

文章编号: 1674—8247(2018)01—0024—06

高速铁路饱和中—低压缩性土地基沉降趋势分析

田 辉¹ 陈伟志¹ 蒋关鲁² 李安洪¹ 曾永红¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘 要:文章以高速铁路路基分段堆载为研究依据,由太沙基一般固结理论和渗透系数与孔隙比的经验关系,推导了分级连续加载下地基沉降的固结控制方程,根据方程的解析解,建立了分级连续加载下饱和中—低压缩性土地基沉降的计算公式。结合海南东环客运专线、云桂高速铁路建设,基于建立的分级连续加载地基沉降计算公式,计算了高速铁路路基分段堆载下,花岗岩全风化土地基、黏土地基的沉降发展趋势,并通过理论计算与实测结果的对比,验证了计算方法的合理性。

关键词:高速铁路; 中—低压缩性土; 花岗岩全风化土; 黏土; 分级连续加载; 沉降趋势

中图分类号:U213.157 **文献标志码:**A

Analysis of Settlement Trend of Saturated Medium-low Compression Soil Foundation on High-speed Railway

TIAN Hui¹ CHEN Weizhi¹ JIANG Guanlu² LI Anhong¹ ZENG Yonghong¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking the stage loading of subgrade for high-speed railway as the object of study, based on Terzaghi consolidation theory, the relationship between permeability coefficient and void ratio, the equations for consolidation of foundation settlement under stage continuous loading is derived. According to analytical solutions of the above equations, a formula for settlement calculation of saturated medium-low compression soil foundation under stage continuous loading is established. Combined with the construction of east ring dedicated passenger railway in Hainan and Yun-Gui high-speed railway, settlement trend of completely decomposed granite foundation and clay soil foundation are calculated with that formula. The theoretical values of settlement are compared with test results, then the rationality of the calculation formula is verified.

Key words: high-speed railway; medium-low compression soil; completely decomposed granite; clay soil; stage continuous loading; settlement trend

高速铁路路基分段堆载一般可简化为分级连续加载^[1],获取分段堆载下地基的荷载—沉降—时间关系,即确定地基沉降发展趋势,可更好地指导高速铁路路基施工,也是中国高速铁路“走出去”亟需解决的难

题之一。在“一带一路”沿线高速铁路勘察设计过程中,海外业主、咨询等单位十分重视高速铁路路基荷载作用下地基沉降发展趋势,在设计过程中往往严格要求勘察设计单位提供沉降发展趋势计算报告。

收稿日期:2017-08-30

作者简介:田辉(1966-),男,工程师。

基金项目:铁道部科技研究开发计划项目(2010G003-F)

引文格式:田辉,陈伟志,蒋关鲁,等. 高速铁路饱和中—低压缩性土地基沉降趋势分析[J]. 高速铁路技术,2018,9(1):24—29.

TIAN Hui, CHEN Weizhi, JIANG Guanlu, et al. Analysis of Settlement Trend of Saturated Medium-low Compression Soil Foundation on High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1): 24—29.

目前,国内外学者已针对连续加载或分级连续加载下土体固结特性开展了有益的研究。如 Davison^[2]和 Hanna^[3]等人研究了连续加载下土体的固结理论、试验方法及成果整理。Landva 等人^[4]基于自制开环设备分析了分级连续加载条件下城市固体垃圾的压缩特性与静止侧压力系数,指导了城市固体垃圾的工程设计。本文在太沙基一般固结理论和考虑渗透系数与孔隙比经验关系的基础上,建立了分级连续加载饱和土地基沉降计算公式。并结合海南东环客运专线(以下简称“海东线”)、云桂高速铁路建设与地基沉降的修正切线模量法^[5],从理论上分析了路基分段堆载下花岗岩全风化土地基、黏土地基的实时沉降,并将计算结果与现场实测值进行了比较分析。

