

文章编号: 1000-4750(2015)01-0128-09

大断面隧道模型试验水压模拟加载方法

何本国^{1,2}, 张志强^{1,2}, 马腾飞³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川, 成都 610031; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川, 成都 610031;

3. 山东大学土建与水利学院, 山东, 济南 250061)

摘 要: 首先采用结构力学方法确定隧道拱部、仰拱部分不等值环箍力模拟水荷载, 研制了马蹄形断面隧道模型试验的全周密闭非均匀水压加载装置, 实现“灯泡型”水压模拟加载。在此基础上进行模型试验, 所得结论与数值模拟在关键部位受力结果相吻合, 从而验证了水压模拟加载方法的正确性, 成功解决了隧道结构试验中水压模拟加载“瓶颈”问题。在水压作用下, 衬砌底部弯矩大于拱部, 仰拱向内和墙脚向外弯矩最大, 处于大偏心受拉截面, 成为高水压隧道衬砌关键控制部位。确定了高速铁路双线隧道衬砌水压极限承载力, 墙脚先发生压剪破坏, 接着仰拱出现压弯破坏。研究成果可为高水压隧道主体结构设计、施工提供参考。

关键词: 大断面隧道; 高水压; 主体结构; 模型试验; 加载方法

中图分类号: U25; TU91 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.07.0689

LOADING SIMULATION OF WATER PRESSURE FOR MODEL TEST OF LARGE-SPAN TUNNEL

HE Ben-guo^{1,2}, ZHANG Zhi-qiang^{1,2}, MA Teng-fei³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: Based on structural mechanics, the different hoop forces on upper and under a tunnel are determined to simulate water pressure in the first place. The fully-sealed hydraulic loading device for horseshoe-section tunnel-model tests was manufactured, which implements non-uniform hydraulic loading successfully. A model test were carried out to investigate its mechanical characteristics. The test conclusions are consistent with those of numerical simulation for controlled safe locations, which would verify the validity of the loading simulation for water. It solves the ‘bottleneck’ problem of water pressure loading during the model test of a tunnel. Under water pressure, the moment at the invert is more than that at the arch. The moment at the invert towards interior and that at the wall-footing is outwardly. A large eccentric tensile crack appears. The invert and wall-footing are deemed as controlled safe locations of lining. The ultimate bearing capacity of two-lane tunnel lining for high-speed passenger railway is determined under water pressure. Compressive-shearing damage takes place at the wall-footing. The bending destruction appeared at the invert. The results can provide a reference for the design and construction of a tunnel subjected to high water pressure.

Key words: large-span tunnel; high water pressure; main structure; model test; loading method

收稿日期: 2013-07-29; 修改日期: 2013-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078318, 51278427)

通讯作者: 何本国(1984—), 男, 安徽人, 讲师, 博士, 主要从事地下工程研究(E-mail: hebenguo@my.swjtu.edu.cn).

作者简介: 张志强(1968—), 男, 四川人, 教授, 博士, 博导, 主要从事地下工程和岩土工程研究(E-mail: zhangzqmail001@163.com);

马腾飞(1986—), 男, 山东人, 博士生, 主要从事地下工程研究(E-mail: matfperfect@163.com).

近年来交通基础设施建设规模越来越大, 几乎所有长大隧道都不可避免地遇到高水压地质灾害^[1-2]。隧道衬砌结构在水压条件下受力特征一直是学术界和工程界关注的焦点, 亟待突破。目前铁路和公路隧道设计规范对高水压隧道支护结构设计没有给出明确结论, 甚至有的工程干脆按照通常的标准图设计, 造成现有隧道衬砌开裂现象尤为严重^[3]。针对高水压衬砌受力特征、破坏模式等问题, 相关学者进行了一些研究工作, 取得一定研究成果^[4-5]。

张顶立^[6]以宜万铁路堡镇隧道为背景, 研究富水围岩隧道大变形段力学特性, 提出二次衬砌合理时机。谭忠盛^[7]依托厦门翔安海底隧道, 采用相似模型试验方法, 研究了无纺布对海底隧道衬砌防水作用。许金余^[8]推导出海底圆形隧道在渗流场影响下的弹塑性位移和应力解析表达式, 分析了渗流场作用下海水深度和覆岩厚度对隧道应力场影响规律。刘新荣^[9]结合模型试验和数值分析数据, 研究管涌发生的准则, 指出围岩裂隙很容易引发突水突泥工程事故。李术才^[10]依托青岛胶州湾海底隧道, 通过大量配比试验, 研制出一种由砂、重晶石粉、滑石粉、水泥、凡士林、硅油和适量拌合水组成的新型流-固耦合相似材料, 但只是针对渗透作用, 而没有考虑隧道主体结构的受力特征。Hernqvist^[11]针对芬兰 Onkalo 隧道工程, 提出一种评价是否需要注浆的判定方法, 进而给出相应注浆圈范围和渗透系数。Zhao 和 Fahimifar^[12-13]采用解析的方法, 探讨了流固耦合条件下, 围岩弹塑性力学响应与地下水渗流场。

