

# 应用管涵处治桥路过渡段差异沉降研究

包龙生<sup>1</sup>,王 腾<sup>1</sup>,和海芳<sup>2</sup>,赵同宇<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 交通运输部公路科学研究院,北京 100088;  
3. 辽阳市城市管理事务服务中心,辽宁 辽阳 111000)

**摘 要** 目的 改善桥头跳车现象,增加行车的舒适性及安全性,延长桥梁使用寿命. 方法 拟定常规回填土处治方案和2种预埋不同管涵的改善处治方案,应用数值分析的方法,对比分析3种处治方案的桥路过渡段沉降变化,路面坡度,管涵的受力及变形. 结果 桥路交界处阶形高差由常规方案的8.88 cm经过2种改善方案预埋管涵处治,分别变为0.41 cm,2.99 cm,桥路过渡段工后坡度最大为1.97%,处治效果良好. 钢管应力最大值为168 MPa,管涵竖向变形最大,相对变形为0.4%,满足工程承载力及变形要求. 结论 在桥路过渡段回填区内预埋管涵,方案可行,桥头跳车现象处置效果良好.

**关键词** 桥路过渡段;差异沉降;桥头跳车;搭板脱空

中图分类号 TU 997;U449.7

文献标志码 A

## Differential Settlement of Bridge Transition Section with Culvert

BAO Longsheng<sup>1</sup>, WANG Teng<sup>1</sup>, HE Haifang<sup>2</sup>, ZHAO Tongyu<sup>3</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing, China, 100088; 3. Liaoyang City Management Service Center, Liaoyang, China, 111000)

**Abstract:** Improving bumping phenomenon at bridge head is of great significance to driving comfort and safety and prolonging the service life of bridges. The conventional backfill treatment scheme and two improvement treatment schemes of different pre-buried culverts are drawn up. Their settlement changes of bridge-road transition section, the gradient of road surface, the stress and deformation of culverts and pipes are compared and analyzed by numerical analysis method. After pre-buried pipe culvert treatment, the step height difference at the junction of bridge road changed from 8.88 cm of the conventional scheme to 0.41 cm and 2.99 cm of the two improvement schemes, respectively. The maximum slope of bridge-road transition section after construction was 1.97%. The treatment effect was good. The maximum stress of steel pipe is 168 MPa, and the

收稿日期:2018-01-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51078242);辽宁省自然科学基金项目(201602602);住房和城乡建设部科学技术项目(2016-K2-012);沈阳市科学技术基金项目(F16-095-1-00)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士,主要从事桥梁工程方面研究.

maximum vertical deformation of culvert is 0.4%, which meets the requirements of engineering bearing capacity and deformation. In the backfill area of bridge-road transition section, the pre-buried pipe culvert is feasible and the treatment effect is good.

**Key words:** Bridge transition section; differential settlement; bridge head jump; free board

桥头跳车是指高速行驶的车辆通过桥路过渡段时产生的颠簸跳跃现象. 产生桥头跳车的原因可归为两类<sup>[1-5]</sup>: 第一类为桥路过渡段的差异沉降, 在桥路过渡段处, 由于不利于大型机械压实, 回填材料在自身重力作用下发生固结沉降<sup>[6-8]</sup>, 基础受回填材料重力作用产生压缩变形<sup>[9-11]</sup>, 在桥路交界面台产生阶形高差, 在桥路过渡段形成显著纵坡, 导致桥头跳车; 第二类为桥路过渡段的刚度差, 车辆在通过刚度相差较大的两种路面结构时, 汽车产生不同的振动形式, 产生较大颠簸, 引起桥头跳车. 改善桥头跳车现象, 可增加行车的舒适性与安全性, 延长桥梁使用寿命<sup>[12-13]</sup>. 设置桥头搭板的方法可以减小路面刚度差异, 处治效果良好<sup>[14-17]</sup>, 但台后回填区沉降过大会导致桥头搭板脱空、断裂等病害, 加剧桥头跳车. 现有的处治方法有预压法<sup>[11]</sup>、设置桥头搭板<sup>[14-17]</sup>、换填法<sup>[18-21]</sup>、桥面加铺找平法、土工网法<sup>[22]</sup>等. 换填法将填土置换为自重较小的泡沫混凝土等材料, 维修成本较高, 工期较长; 桥面加铺找平法, 增大附加应力, 引起新的基础沉降, 维修频繁. 基于此, 笔者拟提出在桥路过渡段回填区内预埋钢管的处治方案, 通过减小基础附加应力, 以期达到改善桥路过渡段差异沉降的目的.

