

软土路基“波浪型”不均匀沉降及其机制分析

孙立强¹, 闫澍旺¹, 徐 余²

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津, 300072; 2. 天津建筑设计院, 天津 300384)

摘 要: 在软土地基上修建道路, 变形是控制道路质量和正常使用的主要因素。天津东疆港道路建立在经真空预压加固后的吹填土地基上, 道路使用 3 a 后产生了严重的“波浪型”不均匀沉降, 严重影响了车辆的行驶及人的生命安全。通过分析软土路基产生波浪变形的机制, 提出了道路在建成后产生初始波浪变形, 在车辆荷载作用下加剧了这种不均匀沉降的理念; 建立了软土路基在波浪变形初值缺陷条件下的力学模型, 通过力学分析与计算得出, 在初始波浪变形条件下路基波谷受到比波峰大的车辆荷载; 路基波峰与波谷处车辆荷载大小的不同是加剧地基不均匀沉降变形的原因。提出利用土工格栅的加筋作用可减小不均匀沉降, 通过有限元方法分析了该措施的加固效果。

关 键 词: 软土地基; 不均匀沉降; 波浪变形; 土工格栅; 地基加固

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Study of wave type asymmetry settlement and its mechanism of soft soil roadbed

SUN Li-qiang¹, YAN Shu-wang¹, XU Yu²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China; 2. Tianjin Architecture Design Institute, Tianjin 300384, China)

Abstract: The deformation is the dominant factor of the quality of the road constructed on the soft soil foundation. Tianjin Dongjiang port is located on the hydraulic filled soil foundation which is improved by using vacuum preloading method. Roads in this area often suffer wave type asymmetry settlement, which seriously affects the usage of the road and causes damage to both vehicles and human being. It is found that the initial wave asymmetry deformation of the road on very soft soil foundation is usually existing and will be developing continuously under the traffic load. The mechanism of the wavy failure of the road is discussed by establishing a mechanical model. The method of using geogrids to reduce the asymmetry deformation is proposed; the reinforcing effect is analyzed using finite element method.

Key words: soft subsoil foundation; nonuniform settlement; wave type deformation; geogrids; soil improvement

1 引 言

在超软土地基上修建道路会出现各种因大变形而引起的病害, 超软土地基因发生过量沉降而使路面发生断裂、错台现象时有发生, 同时因为软土地基的不均匀性会导致路基产生不均匀沉降。例如天津东疆港美洲路等多条道路在使用 3 a 后都发生了 30~60 cm 的沉降, 并且出现了较严重的波浪型不均匀沉降, 严重影响了道路的使用功能和人的生命安全。

超软土地基在路面荷载和交通荷载下会发生

的沉降变形随时间可分为瞬时沉降(挤出变形)、主固结沉降、次固结沉降, 当地基不均匀或路基土质较软时会发生一定的不均匀沉降, 不均匀沉降会加剧路面结构的破坏, 宏观表现为路面产生裂缝, 车辆经过不均匀沉降路段时会有跳车现象。

羊晔等^[1]对路基不均匀沉降进行了模型试验, 通过试验提出了采用加筋的方法处理不均匀沉降。赵明华等^[2]对滨海公路路基的工程地质特征, 探讨了该类地区软土路基变形机制及发展规律, 提出了滨海公路软土路基变权重组合 S 型成长模式; 李云峰等^[3]对路基不均匀沉降的原因进行了分析, 并提

出了相应的处理措施; 张嘉凡等^[4]以解析解表达式为基础, 详细分析了不同沉降量和路面结构参数对路面结构附加应力的影响; 赵明华等^[5]通过对软土路基沉降的发展规律及其特点进行分析与研究, 得出软土路基沉降发展基本经历了发生、发展、稳定、极限 4 个阶段, 指出其固结沉降-时间过程曲线的特点与社会经济预测中的 S 型成长曲线相似。

在以上研究的基础上, 以天津东疆港道路工程为依托, 对超软土路基产生的波浪型不均匀沉降变形进行研究, 分析产生波浪型不均匀沉降的机制, 建立软土地基路面在车辆荷载下的力学模型, 通过力学分析的手段对严重的不均匀沉降的原因进行分析, 最后根据产生不均匀沉降的原因和软土地基特点的, 提出避免或减小不均匀沉降的措施, 并通过有限元方法对该方法进行数值模拟, 分析其加固效果。

