

高速公路拓宽路基软土工程特性试验

舒 阳^{1,2}, 孟庆山³, 舒思齐⁴

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 连云港市建设局, 江苏 连云港 222003; 3. 中国科学院
岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 香港理工大学 机械工程系, 香港 999077)

摘 要:分析了新老路基各试验断面软土层的物理力学特性,开展了新老路基软土室内三轴剪切试验和直剪试验,并进行了试验对比分析。结果表明:老路基经过多年的运营产生了固结变形,其固结程度与力学性质好于新路基,表现在老路基软土的抗剪强度稍高于新路基对应位置,粘聚力高于新路基,但内摩擦角则相对低于新路基;由直剪试验求得的软土粘聚力普遍小于由三轴剪切试验求得的软土粘聚力,内摩擦角则相对较大;建议在考虑新路基的软基段的处理方法时,采取比相应段原有老路基的处理方式更为刚性的处治对策,更加严格地控制新路基沉降和差异沉降。

关键词:道路工程;高速公路;拓宽;软土路基

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A

Experiment on engineering characteristics of soft clay on expressway widening foundation

SHU Yang^{1,2}, MENG Qing-shan³, SHU Si-qi⁴

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Lianyungang Bureau of Construction, Lianyungang 222003, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; 4. Department of Mechanical Engineering, The Hongkong Polytechnic University, Hongkong 999077, China)

Abstract: The physical and mechanical characteristics of the new and the old foundation soft soil were completed to make the expressway widening deformation uniformly. Tri-axial shear test and direct shear test in the laboratory were carried out and their comparison tests were analyzed. The results show that the old foundation's consolidation degree and mechanical properties are better than new foundation's because of deformation after many years of consolidation. The cohesion of the old foundation is larger than the new one's, but the angle of internal friction is smaller than new foundation's. In general, the old foundation's shear strength is larger than the new foundation's shear strength. The shear strength obtained from direct shear test is smaller than that obtained from tri-axis test. It is instructed that when dealing with the soft part of the new foundation, some tough measures of controlling the settlement should be adopted to make the deformation uniformly. 4 tabs, 10 figs, 19 refs.

Key words: road engineering; expressway; widening; soft clay foundation

收稿日期:2008-06-20

基金项目:中国科学院岩土力学重点实验室开放课题(Z000602);湖北省环境岩土工程重点实验室开放课题(T000508)

作者简介:舒 阳(1965-),男,江苏东海人,江苏省连云港市建设局研究员级高级工程师,天津大学工学博士研究生,

E-mail:shuyang6769@163.com。

0 引 言

随着经济建设的飞速发展,一些原有公路已不能满足现有交通的需要。在旧路拓宽改建过程中,新老路基的不均匀沉降问题一直困扰着公路工程技术人员。自中国首条高速公路加宽扩建工程(广州—佛山高速公路扩建工程)动工以来^[1],海南环岛东线、沈阳—大连、上海—宁波等高速公路相继局部或全线扩建加宽,新老路基拼接引发的病害十分严重,尤其是新老路基结合处面层纵向开裂现象十分普遍。已有的研究往往侧重于路基段的拼接方法实施,如为了减少新老路基间的差异沉降,一般多采用轻质填料和加大格栅用量,并且在软土地基上的新老路基结合下部的软土地基采用超载预压、加密加长粉喷桩、旋喷桩、路堤桩(混凝土管桩)和隔离墙(定喷桩)等方法进行重点处理。国内外对软土地基上高速公路加宽工程的研究大多建立在离心模型试验和有限元模拟分析的基础上^[2-4],分析计算的方法包括有限单元法、反分析法和模型试验法等,计算的内容主要涉及加宽新路基地基处理前后的路基应力应变关系以及由其引起的老路基附加沉降和新老路基差异沉降。将模型试验和非线性有限元法,以及现场测试相结合,可以较好地分析软土地基上高速公路加宽

