

混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降控制方法

Control Method of Soil Settlement Around Rock-filled Subgrade of Concrete Continuous Bridge

罗 实¹, 孟祥靖¹, 杨 雷²

- (1. 中建三局第三建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000;
2. 中交建冀交高速公路投资发展有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 为避免桥梁路基沉降导致交通安全隐患, 研究混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降控制方法。通过填石路基周围土体应力变化选取适宜填石材料, 采用振动压实法压实土体及石料, 控制混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降。结果表明: 在同等压力作用下, 粒径较小的填石材料对填石路基周围土体进行压实效果较好; 填石路基周围土体坡率为 1:1.8 时, 土体稳定系数最高; 通过压实填石路基周围土体方法控制沉降, 孔隙率及沉降率均符合路基设计规范压实标准; 工程结束后一年内填石路基周围土体沉降值较低。

关键词: 混凝土; 连续桥梁; 填石路基; 周围土体; 沉降控制; 振压实法

中图分类号: U416 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 02-0103-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.019

LUO Shi¹, MENG Xiangjing¹, YANG Lei²

- (1. The Third Construction Co., Ltd of China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan 430000, China;
2. Zhong Jiao Jian Ji Jiao Highway Investment Development Co. LTD, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In order to avoid the hidden danger of traffic safety caused by the settlement of bridge subgrade, the control method of soil settlement around the rockfill subgrade of concrete continuous bridge is studied. Select appropriate rockfill materials through the change of soil stress around the rockfill subgrade, and compact the soil and stone with vibration compaction method to control the settlement of soil around the rockfill subgrade of concrete continuous bridges. The results show that under the same pressure, the soil around the rockfill subgrade can be compacted easily by the rockfill material with smaller particle size; When the slope ratio of the soil around the rock fill subgrade is 1:1.8, the soil stability coefficient is the highest; The settlement is controlled by compacting the soil around the rock filled subgrade, and the porosity and settlement rate meet the compaction standard of subgrade design specifications; The settlement value of soil around the rockfill subgrade is low one year after the completion of the project observed by the inclinometer.

Keywords: concrete; continuous bridge; rockfill roadbed; surrounding soil; settlement control; vibration compaction method

0 引言

混凝土连续桥梁是桥梁工程中主要的结构形式, 具有刚度好、接缝少的优势^[1]。混凝土连续桥梁属于超静定体系, 桥梁内力状态较为均匀, 但受桥梁周围土体结构变化影响较大。桥梁工程中的碎石加固法、换填土加固法是桥梁填石路基施工的主要方法, 填石路基在桥梁建设占据的比例较高。选取有效的路基处理方法, 提升桥梁路基的稳定性以及承

作者简介: 罗实 (1990—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 隧道、桥梁施工管理。

通信作者: 孟祥靖 (1986—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 隧道、桥梁施工管理。

收稿日期: 2023-09-26

岩土力学

载力,对于降低桥梁路基的不均匀沉降具有一定作用。桥梁路基填实过程中,由于荷载作用,周围土体容易形成沉降,桥梁填石路基周围土体沉降速率过快易造成安全问题,因此,研究混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降控制方法具有重要意义^[2]。

目前众多学者针对桥梁沉降进行研究,谢雄耀等^[3]分析南京和燕路过江通道大堤沉降情况,明确大堤沉降受不同注浆压力的影响,并提出相应控制措施;方淑君等^[4]针对高铁桥梁沉降进行研究,明确新旧桩中心距参数改变时桥梁的沉降值变化。以上两种方法虽然对桥梁沉降控制研究提供重要的措施,但是并未考虑孔隙率等指标对混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降控制的影响。针对以上两种研究方法存在的缺陷,研究混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降控制方法;依据混凝土连续桥梁填石路基周围土体孔隙率等指标对沉降的影响,提出相应控制措施,提升混凝土连续桥梁的运行安全性。

1 控制方法

1.1 工程概况

某高速公路大桥为混凝土连续桥梁,该混凝土连续桥梁为超静定结构,分为左右两幅,单幅桥梁宽度为 45 m,连续桥梁跨径为 2180 m;地层为粉质黏土、粉砂、细砂、粉土、黏土及其互层;地下水位区间为 0.9~1.7 m。

