

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0578

不同面板形式加筋土挡墙结构 特性现场试验研究

牛笑笛^{1,2}, 杨广庆^{2,3}, 王 贺³, 丁 硕³, 冯 帆³

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北省 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北省 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北省 石家庄 050043)

摘 要: 以成昆铁路复线加筋土挡墙为工程依托进行现场原位试验, 对比分析工后 9 个月内新型整体式面板、内嵌返包结构的模块式面板和模块式面板 3 类加筋土挡墙的结构特性。在此期间发生两次地震, 监测了震后挡墙变形及土压力变化。结果表明: 整体式面板加筋土挡墙整体稳定性最好, 具有良好的抗震性能, 格栅应变变化率、墙体压缩量和墙面水平位移均最小。整体式面板和模块式面板加筋土挡墙墙背土压力沿墙高近似呈 M 型, 内嵌返包结构的模块式面板加筋土挡墙墙背土压力沿墙高近似呈 S 型。整体式面板加筋土挡墙的侧向土压力系数沿墙高变化较小, 小于美国联邦公路局 (FHWA) 加筋设计指南计算值; 内嵌返包结构的模块式面板加筋土挡墙侧向土压力系数沿墙高呈增大的趋势, 挡墙中、下部小于 FHWA 计算值, 上部接近或大于静止土压力系数; 模块式面板加筋土挡墙侧向土压力系数大部分处在 FHWA 计算值与静止土压力系数之间。3 类挡墙土工格栅应变沿墙高均呈非线性变化。挡墙墙体压缩量随着时间的增加逐渐增加, 在工后前 50 d 时间内增加速率较快, 随后增加速率减缓, 进入雨季之后增加速率再次增大。发生地震后, 3 类加筋土挡墙均出现不同程度的墙背土压力减小、格栅应变增大、墙体压缩量增加和墙面板外移的现象。

关 键 词: 加筋土挡墙; 不同面板形式; 结构特性; 地震

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2021) 01—0245—10

Field tests on structural properties of reinforced retaining walls with different panels

NIU Xiao-di^{1,2}, YANG Guang-qing^{2,3}, WANG He³, DING Shuo³, FENG Fan³

(1. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Based on the reinforced retaining wall of Chengdu-Kunming railway, the field tests were carried out. The comparison of the reinforced retaining wall with full-height rigid panels, the reinforced retaining wall with modular panel embedded return package structure and the reinforced retaining wall with modular panel within 9 months after the completion of construction were analyzed to study the structural properties. During the test period, two earthquakes occurred and changes of the deformation of retaining wall and the earth pressure were monitored. The results show that the geogrid strain rate, wall compression and wall horizontal displacement can be well controlled by the reinforced retaining wall with full-height rigid panel, showing the best stability and seismic performance. The earth pressure on the back of the reinforced retaining wall with full-height rigid panel and reinforced retaining wall with modular panel are distributed following with a "M" type along the wall height. The distribution of earth pressure on the back of the reinforced retaining wall with modular panel embedded return package structure is similar to "S" along the wall height. The lateral earth pressure coefficients of the reinforced retaining wall with full-height rigid panel change little along the wall height, which are less than the FHWA calculated values. The lateral earth pressure coefficients of the reinforced retaining wall with modular panel embedded return package structure have an increased trend along the wall height. The values of the middle and lower part of the retaining wall are less

收稿日期: 2020-05-08

修回日期: 2020-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51378322, No. 51709175); 河北省自然科学基金资助项目 (No. E2019208159)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51378322, 51709175) and the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2019208159).

第一作者简介: 牛笑笛, 男, 1991 年生, 博士研究生, 主要从事土工合成材料加筋、岩土工程等方面的研究。E-mail: tdnixd@163.com

通讯作者: 杨广庆, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土工合成材料加筋、路基工程等方面的研究与教学工作。E-mail: gtsyang@vip.163.com

than the FHWA calculated values, and the values of the upper part are close to or higher than the static earth pressure coefficients. Most of the lateral earth pressure coefficients of the reinforced retaining wall with modular panel are ranging from the FHWA calculation values to the static earth pressure coefficients. The geogrid strains of three retaining walls change nonlinearly along the wall height. The retaining wall compressions increase gradually with the increased time, especially in the first 50 days. Then the increase rates gradually decrease until the coming of the rainy season, the hydraulic effect promotes the increase rates to increase again. After the earthquakes, the earth pressure on the back decreases, the geogrid strain increases, the wall compressions increase and the wall panels have an obvious trend to move out.

Keywords: reinforced retaining wall; different panels; structural property; earthquake

1 引言

加筋土挡墙自问世以来,在地震及强降雨等极端自然条件下表现出良好的性能,得到越来越广泛的认可^[1-2]。近年来,为使加筋土挡墙理论能够满足工程发展的需要,国内外学者进行了大量的研究。Balakrishnan 等^[3]通过离心模型试验研究了土工格栅不同刚度对加筋土挡墙的水平位移、墙顶沉降和格栅最大峰值应变的影响。Razeghi 等^[4]模拟地下水上升情况,对比分析了离心作用下有、无土工合成材料排水层对加筋土挡墙变形及内部孔隙水压力变化的影响。Mehrjardi 等^[5]考虑了填土颗粒、土工格栅孔径和加载板对加筋土挡墙的尺寸效应,通过施加的荷载和地表沉降评估挡墙模型的响应,以进一步了解加筋土挡墙的特性。Portelinha 等^[6]为了研究填土的渗透能力对挡墙结构性能的影响,建立了全尺寸加筋土挡墙,采用灌溉系统模拟降雨过程,测量了填土体积含水率、基质吸力、墙面位移和格栅应变的变化。杨果林^[7]、王家全^[8]、王贺^[9]等通过室内模型试验研究了挡墙在墙顶静、动荷载作用下的结构行为演化规律,揭示了不同荷载条件对挡墙力学特性的内在影响机制。

加筋土挡墙按照面板形式的不同可分为模块式面板、返包式面板、分离式大面板和整体式面板加筋土挡墙等。加筋土挡墙设计大多忽视了面板所起的作用^[10-11],但部分学者认为面板对挡墙的结构力学行为具有一定影响。Tatsuoka^[12]简要分析了模块式面板、返包式面板和整体式面板加筋土挡墙的结构特点。徐鹏等^[13]进行了整体式面板与分离式面板加筋土挡墙的离心试验,发现前者筋-土界面的摩擦系数小于后者。叶观宝等^[14]使用有限元软件 Plaxis 研究了返包式面板、模块式面板和整体式面板对路堤式加筋土挡墙力学特性的影响。现有针对挡墙面板形式的研究主要集中于室内试验及数值模拟,然而由于其理想化的条件,很难真实反映不同面板形式加筋土挡墙的结构行为。对此,本文依托成昆铁路复线加筋土挡墙试验段进行现场试验,对

