

文章编号: 1000-7598 (2011) 09-2617-06

爆炸成腔后土体物理力学性能的变化规律

王海亮¹, 叶朝良²

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建教育部重点实验室, 山东 青岛 266510; 2. 石家庄铁道大学, 石家庄 050043)

摘 要: 在 6 块不同的土质场地完成了 21 次爆炸成腔试验, 试验用炸药埋深为 1.20~12.5 cm, 起爆药量为 0.05~51 kg。对其中的 5 个腔体进行了土工试验。对爆后土体的天然密度、孔隙比、饱和度、压缩系数、压缩模量、内摩擦角、黏聚力的分布规律进行了实测。试验结果表明, 爆炸作用对土体的影响半径是爆炸成腔半径的 4~6 倍。土体的天然密度、干密度、饱和度和压缩模量等指标随土体距爆炸中心距离的增大而降低。土体的孔隙比、压缩系数和渗透系数等指标随土体距爆炸中心距离的增大而提高。未在腔壁附近发现密度低于原状土的低密度区。爆炸冲击作用对土体内摩擦角的影响规律不明显。

关 键 词: 爆炸成腔; 土体; 物理力学性能; 现场试验

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Variation pattern of soil physico-mechanical performance by explosive enlargement

WANG Hai-liang¹, YE Chao-liang²

(1. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266510, China;
2. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Twenty-one field explosive enlargement tests were carried out on six different soil test sites. The embedded charge were 0.05-51 kg and their embedded depths were 1.20-12.5 cm. Five explosively formed cavities were employed for the soil mechanical test on the variation patterns of natural density, pore-solids ratio, saturation degree, compressibility, compression modulus, internal friction angle and cohesive strength. The test results show that the radii of soil mass affected by explosion are four to six times larger than radii of explosively formed cavities. Soil performance indices such as natural density, dry density, saturation degree, compression modulus, cohesive strength are decreased with the increasing of distance to the center of charge. The indices such as pore-solids ratio, compressibility, coefficient of permeability are increased with the increasing of distance to the center of charge. No low-density region where density is lower than undisturbed soil is found around the caves. The variation pattern of internal friction angle of soil by explosive shock is not clear.

Key words: explosive enlargement; soil; physico-mechanical performance; field test

1 引 言

爆炸成腔是一种具有实用价值的工程爆破技术。它在雨水集蓄和农业节水灌溉^[1-3]、爆扩成型桩基、营造地下仓储空间、快速建造军事工事、工业废弃物及核废料处理、地下核试验的模拟研究等方面具有广阔的应用前景。

岩土中的爆炸成腔具体地可以分为土壤中的爆炸成腔与岩石中的爆炸成腔。土壤中与岩石中的爆炸成腔技术具有很多相同之处, 但在作用机理、施

工方法及应用目的方面存在着一些不同的特点。在岩石中, 主要依靠炸药能量粉碎岩石, 形成腔体。在土壤中, 则依靠炸药能量压缩土壤, 形成腔体。如需在岩石中多次爆扩形成腔体, 一般需要预留通道(炮孔)将岩粉排出腔体。在土中爆炸形成腔体则要求将装药通道堵塞, 以充分地利用炸药能量。工程上, 在岩石中爆炸形成腔体的主要目的是在更大范围破碎岩石, 而在土中爆炸形成腔体的目的主要是利用爆炸形成的空间。

目前, 土中爆炸成腔的研究多集中于数值模拟

收稿日期: 2010-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10672091)。

第一作者简介: 王海亮, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事爆炸与安全技术、地下工程方面的研究工作。E-mail: TLGCBP@263.net

和理论计算^[4-6]，但大部分的研究成果缺乏实测数据的支持。本文通过现场试验，系统研究了爆炸成腔后土体物理力学性能指标的变化规律，对相关的数值模拟和理论研究具有参考价值。