目前, 国内外相关研究成果没有较好地反映工程实际情况, 不能正确地模拟衬砌与地层环境相互作用。从既有成果看, 很多富水隧道模型试验都是利用水源方式来加载水压, 但是相似材料一旦浸水, 其物理力学性质就发生了极大改变, 并且给测试系统带来新的挑战。即使研制了新型流固耦合相似材料, 也没有研究隧道主体结构的受力特征、破坏模式。参考国内外文献^[14-17], 富水区隧道模型试验还处于起始阶段。因此, 迫切需要解决富水隧道模型试验中水压力加载的“瓶颈”问题, 在此基础上研究隧道衬砌结构受力特征、破坏模型、裂纹发展规律, 以及极限承载力, 具有重要的理论价值和工程应用价值, 直接指导富水大断面隧道的设计和施工。

1 模型试验水压模拟加载

1.1 依托工程

新建铁路贵广线(贵贺段)天平山隧道为双线大断面隧道, 设计要求高, 行车速度 200 km/h, 预留 250 km/h 提速条件。隧道全长 14480m, 洞身最大埋深 637 m, 洞身段一共发育有 22 条断层及 5 个褶曲构造。洞身含水岩组为浅变质碎屑岩类含水岩组, 洞身地下水为基岩裂隙水, 为风化、构造裂隙带网状裂隙水; 隧道洞身以较硬脆性的砂质板岩和变余砂岩为主, 构造极为发育, 致洞身围岩微张、张开型节理裂隙密集发育, 有赋存地下水的空间条件; 隧道区降水汇水面积较大。洞身基岩裂隙水含水丰富, 水量丰富。隧道通过断裂构造和向斜构造时, 因地下水的局部富集, 有可能会发生断层带地下水的集中涌出。隧道平常期涌水量 45160m³/d, 雨季最大涌水量 84600m³/d。在 DK231+860 处掌子面水压最高处进行水位测试, 最高达 0.90MPa, 现场掌子面涌突水和钢架严重变形如图 1 所示。



(a) 掌子面涌突水



(b) 支护严重变形

图 1 高水压隧道施工现场图

Fig.1 Construction site of tunnel subjected to high water pressure

1.2 水压模拟加载控制原理

衬砌承受的实际水压荷载沿洞周分布是不均匀的, 呈“上小下大”灯泡状分布, 直接模拟出实际非均匀水压的加载方式是难以实现的。根据结构力学原理, 把水荷载分成两部分, 分别作用于上下两段圆弧上, 如图 2 所示。

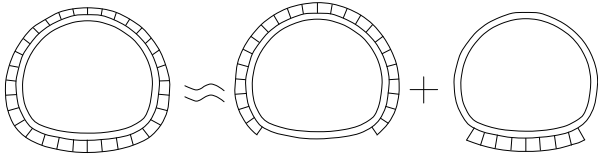


图2 马蹄形衬砌断面水压模拟示意图

Fig.2 Simulation of water pressure on a horseshoe-shaped tunnel section

在模型试验中通过数根钢绞线环箍衬砌结构, 实现上述施加均匀水压荷载。对衬砌上部、下部圆弧段分别施加不相同的箍拉力, 由于墙脚位置作为过渡区域, 其圆弧段较短, 且与两边圆弧的弧度差值较小, 故把墙脚过渡区为界, 分为上、下两部分, 上部承受拱顶与墙脚平均荷载, 下部承受仰拱位置水荷载, 实现全周密闭加载。根据结构力学, 可推导箍拉力和水荷载之间的关系, 如图3所示。

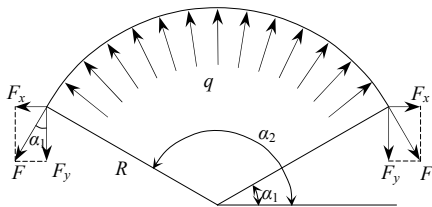


图3 箍拉力转换为等效圆周压力示意图

Fig.3 Equivalent circumferential compressive stress transformed from confining force

取需要施加均匀径向水压的圆弧段, 设衬砌外半径为 R , 纵向幅宽为 B , 作用在结构表面上的平均压应力为 q , 张拉的钢绞线数目为 n , 沿纵向平均分配到衬砌上, 单根钢绞线箍力为 F , 根据力的平衡关系有:

$$2nF_y = B \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} qR \sin \theta d\theta \quad (1)$$

积分后, 推导得:

$$F_y = -\frac{1}{2n} BqR \cos \theta \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2} \quad (2)$$

又有:

$$q = \gamma_w H \quad (3)$$

得到箍拉力与水头高度的关系式:

$$F_y = -\frac{1}{2n} B\gamma_w HR \cos \theta \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2} \quad (4)$$

根据受力的方向性, 可得:

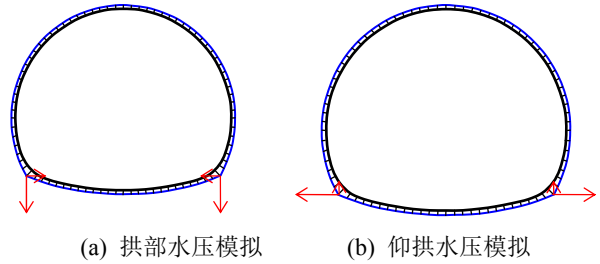
$$F_x = F_y \times \tan \alpha_1 \quad (5)$$

$$F = F_y / \cos \alpha_1 \quad (6)$$

1.3 仰拱和拱部非均匀箍拉力确定

在墙脚中心处把衬砌结构分为上下两部, 衬砌结构外建立受拉连杆单元模拟箍拉钢绞线, 受拉连杆与衬砌结构之间用受压连杆连接, 将受拉连杆所

受拉力转换成压力通过受压连杆作用于衬砌上, 如图4所示。



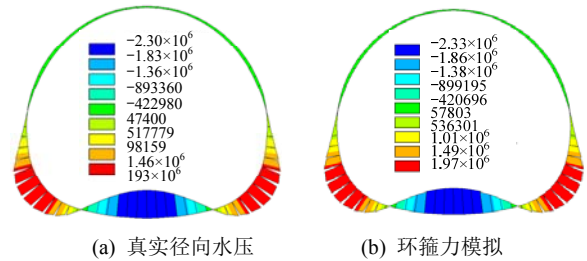
(a) 拱部水压模拟 (b) 仰拱水压模拟

图4 衬砌上、下段分别施加不等箍拉力示意图

Fig.4 Different confining forces applied on upper and lower parts of lining

根据式(4)和式(5), 计算箍拉力 F_x 、 F_y 。由于下部圆弧段较短, 弧度很小, 取下部均匀荷载计算高度与仰拱底高度一致。

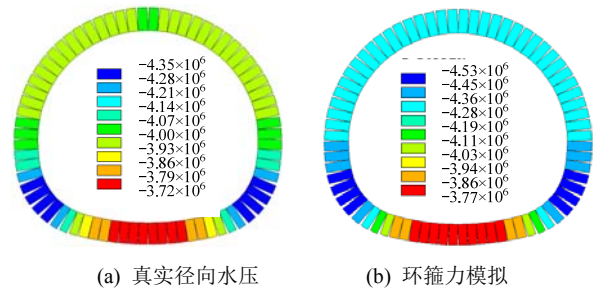
水压取边墙中部深度, 采用模拟加载方法得到的结果, 与真实径向水压力学效应比较如图5、图6所示。



(a) 真实径向水压 (b) 环箍力模拟

图5 箍拉力模拟水压加载弯矩效应比较 / (N · m)

Fig.5 Comparison of equivalent bending moment between factual radial water pressure and simulation of confining force



(a) 真实径向水压 (b) 环箍力模拟

图6 箍拉力模拟水压加载轴力效应比较 / N

Fig.6 Comparison of equivalent axial force between factual radial water pressure and simulation of confining force

从图5、图6看出, 模拟水压高度取边墙中部深度, 通过箍拉的方式施加上下均匀荷载, 得到的衬砌内力分布规律与实际水压一致, 最大正负弯矩也产生在仰拱和墙脚处, 最大、最小轴力出现在墙脚和仰拱处, 因此, 水压条件下隧道最不利位置为墙脚、仰拱, 成为隧道结构稳定性关键控制部位。由于上部圆弧段较长, 范围较大, 有必要选取合适

的计算高度。在水深 50m(即 500kPa)时, 上部箍拉力分别按照拱顶、边墙、墙脚, 以及上段圆弧平均

埋深 4 个计算高度取值, 统计最不利位置(仰拱、墙脚)计算结果如表 1 所示。

表 1 真实径向水压与箍拉力作用下衬砌内力对比表(水压 500kPa 时)

Table 1 Comparison of internal force for lining between factual radial water pressure and simulation of confining force when the water pressure is 500kPa

加载方式	弯矩 /($\text{kN} \cdot \text{m}$)		轴力 / kN		
	仰拱	墙脚	仰拱	墙脚	
上下箍拉	拱顶	-2458.9	2080.8	-3626.2	-4423.3
	边墙	-2334.7	1971.8	-3771.4	-4533.8
	墙脚	-2238.9	1888.1	-3883.4	-4619.0
	上部圆弧平均值	-2348.9	1984.3	-3754.8	-4521.2
实际水压	-2304.5	1928.9	-3718.0	-4347.6	
误差比较/(%)	拱顶	6.28	7.30	-2.53	1.71
	边墙	1.29	2.18	1.42	4.11
	墙脚	-2.93	-2.16	4.26	5.88
	上部圆弧平均值	1.89	2.79	0.98	3.84

由水深 50m 时衬砌内力表 1 可见, 拉杆模拟水压加载得到的衬砌内力分布规律与实际水压相一致, 从而验证了水压模拟加载的正确性。当上部箍拉力计算高度为边墙中部深度, 产生的衬砌内力与实际水压作用下的衬砌内力相比误差最小。因此, 试验中采取的水压计算高度, 均以边墙中部作为水压参考位置, 向上、下以梯度均匀变化。

针对 20m、50m、100m 水深条件下, 通过实际水压与环箍力模拟水压作用下关键控制部位(仰拱、墙脚)的比较, 误差汇总如表 2 所示。

表 2 真实径向水压与箍拉力模拟水压引起衬砌内力比较

Table 2 Comparison of internal force for lining between simulation of confining force and factual radial water pressure

