第 45 卷第 1 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 45, No. 1
2024 年 2 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Feb. 2024

文章编号:1008-1542(2024)01-0082-09

筋材布设方式对加筋土挡墙动力响应的影响

靳　静[1,2],张　森[1],李智广[1],梁小勇[1,2],于远亮[1]

(1.河北科技大学建筑工程学院,河北石家庄　050018;
2.河北省岩土与结构体系防灾减灾技术创新中心(筹),河北石家庄　050018)

摘　要:针对目前加筋土挡墙设计和施工中筋材布设方式大多为等长形的问题,提出一种倒梯形的筋材布设方式,并基于挡墙位移分区理论和有限差分 Flac^{3D} 数值模拟,建立加筋土挡墙三维分析模型,探讨不同峰值加速度下 3 种加筋土挡墙对位移、水平土压力、筋材拉应力及潜在破裂面的影响。结果表明,随峰值加速度增大,挡墙位移逐渐增大,同一荷载作用下,改变筋材布设方式,侧向水平位移减少 9.3%,竖向沉降减少 5.3%;3 种形式挡墙水平土压力相差不大,最大水平土压力分布在挡墙的中下部;筋材拉应力随峰值加速度的增大,沿墙高从单峰型转化为双峰型分布,最大值位于挡墙中下部;潜在破裂面填土区破裂带的形状与筋材的布设方式有关。所提出的倒梯形筋材布设方式对加筋土挡墙的抗震效果更好,可为施工设计中加筋土挡墙筋材布设提供参考。

关键词:地基基础工程;加筋土挡墙;位移分区理论;数值模拟;布筋形式;抗震性能

中图分类号:TU476.4　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2023yx06010

Effect of reinforcement layout on dynamic response of reinforced soil retaining wall

JIN Jing[1,2], ZHANG Sen[1], LI Zhiguang[1], LIANG Xiaoyong[1,2], YU Yuanliang[1]

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
2. Innovation Center of Disaster Prevention and Mitigation Technology for Geotechnical and Structural Systems of Hebei Province (Preparation), Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: Aiming at the current design and construction of reinforced earth retaining wall in which most of the reinforcement laying methods are of equal length, an inverted trapezoidal reinforcement laying method was proposed. Based on the theory of retaining wall displacement zoning and finite-difference Flac3D numerical simulation, a three-dimensional analytical model of reinforced earth retaining wall was established to explore the effects of the three types of reinforced earth retaining wall on the displacements, horizontal earth pressures, reinforcement tensile stresses, and the potential rupture surfaces under different peak accelerations. The results show that with the increase of peak acceleration, the displacement of the retaining wall gradually increases, and under the same load, changing the layout of reinforcement material the lateral horizontal displacement

收稿日期:2023-09-06;修回日期:2023-11-01;责任编辑:冯　民

基金项目:河北省自然科学基金(E2019208159);河北省地质环境监测院开放课题项目(JCYKT202104);河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室项目(HWEKF202102);河北省中央引导地方科技发展资金项目(236Z4507G)

第一作者简介:靳静(1978—),女,河北保定人,副教授,博士,主要从事岩土工程稳定性与变形控制方面的研究。

通信作者:梁小勇,副教授。E-mail:liaxiayon@hebust.edu.cn

靳静,张森,李智广,等.筋材布设方式对加筋土挡墙动力响应的影响[J].河北科技大学学报,2023,44(6):82-90.

JIN Jing, ZHANG Sen, LI Zhiguang, et al. Effect of reinforcement layout on dynamic response of reinforced soil retaining wall[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2023, 44(6): 82-90.

decreases by 9.3%, and the vertical settlement decreases by 5.3%; The horizontal earth pressure of the three forms of retaining wall does not differ much, and the maximum horizontal earth pressure is located in the middle and lower part of the retaining wall; The tensile stress of the reinforcement material transforms from a single-peak type to a bi-peak type along the height of the wall as peak acceleration increases, with the maximum value located in the middle and lower part of the retaining wall; The shape of rupture zone of potential fracture surface filling area is related to the shape of rupture zone of potential fracture surface filling area. The maximum value is located in the middle and lower part of the retaining wall; The shape of the rupture zone in the filling area of the potential rupture surface is related to the deployment method of the reinforcement material. The inverted trapezoidal reinforcement layout has better seismic effect on reinforced soil retaining wall, which provides reference for reinforcement layout of reinforced soil retaining wall in construction design.

Keywords: foundation engineering; reinforced soil retaining wall; displacement partition theory; numerical simulation; reinforcement deployment form; seismic performance

加筋土挡墙是由面板、筋材、填料组成的一种新型柔性支挡结构，具有优良的工程特性，诸如节约用地、工期短、造价低、抗震性能好、外形整体美观等，被广泛应用于土木工程、交通运输工程和水利工程等领域。随着铁路建设的快速发展，加筋土挡墙也成为铁路路基的重要组成部分[1]。

