

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0290-06

施工爆破对确定海底隧道最小 岩石覆盖厚度的影响研究

王汉鹏¹, 李术才¹, 乔 玲²

(1. 山东大学 岩土与结构研究中心, 济南 250061; 2. 山东章丘地矿局, 章丘 250200)

摘 要: 确定海底隧道的最小岩石覆盖厚度是在确保海底隧道安全的基础上减少工程造价的关键。施工爆破对上覆岩石的振动影响着海底隧道最小岩石覆盖厚度的确定。采用 FLAC^{3D} 模拟了宁波海底隧道钻爆法施工对上覆岩层的动力学影响, 分析了海底隧道的底板标高和装药量对上覆岩层交界面的稳定性影响, 得到了振动速度、应力波动历时曲线和塑性区大小。通过与萨道夫斯基公式计算结果的对比, 综合经济、安全方面的考虑, 建议降低装药量, 底板线下降 2 m。

关 键 词: 海底隧道; 最小岩石覆盖厚度; 钻爆法施工; 动力学; FLAC^{3D}; 数值模拟

中图分类号: U452

文献标识码: A

Dynamic research on the minimum rock covers of subsea tunnel construction using drilling and blasting method

WANG Han-peng¹, LI Shu-cai¹, QIAO Ling²

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Bureau of Geo. Minerals, Zhangqiu City, Zhangqiu 250200, China)

Abstract: Ascertaining the minimum rock covers of subsea tunnel is important to reduce project cost on the conditions of subsea tunnel safety. Researching the dynamic influence of tunnel blasting construction on the cover rock mass is necessary to the minimum rock covers. The effect of subsea tunnel construction using drilling and blasting method to overlaying strata is analyzed through FLAC^{3D} numerical simulation. The influence of different subsea tunnel level and charge weight on the interface of overlaying strata is analyzed. The blasting vibration velocity history and stress vibration history at key points and the plastic zone are gained and contrasted with the result of experimental formula; synthesizing the above analysis and considering economical and safety of subsea tunnel, we suggest that charge weight should be reduced and subsea tunnel level should be descended 2 meters.

Key words: subsea tunnel; minimum rock covers; drilling and blasting construction; dynamics; FLAC^{3D}; numerical simulation

1 前 言

国外(如挪威、日本)的海底隧道多采用矿山法(钻爆法)施工,其埋深的确定,既要避免埋深过大,使隧道增长、造价提高,又要防止埋深不足,使海水溃入隧道。如何综合考虑经济、安全两方面因素,确定矿山法海底隧道的最小埋深,是海底隧道修建的最大难点之一^[1]。

现有的海底隧道施工方法主要是钻爆法^[2]。在爆破方面如何控制开挖轮廓和爆破振动对地层的扰动一直是隧道爆破的一个重要研究课题,这一点对

施工环境特别是对隧道工程的质量有着决定性的影响。爆破工程一方面要求充分发挥炸药的能力,另一方面则要对这种能量进行有效的控制^[3]。

在海底应用钻爆法开挖施工中存在着爆破施工开挖岩石和保护围岩,使其影响降至最低的矛盾。炸药在岩体内爆炸时,在将开挖范围内的岩石爆破下来的同时,必然要对保留的岩体造成损伤和破坏,从而影响围岩的稳定性和渗透性^[4,5]。因此,研究海底隧道钻爆法施工对上覆岩层的动力学影响非常有意义。李术才、邱祥波^[6]等人用工程类比和数值分

收稿日期: 2006-04-15

基金项目: 国家自然科学基金委联合基金重点项目 (No. 50539080)

作者简介: 王汉鹏,男,1978年生,博士研究生,主要从事岩石力学试验与数值模拟研究。E-mail: pcwli@163.com。

析研究了海底隧道的最小岩石覆盖厚度,文献[7]用数值方法预测了地下大规模爆破对围岩的动力响应。李飞、闰长斌等人应用 FLAC^{3D} 软件分别研究了爆破振动对隧道和采空区稳定性的影响^[8, 9]。本文拟采用数值方法研究海底隧道施工爆破对确定海底隧道最小岩石覆盖厚度的影响。

