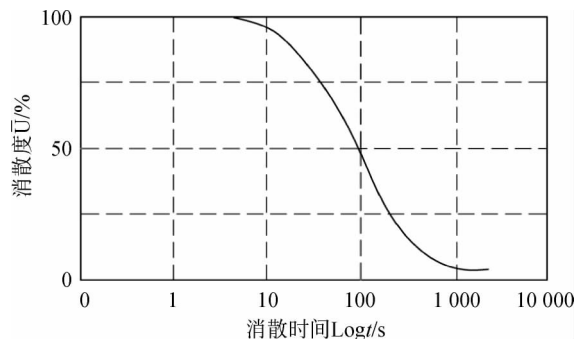


图 1 典型归一化孔压消散曲线

(3)时间因数 T_{50}^* 的确定。

国外学者 Houlsby 和 The 对软土的固结进行了大量研究工作,对软土固结的修正时间因数 T^* 给出了与固结度、过滤器位置等因素相关的取值方法^[9], T^* 取值结果可以通过查表 2 获得。

表 2 修正后的时间因数 T^* (Houlsby 和 The, 1988)

固结度/%	过滤器位置			
	锥面(u_1)	锥尖(u_2)	圆柱体上,距锥底 5 倍半径	圆柱体上,距锥底 10 倍半径
20	0.014	0.038	0.293	0.378
30	0.032	0.078	0.503	0.662
40	0.063	0.142	0.756	0.995
50	0.118	0.245	1.110	1.458
60	0.226	0.439	1.650	2.139
70	0.463	0.804	2.430	3.238
80	1.040	1.600	4.100	5.240

(4)土体刚度指数 I_r 的确定。

I_r 通常由室内试验获得,也可由经验确定,或按表 3 确定。

表 3 软黏土 I_r 的确定^[10]

I_p /%	S_r	OCR	I_r
30	3—4	1	206
22	2—3	1	290
17	5—6	1.5	365



图 3 岛隧工程效果图

3 港珠澳大桥岛隧工程的软土固结系数

3.1 工程概况

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,是连接香港、珠海及澳门的大型跨海通道,见图 2。大桥主体工程采用桥隧组合方式,大桥主体工程全长约 29.6 km,其中海底隧道长约 6 km,见图 3。

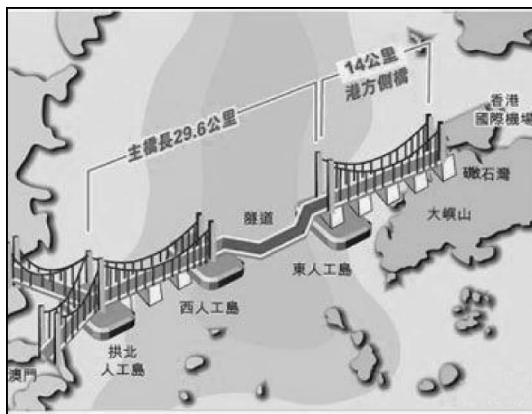


图 2 港珠澳大桥示意

工程区内地层类型为海相沉积与陆相沉积,钻孔所揭露地层主要有:

①大单元层为全新世海相沉积物(Q_4^m):淤泥、

淤泥质黏土和淤泥质黏土夹砂。软土呈灰色,流塑,饱和,显波状层理;

②大单元层晚更新世晚期陆相沉积物(Q_3^{al+pl}):黏土,软~可塑,呈断续分布,局部地段缺失,层厚较薄,其下部多分布有薄层松散~中密状的粉砂~砾砂;

③大单元层晚更新世中期海相冲积物(Q_3^{m+al}):淤泥质土、软~可塑状黏土及粉质黏土,夹有粉砂~中砂透镜体,部分地段黏土与粉细砂呈互层状;

④大单元层晚更新世早期河流相冲积物(Q_3^{al}):粉砂~砾砂,中密~密实,总体自上而下变粗,夹有透镜体状的软~可塑状粉质黏土和密实圆砾土;

⑦、⑧大单元层为基岩层(Z):新元古代震旦系混合片岩、混合花岗岩。

以上各大单元层分别含亚层,限于篇幅,不再赘述。其中①₃层(淤泥质黏土)及③₂层(软~可塑状黏土及粉质黏土)土体的地质特性对人工岛及海底沉管隧道的影响最为显著,见图 4。在人工岛及沉