1 理论研究

1.1 基本假定

(1) 饱和中-低压缩性土地基厚度对时间的变化率忽略不计,上表面单面排水;

(2) 渗透系数 k 不随深度的变化而变化;

(3) 不考虑温度变化^[6],其余假定与太沙基固结理论相同^[7]。

1.2 固结控制方程

由太沙基一般固结理论可知,水的一般连续性方程可写为:

$$\frac{(1+e_0)k}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{k} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial k}{\partial z} \right) = \frac{\partial e}{\partial t} - \alpha_v \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial t} - \gamma' \alpha_v \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: e_0 ——初始孔隙比;

k ——渗透系数;

γ_w ——水的重度;

u ——孔隙水压力;

z ——土体深度;

e ——孔隙比;

t ——时间;

α_v ——压缩系数, $\alpha_v = -\frac{\partial e}{\partial \sigma'}$;

$\Delta \sigma$ ——荷载增量;

γ' ——土的浮重度;

H ——土层厚度。

由基本假定(1)和(2),可将式(1)写为:

$$\frac{(1+e_0)k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} - \alpha_v \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial t} \quad (2)$$

根据有效应力原理,可得:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3)$$

将式(3)对孔隙比求导,得:

$$\frac{\partial u}{\partial e} = -\frac{\partial \sigma'}{\partial e} = \frac{1}{\alpha_v} \quad (4)$$

孔隙比 e 对时间 t 求导,得:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} = \alpha_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

研究表明^[8],渗透系数 k 随孔隙比 e 的变化而变化,可表示为:

$$k = k_0 10^{m(e-e_0)} \quad (6)$$

式中: m ——与土性有关的无量纲参数,常见取值为10~13^[8];

k_0 ——孔隙比为 e_0 时的渗透系数。

因此,式(2)可改写为:

$$\frac{(1+e_0)k}{\alpha_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial t} \quad (7)$$

即:

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial t} \quad (8)$$

其中, $C_v = \frac{(1+e_0)k}{\gamma_w \alpha_v} = \frac{(1+e_0)k_0 10^{m(e-e_0)}}{\gamma_w \alpha_v}$ 为土的固结系数。

1.3 方程解析

高速铁路路基填筑一般可简化为分级连续加载,在加载期荷载增加速率为定值,即 $\frac{\partial \Delta \sigma}{\partial t} = \text{const}$ (常量),加载结束后进行稳载。分级连续加载-沉降-时间曲线如图1所示。

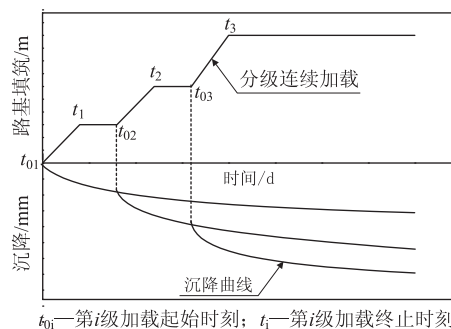


图1 分级连续加载-沉降-时间曲线

分级计算每次加载在土层 H 中产生的超孔隙水压力时,将每级加载起始时刻设为各自孔隙水压力计算的时间零点,通过求解式(8),可得到每次加载后的孔隙水压函数,再进行沉降分析。然后,运用叠加原理,将每级加载在 t 时刻产生的沉降进行累加,可得 t 时刻地基所对应的实时总沉降。

由图1可知,当 $t_{0i} < t < t_i$ 时,荷载增长率:

$$\frac{\partial \Delta \sigma}{\partial t} = \frac{\Delta p_i}{(t_i - t_{0i})} \quad (9)$$

式中: Δp_i ——第 i 级加载的总外荷重。

土体的初始孔压为土体加载后的不排水孔压,地基表面单面排水,其边界条件和初始条件可表示为:

$$\begin{aligned} z = 0, u_{0i} &= 0 \quad [(t - t_{0i}) > 0] \\ u_{0i} &= 0, t = t_{0i} \quad 0 \leq z \leq H \\ \frac{\partial u_{0i}}{\partial z} &= 0 \quad z = H \end{aligned} \quad (10)$$

