

采用深层混凝土搭板处治桥头跳车的试验

项贻强¹, 孙 筠¹, 金福根², 李 威², 张树仁³

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058, xiangyiq@zju.edu.cn; 2. 台州公路管理处, 浙江 台州 318000;
3. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 为了解决传统近路面桥头搭板受车辆荷载的冲击作用, 加之下方发生脱空现象, 易造成开裂破坏的问题, 结合工程实践提出一种新的桥头路基处治方法——深层混凝土搭板处治法, 将混凝土搭板放置一定深度, 用以改善桥头路基的应力分布及变形. 通过对 Winkler 弹性地基梁一端固定另一端自由时梁底地基反力的理论分析及现场试验研究得到, 深层搭板底部地基反力是从固定端到自由端一平滑过渡的曲线, 且处治后路桥过渡段道路线形平顺, 桥头沉降差较小, 路基整体稳定. 与 EPS 轻质换填处治方法进行比较, 结果表明所提出的深层混凝土搭板处治法在控制桥头沉降差方面有较大优势.

关键词: 深层混凝土搭板; 桥头跳车; EPS 轻质换填; 试验研究; 理论分析

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0158-05

Case study of the deep-seated concrete slab for settlement control at bridge approach embankment

XIANG Yi-qiang¹, SUN Yun¹, JIN Fu-gen², LI Wei², ZHANG Shu-ren³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China, xiangyiq@zju.edu.cn;
2. Highway Administration Department of Taizhou, Taizhou 318000, China; 3. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Aimed at the concrete slab cracking with the impact action of vehicles, or the settlement under the slab for bridge approaches normally constructed with reinforced concrete slabs, this paper puts forward a new solution for settlement control at bridge approach embankment by adopting the deep-seated concrete slabs, which can redistribute the load in embankment. The result of theoretical analysis of the reaction under the concrete slabs in Winkler foundation model and that of field observation show that the reaction under the concrete slabs presents smooth evolution from the fixed end to the free end, the road alignment of transitional section between bridge and approach is smooth, the settlement is mitigated, and the road subgrade is stable. Compared with the EPS geofoam lightweight fill for the bridge approach embankment in the settlement control, the use of deep-seated concrete slabs has more advantages.

Key words: deep-seated concrete slab; vehicle bouncing at bridge approach; EPS geofoam lightweight fill; field observation; theoretical analysis

为使桥梁与道路能平缓过渡, 一般在桥梁与道路衔接的路面下层设置混凝土搭板, 而在运营中常出现搭板下部填筑物发生脱空或不均匀沉降, 加之路面车辆荷载的冲击作用, 造成桥头搭板

破坏甚至断裂, 给桥头行车舒适性及安全性带来不利影响. 因此有必要研究和探讨新的桥头跳车处理方法.

国内外对传统桥头搭板解决桥头跳车问题进行的研究主要有: (1) 传统桥头搭板受力特性、参数影响及试验研究^[1-4]; (2) 对桥头搭板裂缝开展研究及对带裂缝桥头搭板的维修加固^[5-6]; (3) 斜交桥头搭板的受力特性分析^[7]; (4) 构造改

收稿日期: 2008-11-24.

基金项目: 浙江省交通厅科研计划资助项目(2008H36).

作者简介: 项贻强(1959—), 男, 教授, 博士生导师;

张树仁(1935—), 男, 教授, 博士生导师.

进后的桥头搭板受力特性分析^[8],此外还有就桥头地基土体固结沉降的研究等^[9].但未见有关于桥头搭板的搭置深度对路桥过渡沉降差控制的研究.因此,本文提出一种处治桥头跳车的新方法——既将桥头搭板埋置在一定的深度,同时配合轻质回填料.通过深置搭板来减小近桥头处板下的地基应力,并能有效解决桥头不均匀沉降的现象,使得沉降能够平滑过渡到搭板上.基于半无限长弹性地基梁计算理论计算梁下地基反力变化规律,并结合实际工程进行了试验研究.

