

# 新疆奎克地区硫酸盐渍土溶陷特性研究

康琦<sup>1,2</sup>, 董晓明<sup>3</sup>, 任国杰<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710068;  
3. 鲁东大学 土木工程学院, 山东 烟台 264025)

**摘要:** 采用低速台式自动平衡离心机, 对新疆奎屯-克拉玛依高速公路路基填料的天然盐渍土进行室内离心模拟试验, 探讨了含盐量、温度及离心力对该地区硫酸盐渍土溶陷变形的影响。研究表明: 硫酸盐渍土的溶陷系数均随着离心加速度的增加而增加, 与含盐量无关; 当离心力小于 300 kPa 时, 溶陷系数最敏感; 当  $\text{SO}_4^{2-}$  含量为 2% 时, 对盐渍土的溶陷变形影响最大。通过非线性回归正交分析方法对 5 种工况试验数据进行分析, 得出不同含盐量、不同温度的  $f \sim \delta$  拟合公式, 发现当离心力为 300 kPa 时, 温度的变化对该地区的天然盐渍土的溶陷系数影响不大。研究成果可为类似盐渍土地区进行公路工程的设计与施工提供参考。

**关键词:** 盐渍土; 溶陷系数; 离心试验; 含盐量; 离心力;  $\text{SO}_4^{2-}$  含量; 温度

**中图分类号:** U416.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0147-04

## Melting Characteristics of Sulfuric Saline Soil in Kuik Region of Xinjiang

KANG Qi<sup>1,2</sup>, DONG Xiaoming<sup>3</sup>, REN Guojie<sup>2</sup>

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710068, China; 3. Civil Engineering of Ludong University, Yantai, Shandong 264025)

**Abstract:** The low speed table automatic balance centrifuge was used to perform the laboratory centrifuge simulation on the natural saline soil of the roadbed filling of Kuitun-Kelamayi highway of Xinjiang and to investigate the impacts of salinity content, temperature, and centrifugal force on the melting deformation of sulfuric saline soil. The research result showed that (1) the melting coefficient of sulfuric saline soil increases with the increasing of centrifugal acceleration speed, and is unrelated to salinity content; (2) the melting coefficient is most sensitive when the centrifugal force is less than 300 kPa; and (3) the melting deformation is biggest when  $\text{SO}_4^{2-}$  content is 2%. The nonlinear regression orthogonal analysis method was used to analyze the test data under five working conditions and to obtain the  $f \sim \delta$  fitting formula of different salinity contents and temperatures. It suggested that the variation of temperature has insignificant impacts on the melting coefficient of natural saline soil when the centrifugal force is 300 kPa. The research results can provide reference for the design and construction of highway engineering in the similar saline soil area.

**Key words:** saline soil; melting coefficient; centrifugal test; salinity content; centrifugal force;  $\text{SO}_4^{2-}$  content; temperature

盐渍土是指地表以下 1 m 以内易溶盐含量大于 0.5% 的土。我国盐渍土占地面积大、分布广、类型多, 不仅涉及内陆区域的新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、黑龙江、吉林等地, 而且在沿海区域的江苏、山东、河北、辽宁等地也有分布<sup>[1-3]</sup>。大量试验<sup>[4-13]</sup>表明, 当地基或路基盐渍土遇水后, 土体中的易溶盐溶解, 土体骨架结构遭破坏, 在土体自重及附加应力下易产生较大的沉陷, 因此盐渍土的溶陷变形一直都是公路工程中的主要病害之一。盐渍土中易溶盐的性质、含量、温度、荷载、浸水量、土层厚度及盐渍土类别均对溶陷变形有

重要影响<sup>[14-17]</sup>。

本文对新疆奎克高速公路第六合同段 K 92+900 路基填料的天然盐渍土进行溶陷离心模拟试验, 通过对含水率、温度及离心力的变化对试样采取不同工况模拟, 研究了硫酸盐渍土在不同离心加速度下, 水分和各种离子的迁移, 及其对盐渍土溶陷变形的影响。