国内外学者对加筋土挡墙的研究主要集中于等长布筋。王家全等[2]通过对挡墙进行静动载试验，分析筋材长度改变对挡墙变形和受力的影响，发现格栅长度和类型的不同会对挡墙的破坏模式造成一定差异；DESAIC 等[3]通过现场试验和数值模拟，揭示了挡墙水平位移和筋材应力应变的变化规律；李丽华等[4]通过在墙顶荷载作用下改变筋材层数、长度、筋材材料等方面研究对加筋土挡墙结构动力响应的影响；蔡晓光等[5]通过 Flac^{3D} 数值模拟研究在地震作用下返包式加筋土挡墙的抗震性能，得出筋材强度的作用饱和结论；赵云斐等[6]研究加筋土挡墙的演化规律，揭示高速铁路土工格栅加筋土挡墙服役期间的力学行为；王家全等[7]通过模型试验，研究静动荷载下筋材长度和类型的变化对挡墙工作性能的影响，得出动载下格栅的侧向约束作用和网兜效果可发挥地更好；张飞等[8-9]基于极限平衡法，提出加筋力的计算方法以及土工合成材料加筋土挡墙稳定性的分析方法；BALAKRISHNAN 等[10]通过离心模型试验研究土工格栅不同刚度对加筋土挡墙位移和格栅最大峰值应变的影响；牛笑笛等[11]通过现场原位试验研究新型整体式、内嵌返包的模块式和模块式面板在地震作用下的结构特性；杨广庆等[12]基于土工格栅蠕变试验，分析温度和荷载对格栅蠕变的影响，确定了蠕变损伤模型的各指标参数值；GULER 等[13]通过室内模型试验，对比分析地震作用下加筋土挡墙 2 种模型的加速度和筋材应变变化规律及面板变形特性；王家全等[14]探讨了基础偏移距离对加筋土挡墙承载破坏性能的影响；BHATTACHARJEE 等[15]通过有限元软件模拟，认为挡墙内部可分为高、低 2 个应变区域，并得出筋材可使挡墙应力和应变显著减小的结论；BHATTACHARJEE 等[16]通过 Flac^{3D} 软件，研究刚性面板加筋土挡墙动力响应，得出刚度很小的筋材亦能对加筋土挡墙抗震起到显著作用；周健等[17]探讨包裹式加筋土挡墙在改变筋材长度、间距、刚度等因素下对挡墙变形的影响，发现最为显著的影响因素是筋材间距；王志杰等[18]基于大尺寸三轴试验，研究筋材竖向间距、筋材层数对其力学响应及变形特征的影响规律。

综上所述，以上学者主要从等长布筋方面研究加筋土挡墙的动力响应，对于改变布筋方式对加筋土挡墙的影响鲜有报道。除此之外，目前文献还未考虑地震作用下倒梯形布筋加筋土挡墙的动力特性。基于此，本文采用 Flac^{3D} 软件，建立倒梯形布筋方式加筋土挡墙数值模型，通过改变填料区布筋方式来对比分析加筋土挡墙在地震荷载作用下的动力特性，为挡墙筋材布设、工程实践等提供依据。

1　挡墙位移分区理论

1.1　刚度强化区

加筋土挡墙内部根据稳定性的不同可划分为 3 个区域[19]，分别为主动区、过渡区和稳定区，见图 1。

当倾角小于 φ（土体内摩擦角）时，土体可自稳，为稳定区；当倾角大于 φ，小于 45°＋φ/2 时，为过渡区；当倾角大于 45°＋

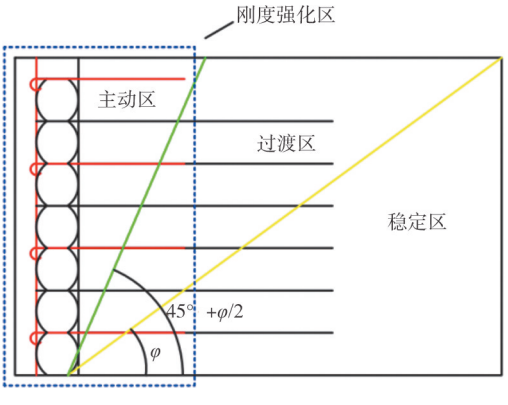


图 1　刚度强化区原理图

Fig. 1　Schematic diagram of stiffness strengthening zone

$\varphi/2$ 时，为主动区。在施工过程中，主动区和过渡区稳定性较差，若有外荷载作用，主动区易发生破坏。在施工过程中，刚性面板和加筋体形成刚度强化区，该区域可承担较大的土压力，且该部位筋材应变较小，使筋材充分发挥作用，增强稳定性。

1.2 挡墙不同区域受力分析

整体刚性面板加筋土挡墙在施工过程中根据稳定性划分为 3 部分区域：连接钢筋和面板构成了刚度强化区；刚度强化区后为筋材铺设的加筋区；最后为非加筋区域。挡墙墙高 h，EF 段长为 L_1，FG 段长为 L_2，GH 段长为 L_3，如图 2 所示。

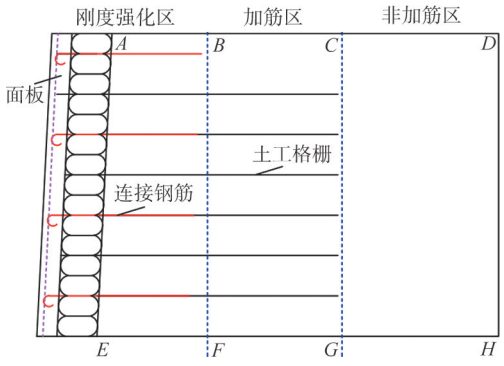
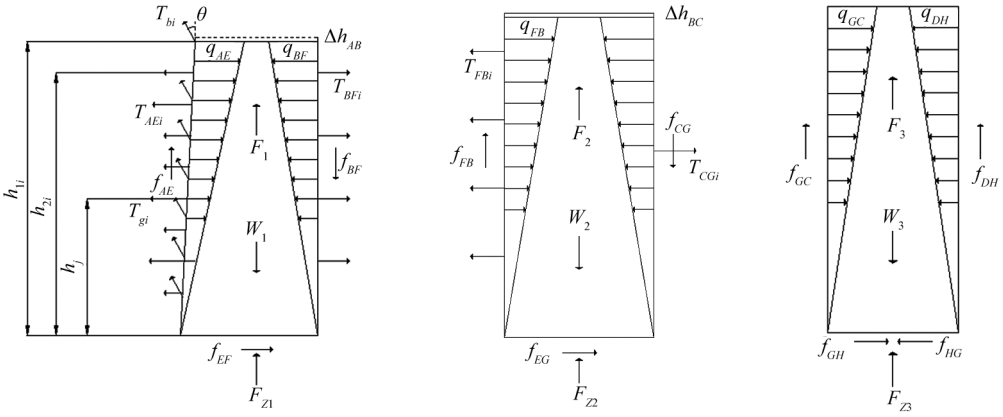


