

新型复合锚固结构抗爆优化设计数值模拟分析

李世民, 曾宪明, 林大路

(总参工程兵科研三所, 洛阳 471023)

摘 要: 新型复合锚固结构是指“锚杆-构造措施”型复合锚固结构, 用于洞室的加固支护。“构造措施”是指在锚杆里端规律设置一段表面经过处理的空孔。这段空孔对周围介质起弱化作用, 因而称为“弱化孔”。新型复合锚固结构优化设计因素包括: ①弱化孔直径 d ; ②弱化孔密度; ③弱化孔长度 l ; ④锚固区厚度 t 。利用 LS-DYNA 程序依次对 4 个因素的优化设计进行了数值计算分析, 得出: 弱化孔直径的优化设计值为 $d = 1.0$ cm; 弱化孔密度的优化设计为沿环向布设 24 个弱化孔; 弱化孔长度的优化设计值是 $l = 25$ cm; 锚固区厚度的优化设计值是 $t = 25$ cm (或锚固区厚度与弱化孔长度的比值为 1)。

关 键 词: 锚固结构; 爆炸; 优化; 洞室

中图分类号: TD 354

文献标识码: A

Numerical simulation analysis of optimum design of a new composite anchorage structure resisting explosion

LI Shi-min, ZENG Xian-ming, LIN Da-lu

(The Third Research Institute of the Corps of Engineering, General Staff of PLA, Luoyang 471023, China)

Abstract: The new composite anchorage structure indicates the ‘bolt-tectonic measure’ composite anchorage structure, it is applied to cavity reinforcement and support. ‘Tectonic measure’ indicates to construct a section of empty hole located at the end of inner bolt with processing the hole surface. This section of empty hole can weaken the medium, and it is named as ‘weakening hole’. The optimum design factors of the new composite anchorage structure include: ① weakening hole diameter, d ; ② weakening density; ③ weakening length, l ; ④ anchorage zone thickness, t . The optimum design of the above four factors is analyzed through numerical simulation with LS-DYNA code. The conclusions show that: optimum weakening hole diameter, $d = 1.0$; optimum design of weakening hole density is 24 weakening holes along cavity circle; optimum weakening hole length, $l = 25$ cm; optimum anchorage zone thickness, $t = 25$ cm (or the ratio of anchorage zone thickness to weakening hole length is 1).

Key words: anchorage structure; explosion; optimization; cavity

1 引 言

锚固结构是指锚杆、锚索、土钉一类岩土工程加固支护结构。复合锚固结构是指各单一锚固结构彼此或与各种工法联合使用的一类岩土工程加固支护结构。复合锚固结构在岩土工程中已大量成功应用, 尤其是在新奥法不建议使用的软土、流砂、厚杂填土等一类复杂地质体工程中。其对人类工程建设的贡献和所产生的社会、经济和军事效益是无法估计的。复合锚固结构种类繁多, 如城建工程中常用的桩-锚(杆、索、钉)结构, 墙(地下连续墙、

搅拌桩墙等)-锚(杆、索、钉)结构等。其间存在优化复合问题, 并非简单组合即可。

本文所研究“新型复合锚固结构”是指“锚杆-构造措施”型, 主要用于地下洞室的加固支护, 如图 1 所示。“构造措施”是指在锚杆里端规律设置一段表面经过处理的空孔。这段空孔削弱了周围介质的整体强度、刚度和质量密度, 对介质具有弱化作用, 因而称为“弱化孔”。

现场的原型和模型试验已证明这种复合锚固结构可以明显地提高岩土洞室的抗动静载性能^[1-2]。在土洞同等顶爆条件下, 复合锚固结构临界抗动载能

力和临界破坏装药量是单一锚固结构的 4.6 倍和 6.6 倍。在岩洞同等顶爆条件下, 出现同等震塌破坏的装药量, 复合锚固结构是单一锚固结构的 1.71 倍; 单一锚固结构洞室震塌落石高度是复合锚固结构的 2.5 倍, 实测锚杆动应变峰值, 前者是后者的 2~4 倍。

这种复合锚固结构的构筑成本很低, 十分利于推广和应用, 目前已有成功应用的工程实例^[2]。这种复合锚固结构存在优化设计问题。其优化设计因素包括: ①弱化孔密度; ②弱化孔长度 l ; ③弱化孔直径 d ; ④锚固区厚度 t (或锚固区厚度与弱化区长度的比值)。其中, 弱化孔密度通过改变弱化孔沿锚固区环向布设的个数而改变。本文采用 LS-DYNA 动力分析软件, 通过数值模拟寻找上述 4 个因素优化组合模式, 为复合锚固结构的优化设计提供一定的依据。

