

文章编号:1006—2106(2004)04—0077—05

浅埋洞室围岩压力有限元分析

毕继红* 钟建辉 丛蓉

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:本文运用有限元法的基本原理,采用 ANSYS 软件对浅埋洞室围岩应力状态进行了数值模拟,分别就埋深对浅埋洞室围岩压力的影响及浅埋山坡处洞室围岩压力进行了分析,并将分析结果与规范规定的简化公式求得的结果进行了比较,得出了一些有益的结论,同时提出了在实践中应注意的问题。

关键词:浅埋洞室;围岩压力;有限元;偏压

中图分类号:U451.2 **文献标识码:**A

1 引言

洞室围岩压力分析是洞室设计的重要内容。人们对深埋洞室的研究已经取得了很多成果,但对于受地形边界和地面荷载影响比较大的浅埋洞室的研究却较少,在工程计算中,一般采用规范中规定的简化公式对浅埋洞室围岩压力进行计算。由于浅埋洞室必须考虑地表边界和地面局部荷载以及埋深的影响,围岩应力比深埋洞室情况更为复杂。因此,用有限元法去分析这些影响以及衡量简化公式的不足之处是完全有必要的。本文采用有限元软件 ANSYS,通过算例,对这一问题将进行较为深入的研究。

有限元法是目前已经广为应用的岩土工程与结构分析的有利工具。首先,它适于分析复杂几何形状连续介质问题;其次,便于引入各种要求的边界条件;另外,它能够成功地反映各种复杂的材料性质及其不均匀性,因而可以考虑计入岩土介质的非线性和非均匀性。这些都是其它数值方法难于做到的。

2 浅埋洞室的围岩应力分析

2.1 埋置深度对浅埋洞室围岩应力的影响

2.1.1 有限元分析

本文中的有限元分析过程是通过 ANSYS 软件实现的。将围岩体系按二维平面应变问题进行有限元分

析,采用平面四结点四边形等参元来划分单元。网格划分范围是单元划分时的重要问题,实算结果表明,当划分范围取为 $8D-10D$ (D 为洞室的高度或宽度)时,即可获得较好的计算精度。另外一个需要注意的问题就是边界条件的选取,在围岩应力的数值模拟中,一般都要截取岩体的某一部分建立数值模拟计算模型,用一定的边界条件去代替原始介质的连续状态,这种替代方法合理与否决定了计算结果的正确性。本文采用的边界条件如图 1 所示。

(1)地下开挖工程中,模型的两侧施加水平方向的约束,保证水平方向位移为 0;

(2)模型底部为固定边界,即底部边界结点水平位移和垂直位移均为 0;

(3)模型上部(地表)荷载忽略不计,仅计算岩体自重应力作用下的应力分布情况。

算例 1:洞室处于平面应变状态下,其断面为矩形,尺寸为 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 。现令洞室埋深分别为 5 m, 10 m。岩体力学参数:密度 $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=3 \text{ GPa}$,泊松系数 $\mu=0.3$,粘聚力 $c=0.1 \text{ MPa}$,计算摩擦角 $\phi=45^\circ$ 。有限元网格如图 2 所示。

经有限元软件 ANSYS 计算得出以下结果如表 1、表 2 所示。

从表 1 中可以得出以下结论:

(1)两种埋深的洞室顶部上的点,大部分受到微小拉应力的作用。拉应力的数值较为接近,数量级均为 kPa;

* 收稿日期:2004—03—11 毕继红 副教授 女 1965 年出生

** 天津市自然科学基金资助项目,编号:NM013607711

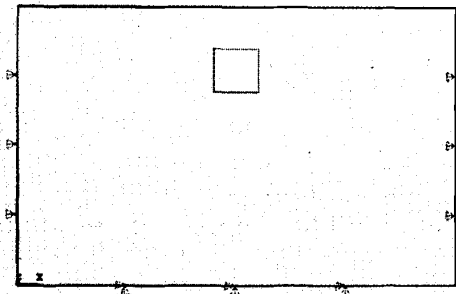


图 1 模型边界条件图示

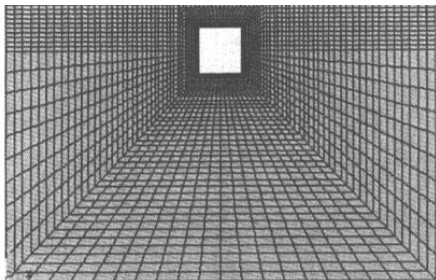


图 2 浅埋矩形洞室的有限元网格划分

表 1 两种埋深的浅埋矩形洞室洞顶的竖向应力值
(正值表示受压,负值表示受拉)

