

爆炸荷载下坑道 振动规律及安全性估计

杨昇田

(1984年3月10日收到)

本文对文献[1]所叙述的试验给出实测结果,并通过对结果的分析给出坑道的安全性估计。

一、前言

根据文献[1]可以看到,在爆炸地震波的瞬间作用下,地下坑道的完整性变坏,出现位移、滑塌、洞形改变、洞室堵塞等破坏现象。这些现象随着坑道所处的地质环境,距爆心的距离不同而有所差异。

文献[1]对一条平行于爆炸洞轴线的坑道作了破坏情况的宏观调查分析。这条坑道的轴线垂直于爆炸压缩波阵面的传播方向,即与爆炸洞平行。在这次试验中还同时构筑了两条轴线与爆炸洞垂直的坑道,另有一条与文献[1]所述相同走向的坑道,但距爆轴的距离要远一倍。图1是这次试验的坑道平面布置及测量工点示意图,07-4就是文献[1]所述的主坑道。全长105m,其中包括35m长引洞。引洞断面为 $3 \times 3 \text{ m}^2$,主坑道 $9 \times 6 \text{ m}^2$ 。复盖层厚度3~41m,一般在25m。

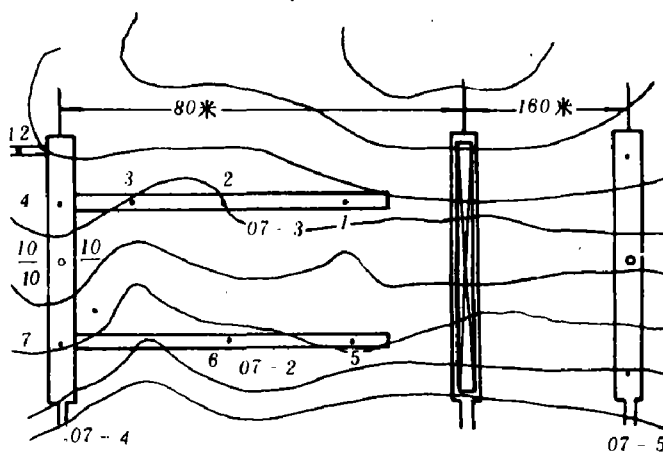


图 1

二、文献[1]所述07-4坑道结果

根据对07-4坑道的地质调查,洞深从洞口算起,下同71~99m,西侧墙洞深38~43m,东侧墙38~54m,围岩风化轻微,为硬质岩体,完整性好,成洞后围岩稳定。其余部分围岩

多为块状结构(局部有碎裂结构),为中等坚硬岩体,成洞后基本稳定。测量工面分别在洞深40m, 90m底板及75m断面处(毛洞段)。

07—4坑道从爆后的宏观现象看,破坏较重。譬如,围岩出现冒顶坍塌,岩体出现较大的相对位移,边墙出现片帮滑移,坑道内部的离壁式结构拱顶塌落,砖墙出现局部倾复毁坏。但是,根据坑道内主要结构面分布情况看,这些破坏主要是受 F_1 、 F_2 断层(F_1 : $305^\circ SW < 53^\circ$ 断层约在洞深31~41m间, F_2 : $75^\circ SW < 21^\circ$ 断层约在洞深39~69.6m间)以及被节理切割成孤立的割裂体,尤其是那些与洞轴交角较小的节理的影响所致。根据70m长的洞内破坏情况,在洞深80—105m间(即端部25m)未见任何节理张裂现象,也未见喷射混凝土剥离,洞室完好。在其余地段很少见到爆炸裂隙和新鲜剥离面,岩体的整体性破坏并不严重。从破坏的后果看,也是可以修复的。实测环向应力值也均在屈服应力以下。因此该坑道围岩的破坏应属中等破坏(结构面控制区)和轻微破坏之间而偏于轻微破坏(下面将详述破坏分区)。

根据文献[1]的宏观调查,岩体的完整性,结构面的产状和它的出露位置以及软弱结构面等都对围岩的破坏有影响。从宏观调查的引洞和主坑道破坏结果看,还与坑道的几何尺寸有关。