2 软土路基变形分析

在软土地基上修建道路, 变形是控制道路质量和正常使用的主要因素。软土路基沉降变形随时间可分为瞬时沉降(挤出变形)、主固结沉降、次固结沉降。瞬时沉降为加载过程中, 土体来不及排水, 而由地基上部荷载的挤压作用使土体流动变形引起的附加沉降。主固结沉降和次固结沉降是在路堤和车辆荷载下而产生的固结变形。这 3 部分沉降已有相对成熟的计算方法^[6-7]。除了上述 3 部分沉降, 还有软土路基在车辆动荷载作用下产生的塑性残余变形^[8-9], 对较软土路基而言, 这部分沉降会占有相当的比例。

东疆港的陆域基本上是吹填土经真空预压处理形成的, 强度仍然较低, 压缩性较大。该地区的道路在使用 3 a 左右后, 出现了较大的不均匀沉降, 甚至出现了波浪起伏的状态, 严重影响道路的使用功能。为此首先对东疆港道路的破坏状况进行了详细调查, 以便于分析破坏原因, 提出相应的工程对策。东疆港主要交通荷载为施工车辆荷载和集装箱车辆荷载, 如图 1、2 所示。

东疆港美洲路建成于 2007 年 3 月, 自道路建成通车后, 近 1 a 的时间, 出现波浪病害, 波峰与波谷之间的高差从 10 cm 左右(2008 年 10 月)发展至 25 cm 左右(2010 年 6 月), 现场照片如图 3~5 所示。2007 年 11 月道路标高测量值发现道路出现规则的波浪变形, 标高道路轴线方向变化曲线呈正弦曲线形式, 如图 6 所示。



图 1 施工车辆荷载

Fig.1 The load of construction vehicle



图 2 集装箱车辆荷载

Fig.2 The load of container vehicle



图 3 2009 年 3 月道路波浪变形

Fig.3 Settlement of road in March, 2009



图 4 2009 年 10 月道路波浪变形

Fig.4 Settlement of road in October, 2009

图 6 为天津东疆港区美洲路沿轴线沉降曲线, 自 2007 年 11 月道路运行后道路产生了类似正弦曲线的波浪变形, 波峰与波谷之间的沉降差为 10 cm 左右, 随着时间的延续, 在交通荷载作用下沉降差越来越大, 到 2010 年 4 月沉降差达到了 25 cm, 如

此大的不均匀沉降严重影响了道路的使用功能,需要通过分析道路产生不均匀沉降的原因,提出相应的加固方法进行加固处理。



图5 2010年4月份道路波浪变形
Fig.5 Settlement of road in April, 2010

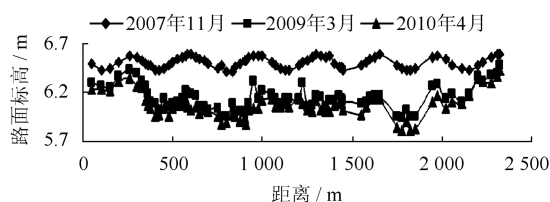


图6 美洲路路面沿轴线沉降
Fig.6 Settlement of Meizhou road along the axes

3 超软土道路地基波浪变形机制

由现场照片和检测数据可知,在道路建成后不久,软土地基在路面荷载和车辆荷载下产生了波浪式的初始沉降变形,由于超软土地基沿轴线方向分布的不均匀性,使地基在上部荷载作用下沿轴线方向产生不均匀的固结沉降。在交通荷载作用下,加剧了不均匀沉降的程度。下面对道路产生波浪型变形的机制进行分析。

为了分析道路产生不均匀沉降的机制,建立交通荷载下路基的力学模型。当车辆行驶到由不均匀沉降产生的波浪的不同位置时,地基受力如图7所示。通过图可知,车辆在做近似的圆周曲线运动。由于离心力的作用,使得车辆在“波浪”路面的不同位置给予垂直于路基面的荷载是不同的。

在波浪型路面上取代表性的作用点A、B、C、D、E,设车辆速度为 v ,重力为 G ,车辆受到路面的反力为 F_n ,离心力为 f ,重力方向与路面法线方向夹角为 θ 。根据理论力学中的圆周运动离心力公式,可得出路面反力 F_n 的计算公式。

