

吹填土在冲击荷载下的渗透性试验研究

贾敏才^{1,2}, 王磊^{2,3}, 周健^{1,2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海建科建设监理咨询有限公司, 上海 200032)

摘要: 通过制配不同细粒含量的吹填土样, 在自行改装设计的渗透仪内进行了冲击荷载作用下的渗透性试验研究, 试验中考虑了细粒含量、冲击能量、冲击遍数和夯后时间等 4 个因素对夯后土样渗透系数的影响。试验结果表明, 细粒含量对冲击荷载下吹填土渗透系数的影响存在一个“分界点”, 其质量分数范围大致在 20%~30% 之间。通过对试验数据进行统计和拟合, 建立了不同细粒含量吹填土在冲击荷载作用后渗透系数随时间变化的预测公式。

关键词: 吹填土; 渗透性; 细粒含量; 变水头试验; 冲击荷载

中图分类号: TD 853.34

文献标识码: A

Test Study on Permeability of Hydraulic Fill Under Impact Loading

JIA Mincai^{1,2}, WANG Lei^{2,3}, ZHOU Jian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Jianke Project Management Co. Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: A falling head permeameter was modified to explore the hydraulic conductivity of hydraulic fill under impact loading. A number of laboratory tests were conducted to investigate the effect of impact loading on permeability coefficient of hydraulic fill with different fine contents, impact energy, impact passes and the interval time after hitting. Results show that the effect of fine content on permeability of hydraulic fill after impacting exists a “critical value” which is between 20% and 30%. Based on the test results, an approximate formula was developed to predict the coefficient of permeability of hydraulic fill with different fine contents after hitting.

Key words: hydraulic fill; permeability; fine content; falling head test; impact loading

随着经济的发展和城市基本建设的蓬勃开展, 对土地资源的要求日益迫切, 将疏浚出来的吹填土进行填海造陆已成为沿海城市缓解土地资源紧张的重要途径。不同地域疏浚吹填土因细粒含量不同而使渗透性差别很大, 如长江口疏浚吹填土多为中细砂, 上海洋山深水港疏浚吹填土多为夹泥的粉细砂, 连云港地区疏浚吹填土多为粉质粘土, 珠江三角洲地带疏浚吹填土多为淤泥质粘土等。土的透水性常以渗透系数表示, 吹填土的渗透系数是影响其静、动力排水固结加固方法选择及其工艺参数确定的决定性因素之一。如针对细粒含量较高软土的低渗透性特征, 郑颖人等^[1]结合具体工程提出采用排水板来加速强夯作用下土体超静孔隙水压力的消散, 并提出“先轻后重、逐级加能、轻重适度、少击多遍”的原则, 周健^[2-3]等针对含砂粘土和吹填粉土又提出低能量强夯联合真空井点降水的加固思路。但到目前为止, 国内外对土体渗透性的研究多集中于原状土或重塑土在静力条件下的渗透规律, 如结构性、固结应力、含盐量、饱和度等对渗透性的影响^[4-9], 而对动力荷载下特别是冲击荷载作用下土体渗透性变化规律的研究则少有文献报导。

笔者采用自行改装的渗透仪, 对不同细粒(直径小于 0.075 mm 颗粒)含量吹填土样在冲击荷载作用前后的渗透特性进行了系统的试验研究, 试验中考虑了细粒含量、冲击能量、冲击遍数和夯后时间等 4 个因素对夯后土样渗透性的影响, 并在室内试验研究的基础上建立了不同细粒含量吹填土在冲击荷载作用后渗透系数随时间变化的预测公式。

收稿日期: 2009-02-19

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(B308)

作者简介: 贾敏才(1973-), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为软土地基处理和离散元数值模拟. E-mail: mincai_jia@tongji.edu.cn

1 试验设计

1.1 试验装置改进

为了能够及时测得冲击荷载作用后的土样渗透系数(土样直径 61.8 mm, 高为 40.0 mm), 笔者对南 55 型渗透仪进行了改装, 整个试验装置系统共有 3 个部分组成: 渗透仪、孔压计和施加冲击荷载装置. 试验装置示意图见图 1.