2 土中爆炸成腔试验

土中爆炸成腔试验主要包括试验场地选择、打孔、装药、填塞、起爆、开挖、土样提取和实验室土工实验等步骤^[7-8]。

现场试验选择在未扰动过的黏土和粉质黏土地。炸药埋深不超过土层厚度的 50%。本文试验共涉及 6 块土质不同的场地。打孔的目的是为下放炸药提供通道。试验采用的炮眼直径为 12 cm，深度在 1.20~12.5 m。试验使用 2 号岩石铵梯炸药，2 发瞬发工业电雷管并联起爆。药包长度与其横截面直径的比值小于 3.125^[9]，可视为集中药包。药包与孔壁之间的空隙、装药后剩余的炮孔均用成孔时挖出的土壤填塞。爆炸成腔的装药量在 0.05~51 kg。爆炸形成的腔体在起爆后 24 h 内完成开挖和土样提取工作。开挖槽的宽度不小于

0.8 m，开挖深度高出计划提取土样水平 0.2~0.3 m。靠近腔体部分预留 0.4 m 保护层，在提取土样的时候再开挖。在爆炸形成腔体的最大直径所在水平剖面上提取土样。依照距爆炸中心的距离，划分土样提取点。在同一取样点提取多个土样时，提取的土样应布置在距腔体中心距离相同的圆周上。将距爆炸中心最远的土样布置在基本未受扰动的原状土体中。为减小环境因素对土样性能的影响，土样所在位置上方 0.2~0.3 m 范围内的土层在提取土样前保持原状，采用边开挖边提取的方式谨慎提取土样。提取的土样应该在 24 h 内完成土工实验。

3 爆炸成腔的实测数据

共进行了 21 次爆炸成腔试验。对起爆药量在 0.3~1.2 kg 的 5 个腔体最大水平剖面上的土样进行了土工试验分析。试验场地的土壤类型及性能参数的实测数据如表 1 所示。爆炸成腔的实测数据如表 2 所示。

表 1 试验场地土壤类型及性能参数

Table 1 Soil types of test sites and each performance parameters

钻孔编号	土壤类型	含水率/%	天然密度/(g/cm ³)	干密度/(g/cm ³)	孔隙比/%	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa
1C~6C	褐黄色黏土	21.13~29.00		1.56~1.07	0.63~0.79	0.08~0.23	7.80~21.20
16C	粉质黏土	14.50	1.60		0.71	0.21	9.50
17C~19C	粉土	12.99~21.85	1.62~1.67	1.37~1.45	0.86~0.97	0.33~0.67	2.67~5.79
23C~24C	粉质黏土	20.10~21.20	1.75~1.86	1.46~1.51	0.79~0.87	0.28~0.60	1.97~6.28
29C, 40C~41C	黏土	11.69~13.78	1.48~1.73	1.32~1.53	0.77~1.04	0.50~0.95	1.96~3.35
35C~38C, 43C~44C	粉质黏土	17.19~19.51	1.68~1.79	1.41~1.53	0.77~0.93	0.32~1.13	1.52~5.30

表 2 爆炸成腔的实测数据

Table 2 The measured data of explosive formed cavities

钻孔编号	孔深 L/m	爆扩药量 Q _c /kg	腔体直径 D _c /cm
1C	8.50	19.95	206
2C	12.50	36.00	250
3C	12.00	49.80	400
4C	12.00	51.00	280
5C	12.00	50.10	320
6C	11.30	44.55	345
16C	1.20	0.05	28
17C	2.25	0.30	50
18C	2.20	0.30	62
19C	2.25	0.30	58
23C	2.24	0.30	53
24C	2.10	0.45	67
29C	1.80	0.60	75
35C	3.00	1.20	95
36C	3.00	1.20	83
37C	3.00	1.20	83
38C	3.10	1.20	95
40C	1.75	1.65	100
41C	1.78	0.60	65
43C	2.95	2.70	120
44C	2.85	3.60	155