比分析了整体式面板、内嵌返包结构的模块式面板、模块式面板 3 种加筋土挡墙的结构变形及墙背土压力变化。分析其结构差异性,为以后不同形式加筋土挡墙的修建提供理论依据及工程借鉴。

2 试验工程概况

试验段位于成昆铁路复线(国铁 I 级),其中 DK443+744.65~DK443+764.81 段左侧采用内嵌返包结构的模块式面板加筋土挡墙,右侧采用模块式面板加筋土挡墙,选取 DK443+760 左、右两侧进行监测;DK443+764.81~DK443+894.56 段左右两侧均采用整体式面板加筋土挡墙,选取 DK443+860 左侧进行监测。

挡墙施工完成后,于 2018 年 10 月 31 日发生地震 1,震级为 5.1 级,震源(北纬 27.7°,东经 102.08°)深度为 19 km,距现场 10 km;于 2018 年 11 月 20 日发生地震 2,震级为 3.3 级,震源(北纬 27.69°,东经 102.07°)深度为 14 km,距现场 12 km。对此研究了地震对不同形式加筋土挡墙的影响。

2.1 填料及筋材特性

(1) 填料采用圆砾石,其物理力学指标见表 1。分层填筑并碾压,压实度 $\geq 92\%$ 。

表 1 填料物理力学指标
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

$\omega_{opt}/\%$	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
7.5	2.31	5	38.5

注: ω_{opt} 为最优含水率, ρ_{dmax} 为最大干密度, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

(2) 土工格栅采用高密度聚乙烯(HDPE)单向拉伸塑料土工格栅,物理力学指标见表 2。

表 2 土工格栅物理力学指标
Table 2 Physical and mechanical parameters of geogrid

横肋间距 /cm	纵向抗拉强度 /(kN · m ⁻¹)	2%应变对 应的强度 /(kN · m ⁻¹)	5%应变对 应的强度 /(kN · m ⁻¹)	峰值应变 /%
30	120	33	65	11.5

2.2 挡墙结构特点

挡墙高为 6.6 m, 基底深度 2 m 范围内换填圆砾石, 墙面坡率均为 1:0.05, 墙面厚度均为 0.3 m。加筋材料竖向间距为 0.3 m, 每 1.2 m 进行一次通铺, 使两侧挡墙形成对拉的稳定结构。挡墙靠近墙面板宽度为 1.5 m 范围内使用轻型机械夯实, 其余部分使用重型振动压路机压实。

2.2.1 新型整体式面板加筋土挡墙 (简称整体式挡墙)

先进行加筋体填筑, 在加筋体内埋设 HPB300 镀锌钢筋 ($\Phi 25$ mm), 间距为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。埋入加筋体的锚固长度为 3 m, 钢筋末端焊接水平向的镀锌 L 型钢。前端伸出加筋体外, 起到连接面板与加筋体的作用。在加筋体外绑扎双层钢筋网, 作为面板骨架, 之后进行整体墙面的浇筑。

加筋体内非通铺格栅长度相等, 格栅总长度为 10 m, 其中每层平铺部分长度为 6 m, 包裹砾石袋部分长度为 1 m, 返包回折部分长度为 3 m, 返包格栅与平铺格栅采用扁形高密度聚乙烯连接棒连接。整体式挡墙结构形式如图 1(a)所示。

2.2.2 内嵌返包结构的模块式面板加筋土挡墙 (简称模块加返包式挡墙)

面板模块采用 C35 混凝土预制 ($42\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$), 模块预留直径为 6 mm 的插销孔。模块之间采用竖向钢筋连接, 插销孔内灌注 M30 水泥砂浆。模块面板后设返包加筋体, 通过土工格栅与面板连接。加筋体与面板之间设置宽 30 cm 的粗砂反滤层。

土工格栅按使用功能分为受力格栅和构造格栅, 受力格栅用于填料加筋和包裹砾石袋, 构造格栅主要用于连接面板与加筋体。受力格栅每层平铺长度为 6 m, 砾石袋包裹长度为 1 m, 返包回折长度为 3 m。构造格栅平铺长度为 4 m, 回折长度为 2 m。格栅回折后, 回折点形成环形, 与模块内侧预埋的环形钢筋平行放置。采用直径为 25 mm 的 HPB300 镀锌钢筋水平向穿过环形钢筋, 连接面板和构造格栅。格栅的平铺部分与回折部分采用连接棒连接。模块加返包式挡墙结构形式如图 1(b)所示。

2.2.3 模块式面板加筋土挡墙 (简称模块式挡墙)

模块样式、面板-格栅连接方式与模块加返包式挡墙相同。每层土工格栅平铺长度为 6 m, 回折长度为 3 m。模块式面板内侧设置宽度为 30 cm 的

粗砂反滤层。模块式挡墙结构形式如图 1(c)所示。

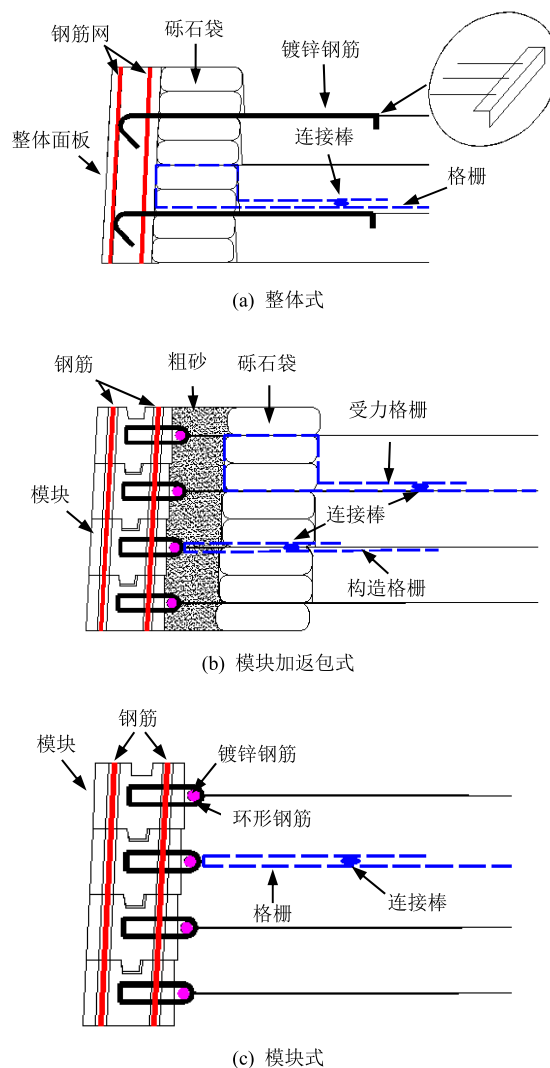


图1 不同墙面形式加筋土挡墙的结构简图
Fig.1 Schematic of reinforced retaining wall with different panels

