

DOI: 10.11779/CJGE201506016

地铁列车振动荷载对穿越泥水盾构泥膜渗透系数的影响

武 军¹, 廖少明^{1, 2}, 霍晓波¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 泥水盾构穿越饱和砂土地层中的运营地铁时, 在地铁列车振动荷载的作用下, 开挖面前方土体中会产生超孔隙水压力, 从而降低泥膜承受的压力差, 使泥膜回弹, 渗透系数增大, 进而影响开挖面稳定。通过动三轴试验, 研究了不同类型砂土在地铁列车振动荷载作用下的超孔隙水压力增长规律, 并利用改进的 Kozeny-Carman 公式分析了其对泥膜渗透系数的影响。研究表明: 地铁列车振动荷载振幅与在其作用下产生的砂土最大超孔隙水压力之间的关系可用指数函数表示; 砂土中粗颗粒间的孔隙起控制作用时的最大动孔压比和泥膜最大渗透系数增大比约为细颗粒间的孔隙起控制作用时的最大动孔压比和泥膜最大渗透系数增大比的 50% 和 60%; 当动应力比不大于 0.15 时, 振动荷载振幅的增大对最大动孔压比的增加影响并不明显; 相对密实度对最大动孔压比的影响并不明显; 卸荷程度相同时, 轴向卸荷比水平卸荷对最大动孔压比的影响约大一倍; 一般情况下, 地铁列车振动荷载最大可使泥膜渗透系数增大约 15 倍; 当泥膜渗透系数不大于 7.73×10^{-8} cm/s 时, 可不必考虑运营地铁列车振动荷载对泥膜渗透系数的影响。

关键词: 泥水盾构; 下穿越; 列车振动荷载; 饱和砂土; 动三轴试验; 泥膜; 渗透系数

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)06-1093-12

作者简介: 武 军(1984-), 男, 山西长治人, 博士研究生, 主要从事盾构隧道施工环境影响及隧道稳定性、耐久性研究。E-mail: wwwx207@yeah.net。

Change of hydraulic conductivity of filter cake caused by train vibration load of a running subway

WU Jun¹, LIAO Shao-ming^{1, 2}, HUO Xiao-bo¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The pressure of filter cake declines because of the generation of the excess pore pressure caused by the train vibration load of a running subway when a slurry shield crosses the subway. The hydraulic conductivity amplification of the filter cake on account of its swelling due to the reduction of the pressure brings negative impact on the stability of excavation face. The effect of the running subway train vibration load on the generation of excess pore pressure in three categories of sand specimens is investigated through dynamic triaxial tests. The findings from these tests are used to predict the change of the hydraulic conductivity of filter cake via the improved Kozeny-Carman formula. It is concluded that the relationship between the maximum excess pore pressure and the amplitude of train vibration load can be described as an exponential function, and the maximum dynamic excess pore pressure ratio when the sand void is determined by the void between coarse particles is 50% of that when it is determined by the void between fine particles. The amplitude of train vibration load has no significant influence on the maximum dynamic excess pore pressure ratio when the dynamic stress ratio is not more than 0.15. Moreover, the effect of sand relative density on the maximum excess pore pressure is not evident. The rise of the maximum excess pore pressure in sand is the same when the decline of vertical stress is half of that of horizontal stress. The vibration load makes the hydraulic conductivity of filter cake increase 15 times in most cases, however, it will not rise to be too large and permeable if the hydraulic conductivity of filter cake is less than 7.73×10^{-8} cm/s.

Key words: slurry shield; lower-crossing; train vibration load; saturated sandy soil; dynamic triaxial test; filter cake; hydraulic conductivity

0 引言

盾构隧道穿越运营地铁日益频繁, 而且两者间距

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078292, 51378389)

收稿日期: 2014-09-19

越来越小^[1-3]，因此运营地铁列车振动荷载对其下方在建盾构隧道开挖面稳定性的影响也日益突出。目前地铁列车振动荷载对周围环境的影响研究主要集中在对其对地面临近建筑物^[4-6]和隧道周围土体^[7-8]与地下结构体系^[9-11]产生的影响，而地铁列车振动产生的大部分能量向下传播^[8]，列车振动频率经过轨道系统和隧道衬砌的吸收衰减后，传入隧道周围土体的振动荷载以不超过 10 Hz 的低频压缩波为主^[5]，这种波抗干扰性较强^[8, 12]，传播距离远，因此位于运营地铁下部的土体和结构所受的影响远比位于地表的大^[8]，直接位于运营地铁正下方的在建隧道所受的影响就更加明显^[13]。

泥水盾构广泛应用于饱和地层^[14]，特别是穿越江河和海底的隧道建设中，如荷兰西尔维斯特隧道、德国易北河第四隧道、东京湾横断道路、上海沪崇苏隧道、南京长江隧道、武汉长江隧道、狮子洋隧道等均采用泥水盾构修建^[15]。泥水盾构和土压盾构在饱和土体中掘进时，在开挖面前方均会产生很大的超孔隙水压力，甚至能使有效应力降为零^[16-17]。对于饱和松散砂土地层，超孔隙水压力使开挖面前方砂土局部液化的能力大增，如果渣土或泥膜渗透系数较高，可能会引起开挖面失稳。但是，由于土压盾构土舱中充满渣土，开挖面失稳还不会造成灾难性的后果，而对于泥水盾构，由于土舱中填充的是泥水，开挖面一旦失稳，后果将是灾难性的^[17]。因此，当泥水盾构在运营地铁下方掘进时，由于受地铁列车振动荷载的影响，超孔隙水压力会比一般工况大大增加，从而大幅度提高开挖面失稳的可能性，为保证工程安全，在泥水盾构穿越地铁掘进时，地铁应停止运营。然而，地铁在城市公共交通中越来越重要，如北京地铁 2013 年日均客运量达 1027.6 万人次^[18]，停止地铁运营势必对市民的出行造成较大不便，对社会的正常运转产生不利影响。盾构在停止掘进拼装管片时，超孔隙水压力会大幅下降，在排水性较好的砂性地层中超孔隙水压力会降低约 80%甚至完全消散^[19]，而且拼装一环管片所用的时间与盾构掘进一环所需的时间大致相等^[16]，便于管理。综上所述，在泥水盾构停止掘进拼装管片时恢复地铁运营，是一种较为可行的选择。

泥水盾构开挖面稳定的关键是在开挖面形成一层致密的低渗透性泥膜，以阻止泥浆的大量渗漏损失并将泥水压力转化为开挖面前方的水土压力^[20]。泥膜的渗透系数和形成时间是评价泥膜质量最重要的两个参数^[21]，高质量的泥膜一般在几秒之内形成^[21-22]，可以认为泥膜被盾构刀具切削后新泥膜立刻在开挖面上形成^[17, 21, 23]，即当盾构机停止掘进的同时，新的泥膜就已形成。此外，在泥膜的形成过程中，由于泥浆中的

水或细颗粒向地层中渗漏，会导致地层中孔隙水应力的上升，泥膜形成后超孔隙水压力并不会立刻消散^[22]，其残留值取决于地层的渗透系数，在渗透系数较大的砂性地层中，超孔隙水压力的残留值很小^[17]。此外，盾构机停止掘进拼装管片时，为维持开挖面的稳定和防止上部运营隧道沉降变形，应使开挖面前方土体的有效应力处于静止应力状态。因此，支护压力需略大于静止水土压力，以抵消泥膜形成后残留的超孔隙水压力，此时，泥膜承受的前后压力差 p 为支护压力与开挖面前方土体水土压力和残留超孔隙水压力之和的差值。当运营地铁列车经过开挖面前方时，在列车振动荷载的作用下，开挖面前方土体中产生超孔隙水压力，使泥膜承受的压力差大幅减小。而泥膜可近似看做多孔弹性介质^[24-25]，压力差的变化能对泥膜孔隙比产生很大的影响^[26]，而孔隙比与泥膜的渗透系数息息相关。当承受的压力差减小时，泥膜回弹，厚度增加，体积增大，孔隙比增加，渗透系数增大。随着泥膜渗透性增大，一部分泥浆会重新渗透进入地层，孔隙水压力随之增高。孔隙水压力增高又进一步降低泥膜承受的压力差，使泥膜渗透性增大，如此反复，开挖面稳定性逐渐被破坏直至坍塌^[19, 27]。然而目前，地铁列车振动荷载如何影响泥水盾构泥膜的渗透系数还未见文献报道。因此，很有必要对这一问题进行研究，以定量确定地铁列车振动荷载对泥水盾构泥膜的渗透系数的影响程度，为泥水盾构穿越运营地铁提供理论指导。

