

基于扩展有限元的隧道衬砌裂缝开裂数值分析

黄宏伟^{1,2}, 刘德军^{1,2*}, 薛亚东^{1,2}, 王平让^{1,2}, 刘 印^{1,2}

(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: 分别通过对浙江区域 48 条公路隧道衬砌裂缝病害的现场调查和大量裂缝病害实例的统计分析, 获得了公路隧道衬砌裂缝的分布特征规律和衬砌开裂的主要影响因素。通过与衬砌原型试验的对比, 验证了衬砌开裂扩展有限元分析方法的适用性。在这些研究的基础上, 采用扩展有限元研究了衬砌在主要影响因素作用下的裂缝分布规律、裂缝扩展过程、裂缝外观表现形式及发生机制。该研究为衬砌裂缝产生原因的分析提供了借鉴, 同时也为隧道衬砌裂缝病害的防治与加固修复打下了基础。

关键词: 衬砌裂缝; 分布规律; 影响因素; 扩展有限元; 开裂机制

中图分类号: U457; TU4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)02-0266-10

作者简介: 黄宏伟(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道及地下工程动态信息化施工、风险管理与评估的研究。E-mail: huanghw@tongji.edu.cn。

Numerical analysis of cracking of tunnel linings based on extended finite element

HUANG Hong-wei^{1,2}, LIU De-jun^{1,2}, XUE Ya-dong^{1,2}, WANG Ping-rang^{1,2}, LIU Yin^{1,2}

(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: Through the inspection of 48 tunnels in Zhejiang Province and the statistical analysis of numerous cases of lining cracks, the distribution laws and main influencing factors of lining cracks are attained. The applicability of XEFM for lining cracking is proved by the comparison between the numerical analysis and the prototype test. The propagation and distribution laws, appearances and cracking mechanism of cracks under main influencing factors are studied by using XEFM. This research provides reference for deciding the reasons of lining cracks and lay foundation for preventing and repairing lining cracks.

Key words: lining crack; distribution law; influencing factor; extended finite element; cracking mechanism

0 引 言

随着隧道建设规模不断扩大以及运营时间的增加, 衬砌结构的系列病害也逐渐暴露出来, 其中裂缝是最为主要的病害之一^[1-2]。裂缝不仅影响衬砌结构的美观和耐久性, 破坏结构的完整性, 缩短隧道的维护周期和使用寿命, 而且严重的情况下会造成衬砌的整体崩塌, 导致巨大的经济损失和不良的社会影响。因此, 近年来国内外学者开展大量关于衬砌裂缝的研究工作, 取得了系列的研究成果^[3-10]。但是这些研究大部分都是以具体实例为主, 尚未能从整体角度对衬砌裂缝的分布规律和主要影响因素达成统一的认识。此外, 目前关于裂缝产生原因的判断大多数是笼统且定性的, 而有关裂缝的数值分析研究均是从应力和变形角度出发, 定性地分析裂缝可能产生的部位, 缺乏直观性和对裂缝扩展过程及规律的研究。因此, 从衬砌裂缝产生原因的分析、隧道衬砌裂缝的预防和后期的加固与修复角度出发, 尚需要做进一步的工作。笔者

先对浙江区域的 48 条隧道进行了现场调查, 分析了衬砌裂缝的分布规律特征, 然后通过文献查阅, 统计了大量的隧道裂缝病害的实例, 全面分析了衬砌开裂的影响因素。采用扩展有限元对日本隧道研究所开展的衬砌原型试验进行分析, 验证了衬砌裂缝扩展有限元分析方法的可行性。在这些研究的基础上, 采用扩展有限元对衬砌在主要影响因素作用下的裂缝产生部位、扩展规律、外观形式、产生机制以及衬砌破坏形式进行了探讨。

1 裂缝分布规律及开裂影响因素分析

(1) 裂缝分布规律

笔者分别于 2010 年 8 月和 12 月先后两次对浙江

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB013800);
长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1029)

收稿日期: 2012-05-09

*通讯作者

区域的48条公路隧道裂缝病害进行了现场调查。调查结果表明:衬砌裂缝主要以环向裂缝和纵向裂缝为主,所占比例分别为46.44%和42.34%;在分布位置上,拱顶、拱腰和边墙上的裂缝所占比例分别为42.27%,27.08%和30.65%。具体来说,环向裂缝主要分布于边墙,比例为44.48%,而分布于拱顶和拱腰的比例大体相当,分别为30.38%和25.14%;纵向裂缝绝大部分分布于拱顶,比例为64.92%,其次为拱腰,比例为27.30%,最少的是边墙,比例仅为7.78%。

图1为调查统计所得到的围岩级别与每百米衬砌所含裂缝数量的关系图。调查统计结果表明:随着围岩级别从II至IV的逐渐升高,每百米衬砌所含的裂缝数量逐渐增多,分别为1.39,6.77和12.79条,而当围岩级别达到V级时,每百米衬砌所含有的裂缝数量明显降低,其值为5.42条。分析原因,这可能归结于V级围岩一般处于隧道进出口地段或隧道内部破碎断层带,而针对隧道进出口或穿越破碎带地段都具有专门的设计,如增加衬砌厚度和配筋量,同时施工过程中这些地段也采用相对较为保守的施工工艺,使得衬砌的承载力提高以及后期的运营环境得到了改善,因此造成了这一现象。

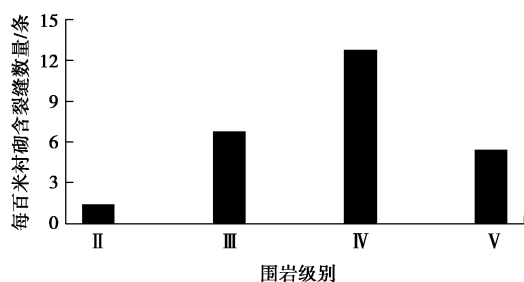


图1 围岩级别与每百米衬砌所含裂缝数量关系图

Fig. 1 Relationship between grade of surrounding rock and number of cracks of lining per 100 m

(2) 开裂影响因素分析

通过文献统计分析,共收集到了境内外109条含有衬砌裂缝的有效案例,其中公路隧道86条,铁路隧道18条,人行隧道等5条。假设案例中明确表明:导致衬砌裂缝的因素中包含因素A的隧道数量为N,则A因素的统计概率 P_i 为 $N/109$ 。依此,可得到造成衬砌裂缝的因素比重分图,见图2。

