

doi: 10. 3969/j. issn. 1002 - 0268. 2014. 04. 006

高填方段波纹管涵垂直土压力试验及计算

杨明辉¹, 方天云¹, 赵明华¹, 罗杰²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南省交通科学研究院, 湖南 长沙 410015)

摘要: 基于原位观测试验与理论研究, 对高填方段波纹管涵的涵顶垂直土压力的分布特征与变化规律进行了探讨。首先, 开展了高填方段波纹管涵垂直土压力现场观测试验。试验结果表明, 高填方段管涵顶部存在土拱效应, 规范的土柱法计算土压力值误差较大, 偏于保守, 而管涵顶部平面的土压力值并非均匀分布, 存在明显的应力集中区域。在此基础上, 结合试验规律及马斯顿理论, 考虑由于土拱效应造成的应力集中现象, 建立了高填方段波纹管涵垂直土压力计算模型, 并进行了理论求解, 从而提出了高填方段波纹管涵垂直土压力计算方法。最后, 依据此模型对涵顶填土重度、土体内摩擦角、黏聚力、管径大小等主要影响因素进行了参数分析。结果表明, 土体重度对管涵垂直土压力数值影响较大, 而内摩擦角及黏聚力的影响较小。

关键词: 道路工程; 波纹管涵; 现场试验; 土拱效应; 垂直土压力

中图分类号: U443. 15

文献标识码: A

文章编号: 1002 - 0268 (2014) 04 - 0033 - 06

Test and Calculation of Vertical Earth Pressure on Corrugated Pipe Culvert under High Embankment

YANG Ming - hui¹, FANG Tian - yun¹, ZHAO Ming - hua¹, LUO Jie²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

2. Hunan Communications Research Institute, Changsha Hunan 410015, China)

Abstract: Based on in - situ observation experiment and theoretical study, the distribution characteristics and variation regularity of vertical earth pressure on the corrugated pipe culvert under high embankment are studied. First, the field observation of the vertical soil pressure on corrugated pipe culvert under high embankment is carried out. The test result shows that the soil arching effect exists above the pipe culvert top, and the errors of the earth pressures calculated by standardized soil column method are large and conservative, while the earth pressure of culvert top plane is not uniformly distributed and there is an obvious stress concentration region. On this basis, the calculation model of vertical earth pressure on the corrugated pipe culvert under high embankment is established combining with the experimental regularity and Marston theory, considering the stress concentrate phenomenon caused by soil arching effect. Then, theoretical solving is conducted and the calculation method of vertical earth pressure on the corrugated pipe culvert under high embankment is proposed. Finally, based on the model, parametric analyses are performed for the main factors which affect the earth pressure on the culvert such as soil density, angle of internal friction and pipe diameter. The result shows that soil density has great influence on the culvert's vertical earth pressure value while angle of internal friction and cohesion are influenced little.

Key words: road engineering; corrugated pipe culvert; in - situ test; soil arching effect; vertical earth pressure

收稿日期: 2013 - 07 - 21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278184); 交通运输部科技示范工程项目 (CXKJSF0108 - 2); 湖南省交通科技项目 (201206)

作者简介: 杨明辉 (1978 -), 男, 湖南省武冈人, 博士, 副教授. (yamih@126. com)

0 引言

随着现今我国高速公路建设向西部山区地带迅猛发展,由于西部山区特有的地形地貌,大填大挖地段屡见不鲜,不少填方段甚至超过了 50 m。对于该类地段的管涵结构其承载能力及变形要求甚高,而圆形波纹管涵以其造价低廉、施工工期短、适应变形能力强等优点近年来在高填方地段得到了广泛应用^[1]。

在该类管涵计算中,涵顶垂直土压力为其最为重要的荷载参数,计算是否合理决定着管涵结构设计的经济性与可靠性。目前,相关规范^[2-3]多采用土柱法计算,即以涵顶上覆土柱重量作为土压力值,该法虽计算简单,但未能考虑边界条件及涵体间相互作用,计算结果偏于保守^[4],且对于高填方段大量试验表明,管涵上方将存在较明显土拱效应^[4-5],可见规范法难以满足工程设计要求,故寻求合理的高填方段圆形波纹管涵涵顶土压力计算方法十分必要。

