

DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2015.01.19

工后沉降双指标控制理论在某公路 软基处理中的应用研究

张思峰¹, 陈雪峰¹, 李琳¹, 陈亦丛²

(1. 山东建筑大学交通工程学院, 济南 250101; 2. 山东大学管理学院, 济南 250100)

摘 要: 高等级公路建设越来越多地延伸到软土地区, 但工程中采用的工后沉降量指标并不能完全消除路面开裂及不均匀沉降等病害的大面积发生。基于此, 在提出软土地区公路建设工后沉降量及沉降速率双指标控制理论的基础上, 确定了软土地区高速公路工后沉降速率控制标准, 并以济(宁) — 徐(州) 高速公路济宁南四湖地区某高填土路段湖相软土地基处理工程为依托, 在进行不同地基处理方法下工后沉降特性研究的基础上, 依据工后沉降双指标控制理论, 提出了适于该工程的公路软土地基处理技术, 研究成果可供类似工程的设计参考。

关键词: 软土地基; 双指标控制理论; 工后沉降量; 沉降速率

中图分类号: U416.1⁺66 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8825(2015)01-0084-03

0 引言

软土地基在我国滨湖、滨海等地区分布广泛, 它是一种含水量大、承载力低、渗透性小的高压缩性土, 在其上修建公路时, 路基变形较大是其主要工程问题。因此, 合理选择地基处理技术, 对减小由此而产生的路基病害, 从而保证道路使用性能尤为重要。

目前, 公路建设中软土地基处理技术的选择均以工后沉降量为控制指标, 即选择的地基处理技术应保证在路面设计使用年限(沥青路面15年、水泥混凝土路面30年)内, 其工后沉降(或称残余沉降)量满足规范^[1]要求。但从已建高等级公路的运营情况来看, 软土地区往往因为沉降速率过大而导致路面开裂及不均匀沉降等问题的大面积发生^[2], 因此对于软土地区公路建设来说, 应采用工后沉降量及沉降速率的双指标控制理论, 即在满足规范要求的工后沉降量指标的基础上, 同时还应满足工后沉降速率指标要求。目前, 国内对此方面还鲜有文献报道, 有必要结合工程实际开展相关研究工作。基于

此, 本文以拟建的济—徐高速公路某高填土路段地基处理工程为依托, 在确定软土地区高速公路工后沉降双指标控制标准的基础上, 结合依托工程进行了不同地基处理方法下的工后沉降特性研究, 并依据工后沉降双指标控制理论, 对本地区的公路软土地基处理方法进行优选。

1 工后沉降双指标控制标准的确定

对于工后沉降量指标, 《公路路基设计规范》^[1]中已给出明确要求, 此处不再赘述。对于工后沉降速率指标, 由于无法通过土体变形机理得出精确的理论解答, 实际工程中多采用一些经验标准, 如广东省某高速公路采用5 mm/月^[3], 浙江省一些高速公路则采用2~3 mm/月^[4]。张再武通过对沪宁高速公路长达7年的沉降跟踪观测, 提出路面结构层沉降速率宜控制为0.5 cm/月^[5], 而相关的路面结构力学分析则表明近6 cm的差异沉降将导致面层弯拉应力达到极限而破坏^[6], 并且大于4 cm的差异沉降还将造成诸如桥头跳车、车辆后轮腾空等行车不舒适感甚至发生交通事故^[7]。《铁路特殊路基设计规范》中, 也要求软土地区I级铁路一般路段工后沉降速率应小于4 cm/a^[8]。

综合以上研究成果, 笔者认为, 考虑路面结构耐久性、行车安全性等因素, 软土地区高速公路采

收稿日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(51108252); 山东省交通科技创新计划项目(2010Y08-3)