竖向应(m) 洞顶横坐标(m)	埋深(m)	5	10
45		5.66e ⁵	7.91e ⁵
45.5		9.27e ⁴	1.44e ⁵
46		-1.88e ¹	7.45e ³
46.5		-5.57e ³	-6.18e ³
47		-3.42e ²	-4.28e ²
47.5		-2.85e ³	-2.74e ³
48		-1.92e ³	-2.35e ³
48.5		-2.73e ³	-2.67e ³
49		-1.39e ³	-2.61e ³
49.5		-1.95e ³	-2.62e ³
50		-1.98e ³	-2.60e ³
50.5		-1.95e ³	-2.62e ³
51		-1.39e ³	-2.61e ³
51.5		-2.73e ³	-2.67e ³
52		-1.92e ³	-2.35e ³
52.5		-2.85e ³	-2.74e ³
53		-3.42e ²	-4.28e ²
53.5		-5.57e ³	-6.18e ³
54		-1.88e ¹	7.45e ³
54.5		9.27e ⁴	1.44e ⁵
55		5.66e ⁵	7.91e ⁵

(2) 洞室顶部的竖向围岩压力随着深度的增加而增大。经计算,埋深增加 5 m,其竖向应力值的增大系数为 1.3~1.60;

表 2 两种埋深的浅埋矩形洞室洞壁的侧向应力值
(正值表示受压,负值表示受拉)

竖向应(m) 洞顶横坐标(m)	埋深(m)	5	10
45		5.13e ⁵	7.03e ⁵
45.5		1.16e ⁵	1.64e ⁵
46		2.69e ⁴	1.91e ³
46.5		1.26e ³	8.14e ²
47		2.69e ³	3.90e ³
47.5		3.67e ²	5.39e ²
48		4.87e ²	8.20e ²
48.5		2.15e ³	4.41e ²
49		2.27e ²	4.72e ²
49.5		2.13e ³	4.55e ²
50		2.56e ²	4.95e ²
50.5		2.98e ²	5.12e ²
51		3.56e ²	5.60e ²
51.5		3.68e ²	5.49e ²
52		5.78e ²	8.22e ²
52.5		4.55e ²	5.69e ²
53		2.20e ³	2.95e ³
53.5		9.33e ²	3.05e ²
54		2.03e ⁴	2.30e ⁴
54.5		8.67e ⁴	1.11e ⁵
55		4.00e ⁵	5.15e ⁵

(3) 接近洞室的转角处,应力值明显增大,这是应力集中的结果。

从表 2 可以看出,埋深对浅埋洞室的侧向围岩压力有如下影响:

(1) 洞壁侧向围岩压力随着深度的增加而增大。经计算,埋深增加 5 m,其侧向应力值的增大系数为 1.2~1.3;

(2) 洞壁侧面均受压应力,以中间最小,靠近洞室顶部和底部的应力值有明显的增加,这是应力集中的结果。

从表 1 表 2 均可看出:洞室埋置深度对浅埋洞室的竖向围岩压力是有影响的。

2.1.2 规范法

《公路隧道设计规范》(JTJ026-90)中,规定浅埋隧道围岩压力的计算方法为:

深埋和浅埋隧道的分界,按荷载等效高度的判定式为:

$$H_p=(2\sim2.5)h_q$$
 (1)

式中: H_p ——深浅埋隧道的分界深度;

h_q ——荷载等效高度,按下式计算:

$$h_q=\frac{p}{\gamma}$$
 (2)

式中: p ——用式 $p=0.45\times2^{6-\gamma}\gamma\omega$ 算出的深埋隧道

垂直均布压力(kN/m²)；

s ——围岩类别；

ω ——宽度影响系数， $\omega=1+i(B-5)$

浅埋隧道围岩压力分下述两种情况分别计算：

(1) 埋深 $H \leq h_p$ 时，荷载视为均布垂直压力

$$p=\gamma H$$
 (3)

