

横向加筋注浆技术防治高速公路桥头跳车技术研究

刘建敏

(石家庄市西柏坡高速公路管理处, 河北 石家庄 050081)

摘要:基于“刚柔过渡”形变原理,研发横向加筋注浆技术,以西柏坡高速公路 BP1+942 冶河大桥 0 号台为工程背景,借助通用有限元分析软件 MIDAS/GTS 建立三维立体模型,对经过横向加筋注浆处理后的桥头路基在不同工况情况下进行模拟计算,研究加筋材料不同横、竖间距布置对桥头路基过渡段路基沉降及不同深度水平位移的影响,探寻加筋材料的合理布置方式并进行优化,为施工提供理论依据和参考。分析研究了横向加筋注浆技术的施工参数,并采用该技术对西柏坡高速公路 BP1+942 冶河大桥 0 号台背进行了处治。选用面波波速测试法对横向加筋注浆试验加固效果进行了检测,并继续对实际处理效果进行了长期的跟踪观测,验证了实际检测与有限元模拟结果的相似性,证明了数值模拟的合理性,论证了横向加筋注浆技术对防治桥头跳车的有效性。

关键词:桥梁工程;横向加筋注浆技术;有限元模拟;桥头跳车;波速测试

中图分类号:U445.7+1 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)04-0039-09

0 引言

从近十万公里已通车的高速公路运营状况来看,有一些急需解决的问题,其中之一就是桥头跳车。国内外对桥头跳车的研究已取得了一定的成果,已有采用加筋、注浆技术防治高速公路桥头跳车的实践与研究。中交第一公路勘察设计研究院有限公司开发了防止桥头跳车的刚柔过渡结构,包括路面、路堤、复合地基、承台、桥台桩基、一般路堤和桥台。中南大学赵炼恒通过采用柔性加筋注浆技术处理台后回填土。成都理工大学左乾坤论述了注浆技术在处理桥背沉降中的应用。东北林业大学姜利用 ABAQUS 有限元法对利用双向土工格栅加筋桥头路堤进行研究。本文从全新的角度提出横向加筋注浆处治技术,即在台后填方路基中沿轴向或横向分层、成排打入一定长度的注浆锚杆,然后增压注浆,使浆液填充路基中未填充或未压实的孔隙,得以形成轴向或横向注浆加筋体,并用有限元分析软件 MIDAS/GTS 进行模拟计算并确定加筋注浆参数,从而显著增强桥头路基的抗变形能力,大大降低台后路基的工后沉降,并使高速公路桥头跳车、桥台路面开裂破坏、桥台正侧面支挡构造物损坏等问题得到有效控制。

1 横向加筋注浆技术有限元模型建立

以西柏坡高速 BPK1+942 冶河大桥 0 号台为工程背景,借助通用有限元分析软件 MIDAS/GTS 建立三维立体模型。

1.1 本构关系

土体的本构关系从所建模型要实用的角度考虑,土体的本构关系选用 Mohr-Coulomb 模型^[1],土工合成材料采用线弹性的本构关系,对加筋注浆后所形成的复合土体接触面单元进行模拟时,采用的是 Midas

收稿日期:2014-09-10 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2015.04.08

作者简介:刘建敏(1968-),男,高级工程师,主要从事道路与桥梁的研究。E-mail: hbljm666@163.com

基金项目:河北省交通运输厅计划项目(T-2010141)

刘建敏. 横向加筋注浆技术防治高速公路桥头跳车技术研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2015, 28(4): 39-47.

软件中的二维接触单元,这种单元与 Goodman 单元相似,但是比 Goodman 单元的功能更强大^[1]。

1.2 应力与位移边界条件

(1)边界条件假设。在 MIDAS/GTS 平台基础上,为了在有限元分析中更好地反映问题的主要特征并使问题简化,在有限元分析时作了以下假定:①假定土体、注浆锚杆均为均质、各向同性材料;②假定土体(包括地基和路基土)为理想弹塑性体;③假定注浆锚杆为线弹性体。

(2)应力和位移边界条件。应力边界条件:地基土在其自重作用下的沉降已经完成;路基土经锚杆注浆加固后已充分压实,其固结沉降基本完成,所以只作为路基荷载作用在地基土层上^[1]。位移边界条件:路基底部施加的是垂直与水平约束,路基两侧施加的是水平约束^[1]。

