

文章编号:1673-9469(2026)01-0001-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.001

冲击荷载作用下双层包裹式加筋土防护屏障力学特性研究

王贺,王岩,尹宝银,张羽,宋帅

(石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043)

摘要: 针对传统包裹式加筋土防护屏障在爆炸冲击荷载作用下存在沿筋土作用面滑移的风险,提出了双层包裹式加筋土防护屏障,研究了爆炸冲击荷载作用下加筋土防护屏障力学特性。利用有限元软件对双层包裹式加筋土防护屏障抵抗爆炸冲击荷载的情况进行数值模拟,并对不同大小爆炸冲击荷载作用下,不同加筋形式的防护屏障进行了土压力和变形演化规律对比分析。结果表明:双层包裹式加筋土防护屏障比传统包裹式加筋土防护屏障具有更强的荷载缓冲效果,双层包裹式加筋土防护屏障相较于传统包裹式加筋土防护屏障迎爆面、背爆面的最大水平土压力分别减小12.2%、7.5%,防护屏障迎爆面与背爆面水平土压力沿墙高先增加后减小,在与爆源同等高度处土压力最大;双层包裹式加筋土防护屏障相较于传统包裹式加筋土防护屏障迎爆面、背爆面的最大水平位移分别减小6.4%、0.8%,在爆炸冲击荷载作用下,加筋土防护屏障迎爆面与背爆面水平位移沿墙高先增加后减小,最大位移发生在与爆源同等高度位置处,背爆面受到扰动较小;随着土工格栅竖向间距的增加,防护屏障的水平位移也逐渐增大。

关键词: 防护屏障;加筋土;爆炸冲击荷载;数值模拟;力学特性

中图分类号:TU476.4

文献标识码:A

Mechanical Characterization of Double-Wrapped Reinforced Soil Protective Barrier Under Impact Loads

WANG He, WANG Yan, YIN Baoyin, ZHANG Yu, SONG Shuai

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Aiming at the risk of slippage along the reinforced soil action surface under blast impact loading of traditional wrapped reinforced soil protective barriers, a double-wrapped reinforced soil protective barrier is proposed. The mechanical properties of the reinforced soil protective barriers under blast impact loading were investigated. Numerical simulations were conducted for double-wrapped reinforced soil protective barriers against blast impact loads using finite element software. Moreover, under the action of different magnitudes of blast impact loads, comparative analyses were performed on the earth pressure and deformation evolution laws of protective barriers with different reinforcement forms. The results show that double-wrapped reinforced soil protective barriers provide greater load cushioning than traditional wrapped reinforced soil protective barriers. Compared with traditional wrapped reinforced soil protective barriers, the maximum horizontal earth pressure on the blast-facing surface and back-blast surface of double-wrapped reinforced soil protective barriers is reduced by 12.2% and 7.5%, respectively. For both the blast-facing and back-blast surfaces of the protective barrier, the horizontal earth pressure first increases and then decreases along the wall height, reaching the maximum at the same height as the explosion source. Compared with traditional wrapped reinforced soil protective barriers, the maximum horizontal displacement of the blast-facing surface and back-blast surface of double-wrapped reinforced soil protective barriers is reduced by 6.4% and 0.8%, respectively. Under

收稿日期:2024-01-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0104600);国家自然科学基金资助项目(52079078)

第一作者:王贺(1987—),男,河北石家庄人,博士,副教授,从事加筋土结构稳定性与变形控制方面的研究。

blast impact loading, the horizontal displacement of the blast-facing and back-blast surfaces of reinforced soil protective barriers first increases and then decreases along the wall height, with the maximum displacement occurring at the same height as the explosion source, and the back-blast surface is less disturbed. As the vertical spacing of geogrids increases, the horizontal displacement of the protective barrier gradually increases.

Key words: protective barrier; reinforced soil; blast load; numerical simulation; mechanical property

为减小存放爆炸物品的生产车间及存储库房发生爆炸时对周围设施和人员造成损害,可在厂房周围一定范围内构筑防护屏障。防护屏障可采用防护土堤、钢筋混凝土挡墙等形式,对冲击波具有较强的消减作用。

防护屏障的抗倾覆性和稳定性在国外的研究中已经取得了一定的进展^[1], Scherbatiuk 等^[2-4]研究发现不同材质的防爆墙体会对爆炸冲击波产生不一样的阻挡效果,爆炸冲击波通过混凝土墙体时会产生明显的环流现象,对墙后流场分布有较大的影响。董二奎等^[5]通过 LS-DYNA 模拟了凝聚炸药的爆炸及其产生空气冲击波的传播过程,重点分析了不同坡度的防护堤对空气冲击波的防护能力。阎石等^[6]对爆炸荷载下钢筋混凝土板破坏模式进行分析发现,随着峰值压力的增加和作用时间的减少,钢筋混凝土板破坏模式逐渐由弯曲破坏转变为剪切破坏。

