

应用离心模型试验分析涵洞病害机理

康 佐, 谢永利, 冯忠居, 杨晓华

(长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 利用离心模型试验, 通过模拟实际依托工程的地基形式、回填材料、沟坡地形以及施工工艺, 分析了涵洞发生病害的全过程, 利用图片测量软件再现了土体、涵洞结构体、地基相互作用的过程, 阐述了涵洞纵向不均匀沉降所产生的“扁担效应”对涵洞结构破坏的机理, 根据实录影像描述了涵洞模型裂缝的发展形式, 并与实际病害工程对比。

关键词: 道路工程; 离心模型试验; 涵洞结构; 位移; 病害机理

中图分类号: U449

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)06-0784-05

作者简介: 康 佐(1978-), 男, 安徽广德人, 博士研究生, 主要从事公路岩土、路基结构物和地基处理方面的研究。

Studies on distress mechanism of culverts by centrifugal model test

KANG Zuo, XIE Yong-li, FENG Zhong-ju, YANG Xiao-hua

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on centrifugal model test, the whole course of distress of culverts was analyzed by simulating the foundation, ravine land, fill material and construction technology of practical projects. The software of image measuring was utilized to reproduce the interaction course among the soil mass, culvert structure and ground. And it was shown that the destruction mechanism of culvert structure was attributed to the phenomena of shoulder pole, which was engendered because of longitudinal unequal settlement. The evolution of crack on the culvert model was described by recording of video tape, which was simultaneously contrasted to the practical diseased project.

Key words: highway engineering; centrifuge; culvert structure; displacement; distress mechanism

0 引 言

土工离心模型试验是通过施加在模型上的离心惯性力使模型的容重变大, 从而使模型的应力与原型一致, 以模拟原型。黄文熙先生称“离心模型是土工模型试验的里程碑”。到目前为止, 许多复杂的岩土工程问题, 如非饱和土问题、污染介质的迁移问题、非线性破坏过程、地震反应问题等, 运用计算机仍有不少困难, 而通过离心模型试验却能得到直观、清晰的结果^[1-7]。

近年来, 高填土路堤涵洞在山区公路工程建设中的运用较为广泛, 但由于受地质、地形、施工工艺及涵洞结构型式等因素的影响, 使涵洞的受力计算很难综合考虑这些因素, 造成涵洞病害时有发生。许多专家和学者都从不同的角度出发对涵洞受力性状进行了研究, 但都未能完全应用于实际。应用离心模型试验研究涵洞周围土体应力应变性状有助于掌握涵洞的破坏机理^[8-10]。

本文以兰州-海石湾高速公路某高填病害涵洞为基础, 应用离心模型试验直观、全面地分析了涵洞由于地基、地形设计处理不当引起病害的机理, 并描述

了土体、涵洞结构体、地基三者相互作用的过程。

1 涵洞离心模型试验设计方案

1.1 离心机参数

离心机最大容量为 60 gt, 有效半径 1.5 m。最大载荷情况为: 当 $n = 100g$ 时, 载荷 600 kg; 当 $n = 200g$ 时, 载荷 300 kg。加速度为 10~200g。模型箱内为 700 mm×500 mm×360 mm。启动时间 20 min。

1.2 试验材料选取和模型制作

采用黄土作为填料; 涵洞采用混凝土管片, 混凝土强度等级为 C30, $E_c = 30 \text{ GPa}$; 模拟淤泥软弱地基采用 EPS(Expanded Polystyrene)板, 压缩强度为 100~350 kPa。模型中砖模拟的是与填土模量相差很大的“原始山脊”。原型拱涵的设计参数为: 基础宽 7.58 m、高 1.20 m, 台身下部宽 2.19 m、上部宽 1.50 m, 拱涵内宽 2.00 m、高 2.17 m, 拱矢高 0.67 m, 拱厚 0.60 m, 如图 1 所示。模型按 1: 60 比例缩尺制作, 选用微型混凝土材料, 如图 2 所示。

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200231881224)

