

文章编号: 1006 - 2106( 2012) 05 - 0018 - 08

## 胶济客专非饱和土地基沉降特性试验研究<sup>\*</sup>

姚裕春<sup>1\*\*</sup> 李安洪<sup>1</sup> 蒋关鲁<sup>2</sup>

( 1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:** 研究目的: 由于非饱和土的复杂性, 目前非饱和土理论还不完善, 尚未形成成熟的非饱和土固结理论和沉降计算方法。地基沉降已成为高速铁路客运专线路基的主要控制因素之一。在掌握非饱和土物理力学特性基础上, 揭示非饱和土地基沉降特性, 对于在其上修建高速铁路客运专线根据工期情况选择更加合理、经济的地基处理措施具有重要意义。

**研究结论:** 胶济客专非饱和粉质黏土、粉土饱和度一般在 46% ~ 80%; 路堤在填筑期可完成总沉降的 75% 以上, 经过 3 ~ 5 个月的放置, 可完成总沉降的 90% 左右; 非饱和土应力 - 应变、应变 - 时间关系均符合双曲线模型, 沉降预测推荐双曲线法; 非饱和土地基上一般地段修建有砟轨道客运专线地基不处理, 修建无砟轨道客运专线只对地基浅层 5 ~ 8 m 采用复合地基处理, 对于高填方及过渡段加大复合地基处理深度。

**关键词:** 胶济客专; 非饱和土地基; 沉降特性; 沉降预测; 地基处理原则

中图分类号: U213 文献标识码: A

## Experimental Study on Settlement Characteristics of Unsaturated Soil Subgrade of Qingdao - Jinan Passenger Dedicated Line

YAO Yu - chun<sup>1</sup>, LI An - hong<sup>1</sup>, JIANG Guan - lu<sup>2</sup>

( 1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract: Research purposes:** Now the theory on the unsaturated soil is imperfect, and the consolidation theory and settlement calculating method for the unsaturated soil are not mature because of the complexity of the unsaturated soil. The subgrade settlement becomes one of important control factors of passenger dedicated line, so it is very important to know the physical mechanics characteristics of the unsaturated soil and it is very significant to reveal the settlement characteristics of unsaturated soil subgrade for selection of more reasonable and economic treatment way for the unsaturated soil subgrade of passenger dedicated line.

**Research conclusions:** The saturations of unsaturated silty clay and floury soil along the Qingdao - Jinan Railway are between 46% ~ 80%. The embankment settlement during construction period can be above 75 percent of the total settlement and about 90 percent of the total settlement after 3 to 5 months. The stress - strain curve and the strain - time curve tally with the hyperbolic model, and hyperbolic method is recommended to predict the settlement of the subgrade. It is unnecessary to treat the unsaturated soil subgrade of the ballast track of passenger dedicated line. It is necessary to conduct the treatment to the shallowness from 5 m to 8 m of the subgrade of ballastless track of passenger dedicated line. The treating depth should increase for the high filling and transition sections of the ballastless track of passenger dedicated line.

**Key words:** Qingdao - Jinan passenger dedicated line; unsaturated soil subgrade; settlement characteristics; settlement prediction; ground treatment principle

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011 - 12 - 13

<sup>\*\*</sup> 作者简介: 姚裕春, 1974 年出生, 男, 高级工程师。

非饱和土是指在土骨架形成的孔隙中含有水和空气的土,通常定义非饱和土具有三相,即固体、水、空气,更确切地说,非饱和土中还有第四相存在,即水、气的分界面或收缩膜<sup>[1]</sup>。工程上遇到的岩土工程问题严格说来大多属于非饱和土问题,由于孔隙中空气的存在使非饱和土性质非常复杂,也给试验揭示其特性规律带来了巨大困难,非饱和土理论的研究工作目前还不完善,还未形成成熟的非饱和土沉降计算理论和计算方法。近年来我国高速铁路发展非常迅速,高速铁路特别是无砟轨道客运专线铁路土质地基多采用复合地基处理,但多条线的现场实测沉降值明显小于计算沉降值,鉴于目前柔性基础下非饱和土地基沉降特性研究很少,且沉降控制已成为客运专线主要控制因素之一的情况,开展胶济客专非饱和土地基沉降特性研究,可为在其地基上修建客运专线进行地基处理方案选择及根据工期情况选择更加合理、经济的地基处理措施具有重要意义。

## 1 非饱和土固结理论概况

非饱和土的固结是工程中常见的问题,也是非饱和土地基上修建客运专线特别是修建无砟轨道客运专线要解决的主要控制因素之一,其理论研究内容包括孔隙水压力和孔隙气压力随土体变形而变化以及随时间增长而消散的规律。

国外从20世纪60年代开始研究非饱和土固结问题,其中最为流行的为Fredlund固结理论<sup>[1]</sup>。国内非饱和土的固结理论是20世纪90年代研究的热点并取得了一定进展<sup>[2-6]</sup>。但是非饱和土在土骨架形成的孔隙中同时含有气体和水,气体在压缩时会有部分溶解于水中,非饱和土的压缩性和渗透性比饱和土复杂得多。因此,迄今为止,还没有公认为成熟的非饱和土固结理论。建立非饱和土固结理论的困难主要有几个方面<sup>[1-8]</sup>:

(1) 饱和土固结理论是以土体变形是连续的作为基本假设。对于非饱和土而言,土体中气体具有很高的压缩性,同时,部分气体溶解于水中,很难满足严格的连续条件。

(2) 非饱和土的渗透性包括透气性和透水性,渗透性与非饱和土的基质吸力和含水率密切相关,且在由干到湿和由湿到干的干湿循环过程中,相同含水率的土体,渗透性并不一样,即渗透性与含水率不是单值函数关系,因此,测量渗透系数不容易。

(3) 非饱和土的有效应力参量和有效应力原理的适用性较窄,有效应力公式中含有与基质吸力有关的参量不易确定。

(4) 非饱和土的水气接触是一个复杂的物理-化学界面,Fredlund称之为第四相,第四相对非饱和土的行为有何影响仍不得而知。

(5) 非饱和土本构模型还没有公认的理论,因此建立成熟的非饱和土固结理论还需要时间。

## 2 非饱和土物理力学特性

胶济客专非饱和地基土主要是非饱和粉质黏土、粉土,其代表性断面如图1所示,其物理力学性质试验结果如表1所示,现场试验断面概况如表2所示。

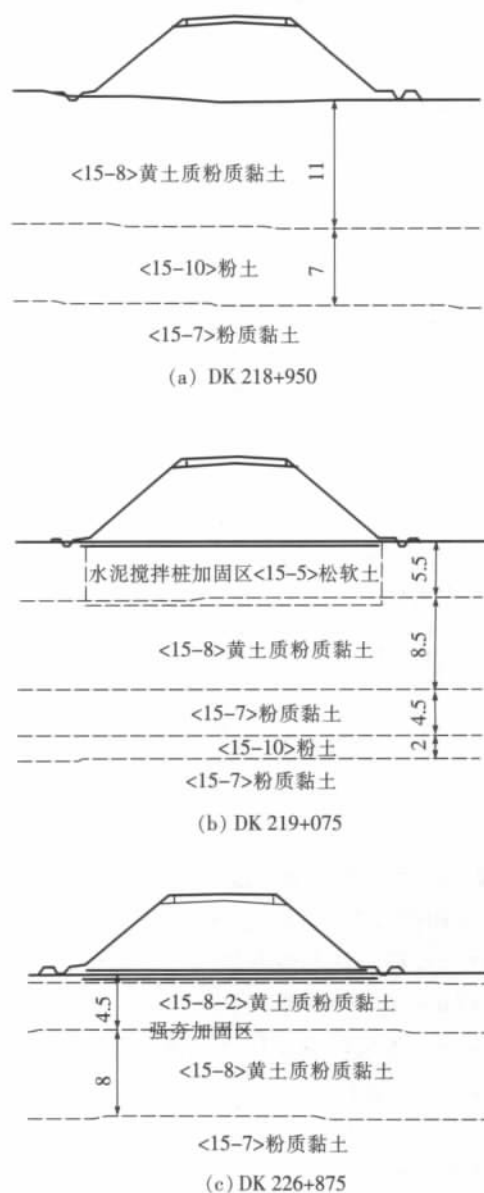


图1 非饱和土路基代表性断面(单位:m)

表 1 非饱和土物理力学性质

试验断面	深度 /m	天然含水率 /%	饱和度 /%	塑限 /%	液限 /%	塑性指数
DK 225 + 560	5.5 ~ 5.9	13.2	48	15.9	25.7	9.8
DK 225 + 560	12.2 ~ 12.6	18.3	58	18.8	25.9	7.1
DK 225 + 560	16.4 ~ 16.8	18.4	67	19.4	27.4	8
DK 225 + 560	22.2 ~ 22.6	27.9	87	19.9	34.1	14.2
DK 225 + 700	6.5 ~ 6.9	11.3	46	16.7	25.9	9.2
DK 225 + 700	9.2 ~ 9.6	12.7	51	17.7	26.5	8.8
DK 225 + 700	13.2 ~ 13.6	16	56	16.6	24	7.4
DK 225 + 700	19.8 ~ 20.2	25.6	79	22.1	37.9	15.8

表 2 现场断面概况

断面	地基处理方法	处理深度 /m	路基填高 /m
DK 218 + 950	未加固	—	7.5
DK 218 + 978	换填	2.0	7.7
DK 219 + 075	水泥搅拌桩	5.5	7.7
DK 219 + 100	水泥搅拌桩	6.5	7.8
DK 225 + 700	换填	2.0	8.4
DK 226 + 875	强夯	—	7.4
DK 226 + 825	强夯	—	7.3