加筋土结构具有施工简便快捷、抗震性能好、地基适应性强、稳定性强、投资少等优点,其柔性结构在吸收爆炸能量、降低次生破坏方面有较大的优势。周亦涛等^[7]通过对某土工格栅加筋土防护陡堤力学行为进行现场试验研究,研究表明土工格栅加筋土防护土堤是可行的。王贺^[8]对基于返包式土工格栅加筋土挡墙在循环荷载作用下的挡墙沉降变形作用机制进行了研究,得出土中动力加速度受动载频率影响较大,面板水平位移沿高度方向呈 S 形分布。牛笑笛等^[9]对模块式面板包裹式加筋土挡墙进行了 9 个月的监测分析,发现侧向土压力系数沿墙高从下到上呈增大的趋势,挡墙中下部侧向土压力系数小于美国联邦公路局加筋土结构设计指南计算值,上部大于等于静止土压力系数。肖娴等^[10]运用有限元方法,对包裹式加筋土挡墙动力特性进行了仿真模拟,探讨了地震荷载作用下筋带与迎爆面板的应力与变形规律。宋海波等^[11]分析了加筋土防护屏障的设计方法,总结出加筋土防护屏障具有节省占地、提高防护强度等优点。

目前对于爆炸防护结构的研究多集中于防爆

墙,如钢筋混凝土防爆墙等,对加筋土防护屏障的研究很少,并且很少考虑爆炸冲击荷载作用对其的影响。鉴于此,本文基于已有的传统防护屏障,设计了一种具有冲击缓冲层的双层包裹式土工格栅加筋土防护屏障,其有效缓冲了因爆炸冲击波引起的墙面变形,同时兼有节省占地、施工工艺简单等优点。本文通过加筋土防护屏障模型试验及加筋土防护屏障数值模型,开展了不同加筋形式的防护屏障在爆炸冲击荷载作用下土压力和变形演化规律的对比分析,为加筋土防护屏障的研究提供理论依据。

1 试验方案

1.1 结构型式

目前常见的传统包裹式加筋土防护屏障如图 1(a)所示,相邻两层土工格栅之间没有紧密连接,在承受侧向冲击力时容易导致沿土工格栅与土体接触界面产生水平滑移。基于此,对包裹式加筋土防护屏障土工格栅布置方式进行改进,设计出双层包裹式加筋土防护屏障,如图 1(b)所示。

双层包裹式加筋土防护屏障土工格栅布置形式如图 2 所示,具体铺设步骤如下:

步骤 1:第一层土工格栅平铺在基底上,作为底层平铺段,并在两端预留返包长度;

步骤 2:将土工袋放置在底层平铺段上靠近两端的位置,将第一层土工格栅的端部包裹土工袋,形成环形包裹段,完成底层土工格栅的铺设;

步骤 3:在底层平铺段上摊铺一层填料并压实,得到下层填充层;

步骤 4:将第二层土工格栅平铺在下层填充层表面的部分作为内层平铺段,并在两端预留返包长度;

步骤 5:在内层平铺段上摊铺一层填料并压实,得到上层填充层;

步骤 6:按步骤 1 和步骤 2 的方式完成第三层土工格栅铺设,然后将第二层土工格栅预留的返包段端部横肋剪断,得到分离的纵肋,将此分离的纵肋穿过第三层土工格栅网格孔;

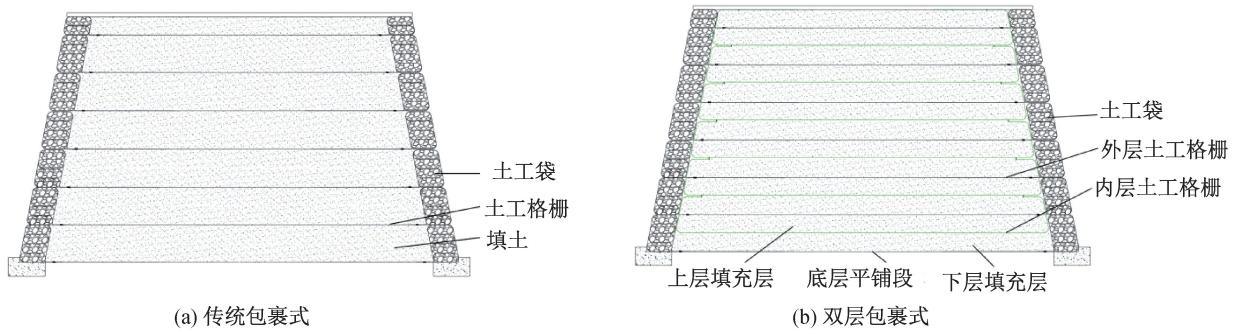


图 1 传统包裹式和双层包裹式加筋土防护屏障横截面图

Fig. 1 Cross-sections of conventional and double-wrapped reinforced soil barriers

步骤 7:摊铺并压实第三层土工格栅上土料填充层;

步骤 8:将穿过第三层土工格栅的第二层土工格栅预留返包段向内弯折平铺并固定在土料填充层上;

步骤 9:重复步骤 4 至步骤 8 直至到顶,完成双层包裹式加筋土防护屏障的填筑。

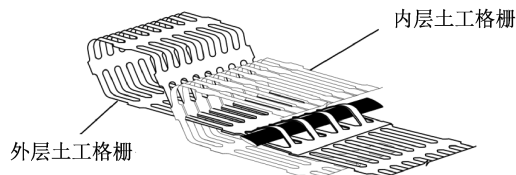


图 2 土工格栅布置形式

Fig. 2 Geogrid arrangement form

防护屏障模型面板结构为土工格栅加筋返包式。根据实验装置的尺寸,通过对不同模型的比例尺方案进行讨论分析,应用方程分析法与量纲分析法推导出土工格栅加筋土防护屏障模型试验的相似关系,如几何相似比 $C_1 = 6$, 填料容重相似比 $C_\gamma = 1$, 黏聚力相似比 $C_c = 1$, 摩擦角相似比 $C_\varphi = 1$,