从该坑道的实测结果发现,主坑道的中部加速度量值最大,靠近端部次之,而在靠近主坑道口部最小。其实测结果如图2所示的分布曲线。坑道中部底板的速度,径向分量小于垂向分量。例如在测量工点10—1,速度峰值之间有关系

$$\frac{V_v}{V_r} = 1.57$$

而在断面的其它点,如拱顶和拱脚,却相反,其径向速度峰值大于垂向速度峰值

如 10—2点 $\frac{V_v}{V_r} = 0.56$, 10—3点 $\frac{V_v}{V_r} = 0.79$, 10—4点 $\frac{V_v}{V_r} = 0.75$ 。式中 V_v 为垂向速度峰值, V_r 为径向速度峰值,10—1~10—4各点位置如图3所示。

在毛洞段的横断面,应力分布见图4。从初至应力峰值分布可以看出,直墙拱的两个侧墙中点均受拉应力的作用,这与文献[2]结果相一致。本次试验观察到在引洞背爆拱脚喷层鼓裂剥落,应与此应力状态有关,即围岩表面受拉而围岩断面受弯而破坏。

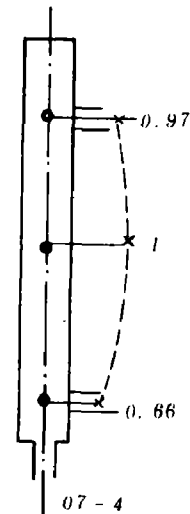


图 2

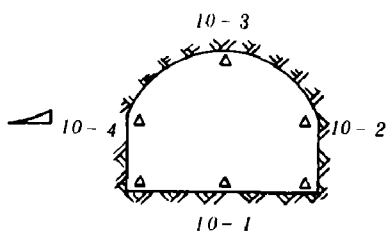


图3 10—10断面

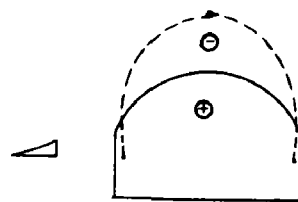


图4

三、同一试验中的07—2, 07—3坑道结果

07—2号坑道的走向与爆炸压缩波传播方向一致, 坑道端墙距爆轴28m, 实际岩体厚度23m, 洞口距爆轴75m, 坑道长47m。坑道为 $3 \times 3 \text{ m}^2$ 断面的岩石毛洞(局部有喷射混凝土)。爆后, 爆轴距57.6m处已完全被落石填塞, 围岩坍塌, 岩体结构的整体性破坏严重。由于结构面的存在, 产生上复岩体的滑移。该区段爆炸应力大大超过岩石的屈服强度。坑道已无修复价值。由57.6m至洞口75m区间, 破坏仍较严重, 落石堆积高度在1m以上, 坑道呈半堵塞状。在局部结构面处破坏稍为严重, 如在爆轴距为63.9m的 $70^\circ \text{ SE} < 72^\circ$ 结构面处出现大的岩体相对位移。爆轴距68.8~75.0m区间的北墙 $350^\circ \text{ SW} < 75^\circ$ 夹泥膜节理的剥离偏塌。该区段爆炸应力接近岩石的屈服强度, 坑道修复困难。

07—3坑道与07—2坑道结构相同。该坑道的破坏特征是在距爆轴55m处开始出现大量落石。该处恰有两条断层相交, 即 $45^\circ \text{ SE} < 66^\circ$ 和 $107^\circ \text{ SW} < 50^\circ$ 交于此处。由该处为分界, 向爆心一侧的坑道破坏严重, 而反方向的坑道却破坏轻微, 有一较明显的分界。爆轴距39m开始, 坑道均被块石充填, 原结构破坏, 整体性基本丧失。在39~45m间, 爆后出现大规模偏塌, 结构松弛, 整体性也很差。在45~55m间, 坑道的破坏主要是受结构面控制。譬如, 在该段出现的冒顶现象。在55~60m间则破坏轻微, 坑道无明显变化, 仅有局部节理张开和浮石震落。而在60m以外的地区则安全无恙, 即使在洞口亦无破坏现象。