AB段与DE段车辆做近似圆周运动的离心力方向向上,由图7受力分析可得出路面反力为

$$F_n = mg \cos \theta - \frac{mv^2}{R} \quad (1)$$

BC段与CD段车辆离心力方向向下,因而路面

反力为

$$F_n = mg \cos \theta + \frac{mv^2}{R} \quad (2)$$

式中: m 为车辆的质量; R 为路面圆周曲线半径。

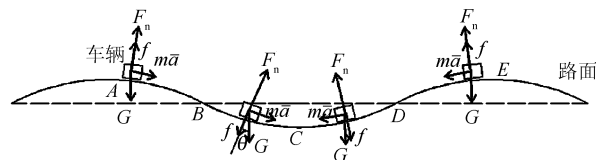


图7 软土地基波浪变形下车辆荷载力学模型
Fig.7 Model of vehicle load under the wave type deformation

由图7和式(1)、(2)可得出:

在AB段路面受到的反力小于BC段的路面反力,即波峰处路面压力小于波谷处路面上的压力,因而时路面在波峰处产生的沉降变形小于波谷处的沉降变形。

同理在DE段路面反力小于CD段路面反力,同样可得出波峰处路面沉降变形小于波谷处沉降变形。

BC段:由B点驶向C点下坡的过程中,在相同的机器牵引力下,车辆在重力分量作用下产生加速运动,C点速度大于B点速度,同时在这个过程中 θ 不断减小直至0。根据式(2),随着速度的增大, θ 的减小, F_n 增大,即:在波谷的最低点,路面受到的动荷载最大,因而使路面在交通荷载作用下波谷最低点的残余变形最大。

CD段:C点速度最大,由C向D速度变小,同时在这个过程中 θ 不断的增大,根据式(2),随着速度的减小, θ 的增大, F_n 减小,同样可得出,在波谷最低位置路面受到的动荷载最大,因而,使路面在交通荷载作用下波谷最低点的残余变形最大。

根据以上分析,在大小不同的车辆荷载作用下波峰与波谷的沉降差随着作用次数的增加沉降差不断增大,从而会导致道路的波浪不均匀沉降不断的加剧(见图8、9)。

由上述分析可知,软基道路产生严重的波浪变形的机制为:①在道路修建完成的初始阶段,道路因产生一定的不均匀沉降而出现初始波浪型沉降,本文称之为初值缺陷。②在初值缺陷和大小不同的车辆荷载作用下使初始不均匀沉降不断加剧,从而使道路的起伏程度不断加重。路基产生严重不均匀沉降的原因除了路基地质分布的不均匀外,车辆对路面不同位置荷载的不均匀性也会引起不均匀沉

降, 车辆对路面荷载的不均匀性是由初始不均匀变形引起的。

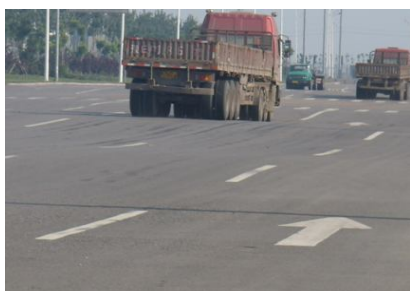


图 8 车辆由波峰向波谷下行
Fig.8 The vehicle going downriver



图 9 车辆由波谷向波峰上行
Fig.9 The vehicle going upriver

4 减小不均匀沉降的措施

通过软基道路产生严重波浪起伏机制的分析可知, 产生波浪起伏变形的前提条件是存在初始波浪型的不均匀沉降, 然后在这种初始缺陷条件下波峰和波谷受到的车辆荷载大小不同, 从而加剧了波浪型不均匀沉降, 影响了道路的使用功能。因此, 如何避免或减小初始不均匀沉降是解决这个问题的关键。通过提高路面的抗弯刚度, 可减小或消除不均匀沉降。本文从消除初始不均匀沉降的角度考虑, 寻求软基加固措施。