收稿日期: 2005-06-08

表 1 高填路堤涵洞离心试验相似律

Table 1 The rule of similarity on centrifuge under high fill embankment

参数	重力加 速度	几何				填土材料						初始 应力	涵洞结构 反应				破坏 准则	
原形	g	h/D	Δ/D	$f_{\text{矢}}/D$	ϕ	rD/c	E/c	v	$r/\rho g$	d/D		σ_0/C	σ/C	ε	δ/C		τ'/C	σ'/C
模型	ng	h/D	Δ/D	$f_{\text{矢}}/D$	ϕ	rD/c	E/c	v	$r/\rho g$	d/D		σ_0/C	δ/h	ε	δ/h		τ'/C	σ'/C
是否 相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	相似	不相似		相似	相似	相似	相似		相似	相似

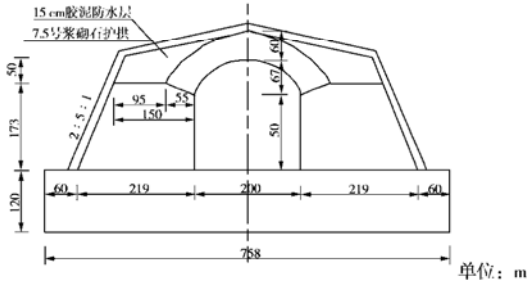


图 1 原型拱涵的设计图

Fig.1 The design of the prototype arch culvert

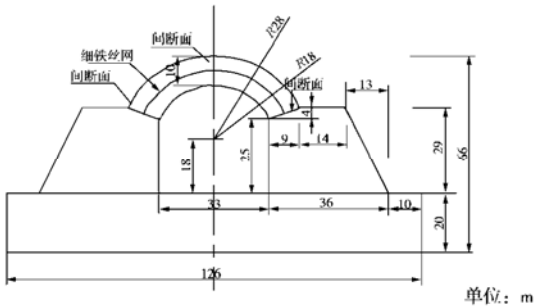


图 2 拱涵 (1: 60) 模型横断面图

Fig. 2 The transverse section of the arch culvert model (1:60)

1.3 试验参数及离心模型试验的相似关系^[11-12]

高填涵洞的离心试验相似律是在土工模型相似准则和一般岩土工程离心模型律的基础上建立起来的。相似关系主要取决于：①涵洞的计算直径、涵洞拱圈的厚度及埋置深度等几何因素；②涵洞周围土体的性质；③涵洞结构体材料的性质；④土体的初始应力状态。由量纲分析法得出相似规律如表 1。

表 1 中： h 为涵洞的埋深，即涵洞拱顶至地面的距离； D 为涵洞的计算直径； Δ 为涵洞拱圈的厚度； γ 为填土材料容重； c 、 ϕ 为填土材料的抗剪强度参数； σ 、 δ 、 ε 分别为土体和涵洞材料的应力、位移和应变； $f_{\text{矢高}}$ 为涵洞拱圈的计算矢高。土的破坏准则采用摩尔-库仑破坏准则。除土体的粒径不相似外，其他各项无量纲量均相似。当土粒的粒径较小时，这一不相似对相似问题的影响不大。因而，用离心模型试验模拟高填路堤涵洞问题在理论上是可行的。

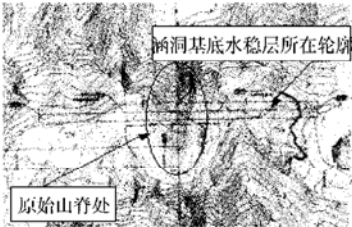
1.4 试验量测方法

用数码相机定点拍摄运动模型箱内模型变化，计算机对数字图像进行处理，利用测量软件处理后得到位移，停机后对土体上绘制的格栅进行测量。

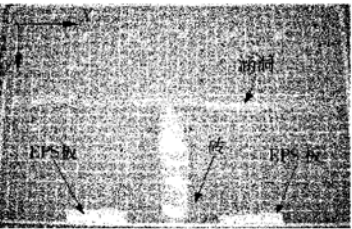
2 涵洞离心模拟试验

2.1 模型制备

该工况主要模拟实际依托工程的地形，研究涵洞不均匀沉降情况，并模拟实际工程将涵洞中间涵节“担”在原始山脊上，如图 3 (a) 所示。模型制备实图见图 3 (b)，格栅间距 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ ，格栅中标示的数字单位为格，每格长度 2 cm ， x 、 y 方向如图。



(a) 原型工程地形图



(b) 涵洞纵断面地形模型 (格栅: $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$)

图 3 涵洞纵断面基底地形影响工况模型制备

Fig. 3 The model for studying the effect of longitudinal topography on the culvert