对大量爆后腔体的开挖观察发现，爆后腔体周围土体的物理性质，一方面与土体自身的物理性质有关；另一方面还与起爆药量有很大关系。

当一次起爆药量在 18.9~51 kg 时^[10]，靠近腔体的土体呈烘干状态。腔体内壁壁面土体光滑、致密、坚硬，形成一个具有承载和自稳能力的土质砌体。砌体局部有可见裂隙，裂隙宽度约 5~10 mm，不很发育。这种砌体在无水浸泡的状态下，可以长期稳定承载而不垮塌。

当一次起爆药量在 0.225~3.6 kg 时，靠近腔体的土体中存在明显的气楔作用痕迹，龟裂裂隙发育，土体被压缩挤密，但未见被烘干的现象。土体性质不同，裂隙的宽度也有所不同。粉质黏土中形成的腔壁光滑，裂纹较小，且周围的土体黏结好，无掉落现象。图 1 是在粉质黏土中爆炸形成的腔体壁面的垂直开挖剖面。但粉土中形成

的腔体壁面比较粗糙, 裂隙宽度明显大于粉质黏土, 开挖后腔体顶部土体有掉落现象。



图1 在粉质黏土中爆炸形成的腔体壁面

Fig.1 The cavity wall formed by explosive in silty clay

4 爆后土体天然密度的变化规律

图2是爆后腔体最大水平剖面上土体实测天然密度 ρ 与土样距腔壁距离 L 之间的关系。

从图2可以看出, 土体的天然密度 ρ 随土样距药包中心距离的增大而减小。以29C、35C腔体为例, 土层的原状土天然密度分别为 1.73 g/cm^3 和 1.79 g/cm^3 。爆炸成腔后土体的最大天然密度分别为 2.02 g/cm^3 和 1.99 g/cm^3 , 都出现在距腔壁 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 范围内, 天然密度分别提高16.8%和11.2%, 可见爆炸作用对土体的挤密效果还是很明显的。

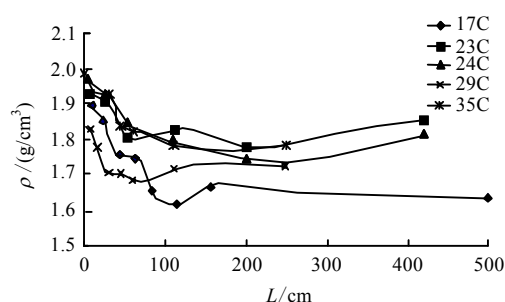


图2 爆炸成腔后土体天然密度 ρ 与水平距离 L 之间的关系

Fig.1 Relationships between natural density ρ and horizontal distance L of surrounding soil of explosively formed cavities

实验数据表明, 在距腔壁 $110 \sim 150 \text{ cm}$ 之外土体的天然密度已趋于稳定。说明当起爆药量在 $0.3 \sim 1.2 \text{ kg}$ 时, 爆炸作用对土体的影响范围在 $R/r=4 \sim 6$ 的范围内。其中, R 为土样距爆炸中心的距离, r 为爆炸成腔的半径。因此, 本文把距腔

壁 150 cm 之外的土体视为原状土体, 做为对比分析的依据。

国内的一些学者在数值模拟研究的基础上认为, 腔壁附近存在一个低密度区^[4-6]。本文的土工试验结果表明, 对于爆炸成腔, 腔壁附近土体的密度均明显大于原状土体的初始密度。未发现密度低于原状土的所谓低密度区。

试验数据表明, 对于爆炸成腔试验, 土体干密度与水平距离的关系与天然密度具有相同的变化规律。未在腔壁附近发现实测干密度低于原状土干密度的低密度区。

5 爆后土体孔隙比的变化规律

图3是爆后腔体最大水平剖面上土体实测孔隙比 e 与土样距腔壁距离 L 之间的关系。

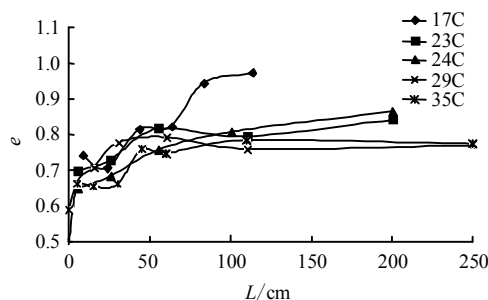


图3 爆后腔体周围土体孔隙比 e 与水平距离 L 之间的关系

Fig.3 Relationships between pore-solids ratio e and horizontal distance L of surrounding soil of explosively formed cavities

