

DOI: 10.11779/CJGE201604007

高填黄土明洞卸载结构土压力模型试验和数值模拟分析

李 盛¹, 马 莉², 王起才^{*1}, 李善珍¹, 李建新¹, 张延杰¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州工业学院土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 通过模型试验, 研究了高填黄土明洞不同卸载结构的土压力、土体位移随填土高度的变化规律。试验结果表明, 边坡的摩擦上提作用、低压实土产生的土拱效应以及土工格栅变形后的“提兜”作用均能够引起明洞顶土压力的减小, 其中, 低压实土+土工格栅卸载结构卸载率最大; 卸载结构不同, 明洞顶平面土压力分布规律不同, SY0 和 SY1 在 1 倍明洞宽度范围内的土压力近似为梯形分布, 大于 1 倍明洞宽度的土压力基本保持不变, 近似为均匀分布, SY2~SY5 明洞中轴线到 0.75 倍明洞宽度处, 土压力基本保持一致, 大于 0.75 倍明洞宽度的土压力呈先增大后减小的趋势。随后对试验过程进行了数值模拟分析, 两者结果较为吻合。最后探讨了土拱效应形成机理, 从而为高填明洞土压力卸载技术的进一步研究提供科学依据。

关键词: 高填明洞; 土压力; 土拱效应; 卸载措施

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)04-0636-07

作者简介: 李 盛(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事桥梁与隧道方面的教学与研究。E-mail: ligwin@126.com。

Model tests and numerical simulations of earth pressure for unloading structures of high fill open cut tunnel

LI Sheng¹, MA Li², WANG Qi-cai¹, LI Shan-zhen¹, LI Jian-xin¹, ZHANG Yan-jie¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Civil Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The influence laws of earth pressure and soil displacement for different unloading structures of high fill loess open cut tunnel with the increase of filling height are studied through the model tests. The results show that the friction resistance of slope, the soil arch effect of low compacted soil and the geogrid effect can reduce the earth pressure of the open cut tunnel, and the unloading rate of low compacted soil and geogrid is the largest. Under different unloading structures, the distribution law of earth pressure on the top of the open cut tunnel is also different. Within the scope of 1 times the width, the earth pressures of SY0 and SY1 are approximately in trapezoidal distribution. Within the scope of over 1 times the width, the earth pressures keep unchanged, and are approximately in uniform distribution. The earth pressures are basically consistent in the scope of the central axis to 0.75 times the width, and they increase at first and decrease later within the scope of over 0.75 times the width. Based on the numerical simulation analysis, the test and numerical results are basically identical. Finally, the formation mechanism of soil arch effect is discussed so as to provide a scientific evidence for further researches on the unloading technology of the earth pressure of the high fill open cut tunnel.

Key words: high fill open cut tunnel; earth pressure; soil arch effect; unloading measure

0 引言

西北黄土高原是中国也是世界上黄土分布最集中、覆盖厚度最大的区域。近年来, 由于西部经济发展的需要, 中国投入大量资金完善黄土高原地区交通网络。由于西北地区山大、沟多、平地少, 土地资源成为城市发展的最大瓶颈, 填沟造地虽暂时弥补了土地的稀缺, 但引起诸多问题, 其中之一就是明洞回填高度的增加。过大的土压力将对明洞结构安全产生极其不利的影响, 导致明洞结构病害的产生。因此, 对

于受沟谷地形限制的黄土高原地区, 陡坡填方明洞应该采取何种措施来减小明洞所受土压力, 对完善设计、指导施工、保证结构的正常使用具有极其重要的作用。

美国的 Marston、Spangler 等最早提出并验证了高填方结构的 ITI 卸载法, 即在涵洞(管)顶铺设可压

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT_15R29); 国家自然科学基金青年基金项目(51408289, 41402252)