3 非饱和土固结试验

3.1 非饱和土应力—应变关系

胶济线非饱和粉质黏土、粉土压缩系数  $a_{1-2}$  在  $0.117 \sim 0.217 \text{ MPa}^{-1}$  之间,属典型的中等压缩性土。非饱和粉质黏土、粉土的应力—应变关系曲线如图 2 所示,其符合双曲线模型:

$$\varepsilon_i = P_i / (A + BP_i) \tag{1}$$

式中  $P_i$ ——固结压力;  
 $\varepsilon_i$ ——轴向应变;  
 $A、B$ ——双曲线拟合参数。

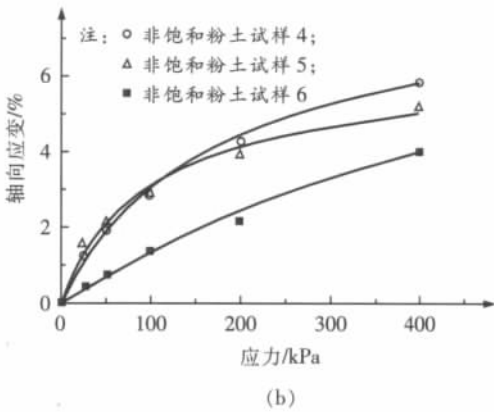
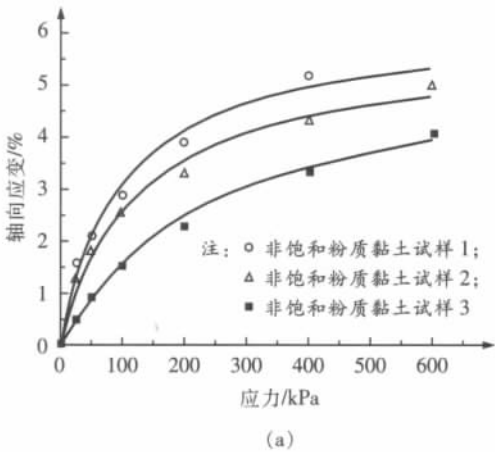


图 2 非饱和土应力—应变曲线

3.2 非饱和土应变—时间关系

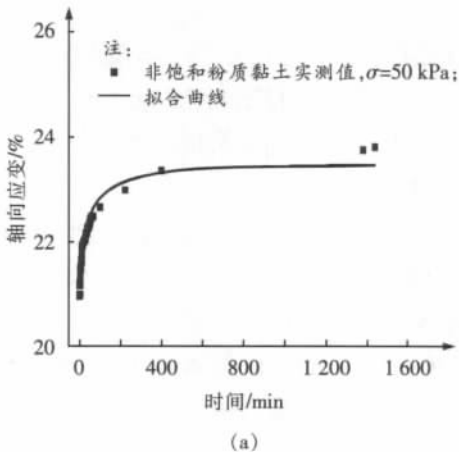
非饱和粉质黏土、粉土的应变—时间关系曲线如图 3 所示,其符合双曲线模型:

$$\varepsilon = (b + ct) / (a + t) \tag{2}$$

式中  $\varepsilon$ ——各级荷载作用下的轴向应变;  
 $t$ ——各级荷载作用下的固结时间;  
 $a、b、c$ ——相关试验参数。

3.3 非饱和土饱和度—固结时间关系

图 4 为非饱和土初始饱和度与固结时间关系曲线,结果表明低饱和状态( $S_r < 52.9\%$ )固结时间最短,随着饱和度的增加( $52.9\% \leq S_r < 90\%$ ),固结