4.1 软土路基加固方法

本文提出利用土工格栅进行路基加固, 利用土工格栅的加筋作用增加路面的抗弯刚度。土工格栅是用聚丙烯、聚氯乙烯等高分子聚合物经热塑或模压而成的二维网格状或具有一定高度的三维立体网格屏栅, 当作为土木工程使用时, 称为土工格栅。土工格栅常用作加筋土结构的筋材或复合材料的筋材等。土工格栅分为塑料土工格栅、钢塑土工格栅、玻璃纤维土工格栅和玻纤聚酯土工格栅 4 大类。

当土工格栅用于软土地基上路基加固时 (见图 10), 由于土工网具有性质均匀、变形强度高、刚度大, 土工网对路基的加固作用主要表现在以下几个方面:

(1) 铺设土工网后, 土工网两侧路基土体颗

粒摩擦咬合作用增强, 剪应力增大, 从而约束了土体的侧向变形, 在一定程度上减小了路基的瞬时变形。

(2) 增强路基抗弯刚度, 在公路的路基和路面层中加入土工格栅, 可降低弯沉, 减少车辙, 推迟裂缝出现时间 3~9 倍, 可减少结构层厚度达 36%; 可有效地分配扩散载荷, 提高路基的稳定性和承载力, 延长使用寿命;

(3) 可有效降低路基中的剪应力, 使路基中由于剪切破坏而产生的塑性屈服域明显降低, 减小其塑性变形, 从而减小了总沉降。



图 10 土工格栅加固超软土道路地基
Fig.10 Foundation improvement using geogrids

4.2 土工格栅加固超软土路基效果的有限元分析

为了研究土工格栅加固超软土路基的加固效果, 建立有限元模型对有无土工格栅两种情况下超软土路基的变形和应力进行有限元计算。

4.2.1 计算模型

利用大型通用有限元软件对土工格栅路基进行有限元分析, 其中, 土体单元采用六面体实体单元。土工格栅采用 Abaqus 有限元软件中的 Membrane 单元, 这种单元只能承受拉应力不能受弯, 恰好符合土工格栅的力学特性。土体采用摩尔-库仑弹塑性本构关系, 路基按设计分层, 碎石层采用摩尔-库仑模型。土工格栅与土体、路堤之间设置接触, 模拟了土工格栅和路基之间的摩擦力作用。土工格栅采用弹性本构关系。在有限元分析时, 将土工格栅铺设在路基碎石层底部。有限元几何模型如图 11 所示。

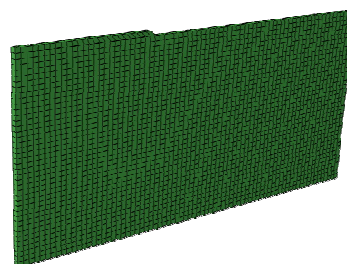


图 11 有限元计算模型
Fig.11 Model of finite element calculation

4.2.2 计算参数

从现场取得原状土样, 在室内进行室内试验, 得出土层的物理力学指标, 见表 1。

表 1 土体的物理力学指标
Table 1 Parameters of soils

土层名称	重度 γ (kN/m ³)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	压缩模量 E_s (kPa)	泊松比
黏土	1 650	15	10	3 000	0.35
淤泥质黏土	1 800	10	2	1 600	0.35
黏土	1 850	18	9	4 500	0.30
粉质黏土	1 800	15	12	7 000	0.30

4.2.3 荷载

荷载由路面结构的重力荷载和车辆荷载组成, 为了研究土工格栅发挥的作用, 对路基上施加宽度为汽车轮距的面荷载, 大小为车辆的重力。

4.2.3 有限元计算结果

(1) 应力计算

分别计算有无土工格栅两种情况下路基的应力、沉降的分布及大小, 对比两种情况下的计算结果, 分析土工格栅对路基加固的效果。图 12 为有土工格栅时路基中的应力分布云图, 图 13 为无土工格栅时路基中应力分布。对比图 12 和图 13 可以看出, 有土工格栅的情况下, 应力分布范围明显大于无土工格栅的情况, 路基中应力比无土工格栅情况下小 10% 左右, 说明土工格栅能够使应力扩散到地基中更大范围, 从而在一定程度上降低了土中的应力水平。