据此, 对该种坑道的破坏建议分四类区段:

I区(毁坏区)。坑道壁上的压应力超过岩石屈服强度, 坑道毁坏, 使破坏深入壁内, 造成全部堵塞, 无修复和使用价值。

II区(破坏区)。洞室呈半堵塞状, 围岩整体性破坏严重, 落石堆积较多, 形成连续性破坏, 坑道壁上的压应力接近岩石的屈服强度, 基本无修复和使用价值且修复困难。

III区(结构面控制区)。落石断续发生, 破坏多发生在软弱结构面, 可见岩体沿结构面的相对位移, 围岩破坏受结构面控制。坑道有修复价值, 亦可以修复。

IV区(轻微破坏区)。坑道完好, 围岩破坏轻微, 仅有原松动的浮石震落, 可见部分节理张开, 稍加清理即可使用。

那么用 $R_1 = R_c$ 代表I区的外边界, 用 R_2 代表II区的外边界等等, 则对于07—2坑道有: $R_1 = R_c = 57.6 \text{ m}$, $R_2 = 1.3 R_c$ 。 R_2 是近似估计, 因为该坑道直至洞口破坏仍很严重, 而III区和IV区不存在。对07—3坑道有: I区 $R_1 = R_c = 39 \text{ m}$, II区 $R_2 = 1.20 R_c$, III区 $R_3 = 1.40 R_c$, IV区 $R_4 = 1.54 R_c$ 。

将本次试验在坑道底板所测得的垂向运动参数^[3]经过筛选用最小二乘法回归拟合得如下方程

$$a_v = 51.687 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{3.073}$$

$$V_v = 67.86 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.060}$$

式中 a_v 为垂向加速度(单位: g), V_v 为垂向速度(单位: cm/s), Q 为爆炸总药量(单位: kg), R 是爆轴距(单位: m)。回归曲线见图5, 实测结果见表1, 其中测点位置见图1所示。

表 1

测点编号	1	2	4	5	6	7	10	12
爆轴距(m)	35.3	49.6	80.0	35.3	48.6	80.0	80.0	110.9
速度(cm/s)	138.5	113.2		134.3	164.3		80.3	37.7
加速度(g)			63.3*	759.5	168.0	42.8	65	