侧向压力 e ，按均布考虑时，其值为：

$$\sigma=\gamma\left(H+\frac{1}{2}H_i\right)\operatorname{tg}^2\left(45^{\circ}-\frac{\phi}{2}\right)$$
 (4)

式中： H_i ——坑道高度；

ϕ ——围岩计算摩擦角；

γ ——围岩容重(kN/m³)。

(2) 当 $h_p < H < H_p$ 时，作用在支护结构上的均布荷载：

$$p=\gamma H\left(1-\frac{H}{B_i}-\lambda \operatorname{tg} \theta\right)$$
 (5)

式中： B_i ——坑道宽度；

θ ——破裂滑面的摩擦角。

作用在支护结构两侧的水平侧压力为：

$$\left.\begin{aligned} \sigma_1 &= \gamma H \lambda \\ \sigma_2 &= \gamma H \lambda \end{aligned}\right\}$$
 (6)

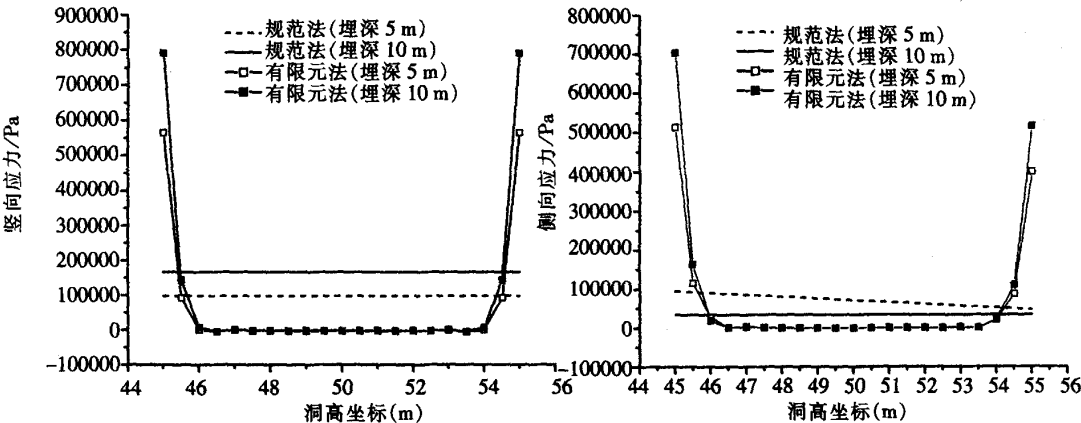
式中： H ——洞顶至地面的距离；

h ——洞底至地面的距离；

λ ——岩体的侧压力系数。

由规范法计算的结果与有限元分析结果的比较见图 3。

由图 3 可知，有限元法可以比较精确的计算出围



(a)对洞顶围岩压力的数据分析曲线 (b)对洞侧围岩压力的数据分析曲线

图 3 规范法计算的结果与有限元分析结果的比较曲线

岩应力，而规范法在计算围岩应力的时候，只是简单地采用了应力的直线分布，并没有考虑应力集中引起的应力值的明显增加。规范中的公式考虑了埋深对围岩压力的影响，而且其计算结果是偏于安全的，只有一定的可靠性，因此具有一定的实用价值。

2.2 浅埋山坡处洞室围岩压力的计算

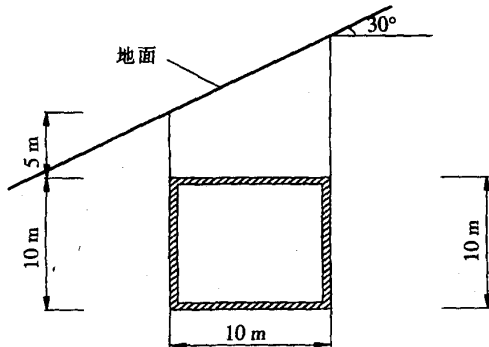


图 4 算例图示

2.2.1 有限元分析：

算例 2：一浅埋山坡处有一洞室，洞室处于平面应变状态下，形状为矩形。矩形洞室尺寸为 10×10 m²。岩体力学参数为：密度 $\rho=2\,000\text{ kg/m}^3$ ，弹性模量 $E=3\text{ GPa}$ ，泊松系数 $\mu=0.3$ ，计算摩擦角 $\phi=45^\circ$ ，粘聚力 $c=0.1\text{ MPa}$ ，其他参数如图 4 所示。有限元网格见图 5。