1 有限元模型

在桥路过渡段阶形回填区内横桥向(垂直于行车方向)预埋数根钢管, 对桥路过渡段沿行车方向进行竖向切割, 各竖切截面受力情况一致, 因此可将模型简化为平面模型. 为消除边界影响, 合理增大模型分析范围. 其中路堤填土厚 17.3 m, 路面厚 0.7 m. 基础由深至浅分别为 20 m 碎石土、4 m 圆砾土、8 m

黏土, 水位线位于圆砾层与黏土层交界处, 地基底面长 74 m. 对土体侧向约束 X 向位移, 底边约束 X、Y 向位移, 对桥台基础约束 X、Y 向位移. 其中 X 表示水平方向, Y 表示竖直方向. 模拟桥台桩基础, 对桥台侧向与填土接触采用面-面接触, 摩擦因数取 0.2. 常规回填土处治方案为 Plan0, 拟定 2 种不同预埋管涵的改善处治方案, 分别为 Plan1、Plan2. 其中在 Plan1 中预埋 3 根直径 6 m, 壁厚 3 cm 的 a、c、d 钢管, 2 根直径 3.6 m, 壁厚 3 cm 的 b、e 钢管; 在 Plan2 中预埋 12 根直径 3 m, 壁厚 3 cm 的钢管. 钢管与填土及桥台基础与填土采用绑定(tie)接触. 桥台后回填土的范围参照《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTG/T D31-02-2013)确定, 采用 1:1.5 阶梯形放坡. 将 plan1、plan2 两种处治方案与常规回填土 plan0 进行对比, Plan0 方案模型几何示意图如图 1 所示, Plan1、Plan2 方案有限元模型网格划分图分别如图 2、图 3 所示. 由于填筑和沉降伴随发生, 实际工程中需多填筑一定高度才能达到路面铺装层铺装所需的高度, 增加一定厚度的找平层来模拟实际填筑的高度, 找平层厚度  $h$  通过计算得出.

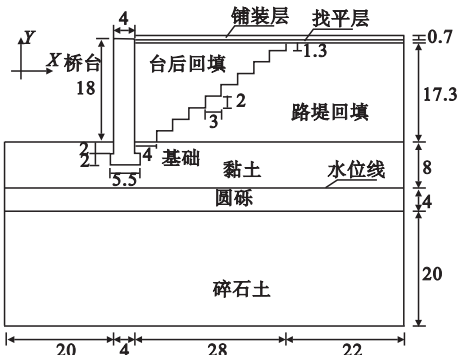


图 1 Plan 0 几何示意图

Fig. 1 Plan 0 geometric schematic

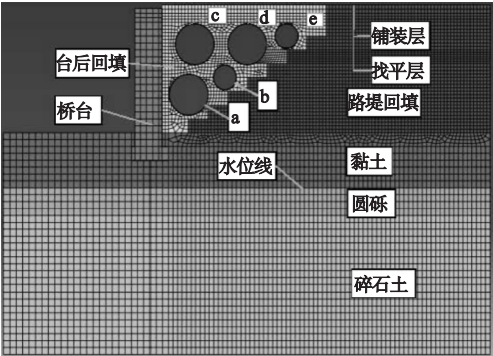


图2 Plan 1 网格划分图

Fig. 2 Plan 1 grid partition graph

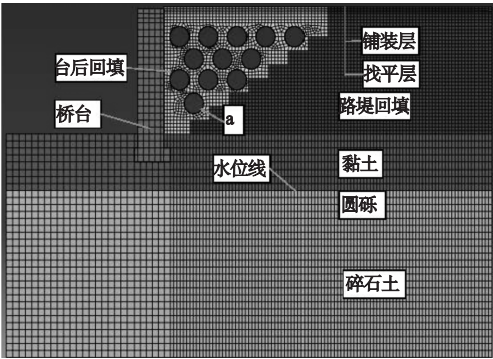


图3 Plan 2 网格划分图

Fig. 3 Plan 2 grid partition graph

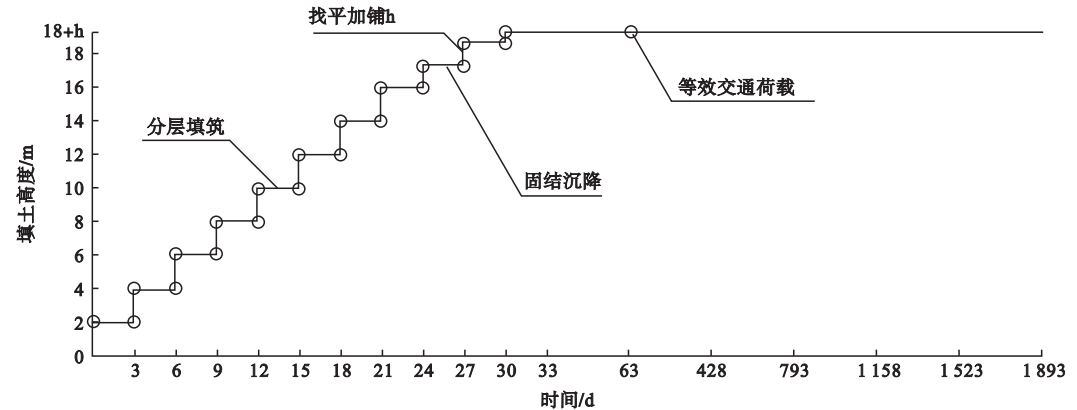


图4 加载历时曲线

Fig. 4 Loading duration curve

## 2 模型参数

根据不同构件的受力情况,采用不同的弹塑性本构关系.桥台混凝土、钢管及路面铺装采用线弹性模型,地基土层、台后回填土及

在数值分析中,结合分析步时间与单元生死功能来模拟分层填筑,共 11 层填筑.其中第 1 ~ 8 层每层填筑 2 m,第 9 层填筑 1.3 m,第 10 层填筑找平层,第 11 层为 0.7 m 厚路面铺装,每层填筑 1 d 施工期,2 d 间歇期.填筑完成后间歇 30 d,施加交通荷载模拟通车运营 5a.根据 J. S. Kim<sup>[23]</sup>研究成果,计算中交通荷载等效为 11.5 kPa 的均布荷载.找平层厚度计算方法为:分层填筑至 17.3 m 后,间歇 30 d,取桥台与台后填土交界面处填土顶点下降位移为找平层厚度.加载历时曲线如图 4 所示.