3 试验仪器布置

在挡墙内加筋体第 2、6、10、14、17、20 层埋设监测传感器。在整体式挡墙、模块加返包式挡墙砾石袋背部和模块式挡墙墙面背部的水平、竖直方向分别安装钢弦式土压力盒, 监测垂直土压力和水平土压力。在不同位置土工格栅上安装柔性位移计, 监测格栅变形。由于内容限制, 本文仅讨论临近墙面处格栅应变, 其他部位格栅应变会在后续论文分析。在墙面处安装测斜探头, 监测墙面位移。在路肩基底和墙顶分别埋设单点沉降计, 监测路肩处挡墙压缩量。传感器布置具体位置见图 2, 传感器参数见表 3。

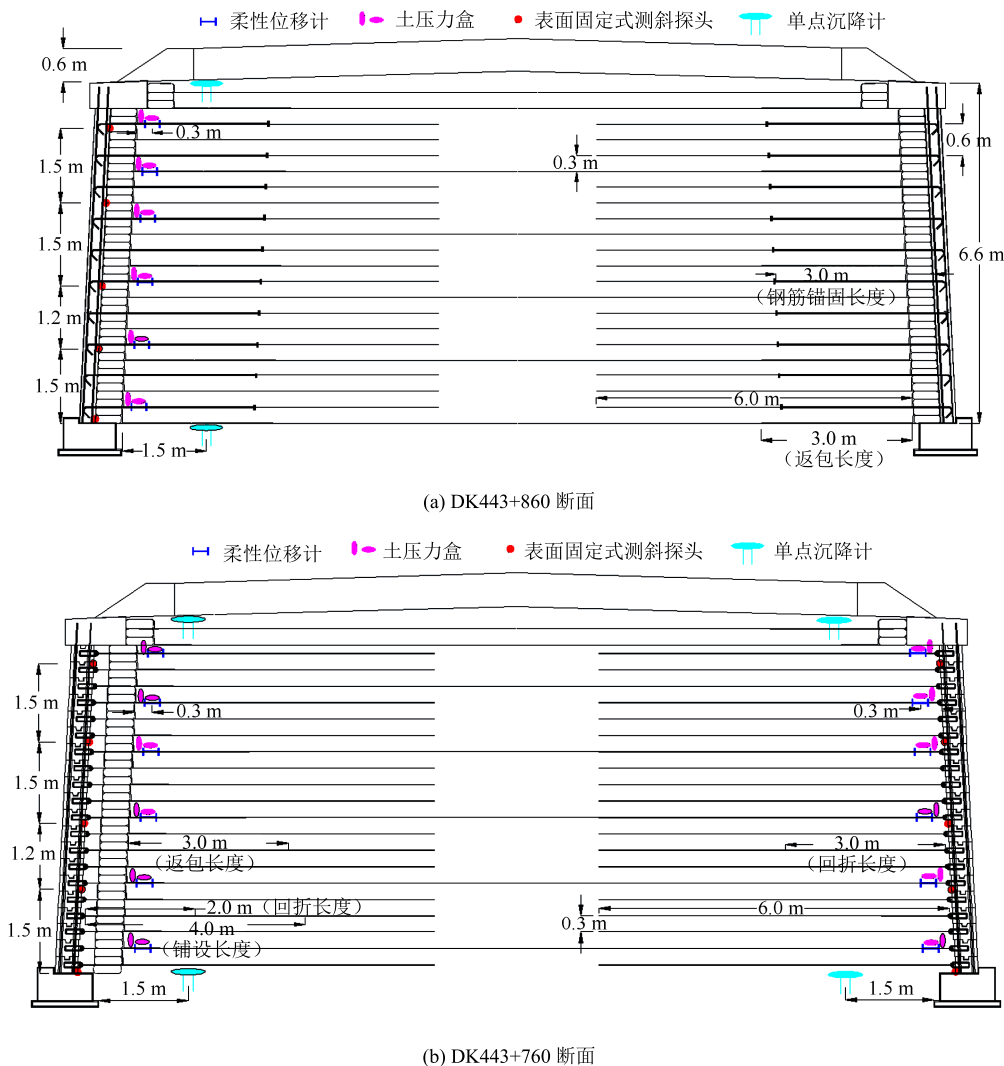


图 2 断面及传感器布置

Fig.2 Sections and sensor layouts

表 3 传感器参数
Table 3 Sensor parameters

名称	型号	量程	精度
柔性位移计	JMDL-2405AT	50 mm	0.01 mm
土压力盒	JMZK-5040A	4 MPa	0.001 MPa
表面固定式测斜探头	JMQJ-7315ADX	$\pm 15^\circ$	0.005°
单点沉降计	JMDL-4740A	400 mm	0.1 mm

4 试验结果及分析

4.1 墙背土压力

将挡墙在不同时期的墙背土压力绘制成曲线,并将实测水平土压力与静止土压力、郎肯主动土压力进行对比,将实测垂直土压力与土体自重进行对比,结果如图 3~5 所示。由图可知:

(1) 整体式挡墙和模块式挡墙墙背土压力沿墙高近似呈 M 型。由于填土厚度的增加,由下至上土压力整体呈现增长的趋势。模块加返包式挡墙墙背

土压力沿墙高近似呈倒 S 型。在墙高为 1~3 m 处土压力相对较小,主要是由于返包体与面板之间存在粗砂反滤层,反滤层可压缩空间较大,返包体产生一定位移,释放背部土压力,土压力在反滤层进行了重新分布,并作用于模块式墙面和返包体,从而使墙背土压力呈现不同趋势。