由于在所统计的案例中,大部分案例详细指出了造成衬砌裂缝的具体原因,但是也有部分文献没有展开深入的分析,而是笼统地归结于为地质因素、施工因素和设计因素等其他因素中的某一类或某几类因素。除此之外,在统计分析时,也将小比例因素,如火灾、车辆振动等,归结于其他因素。因此,这造成了在具体因素统计中其他因素所占比例最高。分析结

果表明,引起隧道二次衬砌裂缝的主要因素依次为:偏压、混凝土收缩、背后空洞、滑坡、松弛压力、不均匀沉降、地下水作用、温度变化和施工缝处理不当。

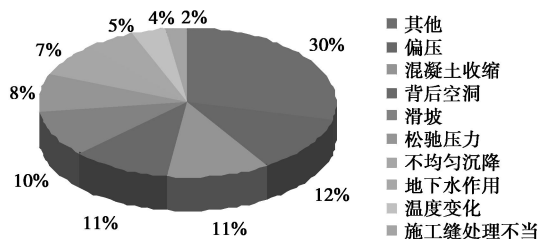


图2 衬砌裂缝影响因素比重分布图

Fig. 2 Distribution proportion of factors for lining cracks

2 衬砌裂缝扩展有限元分析可行性研究

美国西北大学Belytschko教授在1999年首次提出了扩展有限元(XFEM)的思想^[11],此可看作属于单位分解法的一个特例,利用有限元形函数作为单位分解函数,引入非线性的位移模式来描述断裂位移。与常规有限元最主要的区别在于^[11-12]:所使用的网格与结构内部的几何或物理界面无关,从而克服了在诸如裂纹尖端等高应力和变形集中区进行高密度网格剖分所带来的困难,模拟裂纹生长时也无需对网格进行重新剖分。

XFEM方法^[12-14]采用有限元形函数构造出求解域上的一组单位分解函数,将节点相邻单元组成的节点影响域看作一组覆盖,然后在覆盖上定义位移模式,全域的位移近似描述可以写为

$$u_{app}(x) = \sum_i N_i(x) \sum_j \beta_{ij} p_j(x) \quad , \quad (1)$$

式中,下标*i*表示节点影响域, $N_i(x)$ 为定义在节点影响域上的单位分解函数, $\{p_j(x)\}$ 是局部近似空间上的一组基。当 $\{p_j(x)\}$ 仅含有常数项时, β_{ij} 即为节点位移,式(1)也就可以退化为传统有限元的位移近似公式。

当计算区域有裂缝时,位移的逼近形式可以表达为^[15]

$$u^h(x) = \sum_{i \in I} N_i(x) u_i + \sum_{j \in J} \bar{N}_j(x) (H(x) - H(x_j)) a_j + \sum_{k \in K} \bar{N}_k(x) \sum_{l=1}^4 (B_l(x) - B_l(x_k)) b_{lk} \quad , \quad (2)$$

其中, $N_i(x)$ 和 $\bar{N}_j(x)$ 为有限元形函数, u_i , a_j 和 b_{lk} 为结点位移和结点加强变量, I 为离散结构中所有结点的集合, J 为裂纹完全贯穿单元节点的集合, $H(x)$ 和 $B_l(x)$ 分别为广义Heaviside裂纹面改进函数^[15]和裂尖Westergaard场的基^[16]。

日本隧道研究所开展了 1:1 的衬砌模型试验^[17], 研究了衬砌拱顶存在集中荷载和 30° 范围松弛地压等工况作用下的裂缝扩展情况。试验中, 通过布置于衬砌外表面的全周千斤顶来模拟围岩抗力和施加荷载。为了分析扩展有限元模拟衬砌裂缝扩展过程及规律的适用性, 选取后一种工况进行对比分析。计算模型采用荷载-结构模型, 通过引入非线性弹簧来模拟围岩地层抗力。分析中考虑两类破坏模式^[17], 一类混凝土达到极限压应变而发生压溃, 另一类为由于裂缝的扩展而导致的衬砌承载力散失。裂缝扩展准则采用最大周向拉应力准则。具体的各项模拟分析参数详见文献^[17]。

图 3~5 分别为试验与扩展有限元分析得到的荷载-拱顶收敛位移、应力-拱顶裂缝扩展状态和裂缝分布的对比图。与试验结果相比, 在图 3 中, 由于在试验前, 衬砌已经存在损伤, 同时试验中采用固定千斤顶荷载来模拟地层抗力, 使得加载初期地层抗力过大, 而加载后期地层抗力过小, 因此造成试验与数值分析所得结果略有差别。从荷载与拱顶裂缝扩展状态、裂缝分布上看, 二者所得到的结果基本上是一致的。因此, 采用扩展有限元来模拟衬砌裂缝分布及其扩展规律是可行的。

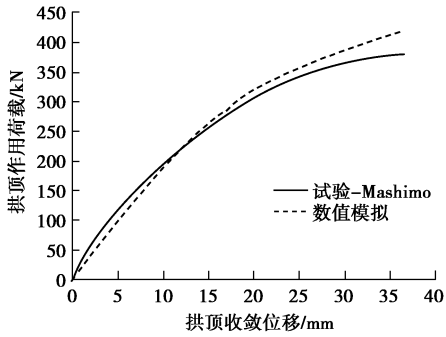


图 3 拱顶处荷载-收敛位移曲线

Fig. 3 Curves of load-convergence displacement at vault

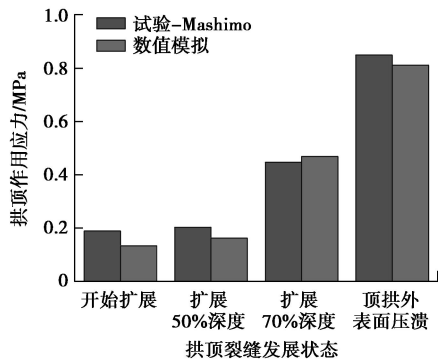


图 4 拱顶应力与裂缝扩展深度关系图

Fig. 4 Relationship between pressure and crack extended depth at vault

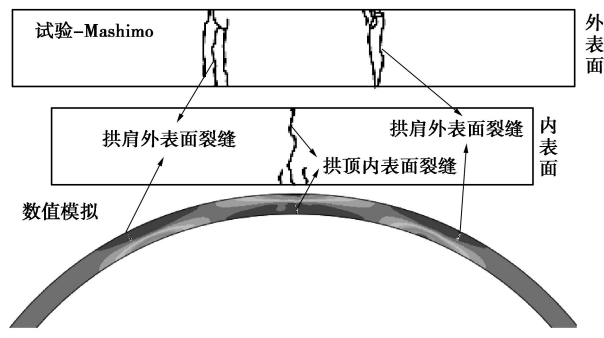


图 5 试验与数值分析所得裂缝分布对比图

Fig. 5 Cracks distribution comparison between test and numerical calculation

3 开裂主要影响因素扩展有限元分析

根据裂缝现场调查结果, 主要针对 IV 级围岩条件下的衬砌裂缝展开研究。计算模型采用荷载结构模型, 围岩抗力系数取 350 MPa/m^[18]。依据业主提供的隧道设计资料, 衬砌采用 C30 混凝土, 厚度为 350 mm。混凝土应力应变关系依照文献^[19]进行选取, 断裂能 $G_f^I = G_f^{II} = G_f^{III} = 80 \text{ N/m}^{[20-21]}$ 。