水头高度	位置			
	弯矩		轴力	
	仰拱/(%)	墙脚/(%)	仰拱/(%)	墙脚/(%)
200kPa	2.08	3.62	0.92	3.70
500kPa	1.29	2.18	1.42	4.11
1MPa	0.90	1.46	1.65	4.24

由表 2 可见, 上部均匀荷载的计算高度取边墙中部深度, 下部均匀荷载计算高度取仰拱底深度时, 随着水深的增大, 仰拱和墙脚的弯矩误差减小, 轴力误差有所增加但幅度很小, 误差范围在 5% 以内, 满足工程要求。

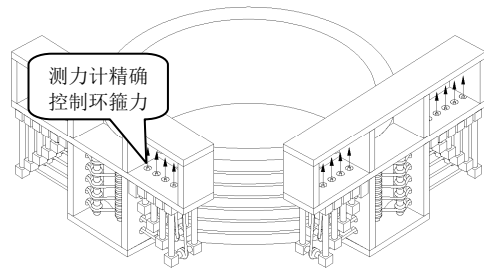
综上所述, 在高水压的情况下, 采用对非圆形断面上、下段圆弧施加不等的环箍力, 这种处理的方式简化实际非均匀水压, 其产生的衬砌内力和变

形与实际水压作用下衬砌内力是一致的, 可以有效地反映实际非均匀水压作用。

2 隧道模型试验水压模拟加载系统

2.1 隧道结构试验模拟水压加载装置

针对上、下段圆弧施加不等的环箍力模拟水压加载的思路, 设计了马蹄形断面隧道模型试验的全周密闭水压加载装置, 如图 7 所示。



(a) 示意图



(b) 实物图

图 7 非均匀水压加载装置

Fig.7 Loading equipment of non-uniform water pressure

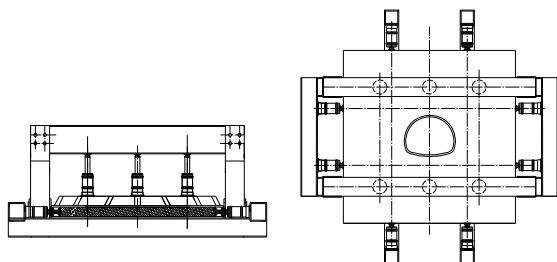
该装置能马蹄形断面隧道结构施加顶部小、底部大全周密闭的非均匀模拟水压,能较真实地模拟水压对隧道结构作用。水压加载装置固定于墙脚位置,由测力计精确控制钢绞线对结构模型的上下箍拉力。数值模拟中将钢绞线的张拉力必须通过与钢绞线相连的压杆将压力传递到衬砌上,其中,压杆之间的距离为 50cm,反映到模型试验中为 1.67cm(相似比为 1:30),考虑到试验可操作性和试验效果,试验中将钢绞线与衬砌直接接触,而无压杆。

2.2 围岩环境复合体模拟辅助试验装置

将水压模拟加载装置与衬砌模型预先施加一定环箍力(模拟水荷载),使得装置和模型连为一体。再一起按装在围岩环境复合体体系中^[18],其实物和示意图如图 8 所示。其中,围岩边界是仅需加密即可,试验中采取施加 0.1MPa 的土压力,以模拟围岩对衬砌施加的反力效应。由于衬砌模型之前预加了一定荷载,即使衬砌发生裂缝,钢绞线也不会发生很大位移;而且土压力比较小,不会导致钢绞线较大的摩擦力;钢绞线在试验前涂上黄油,以减小模型材料的磨阻力。因此,试验过程中,不会引起较大的钢绞线与模型材料之间的磨阻力。



(a) 试验装置立面图及俯视图



(b) 示意图

图 8 隧道衬砌—地层复合体模型试验系统

Fig.8 Composite test equipment for lining of tunnel and stratum

2.3 相似材料与模型试验测试系统

以几何相似比 1:30 和容重相似比 1:1 为基础,围岩相似材料由重晶石粉、粉煤灰、细砂以及机油按一定比例配置而成,模拟 IV 级围岩。重晶石粉容重较大,实现混合材料容重与原型相似,石英

砂可调试合适相似材料摩擦角,掺适量废机油可得到适合凝聚力,反复配置和测试,得到模型材料物理力学参数见表 3。

表 3 围岩原型和模型物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of prototype and model test

土体	粘聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	弹性模量 E/GPa	容重 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
原型	0.20~0.70	27~39	1.3~6	20~23
模型	0.022	37.2	0.057	2.20
相似比	30	1	30	1

隧道衬砌模筑混凝土设计标号为 C30,采用比例为水:石膏=1:1.18 材料,预制加工现场安装的方法模拟。

在二次衬砌拱顶、拱腰、拱脚、边墙、墙脚、仰拱关键部位布置应变片,监控二次衬砌内、外侧受力过程,应变片焊接和石膏模型测试如图 9 所示。

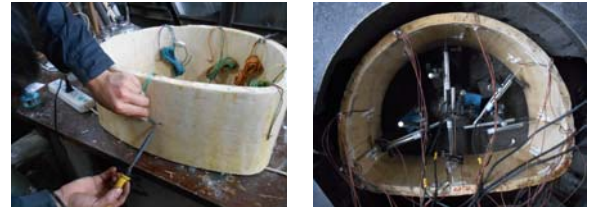


图 9 衬砌应变片焊接

Fig.9 Welding of strain gauges for lining

测试水压力模拟加载过程中隧道主体结构应变改变值,以期获得衬砌结构弯矩、轴力,计算公式为:

$$N = \frac{1}{2} \times E \times (\varepsilon_{\text{内}} + \varepsilon_{\text{外}}) \times b \times h \quad (7)$$

$$M = \frac{1}{12} \times E \times (\varepsilon_{\text{内}} - \varepsilon_{\text{外}}) \times b \times h^2 \quad (8)$$

