

# 碎石桩处理软土路基侧向变形规律与预测分析

于涛

(中邮通建设咨询有限公司, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 软土地区修正高速公路、高速铁路面临的软土地基的变形问题甚为复杂, 尤其是西南地区软土变形特性仍未探明。为了探讨软土路基经碎石桩处理后的路基侧向变形的规律, 本文基于四川省某高速公路项目, 通过监测和梳理路基典型断面的深层水平位移观测数据, 分别总结侧向水平位移随埋深和时间的变化规律, 获得经碎石桩处理后的软土路基侧向变形空间变形特征, 进一步拟合得出相应的预测模型。研究表明: (1) 路基侧向水平位移随深度成“上凸”形变化, 近地表处侧向位移变化较为剧烈, 经堆载预压处理后后期位移回缩率在 10% 左右。

(2) 路基最大侧向水平位移随时间呈“S”形发展。(3) 根据侧向水平位移随深度和时间的变化特点, 分别提出“凸”形曲线、“S”形曲线预测模型, 该模拟的预测结果与实际监测数据较为吻合, 预测效果良好。研究成果可为西南地区山地型软土工程建筑提供理论积累和实践指导。

**关键词:** 碎石桩; 软土路基; 侧向位移; 变形规律; 预测模型

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)06-0502-06

## Analysis and prediction of lateral deformation of soft soil subgrade treated by gravel column

YU Tao

(China Post Construction Consulting Co., Ltd., Nanjing 210003, Jiangsu, China)

**Abstract:** In soft soil area, the deformation of soft soil foundation faced by expressway and high-speed railway is very complicated, especially in Southwest China. In order to explore the lateral deformation of soft soil subgrade after gravel pile treatment, based on an expressway project in Sichuan province, by monitoring and combing the deep horizontal displacement observation data of typical subgrade sections, this paper summarizes the variation of lateral horizontal displacement with depth of embedment and time, and obtains the spatial deformation characteristics of lateral deformation of soft soil subgrade after gravel column treatment. The corresponding prediction model is obtained by further fitting. The results show that: (1) The lateral horizontal displacement of subgrade changes in a “convex” shape with depth, and the lateral displacement near the surface changes rapidly; after preloading, the displacement retraction rate is about 10%. (2) The maximum lateral horizontal displacement of subgrade develops in “S” shaped profile with time. (3) According to the variation characteristics of lateral horizontal displacement with depth and lateral horizontal displacement with time, the prediction models of “convex” curve and “S” curve are proposed respectively. The simulation prediction results are consistent with the actual monitoring data, and the prediction effect is good. The research results can provide theoretical accumulation and practical guidance for mountainous soft soil engineering buildings in Southwest China.

**Key words:** gravel column; soft soil subgrade; lateral deformation; the characteristic of deformation; prediction model

## 0 引言

大量高等级公路、高速铁路的建设要穿越软土地区, 然而软土地基的变形问题甚为复杂。路堤下

地基的变形包括竖向沉降和侧向水平向变形<sup>[1]</sup>。水平变形关乎地基的稳定性, 但是目前研究重点集中在精准预测路堤的工后沉降方面, 忽略了水平变形对沉降的影响, 从而导致其相关研究鲜少报道。

HARRY<sup>[2]</sup>、SMADI<sup>[3]</sup>、TAVENAS 等<sup>[4]</sup> 分别以弹性理论为基础提出了软基侧向变形的计算方法,总结了全施工周期内路基侧向变形与路堤沉降的拟合关系。国内众多学者经实践和理论研究<sup>[5-7]</sup> 认为路堤填筑期软土地基侧向位移与软土成因、软土沉积地层、地基土非线性应力-应变特性、软土渗透性、路堤填土性状、路堤填筑速率、地基处理方法等因素均有直接关系。就上述因素,进一步考虑软土厚度、软土厚度与填土高度比值等因素,在原位变形观测数据的基础上获得了上述各因素对侧向变形的影响规律<sup>[8]</sup>。并且结合不同沉积环境下的软土地基上修筑高速公路的实测变形数据进行了深入分析,简单总结了塑料排水板、粒料桩、高压旋喷桩和预制桩处理方式下深层水平位移在路堤填筑的全寿命周期内的发生发展规律,提出在路堤上覆堆载作用下软基侧向水平向位移随深度变化呈“弓”字型<sup>[9]</sup>,指数函数来反映侧向位移沿深度方向的分布特征是较为合适的<sup>[10]</sup>。上述研究多见于浙江<sup>[11]</sup>、山东<sup>[12]</sup>、上海<sup>[13]</sup>、广州<sup>[14]</sup>等地的浅水瀉湖相、海陆交会相、三角洲相、东部沿海滨海相软土。而四川地区软土属于山地型软土,物理指标较我国部分沿海地区低,而力学指标要高<sup>[15]</sup>。对其变形特性研究相对较少,仍然遵循华东沿海地区的工程经验。

