

## 软土地区高速公路路基沉降监测及预测分析\*

张军辉<sup>1</sup>, 周剑坤<sup>1</sup>, 周平<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.云南省建设投资控股集团有限公司, 云南 昆明 650501)

**摘要:** 针对甬台温(宁波—台州—温州)高速公路软土路基填方工程,选取典型地质区段 10 个不同断面,采用沉降板法监测施工过程中 4 组路基沉降数据,分析填方路基不同时间的沉降规律,对比不同路基的沉降关系,并采用双曲线模型法对路基沉降进行预测。结果表明,水泥搅拌桩处理桥头地基可改善路基沉降,塑料排水板处理一般路段地基可减缓路基沉降的发生;采用双曲线模型法预测路基沉降具有相当高的可靠性。

**关键词:** 公路;路基;沉降监测;沉降预测;软土地区;双曲线模型

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2020)03-0064-05

路基的沉降稳定是高速公路畅行的重要保证,施工中沉降变形值是路基处理的重要指标。路基沉降监测方法有横剖测试法、CMOS 图像传感器测量法、沉降水杯法、基于光纤光栅(FBG)的新型拉伸计、沉降板法等。其中:横剖测试法的监测设施便于保护,不影响施工,但其监测质量不易控制,可靠性差;CMOS 图像传感器测量法的监测精度较高,可实现自动化监测,但其稳定性差,现场监测难以实施;沉降水杯法通过测量管内液面高度差得出土体内部沉降量,仅限于不结冰的地区使用;基于光纤光栅(FBG)的新型拉伸计可实现连续自动监测,但成本高,测量范围小;沉降板法通过测量不同时间段沉降观测点的标高得出路基沉降量,技术成熟,成本低廉,是路基沉降监测的首选。

除对路基进行沉降监测外,路基工后沉降预测同等重要,方法有灰色理论方法、BP 神经网络法、分层总和法、数值计算、双曲线模型法等。其中:灰色理论方法不够精确,理论性强,局限性大,数据处理麻烦;BP 神经网络法的工作量大,需使用庞大的软件进行处理,一般技术人员不能适应,且无法及时处理数据,不具有时效性;分层总和法假设地基只产生竖向变形,但软基存在明显的侧向变形;岩土工程数值计算软件大都需室内试验为其提供参数,且理论性较强、操作复杂,不易被一线施工人员接受;双曲线模型法相对简单,且可靠性高,当天处理完数据即可作出推算,其运用最为广泛。

目前类似浙江温州沿海地区软土地基的地质条

件可供信赖的经验和信息很少,路基沉降趋势经验更少,无法合理有效地预测路基工后沉降。该文采用沉降板法监测路基沉降,利用双曲线模型法预测工后沉降,为该地区路基沉降监测和预测提供参考。

## 1 沉降监测设计

### 1.1 工程概况

甬台温(宁波—台州—温州)高速公路温州段全长 56.855 km,沿线为特殊性岩土,以粉质黏土和淤泥质黏土为主。出露地层单元较少,基岩主要为侏罗系、白垩系火山碎屑岩和侵入岩,第四系主要为全新统海积松散堆积物地层。侏罗系上统磨石山组以中酸性火山碎屑岩为主,岩性以青灰色、灰紫色块状流纹质晶屑凝灰岩或晶屑熔结凝灰岩为主,常含角砾;白垩系下统朝川组以中酸性火山碎屑岩为主,岩性以青灰色晶屑凝灰岩、晶屑熔结凝灰岩、晶屑玻屑熔结凝灰岩、熔结凝灰岩为主,部分段夹砂砾岩;侵入岩岩性以酸性岩为主,少量中酸性,主要为马站钾长花岗岩。工程区第四系分布最广,岩性以粉质黏土、含黏性土碎石为主;平原区上部堆积厚度巨大的第四纪地层,厚度达 70~100 m,岩性以淤泥、淤泥质土为主。

该地区软土呈软塑~流塑状,干缩性大,工程性质极差,易发生侧向滑移和不均匀沉降。一般无特殊要求的路段采用塑料排水板处理;桥头、通道等结构物相邻路段对路基沉降要求较高,采用水泥搅拌桩处理。

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878078)