1.3 有限元模型建立

以西柏坡高速 BPK12+885 冶河大桥 0 号台为工程背景,经过现场勘察和试验,模拟工程现场条件,在综合分析并适当简化的基础上,建立了合理的有限元三维立体计算模型。根据西柏坡高速公路的设计,沿行车方向选取 30 m,建立三维有限元模型。路基高度为 12 m,顶部宽度 24.5 m,路基边坡坡度为 1:1.5^[2]。路基纵横断面如图 1 所示,有限元模型如图 2 所示。

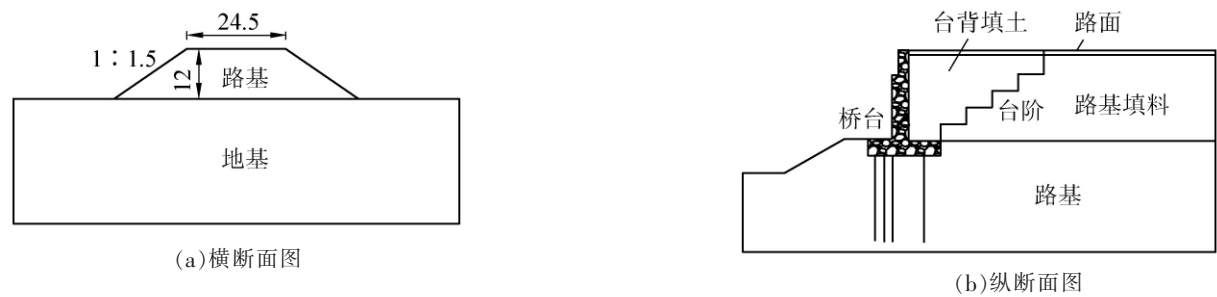


图 1 路基横、纵断面图(单位:m)

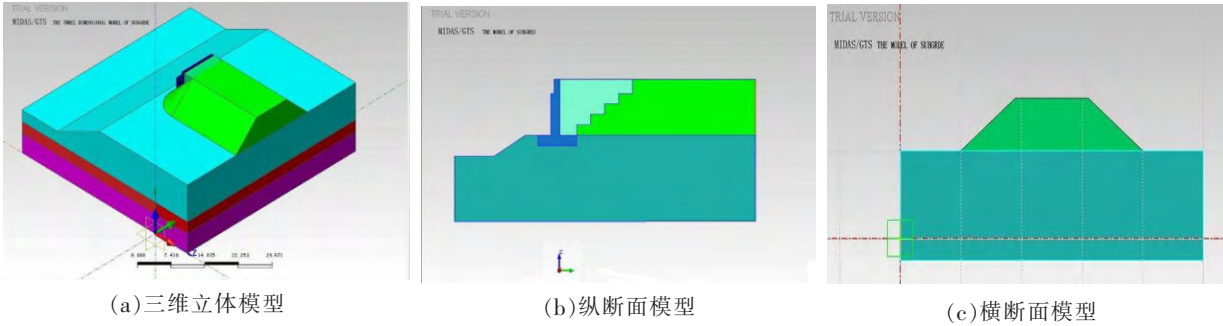


图 2 路基模型

1.4 模型计算参数的选取

技术人员进行了现场踏勘,从地层揭露情况来看,表层覆盖着少量黄土状粉土,表层以下是承载力较好的砂层、泥岩层;采集了西柏坡高速公路施工材料、岩土体样本,测定了具体材料的物理力学指标(如表 1 所示)。路基填料、基岩、加筋注浆体材料都考虑为完全弹塑性材料,台背考虑为刚度很大的弹性体,在荷载作用下,变形量极小^[3-5]。

表 1 材料物理力学指标表

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^3)$	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\Phi/(^{\circ})$	法向刚度/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	切向刚度/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$
桥台	2 500	0.18	25	—	—	—	—
泥岩	100	0.35	24	50	40	—	—
砂层	150	0.30	25	40	50	—	—
锚杆	200 000	0.25	78	—	—	—	—
路基填料(注浆前)	40	0.30	19	15	35	—	—
路基填料(注浆后)	68	0.25	20	30	40	—	—
接触单元参数	—	—	—	—	—	1×10^7	1×10^4

1.5 荷载的设定

据现行规范,公路工程设计中的汽车荷载为:公路-I级荷载和公路-II级荷载,公路-I级荷载适用于高速公路和一级公路,公路-II级荷载适用于二、三、四级公路。本工程为高速公路,采用公路-I级荷载,并在计算模型中将集中荷载换算为均布荷载,将路面结构层的自重也作为均布荷载,并考虑荷载冲击系数0.45,通过计算,最终施加在路基上表面的荷载为0.05 MPa,布置方式见图3^[3-5]。

