

影响工业污染土工程行为的物理化学作用概述

刘志彬¹, 刘松玉¹, 王 洋²

(1. 东南大学交通学院岩土工程研究所, 南京 210096;

2. 广州市建设工程质量监督站, 广州 510030)

摘要:随着人类活动在工业污染区日益加剧,由此引发的环境岩土工程问题正在世界范围内引起关注。本文在对环境科学、土壤学以及岩土工程领域相关研究成果总结的基础上,阐述了遭受典型工业污染物如酸碱、重金属和石油侵入后,天然土体工程性质改变的规律,并对不同类型污染物与土体间的物理化学作用进行了深入分析。虽然3类工业污染物一般均会导致天然土体工程性质劣化,但各类污染物质与土体间的物理化学作用机制却各不相同,因此在理论分析与工程应用中必须分别考虑。

关键词:工业污染; 污染土; 工程性质; 物理化学作用

作者简介:刘志彬(1976—),男,河北灵寿人,博士、博士后,主要从事环境岩土工程方面的研究工作。

0 引言

近年来,由于人类活动在工业污染区日益加剧,土体在遭受工业污染后和治理过程中所引起的岩土工程问题在世界范围内开始受到关注。事实上,20世纪90年代末,广西柳州某公司电解镀锌车间在投产使用仅半年就发生了因车间 $ZnSO_4$ 溶液泄漏导致地基明显下沉而停产的事故^[1]。国外70年代初也有地基土因遭受石油污染引起储油罐的过度沉降、倾覆以及输油管线的断裂的报道^[2]。另一方面,自20世纪80年代中期以后,在环境岩土工程领域开始在室内及现场开展利用动电技术从工业致污黏性土中去除重金属和对软土地基进行加固等相关技术的研究。但在已往工作中对电、化学和力三场耦合条件下的土体行为较少进行评价和研究,尤其是对于土体中的物理化学行为很少考虑。实践表明,动电条件下土体尤其是工业致污黏性土的工程性质变化与其内部物理化学作用过程密切相关^[3,4]。

可见,探讨和研究污染物与土体间相互作用的物理化学机制对于查明工业污染土的工程行为、修复污染土以及加固软土地基具有重要的科

学意义。本文试图对天然土体遭受酸碱、重金属,以及石油3类典型工业污染物入侵后的工程行为,以及影响该行为的污染物与土之间的物理化学作用在文献综述的基础上做初步的分析。

1 酸碱污染土

1.1 工程行为

在酸碱污染土的工程行为研究方面,邓承宗^[5]分析了硫酸对地基土的腐蚀后建议,对于重要的有硫酸介质作用的工业厂房地基,最好根据厂房的实际使用条件做室内模拟浸酸试验。顾季威^[6]针对福建某山区造纸厂碱性废液泄漏污染地基土,引起土体工程性质劣化导致管道开裂和建筑物不均匀沉降的问题,经现场钻探取样、室内鉴定以及废碱液对黏性土样浸泡试验后证实,现场出现的工程稳定性问题确系地基土受侵蚀所致。Sunil等^[7]通过室内试验发现,红土经酸液浸泡后由于起胶结作用的有效胶结铁的溶蚀,红黏土的工程性质劣化,抗压强度降低。

范青娟和马光锁^[8]对强夯和击实黄土浸碱后的膨胀率与膨胀力以及膨胀变形机理开展了室内和现场试验研究。发现浸碱膨胀变形对地基土的

影响不仅与浸碱量的多少有关,而且与地基所承受的基础应力大小及环境温度有关。地基浸碱发生胀缩变形,是一个动态平衡过程。李琦等^[9]对造纸厂废碱液污染土进行了室内试验,发现土样经腐蚀后孔隙比增加、强度下降、压缩性增加。李相然等^[10]对济南典型地区地基土的污染腐蚀进行了研究,发现地基土经人工酸碱污染后物理力学性质变化显著,塑限、液限、塑性指数和压缩模量均比腐蚀前减小,液性指数、压缩系数比腐蚀前增大。此外,地基土在遭受污染腐蚀后,其中粉土、粉质黏土物理力学性质的变化规律性不强,除液塑限、压缩系数和压缩模量变化规律性强外,其他的指标变化不显著。而黏土及淤泥质土污染腐蚀前后土的物理力学性质变化较明显,地基土遭受污染腐蚀后压缩系数都有较大增长,地基土承载力降低。Sivapullaiah 和 Manju^[11]通过室内试验发现,高岭土被碱溶液污染后比重降低,吸水能力、比表面积和自由膨胀指标均提高。

