

DOI: 10.11779/CJGE2015S2017

黄土隧道地基湿陷压缩应力的计算方法

范 文^{1, 2}, 邵生俊^{1, 2}, 杨春鸣^{1, 2}, 邵 帅^{1, 2}

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 黄土隧道地基湿陷变形产生的不均匀沉降是导致衬砌结构破坏的重要影响因素。首先, 在应用松散介质围岩压力的 Terzaghi 公式和松散岩柱公式确定隧道围岩压力的基础上, 考虑衬砌结构自重荷载, 得到了衬砌结构基底压力的两种计算方法。然后, 应用半无限弹性空间解答, 考虑衬砌结构基底压力和隧道两侧上覆地层土自重压力, 得到了隧道地基土竖向压缩应力的解析解, 从而提出了一种黄土隧道地基湿陷压缩应力的解析计算方法。利用隧道基底压力的两种解答, 比较分析了不同埋深隧道的基底压力和自重应力的差异; 利用隧道地基土竖向压缩应力计算方法, 比较分析了隧道地基土竖向压缩应力和场地自重应力的差异, 得到了地基土竖向压缩应力和场地自重应力比值沿深度的分布变化规律。并与数值计算结果比较, 表明解析计算方法确定的湿陷压缩应力安全可靠, 为合理评价黄土隧道地基的湿陷性提供了压缩应力条件。

关键词: 黄土隧道; 地基; 湿陷性; 压缩应力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S2-0080-06

作者简介: 范 文(1988-), 男, 陕西岐山人, 硕士研究生, 从事土力学与岩土工程方面的研究工作。E-mail: 642240612@qq.com。

Method for calculating collapsible compressive stress of loess tunnel foundation

FAN Wen^{1, 2}, SHAO Sheng-jun^{1, 2}, YANG Chun-ming^{1, 2}, SHAO Shuai^{1, 2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering of Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess

Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: The differential settlement produced by collapsible deformation of loess tunnel foundation is an important factor to cause failure of lining structures. Firstly, two methods for calculating base pressure of the lining structures are derived based on the Terzaghi formula from loose medium surrounding rock pressure and the loose rock pillar formula considering the dead load of lining structures. Then, the analytical solution of vertical compressive stress of tunnel foundation is got when that elastic half-space answer is applied and the base pressure of lining structures and the self-weight stress of at both sides of tunnel overburden soil are considered. Thereby an analytic method for collapsible compressive stress of loess tunnel foundation is proposed. The difference between different buried depths of tunnel foundation pressure and self-weight stress is analyzed by using the two methods for tunnel base pressure, and the difference between the vertical compressive stress of tunnel foundation and the field self-weight stress is analyzed by using the proposed method. The distribution variation laws of foundation compressive stress of vertical and field self-weight stress with the increase of depth are obtained. Compared with the numerical results, the proposed method is proved to be more reliable and safer. It may provide the compressive stress condition for reasonable evaluation of the collapsibility of loess tunnel foundation.

Key words: loess tunnel; foundation; collapsibility; compressive stress

0 引 言

湿陷性黄土地区土木工程建设中不可避免地需要合理评价地基的湿陷性^[1]。《湿陷性黄土地区建筑规范》^[2]已经明确确定了浅基础下 10 m 深度范围内的湿陷压缩应力为 200 kPa, 10~15 m 范围内为 300 kPa, 当饱和和自重压力大于 300 kPa 时按照饱和和自重压力确定湿陷压缩应力。由此确定了黄土湿陷性试验中试样

的压缩应力, 并依据室内试验测定的湿陷系数大于 0.015 的土层, 应用分层总和法评价地基的湿陷变形量。这种黄土地基湿陷变形的的评价方法已经在以往大量的地基工程中得到了普遍应用。但是, 与建筑地基

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320); 陕西省黄土力学与工程重点实验室科研计划项目(2013JS074)