从图3可以看出, 对于爆炸成腔试验, 土体的孔隙比 e 随土样距药包中心距离的增大而增大。孔隙比在距腔壁 $110 \sim 150 \text{ cm}$ 左右趋于稳定, 接近土体的天然孔隙比。以23C、24C腔体为例, 二者腔体周围土体距腔壁 200 cm 处土样比距腔壁 5 cm 处土样的孔隙比分别大20.40%和33.44%。这说明越靠近爆炸中心土壤越密实, 也就是说越接近爆炸中心爆炸作用对土体的挤密效果越明显。

数理统计结果表明, 孔隙比与距腔壁的距离成正比, 二者呈幂指数关系。

6 爆后土体饱和度的变化规律

饱和度 S_r 是土中水的体积 V_w 与孔隙体积 V_v 之比, 其计算公式为

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{WG_s}{e} \quad (1)$$

式中: W 为含水率; G_s 为土粒相对密度; e 为孔隙比。

图 4 是爆后腔体最大水平剖面上土体实测饱和度和 S_r 与土样距腔壁距离 L 之间的关系。

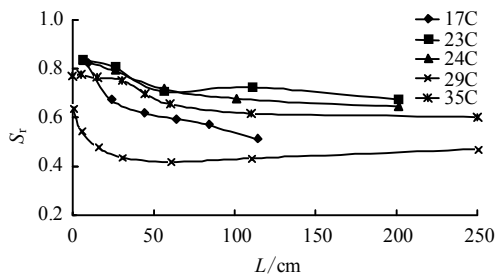


图 4 爆后腔体周围土体实测饱和度 S_r 与水平距离 L 之间的关系

Fig.4 Relationships between measured saturation S_r and horizontal distance L of surrounding soil of explosively formed cavities

由图可以看出, 对于爆炸成腔, 腔体周围土体的饱和度随着土样距爆炸中心距离的增大, 有一个明显的下降趋势, 在 $R/r=4\sim6$ 时趋于原状土体的饱和度。以 23C、24C 腔体为例, 距腔体 5 cm 处土样比距腔体 200 cm 处土样的饱和度分别大 24.40% 和 29.5%。饱和度在距腔壁 110~150 cm 或 $R/r=4\sim6$ 时左右趋于稳定, 接近原状土体的饱和度。

相同土层的土壤, 土粒相对密度 G_s 为定值, 所以由 (1) 式可以看出, 饱和度 S_r 与含水率 W 成正比关系, 与孔隙比 e 成反比关系。试验研究表明^[7], 爆炸作用对腔体周围土体含水率的影响规律是比较复杂的, 但图 4 并没有体现出含水率的变化规律对饱和度的影响特征, 仅仅反映出饱和度与孔隙比 e 成反比这样一种关系。这说明, 炸药爆炸作用对土体孔隙比数值的影响远大于对土体含水率数值的影响。换句话说, 炸药的爆炸作用对土体密实程度的影响是非常直观的, 但对土体含水率的影响则不是特别的明显。这与现场试验观察到的现象是吻合的。

7 爆后土体压缩系数的变化规律

图 5 是爆后腔体最大水平剖面上土体实测压缩系数 a_v 与土样距腔壁距离 L 之间的关系。

从图 5 可以看到, 爆后腔体周围土壤的压缩系数 a_v 随距腔壁的距离 L 之间的变化规律存在着一个逐渐增大的趋势, 这表明爆炸挤密作用越靠近腔体效果越好, 逐渐达到土体未扰动状态。