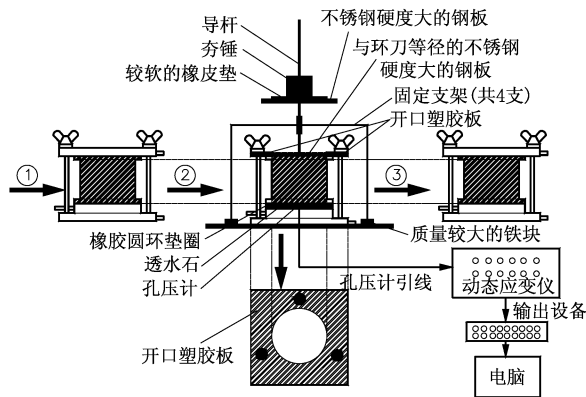


图1 试验装置示意图

Fig.1 Layout of test equipment

渗透仪的改装: 在夯击时需要改装渗透仪的顶盖, 顶盖由 1 个高强度的塑胶块构成, 中间挖除一直径为 7.4 cm 的圆, 并重新配备 3 根螺栓用以固定新顶盖、土、套环和底座.

冲击荷载装置: 由 2 个圆形钢板组成, 第 1 个圆形钢板直径略小于渗透环刀内径, 约为 6.1 cm; 第 2 个圆形钢板直径为 15 cm, 其上紧贴一柔性橡皮垫, 以模拟冲击荷载的单脉冲特性, 2 个圆形钢板通过一直径 10 mm、长 450 mm 的 2 级钢筋焊接在一起, 然后连接到一质量较大的四支支架上, 以起固定作用, 并在钢筋上焊接 2 个直径 1.03 cm、长 4.00 cm 的钢套筒, 套筒内涂抹凡士林以起润滑作用, 通过此套筒保证在夯击的过程中冲击锤下落的垂直度.

1.2 土样制备

吹填土样中细颗粒来源于上海外高桥河道中的疏浚淤泥, 粗颗粒采用标准中砂. 根据细粒占吹填土土样的质量百分比, 分别配制细粒含量(细粒质量分数 P_f) 为 8%, 20%, 30%, 40% 和 98% 的 5 种土样, 然后采用小型混凝土拌和机分别对配置好的土样进行拌和, 5 种不同细粒含量土样的颗粒分析曲线如图 2 所示. 为了模拟土的吹填沉积过程, 待土样拌和均匀后分 4 层装入静置于水中的渗透环刀内(每层静

置 3 h), 制样完成后将环刀放于水中静置 2 个月.

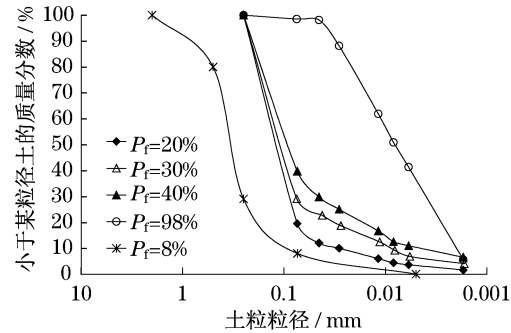


图2 颗粒分析曲线

Fig.2 Particle size distribution curve

1.3 试验内容

采用 2 个质量不同的圆形夯锤, 质量分别为 369 g 和 519 g, 与落距组合以下 4 种不同的冲击能量 E : $3.62 \text{ N} \times 15 \text{ cm}$, $3.62 \text{ N} \times 30 \text{ cm}$, $5.09 \text{ N} \times 15 \text{ cm}$ 和 $5.09 \text{ N} \times 30 \text{ cm}$. 试验内容见表 1.

表1 试验内容

Tab.1 Test contents

土样	击数	组数	遍数	$P_f/\%$
S08	8	4	1	8
S20	8	12	2	20
S30	8	12	2	30
S40	5	12	3	40
S98	4	12	3	98

1.4 试验准备及步骤

1.4.1 试验准备

在进行渗透试验之前, 将配制好的环刀土样从水槽中拿出放入饱和器进行抽气饱和, 保证配制的吹填土样在夯击前处于饱和状态.

1.4.2 试验步骤

(1) 安装土样于改装后的渗透仪中, 在储水管内注水到预定水位, 关闭渗透仪的出水口, 打开排气口, 将渗透仪底部透水石内的气泡排出, 让透水石完全饱和. 待排气口不再有气泡排出时, 关闭排气口, 打开排水口, 待排水口流出的水流呈稳定流时, 开始测读计数并计时, 测量 3 次取平均值作为土样的原始渗透系数.