收稿日期: 2015-03-26

土除承受自重压缩应力之外, 还承受上部结构荷载附加压缩应力作用的情况不同, 隧道成洞的开挖过程实际上是围岩卸荷的力学过程。表现为围岩竖向、侧向压应力减小, 而剪应力增大; 黄土隧道开挖卸荷, 显著地减小了隧道仰拱下黄土的竖向压缩应力, 即减小了黄土浸水饱和湿陷变形时的压缩应力^[3]。可见, 为了对隧道仰拱基底下黄土的湿陷变形做出合理的评价, 首先需要合理确定隧道基底下黄土的压缩应力。然后, 在合理确定的压缩应力作用下进行黄土的湿陷性试验, 测试黄土实际压缩应力作用下的湿陷系数^[4]; 最后, 才能合理评价隧道基底下湿陷性黄土地基的湿陷变形量, 以便分析湿陷性黄土地层对隧道结构的危害性。然而, 针对黄土隧道基底下地基土湿陷压缩应力的合理确定还没有相应的计算方法, 本文依据隧道围岩松散介质围岩压力的太沙基计算公式及弹性地基弗拉曼 (Flamant) 解答, 将隧道仰拱基底水平面以上作用的荷载简化为松散介质围岩压力和衬砌结构自重作用下的基底压力, 以及隧道两侧覆盖土层自重均布压力, 按照平面应变弹性地基, 得到了一种隧道基底下地基土压缩应力的解析计算方法。结合隧道工程不同埋深的黄土地基, 运用该方法进行了隧道基底下地基土竖向压缩应力的计算分析, 以及与数值计算结果的比较, 为合理评价黄土隧道地基的湿陷性提供了依据。

1 黄土隧道基底压力计算方法

尽管湿陷性黄土具有竖向裂隙发育、大孔隙分布和孔隙比大的基本特性, 但由于其具有显著的结构性, 在天然含水率较小的非饱和状态, 仍然具有较大的抗剪强度和承载能力^[5]。但是, 一旦在剪切和增湿作用下, 其结构性遭到破坏, 则强度降低, 变形会显著发展^[6]。黄土隧道在开挖施工时, 洞顶沉降引起上覆黄土层产生剪切变形^[7]。假定剪切面自仰拱底贯通到地面, 出现如图 1 所示的破坏, 破坏区域的土层自重全部作用于拱顶及剪切破坏面上。拱顶承受的荷载通过衬砌结构会传递到仰拱基底。以下首先分析拱顶围岩压力, 然后再分析确定仰拱下地基附加应力及竖向压缩应力^[8]。

太沙基认为土质洞室开挖后, 洞室围岩将沿两侧剪切滑移面位移, 作用在衬砌结构的压力等于其拱顶以上滑动岩土体铅垂面范围内土柱的重力扣除铅垂面上摩阻力和黏聚力的分量。为了考虑沿深度变化的侧阻力, 沿铅垂面深度取微分厚度的土柱体, 如图 1 所示。并且, 假定任意深度微分厚度土柱体水平面上的竖向应力 σ_v 呈均匀分布。由微分厚度土柱体力的平

衡条件可得

$$2\gamma a_1 dz = 2a_1 d\sigma_v + 2Cdz + 2\lambda\sigma_v \tan\phi dz, \quad (1)$$

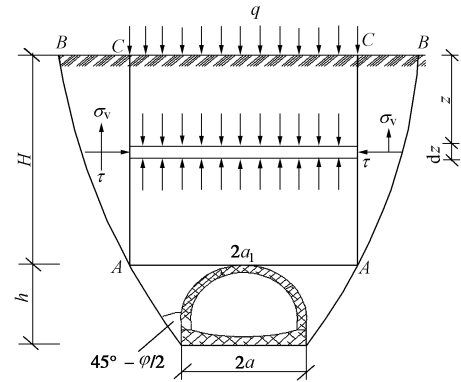


图 1 太沙基计算原理简图

Fig. 1 Simplified diagram of Terzaghi's theory

可简化为

$$\frac{d\sigma_v}{dz} = \gamma - \frac{C}{a_1} - \lambda\sigma_v \frac{\tan\phi}{a_1}, \quad (2)$$