1.2 物理化学作用

为了解释酸碱污染土宏观行为改变的机制,许多学者对酸碱物质侵入黏性土后发生的相关物理化学反应进行了研究。蒋引珊等^[12]在进行了黏土矿物酸溶解试验后认为, H^+ 被矿物表面吸附,降低了表面能,被吸附的 H^+ 与矿物表面及结构中的离子发生交换反应,被交换的离子发生解析,离开矿物表面或结构进入溶液中,实现了矿物在酸性水溶液中的溶解。路世豹等^[13]分析了硫酸库地基土(粉质黏土)遭受污染的机理后发现,地基土在污染后产生了以石膏、明矾石和褐铁矿为主的新生矿物,其中石膏形成过程中体积膨胀是地基土变形的主要原因。并且总结出地基土遭受酸性侵蚀污染的过程为:①酸侵入;②酸溶解土中的矿物;③酸溶矿物质的迁移;④矿物重结晶;⑤体积膨胀(土结构破坏)。张信贵^[14]等进行了不同酸碱条件下土体细观结构变异的试验研究,发现随酸度增高、碱度增大,矿物变异的种类、数量也逐渐增多,矿物有伊利石化与蛭石化趋势。酸性溶液会溶蚀黏土颗粒间胶结物和黏土矿物本身,破坏土的凝聚力,使得黏土颗粒形成架空结构,粒间孔隙增大。若土体仅受自重应力,土体结构将趋于疏松状态,其渗透性和压缩性提高,抗压强度降低。若有外部附加应力,则在溶蚀过程中,颗粒趋于压密,渗透性减弱,对其性质劣化可起到一定的

抑制作用。

至于碱溶液与土体间相互作用,相关研究表明,低浓度的碱将引起土的结构变化^[15],高浓度碱则会在土中产生新的化合物并且由于碱与黏土矿物的相互作用导致黏土结构性变化^[11]。范青娟和马光锁^[8]分析认为,黄土浸碱膨胀变形主要是物理变化,也伴有化学作用过程。碱液在土中蒸发浓缩结晶或稀释溶解会产生胀缩变化。当碱液干燥浓缩结晶膨胀。温度降低时,碱液溶解度下降,同样也会结晶膨胀。相反,当碱液被稀释,浓度降低或温度升高溶解度增加时,膨胀量则相对下降。此外,碱和碱的生成物除产生结晶膨胀腐蚀外,碱还与土中呈游离状态的 SiO_2 和 Al_2O_3 以及铝硅酸盐等细微颗粒发生化学溶蚀,使土颗粒解体、孔隙增大、力学强度降低,导致地基下沉。

2 重金属污染土

2.1 工程行为

目前,有关土体被重金属污染后工程行为的系统研究较少,已有文献主要是探讨锌污染土的物理力学性质变化。陈先华^[16]在对柳州市化冶公司污染土的调查中发现,红黏土受 $ZnSO_4$ 污染后, $ZnSO_4$ 在干燥状态下结晶成 $ZnSO_4 \cdot H_2O$ 后表现出良好的工程特性,但结晶体遇到水后会立即溶解,以离子的形式存在于溶液中。Turer^[17]利用 $Pb(NO_3)_2$ 和 $Zn(NO_3)_2$ 研究表明,高岭土被重金属离子铅和锌污染后其膨胀性变大。罗春泳等^[18]通过室内试验,研究了吸附无机离子后黏性土物理力学性质的变化。发现单离子情况下,离子吸附率与土的塑性指数之间表现出良好的线性关系;黏性土的渗透系数都随着土中离子含量的增加而增大;黏性土强度随着土中离子含量的增高而逐渐降低,其黏聚力与离子吸附率接近线性关系。此外,Lo等^[19]通过在相同渗流条件下的台架试验和离心柱试验,研究了饱和土中有效应力对镉离子迁移特性的影响。他们认为,在确定物质运移参数时有必要考虑土中的应力状态的影响。并且发现土的渗透性和水动力弥散系数对其应力状态的改变比较敏感。