圆形管涵涵顶垂直土压力计算一直以来是岩土工程领域的热点问题,早在 20 世纪 60 年代,Marston^[6]已基于散粒体材料极限平衡条件推导了管涵垂直土压力的计算公式,开创了埋地管涵土压力计算方法的先河。而后,国内外学者在此基础上对埋地管涵垂直土压力计算做了更进一步的研究与完善:Spangler^[7]通过大量的试验和研究,进一步充实和阐述了 Marston 理论;曾国熙^[8]考虑土体黏聚力影响,并将土体拖拽力表示为外土柱对内土柱主动侧向土压力,对 Marston 理论进行了分析与修正;顾安全^[9]用弹性理论解反算涵顶附加土压力,建立适用于高填方涵洞竖向土压力计算公式;折学森^[10]进一步考虑了沟谷效应对管涵的影响,并提出了量化的影响系数;杨锡武^[5]将模型试验数据回归拟合,分析得出高填方下涵洞的非线性土压力计算公式;申文明^[11]进行了全尺寸管涵模型试验,研究管涵垂直土压力的分布特征,并根据试验结果提出相应的垂直土压力计算公式。

上述方法多用于混凝土管涵结构,是否适用于高填方段波纹管涵结构仍存在疑问。基于此,本文首先展开了高填方段波纹管涵垂直土压力的现场观测,寻求波纹管涵管顶土压力分布规律,在此基础上,结合经典的 Marston 管涵土压力计算理论,对上覆土体受力进行深入分析,从而提出高填方段波纹管涵结构垂直土压力计算方法,并对各影响参数进

行探讨,以期对高填方段波纹管涵的设计计算提供参考。

1 现场试验

1.1 土压力量测方案

现场试验为湖南省某高速公路高填方段,管涵为斜交 115° 波形钢板涵洞,管径 4 m,壁厚 5.5 mm,涵长约 72.21 m,内外壁采用热浸镀锌和涂刷沥青防腐,整体结构如图 1 所示。填土采用红黏土压实,相关土体参数见表 1 所示。采用分层填筑,每层填土高度 50 cm。填土总高度 28 m (涵顶以上填土 24 m)。



图 1 波纹钢板管涵结构整体图

Fig. 1 Overall view of corrugated steel pipe culvert structure

表 1 填土物理力学性质

Tab. 1 Physical and mechanical properties of filling

重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水量/ %	摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	液限/%	塑限/%
15.2	18.9	24	35.8	50.4	32.8

管涵变形为管涵物施工及运营阶段极为重要的参数,过量变形将直接影响管涵结构物的正常使用,其中关键点为涵顶与地基的竖向变形。为此,在波纹管涵涵顶与涵底位置布设了沉降观测板,以观测管涵变形情况。如图 2 所示。

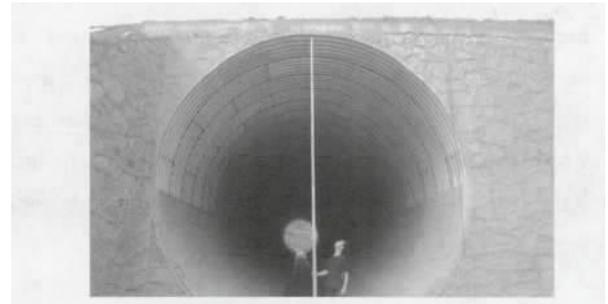


图 2 涵顶下沉量观测

Fig. 2 Observing culvert top subsidence

同时, 为测定涵顶垂直土压力随填土高度的分布规律, 填筑过程中在涵顶不同平面内 (沿管涵长度方向共布置 3 组, 距管涵端部距离分别为 5、10 m 及 15 m) 均匀布置土压力盒, 具体布置如图 3 所示 (从左至右依次编号①~⑥)。土压力盒埋设至指定位置后, 引线由管涵端部引出以方便量测。