1 方案提出及应用背景

选取浙江东部沿海 104 国道台州黄岩段西门立交一典型的软基已建桥头,原桥头宕渣填土约 3.1 m,其下为 0.5 m 物理力学性质稍差的粘土层,再往下为 35 m 为软塑和流塑状态的淤泥质粘土或亚粘土.淤泥或淤泥质粘土的承载力为 45 ~ 60 kPa,压缩模量为 1.73 ~ 2.08 MPa,亚粘土的承载力为 60 ~ 100 kPa,压缩模量为 6.8 MPa.该处桥头的地下水位高度在 3.18 m.由于该桥头之前未做地基处理,路基沉降累计已到达 70 cm,虽经过数次路面养护维修,但地质的不良使得路桥过渡段路面仍旧坑洼严重.为此,决定在该桥头采用深层混凝土搭板处治法,并进行理论分析和试验研究(见图 1).

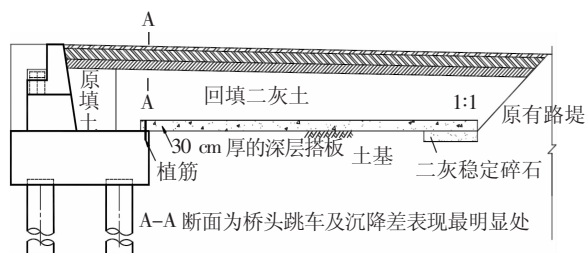


图 1 深层混凝土搭板处治示意图

其中,搭板厚度 30 cm,长度为 10.6 m,宽度与路基宽度相同,搭板一端 0.6 m 搭置在承台上,并用一排间距 25 cm 单根长 55 cm 的 $\phi 32$ 钢筋一端植入桥台深约 25 cm,另一端 30 cm 绑扎进入搭板内部钢筋网架,并在植筋的外部套上 pvc 管,以保证搭板能绕搭置端发生一定角度的转动.搭板浇筑养护好后,上部采用二灰土轻质回填,其中石灰(9%):粉煤灰(21%):煤渣(70%).

2 搭板底地基反力分布分析

如图 2 所示,可简化为一端固定一端自由的弹性地基梁^[1-2],下部采用 Winkler 地基模型,梁体上部的回填料及车辆荷载都等效转化为均布荷载 q ,假定该地基梁的长度为 l ,梁的宽度为 b ,抗弯刚度

为 EI ,地基刚度为 k ,以固定端为 0 点, x 为长度变量,则梁的柔性特征值为 $\beta = \sqrt[4]{kb/EI}$.一般认为,当 $\beta l \geq \pi$ 时可按柔性梁(相当于无限长)来进行计算, $\beta l < \pi$ 时按有限长梁来进行计算^[10].

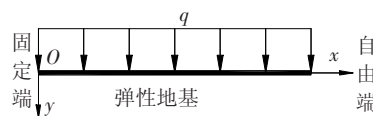


图 2 一端固定另一端自由的弹性地基梁

1) 当 $\beta l \geq \pi$ 时可按柔性梁进行计算.对于任意文克尔地基上一端固定另一端自由的弹性地基梁,其挠度方程的通解是

$$y = e^{\beta x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) + y_1(x). \quad (1)$$

将边界条件代入上式即可得到半无限长弹性地基梁,承受均布荷载作用下的梁体挠度方程及基底压力 P 的分布^[11]:

$$y = \frac{q}{k} [1 - e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)], \quad (2)$$

$$P = q [1 - e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)]. \quad (3)$$

对于式(3)有,当 $\beta x = 0$ 时, $P_{\min} = 0$; 当 $\beta x = \pi$ 时, $P_{\max} = 1.0432q$; 当 $\beta x \rightarrow \infty$ 时, $P \rightarrow q$.