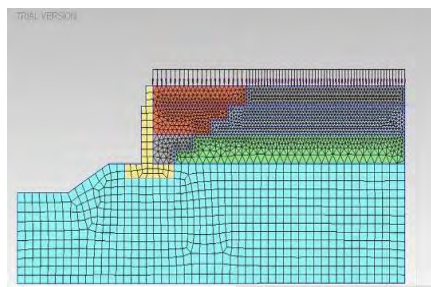
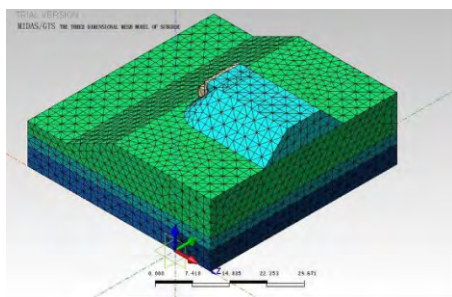


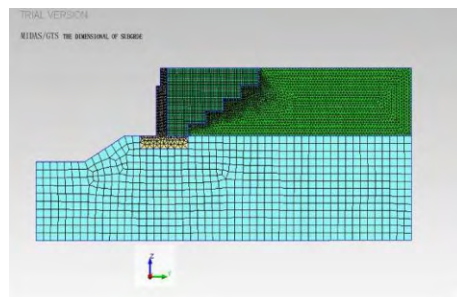
图3 均布荷载布置方式

1.6 网格的划分

本研究使用GTS软件中的“自动网格划分”功能,该功能使用循环网格法生成网格,根据地基、路基、桥背等不同材料的划定区设定网格的数量,也可以直接指定网格尺寸。这种方法快捷方便,可划分出优良的网格,提高建模效率和计算精度,省去了手工建立网格的麻烦^[6]。网格划分后路基的有限元模型如图4。



(a) 三维网格模型



(b) 纵向网格模型

图4 路基网格模型

2 横向加筋注浆技术处治效果模拟

沿路基高度方向,锚杆分层布置,第一层锚杆距离路基顶部为 $h_0=2$ m,锚杆层间距为 Δh ,加筋层数为 n ,其中 n 和 Δh 根据不同的计算情况变化;锚杆横向间距 Δl 原则上取0.5~2 m;锚杆外径48 mm,壁厚5 mm,采用八结点等参元模拟土体单元;采用薄膜单元模拟加筋体材料;用接触单元模拟土与加筋材料之间的接触^[6-7]。

治河大桥0号桥台为桩承式桥台,桥背回填最大高度为12 m,本有限元数值模拟考虑了两种类型的模型,模拟分析各自工况下的路基和台背填料的沉降情况。

(1) 桥台后填料原设计情况下,正常填筑。

(2) 采用不同间距加筋注浆处理。

2.1 填料正常填筑

桥台后填料正常填筑的情况下,只需要考虑路基及台背填料的自重和车辆荷载的作用即可。数值模拟结果以 z (垂直)方向的沉降量表示。治河大桥台背原设计情况下的路基沉降模拟结果如图5所示。路基中线沿行车方向的沉降曲线如图6所示。

以上数值模拟的结果可以看出:

(1) 按原设计桥背回填时,沉降量较大,沿路线方向沉降曲线近似呈“勺”状分布,最大沉降量约为13 988 cm。

(2) 沉降集中在“勺”口中心附近,而靠近桥背附近的“勺”口边缘和“勺”柄端相对沉降量较小。经分析,台背对台后路堤填土的竖向摩擦约束导致了“勺”口边缘沉降量减小,台后长路基由于得到有效地压实,沉降逐渐减小并趋于一稳定值,而台后路堤与长路基的衔接过渡段施工中开台阶处理导致了沉降有一渐变段。