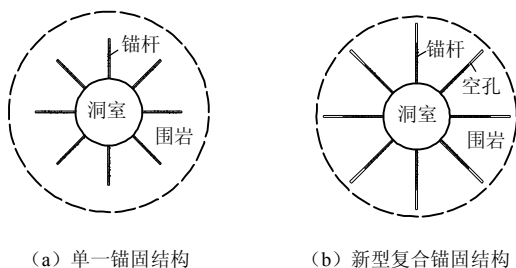


图 1 单一锚固结构、新型复合锚固结构加固洞室示意图
Fig.1 Schematic plans of a single anchorage structure and the new composite anchorage structure reinforcing cavities

2 数值模拟分析方法

所模拟的物理模型如图 2 所示。试件尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。试件埋于地下。洞室半径为 25 cm 。TNT 炸药的药量为 $1\ 600\text{ g}$ 。炸药放在试件表面中心, 接触试件表面爆炸。起爆点位于炸药中心。炸药尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。复合锚固结构构造措施段 (空孔轴线) 沿洞室轴向布设的间距为 7 cm 。下文所有计算模型中上述条件不变。

数值模拟分析的具体方法是选取锚固区上一定点 (本次计算选取的是试件爆心正下方弱化孔孔底中心点, 图 2 (a)、(b) 中所示 A 点), 通过对不同设计方案模型的该点 (单元) 压力峰值进行比较, 压力峰值较小的复合锚固结构便是所比较方案中较优化的复合锚固结构。由于介质的抗拉性能较低, 因而, 分析中应重点考虑负压力 (拉伸) 绝对值的大小。对其他计算结果, 如锚固区的损伤值、洞室拱顶的位移值等则进行综合考虑。

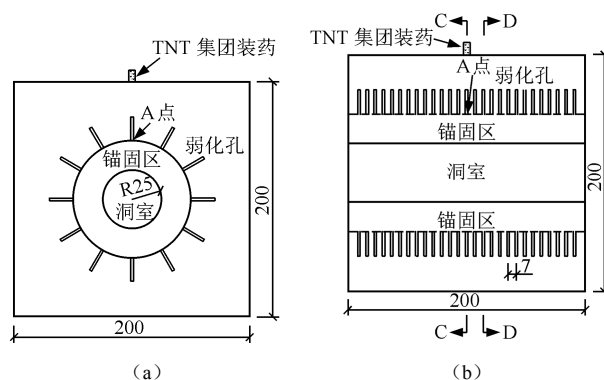


图 2 物理模型截面示意图 (单位: cm)
Fig.2 Sections of physical model (unit: cm)

3 材料模型、状态方程及材料参数

本次数值模拟需要考虑混凝土、炸药、空气三种材料的材料模型和状态方程。

混凝土采用混凝土损伤模型 (LS-DYNA 的 72[#] 材料模型)。该模型是 Marlvat 等于 1995 年提出的^[3]。该模型采用 8 个独立的参数定义子午面上的三个固定失效面, 即初始屈服面、极限强度面、残余强度面, 函数关系如下:

$$\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y}\sigma_0} \quad (\text{初始屈服面}) \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2\sigma_0} \quad (\text{极限强度面}) \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f}\sigma_0} \quad (\text{残余强度面}) \quad (3)$$

式中: $\Delta\sigma = \sqrt{3J_2}$, $J_2 = (s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)/2$; $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ (其中应力以拉伸为正、压缩为负, 压力以压缩为正, 拉伸为负); a_{0y} 、 a_{1y} 、 a_{2y} 、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_{1f} 、 a_{2f} 为材料常数; s_1 、 s_2 、 s_3 分别为第 1、2、3 偏应力; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第 1、2、3 主应力。

计算中锚固区以外的围岩介质按 C30 混凝土设计。假设锚固区有足够高的强度, 按 C50 混凝土设计。其材料参数及取值方法见文献[4-5]。

混凝土的应变率效应采用欧洲规范 CEB 给出的指数形式关系^[6]; 混凝土状态方程采用 LS-DYNA 的 8[#] 状态方程^[4]。炸药和空气的本构关系、状态方程及材料参数见文献[4, 7-8]。