土工格栅拉伸模量相似比 $C_E = 3$ 。

1.2 材料参数

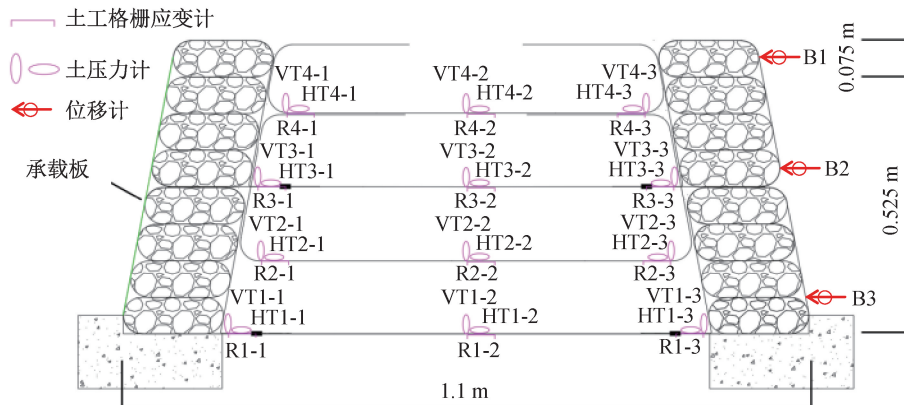
试验所用填料为碎石土,其最大干密度为 1.9 g/cm^3 ,最佳含水量为 8.7% ,不均匀系数为 60 ,曲率系数为 0.13 ;加筋材料选用高密度聚乙烯单向拉伸塑料土工格栅,其厚度为 1 mm ,拉伸模量为 425 kN/m ,抗拉强度为 47.4 kN/m , 2% 和 5% 应变时拉伸强度分别为 8.5 kN/m 和 17.3 kN/m 。

1.3 监测仪器布置

模型箱长 1.8 m 、宽 0.8 m 、高 1.4 m 。设计加筋土防护屏障模型长 1.1 m 、宽 0.8 m 、高 0.6 m ;土工格栅竖向间距 0.3 m ,采用传统双坡面包裹式结构和双层双坡面包裹式结构,返包部分长 0.2 m ;承载部件为方形钢板,钢板尺寸为长 0.6 m 、宽 0.4 m 。监测传感器包括土压力盒、应变片、百分表(图 3)。

1.4 加载方案

本试验采用重物撞击承载板来模拟侧向冲击荷载,依照空气冲击波峰值压力经验公式^[12]确定



注:仪器编号中,HT为水平放置的土压力计(测量竖向土压力),VT为竖直放置的土压力计(测量水平土压力),B为位移计,R为土工格栅应变计。

图 3 加筋土防护屏障尺寸及监测仪器布置

Fig. 3 Reinforced soil barrier dimensions and monitoring instrumentation layout

实际荷载大小:

$$P = \frac{0.084}{Z} + \frac{0.27}{Z^2} + \frac{0.67}{Z^3} \quad (1)$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2)$$

式中: P —冲击波峰值压力,MPa; Z —比例爆炸距离, m/kg^3 ; R —爆源距离迎爆面的距离,m; W —三硝基甲苯炸药(Trinitrotoluene,TNT)质量,kg。

按照比例缩尺之后得到的荷载大小为 2.38 kN,重物质量为 50 kg,重物下落高度为 0.3 m。加载过程中采用动态采集仪对数据进行采集。

2 试验结果分析

图 4 为侧向冲击荷载作用下传统包裹式和双层包裹式防护屏障各层水平土压力随时间的变化情况。

从图 4 中可以看出,受冲击荷载影响,两种防护屏障各层水平土压力随时间呈增大—减小—稳定的趋势,在加载位置处形成最大值。传统包裹

式加筋土防护屏障迎爆面最大水平土压力为 11.33 kPa,背爆面最大水平土压力为 2.15 kPa,为迎爆面的 18.9%;双层包裹式加筋土防护屏障迎爆面最大水平土压力为 10.71 kPa,背爆面最大水平土压力为 1.49 kPa,为迎爆面的 13.9%,可见其削弱冲击荷载效果更为明显。

3 数值模拟方案

3.1 计算模型及材料参数

采用非线性有限元软件 ABAQUS 来模拟土工格栅加筋土防护屏障,根据《烟花爆竹工程设计安全标准》(GB 50161—2022)^[13]、《民用爆炸物品工程设计安全标准》(GB 50089—2018)^[14]建立加筋土防护屏障模型,取填土厚 4 m,地基土厚 8 m,防护屏障底宽 6 m,顶宽 4.4 m,土工格栅满铺,土工格栅竖向间距为 0.3 m,墙面坡率为 1:0.2,计算模型如图 5 所示。土体采用莫尔-库伦模型,其相关参数取值如表 1 所示,土工格栅采用线弹性模型,其拉伸模量为 425 kN/m,泊松比为 0.2。土工