## 1.2 沉降监测断面选取

根据该工程软基段路基填土高度、淤泥层厚度、软基处理方式等情况,为对比塑料排水板地基、水泥搅拌桩地基及不同填土高度路基的沉降情况,选取 10 个断面进行沉降监测。其中:5 个断面为塑料排水板地基,设计填土高度,桩号 AK0+020 为 3.25 m,FK0+236 为 2.79 m,GK0+640 为 2.87 m,GK0+850 为 2.82 m,IK0+187 为 2.54 m;5 个断面为水泥搅拌桩地基,设计填土高度,桩号 AK0+270 为 2.55 m,DK0+110 为 3.31 m,FK0+268 为 2.55 m,FK0+603 为 3.06 m,IK0+300 为 2.23 m。选取断面的路基跨度均大于 12 m。监测断面平面布置见图 1。

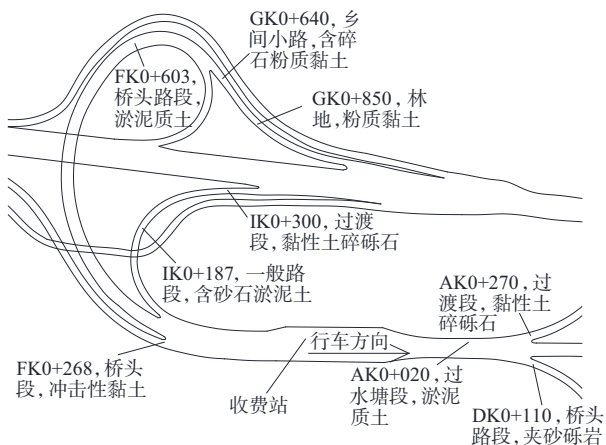


图 1 沉降监测断面平面布置

一般路段每隔 100~200 m 设置 1 个监测断面,桥头路段和过渡段设置 2~3 个监测断面;路基宽度不大于 8.5 m 时仅设置路中沉降板,路基宽度为 8.5~12 m 时设置路肩沉降板,路基宽度大于 12 m 时设置路中沉降板和路肩沉降板(见图 2)。

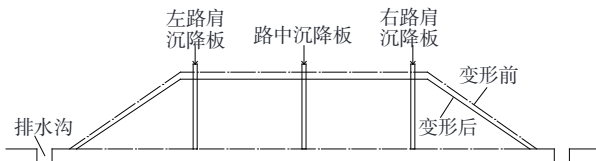


图 2 沉降板布设

## 1.3 沉降监测装置及埋设方法

沉降监测装置由钢板、闷头和金属测管等组成。底板尺寸为 60 cm×60 cm×0.9 cm,测管直径 3 cm,厚度不小于 5 mm,每节长度 20 cm。第一节管用 3 根加强钢筋将其焊在沉降板上,随着填土的增加,测管相应加高。接高后的测管上口加盖闷头,便于立尺和保护测管不被破坏(见图 3)。

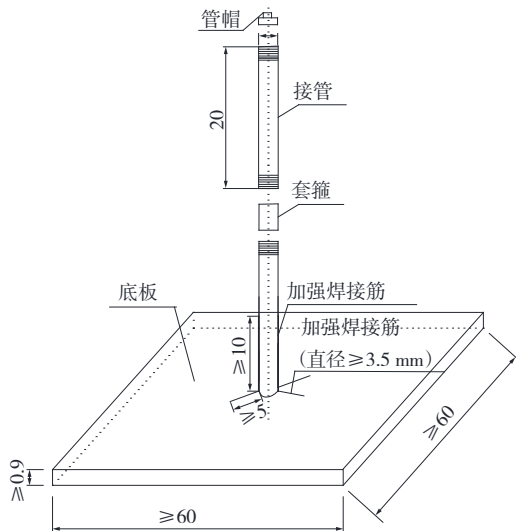


图 3 沉降监测装置(单位:cm)

沉降板埋设方法:在埋设点地面挖 80 cm×80 cm×30 cm 左右的土坑,坑内用厚度为 3~5 cm 的砂石垫平压实;把沉降板平放在土坑内,周围用砂石填实,并校正水平,用填土整平压实;填土时先将沉降板的周围压实,保护沉降板不受破坏;护套管理设在高于底板 35 cm 处。