经有限元软件 ANSYS 的分析得出以下应力分布

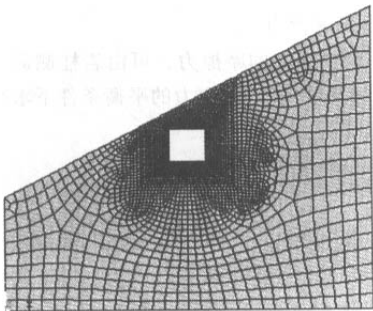
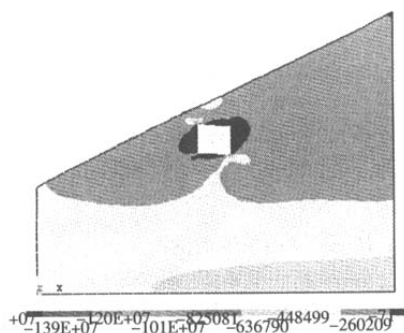
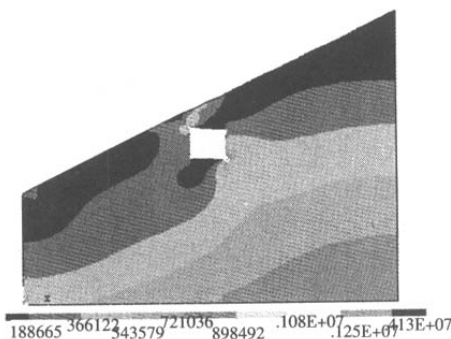


图 5 浅埋山坡处矩形洞室有限元网格划分



(a) 浅埋山坡处洞室水平应力分布云图



(b) 浅埋山坡处洞室竖直应力分布云图

图6 有限元分析浅埋山坡处洞室的应力结果云图

云图见图6。

由图6(a)可以看出,浅埋山坡处洞室水平应力的最大值发生在洞壁周围,随着深度的增加,水平应力的值越来越小。从图6(b)可以看出,浅埋山坡处洞室竖直应力的最大值发生在洞顶、洞底及埋深较浅处,随着深度的增加,所受的竖向应力值也越来越小。

2.2.2 简化公式法

当洞室处在图7所示的情况时,围岩压力将产生偏压。计算原理采用岩柱法。

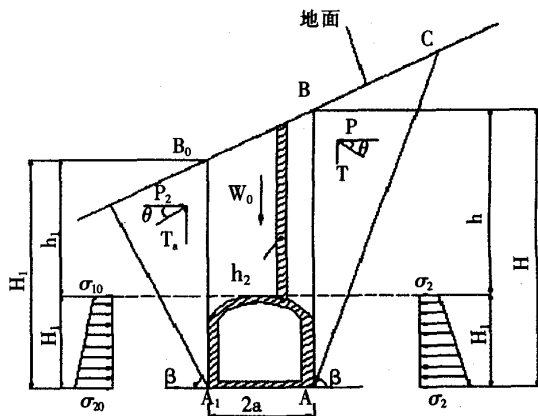


图7 山坡处洞室围岩压力的计算简图

考虑岩柱两侧摩擦力的作用,衬砌上的垂直压力的总和等于岩柱 ABB_0A_0 的重量减去两侧破裂面(AB 和 A_0B_0)上的摩擦力。

岩柱两侧面上的摩擦力,可由岩柱侧面 AB 和滑动面 AC 所形成的岩体,在力的平衡条件下求得。经过计算得出以下公式:

洞顶的垂直压力为:

$$p_i = \gamma h_i \left[1 - \frac{\gamma g \theta}{2} \frac{H^2 \lambda + H_0^2 + \lambda_0}{W} \right] \quad (3)$$

其中:

$$\lambda = \frac{1}{\lg \beta - \lg \alpha} \frac{\lg \beta - \lg \phi}{1 + \lg \beta (\lg \phi - \lg \theta) + \lg \phi \lg \theta};$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{\lg \beta_0 - \lg \alpha_1} \frac{\lg \beta_0 - \lg \phi}{1 + \lg \beta_0 (\lg \phi - \lg \theta) + \lg \phi \lg \theta};$$

$$\lg \beta = \lg \phi + \sqrt{\frac{(1 + \lg^2 \phi)(\lg \phi - \lg \alpha)}{\lg \phi - \lg \theta}};$$

$$\lg \beta_0 = \lg \phi + \sqrt{\frac{(1 + \lg^2 \phi)(\lg \phi - \lg \alpha)}{\lg \phi - \lg \theta}};$$

