

# 再论柔性回填材料的回填厚度

宋熙太

(洛阳水利工程技术研究所 河南洛阳 471023)

**摘要** 随着科学技术的发展,人们目标是构筑能够承受更高冲击荷载的地下工程。当前所采用的措施之一,是用一种柔性材料回填在毛洞与衬砌之间,形成一种刚柔结合的地下工程结构体系。利用柔性材料可大量吸收冲击震动能量的特性,将地下工程构成高抗力结构体系。主要论述了柔性回填材料在高抗力地下工程中的作用;同时利用能量原理导出了在强冲击条件下回填材料理想厚度的计算方法。试验证明,本文的方法,计算值与试验值吻合很好,可以推广应用。

**关键词** 圆形结构 回填材料 承载能力 隔震 能量原理

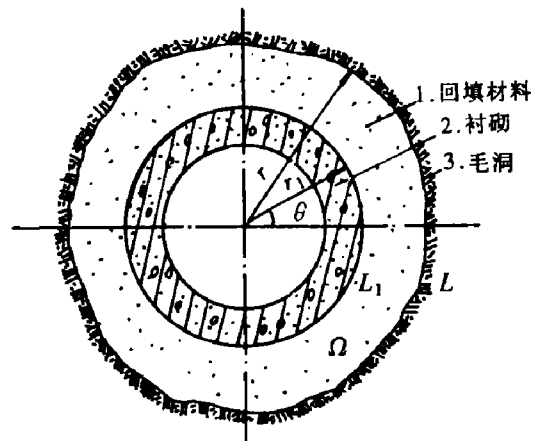
**中图法分类号** O383.2

## 1 前言

为了使地下工程具有更强的承载能力,目前出现了两种发展趋势:(1)将地下工程的埋深加大,使之具有更厚的自然岩石防护层厚度;(2)利用现代高技术和最新科研成果,采用一些技术措施,亦可将地下工程构筑成结构承载能力更高、隔震能力更强的高抗力型地下工程。

高抗力型地下工程构筑的关键技术之一,是在工程结构(衬砌)与岩体毛洞之间,填充一种柔性回填材料。这种回填材料本身具有较大的柔性,可以大量吸收冲击震动能量。同时,利用岩体和衬砌的刚性以及回填材料具有的柔性,造成材料与材料间的阻抗失配,从而形成一种刚柔结合的地下工程结构体系,以达到实现承受强冲击震动的目的。现以圆形结构为对象将该类工程的结构断面和示意图,表示在图1中。

构筑高抗力地下工程,对于柔性回填材料理想回填厚度的计算,是众所关心的课题,目前各国地下工程工作者都正在研究中。文献[1]的研究结果指出:柔性材料的回填厚度



1. Backpacking material; 2. Lining;  
3. Surrounding rock

图1 柔性回填材料的地下工程示意  
Fig. 1 Underground structure for soft  
backpacking materials

$H$  大约等于 0.330 倍的结构外半径  $r_1$ , 并给出了经验关系式:  $H=0.330r_1$ 。文献[2]提出回填厚度在衬砌外半径  $r_1$  的(0.3~0.5)之间最为合适, 给出了  $H=(0.3\sim 0.5)r_1$  的计算关系。文献[3]指出: 回填厚度  $H$  与衬砌厚度  $h$ , 大约保持如下的比例关系:  $H:h=3.30:1$ , 作者在文献[4,5]的基础上对柔性回填材料理想回填厚度  $H$  的计算方法进行了改进和完善。文中新的计算方法, 计算更加简便, 结果更加可靠。

## 2 柔性回填材料在地下工程中的作用

为提高地下工程自身的承载能力, 在岩体毛洞和衬砌之间柔性回填材料的物理力学性质, 必须满足承受高冲击荷载的要求。当然该性质是普通建筑材料所不具备的。试验证明: 一种良好的柔性回填材料, 在强冲击荷载下对地下工程承载能力的提高可起到巨大的作用。其作用归结起来有如下诸点。