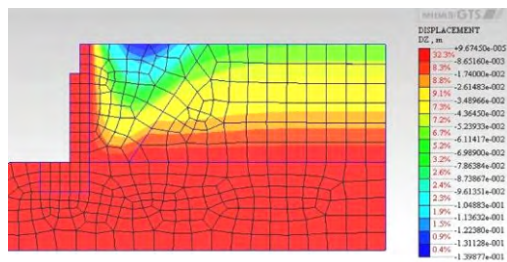


图 5 台背路基沉降模拟结果图

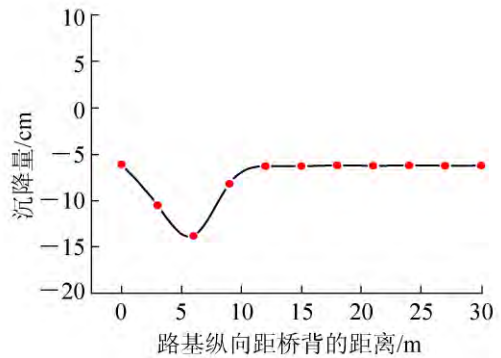


图 6 路基中线沉降量曲线图

2.2 采用加筋注浆处理

2.2.1 加筋注浆对路基沉降的影响作用

加筋注浆处理桥头路基,可以明显提高台后路基的整体性,增强其稳定性,从而改善路基的受力性能,显著降低路基的工后沉降。

建立有限元离散模型分析研究注浆锚杆间距对路基沉降的影响,横向间距分别采用 $\Delta l=1\text{ m}$ 、 $\Delta l=1.5\text{ m}$ 、 $\Delta l=2\text{ m}$ 、 $\Delta l=2.5\text{ m}$ 四种方式来布置,竖向层间距采用 $\Delta h=3\text{ m}$,共布置 4 层注浆锚杆。通过有限元计算分析以上间距对台背路基填土的沉降量、土的横向位移的影响。注浆锚杆各布置间距下,路基沉降图如图 7 所示,路基中线沿行车方向的沉降曲线如图 8 所示。

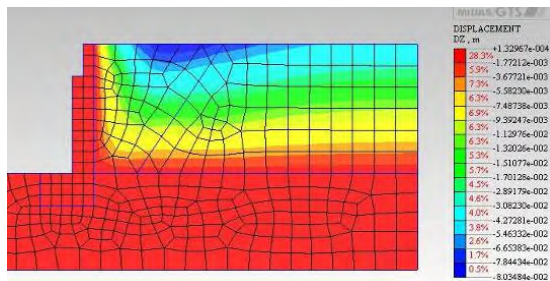
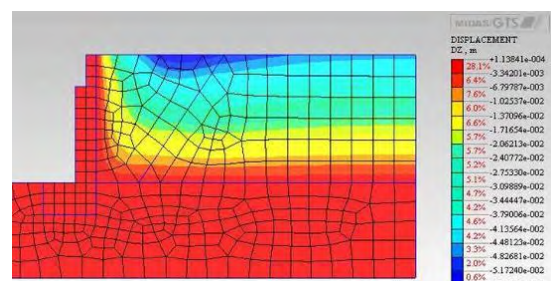
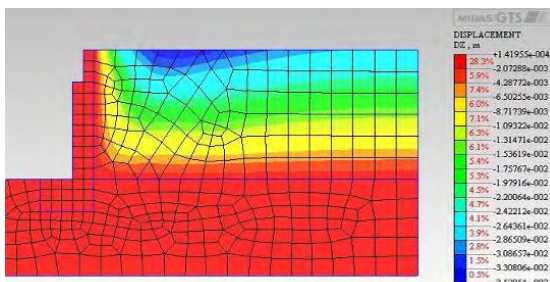
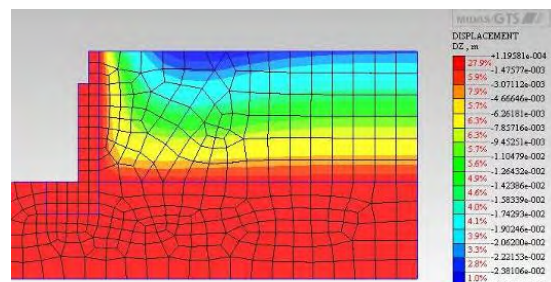
(a) 台背路基沉降模拟结果图(锚杆间距 $\Delta l=2.5\text{ m}$)(b) 台背路基沉降模拟结果图(锚杆间距 $\Delta l=2\text{ m}$)(c) 台背路基沉降模拟结果图(锚杆间距 $\Delta l=1.5\text{ m}$)(d) 台背路基沉降模拟结果图(锚杆间距 $\Delta l=1\text{ m}$)

图 7 台背路基沉降模拟结果图

从图 7 中可以看出:

(1) 桥台后布设注浆锚杆后,路基中心线处的位移明显降低。

在不设置注浆锚杆的情况下,台背填土的最大沉降量为 13.988 cm。注浆锚杆按间距 2.5 m 布设后,台背处最大沉降量减少为 8.035 cm,锚杆按间距 1 m 布设时,台背处最大沉降量减少为 2.541 cm,前后降低了 42.6%~81.8%,可见注浆锚杆对路基沉降的减少起到了很大的作用。