## 2 沉降监测结果与分析

沉降监测按规范要求进行,由固定人员按照固定周期进行监测,并采用相同的监测路线和监测方法,以最大限度减小误差。每次监测完成后,当天处理数据,以及时发现问题并加以解决,为以后的监测提供经验教训。

### 2.1 沉降监测结果

#### 2.1.1 塑料排水板处理路段

桩号 AK0+020 路段为过水塘路段,填方高度 3.25 m。采用的塑料排水板宽度为 100 mm,厚度 4.5 mm,路基处理长度 100 m,布置间距 1.1 m,处治深度 30 m。该路段路基含水量大,土基松软,最终完成填土时最大沉降量高达 630 mm。路基填筑第 1 阶段填土高度仅 2 m,堆载预压时间仅 29 d 时,左侧路基累计沉降量已达 210 mm,约占总沉降量的 35%,沉降速率过大,为保证路基的安全及时停止填土。在第 2 阶段,随着堆载时间的延长,路基沉降减缓,继续填土。到第 3 阶段时,沉降趋于稳定。沉降监测结果见图 4。

桩号 GK0+850 路段为林地,填方高度为 2.82 m,路基主要承力层为粉质黏土和砂土。塑料排水板

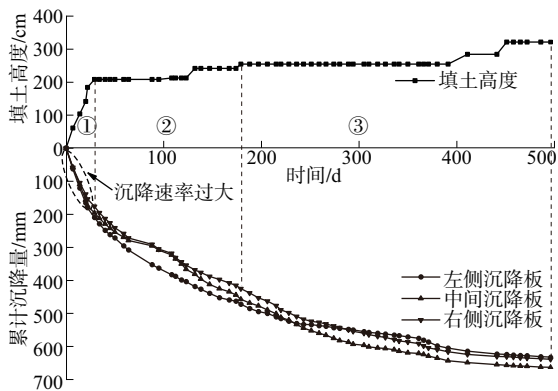


图4 AK0+020断面路基累计沉降量与填土高度时间曲线

宽度为 100 mm, 厚度为 4.5 mm, 路基处理长度 55 m, 布置间距 1.1 m, 处治深度 15 m。在路基填筑第 1 阶段, 随着填土高度的增加, 路基累计沉降量较快增长; 第 2、3 阶段填土高度增加而沉降量几乎不变。由于前期施工速度快, 路基沉降量较大, 为保证路基的安全和通车后的稳定, 采用先预压再继续填土的方法。在预压一定时间后, 填土增加而路基沉降并不明显。沉降监测结果见图 5。

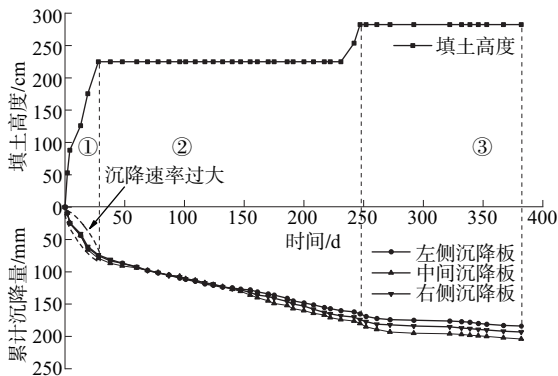


图5 GK0+850断面路基累计沉降量与填土高度时间曲线

### 2.1.2 水泥搅拌桩处理路段

桩号 FK0+268 路段为桥头路段, 填方高度为 2.55 m。该处路基松软、含水量大、路基反弹性大, 采用水泥搅拌桩处理。处理长度 35.3 m, 桩长 18 m, 桩径 0.5 m, 桩距 1.1 m, 采用 42.5 号普通硅酸盐水泥浇筑。在路基填筑第 1 阶段, 尽管填筑速度较快, 但路基沉降量并未增长太多; 第 2 阶段继续填土, 路基沉降速度大幅减小; 第 3 阶段达到设计填土高度并继续预压时, 路基沉降不明显, 几乎保持稳定, 平均沉降速率仅 0.55 mm/d。在整个监测期内, 路基沉降速率相对较慢, 路基预压期内路基沉降速率更小。沉降监测结果见图 6。