并由边界条件 $z=0$ 处, $\sigma_v = q$ 及 $z=H$ 处, $\sigma_v = p$, 即可得洞顶的围岩压力 p 为

$$p = \frac{\gamma a_1 - C}{\lambda \tan\phi} \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda H \tan\phi}{a_1}\right) \right] + q \exp\left(-\frac{\lambda H \tan\phi}{a_1}\right). \quad (3)$$

式中 $a_1 = a + h \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$, γ 为围岩重度; λ 为静止侧压力系数, 太沙基取 $\lambda=1$; q 为地面均布荷载。

令 $\left(-\frac{\lambda H \tan\phi}{a_1}\right) = \psi$, 则式 (3) 转化为

$$p = \frac{\gamma a_1 - C}{\lambda \tan\phi} [1 - \exp(\psi)] + q \exp(\psi). \quad (4)$$

同样, 可以由洞顶围岩压力及衬砌结构自重得到隧道基底的压力:

$$p' = \frac{p \cdot 2a + G_z}{2a}, \quad (5)$$

其中, G_z 为衬砌自重。

2 隧道基底压力两种计算方法对比分析

结合某穿越黄土地层的铁路隧道, 依据场地勘察资料, 应用上述计算方法, 对隧道基底下地基土的竖向压缩应力进行计算, 并且和场地的自重应力进行了比较。

隧道断面呈马蹄形, 隧道宽 14 m, 高 12 m, 断面形状如图 2 所示。隧道所在土层为砂质黄土, 其参数为黏聚力 $c'=18$ kPa, 内摩擦角 $\phi=24.15^\circ$, 天然重度 $\gamma=14.0$ kN/m³, 衬砌重度为 $\gamma=26$ kN/m³, 取衬砌平均厚度为 50 cm, 衬砌的自重为 650 kN。

利用太沙基理论计算方法，计算得到了天然重度、饱和重度条件下隧道基底压力，并与隧道基底埋深的场地自重应力进行了比较，结果如表 1，2 所示。

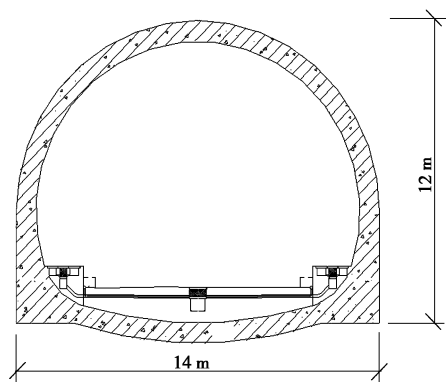


图 2 隧道断面示意图

Fig. 2 Sketch map of tunnel section

表 1 天然重度松散介质太沙基理论计算的基底压力

Table 1 Base pressures calculated by Terzaghi's theory under bulk unit weight conditions

埋深 H/m	基底压力/ kPa	基底埋深自重应力/ kPa
5	106	238
10	157	308
15	201	378
20	238	448
30	298	588

表 2 饱和重度松散介质太沙基理论计算的基底压力

Table 2 Base pressures calculated by Terzaghi's theory under saturated unit weight conditions

埋深 H/m	基底压力/ kPa	基底埋深自重应力/ kPa
5	123	303
10	190	392
15	246	481
20	295	570
30	373	748

根据工程的实际经验来看^[9]，太沙基公式的计算结果比较合理。隧道开挖形成后，在隧道上覆土层中会形成具有一定承载力的承载拱，它可以起到稳定上覆土体，减小隧道基底压力的作用。