由式(8)可解得加载期任一时刻不同深度的超孔隙水压力为:

$$u_{0i}(z, T_v) = \frac{\Delta p_i}{T_{vi}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^3} \sin \frac{Mz}{H} [1 - \exp(-M^2 T_v)] \quad (11)$$

其中:

$$M = \frac{1}{2}(2m_1 + 1)\pi \quad m_1 = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

$$T_{vi} = \frac{C_v}{H^2}(t_i - t_{0i}) \quad (13)$$

$$T_v = \frac{C_v}{H^2}(t - t_{0i}) \quad (14)$$

加载期的平均超孔隙水压力为:

$$\overline{u_{0i}}(T_v) = \frac{1}{H} \int_0^H u_{0i}(z, T_v) dz \quad (15)$$

将式(11)代入(15)积分得:

$$\overline{u_{0i}}(T_v) = \frac{2\Delta p_i}{T_{vi}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[1 - \exp(-M^2 T_v)]}{M^4} \quad (16)$$

因此,加载期任一时刻 t 的沉降为:

$$S_{ilt} = U_{ilt} S_{i\infty} = \frac{(t - t_{0i}) [\overline{u_i} - \overline{u_{0i}}(T_v)]}{(t_i - t_{0i}) \overline{u_i}} S_{i\infty} \quad (17)$$

式中: U_{ilt} ——加载期 $(t - t_{0i})$ 时刻的固结度;

$$\overline{u_i} = \int_0^{2H} \frac{\sigma}{2H} dz = \frac{(t - t_{0i}) \Delta p_i}{(t_i - t_{0i})};$$

$S_{i\infty}$ ——地基在荷载 Δp_i 作用下的最终沉降量。

当 $t > t_i$ 时, $\Delta \sigma = 0$, 由式(8)可得稳载期任一时刻的孔隙水压力:

$$u'_i(z, T_v) = \frac{\Delta p_i}{T_{vi}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^3} \sin \frac{Mz}{H} [1 - \exp(-M^2 T_v)] \exp[-M^2(T_v - T_{vi})] \quad (18)$$

类似于加载期,稳载期的平均超孔隙水压力为:

$$\overline{u'_i}(T_v) = \frac{2\Delta p_i}{T_{vi}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{M^4} [1 - \exp(-M^2 T_v)] \exp[-M^2(T_v - T_{vi})] \quad (19)$$

则稳载期沉降可表示为:

$$S_{ist} = U_{ist} S_{i\infty} = \left[1 - \frac{\overline{u'_i}(T_v)}{\Delta p_i} \right] S_{i\infty} \quad (20)$$

式中: U_{ist} ——稳载期 $(t - t_i)$ 时刻的固结度。

结合式(15)和(20)可知,第 i 次线性加载沉降计算公式可以表示为:

$$S_{ii} = \begin{cases} S_{i\infty} \left[\frac{t - t_{0i}}{t_i - t_{0i}} - \frac{1}{\beta(t_i - t_{0i})} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^4} (1 - e^{-M^2 \beta(t - t_{0i})}) \right] & (t_i \leq t \leq t_{0i}) \\ S_{i\infty} \left[1 - \frac{1}{\beta(t_i - t_{0i})} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^4} (e^{M^2 \beta(t_i - t_{0i})} - 1) e^{-M^2 \beta(t - t_{0i})} \right] & (t > t_i) \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{其中, } \beta = \frac{C_v}{H^2} = \frac{(1 + e_0) k_{w0} 10^{m(e - e_0)}}{\gamma_w \lambda H^2}。$$

利用叠加原理可得 t 时刻土体的沉降量为:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n S_i(t) \quad (22)$$