2.2 离心模拟试验加速度设置

加速度趋势如图 4，相关技术参数见表 2。

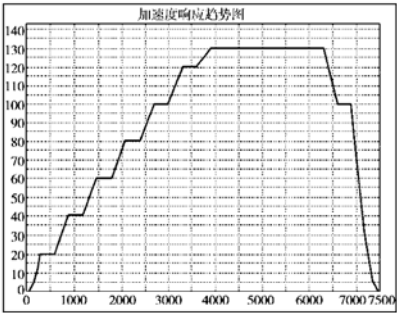


图 4 加速度响应趋势图

Fig. 4 The diagram of response current on acceleration

表 2 技术参数表

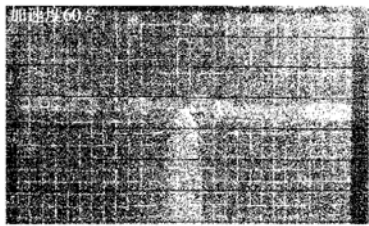
Table 2 The technical parameters

实际填土高度/cm	离心模拟填土高度/m	对应加速度/g	加速度停留时间/min	实际模拟时间/min	实际模拟天数/d	累计模拟总天数/d
19	3.8	20	5	2000.0	1.4	1.4
19	11.4	60	5	18000.0	12.5	19.4
19	19.0	100	5	50000.0	34.7	76.4
19	24.7	130	40	676000.0	469.4	595.8

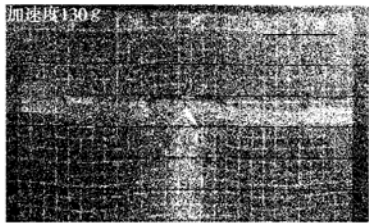
3 试验结果分析

(1) 涵洞纵断面基底地形对涵洞位移的影响，如图 5 所示。可以看出，当加速度达到 60g 时，模拟填土高度达到 11.4 m，涵洞中间涵节开始出现破坏，涵中两侧沉降量增大，涵顶上部土体出现“倒八字”裂缝发展趋势；当加速度达到 100g 时，中间涵节进一步破坏，涵洞基底的沉降变形性状为“W”状，而涵顶土体的沉降变形性状为上凸形；当加速度达到 130g，并离心固结 40 min 以后，涵顶“漏斗状”沉降变形十分明显，此时涵顶内外土柱间的沉降差亦明显，对涵洞结构的受力也更为不利。一方面由于外土柱的沉降差较大，致使外土柱的部分土体荷载转嫁到涵顶，另一方面涵底的砖体（原始山脊）在上部填土应力的作用下，对涵底基础产生了应力集中。根据加速度从 20g 至 130g 的实时监控照片分析，涵洞周围土体在模拟填土高度 4 m 以下，土体、基础、地基三者的相互运动较微小，可见此时填土对涵洞结构的影响甚微，表明此填土高度以下应控制机械碾压引起的冲击损伤；在模拟填土高度大于 4 m 以后，首先发生较大的位移是地基，并且地基深处发生的沉降沿垂直方向以“漏斗”形式向涵洞基础传递，此时涵顶填土随之发生了较小沉降，由于涵中位置设置了砖体，沉降量明显没有两侧土体的沉降大。随着加速度的增加，模拟涵顶填土高度也相应增大，“担”在砖体上的涵节随地基土体的沉降缓慢下移，导致此时的涵中管节就如“扁担”一样担在砖体（原始山脊）上，最终导致了涵洞的破坏。

(2) 不同模型填土高度处，加速度增大涵洞纵向不均匀沉降分析。选取模型中涵洞基底-16、-6 cm（负号表示基底以下）和涵顶 2、12 cm 4 个分析层来分析各层随加速度的增加，不均匀沉降发展的运动过程，如图 6 所示（横坐标代表模型箱中监控点的格栅位置，其原点位置见图 3（b））。由图 6（a）、6（b）可以看到涵洞基础下随加速度增大，EPS 板的变形增加，基底-6 cm 较基底-16 cm 变形较缓和，沉降随填土增加基本趋于平缓；图 6（c）、（d）可以看到，涵顶由于中间沉降量小，形成了上凸形沉降趋势。当实时加速度小于 60g 时，虽然有“原始山脊”存在，但是涵洞的“扁担效应”还不很明显，期间整个土体还属于固结稳定期间，尤其是涵中部位的沉降量与两侧土体相差不大，涵洞纵向不均匀沉降现象不明显；随着加速



