

DOI: 10.11779/CJGE201806001

# 不同管片张开量下隧道外水土流失规律试验研究

郑刚<sup>1,2</sup>, 姚杰<sup>1,2</sup>, 戴轩<sup>3</sup>, 杨新煜<sup>1,2</sup>, 孙佳羽<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点试验室, 天津 300072; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点试验室, 天津 300072;  
3. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051)

**摘要:** 盾构隧道管片接缝漏水并导致管片外土体侵蚀、甚至发生漏水漏砂, 是富水砂层中盾构隧道安全的主要风险。设计了一种模拟管片在不同张开量下土体流失状态的试验设备, 对福建标准砂和天津典型细砂在不同管片张开量及水压下的土体流失状态进行了试验研究。试验揭示了管片外砂土逐步流失的机理, 发现不考虑土颗粒作用的传统水密性试验会高估弹性密封垫的防水性能; 提出了临界侵蚀张开量的理论公式, 并通过试验结果初步验证了其合理性。研究表明, 临界侵蚀张开量与土颗粒竖向所受应力和土层厚度成一次正比关系, 与缝隙处水头、土体孔隙率成一次反比关系; 当土体通过管片缝隙发生侵蚀后, 侵蚀质量与管片张开量和水压成正比, 与缝隙周围的有效应力大小成反比, 侵蚀使福建标准砂级配曲线变得更加平缓; 针对福建标准砂及天津细砂, 提出了便于实际应用的考虑水压及管片张开量的土体流失状态评估方法。

**关键词:** 临界缝隙宽度; 模型试验; 漏水; 土体侵蚀; 漏砂

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)06-0969-09

作者简介: 郑刚(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学及岩土工程方面的教学和研究工作。E-mail: zhenggang1967@163.com。

## Experimental study on sand inflow under different opening widths of shield tunnel segments

ZHENG Gang<sup>1,2</sup>, YAO Jie<sup>1,2</sup>, DAI Xuan<sup>3</sup>, YANG Xin-yu<sup>1,2</sup>, SUN Jia-yu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051, China)

**Abstract:** For the tunnel accident caused by water leakage, soil erosion and sand and water loss in water-rich sand stratum, in order to quantify the risks of tunnels, a new shield tunnel seepage simulation test device is developed considering the interaction between elastic sealing gasket, soil and water. The states of soil loss of Fujian standard sand and Tianjin fine sand under different gap widths and water pressures are studied through experiments. The leakage mechanism due to invasion of sand is revealed and proved by the test results. It is shown that the traditional test methods will overestimate the waterproof property of elastic sealing gaskets without considering the influence of soil. The formula for estimating the critical gap width of soil erosion is derived, and verified by the test results. The critical gap width of soil erosion is proportional to the vertical stress and soil thickness, and is inversely proportional to the soil porosity and hydraulic pressure around gap. When soil erosion happens, the mass loss is proportional to the gap width and hydraulic pressure, and is inversely proportional to the effective stress in the soil around gaps. The soil erosion makes the gradation curve smoother. For Fujian standard sand and Tianjin fine sand, a practicable assessment method for the state of soil loss is put forward considering pressure and segment gap.

**Key words:** critical gap width; model test; water leakage; soil erosion; sand leakage

## 0 引言

富水砂层中的盾构隧道, 极易在刚度较小的管片接缝位置出现漏水漏砂事故, 如上海金山引水隧道, 曾发生由于隧道曲率过大, 导致管片张开量过大从而在隧道底部发生漏水漏砂, 最终引起管片因受力和变

形过大而发生破坏<sup>[1]</sup>。前苏联圣彼得堡地铁一号线“森

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630641); 国家重点研发计划(2016YFC0802008)

收稿日期: 2017-03-14

\*通讯作者 (E-mail: yxy0038@126.com)

林”站到“英勇广场”站区间从1975年投入运营后,下行隧道的管片之间因张开量过大而不断间隙性涌水涌砂,隧道外的水、砂不断进入隧道内又会导致隧道外土体发生流失、隧道不均匀沉降增大,隧道管片之间张开量进一步增大,从而形成恶性循环。至1995年12月3日,下行隧道涌水涌砂突增,引起上行隧道变形急剧增大,最终隧道被迫终止运营而废弃<sup>[2]</sup>。调查发现,漏水漏砂事故的直接原因都是隧道管片张开量过大,然而,隧道建成后不同管片张开量下隧道外土体的流失机理与规律却并没有引起足够的重视。

面对富水地区隧道运营期“十隧九漏”的现状,前人提出了一些隧道建成后的继续评价体系来初步判断隧道不同位置的管片张开量。如王如路等<sup>[3]</sup>通过数值模拟,提出了隧道横向变形几何简易计算方法,指出通缝隧道中横截面的直径变化量与隧道该截面不同位置接头的张开量之间存在归一化关系;朱斌<sup>[4]</sup>进一步研究了错缝隧道中二者的关系;郑永来等<sup>[5]</sup>通过理论公式推导,得到了隧道曲率与环缝张开量之间的理论公式。这些研究成果使得在实际工程中更容易算得隧道不同位置的管片张开量,但都没有进一步揭示不同管片张开量下隧道周围土体特征,从而很难量化判断隧道所面临实际风险。

对管片张开量的研究<sup>[6-8]</sup>主要以隧道防水为出发点,正常情况下可有效预防渗漏水的发生,但随着隧道服役期增长或外界环境的扰动,管片张开量经常超过防水的限值,这不仅将引发隧道漏水,随着管片张开量的继续增大还会造成隧道侵蚀甚至漏水漏砂,管片周围土体出现侵蚀甚至形成空洞(图1),改变了隧道受力状态并引起隧道产生附加变形及管片接缝张开量增大,进一步可引发漏水漏砂灾害<sup>[9-10]</sup>。仅以隧道防水为目的的管片张开量研究,没有考虑隧道外的土体类型和状态以及隧道漏水后可能引起的土体侵蚀发展规律。因此,急需建立管片不同张开量下的隧道漏水、侵蚀、漏水漏砂的一体化评价体系,量化隧道发生漏水、侵蚀、漏水漏砂的条件,用以指导实际工程。