(2) 整体式挡墙墙背水平土压力在 0~20 kPa 之间,均小于郎肯主动土压力和静止土压力;垂直土压力在 0~110 kPa 之间,上部大于土体自重,下部小于土体自重。整体式挡墙分阶段施工,先进行返包体的填筑;填筑完成后,在面板浇筑前,将砾石袋作为临时面板,其相对土体为柔性边界,并产生水平位移,释放了背部土压力,从而使水平、垂直土压力较小。挡墙上部填筑时间短,返包体产生位移相对较小,使其实测值接近或大于计算值,挡墙下部填筑时间长,返包体产生位移相对较大,使其实测值小于计算值。

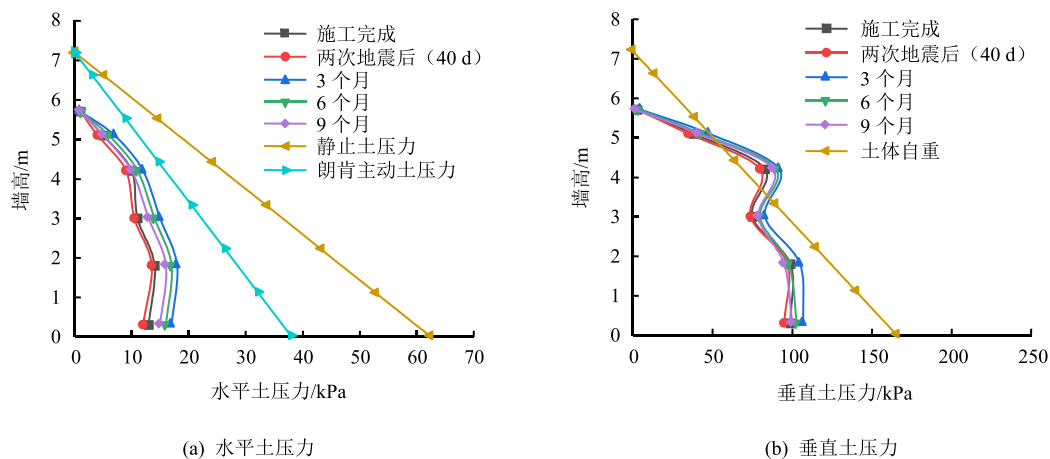


图 3 整体式挡墙墙背土压力

Fig.3 Earth pressures on wall back of reinforced retaining wall with full-height rigid panel

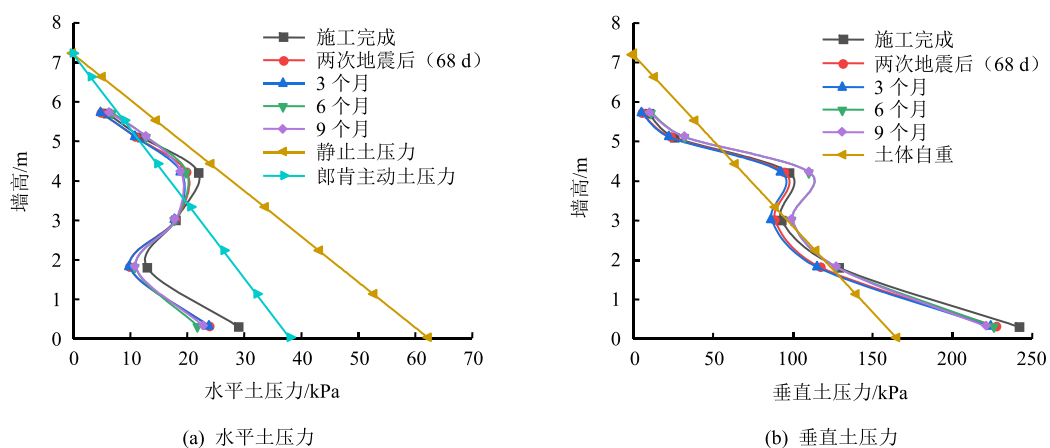


图 4 模块加返包式挡墙墙背土压力

Fig.4 Earth pressures on wall back of reinforced retaining wall with modular panel embedded return package structure

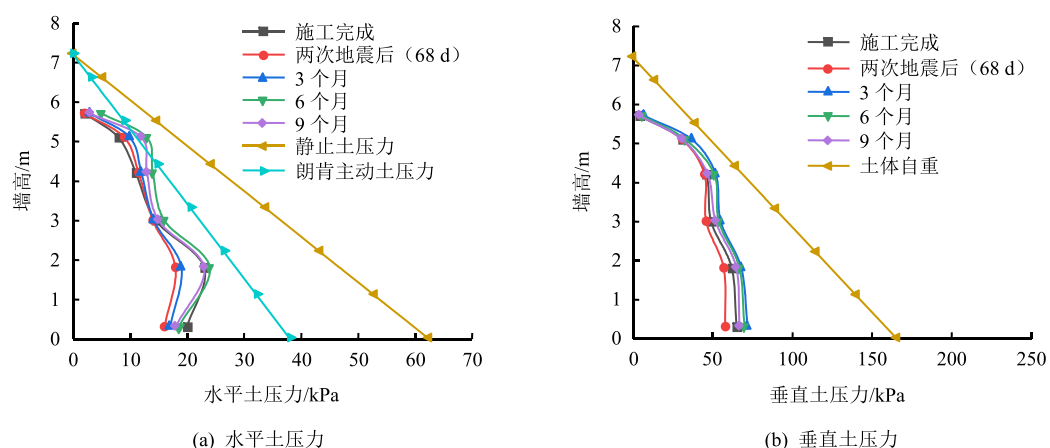


图 5 模块式挡墙墙背土压力

Fig.5 Earth pressures on the wall back of reinforced retaining wall with modular panel

模块加返包式挡墙墙背水平土压力在 10~30 kPa 之间,挡墙上部实测值大于朗肯主动土压力,接近静止土压力,下部实测值小于朗肯主动土压力。

垂直土压力在 0~250 kPa 之间,接近或大于土体自重。由于砾石袋相对土体为柔性边界,且水平土压力在反滤层里进行了重分布,所以呈现了土压力在

挡墙上、下部分布类似的情况。其竖向土压力相对较大,可能是由于双面加筋土挡墙两侧为不同墙面形式,结构并不对称,加上施工期及工后两侧挡墙产生不同的水平位移,从而产生了偏心力矩所致。

模块式挡墙墙背水平土压力在 0~25 kPa 之间。挡墙上部实测值接近郎肯主动土压力,下部实测值小于郎肯主动土压力。垂直土压力在 0~80 kPa 之间,沿墙高小于土体自重。由于模块相对土体为刚性边界,所以水平土压力释放较少,水平土压力相对较大。由于模块式挡墙的面板整体性差,面板不同部位产生不同的水平位移,尤其是挡墙下部填筑完成时间长,水平位移较大,从而使其垂直土压力较小。