## 1 工程背景

新疆奎克高速公路是连霍高速公路的重要联络线, 是奎

屯至阿勒泰和奎屯至塔城的重要交通要道,也是新疆主要骨架网中的“三横两纵”中的重要组成部分。该公路全长 135 km,为双向四车道高速公路,全线共设互通式立交 5 座、分离式立交 14 座、铁路立交 2 座、特大桥 1 座、大中桥 3 座,设计时速 120 km/h。途经地区地形封闭,自然条件恶劣,属于盐渍土地区,盐渍化程度和含盐量随各标段有较大差异。

## 2 试样物理性质

本试验采用新疆奎克高速公路第六合同段 K 92+900 的天然盐渍土作为研究对象,该盐渍土的颗粒成分、击实曲线及化学成分见图 1-图 2,其中击实试验依据《公路土工试验规程》(JT G E40-2007)规定实施。

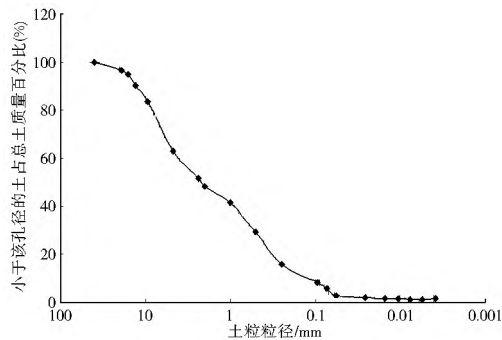


图 1 颗粒分析曲线

Fig. 1 Grain size analysis curve

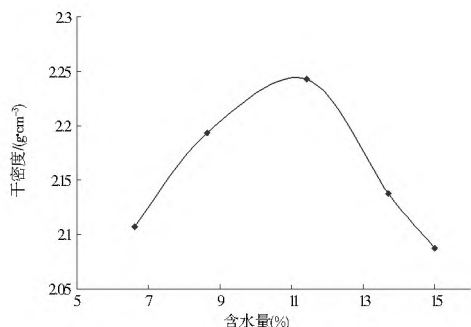


图 2 击实曲线

Fig. 2 Compaction curve

由颗粒分析的曲线试验结果(图 1)可知:  $d_{10} = 0.15$  mm,  $d_{30} = 0.47$  mm,  $d_{60} = 5.1$  mm; 不均匀系数  $C_u = 34$ , 即  $C_u > 5$ , 曲率系数  $C_c = 0.29$ , 该盐渍土级配不均匀, 根据文献 [17] 可判断该土级配越良好, 则说明该场地盐渍土的土粒成分并不连续, 主要由大颗粒和小颗粒组成, 缺少中间颗粒, 较粗的颗粒间空隙被较细的颗粒所填充, 该试验场地土体的密实度较好。

从天然土击实击实曲线(图 2)可以看出: 该盐渍土的最大干密度为  $2.25$  g/cm<sup>3</sup>, 最佳含水率为 11.12%。针对该场地路基填料未经冻融情况下的天然土, 利用 1 mm 的筛孔制作试验土, 分析其离子化学成分, 分析结果见表 1, 其中  $Cl^-/SO_4^{2-}$  为 0.21, 据此判定该土样为硫酸盐渍土, 属中盐渍土<sup>[19]</sup>。

盐渍土的盐胀和一般膨胀土的膨胀产生的机理不同, 膨胀土的膨胀主要是由于土中含有强亲水性黏土矿物导致土体膨胀; 但盐渍土的膨胀则是由于土体吸水产生膨胀(如硫酸盐渍土)或失水或温度降低导致的结晶膨胀(如硫酸盐渍

土), 其中硫酸盐渍土的膨胀对工程的危害影响很大。硫酸盐渍土的盐胀主要有两方面因素决定: 一是随温度的降低产生盐胀; 另一方面由于土体中孔隙溶液及浓度的不同产生不同程度的盐胀, 硫酸盐渍土的膨胀危害远大于其它盐渍土。一般情况下, 当硫酸钠含量超过 2% 时或当温度低于 32.4 °C 时, 温度由高向低变化时, 无论硫酸钠存在于水中还是粉末中, 均吸收 10 个水分子变成砒硝晶体, 使体积变大 3.11 倍<sup>[20]</sup>。