(1) 能够有效地衰减传递到衬砌上的冲击荷载。

目前, 岩体中地下工程的施工, 一般是先开挖毛洞, 后进行钢筋混凝土衬砌的施工作业, 等到混凝土达到一定强度后, 在毛洞与衬砌之间回填一种建筑材料。在过去施工中, 这些材料通常用如浆砌块石、开挖施工中的碎石等, 现在可用普通粗砂、水泥胶结砂或特制的一类柔性回填材料等。试验证明: 以上所列举的材料都能有效地衰减传递到衬砌上的强冲击荷载。回填材料的厚度  $H$  越大, 则传递到衬砌上的冲击荷载越小, 反之亦然<sup>[2~3]</sup>。对于实际地下工程来说, 并不是  $H$  越厚越好。现将几种材料实验得到的衬砌应力  $\sigma_r$  与回填厚度  $H$  的关系曲线, 示于图 2 中。

图中  $\sigma_{rmax}$  是在没有柔性回填材料时, 在强冲击荷载作用下岩体传递到衬砌上的最大径向应力,  $L$  是结构特征长度。由图 2 看出: 浆砌块石、水泥胶结砂和柔性回填材料等, 都能有效地衰减到达衬砌上的冲击荷载。试验证明<sup>[2,6]</sup>: 结构上的应力  $\sigma_r$  与回填厚度之间呈指数规律衰减。因此, 选取一种物理力学性质适合的回填材料, 并寻找其理想的回填厚度  $H$  的计算方法, 是在强冲击荷载作用下实现地下工程高抗力必须条件。

(2) 能有效地减少地下工程衬砌内部的震动效应。

在强冲击荷载作用下, 高承载能力的地下工程内部震动效应是十分强烈的。有时内部衬砌震动加速度峰值达到上千个  $g$ 。这样强烈的冲击震动效应, 工程内部人员和各种仪器设置, 将受到各种程度的杀伤和破坏。所以, 工程内部的隔震设计, 同结构抗力设计一样, 是必须同时进行的。

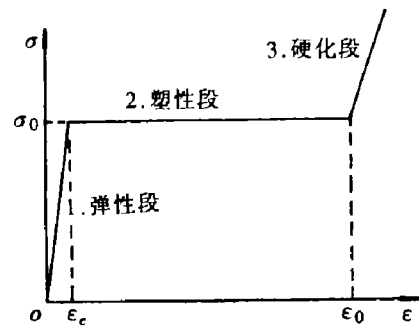
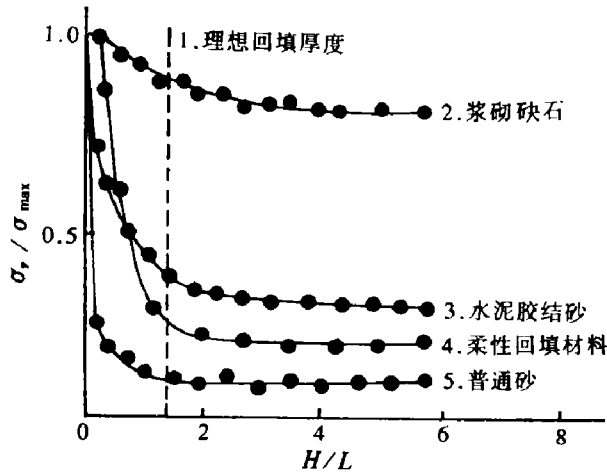
在洞室周边与衬砌之间填充一种隔震性能好的柔性回填材料, 又是作为工程隔强震的一级隔震措施, 必须精心设计。试验证明: 利用柔性回填材料具有大的塑性变形, 可以大量吸收冲击和震动能量, 造成岩体毛洞—回填材料—衬砌三者之间的阻抗失配, 可使冲击震动能量在回填材料中造成急剧衰减, 达到减少衬砌内部震动效应的目的<sup>[5]</sup>。

(3) 柔性回填材料改变了衬砌的受力形态。

试验证明: 构筑在岩体中的地下工程, 在强冲击荷载作用下, 衬砌四周的受力是不均匀的。以圆形结构为例, 衬砌所承受到的最大荷载是在迎爆面方向, 次之是在拱顶或拱脚处, 衬砌所承受的最小荷载是在背爆面方向。亦即是说, 若将衬砌直接同岩体相接, 衬砌的受力形态是极不均匀的。但若在衬砌与围岩之间填充一种柔性材料, 如图 1 所示, 则可以