收稿日期: 2015-02-08

*通讯作者

缩柔性材料进行土压力卸载^[1-2]; 随后, Larsen、Taylor 等通过模型试验, 得到柔性材料卸载效果明显, 进而显著提高涵顶填土高度^[3-4]; Dancygier 通过有限元研究了深埋结构顶部铺设柔性材料对结构–土相互作用的影响, 得出深埋结构顶部卸载效果最明显的柔性材料最佳铺设范围^[5]; 顾安全通过试验研究了在涵(管)顶与涵侧分别铺设不同厚度 EPS 板的减荷效果, 得到涵顶竖向土压力、涵侧水平土压力分别可减小约 1/2~2/3, 1/2^[6-7]; 杨锡武提出了加筋桥减载法, 并利用模型试验及有限元软件对此方法的有效性及影响因素进行了分析^[8-9]; 康佐利用离心模型试验对 EPS 板卸载后的涵周土体位移进行了观测, 结果表明, 当填土高度较低(5~10 m)时, EPS 板卸载效果不明显, 随填土高度增加, EPS 板产生明显变形, 才会起到卸载作用^[10-11]; 郑俊杰等对土工格栅卸载情况下的涵洞顶土压力计算方法进行了试验探究和理论推导, 并采用数值模拟进一步验证理论公式的准确性^[12-15]。

从以上资料可以看出, 国内外学者的研究主要集中在涵洞顶垂直土压力的卸载机制上, 而对黄土高原陡坡高填方明洞卸载措施研究不足。本文通过室内模型试验、数值模拟方法, 研究不同卸载方式下 70°边坡的高填明洞土压力及土体位移随填土高度的变化规律, 为沟谷地区陡坡高填明洞卸载结构设计、施工提供参考。

1 室内模型试验

1.1 试验简介

按照相似比例自制刚性圆拱形明洞模型, 填土模型槽边坡坡角为 70°、槽洞底宽 76 cm, 选用黄土进行分层填筑、压实, 研究不同减荷方式下, 高填明洞拱顶、拱脚土压力及土体位移的变化规律。

1.2 模型相似分析及试验装置

(1) 土压力的模拟相似分析

设模型与原型填土重度分别为 r_m , r_p , 填土高度分别为 h_m , h_p , 根据模拟相似理论, 要使模型与原型在对应点处的垂直土压力相似, 则必须满足

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{\gamma_m \times h_m}{\gamma_p \times h_p} = \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \times C_h = C_\sigma , \quad (1)$$

式中, C_h , C_r , C_σ 分别为模型的几何相似比、材料相似比和应力相似比。

根据弹性模型相似时制约各相似比的物理方程:

$$\frac{C_\sigma}{C_h \times C_r} = 1 . \quad (2)$$

在本次试验中取 $r_m=r_p$, 即模型材料与原型材料相同, $C_r=1$, 由此可得

$$C_\sigma = C_h \times C_r = C_h . \quad (3)$$

则模型与原型在对应点处的应力相似关系:

$$\sigma_m = C_\sigma \times \sigma_p = C_h \times C_r \times \sigma_p = C_h \times \sigma_p . \quad (4)$$

根据模拟相似分析与加载条件, 确定模型的几何相似比尺为 1/25, 最大模拟洞顶填土高度为 30 m。

(2) 试验装置

填土模型槽的尺寸为长 180 cm×宽 120 cm×高 150 cm, 前挡板采用透明有机玻璃板, 以便观测填土过程中土体位移的变化。为减小有机玻璃板与填土间摩擦作用对试验结果的影响, 试验前对有机玻璃板内表面涂抹黄油进行光滑处理。本次试验主要是针对高填明洞卸载结构土压力随填土高度变化规律, 因此对明洞制作材料不作要求, 明洞模型采用 C30 混凝土预制, 长度为 120 cm, 高度为 28 cm, 两拱脚距离 56 cm。如图 1 所示。



(a) 模型槽



(b) 明洞模型

图 1 模型图

Fig. 1 Model

1.3 接触条件及材料参数

(1) 接触条件

为保证模型边坡与土体接触面间的摩擦系数与实际工程相近, 对接触面混凝土表面进行凿毛处理。

(2) 材料

填土采用兰州地区典型黄土, 黄土最优含水率为 15.25%, 最大干密度为 1.58 g/cm³。受模型试验场地限制, 采用人工夯实, 根据预先的人工夯实效果试验, 确定回填压实度 K 为 85%。为保证低压实土变形层的变形效果, 低压实土压实度 K 取为 60%。其中: 85% 压实度下黄土重度 $\gamma=17.7$ kN/m³, 黏聚力 $c=31.1$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=28.3^\circ$, 压缩模量 $E=5.4$ MPa; 60% 压实

度下黄土重度 $\gamma = 13 \text{ kN/m}$, 黏聚力 $c = 21 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 18^\circ$, 压缩模量 $E = 0.2 \text{ MPa}$ 。