4 有限元模型

根据问题的对称性, 取 1/4 的物理模型进行计算。考虑计算机的硬件性能, 有限元模型沿洞室轴线方向取 14 cm 厚部分 (图 2 (b) 中 C-C 截面至

D-D 截面间的部分), 计算模型的大小为 $100\text{ cm} \times 200\text{ cm} \times 14\text{ cm}$, 如图 3 所示 (限于篇幅, 仅给出模型 1)。与炸药接触的上表面为自由边界, 对模型的对称面施加对称约束, 其余边界则设为透射边界。单位制采用 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 值。计算时间取 $700\text{ }\mu\text{s}$, 每 $5\text{ }\mu\text{s}$ 输出一个计算结果文件。采用 8 节点六面体单元划分网格。炸药、爆炸近区、锚固区、弱化孔区域的网格划分较密, 单元大小均控制在 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 以内。爆炸远区网格相对较稀疏。所有计算模型的单元数量接近, 均在 32 万个单元左右。对于不同的计算模型, 相同区域的单元大小基本一致, 因而可忽略由于单元大小略微变动而引起的计算相对误差。流固耦合方法采用允许材料侵蚀的罚函数耦合方法^[4]。

为便于建模和划分网格, 有限元模型的弱化孔用方形孔简化代替实际的圆形孔。即 $\Phi 1\text{ cm}$ 的孔简化为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的孔, 类似地, $\Phi 2\text{ cm}$ 的孔简化为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的孔, 等等。

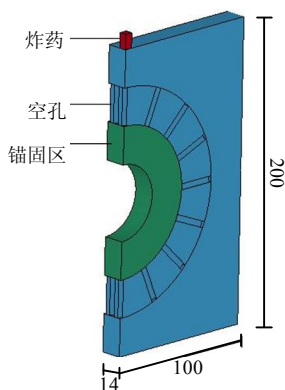


图 3 有限元计算模型 (模型 1, 单位: cm)
Fig.3 Finite element model (model 1, unit: cm)

5 优化设计计算及结果

5.1 孔径的优化设计计算及结果

分别计算分析 $\Phi 1\text{ cm}$ 、 $\Phi 2\text{ cm}$ 、 $\Phi 3\text{ cm}$ 、 $\Phi 4\text{ cm}$ 4 种孔径方案。模型 1: 弱化孔截面面积大小为 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$, 孔长 25 cm , 弱化孔沿环向布设 16 个孔, 锚固区厚度为 25 cm ; 模型 2: 在模型 1 方案基础上仅改变弱化孔横截面面积大小为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$; 模型 3: 在模型 1 方案基础上仅改变弱化孔横截面面积大小为 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$; 模型 4: 在模型 1 方案基础上仅改变弱化孔横截面面积大小为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 。

模型 1 孔底中心单元的压力时程曲线如图 4 所示, 第一个峰值为 3.11 MPa , 第二个峰值为 -3.34 MPa (负号表示拉伸); 其余模型孔底中心单

元的压力时程曲线形状相似 (限于篇幅, 其余模型的未给出)。混凝土介质是抗拉性能较低的介质, 因而, 在正压力峰值较小时, 应主要考虑负压力绝对值峰值大小 (即此时拉伸破坏是主要的可能破坏形式)。

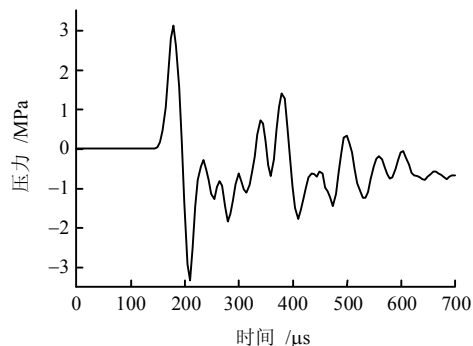


图 4 爆心下方孔底中心单元的压力时程曲线 (模型 1)
Fig.4 Pressure history curve of the center element in hole bottom under blasting center (model 1)

可得到孔径大小与孔底中心单元的负压力峰值绝对值关系曲线如图 5 所示, 可看出所比较方案中孔径为 1.0 cm 的复合锚固结构是优化的。因而, 在此后的计算模型中, 将孔径均固定取为 1.0 cm 。