1.2 填石路基周围土体应力

在公路工程中,填石路基周围土体石料的力学性能常用抗剪强度表示。由于填石料粒径较大,未经过压实的石料应力水平较低^[5-7],此时抗剪强度线性表达式为:

$$\tau = b + \sigma_n \tan \varphi + 1 \quad (1)$$

式中: b 与 φ 均为常量; $\sigma_n \tan \varphi$ 为石料颗粒之间的压实程度; σ_n 为基本承载力。通过对石料进行压实,其应力水平不断增高,颗粒粒径减小为破碎颗粒并重组,密度随之增加^[8-9],抗剪强度以曲线方式呈现,其表达式为:

$$\tau' = \Delta\varphi 1g \frac{\sigma_n}{P_a} + \varphi_{Pa} \quad (2)$$

式中: P_a 为工程大气压; φ_{Pa} 为围压 P_a 时的内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为内摩擦角在围压提升速度为 10 倍时的递减量。

1.3 压实填石路基周围土体沉降控制方法

依据路基设计规范将孔隙率作为压实填石路基周围土体的控制标准。当材料为硬质石料且抗压强度大于 60 MPa 时,压实填石路基周围土体的控制标准如表 1。

表 1 压实填石路基周围土体的控制标准

Table 1 Control standards for soil around compacted rock-fill roadbed

分层	摊铺层厚/cm	路面下深度/cm	孔隙率%
上路堤	≤40	80~150	≤23
下路堤	≤60	>150	≤25

填石路基周围土体通常选取粒径较大的填石料^[10],采用渐进式摊铺。填石路基周围土体中心段与左右两侧分别埋设土压力盒,将压力盒水平置于高宽分别为 1.5 m×0.45 m、底部经混凝土铺平处理的坑中,盒上方焊接钢筋,再用混凝土将土压力盒四周固定,将土压力盒相连的测试仪导线安装套管后埋入铺细沙的沟中,如图 1 所示。



图 1 土压力盒

Fig. 1 Earth pressure cell

为确保填石路基周围土体压实质量,依据压实质量控制标准,上路堤摊铺厚度低于 40 cm,下路堤摊铺厚度低于 60 cm。填石路基压实方法采用振动压实法即利用土体测斜仪测量填石路基周围土体沉降。

2 结果与讨论

2.1 填石路基周围土体应力变化

考虑导致混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降的因素较多,实验选取两种填石材料,花岗岩(A),最大粒径为 23 cm;石英岩(B),最大粒径为 30 cm,在工程现场通过测量两种填料的横向位移、整体方向位移及填石路基周围土体高度,对其施加相同程度压力,计算其应力变化、应变及稳定系数,通过实验结果得到符合力学要求的填料及应变界限,从而控制填石路基周围土体的沉降,结果见表 2。

表 2 两种填料应力变化及位移
Table 2 Stress change and displacement of two fillers

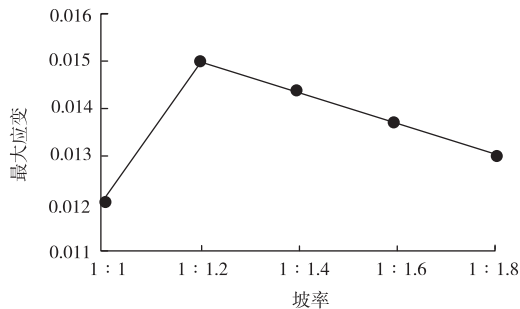
填料	路堤最大主应力/kpa	路堤最大剪应变	横向位移/mm	整体方向位移/mm	稳定系数
花岗岩 (A)	486.5	0.005	37.67	18.78	2.83
石英岩 (B)	477.8	0.084	60.12	89.57	1.62