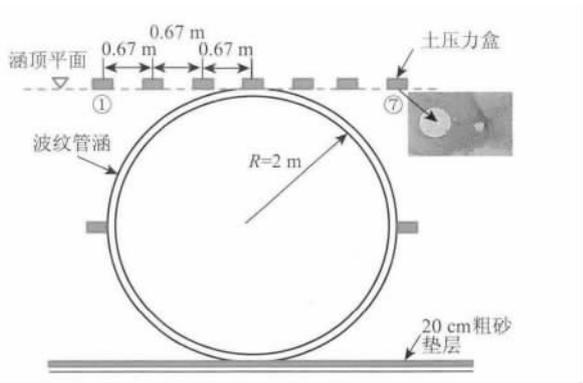


图 3 土压力盒的布置图

Fig. 3 Arrangement of earth pressure cells

1. 2 测试结果及分析

图 4 为管涵顶部与底部竖向沉降与填土高度关系。由图可知, 开始阶段, 波纹管涵涵顶与涵底的竖向沉降随填土高度逐渐增长, 但随着填土高度增大至一定值后 (填土高度为 16 m), 二者沉降则趋于稳定, 表明波纹管涵在高填方地段承受大荷载时, 具有较强的适应变形能力, 其变形可满足工程需要。

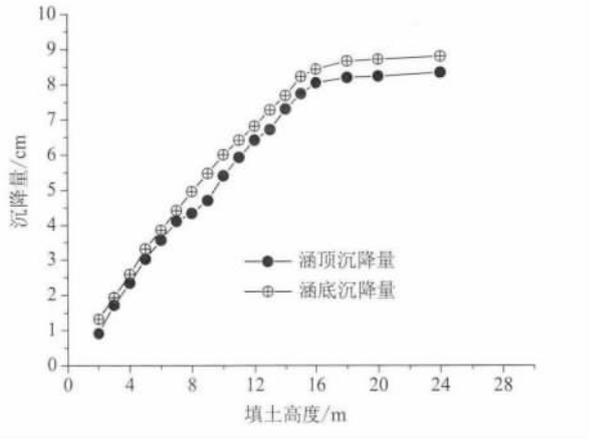


图 4 涵顶与涵底沉降随填土高度关系曲线

Fig. 4 Settlements of culvert top and bottom varying with filling height

图 5 为涵顶中心及侧边土压力随填土高度的分布规律 (土压力值取各断面同一位置土压力盒读数均值), 为便于比较, 特列出了规范^[3-4]土柱法计算值。由图可知, 涵顶各处土压力值随填土高度增加而增大, 但增速随着填土高度的增加逐渐减缓, 且

与土柱法计算结果差异逐渐拉大, 表明在低填方段, 采用规范方法计算涵顶土压力较为合理; 而对于高填方段, 逐渐形成土拱效应^[5], 从而造成土压力的减小, 可见规范法过高地估计了高填方段涵顶垂直土压力值, 从而使涵洞设计过于保守。

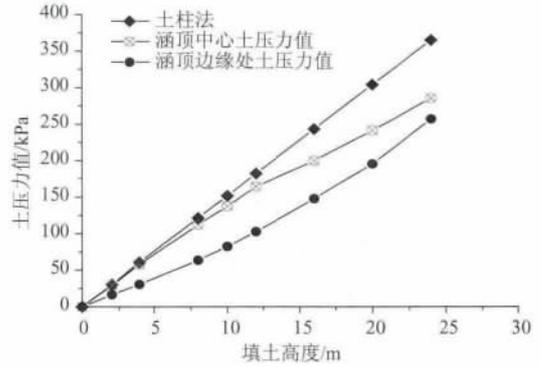


图 5 涵顶土压力随填土高度分布规律曲线

Fig. 5 Earth pressure on culvert top varying with fill height

图 6 则为波纹管涵涵顶各位置处土压力随填土高度变化的差异。由图可知, 填土高度增大至一定值后涵顶平面内各点土压力值并非均匀分布, 管顶中心处土压力值要明显高于管涵两侧土压力值, 且该规律随填土高度的增加愈发明显, 可见, 对于高填方段的波纹管涵, 其涵顶中心存在土压力集中现象, 且该应力集中现象存在于涵顶中心一定范围内, 其范围大致为 $R/3$ (R 为波纹管涵直径), 即存在应力集中区域, 而非应力集中点^[12]。