(1) 偏压

衬砌结构承受显著不对称围岩荷载的隧道称为偏压隧道, 主要有地形偏压和局部偏压两类^[22-24]。文献^[3]通过试验对地形偏压进行了研究, 主要对局部偏压展开分析。图 6 为局部偏压计算示意图。

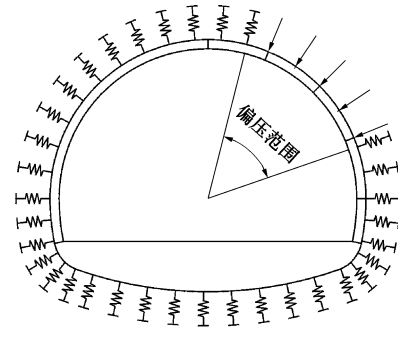


图 6 偏压计算示意图

Fig. 6 Calculation schematic diagram for bias pressure

局部偏压作用下, 当荷载达到一定值时, 衬砌首先在内表面沿偏压荷载中心产生一条主裂缝, 并且在其两侧发育两处受压集中区域。随着偏压荷载的增大, 接着在受压集中区域的衬砌外表面产生一条主裂缝, 见图 7。在破坏模式上, 当局部偏压范围较小时, 衬砌由于内表面裂缝发展, 最终导致衬砌外表面混凝土压溃, 而当局部偏压范围增大到一定值时, 衬砌破坏方式转变为内表面上部受压集中区域混凝土压溃。

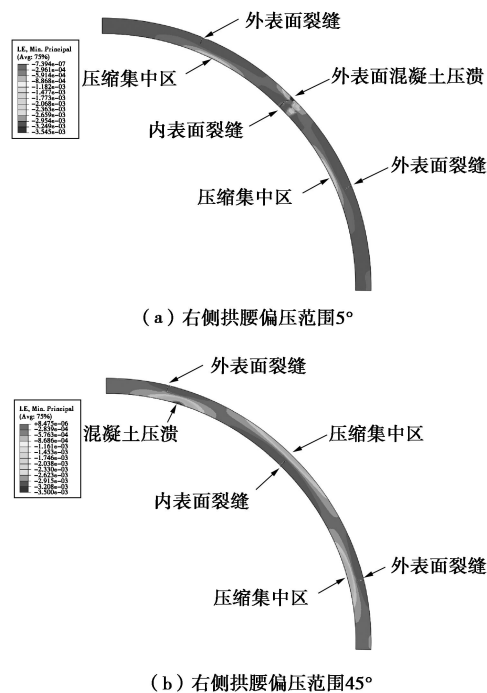


图7 右侧拱腰局部偏压作用下衬砌裂缝分布及破坏形式
Fig. 7 Cracks distribution and failure modes under local bias pressure at right side

在扩展速率上,随着偏压范围的增大,裂缝扩展至同样深度所对应的荷载明显降低,扩展速率增加,见图8。而对于衬砌在固定范围的偏压荷载作用下,随着荷载的增大,裂缝的扩展速率是逐渐减小的。

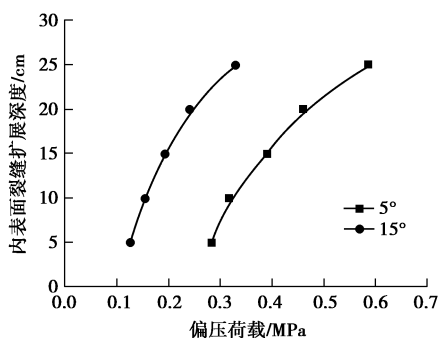


图8 偏压荷载与衬砌内表面裂缝扩展深度关系曲线

Fig. 8 Relationship between bias pressure and depth of inner crack

在偏压荷载的作用下,对于衬砌内表面裂缝来说,裂缝两侧主要产生张开,张开量随着偏压荷载的增大而增大,但是沿着裂缝的扩展方向却逐渐减小,见图9,因此裂缝的外观形式将呈现出“Λ”型形状。

图10为偏压荷载与内表面裂缝处截面偏心距的关系曲线。分析结果表明:当偏压范围一定时,随着偏压荷载的增大,裂缝截面处的轴力和弯矩均逐渐增大,但是轴力的增加速率大于弯矩的增加速率,特别是在裂缝扩展阶段,因此造成截面处内力从以弯矩为主导逐渐过渡为以轴力为主导,偏心距明显减小,裂缝的扩展速率降低。当偏压荷载一定时,随着偏压范

围的增大,裂缝截面处的偏心距也呈现出类似的规律。

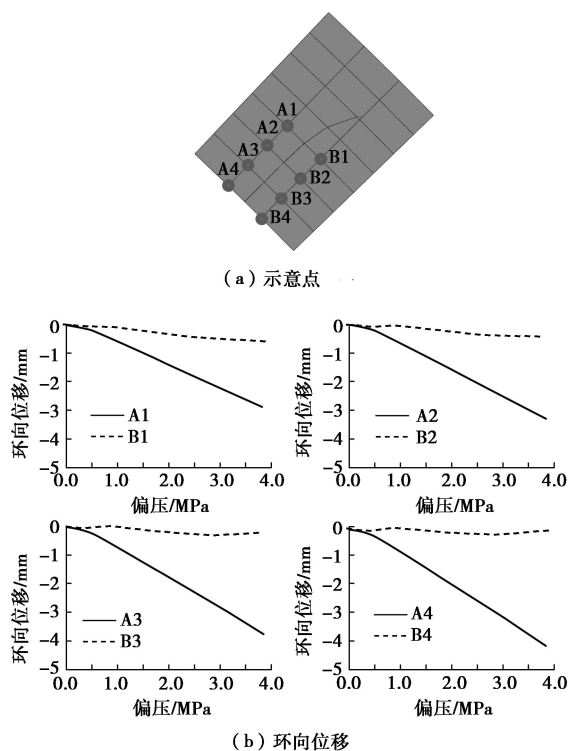


图9 衬砌内表面裂缝两侧环向位移对比(5°)