2 爆破冲击波理论

控制爆破的目的是减少对被保护围岩的破坏和保证被保护围岩的工程稳定性,质量标志是炮孔残留率较高和爆破壁面平整(如光面爆破和预裂爆破),因此,它的首要条件是在爆炸冲击压力下炮孔孔壁岩石不被压坏。在不耦合连续装药条件下,作用在炮孔孔壁上的平均爆炸冲击压力为

$$P_0 = \rho_0 D^2 (d_c / d_b)^6 n / 8 \quad (1)$$

式中 n 为爆生气体与炮眼壁碰撞时的压力增大系数, $n \approx 8 \sim 11$; D 为炸药爆速; d_b 为炮孔直径; d_c 为药卷直径; ρ_0 为炸药密度。

采用空气间隔药时,不耦合间隔装药时炮孔壁上的冲击压力为

$$P_0 = \frac{\rho_0 D^2}{8} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^6 \left(\frac{l_c}{l_c + l_a} \right) n \quad (2)$$

式中 l_c 为装药长度; l_a 为不包括孔口堵塞长度的间隔空气柱长度。其他参数与上式相同^[10]。

关于超压作用时间 $\tau(s)$, 给出 Sdofskyi 公式:

$$\tau = B \times 10^{-3} W^{1/6} \sqrt{R} \quad (3)$$

式中 W 为药量; R 为到炮孔中心的距离。对系数 B , 不同的学者给出不同的值, 本文取 1.3。

冲击波在惰性介质中衰减过程相当复杂, 很难从理论上得到精确的解析表达式。在惰性介质中, 一般认为, 冲击波与时间的衰减规律近似符合指数衰减规律, 可用近似公式表示:

$$p(t) = p_0 e^{\frac{-at}{\tau}} \quad (4)$$

式中 a 为常数, a 可以通过试验的方法或用曲线拟合方法确定; p_0 为初始压力^[11]。

在本次计算中为了得到更准确的信息, 并不是像通常那样把上述载荷直接加在隧道围岩的表面上, 而是根据 FLAC 动态计算的特点, 模拟同时起爆药量最大段的炮孔布置, 然后把计算所得的动载荷以等效应力的方式加载于模拟炮孔上。这样可以很形象地得到最大段起爆后所形成的松动圈及各点

的峰值振动速度, 进而确定最小顶板厚度爆破振动的影响范围。

3 工程概况

象山港海底隧道工程位于宁波和象山之间, 隧道预计长度为 12.5~15 km, 其中隧道穿越海域水面宽度约 4.3~6.1 km。海域基岩以泥灰岩为主, 隧道经过全风化带、强风化带、弱风化带、破碎微风化带和微风化带。个别深槽底界可深至 -110 m。岩脉内原生节理及密闭裂隙发育。隧道建成后, 净高 5 m, 净宽为 9.5 m, 图 1 为海底隧道断面图。

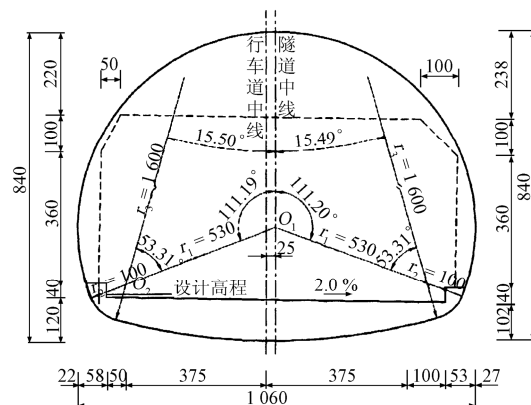


图 1 海底隧道断面图 (单位: cm)