管隧道段均布置了大量 CPTU 孔,并在 CPTU 孔旁 布置钻孔并取样进行室内试验。

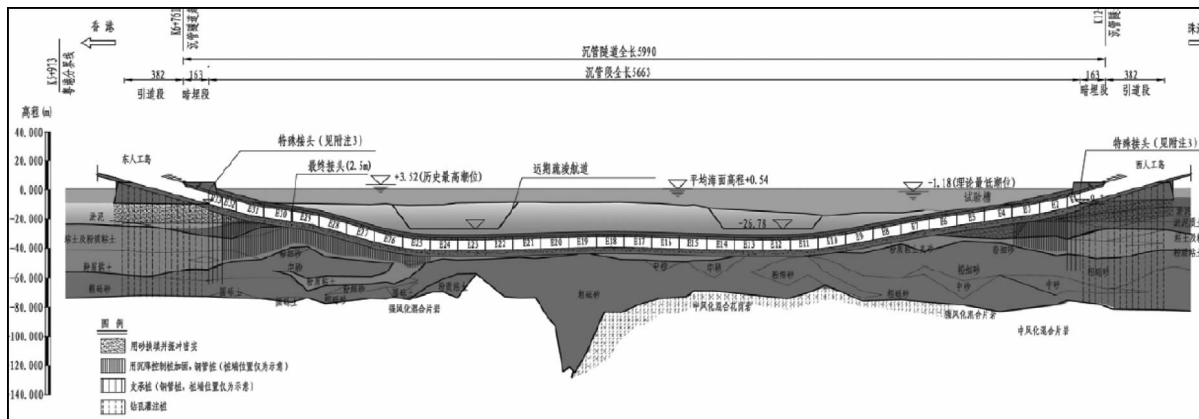


图 4 港珠澳大桥岛隧剖面示意

3.2 固结系数 C_h 的计算

固结系数 C_h 的计算将采取 Torstensson 理论消散曲线,考虑土刚度指数因素,利用公式(4)进行固结系数 C_h 的计算。

本项目 CPTU 试验所采用的探头横截面半径 $r_0 = 2.185 \text{ cm}$;对现场 CPTU 试验资料进行归一化处理,绘制归一化孔压消散曲线,见图 5 和图 6。

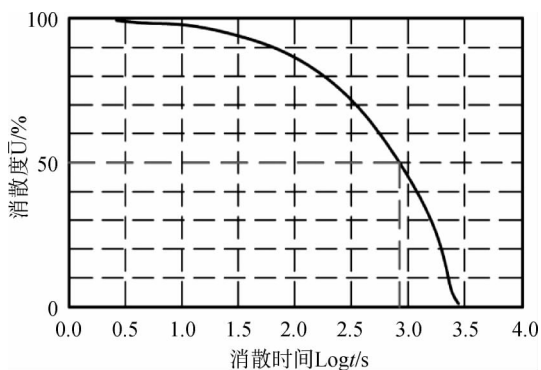


图 5 ①₃层归一化孔压消散曲线

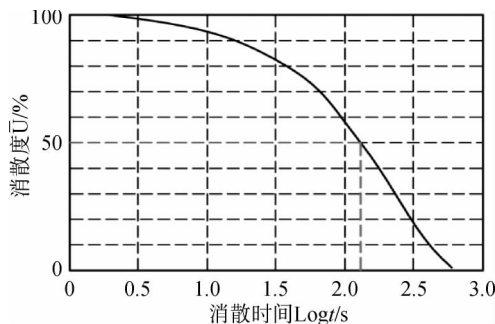


图 6 ③₂层归一化孔压消散曲线

从图中可以通过纵坐标消散度为 50%对应的横坐标 $\log t$,进一步求出 t_{50} ;根据公式(2)和(3)得到 T^* 及 L_r ;将上述各指标代入公式(4)中,可以求出①₃层 $C_h = 0.0412 \text{ cm}^2/\text{s}$,③₂层 $C_h = 0.1371 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

4.3 水平向固结系数与垂直向固结系数的关系

为了更好地确定土层的固结系数,进行了室内固结试验,计算固结系数 C_v ,并与通过 CPTU 试验得出的固结系数 C_h 比较,见表 4。

表 4 固结系数 C_h 与 C_v 成果对比

CPTU 孔号	试验深度 m	水平固结系数 $C_h \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$	垂直固结系数 $C_v \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$	C_h/C_v	土层代号
16	4.8	43.1	0.86	50.12	①₃
18	4.8	39.8	0.81	49.14	①₃
19	4.8	40.3	0.84	47.98	①₃
20	4.8	49.0	1.11	44.14	①₃
22	5.9	43.5	0.90	48.33	①₃
6	16.8	304	2.22	136.94	③₂
7	16.8	260	1.81	143.65	③₂
9	16.7	481	2.91	165.29	③₂
10	15.8	409	2.49	164.26	③₂
12	16.8	359	3.51	102.28	③₂

