

桥跨荷载下加筋土桥台变形特征 数值模拟研究

沈盼盼

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 本文采用二维有限差分数值模拟方法 FLAC 2D, 对桥跨结构荷载作用下加筋土(GRS)桥台的变形特征进行了研究, 具体分析了筋材刚度以及加筋间距两种影响因素作用下桥台砌块面板侧向变形、桥台顶部沉降以及桥台体积变形。结果表明: (1) 桥跨结构荷载作用使得加筋土桥台砌块面板发生最大侧向变形的位由自重荷载下的桥台中部发生明显上移; (2) 由于桥跨结构荷载是一个荷载值较高的集中荷载, 使得桥跨结构沉降大于综合引道, 桥跨结构末端与引道连接处存在差异沉降; (3) 桥跨结构荷载作用下, 加筋土桥台的体积变形不为零, 桥台的竖向压缩体变大于侧向膨胀体变; (4) 筋材刚度的增大或加筋间距的减小可有效减小加筋土桥台在桥跨结构荷载下产生的砌块面板侧向变形以及顶部沉降, 进而使得加筋土桥台的体变曲线进一步远离“零体变”假设曲线。

关键词: 土工合成材料; 加筋土; 桥台; 桥跨结构荷载; 变形; 数值模拟

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)04-0289-06

Numerical simulation on deformation characteristics of geosynthetic-reinforced soil (GRS) abutments under bridge slab loading

SHEN Pan-pan

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China;

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This study conducted two-dimensional finite difference numerical analyses using FLAC 2D to investigate the deformation characteristics of geosynthetic-reinforced soil (GRS) abutments under bridge slab loading in terms of the lateral facing displacement, the settlement at the top of the abutment, and the volumetric strain of the abutment. The investigated influencing factors included both reinforcement stiffness and spacing. The results show that: (1) the location of the maximum lateral facing displacement moved upwards due to bridge slab loading applied on the top of the GRS abutment. (2) Differential settlements happened at the end of the bridge slab and the bridge slab settled more than the integrated approach way as a consequence of the high concentrated load applied on top of the GRS abutment. (3) Under bridge slab loading, the GRS abutment had more vertical compression than lateral deflection and the volumetric strain of the GRS abutment was found not to follow the zero volume-change assumption. (4) Increasing reinforcement stiffness or reducing reinforcement spacing could effectively reduce both the lateral facing displacements and the settlements at the top of the GRS abutment induced by bridge slab loading, resulting in the volumetric strain of the GRS abutment further away from the zero volume-change line.

Key words: geosynthetics; geosynthetic-reinforced soil (GRS); abutment; bridge slab loading; deformation; numerical simulation

0 引言

土工合成材料加筋土技术以其适应性强、造价

经济、低碳环保等优势, 在岩土工程界得到广泛应用。近些年来, “土工合成材料加筋土柔性桥台”(以下简称加筋土桥台) 逐渐受到人们关注。加筋土桥

台因在施工中保证了加筋土结构所选用的填料压实度与路堤填土相同,可基本消除桥台与路基之间的差异沉降,从而消除大部分中小跨度桥梁桥头跳车问题。相比桩承桥台,采用加筋土桥台可以减少16.2%的造价^[1];此外,由于施工技术相对简单,可以有效减少碳排放。因此,加筋土桥台兼具经济性 & 环保性等优点,可应用于解决桥台-路堤间差异沉降控制的技术难题^[2]。

区别于顶部无荷载作用或受较小均布荷载作用的一般支挡结构,加筋土桥台作为承重结构,其顶部承受较高的桥跨结构局部荷载作用^[2]。因此,在设计建造加筋土桥台时,不仅对其在极限状态下的承载能力有着很高的要求,对其在工作状态下的变形也有着严苛的标准,以保证桥梁道路充足的安全性和良好的工作性能。

现有的研究大多集中在加筋土桥台的承载能力方面,提出了诸多加筋土体极限承载力的计算方法,如WU等^[3]、XU等^[4]、徐超等^[5]。大量模型试验^[3-11]以及原型试验^[12]结果也证实,加筋土桥台的极限承载能力远超一般中小跨度桥梁荷载,完全能够满足实际工程要求。然而,针对加筋土桥台在局部荷载作用下的变形特征及相关变形计算理论的研究却远远滞后于其极限承载力的研究。迄今为止,美国联邦公路局发布的加筋土柔性桥台设计及建造指南^[13]是唯一一本提供有关加筋土柔性桥台变形验算方法的技术标准。该指南中推荐采用大型加筋土微型墩试验(GRS mini-pier test)^[6]确定某一荷载作用下加筋土桥台顶部桥梁基础的沉降,并基于“零体积应变”假定计算加筋土桥台面板最大侧向变形。然而,加筋土微型墩试验是一种经验方法,缺乏坚实的筋-土相互作用机理作为理论基础,局限性强,缺陷明显。因此有必要对局部荷载作用下加筋土桥台的变形特征开展进一步研究。