* 80 m 测点回归时取的是平均值

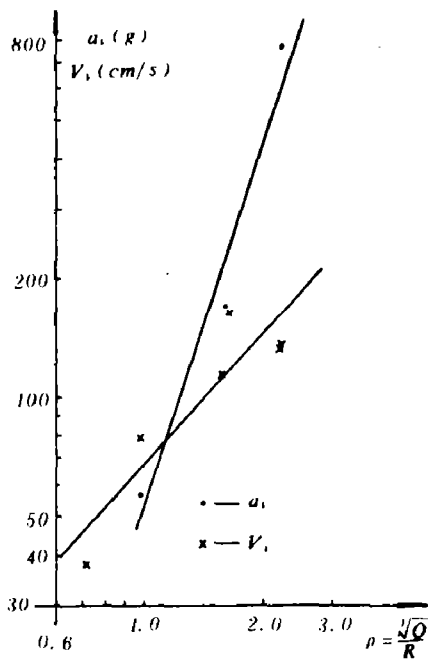


图 5

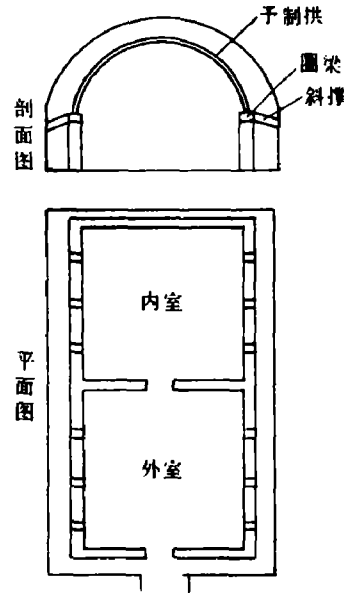


图 6

按此公式推算可得 I 区(毁坏区)的运动参数指标为: I 区, 对于 07—3 坑道, 加速度 $a_v = 458.9g$, 速度 $V_v = 144.1cm/s$; 对于 07—2 坑道, 加速度 $a_v = 138.4g$, 速度 $V_v = 95.3cm/s$ 。IV 区(轻微破坏区)的运动参数为: 对于 07—3 坑道, 加速度 $a_v = 122.1g$, 速度 $V_v = 91.28cm/s$ 。如果按此公式近似推算文献〔1〕所述的 07—4 坑道的运动参数值为: 加速度 $a_v = 50.44g$, 速度 $V_v = 71.36cm/s$ 。因 07—4 坑道走向与 07—2, 07—3 走向不同, 其回归方程略有差异, 所以推算 07—4 坑道或者 07—5 坑道时近似使用。

在 07—4 坑道实际测得的加速度值平均 $57g$, 在坑道中部稍高于这个值, 坑道口部稍低于这个值, 在坑道的端部取口部和中部的中间值。在 07—4 坑道的中部实测速度值为 $80.33cm/s$ 。据此, 上述公式可估算 07—4 类型及 07—2, 07—3 类型坑道安全的大致范围。

爆炸洞的另一侧, 在距爆轴二倍于文献〔1〕所述的坑道爆轴距的位置处构筑了 07—5 坑道, 其结构尺寸与 07—4 坑道相类似, 走向一致, 但内部只有一种离壁式结构, 围岩仅有小锚杆加喷射混凝土支护。爆后坑道围岩宏观破坏轻微, 围岩完好, 仅在极其局部的地方出现

轻微裂缝。

此坑道内离壁式结构分为内室和外室,外室侧墙为钢筋混凝土框架砖填充墙结构。内室则无框架,拱脚都有圈梁,在顶部无落石的情况下只受到通过坑道底板及坑道与圈梁间的斜撑(见图6)传递的爆炸引起的地震波的作用爆后特点如下:

(1) 内室比外室破坏严重,迎爆面比背爆面严重,外室沿圈梁只有轻微水平弯曲裂缝。

(2) 内室端墙产生 45° 剪切裂缝,纵墙产生整体错动,沿墙脚底线出现弯曲裂缝,与端墙联接处亦出现剪切裂缝,整个墙体如同一端自由三端支撑的板,斜撑弯曲断裂。在地震波作用下,由于岩壁,拱圈,直墙的振动不协调,予制园拱与圈梁联接处错位,圈梁与直墙错位,造成软弱墙体的如图7的破坏。由斜撑本身的破坏及它所造成的墙体的破坏,表明斜

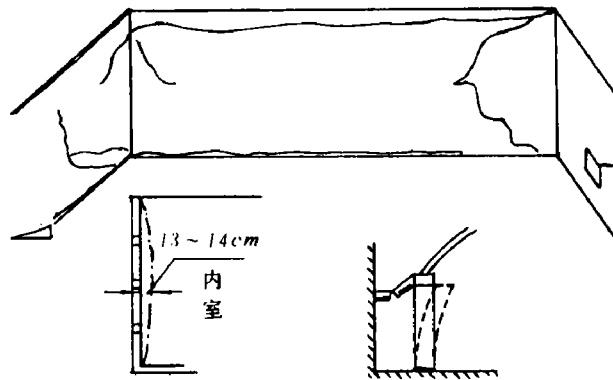


图 7

撑在动载下正如所予料的未起到改善受力状态和加固的作用。钢筋混凝土框架填充墙则收到了良好的效果,其墙体、柱都破坏轻微。予制园拱除联接处抹灰脱落后,无破坏。如仍接上述公式推算该坑道的垂向振动参数为:加速度 $a_v = 5.99 g$;速度 $V_v = 32.2 cm/s$ 。