(a) 实时加速度 60g

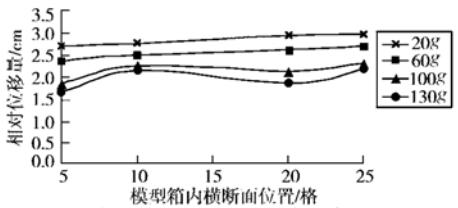


(b) 实时加速度 130g

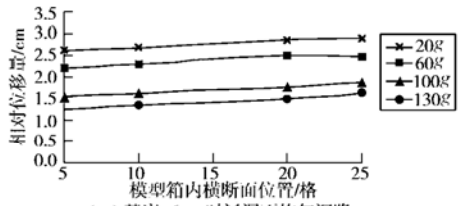
图 5 随模拟填土高度增加，拱涵周围土体位移变化情况

Fig. 5 Variation of displacements with the increase of simulated fill height

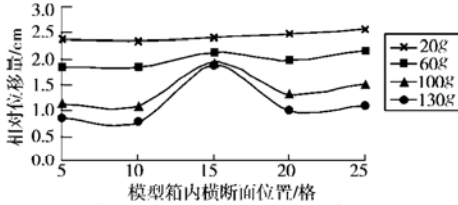
度的增加，即模拟填土高度的增加，涵顶等沉面高度上升，稳定的沉降平衡被打破，由于下部“软弱地基”的大幅沉降量反射到上层土体，内外土柱差迅速扩大，涵洞顶基底应力集中现象明显剧增。在涵顶 2 cm 分析层中，涵中沉降量只有 0.5 mm，而两侧土体的沉降量高达 3.4 mm，导致涵洞在加速度达到 60g 后开始破坏。



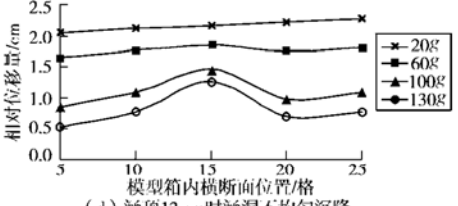
(a) 基底-6 cm 时涵洞不均匀沉降



(b) 基底-6 cm 时涵洞不均匀沉降



(c) 涵顶 2 cm 时涵洞不均匀沉降



(d) 涵顶 12 cm 时涵洞不均匀沉降

图 6 涵洞纵向不均匀沉降图片位移分析

Fig. 6 Distribution of differential settlement along the longitudinal direction

(3) 试验模型静态量测成果分析

图7为停机后由于纵向不均匀沉降导致的涵洞病害特征图片。反映了合理的涵节长度可以避免由于局部沉降突变产生的弯折应力集中。由图7(a)可以清楚地看到像“扁担”担在砖体上涵洞模型已经被折成2段,裂缝形式为倒八字形。由图7(d)可知,裂缝发生在中间涵节中线处,并且是自涵洞顶一直发展到涵洞基底。由裂缝发展规律可以简单分析,裂缝首先由于不均匀纵向沉降产生图7(d)中“标识1”的裂缝,而后由于横断面不均匀受力导致图中“标识2和3”裂缝的产生。除中间涵节破坏外,其余4个涵节均未破坏。由图7(a)涵顶沉降可以看到,针对中间涵节的沉降集中现象,涵顶以上随填土增加逐渐“消化”,由图7(a)中所标识扩散线可以看到,此时涵顶内土柱是以“漏斗状”向填土顶发展的,直至等沉面的形成。图7(c)地基层EPS板以上土体的沉降差“消化”也是呈漏斗状扩散至涵洞基底。由图7(b)土体裂缝发展形式也可以看到裂缝正是沿图示扩散线发展