土工格栅采用型号为 TGSG25×25 经编涤纶土工格栅材料, 每延米纵横向拉伸屈力 $\geq 25 \text{ kN/m}$, 纵向标称伸长率 $\leq 15\%$, 纵向标称伸长率 $\leq 13\%$, 纵横向 5%伸长率时拉力 $\geq 17 \text{ kN/m}$ 。

1.4 试验方案

根据主要研究内容, 确定了6种试验方案。其中土工格栅在拱顶以上17 cm处开始布置, 间距15 cm。具体如表1、图2所示。

表1 试验方案

Table 1 Test schemes

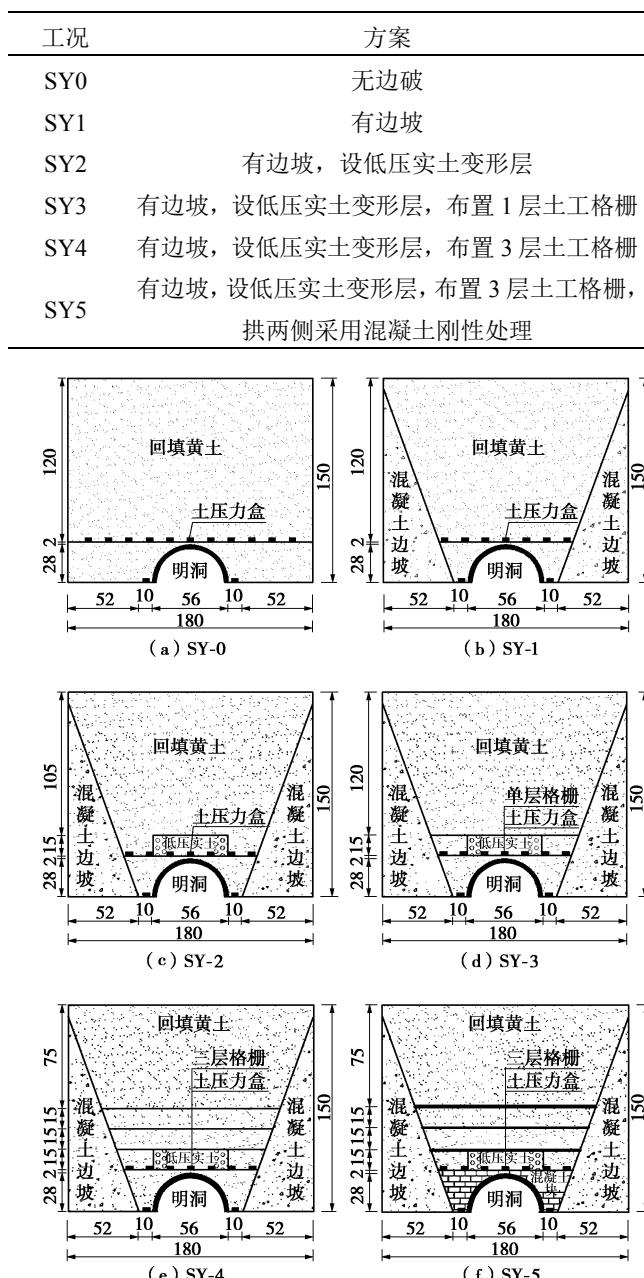


图2 模型试验方案布置图

Fig. 2 Arrangement of model test schemes



图3 土压力盒布置

Fig. 3 Arrangement of earth pressure cells

1.5 测点布置及测试

(1) 测点布置

为得到土压力变化规律, 沿明洞纵向布置6个土压力盒, 间距40 cm, 横向布置7个土压力盒, 间距10 cm, 在坡脚与明洞侧墙之间各布置1个土压力盒, 量程为100 kPa。详细布置见图2, 3。在土压力盒上、下两面各铺一层细砂, 以减少试验误差。在每层填土顶面与有机玻璃板接触处用石灰粉撒出一条白线, 通过观测白线与有机玻璃板上黑色填土线之间的距离变化, 实现位移的测量; 在明洞内安设机电百分表, 测试明洞自身在填土过程中竖向位移的变化。

(2) 土压力和位移测试

试验模拟实际明洞分层填筑过程, 拱顶以上填土高度为120 cm, 共8层, 每层15 cm。每层填土质量的确定采用体积法, 即根据85%的压实度和每层回填高度计算各层填土重量, 均匀摊铺后夯实达到设计高度。在每层填土达到设计高度时, 进行土压力、位移的测试和记录。