2) 当 $\beta l < \pi$ 时可按有限长梁进行计算.此时用初参数法进行有限长度的弹性地基梁的求解,由文献[11]可知一端固定另一端自由的有限长度弹性地基梁在承受均布荷载时的挠度方程为

$$y = \frac{2q}{k} \cdot \frac{\text{ch}^2 \beta l \sin^2 \beta l + \text{sh}^2 \beta l \cos^2 \beta l}{\cos^2 \beta l + \text{ch}^2 \beta l} \phi_3 - \frac{4q}{k} \cdot \frac{\text{ch} \beta l \cdot \text{sh} \beta l + \sin \beta l \cos \beta l}{\cos^2 \beta l + \text{ch}^2 \beta l} \phi_4 + q \frac{1 - \phi_1}{k}. \quad (4)$$

则地基反力 P 为

$$P = ky = 2q \cdot \frac{\text{ch}^2 \beta l \sin^2 \beta l + \text{sh}^2 \beta l \cos^2 \beta l}{\cos^2 \beta l + \text{ch}^2 \beta l} \phi_3 - 4q \cdot \frac{\text{ch} \beta l \cdot \text{sh} \beta l + \sin \beta l \cos \beta l}{\cos^2 \beta l + \text{ch}^2 \beta l} \phi_4 + q(1 - \phi_1), \quad (5)$$

其中: $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ 为 βx 的克雷霍夫函数:

$$\phi_1 = \text{ch} \beta x \cos \beta x,$$

$$\phi_2 = \frac{1}{2} (\text{ch} \beta x \sin \beta x + \text{sh} \beta x \cos \beta x),$$

$$\phi_3 = \frac{1}{2} \text{sh} \beta x \sin \beta x,$$

$$\phi_4 = \frac{1}{4} (\text{ch} \beta x \sin \beta x - \text{sh} \beta x \cos \beta x).$$

对于式(5)有:当 $x = 0$ 时,地基反力

$$P_{\min} = 0;$$

当 $x = l$ 时,地基反力

$$P_{\max} = q \left(1 - \frac{2 \cos \beta l \text{ch} \beta l}{\cos^2 \beta l + \text{ch}^2 \beta l} \right).$$

两种情况下搭板下的土基所受的压力也是一条在桥路衔接处为零、而在板体另一末端处逐渐增大的平滑曲线。在本工程实例中将地基刚度假定^[6]为 $30\,000\text{ kN/m}^3$, 通过计算得 $\beta l \geq \pi$ 则针对本工程需假定为半无限长弹性地基梁进行计算。

3 深层搭板的构造

3.1 埋设深度

① 对于桩柱式的桥台, 搭板一端可搭置在桩基一定深度的系梁、承台或增设的牛腿上, 另一端自由搁置在土体上。

② 从搭板底部地基反力的分布情况公式(3)和(5)可以看出, 搭板的设计与板底的地基刚度 k 有关, k 越大, 自由端板下地基反力 p 就越小, 由 Winkler 地基模型即可得出板下土体的位移量 δ 就越小。因此调整好搭板搭置深度, 使其下方土体刚度不能过小, 且要满足搭板下卧层的强度验算。

3.2 搭板的尺寸选择

深层搭板长度宽度的设计主要参照传统桥头搭板的设计^[12]。从经济及工程实践角度出发一般搭板长度在 $L = 3 \sim 10\text{ m}$ 较合理; 在条件允许的情况下搭板宽度尽量选与桥面等宽^[3]; 搭板的厚度及配筋设计时需考虑搭板厚度增加或配筋量的增加对搭板自重的影响, 深层搭板处治桥头的方法意在采用柔性搭板来均匀过渡桥头的不利沉降差, 因此在搭板满足抗弯抗剪强度条件下, 搭板厚度及配筋率不宜过大。