(2) 待原始渗透系数测定完毕后, 关闭排水口和排气口, 去掉渗透仪的顶盖, 将改装的开口塑胶顶盖用螺栓与套环、底座连接起来, 然后把施加冲击荷载的支架装置放在环刀土样的上表面(土样表面覆盖滤纸, 以防圆盘带起土样), 使之与其接触紧密.

(3) 进行冲击荷载试验. 根据试验内容确定冲

击的击数 N , 冲击完毕后, 去掉改装的顶盖, 安装渗透仪原始顶盖, 重新给储水管加水至预定高度, 打开排水口, 待有稳定水流流出时, 测读数据并计时, 根据土样的原始渗透系数大小, 按不同的间歇时间进行读数计时. 在进行下一遍夯击时, 重复步骤(2)~(3), 直到试验完成更换另外一个土样.

2 试验结果及分析

2.1 细粒含量与渗透性的关系

图3为土样的平均渗透系数 \bar{k} 随 P_f 的变化曲线. 由图3可以看出: 当 P_f 由8%增大到30%时, 其渗透系数从 $1.22 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小到 $2.48 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 其变化幅度很大, 二者相差3个数量级; 但当 P_f 大于30%后, 土样的渗透系数变化幅度明显减小. 总体说来, 吹填土样的平均渗透系数 \bar{k} 与 P_f 之间近似呈幂函数关系

$$\bar{k} = 7.0 \times 10^{-8} P_f^{-3.6477}, \quad R^2 = 0.952 \quad (1)$$

\bar{k} 随 P_f 的这种变化表明, 土的渗透系数主要受控于细颗粒和粗颗粒骨架之间的相对关系. 当细粒含量较小时, 土样中的细粒还不足以将砂颗粒中的孔隙全部填充, 土样中砂骨架中的孔隙仍然是连通的, 所以渗透系数很大, 随着细粒含量的增多, 砂骨架中的孔隙逐渐被细粒所填充, 其渗透性会大幅度降低, 但当细粒完全填充砂颗粒间的孔隙并将砂粒

包围起来后, 其渗透性随细粒含量增大而降低的幅度将明显减小.

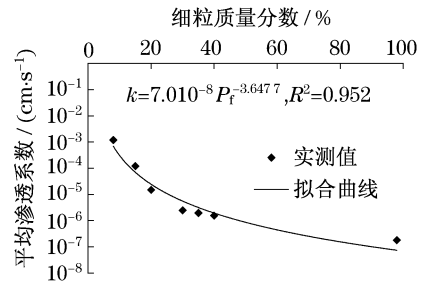


图3 土样渗透系数与细粒质量分数关系

Fig.3 Coefficient of permeability and silt content

2.2 冲击后渗透性随时间的变化关系

图4a~4b为在夯击能量 $E = 3.62 \text{ N} \times 15 \text{ cm}$ 、击数 $N = 8$ 次的冲击荷载作用下, P_f 分别为8%和20%土样的夯后渗透系数变化曲线, 图中 k_0 为原始渗透系数. 由图可知, $P_f = 8\%$ 土样的平均渗透系数在冲击后略有减少, 其值由 $1.22 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 变化到 $1.07 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 然后基本保持恒定; $P_f = 20\%$ 土样冲击后的渗透系数也在减小, 夯后5 min的平均渗透系数为 $1.15 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 较原始平均渗透系数 $1.48 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 减少22%, 随后土样平均渗透系数呈逐渐减小的趋势, 经历一段时间后也基本保持恒定. 这表明当 $P_f < 20\%$ 时, 土体在冲击荷载作用后被压密, 表现出一般砂类土的基本特性.