Fig.1 Subsea tunnel section (unit: cm)

围岩属于微风化、弱风化安山岩, 且微风化围岩位于隧道上方, 实测岩石物理力学参数列于表 1。

表 1 岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rocks

围岩类别	重度 γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹模 E / GPa	泊松比 μ	凝聚力 / MPa	内摩擦角 / ($^\circ$)	抗拉强度 / MPa
III类	25.6	6.0	0.28	0.5	35	0.5
IV类	26.5	10	0.3	1.0	43	1.0

该段隧道围岩较弱, 隧道与海底距离小, 必须控制爆破规模来减小对围岩的损伤破坏和降低岩石的渗透率, 爆破开挖方案采用上下台阶法, 先开挖上部, 掏槽方法为采用直眼掏槽, 拱顶眼采用光面爆破; 然后再开挖下部, 周边眼采用光面爆破, 崩落眼的爆破顺序由上而下。钻眼直径选为 $\phi 42 \text{ mm}$, 循环进尺。上部进尺 2 m, 下部进尺 4 m。掏槽方法采用五梅花小直径中空直眼掏槽^[12], 炮眼布置图见图 2。

在 1[#]眼周围设置 4 个距离很近的小直径空眼作

为1[#]眼的临空面, 1[#]眼起爆后, 在中央形成一个空洞, 作为其他炮眼的临空面, 然后 2[#], 3[#], 4[#]炮眼逐步爆破, 扩大形成槽腔, 提高炮眼利用率。

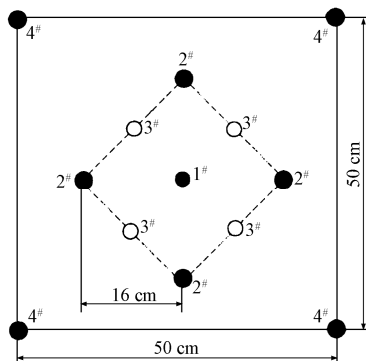


图2 五梅花掏槽眼布置图
Fig.2 Pullout bores layout

炸药直径 $d_c = 25$ mm, 密度 $\rho_0 = 1.5$ g/cm³, 爆速 $D = 4100$ m/s, 炮孔直径 $d_b = 42$ mm, 孔深 2.5 m, 装药不耦合系数 $K_d = 1.68$, 装药长度 l_c 为 1.6 m, 间隔空气柱长度 l_a 为 0.7 m。由此可以算出每个炮孔的装药量为 1.2 kg。

4 钻爆法施工FLAC^{3D}数值模拟

4.1 模型概化

本文选取计算的一段桩号在k27+900附近, 即海底隧道最深处, 隧道底板标高为-150 m, 上覆基岩的厚度为24.95 m。垂直方向为Y轴, 从海底土层向下至-250 m。水平方向为X轴, 隧道两侧各取100 m。隧道轴向方向为Z轴, 考虑到炮孔的封孔长度, 取2 m。

建模时将1[#]炮孔置空, 只考虑2[#]成菱形的4个炮孔, 重点考虑4个掏槽眼的爆破作用。

动力模型要求划分网格时网格的尺寸要小于波长的 1/10 或 1/8, 即网格的尺寸 $\Delta l \leq \lambda/10$, 冲击波长度(压缩空气层厚度)由近似公式计算^[11]:

$$\lambda \approx c_0 \tau \quad (5)$$

式中 $c_0 = 340$ m/s, 为空气中的声速; τ 为超压作用时间^[3]。模型网格的划分依据此原理, 炮孔附近划分的较密, 共划分3 298个单元, 6 756个节点。

