

文章编号: 2097-096X(2025)-04-0401-11

基于地质和渗控双因素的富水地层隧洞堵排设计研究

李 宇¹, 韩 科², 段庆伟¹, 杨浩鹏³, 曹瑞琅¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 广东粤海水务股份有限公司, 广东 深圳 518018;

3. 广东粤海西供水有限公司, 广东 湛江 524000)

摘要: 制定合适的堵排设计方案对于保障赋存水环境复杂水工隧洞的安全至关重要。通过分析堵排措施后隧洞涌水量及围岩孔隙水压演化特征, 利用流固耦合数值模拟方法, 明确了衬砌外水压力分布规律以及结构受力特性, 提出了基于地质和渗控双因素的富水地层隧洞堵排设计方法。结果表明: 高压富水地层隧洞外水压力不仅受制于地质因素还取决于渗控措施, 应考虑灌浆和排水措施对外水压力折减; 排水措施入岩深度过大将削弱灌浆圈堵水作用, 反之则影响排水泄压效果, 入岩深度达到灌浆圈深度 30%~50%时减压控渗综合效果较佳; 为解决排水孔非全断面布置引起衬砌局部偏压情况, 可设置汇水层以有效疏通衬砌周围的渗流通道, 在不影响灌浆封堵效果情况下大幅度提升排水泄压效果。基于地质和渗控双因素的富水地层隧洞堵排设计能为水工隧洞应对富水地层高外水压力提供直接参考。

关键词: 富水地层; 外水压力; 渗流量; 堵排设计; 水工隧洞

中图分类号: TV554

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240079

1 研究背景

水工隧洞随工程建设规模扩大, 直径、长度和埋深随之增加, 面临的工程地质和水文条件复杂性显著。高压富水地层的外水问题给水工隧洞施工期涌水量控制和运行期衬砌安全带来巨大挑战, 合理的堵排设计是工程建设成功的关键要素保障^[1]。

当前高压富水地层衬砌结构设计主要根据外水压力值确定。法国、美国等常将隧洞衬砌外水压力取静水压力值, 称为全水头法^[2]。加拿大和巴西等将隧洞衬砌所承受的静水头计算到地表^[3], 再乘以特定系数, 是一种可能最大水头值法。国内隧洞设计主要采用《水工隧洞设计规范》(SL 279—2016)推荐的折减系数法^[4], 认为外水压力为地下水位作用水头和折减系数(β_e)的乘积, 这与澳大利亚和日本^[5]等国推荐方法一致, 实际应用时考虑水文地质条件、地下水的渗流情况及地下水渗流对围岩稳定性的影响等要素对折减系数取值^[6], 不同工程统计的折减系数值主要分布在 0.15~0.9 之间。然而, 以上外水压力计算方法主要建立在过去大量浅埋或几百米数量级深埋隧洞的工程经验上, 现在水工隧洞最大埋深已超过 2000 m^[7]。假设洞轴线处初始水头达到 2000 m, 即使外水压力折减系数为 0.1, 折减后的外水压力值仍然高达 2.0 MPa 左右, 致使衬砌结构难以设计。事实上, 隧洞外水压力折减不仅取决于地质因素, 还受到隧洞渗控措施的影响^[8], 设置排水措施后外水压力将会得到较大程度折减。

大量实际工程案例同样揭示了水工隧洞采取堵排设计可显著降低外水压力对衬砌结构的影响^[9-10]。国内锦屏二级水电站的外水压力达到了惊人的 10.22 MPa^[11], 国外黎巴嫩阿瓦利隧洞的外水压力也高达 7.3 MPa^[6], 在此荷载作用下按传统结构设计方法计算的衬砌厚度难以接受, 但实际上由

收稿日期: 2024-05-16; 网络首发时间: 2024-12-06

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20241206.1046.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079150); 西藏自治区科技重大专项(XZ202201ZD0003G01)

作者简介: 李宇(2000-), 硕士生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 2427019488@qq.com

通信作者: 曹瑞琅(1985-), 博士, 正高级工程师, 主要从事隧洞及地下工程研究。E-mail: caorl@iwhr.com

于堵水和排水因素对外水压力折减较大^[12]，通过堵排措施联合应用，多数衬砌结构并未因外水压力而导致破裂^[13-14]。在应对高压富水地层外水作用问题上，张有天等^[15]指出在工程设计初期，应考虑隧洞堵排设计渗控因素，但没有提出明确量化设计方法；在工程实践上，工程界则普遍形成了“以堵为主，堵排结合”的处理理念^[16-17]，但堵排方案仍以工程类比确定，同样缺少合理的设计方法。

为此，在分析水工隧洞赋存水环境特征基础上，进行研究堵排措施对隧洞涌水量及衬砌外水压力演化规律，探讨不同排水方案对衬砌外水压力及结构承载力的影响，结合工程案例，在综合考虑地质和渗控双因素的同时提出合理的隧洞渗控措施确定方法和堵排设计方案。研究结果可为富水地层高外水压力隧洞设计提供参考。

2 水工隧洞赋存水环境特征与数值模型

2.1 水工隧洞赋存水环境特征 水工隧洞往往建设于复杂的水文地质环境中，如图 1 所示。地下水水位高低直接影响衬砌外水压力值，气候条件(如降雨、蒸发等)会影响地下水位，当地下水流动时会产生动水压力，从而影响衬砌外水压力。此外，地层水文联通性也会显著影响地下水压力分布，隧洞采用堵水措施会改变地下水流动路径和流速，采用排水措施可以将衬砌外侧水排出，从而降低作用在衬砌上水头。因此，水工隧洞赋存水环境复杂，衬砌外水压力是一个综合因素作用的结果。