(2) 比较各方案的沉降曲线不难看出,随着注浆锚杆横向间距的减小,路基的最大沉降量也减小,但并非呈线性减小。

横向间距从 2.5 m 到 2 m,加筋间距对台背填土沉降的改善作用较为明显,最大沉降量分别为 8.035

cm 和 5.518 cm; 但随着间距的减小, 在间距为 1.5 m 和 1 m 时最大沉降量分别为 3.530 cm 和 2.541 cm。

2.2.2 注浆锚杆布置对路基水平位移的影响

建立有限元离散模型分析研究注浆锚杆间距对路基横向位移的影响, 横向间距分别采用 $\Delta l=1$ m、 $\Delta l=1.5$ m、 $\Delta l=2$ m、 $\Delta l=2.5$ m 四种方式来布置, 竖向层间距采用 $\Delta h=3$ m, 共布置 4 层注浆锚杆。注浆锚杆各布置间距下, 路基的横向位移图如图 9。

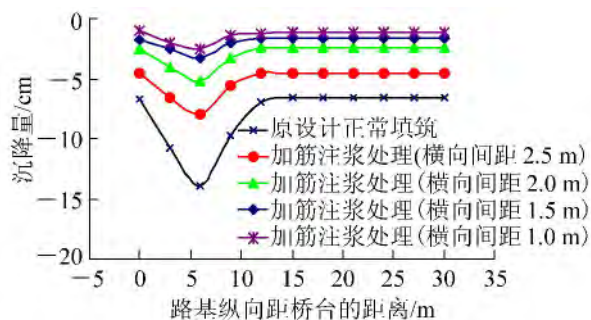


图 8 路基中线沉降曲线

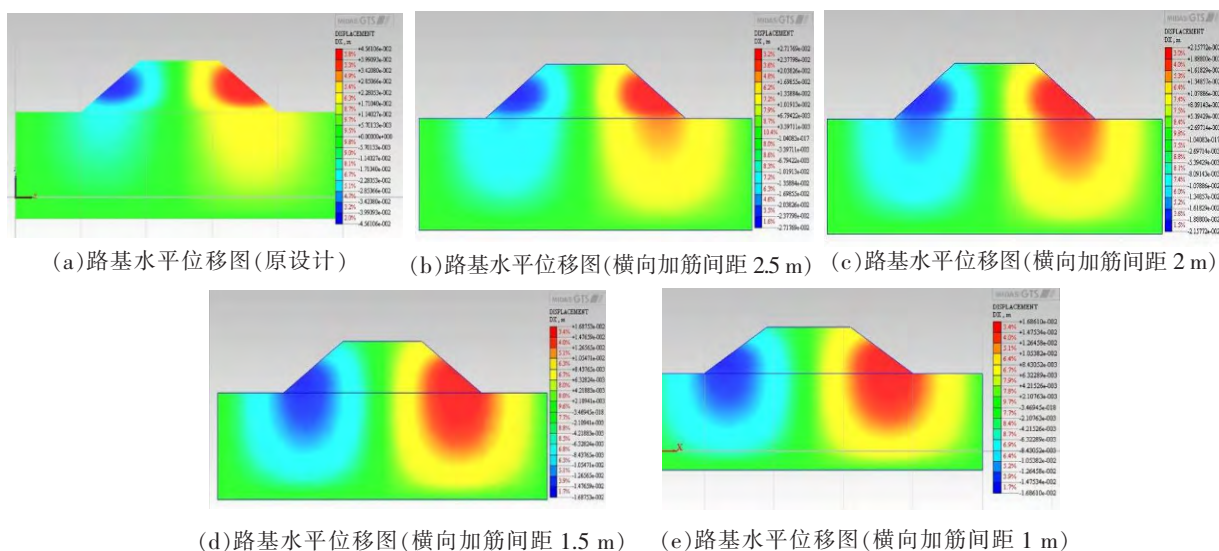


图 9 路基水平位移图

从图 9 中可以看出:

(1) 桥台后布设注浆锚杆后, 路基横向位移明显降低。在不设置注浆锚杆的情况下, 路基的最大横向位移量为 4.561 cm, 注浆锚杆按间距 2.5 m 和 1 m 布设后, 最大位移减少为 2.718 cm 和 1.686 cm, 前后降低了 40.4%~63.0%。

(2) 注浆锚杆的设置, 增加了路基填料的刚度, 使得路基整体受力更加合理。

2.2.3 加筋层数对路基沉降的影响

数值模拟结果显示, 若不采取处置措施, 桥背回填土会出现较大的沉降; 采用加筋注浆法加固桥背回填土, 能提高回填土的整体稳定性和回填土的刚度, 增强其抗变形能力, 数值模拟试验结果也充分的证明了这点。同样, 通过前面的分析可以得出加筋行间距为 $\Delta l=1.5$ m 时较为经济合理。对于加筋层数为 4 层时是不是最合理的, 还有必要进行进一步的研究, 以确定最合理的加筋层数^[6-7]。