4.2 约束边界条件

在FLAC^{3D}中, 动力计算的边界条件有自由场边界和黏性边界两种^[13]。当输入的动力条件为加速度和速度时, 采用刚性基础; 当输入的动力条件为应

力和力时, 采用自由基础。由于输入的爆炸冲击波是应力输入, 所以在此采用自由边界。

施加自重应力场, 侧压系数按0.5和0.8计算。爆破荷载的最大值 p_0 采用式(2)求得。爆炸冲击波 $p(t)$ 用APPLY命令施加到炮孔上, 计算时间取0.15 s, 应用动力计算进行爆破稳定性分析。

5 计算结果分析

目前, 在我国通常仍采用最大质点振动速度作为对爆破控制的标准, 根据我国《爆破安全规程》的规定, 以各点的质点峰值振动速度作为计算控制标准^[4,14]。我国《爆破安全规程》规定的不同隧洞的爆破安全振动速度标准见表2。

表2 安全振动速度标准

Table 2 Safety blasting oscillation velocity criterion

序号	岩石条件与洞室类型	临界振动速度/cm·s ⁻¹
1	稳定岩石巷道	40
2	中等稳定岩石巷道	30
3	岩石不稳定但支护良好的巷道	20
4	重点保护的地下构筑物	10
5	水工隧洞	10
6	交通隧洞	15

本次计算在隧道上部基岩设定监测点, 监测围岩的垂直振动速度历时和垂直应力历时。测点图见示意图 3, 节点 1 位于隧道顶部微风化和弱风化基岩的交界面上, 节点 2 位于基岩与土层的交界面上。当隧道位于原设计位置时, 节点 1 距炮孔 9.5 m, 节点 2 距炮孔 27.5 m。由于测点位于爆破点上方, 岩石质点的垂直向振速一般要大于其水平振速。因此, 主要监测上覆岩层各测点的垂直向振速波形^[14]。

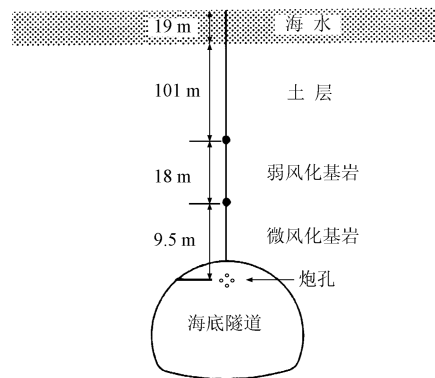


图3 洞顶监测节点位置

Fig.3 Positions of measuring points over tunnel

5.1 隧道埋深对爆破稳定性的影响

计算分别考虑了原设计位置及其在设计位置上分别抬高、降低2 m, 4 m, 共5种情况。由于节点2距爆源较远, 监测到的振动速度和应力变化非常小, 因此, 只列出节点1的历时变化曲线。图4、图5分别为隧道不同高程节点1垂直振动速度历时曲线和垂直应力历时曲线。爆破塑性区图见图6。

从垂直振动速度历时来看, 海底隧道高程越大, 即埋深越浅, 节点1的振动速度越大, 且达到速度高峰的时间越早, 这符合实际情况。设计位置时, 节点1的最大振速约为4.6 cm/s, 降低2 m后最大振速约为3.15 cm/s。从垂直振动速度历时来看, 也是海底隧道高程越大即埋深越浅, 节点1的应力波动越大, 且开始波动的时间越早。测点应力先增加, 后减少, 之后波动幅度迅速减小直至为0。设计位置时, 节点1的最大应力波动振幅约为0.31 MPa, 降低2 m后, 最大应力波动振幅约为0.2 MPa。