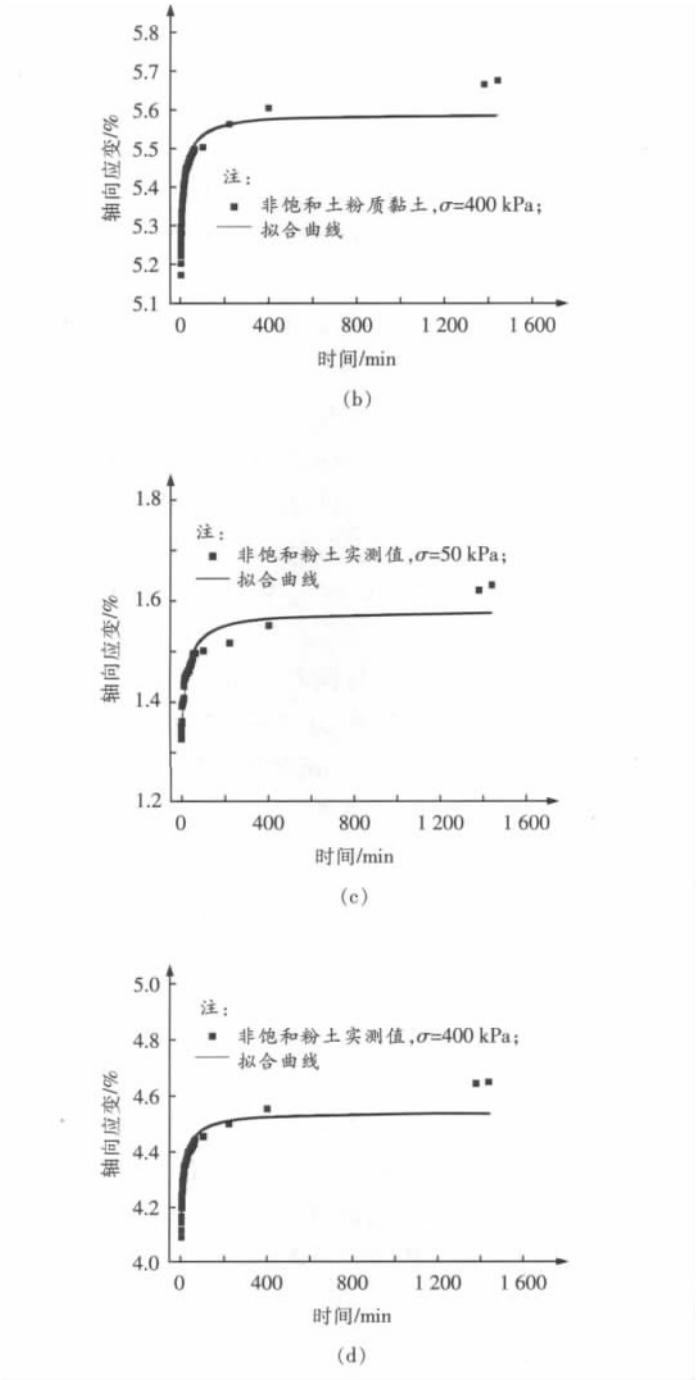


图 3 非饱和土应变—时间曲线

时间逐渐延长,饱和度 $S_r \geq 90\%$ 时固结时间趋近饱和土的固结。

4 非饱和土地基沉降特性

4.1 地基沉降特性现场观测

图 5 为非饱和土现场沉降观测结果,表明路基填筑初期,沉降以地基侧向变形引起的瞬间沉降为主,沉降随着路基高度的增加线性发展,沉降速度较快。填

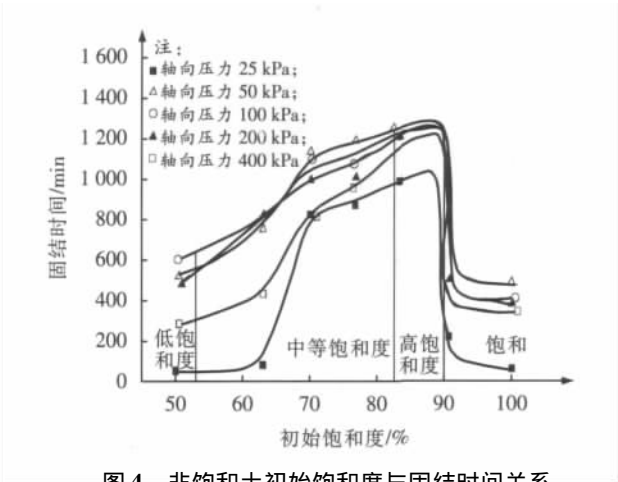
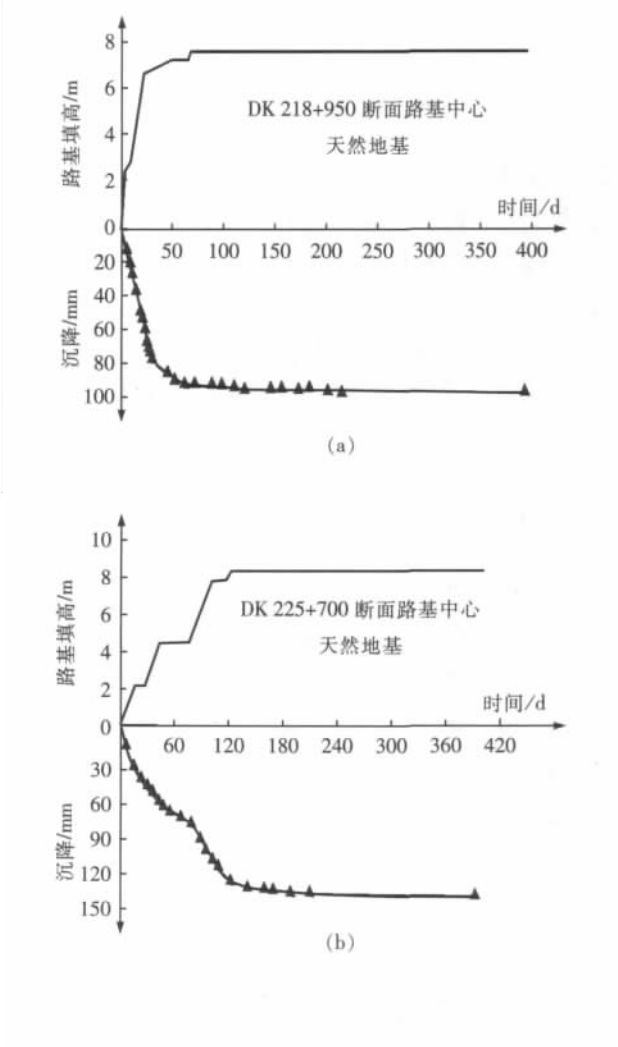