Fig. 9 Comparison of circumferential displacement at both sides of inner crack (5°)

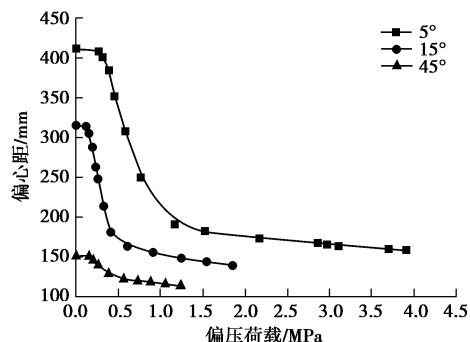


图10 偏压荷载与内表面裂缝截面偏心距关系曲线

Fig. 10 Relationship between bias pressure and eccentricity at cross-section of inner crack

(2) 背后空洞

对于衬砌背后空洞,采用地层弹簧缺失来加以模拟,见图11。针对浙江区域隧道,假设隧道埋深为30m,主要分析不同空洞位置及大小工况下的裂缝分布和发展规律,具体位置为拱顶和拱腰,空洞大小为5°,10°,15°,30°和45°,共10种工况。

拱顶存在空洞时,当荷载增加到一定量值时,衬砌边墙内表面及拱脚外表面均有裂缝发展,见图12(a)。空洞较小时(5°,10°和15°三种工况),在拱顶区域内表面存在一处受压集中区,但是并未产生裂缝,衬砌的破坏形式表现为拱脚内表面混凝土压溃。

当空洞增大到一定程度时 (30° 工况), 随着荷载的增大, 首先在拱顶内表面受压集中区域两侧分别出现一条主裂缝, 随着荷载的继续增大, 接着在衬砌拱顶外表面开始发育一条主裂缝, 见图 12 (a)。随着空洞的继续增大 (45° 工况), 衬砌裂缝的扩展过程和分布规律并未发生改变, 但是衬砌的破坏形式转变为由于拱顶部位的裂缝扩展而导致的衬砌结构承载力散失。此时, 二次衬砌的承载力急剧下降。

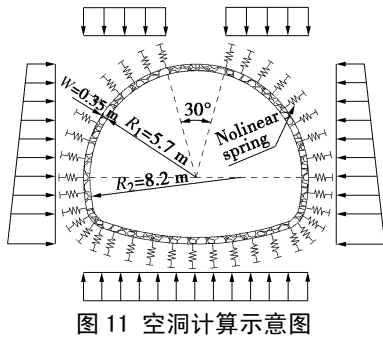


图 11 空洞计算示意图

受压区和区域外表面的一条主裂缝, 但是衬砌的破坏形式尚未发生改变, 见图 12 (b)。随着空洞的进一步发展 (45° 工况), 与拱顶 45° 范围空洞工况一样, 此时衬砌的破坏形式也转变为了由于裂缝扩展而导致的衬砌结构承载力散失。

当衬砌内表面裂缝是由于衬砌背后存在空洞的原因所导致时, 裂缝两侧将会同时产生错动和张开。张开量和错动量均随着裂缝的发展而增大, 但是在某一固定状态下张开量沿着裂缝深度方向是逐渐减小的, 见图 13 拱顶空洞下 (30°) 衬砌内表面裂缝两侧位移对比图。对于空洞位于拱腰部位的衬砌内表面裂缝也有类似的规律。

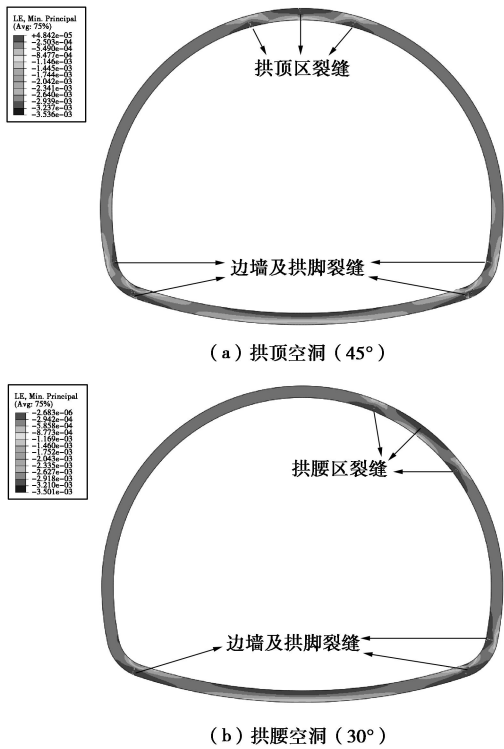


图 12 空洞条件下的裂缝分布

拱腰存在着空洞时, 衬砌拱脚部位外表面仍有裂缝发展。当空洞范围较小时 (5°, 10° 和 15° 三种工况), 边墙两侧均有裂缝发展, 但是空洞侧边墙裂缝发展更为严重, 衬砌的破坏形式表现为空洞侧拱脚内表面混凝土压溃。随着空洞范围的增大 (30° 工况), 远离空洞侧的衬砌边墙不再出现裂缝, 而空洞侧边墙内表面裂缝发展严重加剧, 并且拱腰内表面开始出现两条主裂缝, 同时在这两条裂缝的中间存在一处集中