工后 9 个月,3 类挡墙水平土压力、垂直土压力的实测值与计算值比值分别如表 4、5 所示。

表 4 工后 9 个月水平土压力实测值与计算值比值
Table 4 Ratios of measured values to calculated values of horizontal earth pressure in 9 months after construction

挡墙类型	与郎肯主动土压力比值	与静止土压力比值
整体式	3.8%~38.4%	6.3%~63.0%
模块加返包式	23.4%~73.0%	38.5%~119.7%
模块式	15.4%~65.9%	25.2%~108.0%

表 5 工后 9 个月垂直土压力实测值与计算值比值
Table 5 Ratios of measured values to calculated values of vertical earth pressure in 9 months after construction

挡墙类型	与土体自重比值
整体式	5.8%~127.6%
模块加返包式	31.9%~161.0%
模块式	11.6%~68.2%

(3) 发生两次地震后,3 类挡墙的墙背土压力有所减小,之后随着龄期的增加,整体有先增大再减小的趋势。相对于施工完成时,两次地震后,整体式挡墙水平土压力减小 3.6%~20.0%,垂直土压力减小 2.0%~7.9%。模块加返包式挡墙水平土压力减小 0~33.3%,垂直土压力减小 3.1%~40.0%。模块式挡墙水平土压力减小 0~21.7%,垂直土压力减小 0~10.8%。

地震后,挡墙整体沉降增加,墙面板外移,墙背土压力得到一定程度的释放;随后,土压力有所增长,主要因为此段时间墙面板有所内倾(与后文墙面水平位移监测结果一致),并且由于挡墙为双侧对拉的稳定结构,在墙后土体固结沉降过程中,土压力得到增大。

4.2 侧向土压力系数

规范规定的侧向土压力系数是在理想状态下得

到的计算值,实测侧向土压力系数往往和计算值存在偏差。根据实测值与计算值的比较,得到面板形式对其侧向土压力系数的影响。

根据墙背实测水平土压力 σ_h 和垂直土压力 σ_v , 可求得墙背处实际侧向土压力系数 k_i :

$$k_i = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (1)$$

我国《铁路路基支挡结构设计规范》(TB10025—2006) [15]规定侧向土压力系数为

$$k_i = \begin{cases} k_0 \left(1 - \frac{h_i}{6}\right) + k_a \left(\frac{h_i}{6}\right), & h_i \leq 6 \\ k_a, & h_i \geq 6 \end{cases} \quad (2)$$

$$k_0 = (1 - \sin \varphi) \quad (3)$$

$$k_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

式中: h_i 为距墙顶距离; k_0 为静止土压力系数; k_a 为主动土压力系数; φ 为填料内摩擦角。

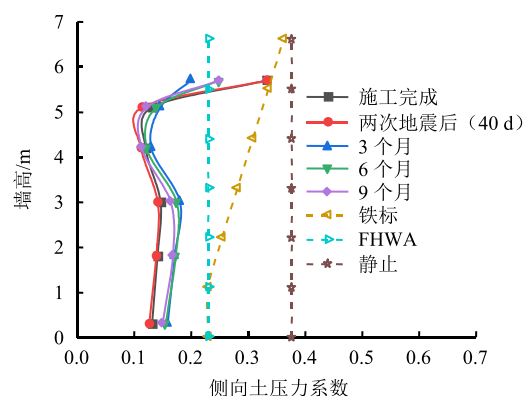
美国 FHWA-NHI-10-24 [16]规定侧向土压力系数为

$$k_i = k_a \quad (5)$$

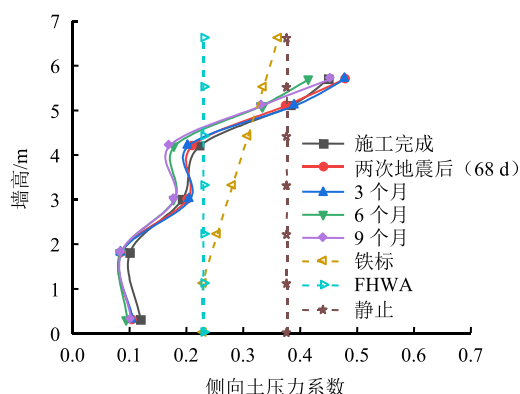
根据实际值、铁标计算值、FHWA 计算值和静止土压力系数绘制侧向土压力系数曲线,如图 6 所示。由图可知:

(1) 整体式挡墙的侧向土压力系数沿墙高变化较小,整体趋势类似于 FHWA 计算值趋势,且小于 FHWA 计算值,基本处于 0.1~0.2 之间。模块加返包式挡墙侧向土压力系数随挡墙高度整体呈现增大的趋势,挡墙中、下部侧向土压力系数小于 FHWA 计算值,上部接近或大于静止土压力系数,整体趋势类似于铁标计算值趋势。模块式挡墙沿墙高的侧向土压力系数大部分处在 FHWA 计算值与静止土压力系数之间,整体趋势类似于铁标计算值趋势。

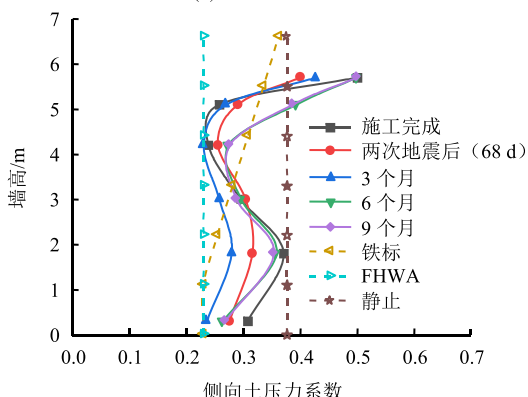
(2) 3 类挡墙都在挡墙上部出现了侧向土压力系数偏大的现象。在压实过程中会产生较大的水平土压力,卸载后仍有残余水平土压力。挡墙中、下部由于填筑时间较长,压实度较大,且因压实产生的残余水平土压力随时间已消散,致使中、下部侧向土压力系数相对较小。而挡墙上部因压实产生的残余水平土压力还未消散,致使水平土压力偏大;因压实度相对较小,加上格栅的托举作用显著,导致垂直土压力偏小,从而致使挡墙上部侧向土压力系数偏大。