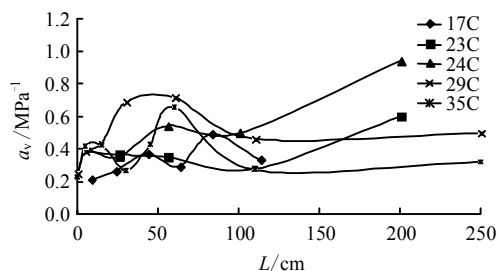


图 5 爆后腔体周围土体压缩系数 a_v 与水平距离 L 之间的关系

Fig.5 Relationships between compressibility a_v and horizontal distance L of surrounding soil of explosively formed cavities

8 爆后土体压缩模量的变化规律

图 6 是爆后腔体最大水平剖面上土体实测压缩模量 E_s 与土样距腔壁距离 L 之间的关系。

由图可以看出, 土体压缩模量的变化趋势正好与压缩系数的变化趋势相反, 这与它们之间的相互关系是一致的。从图 6 反映出来的关系曲线来看, 随距离爆炸中心距离的增大, 压缩模量呈减小趋势, 并在 $R/r=4\sim6$ 时 ($L=110\sim150$ cm) 趋于原状土体的压缩模量, 土体状态逐渐趋于原状土体。

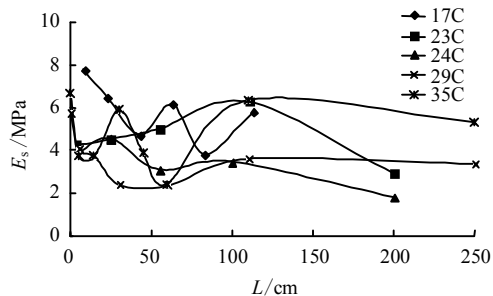


图 6 爆后腔体周围土体压缩模量 E_s 与水平距离 L 之间的关系

Fig.6 Relationships between compression modulus E_s and horizontal distance L of surrounding soil of explosively formed cavities

9 爆后土体抗剪强度指标的变化规律

9.1 爆后土体内摩擦角的变化规律

图 7 是爆后腔体最大水平剖面上土体实测内摩擦角 φ 与土样距腔壁距离 L 之间的关系。

从图 7 可以看出, 腔体周围土壤的内摩擦角 φ 随距离 L 的变化规律不明显, 也就是说爆炸作用对土体内摩擦角的影响不大或没有影响。内摩擦角 φ 的来源主要有接触颗粒间的滑动、体积变化的阻力 (膨胀)、颗粒的重新排列和颗粒破裂等, 而这几个因素所起的作用大小取决于粒径大小、

颗粒形状、孔隙比、饱和度、周围应力状态和含水率的多少。正因为影响土壤内摩擦角的因素很多,各因素之间产生的作用也就很复杂,例如挤密作用增加了土颗粒之间的咬合力,使内摩擦角增大;但孔隙比减小,含水率变化不大,则饱和度增加明显,土颗粒之间润滑作用就提高了,又减小了土体的内摩擦角。这些相互制约作用,对内摩擦角的影响也就不明显了。

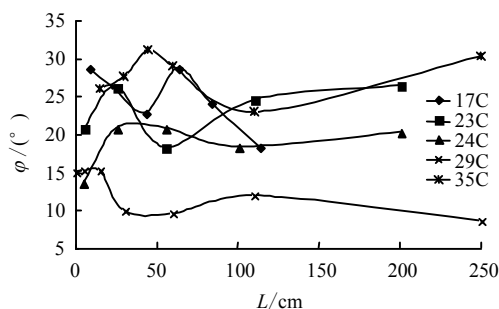


图7 爆后腔体周围土体摩擦角 φ 与水平距离 L 之间的关系

Fig.7 Relationships between friction angle φ and horizontal distance L of surrounding soil of explosively formed cavities

对试验数据进行处理发现,如果将试验数据强行拟合,相关性很差,23C、24C腔体试验数据拟合后的相关系数分别为0.25和0.17,远低于85%,也说明爆炸冲击作用对土体内摩擦角的影响不明显。这也与已有的研究结论一致^[11]。

