

DOI: 10.11779/CJGE2015S1007

剪胀围岩隧道开挖响应曲线的等价圆近似法

苏永华, 张盼凤, 肖 旺

(湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 针对岩体受开挖影响进入塑性状态后存在剪胀及非圆形隧道围岩响应状态无法解析求解的现状, 选用反映围岩剪胀的本构关系, 围绕建立各种断面形状隧道围岩开挖后的响应特征描述函数展开研究。首先, 建立各种断面形状隧道开挖数值模型并进行模拟分析, 利用其结果绘制矩形、直墙拱形和曲墙拱形等常见断面隧道围岩对开挖的响应曲线。然后在同样条件下绘制矩形、直墙拱形及曲墙拱形断面在 5 种等价圆形断面方法下, 基于 Duncan-Fama 提出的考虑剪胀的圆形断面隧道开挖围岩响应弹塑性特征曲线。最后, 比较它们与数值模拟结果绘制曲线的接近程度, 获得与数值模拟结果曲线最接近的等价圆方法, 为任意断面形状剪胀围岩隧道开挖响应特征解析函数的建立提供了便利。

关键词: 岩体扩容; 隧道工程; 断面形状; 等价圆方法; 响应曲线

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0031-05

作者简介: 苏永华(1966-), 男, 湖南涟源人, 博士(后), 教授, 博士生导师, 主要从事地下结构工程的教学与科研工作。E-mail: yong_su1965@126.com。

Equivalent circular approximation method for response curve tunnel excavation of dilatant surrounding rock

SU Yong-hua, ZHANG Pan-feng, XIAO Wang

(Geotechnical Engineering Institute, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In view of dilatancy after rock mass enters the plastic state induced by excavation and the situation that analytic solution for non-circular tunnel surrounding rock response status still can not be solved, the constitutive relation for the surrounding rock that can reflect the dilatancy is selected, and then, the response characteristic functions of the surrounding rock of tunnel for all kinds of section forms after excavation are established. First, numerical model for various cross-section shapes of tunnel excavation is established and analyzed, and the results are used to draw the surrounding rock after excavation, such as response curves of common tunnel sections of rectangle, straight wall arch and curved wall arch. Then, under the same conditions, the elastic-plastic response characteristic curves of cross-sections of rectangle, straight wall and curved wall arch under 5 kinds of equivalent circular section method are drawn based on the analytical method for circular tunnel proposed by Duncan-Fama considering dilatancy. Finally, the closeness degree between the analytical and numerical simulation curves, is compared in order to obtain the equivalent circular method corresponding to the closest analytical curve. It may provide convenient for the establishment of response characteristic analytic function for dilatant surrounding rock of tunnel with arbitrary cross-section.

Key words: dilatancy of rock mass; tunnel engineering; section form; equivalent circle method; response curve

0 引 言

收敛—约束是地下结构稳定性分析理论中的主要模型之一, 其基本依据是围岩与支护结构的相互作用原理。围岩对开挖的响应特征和支护结构力学特性是该模型中的两个主要因素, 其中围岩对开挖的响应体现为隧道附近岩体在二次应力作用下的变形。收敛—约束方法关注的重点在于隧道周边变形与二次应力之间的关系, 即隧道开挖围岩响应函数, 其相应的图示即为地层特征曲线。该响应函数除了受隧道地层特征

这一决定因素影响以外, 还受到施工及隧道设计断面形状等因素的影响。其建立主要依赖弹塑性力学原理, 而经典的弹塑性力学目前在相似的前提下只获得了在圆形断面条件下的二次应力与其周边位移的解答, 同时认为塑性只导致材料形状的改变而不扩容, 这与岩体的实质存在差异。随着认识的进展和实践的需要,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378195, 51078136); 湖南省交通科技项目 (201224)

收稿日期: 2015-03-26

对地层特征曲线的研究逐渐从假定塑性区体积不变的圆形断面隧道向考虑塑性区围岩体积扩容的非圆形断面隧道领域推进。

对于塑性状态岩体体积扩容的考虑主要通过两种手段实现,一种是采用塑性关联流动法则,导出塑性应变增量与扩容的关系^[1],另一种是将扩容通过剪胀角体现^[2-6]。由于经典弹塑性力学中对于非圆形断面的地层特征函数没有相应解答,为了解决非圆形断面的各种等价圆方法,其中几何等价法^[7-8]和位移等价法^[9]在工程中最常用。这两类方法都是基于某一标准对圆形断面的近似,但缺乏系统的比较和分析,不便于工程设计人员在应用中选用。