本文结合现场监测到的地铁列车振动频率及荷载对 3 种不同类型的砂土进行动三轴试验，测试其在不同密实度、不同振动振幅条件下的超孔隙水压力的增长规律，并在此基础上利用改进的 Kozeny-Carman 公式分析了泥膜的孔隙比和渗透系数的变化规律，为泥水盾构穿越饱和砂土地层中的运营地铁的泥膜质量控制提供依据。

1 超孔隙水压力的变化规律

在运营地铁正下方土体直接埋设仪器，现场监测泥水盾构穿越该地铁时开挖面前方土体超孔隙水压力的变化规律是非常困难的。为埋设监测仪器需在运营地铁管片上钻孔会造成地铁渗漏，而且监测仪器可能会破坏盾构刀具和堵塞泥浆分离板；最后在施工过程中也很难对泥膜取样测试其孔隙比和渗透系数。因此，结合文献报道的典型地铁列车振动荷载频率、振幅，通过室内动三轴试验模拟泥水盾构在运营地铁正下方拼装管片时，在地铁列车振动荷载作用下开挖面前方土体的超孔隙水压力变化规律是一种可行的研究方

法。

1.1 典型工况

已运营隧道列车行车荷载对下方正在建设隧道开挖面稳定性的影响最大的情况为盾构平行下穿运营地铁。动三轴试验对应的典型工况如图1所示, 为不失一般性, 运营隧道和建设隧道直径 D 均为 6.2 m, 运营隧道埋深 $C_1=D$, 下方在建隧道拱顶距运营隧道底部间距 $C_2=0.5D$, 假设土样所在位置在建隧道开挖面中部。

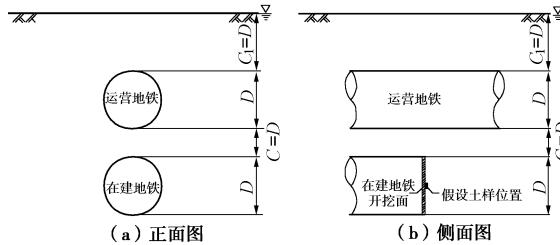


图1 动三轴试验对应典型工况示意图

Fig. 1 Schematic view of study case

当盾构从下方穿越运营地铁时, 需严格控制开挖面支护压力, 以免造成运营地铁沉降或隆起影响地铁的正常运营。理想状态下开挖面支护压力应使开挖面前方土体的有效应力处于静止应力状态, 但在实际施工时, 受盾构机状态、操作水平等条件的限制, 支护压力不可能长期均衡的维持在一个压力值不变, 而是不断的小幅波动, 其波动幅度一般不大于 10%^[28]。而支护应力越小地铁列车振动荷载对饱和土体超孔隙水压力的影响越明显。因此, 本文选取支护压力为静止土压力和在静止土压力基础上卸荷 5% 和 10% 3 种工况, 但是, 支护力卸荷也会引起开挖面前方土体水平应力和竖向应力的同时降低, 这一过程是较为复杂的。为研究超孔隙水压力的增长对哪个方向的应力卸荷更为敏感, 在动三轴试验时, 分别进行水平压力卸荷或者竖向压力卸荷。

由于已建隧道部位土体被置换成隧道结构致使下方土体所受竖向土压力减小^[29-30], 已建隧道下方一点的水平向土压力也会相应降低。假设地下水位位于地表, 则土样所在位置竖向压力为

$$\sigma_{v0} = \gamma' C_1 + T + \gamma' C_2 + 0.5\gamma' D + P_w, \quad (1)$$

表1 试验用石英砂物理参数

Table 1 Basic physical properties of test sand

砂土类型 序号	粗粒含量 $F_c/\%$	摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	相对密实度 $D_r/\%$	饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	25	32.8	0	35	18.86	2.91×10^{-3}
				85	20.24	2.64×10^{-3}
2	85	29.7	0	35	19.89	2.56×10^{-3}
				85	21.04	1.90×10^{-3}
3	100	27.1	0	35	18.99	1.58×10^{-3}
				85	20.22	8.74×10^{-4}

式中, γ' 为土的浮重度, T 为隧道结构单位长度重度, $T = \gamma'_g \pi t$, γ'_g 衬砌浮重度, 取为 15 kN/m³, t 为隧道衬砌厚度, 取为 0.35 m, P_w 为静水压力, $P_w = \gamma_w (C_1 + D + C_2 + 0.5D)$, γ_w 为水的重度。

水平压力为

$$\sigma_{h0} = k_0 (\gamma' C_1 + T + \gamma' C_2 + 0.5\gamma' D) + P_w, \quad (2)$$

式中, k_0 为土的静止水平压力系数, $k_0 = 1 - \sin \varphi'$, φ' 为土的有效内摩擦角。

1.2 试验材料

砂土的物理力学性质主要取决于颗粒组成的特性, 饱和砂土在振动荷载作用下的孔隙水压力变化程度也与其自身颗粒间的孔隙大小息息相关, 而砂土孔隙体积由砂土颗粒级配特别是细粒含量及砂土密实度决定。当砂土中细粒含量小于 30% 时, 细粒填不满粗颗粒的孔隙, 因此对孔隙体积起控制作用的是粗颗粒间的孔隙。当细粒含量大于 30% 时, 砂土的孔隙开始于细粒发生密切关系。当细粒含量大于 70% 时, 此时粗颗粒只起填充作用, 对砂土孔隙体积的影响明显减小, 直至消失^[31]。因此, 本文采用以粗石英砂和细石英砂为基础人工配置的 3 种砂性土, 3 种砂性土颗粒分布曲线图见图 2, 物理参数见表 1。一般认为, 当砂土的渗透系数大于 1×10^{-3} m/s 时, 泥膜难以形成^[14, 23], 由表 1 可知, 本文试验用砂土均能顺利形成泥膜。

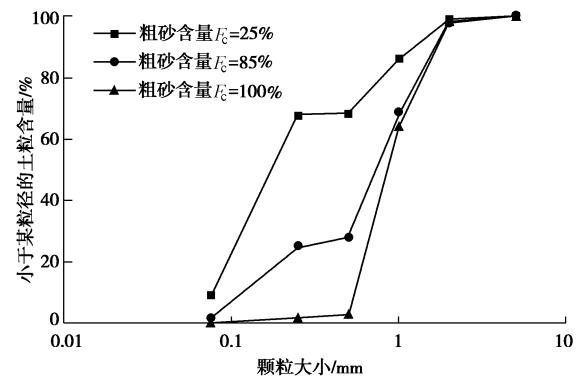


图2 试验用石英砂颗粒分布曲线图

Fig. 2 Grain-size distribution of test sand

1.3 地铁列车动荷载的确定

Tang 等^[32]通过对上海地铁 2 号线静安寺站—江苏路站区间隧道附近钻孔埋设仪器进行现场监测, 得到地铁列车经过时引起隧道周围土体响应频率有高频区段 (2.4~2.6 Hz) 和低频区段 (0.4~0.6 Hz)。地铁列车通过观测点作用的时间一般在 11~16 s, 最长 20 s。考虑到列车及隧道体系施加给隧道底部的静止附加应力在 20~40 kPa 之间 (隧道轴线埋深为 11~14 m 时的工况)。现场实测资料表明: 地铁经过时引起的振次只有几十次, 超孔隙水压力增值不是很大, 地铁运行间隔一般为 3~5 min, 在这段时间里超孔隙水压力基本可以得到消散。该实测工况与本文模拟工况类似, 而且地铁列车振动荷载引起的超孔隙水压力在列车运营间隔时间内基本可以消散, 因此不必考虑动荷载对超孔隙水压力的长期影响, 只考虑列车通过一次时, 其对砂土超孔隙水压力的影响。