图 2 加筋土挡墙结构分区示意图

Fig. 2 Reinforced soil retaining wall structure zoning diagram

加筋土挡墙内部根据筋材分布分为刚度强化区、加筋区和非加筋区，将加筋体区域（$ABFE$，$BCGF$ 和 $CDHG$）分别进行受力分析，如图 3 所示。



a）刚度强化区加筋体　b）加筋区　c）非加筋区

图 3 不同区域受力分布图

Fig. 3 Map of stress distribution in different areas

图 3 中，h_{1i} 为各层返包回折格栅的高度；h_{2i} 为各层土工格栅的高度；h_j 为各层连接钢筋的高度；i 表示相应的格栅层数，j 表示响应的连接钢筋层数；Δh_{AB} 为刚度强化区加筋体的压缩量；Δh_{BC} 为加筋区加筋体的压缩量；自身承受重力分别为 W_1，W_2，W_3；格栅网兜效应合力分别为 F_1，F_2，F_3；基底支撑力分别为 F_{Z1}，F_{Z2}，F_{Z3}；水平筋材拉力为 T_{AEi}，T_{BFi}，T_{CGi}；返包格栅拉力为 T_{bi}（与竖直方向呈 θ 角）；筋材拉力为 T_{gi}；荷载作用下，产生的摩擦力和挤压力分别为 f 和 q。

本文做出如下假设：

1）墙体内等高处由于土体自重引起的侧向土压力值近似相等，受力可相互抵消，可不计土体自重引起的侧向土压力。

2）不同区域之间的挤压力，沿墙高由上到下呈线性减小。

3）在墙体压缩过程中，忽略筋材沿垂直方向的错动，认为筋材拉力保持水平方向。

当墙体处于受力平衡状态时，可以得出以下等式。

对于刚度强化区：

$$\sum T_{AEi}+\sum T_{bi}\sin\theta+\sum T_{gi}+q_{BF}h/2=\sum T_{BFi}+q_{AE}h/2+f_{EF}\ , \tag{1}$$

$$\sum T_{bi}\cos\theta+F_1+F_{Z1}+f_{AE}=W_1+f_{BF}\ , \tag{2}$$

$$\sum T_{AEi}+\sum T_{bi}h_{1i}\sin\theta+\sum T_{gi}+q_{BE}h^2/6+(F_1+F_{Z1})L_1/2=$$
$$\sum T_{BFi}h_{2i}+f_{BF}L_1+q_{AE}h^2/6+W_1L_1/2。 \tag{3}$$

对于加筋区：

$$\sum T_{FBi} + q_{CG}h/2 = \sum T_{CGi} + f_{FG} + q_{FB}/2\ , \tag{4}$$

$$W_2 + f_{CG} = F_2 + F_{Z2} + f_{FB}\ , \tag{5}$$

$$\sum T_{FBi}h_{2i} + q_{CG}h^2/6 + (F_2 + F_{Z2})L_2/2 = \sum T_{CGi}h_{2i} + f_{CG}L_2 + q_{FB}h^2/6 + W_2L_2/2\ 。 \tag{6}$$

对于非加筋区：

$$f_{HG} + q_{DH}h/2 = f_{GH} + q_{GC}h/2\ , \tag{7}$$

$$W_3 = F_3 + F_{Z3} + f_{GC} + f_{DH}\ , \tag{8}$$

$$q_{DH}h^2/6 + (F_3 + F_{Z3})L_3/2 + f_{DH}L_3 = W_3L_3/2 + q_{CG}h^2/6\ 。 \tag{9}$$

2　加筋土挡墙数值模拟

2.1　数值模型建立

Flac^{3D} 主要应用于岩土工程的力学分析，可有效解决岩土体的动力稳定性分析，采用的是有限差分网格，网格和节点都是按照坐标系来进行建立的。依据振动台模型试验[20]中挡墙模型尺寸、填料和筋材属性，建立整体刚性面板加筋土挡墙三维数值模型，包括地基、条形基础、填料区、返包袋、面板和泡沫板，如图 4 所示。数值模型中挡墙墙面坡率为 1∶0.05，地基深度为 0.3 m，挡墙高度为 1.5 m，面板厚为 0.1 m，墙趾外计算宽度为 0.7 m，墙体长度为 2.3 m。挡墙内部筋材长度根据最新版《铁路路基支挡结构设计规范》中建议的 0.8 倍墙高进行布设，即 1.2 m，采用上下等长的布置方式，返包袋宽度取 0.2 m，内部构造连接钢筋取固定值 0.5 m，模型后部施加聚乙烯泡沫板，厚度为 0.1 m。

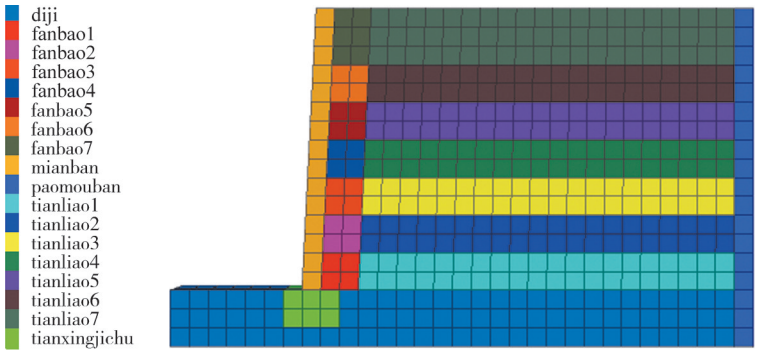


图 4　加筋土挡墙三维数值模型

Fig. 4　Three-dimensional numerical model of reinforced soil retaining wall

数值模型的边界条件在静力计算时设置为左侧面板和模型顶部自由，其余 3 个侧面限制法向位移，底部限制法向位移和切向位移。动力计算时，释放挡墙 x 方向的约束，分别在挡墙模型边界的左侧、右侧及底部施加地震波。