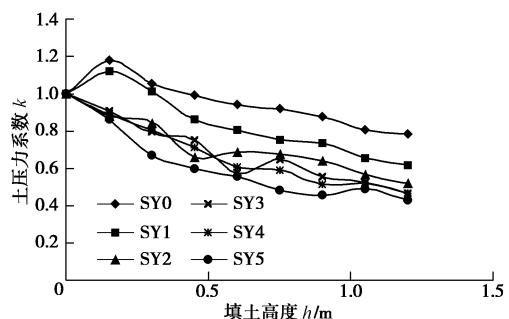


图4 明洞洞顶土压力系数随填土高度变化曲线

Fig. 4 Variation of coefficients of earth pressure on top of open cut tunnel with fill height

1.6 测试结果分析

(1) 明洞洞顶土压力系数

将不同试验方案下明洞洞顶拱冠一点处土压力(文中简称明洞洞顶土压力)测试结果除以土柱压力值 γh , 得到明洞洞顶土压力系数 k , 如图4、表2所示。

表2 不同方案明洞顶土压力系数

Table 2 Coefficients of earth pressure on top of open cut tunnel for different schemes

填土高度 <i>h/cm</i>	明洞顶土压力系数 <i>k</i>					
	SY0	SY1	SY2	SY3	SY4	SY5
0	1	1	1	1	1	1
15	1.29	1.12	0.89	0.91	0.89	0.86
30	1.06	1.02	0.85	0.79	0.80	0.67
45	0.99	0.86	0.66	0.75	0.72	0.60
60	0.95	0.81	0.69	0.58	0.61	0.55
75	0.92	0.76	0.68	0.65	0.59	0.48
90	0.88	0.73	0.64	0.56	0.51	0.46
105	0.81	0.66	0.57	0.53	0.52	0.49
120	0.79	0.62	0.52	0.47	0.46	0.43

分析以上试验数据可知:

a) 边坡的存在有利于明洞洞顶土压力的减小,且填土高度越大,边坡对减小明洞洞顶土压力的作用越显著。对比 SY0、SY1 明洞洞顶土压力系数变化曲线可得,在填土高度较低(30 cm, 模拟高度 7.5 m)时,两者土压力系数分别为 1.06, 1.02, 相差率为 3.77%;随着填土高度逐渐增加,两者土压力系数差值越来越大,在拱顶填土高度从 75 cm(模拟高度 18.75 m)增加到 120 cm(模拟高度 30 m)时,SY0、SY1 土压力系数相差率从 17.4%增大为 21.5%。这是由于明洞洞顶填土高度越高,边坡受土体作用力增大,与此同时,边坡对回填土体反向上托作用逐渐增强,边坡效应明显,有效的减小了实际作用在明洞洞顶的土压力。

b) 明洞回填过程中,明洞刚度大,回填土刚度小,这使得明洞回填过程中,明洞宽度范围内土体(内土柱)沉降变形小于明洞宽度范围外两侧土体(外土柱),内土柱接触面上将产生向下的剪切力,使明洞洞顶土压力产生应力集中。而通过在明洞顶设置低压实土变形层,改变土体相对沉降方向,从而减小作用在洞顶的剪切力甚至使剪切力作用方向发生改变,达到对明洞洞顶土压力卸载的作用。对比 SY2、SY1 明洞洞顶土压力系数变化曲线可得,填土高度较低时,SY2 的卸载效果明显,随着填土高度的增加,卸载率呈下降趋势。当填土高度为 15 cm(模拟高度 3.75 m)时,卸载率为 23.6%,当填土高度为 105 cm(模拟高度 26.25 m)时,卸载率为 8.4%,这是由于随着填土高度的增加,低压实土逐渐被压实,内外土柱沉降差减小的缘故。

c) 由于内外土柱的变形差,在低压实土变形层上方铺设土工格栅,使土工格栅发生向下变形产生拉力,从而将部分土压力传递至明洞两侧外土柱,可进一步起到卸载作用。由本文试验结果可知,铺设土工格栅对于明洞洞顶土压力的卸载有积极的作用,但卸载率不大,为 10%左右。对比 SY2、SY3、SY4 明洞洞顶土压力变化曲线可得,在填土高度较低(45 cm, 模拟