式中: n ——加载级次。

式(17)中, $S_{i\infty}$ 一般可由分层总和法或经验公式法求得,文献[5]考虑铁路路基高宽比 b/h 影响地基反力分布和 Boussinesq 理论,提出了一种利用压板载荷试验成果求解地基非线性沉降的修正切线模量法,即 $S_{i\infty}$ 可表示为:

$$S_{i\infty} = \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \sigma_i \Delta h_i}{\zeta D (1 - \mu^2) \omega K_i} \quad (23)$$

式中: ΔS_i ——第 i 层土在荷载 Δp_i 作用下产生的压缩沉降量;

$\Delta \sigma_i$ ——第 i 层土在荷载 Δp_i 作用下产生的附加应力增量;

Δh_i ——第 i 层土的分层厚度;

ζ ——土体切线模量应力影响系数;

D ——压板载荷试验压板的直径或边长;

μ ——土的泊松比;

ω ——刚性承压板的形状系数,圆形承压板取 0.79;方形承压板取 0.88;

K_i ——初始切线基床系数,由双曲线方程拟合原状土压板载荷试验 $p-s$ 曲线确定。

在式(23)中, ζ 反映了地基中应力水平对土体切线模量的影响,可表示为:

$$\zeta = \left(1 - \frac{\Delta \sigma_i}{p_{ui}} \right)^2 \quad (24)$$

式中: p_{ui} ——第 i 层土的极限承载力。

本文采用上述方法计算每级荷载下地基的最终沉降量。

2 工程应用

2.1 花岗岩全风化土地基

2.1.1 工程地质概况

为了验证算法的可靠性及实用性,选取海东线 2 个路基沉降监测断面(如表 1 所示)进行计算分析^[9]。试验段位于海南省文昌市境内,段内花岗岩全风化层具有“似土非岩”的性质,下伏强风化、弱风化花岗岩,地下水位高,大部分土层为饱和土,故固结排水面为地

基面,即单面排水。花岗岩全风化土的基本物理性质如表 2 所示。属于中等压缩性土^[10]。

表 1 沉降监测断面概况

测试断面	路基顶面宽/m	边坡坡度	填高 h/m	地基处理
DK 67+620	13.4	1:1.5	5.00	未处理
DK 67+630	13.4	1:1.5	5.00	

由文献[9]可知,海东线花岗岩全风化土地基的初始切线模量 $E_0 = 12.81 \text{ MPa}$,地基极限承载力沿深度的分布如图 2 所示。

表 2 花岗岩全风化土的基本物理性质

天然密度 /(g/cm^3)	含水率 /%	初始孔隙比	液限 /%	塑限 /%	塑限指数	饱和渗透系数 /(m/d)	压缩系数 / MPa^{-1}
1.88 ~ 2.11	16.68 ~ 33.97	0.633 ~ 0.822	25.98 ~ 49.28	17.65 ~ 31.43	6.06 ~ 17.85	0.091 ~ 0.122	0.141 ~ 0.284

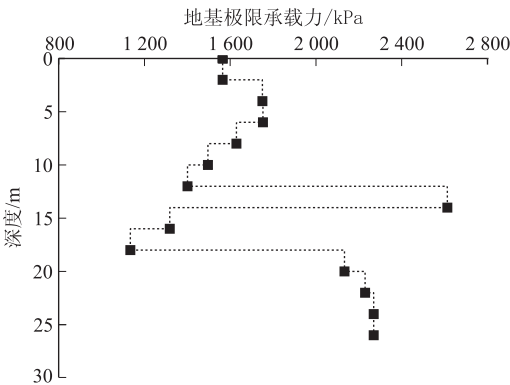


图 2 地基极限承载力沿深度分布

2.1.2 计算结果分析

海东线现场路基填筑可简化为如图 3 所示的分级连续加载路径,结合式(23)与上述试验参数,计算各级荷载下地基的最终沉降量。在计算过程中,填土重度取 $20 \text{ kN}/\text{m}^3$,不考虑列车荷载,仅考虑轨道荷载(按 45° 扩散)。地基按均质体考虑,地基压缩层厚度结合地质条件按 0.1 法确定,分层厚度取 1.0 m 。采用式(21)、式(22)计算分级连续加载下地基实时沉降, m 取 $11.8^{[8]}$ 。