由表 2 可知, 由于填料 B 最大粒径大于填料 A, 填料 B 填石路基周围土体的石料间孔隙较大, 因此其受到压力后, 最大剪应变高于填料 A; 由于施加压力相同, 路堤最大主应力差别较小; 两种填料横向及整体方向均产生不同程度位移, 填料 B 位移变化明显高于填料 A; 填料 B 稳定系数相对较低。由此可知, 填料粒径对填石路基周围土体影响较大, 填料粒径越大, 填石路基周围土体应力变化越大, 填石路基周围土体位移越明显, 稳定性越低。因此, 对于混凝土连续桥梁填石路基周围土体的沉降控制应选取粒径较小的填石料, 使混凝土连续桥梁填石路基周围土体稳定性提升。

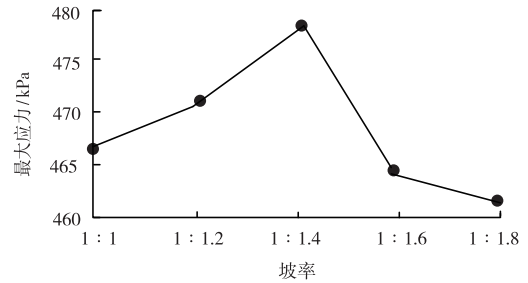
2.2 填石路基周围土体坡度

混凝土连续桥梁填石路基周围土体的作用在于保障路基不受水流冲击, 施工时若发现填料内摩擦角小于周围土体坡度, 需及时对周围土体进行边坡码砌, 常见的路基周围土体处理方式为先填筑后码砌。依据路基设计规范中路基周围土体边坡坡率的规定, 在施工现场堆造 5 种不同坡率的土坡, 坡顶及地基尺寸一致, 坡率分别为 1:1、1:1.2、1:1.4、1:1.6 及 1:1.8, 对 5 种坡率的土坡施加相同程度的压力, 通过土坡剪应力、最大应变及稳定系数计算结果分析填石路基周围土体稳定性, 如图 2 所示。

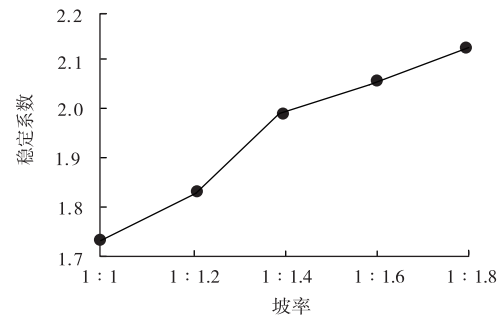
观察图 2 填石路基周围土体坡度逐渐变缓, 在受到相同条件约束时, 坡率为 1:1.2 时, 最大应变值最高, 但 5 种坡率的最大应变整体差异较小; 最大应力范围为 460 kPa 至 480 kPa, 曲线波动区间较小;



(a) 最大应变



(b) 最大应力



(c) 稳定系数

图 2 不同坡率下的路基周围土体稳定性

Fig. 2 Stability of soil around subgrade under different slope ratios
坡率 1:1.8 时土坡稳定系数最高, 因此, 在对混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降控制时, 选取坡率为 1:1.8 的坡度, 填石路基周围土体稳定性好。

2.3 压实填石路基周围土体控制沉降

为有效控制混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降, 使其达到稳定状态, 依据压实填石路基周围土体的控制标准, 在工程现场进行碾压实验, 将碾压结束前两次的高程差作为沉降差; 将摊铺厚度及沉降差间的比值作为沉降率。A、B 两种填料其抗压强度均大于 80 MPa, 每种石材分别在 5 个试点进行摊铺, 每个试点摊铺厚度分别为低于 40 cm 及 60 cm, 结果见表 3。

结合压实填石路基周围土体的控制标准, 上路堤孔隙率需小于 23%, 由表 3 可知, A、B 两种填料在混凝土连续桥梁路基周围土体中的摊铺厚度为低于 40 cm, 填石路基周围土体碾压后的密度均大于碾压前, 当碾压后填石路基周围土体孔隙率大于等于 23% 时, 沉降率大于 3%; 当碾压后填石路基周围土体孔隙率小于 23% 时, 沉降率小于 3%, 此时符合路基设计规范压实标准。