地基与填料采用砂性土，材料参数根据振动台试验[20]来确定；数值模拟中，地基与填料采用摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)本构模型；挡墙面板、条形基础和泡沫板采用线弹性(Elastic)模型；土工格栅使用 Flac^{3D} 自带的 Geogrid 结构单元进行模拟，面板和筋材之间为刚性连接；构造连接钢筋采用 Flac^{3D} 中的 Pile 结构单元进行模拟。计算参数[20]如表 1—表 3 所示。

表 1　材料模型参数

Tab. 1　Material model parameters

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	密度/(kg·m^{-3})
地基	1×10^2	0.25	1	43	1 900
面板	3.15×10^4	0.20			2 500
条形基础	3.15×10^4	0.20			2 500
泡沫板	2	0.40			120

表 2　土工格栅材料参数

Tab. 2　Geogrid material parameters

单元类型	弹性模量/MPa	厚度/mm	筋-土黏聚力/kPa	筋-土摩擦角/(°)	密度/(kg·m^{-3})
Geogrid	55	2	2	43	300

表 3 构造连接钢筋参数

Tab. 3 Parameters of construction-connecting steel bars

单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	筋-土黏聚力/kPa	筋-土摩擦角/(°)	横截面积/mm^2
Pile	2×10^5	0.3	2	43	12.5

Flac^{3D} 中的 interface 单元主要用来模拟不同材料之间的接触面问题，挡土墙模拟中包括面板与土体的接触以及面板与返包填料的接触等，黏聚力、摩擦角、切向刚度和法向刚度为接触面的主要参数。其中，切向刚度 k_s 和法向刚度 k_n 可按式(10)进行计算。

$$k_n = k_s = 10\max\left[\frac{\left(K+\frac{4G}{3}\right)}{\Delta Z_{\min}}\right], \tag{10}$$

其中 $\Delta Z_{\min}$ 是接触面法线方向上连接区域的最小网格尺寸。

2.2 材料阻尼设置和地震波选取

Flac^{3D} 中阻尼有 3 种，分别为瑞利阻尼、局部阻尼及滞后阻尼。本文选用局部阻尼，其中，临界阻尼比取 5%的经验值，局部阻尼系数可按式(11)计算，计算结果为 0.157 1。

$$\alpha_L = \pi D, \tag{11}$$

式中 D 为临界阻尼比，通常取 5%。

挡土墙动力分析中，地震波通常从简谐波和真实地震波中选取。简谐波相较于真实地震波在同等峰值加速下所包含的能量和强度都要大，故选取简谐波进行动力分析，选取的简谐波频率为 5 Hz，时长为 6 s，简谐波波形如图 5 所示。

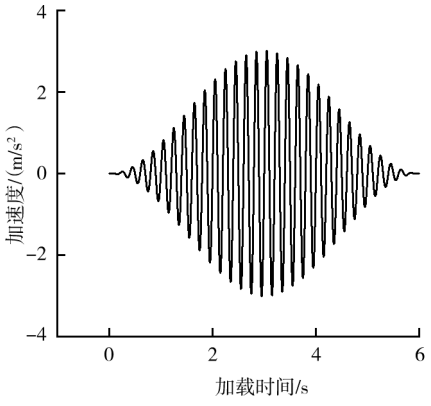
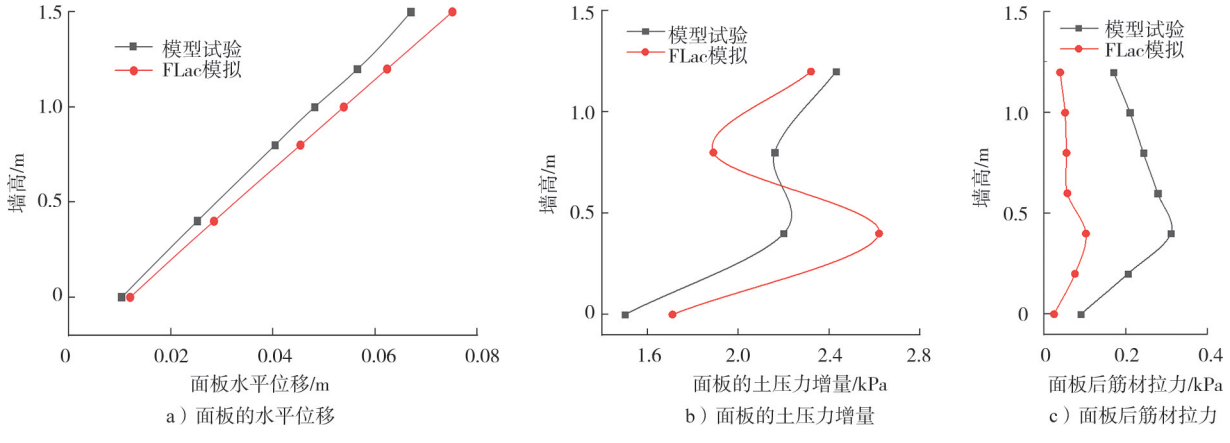