2.2 物理化学作用

重金属在土体中的物理化学行为可大致分为溶解、沉淀、吸附、络合和螯合等,这些过程在土中

相互制约、相互影响。

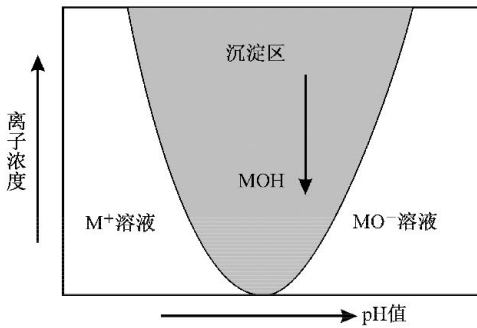


图1 不同 pH 值下重金属沉淀-溶解图 (Dragun, 1998)

水溶液中的一些阴离子如 CO_3^{2-} 、 OH^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 S^{2-} 等对于控制重金属离子的沉淀过程起着重要作用,重金属阳离子与 SO_4^{2-} 和 Cl^- 结合成可溶盐(AgCl 、 HgCl_2 、 PbSO_4 等除外),与其他阴离子形成不溶性化合物^[20]。黏性土水体系的 pH 值是影响重金属沉淀的一个重要因素,如图 1 所示^[21],只有在一定的 pH 值范围内,沉淀才会发生;当 pH 值较低时,金属阳离子或水化、或形成带正电的化合物为黏土颗粒表面吸附。当 pH 值高到沉淀区的右侧后,金属阳离子将形成带负电的化合物,随孔隙水迁移^[22]。

土中存在的有机和无机胶体对金属离子有吸附固定作用,它是许多金属离子和分子从不饱和溶液中转入固相的主要途径,是重金属在土中积累而被污染的重要原因。蓝俊康^[1]经室内吸附平衡试验认为,当 Zn^{2+} 吸附量低于其吸附能力时,被黏土吸附的 Zn^{2+} 对土体结构影响甚微,与红黏土地基力学强度变化关系很小;反之,多余的 Zn^{2+} 有可能会在土粒间隙中结晶沉淀,体积膨胀,对土粒间产生楔入作用,破坏土体结构,引起红黏土地基力学强度明显下降。何宏平等^[23]通过试验发现在相同酸度、温度和重金属离子浓度条件下,不同黏土矿物对重金属离子的吸附容量大小依次为:蒙脱石<伊利石<高岭石,在一定程度上黏土矿物的可交换阳离子容量决定着它们对重金属离子的吸附容量。Mirand-Trevino 和 Coles^[24]研究了高岭土吸附重金属离子 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 的行为后认为,重金属离子的吸附过程中会伴随着 H^+ 的释放,这一过程将引起黏土矿物颗粒的膨胀、絮凝、剪切强度的降低、水力渗透性和压缩性的增大。

土中重金属元素在黏性土中除了吸附作用

外,还存在着络合、螯合作用。一般认为,当金属离子浓度高时,以吸附交换作用为主,而黏性土孔隙液中重金属离子浓度低时,则以络合-螯合作用为主。在无机配位体中,人们比较多重视金属与羟基和氯离子的络合作用,认为这是影响一些重金属难溶盐类溶解度的重要因素。当土体中有有机物与重金属共存时,很容易形成重金属-有机物络合物,从而改变重金属在土中的物理化学行为。研究表明,有机酸、糖类及含氮、硫的杂环化合物等很容易与重金属离子络合或螯合,尤其是含芳香结构及含羧基的腐殖酸类物质。例如,垃圾渗滤液中的有机物质能活化土中的铁锰,使其迁移性大大提高,增加对周边土体的污染^[25]。