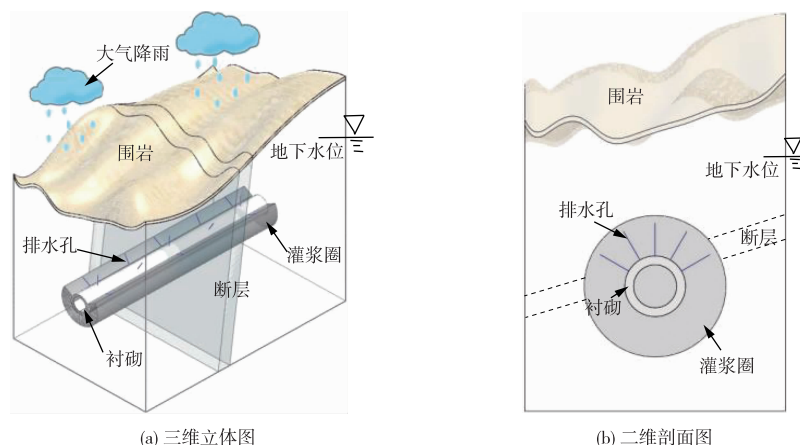


图 1 水工隧洞赋存水环境特征

Fig.1 Characteristics of water environment in hydraulic tunnels

2.2 水工隧洞外水压力数值分析模型 为更加明确水工隧洞赋存水环境特征，采用三维数值模拟(见图 2)探索堵排措施对隧洞涌水量及衬砌外水压力演化规律，以分析不同排水方案对衬砌外水压力及结构承载力的影响。数值计算流固耦合理论原理，将岩体视作多孔介质材料，流体在孔隙介质中流动，满足 Darcy 定律和比奥方程^[18]，将计算平衡后的孔隙水压力作为施加衬砌的对应荷载。

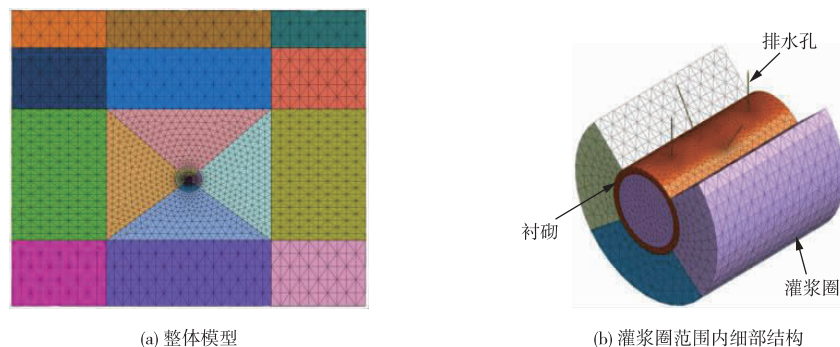


图 2 隧洞外水压力三维数值模拟模型

Fig.2 Three-dimensional numerical simulation model of water pressure outside the tunnel

建模时以水工隧洞典型断面为例，此隧洞段埋深 1100 m，采用 TBM 施工，截面形状为圆形，开挖洞直径为 9.26 m，模型从内到外依次为衬砌、排水孔、灌浆圈和岩体，岩体为 V 类围岩，渗透系数为 1×10^{-5} m/s。堵排措施对应的计算参数根据分析工况来确定，具体见表 1。模型上表面为自由水位线，其他边界为固定的未扰动渗流场初始水头，来保持地下水持续径流补给，竖直方向上考虑了重力加速度和地下水渗流的方向。通过定义节点水头，以模拟地下水位与开挖水头、衬砌水头和排水孔水头之间的边界条件。

表 1 多因素数值模拟工况参数
Table 1 Parameters of multi-factor numerical simulation

参数		单位	量值
初始水头		m	100、200、400、600、800、1000
固结灌浆	渗透系数	m/s	10^{-5} 、 10^{-6} 、 10^{-7} 、 10^{-8} 、 10^{-9}
	厚度	m	2、4、6、8、10
排水孔	深度	m	1、1.5、2、2.5、3
	孔径	mm	30、40、50、75、100

3 影响衬砌外水压力关键因素分析

3.1 水文地质对地层水压力影响分析 地层水压力相关的水文地质条件主要是初始作用水头高度、岩体透水性和地下水渗流状态等。为评价地下水活动对水工隧洞外水压力的影响，可参考表 2 进行折减系数(β_e)确定^[4]。需要指出，仅考虑水文地质因素，外水压力的计算值与真实水头往往可能存在偏差，因此还需综合考虑渗控对外水压力的影响。

表 2 依据水文地质条件外水压力折减系数取值建议
Table 2 Suggested values of external water pressure reduction coefficients according to hydrogeological conditions

级别	地下水活动状态	地下水对围岩稳定的影响	β_e
1	洞壁干燥或潮湿	无影响	0.00~0.20
2	沿结构面有渗水或滴水	软化结构面的充填物质，降低结构面的抗剪强度软化软弱岩体	0.10~0.40
3	沿软弱结构面有大量滴水、线状流水或喷水	泥化软弱结构面的充填物质，降低其抗剪强度，对中硬岩体发生软化作用	0.25~0.60
4	严重滴水，沿软弱结构面有小量涌水	冲刷结构面中的充填物质，加速岩体风化，对断层等软弱带软化泥化，并使其膨胀崩解及产生机械管涌。有渗透压力，能鼓开较薄的软弱层	0.40~0.80
5	严重股状流水，断层等软弱带有大量涌水	冲刷带出结构面充填物质，分离岩体，有渗透压力，能鼓开一定厚度的断层等软弱带，导致围岩塌方	0.65~1.00

3.2 灌浆渗控措施影响分析 固结灌浆孔纵向间距 2 m，梅花形布置，环间分两序，环内加密，通过中间插入、逐渐加密的原则钻孔灌浆。隧洞灌浆前后渗流场分布见图 3。无灌浆时，500 m 初始水头直接作用在衬砌上，约为 5 MPa，隧洞渗流量为 $5.4 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ，此时衬砌承载能力不足且排漏量过大。采用灌浆后，衬砌所受外水压力较灌浆前有所折减，且隧洞渗流量显著降低为 $1.8 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ，灌浆对降压堵水具有重要作用。但需要指出，此时衬砌仍承受较高的外水压力，全封堵设计在长期渗流作用下依然存在“小流量、高水压”现象，仅靠固结灌浆并不能彻底解决高外水压力问题。