地应力是指土层在施加荷载前已存在的应力,是土层未受扰动情况下的天然应力.即只有在施加大于地应力的荷载情况下,土层才会发生变形.在初始分析步中,通过施加土体重力来实现初始地应力平衡.在后续计算分析步中采用土分析步,模拟土的固结沉降,分析步计算设置采用瞬态固结,每荷载步最大孔隙压力变化值为 20 ~ 60 kPa,随填筑的层数以 5 进行递增,计算采用直接非对称的方法进行计算.

路堤填土均采用 Drucker – Prager 本构模型,Drucker – Prager 模型的硬化规律采用剪切硬化曲线来确定.计算采用模型参数如表 1、表 2 所示.表 1 中  $\gamma_d$  为材料干密度; $E$  为材料弹性模量; $\mu$  为材料泊松比; $\beta$  为材料摩擦

角; $K$ 为材料三轴拉伸强度与三轴压缩强度之比; $\Psi$ 为材料剪胀角; $k$ 为材料渗透系数.

表 2 中  $\sigma_1$  为最大主应力轴; $\sigma_3$  为最小主应力轴; $\varepsilon_p$  为对应力值情况下的变形值.

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

材料类型	$\gamma_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/\text{kPa}$	$\mu$	$\beta/(^{\circ})$	$K$	$\Psi/(^{\circ})$	$k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	孔隙率
桥台混凝土	25	$2.34\times10^7$	0.15	—	—	—	$1.4\times10^{-9}$	0.05
台后回填土	20	$6.7\times10^4$	0.28	38.5	1	0	—	0.80
路堤填土	20	$6.7\times10^4$	0.28	38.5	1	0	—	0.90
黏土	20	$4.5\times10^3$	0.26	40.0	1	0	0.023 1	0.98
圆砾	20	$5\times10^4$	0.21	28.7	1	0	0.2	0.72
碎石土	12	$1\times10^5$	0.18	28.7	1	0	0.4	0.63
钢管	78	$2.1\times10^8$	0.30	—	—	—	—	—

表 2 Drucker – Prager 模型硬化参数

Table 2 Drucker-Prager model hardening parameters

台后填土		路堤填土		黏土		圆砾		碎石土	
$(\sigma_1 - \sigma_3)/$ kPa	$\varepsilon_p/\text{m}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/$ kPa	$\varepsilon_p/\text{m}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/$ kPa	$\varepsilon_p/\text{m}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/$ kPa	$\varepsilon_p/\text{m}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/$ kPa	$\varepsilon_p/\text{m}$
54.1	0.000	100.42	0.000	48.0	0.000	77.80	0.000	204.99	0.000
129.9	0.008	110.82	0.003	319	0.050	194.56	0.006	412.54	0.006
200.3	0.014	215.84	0.018	416	0.090	309.00	0.023	757.66	0.026
361.4	0.023	252.12	0.033	—	—	348.05	0.037	887.13	0.040
448.0	0.041	272.24	0.047	—	—	377.86	0.056	1 020.7	0.064
—	—	296.73	0.075	—	—	406.22	0.084	1 124.5	0.092
—	—	—	—	—	—	427.11	0.112	—	—

### 3 结果与分析

取台后填土与路堤填土的交界点作为沉降观测点,以 Plan0 为例,沉降观测结点 I、II、III 如图 5 所示.

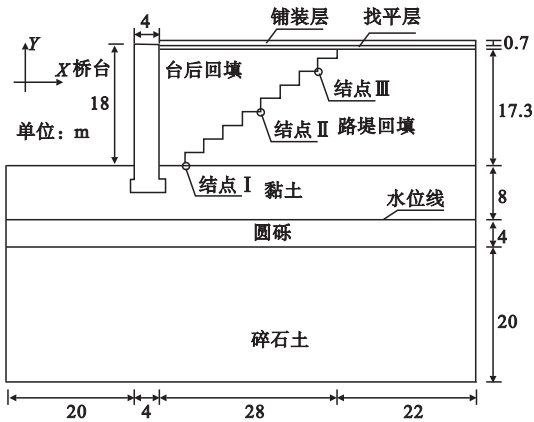


图 5 沉降观测结点

Fig. 5 Settlement displacement observation point

Plan1, Plan2 沉降观测结点位置不变. 取钢管横截面正八分外围结点 A、B、C、D、E、

F、G、H 点作为应力、变形观测点(见图 6).