大大改变衬砌的受力形态。理想的柔性回填材料物理力学特征,其应力变形关系如图 3 所示。在强冲击荷载作用下材料的塑性变形量很大。一般塑性变形限  $\epsilon_0$ , 可达到 40%~50%。这样,在强冲击荷载下,传递到衬砌四周的荷载都是由材料塑性应力  $\sigma_0$  控制。当衬砌某处受力值达到  $\sigma_0$  后,在以后衬砌变形过程中,应力不再升高保持  $\sigma_0$  值。最终使得衬砌四周都是受到应力  $\sigma_0$  的作用,使衬砌由原来的不均匀承载变成均匀承载。柔性回填层大大改变了衬砌的受力形态。

众所周知:圆形衬砌在四周是均匀荷载的作用下,具有更高的承载能力,可承受更强的冲击荷载的作用。因此,柔性回填是实现地下工程高抗力的必备条件。



- 1. Seasonable backpacking thickness;
- 2. Grouted ore; 3. Cemented sand;
- 4. Soft backpacking material; 5. Plain sand

图 2 衬砌应力  $\sigma_r$  与回填厚度  $H$  的比例关系

Fig. 2 Relation between lining stress  $\sigma_r$  and backpacking thickness  $H$

- 1. Elastic branch; 2. Plastic branch;
- 3. Hardening branch

图 3 回填材料变形  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线

Fig. 3  $\sigma$  vs  $\epsilon$  for backpacking material

(4)防止集中荷载对衬砌的冲击作用。

在强冲击条件下,岩体中不被复毛洞处于坑道工程的剥离区或堵塞区,若不采取措施毛洞壁石将产生大量的飞石和剥离落石。毛洞与衬砌间的回填材料,可吸收和分散这些飞石、落石的能量,分散飞落石对衬砌造成的集中荷载直接冲击,这是显而易见的。

### 3 理想回填厚度的计算

#### 3.1 冲击荷载沿毛洞周边的分布

能量守恒原理告诉我们:物体(变形体)在外力  $X_i(r, \theta)$  的作用下产生变形  $U_i(r, \theta)$ , 把变形产生的应力张量记作  $\sigma_{ij}(r, \theta)$ , 应变张量记做  $\epsilon_{ij}(r, \theta)$ , 那么,外力  $X_i$  在物体变形时所做的功  $W$ , 应当等于物体变形  $U_i$  所吸收的应变能  $E_n$ 。

在不计体力时,外力  $X_i(r, \theta)$  做的功  $W$

$$W = \int_L X_i(r, \theta) U_i^*(r, \theta) ds \tag{1}$$

在刚弹性条件下物体变形所吸收的应变能  $E_n$

$$E_n = \int_{\Omega} \epsilon dv = \int_{\Omega} \sigma_0 (\epsilon_0 - \frac{1}{2} \epsilon_r) dv \quad (2)$$

对于地下工程(坑道)因足够长,取出单位长度,可简化为平面问题。假定工程毛洞半径记为  $r$ ,衬砌外半径记做  $r_1$ ,那么柔性回填材料是以  $r, r_1$  为半径的两个同心圆所围成的区域,以下记做  $\Omega$  域,如图 1 所示。那么

$$\int_L X_i(r, \theta) U_i^T(r, \theta) ds = \int_{\Omega} \sigma_0 (\epsilon_0 - \frac{1}{2} \epsilon_r) dv \quad (3)$$

回填材料所围成的  $\Omega$  域是一弹塑性变形体,它受到的外力  $X_i(r, \theta)$  由两部分组成:一是岩体毛洞周边对  $\Omega$  域的压力  $p(\theta)$ ,二是衬砌对  $\Omega$  域所形成的反作用力  $\sigma_0$ 。

毛洞周边对  $\Omega$  的压力  $p(\theta)$  是角  $\theta$  的函数。由试验实测数据知: $p(\theta)$  迎爆面最大,背爆面最小,拱顶和拱底次之。用柔性回填材料形成的图 1 所示系统,毛洞周边的压力分布  $p(\theta)$ ,可用下式表示

$$p(\theta) = (A + B\theta)\sigma_r \quad (4)$$

$$\sigma_r = B_0 (R/W^{\frac{1}{3}})^{-m} \quad (5)$$

式中: $B_0$  和  $m$  是两系数,由表 1 给出。 $A, B$  是两个常数,可用试验测定。

表 1 系数  $B_0$  和  $m$  值

Table 1 Coefficient  $B_0$  and  $m$

爆炸方式	围岩类别	$B_0$ /(MPa)	$m$	实用范围( $R/W^{\frac{1}{3}}$ ) /( $m/kT^{\frac{1}{3}}$ )
触	I 类围岩	$1.068 \times 10^5$	1.95	10~100
地	II 类围岩	$1.313 \times 10^5$	2.48	10~100
爆	III 类围岩	$3.81 \times 10^5$	2.83	10~100
闭	I 类围岩	$6.63 \times 10^5$	1.95	25~250
封	II 类围岩	$1.343 \times 10^6$	2.48	25~250
爆	III 类围岩	$5.41 \times 10^5$	2.83	25~250