作者简介: 张思峰(1976-), 男, 山东济宁人。副教授, 博士, 主要从事软土地基处理等方面的科研工作。E-mail: sddxzsf@163.com。

用 4 cm/a 的工后沉降速率控制标准是适宜的。

2 工后沉降双指标控制理论的工程应用

2.1 工程概况

拟建的济—徐高速公路途径济宁南四湖地区，该区域内河流沟渠密布，地形为黄河泛滥及湖相冲积而成。地质勘察表明，该区域地表下 10 m 以内土体物理力学性能差，属典型软土土质。为避免后期路基路面病害的大面积发生，首先采用分层总和法对最大设计填土高度为 7.4 m 的某大桥高填土路段进行了不同填土荷载作用下天然地基的固结变形特性研究。路堤填土加载方式按照线性加载，如图 1。软土地基物理力学指标，如表 1。

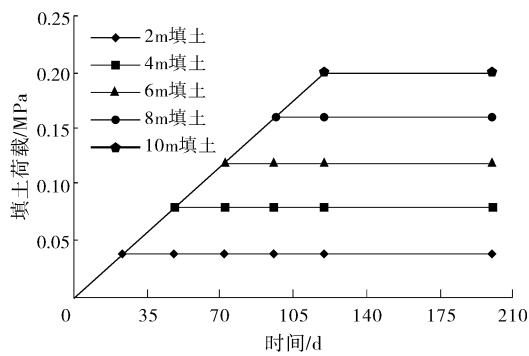


图 1 荷载加载方式

表 1 软土地基物理力学指标

层号	层厚/ m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	塑性指数/ %	固结系数/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	压缩系数/ kPa^{-1}
1	4.7	18.3	8.7	6×10^{-4}	420
2	7.8	19.0	9.2	4×10^{-4}	360
3	9.9	19.4	10.5	6×10^{-4}	310
4	7.6	19.2	12.7	5×10^{-4}	250
5	5.0	19.1	14.4	6×10^{-4}	260

表 2 为不同填土高度下路中心工后沉降量计算结果。由表 2 可以看出，对于初步设计中路基填土高度在 5.5 ~ 7.4 m 之间的路段，其 15 年时的工后沉降量均大于规范要求的桥台部位工后沉降量小于 10 cm 的要求^[1]，因此，5.5 m 填土高度以上路段需进行地基处理。

表 2 不同填土高度下天然地基的工后沉降量计算结果

填土高度/m	总沉降量/cm	15 年时工后沉降量/cm
2	13.72	4.09
4	36.46	7.55
6	67.60	10.75
8	91.90	14.61
10	117.00	18.58

2.2 湖相软土地基处理及工后沉降特性研究

依据双指标控制理论，地基处理技术的选择应满足工后沉降量及沉降速率的双指标标准，结合依托工程的实际地质情况和我国湖相软土常用的地基处理方法，初选 4 种技术作为本工程的软土地基处理方法：粉喷桩法、强夯置换碎石桩法、强夯法及袋装砂井排水固结法。

2.2.1 处理方法计算参数的选取

地基处理后，土体相关物理力学参数的选取将直接关系到沉降量、沉降速率等指标计算结果的正确性。在广泛调研国内公路工程领域中上述地基处理方法设计参数及处理效果的基础上，选定了经不同方法加固处理后的土体物理力学参数^[9]，并将其作为软土地基处理后工后沉降特性计算的依据。经强夯法处理后，原湖相软土地基物理力学参数变化取值，如表 3。

表 3 强夯法计算参数变化幅度选取

深度 范围/m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	塑限/ %	固结系数/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	压缩系数/ MPa^{-1}
1~3	10	10		2~5	30
3~6	5	6		2~3	20
6~9	2	3		1~2	10
备注	增大	减小	视土质情况微调	适当减小	减小

注：设计加固影响深度 9 m，9 m 以下维持原土体物理力学参数不变。

2.2.2 地基处理后的工后沉降量分析

4 种地基处理方式在不同填土高度下的路中心沉降量计算结果，如表 4(忽略路堤本身沉降量；排水固结法考虑 1.4 年的预压期)。

表 4 4 种不同处理方式在不同填土高度下路基沉降量计算结果

填土 高度/ m	粉喷桩法		强夯法		强夯碎石桩法		袋装砂井排水固结法	
	总沉降量	15 年时工后 沉降量	总沉降量	15 年时工后 沉降量	总沉降量	15 年时工后 沉降量	总沉降量	15 年时工后 沉降量
2	5.69	1.58	10.74	2.99	5.56	1.70	13.73	6.76
4	20.79	3.78	31.00	5.60	22.52	4.10	36.61	10.18
6	41.22	5.81	56.50	7.97	42.80	6.21	64.86	11.16
8	63.99	7.70	84.51	10.14	66.20	8.14	95.63	12.72
10	93.29	9.61	119.25	12.26	97.70	10.06	131.64	14.34