3.3 搭板与桥台的连接方式

本试验中采用植筋加 pvc 管的方式使深层搭板与桥台或是牛腿的连接介于半刚接半铰接状态。连接搭板与桥台时, 若采用完全铰接的形式, 即搭板直接搁置在桥台上, 远离桥头端的沉降往往较大, 会引起搭板在桥台侧的转动, 由于与桥台间没有转角约束, 势必会使得搭板自由端的沉降量更大; 若采用完全刚接的形式, 即搭板与桥台形成一刚性整体, 首先会增加原桥台的受力负担, 其次, 板下若有脱空现象发生, 搭板在搭置处就易破坏, 影响搭板的耐久性。

3.4 其他

按排水要求来设计搭板上表面的纵、横坡度, 或是整体的搭设纵、横坡度, 建议坡度 $i \leq 5\%$ 。

4 试验研究

4.1 测点布置

为取得深层混凝土搭板处治桥头段的监测数据, 在桥头处治区域地表布设水准的沉降观测, 在

土体的不同深度埋设沉降观测磁环测试分层沉降, 同时在搭板上下方土中埋设土压力盒及搭板混凝土中埋设应变计测试土压力及混凝土应变, 各观测点布置图见图3。

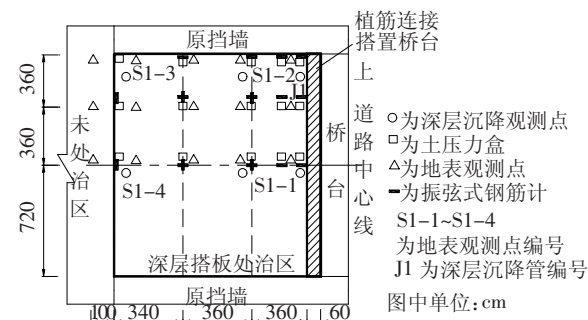


图3 现场各测点平面布置图

4.2 现场试验结果分析

2007年11月28日进行搭板内部钢筋的绑扎及钢筋计的埋放, 浇注完混凝土后搭板养护7 d, 其后进行回填二灰土及路面的铺筑。从维修后正式通车起, 历时304 d 共进行6次数据的采集整理。

4.2.1 地表沉降观测结果及分析

在桥头监测断面布置的地表沉降观测点共12个(见图3), 分别位于道路中心线、行车道边缘线及近桥台横向布设。图4为S1-1~S1-4地表沉降点随时间的变化曲线。起初桥头道路中心线车辆荷载反复作用强度较大沉降较为明显, 但随时间发展, 桥头处治段整体刚度较之前提高, 未处理区刚度较小沉降表现明显, 加之搭板尾部为自由端, 此处的沉降量就较明显。相比较而言路边缘线处的沉降量较小, 通车304 d 沉降量为7~17 mm, 该结果还与回填二灰土在边角处的压实情况有关系, 边角处的回填料是采用小型机械进行压实, 其压实效果与大型机械相比还是有差别, 在车辆运行后由回填料压缩产生的沉降量就明显。

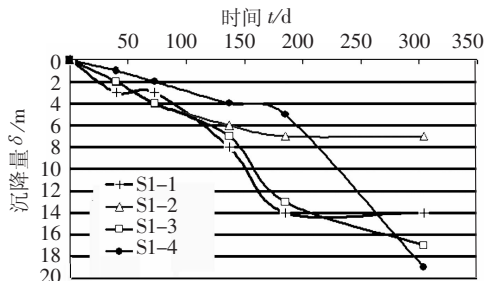


图4 处治区域首尾各观测点沉降量随时间的变化曲线

表1列出了通车后各测量时段内发生的最大沉降量、纵向线形坡度的变化及桥头附近地表沉降量。桥头台阶高度能直接的反应路桥搭接缝差异沉降差大小, 本桥头处治完成并通车304 d 后, 桥头差异沉降最大为1.4 cm, 纵坡坡度变化值均在0.1%范围内, 满足桥头沉降控制标准^[12-13]。