由表4可以看出,CPTU测得的固结系数与室内试验测得的固结系数存在明显差异,这是因为CPTU孔压消散试验整个过程是受水平渗透性质控制,测出的是土的水平固结系数 C_h ;而室内固结试验是土在有侧限条件下,受到某一荷载作用的垂直向排水与变形的情况,测出的是土的垂直固结系数 C_v 。因为应力的分布、大小,排水路径长度的不同,两种方法得到的固结系数肯定会存在一定差异^[3],本工程实例中,差异程度为1~2个数量级。这种差异程度在其他学者研究成果中也有体现^[11,12]。

目前,在很多规范中仍以室内固结试验测定的 C_v 值作为设计参数。随着CPTU试验在我国的逐步推广应用,以及理论技术上的日益成熟深入,探求水平向固结系数与垂直向固结系数之间的关系则尤为必要^[3]。

依托港珠澳大桥岛隧项目,笔者获得了大量的CPTU消散试验和室内土工试验数据,用以进行 C_h 与 C_v 的对比,通过对 C_h 与 C_v 进行一元线性回归分析,建立了 C_h 与 C_v 的回归方程,见图7和图8。

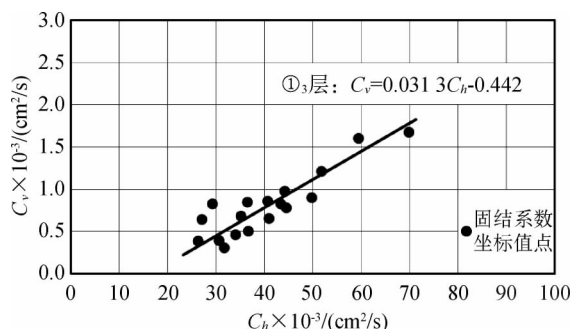


图7 ③1层 C_h 与 C_v 线性相关散点图及回归曲线

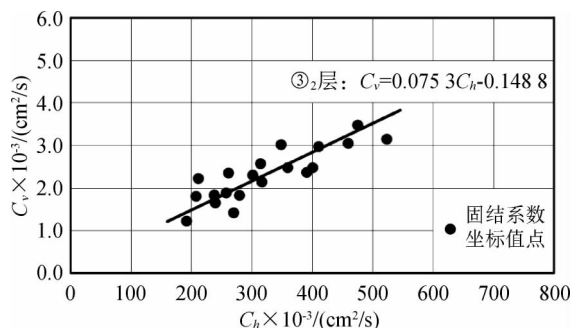


图8 ③2层 C_h 与 C_v 线性相关散点图及回归曲线

统计分析的相关系数 r 为0.962(r 取值 $[-1,1]$,越接近边界,表示拟合程度越高),表明上述回归方程拟合程度很好。

通过数据统计获得 $C_h \sim C_v$ 回归方程除具有一

定的理论意义,还具有较好的工程实际意义:通过CPTU孔压静探消散试验获得水平固结系数 C_h ,然后通过 $C_h \sim C_v$ 回归方程获得垂直固结系数 C_v ,从而对比修正室内试验得出的固结系数 C_v ,进一步提高设计参数的准确性和可靠性。

由于本次试验样品数量有限且具有一定地域局限性,今后在其他地区进一步积累资料,对上述公式进行验证,并使之得到优化。

5 结语

(1)孔压静力触探(CPTU)方法是一种计算固结系数 C_h 快速、经济、可靠的试验方法。

(2)基于太沙基(Terzaghi)理论、应用Torstensson孔穴扩张模型、考虑土的刚度指数 I_r 的变化效应,确定计算固结系数 C_h 的公式 $C_h = T_{50}^* r_0^2 \sqrt{I_r} / t_{50}$ 。

(3)计算得出固结系数③1层 $C_h = 0.0412 \text{ cm}^2/\text{s}$, ③2层 $C_h = 0.1371 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