式中: γ ——岩体的容重;

h_i ——计算点处衬砌顶上的岩柱高度;

W ——每单位长度洞室顶部岩柱总重量,

$$W = \gamma a(h + h_0);$$

λ, λ_0 ——侧压力系数;

β, β_0 ——滑动面与水平面的夹角;

α ——地表面的坡度;

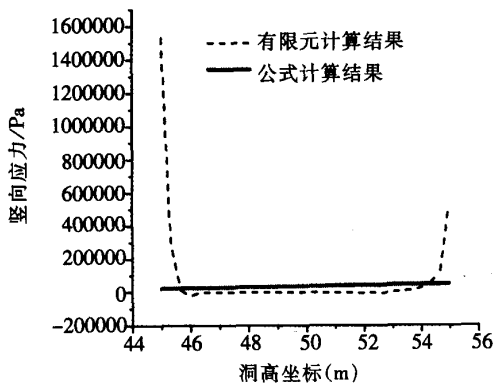
ϕ ——岩体的内摩擦角;

θ ——岩柱两侧的摩擦角,对于岩石, $\theta = (0.7 \sim 0.8)\phi$ 。

水平侧压力可按式计算:

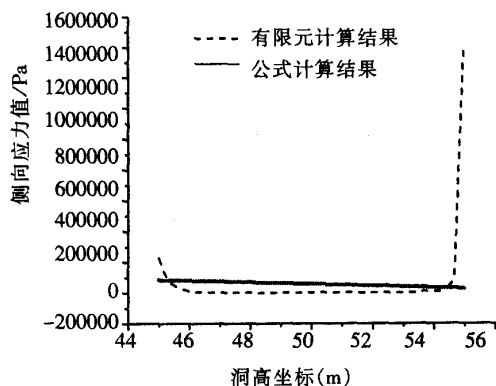
$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \gamma h \lambda \\ \sigma_2 &= \gamma (h + H_1) \lambda \\ \sigma_{10} &= \gamma h_0 \lambda_0 \\ \sigma_{20} &= \gamma (h_0 + H_{10}) \lambda_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

水平侧压力的分布图为梯形(见图7)。

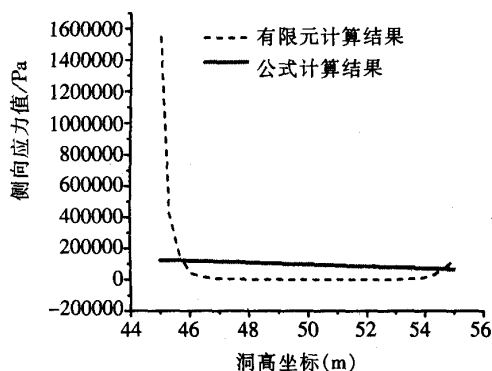


(a) 洞室顶部竖向应力的比较

计算浅埋山坡处矩形洞室洞壁处应力时有限元法与简化方法的比较见图8。



(b)左侧洞壁侧向应力的比较



(c)右侧洞壁侧向应力的比较

图8 计算浅埋山坡处矩形洞室洞壁处应力时有限元法与简化方法的比较曲线

从图8(a)中可以看出:

(1) 有限元计算的浅埋山坡处矩形洞室顶部所受的竖向应力值多数小于公式的计算值。说明用公式计算的结果是安全的;

(2) 洞室夹角处应力很大,而且左面最大值是右面的2~3倍。这是应力集中的结果;

(3) 洞室顶部的中间部分出现了微小的拉应力。

从图8(b)中可以看出:

(1) 有限元计算的浅埋山坡处矩形洞室左侧洞壁所受的应力值多数小于公式的计算值。证明了公式计算的可靠性;

(2) 在洞室的左侧,左上角所受的应力值是最大的,其值是左下角应力值的5~7倍。这也是应力集中的结果。

从图8(c)中可以看出:

(1) 有限元计算的浅埋山坡处矩形洞室右侧洞壁所受的应力值多数小于公式的计算值。也证明了公式计算的可靠性;