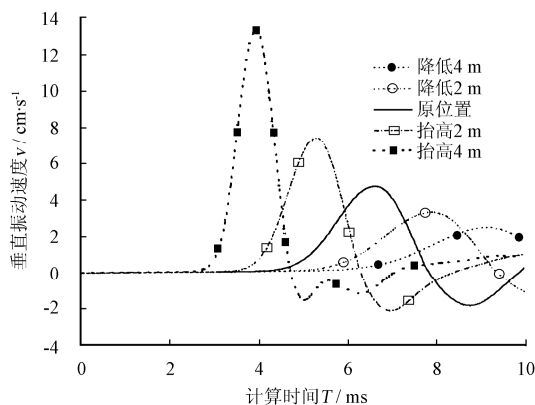


图4 关键点1垂直振动速度历时
Fig.4 Vertical vibration velocity during blasting

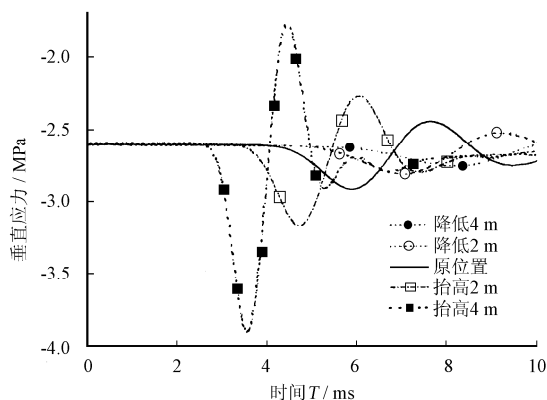


图5 关键点1垂直应力历时
Fig.5 Vertical stress history

由爆破产生的塑性区可以看出, 在4个炮孔中心周围约2 m左右的距离内产生塑性区。爆破产生

的塑性区分布在炮孔的周围, 其塑性区的面积为8.04 m²。

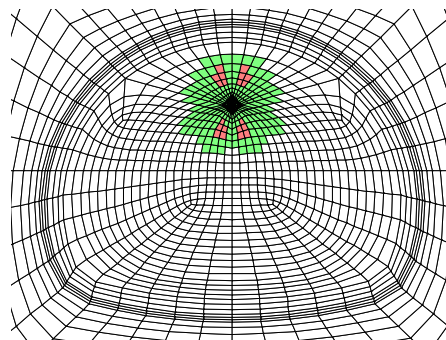


图6 爆破塑性区图
Fig.6 Plastic zones of blasting

工程上常用萨道夫斯基公式来求振动速度^[15], 其公式为

$$v = K \left(\sqrt[3]{Q} / R \right)^{\alpha} \quad (6)$$

式中 Q 为装药量; R 为距爆源中心的距离; K 为与爆区地质条件有关的系数; α 为衰减指数。表3为爆破区不同岩性的 K , α 取值。

表3 爆破区不同岩性的 K , α 值
Table 3 K and α value in different rock mass

岩性	K	α
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

因此, 可以利用萨道夫斯基公式来反求 R 值。对萨道夫斯基公式, 根据工程类比, 取 $Q = 4.8$ kg, $K = 150$, $\alpha = 1.8$, 假设海底隧道上方微风化基岩与风化基岩交界面允许的振动速度为 5 cm/s, 代入式 (6), 可得距爆源最小安全距离 R 为 11.16 m。隧道设计位置时, 弱风化基岩与微风化基岩交界面距炮孔的距离为 9.5 m, 小于最小安全距离, 故而应该降低隧道埋深, 从图4和图5可看出, 降低2 m和降低4 m振速和应力波动相差不大, 综合经济因素考虑, 故建议降低2 m。

5.2 装药量对爆破稳定性的影响

在装药量4.8 kg的基础上, 降低装药量至4.0 kg。此时, 隧道不同高程节点1垂直振动速度历时曲线和垂直应力历时曲线分别见图7、图8。

从垂直振动速度历时来看, 装药4.0 kg时, 设计位置节点1的最大振速约为3.68 cm/s, 降低2 m后最大振速约为2.52 cm/s。从垂直振动速度历时来