摊铺厚度为低于 60 cm, 填石路基周围土体碾压后的密度均大于碾压之前, 当碾压后填石路基周围

岩土力学

土体孔隙率大于 25% 时, 沉降率为 3%~6%; 当碾压后填石路基周围土体孔隙率小于 25% 时, 沉降率为 3%~5%, 此时符合路基设计规范压实标准。

表 3 两种填料摊铺厚度低于 40、60 cm 时碾压前后结果
Table 3 Results before and after rolling when the paving thickness of the two fillers is less than 40 and 60 cm

摊铺厚度	填料	密度/(g/cm ³)		孔隙率/%		沉降率/%
		碾压前	碾压后	碾压前	碾压后	
低于 40 cm	A	1.794	1.998	34	26	3.45
	A	2.011	2.179	26	22	2.72
	A	2.002	2.115	27	24	3.35
	A	1.877	2.067	22	19	2.48
	A	2.054	2.212	17	15	2.05
	B	1.747	1.899	27	21	2.85
	B	1.851	1.927	28	23	4.36
	B	1.576	1.795	29	21	2.97
	B	1.682	1.753	25	22	2.65
	B	1.815	1.901	26	23	3.58
低于 60 cm	A	1.725	1.967	35	24	4.81
	A	1.899	2.124	34	24	4.36
	A	1.801	1.997	26	20	3.66
	A	1.717	1.862	41	31	3.71
	A	1.998	2.266	45	33	5.72
	B	1.336	1.418	54	35	5.53
	B	1.498	1.701	38	23	4.68
	B	1.555	1.765	36	22	4.15
	B	1.521	1.712	36	22	3.88
	B	1.579	1.706	36	23	3.65

因此, 在填料及摊铺厚度不同的情况下, 通过压实填石路基周围土体, 碾压后密度均有不同程度增大, 孔隙率不同程度降低, 在混凝土连续桥梁填石路基周围土体, 上路堤沉降率小于 3%, 下路堤沉降率区间为 3%~5% 时, 符合路基设计规范压实标准, 能够有效控制混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降。

混凝土连续桥梁填石路基周围土体的沉降控制为对填料的压实, 石料密度高、孔隙率低则填石路基周围土体不易沉降。

2.4 路基沉降控制性能验证

为验证混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降控制方法的有效性, 在工程现场填石路基周围土体坡脚设置观测断面, 采用土体测斜仪定期测量测头位置并记录。试验选取工程结束后一年的测量结果, 见表 4。

通过本文控制方法对混凝土连续桥梁填石路基周围土体进行沉降控制, 在工程结束后的一年内, 1 月份初始测量值为 -4.15 mm, 当月垂直位移为

0.24 mm; 12 月份初始测量值为 -5.61 mm, 当月垂直位移为 0.05 mm; 填石路基周围土体垂直位移逐月递减, 12 个月的累计位移为 1.51 mm, 填石路基周围土体沉降值较小, 因此本文控制方法能够有效控制混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降。

表 4 沉降结果
Table 4 Settlement results

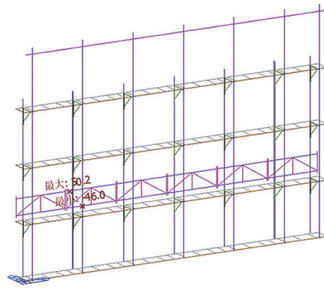
日期/月	初始值/mm	测量值/mm	垂直位移/mm
1	-4.15	-4.39	0.24
2	-4.39	-4.61	0.22
3	-4.61	-4.78	0.17
4	-4.78	-4.94	0.16
5	-4.94	-5.07	0.13
6	-5.07	-5.18	0.11
7	-5.18	-5.29	0.11
8	-5.29	-5.38	0.09
9	-5.38	-5.47	0.09
10	-5.47	-5.55	0.08
11	-5.55	-5.61	0.06
12	-5.61	-5.66	0.05
累计位移			1.51

3 结论

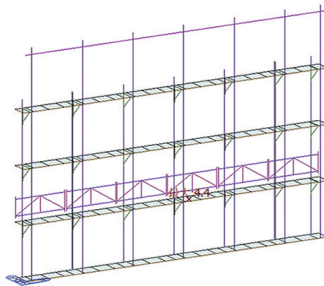
针对混凝土连续桥梁填石路基, 由于长期车辆通行容易造成周围土体沉降情况, 研究混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降控制方法。将土体沉降控制方法应用于某地高速公路混凝土连续桥梁工程中。研究结果验证, 选取粒径较小的材料作为填石材料, 通过振动压实法对填石路基进行压实处理, 可以改善混凝土连续桥梁填石路基周围土体沉降问题, 提升混凝土连续桥梁的通行安全性。