表 1 硫酸盐渍土的化学成分

Table 1 Chemical composition of sulfate saline soil

化学成分	总含盐量	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup>
含量 (%)	0.906	0	0.0392	0.114	0.024	0.279	0.037	0.023

## 3 盐渍土的溶陷机理

在天然状态下的盐渍土, 当受到遇水浸时, 除了受到土体自重压力或者上覆建筑物荷载等附加压力作用导致而产生压密之外, 还会因土中结晶盐溶解而导致附加沉陷, 产生的变形称作盐渍土溶陷变形, 干燥和稍湿状态的盐渍土才具有溶陷性。盐渍土的溶陷与黄土的湿陷机理有类似之处, 相同点是均是受水浸湿, 使得土颗粒间的连接强度降低, 土结构坍塌; 不同点是盐渍土的结构强度降低是由于土颗粒连接点处的盐结晶被水溶解所致, 没有盐结晶的溶解, 就没有土结构破坏和溶陷变形。所以, 盐结晶的溶解是产生土结构破坏和溶陷变形的导火线<sup>[19-20]</sup>。

盐渍土溶陷通常表现为静水中的溶陷变形和潜蚀变形两种类型, 其中潜蚀变形是指盐渍土浸水时间长、浸水量大时造成的渗流带走了土中部分颗粒而产生的, 是盐渍土溶陷中最常见的一种溶陷形式。盐渍土在潜蚀作用下空隙增大, 在土自重和外荷载的作用下容易产生溶陷变形, 是否存在渗流潜蚀是盐渍土地基和非盐渍土地基发生沉陷的本质区别<sup>[15]</sup>。

## 4 离心模拟试验方案

通常用溶陷系数来评价盐渍土的溶陷性指标, 溶陷系数用符号  $\delta$  来表示。目前研究盐渍土溶陷变形的的方法主要有室内渗压试验、现场浸水荷载试验、液体排开法及离心模拟试验等方法。本文采用离心模拟法对奎克高速天然盐渍土进行溶陷试验特性研究, 来探讨  $SO_4^{2-}$  含量和离心力( $f$ )对溶陷系数( $\delta$ )的影响。本试验选用北京时代北利离心机有限公司生产的型号为 DT54 的低速台式自动平衡离心机, 最大离心加速度 5180 g, 转速 5000 r/min, 功率 300 W, 定时范围 0~999 min, 频率为 50 Hz, 试样杯 250 ml, 试验仪器示意图见图 3。



图 3 试验装置

Fig. 3 Test apparatus

为研究自然条件下不同含盐量的硫酸盐渍土遇水溶陷的基本特征和规律,通过调控不同的加速度,选用最佳含水率下的土样,将土样进行配比后放入试样杯中;土样上下均垫滤纸并与滤纸紧密接触;对土样进行饱和,并称量;试验方案设定的离心力分别为 25 kPa、50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa、600 kPa,速度由低向高依次旋转,测出每种离心加速度情况下的最大溶陷率,并收集不同时刻的滤液,测其滤液浓度。

盐渍土溶陷量的决定因素有很多,本试验共模拟两种不同的工况:

工况一:模拟研究不同含盐量的影响。对天然盐渍土分别加 0%、0.5%、1.5%、2%、3%、4%、5% 的硫酸钠粉末,原盐渍土的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量为 0.114%,配成后的总含盐量为 0.82%、1.32%、2.32%、2.82%、3.82%、4.82%、5.82%, $\text{SO}_4^{2-}$  含量分别为 0.11%、0.45%、1.13%、1.47%、2.15%、2.82%、3.49%,各土样均按照最佳含水率来配置。