地铁列车产生的动荷载在轨道及轨道附近产生的波形为单向脉冲波, 但经轨道衰减后, 近似于等幅正弦波^[33], 所以本文采用等幅正弦波来模拟地铁列车的动应力波形是符合实际的。多数研究表明^[34-36], 低频 (0~20 Hz) 范围内, 砂土动力特性会有一定程度的改变, 但总体影响不大。参考 Tang 等^[32]的实测结果和鉴于所用仪器的局限, 本研究取不利情况, 振动荷载频率 f 取为 2.5 Hz, 振动时间 20 s, 振动次数 N 为 50。列车在轨道上行驶, 作用在轨道结构上的作用力由两部分组成, 一部分为车辆自重构成的静载, 另一部分则是列车在行驶时产生的振动荷载^[33]。本文地铁车辆施加给隧道底部的静止附加应力 σ_s 参照上海地铁车辆取 30 kPa^[7], 地铁列车振动荷载振幅主要受行驶速度、轨道平顺程度以及车辆载重的影响^[4, 33], 一般认为列车行驶速度越低, 轨道越平顺, 载重越小, 振动荷载振幅越小, 即同一组列车在同一段轨道因其行驶速度和载重的不同产生的动荷载振幅也不同。因此, 为较为全面的包含地铁车辆在不同平顺度的轨道上以不同载重不同速度行驶时, 地铁列车振动荷载作用下饱和砂土超孔隙水压力的变化情况, 本文振动荷载振幅 σ_d 取 5, 10, 15, 20, 25, 30 kPa^[7]。

1.4 试验仪器及步骤

试验采用多功能动态循环三轴试验系统 GDS (global digital systems)。砂土制样方法大体上可分为湿装法和干装法两大类, 湿装法制样时土样不均匀性较大, 容易使粗粒沉积于土样底部, 细粒分布于土样上部^[37]。因此, 不均匀砂土制样一般采用干装法^[38]。本文也采用干装法, 将砂土拌合均匀后, 将砂土分为三等分, 分层装入制样器, 再压实至所需高度, 最终制成直径 38 mm, 高 80 mm 的砂土样。在拆模时, 先

给土样施加-10 kPa 的负压, 以减少对土样的扰动^[38]。然后对土样反压饱和, 当 Skempton B 值大于 0.98 后, 对土样进行 K_0 固结。考虑到土体超孔隙水压力在实际振动荷载作用时间内难以消散, 待固结完成后, 关闭排水阀, 在不排水条件下对土样施加动荷载。一个土样只进行一个振幅值的振动试验。对于需进行轴压或围压卸荷的试样, 在固结完成后还需对试样按要求卸荷至所需压力值, 待其变形稳定后, 再按上述步骤进行振动试验。图 3 为土样的典型振动荷载时程曲线。由图 3 (b) 可知, 动孔压比 u_d/σ'_3 (超孔隙水压力 u_d 与初始有效围压 σ'_3 的比值) 随着振动时间 t 的增加近似线性增长, 这与张建民等^[39]建立的砂土 B 型超孔隙水压力增长过程基本相符。需要说明的是: 由于开挖面前方砂土在列车振动荷载作用下产生的超孔隙水压力越大, 泥膜回弹量越大, 泥膜渗透系数降低越明显, 因此本文只选取了砂土土样的在动荷载作用下产生的最大超孔隙水压力进行研究, 而超孔隙水压力随振动时间的增长过程并不在本文的研究范围内。

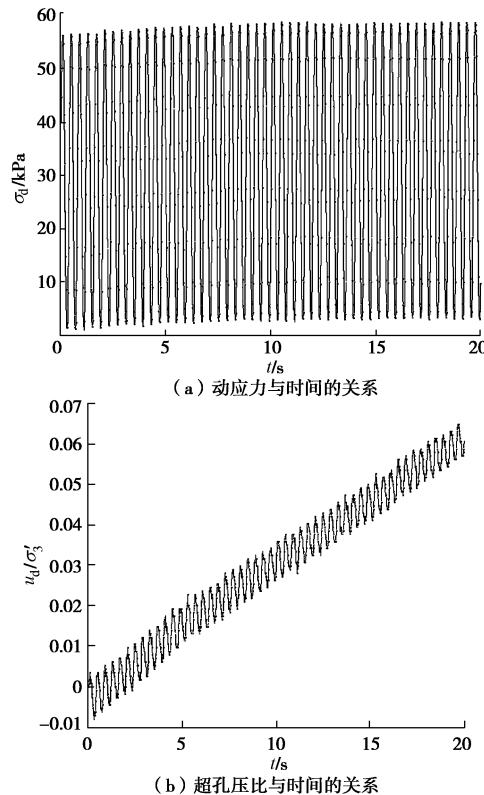


图 3 砂土土样 σ_d , u_d/σ'_3 的典型时程曲线

Fig. 3 Typical time-history curves of dynamic stress σ_d and excess pore pressure ratio u_d/σ'_3 of sand under train vibration load

1.5 试验结果

图 4~6 分别为开挖面不卸荷、水平卸荷和竖向卸荷状态下, 不同地铁列车振动荷载振幅作用下土样振动 N (本文为 50) 次的最大超孔隙水压力值归一化曲

线拟合图。地铁列车振动荷载振幅 σ_d 与砂土最大超孔隙水压力 $u_{d\max}$ 之间的关系可用下式表示:

$$\frac{u_{d\max}}{\sigma'_3} = a + b \frac{\sigma_d}{c\sigma'_3} \quad (3)$$

式中 $u_{d\max}$ 为土样振动 N 次后的最大超孔隙水压力值; σ'_3 为试样的初始有效围压; a , b , c 为试验参数。表 2 为各土样曲线拟合参数 a , b , c 及相关系数 R 汇总表, 由此可知相关系数 R 最小值为 0.9627, 说明曲线拟合质量较高。

由图 4~6 可知, 最大动孔压比 $u_{d\max}/\sigma'_3$ 与土样的粗粒含量、相对密实度、有效动应力比以及卸荷方向和卸荷程度有关。总体上, 在其他条件相同时, 随着粗粒含量的增加, 最大动孔压比逐渐降低, 粗粒含量为 85% 时的最大动孔压比平均约为粗粒含量为 25% 时最大动孔压比的 65%, 粗粒含量为 100% 时的最大动孔压比平均约为粗粒含量为 25% 时最大动孔压比的 55%。这说明砂土中粗颗粒间的孔隙起控制作用时的最大动孔压比约为细颗粒间的孔隙起控制作用时的最大动孔压比的一半。

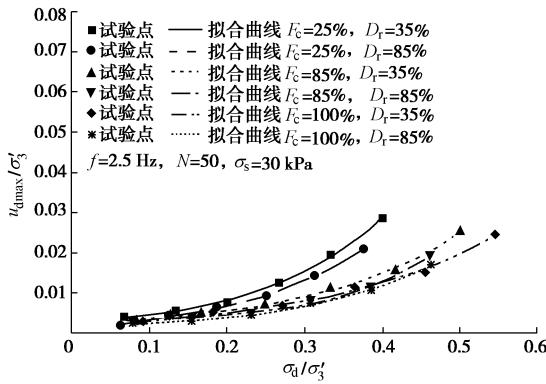


图 4 开挖面不卸荷状态下地铁列车振动荷载振幅对砂土最大超孔隙水压力的影响

Fig. 4 Maximum excess pore pressures generated in sand with amplitude of train vibration load when support pressure equals static earth pressure

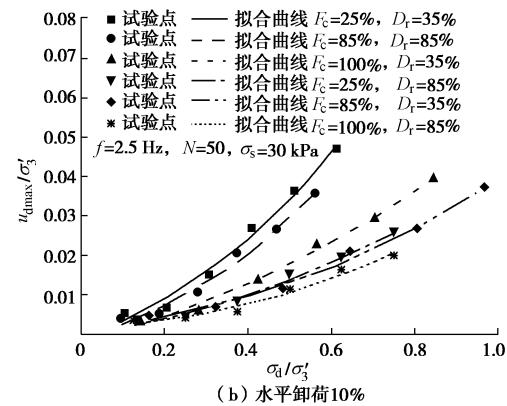
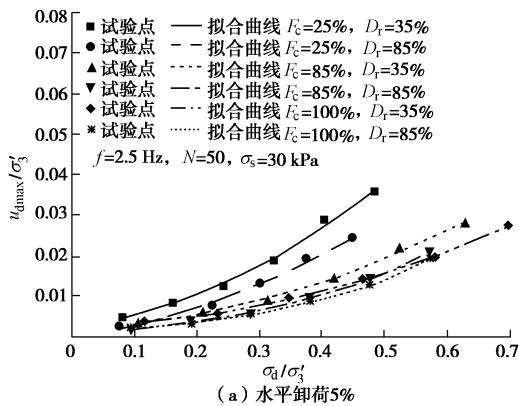