3 有机物(石油)污染土

3.1 工程行为

目前对于有机物污染对土体工程性质的影响研究主要集中在石油领域。

Evgin 和 Das^[26]对干净的和受石油污染的石英砂进行了三轴对比试验,发现被机油完全饱和后不论是松散还是密实的石英砂其摩擦角均显著下降,他们还通过有限元分析证明了由于石油污染原因可引起地基的沉降。Ghaly^[27]和 Shin 等^[28]则利用直剪试验证明,随着含油量的增加,石油污染砂土的摩擦角降低。此外, Srivastava 和 Pandey^[29]对冲积土和砂土、Khamchichyan 等^[30]对波斯湾黏性土和砂土的力学试验也同样得到土体受石油污染后强度下降的事实。Shin 和 Das^[31]研究了非饱和石油污染砂的承载力后发现,石油污染可导致砂土的承载力急剧下降。Al-sanad 等^[32, 33]利用科威特砂土和石油开展了大量室内土工试验,发现石油污染后砂土的强度和模量降低,且在相同密度条件下重油比轻油对土体行为的影响更显著,这涉及石油污染土的长期老化问题。此外, Ratnaweera 和 Meegoda^[34]研究认为粒状土体的剪切强度随着孔隙流体的黏滞性增加而降低。

Srivastava 和 Pandey^[29]、Al-sanad 等^[32]经室内试验发现,冲积土和砂土、科威特砂土受石油污染后压缩指数均变大。Meegoda 和 Ratnaweera^[35]利用甘油和丙醇作为有机污染试剂,通过固结试验研究了具有不同塑性细粒土的压缩特性,

认为污染土压缩性的提高受到力学和物理化学因素的控制,并建议利用校正系数来解释由于孔隙流体的黏滞性而引起的土体压缩指数变化。Aiban^[36]在温度对沙特东部石油污染砂土的工程性质的影响规律方面做了调查,发现石油污染砂土的压缩性与永久变形随温度上升而提高,但剪切强度参数对温度的变化不敏感。

Khamehchiyan 等^[30]对原油污染的波斯湾黏性土和砂土进行的物理力学试验表明,土体污染后其最大干密度和最优含水量均降低。然而另一些学者^[32, 37]的研究认为,石油污染物含量在 4% 前,随着石油含量的提高,土体的最大干密度增加,但石油含量再增加时,最大干密度下降。

3.2 物理化学作用

对有机物污染土工程行为的物理化学机制目前主要是从孔隙流体的润滑效应、胶体化学和双电层理论等方面来进行解释的。

黏土颗粒间孔隙流体充当着润滑剂的作用,影响着土体的内摩擦角大小^[38]。黏土颗粒接触时的润滑作用是由孔隙流体的黏滞性提供的,孔隙流体黏度的增加将改变这一接触特性,导致土体应变行为软化效应^[33]。另一方面,这种润滑作用将有助于其击实行为,如降低土的最优含水量和提高其最大干密度。

双电层的内层将极性水分子牢固控制在黏土矿物表面,吸附结合水的定向性则使黏性土具有塑性^[39],而干燥的黏土或者黏土与非极性的流体混合物不具有塑性^[40]。原油是非极性流体,当其进入黏性土中后,包裹在黏土矿物颗粒周围,削弱了水土之间的相互作用,使得双电层厚度减小,最终导致土的塑限降低。Khamehchiyan 等^[30]对原油污染的波斯湾黏性土和砂土进行的物理力学试验证实土体污染后其液塑限均降低。不过, Srivastava 和 Pandey^[29]对冲积土和砂土的试验则发现石油污染导致土的液限和塑性指数增大。

土体被有机物污染后的渗透性变化目前没有形成统一的认识,这是因为渗透系数的获取受到渗透仪类型(柔性或刚性壁)、黏土矿物成分、有机物的极性,以及土与有机物之间的相互作用等多因素的影响。基于双电层理论, Fernandez 和 Quigley^[41]分析了由于流体置换而引起的渗透性提高的原因。孔隙流体被置换后,介电常数的降低导致双电层厚度变薄,使得黏土颗粒彼此靠近

和团粒的收缩,引起黏土颗粒的絮凝和团聚,若土体总的体积基本维持不变,其渗透性可能提高。Anadarajah^[42]进一步通过理论分析和数值模拟后认为,这种渗透性提高的微观机制是因为黏土团粒在收缩过程中在土体内局部形成了宏观裂隙。Khamehchiyan 等^[30]和 Al-sanad 等^[32]则认为土体的渗透性因石油污染而降低。Meegoda 等^[43]研究发现,孔隙流体的介电常数降低时,土体的平均有效孔径变大,但是试验土样的渗透性基本不变。一种解释为,当孔隙内混合流体的介电常数降低时,其黏滞性提高,因而渗流速度下降。此后,他基于试验分析指出^[44],土的水力渗透系数(hydraulic permeability)可表示为其本征渗透系数(intrinsic permeability)与孔隙流体的运动黏度之积。在有机化合物的长期作用下,土体结构将发生改变,其本征渗透系数提高。