高度 11.25 m)时,三者相差不大;随着填土高度逐渐增加,三者的差值有一定增加,在拱顶填土高度达到 75 cm(模拟高度 18.75 m)和 120 cm(模拟高度 30 m)时,SY3、SY4 与 SY2 相差率分别从 4.0%, 12.3% 变到 11.0%, 11.8%。这说明随着填土高度的增加,逐渐被压实的低压实土无法继续为格栅的变形提供空间,使多层格栅无法全部发挥作用,卸载效果与单层基本相同。

d) 若明洞两侧采用压缩模量较大的材料填筑,对于采用低压实土+土工格栅卸载措施的实施有积极的作用。对比 SY2、SY4、SY5 明洞洞顶土压力变化曲线可得,三者的总体卸载趋势类似,但 SY5 卸载效果比 SY2、SY4 好。这是因为明洞两侧填料的高压缩模量减小了外土柱的沉降,而内土柱低压实土的存在使内外土柱相对沉降量增大,从而有利于将更多荷载转移到两侧土体中。

(2) 明洞顶平面土压力分布

不同试验方案下明洞顶同一平面土压力分布规律见图 5。

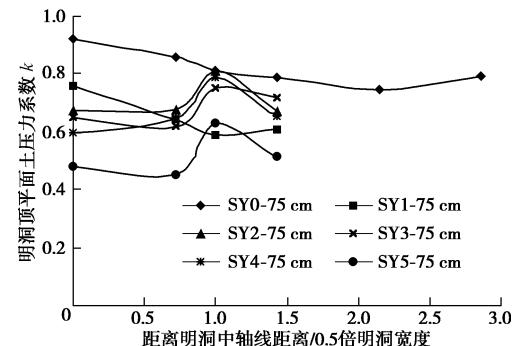


图 5 明洞顶同一平面土压力系数

Fig. 5 Variation of coefficients of earth pressure on same plane of open cut tunnel

由以上曲线可知,卸载方案不同,明洞顶同一平面土压力分布规律不同。对比 SY0、SY1 可得,两者整体变化规律相似,1 倍明洞宽度范围内的土压力系数逐渐减小,可以近似认为是梯形分布,而大于 1 倍明洞宽度处的土压力系数,由于受边坡的影响,呈下凹曲线变化,但相差率在 8%以内,基本趋于稳定,可视为均匀分布;对比 SY1、SY2、SY3、SY4、SY5 可得,SY2、SY3、SY4、SY5 由于明洞顶设置低压实土变形层改变了土体相对沉降方向,在虚实土接触附近土压力系数出现突变,明洞中轴线到 0.75 倍明洞宽度处,土压力系数基本保持一致,0.75~1 倍明洞宽度范围内,土压力系数呈上升趋势,大于 1 倍明洞宽度范围又逐渐减小。

(3) 明洞拱脚土压力系数

不同试验方案下明洞拱脚土压力系数结果见表 3, 拱脚土压力系数随填土高度变化曲线见图 6。

表 3 明洞拱脚土压力系数

Table 3 Coefficients of earth pressure on bottom of open cut tunnel for different schemes

填土高度/cm	明洞拱脚土压力系数 k				
	SY0	SY1	SY2	SY3	SY4
0	1	1	1	1	1
30	0.83	0.62	0.66	0.67	0.65
45	0.81	0.61	0.66	0.66	0.64
60	0.74	0.58	0.61	0.61	0.59
75	0.71	0.54	0.61	0.68	0.64
90	0.66	0.47	0.60	0.60	0.52
105	0.62	0.47	0.56	0.54	0.55
120	0.59	0.48	0.61	0.58	0.56
135	0.58	0.45	0.57	0.55	0.53
150	0.54	0.42	0.56	0.51	0.49

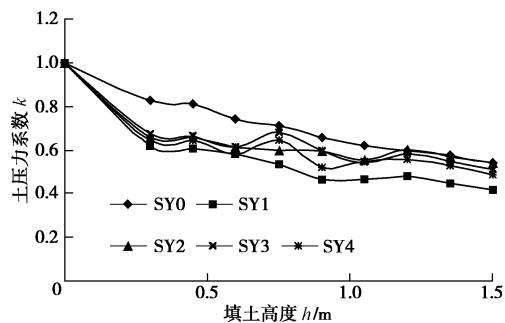


图 6 明洞拱脚土压力系数随填土高度变化曲线

Fig. 6 Variation of coefficients of earth pressure on bottom of open cut tunnel for different schemes