IK0+300 路段为过渡段, 填方高度 2.23 m。该

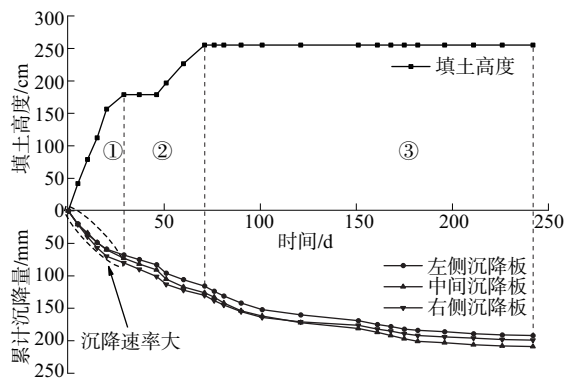


图6 FK0+268断面路基累计沉降量与填土高度时间曲线

处为高速公路路口处, 车流量大, 行车荷载集中, 路基沉降要求高, 采用水泥搅拌桩处理。处理长度 30 m, 桩长 15 m, 桩径 0.5 m, 桩距 1.1 m, 采用 42.5 号普通硅酸盐水泥浇筑。以路中沉降板为例, 在路基填筑第 1 阶段, 路基填筑至 1.86 m 时, 路基累计沉降量为 102 mm, 沉降量与填土高度比约为 5.5%; 第 2 阶段填土至设计标高 2.23 m 时, 路基累计沉降量为 122 mm, 沉降量与填土高度比约为 4.7%。路基土承载性能有所提高; 第 3 阶段路基沉降趋于平稳, 基本保持不变。填筑期的平均沉降速率为 1.95 mm/d, 监测期为 1.16 mm/d, 预压期为 0.83 mm/d, 随着堆载时间的延长, 路基沉降速率逐步降低, 路基承载性能和稳定性能提高。沉降监测结果见图 7。

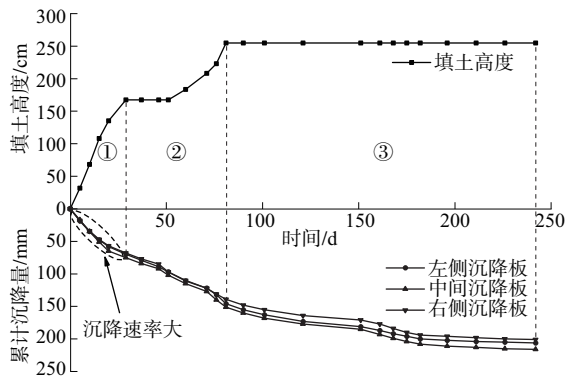


图7 IK0+300断面路基累计沉降量与填土高度时间曲线

### 2.2 沉降结果分析

在整个路基沉降监测期内, 各断面累计沉降量均在合理范围内, 路基相对保持稳定, 卸载前 2 个月内路基沉降不超过 5 mm/月, 符合 JTG D30—2015《公路路基设计规范》的要求。各断面沉降量见表 1。

由表 1 可知: 1) 路基最大沉降量和最大沉降速率均发生在 AK0+020 断面处。该处属于过水塘路段, 路基土终年浸泡于水中, 含水率大, 干缩性强, 沉

降量大。在用塑料排水板处理路基后,路基性能提升,在预压期内路基沉降速率仅为整个填筑期的 15%,承载性能得到改善。2) DK0+110 断面处主要承力层为夹砂砾岩,承载性能好,且路基在经过水泥搅拌桩处理后土体得到硬化加固,力学性能提升,尽管该处填高大,但最终沉降量和沉降速率比与其他断面都小。

表 1 各断面沉降量

断面桩号	填土高度/m	最大沉降/mm	监测时间/d	沉降速率/(mm·d <sup>-1</sup> )
AK0+020	3.25	663	501	1.32
AK0+270	2.55	105	165	0.64
DK0+110	3.31	66	196	0.34
FK0+236	2.79	307	503	0.61
FK0+268	2.55	209	242	0.86
FK0+603	3.06	195	225	0.87
GK0+640	2.87	438	490	0.89
GK0+850	2.82	204	382	0.53
IK0+187	2.54	216	242	0.89
IK0+300	2.23	150	242	0.62