将计算结果与现场实测值进行对比,如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可知,理论计算得到的沉降曲线发展趋势与实测沉降曲线吻合较好,适于反映路基分段堆载下花岗岩全风化土地基的沉降行为,理论计算值略大于现场沉降实测值,修正系数约为 0.812。

2.2 黏土地基

2.2.1 工程地质概况

为进一步验证算法的可靠性及实用性,选取云桂高速铁路 2 个路基沉降监测断面(如表 3 所示)进行

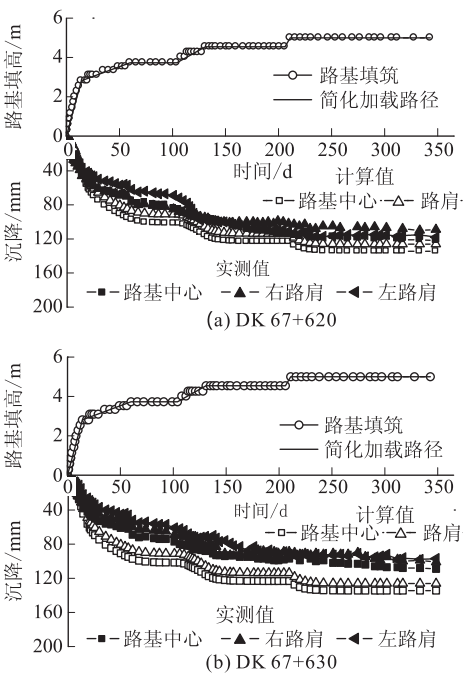


图 3 分级连续加载下花岗岩全风化土地基沉降

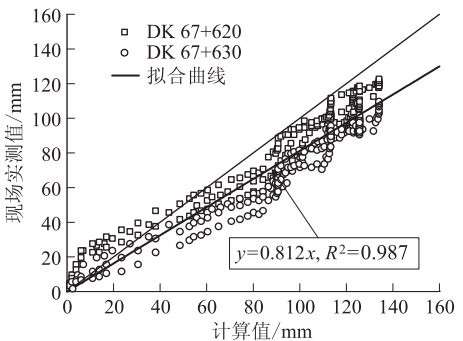


图 4 计算值与现场实测值

表 3 沉降监测断面概况

测试断面	路基顶面宽/m	边坡坡度	填高 h/m	地基处理
DK 619+430	13.4	1:1.5	4.37	未处理
DK 619+450	13.4	1:1.5	4.67	

计算分析。试验段位于云南省弥勒断陷盆地内,根据地质勘查报告可知,弥勒黏土层是由第三系泥岩、泥灰

岩和黏土岩经风化淋滤后,被水流搬运而形成的冲积-湖积黏土,基本物理性质如表 4 所示。下伏基岩为三叠系个旧组白云岩,盆地的地下水位在 0.7 ~ 1.7 m,大部分土体为饱和土。可见,该段黏土地基固结排水面为地基面,即单面排水。黏土压缩系数 α_{1-2} 为 0.095 ~ 0.399 MPa⁻¹,压缩系数值均在 0.1 ~ 0.5 之间,具有中-低压缩性^[11]。

表 4 弥勒黏土的基本物理性质

天然密度/(g/cm ³)	含水率/%	初始孔隙比	液限/%	塑限/%	塑限指数	饱和渗透系数/(m/d)	压缩系数/MPa ⁻¹
1.81~2.09	28.6~39.9	0.655~1.056	46.66~80.62	29.13~44.83	17.53~35.79	0.012~0.032	0.095~0.399