分析以上试验数据可知, 不同卸载方案的拱脚土压力系数均小于 1, 当填土高度为 150 cm 时, SY0~SY4 土压力系数分别为 0.54, 0.42, 0.56, 0.51, 0.49, 而 SY2、SY3、SY4 拱脚土压力大于 SY1, 说明卸载措施的实施使明洞顶部分土压力传递到拱脚, SY1 拱脚土压力系数小于 SY0, 这可能是由于边坡的上托作用对土压力向两侧的传递起到了分担的作用。

(4) 明洞顶平面位移

图 7 为 SY2 填土完成后明洞顶平面位移测试图, SY3、SY4、SY5 与此基本相似, 可以看出, 最大沉降基本发生在明洞顶, 约为 2.2 cm。而 SY0、SY1 通过试验观测可知, 明洞顶平面土体最大位移发生在 1.2 倍明洞宽度范围处, 约为 0.2 cm, 说明明洞顶低压实土的存在引起了土体沉降方向的改变; 机电百分表读数显示, 明洞结构自身变形位移很小, 基本可忽略不计。



图 7 明洞顶平面沉降变形图

Fig. 7 Displacement on same plane of open cut tunnel

2 数值模拟

2.1 有限元分析模型

本文采用有限元软件对明洞不同卸载方案进行模拟分析, 边界条件、结构尺寸、填料性质与试验模型相同。通过定义时间步的方法模拟分层填筑过程, 计算每个时间步的应力场、位移场。明洞、边坡、侧填混凝土块采用理想弹性材料模型; 黄土、低压实土采用莫尔-库仑理想弹塑性模型; 土工格栅采用锚索单元来模拟。边坡及明洞结构与填土的接触关系采用库仑摩擦定律实现, 即 $\tau_{\text{crit}} = \mu p$, τ_{crit} 为极限剪应力, μ 为摩擦系数, p 为法向接触应力; 土工格栅与土体两者间的相对位移和变形采用库仑滑动模型模拟, 通过设置格栅单元的耦合弹簧参数实现土工格栅与土体间的相互作用。各材料计算参数见表 4。

模型网格划分以平面四边形为主, 三角形为辅。模型两侧定义水平方向的边界约束, 底部定义水平和竖直方向的约束。

表 4 计算参数

Table 4 Parameters for calculation

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\phi/(\text{°})$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
填土	5.4	0.3	31.11	28.24	17.7
明洞	3×10^4	0.167	—	—	24
低压实土	0.2	0.4	21	18	13
边坡	4×10^3	0.3	—	—	22

注: 土工格栅 $EA=40 \text{ GPa}$

2.2 有限元结果与试验结果对比

为验证测试数据的可靠性, 以及揭示高填明洞卸载机制, 采用数值模型进行对比分析, 计算结果见图 8。对比两种方法得出的结果可知, 相对误差最大值为 12.8%, 总体来说, 各试验测试值和有限元计算值较为吻合, 表现出相似的规律, 卸载措施的实施确实使明洞顶产生了土拱效应, 减小了明洞顶土压力的增长。

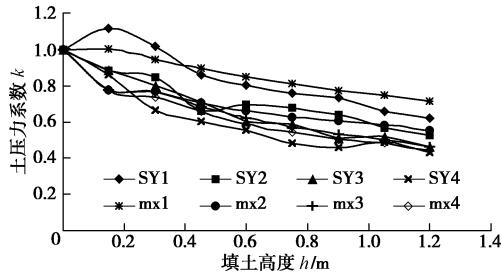


图8 数值模拟和模型试验明洞顶土压力系数变化曲线

Fig. 8 Variation of coefficients of earth pressure on top of open cut tunnel of numerical simulations and model tests

2.3 土拱效应分析

限于试验条件,模型试验无法准确监测填土过程中土体的土拱效应,本文采用数值模拟手段模拟计算高填明洞各个平面的应力、竖向位移,以此来说明土拱效应的产生。

图9~11分别为填土高度120 cm(模拟高度30 m)时,SY2土体位移、小主应力、竖向应力图。由图9知,由于低压实土变形层的存在,明洞顶13~62 cm填土范围内,内土柱沉降变形大于外土柱,且最大沉降差为0.13 cm,发生在明洞顶17 cm处。内外土柱沉降差引起土拱效应的产生,使土体应力发生调整,明洞顶部分土压力荷载传递到了相对不动的两侧土体上,明洞顶土层的小主应力形成一个非常明显的应力拱,如图10所示。