设定灌浆圈渗透系数变化范围为 $10^{-9} \sim 10^{-5}$ m/s，初始水头和灌浆圈渗透系数对外水压力、渗流量的影响曲线见图 4。随着渗透系数升高，衬砌承受的外水压力及隧洞渗流量明显变大。初始水头较小时(400 m 以下)，调整灌浆圈渗透系数对外水压力和渗流量的改善效果并不明显，即工程中建议采用

水泥料类浆料。初始水头较大(达到 600 m)，水泥类灌浆的降压堵水效果逐渐变弱，化学灌浆堵水效果更佳。

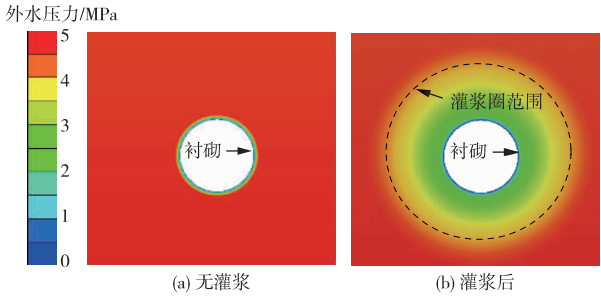


图 3 典型隧洞灌浆前后渗流场分布 (500 m 水头)
 Fig.3 Distribution of seepage field before and after grouting in a typical tunnel(500 m head)

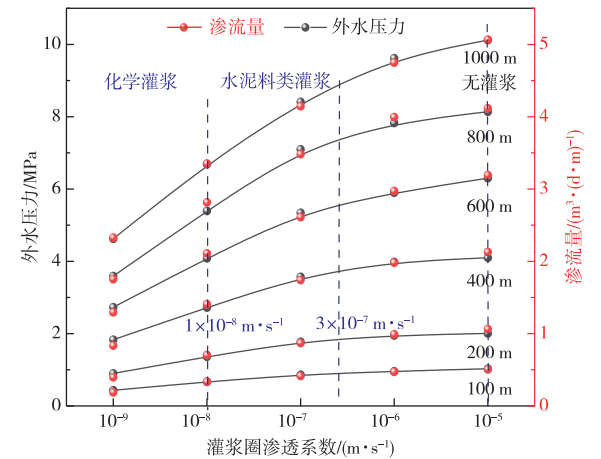


图 4 外水压力、渗流量与灌浆圈渗透系数关系
 Fig.4 Relationship between external water pressure, seepage flow and permeability coefficient of grouting ring

3.3 排水措施影响分析 排水孔孔深 3 m，孔径 75 mm，纵排距 3 m，环向间隔 60°，梅花桩布置。初始水头较低的隧洞即便考虑全水头，也能得到可行的衬砌设计方案，但富水地层高外水力隧洞仅采用封堵措施衬砌安全性将面临极大威胁。如图 5 所示，初始水头为 500 m，灌浆后作用于衬砌上的外水压力仍达 2.6 MPa，衬砌可能受力较大而破坏。在此基础上，设置深度为 3 m 排水孔后，作用于衬砌上的外水压力可下降到 0.6 MPa，外水压力得到明显控制。因此，在较高作用水头环境下设置排水孔对保障衬砌安全十分必要。

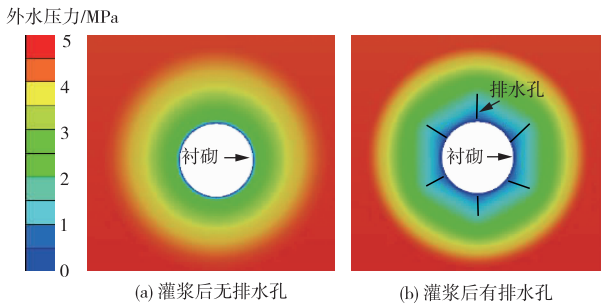


图 5 典型排水孔前后渗流场分布 (500 m 水头)
 Fig.5 Distribution of seepage field before and after typical drainage holes(500 m head)

保持隧洞其他参数不变，在衬砌顶拱 120°范围内设置了排水孔，深度分别为 1、1.5、2、2.5 和 3 m。图 6 和图 7 分别展示了排水孔深度对外水压力及渗流量的影响。随着排水孔深度增加，外水压力呈现

降低趋势,隧洞渗流量与初始水头之间呈现线性关系。排水孔深度由浅变深时,隧洞渗流量随之增加,且增加幅度加快,导致灌浆堵水效果减弱;与此同时,当排水孔深度持续增加,外水压力降低幅度却不再明显。因此,设计应根据初始水头和渗控标准来选择合适排水孔深度,片面追求其深度并不合理。

