

# 飞马度 (FERMADUR) 底板堵漏施工工艺

薛艳飞

中铁十四局集团电气化工程有限公司

**摘要：**隧道渗漏是明挖法施工面临的一个重要问题，华东地区过湖隧道变形缝的渗漏几乎是一个通病，渗漏通道由小到大，日积月累，容易造成隧道外围水土失衡。苏州地区地下水丰富，属于沙性土质，渗流速率大，经常遇到地下流沙层。变形缝渗漏量大，可能夹带泥沙，日积月累，甚至造成瞬间出现大量泥沙的险情，造成地基扰动，危及公共安全。因此本文结合苏州市独墅湖隧道底板飞马度压缩密封堵漏密封施工工艺的工程实践，配合不打孔注浆的情况下，做到解决底板反复渗漏隐患。

**关键词：**隧道；渗漏；底板；飞马度；压缩密封

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.03.098

## 一、工程简介

独墅湖大桥隧包括独墅湖隧道、独墅湖高架桥、星湖街下穿通道、星港街下穿通道等。主线西起东南环立交高架，东至隧道东出口，具体桩号为K0+000~K7+346，主道全长7.346公里。其中高架桥长3.43公里，隧道长3.46公里，地面道路650米，包括星湖街匝道出入口至星湖街地面段范围，为双向六车道城市快速路，隧道段运行时间为24小时/天，设计车速为60公里/小时，工程总造价估算为24亿元左右，2007年10月10日建成正式通车。隧道横断面采用两孔一管廊的箱涵布置形式，每60米设置一道变形缝，每孔设单向三车道。主体采用钢筋混凝土设计，基础采用抗拔桩设计。本次施工对独墅湖隧道南洞K4+619进行底板飞马度工艺堵漏，并设计实现长久动态密封。

## 二、变形缝现状

变形缝由于其非周期性和周期性不均匀沉降、热胀冷缩变形，振动和扰动，特别是地下工程变形缝，在地质条件差，富水和地下水位高、地下流沙层等地质环境下，变形缝素有“十缝九漏”之说。变形缝渗漏，容易发展成为大涌水，漏泥沙，土桩塌陷。渗漏的失控，除了会导致水的泛滥，反复维修，影响建筑物正常使用及寿命，严重还会导致地下水土失衡，危及建筑物结构安全及周边公共安全。变形缝防水，从上世纪50年代以前的“粘结防水、塑性防水”，过渡到“线状”（U型或口型）中埋橡胶止水带主要防线，在混凝土浇筑及中埋止水带安装期间，止水带的定位和对接，止水带周边混凝土密实，直接影响止水带的水密性。止水带在安装期间破损和安装缺陷，在实际工程中发生的概率非常高，一旦发生导致渗漏，中埋隐藏在结构中，看不见，摸不着，一般不可逆转，修复中埋橡胶止水带非常困难。为了带水堵漏密封，创新设计飞马度后嵌圆形压缩密封条原理（艺术材料和贯入工艺），配套压缩密封缝隙带水修缝材料RV、RL，配套密封胶保护和背衬，提高抵抗负水压。

## 三、飞马度 (FERMADUR) 密封构件材料

飞马度 (FERMADUR) 圆形压缩密封体条，具有“圆形”截面，由均匀分布的、封闭的、“细胞腔”微观结构组成，在显微镜下，各个方向的“细胞数”几乎完全相同，一件艺术品。柔韧可弯曲，在弯曲时不易形成张力起皱，构型容易可靠。对比照片中左边是飞马度圆形压缩密封体条截面图，右边是肉眼可见的无序的发泡橡胶棒，无法达成压缩密封的设计要求（见下图）。



飞马度Fermadur S38圆形压缩密封体条的性能指标如下：

项目	数值	试验方法
主要材质	丁苯橡胶	
重量	970g/m	
外观	外表光滑，圆形截面	
截面	直径38mm，细胞式蜂窝巢室结构	
施工对应缝隙宽度	24-26.5mm	
①拉伸强度 $\geq$	2N/mm <sup>2</sup>	GB/T 528-2009
②拉断伸长率 $\geq$	350%	GB/T 528-2009
③压缩永久变形 $\leq$	$\leq 20\% (70^{\circ}\text{C} \times 24\text{h} \times 25\%)$	GB/T 7759.1-2015 GB/T 7759.2-2014
抗水压	大于20米水头（单独）	自制密封腔体打气气压测定或者自制模型加水压测试