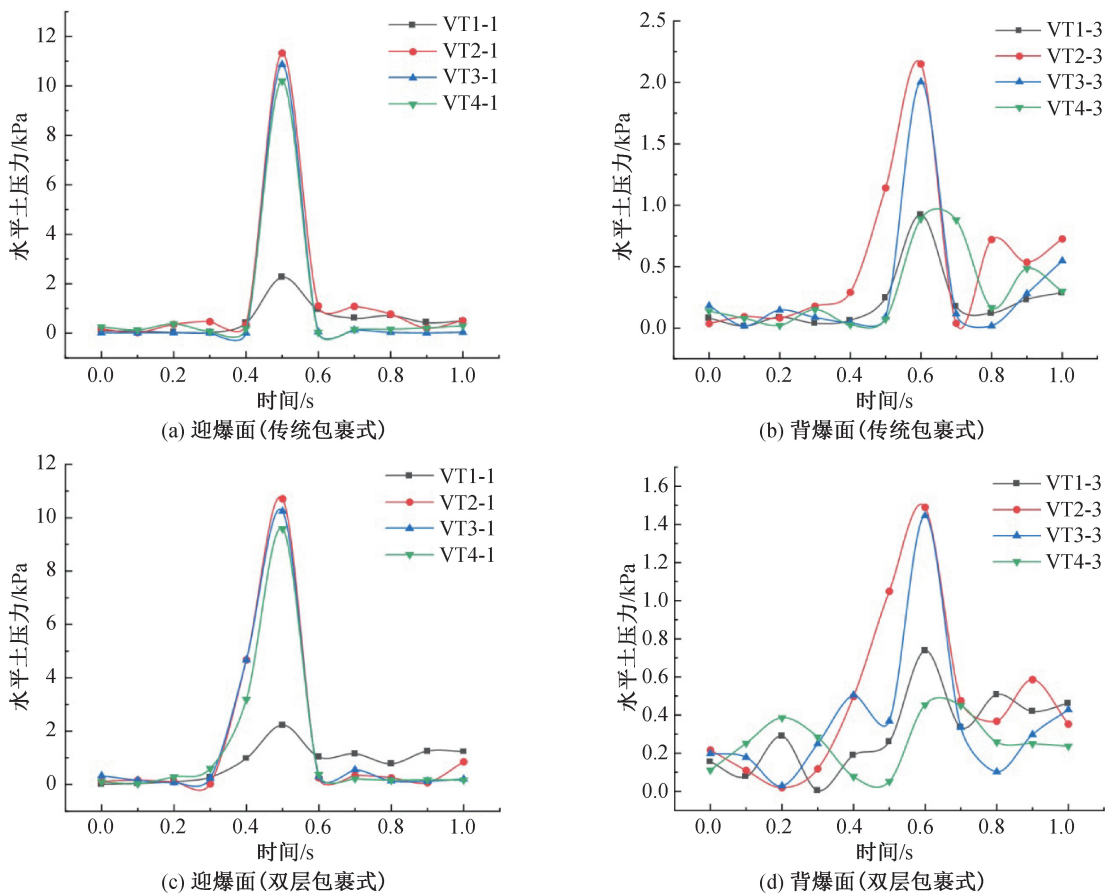


图 4 传统包裹式与双层包裹式加筋土防护屏障水平土压力随时间的变化

Fig. 4 Horizontal stresses over time for conventional wrapped reinforced soil protective barrier and double-wrapped reinforced soil protective barrier

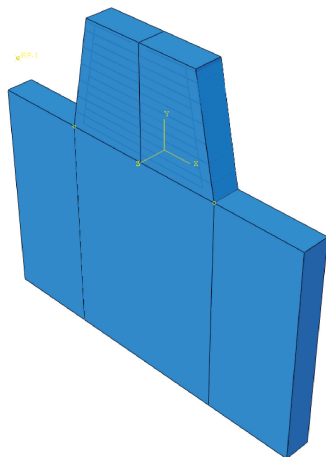


图 5 加筋土防护屏障数值模型
Fig. 5 Numerical model of reinforced soil protective barriers

表 1 土体物理力学参数

Tab. 1 Soil physical and mechanical parameters

材料	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	黏聚 力/kPa	泊松比	内摩擦 角/ $(^\circ)$
填土	19.0	30	10.3	0.30	31
地基土	20.0	35	20.0	0.32	35

格栅与土体之间的接触采用嵌入区域,将土工格栅作为嵌入体嵌入到填土中。

3.2 试验工况

为研究冲击荷载作用下包裹式加筋土防护屏障土压力和变形演化规律,分别从土工格栅布置形式、荷载大小、土工格栅竖向间距几个方面对加筋土防护屏障开展有限元分析,具体工况如表 2 所示。

表 2 试验工况表

Tab. 2 Test condition table

工况	防护屏障形式	土工格栅 竖向间距/m	TNT 当量/kg
1	传统包裹式	0.3	15
2	双层包裹式	0.3	5
3	双层包裹式	0.3	10
4	双层包裹式	0.3	15
5	双层包裹式	0.4	15
6	双层包裹式	0.6	15

3.3 模型验证

由双层包裹式加筋土防护屏障迎爆面水平位移沿墙高变化试验值与模拟值对比分析可知(图 6),两者的分布规律基本一致,验证了本构模型参

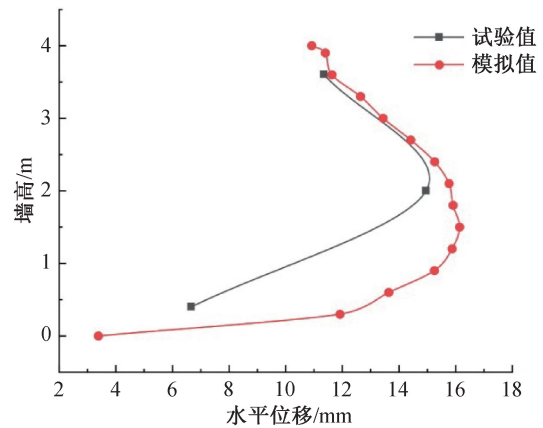


图 6 双层包裹式加筋土防护屏障迎爆面水平位移沿墙高变化对比

Fig. 6 Comparison of horizontal displacement along the wall height of the blast-facing surface of double-wrapped reinforced soil barriers