(a) 整体式



(b) 模块加返包式



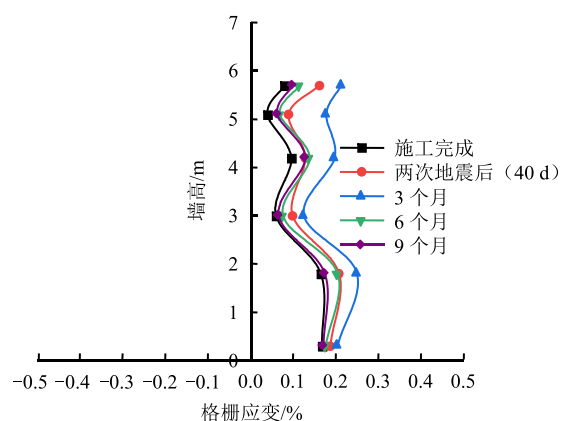
(c) 模块式

图6 不同面板形式加筋土挡墙的侧向土压力系数
Fig.6 Lateral earth pressure coefficients of reinforced retaining wall with different panels

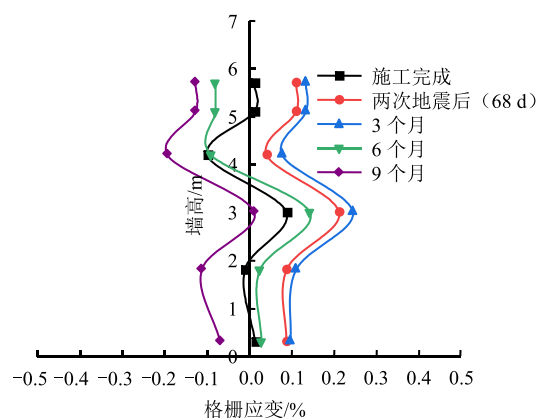
4.3 土工格栅应变

在施工完成后, 由于土压力变化及墙体位移的影响, 墙背处土工格栅应变会产生较为明显的改变。加筋土挡墙墙背处不同加筋层的土工格栅应变沿墙高的分布规律如图7所示。由图可知:

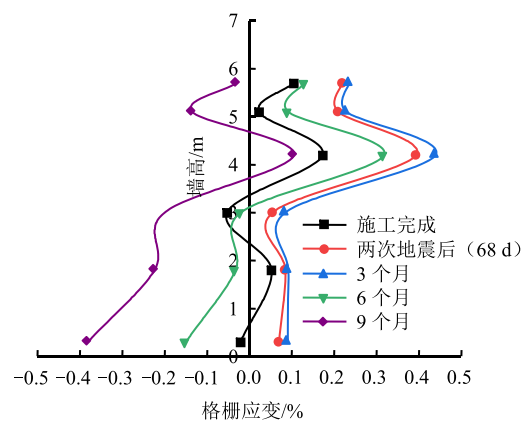
(1) 不同面板形式加筋土挡墙内的土工格栅应变沿墙高均呈非线性变化。土工格栅埋设于土体内, 起到摩擦加筋的作用, 靠与土体的咬合力和摩擦力来提供拉力用以抵消墙背处的水平土压力。由于墙背处土体变化不规则, 水平土压力沿墙高为非线性变化, 因此格栅应变亦呈非线性变化。



(a) 整体式



(b) 模块加返包式



(c) 模块式

图7 不同面板形式加筋土挡墙内的土工格栅应变
Fig.7 Geogrid strains of reinforced retaining wall with different panels

(2) 格栅应变变化率由小到大依次为整体式挡墙<模块加返包式挡墙<模块式挡墙。施工完成时, 由于前期土体填筑和机械碾压的作用, 使格栅产生一定的变形。施工完成后, 由于整体式挡墙稳定性高、变形小, 内部土体相对密实, 所以格栅应变的变化率较低; 模块加返包式挡墙和模块式挡墙墙面易发生变形, 使其墙后土体变形较大, 从而导致墙后格栅应变变化率较大。

(3) 两次地震后, 格栅应变有所增大, 之后从施工完后成的 3~9 个月, 格栅应变逐渐减小。由于两次地震产生的瞬时地震波增加了土体的密度, 使土体对格栅的张拉作用增大, 从而导致应变增长。格栅应变随时间而降低, 如果考虑地震作用, 可能是因为地震荷载产生的土体压密作用使格栅应变到达一定值后, 格栅产生了应力松弛; 如果不考虑地震作用, 可能因为施工填筑阶段格栅和土体产生瞬时应变, 在施工完成后一定时期内格栅发生收缩现象。格栅应变最终为负值, 主要是由于上覆土体产生的不均匀回弹变形, 对其进行压缩所致。

两次地震后, 相对施工完成时, 整体式挡墙格栅应变增加 0.02%~0.08%, 模块加返包式挡墙格栅应变增加 0.07%~0.14%, 模块式挡墙格栅应变增加 0.03%~0.22%。工后 9 个月内, 整体式挡墙格栅应变最大值为 0.25%, 模块加返包式挡墙格栅应变最大值为 0.25%, 模块式挡墙格栅应变最大值为 0.44%, 远小于格栅峰值应变, 即 11.5%。

4.4 路肩墙体压缩

在挡墙路肩部位测得墙顶沉降 S_1 和基底沉降 S_2 , 将路肩墙体压缩量 ΔS 表示为

$$\Delta S = |S_1 - S_2| \quad (6)$$

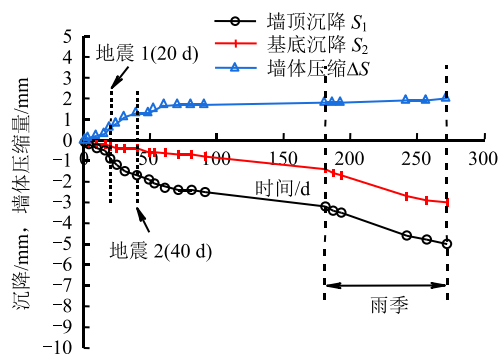
绘制挡墙路肩基底沉降、墙顶沉降和墙体压缩量随时间的变化曲线, 如图 8 所示。由图可知:

(1) 挡墙路肩墙顶沉降大于路肩基底沉降。因为基底沉降主要发生在挡墙填筑期, 在挡墙填筑完成后, 基底已进行较长时间的固结, 沉降相对较小, 而墙体固结时间较短, 填土密实度小, 从而导致墙顶的沉降较大。