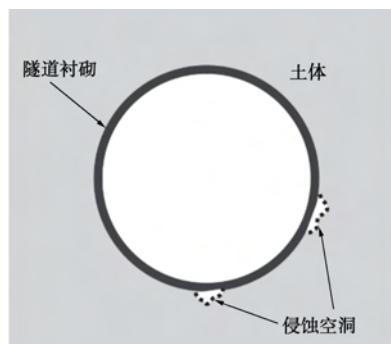


图1 隧道周围的侵蚀空洞<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Erosion voids round tunnel lining<sup>[10]</sup>

为了揭示富水砂土中盾构隧道管片不同张开量下隧道周围水土流失的规律,自行设计了一套能够反映在不同管片张开量下土体流失状态的试验装置,通过试验和理论公式推导,初步研究了福建标准砂和天津细砂在不同水压和管片张开量下的土体渗透发展规律,研究结果对隧道风险的量化评估和治理具有参考意义。

## 1 临界张开量与土体流失状态

在富水砂层中,隧道在最终发生结构性坍塌破坏前,往往经历漏水、土体侵蚀、漏水漏砂3个破坏阶段。为研究方便,与隧道外土体不同的稳定状态相对应,根据已有的工程经验,本文提出将管片在不同阶段间的界限张开量定义为临界漏水张开量 $d_1$ 、临界侵蚀张开量 $d_2$ 及临界漏水漏砂张开量 $d_3$ ,如图2所示。

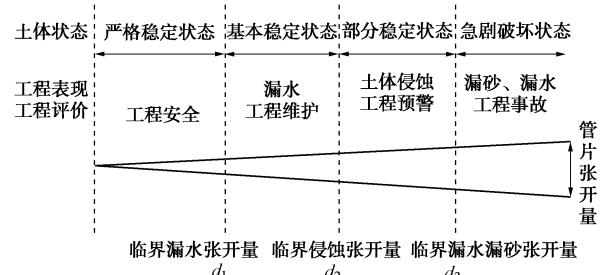


图2 不同管片张开量下土体流失状态

Fig. 2 States of soil loss corresponding to gap width of segment

当管片张开量小于 $d_1$ 时,隧道内处于绝对干燥状态,管片接缝间不发生渗水和漏水,管片周围土体处于严格稳定状态。

当管片张开量大于 $d_1$ 而小于 $d_2$ 时,管片将发生漏水,此时管片接缝处将出现湿渍、渗水、水珠、滴漏、线漏等不同程度漏水现象,这将影响隧道内设备的正常工作,需对隧道进行工程维护,但不会引发土颗粒随地下水通过管片接缝进入隧道,管片外土体处于基本稳定状态,短时间不会造成土体的急剧变形。

当管片张开量大于 $d_2$ 而小于 $d_3$ 时,管片接缝外土体中的细颗粒将随着漏水逐步侵入隧道内,隧道外发生土体侵蚀,长时间可能在隧道外产生局部孔洞并形成土体松动区,但管片外土体中粗颗粒可在接缝处形成土拱使得土体短时间内不会大量流失,但隧道受力发生变化,增大了隧道的局部变形,可能导致隧道管片接缝进一步增大和水土流失现象加剧。

当管片张开量大于 $d_3$ 时,地下水可较大量地通过管片接缝流入隧道内,并携带着砂不断涌入。此时隧道外土体将大量流失并导致地面塌陷和隧道破坏。

针对隧道外的特定土体,得出上述界限张开量,即可对隧道外土体的流失状态进行判定,从而量化隧

道所处的风险。为此, 本文针对福建平潭标准砂(后文简称福建标准砂)和天津市区地铁隧道埋深范围内的主要细砂层(后文简称天津细砂), 开展了上述界限张开量的研究。

## 2 模型试验

### 2.1 试验土样

福建标准砂的级配曲线如图3所示, 其主要物理力学特性如表1所示。另一种土样取自天津地区埋深在18~24 m处的细砂层, 其位于第二相对承压含水层, 在该层砂土中的基坑和隧道发生了大量的漏水、漏砂事故, 其土样如图4所示, 级配曲线如图5所示, 物理力学参数如表1所示。

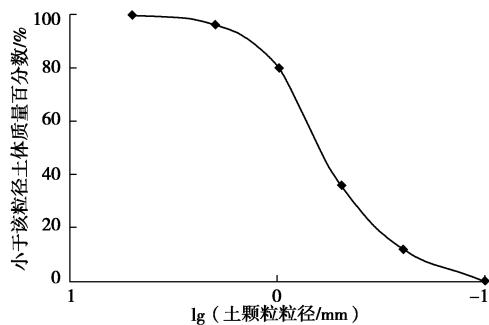


图3 福建标准砂级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution of Fujian standard sand



图4 现场取得的天津细砂

Fig. 4 Tianjin fine sand taken from field

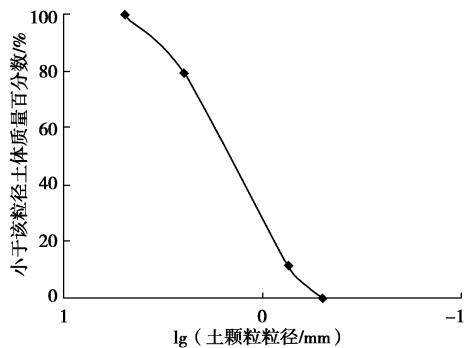


图5 天津细砂级配曲线

Fig. 5 Grain-size distribution of Tianjin fine sand

表1 标准砂和天津细砂的主要物理力学参数

Table 1 Main physico-mechanical properties of Fujian standard sand and Tianjin fine sand

| 参数                                       | 标准砂    | 天津细砂  |
|--|--------|-------|
| 比重 $G_s$                                 | 2.652  | 2.04  |
| 最大孔隙比                                    | 0.822  | 0.66  |
| 最小孔隙比                                    | 0.549  | 0.56  |
| 平均粒径 $D_{50}/\text{mm}$                  | 0.630  | 0.15  |
| 不均匀系数 $C_u$                              | 3.130  | 2.66  |
| 曲率系数 $C_c$                               | 1.170  | 1.06  |
| 内摩擦角/(°)                                 | 36.100 | 32.40 |
| 渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 0.210  | 0.06  |