数选取的合理性。

4 数值模拟结果分析

4.1 包裹式加筋土防护屏障力学特性对比分析

4.1.1 水平土压力对比分析

图 7 为在工况 1、4 下,不同时刻加筋土防护屏障在爆炸冲击荷载作用下迎爆面和背爆面水平土压力的变化。由图 7 可以看出,水平土压力随时间呈增大—减小的变化趋势,迎爆面和背爆面水平土压力分别在 $t=0.04 \text{ s}$ 、 $t=0.06 \text{ s}$ 时刻达到最大,传统包裹式和双层包裹式加筋土防护屏障迎爆面最大水平土压力分别为 0.49、0.43 MPa,传统包裹式和双层包裹式加筋土防护屏障的背爆面最大水平土压力分别为 0.053、0.049 MPa,双层包裹式加筋土防护屏障相较于传统包裹式迎爆面、背爆面的最大水平土压力分别减小 12.2%、7.5%。

4.1.2 水平位移对比分析

图 8 为在工况 1、4 下,不同时刻加筋土防护屏障在爆炸冲击荷载作用下水平位移变化图,由图可知,随着时间推进,防护屏障水平位移也逐渐增大,迎爆面与背爆面水平位移沿墙高先增大后减小,在爆源同等高度附近产生最大位移,且背爆面位移很小。这是由于防护屏障底部固定,整体可视为悬臂梁,水平位移沿墙高增加,土工格栅采用返包形式,这种形式相当于对顶部施加了约束,造成顶部水平位移的减小。通过图 8 对比得到,传统包裹式和双层包裹式加筋土防护屏障迎爆面最大水平位移分别为 17.26、16.14 mm,分别占墙高的

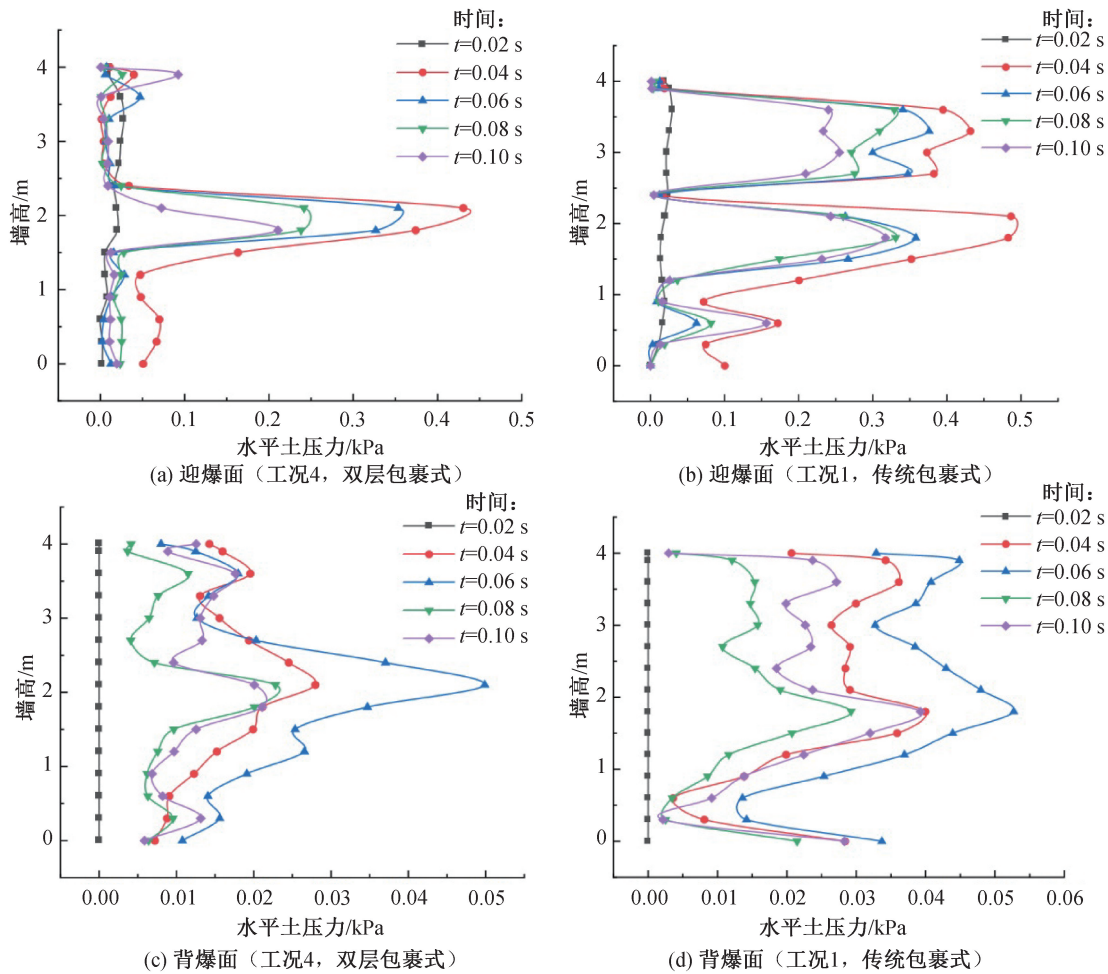


图7 加筋土防护屏障水平土压力沿墙高的分布

Fig. 7 Distribution of horizontal earth pressures along the wall height for reinforced soil protective barriers