式(7)、式(8)中 b 为单位长度,取 1m; h 为石膏模型厚度。

3 水压作用下隧道衬砌受力特征

3.1 主体结构内力分布

水压加载过程中,隧道衬砌结构弯矩、轴力分布形式如图 10 所示。

从图 10 看出,在水压作用下,底部弯矩大于拱部,拱肩向外,边墙向内,墙脚向外,仰拱向内,其中正弯矩仰拱最大,负弯矩墙脚弯矩最大,成为水压作用下,衬砌结构的薄弱部位,总体上呈现明显的“上小下大”型式。仰拱轴力略大于拱部,其中墙脚轴力最大,轴力总体呈椭圆形分布。

衬砌关键点弯矩、轴力随水压变化曲线如图 11 所示。

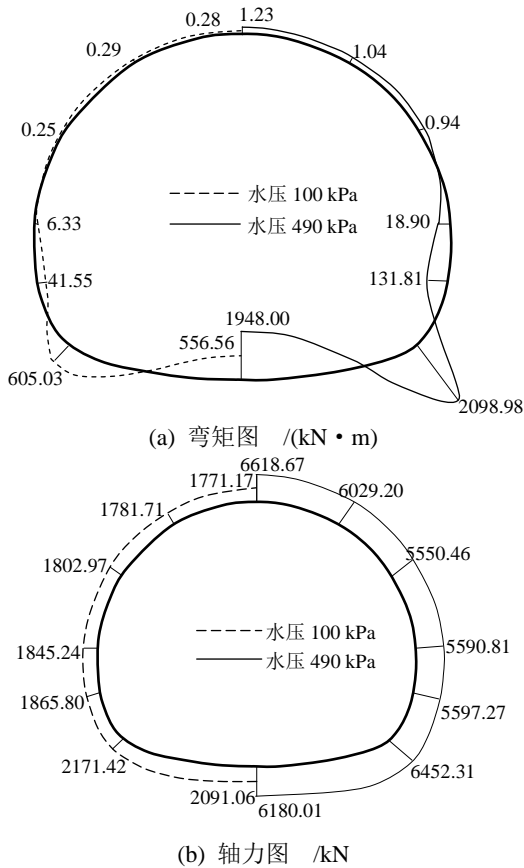


图 10 水压条件下隧道受力分布特征

Fig.10 Mechanics characteristics of lining under water pressure

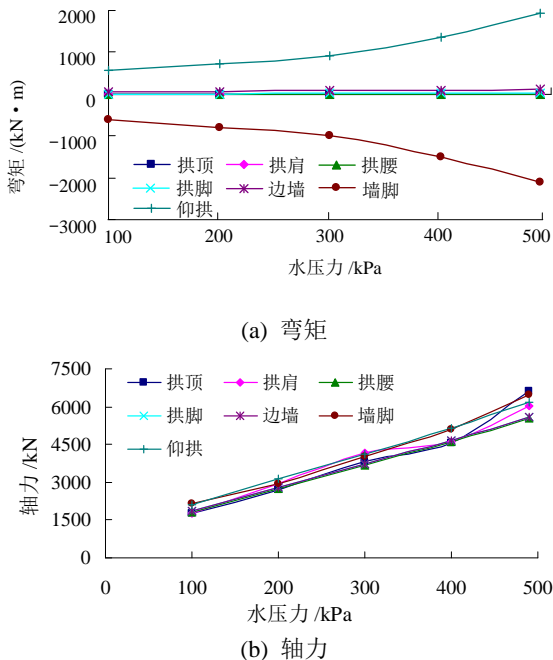


图 11 衬砌关键点内力随水压变化曲线

Fig.11 Variation curves of internal force for lining induced by water pressure

从图 11 看出，墙脚负(向外)弯矩最大，仰拱正(向内)弯矩最大，成为最不利的位置，隧道衬砌结

构外表面最不利部位在拱脚位置，内表面最不利部位在仰拱位置，拱顶受力相对较小，弯矩、轴力随水压似乎呈线性增大。而且同一水压条件下，衬砌各部位轴力差异不大。当水压 400kPa 时，得到的衬砌关键部位的破坏模式如表 4 所示。

表 4 关键部位力学特征汇总

Table 4 Summarizability of mechanical characteristics for key positions

受力状态	拱顶	拱腰	拱脚	墙脚	仰拱
弯矩/(kN·m)	-0.84	-0.77	15.76	-1500.49	1375
轴力/kN	4581.79	4613.59	4654.42	5082.09	5157.77
破坏模式	安全	安全	安全	压剪破坏	压弯破坏