### 2.2 试验设备

笔者研发设计的一种弹性密封垫、土、水共同作用的盾构隧道渗漏试验系统如图6, 7所示, 其由主试验系统、气泵、加压水箱系统3部分组成, 主试验系统底部为模拟管片张开量的主试验箱, 主试验箱的上部设置有密封顶盖, 顶盖下侧固定可拆卸加压气囊, 同时上侧连接精密调压阀和数显压力表, 主试验箱的下部为土体容器, 主试验箱的底部与两块可移动底板通过盾构隧道原型弹性密封垫密封, 如图8所示, 两块可移动底板之间通过丝杠连接, 试验时, 可通过丝杠来调节两块可移动底板间的缝宽, 此缝宽即为盾构隧道管片的张开量; 气泵通过精密调压阀为可拆卸气囊或者主试验箱内部提供指定压力; 加压水箱系统通过控制自身水头高度, 为主试验箱内部提供指定水压。

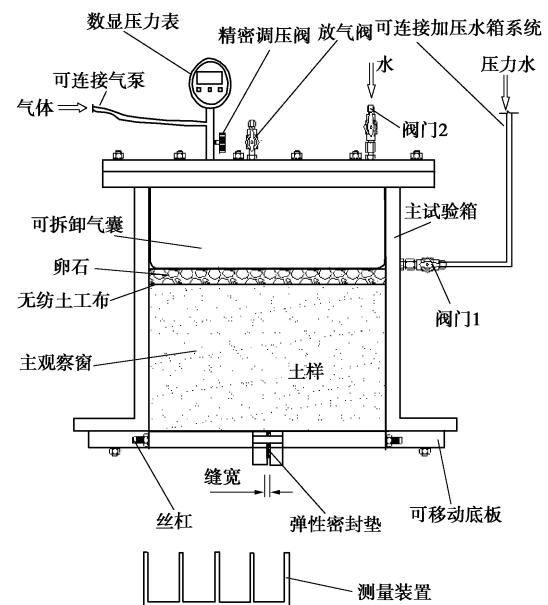


图6 试验设备示意图

Fig. 6 Sketch of experimental devices

通过该套试验装置可进行管片的漏水试验以确定临界漏水张开量, 进行管片周围土体侵蚀试验以确定

临界侵蚀张开量, 进行管片周围土体漏水漏砂试验以确定临界漏水漏砂张开量。



图 7 试验设备实物图

Fig. 7 General view of experimental devices

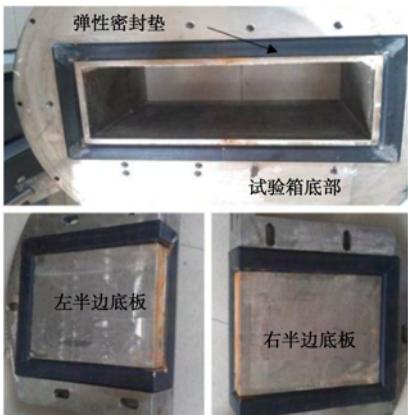


图 8 试验箱底板及弹性密封垫

Fig. 8 Bottom plates of test box and elastic sealing gaskets

### 2.3 管片漏水试验的试验步骤

将图 6 试验设备拆除气囊, 试验箱内放入土样和蒸馏水, 通过气泵加压。试验期间关闭阀门 1、阀门 2, 试验在  $(23\pm2)$  °C 的室温下进行, 试验步骤如下:

(1) 试验系统组装完毕后, 调节可移动底板处的丝杠, 使两块可移动底板之间的缝宽达到预定缝宽, 该缝宽对应盾构隧道管片张开量, 固定可移动底板。

(2) 向主试验箱内装入土样, 土样采取分层装填并压实, 装填至主试验箱内部的 2/3 刻度线处, 密封主试验箱。

(3) 由阀门 2 沿主试验箱壁向土样中加水至饱和, 使水位稍高于土样上表面。

(4) 打开气泵, 通过顶部精密调压阀向主试验箱内部加入气压, 气压作用于水面转化为水压。

(5) 控制气泵, 不断提高水压, 直至弹性密封垫接缝处渗漏。

(6) 将缝宽增大, 并重复步骤 (2) ~ (5)。

(7) 得到不同水压下的临界漏水张开量, 结束试验。

### 2.4 管片周围土体侵蚀试验步骤

利用如图 6 所示试验装置试验, 将气囊连接好。试验期间一直关闭阀门 2, 阀门 1 连接室外水箱。试验在  $(23\pm2)$  °C 的室温下进行, 试验步骤如下:

(1) 试验系统组装完毕后, 调节可移动底板处的丝杠, 使两块可移动底板之间的缝宽达到理论最小张开量, 固定可移动底板。

(2) 向主试验箱内装入土样, 土样采取分层装填并压实, 装填至主试验箱内部的 2/3 刻度线处, 在砂土顶面铺无纺布以及卵石层, 密封主试验箱。

(3) 打开气泵, 通过顶部精密调压阀向主试验系统内部的可拆卸加压气囊施加气压, 气囊作用在土体表面, 转化为土体内部的土压力, 土压力通过试验箱底部的微型孔压计测得。