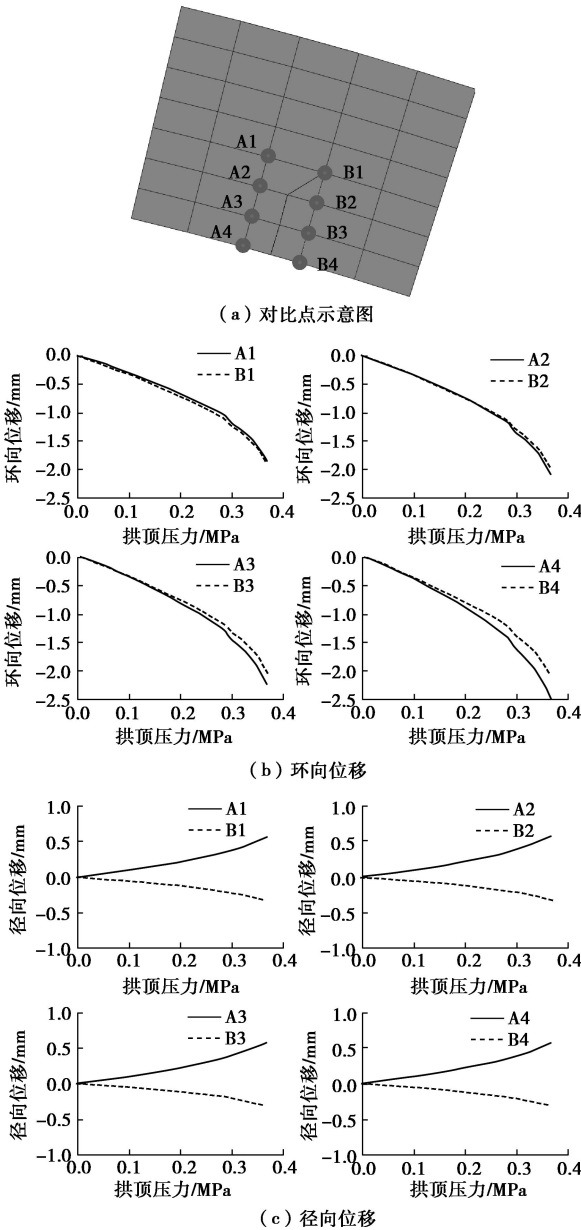


图 13 拱顶空洞下 (30°) 衬砌内表面裂缝两侧位移对比

Fig. 13 Comparison of displacements at both sides of inner crack under void behind vault (30°)

图 14 为拱顶存在 30° 大小的空洞时衬砌内表面裂缝截面的内力关系曲线。截面内力分析表明, 内表面裂缝截面主要受到弯矩和剪力复合作用而产生的弯剪复合裂缝, 这与裂缝外观表现是一致的。

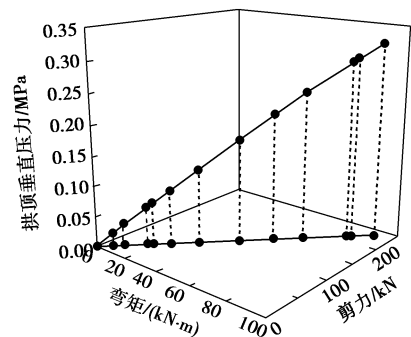


图 14 拱顶空洞 (30°) 下内表面裂缝截面的内力关系曲线
Fig. 14 Relationship of internal forces at crack cross-section of lining inner under void behind top arch (30°)

(3) 松弛地压

松弛地压是公路隧道较为常见的一种地质灾害。本文主要研究松弛压力的范围 (5°, 10°, 15°, 30° 和 45° 共 5 种工况) 及大小对隧道衬砌裂缝的分布及其扩展规律的影响。松弛地压的模拟示意图见图 15。

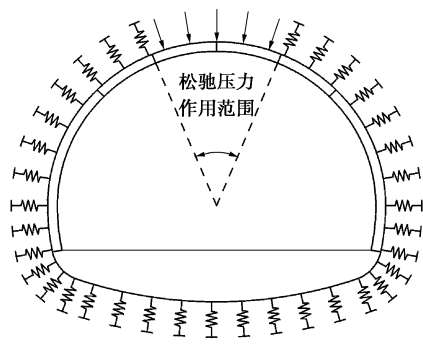


图 15 松弛地压模拟示意图
Fig. 15 Calculation schematic diagram for loose pressure

图 16 为拱顶在不同范围的松弛地压作用下衬砌裂缝分布及破坏图。从分析结果可知, 在松弛地压的作用下, 衬砌拱顶内表面首先发育一条主裂缝, 随着荷载的增大, 接着会在拱肩外表面两侧分别发育一条主裂缝。除此之外, 在衬砌拱肩部位内表面两侧分别存在一处受压集中区域, 并随着松弛压力作用范围的增大受压集中效应越明显。从破坏形式上看, 在拱顶存在 5°, 10°, 15° 和 30° 范围松弛地压 4 种工况下, 衬砌的破坏形式表现为拱顶外表面混凝土压溃, 而拱顶在 45° 范围的松弛地压作用下, 衬砌破坏形式转变为拱肩处内表面混凝土压溃。

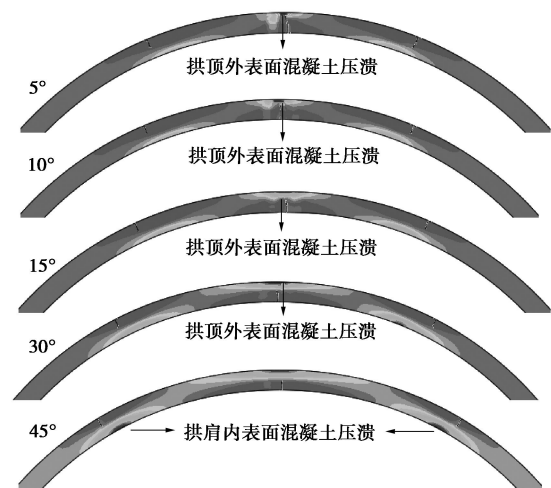


图 16 松弛地压作用下衬砌裂缝分布及破坏图
Fig. 16 Cracks distribution and failure modes under loose pressure with different ranges

图 17 为分析得到的不同工况下的拱顶裂缝扩展速率曲线。从计算结果可知, 当拱顶松弛压力作用范围较小时, 拱顶裂缝扩展至同一深度所对应的开裂荷载随着松弛压力作用范围的增大而明显减小, 扩展速率增加, 见图 17 中 5°, 10° 和 15° 曲线。当松弛压力作用范围超过一定值时, 裂缝的扩展速率开始降低, 当混凝土压溃部位由外表面转移至内表面时, 拱顶裂缝的扩展速率明显降低, 见图 17 中的 30° 和 45° 曲线。对于衬砌在某一固定范围的松弛压力作用下, 拱顶裂缝的扩展速率是逐渐减小的。

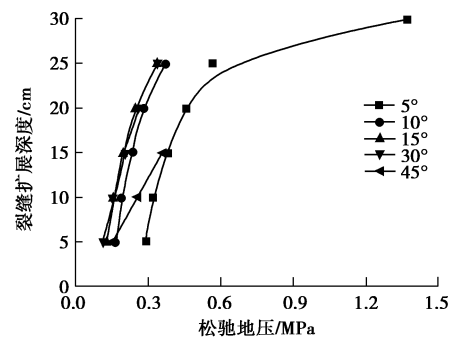


图 17 松弛地压作用下拱顶裂缝扩展速率曲线
Fig. 17 Extended rate curves under loose pressure with different ranges

与偏压荷载作用一样, 松弛地压作用下造成的衬砌内表面裂缝外观形式也将呈现出“Λ”型形式, 见图 18。

图 19 为拱顶处裂缝截面偏心距与松弛压力之间的关系曲线。分析结果表明: 随着松弛压力作用范围的增大, 拱顶内表面裂缝截面处的偏心距迅速降低。同时当偏压范围一定时, 随着偏压荷载的增大, 偏心距经历了缓慢降低、迅速降低 (裂缝扩展阶段) 和趋