图 4 非饱和土初始饱和度与固结时间关系

筑后期,沉降量进一步增加,沉降曲线较陡。路基填筑完成后,沉降速度开始减缓,沉降曲线趋于稳定。胶济客运专线天然非饱和粉土、粉质黏土未加固地基路基填筑时间为 70 d,填筑期沉降为观测总沉降的 90%;强夯断面的填筑期为 118 d,填筑期沉降约为观测总沉降的 80% 左右;换填断面的填筑期约为 120 d,填筑期沉降为总沉降的 86.5% ~ 89%;水泥土搅拌桩填筑期为 99 d,填筑期沉降最大可达观测总沉降的 95.8%。



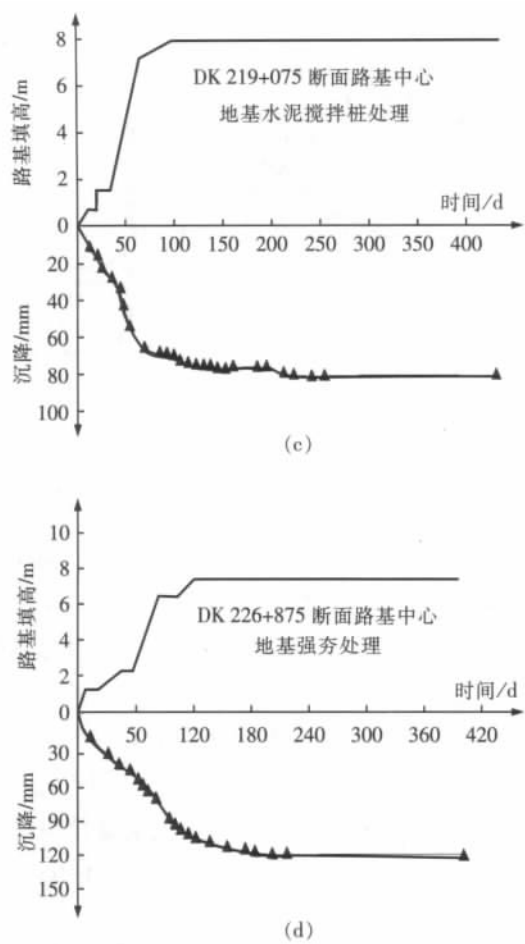


图 5 现场沉降观测结果

4.2 地基沉降特性离心模型试验

图 6 为各代表性断面离心模型试验沉降与时间关系,结果表明,路基模拟填筑期 80 d,放置期 90 d,未处理断面路基填筑期内地基沉降 46.8 mm,放置期内地基沉降 7.1 mm,铺轨后 3 年运营期内,地基产生工后沉降 23.2 mm,路基基底中心(填筑+放置期)沉降占

总沉降的 69.9%;水泥搅拌桩加固断面填筑期内地基沉降 63.9 mm,放置期内地基沉降 10.1 mm,铺轨后 3 年运营期内,路基表面产生的工后沉降约为 38.3 mm,路基基底中心(填筑+放置期)沉降占总沉降的 68.5%;强夯加固断面填筑期内地基沉降 79.2 mm,放置期内地基沉降 12.1 mm,铺轨后 3 年运营期内,路基表面产生的工后沉降约为 28.7 mm,路基基底中心(填筑+放置期)沉降占总沉降的 77.6%。路基填筑完成之后放置 1.5 年以上,地基沉降完全稳定。

4.3 地基沉降特性数值模拟

数值模拟采用 PLAXIS 有限元程序,数值模拟沉降与时间关系如图 7 所示,非饱和土未处理地基、换填加固地基、强夯加固地基、水泥搅拌桩桩加固地基的填筑期间沉降分别为 116 mm、101 mm、81.6 mm 和 78.4 mm,最终沉降量分别为 155.3 mm、137.5 mm、124.2 mm 和 96 mm,填筑期间沉降分别占总沉降的 74.7%、73.4%、65.8% 和 81.7%,填筑完成后放置 195 d、205 d、250 d 和 115 d 沉降完全稳定下来。

4.4 地基沉降特性综合分析

4.4.1 沉降与时间关系

根据地基现场沉降观测、离心模型试验及数值模拟结果综合分析,非饱和土地基在路基填筑期沉降完成较快,施工期可完成总沉降的 75% 以上,经过短期放置(3~5 个月)可完成总沉降的 90% 左右。

4.4.2 沉降量与工后沉降

离心模型试验、数值模拟及现场实测各断面的总沉降量及工后沉降结果如表 3 所示。表 3 显示,非饱和土地基离心模型试验、数值模模拟与实测结果均较为接近,从工后沉降值看满足无砟轨道要求。

表 3 沉降量与工后沉降结果

断面	实测/mm		离心模型试验/mm		数值模拟/mm	
	总沉降	工后沉降	总沉降	工后沉降	总沉降	工后沉降
DK 218+950	101.5	6	95	7.1	115	16.2
DK 218+978	135.5	9	—	—	142	15.1
DK 219+075	85	8	109	10.1	102	9.4
DK 219+100	84	2	—	—	99	—
DK 225+560	152.1	7	—	—	158	—
DK 225+700	142.6	6	—	—	163	—
DK 226+875	130.5	10	118	12.1	139	22.4
DK 226+925	129.5	10	—	—	136	—