根据五机部勘测公司地质调查,07—2坑道爆轴距 $57.6 \sim 68.8 m$ 间,北墙原节理 $60 \sim 70\%$ 出现张裂,一般近 $0.5 cm$,最大可达 $2 cm$,在 $63.6 \sim 68.8 m$ 间可见到爆炸裂隙和新鲜剥离面。在爆轴距 $68.8 \sim 75.0 m$ 间原节理也普遍张开 $0.2 \sim 0.5 cm$,但爆炸裂隙不发育。拱部喷射混凝土大部分剥离,有少量新鲜剥离面出现,一般节理张开不明显,07—3坑道,爆轴距 $29.0 \sim 39.0 m$ 间,节理普遍张开 $0.2 \sim 3.0 cm$,少量可达 $10 cm$ 。在 $39.0 \sim 52.0 m$ 间,原节理普遍张开 $0.5 \sim 2.0 cm$ 。而到 $52.0 \sim 60.0 m$ 间,一般节理无明显变化,只有少数张开 $0.2 cm$,个别张开 $0.5 cm$ 。 $60.0 \sim 75.0 m$ 节理无明显张裂现象。

仍据上述地质调查,07—2坑道和07—3坑道围岩的线裂隙率基本一致。譬如,07—2坑道北墙高 $1.2 m$,爆轴距 $35.0 \sim 74.5 m$ 的 $39.5 m$ 长的洞壁内共遇 156 条节理,其中 64.1% 为闭合节理, 35.9% 有不同程度的张开现象。

07—3坑道内在南墙高 $1.2 m$ 爆轴距 $35.5 \sim 74.0 m$ 的 $39.0 m$ 长度内,共遇 145 条节理,其中 61.4% 为闭合节理, 38.6% 有不同程度的张开现象。可见,两坑道线裂隙率基本一致。

从实测速度结果看,其峰值也较接近。譬如,距爆轴最近的测量工点1,两坑道实测垂

向速度结果

$$\frac{V_{v,07-2}}{V_{v,07-3}} = 0.97$$

从破坏效果看,两坑道的破坏程度有较大的差别,其原因可能有如下几点。

07—2与07—3坑道相比,较处于山体的边缘地带,复盖层厚度最小只有13m,最大23m,一般18m厚。对于07—3坑道,则位于山体深部,复盖层厚最小33m,最大39m,一般也要有37m。07—2也较07—3风化严重,降低了岩石的抗爆性能。从爆源看则离爆坑较近。

如前述,07—3坑道在距爆轴55m处其破坏程度有一明显突变,主要是在这里有一交叉断层。运动参数的测量结果也表明,当爆炸波通过断层时在断层附近也有所降低。譬如,在该坑道距爆轴61.05m处测得的垂向速度值偏低。在作回归拟合时,如果将该点数据筛掉,则得到的回归曲线的置信度为 $\nu = 0.9396$ 。如果计入该点数据,则回归曲线的置信度降为 $\nu = 0.7300$ 。按本文公式推算该点垂向速度为89.62cm/s,而实测值为30.77cm/s。从该点的测试波形看并无大的畸变现象。

四、结 论

根据文献[1]及本文的讨论,对本次试验可得如下结论。

(1) 07—4, 07—2, 07—3以及07—5坑道的破坏情况表明,坑道的破坏有两种形式,一种是有规律性的破坏,一种是随机破坏,而以前者为主。随机破坏主要受地质环境及其偶然情况支配,即与随机构造有关。如07—4, 07—3坑道中断层节理对局部岩体和离壁式结构破坏的影响。对于规律性破坏其破坏程度主要取决于爆炸波的强度和岩石的动态特性。譬如,在07—3坑道中的轻微破坏区和毁坏区的情形。

(2) 如果排除随机因素,07—4坑道应属中等破坏(结构面控制区)和轻微破坏区之间而偏于轻微破坏。按本文公式推算该种坑道垂向运动参数值应为:加速度 50.4g,速度 71.36cm/s;实测值为:加速度 57.0g(平均值),速度 80.33cm/s。对于07—5坑道,推算值为:加速度 5.99g,速度 32.2cm/s,这时坑道是安全的。还可利用本文所给的公式反演而确定安全距离。