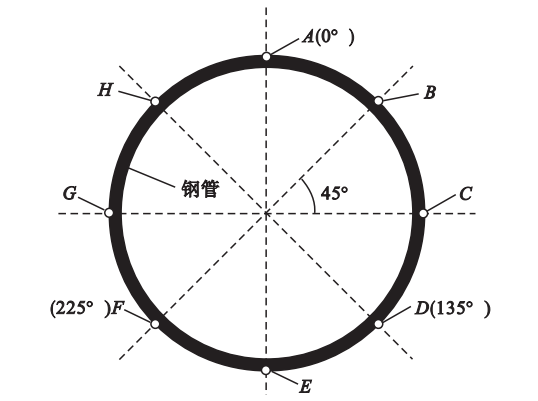


图 6 应力变形观测点

Fig. 6 Stress deformation observation point of steel tube

#### 3.1 找平层厚度

根据找平层厚度计算方法得各方案找平层厚度(见表 3). 通过预埋钢管处治, Plan1 找平层厚度减小 40%, Plan2 找平层厚度减小 45%. 应用管涵处治后明显减小了伴随填筑进行的沉降.

表3 找平层厚度

Table 3 Leveling thickness table

方案	找平层厚度/cm
Plan0	50
Plan1	30
Plan2	27.5

表4 沉降位移表

Table 4 Settlement displacement table

沉降观测点	位移/cm		
	Plan0	Plan1	Plan2
最大值点	-77.80	-72.90	-66.50
结点 I	-44.38	-26.72	-30.07
结点 II	-66.87	-54.34	-50.70
结点 III	-72.81	-63.54	-58.44

3.2 沉降分析

模型分析时间长度为1 893 d,根据计算结果,分析时长500 d时土层沉降固结完成,计算结果不再发生变化.500 d时3种方案竖向位移结果如表4所示.500 d时3种方案竖向位移云图如图7所示.沉降观测结点I、II、III历时沉降如图8所示.从图7、图8可以看出,Plan1、Plan2 相较 Plan0 沉降范围均有收缩,最大竖向位移均有减小,最大竖向位移点出现在远桥台侧的顶点处.由表4可以看出,应用管涵处治后台后最大沉降位移均有减小.由图8(a)可看出,50 d时完成了近90%的沉降,说明沉降主要发生在填筑回填土阶段.对比表4及图8中3种方案沉降观测点I、II、III 竖向位移.沉降观测点I改善效果最优,plan1 沉降减小40%,plan2 减小32%.沉降观测点III点改善效果最差,plan1 沉降减小12.7%,plan2 减小19.7%.沉降观测点I处对基础土层附加应力较小,对基础土层的压缩变形影响较小,沉降观测点III处对基础土层附加应力较大,对基础土层的压缩变形影响较大.说明附加应力的大小是影响基础土层沉降的关键因素.

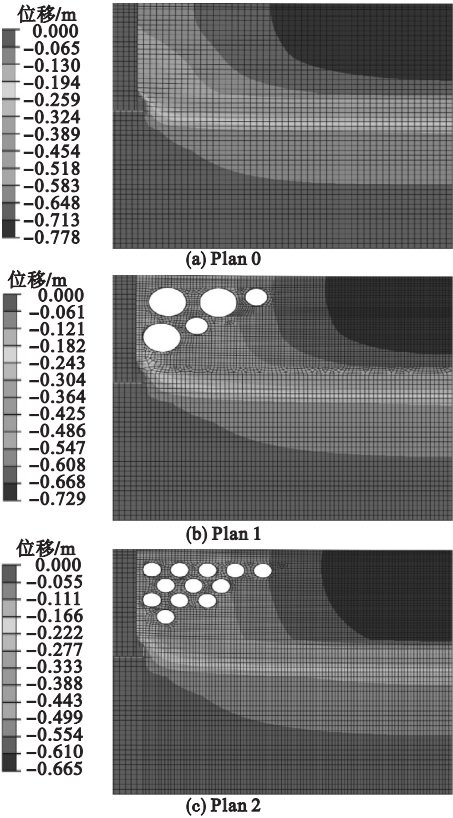


图7 竖向位移云图

Fig. 7 Vertical displacement cloud diagram

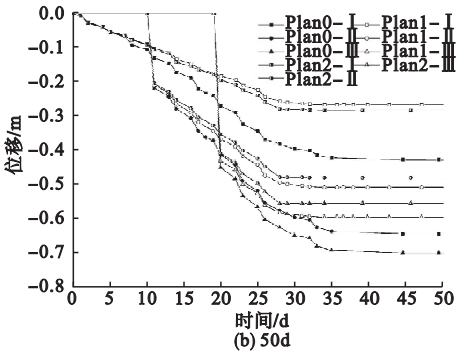
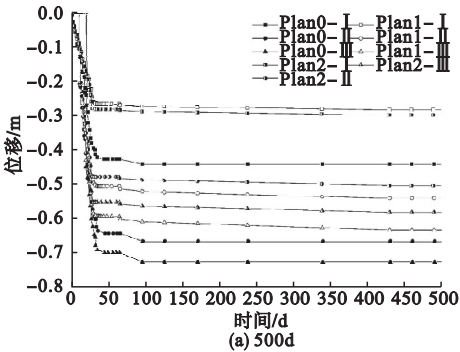


图8 观测点沉降对比图

Fig. 8 Settlement contrast curve of observation point



3.3 钢管应力分析

取 Plan1、Plan2 中受力最大的钢管进行应力分析(见图6)。根据计算结果,钢管

Plan1-a 受力最集中. 钢管 Plan1-a 应力观测点历时应力如图9所示,50 d 及 500 d 时应力观测点应力值如表5所示.