0.43%、0.40%；背爆面最大水平位移分别为6.25、6.20 mm，分别占墙高的0.16%、0.15%。双层包裹式加筋土防护屏障相较于传统包裹式迎爆面、背爆面最大水平位移分别减小6.4%、0.8%。

双层包裹式加筋土防护屏障水平土压力和水平位移均减小，这是由于改变筋材铺设方式后得到的双层包裹式加筋土防护屏障相邻两层土工格栅之间相互连接，与填土区域成为一个整体，刚度增大，并且土工格栅抗拔承载力增加，在抵抗爆炸冲击荷载时，防护屏障变形减小。

4.2 不同炸药当量比较分析

对比工况2、3、4（TNT当量分别为5、10、15 kg），双层包裹式加筋土防护屏障迎爆面以及背爆面水平位移见图9。从图9可以看出，从变化趋势来看，随着药量增加，防护屏障所产生的位移也在增大；荷载不变时，迎爆面和背爆面水平位移沿墙高呈先增加后减小态势，但背爆面水平位移小于迎爆面。这是由于炸药量增大，冲击波到达迎爆面

的峰值就越大，在侧向冲击荷载作用下土工格栅和土体间的摩擦作用抵抗沿筋材和土体的接触面的水平滑移，对防护屏障破坏作用减小，有效缓冲因爆炸冲击波引起的腔体变形。

4.3 不同土工格栅竖向间距比较分析

图10为筋材竖向间距分别为30、40、60 cm的情况下，双层包裹式加筋土防护屏障水平位移沿墙高的变化情况。从图10中可见，迎爆面水平位移沿墙高从低到高先增加后减小，迎爆面、背爆面水平位移最大值均出现在爆源同等高度位置，随着筋材间距的增加，迎爆面水平位移也随之增加。筋材间距的增加使防护屏障整体刚度降低，筋材所承受水平拉力增大，降低了加筋土防护屏障抵抗爆炸冲击荷载的能力。

当筋土产生相对位移时，筋材附近一定范围内的土体会发生膨胀，出现应变区，靠近筋材的区域为高应变区，较远处为低应变区。由于筋土之间的摩擦和嵌挤作用，筋材对土体应变起到约束

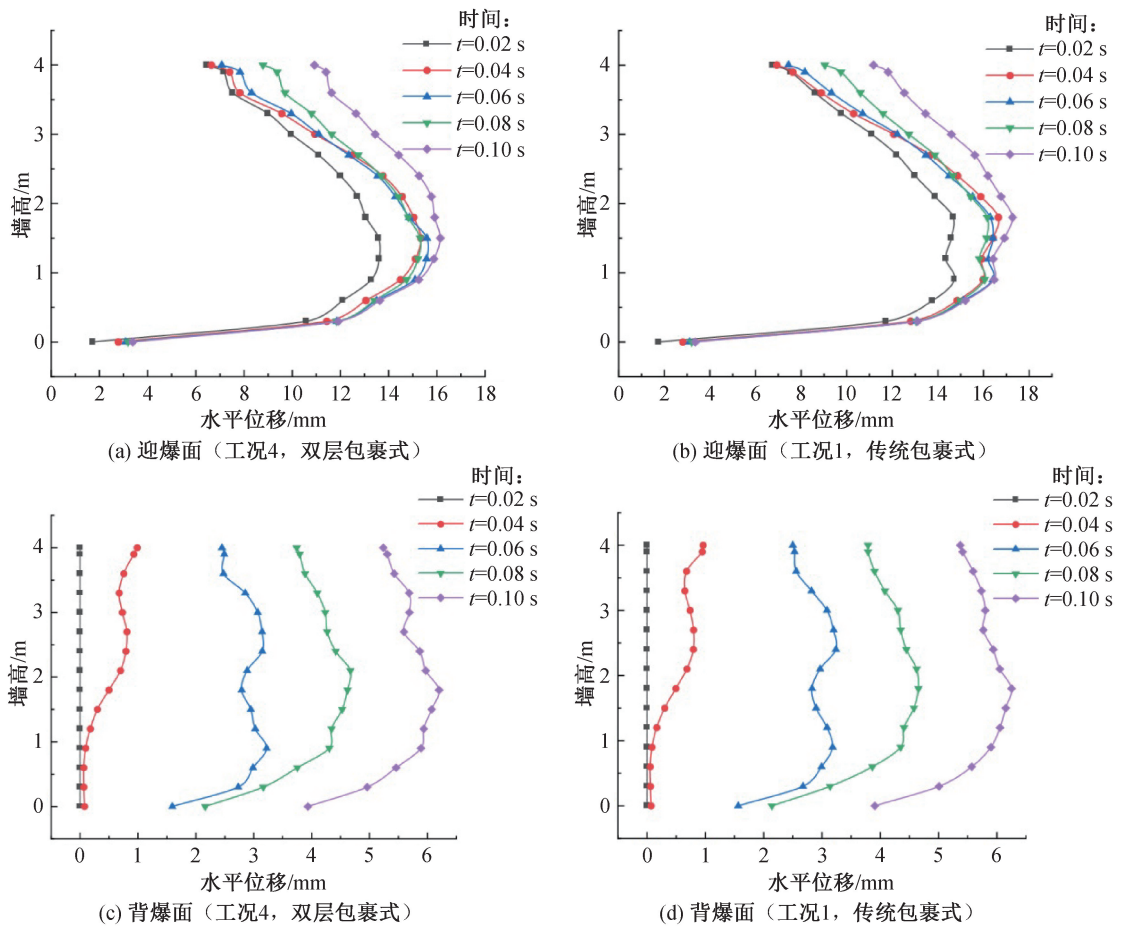


图 8 加筋土防护屏障水平位移沿墙高的分布

Fig. 8 Distribution of horizontal displacement of reinforced soil barrier along wall height