(4) 通过丝杠调节两块可移动底板的缝宽至预定缝宽, 该缝宽即为盾构隧道管片张开量。

(5) 调节加压水箱系统水头高度, 打开阀门 1, 给主试验箱内部提供特定水头下的水流环境, 保持水流 30 min, 由于初始存在自由掉落的松散土颗粒, 通过反复试验得到松散土颗粒均在 10 g 左右, 因此在 30 min 内流失土颗粒超过该质量时认定发生了土体侵蚀, 并记录该时间段内的侵蚀质量。

(6) 在此缝宽下, 提高加压水箱高度, 重复步骤 (2) ~ (5), 测得该缝宽下不同水压对应的侵蚀质量变化。

(7) 增大两块可移动底板的缝宽值, 重复步骤 (2) ~ (6), 则可得到不同缝宽和水压下的侵蚀质量。

(8) 增大气囊压力, 重复步骤 (2) ~ (6), 可得到不同土压力对侵蚀质量的影响。

### 2.5 管片周围土体漏水漏砂试验步骤

利用图 6 试验系统, 拆掉可拆卸气囊, 关闭精密调压阀, 阀门 2 连接供水设备, 阀门 1 连接溢水管, 保持常水头进行试验。试验在  $(23\pm2)$  °C 的室温下进行, 试验步骤如下:

(1) 调节可移动底板处的丝杠, 使两块可移动底板之间的缝宽达到理论最小张开量, 固定可移动底板。

(2) 向主试验箱内装入土样, 土样采取分层装填并压实, 装填至主试验箱内部的 2/3 刻度线处。

(3) 由阀门 2 沿主试验箱壁向土样中加水至饱和, 待蒸馏水从溢水口溢出后停止供水, 使土样静置 24 h。

(4) 由阀门 2 沿主试验箱壁向主试验箱内持续供水, 阀门 1 连接溢流口可使水头稳定, 调节丝杠, 逐步增大可移动底部之间的缝宽, 直至水砂持续漏出, 同时通过底部测量装置可测量漏出的砂、水各自质量, 试验后测量缝宽, 此缝宽即为临界漏水漏砂缝宽, 对

同一土样重复进行3组试验。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 临界漏水张开量

临界漏水张开量是进行管片防水设计时必须考虑的因素。目前常规的弹性密封垫作用理论是将弹性密封垫作为隧道防水的整体部件, 水压作用下的弹性密封垫受力如图9所示。

当弹性密封垫被压缩时, 产生的弹性密封垫初始接触压力为 $P_0$ , 当水压 $P_w$ 作用后, 产生的附加接触面压力为 $P_1$ , 则密封垫总接触压力为

$$P = P_0 + P_1 \quad (1)$$

弹性密封垫发生渗漏的条件如下式所示:

$$P_w > \alpha P = \alpha(P_0 + P_1) = \alpha(P_0 + \beta P_0) = \alpha(1 + \beta)P_0 \quad (2)$$

式中  $\alpha$  与密封材料的材质、耦合面的表面状态有关, 取值小于1;  $\beta$  与材料硬度、断面形式相关。定义弹性密封垫防水系数如下式:

$$k = \alpha(1 + \beta) > 1 \quad (3)$$

因此弹性密封垫的最大防水压力 $P_{\max}$ 可用下式表示:

$$P_{\max} = kP_0 \quad (4)$$

对于非膨胀的弹性密封垫,  $k$ 值取1.3左右。实际设计过程中, 往往已知弹性密封垫的最大防水压力, 则可根据 $P_0$ 由密封垫压缩试验曲线得出弹性密封垫的临界漏水张开量。

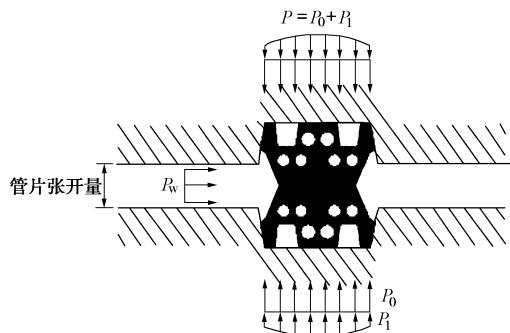


图9 弹性密封垫作用原理

Fig. 9 Action principle of elastic sealing gasket

国家标准《高分子防水材料》<sup>[11]</sup>规定对于弹性密封垫的性能可进行室内试验(“一字缝”或“T字缝”试验), 以验证其断面结构是否满足防水性能的要求, 其推荐的“T字缝”试验设备如图10所示。试验装置材料为钢材或者混凝土, 试验时首先向设备内注水, 待有水从排水阀门流出后关闭阀门, 从进水阀逐步增加水压力, 直至从弹性密封垫处出现渗漏水, 则此时水压为该张开量下的临界漏水压力。

然而上述试验设备仅考虑水压对弹性密封垫的影响, 弹性密封垫实际工作时, 赋存环境不仅有地下水,

还有土体, 这将对弹性密封垫的耐水性产生影响。

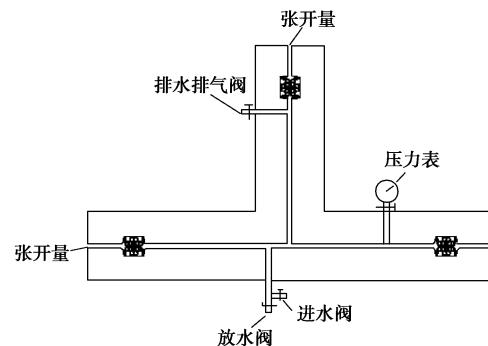


图10 “T字缝”水密性试验设备

Fig. 10 T-type experimental devices for water tightness tests

为了对比土体对弹性密封垫耐水性的影响, 在这组试验中同时进行了常规水密性试验, 即利用该套装置, 在不放入土体的情况下开展相同试验。考虑土体影响的水密性试验与常规水密性试验得到的临界漏水张开量对比如图11所示。可以看出, 弹性密封垫所能承受的临界水压力均随缝宽的增大而降低, 这里的张开量均指管片张开量(图9)。与常规漏水试验相比, 在接缝张开量小于5.5 mm时, 考虑土体影响的临界漏水压力明显降低, 最大降幅达20%; 随着缝宽的增大, 土体对临界漏水压力的影响越来越小, 当缝宽超过6 mm后, 土体对临界漏水压力的影响可以忽略。