工况二:模拟研究不同温度的影响。通过低温恒温箱控制,土样温度分别设定为 2℃、10℃、15℃、20℃、25℃。

## 5 试验结果讨论

### 5.1 不同含盐量条件下盐渍土的溶陷特性

不同  $\text{SO}_4^{2-}$  含量的盐渍土在不同离心力( $f$ )下的溶陷系数变化情况见图 4。可以看出,无论  $\text{SO}_4^{2-}$  含量为多少,溶陷系数均随着离心力的增加而增加。每种含盐量的溶陷系数变化趋势基本一致,可分两个阶段:<sup>1</sup> 线性阶段,当离心力小于 300 kPa 时,曲线斜率较大,溶陷系数增加较快,近似线性;<sup>2</sup> 非线性阶段,当离心力大于 300 kPa 时,曲线斜率减小,溶陷系数增加缓慢,呈非线性。

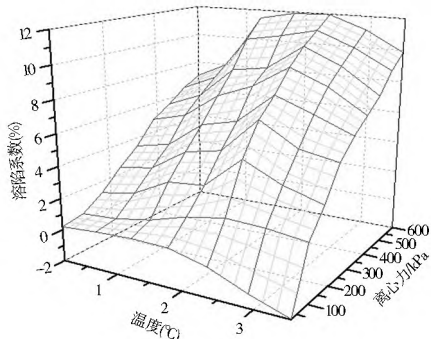


图 4 不同含盐量溶陷系数的变化

Fig. 4 Variation of melting coefficient with different salinity contents

为了更形象的描述  $\text{SO}_4^{2-}$  含量与溶陷系数的关系,取离心力为 600 kPa 为例进行分析(图 5)。从图 5 中可以看出, $\text{SO}_4^{2-}$  含量较小(小于 2%)时,溶陷系数随含盐量的增加而增大;当  $\text{SO}_4^{2-}$  含量达到 2% 时,溶陷系数达到峰值;随着含盐量的继续增加,溶陷系数逐渐减小;离心力为 600 kPa 时,该地区盐渍土的溶陷系数最大值为 12.2%。

### 5.2 不同温度条件下盐渍土的溶陷特性

不同温度下,天然盐渍土在不同离心力作用下的溶陷系数变化情况见图 6。从单因素变化角度分析:离心力相同时,溶陷系数随着温度的增加而增加;温度相同时,溶陷系数随着离心力的增加而增加。从双因素变化角度分析:当离心力

小于 25 kPa 时,各温度条件下的溶陷系数近乎相等;当离心力在 25~300 kPa 之间,各温度的溶陷系数差异明显,说明在该离心力范围内溶陷系数对离心力变化敏感,但随着离心力的增加,速率变缓,溶陷系数变化缓慢。

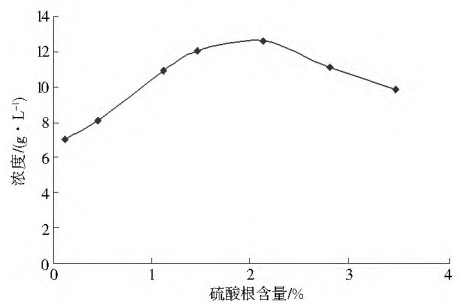


图 5 600kPa 下的  $\delta$  变化规律

Fig. 5 Variation law of  $\delta$  under pressure of 600kPa

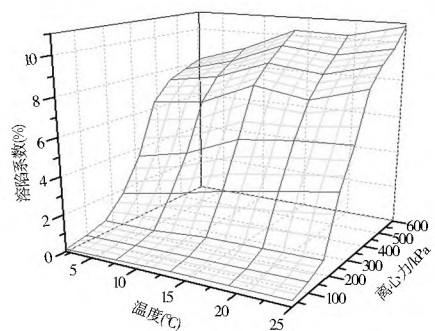


图 6 不同温度溶陷系数的变化

Fig. 6 Variation of melting coefficient under different temperatures

当离心力为 300 kPa 时,对不同温度下  $\delta \sim f$  的关系进行曲线拟合,各拟合方程的判定系数  $R^2$  均大于 99% (表 2),当温度为 2℃、10℃、15℃、20℃、25℃ 时,二次项系数分别为 -0.2402、-0.2444、-0.2666、-0.2959、-0.3052,且均为负值。根据各公式中计算得到不同温度下  $\delta|_{f=300} \in (6.37, 7.92)$ ,即该地区的天然盐渍土溶陷特性受温度的影响不是很大。