4 结 语

(1) 土体遭受污染后其物质成分及微观结构的改变是其工程性质发生变化的根本原因。因此,对污染土工程性质改变机理的分析应当着重考虑污染物与土之间的相互作用机制(主要是物理化学反应)及其微观结构性两方面。

(2) 大量工程实践及室内外模拟试验表明,工业污染物侵入天然土体后一般都将引起土体工程性质的劣化如压缩性提高、强度和承载力降低。但其他工程性质如击实性、渗透性和液塑限等,目前还没有十分统一的观点,须开展进一步研究工作。

(3) 不同类型污染成分与土体间物理化学作用的机制各不相同。酸碱污染土须重视物质的溶解和结晶沉淀作用;重金属污染土须考虑重金属的吸附、溶解、沉淀、络合和螯合作用;有机物污染土在充分考虑到其极性、介电特性、黏滞性等基本性质的基础上,注意其挥发、包被与润滑效应等的影响。

(4) 工业污染土的工程行为研究目前仍处在起步阶段,没有成熟和系统的理论。天然土体尤其是黏性土遭受不同类型工业污染物入侵后其工程性质演变的微观机制仍很模糊,工业污染土力学性质演变与其内部物理化学作用间的耦合行为如何分析值得深入探讨。但作为一个包括现代土

力学、矿物学、物理化学、无机和有机化学、热力学、流体力学、多孔介质理论等在内的多学科、综合性研究领域,工业污染土工程行为研究充满了机遇和挑战。

参 考 文 献

- [1] 蓝俊康. 柳州市红黏土对 Zn^{2+} 的吸附平衡实验[J]. 桂林工学院学报, 1995, 15(3): 265~267.
- [2] Mackenzie J M W. Interaction between oil drops and mineral surfaces[C]. Society of Mining Engineers, AIME, Transaction, 1970, 247: 202~208.
- [3] Quigley R M. Geology, mineralogy, and geochemistry of Canadian soft soils; a geotechnical perspective[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(2): 261~285.
- [4] Shang J Q, Dunlap W D. Improvement of soft clays by High-voltage electrokinetics [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(4): 274~280.
- [5] 邓承宗. 硫酸对地基的腐蚀[J]. 勘察科学技术, 1985, 6: 9~12.
- [6] 顾季威. 酸碱废液侵蚀地基土对工程质量的影响[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(4): 72~78.
- [7] Sunil B M, Nayak S, Shrihari S. Effect of pH on the geotechnical properties of laterite[J]. Engineering Geology, 2006, 85: 197~203.
- [8] 范青娟, 马光锁. 浸碱膨胀对地基土的影响与处理[J]. 轻金属, 1999(9): 58~62.
- [9] 李琦, 施斌, 王有诚. 造纸厂废碱液污染土的环境岩土工程研究[J]. 环境污染与防治, 1999, 19(5): 16~18.
- [10] 李相然, 姚志祥, 曹振斌. 济南典型地区的地基土污染腐蚀性性质变异研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1229~1233.
- [11] Sivapullaiah P V, Manju. Kaolinite-alkali interaction and effects on basic properties[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2005, 23: 601~614.
- [12] 蒋引珊, 金为群, 权新君, 等. 黏土矿物酸溶解反应特征[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(1): 97~99.
- [13] 路世豹, 张建新, 雷扬, 等. 某硫酸库地基污染机理的探讨[J]. 岩土工程界, 2002, 6(5): 37~39.
- [14] 张信贵, 易念平, 吴恒. 不同 pH 水环境下土变形特性的试验研究[J]. 高校地质学报, 2006, 12(2): 242~248.
- [15] Mitchell J K. Fundamental of Soil Behavior[M]. John Wiley & Sons, 1993.
- [16] 陈先华. 污染土的研究现状及展望[J]. 地质与勘探, 2003, 39(1): 77~80.
- [17] Turer D. Effect of heavy metal and alkali contamination on the swelling properties of kaolinite[J]. Environmental Geology, 2007, 52(3): 421~425.
- [18] 罗春泳, 陈云敏, 唐晓武, 沈水龙. 吸附离子对黏性土土工特性的影响[C]. 第十届土力学及岩土工程学术会议论文集(上册). 重庆: 重庆大学出版社, 2007: 602~605.
- [19] Lo I M C, Zhang J H, Hu L M, et al. Effect of soil stress on Cadmium transport in saturated soils[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2003, 7(3): 170~176.
- [20] Nagaraj T S, Miura N. Soft clay behaviour: analysis and assessment [M]. Rotterdam, Brookfield: VT Publishing, 2001.
- [21] Dragun J. The soil chemistry of hazardous materials [M]. Massachusetts: Amherst Scientific Publishers, 1998.
- [22] Yong R N. Geoenvironmental Engineering: Contaminated soil, pollution fate and mitigation[M]. CRC Press, USA, 2001.
- [23] 何宏平, 郭九皋, 朱建喜, 等. 蒙脱石、高岭石、伊利石对重金属离子吸附容量的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志. 2001, 20(4): 573~578.
- [24] Miranda-Trevino J C, Coles C A. Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH [J]. Applied Clay Science, 2003, 23(1~4): 133~139.
- [25] 夏立江, 温小乐. 垃圾渗滤液对土壤铁锰有效性及地下水质的影响[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 6~9.
- [26] Evgin E, Das B M. Mechanical behavior of an oil-contaminated sand[C]. Usmen, Acar (Eds.), Environ. Geotechnology Mediterranean Conference Proc., Rotterdam; Balkema Publishers, 1992: 101~108.
- [27] Ghaly A M. Strength remediation of oil contaminated sands[C]. The Seventeenth International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, 2001.
- [28] Shin E C, Omar M T, Tahmaz, et al. Shear strength and hydraulic conductivity of oil-contaminated sand [C]. de Mello L G, Almeida M(Eds.), Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, Brazil, vol. 1. Lisse: A A Balkema Publishers, 2002: 9~13.
- [29] Srivastava R K, Pandey V D. Geotechnical evaluation of oil contaminated soil[C]. Contaminated and Dere-