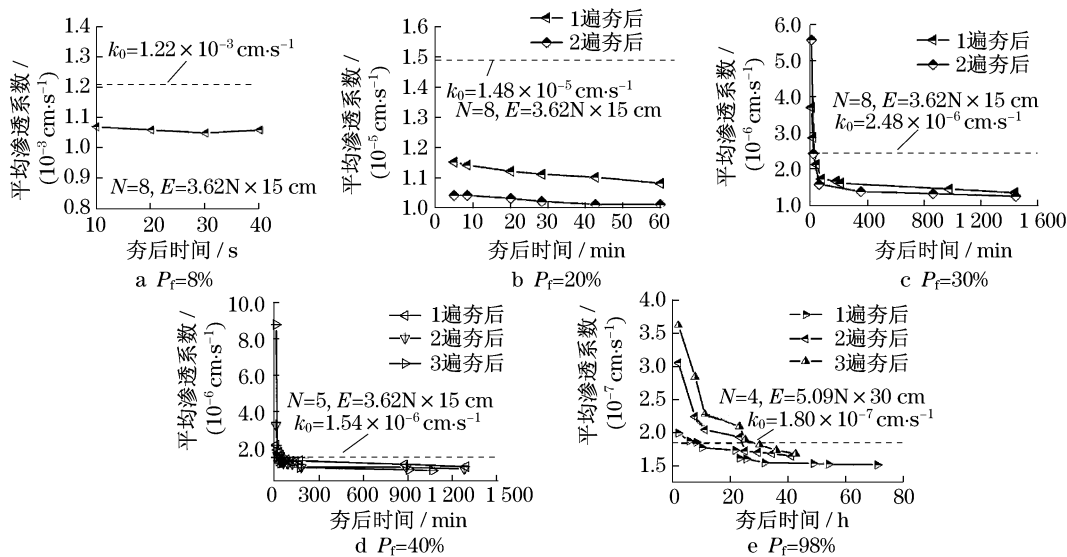


图4 冲击后渗透系数变化曲线

Fig.4 Permeability curves after impacting

对比图4中的试验结果, 当 P_f 超过30%后, 在冲击荷载作用下, 其冲击后的渗透系数与 P_f 小于

20%的土样有着明显不同的变化规律. 这说明细粒含量对吹填土在冲击荷载作用后渗透性变化规律的

影响存在着一个“分界点”, P_f 范围应该在20%~30%之间.当 P_f 小于该“分界点”时,冲击荷载作用后土样的渗透系数比原始渗透系数略小,且很快稳定;而对于 P_f 超过该“分界点”的土样,在冲击后某一段时间内土体的渗透系数会大于土体原始渗透系数,但再经历一段时间后,某时刻土体的渗透系数与原始渗透系数相等,之后土体的渗透系数逐渐小于原始渗透系数.冲击后不同细粒含量土样渗透性的变化过程说明,当 P_f 超过某一界限值后,土样在冲击荷载作用后一般经历着这样一个过程:高能量冲击→大量树枝状微裂隙产生→裂隙慢慢闭合;而当 P_f 低于此界限值时,则冲击不会在土体内诱发微裂隙.从图4c~4e还可以看出,随着 P_f 的不断增大,裂隙闭合的时间也在不断延长.这一规律也间接证明了Menard提出的饱和土体强夯动力固结理论的合理性^[10].

不同细粒含量吹填土在冲击荷载作用下的上述渗透性变化规律可以从细颗粒和粗颗粒骨架之间的相对关系方面进行解释.当 P_f 小于某一界限值时,土体内砂粒等粗颗粒含量较高,砂粒能够相互直接接触而组成砂粒骨架,此时细粒主要填充于砂骨架中的孔隙内,土体的力学特性基本上由砂骨架的特性所控制,因此在冲击荷载的作用下,其渗透性的

变化规律接近于一般砂类土,主要表现为冲击压实导致的渗透性降低.而当 P_f 超过某一界限值时(如 $P_f \geq 30\%$),砂颗粒间的孔隙已完全为细粒所充填或包裹,砂粒之间已无法直接接触形成有效的骨架,此时土体的力学特性开始受控于粗颗粒间的细粒特性.由于细颗粒间孔隙排水相对困难,在冲击荷载作用下孔隙中水压力瞬间升高且一时难以消散,土样颗粒间易产生剪切破坏,使土体内形成微裂隙而增大土体在夯后一段时间的渗透性.此后,由于微裂隙的逐渐闭合和土体的排水固结,吹填土的渗透系数也逐渐降低到低于原始土体的渗透系数.

文献[11]指出只有当吹填土中砾、砂 P_f 为80%左右,而粘粒仅占15%以下、粉粒略多于5%左右时,粗颗粒才能互相接触形成土体骨架,强度才会有显著改善,否则其力学性质将会明显降低.这与通过本试验发现的影响冲击荷载下吹填土渗透性变化规律的 P_f “分界点”基本吻合.