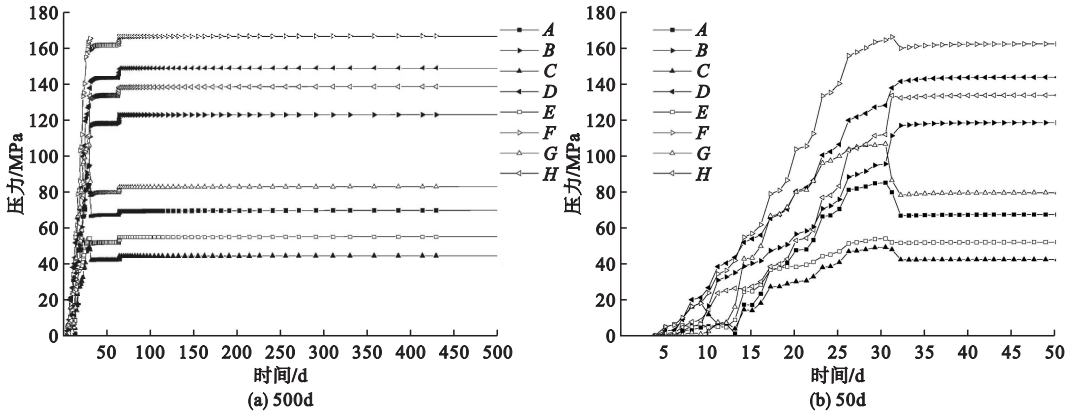


图9 钢管 Plan1-a 历时应力图

Fig. 9 Steel pipe Plan1-a diachronic stress curve

表5 钢管 Plan1-a 应力表

Table 5 Steel pipe Plan1-a stress meter

观测点	应力/MPa	
	50 d	500 d
A	67.6	70.2
B	118.8	123.5
C	42.6	45.0
D	144.1	149.9
E	52.3	55.3
F	162.7	168.0
G	79.8	83.3
H	134.1	139.0

从图9、表5可知,在50 d 时应力增长完成近90%,即钢管应力增长主要发生在填筑回填土阶段.对钢管应力观测点应力进行排序得: $\sigma_F > \sigma_D > \sigma_H > \sigma_B > \sigma_G > \sigma_A > \sigma_E > \sigma_C$ .其中F点应力值明显高于其他应力观测点,

E、C点应力值明显低于其他应力观测点.500 d 时,E点应力值为F点应力值的32.9%,C点应力值为F点应力值的26.8%,由此可以得出E、C点为钢管涵的应力松散区.B点应力为F点应力值的73.5%,D、H点应力均高于B点.钢管的应力集中点为F、D、H点,应力集中区为 $(225 \pm 15)^\circ$ 、 $(135 \pm 15)^\circ$ 、 $(315 \pm 15)^\circ$ 范围.

3.4 钢管位移及变形分析

3.4.1 水平方向位移及变形分析

选取 Plan1 进行变形分析.图10为钢管 Plan1-a 各观测点水平位移历时图,在填筑回填土阶段水平位移变化显著,50 d 时即完成了近90%的变形.钢管各观测点50 d 时水平位移如表6所示.钢管水平位移如图11所示.

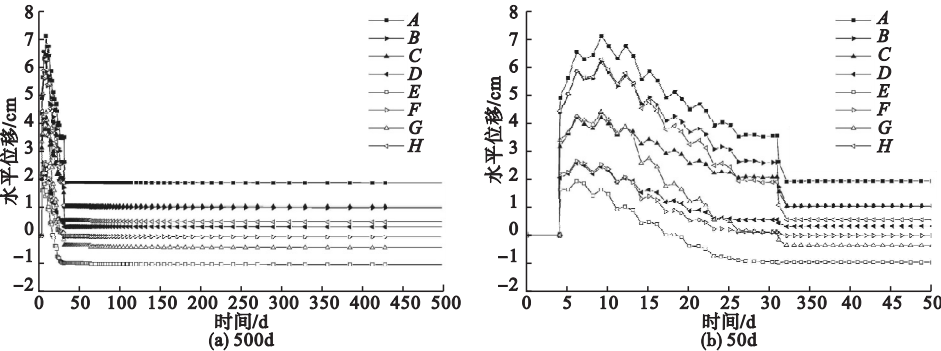


图10 Plan1-a 水平位移历时图

Fig. 10 Horizontal displacement diachronic curve of Plan1-a

表6 Plan1 水平位移表

Table 6 Horizontal displacement table of Plan1

钢管	水平位移/cm							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Plan1 - a	1.88	0.99	1.04	0.32	-1.02	-0.05	-0.44	0.49
Plan1 - b	2.56	1.99	1.08	0.13	-0.43	0.15	1.06	1.99
Plan1 - c	3.35	2.97	3.37	2.54	1.37	1.64	1.04	2.29
Plan1 - d	4.52	3.52	2.95	2.19	1.12	2.19	2.61	3.38
Plan1 - e	4.09	3.57	2.67	1.72	1.19	1.72	2.62	3.56