工程的力学特性和变形特性。为避免新老路基土体受力历史、处理方式等因素的影响,以及拼接部分差异沉降和路基裂缝现象的出现^[5],本文认为,施工前应对原有高速公路的各种资料文件进行研究^[6],分析场地地质变化情况,重点掌握新老软基的物理力学特性及工程特性上的差异,做到设计、计算和施工有的放矢^[7-19]。

1 工程地质条件

沪宁(上海—宁波)高速公路全长 274.08 km,江苏段 248.21 km,软土地段长约 92.29 km。沿线软土层厚薄不均,最厚处大于 30 m,一般为 6~15 m,是目前中国建成的高速公路中软土地基线路最长的。全线平均填土高度为 3.7 m,最高达 10 m 以上,设计估算最大沉降量达 150 cm,一般为 35~60 cm。

2 软土物理力学特性指标

对新老路基软土的土体基本物理特性、压缩变形特征、渗透特性和剪切强度进行试验研究,为后期软土地基的稳定性和沉降量计算提供参数依据,在室内进行了常规试验,各试验断面软土层的物理力学特性指标如表 1 所示。

表 1 各试验断面软土层的物理力学特性

试验断面	土样位置	取样深度/ m	含水量 w / %	干密度 γ / ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对密度 G_s	孔隙比 e	液限 W_L / %	塑限 W_P / %	塑性指数	液性指数
1	新路基	13.5~14.4	34.6	18.4	2.72	0.962	36.5	19.5	17.0	0.89
	老路基	14.5~15.8	34.7	18.3	2.72	0.962	40.6	19.6	21.0	0.72
2	新路基	8.5~9.7	32.8	18.7	2.72	0.890	37.1	24.9	12.2	0.65
	老路基	5.0~7.3	39.7	17.8	2.72	1.094	41.2	18.9	22.3	0.93
3	新路基	10.5~11.8	36.4	18.4	2.72	0.983	39.6	19.9	19.7	0.84
	老路基	10.6~13.8	34.8	18.3	2.72	0.962	39.5	21.5	18.0	0.74

从表 1 可以看出,各试验断面浅层软土层孔隙比为 0.80~1.10,天然含水量为 32.8%~39.7%,液限为 36.5%~41.2%,塑限为 19%~25%,塑性指数为 12.2~22.3,液性指数为 0.65~0.93,应属于低液限粘土,且处于软塑-可塑状态。由此可见,新老路基下软土的物理力学特性参数差异不大,对于新老路基拼接处理比较有利。

3 软土压缩变形特征

室内固结试验能反映软土层的压缩变形特征,并为评价地基处理方法提供依据。将典型试验所得结果整理绘制成 $e-\lg(P)$ 曲线、压缩系数 a_v 随垂直

压力 P 变化曲线,典型结果如图 1(见下页)所示。
从图 1(a)可以看出,原状土样 $e-\lg(P)$ 曲线在 100~200 kPa 处有一较明显拐点。曲线的初始段相对较平缓,当压力超过某一 P_c 值时曲线变陡,整条曲线具有较典型的低灵敏度原状粘土的固结压缩曲线的特征。由于土样由地下取出后,随着上覆土压力的解除,平缓的曲线初始段实质上反映了土的再压缩过程。当 $\lg(P)$ 超过 100 kPa 后,压缩模量 E_s 与对应的垂直压力基本呈直线关系。由图 1(b)中压缩系数 a_v 随 P 的变化关系可看出,试验土体与低灵敏度原状粘土的变化规律一致。