图 5 动荷载波形示意图

Fig. 5 Waveform diagram of dynamic load

2.3 数值模型验证

为验证数值模拟的准确性，选取频率 5 Hz、峰值加速度 0.3g 下模型试验得到的数据与文献[20]中的振动台试验数据进行对比，分别对比面板水平位移、面板的土压力增量及面板后的筋材拉力，如图 6 所示。



a) 面板的水平位移 b) 面板的土压力增量 c) 面板后筋材拉力

图 6 挡墙数值模拟与振动台试验数据对比示意图

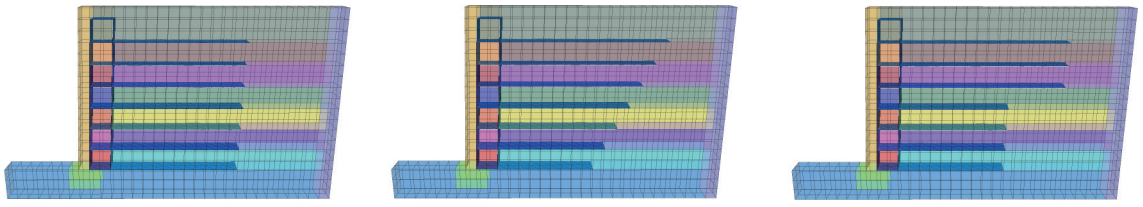
Fig. 6 Comparison diagram between numerical simulation and shaking table test data of retaining wall

由图 6 a)可知，墙面板位移沿墙高整体呈增大的趋势，最大水平位移出现在墙面板顶部；图 6 b)为面板的土压力增量沿墙高的分布图，面板后的土压力增量沿墙高整体呈增大的趋势，其中最大值出现在挡墙的中下部，墙顶的土压力增量相对较小，这可能与墙顶面板水平位移较大导致的应力释放有关；图 6 c)为面板后的筋材拉力沿墙高的分布图，沿墙高整体上出现增大的趋势，最大值出现在挡墙的中下部。

通过对比分析发现，数值模拟结果与振动台试验结果较为吻合，说明数值模拟中模型和参数的选取是合理可靠的，可为后续深入的研究奠定基础。

2.4　不同布筋形式加筋土挡墙数值模型建立

在此基础上，为了研究筋材不同布置方式对整体刚性面板加筋土挡墙动力响应与抗震性能的影响，选取等长形、倒梯形和上长下短形，分别对 3 种不同布置方式的挡墙施加 0.4g，0.6g 和 0.8g 简谐波，对比分析位移、土压力、筋材拉力等计算结果，获得最优的布筋方式，如图 7 所示。



a）等长布筋形式　　b）倒梯形布筋形式　　c）上长下短布筋形式

图 7　3 种筋材布置方式对应加筋土挡墙模型示意图

Fig. 7　Three reinforcement layout methods corresponding to the reinforced soil retaining wall model diagram

3　数值计算结果分析

3.1　挡墙侧向水平位移

在面板后沿墙高布置 6 个监测点，高度分别为 0，0.4，0.8，1.0，1.2 和 1.5 m。不同峰值加速度作用下挡墙面板在不同筋材布设方式上的水平位移变化曲线如图 8 所示。

从图 8 可以看出，在地震荷载作用下，面板水平位移的分布不随筋材布设方式的改变而发生变化，3 种布设方式产生的面板水平位移变化规律基本一致，均沿墙高度的增大而增大；挡墙面板的水平位移最大值出现在挡墙顶部；墙顶最大位移分别为 19.46，17.65 和 18.13 cm，最好的为倒梯形，其次为上长下短形，最差为等长形。原因可能是倒梯形布置方式顶部区域内的筋材长度最长，筋材能够提供更大的拉力，以至于能够更好的限制面板的水平位移。选用倒梯形比等长形可有效减小水平位移 9.3%。

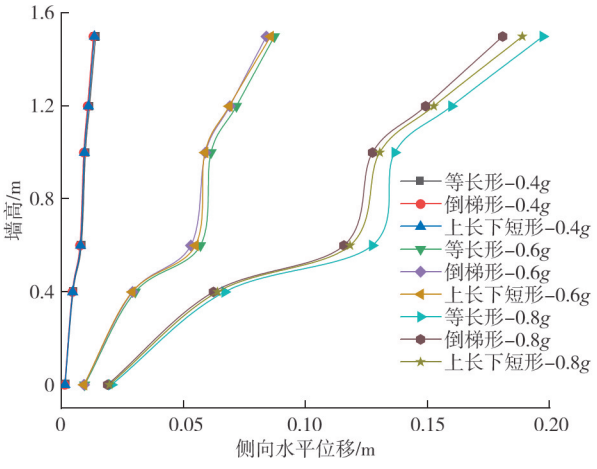


图 8　不同布筋形式下面板水平位移沿墙高变化图

Fig. 8　Variation diagram of horizontal displacement of panel along wall height under different reinforcement forms

3.2　挡墙竖向沉降

在加筋土挡墙顶部（墙高 1.5 m 处）设立 6 个监测点，距离挡墙面板的距离分别为 0.1，0.3，0.6，0.9，1.5 和 1.9 m。不同布筋形式下的挡墙顶部竖向沉降曲线如图 9 所示。

由图 9 可知，在地震荷载作用下，返包袋后（0.3 m 处）和连接钢筋末端（0.6 m 处）都出现了明显的沉降突变，但在筋材末端处，只有等长形出现明显的沉降突变，原因可能是筋材末端集中作用于一点，此处的格栅起到了一定的“托举”作用，导致曲线有所回升；随着距面板距离的增大，挡墙竖向沉降整体呈现“增大”的趋势，原因可能是随着距离的增大，由挡墙前部的刚度强化区进入到非加筋区，缺少筋材与土体的相互作用，进而导致沉降增大；加筋土挡墙竖向沉降的最大值出现在填土区的末端；当峰值加速度为 0.4g 时，挡墙的竖向沉降较小，3 种布筋形式几乎无差别；随着峰值加速