本文依托四川省某一在建高速公路项目,梳理典型断面的深层水平位移观测数据,分别归结侧向水平位移随埋深和时间的变化规律,以提出相应的预测模型。

## 1 工程概况

项目高速公路穿越成渝双城经济区的核心地

带,意为助力区域建设而兴建,线路全长 130 km,主线路面宽 24.5 m,双向四车道,填筑高度为 5~10 m。据统计全线软基 150 余处,沿线软土地基呈槽状均匀分布在山间间隔(图 1)。研究区域地表以下岩土体的分层、工程性状及岩土体物理力学参数统计见表 1。



(a) 软基分布图

(b) 软基岩芯照

图 1 研究区软土地基山间间隔分布照片

Fig. 1 Photos of mountain interval distribution of soft soil foundation in the study area

研究区地基软土成因以第四纪残坡积、冲洪积为主,为高、低液限黏土。从表 1 可见,其天然含水率在液限、塑限之间,为可塑性黏土,结合孔隙比、强度等指标可认为该区黏性土具含水率高、强度低、压缩能力中等特点。同时,对比我国其他地区软土的性状,研究区天然含水率均值为 25%~35.1%,小于液限,大于塑限,为可塑状态;孔隙比均值分别为 0.7, 1.0;压缩系数均值分别为 0.35, 0.6;黏聚力均值分别为 32.1, 10.5;摩擦角均值分别为 13.2, 6.1。这些指标都说明该区软土具有高含水率、高液限、低强度、中等压缩性等特点。但该区高低液限黏土的软土物理指标较我国部分沿海地区低,而力学指标要高。可知研究区软土物理指标较我国部分沿海地区低,而力学指标要高。

全线软土地基根据黏土层厚度、路堤填筑高度等因素,处理方式设计有换填、碎石桩、塑料排水板。碎石桩处理采用正三角形布设,间距为 1.5 m,处理深度以超过勘探揭露的软土层厚度为标准。碎石桩加固软基的相关参数见表 2 所示。

表 1 岩土体物理力学参数均值

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

岩土体类型	埋深/m	性状描述	含水率/%	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙率	压缩系数/MPa <sup>-1</sup>	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	塑性指标
高液限黏土	2~10	湿-饱和,软塑	35.1	1.78	1.0	0.60	10.5	6.1	29.4
低液限黏土	10~15	湿,软可塑	25.0	1.96	0.7	0.35	32.1	13.2	13.8
泥岩	15~30	风化裂隙发育-较发育,岩体内局部破碎, RQD 为 40~70	—	24.5	—	—	28.0	35.0	—

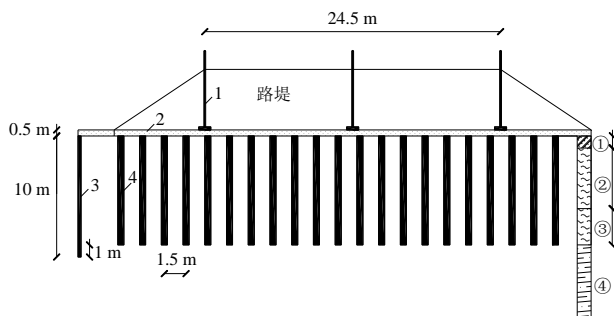
表 2 碎石桩相关加固参数

Table 2 Parameters related to consolidation calculation of gravel column

石桩间距 s/m	碎石桩直径 d/m	面积置换率 m/%	等效直径 d <sub>e</sub> /m	加固面积 A/m <sup>2</sup>	井径比 N
1.5	0.5	10.0	1.58	1.96	3.15