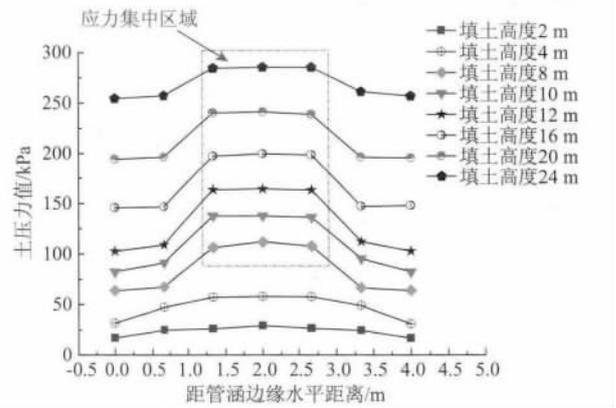


图 6 涵顶平面垂直土压力值随填土高度变化情况

Fig. 6 Earth pressure of culvert top plane varying with fill height

存在上述现象, 其原因在于由于波纹管涵刚度远大于土体刚度, 在路堤回填过程中, 管涵沉降较小, 而管涵两侧土体相对于管顶土体存在向下运动趋势, 从而产生剪切力, 即对管涵上方土体施加向

下拖曳力, 导致管涵顶部应力集中。与此同时, 此剪应力对管涵两侧土体有向上的提拉作用, 使得管顶土体与两侧土体的差异沉降逐渐减小, 当深度达到某一值时, 差异沉降消失, 该深度处平面称为等沉面 h_e [1]。本文将填土高度 h 大于 h_e 的填方路堤定义为高填方地段。

2 高填方段波纹管涵土压力计算

在传统的 Marston 理论中, 一直假定管顶土压力为均匀分布 [6], 但前述现场试验表明, 管顶平面存在明显的应力集中区域, 并非均匀土压力值。针对该现象, 本文将对传统的马斯顿管涵垂直土压力计算方法进行修正, 以提出适合于波纹管涵的垂直土压力计算公式。

2.1 基本假定

(1) 路堤填料为均质各向同向散体材料; (2) 存在等沉面高度 h_e , 取 $h_e = 2.25B$ [1]; (3) 管涵宽度为 B , 半径为 R , 填土高度为 h 。根据现场试验观测, 涵顶应力集中区域范围为 $B/3$ 。假定集中区域垂直土压力为 σ_{v0} , 其余部分土压力为 σ_{v1} ; (4) 不考虑波纹管涵微小变形, 定其为刚性管涵。

2.2 公式推导

管顶以上至等沉面处的内土柱 $abcd$, 从中选取厚度为 dz 的土层单元 (图 7), 由单元体竖向力平衡条件得:

$$W + 2S = dV, \quad (1)$$

式中, W 为土层单元的重量, $W = \gamma B dz$; S 为涵顶土柱与周围土体的相互剪切力。

$$S = (\sigma_{v1} \tan \varphi + c) dz = (K \sigma_{v1} \tan \varphi + c) dz, \quad (2)$$

式中, K 为土体侧压力系数, $K = \tan^2 (45 - \varphi/2)$; φ 为土体内摩擦角; c 为填土黏聚力; σ_{v1} 为内外土柱分界面处竖向应力。

引入应力集中系数 α :

$$\alpha = \sigma_{v1} / \sigma_{v0}, \quad (3)$$

则

$$d\sigma_{v1} = \alpha d\sigma_{v0}. \quad (4)$$

将式 (2)、(3) 代入式 (4) 平衡方程得:

$$\gamma B dz + 2(K\alpha\sigma_{v0}\tan\varphi + c) dz = \left(\frac{B}{3} + \frac{2B}{3}\alpha\right) d\sigma_{v0}. \quad (5)$$

整理式 (5) 得:

$$\frac{d\sigma_{v0}}{dz} - \frac{2K\alpha\tan\varphi}{(1+2\alpha)/3B}\sigma_{v0} - \frac{\gamma B + 2c}{(1+2\alpha)/3B} = 0. \quad (6)$$