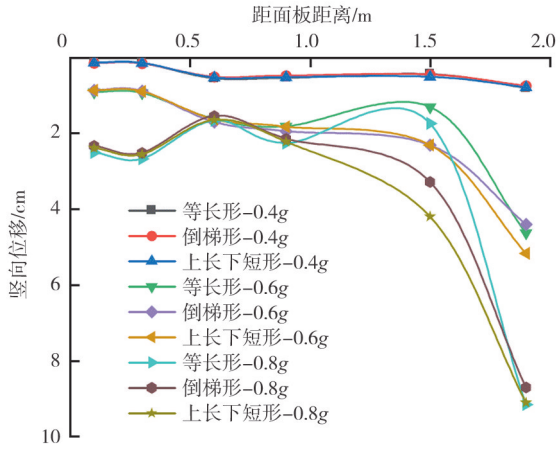


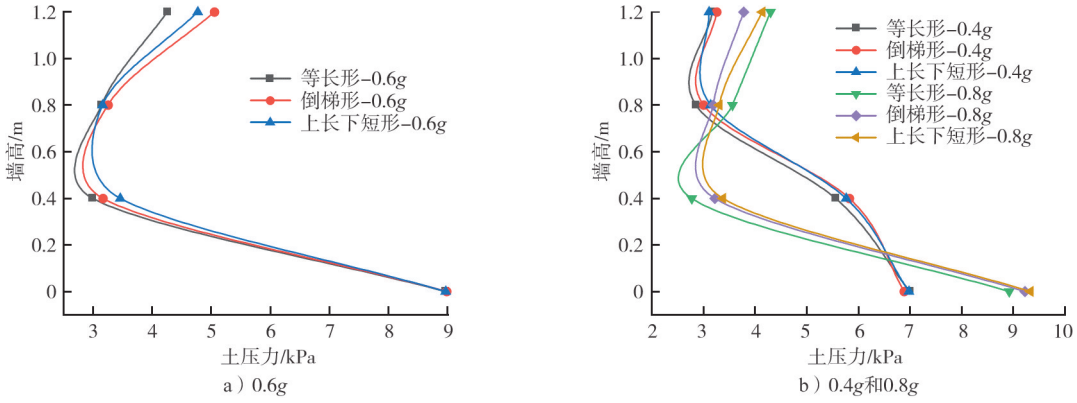
图 9　不同布筋形式下挡墙顶部竖向沉降曲线图

Fig. 9　Vertical settlement curve of the top of retaining wall under different reinforcement forms

度的增大，挡墙顶部的竖向沉降出现明显变化，当峰值加速度为 0.6g 时，倒梯形的竖向沉降最小，等长形居中，上长下短形最差；当峰值加速度为 0.8g 时，倒梯形的竖向沉降最小，上长下短形居中，等长形最差，这种工况下倒梯形相对于等长形可有效减少竖向沉降 5.3%。

3.3 墙背水平土压力

为研究不同峰值加速度作用下筋材布设方式对挡墙水平土压力的影响，于面板后设置 4 处监测点进行监测。不同峰值加速度下面板后的水平土压力沿墙高变化曲线如图 10 所示。



a）0.6g　　b）0.4g和0.8g

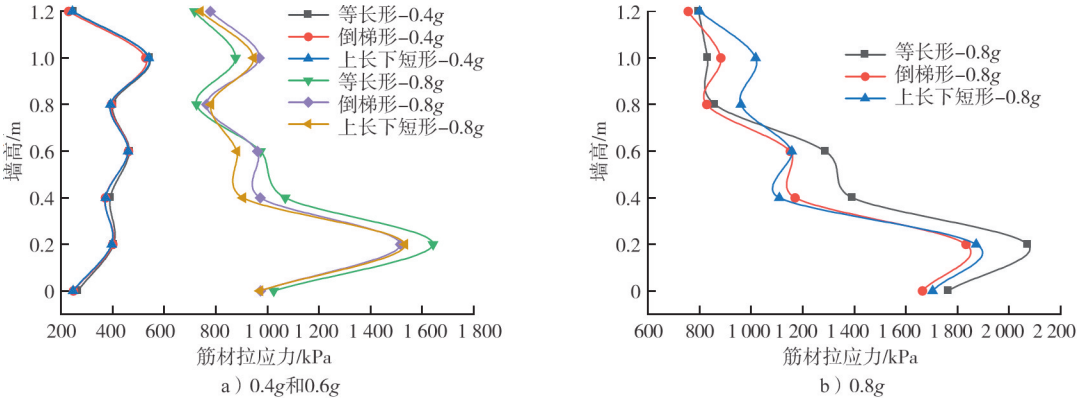
图 10　面板后水平土压力随墙高变化曲线图

Fig. 10　Curve of horizontal earth pressure behind the panel with wall height

由图 10 可知，最大水平土压力出现在挡墙的中下部，可能是由于挡墙中下部的条形基础的弹性模量、刚度等参数相对较大；在 0.4g 峰值加速度下，整体上，水平土压力沿墙高呈逐渐减小的趋势；在 0.6g 和 0.8g 峰值加速度下，面板水平位移急剧增大，应力得到一定的释放，水平土压力沿墙高呈现出“中间小两头大”的分布规律；最大水平土压力出现在挡墙墙基位置处；3 种形式下挡墙的水平土压力，等长形最小，倒梯形居中，上长下短形最差，但结果相差不大。