## 2 监测方案及数据处理方式

为了探究碎石桩处理后软土地基深层水平位移在路堤填筑过程中发生发展规律,选取 10 处典型断面在其路堤边坡坡脚处打设钻孔并埋设了深层水平位移监测设备(图 2),测斜仪精度为  $\pm 0.02 \text{ mm}/500 \text{ mm}$ ,每个测斜孔根据软土层厚度不同布设 10~15 个测斜元件,采用自动化数据采集系统同步监测数据,数据采集频率根据填筑阶段不同而分期设定(每层填筑完成后的 1~2 d 内每 10 min 采集一次数据,非填筑期每 60 min 采集 1 次数据)。



(a) 典型断面和侧斜管埋设示意图

①耕植土 ②高液限黏土 ③低液限黏土 ④基岩  
1-沉降板 2-砂垫层 3-测斜管 4-处理方式



(b) 水平位移监测设备

图 2 典型监测断面

Fig. 2 Horizontal displacement monitoring equipment

最终通过水平位移-深度-时间关系、最大水平位移发育位置等来获得碎石桩处理软土路基侧向变形规律与预测计算模型。

## 3 观测结果分析

通过对路堤填筑期和预压期观测了近 1 年的时间,获得了大量的有效水平位移监测数据。分析时解析筛选了代表性时间段的数据开展深入分析,10 处典型断面的观测结果见表 3。分析时以 K127+520

监测结果(见图 3)为主进行简要说明。

表 3 侧向水平位移观测数据统计表

Table 3 Statistical table of lateral horizontal displacement observation data

断面编号	软土厚度/ m	路堤填高/ m	最大水平位移/ (mm-位置/m)	侧向回 缩率/%
K27+500	8	10	10.55-1.5	11.8
K64+220	13	12	5.5-8.0	0
K77+580	8	9	10.5-2.0	0
K83+300	9	18	23.4-2	11.3
K109+670	10	14	7.25-2.5	21
K115+840	10	6	17.5-2	0
K119+650	10	13	18.3-2	10
K119+700	6	12	7.1-1.5	5
K120+570	9	13	33.65-2.0	13
K127+520	11	10	9.2-2.5	0

(1) 深层水平位移监测元件埋设时路堤均已 有 1~2 m 的回填高度,分析中暂时忽略已填高度对土体水平位移的影响。从图 3 可见,随着路堤填筑高度的增加,土体深层水平位移逐渐增大,从地表到基底表现为先增大后减小的“凸”型变化,最大侧向水平位移为 10 mm,距离地表 1.5~2.5 m 处变化剧烈,位于整个软土埋深的中上部,这主要是受荷载的传递深度影响而导致的。碎石桩增加了土体排水途径,使孔隙水压力的消散时间减少,即每次填筑完成后很快完成有效应力的转化,降低了软基的变形量,路堤每层填筑完成后其软基的变形可以在很短的时间内达到一个稳定值。

(2) 同时对各个断面在堆载预压后期观测结果进行统计显示:约有 50% 的监测断面侧向位移存在“回缩现象”,回缩率在 10% 左右,有 5~8 mm。表明经碎石桩处理的软土地基在监测后期普遍存在“回缩现象”,且较为明显。究其原因土体在固结后期,随着土体孔隙水排出,土体有效应力增加,土体固结排水引起的侧向收缩大于剪应力引起的侧向变形。但应注意在后期排水减小引起的再次向外鼓胀。

(3) 随时间变化,最大侧向水平位移与时间呈非线性变化(图 3),曲线存在 3 个阶段的变化,A 区域为填筑前期,  $\Delta y_m = \Delta S_D$  (在路堤填筑过程中侧向变形增量 ( $\Delta y_m$ ) 随路中沉降增量 ( $\Delta S_D$ )); B 区域为  $\Delta y_m = 0.15 \Delta S_D$ ,此阶段地基土体固结排水较慢,大部分变形发生在此阶段; C 区域为固结阶段,此阶段为长期排水阶段,  $\Delta y_m = 0.3 \Delta S_D$ 。