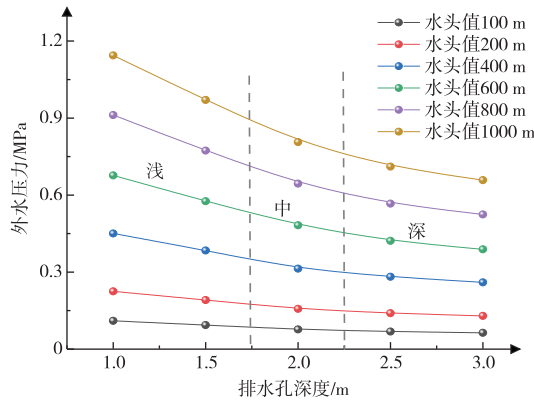


图 6 排水孔深度对外水压力的影响

Fig.6 Effect of drainage hole depth on external water pressure

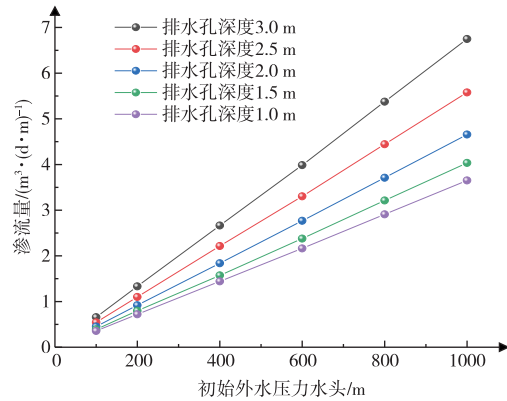


图 7 排水孔深度对渗流量的影响

Fig.7 Effect of drainage hole depth on seepage flow

排水孔直径分别为 30、40、50、75 和 100 mm 时外水压力和渗流量变化规律见图 8 和图 9。当排水孔直径较小时(如 30 mm),适当增加直径可显著降低外水压力,同时渗流量增幅相对较小。然而,当排水孔直径增大到 60 mm 时,外水压力不再明显降低,且渗流量增速加快。随着直径增加,排水孔降低压力能力会逐渐减弱,过大排水孔直径会削弱灌浆堵水作用,选择合适的排水孔直径需要综合考虑降压和堵水双重效果。

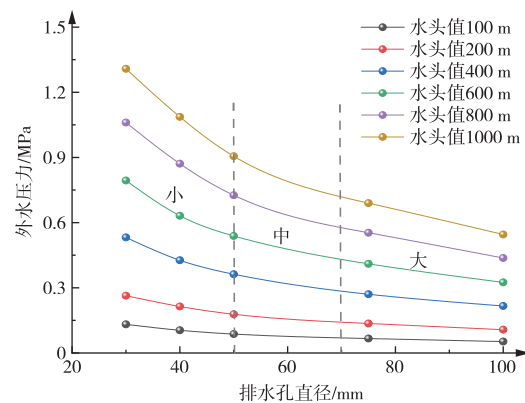


图 8 排水孔直径对外水压力的影响

Fig.8 Effect of drainage hole diameter on external water pressure

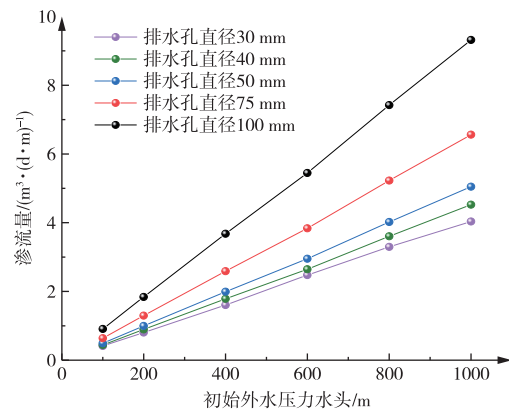


图 9 排水孔直径对渗流量的影响

Fig.9 Effect of drainage hole diameter on seepage flow

3.4 排水孔和灌浆联合措施 在保持隧洞其他参数恒定的情况下,设定初始水头为 300 m,探讨了四种不同堵排设计方案对隧洞外水压力和渗流量的影响:无堵排设计、仅施作灌浆、仅设置排水孔和堵排结合方案。

图 10 展示了不同堵排设计对外水压力和渗流量的影响。在不采取任何堵排措施情况下,隧洞衬砌承受外水压力约为 3 MPa,渗流量非常高;仅施作灌浆可有效地控制隧洞渗流量,减小隧洞开挖对周围渗流场的影响,但外水压力仍维持在较高水平,约为 1.4 MPa;仅设置排水孔后因大量地下水排出,衬砌外水压力显著降低,但隧洞渗流量却大幅提高,对地下水环境造成了显著不利影响;堵排设计相结合时,外水压力和渗流量均得到有效控制。

在考虑灌浆圈情况下,设置不同的排水孔入岩深度以判断其对外水压力影响,见图 11。入岩深度

达到灌浆圈深度 30%~50%时减压控渗综合效果较佳,衬砌外水压力得到了有效控制且隧洞渗流量维持在较低水平,既确保了衬砌的安全,又减少了对地下水环境影响。

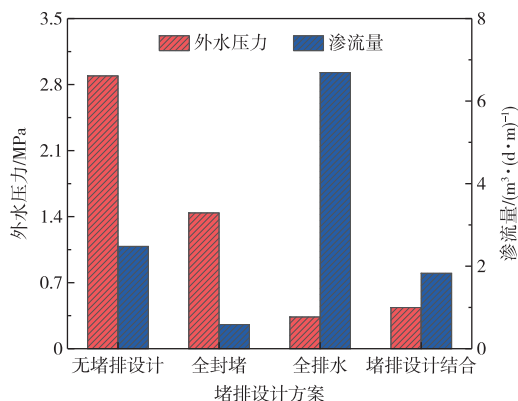


图 10 不同堵排设计方案效果

Fig.10 Influence of different plugging and drainage design schemes

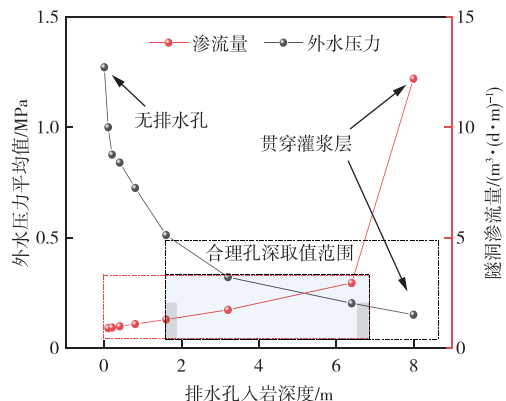


图 11 入岩孔深对外水压力及渗流量影响

Fig.11 Effect of the depth of the hole

4 衬砌外水压力分布规律和结构受力分析

4.1 隧洞排水设计方案 选取水工隧洞典型断面,分析不同排水方案对衬砌外水压力分布规律和结构受力的影响。在数值模型中,仅考虑地质因素折减后外水压力水头为 120 m,围岩渗透系数为 7.5×10^{-5} m/s,不考虑灌浆作用,排水方案分为 5 种工况(排水布置方案见图 12): (a)隧洞无排水孔设置; (b)隧洞上部 240°设置排水孔; (c)隧洞下部 240°设置排水孔; (d)隧洞上部 240°设置排水孔并周围设置汇水层(渗透过初支和二衬的外水进入汇水层后,引入上部排水孔); (e)全断面设置排水孔。