## 四、飞马度 (FERMADUR) 压缩密封原理工艺：

沉管隧道使用的GINA止水带和FERMADUR是全球知名的压缩密封原理产品。GINA是在海底管节拼装时利用水力压接法和预埋拉锁张拉，形成所需要的挤压力度。FERMADUR是一种后嵌缝挤压密封构件，系统设计需要达到足够的压缩回弹力，不是可以直接可以推入缝隙的。飞马度在嵌入方式设计上也是非常独特的方式，采用专用的尼龙凿子及重锤（6磅），卡在缝口左右强力敲击，形成一次次细微地旋转滚动，两边腾挪挤入缝隙之中。达成适度的压缩比（35%左右），既能保证通过专用机械或工具强力旋转挤入时橡胶条不会机械受损，同

时满足挤压变形后压缩密封条对两边平行的侧壁可以形成对称、强大的气压回复力，从而实现缝隙即时物理止水密封功能，以及背水面承压的要求。

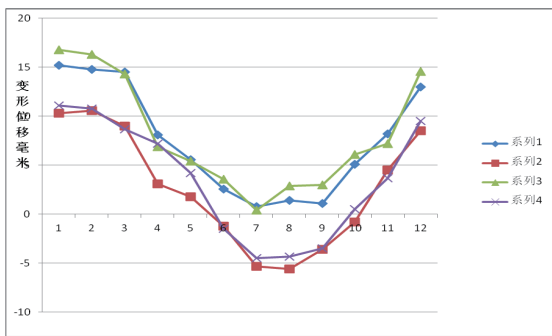
飞马度设计成圆形截面的简单设计，以及微观封闭均匀的小气球艺术，保证的在强力滚动嵌入过程中，构件密封性能对方向的依赖性最小，同时依靠可靠闭孔的微小细胞腔，保证在几十年的服役过程中，回复力几乎没有衰减。

### 五、飞马度嵌缝槽建立

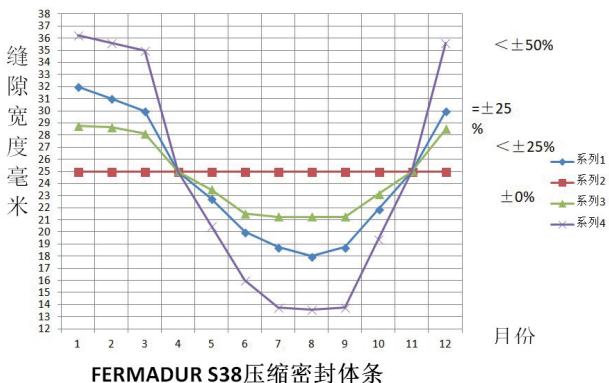
为了完美实现飞马度压缩密封原理及设计的变形的密封线，作为一个嵌缝型密封构件系统，修缮变形缝结构，建立具有一定深度（H）和宽度（D）的嵌缝槽，是飞马度密封施工的关键。该项目设计嵌缝槽15cm，宽度25mm。配套压缩密封缝隙带水修缮材料RV、RL，具有带水作业、新老接缝水密、高度防裂、快速强度的特性。接缝水密性可以通过后面水压进行检查，材料耐久性经过国内高铁隧道20多年的强振环境的使用，耐久安全。通过该工程的试验，发现缝隙周边因为板块运动开裂、重复钻孔注浆破坏，修整缝隙结构是必须的。

### 六、变形的适应

建立对变形缝可控长久密封的弹性防水线，必定要研究该项目的变形缝一年四季的热胀冷缩变形的曲线。设计的密封防线能适应该变形，保持密封。通过全年每月对独墅湖隧道缝宽的测试数据，独墅湖隧道几条变形缝参考变形曲线如下，冬天和夏天最大的热胀冷缩达到接近15mm。



该工程使用直径为38mm的飞马度（Fermadur）压缩密封体条，其在缝隙全年热胀冷缩变形中对应的缝宽曲线如下图：



通过大量工程模拟实验以及工程实践，缝隙在 $\pm 25\%$ 范围（18mm-25mm-32mm）内变形，单道压缩密封能保持密封。缝隙宽度拉伸大于25%，即缝宽大于32mm，如果缝隙侧壁光滑，依然能和飞马度压缩密封体条密贴无缝，但是回复力可能不足以抵抗负水压，因此通过外侧配套密封胶保护和背衬，提高抵抗负水压，压缩密封体条不被水压挤出。