令 $\beta = (1+2\alpha)/3B$, 对上述微分方程求解,

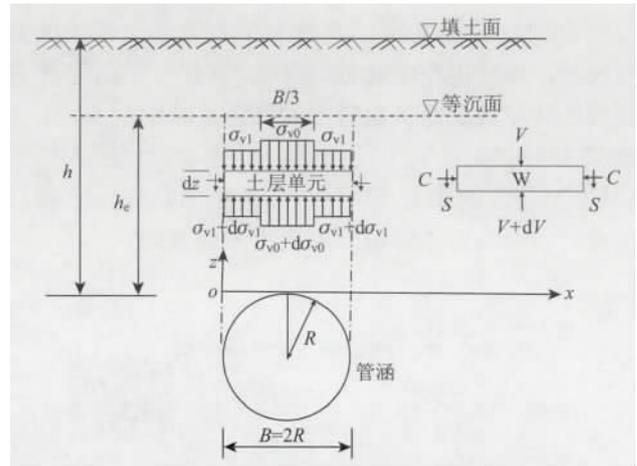


图 7 高填方管涵土压力分析模型

Fig. 7 Analytical model of soil pressure on pipe culvert under embankment

可得:

$$\sigma_{v0} = \exp\left(\frac{2k\alpha\tan\varphi}{\beta} dz\right) \cdot$$

$$\left[\int \frac{\gamma B + 2c}{\beta} \exp\left(-\int \frac{2k\alpha\tan\varphi}{\beta} dz\right) dz + C\right]. \quad (7)$$

上述管涵顶部土压力值 σ_{v0} 解析式中, C 为待定参数, 可结合边界条件求解。由等沉面定义可知, 等沉面以上各土柱无差异沉降, 则该处土压力即为以上土柱重量, 故有 $\sigma_{v0} = \gamma(h - h_e)$, 代入式 (7), 求解得:

$$\sigma_{v0} = \eta \cdot \exp\left[\frac{2K\alpha\tan\varphi}{\beta}(z - h_e)\right] + \frac{\gamma B + 2c}{2K\alpha\tan\varphi}, \quad (8)$$

式中 $\eta = \gamma(h - h_e) - \frac{\gamma B + 2c}{2K\alpha\tan\varphi}$ 。

由此, 即建立了波纹管涵涵顶垂直土压力计算公式。式中计算参数包括土体参数 γ 、 c 、 φ 以及填土高度 h , 等沉面高度 h_e 、管涵直径 B 以及应力集中系数 α 。

2.3 参数确定

上述高填方段波纹管涵涵顶垂直土压力计算公式中涉及到关键参数 α 取值, 其值可通过对现场试验数据拟合以确定, 如图 8 可知, 应力集中系数 α 随填土深度增加而逐渐减小, 其与填土高度近似满足线性关系。实际工程中, 当埋土深度较低时, 由于管涵刚度相对较大, 应力集中系数比较大, 随着填土高度增加, 管顶中心处土压力趋于相等, 应力集中系数相应变小, 可见该规律与实际工程中现象相符。

3 参数分析

从式 8 可知, 管顶土压力与土体性质 (内摩擦

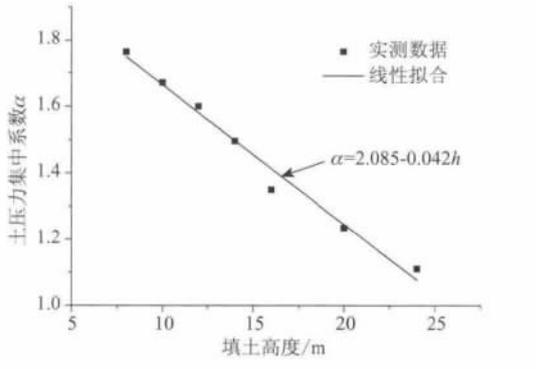


图 8 应力集中系数与填高的关系

Fig. 8 Stress concentration coefficient vs. filling height
 角 φ 及黏聚力 c) 相关, 为分析各参数敏感性, 本节将对各土体参数进行单一分析。首先分析土体重度的影响, 各基本参数取值如下: 内摩擦角 $\varphi = 24^\circ$, 黏聚力 $c = 35.8 \text{ kPa}$, 管径 $B = 4 \text{ m}$, 填土高度 $h = 24 \text{ m}$ 。考虑到实际土体的重度范围, 土体重度取值从 $\gamma = 6 \text{ kN/m}^3$ 开始。