于稳定 3 个阶段。

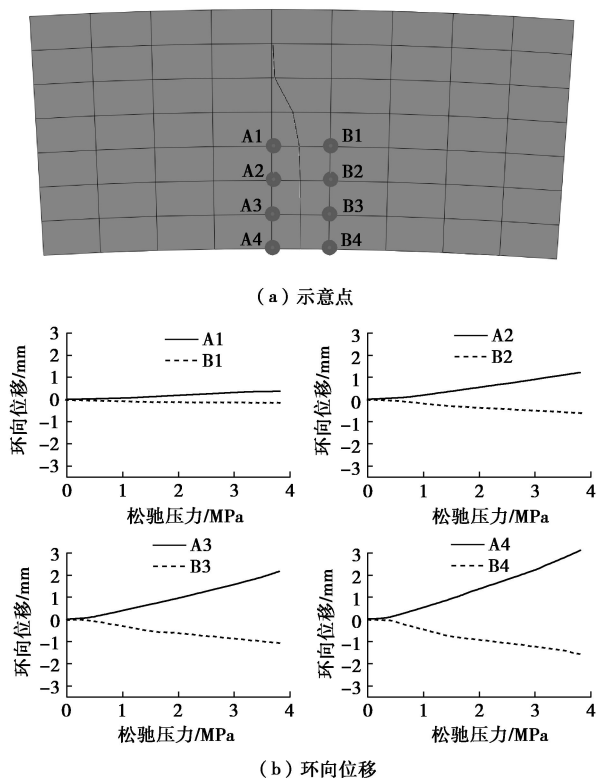


图 18 松弛地压作用下拱顶裂缝两侧环向位移对比 (5°)
Fig. 18 Comparison of circumferential displacement at both sides of crack of top arch under loose pressure (5°)

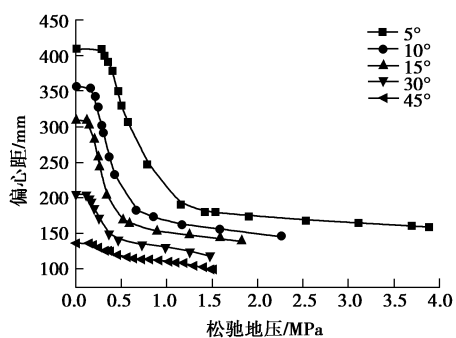


图 19 松弛压力与内表面裂缝截面偏心距关系曲线
Fig. 19 Relationship between loose pressure and eccentricity of inner crack cross-section at top arch

图 20 衬砌破坏时拱顶裂缝处截面弯矩、轴力与松弛压力作用范围之间的关系曲线。当松弛压力作用范围小于 30° 时, 截面内力以弯矩为主导 (大偏心受压), 拱顶有裂缝发展, 最终的破坏形式为拱顶外表面压溃。随着松弛压力从 30° 向 45° 范围过度, 拱顶截面处的轴力迅速增加, 使得拱顶内表面裂缝虽然有所发育, 但是衬砌破坏形式发生了转变。随着松弛压力作用范围的进一步发展, 拱顶裂缝截面内力变为以轴力为主导, 当松弛压力范围达到一定范时 (见图 20, 介于 45° ~90°), 拱顶处不在产生裂缝。

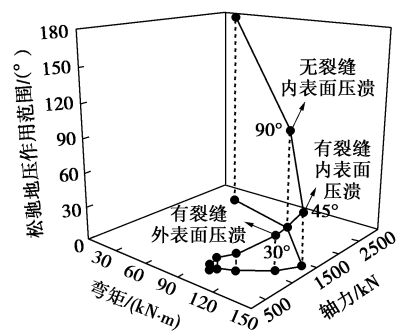


图 20 拱顶松弛压力作用范围 - 裂缝截面内力关系曲线
Fig. 20 Relationship between range of loose pressure and internal force of inner crack cross-section at top arch

(4) 不均匀沉降

图 21 为不均匀沉降的计算示意图。在不均匀沉降的作用下, 衬砌拱顶外表面首先产生环向裂缝, 但是它们的扩展速率缓慢, 随着沉降量的继续增大, 接着衬砌边墙底部开始产生环向裂缝, 并随着沉降量的增大迅速向上扩展, 见图 22。

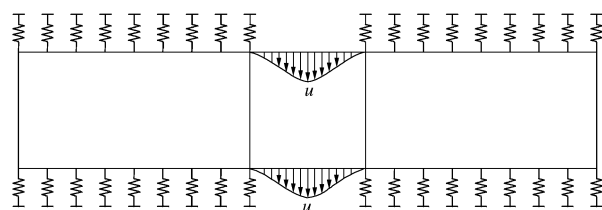


图 21 不均匀沉降计算示意图
Fig. 21 Calculation schematic diagram of differential settlement

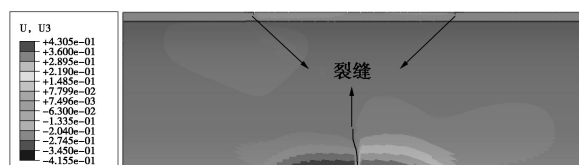


图 22 不均匀沉降裂缝分布
Fig. 22 Distribution of cracks under differential settlement

图 23 为边墙裂缝两侧相同高程点的位移对比曲线, 对比点示意图见图 23 (a)。在不均匀沉降作用下, 边墙环向裂缝两侧将会同时产生错动和张开, 并且它们的量值都随着沉降量的增大而增大, 见图 23 (b) 和 (c)。另外, 在某一固定沉降的作用下, 裂缝两侧的张开量沿着裂缝扩展方向逐渐减小, 见图 23 (c)。