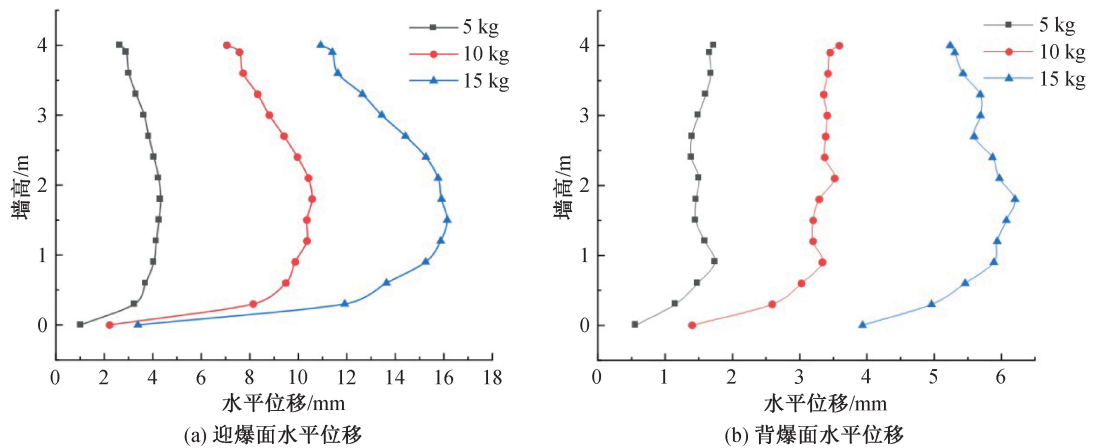


图 9 不同 TNT 当量下加筋土防护屏障水平位移随墙高变化

Fig. 9 Variation of horizontal displacement of reinforced soil protective barrier with wall height for different TNT equivalents

作用,限制了土体的位移,但其仅对筋材附近一定范围内的土体具有约束作用,如果筋材竖向间距较小,这种约束区连成整体,那么对土体整体变形的限制效果就明显;而如果筋材竖向间距较大,约束区之间还有没被筋材限制的土体,这些土体的变形依旧较大,这就减弱了对土体整体变形的约束,因此会出现以上变化规律。

5 结论

1) 包裹式加筋土防护屏障,其柔性结构有利于耗散爆炸产生的冲击力,且双层包裹式加筋土防护屏障与传统包裹式加筋土防护屏障相比,在迎爆面、背爆面的最大水平土压力分别减小 12.2%、7.5%。

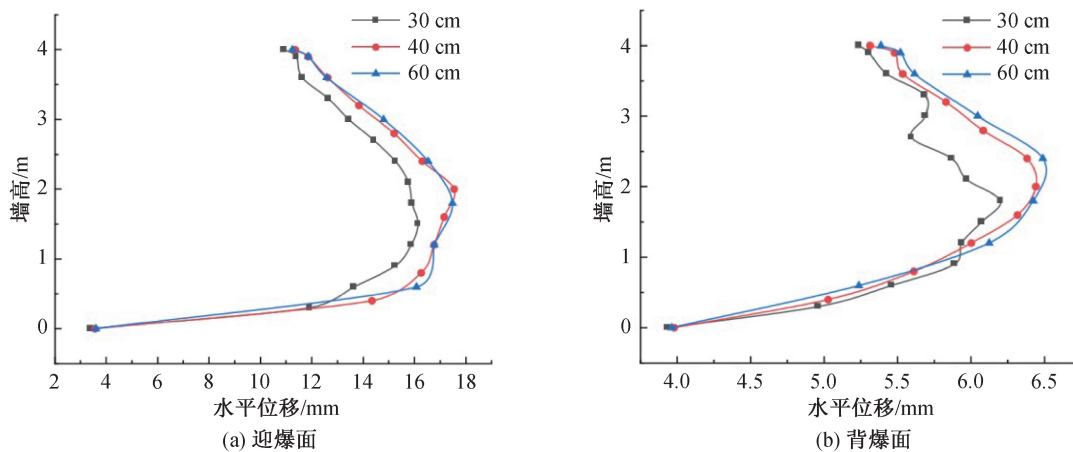


图 10 不同土工格栅竖向间距下加筋土防护屏障水平位移随墙高变化

Fig. 10 Variation of horizontal displacement of reinforced soil protective barrier with wall height at different geogrid vertical spacings