2.3 冲击能量与渗透性的关系

图5为4种不同冲击能量下第1遍冲击后渗透系数与冲击能量的关系曲线,图中渗透系数提高比为 $(k_t - k_0)/k_0$,其中, k_t 为 t 时刻的渗透系数.

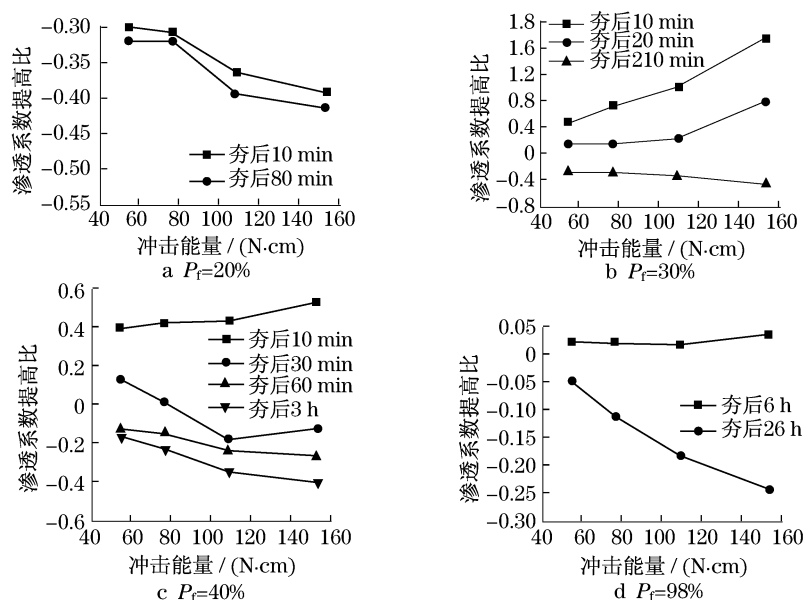


图5 渗透系数与冲击能量的关系

Fig.5 Coefficient of permeability and impacting energy

从图5的试验结果可以看出, $P_f = 20\%$ 土样随夯击能量的变化规律与 $P_f \geq 30\%$ 土样明显不同. $P_f = 20\%$ 的土样冲击后的渗透系数提高比为负值,在冲击后不同时间段的渗透系数均随着冲击能量的增

加而逐渐减小,但减小幅度不大,土体总体表现为瞬间被压实,且其冲击产生的超静孔压基本不叠加,能够很快消散;根据图5b~5d,对于 $P_f \geq 30\%$ 的土样,其冲击后的渗透系数提高比在夯后一定时间内为正

值,然后再逐渐过渡到负值.上述试验结果表明,对于 $P_f \geq 30\%$ 的土样,单击能的增加可以在夯后一定时间内改善土体的渗透性,从而加快冲击瞬间产生的超静孔压消散,但随着土样中细粒的增加,冲击能对土样渗透系数提高比的影响越来越弱,即不能一味通过加大冲击能量来改善吹填土夯后初始阶段的渗透性能.

2.4 冲击遍数与渗透性的关系

图6a表明, $P_f = 20\%$ 土样在第1遍冲击后渗透系数比其原始渗透系数明显减小,在第2遍冲击后的渗透系数较第1遍冲击后继续减小,但减小的幅

度明显降低.这说明对于 $P_f = 20\%$ 的土样在第1遍冲击后已基本密实.

由图6b~6d可知,当 $P_f > 30\%$ 后,土样在不同冲击遍数下的夯后渗透系数变化规律与 $P_f = 20\%$ 的情况有较大不同,土体的渗透性在每遍冲击后一段时间内表现出增大的趋势,而后开始迅速减小,并逐渐减小到比原始渗透系数还小,且冲击后的渗透系数峰值随遍数增加而依次升高,这是由于土样在每遍冲击后随着超静孔压消散,土体固结、土体触变恢复、强度不断增加所致.