(2) 在洞室的右侧,右下角所受的应力值是最大的,其值是右上角应力值的7~8倍。

3 结束语

(1) 浅埋洞室围岩压力的大小随洞室埋置深度的增加而增大。规范中的公式考虑了埋深对围岩压力的影响,因此具有一定的实用价值,但没有考虑应力集中的影响。实践中应该在应力集中处作出妥善处理;

(2) 基于岩柱法原理所推导出的计算浅埋山坡处洞室围岩压力的计算方法是具有一定的实用价值的。其计算结果具备一定的可靠性;

(3) 浅埋山坡处矩形洞室洞壁的围岩压力的最大值发生在洞室的左上角和右下角。实践当中应该考虑应力集中产生的影响,并对洞室夹角处尤其是这两处作出妥善的处理;

(4) 洞室顶部会出现微小的拉应力,拉应力值在<3 000 Pa。并未超出岩体的抗拉强度值。实践中可以适当考虑此因素。

参考文献:

- [1] 公路隧道设计规范(JTJ026-90)[S]. 1990.6.
- [2] 孙钧,汪炳镒.地下结构有限元法解析[M]. 上海:同济大学出版社,1988.6.
- [3] 尚岳全.岩体稳定和区域稳定数值模拟模型边界条件确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(2):201-204
- [4] 王毅才.隧道工程[M]. 北京:人民交通出版社,1987.
- [5] Pierre Chambol, Jean-Francois Corte. Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of Tunnel Face[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994,120(7):1148-1165.
- [6] 沈明荣.岩体力学[M].上海:同济大学出版社,1999.

(下转第106页)

脂渗透到纤维中并除去空气。

在纤维长方向片材的接头须搭接 10 cm 以上。

当平行粘贴多条碳纤维板时, 两条板带之间的空隙不应小于 5 mm。

纤维片粘贴 20~90 min(根据干燥程度)后, 用滚筒涂刷环氧树脂上涂。上涂时间切忌过长, 以免影响树脂的渗透。

上涂 3 h 后, 开始进行固化后的空鼓处理。碳纤维片材与混凝土之间粘结质量, 可用小锤轻轻敲击或手压碳纤维片材表面的方法检查, 总有效面积不应低于 95 %。当碳纤维布的空鼓面积不大于 10 000 mm² 时, 可采用针管注胶的方法进行修补。当空鼓面积大于 10 000 mm² 时, 宜将空鼓部位的碳纤维片材切除, 重新搭接贴上等量的碳纤维片材, 搭接长度不应小于 100 mm。

4.4.6 养护

粘贴碳纤维片后, 需自然养护 24 h 达到固化, 并保证固化期间不受干扰。

4.4.7 施工注意事项

在气温 5 ℃ 以下、相对湿度 RH>85 %、混凝土表面含水率在 8 % 以上、雨天或有结露的可能时, 如无有效措施不得施工。

碳纤维为导电材料, 施工碳纤维片材时应远离电气设备和电源, 或采取可靠的防护措施。

施工过程中应避免碳纤维片材弯折。

树脂的原料应密封储存, 远离火源, 避免阳光直接照射; 树脂的配置和使用场所应保持通风良好。

5 结构加固后的使用要求

(1) 严禁超过设计荷载使用。

(2) 用碳纤维加固的房间, 长期使用的环境温度不应高于 60 ℃。

6 结束语

随着结构加固技术规范、规程的制定和不断修订, 碳纤维结构加固技术, 以其优异的技术特征、广阔的应用领域、相对低廉的综合成本, 必将在我国建筑结构补强技术领域发挥越来越重要的作用。

APPLICATION OF CARBON FIBER SHEET IN REFORM AND STRENGTHENING OF CONCRETE STRUCTURE

JIANG Chong

Abstract: CFRP has found wide applications in the field of strengthening of concrete structures due to its remarkable features, such as high strength, light weight, anti-corrosion and duration. The construction method is the key factor in full exerting the advantages of carbon fiber sheet to achieve and guarantee the best strengthening effect. This article mainly introduces the construction feather and performance of material and method of using carbon fiber sheet in strengthening.