3.4 筋材拉应力

不同布筋形式下筋材拉应力沿墙高变化曲线如图 11 所示。



a）0.4g和0.6g　　b）0.8g

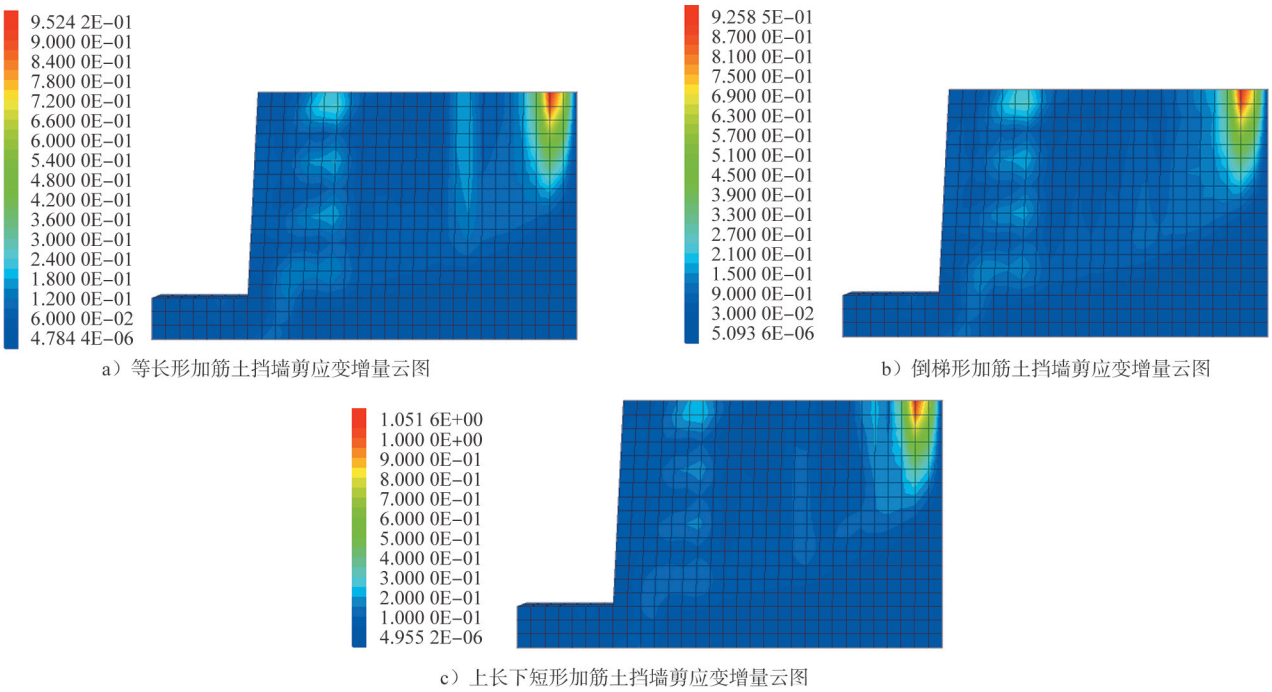
图 11　不同布筋形式筋材拉应力随墙高变化曲线

Fig. 11　Variation curve of tensile stress of reinforcement with wall height in different types of reinforcement

由图 11 可知，筋材拉应力最大值随峰值加速度的增大而增大；0.4g 峰值加速度下，最大值出现在挡墙中上部，呈“单峰型”分布；0.6g 峰值加速度下，沿墙高呈“双峰型”分布，筋材拉应力峰值分别出现在挡墙中下部和中上部，最大值位于挡墙中下部，原因可能是与 0.4g 之后挡墙面板水平位移急剧增大，上部筋材发生滑移，筋材应力得到释放有关；0.8g 峰值加速度下，仍呈“双峰型”分布，但挡墙上部筋材拉应力变化减小，筋材拉应力向挡墙下部增大发展，最大值出现在挡墙中下部。由此可知，随着地震作用的增大，挡墙内的下部筋材要先于上部筋材发生破坏。

3.5　潜在破裂面

不同布筋形式下挡墙的剪应变增量云图如图 12 所示。



a）等长形加筋土挡墙剪应变增量云图　　b）倒梯形加筋土挡墙剪应变增量云图

c）上长下短形加筋土挡墙剪应变增量云图

图 12　加筋土挡墙剪应变增量云图(0.6g)

Fig. 12　Cloud view of shear strain increment of reinforced soil retaining wall(0.6g)

剪应变增量云图的前部加筋区符合“0.3H”破裂面的发展规律，但随着峰值加速度的增大，剪切滑移带向填土区发展，等长形出现第 2 条明显的竖直破裂带，位于筋材末端处，破裂面形式整体呈“倒 F”形；上长下短形的第 2 条破裂带位于下部较短筋材的末端，呈竖直状态，但并无等长形明显；倒梯形仅在前部加筋区出现 1 条竖直破裂带，后部并无明显破裂带形成，可能是由于筋材从上往下均匀减小，并无筋材集中或长度突变所致。

4　结　语

针对当前加筋土挡墙施工和设计中筋材布设方式多为等长形的情况，提出了倒梯形的筋材布设方式，并基于挡墙位移分区理论和有限差分数值模拟，研究其在地震作用下对挡墙动力响应的影响规律，主要结论如下。

1）不同布筋形式对提高挡墙抗震性能程度不同，本模拟中抗震性能从优到次，依次为倒梯形、上长下短形、等长形。

2）布筋形式的改变，使得挡墙主动区的面板侧向水平位移和过渡区的挡墙顶部未加筋区域竖向沉降分别减少 9.3%和 5.3%。可见，选用合理的布筋形式能够提高挡墙的整体稳定性。

3）筋材的布置方式对墙背水平土压力的影响较小，3 种筋材布置方式的挡墙水平土压力发展规律基本一致，随着峰值加速度的增大，水平土压力沿墙高呈“中间小两头大”的分布规律，最大水平土压力在挡墙中下部。

4）随着峰值加速度的增大，挡墙内部筋材的拉应力从“单峰型”变为“双峰型”分布，最大值出现在挡墙中下部，中下部的筋材要先于上部筋材发生破坏。

5）潜在破裂面遵循“0.3H 破裂面”的发展规律，随着峰值加速度的增大，破裂带向填土区发展，筋材的布置方式对填土区破裂带的形状有一定影响。

本文仅施加一种单一频率的简谐波，与实际工程中的地震波存在一定差异。后续工作会采用实际地震波和更高峰值的加速度，进一步探究筋材布设方式的改变对挡墙动力响应与抗震性能的影响。

参考文献/References：

[1] TB 10621—2014,高速铁路设计规范[S].