看, 设计位置节点 1 的最大应力波动振幅约为 0.2 MPa, 降低 2 m 后最大应力波动振幅约为 0.1 MPa。

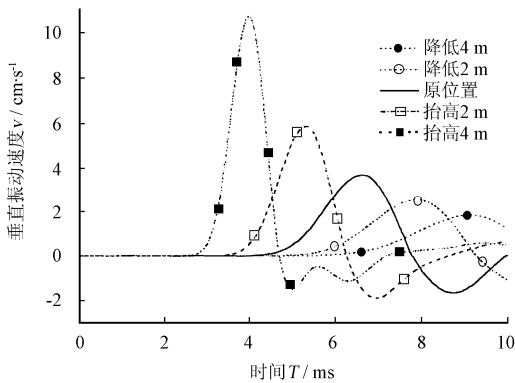


图 7 关键点 1 垂直振动速度历时曲线
Fig.7 Vertical vibration velocity during blasting

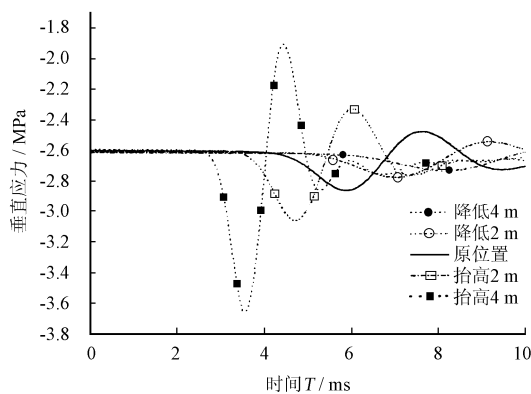


图 8 关键点 1 垂直应力历史
Fig.8 Vertical stress hishtory

装药量 4 kg 时爆破产生的塑性区面积为 6.26 m^2 。

装药量的多少对隧道振动速度、最大应力波动振幅和塑性区面积均有不同程度的影响。装药量越少, 监测点振动速度和最大应力波动振幅越小, 塑性区面积也越小。与装药量 4.8 kg 相比, 装药量 4 kg 时振动速度下降了 19%~20%, 最大应力波动振幅下降了 16.7%~21%, 塑性区面积下降了 20%。

将 $Q=4.0 \text{ kg}$ 代入式 (6), 其他参数不变, 可求得安全距离为 10.5 m。萨道夫斯基公式求得的安全距离与设计值相比, 海底隧道应该由设计位置降低 2 m 才能满足要求。

结合海底隧道最小顶板厚度的流固耦合计算分析, 为了确保海底隧道的安全性, 建议施工爆破减少装药量, 隧道底板标高降低 2 m。

6 结 论

本文应用 FLAC^{3D} 对海底隧道钻爆法施工进行了数值分析, 模拟不耦合间隔装药爆破对上覆基岩振动的影响, 得出以下结论:

(1) 隧道爆破后, 上覆基岩的垂直振动速度与距爆源的距离成反比, 即距离爆源越近, 垂直振动速度越大, 反之越小。对比分析了海底隧道不同埋深下, 隧道正上方微风化基岩和弱风化基岩交界面上监测点的垂直振动速度和垂直应力波动历史。通过与萨道夫斯基公式的计算结果对比, 为保证爆破后海底隧道上覆岩体的稳定和无新的裂隙产生, 建议隧道由设计高程下降 2 m。

(2) 装药量的多少对隧道振动速度、最大应力波动振幅和塑性区面积均有不同程度的影响。装药量越少, 监测点振动速度和最大应力波动振幅越小, 塑性区面积也越小。相比装药量 4.8 kg, 装药量 4 kg 时基岩振速和应力振幅都下降了约 20%, 因此, 装药量 4 kg 时隧道更加安全。

(3) 在 4 个炮孔中心周围约 2~3 m 左右的距离内产生应力集中, 围岩进入塑性区。降低装药量后塑性区明显减少。

(4) 爆破对上覆岩层有一定的损伤, 结合海底隧道最小顶板厚度的流固耦合计算分析, 为了确保海底隧道的安全, 同时考虑经济的因素, 建议降低底板标高, 在原设计位置降低 2 m, 同时采取减少装药量等相应措施, 以减少对上覆岩层的振动损伤。考虑海底隧道对水的敏感性, 在对隧道进行爆破施工时, 应采用毫秒微差爆破, 减少爆破振动对围岩的破坏, 单段起爆药量不应超过 4 kg。