由于各试验断面所取软土埋深不同,导致土体

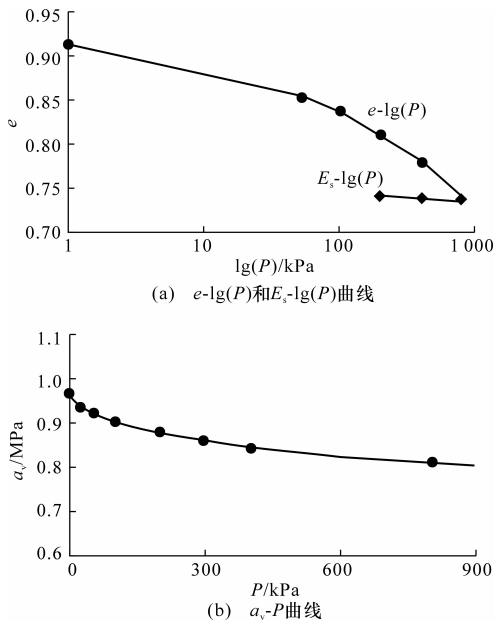


图 1 试验断面 1 原状土固结试验曲线

先期固结压力存在一定的差异, P_c 为 70~130 kPa 时, 软土基本处于正常固结或弱超固结的状态。随着深度的增加, 固结程度呈对数函数减弱, 并出现欠固结的趋势, 如图 2(x 为深度, y 为超固结比, R^2 为相关系数) 所示。相同深度位置, 老路基软土的超固结程度比新路基软土的超固结程度高, 而且 10 m 以上试验断面 3 的软土超固结程度强于试验断面 2, 如图 3 所示, 这与试验断面 3 属于挖方区, 而试验断面 2 属于填方区有关。

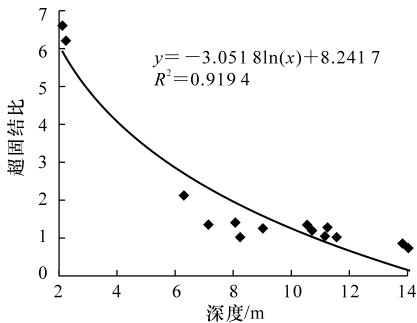


图 2 原状土超固结比与深度的关系

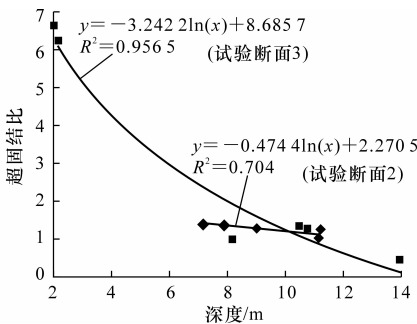


图 3 不同试验断面原状土超固结比与深度的关系

4 软土的强度特性

4.1 三轴剪切试验

CU(固结不排水)剪应力-应变曲线、剪切过程孔隙水压力-轴向应变曲线如图 4、图 5 所示; CD(固结排水)剪应力-应变曲线、主应力比-轴向应变曲线如图 6、图 7 所示。