3 黄土隧道地基土压缩应力计算方法

3.1 计算原理

(1) 隧道中心点下地基土竖向压缩应力

建筑地基的压缩应力依据基底下土层的自重应力和净基底压力引起的附加应力计算。对于湿陷性黄土地基，由自重应力和附加应力构成了竖向压缩应力。图 3 给出了条形基础中心点下地基的应力分布图， σ_s 表示自重应力（由于埋深较浅，基础埋深范围内的土

体自重应力不计），可以由单位面积上覆土柱的有效重力计算； σ_z 表示上覆荷载引起的附加应力，可以由净基底压力作用下弹性地基的解答确定。

隧道具有一定的埋深，隧道上覆土对衬砌结构产生围岩压力作用，前述太沙基公式给出了确定方法。隧道拱顶的围岩压力通过衬砌结构传递至仰拱基底。因此，隧道地基的压缩应力除了其基底面以下土柱的自重应力外，还包括隧道基底压力及隧道两侧基底面以上土层自重引起的竖向应力。如图 4 所示，隧道地基土的竖向压缩应力分布包括基础底面以下地基土自重应力的 σ_s ，以及由基底压力和隧道两侧上覆土层荷载引起的附加应力 σ_z 。

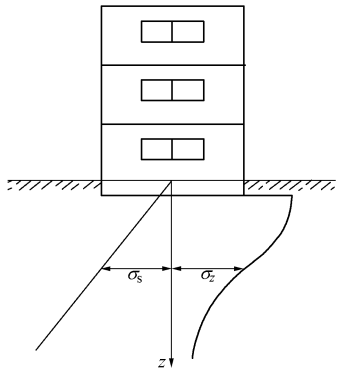


图 3 条形基础地基土压缩应力分布

Fig. 3 Distribution of stress under strip foundation

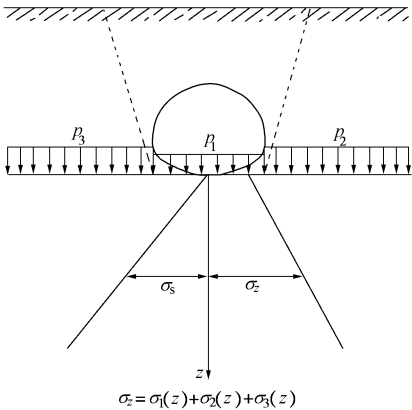


图 4 隧道地基土压缩应力分布

Fig. 4 Distribution of vertical stress under tunnel basement

附加应力 σ_z 包括由基底均布压力 p_1 和隧道两侧上覆土层压力 p_2 ， p_3 引起的竖向正应力。 p_1 可由(5)式计算， p_2 ， p_3 可以由隧道两侧基底面以上单位面积土柱的有效重力计算确定。即，隧道仰拱基底中心铅锤线上的附加应力为

$$\sigma_z = \sigma_1(z) + \sigma_2(z) + \sigma_3(z) \quad (6)$$

p_1 作用下，由弗拉曼(Flamant)弹性解答，可得附加应力计算公式：

$$\sigma_1(z) = \frac{P_1}{\pi} \left(\frac{2az}{a^2 + z^2} + 2 \arctan \frac{a}{z} \right) \quad (7)$$

p_2 , p_3 作用下, 由弹性地基的弗拉曼(Flamant)解答, 可得附加应力公式:

$$\begin{aligned}\sigma_2(z) &= \sigma_3(z) = \int_0^\infty \frac{2pz^3}{\pi[(x+a)^2 + z^2]} dx \\ &= p \cdot \frac{2z^3}{\pi} \left\{ \frac{\pi}{4z^3} - \left[\frac{a}{2z^2(a^2 + z^2)} \right] - \frac{1}{2z^3} \arctan \frac{a}{z} \right\}. \quad (8)\end{aligned}$$