由图 9 (a) 可知, 土体重度的变化对涵顶垂直土压力的影响较大, 随着土体重度的增加, 涵顶垂直土压力呈线性增长, 该规律与土柱法规律类似, 表明土体重度仍为影响涵顶垂直土压力的主要因素。但与土柱法相比, 涵顶垂直土压力随土体重度的增长趋势明显放缓。

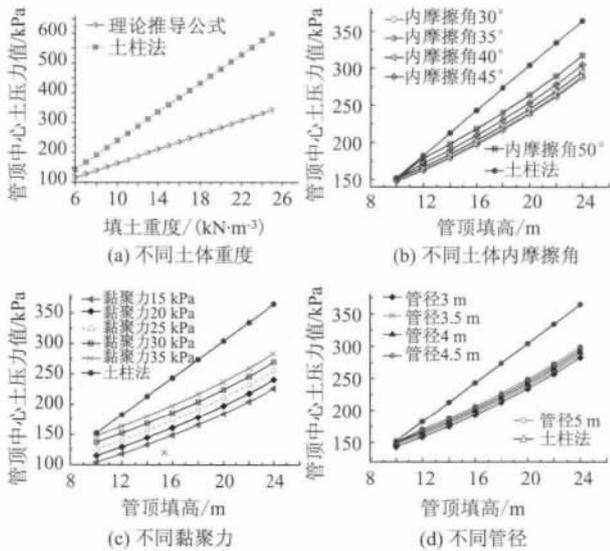


图 9 管顶土压力的对比分析

Fig. 9 Comparison of soil pressures on pipe culvert top

其次, 取土体内摩擦角为 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 50° 进行对比研究。由图 9 (b) 可知, 随着内摩擦角的增大, 涵顶垂直土压力略微增大, 但增大趋势并不明显。表明内摩擦角的变化对涵顶垂直土压力值影响较小。图 9 (c) 为回填土体黏聚力取值对涵

顶垂直土压力的影响 (土体黏聚力分别取 15、20、25、30、35 kPa)。由图可知, 涵顶垂直土压力值随填土黏聚力增加有所增大, 但增加幅度较小, 表明其对管涵涵顶垂直土压力有一定影响, 但敏感性较低影响较小。

值得注意的是, 在同一内摩擦角或黏聚力情况下, 土压力值随着填土高度的增加均呈现非线性增长趋势而明显低于土柱法计算值, 其原因在于由于存在土拱效应, 造成等沉面以上部分管顶填土重力由周围土体分担, 从而减轻了涵顶的土压力值。

此外, 在实际工程中, 涵管管径的选择亦是重要的设计参数。图 9 (d) 在相同土体条件下不同管涵直径条件下涵顶垂直土压力的分布。由图可知, 随着管径增大, 管顶土压力仅略有增加, 表明管涵管径大小对于涵顶垂直土压力值影响甚小, 实际工程中在通涵条件许可下可选择小孔径管涵以节约造价。

4 结语

本文开展了高填方段圆形波纹管涵现场观测试验, 并在此基础上对涵顶垂直土压力值进行了分析与计算, 主要结论如下。

- (1) 高填方段圆形波纹管涵涵顶水平面上垂直土压力并非均匀分布, 而是存在管顶中心土压力集中的现象, 并随填高增大渐趋明显。
- (2) 结合现场观测数据, 基于 Marston 理论公式, 并考虑涵顶土拱效应所形成的应力集中现象, 提出了高填方段圆形波纹管涵涵顶垂直土压力计算方法, 该方法相比规范法, 更接近于工程实测值, 从而克服了规范法过于保守的缺陷, 且参数明确易求, 便于工程应用。
- (3) 对影响波纹管涵涵顶垂直土压力值的各主要参数进行了对比分析, 结果表明, 圆形波纹管涵垂直土压力值随着土体重度、内摩擦角及黏聚力的增大而有所增加, 但其中土体重度为主要影响参数, 而内摩擦角及黏聚力的影响较小。

参考文献:

References:

[1] 刘保健. 涵管的作用荷载与影响因素分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
 LIU Bao - jian. Analysis of Loads on Culvert and Influencing Factors [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.