由文献[11]可知,弥勒黏土地基的初始切线模量 $E_0 = 13.22$ MPa,地基极限承载力沿深度的分布如图 5 所示。

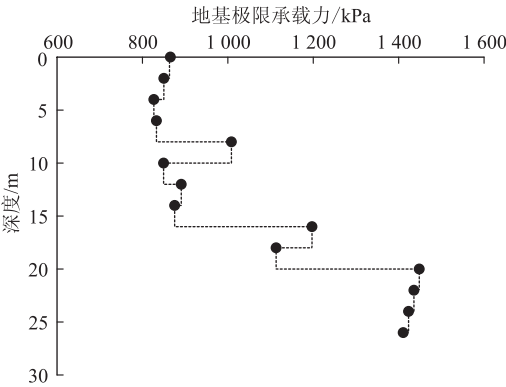


图 5 地基极限承载力沿深度分布

2.2.2 计算结果分析

云桂高速铁路现场路基填筑可简化为如图 6 所示的分级连续加载路径,地基沉降发展趋势计算方法及流程同海东线, m 取 12.3^[8]。

将计算结果与现场实测值进行对比,如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可知,理论计算得到的沉降曲线发展趋势与实测沉降曲线吻合较好,适于反映路基分段堆载下黏土地基的沉降发展趋势,理论计算值略大于现场沉降实测值,修正系数约为 0.685。

3 结论

(1)由太沙基一般固结理论和渗透系数与孔隙比的经验关系,推导了分级连续加载下饱和地基沉降的固结控制方程,根据方程的解析解,建立起分级连续加载地基沉降计算公式。

(2)结合海南东环客运专线、云桂高速铁路建设,对路基分段堆载下的饱和花岗岩全风化土地基、黏土

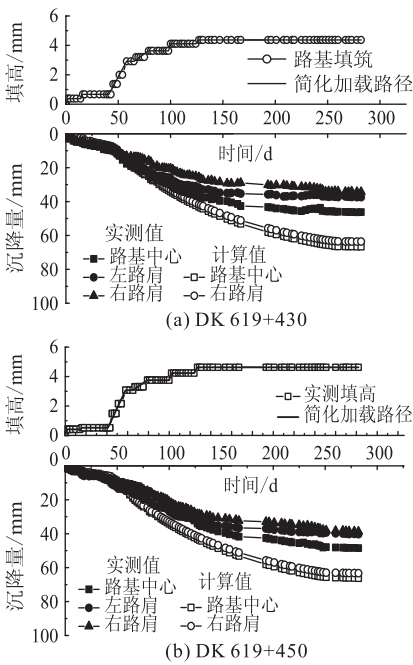


图 6 分级连续加载下黏土地基沉降

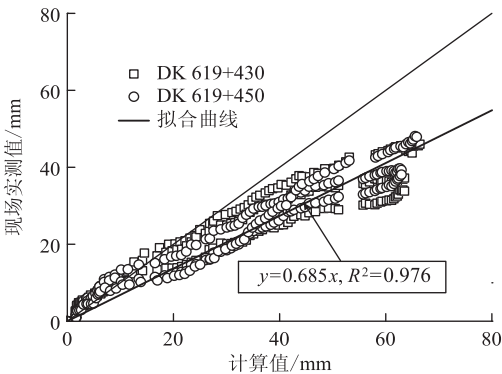


图 7 计算值与现场实测值

地基,采用分级连续加载地基沉降计算公式进行沉降发展趋势分析,并通过现场实测值验证了理论计算结果的合理性。

(3)本文方法适用于土质路基荷载下饱和中 - 低压缩性土地基的沉降趋势分析,可用于确定合理的路基填筑速率,避免盲目开展路基施工。还可用于判断地基沉降稳定趋势及工后沉降量,指导高速铁路铺轨时间的合理确定。