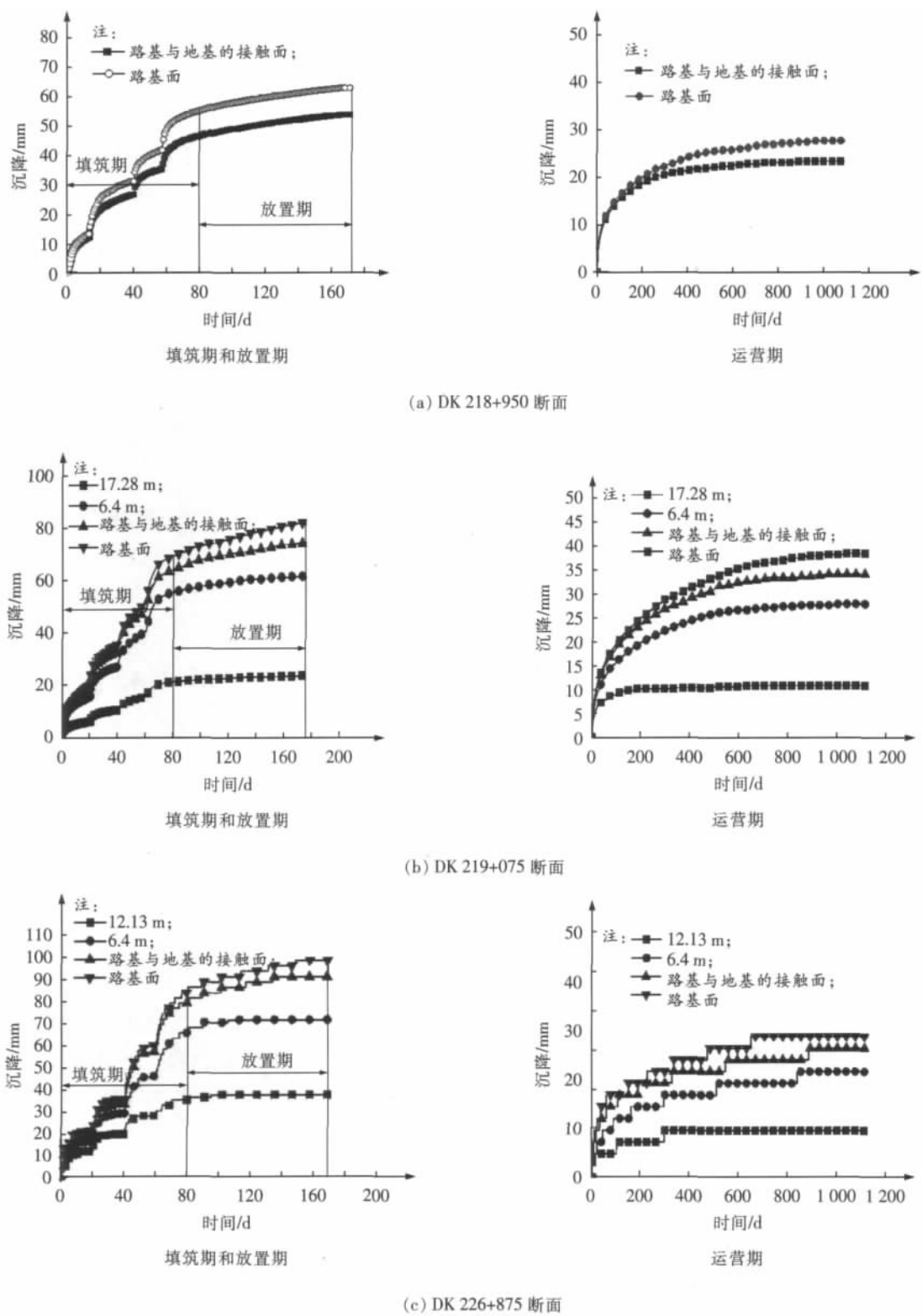


图 6 离心模型试验沉降与时间关系

## 5 非饱和土地基沉降特性与工程应用

### 5.1 沉降计算施工期沉降完成比例

我国修建客运专线由于工期紧,对沉降不满足要求的地基往往采取复合地基进行加固,在这种情况下掌握非饱和土地基沉降特性,对于非饱和土地上修建

客运专线根据工期情况选择更加合理、经济的地基处理措施具有重要意义。

通常路基计算工后沉降采用下式进行:

$$S_{\text{工后}} = S_1 - S_2 \times \alpha$$

式中  $S_1$ ——总沉降;  
 $S_2$ ——施工期沉降;