由表 4 可以看出: ①采用粉喷桩法或强夯碎石桩法处理时, 10 m 以下路基填土高度均可满足桥头部位 15 年工后沉降量小于 10 cm 的要求, 故对于最大填土高度 7.4 m 的地基, 采用粉喷桩法或强夯碎石桩法可满足工后沉降量指标要求; ②强夯法处理填土高度 8 m 以下的地基其工后沉降量均满足要求, 故对于本断面来说, 采用强夯法也是适宜的处理技术; ③袋装砂井排水固结法, 仅能满足填土高度 4 m 以下路基工后沉降量要求, 因此本工程中按照一般软土地基处理设计参数, 采用排水固结法是不适宜的。

综合以上分析, 对填土高度在 5.5 ~ 7.4 m 之间

的需处理路段, 按照工后沉降量指标进行控制时, 除袋装砂井排水固结法以外, 其余 3 种地基处理技术, 均可满足 15 年时工后沉降量要求。

2.2.3 地基处理后的工后沉降速率特性分析

依据双指标控制理论, 进行地基处理后的公路路基除满足工后沉降量指标外, 还应满足工后沉降速率指标要求, 即最大年沉降速率应小于 4 cm/a。基于此, 本文对粉喷桩法、强夯碎石桩法及强夯法在填土高度 7.4 m 条件下的沉降量 - 时间关系曲线进行了拟合, 进而分析了其工后沉降速率特性, 如表 5。

表 5 工后沉降量及沉降速率

地基处理方式	沉降量 - 时间拟合公式	相关系数 R^2	最大年沉降速率/ ($\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$)	是否满足 沉降速率要求
粉喷桩法	$y = 2.222\ln x - 12.068$	0.97	1.54	满足
强夯法	$y = 2.943\ln x - 15.983$	0.97	2.04	满足
强夯碎石桩法	$y = 2.389\ln x - 13.011$	0.97	1.66	满足

注: 拟合公式中 x 为时间, 天。

从表 5 中看出, 经地基处理后, 按照 4 cm/a 的沉降速率控制, 满足工后沉降量指标要求的 3 种地基处理技术也均满足工后沉降速率指标要求。但考虑到本断面地质条件(表层 12.5 m 范围内土体塑性指数小于 $10^{[10]}$) 以及各处理技术的工程造价、施工工艺等因素, 本工程其最适宜的地基处理技术应为强夯法。

3 结论

针对济—徐高速公路四湖地区软土地基处理中存在的问题, 提出了软土地基处理的双指标控制理论, 并结合工程实例, 进行了基于双指标控制理论的软土地基处理方法的优选。主要结论如下:

(1) 提出了软土地区工后沉降量与沉降速率双指标控制理论, 确定了高速公路 4 cm/a 的沉降速率控制标准。

(2) 工程应用实例表明, 初选的 4 种地基处理技术除袋装砂井排水固结法外, 均满足工后沉降量与沉降速率的双指标控制理论, 但考虑到地质条件、工程造价等因素, 最适宜地基处理技术应为强夯法。

(3) 提出的软土地区高填土路基工后沉降双指标控制理论, 可为类似工程设计方案的制定提供借鉴。

参考文献 (References):