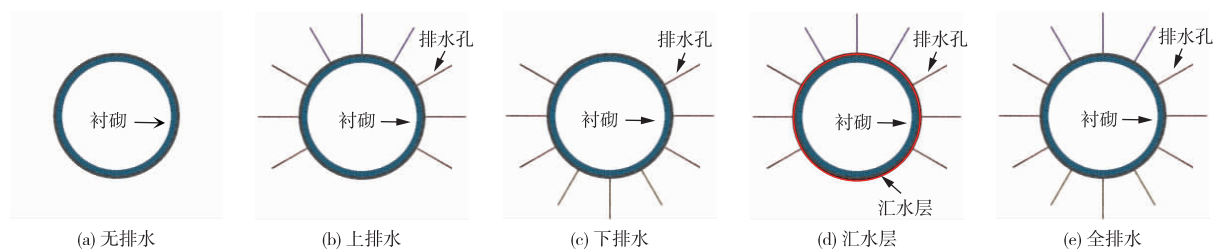


图 12 不同排水方案的模型

Fig.12 Models of different drainage schemes

4.2 衬砌外水压力分布规律 隧洞无排水孔设置时,外水压力全部作用于衬砌上,设置排水孔时会显著降低衬砌外水压力。图 13 为绕衬砌一圈外水压力分布情况,可以看出,排水孔附近外水压力几乎为 0,衬砌上排水孔之间部位表现出“距离排水位置越远,外水压力越高”的变化趋势,形成单孔排水降压的影响区域。

不同排水方案对衬砌孔压分布影响见图 14。从图中可以看出,全排水方案降压最显著,外水压力为 0.25 MPa。隧洞上部 and 下部 240°设置排水孔方案,衬砌出现明显偏压现象,即排水孔附近外水压力明显降低,均低于 0.5 MPa,但远离排水孔部位局部外水压力达 0.8 MPa。考虑这种衬砌受力不均匀现象,探索了汇水层方案,设置汇水层使排水孔形成连通性,加强了排水效果同时达到泄压目的,此时衬砌外水压力分布均匀且处于 0.4 MPa 的低值。

4.3 衬砌结构受力分析 将外水压力施加在衬砌上进行应力计算,研究不同渗控方案的衬砌受力分析。图 15 为衬砌最大压应力分布,无排水时衬砌承受的压应力超过了混凝土抗压强度设计值;全排水方案衬砌承受压应力最小且分布均匀,且结构整体性和安全性最佳;上排水和下排水方案衬砌存在偏压现象,汇水层可解决这种偏压问题,成为一种可考虑的方案。因此,应根据隧洞实际富水条件、

地层初始水头和围岩渗透性等因素因地制宜地进行渗控措施设计。

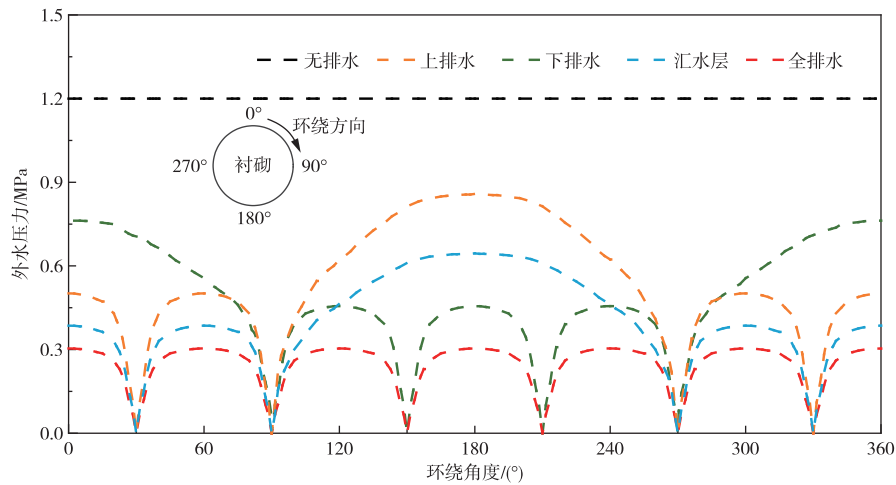


图 13 绕衬砌一圈外水压力分布情况

Fig.13 Distribution of external water pressure around the lining

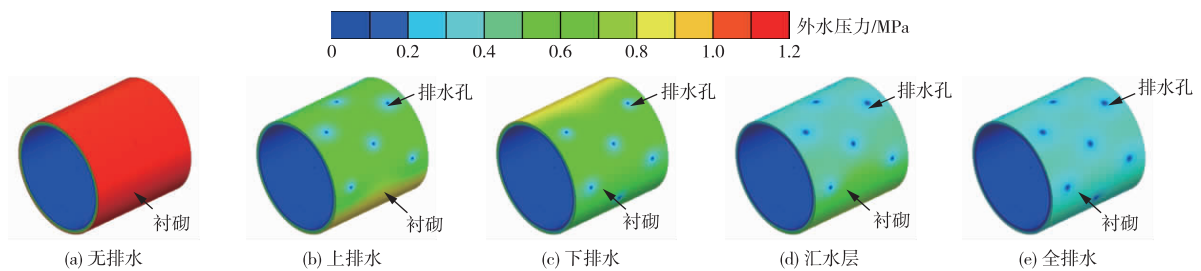


图 14 不同排水方案衬砌孔压分布云图

Fig.14 Contour diagram of lining hole pressure distribution with different drainage schemes