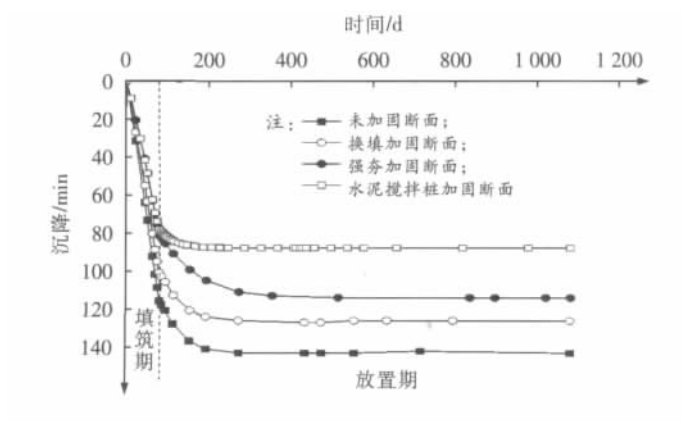


图7 数值模拟沉降与时间关系

$\alpha$ ——施工期沉降完成比例。

本研究非饱和土地基施工期完成沉降比例在控制填筑速率分层填筑情况下可取 75% 以上, 放置 5 个月以上可取 90%。

目前对非饱和土地基沉降特性的研究很少, 本研究得出的非饱和土地基施工期完成沉降明显高于《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)<sup>[9]</sup> 中等压缩性土的 20% ~ 50%, 研究结果具有重要意义。

## 5.2 非饱和土地基处理原则

从非饱和土路基现场沉降观测、离心模型试验、数值模拟结果表明, 路基施工期沉降完成比例较高, 且沉降较快可以趋于稳定、工后沉降值较小, 由此针对胶济线非饱和土地基修建高速铁路客运专线, 提出以下地基处理原则。

### 5.2.1 修建有砟轨道客运专线

一般地段地基原则上不处理; 地基表层有软土、松软土时, 原则上只对地基表层存在的软土、松软土采取挖除换填、复合地基进行加固; 只对高填方及较高的过渡段进行浅层处理。

### 5.2.2 修建无砟轨道客运专线

由于地表浅层呈黏性土特性(沉降量较大)、受外界降雨等影响较大、地表地层的复杂性及无砟轨道沉降要求的严格性, 一般路基原则上对地基浅层 5 ~ 8 m 采用 CFG 桩、强夯、堆载预压等措施进行地基加固; 基表层有软土、松软土时, 根据沉降计算加大处理深度; 高填方、过渡段则地基处理深度加大, 且宜联合堆载预压措施。

## 5.3 非饱和土地基沉降预测

常用地基沉降预测方法各有自己的特点<sup>[10]</sup>, Asaoka 法可利用短期沉降观测资料推求地基最终沉降值, 但理论计算结果偏小; 星野法在观测点偏少或实测数据相关性较差情况下适用性强, 但精确度较低; 双曲线法与实测结果最接近并且计算结果相对稳定, 但

要求路基填筑完成后, 沉降观测时长不少于半年以上。

由固结试验结果知道非饱和粉土、粉质黏土的应力-应变、应变-时间关系均为双曲线型, 在沉降观测时间大于半年以上时推荐非饱和土地基采用双曲线法进行沉降预测, 图 8 为其中某试验代表性断面沉降观测与预测结果, 结果表明双曲线法精度相对更高。

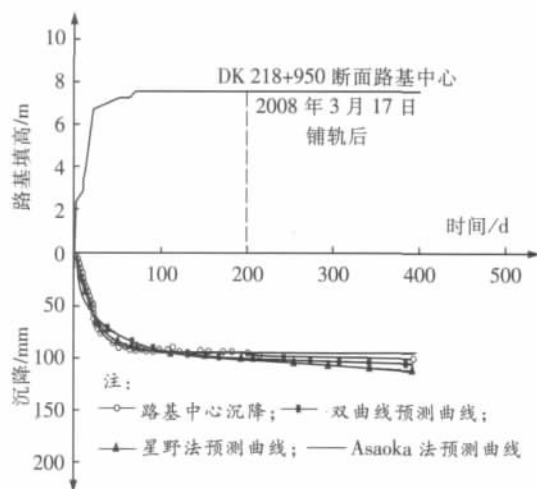


图8 非饱和土沉降预测对比

## 6 结论

(1) 胶济线非饱和粉质黏土、粉土饱和度一般在 46% ~ 80%, 压缩系数  $a_{1-2}$  在 0.117 ~ 0.217 MPa<sup>-1</sup> 之间, 属典型的中等压缩性土, 其应力-应变及应变-时间关系均符合双曲线模型, 推荐采用双曲线法进行地基沉降预测。

(2) 非饱和粉质黏土、粉土地基路堤在填筑期可完成总沉降的 75% 以上, 在控制填筑速率分层填筑情况下, 经过 3 ~ 5 个月放置可完成总沉降的 90% 左右。