因此,本文试图建立一种考虑岩体剪胀的非圆形断面隧道地层特征函数近似解析方法。基本思路是利用数值方法的灵活性,通过数值模拟求得具有剪胀特性岩体中的各种断面形状隧道地层特征曲线,依次通过目前工程中常采用的5种等价圆方法确定相应的等价圆半径,然后采用数值模拟同等条件,建立基于Duncan-Fama提出的考虑岩体剪胀的等价圆地层特征曲线。将等价圆特征曲线与数值模拟地层特征曲线对比,确定各种等价圆方法的适用性和近似性程度,为工程设计人员利用直观简洁的解析法解决实际问题提供便利。

1 Duncan-Fama 地层特征曲线及等价圆半径算法

1.1 Duncan-Fama 地层特征曲线

设在深部静水远场应力为 σ_z ,在弹性模量、泊松比、内摩擦角和黏聚力分别为 E , ν , φ , c 的地层中开挖半径为 r_0 的圆形隧道,Duncan-Fama^[10]采用塑性关联流动法则,考虑塑性区体积扩容,导出了与不考虑体积变化的Kastner方程不一样的隧道周边收敛 u_{r_0} 与需求支护阻力 p_a 之间的关系方程:

$$u_{r_0} = \frac{M(1-\mu)r_0}{2G} \left[\frac{(\sigma_z + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{p_a + c \cot \varphi} \right]^{\frac{1-\sin \varphi}{\sin \varphi}} + \frac{r_0}{2G} (1-2\mu)(p_a - \sigma_z) \quad (1)$$

式中, $M = \sigma_t - \sigma_r = 2\sigma_z \sin \varphi + 2c \cos \varphi$, $G = E / [2(1 + \mu)]$ 。

1.2 等价圆半径 R_0 近似确定方法

目前国内外学者提出的等价圆方法主要有以下5种:断面外接圆半径法、圆拱半径法、大小半径和之半、当量半径法和位移等价法。

如图1所示,断面外接圆半径法等价圆半径 R_0

与洞室各部分尺寸之间关系,由下式确定:

$$R_0 = (\sqrt{h^2 + (b/2)^2}) / \left(2 \cos(\tan^{-1} \frac{b}{2h}) \right) \quad (2)$$

式中, b 为洞室跨度, h 为洞室高度。

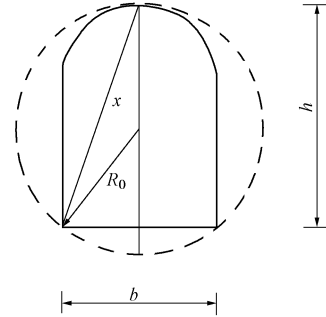


图1 外接圆半径法

Fig. 1 Method of circumscribed circle radius

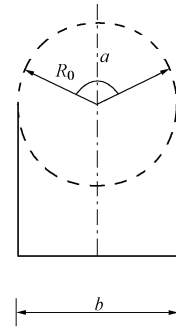


图2 圆拱半径法

Fig. 2 Method of arch radius

如图2所示,圆拱半径法等价圆半径 R_0 与洞室各部分尺寸之间关系,由下式确定:

$$R_0 = b / \left[2 \sin \left(\frac{a}{2} \right) \right] \quad (3)$$

式中, b 为洞室跨度, a 为圆拱对应的圆心角。

如图3所示,大小圆半径之和法等价圆半径 R_0 ,由下式确定:

$$R_0 = (a_1 + a_2) / 2 \quad (4)$$

式中, a_1 是长边半径, a_2 是短边半径。

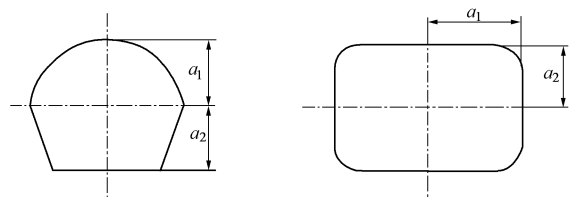


图3 大小半径和之半

Fig. 3 Half of sum of maximum and minimum radii

“当量半径法”采用面积相等的虚拟圆等效求解,虚拟圆半径为 r_0 ,引入形状因素影响系数 k 对 r_0 修正,

经修正后的虚拟圆半径 R_0 定义为“当量半径”^[8], 当量半径 R_0 为

$$R_0 = k / (S / \pi)^{1/2} \quad , \quad (5)$$

式中, S 为断面面积, k ^[8] 为地下洞室断面形状修正系数。

“位移等价法”^[9] 以控制洞周围岩变形量为出发点, 基于洞周位移建立圆形洞室与非圆形洞室之间的等代关系。洞室跨高比和等价圆半径之间的等代, 有兴趣的读者可参考有关文献^[9]。

2 基于数值模拟结果的地层特征曲线

2.1 数值模拟研究对象

选取工程中常见的直墙拱形、矩形和曲墙拱形为研究对象, 并以直墙拱型洞室为例来说明。

2.2 模型参数

模型参数主要考虑影响地下洞室围岩稳定性的 3 类因素^[11]: 地质因素、工程因素和施工因素。

地质因素有关参数: 按照《公路隧道设计规范》以埋深为 300 m 的 IV 级围岩为例, 岩体密度 ρ 为 2200 kg/m³, 弹性模量 E 为 5 GPa, 泊松比 μ 为 0.3, 内摩擦角 φ 为 35°, 黏聚力 c 为 0.5 MPa。对于剪胀角, 实际工程中, 洞室围岩会出现体积膨胀, Hoek 等^[12] 建议在不考虑尺寸效应前提下, 采用恒定剪胀角 Ψ 来模拟岩石的塑性变形, 参照文献^[12], III、IV、及 V 级围岩剪胀角分别采用 $\Psi = \varphi / 4$ 、 $\Psi = \varphi / 8$ 及 $\Psi = 0$ 。

表 1 直墙拱型洞室等价圆半径

Table 1 Equivalent circle radii for straight wall arched cavern

b/h	h/m	方法 1 /m	方法 2 /m	方法 3 /m	方法 4 /m	方法 5 /m
0.80	7.5	4.35	3.00	3.75	3.98	4.47
0.86	7.0	4.14	3.00	3.50	3.83	4.27
0.95	6.3	3.86	3.00	3.15	3.62	3.95
1.00	6.0	3.75	3.00	3.00	3.52	3.78
1.05	5.7	3.64	3.00	2.85	3.42	3.62
1.20	5.0	3.40	3.00	2.50	3.17	2.99
1.25	4.8	3.34	3.00	2.40	3.10	2.79

说明: 方法 1~5 分别表示“外接圆半径法”、“圆拱半径法”、“大小半径之和半”、“当量半径法”及“位移等价法”。

工程因素有关参数: 以跨度 6 m 为例取工程中常用的跨高比范围 0.80~1.25, 改变跨高比, 体现直墙

拱形洞室断面形状的变化, 则各跨高比基于不同等代圆方法所得的等价圆半径如表 1 所示。

2.3 模型的建立及求解

采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件求解洞室开挖后洞周的径向应力和位移, 按平面应变问题处理, 不考虑开挖的空间和时间效应。由于洞室形状对称, 取模型一半简化分析, 模拟范围取 5 倍洞径, 模型顶部为均布应力边界条件, 其他边界为单向约束位移边界条件。围岩初始竖向应力取上覆岩层自重 $\sigma_v = \gamma h$, 初始侧压力采用定义侧压力系数求解^[13], 当埋深大于 50 m 时, 其标准值为 1, 洞室初始应力场为静水压力状态。

在求解 GRC 时, 采用施加均布法向压力(荷载等间距逐步减小的循环加载模式)模拟支护结构提供的支护阻力, 并绘制直墙拱型洞室在 IV 级围岩、埋深 300 m 条件下的地层特征曲线。

3 各种等价圆法与数值模拟结果的对比

图 4 给出了若干不同跨高比情况下, 数值模拟确定的 GRC 与基于等代圆方法的 GRC。

在绘制 GRC 过程中, 弹性阶段的 GRC 曲线数值解和解析解重合, 而弹塑性阶段的 GRC 曲线差异比较明显。因此, 图 4 仅对开挖后受岩体剪胀影响的差异较明显的弹塑性变形阶段(支护阻力位于 0 与 $p_{a\min}$ 之间) GRC 进行比较分析。 $p_{a\min}$ 为不形成塑性区所需的最小支护阻力:

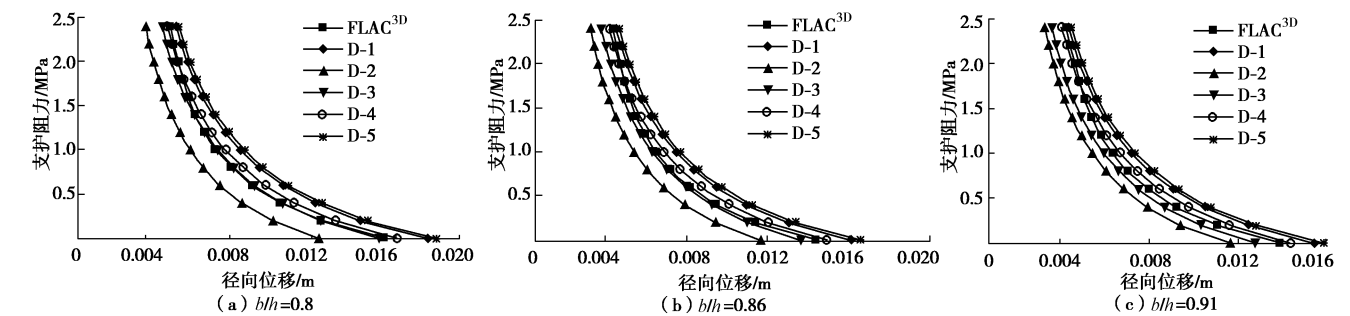
$$p_{a\min} = \sigma_z (1 - \sin \varphi) - c \cos \varphi \quad 。 \quad (6)$$

图 4 中的符号“D- i ”表示采用第 i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 种等价圆方法建立的 Duncan-Fama 近似 GRC, 符号“FLAC^{3D}”表示数值方法建立的 GRC。

对于 $b/h=0.8$, 由图 4 可知: 基于“当量半径法”建立的近似 GRC 曲线 D-4 与数值模拟得到的 GRC 曲线 FLAC^{3D} 最接近。同时, 从相对误差分析表 2 可得出, 当 $b/h=0.86$ 时, 对于同一支护阻力, D-4 与 FLAC^{3D} 对应的径向位移值最接近, 相对误差在 7% 以内。相对误差 ε_i 计算公式为

$$\varepsilon_i = [| (U_{\text{FLAC}} - U_{\text{D-}i}) | / U_{\text{FLAC}}] \times 100\% \quad 。 \quad (7)$$