[1] JTG D30—2004 公路路基设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

- [2] 祝天晴. 西部山区公路软基沉降监控技术及工后沉降研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [3] 杨涛, 张文彦, 李国维, 等. 基于双曲线拟合法的超载预压卸荷沉降速率标准研究 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (3): 10-14.
Yang T, Zhang W Y, Li G W, et al. Research on settlement rate standard for determining surcharge removal time based on hyperbolic fitting method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (3): 10-14.
- [4] 刘吉福, 莫海鸿. 对沉降速率法确定卸载时机的认识 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (S1): 3065-3072.
Liu J F, Mo H H. Understanding of determination of unloading time using settlement velocity method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (S1): 3065-3072.
- [5] 张再武. 高速公路软土路堤沉降速率控制标准研究 [J]. 交通科技, 2011 (3): 83-85.
- [6] 黄永强, 李海波, 马兴峰, 等. 路基不均匀沉降对沥青混凝土路面结构影响数值分析 [J]. 公路工程, 2012, 37 (5): 34-40.
Huang Y Q, Li H B, Ma X F, et al. Numerical analysis on influence of subgrade uneven settlement on pavement structure of asphalt concrete [J]. Highway Engineering, 2012, 37 (5): 34-40.
- [7] 赵衡, 刘晓明. 桥头跳车引起的路面受力计算分析 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (5): 59-62.
Zhao H, Liu X M. Analysis of pavement loading caused by vehicle jumping at bridge head [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (5): 59-62.
- [8] TB10035—2006 铁路特殊路基设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [9] 山东大学. 湖相软土路基处理技术的研究及应用 [R]. 2012.
- [10] 邱青长, 陈豪, 黄生文, 等. 强夯法在粘土回填地基处理中的应用 [J]. 公路与汽运, 2003 (6): 32-34.

(下转第 103 页)

- surrounding rocks for tunnels constructed using TBM and drill-and-blast [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42 (11): 121–128.
- [6] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [7] 彭道富, 李忠献. 特长隧道 TBM 掘进施工技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (2): 179–183.
- Peng D F, Li Z X. Study on TBM boring technique for construction of super long tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25 (2): 179–183.
- [8] 吴世勇, 王鹤, 徐劲松, 等. 锦屏二级水电站 TBM 选型及施工关键技术研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (10): 2000–2009.
- Wu S Y, Wang G, Xu J S, et al. Research on TBM type-selection and key construction technology for Jinping II hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (10): 2000–2009.
- [9] 高燕芳. TBM 掘进技术在软岩隧洞中的应用 [J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9 (6): 126–128.
- Gao Y F. Application of TBM boring technology in soft rock tunnels [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9 (6): 126–128.
- [10] GB6722—2011 爆破安全规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

Numerical Analysis on Impact of Vibration on Surrounding Environment in TBM Construction of Subway Tunnel

GAO Wei¹, DU Jiaqing², YANG Long³

(1. Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Shum Yip Land Company Limited, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: Taking Chongqing Rail Transit Line 6 (Phase I) as the background, the vibration effect of surrounding rock induced by TBM construction was analyzed by means of numerical simulation. The result shows that, for the general civil, industrial and commercial buildings, the vibration strength of TBM construction is within the range permitted; however, for the structures sensitive to the vibration, the strength is out of this range, and the vibration absorption and isolation measures are required.

Key words: subway tunnel; TBM; rock vibration; environmental impact; numerical simulation

(上接第 86 页)

Study on Application of Two-indicators Control Theory for Post-construction Settlement in Soft Soil Foundation Treatment of a Highway

ZHANG Sifeng¹, CHEN Xuefeng¹, LI Lin¹, CHEN Yicong²

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. School of Management, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Currently more and more high-class highway projects extend to soft soil area; however, the usage of post-construction settlement index in the engineering can not completely relieve the highway from massive occurrence of pavement cracking, uneven settlement and other diseases. Thus, based on the two-indicators control theory of post-construction settlement and settlement rate in highway construction in soft soil area, this paper defined the standard for control of post-construction settlement rate for highway in soft soil areas. In addition, depending on the lacustrine facies soft soil foundation treatment in a high-fill section in the Southern Four Lakes Area of Jining along Jining-Xuzhou Highway, this paper studied the characteristics of post-construction settlement under different foundation treatment methods, based on which the technology for soft soil foundation treatment and applicable to this project was proposed through the basis of the post-construction two-indicators control theory. The study result may provide references for similar engineering design.

Key words: soft soil foundation; two-indicators control theory; post-construction settlement; settlement rate