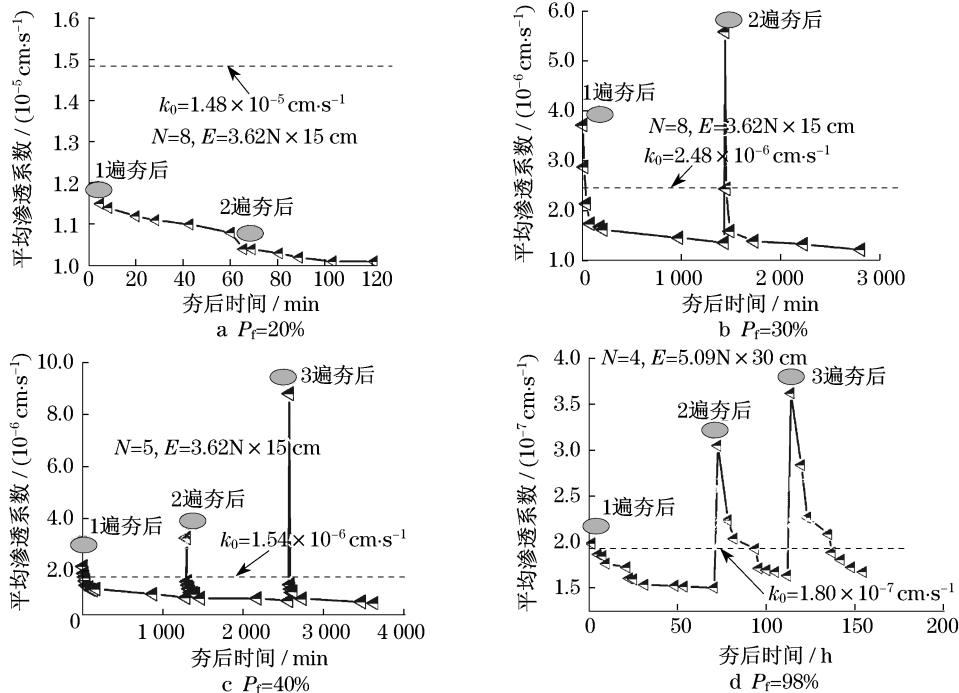


图6 遍数与冲击后渗透系数变化

Fig.6 Permeability curves with different passes

在实际工程中,在处理 $P_f < 20\%$ 的吹填土地基时,其超孔压消散较快,且瞬间被压密,因此在处理时应采用较大能量,进行连续夯击.当 $P_f \geq 30\%$ 后,超静孔压具有叠加的现象,且渗透系数在夯后有一个增大的过程,因此在处理时宜采用合适的能量,多遍夯击.

为能够预测吹填土体在冲击荷载作用后的土体渗透性随时间的变化趋势,对图6的变化曲线进行数值拟合.根据图7的曲线拟合结果可知:当 P_f 在20%左右时,土样冲击后的渗透系数与夯后时间基本可以拟合为线性关系,如图7a;当 P_f 达到30%以后,土样在经过第1遍冲击荷载作用后,土样的渗透系数可以通过时间的幂函数进行拟合,如图7b~7d.

2.5 冲击荷载下吹填土渗透性变化规律

通过上述试验结果和分析可知,土体冲击后的平均渗透性与冲击能量、冲击次数、冲击遍数和细粒含量相关,因此给出1个广义的预测公式

$$\bar{k} = f(E, N, N_q) k_0 \quad (2)$$

式中: N_q 为似超固结比^[12],表征冲击遍数的影响.

联合 P_f 与渗透性关系的拟合式(1),式(2)可以改写为

$$\bar{k} = f(E, N, N_q) \times 7.0 \times 10^{-8} P_f^{-3.6477} \quad (3)$$

式(3)虽然表征了土体冲击后的渗透性的变化特征,但参数还是较难确定.根据前面拟合曲线的分析,为找出较为简便的预测方法,将吹填土的细粒含量大致划分为2类:细粒含量低(小于“分界点”)、细

粒含量高(大于“分界点”).

对于第1类,有

$$k = (\alpha t + A) \times 7.0 \times 10^{-8} P_f^{-3.6477} N_q^{-\lambda} \quad (4)$$

对于第2类,有

$$k = \alpha t^{-\gamma} \times 7.0 \times 10^{-8} P_f^{-3.6477} N_q^{\lambda} \quad (5)$$

式中: $\alpha, A, \gamma, \lambda$ 为系数,均大于零.