图 24 为边墙环向裂缝截面的内力与沉降量之间的关系曲线。分析可知, 不均匀沉降作用下, 边墙裂缝是由弯矩与剪力共同作用产生弯剪复合裂缝。

(5) 滑坡

对于滑坡来说, 按照滑坡方向与隧道轴向的关系, 可以分为垂直型和平行型两类。对于滑坡方向与隧道

轴向方向斜交的情况, 根据相交的角度可以简化为上述两类。滑坡的计算示意图见图 25。

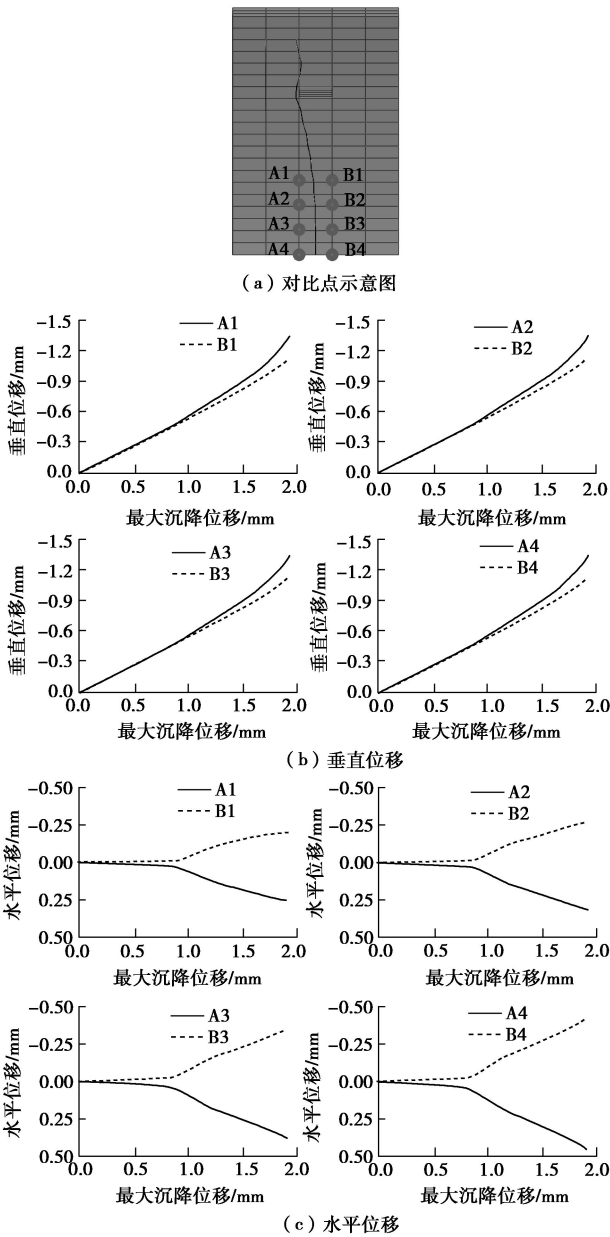


图 23 边墙裂缝两侧位移对比

Fig. 23 Comparison of displacement between both sides of crack

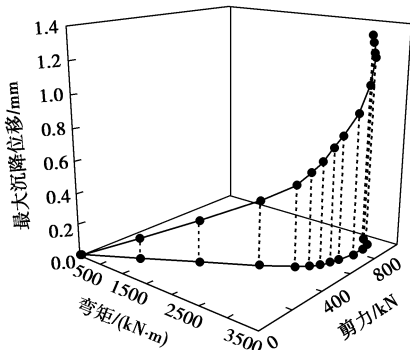


图 24 内表面裂缝处截面内力与最大沉降量关系曲线

Fig. 24 Relationship between internal forces at cross-section of inner crack and maximum settlement

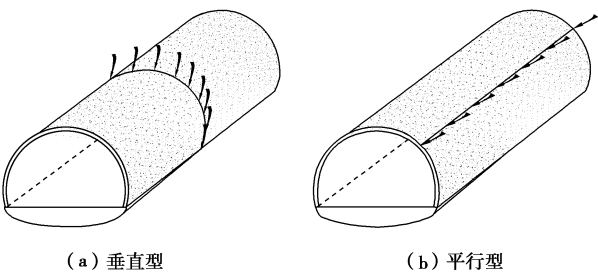


图 25 滑坡计算示意图

Fig. 25 Calculation schematic diagram of landslide

图 26 为滑坡作用下的衬砌裂缝分布图。对于滑坡造成的裂缝, 两种工况作用下, 衬砌的承载力相差较大, 因此造成衬砌破坏时最大位移量值相差较大。从发展过程来看: 在垂直型滑坡作用下, 衬砌首先在拱顶两侧外表面产生环向裂缝并迅速贯穿衬砌, 随着滑动力的增大裂缝逐渐向两侧和拱顶发展, 见图 26(a); 在平行型滑坡作用下, 衬砌内表面首先产生一条纵向裂缝, 随着滑动力的增加, 接着在衬砌的外表面产生一条纵向裂缝, 并且两条纵向裂缝是错位分布的, 见图 26(b)。

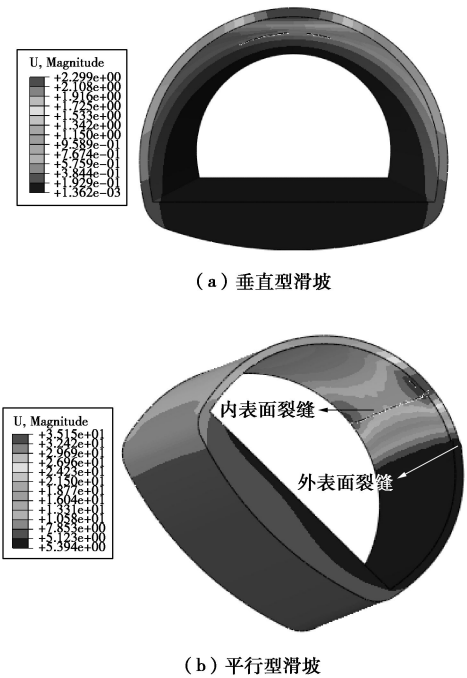


图 26 滑坡作用下的裂缝分布

Fig. 26 Distribution of cracks under landslide

与前 4 种主要影响一样, 分析隧道内表面裂缝截面的内力可知, 滑坡作用下, 裂缝是由弯矩和剪力共同作用产生的弯剪复合型裂缝。此时裂缝的外观表现为张开与错动同时发展, 但是错动表现的更为明显。

4 结 论

通过现场检查、实例统计和扩展有限元分析, 对

衬砌裂缝分布规律、影响因素及主要影响因素作用下的裂缝分布扩展规律、外观表现及产生机制做出了探讨, 获得以下主要结论:

(1) 公路隧道衬砌裂缝主要以环向裂缝和纵向裂缝为主。在分布位置上, 环向裂缝主要分布于边墙, 纵向裂缝绝大部分分布于拱顶; 随着围岩级别从Ⅱ至Ⅳ的逐渐升高, 每百米衬砌所含的裂缝数量逐渐增多, 当围岩级别达到Ⅴ级时, 每百米衬砌所含有的裂缝数量反而明显降低; 引起隧道二次衬砌裂缝的主要因素有偏压、混凝土收缩、衬砌空洞、滑坡和松弛压力。