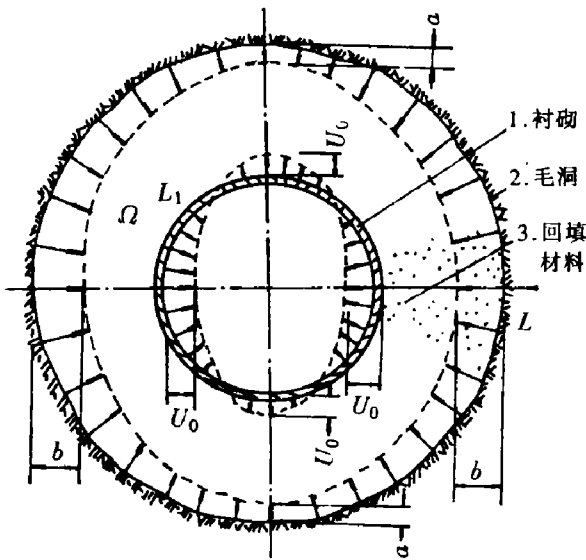
### 3.2 理想回填厚度的导出

毛洞与衬砌间的回填材料,厚度越大,对结构的减压和隔震效果就越是有利,厚度太薄则达不到实现高抗力工程的要求。考虑到工程造价,地下空间利用、工程消费比,施工要求等诸方面,必然存在一个最合理的回填厚度  $H$ ,我们称该厚度为理想回填厚度。

外力  $X_i(r, \theta)$  所做的功由两部分组成,压力  $p(\theta)$  在冲击荷载下回填材料变形过程中做的功,记作  $W_p$ ;衬砌变形对回填材料产生的压力  $\sigma_0$  所做的功,记作  $W_0$ 。

试验证明<sup>[6,8]</sup>:在冲击荷载作用下,毛洞四周的变形都是内收的,迎冲击面和背面位移量最大,且绝对值近于相等;拱顶和拱底位移量最小,两者亦近于相等。衬砌的变形迎冲击面和背冲击面是内收的,且近于相等;拱顶和拱底则是外凸的。现在在冲击荷载作用下,岩体毛洞和圆形衬砌的变形形态,示于图 4 中。

由荷载  $p(\theta)$  的作用使回填材料在  $L$  边界上产生的位移最大值,记作  $X_{\max}(\theta)$ ,可表达为<sup>[6]</sup>



1. Lining; 2. Surrounding rock;  
3. Backpacking material

图4 毛洞与衬砌在冲击荷载下的变形形态  
Fig. 4 Deformations of surrounding rock and lining under intense impulsive loading

$$X_{\max}(\theta) = b - \frac{4(b-a)}{\pi}\theta + \frac{4(b-a)}{\pi^2}\theta^2 \quad (6)$$

$$0 \leq \theta \leq \pi$$

取坑道单位长度,外力  $p(\theta)$  在回填材料边界  $L$  上做的功  $W_p$

$$W_p = \int_L p(\theta) X_{\max}(\theta) dL \quad (7)$$

将(4)、(6)式代入(7)式并简化得

$$W_p = \frac{1}{3}\pi(2a+b)(2A+\pi B)\sigma_r \quad (8)$$

衬砌变形作用力  $\sigma_0$  在边界  $L_1$  上做的功  $W_s$

$$W_s = \int_{L_1} \sigma_0(r, \theta) U_{\max}(\theta) ds \quad (9)$$

由图3看出:衬砌在变形过程中  $\sigma_0(r, \theta) \equiv \sigma_0$ , 这是由柔性回填材料的屈服性质决定的。

衬砌在变形过程中在  $L_1$  边界上产生的最大位移是  $U_{\max}(\theta)$ , 试验证明, 近似用下式计算

$$U_{\max}(\theta) = \left(-1 + \frac{8}{\pi}\theta - \frac{8}{\pi^2}\theta^2\right)U_0 \quad (10)$$