9.2 爆后土体黏聚力的变化规律

同内摩擦角一样,影响土体黏聚力的因素也很多,但爆炸冲击作用对黏聚力的影响却是明显的。

图8是爆后腔体最大水平剖面上土体实测黏聚力 c 与土样距腔壁距离 L 之间的关系。

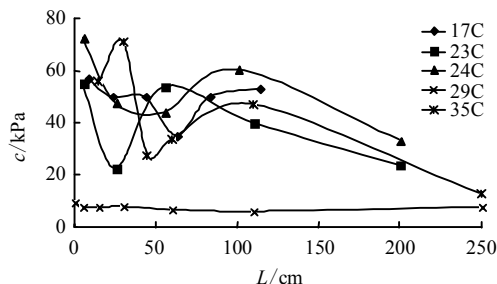


图8 爆后腔体周围土体黏聚力 c 与水平距离 L 之间的关系

Fig.8 Relationships between cohesive strength c and horizontal distance L of surrounding soil of explosively formed cavities

如图8所示,虽然数据波动较大,但仍可看出腔体周围土体的黏聚力 c 随着距爆炸中心距离的增

大有一个总体下降的趋势。爆炸作用影响半径范围内的黏聚力平均值较影响范围以外土体的黏聚力大,爆炸作用影响半径为110~150 cm, $L/r=3\sim5$ 。以23C、24C腔体为例,爆炸作用影响半径以黏聚力的平均值分别为42.9、56.3 kPa;爆炸作用影响半径以外黏聚力的平均值分别为26.2、32.7 kPa。爆炸作用影响半径以内土体的黏聚力分别比爆炸作用影响半径以外黏聚力提高63.74%和72.17%。这也说明腔体周围土体,越接近腔壁挤密效果也也就越好。

10 结论与讨论

(1) 爆后腔体附近土体的密实度较初始状态有所提高。土体的天然密度、干密度、饱和度、压缩模量和黏聚力等性能指标随土体距爆炸中心距离的增大而降低,并逐渐接近原状土体的性能指标。土体的孔隙比、压缩系数和渗透系数等性能指标随土体距爆炸中心距离的增大而提高,并逐渐接近原状土体的性能指标。

(2) 当起爆药量在0.3~1.2 kg时,爆炸冲击作用对土体内摩擦角的影响规律不明显。

(3) 对于2号岩石铵梯炸药,当起爆药量在0.3~1.2 kg时,爆炸作用对土体的影响半径是爆炸成腔半径的4~6倍,在距腔壁110~150 cm的范围内。

从试验结果来看,爆后腔体附近土体的密度明显大于土体的初始密度,未在腔体附近发现密度低于原状土的低密度区。爆炸作用对土体含水率 W 、天然密度 ρ 、孔隙比 e 和饱和度 S_r 等物理性能指标的影响规律明显,试验数据的离散性小;而爆炸作用对土体压缩系数 a_v 、压缩模量 E_s 、渗透系数 k 、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 等力学性能指标的影响规律相对而言不很明显,试验数据的离散性较大。出现这一现象,与这些试验指标所反映的物理或力学性能本身的复杂程度有很大关系。土体的物理性能指标含义明确、单一,试验测试方法简单、试验过程的控制因素少;所以试验数据的离散性小,反映出的规律性比较明显。相反,土体的力学性能指标含义较为复杂、影响因素较多,试验测试方法相对复杂、试验过程的控制因素较多,必然导致试验数据的离散性较大,反映出的规律性相对差一些。

参考文献

- [1] 党进谦,李靖,严宝文,等. 爆破成腔增强黄土高原土壤蓄水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2001, (6): 161-164.