图 5 开挖面水平卸荷状态下地铁列车振动荷载振幅对砂土最大超孔隙水压力的影响

Fig. 5 Maximum excess pore pressures generated in sand with amplitude of train vibration load when horizontal pressure decreases to 95% and 90% of static horizontal earth pressure

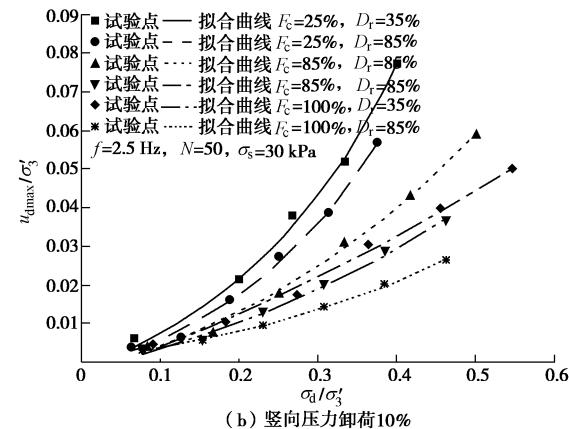
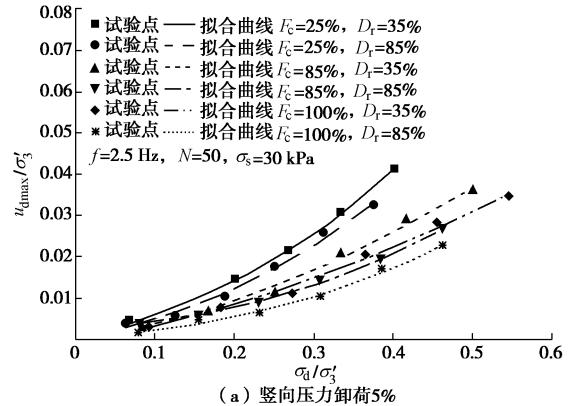


图 6 开挖面竖向卸荷状态下地铁列车振动荷载振幅对砂土最大超孔隙水压力的影响

Fig. 6 Maximum excess pore pressure generated in sand with amplitude of train vibration load when vertical pressure decreases to 95% and 90% of static earth vertical pressure

其他条件相同时, 相对密实度较小的土样最大动孔压比较大, 相对密实度为 35% 的最大动孔压比平均约为相对密实度为 85% 时最大动孔压比的 125%, 这说明相对密实度对最大动孔压比的影响并不明显。

表 2 土样最大超孔隙水压力曲线拟合参数

Table 2 Curve-fitting parameters of maximum excess pore pressures of test sand

开挖面支护状态	参数	粗粒含量 $F_c=25\%$		粗粒含量 $F_c=85\%$		粗粒含量 $F_c=100\%$	
		相对密实度 $D_r=35\%$	相对密实度 $D_r=85\%$	相对密实度 $D_r=35\%$	相对密实度 $D_r=85\%$	相对密实度 $D_r=35\%$	相对密实度 $D_r=85\%$
开挖面 不卸荷	a	0.0005	-0.0018	0.0013	0.0019	0.0003	0.0006
	b	0.0022	0.0029	0.0015	0.0006	0.0019	0.0010
	c	-0.1561	-0.1827	-0.1797	-0.1359	-0.2161	-0.1657
	R	0.9965	0.9968	0.9945	0.9931	0.9894	0.9957
开挖面水平 卸荷 5%	a	-0.0123	-0.0109	-0.00728	-0.0030	-0.0050	-0.0008
	b	0.0136	0.0107	0.0081	0.0035	0.0065	0.0021
	c	-0.3776	-0.3713	-0.42196	-0.2940	-0.4343	-0.2507
	R	0.9885	0.9907	0.9900	0.9977	0.9986	0.9980
开挖面水平 卸荷 10%	a	-0.0265	-0.0162	-0.0299	-0.0116	-0.0108	-0.00531
	b	0.0249	0.0153	0.0278	0.0114	0.0115	0.00604
	c	-0.5605	-0.4555	-0.9160	-0.6248	-0.6743	-0.5133
	R	0.9803	0.9770	0.9888	0.9790	0.9843	0.9627
开挖面竖向 卸荷 5%	a	-0.0148	-0.0134	-0.0268	-0.0042	-0.0349	-0.0050
	b	0.0151	0.0133	0.0250	0.0060	0.0328	0.0051
	c	-0.3029	-0.2980	-0.5326	-0.2792	-0.7136	-0.2734
	R	0.9937	0.9864	0.9834	0.9959	0.9825	0.9923
开挖面竖向 卸荷 10%	a	-0.0178	-0.0146	-0.0282	-0.0274	-0.0598	-0.0110
	b	0.0165	0.0131	0.0253	0.0253	0.0570	0.0114
	c	-0.2286	-0.2208	-0.4019	-0.4925	-0.8229	-0.3872
	R	0.9893	0.9940	0.9927	0.9914	0.9893	0.9986

随着有效动应力比的增大, 最大动孔压比也逐渐增大, 但当 $\sigma_d/\sigma'_3 \leq 0.15$ 时, 振动荷载振幅的增大对最大动孔压比的增加影响并不明显, $u_{d\max}/\sigma'_3$ 最大值约 0.013, 而当 $\sigma_d/\sigma'_3 \geq 0.15$ 时, 振动荷载振幅的增大对最大动孔压比的增加影响变的越来越明显。

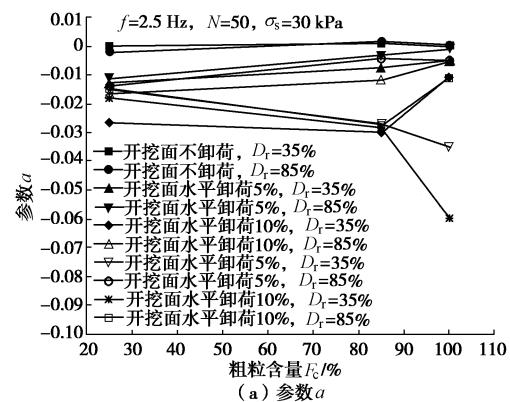
开挖面卸荷程度越大, 最大动孔压比增加越明显, 开挖面水平卸荷 5%时的最大动孔压比平均约为不卸荷时最大动孔压比的 105%, 开挖面水平卸荷 10%时的最大动孔压比平均约为不卸荷时最大动孔压比的 122%, 开挖面轴向卸荷 5%时的最大动孔压比平均约为不卸荷时最大动孔压比的 180%, 开挖面水平卸荷 10%时的最大动孔压比平均约为不卸荷时最大动孔压比的 200%, 这说明卸荷程度相同时, 轴向卸荷比水平卸荷对最大动孔压比的影响将近大一倍。

需要说明的是: 由于本文只进行了单向应力卸荷, 而实际工程中开挖面支护力卸荷会导致土体水平和竖向应力同时卸荷, 所以, 实际工程中在开挖面支护力卸荷状态下, 地铁列车振动荷载对土体超孔隙水压力的影响将比本文动三轴试验结果更大。

由以上分析可知, 虽然砂土中粗粒含量不同, 相对密实度不同, 卸荷方向及卸荷程度不同, 但最大超孔压比发展模式是相同的。粗粒含量、相对密实度、卸荷方向及卸荷程度对最大超孔压比的影响体现在发展模式参数的不同上。最大超孔压比发展模式试验参数 a , b , c 与粗粒含量、相对密实度、卸荷方向及卸