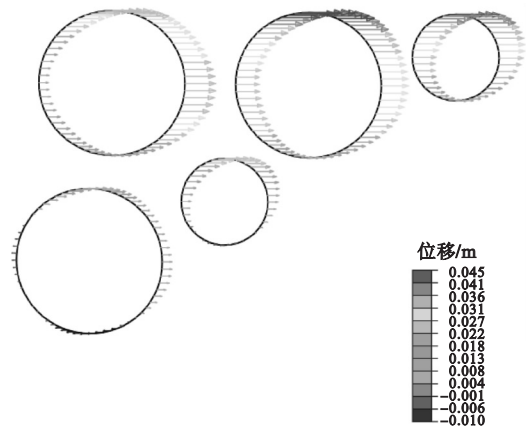


图11 Plan1 水平位移图

Fig. 11 Horizontal displacement diagram of Plan1

分层填筑完成后钢管 Plan1 - a, Plan1 - b, Plan1 - c 水平位移基本稳定. 由图 11 可知, 钢管随填土同时进行沉降运动, 上侧水平

位移较下侧较大, 右侧位移较左侧位移较大.

G 点和 C 点位移的差值可以反映钢管水平方向的变形量, 由表 6 计算可得, 钢管 Plan1 - c 的 G 点和 C 点位移的差值最大, 为 1.97 cm. 水平位移差值与钢管直径的比值可反映钢管的形变大小, 钢管 Plan1 - c 形变程度大小为 0.3%. 根据 W. R. Whidden<sup>[24]</sup>研究成果, 钢管变形程度在 5% 以内时, 钢管仍保持稳定. 水平方向变形满足工程变形要求.

3.4.2 竖向位移分析

图 12 为钢管 Plan1 - a 各观测点竖向位移历时图, 在填筑回填土阶段水平位移变化显著, 50 d 时即完成了近 90% 的变形. 钢管各观测点 50 d 时水平位移如表 7 所示, 钢管竖向位移图如图 13 所示.

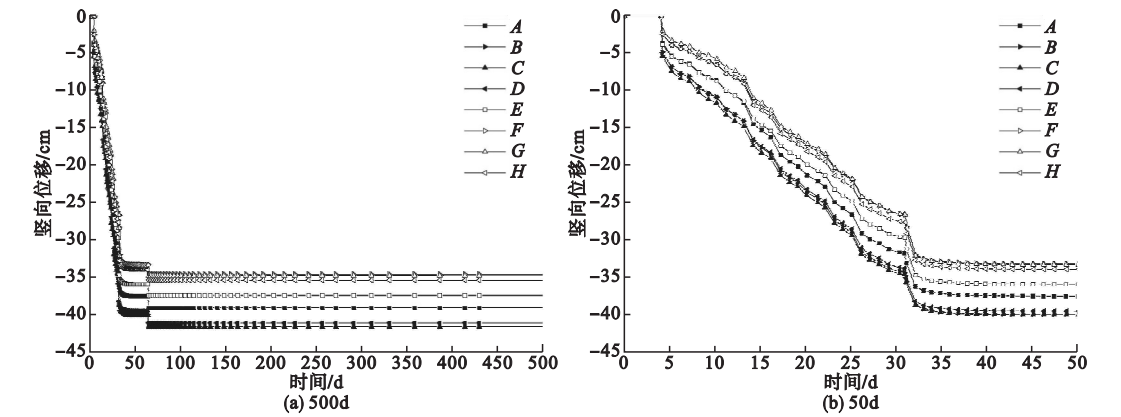


图12 Plan1 - a 竖向位移历时图

Fig. 12 Vertical displacement diachronic curve of Plan1-a

表 7 Plan1 竖向位移表

Table 7 Plan1 vertical displacement table

钢管	竖向位移/cm							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Plan1 - a	-39.15	-41.68	-41.74	-41.20	-37.48	-34.70	-34.81	-35.47
Plan1 - b	-45.06	-46.43	-46.82	-46.39	-44.99	-43.61	-43.22	-43.64
Plan1 - c	-42.50	-43.77	-43.64	-43.12	-40.24	-39.07	-39.35	-40.01
Plan1 - d	-52.25	-54.95	-55.27	-54.81	-51.82	-48.95	-48.68	-49.16
Plan1 - e	-59.51	-60.81	-61.19	-60.77	-59.43	-58.12	-57.73	-58.15

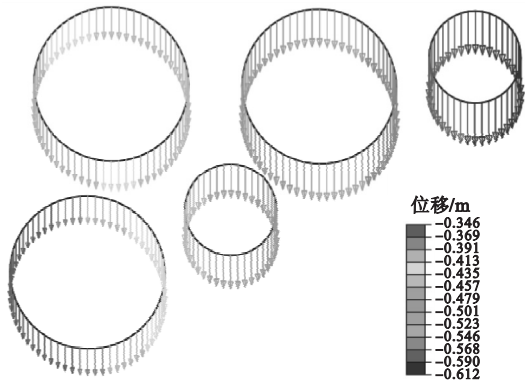


图 13 Plan1 竖向位移图

Fig. 13 Plan1 vertical displacement diagram

钢管竖向位移整体呈现为  $S_B$ 、 $S_C$ 、 $S_D > S_A$ 、 $S_E > S_H$ 、 $S_G$ 、 $S_F$ , 其中  $S$  表示位移, 即右半侧竖向位移大于左半侧位移, 与填土的沉降变形趋势相同。