[2] 王家全,徐良杰,黄世斌,等.动载下土工格栅加筋桥台挡墙承载性能分析[J].岩土力学,2019,40(11):4220-4228.
WANG Jiaquan,XU Liangjie,HUANG Shibin,et al. Bearing capacity analysis of geogrid reinforced abutment retaining wall under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(11):4220-4228.

[3] DESAIC S,EL-HOSEINY K E. Prediction of field behavior of reinforced soil wall using advanced constitutive model[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2005,131(6):729-739.

[4] 李丽华,石安宁,肖衡林,等.加筋土挡墙静载模型试验及其力学性能研究[J].岩土力学,2018,39(12):4360-4368.
LI Lihua,SHI Anning,XIAO Henglin,et al. Model test and mechanical properties study of reinforced earth retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(12):4360-4368.

[5] 蔡晓光,徐洪路,李思汉,等.地震作用下返包式加筋土挡墙数值模拟[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5):1416-1426.
CAI Xiaoguang,XU Honglu,LI Sihan,et al. Numerical simulation of reinforced soil retaining wall with wrapped face under seismic effects [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2021,51(5):1416-1426.

[6] 赵云斐,杨广庆,周诗广,等.高速铁路土工格栅加筋土挡墙服役期力学行为研究[J].铁道学报,2020,42(6):129-138.
ZHAO Yunfei,YANG Guangqing,ZHOU Shiguang,et al. Research on mechanical behaviour of high-speed railway geogrid reinforced soil retaining wall during service period[J]. Journal of the China Railway Society,2020,42(6):129-138.

[7] 王家全,侯森磊,唐滢,等.静动载下筋材变化对加筋土挡墙性能影响分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(5):1352-1361.
WANG Jiaquan,HOU Senlei,TANG Ying,et al. Analysis on the influence of geogrid changes on the performance of geogrid-reinforced soil retaining wall under static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(5):1352-1361.

[8] 张飞,贾世林,朱玉明,等.台阶式加筋挡墙稳定所需加筋力计算方法与影响规律[J].岩土力学,2021,42(11):3079-3089.
ZHANG Fei,JIA Shilin,ZHU Yuming,et al. Required strength of geosynthetics in reinforced multi-tiered wall[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(11):3079-3089.

[9] 张飞,温友鹏,陈延博,等.考虑黏聚力的加筋挡墙筋材内力分析方法[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(12):4238-4251.
ZHANG Fei,WEN Youpeng,CHEN Yanbo,et al. Analytical method to determine reinforcement loads of geosynthetic-reinforced retaining wall[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2021,52(12):4238-4251.

[10] BALAKRISHNAN S,VISWANADHAM B V S. Centrifuge model studies on the performance of soil walls reinforced with sand-cushioned geogrid layers[J]. Geotextiles and Geomembranes,2019,47(6):803-814.

[11] 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 Xiaodi,YANG Guangqing,WANG He,et al. Field tests on structural properties of reinforced retaining walls with different panels [J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(1):245-254.

[12] 杨广庆,靳静,周诗广,等.高速铁路加筋土挡墙土工格栅蠕变损伤本构模型研究[J].铁道学报,2019,41(3):155-162.
YANG Guangqing,JIN Jing,ZHOU Shiguang,et al. Study on constitutive model of creep damage of geogrids for reinforced retaining wall for high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society,2019,41(3):155-162.

[13] GULER E,ENUNLU A K. Investigation of dynamic behavior of geosynthetic reinforced soil retaining structures under earthquake loads [J]. Bulletin of Earthquake Engineering,2009,7(3):737-777.

[14] 王家全,祁航翔,梁宁,等.倒梯形布筋方式的加筋土挡墙承载破坏性能分析[J].自然灾害学报,2022,31(4):154-163.
WANG Jiaquan,QI Hangxiang,LIANG Ning,et al. Analysis of load-bearing failure performance of reinforced earth retaining wall with inverted trapezoidal reinforcement[J]. Journal of Natural Disasters,2022,31(4):154-163.

[15] BHATTACHARJEE A,KRISHNA A M. Strain behavior of backfill soil in rigid faced reinforced soil walls subjected to seismic excitation [J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering,2015,1(2). DOI: 10.1007/s40891-015-0016-4.

[16] BHATTACHARJEE A,KRISHNA A M. Numerical modelling of rigid faced reinforced soil walls under seismic shaking[C]//Indian Geotechnical Conference. Mumbai:GEOtrendz,2010:869-872.

[17] 周健,谢鑫波,姜炯,等.包裹式加筋土挡墙的变形特性及影响因素研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):148-154.
ZHOU Jian,XIE Xinbo,JIANG Jiong,et al. Deformation characteristics and influence factors of wrap reinforced retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(1):148-154.

[18] 王志杰,蔡永明,齐逸飞,等.土工格栅加筋橡胶碎石混合料大型三轴试验研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(7):2509-2520.
WANG Zhijie,CAI Yongming,QI Yifei,et al. Large-scale triaxial tests of geogrid reinforced rubber gravel mixtures[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2023,20(7):2509-2520.

[19] 杨广庆,牛笑笛,周诗广,等.复合式整体刚性面板加筋土挡墙结构行为试验研究[J].岩土力学,2021,42(7):1794-1802.
YANG Guangqing,NIU Xiaodi,ZHOU Shiguang,et al. Experimental study on structural behavior of reinforced retaining wall with composite full-height rigid facing[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(7):1794-1802.

[20] 徐鹏.高烈度地震下刚性面板加筋土挡墙的动态响应研究[D].成都:西南交通大学,2020.
XU Peng. Study on the Seismic Response of Reinforced Soil Retaining Walls with Rigid Facing under High-intensity Earthquakes[D]. Chengdu:SouthwestJiaotong University,2020.