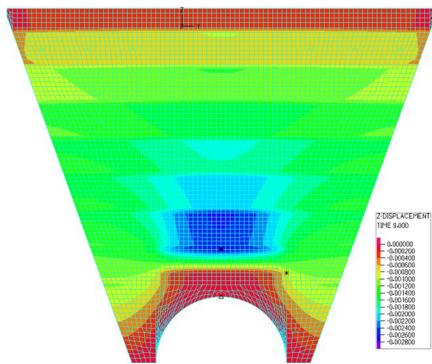


图9 SY2 竖向位移分布云图

Fig. 9 Distribution nephogram of vertical displacement

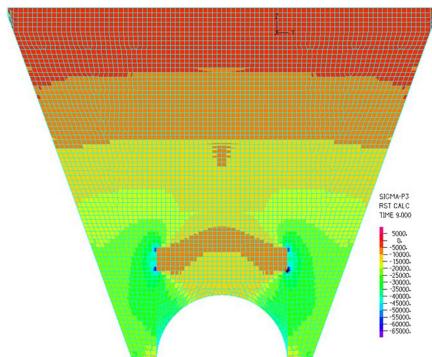


图10 SY2 小主应力分布云图

Fig. 10 Distribution nephogram of minor principal stress

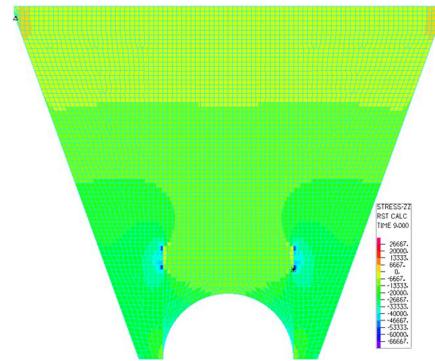


图11 SY2 坚向应力分布云图

Fig. 11 Distribution nephogram of vertical stress

应力拱的存在可承受明洞顶部分荷载,并将其转移到明洞两侧土体上,从而使得土体竖向应力在明洞顶变小,靠近明洞两侧处变大,明洞内外土柱竖向应力呈下凹的拱形分布,如图11所示。拱顶以上40 cm高度范围的外土柱竖向应力较内土柱大,内外土柱竖向应力差在内土柱低压实土与外土柱接触处达到最大,为28.6 kPa。

图12是SY1、SY2拱顶不同竖向高度处横向土压力的分布曲线,从图中可以看出,SY2从拱顶到填土顶面的横向土压力呈现先增大后减小的趋势,曲线形状像拱,在34 cm处横向应力最大,填土过程中确实有土拱效应产生。而SY1横向土压力一直处于减小的趋势,基本上没有拱效应。

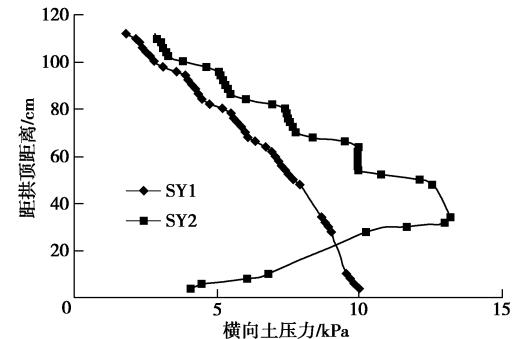


图12 SY2 拱顶不同高度处横向土压力分布曲线

Fig. 12 Horizontal distribution of earth pressure at different heights

3 结 论

本文通过室内模型试验,数值模拟研究不同卸载方案下,高填黄土明洞土压力及土体位移变化规律,主要结论如下:

(1) 设置边坡、低压实土、铺设土工格栅等不同卸载方案对减小高填黄土明洞土压力有积极作用。其中明洞顶设低压实土变形层后,拱顶位移变化明显,调整了应力分布,使明洞顶产生土拱效应,卸载率最大,可达23.6%; 低压实土上方土工格栅的铺设可进一步将卸载率提高10%左右,层数的选择依据低