荷程度的关系如图 7 所示。

由图 7 可知, 在开挖面不卸荷时粗粒含量、相对密实度、卸荷方向及卸荷程度对参数 a , b , c 的影响很小。开挖面卸荷使参数 a 明显降低, 卸荷方向对其值的影响不明显, 但卸荷程度越大, a 值降低越明显; 相对密实度越小 a 值降低越明显, 而且随着粗粒含量增加, 相对密实度对 a 值的影响也越明显。开挖面卸荷使参数 b 明显增大, 卸荷方向对其值的影响不明显, 但卸荷程度越大, b 值增大越明显; 相对密实度越小 b 值增大越明显, 而且随着粗粒含量增加, 相对密实度对 b 值的影响也越明显。开挖面卸荷使参数 c 明显降低, 卸荷方向对其值的影响不明显, 卸荷程度对其值的降低不明显; 相对密实度越小 c 值增大越明显, 而且随着粗粒含量增加, 相对密实度对 c 值的影响也越明显。



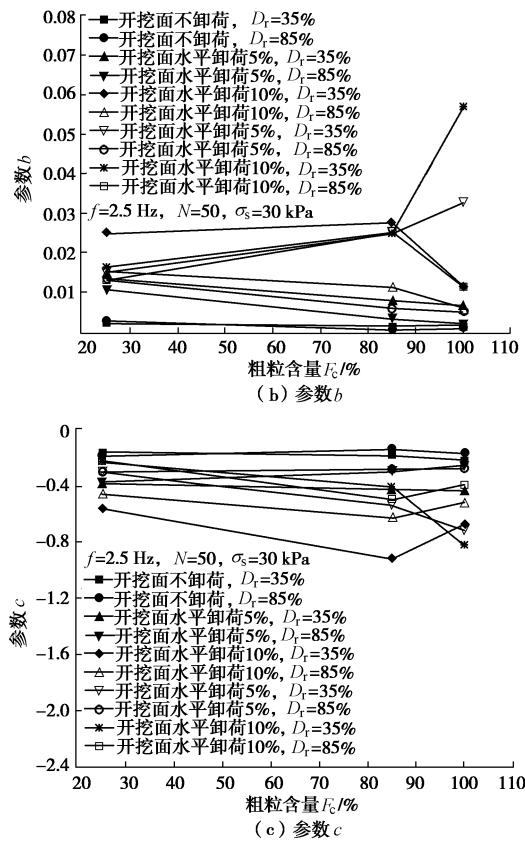


图 7 最大超孔压发展模型参数与砂土粗粒含量关系

Fig. 7 Relationship between parameter of maximum excess pore pressure model and coarse grain content of test sand

2 超孔隙水压力对泥膜渗透系数的影响

2.1 泥膜孔隙比与压力的关系

为能快速形成高质量不透水的泥膜, 一般要向泥浆中加入添加剂, 常用的添加剂有膨润土、高分子聚合物、砂、蛭石、锯末等, 而膨润土是最常用的添加剂^[14, 17, 20, 22-23]。

泥膜是一种近似多孔弹性介质^[24-25], 当承受的压力差减小时, 泥膜回弹, 厚度增加, 体积增大, 孔隙比增大。本文假设开挖面泥膜为一维应力状态, 则泥膜孔隙比与压力差之间的关系可由下式确定^[26, 40]:

$$\Delta e = C_e \lg \left(\frac{p}{p - u_d} \right) \quad (4)$$

式中 p 为泥膜两侧压力差, $p = p_{\text{support}} - p'_s - p_w - u_c$, p_{support} 为开挖面支护压力, p'_s 为开挖面前方土体水平有效应力, p_w 为开挖面前方土体静水压力, u_c 为因泥膜形成产生的超孔隙水压力的残留值; u_d 为泥膜两侧压力差的减小值, 即为开挖面前方土体中因地铁列车动荷载而产生的超孔隙水压力值; Δe 为泥膜孔隙比的增加值; C_e 试验常数。

2.2 泥膜孔隙比与渗透系数的关系

颗粒介质的渗透系数与其颗粒特性、形状、大小、孔隙比有关, Kozeny-Carman 公式是目前被广泛接受的预测砂土颗粒介质的渗透系数的计算方法^[41]。有学者^[42-44]将其改进, 使其能计算所有类型土体的渗透系数, 其表达式如下:

$$\lg k = 0.5 + \lg \left(\frac{e^3}{G_s^2 S_s^2 (1+e)} \right) \quad (5)$$

式中, e 为孔隙比, G_s 为颗粒相对密度, S_s 为颗粒比表面积 (m^2/kg)。

由式 (5) 可得, 当泥膜孔隙比因承受的压力差减小 u_d 而增加 Δe 时, 泥膜渗透系数增大倍数可由下式计算:

$$\frac{k_{p-u_d}}{k_p} = \frac{(e_p + \Delta e)^3 (1+e_p)}{(1+e_p + \Delta e) e_p^3} \quad (6)$$

式中 k_p 为泥膜在压力差 p 作用下的渗透系数; k_{p-u_d} 为泥膜在压力差降低 u_d 后的渗透系数; e_p 为泥膜在压力差 p 作用下的孔隙比; Δe 为泥膜在压力差降低 u_d 后孔隙比的增加值。

2.3 泥膜渗透系数与振动荷载振幅间的关系

一般而言, 为维持开挖面的稳定和防止上部土体或者运营隧道沉降变形, 使开挖面前方土体的有效应力处于静止应力状态, 需在开挖面施加一个略大于静止水土压力约 20 kPa 的支护力^[22], 用以抵消泥膜形成后残留的超孔隙水压力 u_c , 即泥膜两侧压力差 p 一般不大于 20 kPa。

本文根据文献[26, 40]报道的试验结果, 取泥膜承受 20 kPa 差压力时 $e_p=1.5$, 试验常数 $C_e=5.71$ 。为研究泥膜形成后残留的超孔隙水压力 u_c 的影响, 取其值为 0 kPa 和 10 kPa。结合动三轴试验结果和最大动孔隙比拟合函数 (3) 将以上各参数代入式 (4)、(6) 可得开挖面不卸荷、水平压力卸荷和竖向压力卸荷状态下, 不同地铁列车振动荷载振幅对泥膜渗透系数的最大影响, 见图 8~10。

由图 8~10 可知, 最大渗透系数增大比 (k_{p-u_d}/k_p)_{max} 与土样的粗粒含量、相对密实度、有效动应力比、卸荷方向和卸荷程度以及泥膜形成产生的超孔隙水压力的残留值有关。总体上, 在其他条件相同时, 随着粗粒含量的增加, 泥膜最大渗透系数增大比逐渐降低, 粗粒含量为 85% 时泥膜最大渗透系数增大比平均约为粗粒含量为 25% 时泥膜最大渗透系数增大比的 87.7%, 粗粒含量为 100% 时泥膜最大渗透系数增大比平均约为粗粒含量为 25% 时泥膜最大渗透系数增大比的 84.8%。这说明砂土中粗颗粒间的孔隙起控制作用时的泥膜最大渗透系数增大倍数约为细颗粒间的孔隙起控制作用时的泥膜最大渗透系数增大倍数的 85%。

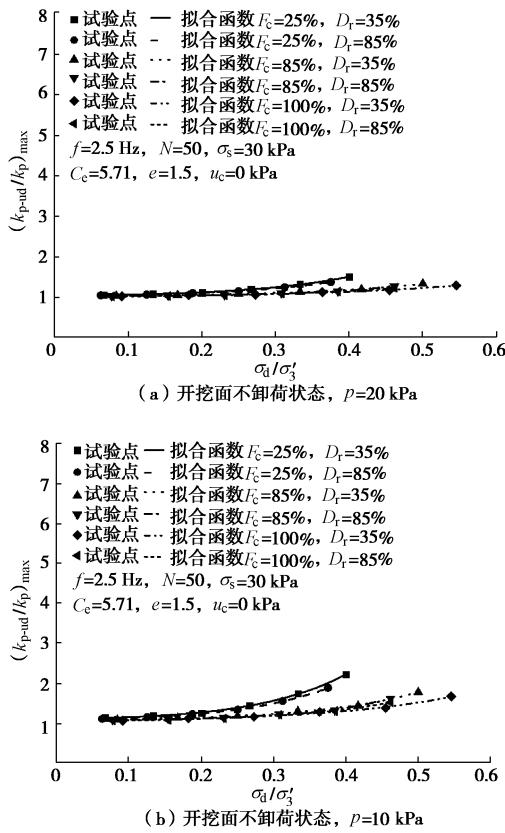
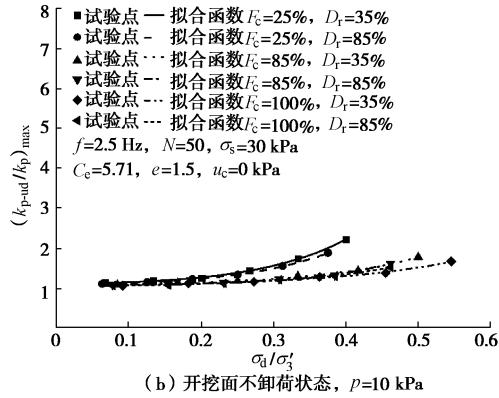
(a) 开挖面不卸荷状态, $p=20$ kPa(b) 开挖面不卸荷状态, $p=10$ kPa