表 2 不同温度下  $f \sim \delta$  关系曲线拟合方程

Table 2  $f \sim \delta$  relationship fitting equation under different temperatures

温度(℃)	拟合方程	判定系数 $R^2$
2	$\delta = -0.2402f^2 + 3.0301f - 1.2078$	0.9903
10	$\delta = -0.2444f^2 + 3.1657f - 1.0243$	0.9916
15	$\delta = -0.2666f^2 + 3.4593f - 1.0244$	0.9915
20	$\delta = -0.2959f^2 + 3.6150f - 1.0031$	0.9905
25	$\delta = -0.3052f^2 + 4.0301f - 1.0491$	0.9937

图 7 是滤液浓度随时间的变化趋势,可以看出,滤液浓度随着模拟时间的增加而减小。浓度与温度的曲线符合幂函数,其拟合关系表达式为:  $C = 141.61t^{-0.8758}$ ,当模拟时间为 10 min 时,  $C = 18.849$  g/L,当模拟时间为 100 min 时,  $C = 2.508$  g/L。

## 6 结论

通过对新疆奎克高速公路路基天然盐渍土进行溶陷离

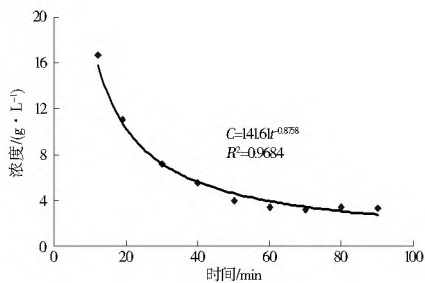


图 7 滤液浓度随时间的变化

Fig. 7 Variation of liquid concentration with time

心模拟试验,发现:

(1) 盐渍土中无论  $\text{SO}_4^{2-}$  含量多少,其溶陷系数均随着离心加速度的增加而增加。每种含盐量的变化趋势基本一致;当离心力小于 300 kPa 时,溶陷系数增加较快;当离心力大于 300 kPa 时,溶陷变化较缓慢。

(2) 盐渍土中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量为 10% 时,其溶陷系数最大。应用非线性回归正交分析,得出该盐量下的  $f \sim \delta$  的拟合曲线:  $\delta = -0.2444f^2 + 3.1657f - 1.0243$ 。

(3) 当离心力为 300 kPa 情况下,不同温度对应的盐渍土的溶陷系数范围在 (6.37, 7.92),表明该地区的天然盐渍土受温度的影响不是很大。

(4) 天然盐渍土的滤液浓度随着离心力模拟实验的增加而减小,当模拟时间为 10 min 时,滤液浓度为 18.849 g/L;当模拟试验时间为 100 min 时,滤液浓度为 2.508 g/L。