布置方案采用横向间距为 1.5 m, 加筋层数分别采用 2、3、4 四种方案, 研究路基中线的沉降量受加筋层数变化的影响趋势及程度。图 10、图 11 反映了层数对沉降的影响。

从图 10 中可以看出:

(1) 加筋可以明显减少台背路基的沉降量。横向间距 $\Delta l=1.5$ m 工况下, 采用 2 层加筋注浆方案时, 台背路基的最大沉降量为 6.535 cm, 较原设计时降低了 53.3%; 加筋层数为 4 时, 最大沉降量为 3.530 cm, 较原设计时降低了 74.8%。

(2) 随着加筋层数的增多, 沿路基中线方向的沉降量逐渐减小。加筋层数从 2 增加到 4 时, 各自的最大沉降量分别为 6.535 cm、3.823 cm、3.530 cm; 从 2 层增加到 3 层时, 路基沉降减小的幅度相对较大, 但从 3 层增加到 4 层时, 减小的幅度放缓, 所以注浆锚杆存在一个经济的布置层数。

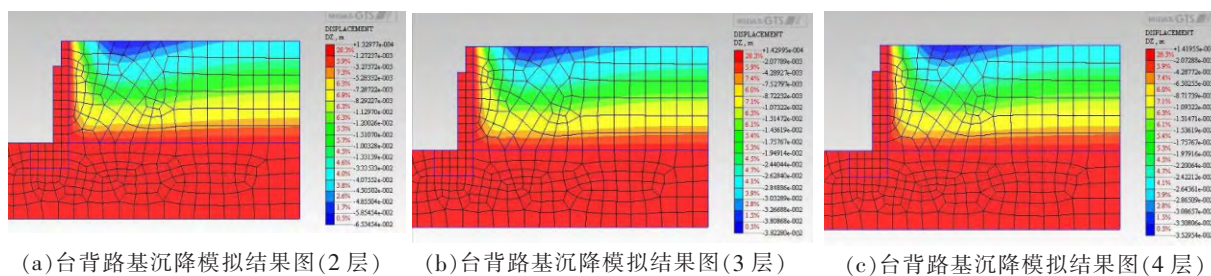


图 10 台背路基沉降模拟结果图

3 横向加筋注浆技术应用研究

3.1 横向加筋布置方案

布置总体方案为,在桥头路基 30 m 范围内,桥台路基坡面上,采用锚杆直接在坡上钻孔,进行高压注浆,锚杆分三层布置,层间距采用 3 m,距离桥台前 10 m、中 10 m、后 10 m,横向间距分别为 1 m、1.5 m 和 2 m。

3.2 注浆加固技术的结构组成

(1)注浆锚杆。锚杆采用特质钢制成,应满足刚度和强度的要求,外径 48 mm,壁厚 5 mm,前端制成尖状,管壁每隔一段距离 30 cm 钻一直径为 8 mm 注浆孔,注浆眼呈螺旋式布置,同一纵、横截面上只布置一个。锚杆按施工要求长度连接,连接方法有焊接和车丝扣连接,本工程施工中采用焊接方式,施工方便,成本低。采用梅花形布置^[8-10]。

(2)复合加固体。本工程采用压力注浆,注浆液在压力作用下向周围地层渗透,硬化后形成坚实的复合加固体,将锚杆与周围土层锚固在一起,锚固段与土体间具有较大的粘结摩阻力,从而改善土体的整体结构,提高土体的力学性能。

3.3 注浆材料及配合比

注浆材料采用水泥浆,水泥选用的是西柏坡高速公路施工现场使用的平山生产的“鼎鑫”牌 42.5[#] 普通硅酸盐水泥,根据工程经验,水灰比采用 0.75 : 1~1.5 : 1,速凝早强剂用量 0.8~1.2,浆液密度为 1.34~1.68 g/m³,初凝时间 410~440 min,终凝时间 780~940 min,7 d 抗压强度 9.5 MPa,28 d 抗压强度 15.3 MPa。

3.4 注浆压力及注浆影响半径

根据试验段注浆试验结果及已有工程经验值,确定注浆压力在 0.2~0.6 MPa 范围内,最大不允许超过 0.9~1.0 MPa。注浆过程中为保证浆液扩散半径达设计要求,应注意根据实际情况随时调整注浆压力^[10-11]。

本工程 r 的确定依据理论计算、现场试验,并同时参考以往类似工程经验参数综合确定,确定注浆半径为 1.5~2 m。施工中可通过调整极限注浆时间、注浆压力和浆液的注入能力来调整 r 值^[11-12]。