表1 各次测试沉降量最值及道路线形变化情况汇总

线形	通车累计天数 t/d	$\delta_{\max}/$ mm	对应位置	纵坡变化值 $\frac{\Delta_2 - \Delta_1}{L} \times 100/\%$	桥头台阶高差 Δ/mm
道路边线	40	5	处治区尾部	0.000	2
	73	4	桥头及处治区尾部	0.000	4
	137	12	处治区尾部	0.008	6
	185	16	处治区尾部	0.047	7
	304	17	处治区尾部	0.078	7
中心线	40	3	桥头	0.016	3
	73	4	处治区尾部	-0.008	3
	137	10	处治区尾部	-0.031	8
	185	14	桥头	-0.024	14
	304	19	处治区尾部	0.039	14

注:表中纵坡坡度变化值计算时, L 是处治区域的长度, Δ_1 是离伸缩缝50 cm处地表沉降量, Δ_2 是处治区尾部的地表沉降量;其中“桥头”是指离伸缩缝50 cm处的道路断面;“处治区尾部”是指搭板尾端对应在地面上的左右50 cm内的区域。

4.2.2 深层沉降观测结果及分析

整个试验桥头段共布置6根深层沉降观测管,其中道路中心线3根,路边缘3根,磁环的安放深度均是从搭板下开始算起,在沉降管钻孔安装之前已在搭板上预留孔洞。图5是J1观测点各深层沉降管磁环沉降数据随时间变化的曲线。J1是在靠近桥头安放的深层沉降观测点,正好是承台边缘向外50 cm处,J1沉降管前4个磁环沉降较为明显,由于混凝土搭板半铰接在桥台承台上,搭板下发生的这些沉降不会明显的反应在地面上,但混凝土搭板下方有可能发生脱空的现象,需要后期的继续监测读数采集。

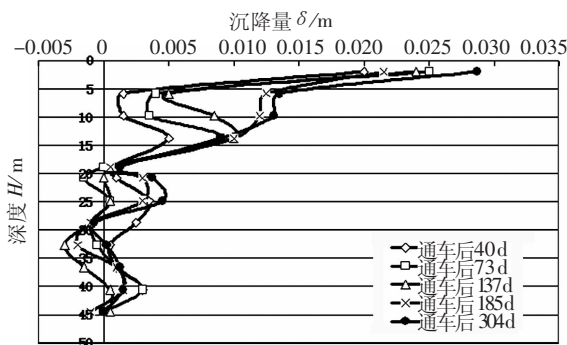


图5 J1观测点深层沉降变化曲线

4.2.3 土压力观测结果及分析

土压力盒主要是布设在搭板的上下缘,图6给出搭板沿纵向1/4线上下部的土压力比较曲线,板底土压力的变化与根据式(3)计算出来的理论值变化规律相吻合。在进行理论计算时,考虑板底土压力盒的埋深,平均深度是板底往下45 cm处。图中看出靠近承台处搭板下方土压力比上部压力减小85%,离承台6.5 m范围内的通过搭板过渡,下方土压力都有不同程度降低,由于混凝土

土搭板搭置端把上部的力传递给承台,可以降低减小土体变形量,从而有效的减小了近桥头段差异沉降;在实际工程中搭板尾端下部铺设一层二灰稳定碎石,此处土压力比理论计算值要大一点。