(2) 试验对比分析表明, 扩展有限元可以为衬砌裂缝产生原因的分析提供一种强有力的手段。通过扩展有限元分析, 获得了衬砌在偏压、衬砌背后空洞、松弛压力、不均匀沉降和滑坡 5 项主要影响因素作用下的主裂缝分布和发展规律, 这为裂缝产生原因的判定提供了依据。

(3) 衬砌在松弛地压、偏压和垂直型滑坡的作用下衬砌内表面会发育一条纵向主裂缝; 在空洞的作用下, 将会在衬砌内表面的空洞两侧分布两条主裂缝; 在不均匀沉降和垂直型滑坡的作用下, 衬砌内表面分别沿着边墙和拱顶发育环向裂缝。

(4) 衬砌在松弛地压和偏压作用下产生的裂缝为张拉型裂缝, 外观主要表现为张开, 形状呈现为“Λ”型; 在空洞、不均匀沉降和滑坡作用下产生的裂缝为拉剪复合型裂缝, 裂缝外观表现为张开和错动同时发展。

参考文献:

- [1] 潘卫东, 张鲁新, 朱元林, 等. 坡体病害地段利用隧道变形规律预测山体灾害的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 502 - 507. (PAN Wei-dong, ZHANG Lu-xin, ZHU Yuan-lin, et al. Forecast method of mountain disaster using tunnel deformation law in slope field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 502 - 507. (in Chinese))
- [2] 王华牢, 刘学增, 李 宁, 等. 纵向裂缝隧道衬砌结构的安全评价与加固研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 2651 - 2656. (WANG Hua-lao, LIU Xue-zeng, LI Ning, et al. Safety evaluation of tunnel lining with longitudinal cracks and reinforcement design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2651 - 2656. (in Chinese))
- [3] 周晓军, 高 杨, 李泽龙, 等. 地质顺层偏压隧道围岩压力及其分布特点的试验研究[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(1): 11 - 20. (ZHOU Xiao-jun, GAO Yang, LI Ze-long, et al. Experimental study on the uneven rock pressure and its distribution applied on a tunnel embedded in geologically bedding strata[J]. Modern Tunneling Technology, 2006, 43(1): 11 - 20. (in Chinese))
- [4] 余 健, 何 川, 汪 波, 等. 衬砌背后空洞对隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 104 - 110. (SHE Jian, HE Chuan, WANG Bo, et al. Study on effect of cavities behind linings on bearing capacity of tunnel structure by model test[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(1): 104 - 110. (in Chinese))
- [5] WANG Tai-tien. Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes[J]. Engineering Geology, 2010(115): 80 - 95.
- [6] 蒲春平, 夏才初, 李永盛, 等. 隧道的温度应力及由其引起的裂缝开展规律的研究[J]. 中国公路学报, 2000, 13(2): 76 - 79. (PU Chun-ping, XIA Cai-chu, LI Yong-sheng, et al. Study of thermo-stress of highway tunnel and the law of line-fissure development caused by the thermo-stress[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 76 - 79. (in Chinese))
- [7] 刘庭金, 朱合华, 夏才初, 等. 云南省连拱隧道衬砌开裂和渗漏水调查结果及分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 64 - 67. (LIU Ting-jin, ZHU He-hua, XIA Cai-chu, et al. Analysis of site investigation of cracking and leakage on arcade tunnel lining of Yunan province[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 64 - 67. (in Chinese))
- [8] ANSELL Anders. Investigation of shrinkage cracking in shotcrete on tunnel drains[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 607 - 613.
- [9] 叶 飞, 何 川, 夏永旭. 隧道衬砌裂缝的跟踪监测与分析研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 97 - 104. (YE Fei, HE Chuan, XIA Yong-xu. Post-construction monitoring and analysis for highway tunnel lining cracks[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 97 - 104. (in Chinese))
- [10] 王建秀, 朱合华, 唐益群, 等. 双连拱隧道裂缝成因及防治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 195 - 202. (WANG Jian-xiu, ZHU He-hua, TANG Yi-qun, et al. Cracking twin-arc highway tunnels and its prevention measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 195 - 202. (in Chinese))
- [11] 李录贤, 王铁军. 扩展有限元法(XFEM)及其应用[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 5 - 20. (LI Lu-xian, WANG Tie-jun.

- The extended finite element method and its applications-A review[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, **35**(1): 5 - 20. (in Chinese))
- [12] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999(45): 601 - 620.
- [13] MOËS N, DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999(46): 131 - 150.
- [14] DAUX C, MOËS N, DOLBOW J, et al. Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, **48**: 1741 - 1760.
- [15] STAZI F L, BUDYN E, CHESSA J, et al. An extended finite element method with higher-order elements for curved cracks[J]. *Computational Mechanics*, 2003, **31**: 38 - 48.
- [16] FLEMING M, CHU Y A, MORAN B, et al. Enriched element-free galerkin method for crack tip fields[J]. *International Journal Numerical Method Engineering*, 1997, **40**: 1483 - 1504.
- [17] MASHIMO H, ISAGO N, YOSHINAGA S, et al. Experimental investigation on load-carrying capacity of concrete tunnel lining[C]// AITES-ITA World Tunnel Congress, 2002.
- [18] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [19] GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50010—2002 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))
- [20] 方修君, 金 峰, 王进廷. 用扩展有限元方法模拟混凝土的复合型开裂过程[J]. *工程力学*, 2007, **24**(增刊 1): 46 - 52. (FANG Xiu-jun, JIN Feng, WANG Jin-ting. Simulation of mixed-mode fracture of concrete using extended finite element method[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, **24**(S1): 46 - 52. (in Chinese))
- [21] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. (WANG Jin-chang, CHEN Ye-kai. Application of ABAQUS in civil engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese))
- [22] TB1003—2001 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. (TB1003—2001 Code for design on tunnel of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. (in Chinese))
- [23] 王 兵, 谢锦昌. 偏压隧道模型试验及可靠度分析[J]. *工程力学*, 1998, **15**(1): 86 - 93. (WANG Bing, XIE Jin-chang. Model test and reliability analysis for an unsymmetrically loaded tunnel[J]. *Engineering Mechanics*, 1998, **15**(1): 86 - 93. (in Chinese))
- [24] 杨小礼, 李 亮, 刘宝琛. 偏压隧道结构稳定性评价的信息优化分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, **24**(1): 84 - 88. (YANG Xiao-li, LI Liang, LIU Bao-chen. Evaluation of structure stability of unsymmetrically loaded tunnels using the theory of information optimization analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, **24**(1): 84 - 88. (in Chinese))