对比图 4~7,路基填筑第 1 阶段,填土速率较大时,沉降速率较大;经过第 2 阶段预压再填土后,沉降速率下降,地基性能得到提升;经历第 3 阶段长时间预压后,沉降速率更小。水泥搅拌桩处理路基更节省时间,可缩短工期;累计沉降量更小,可节约成本;平均沉降速率更低,可提高路基安全性能。

从整体情况看,水泥搅拌桩处理路基后,平均沉降量比塑料排水板的小,原因在于塑料排水板只是挤出路基中多余的水分和空气,使其密实度增大,改变土体的一些物理性能;而水泥搅拌桩是将水泥喷入土体内部,经过充分搅拌,土体和水泥形成一个整体,土体结构发生改变。

### 3 路基沉降预测

根据已有监测数据和沉降规律,采用双曲线模型法预测路基沉降,推测路基的最终沉降。公式为:

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (1)$$

式中: $S_t$  为  $t$  时刻的沉降量; $S_0$  为初始沉降量; $\alpha$ 、 $\beta$  为参数。

由下式可求得任意时刻路基的沉降量:

$$S_t = S_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} \quad (2)$$

式中: $t_0$  为初始时间。

当  $t \rightarrow \infty$  时,  $S_t = S_0 + 1/\beta$ , 由式(2)得:

$$\frac{t - t_0}{S_t - S_0} = \alpha + \beta(t - t_0) \quad (3)$$

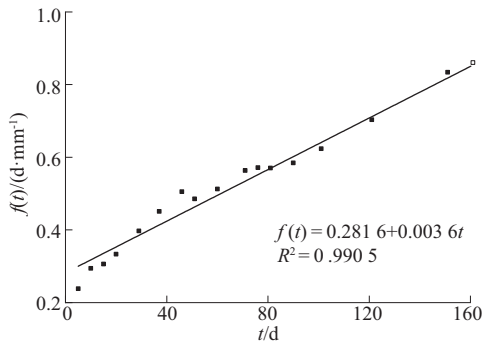
令

$$f(t) = \frac{t - t_0}{S_t - S_0} = \alpha + \beta(t - t_0) \quad (4)$$

由式(4)可知,  $f(t)$  是关于  $t$  的一次函数,通过计算可求得  $\alpha$ 、 $\beta$  的数值。以 FK0+268 中间沉降板前 151 d 实测数据为例,取  $t_0 = 0$ 、 $S_0 = 0$ , 计算  $f(t)$  的值,结果见表 2 和图 8。

表 2  $f(t)$  计算结果

$t/d$	$f(t)/(mm \cdot d^{-1})$	$t/d$	$f(t)/(mm \cdot d^{-1})$
5	0.238 1	60	0.521 8
10	0.249 1	71	0.563 6
15	0.306 1	76	0.571 4
20	0.333 3	81	0.570 4
29	0.379 6	90	0.584 4
37	0.451 2	101	0.623 5
46	0.505 4	121	0.703 5
51	0.485 7	151	0.834 3

图 8  $f(t) \sim t$  曲线

由图 8 可知:双曲线模型的参数  $\alpha = 0.281 6$ ,  $\beta = 0.003 6$ , 拟合曲线的相关系数  $R^2 = 0.990 5$ , 相关度较大。将参数代入式(1), 得:

$$S_t = \frac{t}{0.281 6 + 0.003 6t} \quad (5)$$

利用式(5)对 FK0+268 断面进行沉降预测, 结果见图 9。

由图 9 可知:利用前 151 d 的沉降监测数据预测整个监测期 250 d 的沉降, 预测结果和实测值较



接近,误差大部分控制在 1.5~6 mm,最大误差 8.37 mm,最小误差 0.13 mm,误差较小,说明运用双曲线模型法预测路基沉降合理。 $t \rightarrow \infty$ 时,由  $S_t = S_0 + 1/\beta$  计算得路基的最终沉降量为 278 mm。根据 JTG/T D30-02-2013《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》,桥头路段容许工后沉降为 100 mm。该工程监测期沉降量为 209 mm,工后沉降为 69 mm,符合规范要求。