图 8 开挖面不卸荷状态下地铁列车振动荷载振幅对泥膜渗透系数的影响

Fig. 8 Variation of hydraulic conductivity of filter cake with amplitude of train vibration load when support pressure equals to static earth pressure

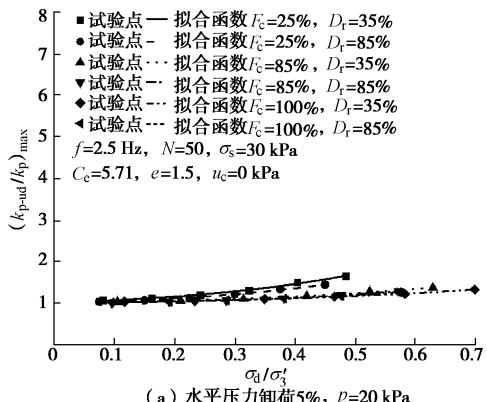
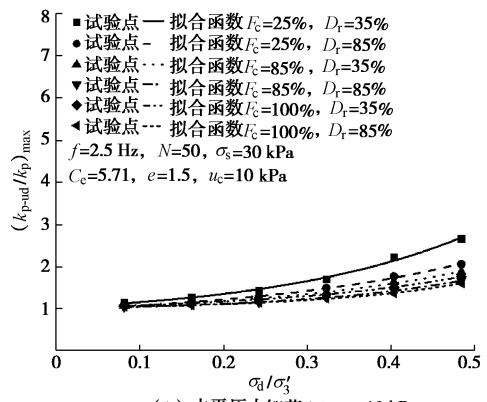
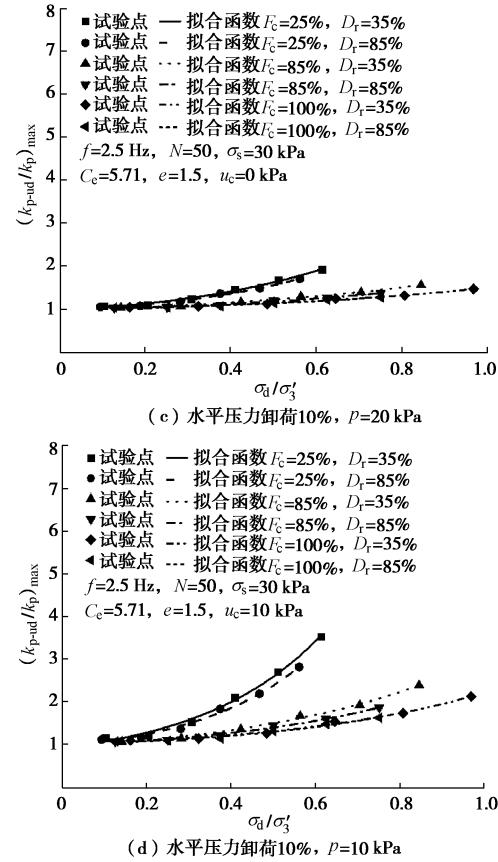
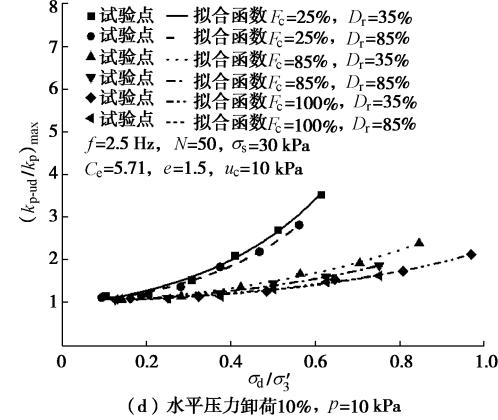
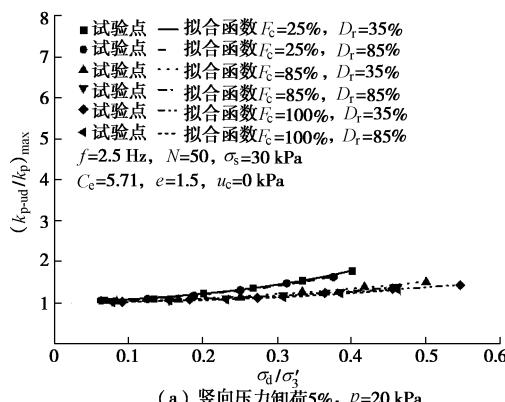
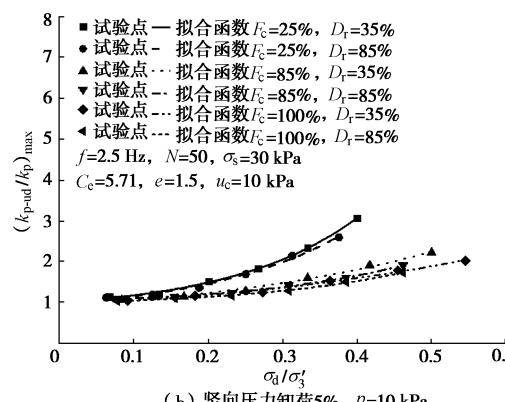
(a) 水平压力卸荷10%, $p=20$ kPa(b) 水平压力卸荷10%, $p=10$ kPa(c) 水平压力卸荷10%, $p=20$ kPa(d) 水平压力卸荷10%, $p=10$ kPa

图 9 水平压力卸荷状态下地铁列车振动荷载振幅对泥膜渗透系数的影响

Fig. 9 Variation of hydraulic conductivity of filter cake with amplitude of train vibration load when vertical pressure decreases to 95% and 90% of static earth vertical pressure

(a) 竖向压力卸荷5%, $p=20$ kPa(b) 竖向压力卸荷5%, $p=10$ kPa

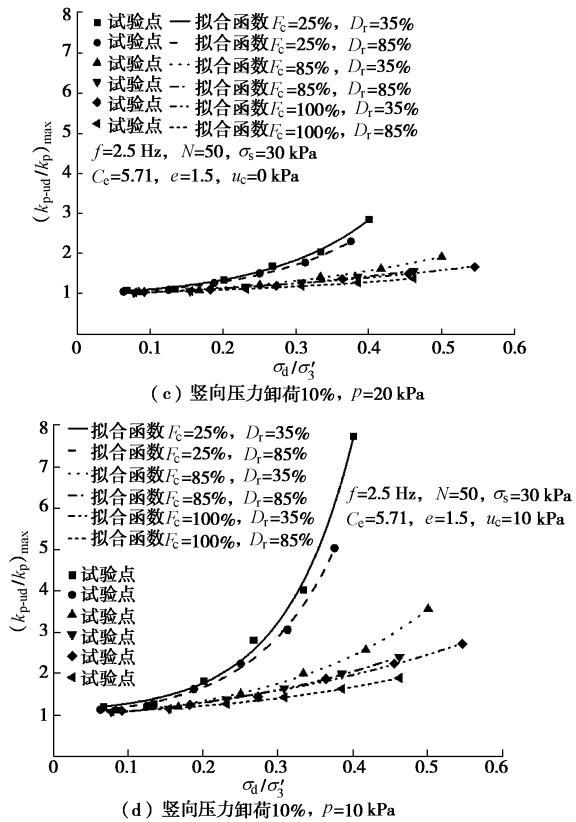


图 10 开挖面竖向卸荷状态下地铁列车振动荷载振幅对泥膜渗透系数的影响

Fig. 10 Variation of hydraulic conductivity of filter cake with amplitude of train vibration load when vertical pressure decreases to 95% and 90% of static earth vertical pressure