(4)在海外高速铁路路基工程设计中,业主、咨询单位十分重视地基沉降趋势分析,在初步设计即要求勘察设计单位给出相关沉降趋势分析方法。本文计算理论已在伊朗德伊高速铁路初步设计中推广应用,并获得意大利 ITALFERR 咨询公司高度认可,积累了海外工程设计经验。

参考文献:

[1] 蒋关鲁,胡润忠,李安洪. 离心模型试验预测中等压缩性土地基沉降的可行性[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 17 - 23.
JIANG Guanlu, HU Runzhong, LI Anhong. Feasibility of Predicting Settlement of Medium Compression Soil Foundation with Centrifuge Model Tests [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6): 17 - 23.

[2] Davison L R, Atkinson J H. Continuous loading oedometer testing of soils [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1990, 23: 347 - 355.

[3] Hanna D, Sivakugan N, Lovisia J. Simple Approach to Consolidation due to Constant Rate Loading in Clays [J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(2): 193 - 196.

[4] Landva A O, Valsangkar A J, Pelkey S G. Lateral Earth Pressure at Rest and Compressibility of Municipal Solid Waste [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37: 1157 - 1165.

[5] 陈伟志, 蒋关鲁. 土质路基荷载下地基沉降的修正计算方法

[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 56 - 62.

CHEN Wweizhi, JIANG Guanlu. Correctional Settlement Calculation Method of Foundation under the Soil Subgrade Load [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(4): 56 - 62.

[6] Chang C S, Duncan J M. Consolidation Analysis for Partly Saturated Clay by Using an elastic Plastic Effective Stress - stating Model [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1983, 7:39 - 55.

[7] Terzaghi K, Peck R B. Soil Mechanics in Engineering Practice [M]. New York: Wiley, 1967.

[8] Lambe T W, Whitman R V. Soil Mechanics [M]. SI Version. New York: John Wiley and Sons, 1979.

[9] 中铁二院工程集团有限责任公司. 客运专线中等压缩性土地基沉降特性及处理技术研究总报告 [R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2010.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. General Report of Subgrade Settlement Characteristics and Processing Technology of Medium Compression Soil of Passenger Dedicated Line [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2010.

[10] TB 10018 - 2003 铁路工程地质原位测试规程 [S].
TB 10018 - 2003 Code for In-situ Measurement of Railway Engineering Geology [S].

[11] 陈伟志, 蒋关鲁, 王智猛, 等. 分级连续加载条件下原状膨胀土固结变形研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 710 - 716.

CHEN Weizhi, JIANG Guanlu, WANG Zhimeng, et al. Study of Consolidation Deformation of Undisturbed Expansive Soil under Stage Continuous Loading Conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 710 - 716.

(编辑: 苏玲梅 白雪)

(上接第 9 页)

参考文献:

[1] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
GONG Jinxin, WEI Weiwei. Principles of Reliability Design for Engineering Structures [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

[2] 顾宝和, 毛尚之, 李镜培. 岩土工程设计安全度 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
GU Baohe, MAO Shangzhi, LI Jingpei. Safety Degree of Geotechnical Engineering Design [M]. Beijing: China Planning Press, 2009.

[3] 罗一农, 刘昌清, 魏永幸. 支挡结构的可靠指标与分项系数关系

研究 [J]. 铁道工程学报, 2014, 31(7): 38 - 42.

LUO Yinong, LIU Changqing, WEI Yongxing. Research on Relationship between Reliability Index of Retaining Structure and Partial Coefficient [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(7): 38 - 42.

[4] GB 50153 - 2008 工程结构可靠性设计统一标准 [S].
GB 50153 - 2008 Unified Standard for Reliability Design of Engineering Structures [S].

[5] Q/CR 9007 - 2014 铁路工程结构可靠性设计统一标准 [S].
Q/CR 9007 - 2014 Unified Standard for Reliability Design of Railway Engineering [S].

(编辑: 苏玲梅 白雪)