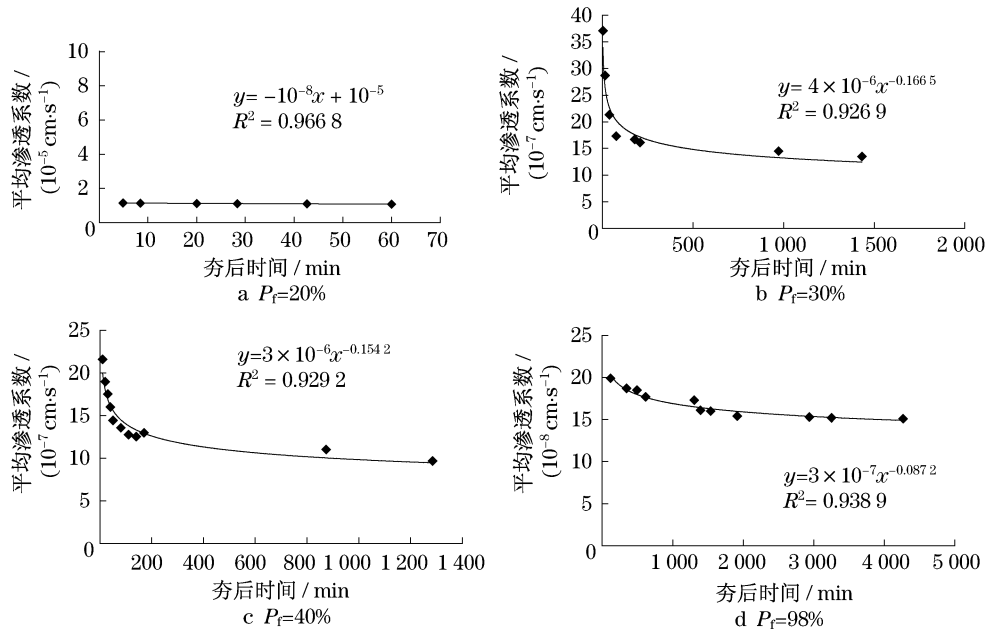


图7 土样渗透系数拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of coefficient of permeability

3 结论

(1) 对不同细粒含量吹填土在冲击荷载作用前后的渗透性变化规律进行了系统的研究,试验结果表明,冲击荷载作用下吹填土的渗透性与细粒含量、冲击能量、冲击遍数和夯后时间等4个因素密切相关.

(2) P_f 对吹填土在冲击荷载作用后渗透性变化规律的影响存在着1个“分界点”,范围大致在20%~30%.当 P_f 小于这一界限值时,土体骨架主要由砂粒构成,因此在冲击荷载的作用下,主要表现为冲击密实导致的渗透性降低.而当 P_f 超过这一界限值时,砂粒已无法直接接触形成土体骨架,此时土体的渗透性开始受控于粗颗粒间的细粒特性.在冲击荷载作用下细粒间孔隙水压力瞬间升高且一时难以消散,土样颗粒间易产生剪切破坏而形成微裂隙,从而增大土体在夯后一段时间的渗透性.此后,由于微裂隙的逐渐闭合和土体的排水固结,吹填土的渗透系数也逐渐降低到低于原始土体的渗透系数.

(3) 在预知吹填土细粒含量的基础上,建立了能够考虑冲击能量、冲击次数、冲击遍数等因素影响的渗透系数随时间变化的预测公式,初步揭示了冲

击荷载下不同细粒含量吹填土渗透性随时间的变化规律.

本文的有关研究成果可供今后对动力排水固结法处理不同细粒含量吹填土地基施工工艺的选择和改进以及控制工后再固结变形等一系列问题提供参考,也为今后进一步研究冲击荷载作用下不同细粒含量吹填土渗透性变化的宏观机理提供了参考.

参考文献:

- [1] 郑颖人,陆新,李学志,等.强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J].岩土工程学报,2000,22(1):18.
ZHENG Yingren, LU Xin, LI Xuezhi, et al. Research on theory and technology of improving soft clay with DCM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 18.
- [2] 周健,曹宇,贾敏才,等.强夯降水联合加固饱和软粘土地基试验研究[J].岩土力学,2003,24(3):376.
ZHOU Jian, CAO Yu, JIA Mincai, et al. In-site test study on soft soils improvement by the DCM combined with dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 376.
- [3] ZHOU Jian, SU Yan, JIA Mincai, et al. In-site tests on vacuum dynamic consolidation to improve a hydraulic fill ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1091.
- [4] 顾正维,孙炳楠,董邑宁.粘土的原状土、重塑土和固化土渗透性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(3):505.