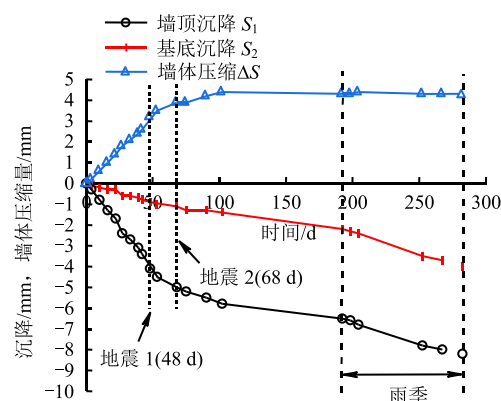
(2) 随着时间的增加, 挡墙路肩墙顶沉降、路肩基底沉降和墙体压缩量逐渐增加, 在工后前 50 d 时间内增加速率较快, 随后速率逐渐趋于平缓, 进入雨季之后增加速率再次增大。施工刚完成时, 挡墙下部孔隙水压力逐渐消散; 发生固结时, 墙顶沉降速率相对较大; 加上两次地震波的作用, 使土体趋于密实, 加速了固结沉降。随着时间的增加, 固结沉降逐渐趋于稳定。在进入雨季之后, 由于降雨的原因, 使地基和挡墙内部含水率增加。一方面软化地基, 减小了地基承载力; 另一方面增加了墙体的自重应力, 从而致使墙顶沉降、基底沉降和墙体压缩量的增加速率再次增大。

(3) 第 1 次地震后, 整体式挡墙墙体压缩量增加了 0.3 mm, 模块加返包式挡墙墙体压缩量增加了 0.6 mm, 模块式挡墙墙体压缩量增加了 0.5 mm; 第

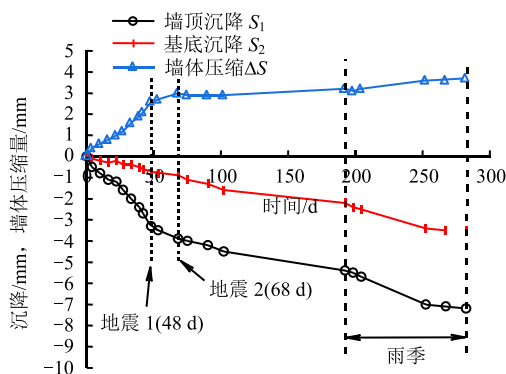
2 次地震后, 整体式挡墙墙体压缩量增加了 0.2 mm, 模块加返包式挡墙墙体压缩量增加了 0.4 mm, 模块式挡墙墙体压缩量增加了 0.3 mm。施工完成后 9 个月, 整体式挡墙墙体累计压缩 2 mm; 模块加返包式挡墙墙体累计压缩 4.2 mm; 模块式挡墙墙体累计压缩 3.7 mm。



(a) 整体式



(b) 模块加返包式



(c) 模块式

图 8 不同面板形式加筋土挡墙的墙体压缩量
Fig.8 Wall compressions of reinforced retaining wall with different panels

整体式挡墙面板刚度大, 且与加筋体之间通过钢筋连接(刚性连接), 使挡墙具有更好的整体性, 能有效减小路肩部分的墙体压缩。另外, 两类挡墙

为模块垒砌的墙面板,面板刚度相对较低,整体性较差。模块式挡墙墙后结构相对简易,墙面板通过格栅与填土直接形成整体(柔性连接),结构完整性不如整体式挡墙。模块加返包式挡墙通过格栅与墙后加筋体相连(柔性连接),且中间存在粗砂反滤层,结构相对复杂,在地震荷载作用下易发生变形。

4.5 墙面水平位移

不同面板形式加筋土挡墙从施工完成到工后9个月的墙面水平位移变化及墙面结构简化原理如图9所示。由图可知:

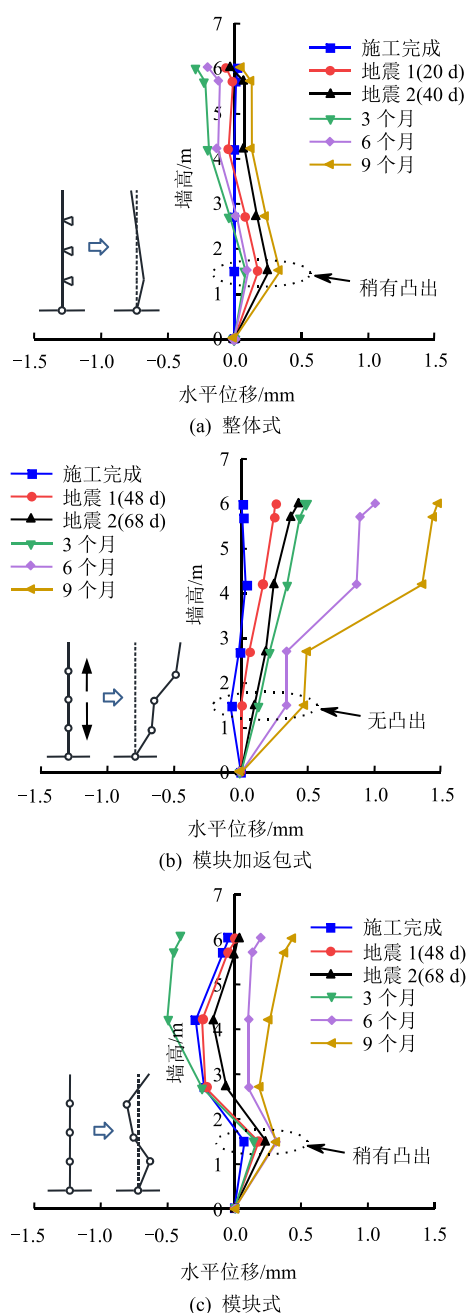


图9 不同面板形式加筋土挡墙的墙面水平位移
Fig.9 Wall horizontal displacements of reinforced retaining wall with different panels

(1) 整体式墙面板及与返包体连接的镀锌钢筋可近似看作一端铰接的连续梁结构,具有完整性和连续性,抗震性能好,在墙背土压力的作用下产生较小的位移。由于模块式墙面采用分离的模块垒砌而成,模块之间连接较差,可近似看作连续铰接的杆系结构。其中,模块加返包式挡墙面板和返包体之间存在粗砂反滤层,墙后土压力传递到反滤层时进行上下传递,发生应力重分布,使其较均匀得分布在墙面板上,因此墙面板在土压力的作用下由下至上逐渐发生外移。但由于反滤层为粗砂,密实度较小,且墙面与其后返包体之间由格栅连接,致使其整体性相对较差,抗震性能较弱,墙面位移较大。模块式挡墙墙面板直接承受来自土体的水平土压力,由于压力的不均匀,使类似铰接的墙面模块发生不规则的外移,墙面与墙后土体使用格栅直接相连,其稳定性及墙面变形大小处于另两类挡墙之间。