A 点与 E 点位移的差值可以反映钢管竖直方向的变形量, 由表 7 计算可得, 钢管 Plan1 - c 的 A 点与 E 点位移的差值最大, 为 2.26 cm. 压缩变形值与钢管直径的比值可反映钢管的形变程度, 钢管 Plan1 - c 的竖向变形最大, 为 0.4%. 根据 W. R. Whidden<sup>[24]</sup> 研究成果, 钢管变形程度在 5% 以内仍保持稳定. 竖向变形满足工程变形要求。

3.5 处治效果分析

桥台顶面距初始地平面高为 18 m, 提取路面距桥台距离 0 m、5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m 点 500 d 时的实际高度, 绘制路面线点高度对比图(见图 14). 台阶形高差改善分析. 路面线 0 m 点与台背顶点的高差即为台背与填土的台阶形高差, 对比 3 种方案路面线与桥台高差. 默认桥台竖向位移微小,

忽略不计. 通过计算得, Plan0、Plan1、Plan2 桥路交界面高差分别为 8.88 cm、0.41 cm、2.99 cm. 通过应用预埋钢管处治, 显著降低了台后回填土与桥台的台阶形高差. Plan1、Plan2 结合工程中桥头搭板的使用, 可更好地解决桥路过渡段差异沉降及搭板脱空的病害. 随着距离桥头距离的增加, 路面沉降加大。

工后路面纵坡改善分析. 通过计算得 Plan0、Plan1、Plan2 路面线 0 m 点与 30 m 点高差分别为 15.9 cm、36.4 cm、30.7 cm, 对应纵坡分别为 0.53%、1.21%、1.02%. 其中, Plan1 中 5 m 点与 10 m 点高差最大, 高差值为 9.83 cm, 节段路面纵坡最大, 坡度值为 1.97%. 工后路面坡度满足《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2016) 对路面坡度的要求. 因此, 应用钢管处治后, 桥路过渡段台阶形高差明显减小, 工后路面纵坡满足设计要求, 桥头跳车现象处治效果良好。

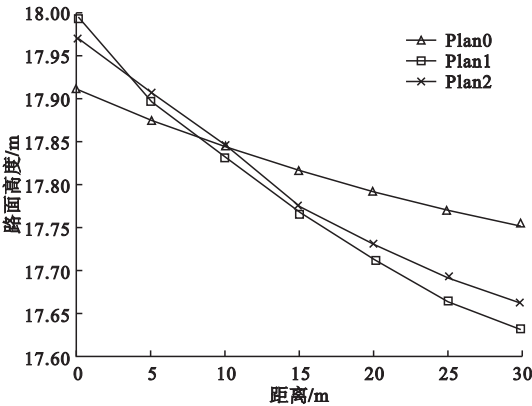


图 14 路面线点实际高度对比图

Fig. 14 The actual height contrast curve of the road point



## 4 结 论

(1)在桥路过渡段处预埋管涵,找平层厚度由常规填土方案的 50.0 cm 分别变为改善方案的 30.0 cm、27.5 cm,可以有效减小伴随填筑进行的沉降.工后沉降最大值由常规填土方案的 77.8 cm 分别变为改善方案的 72.9 cm、66.5 cm,可以有效减小工后沉降.

(2)埋深最深的钢管受力最大,应力集中区为  $(225 \pm 15)^\circ$ 、 $(135 \pm 15)^\circ$ 、 $(315 \pm 15)^\circ$  范围.应力值最大为 168.0 MPa,满足工程结构承载力的要求.钢管受力呈不对称形态,由于受桥台刚度较大的影响,钢管近桥台侧应力较大.

(3)钢管水平向变形为 0.3%,竖直向变形为 0.4%,钢管变形小于 5%,钢管保持稳定状态,变形满足工程要求.

(4)在桥路过渡段处预埋管涵,台阶形高差由常规填土方案的 8.88 cm 分别变为 2 种改善方案的 0.41 cm、2.99 cm,可以明显改善台阶形高差问题.台后路面纵坡最大为 1.97%.工后坡度满足道路设计坡度要求.应用管涵处治桥头跳车现象效果良好.

## 参考文献

- [1] 丁武洋,刘强,刘化学.桥头跳车原因分析、状况评定及处治技术探讨[J].路基工程,2014(3):17-21.  
(DING Wuyang, LIU Qiang, LIU Huaxue. Cause analysis, condition assessment and treatment techniques of bridge head jump[J]. Subgrade engineering, 2014(3):17-21.)
- [2] 吴福泉,王国华,廖碧海,等.公路交通桥头跳车成因探讨[J].工业安全与环保,2014(7):33-35.  
(WU Fuquan, WANG Guohua, LIAO Bihai, et al. Causes of vehicle bump at bridge head of highway traffic[J]. Industrial safety and environmental protection, 2014(7):33-35.)
- [3] 刘秀,冯德成,曹一翔.高等级公路桥头跳车原理分析与预防措施[J].森林工程,2014,30(6):94-97.

(LIU Xiu, FENG Decheng, CAO Yixiang. Principle analysis and preventive measures of vehicle jumping at bridge head of high-grade highway[J]. Forest engineering, 2014, 30(6): 94-97.)