参 考 文 献

- [1] 蒋功化, 刘丽萍, 周德. 大跨预应力混凝土连续梁桥的预应力损失识别 [J]. 公路, 2021, 66 (9): 226-231.
- [2] 周德, 王灿, 雒明波, 等. 混凝土桥梁荷载试验短期黏弹性力学行为研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (6): 2155-2166.
- [3] 谢雄耀, 杨昌植, 王强, 等. 南京和燕路过江通道盾构穿越长江大堤的沉降分析及控制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (2): 3313-3322.
- [4] 方淑君, 徐新桐, 王涛, 等. 运营状态下新建桥对邻近高铁桥梁沉降的分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (5): 1187-1195.
- [5] 王崇淦, 蒋志琳, 朱禹, 等. 大面积堆土荷载对既有高铁桥梁桩基承载性能影响分析 [J]. (下转第 163 页)



(a) 梁单元最大应力处



(b) 板单元最大应力处

图 8 梁、板单元最大应力位置

Fig. 8 Maximum stress position of beam and plate elements

4 结论

对 8 m 机位跨度平台进行试验，建立有限元分析模型，通过试验研究和仿真分析研究不同荷载工况下的力学性能，得到以下结论：

(1) 试验结果与模拟计算结果相差在合理范围以内，可验证本文建立有限元模型的准确性。

(2) 8 m 机位跨度平台多由第 2 步桁架和脚手板承担荷载，荷载应控制在 4 kN/m^2 以内；增大水平桁架截面可使平台承载力增大。

(3) 相对于传统现浇结构的附着式施工平台，装配式建筑施工平台具有自重轻、装拆方便、节约材料、上升快等优势。

参 考 文 献

- [1] 平京辉. 集成型附着式升降脚手架在装配式建筑工程中的应用 [J]. 建设科技, 2020, (22): 45-49.
- [2] 高空亮, 曹珍珠. 附着式升降脚手架用于装配式建筑的附着方案对比分析 [J]. 建设科技, 2020, (22): 50-53.
- [3] 徐明代. 装配式建筑附着式升降脚手架施工及其特殊位置处理技术 [J]. 常州工学院学报, 2021, 34 (5): 5-9.
- [4] 林冰, 张志超, 张连魁, 等. 附着升降式脚手架构件性能试验研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2021, 50 (22): 106-110.
- [5] 孙逸凡, 王禹帅, 徐健闻, 等. 浅谈附着式升降脚手架工程造价 [J]. 科学技术创新, 2020, (14): 138-139.
- [6] 金正军, 龚晓果, 蒯青. 高层建筑附着式和悬挑式脚手架的利弊分析 [J]. 山西建筑, 2016, 42 (34): 115-116.
- [7] GB 50017-2017, 钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

(上接第 81 页)

铁道科学与工程学报, 2020, 17(5): 1090-1096.

- [6] 李海洋. 四线叠交小间距盾构隧道下穿桥梁沉降控制案例分析 [J]. 隧道建设, 2020, 40(1): 343-349.
- [7] 张超. 承压水降压引起的高速铁路桥梁摩擦型群桩沉降特性分析 [J]. 铁道建筑, 2021, 61(6): 36-40.
- [8] LIU Z, ZHANG A, XU J, et al. Calculation model and bearing capacity optimization method for the soil settlement between piles

in geosynthetic-reinforced pile-supported embankments based on the membrane effect [J]. PLoS ONE, 2021, 16(8): e0256190.

- [9] 黄崇伟, 郭丹丹, 王德荣, 等. 粗粒土压实特性与高填体沉降规律研究 [J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(5): 512-518.
- [10] TAO Y, SUN H, CAI Y. Predicting soil settlement with quantified uncertainties by using ensemble Kalman filtering [J]. Engineering Geology, 2020, 276(6): 105753.