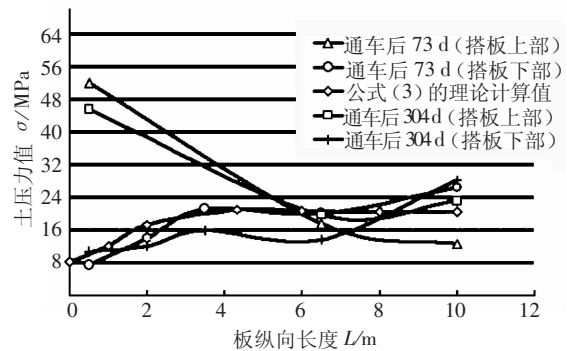


图6 混凝土搭板上下部土压力及搭板下方地基反力理论计算值的对比曲线

4.2.4 钢筋应变观测结果及分析

从图7、8可知,混凝土板内部钢筋底部拉应力有随时间逐渐增大的趋势,但从通车137d起钢筋应力值均有减小的趋势,该情况可能是由于搭板之前发生的是自身抗弯扭变形,之后发生的是整体绕搭置承台端的小角度转动,释放了搭板内部的部分应力。通车304 d,板中心线及边线的纵桥向钢筋拉应力均 <10 MPa(见图7),钢筋混凝土板横桥向的板底钢筋拉应力均 <5 MPa(见图8)。

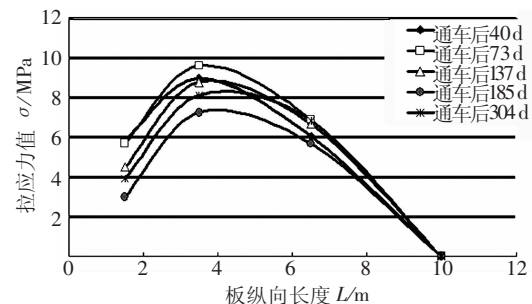


图7 板中心线处搭板底层钢筋纵向拉应力图

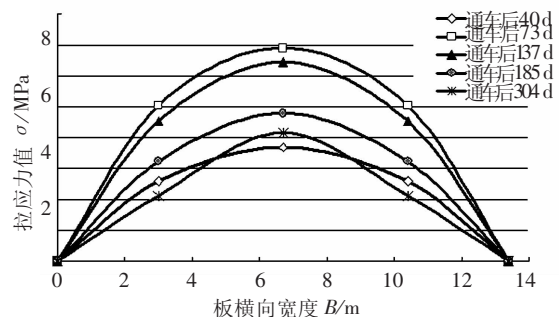


图8 搭板尾端处钢筋横桥向拉应力图

4.3 加固效果分析

为确定深层混凝土搭板法对路桥过渡段沉降控制的效果,还在该桥的另一侧桥头(温州侧),采用EPS块体轻质换填与其进行加固效果及经济比较,两桥头的地质状况类似。

图 9 是深层搭板处治与 EPS 轻质换填处治沿纵向道路中心线通车 304 d 后处治区地表沉降量比较曲线。多年来两处桥头的沉降差主要表现在承台外缘边界上,承台本身沉降量可忽略不计,由于承台上方原回填宕渣经过多年的车辆荷载作用,密实度很高,由宕渣自身压缩引起沉降量不会太大,本次桥头维修加固区域是从承台外侧边缘开始计算的,即图 9 中的 0 点位置。可以看出,两种方法在 0 点处的沉降量相差不大,但采用 EPS 换填处治随着时间的发展,纵桥向全线的沉降变化较大,最大沉降量达到 23 mm;而采用深层搭板处治随时间发展沉降量变化较小,在通车 304 d 后,沉降量最大达到 19 mm,道路线形总体平顺,且纵向各点沉降量均小于 EPS 轻质换填处治。

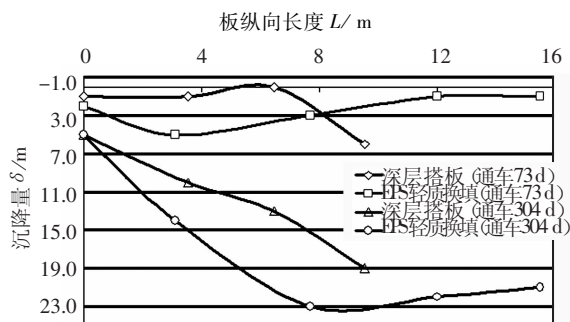


图 9 深层搭板与 EPS 轻质换填处治沉降控制效果比较

表 2 中通过分层总和法计算下卧层预定的沉降值,搭板下方的土体主要承受三角形荷载作用,均布荷载的数值由式(3)计算得到。通过比较,采用深层搭板的方法能够降低近桥台处 48% 的沉降,控制沉降效果明显,能够缓解桥头跳车现象。