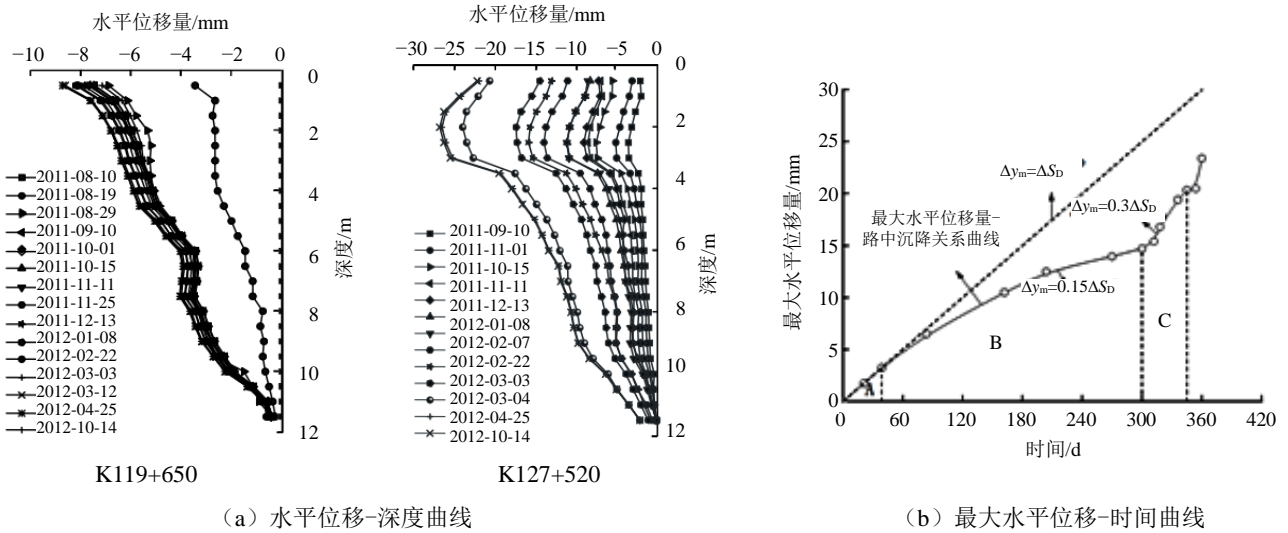


图 3 水平位移观测曲线

Fig. 3 Horizontal displacement curve

### 4 侧向水平位移预测模型

#### 4.1 沿深度方向预测模型

通过对碎石桩处理后软土路堤荷载作用下侧向水平位移随深度从地表到基底表现为先增大后减小的“凸”型变化，在已有学者研究的基础上，

引用以下复合函数形式对碎石桩处理后软土地基侧向位移进行预测，如式（1）：

$$y(z) = a \times z^{-b} \times e^{-cz} \quad (z > 0) \quad (1)$$

式中：y 为侧向位移量；z 为深度；a、b、c 为待定参数。图 4 为各参数变化后预测模型曲线。

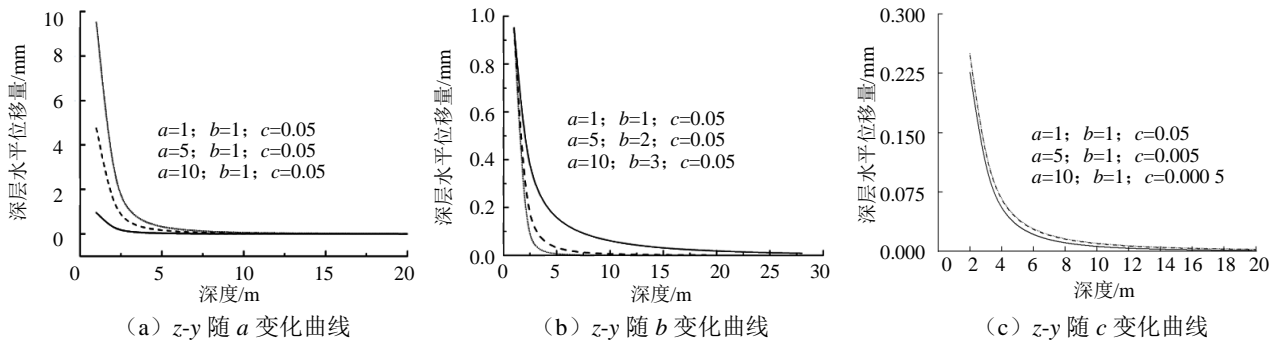


图 4 预测公式影响因素曲线

Fig. 4 Influence factor curve of prediction formula

从图 4 可以看出，a 主要反映了最大水平位移变化的数值，与加载量级有关；b 主要反映了侧向变形的影响深度，与监测深度有关；c 主要反映曲线位置的整体平行，同时增加数据拟合的灵活性。表 4 为本文预测曲线在填筑完成后对最大位移位置的预测结果对比（其中 a=10, b=1, c=0.05）。