参 考 文 献

- [1] 刘松. 矿山法修建海底隧道最小埋深的探讨[J]. 隧道建设, 2003, 23(3): 4—6.
LIU Song. Discussion on minimum cover depth of constructing subsea tunnel using blasting method[J]. Tunnel Construction, 2003, 23(3): 4—6.
- [2] 刘树年, 范鹏. 水底隧道钻爆法施工快速掘进技术初探[J]. 西部探矿工程, 2003, 86: 103—105.
LIU Shu-nian, FAN Peng. Research on fast driving technology of submerged tunnel using blasting method[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 86: 103—105.

- [3] 许锡宾, 赵明阶, 荣耀. 公路隧道爆破掘进震动效应研究[J]. 水运工程, 2004, 368(9): 74—78.
- XU Xi-bin, ZHAO Ming-jie, RONG Yao. Vibration effect of blasting and driving of road tunnel[J]. **Port and Waterway Engineering**, 2004, 368(9): 74—78.
- [4] 王明年, 潘晓马, 张成满, 等. 邻近隧道爆破震动响应研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 412—414.
- WANG Ming-nian, PAN Xiao-ma, ZHANG Cheng-man, et al. Study of blasting vibration influence on close-spaced tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 412—414.
- [5] 国胜兵, 王明洋, 赵跃堂, 等. 爆炸地震波作用下地下结构动力响应数值分析[J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 137—142.
- GUO Sheng-bing, WANG Ming-yang, ZHAO Yue-tang, et al. Dynamic numerical analysis of underground structures under action of explosion seismic wave[J]. **World Earthquake Engineering**, 2004, 20(4): 137—142.
- [6] X B Qiu, S C Li, W Z Chen. Numerical analysis of rock cover thickness of subsea tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2004, 19: 426.
- [7] Chengqing Wu, Yong Lu, Hong Hao. Numerical prediction of blast-induced stress wave from large-scale underground explosion[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2004, 28: 93—109.
- [8] 李飞, 陈卫忠, 李术才, 等. 高速公路浅埋大跨度双跨连拱隧道爆破振动影响研究. 岩石力学与工程学报[J]. 2004, 23(增 2): 4 744—4 748.
- LI Fei, CHEN Wei-zhong, LI Shu-cai et al. Study of effects of blast on shallow large-span double-linked-arch tunnel of expressway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(supp2): 4 744—4 748.
- [9] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC^{3D} 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 894—2 899.
- YAN Chang-bin, XU Guo-yuan, LI Xi-bing. Stability analysis of mined-out areas influenced by blasting vibration with FLAC3D[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(16): 2 894—2 899.
- [10] 王廷武, 刘清泉, 杨永琦, 等. 地面与地下工程控制爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [11] 周昕清. 爆炸动力学及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [12] 齐景岳, 刘正雄, 张儒林, 等. 隧道爆破现代技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- [13] Itasca Consulting Group, Inc. .FLAC^{3D} Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimension, Version 2.0, User's manual[M]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 1997.
- [14] 姚勇, 何川, 晏启祥, 等. 董家山隧道小净距段爆破控制的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增): 501—506.
- YAO Yong, HE Chuan, YAN Qi-xiang, et al. Numerical simulation of blasting control for small clear distance zone of Dongjiashan tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp): 501—506.
- [15] 郭建群, 张继春, 许海亮, 等. 人和场隧道掘进爆破的地震效应试验研究[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(4): 92—95.
- GUO Jian-qun, ZHANG Ji-chun, XU Hai-liang, et al. Seismic effects on drive blasting in Renhechang tunnel[J]. **China Railway Science**, 2003, 24(4): 92—95.