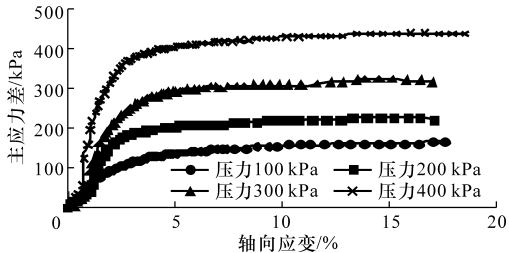


图 4 试验断面 1 软土 CU 剪应力与应变的关系

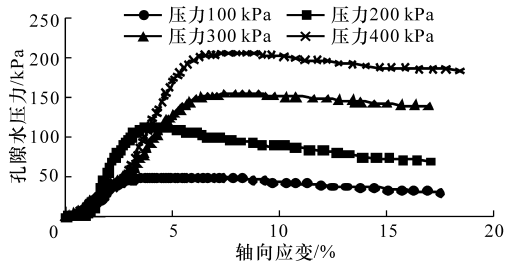


图 5 试验断面 1 软土 CU 剪切过程孔隙水压力与应变的关系

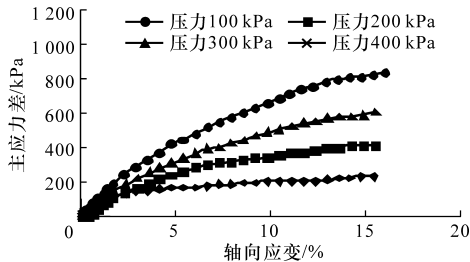


图 6 试验断面 2 软土 CD 剪应力与应变的关系

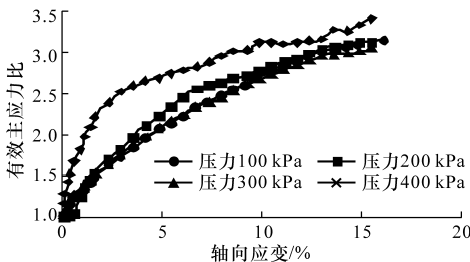


图 7 试验断面 2 软土 CD 主应力比与应变的关系

饱和粘性土固结不排水剪切时, 试样在应力作用下充分排水固结, 在不排水条件下施加偏应力剪切时, 试样中的孔隙水压力随偏应力的增加而不断变化。对于正常固结的试样剪切时体积有减小的趋势(剪缩), 但由于不允许排水, 故产生正的孔隙水压力, 由试验得出孔隙水压力系数都大于 0。从试验结果可以看出, 土样的应力-应变关系曲线没有明显

的峰值,试样在剪切过程中没有形成明显的破裂面,而是随着轴向应变的增大,试样中部呈鼓形突出,塑性破坏。在轴向应变较小(小于5%)时,孔隙水压力随轴向应变的增大而迅速上升,当应变大于5%后,孔隙水压力变化随土样和周围压力的不同而维持某一较稳定值或达到某一峰值后开始下降。

由断面2试样的CD剪应力-应变曲线可看出,在剪切过程中,正常固结粘土发生剪缩。固结排水试验应力应变关系与固结不排水试验应力应变关系不同,固结不排水试验应力-应变曲线尽管很少出现峰值,但一般会稳定的趋于某一固定值,而固结不排水试验应力-应变曲线则没有稳定的趋势。

采用最小二乘法确定三轴应力状态下土样抗剪强度参数,计算所得CU剪切强度指标如表2所示;CD剪切强度指标如表3所示。

表2 各试验断面软土层原状样三轴剪切试验(CU)结果

试验断面	土样编号	取样深度/m	含水量/%	干密度 $\gamma/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	抗剪强度指标			
					c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	c'/kPa	$\varphi'/(\text{^\circ})$
1	老路基 1-3	6.3	34.7	13.6	20.3	18.3	22.8	16.7
	新路基 2-4	13.7	33.8	13.7	17.6	22.2	15.4	24.6
2	老路基 1-4	7.1	37.7	12.7	44.7	17.3	45.2	15.5
	老路基 1-6	8.2	37.8		40.2	10.0	14.2	29.8
	老路基 1-11	10.6	38.2		44.9	8.9	33.5	19.2
	新路基 2-3	7.1	37.8		38.6	9.3	29.7	25.2
	新路基 2-4	8.1	32.8	14.1	21.2	20.4	17.2	22.6
	新路基 2-8	10.7	17.8		23.5	14.8	14.1	28.0

注: c 为粘聚力; φ 为内摩擦角; c' 为有效粘聚力; φ' 为有效内摩擦角。

表3 试验断面1软土层原状样三轴剪切试验(CD)结果

土样编号	取样深度/m	含水量/%	抗剪强度指标	
			c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
老路基 1-9	16.7	32.4	26.5	36.9
老路基 1-17	21.2	33.8	19.5	30.7
老路基 1-24	26.2	38.3	37.7	19.9
新路基 2-9	16.7	32.8	23.7	35.2
新路基 2-18	21.2	35.9	7.6	29.6

由表2可以看出,土样的抗剪强度与其初始干密度和含水量的相关性并不强,并非初始干密度越大、含水量越低,其抗剪强度值就越高。CU剪切强度的粘聚力为17.6~45.0 kPa,相差27.4 kPa,均值为31.4 kPa;内摩擦角为8.9°~22.2°,相差13.3°,均值为15.2°;有效粘聚力为14.1~45.0 kPa,相差约31 kPa,均值为24 kPa;在效内摩擦角为16.7°~28.0°,相差11.3°,均值为22.7°。新老路基随着深度的增加软土的粘聚力呈减小的趋势。