### 七、大伸缩变形配合

如果缝隙宽度大于压缩密封体直径，飞马度与嵌缝槽侧壁接口就会产生缝隙，开始渗漏。为了适应过大伸缩变形，课题早期在压缩密封修整结构，并提供即时止水密封的基础上，设计伸缩量可调整，接缝化学锚固密封可控的锚式防水带。锚式防水带材质自身具有大于600%的延伸率，还可根据工程调节自由伸缩宽度。

考虑到隧道运维，施工时间和速度的极大边界要求，以及提供胶粘锚固所必须的无水作业基面非常困难，在压缩密封带水封闭的基础上，发明了压缩密封物理接口插针化学灌浆工艺，无需钻孔方便形成进浆，以及出气、出水、出浆的灌浆回路，灌注水性粘结力强、延伸率大不脱胶、抗水稀释置换缝隙中的水、形成无发泡具有微膨胀的凝胶灌浆胶圈。浆液更加可靠液体填充，精细控制灌浆，实现橡皮筋的粘弹性胶带模型原理，克服打密封胶无法实现不脱胶的问题。与德国的变形缝灌浆模型不谋而合。如下图：



用于伸缩缝的，水稀释、具有橡胶化性能的丙烯酸盐浆液性能指标如下，而非传统用于土体灌浆的丙烯酸盐浆液。

项目	数值	试验方法
粘度	30-70	JC/T 2037-2010
遇水膨胀性能	25-125%	JC/T 2037-2010
断裂延伸率	300-750%	JC/T 2037-2010

通过使用各种创造性材料，通过设计的可控性施工工艺。更少依赖工人施工，变不可控为可控。冬季施工时缝隙宽度接近最大，相对比较安全。

### 八、施工方案

#### (一) 施工步骤

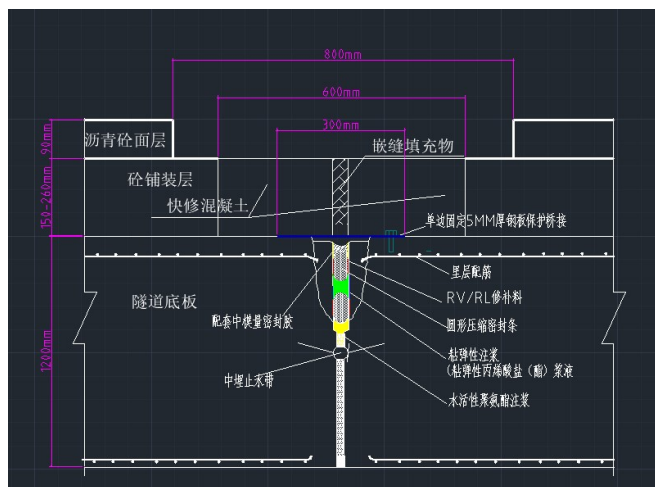
凿除沥青路面及铺装层→开凿及清理V型槽（切割

钢筋)→修理规整缝隙→贯入第一道飞马度→钻注浆孔→贯入第二道飞马度、打密封胶→双液泵注丙稀酸盐浆液→恢复混凝土铺装层→恢复沥青路面层。

## (二) 路面施工方案

### 1. 路面开槽

路面开槽：铣刨机铣刨已经切缝的铺装层沥青砼，铣刨至沥青砼全厚9cm，铣刨槽宽0.8米。路面开槽图如下：



### 2. 混凝土铺装层拆除

沥青砼铺装层拆除后，用切割机在变形缝两侧各30cm的砼找平层上切缝，破碎机破除找平层砼15—26cm厚，见上图。

### 3. 飞马度压缩密封(2道)

#### (1) 开凿U槽、清理及修缝

沿变形缝在结构底板上开凿10cm宽，12cm深的“U”型槽，U槽尽量随变形缝原有走向开凿，侧壁需垂直但是大体顺平。待U型槽清理完毕后进行修缝施工，先立模修两侧阴角的角墩，水平和垂直长度至少20CM，保证一体成型。然后从两侧开始整块模板立模修筑，模板的一侧使用泡沫板封堵，另一侧插入之前修筑好的标准缝，使用自流平材料两侧交替轮流往中间修筑。若之前凿除的U型槽标准宽度外有凿除掉的松散混凝土缺陷，需要先使用RV对缺陷进行修补，再整体浇筑标准缝。