注：负弯矩表示向外弯曲；正弯矩表示向内弯曲。

3.2 主体结构安全系数及失稳模式

按照钢筋混凝土矩形构件计算各个部位截面安全系数，当偏心距 $e_0 \leq 0.20h$ 时抗压控制，按小偏心公式计算：

$$K = \frac{\varphi \alpha R_a b h}{N} \quad (9)$$

当偏心距 $e_0 > 0.20h$ 时，从抗裂要求出发，抗拉控制，按大偏心公式计算：

$$K \leq \varphi \frac{1.75 R_1 b h}{N \left(\frac{6e_0}{h} - 1 \right)} \quad (10)$$

衬砌关键点安全系数随水压变化如图 12 所示。

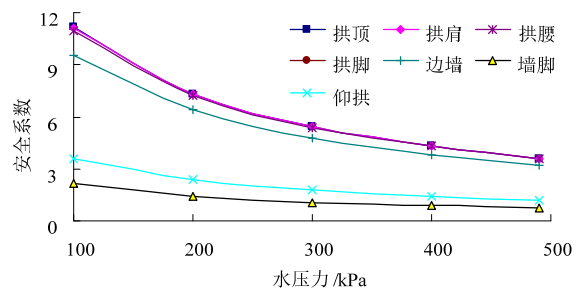


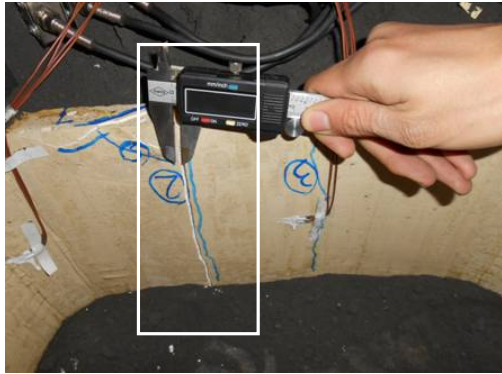
图 12 衬砌关键点安全系数与水压力关系

Fig.12 The relationships between safety factors of lining and water pressure

从图 12 看出，随着外水压力的增大，衬砌结构的安全系数均减小。值得指出的是墙脚和仰拱属于大偏心受拉控制，并且这两个位置的安全系数一直最小，成为破坏的关键控制部位。在加载过程中，高速铁路隧道衬砌结构承受水压为 490kPa。

水压加载过程中，衬砌墙脚首先发生压剪破坏，两侧墙脚内侧出现压溃现象，墙脚外表面出现

裂纹；接着仰拱发生压弯破坏，如图 13 所示。



(a) 仰拱内侧



(b) 墙脚外侧

图 13 水压作用下衬砌产生的裂缝图

Fig.13 Cracks of lining induced by water pressure through model test

4 数值模拟结果

4.1 计算模型

采用 ANSYS 有限元软件，建立三维非线性模型，计算网格见图 14。衬砌为不等厚的 SOLID65 单元，可模拟钢筋混凝土开裂过程，采用整体式配筋形式。设置 LINK10 单元，具有抗压不抗拉功能，模拟主体结构(C30 钢筋混凝土)和围岩(IV级)之间相互作用。