- GU Zhengwei, SUN Bingnan, DONG Yining. Test study of permeability of the original clay, recomposed clay and improved clay with stabilizer ZDYT-1 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 505.
- [5] 李又云, 刘保健, 谢永利. 软土结构性对渗透及固结沉降的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 25(S2): 3587.
LI Youyun, LIU Baojian, XIE Yongli. Influences of permeability and consolidation settlement on structure of soft clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 25(S2): 3587.
- [6] 谢康和, 庄迎春, 李西斌. 萧山饱和软粘土的渗透性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 591.
XIE Kanghe, ZHUANG Yingchun, LI Xibin. Laboratory investigation of permeability characteristics of Xiaoshan clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 591.
- [7] 陈勇, 单红仙, 贾永刚. 黄河沉积粉土渗透系数变化研究[J]. 海洋湖沼通报, 2005(4): 15.
CHEN Yong, SHAN Hongxian, JIA Yonggang. A study on the variation in the seepage coefficient of Yellow River silt [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2005(4): 15.
- [8] 邓友生, 何平, 周成林, 等. 含盐土渗透系数变化特征的试验研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 772.
DENG Yousheng, HE Ping, ZHOU Chenglin, et al. Experimental study of permeability coefficient of saline soils [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 772.
- [9] 高凌霞, 栾茂田, 杨庆, 等. 非饱和和重塑黏土渗透性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2267.
GAO Lingxia, LUAN Maotian, YANG Qing, et al. Experimental study of permeability of unsaturated remoulded clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2267.
- [10] Menard L, Broise Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation [J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 3.
- [11] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
WEI Rulong. Strength and deformation of soft clay [M]. Beijing: China Communications Press, 1987.
- [12] 白冰, 刘祖德. 冲击荷载作用下饱和软粘土强度计算方法[J]. 水利学报, 1999, 30(7): 1.
BAI Bing, LIU Zude. The calculation method for shear strength of saturated soft clay under impact load [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(7): 1.

(上接第 480 页)

(3) 通过结构拓扑易损性分析得到结构体系自身存在的弱点之后, 可通过增加薄弱部位的冗余构件或者结合具体的荷载作用对薄弱部位构件进行加固或防护来降低结构体系的易损性.

参考文献:

- [1] Agarwal J, Blockley D, Woodman N. Vulnerability of 3-dimensional trusses [J]. Structural Safety, 2001, 23(3): 203.
- [2] Agarwal J, Blockley D, Woodman N. Vulnerability of structural systems [J]. Structural Safety, 2003, 25(3): 263.
- [3] 刘西拉. 结构工程学科的进展与前景 [M]. 1 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
LIU Xila. The development and prospect of structural engineering [M]. 1st ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [4] 柳承茂, 刘西拉. 基于刚度的构件重要性评估及其与冗余度的关系 [J]. 上海交通大学学报, 2005(5): 746.
LIU Chengmao, LIU Xila. Stiffness-based evaluation of component importance and its relationship with redundancy [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005(5): 746.
- [5] 邱德锋, 周艳, 刘西拉. 突发事故中结构易损性的研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(2): 55.
QIU Defeng, ZHOU Yan, LIU Xila. Study on the structural vulnerability under unexpected conditions [J]. Sichuan Building Science, 2005, 31(2): 55.
- [6] Yu G, Sun Z, Sun L M. Bridge vulnerability analysis-based health monitoring system design [C/CD] // IABSE Conference on Operation, Maintenance and Rehabilitation of Large Infrastructures Projects. Denmark: ETH Honggerberg, 2006.
- [7] Yu G, Sun Z, Sun L M. Vulnerable component monitoring: a novel concept for health monitoring of complex structures [C/CD] // Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure. Vancouver: ISIS Canada Corporation, 2007.
- [8] Liu C M, Liu X L. Structural vulnerability analysis of three dimensional truss [C] // IABSE Symposium on Structures and Extreme Events. Lisbon: ETH Honggerberg, 2005: 1-8.
- [9] Pellegrino S, Calladine C R. Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks [J]. International Journal of Solids and Structures, 1986, 22(4): 409.
- [10] 罗尧治. 索杆张力结构几何稳定分析 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2000, 27(6): 608.
LUO Yaozhi. Geometrical stability analysis of cable-strut tensile structures [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2000, 27(6): 608.