由表3可以看出,除了老路基1-24接近于孔底

持力层的过渡性软粘土和粘性土外,其余的老路基不同深度软土的粘聚力稍高于新路基相应位置。就软土而言,粘聚力为7.6~26.5 kPa,均值为23 kPa;内摩擦角为29.6°~36.9°,均值为30.5°。CD剪切粘聚力和CU剪切有效应力求出的粘聚力比较接近,而内摩擦角相差8°。总体而言,老路基软土粘聚力相对大于新路基,而内摩擦角则相对小于新路基。

4.2 直剪试验

土体的抗剪强度同样可以通过直剪试验得到,典型断面软土固结快剪的应力变形曲线如图8所示。由图8可以看出,各软土的应力变形关系均没有明显的峰值,也就是说,剪切应力随着变形的增加逐渐增长,在100 kPa、200 kPa固结压力下,剪切位移达到2 mm后,剪切应力趋于一稳定值;而在300 kPa、400 kPa固结压力下,剪切应力一直随剪切位移的增大而缓慢增长。

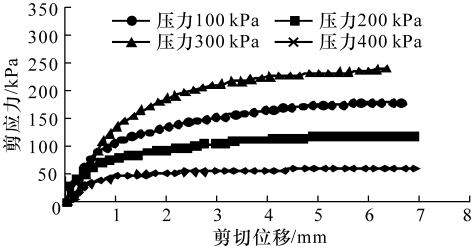


图8 典型断面软土的剪应力与剪切位移的关系

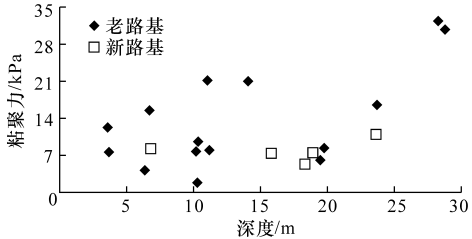


图9 新老路基软土粘聚力与深度的关系

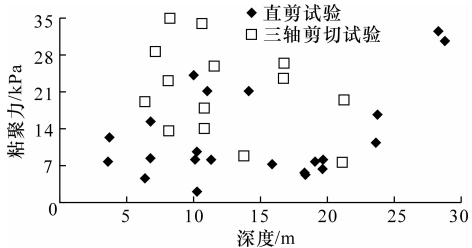


图10 2种试验粘聚力与深度的关系

老路基软土粘聚力稍高于新路基软土(图9);比较直剪试验与三轴剪切试验求得的软土粘聚力大小可以看出(图10),直剪试验求得的软土粘聚力普遍小于三轴剪切试验求得的软土粘聚力,而直剪试验求得的内摩擦角则大于三轴剪切试验求得的软土

内摩擦角,如表 4 所示。

表 4 三轴剪切试验、直剪试验求出的抗剪强度指标

试验类别	剪切方式	抗剪强度指标(CU)			
		c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$
三轴剪切试验	CU 剪切	28.3	17.0	20.4	21.3
	CD 剪切			19.3	33.1
直剪试验	固结快剪	10.6	27.5		

4.3 软土路基拼接处治建议

为了尽可能减小沪宁高速公路拼接加宽段因新老路基地基强度不同产生的差异沉降及纵向裂缝,需在新老路基拼接处采用开挖台阶、铺设单向塑料土工隔栅加筋处理的方法,来消除或减小新老路基拼接处的差异沉降,加强拼接路基的整体性。加固地基,提高地基承载力,可以有效减小新老路基差异沉降。沪宁高速公路原有老路基软基段采用的是较为常规的处理措施,除水泥搅拌桩外,均为柔性处理措施(如砂垫层填土预压和塑料排水板填土预压等),允许软基发生较大的工后沉降。当这些软基固结 11 年后,新拼接路段若采取相同的处理措施,则其变形速率会不同步,造成差异沉降,导致路面开裂。由于老路基沉降已基本完成,因此相应路段的新路基宜采用较为刚性的处理措施(包括清淤换填、湿喷桩、预应力薄壁管桩和钻孔灌注桩等),尽可能减小其工后沉降,促使新老路基协调变形。通过对排水固结法、复合地基法和轻质路堤材料法等比较,进行综合经济技术评价,给出适合沪宁高速公路的软土地基拼接处理方案如下所述。