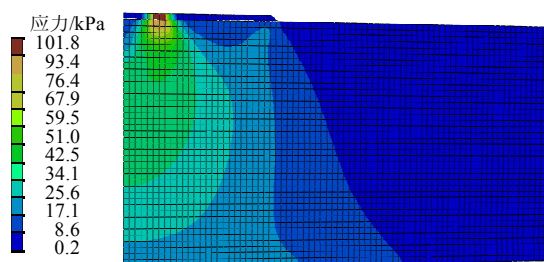


图 12 有土工格栅时的应力云图

Fig.12 Nephogram of stresses under the geogrids

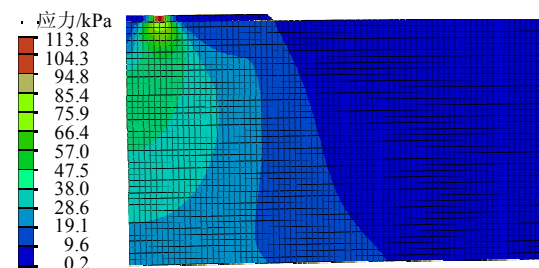


图 13 无土工格栅时的应力云图

Fig.13 Nephogram of stresses without the geogrids

(2) 变形计算

图 14 和图 15 为有无土工格栅两种情况下竖向位移云图, 由图可知, 在有土工格栅时计算得到的沉降值比无土工格栅情况下沉降量小 2.5 cm, 有土工格栅情况下, 车辆荷载作用下残余变形分布范围较无土工格栅的情况下大且小。说明土工格栅能够将上部荷载扩散到更大的范围, 因此, 会使变形较均匀, 不会产生局部大变形或车辙。

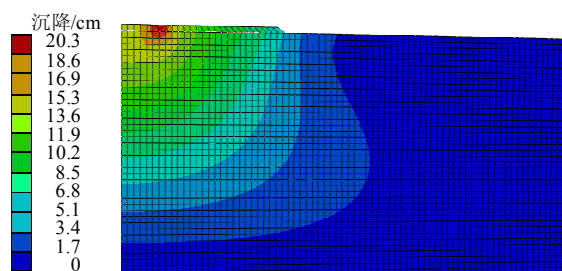


图 14 有土工格栅时的沉降云图

Fig.14 Nephogram of settlements using the geogrids

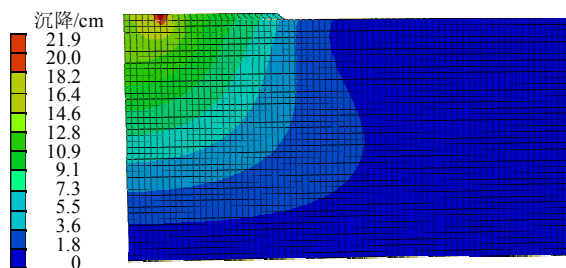


图 15 无土工格栅时的沉降云图

Fig.15 Nephogram of settlements without the geogrids

(3) 土工格栅拉应力

图 16 为土工格栅拉应力云图, 由图可发现土工格栅在上部交通荷载作用下承受很大的拉力, 起到了土工加筋作用。施加荷载的位置拉应力最大, 土工格栅靠路面结构层碎石的嵌入作用约束路面的横向位移, 从而起到了加筋作用, 增大了路面的抗弯刚度。

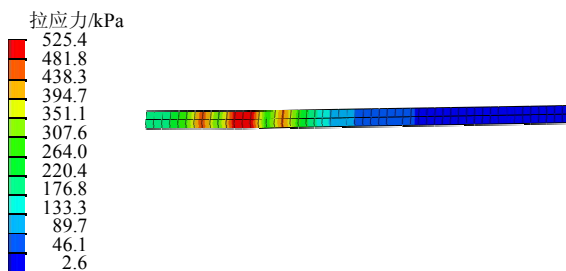


图 16 土工格栅拉应力云图

Fig.16 Nephogram of stresses of the geogrids

(4) 残余应变

分别计算有无土工格栅的两种情况下在车辆

荷载不同的振次作用下产生的残余变形, 将计算结果绘制残余变形随振次的变化曲线, 如图 17 所示。如图可知, 有土工格栅情况下路基残余变形明显小于无土工格栅情况下的残余变形。说明土工格栅能够减小交通荷载作用下的残余变形。