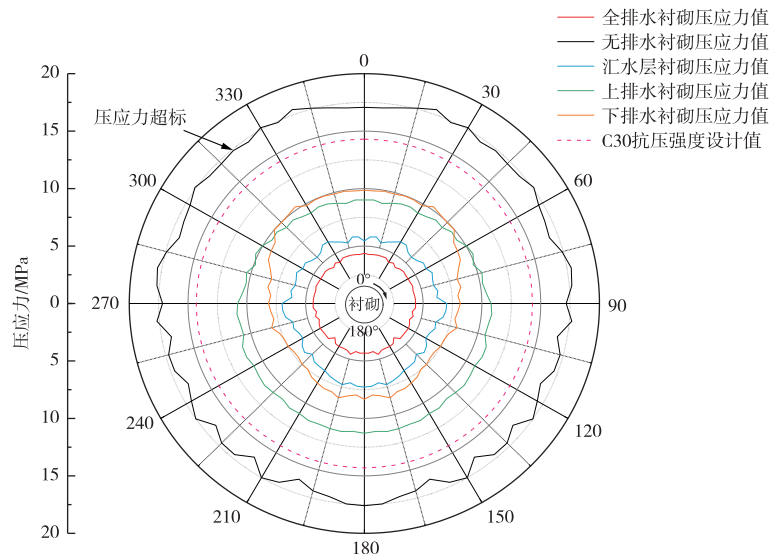


图 15 各排水方案衬砌所受的最大压应力分布

Fig.15 Distribution of the maximum compressive stress of the lining of each drainage scheme

5 工程应用

某隧洞总长 64.48 km，设计流量 $110 \text{ m}^3/\text{s}$ ，地貌总体呈中间高、两头低，具有地质条件复杂、埋

深大、高外水等特点。隧洞埋深 200~800 m，地下水位分布在强风化底板—弱风化上部，隧洞纵剖面如图 16 所示。隧洞断面埋深 240 m，地下水位高于隧洞 186 m，围岩类别为 V 类弱风化的石英云母片岩。

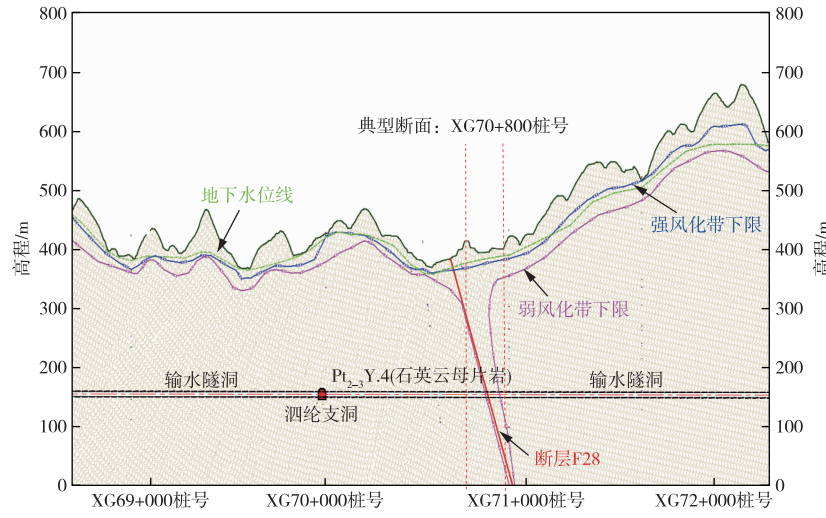


图 16 隧洞纵剖面
Fig.16 Longitudinal section

经过图 4 的渗流量计算选定了固结灌浆圈厚度 8 m，封堵措施设计见图 17(a)。根据入岩孔深对外水压力及渗流量影响(图 11)选定排水孔深度为 2 m，由图 5 的计算结果确定了排水孔直径为 100 mm。根据不同排水方案衬砌孔压分布计算结果(图 13)，排水孔排距选为 3 m，梅花形布置，见图 17(b)。

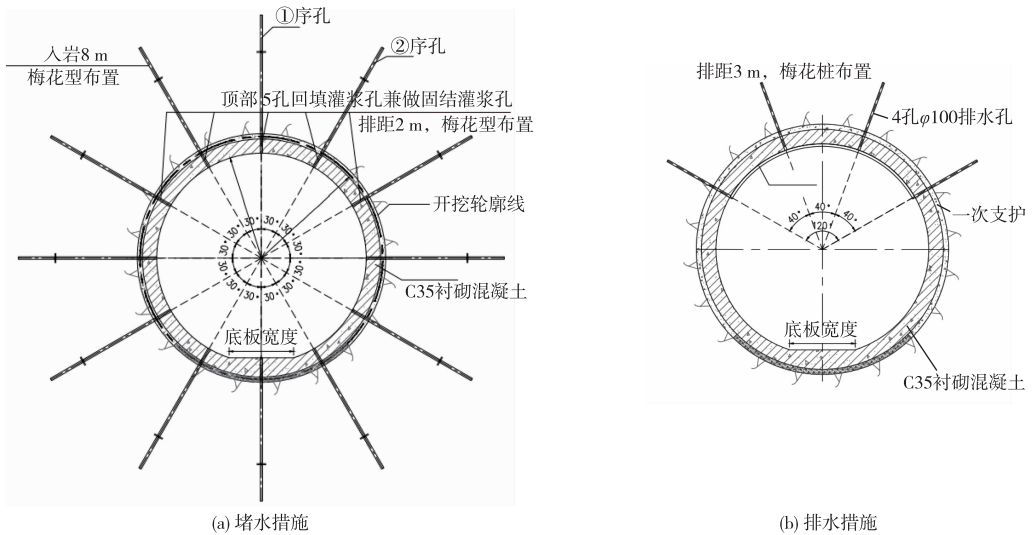


图 17 隧洞渗控措施设计
Fig.17 Design drawing of tunnel seepage control measures

衬砌承受外水压力分布情况见图 18，由于衬砌上部范围设置排水孔，顶拱外水压力折减尤为明显，外水压力由 1.09 MPa 减小到 0.2 MPa，外水压力平均值小于 0.5 MPa。灌浆使隧洞渗流量得到有效控制，维持在较低水平，仅为 $0.84 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。图 19 展示了运行期衬砌应力分布情况，衬砌最大压应力均低于其抗压强度设计值 (16.7 MPa)，隧洞堵排设计满足结构承载力和允许渗流量标准要求。