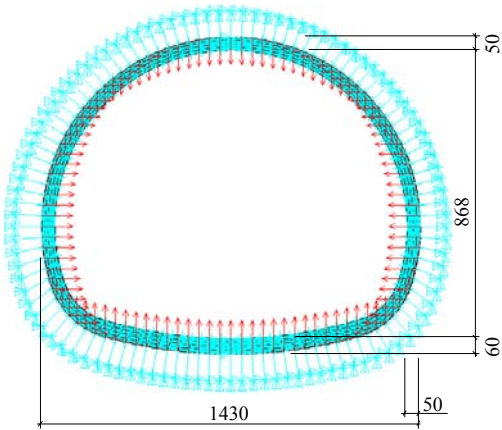


图 14 有限元计算模型 /cm

Fig.14 Calculation model using finite element

4.2 数值计算与模型试验结果比较

为验证水压模拟方法和试验结果的合理性，在水压为 400kPa 时，数值模拟与模型试验得到的弯矩和轴力如图 15 所示。

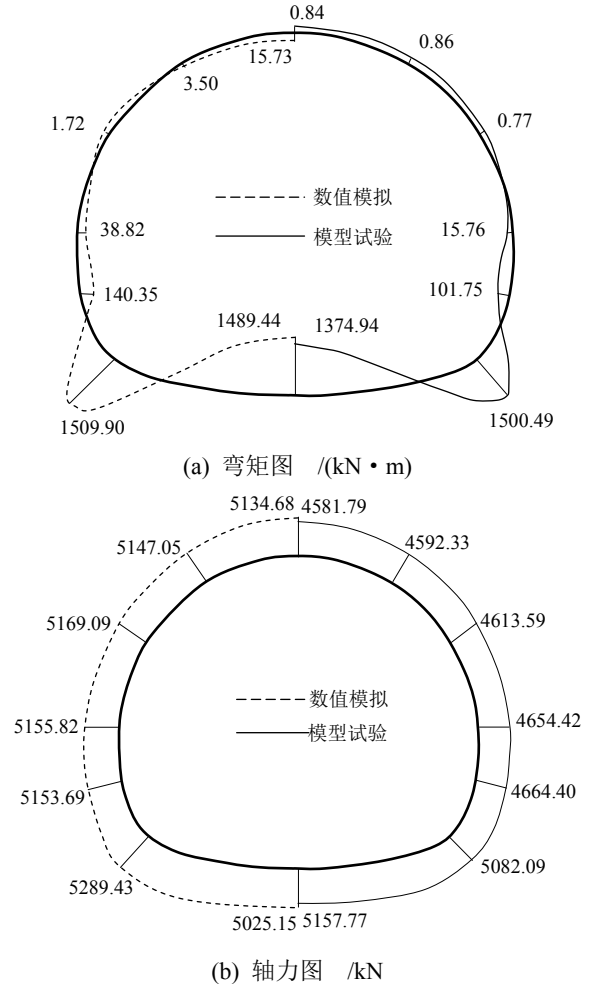


图 15 衬砌内力分布图(水压 400kPa 时)

Fig.15 Variation curves of internal force for lining when the water pressure is 400kPa

从图 15 看出，水压作用下最大弯矩发生在墙脚处，隧道衬砌模型试验和计算得到的弯矩/轴力分布极为相似。试验轴力比数值计算略小，拱圈部分轴力相差较大；仰拱至拱脚处相差较小。仰拱和墙脚处主要控制部位计算结果比试验结果略大，误差在 5% 以内，即破坏形态和受力特征结论可靠，从而验证了模拟水压加载方法和模型试验正确性。试验时用环箍力来代替水压力，解决了模型材料遇水崩解问题；在拱顶有误差较大，但是拱顶不是安全控制部位；在安全控制部位(墙脚、仰拱)误差很小。因此，采用模拟水压加载的方法是合理的。

水压作用下，衬砌主应力如图 16 所示。

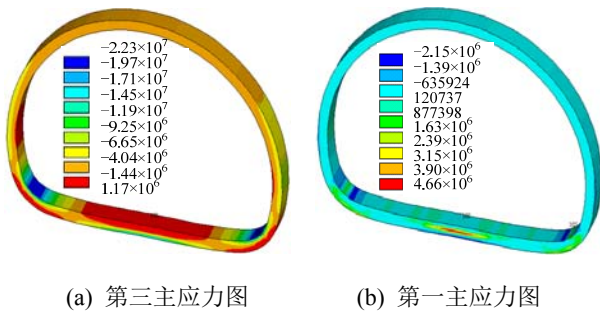


图 16 衬砌主应力云图 /Pa

Fig.16 Principal stress of lining induced by factual radial water pressure

如图 16 所示, 衬砌在水压作用下, 拱顶、仰拱内侧是拉应力, 外侧是压应力; 拱腰、墙脚外侧是拉应力, 内侧是压应力。也就是说裂缝都是从受拉一侧开始产生和发展的, 拉应力大的区域, 裂缝数量和范围也越大。

当水压达到 450kPa 时, 仰拱、墙脚均出现裂缝; 水压 500kPa 时, 仰拱至拱脚部位基本上全是裂缝, 并且内外贯通, 已经完全破坏, 裂缝分布如图 17 所示。

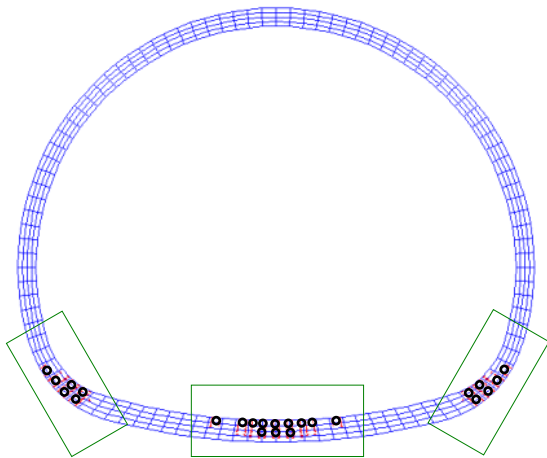


图 17 水压条件下隧道衬砌裂缝分布图

Fig.17 Cracks distribution of lining induced by factual radial water pressure

在水压加载过程中, 墙脚率先出现裂缝, 接着仰拱出现裂缝, 墙脚的裂缝范围不断扩大, 最后扩大至拱脚处, 每个位置裂缝的数量和范围随着荷载的增大而逐渐增多和加大, 并且先前出现裂缝的区域比后出现的区域裂缝数量要多、范围要大。最终裂缝分布如图 17 所示, 仰拱处裂缝出现在衬砌内侧, 墙脚处裂缝出现在衬砌外侧。建议加强隧道拱顶内侧、墙脚外侧配筋, 增强抗拉能力; 必要时增设墙脚箍筋, 提高受剪承载力。

5 结论

(1) 通过对马蹄形断面结构拱部、仰拱段分别施加不等的箍拉力来等效模拟实际水压作用, 其产生的衬砌内力与实际水压作用下衬砌力学效应一致, 为实现模型试验水压加载提供一种有效的方法, 成功解决了模型试验中水压力加载“瓶颈”问题。

(2) 针对马蹄形断面结构拱部、仰拱段分别箍拉力加载实际情况, 设计隧道模型试验的全周密闭水压模拟加载装置, 实现了对马蹄形隧道衬砌非均匀水压加载, 可较真实模拟“灯泡型”水压作用的衬砌结构受力特征。