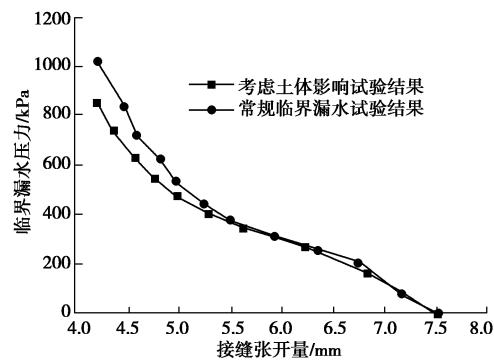


图11 考虑土体影响的临界漏水张开量(福建标准砂)

Fig. 11 Critical gap widths of water leakage considering invasion of sand (Fujian standard sand)

在高水压作用下, 临水面的弹性密封垫会发生挤压变形<sup>[12]</sup>, 接触面在水压作用下逐步张开, 若有土颗粒存在, 细小土颗粒将侵入接触面, 如图12所示, 使得密封垫间的接触面积减小, 产生应力集中, 并引起应力重分布, 接触面变形进一步增大, 最终引发水密性下降, 发生漏水现象。此外, 由于密封垫与沟槽的接触应力两侧低, 中间高, 以及密封垫与沟槽之间可能存在粘接不牢的地方, 土体颗粒同样易从两侧或者是粘接不牢的地方逐步侵入, 使在密封垫与沟槽之间的接触面发生漏水。

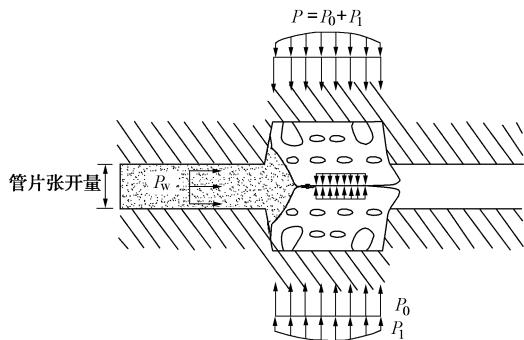


图 12 砂土逐步侵入致漏机理

Fig. 12 Leakage mechanism due to invasion of sand

临界漏水张开量试验结束后, 在弹性密封垫底发现侵入的较细的砂土颗粒, 如图 13 所示, 这初步证实了上述推论的正确性, 即砂土逐步侵入将导致弹性密封垫水密性减弱。

因此, 在对临界漏水张开量进行评估时, 若不考虑砂土逐步侵入的影响, 可能导致弹性密封垫的防水性能被高估。

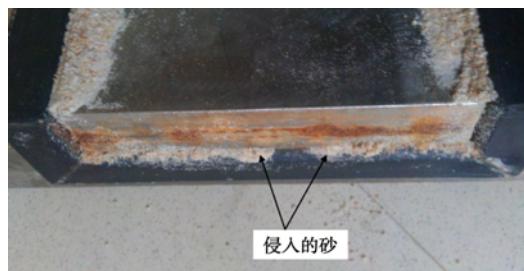
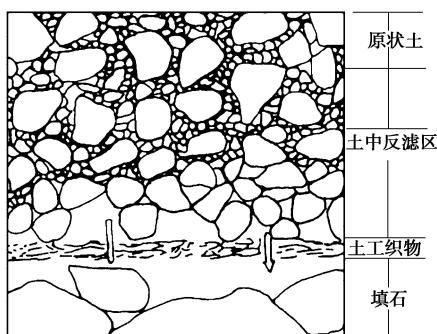


图 13 试验后底板侵入的砂

Fig. 13 Intrusive sand on bottom plate after tests

### 3.2 临界侵蚀张开量

由于土颗粒的土拱效应, 当管片有一定张开量后, 并不会立即引发水砂流出, 而是在缝隙周围形成土拱。土拱中大颗粒成拱的可能性较大, 大颗粒成拱后形成骨架, 在水流作用下, 细小颗粒将穿过土骨架间隙发生流失, 形成侵蚀。当骨架颗粒无法形成土拱时, 持续的漏水漏砂将会发生。如图 14 所示, 这一机理已在土工织物天然滤层的形成过程中有所揭示<sup>[13]</sup>。

图 14 天然滤层形成机理<sup>[13]</sup>Fig. 14 Mechanism of formation of natural filter layer<sup>[13]</sup>

对管片周围土体建立如图 15 所示简化理论模型。土颗粒 1 为即将发生侵蚀的土颗粒, 假设单个土颗粒的重力可以忽略, 其受到上部土体传来的土压力, 相邻土颗粒的摩擦力以及水流的拖拽力。该颗粒即将发生侵蚀时, 有如下关系式:

$$A_0 \sigma'_p + 2\tau_c A_c = 2\sigma'_{pv} \tan \varphi A_0 \quad , \quad (5)$$

式中,  $A_0$  为土颗粒横截面积,  $\sigma'_p$  为土颗粒竖向所受应力,  $\tau_c$  为水流对土颗粒剪切应力,  $A_c$  为水作用在土颗粒上的有效摩擦面积,  $\sigma'_{pv}$  为土颗粒侧向所受应力,  $\varphi$  为土颗粒内摩擦角。