(1)当软土厚度小于 3 m 时,其下部为非软土或软弱土时采用换填方法。

(2)当软土厚度为 3~13 m 时,选用水泥搅拌桩处理,掺灰量根据含水量大小决定,为增强其性能,掺水泥总量(质量分数)以 3%石膏作为添加剂。

(3)软土厚度大于 13 m 时,采用预应力薄壁管桩(PTC),静压法施工。

同时,为了减小填土荷载造成的过大的差异沉降,当软土底板埋深大于 13 m,同时填土高度大于 4 m时,加宽路基部分采用预应力薄壁管桩处理,而老路堤底层台阶以上部分软基采用钻孔灌注桩(素混桩)处理:Φ500 mm,采用灌注水下混凝土法施工,桩体采用素混凝土,强度等级为 C20,混凝土连续灌注,桩帽同 PTC 桩帽。考虑技术经济性和施工的方便,在新老路基结合部铺设土工合成材料,可以起到较好的衔接作用,能有效地减小新老路基的差异沉降。

5 结 语

(1)沪宁高速公路拓宽软基段软土以孔隙比为 1.0~1.3 的淤泥质粘土为主,其天然含水量较高,接近饱和含水量,处于软塑-可塑状态,大多属于中等压缩性土;上部土层处于正常固结或弱超固结状态,老路基软土的固结程度、物理力学性质都要好于新路基;新老路基下部软土的粘聚力随深度的增加而减小,老路基软土粘聚力相对大于新路基,而内摩擦角则相对小于新路基;总体而言,老路基软土的抗剪强度稍高于新路基相应位置处的抗剪强度。

(2)直剪试验求得的软土粘聚力普遍小于三轴试验求得的软土粘聚力,而直剪试验求得的内摩擦角则大于三轴剪切试验求得的软土内摩擦角。

(3)由于老路基已固结了较长一段时间,其固结程度好于新加宽的路基,因此,在考虑新路基的软基段处理措施时,应采取比相应段原有老路基的处理方式更为刚性的处治对策,即新路基处理效果及沉降控制应更为严格,否则极易出现差异沉降,导致路面开裂。

参考文献:

References:

[1] 苏 阳. 广佛高速公路扩建工程软基路段施工简介[J]. 水运工程, 2001(2): 51-54, 58.
SU Yang. Construction of soft-foundation section of Guangfo (Guangzhou-Foshan) express highway expansion project[J]. Port & Waterway Engineering, 2001(2): 51-54, 58.

[2] 高 翔, 刘松玉, 石名磊. 软土地基上高速公路路基扩建加宽中的关键问题[J]. 公路交通科技, 2004, 21(2): 29-33.
GAO Xiang, LIU Song-yu, SHI Ming-lei. Key problems in embankment widening of expressway on soft ground[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(2): 29-33.

[3] Allersma H G B, Ravenswaay L, Vos E. Investigation of road widening on soft soils using a small centrifuge[J]. Transportation Research Record, 1994, 1462: 47-53.

[4] Akou Y, Magnan J P, Dubreucq T, et al. Centrifuge study concerning the widening of embankments on a soft clay foundation[J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 221-233.