(3) 衬砌在水压作用下, 底部弯矩大于拱部, 其中仰拱(正)和墙脚(负)弯矩最大, 为衬砌结构的薄弱部位, 在加载水压过程中属于大偏心受拉控制截面, 其余部位均处于小偏心受压控制。

(4) 综合模型试验和数值模拟结果, 衬砌承受极限水压为 450kPa, 墙脚先发生压剪破坏, 接着仰拱出现压弯。数值模拟与模型试验结果基本一致(关键控制部位相差 5%以内), 从而验证了水压模拟加载方法的正确性。

参考文献:

- [1] 邹金锋. 考虑水-力耦合时交通隧道非线性解析[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 105—111.
Zou Jinfeng. Nonlinear analytical solution of traffic tunnels considering the hydraulic-mechanical coupling [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 105—111. (in Chinese)
- [2] 高华喜, 闻敏杰. 内水压作用下粘弹性饱和土-隧洞衬砌相互作用[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 289—296.
Gao Huaxi, Wen Minjie. Interaction of viscoelastic saturated soil and tunnel lining subject to inner water pressure [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 289—296. (in Chinese)
- [3] 王梦恕, 谭忠盛. 中国隧道及地下工程修建技术[J]. 中国工程科学, 2010, 12(12): 4—10.
Wang Mengshu, Tan Zhongsheng. The construct technology of tunnel and underground engineering in China [J]. Engineering Sciences, 2010, 12(12): 4—10. (in Chinese)
- [4] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945—1956.
Qian Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945—1956. (in Chinese)

- [5] 王明年, 童建军, 周国军. 海底隧道锈蚀工字钢与喷射混凝土的粘结滑移试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 310—315, 330.
Wang Mingnian, Tong Jianjun, Zhou Guojun. Test research on the bond-slip between I-beam and shotcrete in undersea tunnel [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 310—315, 330. (in Chinese)
- [6] 侯艳娟, 张顶立, 郭富利. 涌水隧道支护对围岩力学性质的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3): 1152—1157.
Hou Yanjuan, Zhang Dingli, Guo Fuli. Influences of support on mechanical property of rock in water-containing tunnel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(3): 1152—1157. (in Chinese)
- [7] 谭忠盛, 李健, 卓越, 等. 无纺布对海底隧道衬砌防水作用的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1927—1932.
Tan Zhongsheng, Li Jian, Zhuo Yue, et al. Test study of waterproof effect of nonwoven fabrics on subsea tunnel lining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 1927—1932. (in Chinese)
- [8] 吕晓聪, 许金余. 海底圆形隧道在渗流场影响下的弹塑性解[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 216—221.
Lü Xiaocong, Xu Jinyu. Elastic-plastic solution for subsea circular tunnel under the influence of seepage field [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 216—221. (in Chinese)
- [9] 刘新荣, 石建勋, 刘元锋, 等. 隧道水灾模型试验研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 121—126.
Liu Xinrong, Shi Jianxun, Liu Yuanfeng, et al. Study on tunnel model test of water disasters [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 121—126. (in Chinese)
- [10] 李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128—1137.
Li Shucai, Zhou Yi, Li Liping, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling model test I [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1128—1137. (in Chinese)
- [11] Hernqvist L, Gustafson G, Fransson Å, et al. A statistical grouting decision method based on water pressure tests for the tunnel construction stage – A case study [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 33(1): 54—62.
- [12] Carranza-Torres C, Zhao J. Analytical and numerical study of the effect of water pressure on the mechanical response of cylindrical lined tunnels in elastic and elasto-plastic porous media [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(3): 531—547.
- [13] Fahimifar A, Zareifard M R. A theoretical solution for analysis of tunnels below groundwater considering the hydraulic-mechanical coupling [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24(6): 634—646.
- [14] 谢楠, 杨成永, 欧阳杰, 等. 喷射混凝土早龄期徐变的试验研究及预测[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 375—380.
Xie Nan, Yang Chengyong, Ouyang Jie, et al. The upsurge of urban underground space development in China [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 375—380. (in Chinese)
- [15] 韩建新, 李术才, 李树忱, 等. 贯穿裂隙岩体锚固方向优化的模型研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 171—177.
Han Jianxin, Li Shucai, Li Shuchen, et al. The model study on optimization of bolting direction of rock mass with persistent cracks [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 171—177. (in Chinese)
- [16] 丁伯阳, 宋新初, 袁金华. 饱和土隧道内集中荷载作用下振动位移反应的 Green 函数解答[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 153—157.
Ding Boyang, Song Xinchu, Yuan Jinhua. Solution for displacement response of saturated soil by a concentrated load in tunnel of rectangular section [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 153—157. (in Chinese)
- [17] Fernandez G, Moon J. Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel – Part 2: Verification of proposed method using numerical modeling [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 567—574.
- [18] 何川, 唐志成, 汪波, 等. 内表面补强对缺陷病害隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 406—412.
He Chuan, Tang Zhicheng, Wang Bo, et al. Research on effect of inner surface reinforcing on structure bearing capacity by model test in defective tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 406—412. (in Chinese)