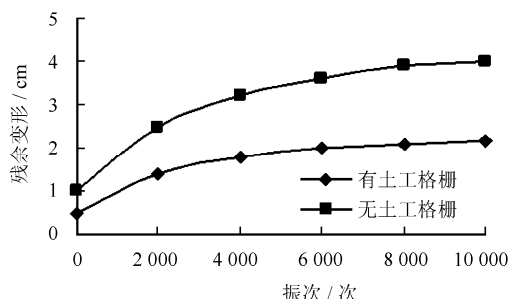


图 17 残余变形与动载振次关系曲线

Fig.17 Relationships between the deformation and dynamic load

5 结 论

通过对天津东疆港道路产生的波浪型不均匀沉降变形分析研究得出以下结论:

(1) 深厚超软土地基上修建道路, 在道路结构荷载作用下土体产生了规则的波浪型初始沉降, 导致车辆荷载在波峰位置小于波谷位置, 从而加剧了波峰与波谷的沉降差, 导致严重的波浪不均匀沉降。

(2) 根据理论力学中圆周运动的离心力公式推导出波浪路面各点的车辆荷载计算公式, 通过该公式可以计算不同位置的车辆荷载。

(3) 采用土工格栅对软土地基进行加固, 可减小或消除初始不均匀沉降, 从而使道路不会因受到不均匀的车辆荷载而导致过大的不均匀沉降。利用有限元的方法对有无土工格栅两种情况下的路基进行了计算, 结果表明, 土工格栅能够提高路面结构的抗弯刚度, 避免路面产生明显的不均匀沉降; 同时可使上部交通荷载在地基中扩散, 从而降低应力水平, 减小车辆动载作用下的残余变形。

参 考 文 献

[1] 羊晔, 刘松玉, 邓永锋. 加筋路基处治不均匀沉降模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 703—711.
YANG Ye, LIU Song-yu, DENG Yong-feng. Effect of reinforced subgrade on differential settlement by model test research[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 703—711.

[2] 赵明华, 刘建华, 刘煜, 等. 滨海公路软土路基变形机理及其沉降预测研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(1): 32—35.

ZHAO Ming-hua, LIU Jian-hua, LIU Yu, et al. Deformation mechanism and settlement forecast of soft clay embankment[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23(1): 32—35.

[3] 李云峰, 胡瑞宁. 路基不均匀沉降的原因及处理措施[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(增刊): 85—88.
LI Yun-feng, HU Rui-ning. The formation and countermeasures to subgrade uneven sedimentation[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2006, 25(Supp.): 85—88.

[4] 张嘉凡, 张慧梅. 软土地基路基不均匀沉降引起路面结构附加应力[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(3): 21—25.
ZHANG Jia-fan, ZHANG Hui-mei. Additional stress in pavement structure due to asymmetrical settlement of soft subgrade[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2003, 23(3): 21—25.

[5] 赵明华, 刘煜, 曹文贵. 软土路基沉降发展规律及其预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(1): 157—161.
ZHAO Ming-hua, LIU Yu, CAO Wen-gui. The developing regularity and forecasting of settlement in soft clay roadbed[J]. *Journal of Central South University (Natural Science)*, 2004, 35(1): 157—161.

[6] 陈伟沪. 城市道路软土路基的沉降计算问题[J]. 安徽建筑, 2008, 15(5): 155—157.
CHEN Wei-lu. Settlement calculation of urban road above weak subgrade[J]. *Anhui Architecture*, 2008, 15(5): 155—157.

[7] 向先超, 汪稔, 朱长岐. 海滩地区软土路基瞬时沉降分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1095—1098.
XIANG Xian-chao, WANG Ren, ZHU Chang-qi. Analysis of soft foundation instant settlement in seaside areas[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(7): 1095—1098.

[8] 凌建明, 王伟, 邬洪波. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. 同济大学学报, 2002, 30(11): 1315—1320.
LING Jian-ming, WANG Wei, WU Hong-bo. On residual deformation of saturated clay subgrade under vehicle load[J]. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(11): 1315—1320.

[9] 耿大新, 钟才根, 郑明新. 交通荷载作用下软土路基残余变形的研究[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(4): 47—51.
GENG Da-xin, ZHONG Cai-gen, ZHENG Ming-xin. Research on similarity relationship for model-based creep experiment of prestressed concrete bridges[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2007, 24(4): 47—51.