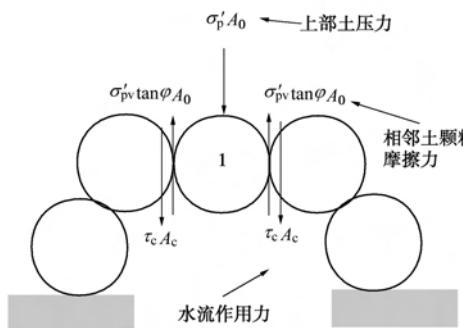


图 15 土体侵蚀模型

Fig. 15 Model of soil erosion

假设土颗粒所受水平应力与竖向应力有如下关系<sup>[14]</sup>:

$$\sigma'_{pv} = k_0 \sigma'_p \quad , \quad (6)$$

式中,  $k_0$  为静止土压力系数。定义  $\alpha$  为水流作用于土颗粒的有效摩擦面积与土颗粒横截面积之比,

$$\frac{A_c}{A_0} = \alpha \quad . \quad (7)$$

将式 (6)、(7) 代入式 (5), 得到水流对土颗粒的剪切应力为

$$\tau_c = \frac{(2k_0 \tan \varphi - 1)\sigma'_p}{2\alpha} \quad . \quad (8)$$

水流对土颗粒的剪切应力可通过下式进行估算<sup>[15]</sup>:

$$\tau_c \cong \frac{\rho_w g d_0 n H}{2H_s} \quad . \quad (9)$$

式中  $\rho_w$  为水的密度;  $H_s$  为土样高度, 实际工程中为管片缝隙以上透水层厚度;  $H$  为缝隙处水头;  $n$  为土体孔隙率;  $d_0$  为弹性密封垫间张开量。将式 (8)、(9) 联立, 可得临界侵蚀张开量的理论公式

$$d_2 \cong d_{ini} + \frac{(2k_0 \tan \varphi - 1)\sigma'_p H_s}{\alpha \rho_w g n H} \quad , \quad (10)$$

式中,  $d_{ini}$  为弹性密封垫接触力为 0 时的管片张开量,  $\alpha$  与土颗粒粒径、种类、形状、密实度等因素有关, 该参数的确定有待进一步研究, 目前可根据试验反算分析求得。

由式(10)可知, 临界侵蚀张开量与土颗粒竖向所受应力和土层厚度成一次正比关系, 与 $\alpha$ 、缝隙处水头、土体孔隙率成一次反比关系。

图16为福建标准砂在不同临界侵蚀张开量下所对应的临界侵蚀水压试验值, 并给出了通过式(10)拟合得到的理论曲线, 可以看出, 理论值与试验值的变化趋势基本一致, 证明式(10)具有一定的适用性, 并且可以反算得到福建标准砂的 $\alpha$ 值为0.14。

图16同时表明, 当管片张开量小于11 mm时, 随着管片张开量的增大, 其对应的临界侵蚀水压值迅速降低; 当管片张开量大于11 mm时, 缝宽对管片临界侵蚀水压影响不大, 随着管片张开量增大, 临界侵蚀水压值缓慢下降。

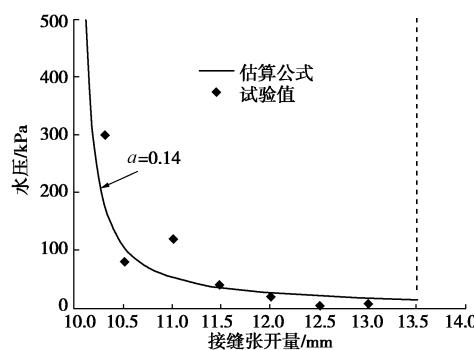


图16 不同管片张开量下的临界侵蚀水压 (福建标准砂)

Fig. 16 Influences of gap widths on critical hydraulic pressure of soil erosion (Fujian standard sand)

福建标准砂在不同管片张开量和水压下的侵蚀土体质量如图17所示, 可以看出, 随着管片张开量与水压的增大, 土体侵蚀质量越大。当水压小于40 kPa时, 随着水压的增加, 土体侵蚀质量明显增加, 这时管片张开量的影响更大; 而当水压值大于40 kPa时, 土体侵蚀质量增加不明显。当土体通过管片缝隙发生侵蚀后, 可通过降低水压或缝宽减少其侵蚀量。

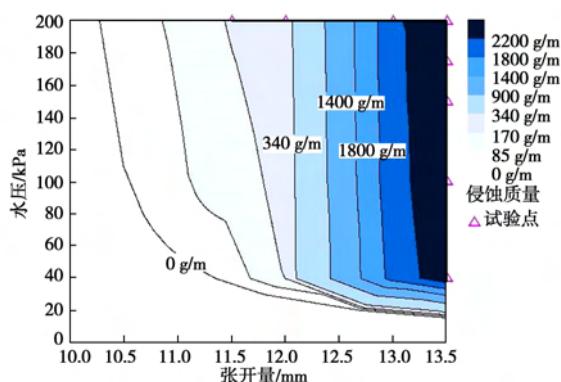


图17 管片张开量与水压对侵蚀质量的影响 (福建标准砂)

Fig. 17 Influences of gap width and hydraulic pressure on mass of soil erosion (Fujian standard sand)

对于福建标准砂, 管片缝隙周围土体所受有效应力与水压力对侵蚀质量的影响如图18所示。由图18可以看出, 水压相同时, 有效应力越大, 土体越密实, 越不易发生侵蚀; 有效应力相同时, 水压越大, 侵蚀质量越大。因此对管片周围侵蚀情况进行评估时, 应综合考虑有效应力与孔压的关系, 并不是隧道埋深越大, 管片周围土体越容易发生侵蚀。