[5] 顾建武, 侯 辉. 沪宁高速公路扩建工程典型软基特性及处治对策研究[J]. 土工基础, 2005, 19(3): 12-

15.
GU Jian-wu, HOU Hui. Study on treatment method and characteristic of typical soft clay foundation at Shanghai-Nanjing freeway extension [J]. Soil Engineering and Foundation, 2005, 19(3): 12-15.
- [6] 周焕云, 黄晓明. 高速公路软土地基沉降预测方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 7-10.
ZHOU Huan-yun, HUANG Xiao-ming. Summary of forecasting methods of expressway settlement on soft ground[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 7-10.
- [7] 王东耀, 折学森, 叶万军, 等. 高速公路软基最终沉降预测的范例推理方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 20-23, 42.
WANG Dong-yao, SHE Xue-sen, YE Wang-jun, et al. Case-based reasoning approach to settlement of expressway on soft foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 20-23, 42.
- [8] 曹永琅, 蔡金荣, 丛建, 等. 高速公路宕碴路堤超深软基的真空联合堆载预压加固[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(4): 23-27.
CAO Yong-lang, CAI Jin-rong, CONG Jian, et al. Improvement of super deep and soft ground under embankment of expressway with combination method of vacuum and preloading[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4): 23-27.
- [9] 俞建霖, 曾开华, 龚晓南, 等. 高速公路拓宽工程硬路肩下土体注浆加固试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 27-31.
YU Jian-lin, ZENG Kai-hua, GONG Xiao-nan, et al. Experimental research on injection process of soil under hard shoulder in freeway widening project [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 27-31.
- [10] 章定文, 刘松玉. 软土地基高速公路扩建中新老路堤相互作用数值分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 7-12.
ZHANG Ding-wen, LIU Song-yu. Numerical analysis of interaction between old and new embankment in widening of freeway on soft ground [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 7-12.
- [11] 傅珍, 王选仓, 陈星光, 等. 拓宽路基差异沉降特性和影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 54-57.
FU Zhen, WANG Xuan-cang, CHEN Xing-guang, et al. Differential settlement characteristics and influencing factors of widening subgrade [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 54-57.
- [12] 黎霞. 新老路基沉降机理有限元数值模拟分析[J]. 中外公路, 2006, 26(4): 30-33.
LI Xia. Numerical simulation on differential settlement of the mechanism of new and old roadbed [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(4): 30-33.
- [13] 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.
YE Jian-shu. Controlling criterion of bridge approach remaining settlement [J]. Journal of Southeast University, 1997, 27(3): 12-17.
- [14] 张洪亮, 胡长顺. 路桥过渡段桥头搭板容许坡差确定的参数影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(3): 11-15.
ZHANG Hong-liang, HU Chang-shun. Parameters' influence on determination of allowable differential slope of approach slab [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(3): 11-15.
- [15] 董海, 王末顺, 张宇. 高等级公路容许工后不均匀沉降指标的研究[J]. 森林工程, 2002, 18(2): 53-54.
DONG Hai, WANG Mo-shun, ZHANG Yu. Study on uneven subsidence index after road construction of highway [J]. Forest Engineering, 2002, 18(2): 53-54.
- [16] 宇云飞, 张文彤, 张梅. 泊松曲线在软土路基沉降预测中的应用研究[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(4): 96-99.
YU Yun-fei, ZHANG Wen-tong, ZHANG Mei. Study of Poisson curve in prediction of soft roadbed settlement [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2004, 27(4): 96-99.
- [17] 左其亭, 马军霞, 张能奎. 建筑物沉降量预测和最终沉降量早期确定的灰色 Verhulst 模型[J]. 岩土工程技术, 1998, 43(1): 59-62.
ZUO Qi-ting, MA Jun-xia, ZHANG Neng-kui. Verhulst grey forecast model and the terminal model of the building settlement [J]. Geotechnical Engineering Technique, 1998, 43(1): 59-62.
- [18] 宰金珉, 梅国雄. 泊松曲线的特征及其在沉降预测中的应用[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(1): 30-35.
ZAI Jin-min, MEI Guo-xiong. Feature of Poisson curve and its application to displacement forecast [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2001, 23(1): 30-35.
- [19] 张留俊, 王福胜, 李刚. 公路地基处理设计施工实用技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.