- [2] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范 [S].
JTG D60—2004, General Specifications for Design of Highway Bridge and Culvert [S].
- [3] TB 10002. 1—2005, 铁路桥涵设计基本规范 [S].
TB 10002. 1—2005, Fundamental Code for Design of Railway Bridge and Culvert [S].
- [4] 郑俊杰. 高路堤下涵洞垂直土压力研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (7): 1009—1013.
ZHENG Jun - jie. Vertical Earth Pressure on Culverts under High Embankments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (7) 1009—1013.
- [5] 杨锡武, 张永兴. 山区公路高填方涵洞的成拱效应及土压力计算理论研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (21): 3887—3893.
YANG Xi - wu, ZHANG Yong - xing. Study on Arch Action and Earth Pressure Theory for Culverts under High Embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (21): 3887—2893.
- [6] MASTON A, ANDERSON A O. The Theory of Loads on Pipe in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe [R]. City of Ames: Iowa State College, 1913: 31—181.
- [7] SPANGLER M G. A Theory of Loads on Negative Projecting Conduits [C] // Proceedings of Highway Research Board. Washington, D. C.: Highway Research Board, 1951: 153—161.
- [8] 曾国熙. 土坝下涵管竖向土压力的计算 [J]. 浙江大学学报, 1960, 4 (1): 79—97.
ZENG Guo - xi. Calculation of the Vertical Pressure on the Pipe Line under an Earth Dam [J]. Journal of Zhejiang University, 1960, 4 (1): 79—97.
- [9] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究 [J]. 岩土工程学报, 1981, 3 (1): 3—15.
GU An - quan. Investigation of the Vertical Earth Pressure on Projecting Conduit and Underground Chamber under a High Embankment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3 (1): 3—15.
- [10] 折学森. 对沟谷地形中埋设管道的研究 [D]. 西安: 西安公路学院, 1986.
ZHE Xue - sen. Study on the Conduit Lying Hidden in the Trench Terrain [D]. Xi'an: Xi'an Highway Institute, 1986.
- [11] 申文明, 边学成, 唐晓武, 等. 低填方上埋式管涵土压力的模型试验和理论研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (7): 1017—1022
SHEN Wen - ming, BIAN Xue - cheng, TANG Xiao - wu, et al. Model Tests and Theoretical Studies on Earth Pressure on Shallow Positive Buried Culverts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (7): 1017—1022.
- (上接第32页)
- HUANG Ji - cheng, HUANG Peng. Relativity Study on Aggregates Fractal and Mechanics Indexes of Asphalt Mixture [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2006, 34 (12): 1632—1636.
- [10] 王宏畅, 黄晓明, 傅智. 半刚性基层材料路用性能的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (11): 45—49.
WANG Hong - chang, HUANG Xiao - ming, FU Zhi. Experimental Study on the Performance of Semi - rigid Base Course Materials [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (11): 45—49.
- [11] JTG E60—2008, 公路路基路面现场测试规程 [S].
JTG E60—2008, Field Test Methods of Subgrade and Pavement for Highway Engineering [S].
- [12] 曹建新, 王哲人. 连续级配的级配碎石材料试验研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (5): 14—16.
CAO Jian - xin, WANG Zhe - ren. Experimental Research of Continuous Grading Macadam Materials [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (5): 14—16.
- [13] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
CHANG Shi - biao, ZHANG Su - min. Manual of Engineering Geology [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [14] 刘小明, 徐林荣, 黄幼民. 石棉尾矿高速公路水稳基层材料的研究 [J]. 公路工程, 2010, 35 (5): 44—47.
LIU Xiao - ming, XU Lin - rong, HUANG You - min. Study on Asbestos Tailings Used as Highway Cement Stabilized Base Material [J]. Highway Engineering, 2010, 35 (5): 44—47.
- [15] 李军, 徐林荣, 刘小明. 石棉尾矿用作沥青混合料集料特性研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8 (5): 31—34.
LI Jun, XU Lin - rong, LIU Xiao - ming. Research on Character of Asbestos Tailing Using as Asphalt Mixture Aggregate [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8 (5): 31—34.