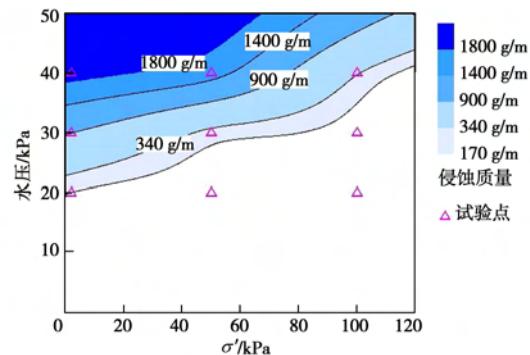


图18 缝隙周围有效应力与水压对侵蚀质量的影响 (福建标准砂)

Fig. 18 Influences of effective stress around gap and hydraulic pressure on mass of soil erosion (Fujian standard sand)

福建标准砂侵蚀后土体的级配与原始级配对比如图19所示, 可以看出, 土体侵蚀后级配的变化主要体现在粒径 $D_{90}$ 附近的骨架颗粒与粒径 $D_{10}$ 附近的细小颗粒。骨架颗粒流失一方面由于初始松散颗粒在自重下的流失, 另一方面, 侵蚀过程中骨架颗粒会不断重新组合成拱, 这将导致部分骨架颗粒损失。粒径 $D_{10}$ 组分的流失主要是细小土颗粒在水流作用下发生侵蚀所致。总体上, 侵蚀使级配曲线变得更加平缓。

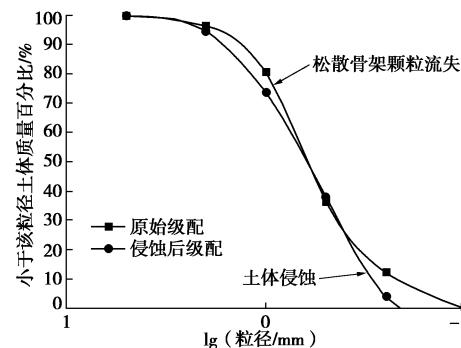


图19 侵蚀前后土体级配变化 (福建标准砂)

Fig. 19 Grain-size distribution of standard sand before and after soil erosion (Fujian standard sand)

### 3.3 临界漏水漏砂张开量

对于福建标准砂, 绘制临界漏水漏砂张开量与土体不均匀系数的拟合关系曲线如图20所示, 可以看出, 临界漏水漏砂张开量主要与土颗粒的组成有关, 粒径 $D_{90}$ 越大, 临界漏水漏砂张开量越小。当不均匀

系数  $C_u$  小于 2 时, 不均匀系数越大, 临界漏水漏砂张开量越小, 但当不均匀系数超过 2 时, 不均匀系数对临界漏水张开量的影响变得很小。

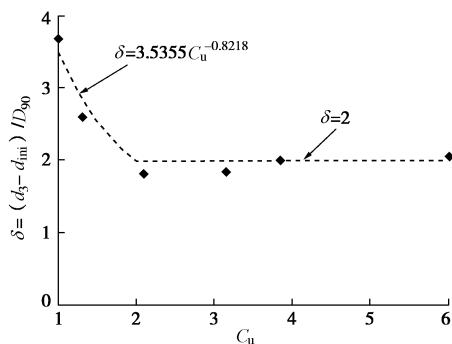


图 20  $d_3$  与土体不均匀系数的拟合关系曲线 (福建标准砂)

Fig. 20 Relationship between  $d_3$  and nonuniformity coefficient (Fujian standard sand)

此外临界漏水漏砂张开量  $d_3$  还受到其它因素的影响, 如土样级配、密实度等。更详细的相关试验结果已经发表在文献[16]中, 这里就不在累述。

### 3.4 土体流失状态的判定

对于福建标准砂和天津细砂, 在上述临界张开量试验结果的基础上, 得到二者在不同管片张开量与水压下的土体流失状态如图 21, 22 所示。根据不同的水压及张开量条件, 由图 21, 22 可初步对福建标准砂和天津细砂所处的流失状态进行判定, 从而量化隧道所处的实际风险。

天津细砂平均粒径  $D_{50}$  为 0.15 mm, 福建标准砂平均粒径  $D_{50}$  为 0.63 mm, 天津细砂较福建标准砂小, 粒径  $D_{90}$  与小粒径  $D_{10}$  的差值也小很多, 因此成拱相对困难<sup>[11]</sup>, 故其侵蚀区范围更窄; 同时, 细小的颗粒以及土体较高的流动性使得其漏水漏砂区域更宽, 更易发生漏水漏砂事故。

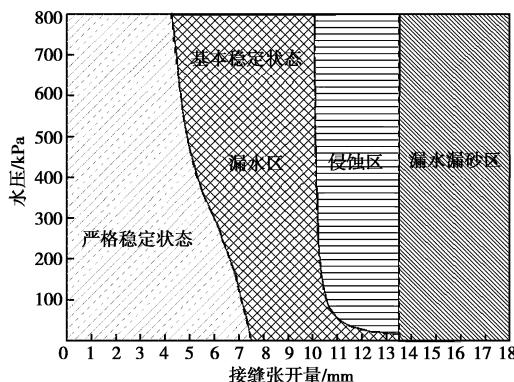


图 21 福建标准砂不同张开量与水压下的土体流失状态

Fig. 21 Influences of gap width and hydraulic pressure on states of soil loss of Fujian standard sand

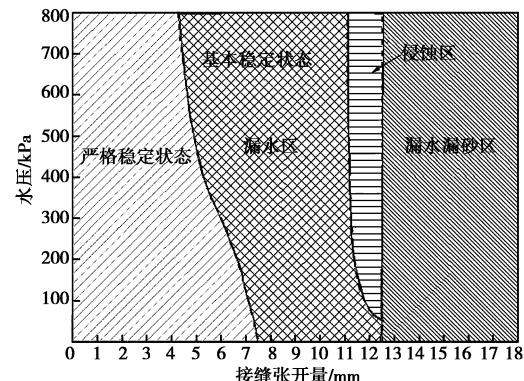


图 22 天津细砂不同张开量与水压下的土体流失状态

Fig. 22 Influences of gap width and hydraulic pressure on states of soil loss of Tianjin fine sand