- DANG Jin-qian, LI Jing, YAN Bao-wen, et al. Improving soil moisture-holding capacity using cavity-making by explosion in the loess plateau[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2001, (6): 161—164.
- [2] 严宝文, 李靖, 包忠谟, 等. 农田爆破成腔技术要素与作物产量关系的正交试验研究[J]. **农业工程学报**, 2000, (5): 41—43.
- YAN Bao-wen, LI Jing, BAO Zhong-mo, et al. Orthogonal experiment on relationship between wheat yields and technical factors of cavity-making by explosion in farm land[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2000, (5): 41—43.
- [3] 党进谦, 严宝文, 李靖, 等. 爆破成腔技术在旱作农业中的应用[J]. **水利学报**, 2002, (10): 103—104.
- DANG Jin-qian, YAN Bao-wen, LI Jing, et al. Application of cavity-making by explosion in arid-agriculture[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (10): 103—104.
- [4] 许连坡, 章培德. 土中爆炸初始阶段的空腔和压层[C]//土岩爆破文集(第二辑). 北京: 冶金工业出版社, 1985: 1—16.
- [5] 顾文彬, 叶序双, 詹发民, 等. 球形装药半无限体土介质中爆炸动力学分析[J]. **工程爆破**, 1999, 5(1): 5—10.
- GU Wen-bin, YE Xu-shuang, ZHAN Fa-min, et al. Dynamic analysis on spherical charges exploding in semi-infinite soil medium[J]. **Engineering Blasting**, 1999, 5(1): 5—10.
- [6] 王仲琦, 张奇, 白春华. 爆炸挤压粘土密度变化过程的数值模拟[J]. **岩土工程学报**, 2001, 23(3): 350—353.
- WANG Zhong-qi, ZHANG Qi, BAI Chun-hua. Numerical simulation on variation of density of the soil compacted by explosion[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(3): 350—353.
- [7] 王海亮, 马敏, 叶朝良, 等. 爆炸成腔与爆炸衬砌对土体含水率的影响[J]. **岩土工程学报**, 2008, 30(3): 425—428.
- WANG Hai-liang, MA Min, YE Chao-liang, et al. Influence of explosive enlargement and explosive lining on moisture content of soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(3): 425—428.
- [8] WANG Hai-liang, SU Hui-feng, MA Min, et al. Influence of explosive lining on soil physical performance[J]. **Theory and Practice of Energetic Materials**, 2007: 495—498.
- [9] 王海亮. 工程爆破[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [10] 王海亮, 冯长根, 王丽琼. 土中爆炸成腔的现场试验[J]. **火炸药学报**, 2001, 24(2): 12—15.
- WANG Hai-liang, FENG Chang-gen, WANG Li-qiong. Study on on-site experiment of explosion cavity in soil[J]. **Chinese Journal of Explosives and Propellants**, 2001, 24(2): 12—15.
- [11] 叶朝良, 岳祖润, 舒玉. 原状残积粉质黏土的饱和度与抗剪强度关系的研究初探[J]. **路基工程**, 2002, (1): 1—3.
- YE Chao-liang, YUE Zu-run, SHU Yu. Research into relation between degree of saturation and shear strength for undisturbed residual silty clay[J]. **Subgrade Engineering**, 2002, (1): 1—3.

上接第 2576 页

- [13] 周维恒, 杨若琼, 判公瑞. 二滩拱坝坝基弱化岩体灌浆加固效果研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 1993, (6): 138—150.
- ZHOU Wei-heng, YANG Ruo-qiong, PAN Gong-rui. Study on effects of grouting in weak dam foundation in Ertan arch dam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1993, (6): 138—150.
- [14] 许宏发, 金丰年. 岩体节理剪切变形的幂函数模型[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, (5): 314—317.
- XU Hong-fa, JIN Feng-nian. The function model of shear deformation for rock joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, (5): 314—317.
- [15] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 1983, 20(6): 249—268.
- [16] 周瑞光, 陈诗才, 孙光忠. 锯齿状结构面力学效应试验研究[J]. **地质科学**, 1979, (4): 157—166.
- ZHOU Rui-guang, CHEN Shi-cai, SUN Guang-zhong. Experimental study on mechanical effect of sawtoothed structural plane[J]. **Geological Sciences**, 1979, (4): 157—166.