6 结论

水工隧洞赋存水环境复杂，基于“以堵为主，堵排结合”的理念，建立了复杂水工隧洞赋存水环

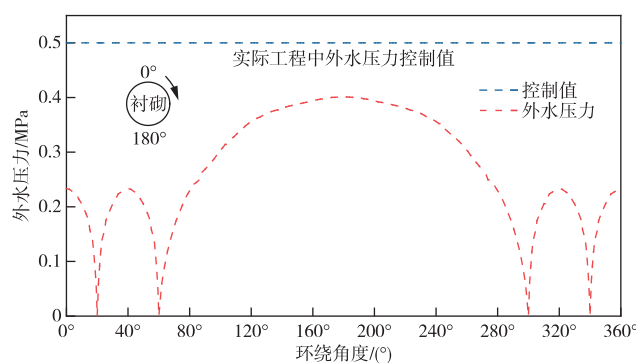


图 18 绕衬砌一圈外水压力分布

Fig.18 Distribution of water pressure around the lining

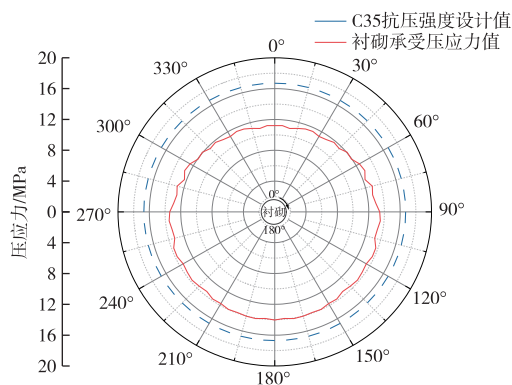


图 19 衬砌所受的最大压应力分布

Fig.19 Distribution of maximum compressive stress of the lining

境数值模型，通过对衬砌外水压力关键因素的研究，探讨了堵排措施对隧洞及衬砌外水压力演化规律，提出了基于地质和渗控双因素的富水地层隧洞堵排设计方法，并将其应用于实际工程某隧洞段，形成了以下结论：

(1) 数值计算结果表明，仅靠固结灌浆并不能彻底解决高外水压力问题，需要结合相应的排水措施，其中排水孔入岩深度达到灌浆圈深度 30%~50% 时减压控渗综合效果较佳；排水孔直径为 60 mm 时，衬砌外水压力不再明显降低，且孔径过大会导致渗流量增速加快。

(2) 排水孔的布置位置对衬砌结构受力具有显著影响。全排水衬砌承受压应力最小且分布均匀，结构整体性和安全性最佳；上排水和下排水衬砌均存在偏压现象，在衬砌外侧设置汇水层可解决偏压问题。

(3) 对实际工程某隧洞段堵排措施的效果进行了校核。通过本研究提出的地质和渗控双因素的富水地层隧洞堵排设计，该洞段衬砌外水压力降至 0.2 MPa，隧洞渗流量仅 $0.84 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ，衬砌最大压应力约 14 MPa，隧洞堵排设计满足结构承载力和允许渗流量标准要求。

参 考 文 献：

- [1] 杨启贵, 张传健, 颜天佑, 等. 长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1188-1210. (YANG Qigui, ZHANG Chuanjian, YAN Tianyou, et al. Integrated research and application of construction and safe operation of long-distance water transfer projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1188-1210. (in Chinese))
- [2] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 水岩分算隧道衬砌外水压力折减系数取值方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 495-500. (LIU Lipeng, WANG Xiaogang, JIA Zhixin, et al. Method to determine reduction factor of water pressure acting on tunnel linings using water-rock independent calculation methodology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 495-500. (in Chinese))
- [3] 黄威, 孙云, 张建平, 等. 深埋隧洞高外水压力研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 1-11. (HUANG Wei, SUN Yun, ZHANG Jianping, et al. Research review on high external water pressure of deep-buried tunnels[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science), 2023, 45(5): 1-11. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国水利部. 水工隧洞设计规范: SL 279—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification for Design of Hydraulic Tunnel: SL 279—2016[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese))
- [5] 张有天. 隧洞及压力管道设计中的外水压力修正系数[J]. 水力发电, 1996(12): 30-34, 71. (ZHANG Youtian. Correction factor of external water pressure in the design of tunnel and penstock[J]. Water Power, 1996(12): 30-34, 71. (in Chinese))
- [6] 刘立鹏, 汪小刚, 段庆伟, 等. 高压富水地层水工隧洞衬砌外水压力确定与应对措施[J]. 岩土工程学报,