(3) 在非饱和土地基上修建有砟轨道客运专线一般地段地基不处理, 修建无砟轨道客运专线一般地段只对地基浅层 5 ~ 8 m 采用复合地基处理。

## 参考文献:

- [1] Fredlund D. G. 非饱和土土力学 [M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.  
Fredlund D. G. Unsaturated Soils Mechanics [M]. Chen Zhongyi, Zhang Zaiming, Chen Yujong, etc, Translated. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [2] 陈正汉, 黄海, 等. 非饱和土的非线性固结模型和弹塑性固结模型及其应用 [J]. 应用数学和力学, 2001(1): 93 - 103.  
Chen Zhenghan, Huang Hai, etc. Non - Linear and Elasto - Plasticity Consolidation Models of Unsaturated

- Soil and Applications [J]. Applied Mathematics and Mechanics 2001(1):93-103.
- [3] 殷宗泽,凌华. 非饱和土一维固结简化计算[J]. 岩土工程学报 2007(5):1-5.
- Yin Zongze, Ling Hua. Simplified Computation of 1D Consolidation for Partially Saturated Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2007(5):1-5.
- [4] 杨代泉. 非饱和土二维广义固结非线性数值模型[J]. 岩土工程学报 1992(S1):122-126.
- Yang Daiquan. Nonlinear Numerical Model of Two-dimensional Generalized Consolidation of Unsaturated Soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992(S1):122-126.
- [5] 陈正汉. 非饱和土研究的新进展[C]//中加非饱和土学术研讨会论文集,1994.
- Chen Zhenghan. Recent Advances in Unsaturated Soils [C]//Chinese and Canada Memoir on Unsaturated Soils, 1994.
- [6] 陈孙文,王炳辉. 饱和土与非饱和土固结理论及有效应力原理浅谈[J]. 中国水运 2007(10):104-105.
- Chen Sunwen, Wang Binghui. Consolidation Theory and Principle of Effective Stress of Saturated Soil and Unsaturated Soil [J]. China Water Transport, 2007(10):104-105.
- [7] 徐永福,傅德明. 非饱和土结构强度的研究[J]. 工程力学, 1999(4):73-77.
- Xu Yongfu, Fu Deming. Study on the Structural Strength of Unsaturated Soils [J]. Engineering Mechanics, 1999(4):73-77.
- [8] 林鸿州,李广信,于玉贞,等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学 2007(9):1931-1936.
- Lin Hongzhou, Li Guangxin, Yu Yuzhen etc. Influence of Matric Suction on Shear Strength Behavior of Unsaturated Soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(9):1931-1936.
- [9] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].
- GB 50007—2002, Code for Design of Building [S].
- [10] 王光勇. 武广客运专线路基沉降监测系统与沉降预测[J]. 铁道工程学报 2009(5):5-7.
- Wang Guangyong. Subsidence Monitoring System and Subsidence Prediction for the Subgrade of Wuhan - Guangzhou Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society 2009(5):5-7.

(上接第10页)

坡体变形破坏机理和各个不同演化阶段的变形破坏及稳定性程度,针对边坡的变形破坏机理和所处的发展阶段,提出合理的治理措施。

(4) 在大型复杂的倾倒变形边坡治理工程中,需要考虑刷方减载、材料置换、锚固、支挡和排水工程等多方案的组合,选择综合性的治理方案,如本案例中的重力罩面+坡率法+截排水等,这样才能取得良好的治理效果。

## 参考文献:

- [1] 丁小军,刘卫民,王佐,等. 软质岩边坡倾倒变形机理及处治工程实例[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- Ding Xiaojun, Liu Weimin, Wang Zuo etc. Mechanism for Toppling Deformation and Treatment Engineering Examples of Soft Rock Slope [M]. Beijing: China Communications Press 2011.
- [2] 中交第一公路勘察设计院有限公司. 阿尔及利亚东西高速公路 M3 标段 PK137+035-PK137+420 段倾倒变形边坡工程地质勘察报告[R]. 西安:中交第一公路勘察设计院有限公司,2009.
- CCCC First Highway Consultants Co. Ltd. Engineering Geological Investigation Report on Toppling Deformation Slope of Lot M3 PK137+035-PK137+420 Algeria East-West Highway Project [R]. Xi'an: CCCC First Highway Consultants Co. Ltd 2009.
- [3] 中交第一公路勘察设计院有限公司. 阿尔及利亚东西高速公路 M3 标段 PK137+035-PK137+420 段倾倒变形边坡处治工程报告[R]. 西安:中交第一公路勘察设计院有限公司,2009.
- CCCC First Highway Consultants Co. Ltd. Treatment Design Report on Toppling Deformation Slope of Lot M3 PK137+035-PK137+420 Algeria East-West Highway Project [R]. Xi'an: CCCC First Highway Consultants Co. Ltd 2009.
- [4] 韩信. 阿尔及利亚东西高速公路工程地质勘察研究[J]. 铁道工程学报 2012(1):11-16.
- Han Xin. Research on Engineering Geologic Investigation of Algeria East-West Highway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(1):11-16.
- [5] 韩信. 中欧(法)岩土工程标准规范体系差异研究[J]. 铁道工程学报 2011(11):117-121.
- Han Xin. Research on Differences between Chinese and European(French) Standard Systems for Geotechnical Engineering [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(11):117-121.