3.5 注浆方法和控制标准

注浆方法:施工现场注浆加固采用逐根横向注浆管注浆。注浆顺序:沿纵向由桥台内侧至左桥台外侧,深度方向上由下至上,每行隔点注浆,台后侧边和边角部位需加密。

控制标准:采用注浆压力和注浆量双控标准。在规定压力下,注浆量小于 1 L/min 时,稳压 10 min,当压力不下降或下降小于 5%,即可停止注浆;或当注浆压力由小增大,注浆量由大到小,大于或等于设计压力时,维持时间 10 min 也可止浆。

3.6 施工流程

根据工程要求、工程地质和水文地质条件,通过试验、理论或经验等方法确定注浆参数,选择合理的注浆设备,编制施工组织设计,组织施工力量,进行压力注浆^[12-14]。

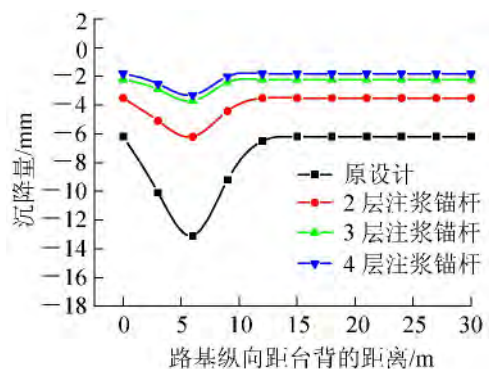


图 11 注浆锚杆布置层数对路基沉降影响

起每 2 m 设置一个,观测长度设为 20 m。在路线的两肩及中线各设置一个观测点,获得 3 组数据,以加强对比,提高观测精度。监测结果如表 3 所示。

表 3 路基沉降量监测结果

测点	30 d	90 d	180 d	测点	30 d	90 d	180 d	测点	30 d	90 d	180 d
A1	0.31	1.62	3.14	B1	0.32	1.61	3.17	C1	0.33	1.64	3.15
A2	0.70	2.12	4.25	B2	0.75	2.14	4.25	C2	0.76	2.17	4.22
A3	0.43	1.84	3.53	B3	0.46	1.87	3.58	C3	0.42	1.81	3.52
A4	0.25	1.58	2.15	B4	0.25	1.55	2.16	C4	0.24	1.53	2.14
A5	0.27	1.52	2.01	B5	0.27	1.58	2.03	C5	0.24	1.53	2.02
A6	0.28	1.59	1.98	B6	0.26	1.51	1.97	C6	0.23	1.55	1.96
A7	0.29	1.58	1.97	B7	0.27	1.57	1.95	C7	0.22	1.54	1.92
A8	0.28	1.59	1.94	B8	0.27	1.57	1.98	C8	0.23	1.52	1.92
A9	0.27	1.52	1.95	B9	0.25	1.54	1.96	C9	0.23	1.53	1.92
A10	0.24	1.59	1.94	B10	0.27	1.62	1.97	C10	0.23	1.64	1.93
A11	0.23	1.58	1.95	B11	0.24	1.55	1.96	C11	0.23	1.55	1.91

根据 30 d、90 d、180 d 的检测结果,取路基横向 3 个检测数据的平均值沿路线走向绘制的路基沉降图如图 16 所示。

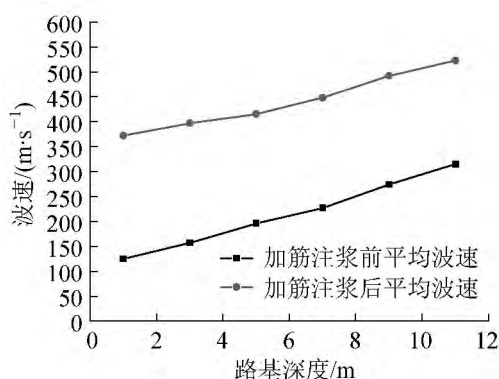


图 15 处治前后路基波速图

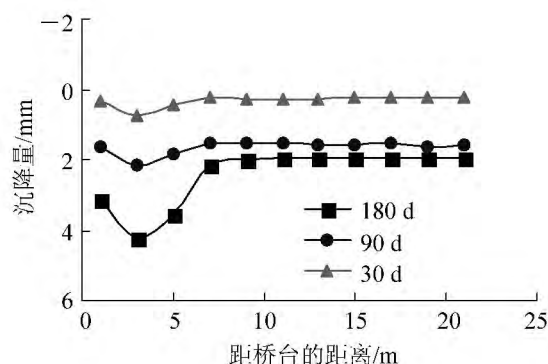


图 16 路基沉降监测结果图

从现场检测数据可以看出:

(1)路基的最大沉降点集中在距离台背 3~4 m 附近的“勺”口中心附近,而靠近桥背附近的“勺”口边缘和“勺”柄端相对沉降量较小,距台背 10 m 以外的路基沉降趋于均匀。

(2)路基的沉降量在前 30~60 d 的变化较大,约为 7 mm,但在后 30~60 d 只增加 2.5 mm。

(3)实际检测与有限元模拟结果趋势基本相同,证明了本研究数值模拟的合理性。

5 结语

(1)采用横向加筋注浆技术处治桥头跳车效果显著,横向加筋注浆处治技术施工工艺简单易行,处治效果良好。

(2)实践证明,实际检测与有限元模拟结果趋势基本相同,证明了数值模拟的合理性,用数值模拟方法选取施工参数简单易行、成本低。

参 考 文 献

- [1]李宁. 加锚层状岩体的变形破坏过程与加固效果分析模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 13(4): 309-317.
- [2]郭长路. 路桥过渡段路基沉降分析与处治措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [3]蒋应军, 武建民, 陈忠达, 等. 桥头跳车成因分析及防治技术研究[J]. 公路, 2004(7): 124-131.
- [4]张红, 王劲松. 路桥过渡段结构型式设计与施工方法探讨[J]. 公路, 2001(9): 49-53.

- [5]杨殿栋,强晨,陈尚法.加锚岩体的三维复合单元模型研究[J].岩石力学与工程学报,2008,22(1):1-8.
- [6]李亮,赵炼恒,邹金锋,等.柔性加筋注浆现场模型试验研究[J].岩土力学,2009,30(7):2081-2086.
- [7]赵炼恒,罗恒,李亮,等.土石混填料台背回填柔性加筋注浆技术加固试验研究[J].岩土力学,2010,31(1):199-205.
- [8]程良奎.岩土锚固的现状与发展[J].土木工程学报,2001,34(3):7-12.
- [9]王波.高速公路桥背沉降控制的后注浆法应用研究[D].成都:成都理工大学,2009.
- [10]王广国,徐祯祥.岩土锚固技术手册[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [11]韦安永,任一鑫,宋红军.新型锚固与注浆技术研究与应用[J].地质与勘探,2000,36(6):87-89.
- [12]华心祝,谢广祥.极软岩巷道锚注加固注浆材料研究与应用[J].岩土力学,2004,25(10):1642-1646.
- [13]胡功笠,田艳凤,张超,等.软岩条件下锚注加固锚杆布置参数与注浆浆液参数的确定[J].岩土力学,2003,24(增):267-270.
- [14]李嘉,董海文.瞬态瑞雷波法在路基压实度检测中的应用[J].中南公路工程,2006,31:8-10.
- [15]北京市水电物探研究所. JGJ/T 143-2004 J370-2004 多道瞬态面波勘察技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [16]朱霞.公路工程试验检测技术[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [17]刘贵民.无损检测技术[M].北京:国防工业出版社,2006.

Research on Transverse Reinforcement Grouting Technique for Preventing Highway Bump at the Ends of Bridges

Liu Jianmin

(Shijiazhuang Xibaipo Highway Administration Office, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Based on the deformation principle of “Flexible-Rigid Transition”, transverse reinforced grouting is designed. In the context of 0[#] abutment of Yehe Bridge at BP1 +942 of Xibaipo highway, the condition of the bridgehead roadbed which has been transverse reinforced grouted is simulated under different operating modes via MIDAS/GTS software of general finite element analysis. The impacts of different horizontal and vertical spacing types in the layout of the reinforced materials on subgrade settlement at transitional section of bridgehead roadbed and horizontal displacement of different depth are investigated. The optimal layout of the reinforced materials is analyzed. The results could serve as a reference for practical construction. Construction parameters of the transverse reinforced grouting are analyzed and treatments are carried out for 0[#] abutment of Yehe Bridge at BP1 +942 of Xibaipo highway. The effectiveness of consolidation in the transverse reinforced grouting test is evaluated by the surface wave velocity measurement method, and long-term observation for practical effectiveness has been made. The results validate the similarity between the practical effectiveness and simulation results obtained via general finite element analysis. It also verifies the correctness of numerical simulation and demonstrates the effectiveness of the transverse reinforced grouting for preventing bump at the ends of bridges.

Key words: bridge engineering; transverse reinforced grouting; finite element analysis; bump at the ends of bridges; wave velocity measurement