线作为最终的预测模型，见式（2）。根据文献[16]相关论述，得出参数 c、r 用来增加数据拟合的灵活性，控制最终侧向位移的作用，r 一般取值在 0.1~1 之间。另外，由于“S”形成长曲线单调递增性，当时间 t 趋近于无穷大时，式（2）趋近于 a，故在计算中可先确定 a，并通过最小二乘法进一步确定其他参数。

从表 4 可见， $y = a \times z^{-b} \times e^{-cz}$  曲线能很好的拟合碎石桩处理后软土地基侧向变形情况。对本项目的监测数据的分析，预测模型与监测情况较吻合，拟合度较好，基本在监测所获深度的范围内。

$$y(t) = \frac{a}{1 + e^{(b-cx^r)}} \quad (2)$$

式中：y(t) 为 t 时刻的沉降量；a、b、c 为待定系数。

#### 4.2 沿时间尺度的预测模型

对于最大土体深层水平位移随时间呈“S”形分布（图 3）变化的特点，本文选择“S”形成长曲

如若采用式（2）进行预测分析，对于本例而言，r 可取 0.5, a=16~20, b=3.5~4, c=0.4~0.43。预测结果见图 5 所示，可见，预测模型与实测数据

较为吻合。

表4 预测模型预测结果对比

Table 4 Comparison of prediction results of prediction models

断面	预测结果(最大位移深度范围/m)	
	“凸”函数	监测深度
K27+500	0.5~2.5	1.5~2.5
K64+220	0.5~3.0	1.5~2.5
K77+580	0.5~3.0	1.5~2.5
K83+300	0.5~2.5	1.0~2.5
K109+670	1.0~2.0	1.0~2.0
K115+840	1.0~2.5	1.0~2.0
K119+650	1.0~3.0	1.5~3.0
K119+700	1.0~2.0	1.0~2.0
K120+570	0.5~2.5	1.0~2.0
K127+520	0.5~3.0	1.5~2.5

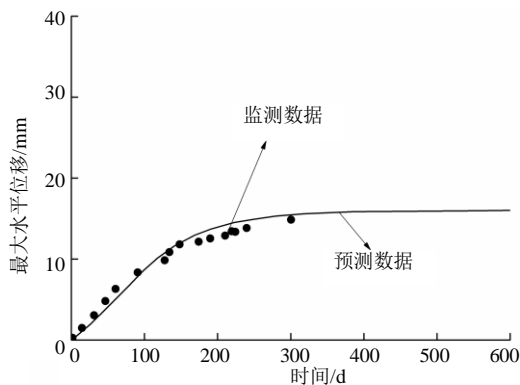


图5 K127+520断面预测结果(拟合度95%)

Fig. 5 Prediction results of K127 + 520 section

## 5 结 论

基于四川省某高速公路项目,梳理典型断面的深层水平位移观测数据,分别总结侧向水平位移随埋深和时间的变化规律,提出了相应的预测模型。研究表明:

(1) 侧向水平位移随深度成“上凸”形变化,近地表处侧向位移变化剧烈,且破坏是从软土地层最大侧向位移点逐渐向下发展的;在堆载预压后期普遍存在较为明显的“回缩现象”。