- lict Land. The Proceedings of Green 2. London: Thomas Telford, 1998; 204~218.
- [30] Khamehchiyan M, Charkhabi A H, Tajik M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils[J]. Engineering Geology, 2007, 89: 220~229.
- [31] Shin E C, Das B M. Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2001, 11 (3): 220~227.
- [32] Al-Sanad H A, Eid W K, Ismael N F. Geotechnical properties of oil contaminated Kuwaiti sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 121 (5): 407~412.
- [33] Al-Sanad H A, Ismael N F. Aging effect on oil contaminated Kuwaiti sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123 (3): 290~293.
- [34] Ratnaweera P, Meegoda J N. Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils [J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2006, 29 (2): 133~140.
- [35] Meegoda N J, Ratnaweera P. Compressibility of contaminated fine grained soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(1): 101~112.
- [36] Aiban A. The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sand[J]. Journal of Environmental International, 1998, 24: 153~161.
- [37] Meegoda J N, Chen B, Gunasekera S D, et al. Compaction characteristics of contaminated soils-reuse as a road base material[C]. Vipulanandan C, Elton D(Eds.), Recycled Materials in Geotechnical Applications. Geotechnical Special Publication, ASCE, 1998, 79: 165~209.
- [38] Proctor R R. Fundamental principles of soil compaction[J]. Journal of the Royal Aeronautical Society, 1933, 111(9): 245~248.
- [39] Das B M. Principle of geotechnical engineering[M]. 3rd edition. PWS Publishing Company, 1994.
- [40] Gillott J E. Clay in Engineering Geology[M]. Elsevier, 1987.
- [41] Fernandez F, Quigley R M. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22: 205~214.
- [42] Anadarajah A. Mechanism controlling permeability change in clays due to changes in pore fluid [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(2): 163~172.
- [43] Meegoda N J, Gunasekera S D. A new method to measure the effective porosity of clays[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, 15(4): 340~351.
- [44] Meegoda N J, Rajapakse R. Short-term and long-term permeabilities of contaminated clays[J]. Journal of Environmental Engineering, 1993, 119 (4): 725~743.