2) 防护屏障迎爆面与背爆面水平土压力沿墙高先增加后减小,在爆源同等高度位置水平土压力最大。

3) 双层包裹式加筋土防护屏障与传统包裹式加筋土防护屏障相比,在迎爆面、背爆面最大水平位移分别减小 6.4%、0.8%。

4) 土工格栅竖向间距对加筋土防护屏障稳定性影响较大,在爆炸冲击荷载作用下,加筋土防护屏障迎爆面与背爆面水平位移沿墙高先增加后减小,最大位移发生在与迎爆面爆源同等高度位置处,背爆面受到扰动较小,随着土工格栅竖向间距的增加,防护屏障的水平位移也逐渐增大。

参考文献:

- [1] POPE D J, SCHERBATIUK K, FOWLER J. The use of finite element analysis to generate pressure-impulse diagrams for temporary soil structures [C]//Proceedings of the Sixth Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures. Ci-Premier PTE Ltd Perth, Western Australia, 2005:457-464.
- [2] SCHERBATIUK K, RATTANAWANGCHAROEN N, POPE D J, et al. Generation of a pressure-impulse diagram for a temporary soil wall using an analytical rigid-body rotation model [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(6):530-539.
- [3] SCHERBATIUK K, RATTANAWANGCHAROEN N. Experimental testing and numerical modeling of soil-filled concertainer walls [J]. Engineering Structures, 2008, 30(12):3545-3554.
- [4] SCHERBATIUK K, RATTANAWANGCHAROEN N. A hybrid rigid body rotation model for predicting a response of a temporary soil-filled wall subjected to blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(1):11-26.
- [5] 董二奎,杜小平,宋建军. 防护堤对爆炸空气冲击波防护效果的数值分析 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(5):114-117.
DONG E K, DU X P, SONG J J. Numerical simulation of the weakening effect of barricade on explosion shock wave [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2011, 22(5):114-117.
- [6] 阎石,张亮,王丹. 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的破坏模式分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005(3):177-180.
YAN S, ZHANG L, WANG D. Failure mode analysis for RC slab under explosive loads [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2005(3):177-180.
- [7] 周亦涛,闫敬华,陈福全,等. 土工格栅加筋土陡防护堤的试验 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(1):109-114.
ZHOU Y T, YAN J H, CHEN F Q, et al. Experimental study of geogrid reinforced earth steep protecting barrier [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2016, 37(1):109-114.
- [8] 王贺. 静动荷载作用下高速铁路土工格栅加筋土挡墙结构行为研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2016.
WANG H. Research on structural behaviour of geogrid reinforced soil retaining wall under static or dynamic loads [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [9] 牛笑笛,杨广庆,王贺,等. 不同面板形式加筋土挡墙结构特性现场试验研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(1):245-254.
NIU X D, YANG G Q, WANG H, et al. Field tests on structural properties of reinforced retaining walls with different panels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1):245-254.

- 扩大头抗浮锚杆的工程应用研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(14): 146-150+123.
- LUO D L, LI X W, LIAO H Y, et al. Engineering application of the prestressed anti-floating anchor with enlarged head project of PSB finishing rolling rebar[J]. Building Structure, 2022, 52(14): 146-150+123.
- [16] 渠红霞. 压力型锚杆锚固段流变特性试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(3): 34-37.
- QU H X. Test research on mechanical behavior of pressure-type anchors[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(3): 34-37.
- [17] 张明义, 寇海磊, 白晓宇, 等. 玻璃纤维增强聚合物抗浮锚杆抗拔性能试验研究与机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1069-1076+1083.
- ZHANG M Y, KOU H L, BAI X Y, et al. Experimental study and mechanism analysis of the anti-pulling behavior of glass fiber reinforced polymer anti-float anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1069-1076+1083.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程抗浮技术标准: JGJ 476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for building engineering against uplift: JGJ 476—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [20] 张永兴, 卢黎, 饶泉宇, 等. 压力型锚杆力学性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2045-2050.
- ZHANG Y X, LU L, RAO X Y, et al. Model test research on mechanical behavior of compression type rock bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2045-2050.
- [21] 孙克国, 许炜萍, 黄谦, 等. 预应力锚杆拉拔力学特性及临界锚固长度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 653-669.
- SUN K G, XU W P, HUANG Q, et al. Study on pull-out mechanical characteristics and critical anchorage length of prestressed anchor bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 653-669.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第8页)
- [10] 肖娴, 李颖. 包裹式加筋土挡墙动力仿真分析[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 49-52.
- XIAO X, LI Y. Dynamic simulation analysis of wrapped reinforced earth retaining wall[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(4): 49-52.
- [11] 宋海波, 曲翔宇, 刘正华. 加筋土防护屏障的设计方法与应用[C]//《工业建筑》2016年增刊II. 中国航天建设集团有限公司, 2016: 530-533.
- SONG H B, QU X Y, LIU Z H. The design of protective barrier with reinforced soil and its application[C]//Industrial Construction (Supplement II). China Aerospace Construction Group Co., Ltd., 2016: 530-533.
- [12] 王可强, 苏经宇, 王志涛. 爆炸冲击波在建筑群中传播规律的数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2007(10): 121-127+176.
- WANG K Q, SU J Y, WANG Z T. Numerical simulation of propagation rules of blast shock wave in building cluster[J]. China Safety Science Journal, 2007(10): 121-127+176.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 烟花爆竹工程设计安全标准: GB 50161—2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Safety code for design of engineering of fireworks and firecracker: GB 50161—2022[S]. Beijing: China Planning Press, 2022.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用爆炸物品工程设计安全标准: GB 50089—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Safety standard for design of engineering of civil explosive materials: GB 50089—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- (责任编辑 王利君)