(2) 隧道拱脚下地层竖向压缩应力

与隧道中心铅锤线下地层竖向压缩应力计算方法类似,可以得到隧道拱脚位置下附加应力计算公式,计算中取 $p_1 = p_3$, 计算示意图如图 5。

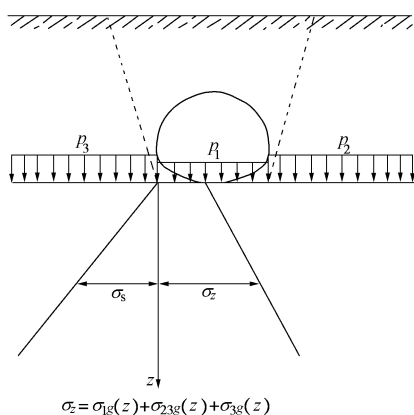


图 5 隧道拱脚压缩应力计算示意图

Fig. 5 Diagram of additional stress calculation under tunnel arch springing

p_1 在拱脚以下产生的附加应力为

$$\sigma_{lg} = \frac{p_l}{\pi} \left(\arctan \frac{2a}{z} + \frac{2az}{4a^2 + z^2} \right) \quad (9)$$

p_2 在靠近 p_3 一侧的拱脚以下产生的附加应力 σ_{23g} 和 p_3 在靠近 p_2 一侧的拱脚以下产生的附加应力 σ_{32g} 为

$$\sigma_{23g} = \sigma_{32g}$$

$$= p_2 \frac{2z^3}{\pi} \left[\frac{\pi}{4z^3} - \frac{2a}{2z^2(4a^2 + z^2)} - \frac{1}{2z^3} \arctan \frac{2a}{z} \right]; \quad (10)$$

p_2 , p_3 在靠近各自一侧的拱脚产生的附加应力为 σ_{2g} , σ_{3g} :

$$\sigma_{2g} = \sigma_{3g} = \frac{p_2}{2} = \frac{p_3}{2} \quad \circ \quad (11)$$

则隧道拱脚处地基土竖向压缩应力计算公式为:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sigma_{23g} + \sigma_{2g} \\ &= p_2 \frac{2z^3}{\pi} \left[\frac{\pi}{4z^3} - \frac{2a}{2z^2(4a^2 + z^2)} - \frac{1}{2z^3} \arctan \frac{2a}{z} \right] + \frac{p_2}{2}.\end{aligned}\quad (12)$$

3.2 竖向压缩应力的比较分析

选择天然密度、隧道埋深 10, 20 m 断面, 计算

基底中心点以及拱脚下一定深度范围内的应力分布。其中隧道基底压缩应力的解析计算方法选用太沙基公式,与数值计算结果比较。可得隧道埋深 10 m 时基底压力: $p_1=140$ kPa、两侧覆盖土层均布压力: $p_2=p_3=308$ kPa; 隧道埋深 20 m 时基底压力 $p_1=226$ kPa, 两侧覆盖土层均布压力 $p_2=p_3=448$ kPa。不同埋深隧道地基土竖向压缩应力分别如表 3~6 所示。

表 3 10 m 埋深隧道中心点下的压缩应力分布

Table 3 Distribution of compressive stress under tunnel center
with buried depth of 10 m

基底以下深度	竖向压缩应力	场地自重应力	竖向自重应力
z/m	/kPa	/kPa	/场地自重应力
3	203	350	0.58
5	241	378	0.64
10	344	448	0.77
15	439	518	0.85
20	526	588	0.89
30	685	728	0.94
40	835	868	0.96

表 4 20 m 埋深隧道中心点下的压缩应力分布

Table 4 Distribution of compressive stress under tunnel center
with buried depth of 20 m

基底以下深度 z/m	竖向压缩应力 /kPa	场地自重应力 /kPa	竖向自重应力 /场地自重应力
3	286	490	0.58
5	328	518	0.63
10	444	588	0.75
15	548	658	0.83
20	641	728	0.88
30	808	868	0.93
40	962	1008	0.95

表 5 10 m 埋深隧道拱角下压缩应力分布

Table 5 Distribution of compressive stress under tunnel arch springing with buried depth of 10 m