压实土可提供的变形量及一层格栅最大变形量，以免造成格栅断裂或材料浪费。

(2) 不同卸载方案对高填黄土明洞顶平面土压力分布的影响不同。SY0、SY1 两者的整体变化规律相似，1 倍明洞宽度范围内的土压力逐渐减小，大于 1 倍明洞宽度处的土压力，由于受边坡的影响，呈下凹曲线变化，但相差率在 8% 以内，基本趋于稳定，可视为均匀分布；设置低压实土变形层改变了土体相对沉降方向，使 SY2、SY3、SY4、SY5 在虚、实土接触附近土压力出现突变，明洞中轴线到 0.75 倍明洞宽度处，土压力基本保持一致，0.75~1 倍明洞宽度范围内，土压力呈上升趋势，大于 1 倍明洞宽度范围又逐渐减小。

参考文献：

- [1] MARSTON A. The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments[C]// Highway Research Board Proceedings. Washington D C, 1930: 138 - 170.
- [2] SPANGLER M G. A theory on loads on negative projecting conduits[C]// Highway Research Board Proceedings. Washington D C, 1950: 153 - 161.
- [3] LARSEN N G, HENDRICKSON J G. A practical method for construction rigid conduits under high fills[C]// Highway Research Board Proceedings. Washington D C, 1962: 273 - 280.
- [4] SPANGLER M G. Induced-trench method of culvert installation[C]// Highway Research Record. Washington D C, 1973: 15 - 31.
- [5] DANCYGIER A N, YANKELEVSKY D Z. A soft layer to control soil arching above a buried structure[J]. Engineering Structures, 1996, **18**(5): 378 - 386.
- [6] 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. Experiment study on reducing-load measurement using EPS of culvert under high-stacked soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 500 - 504. (in Chinese))
- [7] 顾安全, 吕镇锋, 姜峰林, 等. 高填土盖板涵 EPS 板减荷试验及设计方法[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(10): 1481 - 1486. (GU An-quan, LÜ Zhen-feng, JIANG Feng-lin, et al. Load reduction tests and design methods for culverts with high fill soil using EPS slabs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(10): 1481 - 1486. (in Chinese))
- [8] 杨锡武. 山区公路高填方涵洞土压力理论及加筋减载研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004. (YANG Xi-wu. Research on the earth pressure theory and reinforcement load reduction for the culverts beneath high fill[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese))
- [9] 杨锡武, 张永兴. 山区公路高填方涵洞加筋桥减载方法及其设计理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(9): 1561 - 1571. (YANG Xi-wu, ZHANG Yong-xing. Study on the method and theory of load reduction by reinforcement bridge for the culvert beneath high filling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(9): 1561 - 1571. (in Chinese))
- [10] 康佐, 谢永利, 冯忠居, 等. 应用离心模型试验分析涵洞病害机理[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(6): 784 - 788. (KANG Zuo, XIE Yong-li, FENG Zhong-ju, et al. Studies on distress mechanism of culverts by centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(6): 784 - 788. (in Chinese))
- [11] 康佐, 谢永利, 杨晓华, 等. 减荷拱涵周围土体位移变化的离心模型试验[J]. 中国公路学报, 2006, **19**(6): 13 - 18. (KANG Zuo, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Centrifugal model test on displacement variation of earth surrounding reducing-load arch culvert[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, **19**(6): 13 - 18. (in Chinese))
- [12] 马强, 郑俊杰, 张军, 等. 高填方涵洞减载机制与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 1): 424 - 429. (MA Qiang, ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun, et al. Mechanism analysis and numerical simulation on load reduction for culvert beneath high filling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 424 - 429. (in Chinese))
- [13] 郑俊杰, 马强, 张军. 加筋减载涵洞的涵顶土压力计算[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(7): 1135 - 1141. (ZHENG Jun-jie, MA Qiang, ZHANG Jun. Calculation of vertical earth pressure on load reduction culverts under embankments by reinforcement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(7): 1135 - 1141. (in Chinese))
- [14] 马强. 高填涵洞受力特性及新型格栅卸载方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. (MA Qiang. Study on stress characteristics and load reduction by triax geogrid reinforcement for high embankment culverts[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese))
- [15] 马强, 郑俊杰, 张军. 高填方涵洞加筋减载的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 2337 - 2342, 2348. (MA Qiang, ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun. Experimental study of high embankment culvert treated by imperfect ditch covered with a geogrid layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2337 - 2342, 2348. (in Chinese))