Key words: carbon fiber sheet; strengthening of concrete structure; performance of material; construction method

(上接第 81 页)

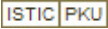
THE SURROUNDING ROCK STRESS IN SHALLOW UNDERGROUND OPENINGS

BI Ji-hong, ZHONG Jian-hui, CONG Rong

Dept. of Civil Engineering, Tianjin University

Abstract: The principle of finite-element method is used to analyses of the underground openings of shallow embedded depth. And some numerical tests were carried out with ANSYS program. The affect of embedded depth and the surrounding rock stress of underground openings in sidehill were analyzed respectively. The results are compared with that coming from simplified formulas. Some knowledge was achieved according to the calculated results of some examples. At the same time, it is pointed out that some problems should be considered in practice.

Key words: shallow underground openings; surrounding rock stress; finite-element; unsymmetrically loaded

作者：[毕继红](#)，[钟建辉](#)，[丛蓉](#)
作者单位：[天津大学建筑工程学院](#)，天津，300072
刊名：[铁道工程学报](#) 
英文刊名：[JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年，卷(期)：2004(4)
被引用次数：3次

参考文献(5条)

1. [JTJ026-1990](#). 公路隧道设计规范 1990
2. [孙钧](#); [汪炳镒](#) 地下结构有限元法解析 1988
3. [尚岳全](#) 岩体稳定和区域稳定数值模拟模型边界条件确定方法[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 1999(02)
4. [王毅才](#) 隧道工程 1987
5. [沈明荣](#) 岩体力学 1999

本文读者也读过(10条)

1. [刘福胜](#). [文竞舟](#). [王成](#) 用隧道周边位移反分析围岩压力的解析研究[会议论文]-2007
2. [张孝伟](#). [ZHAGN Xiao-wei](#) 深埋隧道围岩压力与跨度的关系研究[期刊论文]-[西部探矿工程](#)2009, 21(7)
3. [王辉](#). [陈剑平](#). [邱道宏](#). [阙金声](#). [WANG Hui](#). [CHEN Jianping](#). [QIU Daohong](#). [QUE Jinsheng](#) 洞室围岩压力预测的研究[期刊论文]-[地下空间与工程学报](#)2009, 5(2)
4. [王磊](#). [徐丽芬](#). [WANG Lei](#). [XU Li-fen](#) 偏压隧道围岩压力与初期支护受力数值分析[期刊论文]-[路基工程](#)2009(6)
5. [苟富民](#). [GOU Fu-min](#) 压力隧洞不衬砌法的应用[期刊论文]-[西北水电](#)2006(4)
6. [焦丽芳](#). [王瑞骏](#). [焦富涛](#). [王敏](#). [JIAO Li-fang](#). [WANG Rui-jun](#). [JIAO Fu-tao](#). [WANG Min](#) 复杂围岩有压隧洞应力变形有限元仿真分析[期刊论文]-[水资源与水工程学报](#)2007, 18(5)
7. 高地应力与强渗透水压下软弱围岩支护[期刊论文]-[广西大学学报（自然科学版）](#) 2009, 34(5)
8. [冯永冰](#). [黄敏珍](#). [FENG Yong-bing](#). [HUANG Min-zhen](#) 不透水层下水工压力隧洞特性分析[期刊论文]-[西部探矿工程](#) 2009, 21(12)
9. [苏凯](#). [伍鹤皋](#). [韩前龙](#). [SU Kai](#). [WU He-gao](#). [HAN Qian-long](#) 高压透水隧洞工作机理探讨[期刊论文]-[水利水电技术](#) 2005, 36(6)
10. [高莹](#). [王业红](#). [汤先彬](#). [赖增科](#) 隧洞支护的有限元分析[期刊论文]-[中国科技博览](#)2010(7)

引证文献(3条)

1. [刘福胜](#). [文竞舟](#). [王成](#) 用隧道周边位移反分析围岩压力的解析研究[期刊论文]-[地下空间与工程学报](#) 2007(z1)
2. [王海祥](#) 北京地铁浅埋暗挖折返线工程结构设计与施工[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2010(4)
3. [余飞](#). [陈善雄](#). [陈修和](#). [张胜](#). [王飞](#) 通透肋式拱梁隧道结构荷载设计计算方法探讨[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2013(12)

引用本文格式：[毕继红](#). [钟建辉](#). [丛蓉](#) 浅埋洞室围岩压力有限元分析[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2004(4)