基底以下深度	竖向压缩应力	场地自重应力	竖向自重应力
z/m	$/\text{kPa}$	$/\text{kPa}$	$/\text{场地自重应力}$
3	282	350	0.81
5	311	378	0.82
10	386	448	0.86
15	464	518	0.90
20	541	588	0.92
30	693	728	0.95
40	840	868	0.97

表 6 20 m 埋深隧道拱角下压缩应力分布

Table 6 Distribution of compressive stress under tunnel arch springing with buried depth of 20 m

基底以下深度	竖向压缩应力	场地自重应力	竖向自重应力
z/m	/kPa	/kPa	/场地自重应力
3	406	490	0.83
5	435	518	0.84
10	512	588	0.87
15	591	658	0.90
20	670	728	0.92
30	824	868	0.95
40	973	1008	0.97

3.3 计算结果的可靠性评价

由于没有该场地的地基压力实测值，为了验证本文提出的计算结果的可靠性，针对上述隧道，运用连续介质模型的数值解法进行了计算，计算结果如表 7~10 所示。

表 7 10 m 埋深隧道中心点下的应力分布

Table 7 Distribution of stress under tunnel center with buried depth of 10 m		
基底以下深度 z/m	本文的解析结果 /kPa	连续介质的数值结果 /kPa
3	161	161
5	241	227
10	344	343
15	439	426
20	526	513
30	685	692
40	835	890

表 8 20 m 埋深隧道中心点下的应力分布

Table 8 Distribution of stress under tunnel center with buried depth of 20 m		
基底以下深度 z/m	本文的解析结果 /kPa	连续介质的数值结果 /kPa
3	286	233
5	328	300
10	444	439
15	548	535
20	641	629
30	808	816
40	962	991

表 9 10 m 埋深隧道拱脚下的应力分布

Table 9 Distribution of stress under tunnel arch springing with buried depth of 20 m		
基底以下深度 z/m	本文的解析结果 /kPa	连续介质的数值结果 /kPa
3	282	223
5	311	264
10	386	352
15	464	432
20	541	507
30	693	685
40	840	832

表 10 20 m 埋深隧道拱脚下的应力分布

Table 10 Distribution of stress under tunnel arch springing with buried depth of 20 m		
基底以下深度 z/m	本文的解析结果 /kPa	连续介质的数值结果 /kPa
3	406	283
5	435	336
10	512	449
15	591	542
20	670	623
30	824	810
40	973	961

由表 7~10 可以看出，运用本文提出解析法与基于连续介质的数值方法比较，得到的计算结果基本吻合，且隧道基底土层埋深越浅，计算结果越接近。对于深埋隧道拱脚下地层的竖向应力，解析法与数值方法得到的结果在浅层差异明显，较深处趋于一致。

如果令场地原有竖向应力为 σ_{z0} ，隧道开挖完成后基底下的竖向应力为 σ_z ，定义由隧道基底下的竖向应力与场地原埋深的自重应力的比值为竖向应力系数，即 $k = \sigma_z / \sigma_{z0}$ 。通过计算，可以发现竖向应力系数 k 与深度呈双曲线关系，隧道基底下不同深度的竖向应力系数变化规律如图 6 所示。

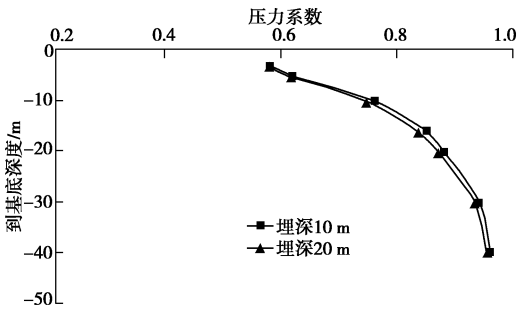


图 6 基于解析法的竖向应力系数随深度变化规律

Fig. 6 Law of vertical stress coefficient with depth based on analytical method

针对两种埋深隧道，通过数值方法考虑衬砌结构与围岩土体的相互作用，得到了地基中心竖向应力系数 k 随深度的变化，如图 7 所示。与图 6 所示结果比较，可以发现运用两种计算方法得到的竖向应力系数 k 随深度的变化规律一致。竖向应力系数 k 随深度增加而增加；在基底下 20 m 范围以内竖向应力比场地原有自重应力明显减小；在基底下较深部位 k 值变化较小最终趋近于 1。