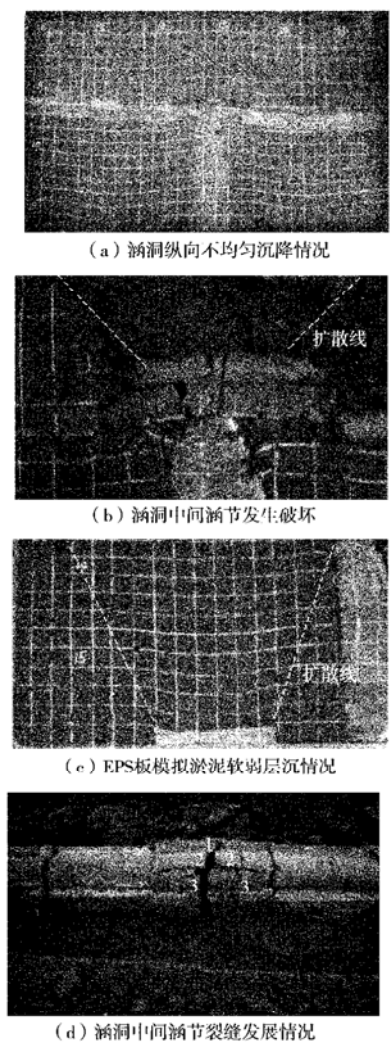


图7 涵洞纵向不均匀沉降病害特征
Fig. 7 Characteristics of distresses caused by differential settlement along longitudinal direction

的。因此可知,当土体中出现沉降突变不均匀情况时,均会以该突变点为“源点”,呈倒锥形向填土顶端逐级“传递”由下端产生的沉降,并把该点上产生的沉降量扩散到更大的面上,直至形成等沉面。据此,可以看到涵洞内外土柱并非与深度方向平行,而是呈锥形。另外由涵节裂缝发展过程可知,涵洞纵向不均匀沉降首先引起涵洞纵向结构破坏,然后才是涵洞横断面的结构破坏。

4 离心模型试验与实际依托工程对比

(1) 根据实测模型箱内各网格位移变化情况,绘出全局位移场变化,如图8所示(图中X、Y方向如图3(b))所示,虚线为各层土体变形前形态,各标志曲线对应变形后的实况)。与原型工程现场测试涵洞纵断面内壁顶部标高,如图9所示的沉降变形情况一致。

由离心模型试验和原型工程现场观测可以明显看到,在涵洞设计中应充分考虑涵洞基础下地基与地形的影响,尤其要注意处理高路堤中的山脊对涵洞基底的受力和沉降影响,施工中应保证填土沟底淤泥清除彻底,减小不均匀沉降。

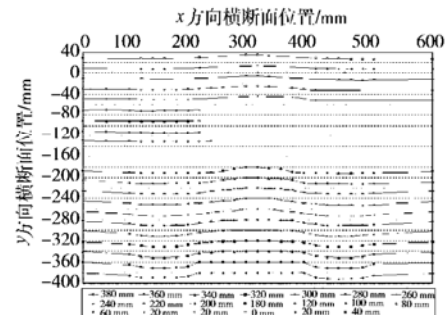


图8 拱涵纵断面全局位移场
Fig. 8 The displacement field on longitudinal section of arch culvert

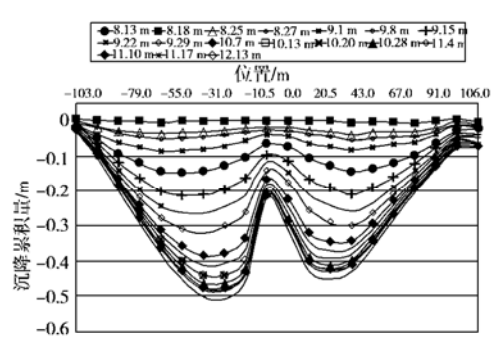


图9 原型工程现场测试涵洞纵向不均匀沉降曲线
Fig. 9 The longitudinal unequal settlement of culvert observed in the practical project

(2) 原型涵洞首次发现裂缝时,涵顶填土已达10 m;应用离心试验模拟,在加速度为60g、模拟填土高度为11.4 m时,首次出现较明显裂缝,此时涵洞结

构破坏原则符合相似规律。此外,原型涵洞中间涵节发生的裂缝形式与离心试验模拟结果一致。所模拟的病害模型在裂缝形式、裂缝发生位置、裂缝产生时间以及裂缝发展过程上与原型相符,所以通过离心试验模拟了原型涵洞发生病害的全过程。

5 结 语

(1) 利用离心模型试验模拟原型工程中的地形、地貌、地基情况,并与原型涵洞的病害表征拟合,分析了原型涵洞发生病害的主要原因,结果表明:离心模型试验能较好地模拟原型的实际情况。