(4)CPTU试验得到的固结系数 C_h 与室内试验得出的固结系数 C_v 具有较好的相关性,可以用回归公式来表示; C_h 可以用来修正 C_v 以提高设计参数的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] 蔡国军,童立元,刘松玉,等.孔压静力触探(CPTU)探求高速公路软基固结系数研究[J].公路交通科技,2007,(3).
- [2] 孔隙水压力静力触探新技术[M].中国建筑学会工程勘察委员会原位测试技术开发中心编印,1992.
- [3] 安岚.孔压静力触探测试土的固结系数机理研究[D].中国地质大学(武汉)硕士学位论文,2005.
- [4] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994.
- [5] Mohammed G. Karib and Alan J. Lutenegeger. In situst imation of the coefficient of consolidation in clays. Can. Geo tech. J. 27, 1990.
- [6] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice [M]. London; Blackie Academic and Professional and Chapman and Hall, 1997.
- [7] TORSTENSSON B A. Pore Pressure Sounding Instrument [C]//Proceedings of the ASCE Specialty Conference on InOsitu Measurement of Soil Properties ISMOSP1 Raleigh; 1975:48-54.
- [8] TORSTENSSON B A. The Pore Pressure Probe [M]. Norway;Pro. Geoteknikkdagen, 1977; 1-15.

影响公路沥青混凝土路面平整度 原因分析与对策

李志军

(邢台市公路管理处 邢台市 054000)

摘要: 公路路面平整度是一项系统工程。它是路面施工全过程各环节质量控制的最终体现。随着我国高等级公路建设的迅速发展,对于路面平整度要求越来越高,路面平整度的合格率既反映了行车舒适程度,又反映了施工队伍的水平。近年来,一些新建通车时间只有两三年的公路沥青混凝土路面,不同程度的出现了路面裂缝、波浪、车辙、跳车等路面不平整现象,笔者就出现的这些普遍现象,结合多年工作实践经验,对影响公路沥青混凝土路面平整度的原因进行了分析总结,并提出解决对策。

关键词: 公路; 沥青混凝土路面; 平整度

1 沥青混凝土路面出现不平整的因素分析

公路沥青混凝土路面的施工,影响因素很多,单是路面平整度,就与工程设计、施工人员素质、路基施工质量、桥头涵洞两端及桥梁伸缩缝的处理、路面底基层及基层的施工、路面施工机械的选用及路面材料的质量有关,而这些恰恰就是影响路面平整度的主要原因。

1.1 路基因素

路基是公路路面的基础,路基出现不均匀沉陷,将会不同程度地造成公路路面整体下沉或者路面小面积沉陷,从而造成路面的不平整。

1.2 基层不平整对路面平整度的影响

次高级路面基层一般刚度较大,如果施工要求不严,基层表面不平整,无论怎样使面层摊铺平整,但压实后也因虚铺厚度不同,路面也会产生不平整现象。

1.3 桥梁涵洞两端跳车也是影响路面整体平整度的主要因素之一

桥梁、涵洞两端的路基病害,是一个比较普遍的

现象,也是最常见的公路病害之一。目前,在国内一些重点高速公路,还有其他乡村公路,包括新建和已建的都不同程度的出现一些问题,主要表现在桥梁、涵洞的台背填土部分,由于压实机械的作业面狭小造成压实不到位,通车后,引起路基的压缩沉降。台背填料与台身的刚度差别较大,造成沉降不均匀。在桥梁、涵洞与路基结合处,常会产生细小缩裂缝,雨水渗入后,使路基产生病害,导致该处路基发生沉陷。桥梁伸缩缝在选型和施工时考虑不周和处理不当,从而产生跳车现象。

1.4 机械性能和施工工艺对平整度的影响

摊铺机是沥青混凝土路面面层施工的主要机具设备之一,其本身的性能及操作对摊铺平整度影响很大。摊铺机结构参数不稳定、行走装置打滑、摊铺机摊铺的速度快慢不匀、机械猛烈起步和紧急制动以及供料系统速度忽快忽慢都会造成面层的不平整和波浪。摊铺机械性能好,决定着路面面层平整度的质量。

收稿日期: 2013-03-04

[9] HOULSBY G T, TEH C I Analysis of the Piezocone in Clay [C] // Proceedings of International Symposium on Penetration Testing, Rotterdam, 1988: 777-783.

[10] 孟高头. 土体原位测试机理、方法及其工程应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.

[11] 孟高头, 王四海, 张德波, 等. 用孔压静力触探求固结系数的研究[J]. 地球科学, 2001, 26 (1): 93-98.

[12] 黄康理, 张诚厚. 利用孔压静力触探(CPTU)测定宁波软黏土的固结系数[J]. 水利水运科学研究, 1997, (4): 358-365.