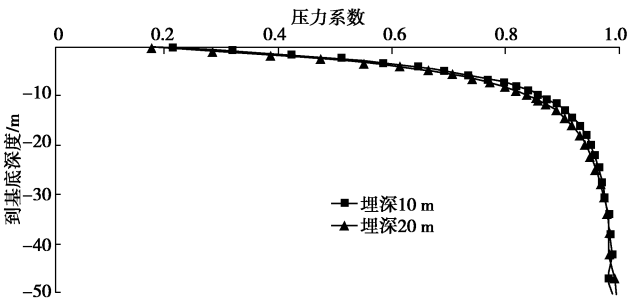


图 7 基于数值法的竖向应力系数随深度变化规律

Fig. 7 Law of vertical stress coefficient with depth based on numerical method

4 结 论

(1) 依据太沙基围岩压力的计算方法和弹性地基附加应力计算方法，建立了隧道基底下地基土的竖向

压缩应力的解析解,为隧道地基黄土的湿陷变形分析确定了压缩应力条件。

(2) 应用建立的解析计算方法,对黄土隧道不同埋深的地基土压缩应力进行了计算。结果表明隧道仰拱基底下约 20 m 深度范围内地基土的竖向压缩应力比场地原有自重压缩应力明显减小。可见,依据饱和自重压缩应力作用下黄土的湿陷性进行的湿陷变形评价不适用于隧道工程。

(3) 进行了基于太沙基公式计算围岩压力作用下隧道地基竖向压缩应力解析解与连续介质理论的数值解的比较分析,表明基底下 40 m 深度范围内两种计算结果基本一致。

参考文献:

- [1] 罗宇生. 湿陷性黄土地基评价[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(4): 87 - 91. (LUO Yu-sheng. Assessment. of collapsibility of collapsible loess foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **20**(4): 87 - 91. (in Chinese))
- [2] GB50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 2004. (GB50025 — 2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. 2004. (in Chinese))
- [3] 李志业, 曾艳华. 地下结构设计原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005. (LI Zhi-ye, ZENG Yan-hua. Design principle and method of underground structures[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2005. (in Chinese))
- [4] 张利生. 湿陷性黄土试验方法探讨[J]. 岩土学, 2001, **22**(1): 207 - 210. (ZHANG Li-sheng. Discussions on test of collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(1): 207 - 210. (in Chinese))
- [5] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [6] 邵生俊, 陶 虎, 许 萍. 黄土结构性力学特性研究与应用的探讨[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 42 - 50. (SHAO Sheng-jun, TAO Hu, XU Ping, Discussing on research of mechanics characteristics of loess considering structural behavior and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 42 - 50. (in Chinese))
- [7] 赵 勇, 李国良, 喻 渝. 黄土隧道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011. (ZHAO Yong, LI Guo-liang, YU Yu. Loess tunnel engineering[M]. Beijing: China Railway Press, 2011. (in Chinese))
- [8] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (XU Gan-cheng, BAI Hong-cai, ZHENG Ying-ren, et al. Supporting structure of underground engineering[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Hydropower Press, 2002. (in Chinese))
- [9] 赵学勖, 王 璐. 黄土拱作用机理剖析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊 2): 9 - 12. (ZHAO Xue-meng, WANG Lu. Analysis of mechanism of loess arching[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S2): 9 - 12. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)