$$0 \leq \theta \leq \pi$$

在(8)、(10)式中  $a, b, U_0$  分别是毛洞、衬砌在冲击荷载下所产生的最大位移。其物理意义如图4所示。参量  $a, b$  可用下式计算

$$a = 11.10(R/W^{1/3})^{-2.61}r \quad (11)$$

$$b = 92.5(R/W^{1/3})^{-2.61}r \quad (12)$$

$$W_s = 2\sigma_0 U_0 r_1 \int_0^\pi \left(-1 + \frac{8}{\pi}\theta - \frac{8}{\pi^2}\theta^2\right) d\theta \quad (13)$$

得到

$$W_s = \frac{2}{3}\sigma_0 U_0 \pi(r-H) \quad (14)$$

回填材料在变形过程中吸收的应变能  $E_n$

$$E_n = \frac{1}{2}\pi\sigma_0(2\varepsilon_0 - \varepsilon_r)H(2r-H) \quad (15)$$

由于  $E_n = W_p + W_s$ , 且由(5)、(8)、(15)式得出

$$3\sigma_0(2\varepsilon_0 - \varepsilon_r)H^2 - [4\sigma_0 U_0 + 6\sigma_0 r(2\varepsilon_0 - \varepsilon_r)]H + 2(2a+b)(2A+\pi B)\sigma_r + 4U_0\sigma_0 r = 0 \quad (16)$$

$$\text{令 } \lambda = 2\varepsilon_0 - \varepsilon_r, k = (2a+b)(2A+\pi B) \quad (17)$$

得到

$$3\lambda H^2 - (4U_0 + 6\lambda r)H + 2kr \frac{\sigma_r}{\sigma_0} + 4U_0 r = 0 \quad (18)$$

由此得到理想回填厚度的表达式

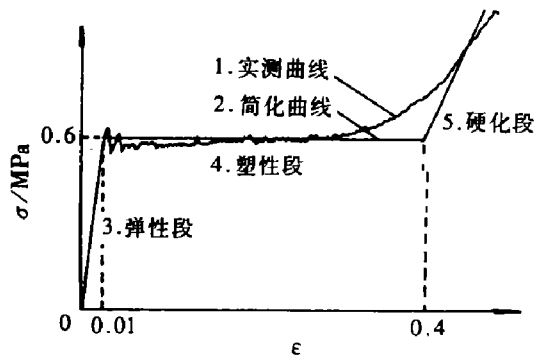
$$H = \frac{1}{6\lambda} [(6\lambda r + 4U_0) \pm \sqrt{(4U_0 + 6\lambda r)^2 - 24\lambda(kr \frac{\sigma_r}{\sigma_0} + 2U_0 r)}] \quad (19)$$

由(19)式计算得出的理想厚度  $H$ ，是既满足结构抗力要求，亦满足系统内部一级隔强震要求的厚度。

### 4 工程算例

假设某地下工程构筑在 I 类花岗岩体中，工程距地表的岩层厚度是 40m，毛洞半径  $r = 4\text{m}$ 。工程的构筑时选用了  $X_r-4-5$  材料回填在毛洞与圆形衬砌之间，回填厚度为  $H = 60\text{cm}$ 。敌方用潘兴 I 式导弹，携带当量为 20kT 的核武器，在地面触地爆炸，爆心偏离工程上方 50m。试验算该工程所用回填材料是否满足工程承载能力和隔震设计的要求。

$X_r-4-5$  柔性回填材料是一种特制材料，材料在冲击荷载作用下应力-应变曲线如图 5 所示。由图 5 知： $\epsilon_r = 0.01$ ， $\epsilon_0 = 0.40$ ， $\sigma_0 = 60\text{MPa}$ 。



1. Real curve; 2. Simplified curve;  
3. Elastic branch; 4. Plastic branch;  
5. Hardening branch

图 5  $X_r-4-5$  材料的  $\sigma-\epsilon$  曲线

Fig. 5  $\sigma$  vs  $\epsilon$  of  $X_r-4-5$  material

工程距爆心的直线距离为  $R$ ， $R = 64\text{m}$ 。

由表 1 查知：核武器触地爆，I 类围岩： $\sigma_r = 52.9\text{MPa}$ ， $a = 1.16\text{cm}$ ， $b = 9.68\text{cm}$ ， $A = 0.887$ ， $B = -0.248$ ， $k = 11.94$ ， $\lambda = 0.79$ ， $U_0 = 0.68\text{cm}$ 。