式中, U_{FLAC} 表示数值方法得到的洞周径向位移, $U_{\text{D-}i}$



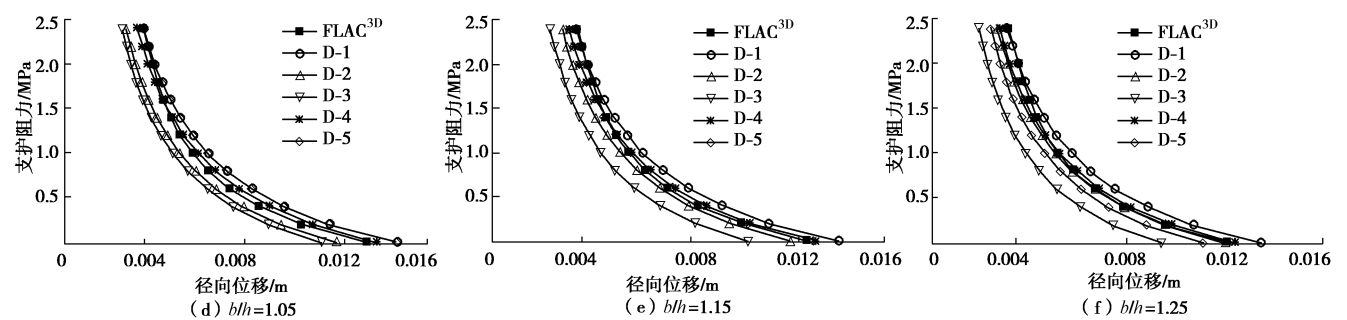


图 4 不同跨高比条件下各种近似方法的 GRC 图
Fig. 4 GRC under different ratios of b/h

表 2 $b/h=0.86$ 各等价圆方法的相对误差表

Table 2 Relative errors of various equivalent circular methods

P_a /MPa	U_{FLAC} /mm	$U_{\text{D-1}}$ /mm	$U_{\text{D-2}}$ /mm	$U_{\text{D-3}}$ /mm	$U_{\text{D-4}}$ /mm	$U_{\text{D-5}}$ /mm	ε_1 /%	ε_2 /%	ε_3 /%	ε_4 /%	ε_5 /%
0	14.352	16.087	11.649	13.590	14.883	16.568	12	19	5	4	15
0.4	9.491	10.929	7.914	9.233	10.111	11.256	15	17	3	7	19
1.0	6.481	7.460	5.402	6.302	6.902	7.683	15	17	3	6	19
1.4	5.516	6.207	4.494	5.244	5.742	6.393	13	19	5	4	16
1.8	4.951	5.358	3.880	4.526	4.957	5.518	8	22	9	0	11
2.0	4.732	5.033	3.645	4.252	4.657	5.184	6	23	10	2	10
2.4	4.316	4.524	3.276	3.822	4.186	4.660	5	24	11	3	8

表示第 i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 种等价圆方法对应的洞周径向位移, 部分数据如表 2 所示。

$b/h=0.86$ 时,“当量半径法”建立的 GRC 曲线 D-4 与实际 GRC 曲线最接近。类似,对表 1 中不同跨高比条件下的各等价圆方法进行对比分析,D-4 为最佳近似曲线 GRC。因此, $b/h=0.80\sim 1.25$,“当量半径法”是直墙拱型洞室最合适的等价圆近似方法。

4 影响因素与断面形状差异

4.1 围岩级别与埋深

围岩物理力学性质及荷载是影响洞室稳定的两个主要因素。围岩的物理力学性质是决定地下洞室开挖后围岩稳定与否的内因,可通过考虑围岩的级别体现,在此验算Ⅲ、Ⅳ及Ⅴ级围岩,按照《公路隧道设计规范》,其参数如表 3 所示。原岩应力及其重分布,是引起洞室围岩变形、破坏的荷载^[8],通过改变洞室埋深来体现。

表 3 围岩参数

Table 3 Parameters of surrounding rock

级别	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$
Ⅲ	2400	15	0.25	1.2	45
Ⅳ	2200	5	0.30	0.5	35
Ⅴ	2000	2	0.40	0.2	25

按照上述分析方法,隧道埋深为 300 m 的条件下,跨高比在 0.80~1.25 的情况下,“当量半径法”是直墙拱型洞室最合适的等价圆近似方法。

对于埋深,参照文献[14]隧道埋深划分方案,取深埋洞室的范围,埋深分别选用 100, 200, 300, 400, 500 m 五种情况,经分析,“当量半径法”是直墙拱型洞室最合适的等价圆近似方法。因此,荷载及围岩性质对断面等价圆方法无影响。

4.2 断面形状差异

按照直墙拱形洞室等价圆确定时相同思路,对比了各种方法。对于矩形洞室,Ⅲ级和Ⅴ级围岩在跨高比 0.80~1.25 范围内最合适的方法分别是“外接圆半径法”和“当量半径法”,Ⅳ级围岩在跨高比为 0.80~1.00 时是“当量半径法”,跨高比为 1.00~1.25 时是“外接圆半径法”。

对于曲墙拱形,Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ级围岩当跨高比为 0.80~1.00 时是“圆拱半径法”,跨高比为 1.00~1.25 时是“外接圆半径法”。

同时在不同埋深情况进行了分析,结果显示埋深对矩形和曲墙拱形洞室等价圆方法选用无影响,说明上述结论具有普遍适用性。

5 结 论

通过研究获得 3 种形状洞室在跨高比、围岩级别和埋深影响下最佳近似地层特征曲线(GRC)对应的等价圆确定方法,得到以下 4 点结论。

(1) 跨高比在 0.8~1.25 之间的直墙拱形洞室,等价圆计算最合适方法是“当量半径法”,这种适用于各种级别围岩。

(2)矩形洞室等价圆计算方法与围岩级别和跨高比均有关。

(3)曲墙拱形洞室最合适的等价圆方法仅与洞室跨高比有关,与围岩级别无关。当跨高比为 0.80~1.00 时选用“圆拱半径法”,当跨高比为 1.00~1.25 时选用“外接圆半径法”。