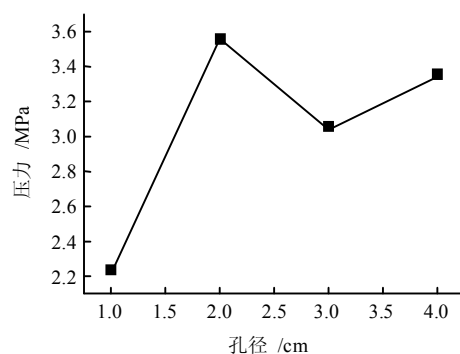


图 5 孔径与孔底单元拉压力峰值关系
Fig.5 Relation of tensile pressure peak between center element in hole bottom and hole diameters

5.2 孔密度的优化设计计算

分别计算分析沿环向布设 24、32、20、28 个空孔的 4 种空孔布设密度方案。模型 5: 在模型 4 方案基础上仅改变孔密度大小, 即弱化孔沿环向布设个数为 24 个; 模型 6: 在模型 4 方案基础上仅改变弱化孔沿环向布设个数为 32 个; 模型 7: 在模型 4 方案基础上仅改变弱化孔沿环向布设个数为 20 个; 模型 8: 在模型 4 方案基础上仅改变弱化孔沿环向布设个数为 28 个。

可得到空孔布设密度与孔底中心单元负压力峰

值绝对值关系曲线如图 6 所示(包括模型 4)。可看出沿锚固区环向布设的空孔个数为 24 个的复合锚固结构(即模型 5)是优化的。因而,在此后的计算模型中,将空孔布设个数固定为 24 个。

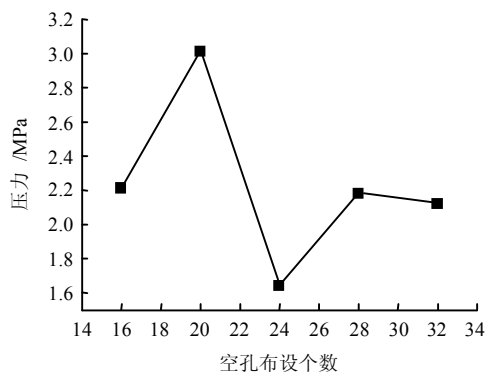


图 6 孔布设个数与孔底单元拉压力峰值关系
Fig.6 Relation of tensile stress peak between center element in hole bottom and hole layout numbers

5.3 孔长的优化设计计算

分别计算分析孔长为 30 cm、20 cm、27 cm、23 cm 的 4 种空孔方案。模型 9: 在模型 5 方案基础上仅改变孔长为 30 cm; 模型 10: 在模型 5 方案基础上仅改变孔长为 20 cm; 模型 11: 在模型 5 方案基础上仅改变孔长为 27 cm; 模型 12: 在模型 5 方案基础上仅改变孔长为 23 cm。

可得到弱化孔长度与孔底中心单元的负压力峰值绝对值关系曲线如图 7 所示(包括模型 5)。由该图可看出沿锚固区环向布设的孔长为 25 cm 的复合锚固结构(即模型 5)是优化的。因而,在此后的计算模型中,将空孔长度固定取为 25 cm。

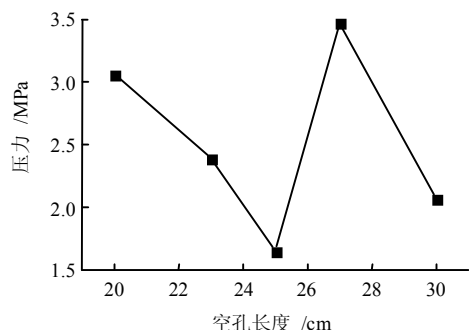


图 7 空孔长度与孔底单元拉压力峰值的关系
Fig.7 Relation of tensile stress peak between center element in hole bottom and hole lengths

5.3 锚固区厚度的优化设计计算

分别计算分析锚固区厚度为 30、20 cm 的两种

锚固区厚度方案。模型 13: 在模型 5 方案基础上仅改变锚固区厚度为 30 cm; 模型 14: 在模型 5 方案基础上仅改变锚固区厚度为 20 cm。

可得到锚固区厚度与孔底中心单元的负压力峰值绝对值关系曲线如图 8 所示(包括模型 5)。由该图可看出沿锚固区厚度为 25 cm 的复合锚固结构(即模型 5)是优化的。