(2) 通过模拟“原始山脊”和“软弱地基”,可以清晰的看到这些不利地形条件对涵洞结构的破坏过程。当土体中出现沉降突变不均匀情况时,以位移运动曲线的突变点为“源点”,呈倒锥形向填土顶端逐级“传递”由下端产生的沉降,并把该点上产生的沉降量扩散到更大的面上,直至形成等沉面。同时可以看到涵洞内外土柱并非与深度方向平行,而是呈锥形。另外由涵节裂缝发展过程可知,涵洞纵向不均匀沉降首先引起涵洞纵向结构破坏,然后才是涵洞横断面的结构破坏。

(3) 由离心试验分析填土、涵洞、地基共同作用结果可知,施工时在涵顶填土 4 m 以下主要控制机械碾压对涵洞结构产生的冲击损伤;涵顶填土 4 m 以上主要控制填土速度,使土体有效应力能足时增长,提高新填土体强度,保证新填土能与周围土体共同发挥作用,并使轻微的地基变形有充分的时间传递消散。

(4) 建议在进行涵洞设计时充分考虑涵洞基底的地形情况,如遇沟谷,应考虑涵洞走向与沟谷一致,避免原始山脊的不利受力情况出现;施工中应完全根据设计要求清除地基的软弱淤泥层,尽可能采用片石挤淤彻底,并在填土与片石间设置土工布,防止因地下水对下层填土的侵蚀而产生的不均匀沉降。

参考文献:

- [1] 谢永利,潘秋远,曾国熙.应用离心模型试验研究软基变形性状[J].岩土工程学报,1995,17(4):46 - 50. (XIE Yong-li, PAN Qiu-yuan, ZENG Guo-xi. Study on deformation behavior of soft clay ground with centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995,17(4):46 - 50.)
- [2] 包承纲.我国离心模拟试验技术的现状和展望[J].岩土工程学报,1991,13(6):92 - 97. (BAO Cheng-gang. The state and prospect of centrifugal model test in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991,13(6):92 - 97.)
- [3] 濮家骝.土工离心模型试验及其应用的发展趋势[J].岩土工程学报,1996,18(5):92 - 94. (PU Jia-liu. The civil centrifugal model test and its trend in development of utility[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996,18(5):92 - 94.)
- [4] 濮家骝,高汉棣.浅基础承载力离心模型试验研究[J].岩土工程学报,1988,10(6):1 - 17. (PU Jia-liu, GAO Han-yan. Study on bearing capacity of the shallow foundation with centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988,10(6):1 - 17)
- [5] MICHAEL O'Rourke, VIKRAM Gadicherla, TAREK Abdoun. Centrifuge modeling of buried pipelines[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 757 - 768.
- [6] HIROHISA Kamata, HIDETO Mashimo. Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: 205 - 212.
- [7] SHARMA J S, BOLTON M D. Centrifugal and numerical modelling of reinforced embankments on soft clay installed with wick drains[J]. Geotextiles and Geomembrances, 2001,9: 23 - 44.
- [8] 顾安全.上埋式管道垂直土压力的研究[J].岩土工程学报,1981,3(1):1 - 17. (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):1 - 17.
- [9] 顾安全,郭婷婷,王兴平.高填土涵洞(管)采用 EPS 板减荷的试验研究[J].岩土工程学报,2005,27(5):500 - 504. (GU An-quan, GUO Ting-ting, WANG Xing-ping. Experimental study on reducing-load measurement using EPS of culvert under high-stacked soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(5):500 - 504.
- [10] 冯忠居,顾安全.大型沟埋式管道侧向土压力的研究[J].西安公路学院学报,1995,1(1):27 - 30. (FENG Zhong-ju, GU An-quan. Study on the lateral pressure of large ditch conduct[J]. Journal of Xi'an Highway Transportation University, 1995,1(1):27 - 30.)
- [11] 周小文,濮家骝.隧洞结构受力及变形特征的离心模型试验研究[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(8):110 - 112,116. (ZHOU Xiao-wen, PU Jia-liu. Centrifuge model test study of the earth pressure and deformation of tunneling[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2001, 41(8): 110 - 112,116.)
- [12] 张云,殷宗泽.埋管隧道竖向地层土压力的研究[J].岩土力学,2001,22(2):184 - 188. (ZHANG Yun, YIN Zong-ze. Study on the vertical ground pressure of the buried tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 22(2): 184 - 188.)