表 2 道路中线不同测试点沉降量与理论预测的比较

处治方法	位置	预计沉降 $\Delta_{\text{预}} / \text{cm}$			现场实测减小沉降量	
		处治区 压缩量	下卧层 压缩量	总沉 降量	测沉降 $\Delta_{\text{实}} / \text{cm}$	减小沉 降量 $\delta / \%$
深层搭板处治	邻近桥台	0.4	2.3	2.7	1.4	48.1
	试验段中心	0.4	1.6	2.0	1.1	22.5
	邻非处理段	0.6	3.7	4.3	1.9	55.8

5 结 论

1) 对已建桥梁桥头过渡段地基进行深层搭板处治,通车运营 10 个月来,控制桥头沉降差效果明显,有效缓解桥头跳车现象。

2) 理论及试验都证实:通过搭板的过渡,靠近承台 6.5 m 范围内深搭板下部的地基反力明显减少,因此近桥台下部地基受附加应力减小,缓解了桥台与道路之间沉降差严重的问题。

3) 采用深层搭板处治桥头地基,可以有效地减轻车辆荷载的冲击作用引起的传统桥头搭板开

裂现象,现场试验通过钢筋计及土压力盒对深层搭板进行的长期监测证明了这一结论。

4) 与同桥另一侧桥头 EPS 轻质换填处治方法效果进行比较,结果表明深层混凝土搭板处治法能有效地控制桥头沉降差,该法是已建桥梁桥头过渡段地基维修加固的又一良好选择。

参考文献:

- [1] SHI Xiaomin, CAI Chunsheng. Finite element analysis of concrete approach slab on soil embankment [J]. Geotechnical Engineering for Transportation Projects, 2004, 1: 393 - 402.
- [2] CAI Chunsheng, SHI Xiaomin. Structural performance of bridge approach slabs under given embankment settlement [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(4): 482 - 489.
- [3] 顾锋,邵容光,裴世保. 桥头搭板设计[J]. 公路, 1996(1): 1 - 5.
- [4] KWAK H G, FILIPPOU F C, NONLINEAR F E. Analysis of reinforced concrete structures under monotonic loads [J]. Computer Structure, 1997, 65(4): 585 - 592.
- [5] CHEN Darhao, NAZARIAN S, BILYEU J. Failure analysis of a bridge embankment with cracked approach slabs and leaking sand [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2007, 21(5): 375 - 381.
- [6] ROY S, THIAGARAJAN G. Nonlinear finite-element analysis of reinforced concrete bridge approach slab [J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 801 - 806.
- [7] 王淑波,赖国麟. 斜交桥头搭板受力分析[J]. 中国公路学报, 1996, 9(3): 47 - 61.
- [8] WONG H K W. Effect of orientation of approach slabs on pavement deformation [J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(4): 590 - 602.
- [9] ZAMAN M, GOPALASINGAM A, LAGUROS J G. Consolidation settlement of bridge approach foundation [J]. Geotechnical Engineering, 1991, 117(2): 219 - 240.
- [10] 莫海鸿. 基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [11] 杨学祥. 均布荷载下一端固定的文克尔地基梁的基底压力特性及其工程意义[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 76 - 79.
- [12] 叶见曙. 桥头引道工后沉降控制标准的研究 [J]. 东南大学学报, 1997, 27(3): 12 - 17.
- [13] DANIEL J T, MAHER K T, JOSEPH V B. State of the art for control of bridge approach settlement [C]// Bridge Evaluation Repair and Rehabilitation. [S. l.]: Kluwer Academic Publishers, 1990: 57 - 67.

(编辑 赵丽莹)