其他条件相同时, 砂土相对密实度较小的泥膜最大渗透系数增大比较大, 相对密实度为 35% 的泥膜最大渗透系数增大比平均约为相对密实度为 85% 时泥膜最大渗透系数增大比的 108%, 这说明砂土相对密实度对振动荷载在泥膜渗透系数的增大影响不明显。

随着有效动应力比的增大, 泥膜最大渗透系数增大比也逐渐增大, 但当 $\sigma_d/\sigma'_3 \leq 0.15$ 时, 振动荷载振幅的增大对泥膜最大渗透系数增大比的增加影响并不明显, 泥膜渗透系数最大约增大至 1.47 倍, 而当 $\sigma_d/\sigma'_3 \geq 0.15$ 时, 振动荷载振幅的增大对泥膜最大渗透系数增大比的增加影响变的越来越明显。

开挖面卸荷程度越大, 泥膜最大渗透系数增大比增加越大, 开挖面水平卸荷 5% 时的泥膜最大渗透系数增大比平均约为不卸荷时最大动孔压比的 105%, 开挖面水平卸荷 10% 时的泥膜最大渗透系数增大比平均约为不卸荷时泥膜最大渗透系数增大比的 114%, 开挖面轴向卸荷 5% 时的泥膜最大渗透系数增大比平均约为不卸荷时最大动孔压比的 112%, 开挖面水平卸荷 10% 时的泥膜最大渗透系数增大比平均约为不卸荷时最大动孔压比的 133%, 这说明虽然卸荷程度相同时, 轴向卸荷对泥膜渗透系数的增加程度约为水平

卸荷泥膜渗透系数增加程度的 1.15 倍, 但总体上影响并不明显。

泥膜形成后残留的超孔隙水压力 u_c 对泥膜的渗透系数的影响较为显著, u_c 从 0 kPa 增加至 10 kPa 最大可使泥膜渗透系数增大约 8 倍, u_c 为 10 kPa 时的泥膜最大渗透系数增大比平均约为 u_c 为 0 kPa 时的泥膜最大渗透系数增大比的 1.3 倍。

2.4 参数敏感性分析

由式 (6) 可知, 孔隙比增加量 Δe 与孔隙比 e_p 的比值是地铁列车振动荷载对泥膜渗透系数的影响分析中对结果影响最大的一个物理参数, 而且不同种类的膨润土的孔隙比的差别很大^[26, 40], 如阳离子为 Na^+ 的膨润土泥膜的孔隙比普遍比阳离子为 Ca^{2+} 的膨润土泥膜的孔隙比大的多, 其孔隙比甚至可达 30.15, 而阳离子为 Ca^{2+} 的膨润土泥膜的孔隙比一般不超过 10^[45]。因此有必要分析泥膜渗透系数的增长对这 $\Delta e/e_p$ 的敏感性。

由图 11 可知, 随着泥膜孔隙比的增加, $\Delta e/e_p$ 对其渗透系数的影响逐渐降低, 而且当 $e_p \geq 10.0$ 时, $\Delta e/e_p$ 对其渗透系数的影响程度几乎没变化; 随着 e_p 的增大, $\Delta e/e_p$ 对泥膜渗透系数逐渐降低, 但当 $\Delta e/e_p \leq 0.6$ 时, 这种现象并不明显; 泥膜渗透系数最大约增大 15 倍, 一般工程中认为当渗透系数 $k \leq 1.16 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ^[46] 时, 可视为不透水, 即当泥膜渗透系数 $k \leq 7.73 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 时, 泥膜渗透系数并不会因为孔隙比增大而增大至可透水的程度, 而工程中泥膜的渗透系数一般不大于 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ ^[47], 一般情况下, 泥水盾构机停止掘进拼装管片时地铁列车振动荷载不会让泥膜渗透系数产生质的变化, 因此可不必考虑运营地铁列车振动荷载对泥膜渗透系数的影响; 但当泥膜渗透系数 $k \geq 7.73 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 时, 泥膜在列车振动荷载的作用下可能因为孔隙比增大而增大至可透水的程度, 从而造成运营地铁变形过大影响列车的正常运行和危害开挖面的稳定性。因此, 泥水盾构穿越运营地铁时要选用与地层相适应的泥浆, 控制泥膜的渗透性。

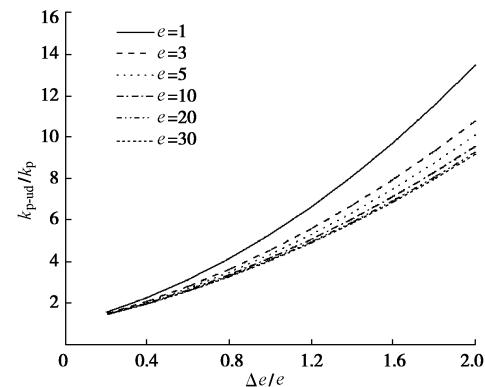


图 11 泥膜孔隙比的变化对其渗透系数的影响

Fig. 11 Influence of void ratio on hydraulic conductivity of filter cake

3 结 论

本文通过动三轴试验分析地铁列车振动荷载对开挖面前方砂土超孔隙水压力的影响，并在此基础上进一步分析了列车振动荷载对地铁下穿越泥水盾构泥膜渗透系数的影响，得到以下 4 点结论。

(1) 地铁列车振动荷载振幅与在其作用下产生的砂土最大超孔隙水压力之间的关系可用指数函数描述。砂土粗粒含量、相对密实度、卸荷方向及卸荷程度和振动荷载振幅对指数函数参数均有一定影响。

(2) 砂土中粗颗粒间的孔隙起控制作用时的最大动孔压比约为细颗粒间的孔隙起控制作用时的最大动孔压比的一半；当 $\sigma_d/\sigma'_3 \leq 0.15$ 时，振动荷载振幅的增大对最大动孔压比的增加影响并不明显；相对密实度对最大动孔压比的影响并不明显；卸荷程度相同时，轴向卸荷比水平卸荷对最大动孔压比的影响约大一倍。

(3) 砂土的粗粒含量、相对密实度、有效动应力比、卸荷方向和卸荷程度以及泥膜形成产生的超孔隙水压力的残留值对泥水盾构泥膜的渗透在地铁列车振动荷载下的增大均有一定程度的影响，但一般情况下泥膜渗透系数最大约增大 15 倍。

(4) 当泥膜渗透系数 $k \leq 7.73 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 时，泥水盾构机停止掘进拼装管片时地铁列车振动荷载不会让泥膜渗透系数产生质的变化，可不必考虑运营地铁列车振动荷载对泥膜渗透系数的影响；当泥膜渗透系数 $k \geq 7.73 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 时，泥膜在列车振动荷载的作用下可能因为孔隙比增大而增大至可透水的程度，从而造成运营地铁变形过大影响列车的正常运行和危害开挖面的稳定性。

参 考 文 献:

- [1] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1998, **13**(3): 289 – 304.
- [2] CHEN S L, GUI M W, YANG M C. Applicability of the principle of superposition in estimating ground surface settlement if twin- and quadruple-tube tunnels[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2012, **28**: 135 – 149.
- [3] 廖少明, 杨宇恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 812 – 818. (LIAO Shao-ming, YANG Yu-heng. Deformation analysis and control of a running subway crossed by upper- and lower-shield in succession[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(5): 812 – 818. (in Chinese))
- [4] 夏 禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 239 – 297. (XIA He. *Traffic induced environmental vibrations and controls*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 239 – 297. (in Chinese))
- [5] FORREST J A, HUNT H E M. Ground vibration generated by trains in underground tunnels[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, **294**: 706 – 736.
- [6] YANG W, HUSSEIN M F M, MARSHALL A M. Centrifuge and numerical modeling of ground-borne vibration from an underground tunnel[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, **51**: 23 – 34.
- [7] 刘 莎. 地铁行车荷载作用下隧道周围饱和软黏土流变效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. (LIU Sha. The study on the rheological properties of saturated soft clay around the tunnel under subway loading[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [8] GUPTA S, STANUS Y, LOMBAERT G, et al. Influence of tunnel and soil parameters on vibration from underground railways[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, **327**: 70 – 91.
- [9] THUSYANTHAN N I, MADABHUSHI S P G. Experimental study of vibrations in underground structures[J]. *Geotechnical Engineering*, 2003, **156**(2): 75 – 81.
- [10] KUO K A, HUNT H E M, HUSSEIN M F M. The effect of a twin tunnel on the propagation of ground-borne vibration from an underground railway[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, **330**: 6203 – 6222.
- [11] 陈若曦, 杨林德, 周治国, 等. 列车振动荷载作用下隧道衬砌结构动力响应特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(7): 1337 – 1342. (WANG Xiang-qi, YANG Lin-de, ZHOU Zhi-guo, et al. Dynamic response analysis of lining structure for tunnel under vibration loads of train[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(7): 1337 – 1342. (in Chinese))
- [12] SIMON J, HUNT H. Voids at the tunnel-soil interface for calculation of ground vibration from underground railways[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, **330**: 245 – 270.
- [13] GUAN F, MOORE I D. Three-dimensional dynamic response of twin cavities due to traveling loads[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, **120**(3): 637 – 651.
- [14] FRITZ P. Additives for slurry shields in highly permeable

ground[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(1): 81 - 95.

[15] WANG S H, HUANG G H, ZENG C. Research on construction technology for yangtze-river crossing tunnel project in wuhan[C]// Proceedings of the Pipelines 2007 International Conference, ASCE, Boston, 2007.

[16] BEZUIJEN A, TALMO A M. Processes around a TBM[J]. GEotechniek, 2008, 4: 50 - 58.

[17] MAIDL U. Active confinement pressure control with foam: a comparison between slurry and earth pressure balanced shields[C]// 1st Eastern European Tunnelling Conference. Budapest, 2012.

[18] 白亚飞. 大客流条件下地铁车站的脆弱性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013. (BAI Ya-fei. Research on the subway station vulnerability under mass passenger flow conditions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))

[19] BROERE W. Influence of excess pore pressures on the stability of the tunnel face[C]// Claiming the Underground Space, ITA. Amsterdam, 2003: 759 - 765.

[20] MIN F L, ZHU W, HAN X R. Filter cake formation for slurry shield tunneling in highly permeable sand[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 38: 423 - 430.

[21] MIN F L, ZHU W, HAN X R, et al. The effect of clay content on filter-cake formation in highly permeable gravel[C]// Proceedings of the 2010 GeoShanghai International Conference, ASCE, GSP204. Shanghai, 2010: 210 - 215.

[22] 闵凡路, 朱伟, 魏代伟, 等. 泥水盾构泥膜形成时开挖面地层孔压变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 722 - 727. (MIN Fan-lu, ZHU Wei, WEI Dai-wei, et al. Change of pore water pressure in soil as filter cakes formed on excavation face in slurry shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 722 - 727. (in Chinese))

[23] FRITZ P, HERMANN S R, HEINZ A. Modified bentonite slurries for slurry shields in highly permeable soils[C]// 4th International Symposium Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Toulouse, 2002.

[24] CHRISTENSEN M L. The effect of filter cake viscoelasticity on filtration - a study of activated sludge dewatering[D]. Aalborg: Aalborg University, 2006.

[25] 白云, 孔祥鹏, 廖少明. 泥水盾构泥膜动态形成机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 19 - 24. (BAI Yun, KONG Xiang-peng, LIAO Shao-ming. Research on dynamic formation mechanism of slurry membrane for slurry shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 19 - 24. (in Chinese))

[26] FILZ G M, HENRY L B, HESLIN G M, et al. Determining hydraulic conductivity of soil-bentonite using the api filter press[J]. Geotechnical Testing Journal, 2001, 24(1): 61 - 71.

[27] ANAGNOSTOU G, KOVÁRI K. The face stability of slurry-shield-driven tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 165 - 174.

[28] BEZUIJEN A, JOUSTRA J F W, TALMON A M, et al. Pressure gradients at the tunnel face of an Earth Pressure Balance shield[C]// Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future. London: Taylor & Francis Group, 2005: 809 - 814.

[29] 刘健航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1996. (in Chinese))

[30] 廖少明, 杨俊龙, 奚程磊, 等. 盾构近距离穿越施工的工作面土压力研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1727 - 1730. (LIAO Shao-ming, YANG Jun-long, XI Cheng-lei, et al. Approach to earth balance pressure of shield tunneling across ultra-near metro tunnel in operation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1727 - 1730. (in Chinese))

[31] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水力水电出版社, 1992: 25 - 31. (LIU Jie. Seepage Stability and Seepage control[M]. Beijing: China Water Power Press, 1992: 25 - 31. (in Chinese))

[32] TANG Yi-qun, CUI Zhen-dong, ZHANG Xi, et al. Dynamic response and pore pressure model of the saturated soft clay around the tunnel under vibration loading of Shanghai subway[J]. Engineering Geology, 2008, 98: 126 - 132.

[33] 唐益群, 周念清, 周洁, 等. 地铁行车荷载作用下饱和软黏土的动力响应与变形特征研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 51 - 55. (TANG Yi-qun, ZHOU Nian-qing, ZHOU Jie, et al. Dynamic response and deformation characteristic of saturated soft clay under subway vibration loading[M]. Beijing: Science Press, 2011: 51 - 55. (in Chinese))

[34] YOSHIMI Y, OH-OKA H. Influence of degree of shear stress reversal on the liquefaction potential of saturated sand[J]. Soils and Foundations, 1975, 15(3): 27 - 40.

[35] 张建民, 王稳祥. 振动频率对饱和砂土动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 89 - 97. (ZHANG Jian-min, WANG Wen-xiang. Effect of vibration frequency on dynamic

behavior of saturated sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(1): 89 - 97. (in Chinese))

[36] 王桂萱, 桑野二郎, 竹村次郎, 等. 循环荷载下砂质混合土孔隙水压力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 541 - 545. (WANG Gui-xuan, KUWANO J, TAKEMURA J, et al. Study on excess pore water pressures of sands mixed with clays under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 541 - 545. (in Chinese))

[37] BAZIAR H, DOBRY R. Residual strength and large-deformation potential of loose silty sands[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(12): 896 - 906.

[38] SITHARAM T G, GOVINDARAJU R. Pore pressure generation in silty sands during cyclic loading[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2007, **2**(4): 295 - 306.

[39] 张建民, 刘公社. 动荷载下饱和砂土与无黏性土孔压计算模型的分析研究[M]// 第三届全国土动力学学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 1990: 231 - 235. (ZHANG Jian-min, LIU Gong-she. Study of pore pressure calculating model of saturated sand and cohesionless soil under dynamic loading[M]// Proceeding of The 3rd Soil Dynamics of China. Shanghai: Tongji Press, 1990: 231 - 235. (in Chinese))

[40] CHUNG J, DANIEL D E. Modified fluid loss test as an improved measure of hydraulic conductivity for bentonite[J]. Geotechnical Testing Journal, 2008, **31**(3): 1 - 9.

[41] TRUSSELL R R, CHANG M. Review of flow through porous media as applied to head loss in water filters[J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, **125**(11): 998 - 1006.

[42] CHAPUIS R P, AUBERTIN M. On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(3): 616 - 628.

[43] HANSEN D. Discussion of "On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils" [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(10): 990 - 993.

[44] CHAPUIS R P, AUBERTIN M. Reply to the discussion by D. Hansen on "On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils" [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(10): 994 - 996.

[45] TRIPATHI K K. Hydraulic conductivity prediction of saturated sand-bentonite mixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, **31**(2): 581 - 591.

[46] 高新强, 仇文革. 隧道衬砌外水压力计算方法研究现状与进展[J]. 铁道工程学报, 2004, **84**(4): 128 - 131. (GAO Xin-qiang, QIU Wen-ge. The current situation and prospect of study on the computation method of external hydraulic pressure upon tunnel lining[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, **84**(4): 128 - 131. (in Chinese))

[47] NGUYEN T, LEE C, CHOI H. Slug test analysis in vertical cut-off walls with consideration of filter cake[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(8): 785 - 797.