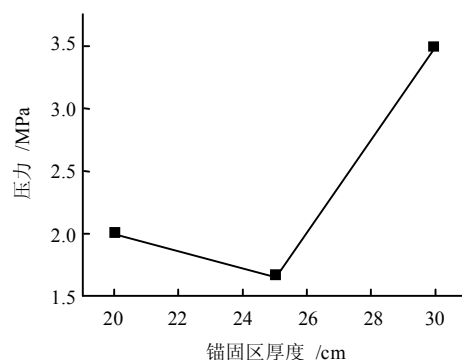


图 8 锚固区厚度与孔底单元拉压力峰值的关系
Fig.8 Relation of tensile stress peak between center element in hole bottom and anchorage zone thickness

由上述所有计算结果可给出各模型孔底中心单元的负压力峰值绝对值(拉伸压力峰值)的比较图,如图 9 所示。由该图可看出,就孔底中心单元的负压力峰值绝对值而言,模型 5 是最小的。

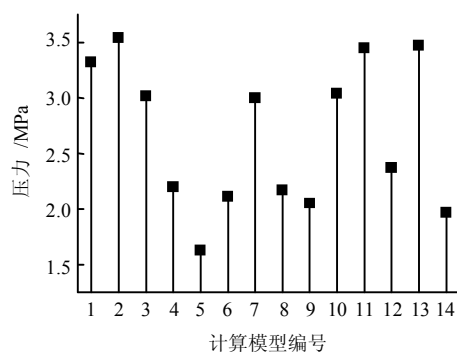


图 9 各模型孔底中心单元的拉伸压力峰值
Fig.9 Tensile pressure peak of center element in hole bottom of all models

5.4 锚固区损伤值的比较

后处理程序 LS-PRE/POST 可显示混凝土损伤模型的损伤参数 δ [4]。应力状态在到达初始屈服面之前, $\delta=0$; 应力状态在初始屈服面和极限强度面之间, $0<\delta<1$; 应力状态到达极限强度面上时, $\delta=1$; 应力状态在极限强度面和残余强度面之间 $1<\delta<2$; 应力状态到达残余强度面时, $\delta\approx 2$ 。

锚固区的最终损伤参数 δ 的分布如图 10 所示

(限于篇幅, 仅给出模型 1 的)。从图 10 可看出, 锚固区的损伤均出现在锚固区顶部, 锚固区的侧部和底部未出现损伤。这表明锚固区的顶部是受力最严重的部位, 出现了塑性变形; 而锚固区的侧部和底部受力状态尚处于弹性阶段, 未出现塑性变形, 受力相对较小。

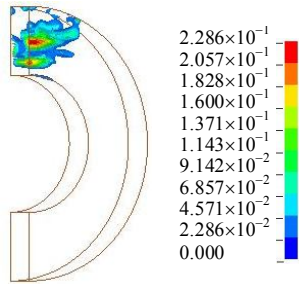


图 10 锚固区最终损伤参数 δ 的分布 (模型 1)

Fig.10 Distributions of ultimate damage parameter δ in anchorage zone (model 1)

给出各模型锚固区损伤参数 δ 的最大值 $\delta_{\max}$ 的比较结果, 如图 11 所示。由图 11 可看出, 模型 5 锚固区的损伤参数 $\delta_{\max}$ 是最小的。这表明, 就锚固区的损伤参数 $\delta_{\max}$ 而言, 模型 5 的复合锚固结构设计是所有模型中最优的。这一计算结果和上述以孔底单元负压力峰值绝对值最小作为复合锚固结构优化设计判据的计算结果是较一致的, 也说明以孔底单元负压力峰值绝对值 (拉伸) 作为复合锚固结构优化设计的判据较为可靠。