#### 参考文献 (References):

- 王小生,章洪庆,薛明,等.盐渍土地区道路病害与防治[J].同济大学学报,2003,31(10):1178-1182.(WANG Xiaosheng, ZHANG Hongqing, XUE Ming, et al. Road Disease and Treatment in Saline Soil Area[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(10): 1178-1182. (in Chinese))
- 袁红,李斌.硫酸盐渍土起胀含盐量及容许含盐量的研究[J].中国公路学报,1995,8(3):10-14.(YUAN Hong, LI Bin. On the Minimum Salt Content and Allowable Salt Content of Sulphate Salty Soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(3): 10-14. (in Chinese))
- 褚彩平,李斌,侯仲杰.硫酸盐渍土在多次冻融循环时的盐胀累加规律[J].冰川冻土,1998,(02):9-11.(CHU Caiping, LI Bin, HOU Zhongjie. Salt Expansion Accumulation of Sulphate Salty Soil under Freezing and Thawing Cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998(02): 9-11. (in Chinese))
- Eigenbrod K D. Effects of Cyclic Freezing and Thawing on Volume Changes and Permeabilities of Soft Fine Grained Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(4): 529-537.
- Nixon J F, Ladanyi B. Thaw Consolidation[A]. Geotechnical Engineering for Cold Regions[C]. Andersland O B, Anderson M, eds, New York: McGraw-Hill, 1978.
- Chamberlain Edwin J, Gow Anthony J. Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13: 73-92.
- Konrad J M, Morgenstern N R. Mechanistic theory of Ice lens Formation in Fine grained Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(4): 473-486.
- Yong R N, Boonsinsuk P, Yin C W P. Alternation of Soil Behavior after Cyclic Freezing and Thawing[A]. Proceedings of 4th International Symposium on Ground Freezing[C]. Rotterdam, the Netherlands: AA Balkema, 1985.
- Zimmie T F, LaPlante C. The Effect of Freeze thaw Cycles on The Permeability of a Fine grained Soil[A]. Proceedings of 22nd Mid Atlantic Industrial Waste Conference[C]. Drexel University, 1990: 580-593.
- 费学良,李斌.不同密度硫酸盐渍土盐胀规律的试验研究[J].冰川冻土,1994,16(3):251-258.(FEI Xueliang, LI Bin. Experimental Researches on Salt Heaving of Sulphate Treated Soil with Different Dry Densities[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(3): 251-258. (in Chinese))
- 高民欢,李斌,金应春.含氯盐和硫酸盐类盐渍土膨胀特性的研究[J].冰川冻土,1997(04):346-355.(GAO Minhuan, LI Bin, JIN Yingchun. Experimental Researches on Expansion Behaviors of Saline Soil with NaCl and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Solutions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997(04): 346-355)
- Sinosen Erik, Janoo Vincent C, Isacsson Ulf. Resilient Properties of Unbound Road Materials During Seasonal Frost Conditions[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2002, 16(1): 28-50.
- YANG Chengsong, HE Ping, CHENG Guodong, et al. Freeze Thaw Experiment Influence on Moisture Content Distrution of Soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, (26): 50-55.
- 徐攸.盐渍土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.(XU You. Saline Soil Foundation[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1993. (in Chinese))
- 张秋美.奎屯至克拉玛依高速公路天然粗颗粒盐渍土路基填料工程性质试验研究[D].西安:长安大学,2011.(ZHANG Qiurmei, Study on the Characteristic of the Natural Coarse Grain Clay Salty Soil of the Freeway from Kuitun to Kalamayi [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese))
- 董晓明,谢永利,李天华.粗粒硫酸盐渍土盐胀特性[J].南水北调与水利科技,2011,9(1):40-43.(DONG Xiaoming, XIE Yongli, LI Tianhua. Characteristics of Salt Heaving for Coarse Grained Sulphate Saline Soil[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 40-43. (in Chinese))
- 洪毓康.土质学与土力学[M].北京:人民交通出版社,2003.(HONG Yurkang. Soil Science and Soil Mechanics[M]. Beijing: People's Traffic Press, 2003. (in Chinese))
- 高江平,杨荣尚.含氯化钠硫酸盐渍土在单向降温时水分和盐分迁移规律的研究[J].西安公路交通大学学报,1997,17(3):22-25.(GAO Jiangping, YANG Rongshang. Study on the Moving Pattern of Water and Salt with Directional Temperature Lowering in Sulphate Salty Soil Containing NaCl[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 17(3): 22-25. (in Chinese))
- 张志萍.国道 314 线和硕至库尔勒段盐渍土工程特性试验研究[D].西安:长安大学硕士论文,2007.(ZHANG Zhiping. Study on Project Property of Salinized Soil along National Road 314 from He Shuo to Ku Er Le [D]. Xi'an: the Master's Thesis in Chang'an University, 2007. (in Chinese))
- M. Y. Abelev. Problems of Construction on Saline Silts, Proc. of 5th Asian Conf. on Soil Mech, Bangkok, 1971.