- 2022, 44(8): 1549–1557. (LIU Lipeng, WANG Xiaogang, DUAN Qingwei, et al. Method to cope with external water pressure of hydraulic tunnel linings in high-pressure groundwater-rich strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8): 1549–1557. (in Chinese))
- [7] 任旭华, 王美芹, 王树洪, 等. 锦屏二级水电站深埋隧洞外水压力研究[J]. 水文地质工程地质, 2004(3): 85–88, 95. (REN Xuhua, WANG Meiqin, WANG Shuhong, et al. Study on external water pressure of deep-lying tunnel in Jinping hydropower station[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004(3): 85–88, 95. (in Chinese))
- [8] 周亚峰, 苏凯, 伍鹤皋. 水工隧洞钢筋混凝土衬砌外水压力取值方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 198–203, 210. (ZHOU Yafeng, SU Kai, WU Hegao. Study of water pressure estimation method for reinforced concrete lining of hydraulic tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 198–203, 210. (in Chinese))
- [9] WANNENMACHER H, ENTFELLNER M, HAUER H. Drilling and grouting works for pressurised groundwater conditions of the semmering base tunnel[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(9): 4377–4391.
- [10] ARJNOI P, JEONG J H, KIM C Y, et al. Effect of drainage conditions on porewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 376–389.
- [11] 江权, 冯夏庭, 周辉. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞群允许最小间距研究[J]. 岩土力学, 2008(3): 656–662. (JIANG Quan, FENG Xiating, ZHOU Hui. Study on acceptable minimum interval of long deeply burial hydropower tunnels in Jinping II hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(3): 656–662. (in Chinese))
- [12] 赵力, 苏岩, 王博, 等. 堵排水方式对秦岭隧洞衬砌外水压力的影响研究[J]. 人民长江, 2022, 53(7): 148–153. (ZHAO Li, SU Yan, WANG Bo, et al. Effect of water blocking and drainage way on external water pressure of Qinling tunnel lining[J]. Yangtze River, 2022, 53(7): 148–153. (in Chinese))
- [13] 窦金熙, 赵卫全, 路威, 等. 引水隧洞复杂裂隙围岩高压灌浆浆液扩散过程研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(6): 565–573. (DOU Jinxi, ZHAO Weiquan, LU Wei, et al. Study on high-pressure grouting fluid diffusion process in complex fractured surrounding rock of water diversion tunnel[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(6): 565–573. (in Chinese))
- [14] 孙晓贺, 施成华, 肖国庆, 等. 基于双粘型防水材料的高水压隧道新型堵水限排方案及设计方法[J]. 隧道建设, 2024, 44(3): 564–575. (SUN Xiaohe, SHI Chenghua, XIAO Guoqing, et al. A novel limited drainage scheme and design method for high water pressure tunnel based on double-bonded waterproofing membrane[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(3): 564–575. (in Chinese))
- [15] 张有天. 岩石隧道衬砌外水压力问题的讨论[J]. 现代隧道技术, 2003(3): 1–4, 10. (ZHANG Youtian. Discussion on external hydraulic pressure upon rock tunnel lining[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003(3): 1–4, 10. (in Chinese))
- [16] 李雪春, 陈重华, 陈平, 等. 山西引黄工程南干线 7#隧洞衬砌外水压力研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003(3): 36–42. (LI Xuechun, CHEN Chonghua, CHEN Ping, et al. Study on external water pressure on lining of tunnel No 7 of south main of YRDR[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003(3): 36–42. (in Chinese))
- [17] LEE J S, et al. Experimental analysis of penetration grouting in umbrella arch method for tunnel reinforcement[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 130: 104346.
- [18] 郭鸿雁, 纪亚英, 方林, 等. 基于流固耦合分析的富水隧道外水压力与限量排放标准研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 165–168. (GUO Hongyan, JI Yaying, FANG Lin, et al. External water pressures and limited emission standards of water-rich tunnels based on fluid-solid coupling analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 165–168. (in Chinese))

Research on design of tunnel plugging and drainage in water-rich strata based on geological and seepage control factors

LI Yu¹, HAN Ke², DUAN Qingwei¹, YANG Haopeng³, CAO Ruilang¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. Guangdong GDH Water Co. Ltd, Shenzhen 518018, China;

3. Guangdong Yuehai Yuexi Water Supply Company Limited., Zhanjiang 524000, China)

Abstract: Developing an appropriate water cutoff and drainage scheme is vital for securing the integrity of complex hydraulic tunnels within water-saturated environments. By examining the post-measurements of tunnel water inflow and the pore water pressure dynamics in the surrounding rock, a fluid-solid coupling numerical simulation approach elucidated the external water pressure patterns on linings and the structural stress behavior. A design methodology for water cutoff and drainage in water-rich strata, grounded in geological and seepage control dual considerations, was developed. The results demonstrate that the external water pressure in tunnels within high-pressure, water-rich strata is governed by both geological conditions and seepage control strategies. The impact of grouting and drainage measures on reducing external water pressure should be accounted for. Overly deep drainage can diminish the sealing effectiveness of the grouting zone, whereas inadequate depth may impair pressure relief efficiency; a drainage depth of 30%~50% of the grouting zone depth is optimal for integrated pressure reduction and seepage control. To mitigate local lining bias stresses due to non-uniform drainage hole placement, a collection layer can be installed to facilitate effective seepage pathways around the lining, substantially enhancing drainage pressure relief without negating the sealing benefits of grouting. This design strategy, based on geological and seepage control factors, provides a direct template for addressing high external water pressures in water-rich strata within hydraulic tunnels.

Keywords: water-rich strata; external water pressure; seepage flow; plug and drain design; hydraulic tunnel

(责任编辑: 祁伟)

(上接第 400 页)

Discussion on prediction method of unit shaft resistance of super long drilled cast-in-place pile in layered soil

SONG Shijie^{1,2}, DUAN Zhiqiang^{1,2}, GUO Wei², REN Yuxiao²

(1. Tianjin Survey Design institute Group Co., Ltd, Tianjin 300191, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The unit shaft resistance of piles is an important factor determining the bearing capacity of ultra long pile foundations. Based on the on-site static load test results of a super long drilled cast-in-place pile of a high-rise building in layered soils, the bearing characteristics and unit shaft resistance development characteristics of the pile in layered soils are analyzed in this paper. The accuracy of several methods for predicting the ultimate pile friction based on the results of Cone Penetration Test (CPT) and Standard Penetration Test (SPT) are evaluated. The results indicate that the test pile behaves as a friction pile. Among the three CPT methods, the Bustamante's method relies on the selection of empirical friction coefficients of the soil layers in this area, and the prediction of ultimate pile shaft resistance is smaller in clay and larger in silt. The JGJ94-2008 standard provides the most accurate prediction of the ultimate pile shaft resistance in soil layers other than the surface soil layer. The overall accuracy of the SPT method is higher than that of the CPT method, with Yamashita's method having the highest accuracy. The SPT results can be used to establish an empirical formula suitable for the local area to accurately predict the ultimate pile friction.

Keywords: drilled cast-in-place pile; ultimate shaft unit resistance; load transfer characteristic; CPT; SPT; layered soils

(责任编辑: 祁伟)