该工程理想回填厚度  $H$  为： $H = 47.8\text{cm}$ 。该工程实际回填厚度是 60cm，满足理想回填厚度的要求。

由 19 式看出：理想回填厚度  $H$  是毛洞半径  $r$ ，自由场应力  $\sigma_r$ ，毛洞变形量  $a$ 、 $b$  和衬砌变形  $U_0$  多种因素的函数。(19)式中诸项一是由毛洞变形量  $a$ 、 $b$  引起的，一项是衬砌的变形  $U_0$  引起的。在通常条件下毛洞的变形远远大于衬砌的变形，并且  $U_0$  值一般不容易求出。作为近似计算，可以忽略  $U_0$  项的影响，认为  $U_0$  恒等于零。理想回填厚度  $H$  的计算关系为

$$H = \frac{1}{6\lambda} [6\lambda r \pm \sqrt{36\lambda^2 r^2 - 24\lambda r k \frac{\sigma_r}{\sigma_0}}] \quad (20)$$

在该算例中，用(20)式重复上述计算过程，得到  $H = 47.2\text{cm}$ ，与(19)式的结果仅差 1.25%。在今后工程实际设计中，可用(20)式计算地下工程理想回填厚度。

### 5 结论

地下工程能承受更高的冲击荷载是地下工程工作者所追求的目标。在岩体毛洞和圆形衬砌之间填充一种物理力学性能良好的回填材料是其中关键技术之一。因此，柔性回填

材料理想回填厚度的计算,引起了人们的重视。文献[1~3]中所提出的计算方法,大多是经验性的、初步的。

本文的理想回填厚度的计算,比如:结构和毛洞在冲击荷载下的变形形态、毛洞周边压力分布等,都是以多次试验数据作依据而提出的;又利用能量原理,导出了理想回填厚度的解析计算方法;将计算结果与试验数据进行比较,吻合很好。因此,本文的计算方法可靠性大。且计算简便,容易掌握,可推广应用。

应当指出:本文的计算方法,仅用于在强冲击条件下的地下工程,冲击荷载强度应大于 20MPa,且回填材料的变形形态需与图 3 有类似的弹塑性  $\sigma-\epsilon$  关系的柔性材料。

#### 参 考 文 献

- 1 Engineering Research Associates, Bureau of Mines and the Armour Research Foundation. Underground Explosion Test Program, Vol. 2 Rock Contract No DA-04-167-eng 298 April, 1953
- 2 Bates R C, Dar S M. Liner Backpacking System Theory. Bureau of Mines, US Gonzagd University, Spokane, Wash, 1974. 185~201
- 3 方 秦, 钱七虎. 应力波与带软衬垫的地下结构动力相互作用. 爆炸与冲击, 1988, 8(8): 4
- 4 宋熙太. 地下圆形洞室塑性回填效应的解析. 岩土工程学报, 1989, 11(2): 64~74
- 5 Song Xitai, Zhao Yuxiang, Li Huanqui. A Calculation Method for the Optimum Backpacking Thickness of Underground Structures under Intense Impulsive Loading. Application of Computer Methods in Rock Mechanics. Xian, China, 1993.
- 6 Grawford R E, Higgins G J, Bultmann E H. The Air Force Manual for Design and Analysis of Hardened Strudures. Air Force Weapon Laboratory, AFWL-TR-74102

## REVISIT OF BACKPACKING THICKNESS OF SOFT BACKFILL MATERIAL

Song Xitai

(Luoyang Institute of Hydraulic Engineeing Technology, Luoyang 471023)

**ABSTRACT** Underground structures near shock sources are designed not only against intense impulsive loading, but also against intense vibration. In order to enhance the resisting capacity of a structure, one of the technical measures is to insert backpacking material between the lining and the surrounding rock. The kind of material to be used should be elastoplastic and soft, and able to absorb a large amount of shock energy as well as to cut down the pressure on the lining and vibration effects in the structure. In this paper, on the basis of energy principle, a method is derived for calculating the optimum thickness of the backpacking under intense impulsive loading. The method of calculation is of practical use.

**KEY WORDS** circular structure, backpacking material, isolation, load-carrying capability, energy principle