- [4] 张永清.山区高速公路路基差异沉降特性与控制措施研究[D].西安:长安大学,2009.  
(ZHANG Yongqing. Study on differential settlement characteristics and controlling measure of expressway in mountain area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.)
- [5] 俞永华.路桥过渡段差异沉降处治技术研究[D].西安:长安大学,2004.  
(YU Yonghua. Study on technique of treatment for differential settlement at the transition between the bridge abutment and embankment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.)
- [6] 徐明,宋二祥.高填方长期工后沉降研究的综述[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(6):786-789.  
(XU Ming, SONG Erxiang. A review of the study on long-term post-construction settlement of high fill [J]. Journal of tsinghua university (science and technology), 2009, 49(6): 786-789.)
- [7] 姚仰平,刘林,王琳,等.高填方地基的蠕变沉降计算方法[J].岩土力学,2015,36(增刊1):154-158.  
(YAO Yangping, LIU Lin, WANG Lin, et al. Calculation method of creep settlement of high fill foundation [J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(S1):154-158.)
- [8] 刘萌成,黄晓明,陶向华.桥台后高填方路堤工后沉降影响因素分析[J].交通运输工程学报,2005(3):36-40.  
(LIU Mengcheng, HUANG Xiaoming, TAO Xianghua. Analysis of influencing factors of post-construction settlement of high embankment behind abutment [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2005(3): 36-40.)
- [9] 孙昊月.堆载预压法处理软土地基沉降量预测研究[D].长春:吉林大学,2010.  
(SUN Haoyue. A research on prediction settlement of soft soil foundation consolidated by means of preloading [D]. Changchun: Jilin University, 2010.)
- [10] 陈保国,骆瑞萍,徐颖.软土地基上高填方刚

- 性涵洞地基承载力分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 353-358.
- (CHEN Baoguo, LUO Ruiping, XU Ying. Bearing capacity analysis of high fill rigid culvert foundation on soft soil foundation[J]. Rock and soil mechanics, 2013, 34(2): 353-358.)
- [11] 李欢, 陈磊, 安海平, 等. 软土地基处理中换填厚度的优化研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2012, 29(2): 16-19.
- (LI Huan, CHEN Lei, AN Haiping, et al. The research on the thickness of replacing in dealing with the soft foundation[J]. Journal of Hebei university of engineering(nature science edition), 2012, 29(2): 16-19.)
- [12] 胡思涛, 项乔君, 朱艳茹. 高等级公路桥头跳车对行车安全的影响评价[J]. 交通信息与安全, 2013(2): 79-82.
- (HU Sitao, XIANG Qiaojun, ZHU Yanru. Impact assessment of high-grade highway bridge head jump on traffic safety[J]. Journal of transport information and safety, 2013(2): 79-82.)
- [13] 潘晓东, 杜志刚, 杨晓光. 桥头跳车对行车安全影响评价指标的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006(5): 634-637.
- (PAN Xiaodong, DU Zhigang, YANG Xiaoguang. Study on the evaluation index of the impact of jumping at bridge head on traffic safety[J]. Journal of tongji university(natural science), 2006(5): 634-637.)
- [14] SHARMA J S, BOLTON M D. Centrifugal and numerical modeling of reinforce embankments on soft clay installed with wick drains[J]. Geotextiles & geomembranes, 2001, 19: 23-44.
- [15] 贺勇, 张学钢, 薛晓辉. 桥头跳车柔性搭板数值模拟分析[J]. 勘察科学技术, 2011(1): 28-31.
- (HE Yong, ZHANG Xuegang, XUE Xiaohui. Numerical simulation analysis of bumping at bridge-head of flexible slab[J]. Survey science and technology, 2011(1): 28-31.)
- [16] CAI C S, SHI X, VOYIADJIS G Z, et al. Structural performance of bridge approach slabs under given embankment settlement[J]. Journal of bridge engineering, 2005, 10(4): 482-489.
- [17] ROY S, THIAGARAJAN G. Nonlinear finite-element ansysis of reinforce concrete brigde approach slab[J]. Journal of bridge engineering, 2007, 12(6): 801-806.
- [18] 孙筠. 已建软基桥梁桥头跳车的处治方法机理分析及试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- (SUN Yun. Mechanism analysis of the methods for treating vehicle bumping at bridge approach built in soft foundation and experimental study [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.)
- [19] 谢洪涛, 杨春和. 使用轻质填料处理桥头软基的设计方法探讨[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 173-177.
- (XIE Hongtao, YANG Chunhe. Discussion on design method of soft embankment disposal with lightweight material[J]. Rock and soil mechanics, 2003, 24(2): 173-177.)
- [20] HORIUCHI S, KAWAGUCHI M, YASUHARA K. Effective of high fly ash slurry as fill material[J]. Journal of hazardous materials, 2000(76): 301-337.
- [21] KEARSLEYA E P, WAINWRIGHTB P J. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete[J]. Cement & concrete research, 2002, 31: 105-112.
- [22] HAN J, GABR M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of geotechnical & geoenvironmental engineering, 2002, 128(1): 44-53.
- [23] KIM J S, BARKER R M. Effect of live load surcharge on retaining walls and abutments[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2002, 128(10): 803-813.
- [24] WHIDDEN W R. Buried flexible steel pipe: Design and structural analysis[M]. Virginia: American society of civil engineers, 2009.
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)