(4)当初始应力场为静水压力状态时,荷载对 3 种形状洞室等价圆方法选用均无影响。

参考文献:

- [1] 高召宁, 孟祥瑞, 何志亮. 考虑渗流、应变软化和扩容的巷道围岩弹塑性分析[J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2014, **37**(1): 96 - 101. (GAO Zhao-ning, MENG Xiang-rui, HE Zhi-liang. Elasto-plastic analysis on surrounding rock of roadways based on seepage, strain softening and dilatancy[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2014, **37**(1): 96 - 101. (in Chinese))
- [2] 张小波, 赵光明, 孟祥瑞. 考虑峰后应变软化与扩容的圆形巷道围岩弹塑性 D-P 准则解[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, **30**(6): 903 - 910. (ZHANG Xiao-bo, ZHAO Guang-ming, MENG Xiang-rui. Elastoplastic solution for surrounding rock of circular roadway based on D-P criterion by considering post-peak strain softening and dilatancy[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, **30**(6): 903 - 910. (in Chinese))
- [3] 王学滨, 张春野, 潘一山, 等. 考虑扩容的围岩局部破坏过程中声发射及能量释放的数值模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, **23**(3): 74 - 81. (WANG Xue-bin, ZHANG Chun-ye, PAN Yi-shan, et al. Numerical simulation of the acoustic emissions and released energy in the tunnel surrounding rock subjected to a localized failure considering dilatancy[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, **23**(3): 74 - 81. (in Chinese))
- [4] 姚国圣, 李镜培, 谷拴成. 考虑岩体扩容和塑性软化的软岩巷道变形解析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 463 - 467. (YAO Guo-sheng, LI Jing-pei, GU Shuan-cheng. Analytic solution to deformation of soft rock tunnel considering dilatancy and plastic softening of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 463 - 467. (in Chinese))
- [5] 吉小明, 黄秋菊. 考虑岩石扩容性质的隧道围岩塑性区位移分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 1999, **12**(4): 80 - 82. (JI Xiao-ming, HUANG Qiu-ju. Zone displacement analysis considering the nature of the expansion[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1999, **12**(4): 80 - 82. (in Chinese))
- [6] 刘夕才, 林韵梅. 软岩扩容性对巷道围岩特性曲线的影响[J]. 煤炭学报, 1996, **21**(6): 596 - 601. (LIN Xi-cai, LIN Yun-mei. Influence on characteristic curve considering expansion of the soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 1996, **21**(6): 596 - 601. (in Chinese))
- [7] 李世辉. 隧道支护设计新论: 典型类比分析法应用和理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999. (LI Shi-hui. The new tunnel support design theory: a typical analog applications and theoretical analysis[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))
- [8] 刘长武, 曹磊, 刘树新. 深埋非圆形地下洞室围岩应力解析分析的“当量半径”法[J]. 铜业工程, 2010, **1**(1): 1 - 5. (LIU Chang-wu, CAO Lei, LIU Shu-xin. Method of “equivalent radius” for the analyzing rock stress of high-buried non-circular underground chambers[J]. Copper Engineering, 2010, **1**(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [9] 李泽浦, 吴凯华. 非圆形洞室围岩压力弹塑性计算的工程方法[J]. 工程兵工程学院学报, 1986(1): 26 - 36. (LI Ze-pu, WU Kai-hua. Engineering approach for elastoplastic analysis of surrounding rocks pressure of non-circular chamber[J]. Journal of Engineering College of Engineering Crops, 1986(1): 26 - 36. (in Chinese))
- [10] DUNCAN F. Comprehensive rock engineering[M]. Oxford: Pergamon Press, 1993.
- [11] 覃仁辉, 王成. 隧道工程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2005. (TAN Ren-hui, WANG Cheng. Tunnel engineering[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2005. (in Chinese))
- [12] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. Int J RockMech Sci Geom Abstr, 1997, **34**(8): 1165 - 1187.
- [13] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Bao-shu. Tunnel engineering design points[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [14] 徐泽民, 黄润秋, 王士天. 隧道的埋深划分[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, **11**(4): 5 - 10. (XU Ze-min, HUANG Run-qiu, WANG Shi-tian. Tunnel classifying in light of depth[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, **11**(4): 5 - 10. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)