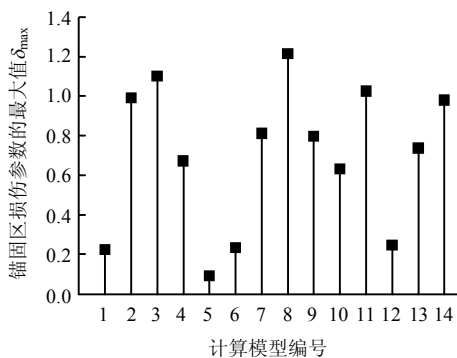


图 11 各模型锚固区最终损伤参数 $\delta_{\max}$

Fig.11 Ultimate damage parameter $\delta_{\max}$ of anchorage zone of each model

5.5 洞室拱顶的竖直向位移

给出爆心投影点正下方洞室拱顶节点的竖直向位移, 以比较各模型洞室拱顶的竖直向位移峰值 (负号表示位移向下), 如图 12 所示 (限于篇幅,

仅给出模型 1, 其它模型的曲线相似)。

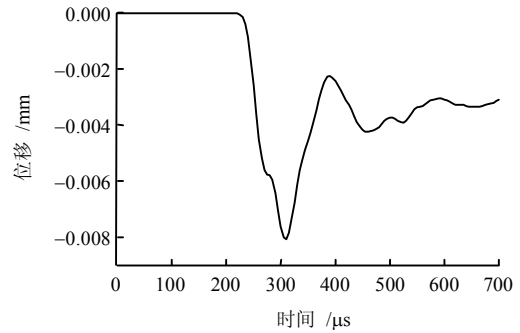


图 12 洞室拱顶的竖直向位移 (模型 1)

Fig.12 Vertical displacements of cavity crown (model1)

从图 12 可看出, 由于炸药的装药量不高, 且锚固区介质强度较高, 因而洞室拱顶向下的竖直向位移峰值很小。出现位移峰值时间在 $t = 300 \mu s$ 附近。比较各模型爆心投影点正下方洞室拱顶节点的竖直向位移峰值, 如图 13 所示, 其中, 模型 5 的是最小的, 这表明, 就洞室拱顶的竖直向位移而言, 模型 5 也是最优的。这一结果与上述以压力和损伤为判据的计算结果较为一致。

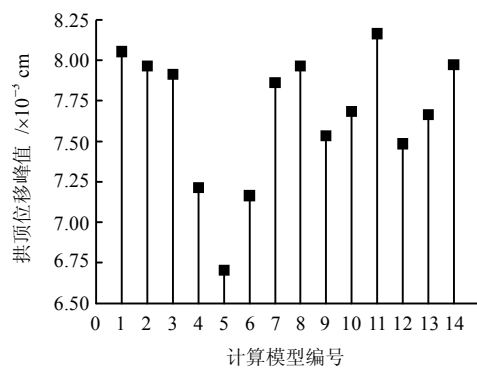


图 13 各模型洞室拱顶的向下位移峰值

Fig.13 Adown vertical displacement peak of cavity crown of each model

6 结 论

利用 LS-DYNA 程序对新型复合锚固结构的优化设计问题进行了数值模拟分析。在给定物理模型, 假定复合锚固结构设计 4 因素彼此不相关的基础上, 通过以爆心正下方弱化孔孔底单元拉伸压力大小为判据, 依次对 4 个因素的优化设计进行了数值模拟分析, 并综合考虑了各计算模型锚固区的最

终损伤分布、洞室拱顶的位移峰值。主要得出以下结论：（1）弱化孔孔径的优化设计值为 $d = 1.0\text{ cm}$ ；

（2）弱化孔密度的优化设计为沿环向布设 24 个弱化孔；（3）弱化孔孔长的优化设计值 $l = 25\text{ cm}$ ；

（4）锚固区厚度的优化设计值 $t = 25\text{ cm}$ （或锚固区厚度与弱化孔长度的比值为 1）；（5）所有计算模型中，各设计参数优化组合的模型（模型 5）的弱化孔孔底单元拉伸压力最小，锚固区损伤参数 $\delta_{\max}$ 最小，洞室拱顶位移峰值最低，因而，其洞室抗力最高，复合锚固结构的设计参数最优。

参 考 文 献

- [1] 曾宪明, 杜云鹤. 土钉支护抗动载原型与模型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1892—1897.
- [2] 宋红民, 李世民. 新型复合土钉支护在大跨度土洞中的应用[J]. 防护工程, 2009, 31(2): 66—71.
- [3] MALVAR L J. A plasticity concrete material model for DYNA3D[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9–10): 847—873.
- [4] HALLQUIST J Q. LS-DYNA keyword manual version 971 [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [5] 中国建筑科学研究院主编. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范（修订版）[M]. 北京：中国建筑工业出版社, 2003.
- [6] CEB. Concrete structures under impact and implosive loading[R]. Lausanne: Committee Euro-International du Beton, 1998, 187.
- [7] LEE E, FINGER M, COLLINS W. JWL equation of state coefficients for high explosives[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, 1973.
- [8] 董永香, 夏昌敬. 平面爆炸波在半无限混凝土介质中传播与衰减特性的数值分析[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 812—817.