(3) 在同等爆炸振动的环境下,离壁式结构要比坑道围岩破坏严重。如果要作到等强度,还需对离壁式结构精心设计,改善强度,譬如对予制拱脚的联接加强。

(4) 从07—2与07—3坑道破坏效果看,如果坑道地处山坡边缘,临空面大,岩体质量差复盖层薄,坑道围岩则破坏较重,反之则较轻。

(5) 破坏情况必须与波的传播方向以及它所走过的路程一同考虑。设计者必须注意到结构所处的地质环境。像07—3坑道,在爆轴距55m处所出现软弱结构面的情形,当爆炸波通过此地时,对振动有所减弱。

当波的走向与坑道轴向垂直时其破坏程度较与坑道轴一致时重。如比较07—4与07—3坑道,轻微破坏区的爆轴距相差近1.5倍。

(6) 还应注意软弱结构面,节理对位移场的影响,它对大块岩体的动力响应特性居支配地位,沿着这些弱面而产生的相对运动造成了空间位移场的间断,这对坑道及其内部设备是十分不利的。比如像07—4坑道的 F_2 断层的影响。

(7) 07—5 坑道离壁式结构的破坏特征与天然地震时地面结构的破坏很相似。例如, 其纵墙产生 45° 剪切斜裂缝, 其横墙变形与三端支撑一端自由的板相似, 底部支撑由于弯矩的作用产生水平裂缝, 而墙中的方孔也产生 45° 裂纹。

试验也证实, 与岩壁相联的斜撑, 并不是有利的, 它既传递了岩壁给离壁式结构的集中力, 同时又使离壁式结构的变形受到局部约束, 正像地震荷载下地面结构的震害所表明, 这是造成结构破坏的一个很重要原因。

(8) 应用本文方法判断坑道破坏分区和安全评价时, 先按本文给出结果, 然后计入局部地区的随机因素来修正, 这些局部地区的随机因素包括节理裂隙的发育程度, 软弱泥质夹层, 结构面的产状、出露位置、风化程度、临空面、工程因素(坑道平面位置、断面尺寸、被复, 走向等)等等。这些影响环境上差异的因素, 可以改变局部地段的破坏等级。例如07—4 坑道, 在排除随机因素时应属 III ~ IV 区之间, 并偏于 IV 区, 但在 F_1 , F_2 断层控制区内则属于 III 区(结构面控制区)。

R_1 的确定与破坏分区中的毁坏区(I 区)相一致, 可由运动参数控制。 R_2 , R_3 , R_4 的确定, 与上述相同, 在一般情况的基础上再计入随机因素。07—2 和 07—3 R_1 值的差异就是因为坑道所处的环境的不同所造成, 如同文中所述, 尽管它们实测运动参数很接近。

(9) 建议破坏分区按本文所述的依据分为四个阶段。那么, 对于轴向与爆炸压缩波走向一致的坑道, 依据本次试验, 在一般情况下(如 07—3 坑道, 无大的随机因素), 其轻微破坏区在毁坏区的约 1.5 倍距离以远的地方, 如像 07—3 坑道所破坏情形那样。

参加本试验实测的有丁兆奎, 龚振鹏, 杨连弟等。

参 考 文 献

- [1] 朱如玉, 王承树, 爆炸与冲击, 2 (1982), 17.
- [2] Yang Shengtian, Zhang Yaoqin, "Finite Element Analysis of a Cavity in Rock Subjected to Blastloading", Proceedings of ICFEM, 8 (1982).
- [3] 杨昇田, 丁兆奎等, 爆炸与冲击, 3 (4) (1983), 34.

VIBRATION LAW AND SAFETY ESTIMATE OF THE TUNNEL SUBJECTED TO BLASTING

Yang Shengtian

Abstract

In this paper, measuring results are given for an experiment in which the effect on a tunnel by an explosion was investigated in reference [1], and safety estimates of the tunnel are given through analysis of the results.