(2) 最大侧向水平位移随时间呈“S”形分布,最大侧向位移发生点基本保持不变, $\Delta y_m/S_D$ 在路堤施工各个阶段呈现不同变化特点。

(3) 根据水平位移和水平位移最大值随深度的变化特点,分别提出“凸”形曲线进行预测变化明显深度的范围和“S”形曲线预测最终水平位移

量,上述预测模型与实测数据较为吻合。

## 参考文献

- [1] 李飞,艾冰.路堤荷载下地基土侧向位移预测及计算分析[M].南京:河海大学出版社,2006.  
LI Fei, AI Bing. Prediction and Calculation Analysis of Lateral Displacement of Foundation Soil Under Embankment Embankment Load[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2006.
- [2] HARRY G P. Difficulties in prediction of horizontal deformation of foundation[J]. Journal of Soil Mechanics of Division, ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal, 1971, 98(8): 843-848.
- [3] SMADI M M. Lateral deformation and associated settlement resulting from embankment loading of soft clay and silt deposits[D]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign: 2002, 6-66.
- [4] TAVENAS F, MIEUSSENS C, BOURGES F. Lateral displacement in clay foundations under embankments[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(3): 532-550.
- [5] 马时冬.路堤下软粘土地基的侧向位移[J].华侨大学学报:自然科学版,1995,16(2):165-167.  
MA Shi-dong. Lateral displacement of soft clay foundation under embankment[J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science Edition, 1995, 16(2): 165-167.
- [6] 刘曾贤,汤连生.路堤荷载下软土侧向挤出沉降分析[J].工程勘察,2003(2):1-4.  
LIU Zeng-xian, TANG Lian-sheng. Analysis on lateral squeeze settlement of soft clay foundation under embankment[J]. Engineering Survey, 2003(2): 1-4.
- [7] 曾华健,李军,梅军,等.真空降水联合不同强夯工艺在仓储软土地基处理中的应用[J].地基处理,2021,3(1):64-70.  
ZENG Hua-jian, LI Jun, MEI Jun, et al. Application of vacuum dewatering combined with different dynamic compaction process in soft soil foundation treatment storage[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(1): 64-70.
- [8] 李瑛,郑健明,陈东,等.深厚软土桩-网复合地基沉降控制现场试验研究[J].地基处理,2020,2(2):111-115.  
LI Ying, ZHENG Jian-ming, CHEN Dong, et al. Field test study on settlement control of pile-net composite foundation in deep soft soil[J]. Journal of Ground

- Improvement, 2020, 2(2): 111-115.
- [9] 余闯, 刘松玉. 路堤侧向变形性状及预测模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1305-1309.  
YU Chuang, LIU Song-yu. Study on the characteristic and prediction model for lateral deformations under embankments[J]. Geotechnical Mechanics, 2008, 29(5): 1305-1309.
- [10] 李冰, 葛爱兵. 路堤下地基土侧向位移预测分析[J]. 路基工程, 2008(1): 11-12.  
LI Bing, GE Ai-bing. Predicative analysis on lateral displacement of foundation soil under embankment[J]. Subgrade Engineering, 2008(1): 11-12.
- [11] 浙江省交通规划设计研究院. 浙江省公路软土地基路堤设计要点[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
Zhejiang institute of transportation planning and design. Key Points of Highway Embankment Design on Soft Soil Foundation in Zhejiang Province[M]. Beijing: People's Communications Press, 2009.
- [12] 崔海丽. 高速公路软土地基沉降预测方法的研究及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2009.  
CUI Hai-li. Research and application of settlement prediction method of expressway soft soil foundation[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [13] 吴承志. 上海地区公路路基压实与软土地基处理研究浅析[M]. 上海: 同济大学出版社, 2005.  
WU Cheng-zhi. Research and Analysis on Highway Subgrade Compaction and Soft Soil Foundation Treatment in Shanghai[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2005.
- [14] 祝关翔, 余清涛. 水载预压在软土路基处理中的应用浅析[J]. 地基处理, 2020, 2(4): 357-360.  
ZHU Guan-xiang, YU Qing-tao. Application of water preloading in soft soil subgrade treatment[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(4): 357-360.
- [15] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴, 等. 西南山区沟谷型软土工程特性及沉降规律[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 945-950.  
CHEN Ji-bin, ZHAO Qi-hua, PENG She-qin, et al. Engineering characteristics and settlement law of gully soft soil in southwest mountainous area[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 945-950.
- [16] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴, 等. 塑料排水板处理软基侧向变形规律及预测模型[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 218-225.  
CHEN Ji-bin, ZHAO Qi-hua, PENG She-qin, et al. Lateral deformation law and prediction model of soft foundation treated with plastic drainage board[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(2): 218-225.