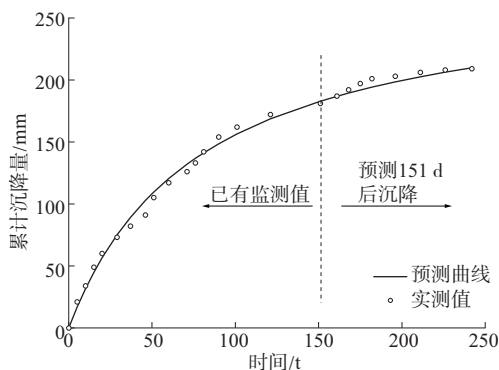


图9 沉降预测结果与实测值对比

#### 4 结语

该文通过沉降板法对甬台温高速公路进行沉降监测,分析不同填土阶段的沉降情况,阐述地基变形和加载速率之间的关系;对比分析不同路基处理方式对沉降的影响,得出水泥搅拌桩处理桥头地基可改善路基沉降,塑料排水板处理一般路段地基可减缓路基沉降的发生;采用双曲线模型法预测路基最终沉降,预测结果与实测值的误差很小,采用该方法预测路基沉降具有相当高的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 吉力此且,宋吉荣.高速公路路基沉降与施工控制研究[J].公路工程,2018,43(2).
- [2] 王金明,陈昌彦,张建坤.不同类型填方路基沉降监测及沉降分析[J].工程勘察,2019,47(1).

(上接第63页)

曲线上凸。

#### 参考文献:

- [1] Li S, White T D. Falling-weight deflectometer sensor location in the backcalculation of concrete pavement moduli [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2000, 28(3).
- [2] JTG H20-2007, 公路技术状况评定标准[S].

- [3] 陈勇,黄泽春,张增强.填埋场沉降监测技术研究现状及其发展[J].环境科学与技术,2009,32(4).
- [4] 钟志旺,陈建译.基于CMOS面阵的道岔缺口定位监测研究[J].铁道学报,2016,38(12).
- [5] 刘尧军,赵玉成,冯怀平.路基沉降监测方法应用研究[J].公路交通科技,2004,21(1).
- [6] 贾亮,徐国双.路基沉降监测中几种监测方法的应用[J].北京测绘,2010(3).
- [7] 徐实.基于激光准直特性的隧道整体道床沉降图像监测技术[J].中国铁路,2012(5).
- [8] 樊振.高速公路路基沉降分析与监测技术研究[D].西安:长安大学,2018.
- [9] Maheshwari M, Yang Y, Upadrashta D, et al. Fiber Bragg Grating (FBG) based magnetic extensometer for ground settlement monitoring[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 296.
- [10] 蒋建国,梁洪涛,何金龙.双曲线法预测技术在地下工程沉降观测中的应用[J].路基工程,2013(2).
- [11] 胡振南.双曲线法在路基沉降预测中的应用研究[J].公路工程,2011,36(3).
- [12] 张军辉.软土地基上高速公路加宽变形特性及差异沉降控制标准研究[D].南京:东南大学,2006.
- [13] Oliveira P J V, Santos S L, Correia A A S, et al. Numerical prediction of the creep behaviour of an embankment built on soft soils subjected to preloading [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 114.
- [14] Providakis S, Rogers C D F, Chapman D N. Predictions of settlement risk induced by tunnelling using BIM and 3D visualization tools[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92.
- [15] 肖硕.南方湿热地区典型路基土干法与湿法击实试验对比研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [16] 魏建国,李洋,王晶.驻信高速改扩建工程路基沉降观测研究[J].湖南交通科技,2016,42(2).
- [17] 刘珣.软土路基沉降变形监测及预测方法的研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.

收稿日期:2019-10-21

- [3] JTG D40-2011, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [4] Noureldin A S, Zhu Karen, Li Shengbo Eben, et al. Network pavement evaluation with falling-weight deflectometer and ground-penetrating radar [J]. Transportation Research Record, 2003, 1860.
- [5] 冀冠宇. FWD荷载作用下路面动弯沉响应试验研究[J].山西交通科技, 2019(1).

收稿日期:2019-08-16