## 4 结 论

本文通过自行研发设计的一套能够反映管片在不同张开量下土体流失状态的试验设备, 研究了盾构管片在不同张开量下隧道周围土体的流失状态, 得出如下结论:

(1) 通过模型试验揭示了隧道外土体在不同管片张开量下发生侵蚀、流失的机理。试验表明, 土体的逐步侵入过程会降低弹性密封垫的水密性, 影响弹性密封垫长期防水性能, 在对接缝进行设计和评估时应考虑土体侵入的影响。

(2) 提出了管片接缝周围土体发生侵蚀时的临界侵蚀张开量的理论计算公式, 并通过试验结果初步验证了其合理性。临界侵蚀张开量与土颗粒竖向所受应力和土层厚度成一次正比关系, 与  $\alpha$ 、缝隙处水头、土体孔隙率成一次反比关系。

(3) 当土体通过管片缝隙发生侵蚀后, 隧道外土体侵蚀质量与管片张开量和水压成正比, 与缝隙周围有效应力的大小成反比。对管片周围侵蚀情况进行评估时, 应综合考虑有效应力与孔压的关系。对于福建标准砂, 发生侵蚀而流失的土体主要是粒径  $D_{90}$  附近的骨架颗粒与粒径  $D_{10}$  附近的细小颗粒, 侵蚀使土体级配曲线变得更加平缓。

(4) 针对福建标准砂及天津细砂, 提出了考虑水压的管片临界张开量, 可用于管片不同张开量下土体流失状态的评估, 为隧道病害、灾害的预防与治理提供参考。

本文主要研究了环缝张开量与水压对土体流失状态的影响。实际上, 弹性密封垫的类型、截面形式, 土体的级配、黏粒含量、密实度也可能对隧道接缝外土体的侵蚀、流失规律产生影响, 仍需进一步对这些因素进行全面研究与分析, 并从宏观和微观参数出发

对不同漏水状态下管片的受力状态进行进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991: 132 - 133. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield tunneling method[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991: 132 - 133. (in Chinese))
- [2] 白云, 肖晓春, 胡向东. 国内外重大地下工程事故与修复技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 41 - 46. (BAI Yun, XIAO Xiao-chun, HU Xiang-dong. Domestic and international important engineering accidents and repair technology[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012: 41 - 46. (in Chinese))
- [3] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1092 - 1101. (WANG Ru-lu, ZHANG Dong-mei. Evolution of transverse deformation and assessment index for operation shield tunnel under surface surcharge in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1092 - 1011. (in Chinese))
- [4] 朱斌. 软土盾构隧道横断面变形规律及控制限值研究[J]. 铁道工程学报, 2014(9): 71 - 76. (ZHU Bin. Research on the law and controlled limit value of transverse deformation for shield tunnel in soft clay[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(9): 71 - 76. (in Chinese))
- [5] 郑永来, 韩文星, 童琪华, 等. 软土地铁隧道纵向不均匀沉降导致的管片接头环缝开裂研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(24): 4552 - 4558. (ZHENG Yong-lai, HAN Wen-xing, TONG Qi-hua, et al. Study on longitudinal crack of shield tunnel segment joint due to asymmetric settlement in soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(24): 4552 - 4558. (in Chinese))
- [6] 朱祖熹. 中日德盾构隧道衬砌接缝密封垫研究技术之比较[J]. 地下工程与隧道, 1994(4): 11 - 19. (ZHU Zu-xi. Comparison of lining joint gasket research techniques among China, Japan and Germany[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1994(4): 11 - 19. (in Chinese))
- [7] 石修巍, 向科, 臧延伟. 盾构法隧道管片接缝密封垫设计及试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2007(增刊1): 40 - 42. (SHI Xiu-wei, XIANG Ke, ZANG Yan-wei. Design and test research of lining joint gasket[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2007(S1): 40 - 42. (in Chinese))
- [8] 拓勇飞, 舒恒, 郭小红, 等. 超高水压大直径盾构隧道管片接缝防水设计与试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊1): 227 - 231. (TUO Yong-fei, SHU Heng, GUO Xiao-hong, et al. Design and experimental study on waterproof gasket of large-diameter shield tunnel under ultra high water pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 227 - 231. (in Chinese))
- [9] TAN Z, MOORE I D. Effect of backfill erosion on moments in buried rigid pipes[M]// Board Meeting. Washington D C: Transportation Research, 2007.
- [10] MEGUID M A, DANG H K. The effect of erosion voids on existing tunnel linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(3): 278 - 286.
- [11] GB 18173.4—2010 高分子防水材料[S]. 2010. (GB 18173.4 — 2010 Polymer water-proof materials[S]. 2000. (in Chinese))
- [12] MARC S. Small but important-gaskets for tunnel segments[C]// International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling. Bangkok, 2006: 239 - 248.
- [13] 康顺祥, 陆士强. 天然滤层模型[J]. 防渗技术, 1997, 3(4): 1 - 5. (KANG Shun-xiang, LU Shi-qiang. Model of natural filter[J]. Technique of Seepage Prevention, 1997, 3(4): 1 - 5. (in Chinese))
- [14] WAN C, FELL R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(4): 373 - 380.
- [15] BUDHU M. Soil mechanics and foundations[M]. Danvers: John Wiley & Sons, 2011.
- [16] 郑刚, 戴轩, 张晓双. 地下工程漏水漏砂灾害发展过程的试验研究及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2458 - 2471. (ZHENG Gang, DAI Xuan, ZHANG Xiao-shuang. Experimental study and numerical simulation of leaking process of sand and water in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2458 - 2471. (in Chinese))