(2) 整体式和模块式挡墙墙面板在第2个测点(墙高为1.5 m)处稍有凸出,类似一般挡墙 $0.3H$ 的规律。由于整体式挡墙墙面板刚度大、稳定性高,此处不易发生破坏;模块式挡墙墙面板由于其整体性较差,在长期使用过程中此处易发生破坏,需注意墙面板位移大小;模块加返包式挡墙,由于土压力在反滤层的重分布,在此处没有凸出的现象。

(3) 发生两次地震后,由于墙内土体趋于密实,墙面发生外移。随后随着时间的增加,墙面整体最终呈外移趋势。工后产生的墙面水平位移由小到大依次为整体式挡墙<模块式挡墙<模块加返包式挡墙。两次地震后,整体式挡墙墙面水平位移增加 $0\sim 0.26$ mm,模块加返包式挡墙墙面水平位移增加 $0\sim 0.42$ mm,模块式挡墙墙面水平位移增加 $0\sim 0.17$ mm。9个月内,整体式挡墙墙面最大水平位移为 0.34 mm,模块加返包式挡墙墙面最大水平位移为 1.47 mm,模块式挡墙墙面最大水平位移为 0.50 mm。

5 结论

通过对比分析成昆铁路复线不同墙面形式加筋土挡墙的结构行为及力学特性,得到以下结论:

(1) 整体式挡墙具有良好的抗震性能,与另两类挡墙相比,能有效减小挡墙的变形,但施工相对复杂,其适用于地震区;模块加返包式挡墙由于具有反滤层,使其由下至上均匀产生位移,无“鼓肚”现象,墙面不易发生破坏,但施工也相对复杂;模块式挡墙施工便捷,但墙面模块位移不规则,易发生墙面破坏,后两类挡墙适用于非地震区。

(2) 整体式挡墙和模块式挡墙墙背土压力沿墙高近似呈 M 型。模块加返包式挡墙墙背土压力沿墙高近似呈倒 S 型。整体式挡墙的侧向土压力系数小于 FHWA 计算值; 模块加返包式挡墙中、下部侧向土压力系数小于 FHWA 计算值, 上部接近或大于静止土压力系数; 模块式挡墙侧向土压力系数处在 FHWA 计算值与静止土压力系数之间。

(3) 不同面板形式加筋土挡墙内的土工格栅应变沿墙高均呈非线性变化。挡墙路肩墙顶沉降、路肩基底沉降和墙体压缩量随着时间的增加而逐渐增加。

(4) 发生两次地震后挡墙墙背土压力减小, 格栅应变增大, 墙体压缩量增大, 墙面发生外移。

参考文献

- [1] 吴迪, 吴建建, 刘宝臣. 顶部交通荷载对加筋土挡墙工作性能的影响研究[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(3): 57-65.
WU Di, WU Jian-jian, LIU Bao-chen. Research on the influence of top traffic load on the working performance of reinforced retaining wall[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2019, 43(3): 57-65.
- [2] YONEZAWA T, YAMAZAKI T, TATEYAMA M, et al. Design and construction of geosynthetic-reinforced soil structures for Hokkaido high-speed train line[J]. **Transportation Geotechnics**, 2014, 1(1): 3-20.
- [3] 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.
- [4] RAZEGHI H R, VISWANADHAM B V S, MAMAGHANIAN J. Centrifuge and numerical model studies on the behaviour of geogrid reinforced soil walls with marginal backfills with and without geocomposite layers[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2019, 47(5): 671-684.
- [5] MEHRJARDI G H T, KHAZAEI M. Scale effect on the behaviour of geogrid-reinforced soil under repeated loads[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2017, 45(6): 603-615.
- [6] PORTELINHA F H M, ZORNBERG J G. Effect of infiltration on the performance of an unsaturated geotextile-reinforced soil wall[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2017, 45(3): 211-226.
- [7] 杨果林, 林宇亮, 李昀. 新型加筋土挡墙变形特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 223-227.
YANG Guo-lin, LIN Yu-liang, LI Yun. Test study on dynamic deformation behavior of new reinforced earth retaining walls[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2010, 29(1): 223-227.
- [8] 王家全, 张亮亮, 赖毅, 等. 加筋土挡墙静动力学特性大模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 497-505.
WANG Jia-quan, ZHANG Liang-liang, LAI Yi, et al. Large-scale model tests on static and dynamic mechanical characteristics of reinforced earth retaining wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 497-505.
- [9] 王贺, 杨广庆, 熊保林, 等. 模块面板式加筋土挡墙结构行为试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 487-498.
WANG He, YANG Guang-qing, XIONG Bao-lin, et al. An experimental study of the structural behavior of reinforced soil retaining wall with concrete-block panel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 487-498.
- [10] GAUDIO D, MASINI L, RAMPELLO S. A performance based approach to design reinforced earth retaining walls[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2018, 46(4): 470-485.
- [11] GRAEME D, SKINNER R, KERRY R. Design and behaviour of a geosynthetic reinforced retaining wall and bridge abutment on a yielding foundation[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2005, 23(3): 234-260.
- [12] TATSUOKA F. Geosynthetic-reinforced soil structures for railways and roads: development from walls to bridges[J]. **Innovative Infrastructure Solutions**, 2019, 41(4): 49-67.
- [13] 徐鹏, 蒋关鲁, 王珣, 等. 面板对加筋土挡墙影响的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1427-1432.
XU Peng, JIANG Guan-lu, WANG Xun, et al. Centrifuge model tests on influence of facing on reinforced soil retaining walls[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(4): 1427-1432.
- [14] 叶观宝, 张振, 邢皓枫, 等. 面板对路堤式加筋土挡墙力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 881-886.
YE Guan-bao, ZHANG Zhen, XING Hao-feng, et al. Influence of facing on mechanical behavior of reinforced retaining wall for embankment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 881-886.
- [15] 铁道第二勘察设计院. TB10025—2006 铁路路基支挡结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
The Second Railway Survey and Design Institute of China Railway. TB10025—2006 Code for design on retaining engineering structure of railway subgrade[S]. Beijing: China Railway Publishing Press, 2006.
- [16] BERG R R, CHRISTOPHER B R, SAMTANI N C. FHWA-NHI-10-024 Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes[R]. Washington D C: U.S. Department of Transportation Federal Highway Institute Federal Highway Administration, 2011.