#### (2) 贯入第一道飞马度和特制水活性聚氨酯注浆

使用长尼龙凿将飞马度贯入到缝隙中，贯入深度距离缝顶6.5cm。可采用三人顺向贯入法，流水线作业，第一个人贯入卡住飞马度，第二人往里加深，将飞马度整个贯入进缝内，第三人根据要求，严格控制8.5cm的贯入深度。在飞马度侧壁插入注浆管特制针头，与注浆泵进行连接，并每隔2米插入观察针头，出浆后移至下一个观察口，从一侧往另一侧依次注浆，直至端头出浆。

#### (3) 贯入第二道飞马度和粘弹性丙稀酸盐注浆

贯入第二道的飞马度，贯入深度距离缝顶1cm，依然使用三人顺向贯入法，第三人严格控制灌入深度，保证两道飞马度之间空腔达到2cm。另外每隔3米，可预留

一个注浆观察口不凿入，方便后期的灌浆和观察。从低处一侧通过漏斗倾倒配置好的浆液，观察员依次观察每个注浆观察口浆液的位置，一旦溢出，立马将观察口的飞马度贯入到位，保证灌入的连贯性和密实度。两个端头观察到出浆后，停止灌浆，待浆液反应后，将第二道预留的飞马度贯入到标准位。

#### (4) 保护钢板安装

沿飞马度打入厚度1CM的密封胶，对飞马度进行保护。然后在底板上单侧使用膨胀螺丝固定5mm厚钢板，保护整套飞马度压缩及配套密封系统。

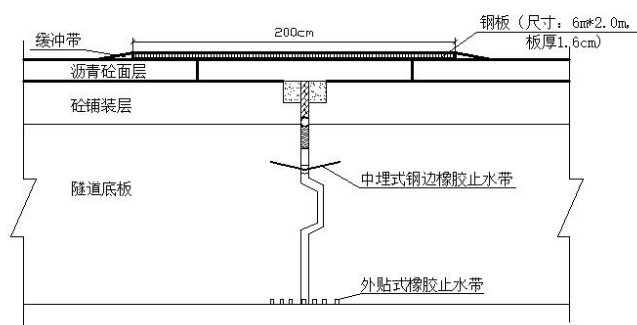
### 4. 路面临时恢复

对变形缝密封系统完成后，恢复铺装层砼，保证路面的耐久性。按原规格型号设置单层钢筋网片，混凝土的等级不低原混凝土，浇筑时振捣充分，沿底板变形缝设15mm厚发泡PE板，恢复铺装层变形缝。

### 5. 路面临时恢复

为保证白天路面正常通行，在路面沟槽上方加盖钢板(规格6000mm\*2000mm\*16mm)。因拆除的铺装层较宽，可采用砂袋填塞沟槽。为保证行车舒适性，在钢板两边安装橡胶缓冲带。盖钢板布置示意图如下：

钢板覆盖临时通行立面示意图



### 6. 沥青砼摊铺

采用人工摊铺沥青砼，压路机碾压，恢复原沥青砼路面。

## 九、总结

施工结束后，经过一个月的复查，未发现复漏现象，达到防水设计要求，解决了路面积水问题，为市民的出行提供了安全保障，在今后的工作中我们还要加强巡视和观测，探讨有效的解决办法，总结以前的施工的经验，学习新的堵漏技术，做到防治结合。

### 参考文献

[1] 陈森森. 城市地铁堵漏施工综合技术实践 [C]. // 全国第十八届防水保温材料技术交流会论文集. 2016: 17-21.

[2] 中铁城建集团第三工程有限公司, 中铁城建集团有限公司, 苏州高新区(虎丘区)城市建设管理服务中心. 一种预防隧道结构底板渗漏水上反的排水系统的施工方法: CN202110279746. 0 [P]. 2021-05-25.

[3] 中交一公局集团有限公司, 中交一公局厦门工程有限公司. 一种飞马度+丙稀法隧道变形缝防水结构及方法: CN202010916340. 4 [P]. 2020-12-04.