本文以加筋土桥台为研究对象,开展二维有限差分数值模拟计算,旨在研究不同影响因素下加筋土桥台受顶部桥跨结构荷载作用而产生的变形特征,以为完善加筋土桥台设计计算理论提供参考。

1 数值模型简介

1.1 数值模型几何尺寸

图1给出了采用FLAC 2D软件建立的加筋土桥台的二维数值模型,由基岩、加筋土桥台、被挡土体区域、土工泡沫、桥跨结构以及桥头综合引道构成。加筋土桥台高 $H=6\text{ m}$,由29层砌块面板、面

板后的加筋土区域、上部桥梁基座以及土工泡沫构成。加筋土体区域筋材长度 $L_r=4.9\text{ m}$,筋材间距 $S_r=0.2\text{ m}$,上部承载区域铺设5层长 $L_{rb}=1.6\text{ m}$ 的辅筋加密,辅筋加筋间距 $S_{vb}=0.1\text{ m}$ 。加筋土桥台采用的砌块面板长 0.4 m ,横截面尺寸为 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ (宽×高)。加筋土桥台顶部桥梁基座前放置土工泡沫,避免桥跨结构与砌块面板直接接触,土工泡沫的横截面几何尺寸为 $0.4\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ (宽×高),土工泡沫后由筋材反包填土形成桥梁基座。桥跨结构直接放置于桥梁基座上,桥梁基座宽度 $b=0.6\text{ m}$,桥梁基座距砌块面板背部的偏移距 $a_b=0.2\text{ m}$ 。根据几何对称性,放置于加筋土桥台上的桥跨结构长 7.5 m ,厚为 0.4 m 。桥跨结构背后填筑有由筋材反包填土形成的桥头综合引道,反包筋材长度为 5.4 m 。为避免边界效应对数值模拟的影响,数值模型底部边界选取1.25倍桥台高 H (即基岩厚度= $1.25H$)、数值模型左侧边界选取3.5倍桥台高度 H (即左侧边界距桥台面板距离为 $3.5H$)。数值模型右侧边界则根据桥跨结构对称性选取,右侧边界距桥台面板距离为 6.5 m 。数值模型底部边界施加固定约束,左、右侧边界施加滑动约束。

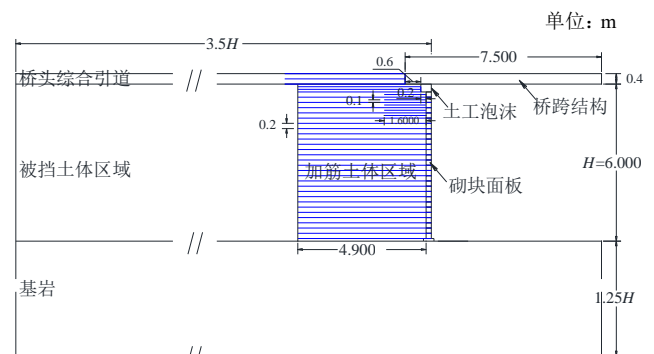


图1 数值模型几何尺寸

Fig. 1 Geometries of the numerical model

1.2 数值模型参数选取、步骤及验证

采用实体单元模拟除筋材外的所有组成部分。加筋土桥台中加筋土体区域填料在数值模拟中采用盖帽 Cap-Yield (CY) 本构模型来模拟,被挡土体区域及桥头综合引道填料采用 Mohr-Coulomb (MC) 本构模型来模拟,其余部分(基岩、砌块面板、土工泡沫、桥跨结构)均采用线弹性本构模型来模拟。采用“梁”结构单元以及“锚索”结构单元模拟筋材,“梁”结构单元以及“锚索”结构均采用线弹性本构模型。其中,“梁”结构单元用来模拟铺设于上下两层砌块面板之间的筋材、铺设于桥梁基座与土工泡沫之间的筋材以及铺设于桥跨结构与桥头综合引道之间的筋材,而“锚索”结构单元用来模拟剩

余铺设于填料内部的筋材。采用“界面”单元模拟不同组成部分之间存在的相互作用，包括加筋土体区域填料-筋材界面、加筋土体区域填料-砌块面板界面、筋材-砌块面板界面（摩擦连接及机械连接）、土工泡沫-筋材/砌块面板/桥跨结构界面等。表 1 给出了采用盖帽模型模拟的加筋区域土体填料参数取值。表 2 给出了剩余用实体单元模拟的各组成部分本构模型及参数取值。表 3 给出了模拟筋材的结构单元参数取值。表 4 给出了各界面单元参数取值。

表 1 盖帽模型参数

Table 1 Parameters for the backfill soil of the reinforced zone using the CY model

参数	单位	数值
密度 ρ	(kg/m ³)	1 650
屈服面参数 α	—	1.0
内摩擦角 φ	(°)	38
剪胀角 ψ	(°)	8
黏聚力 c	kPa	0
乘数因子 R	—	5.9
塑性应变参数 β	—	0.15
参考切线剪切模量 G_{ref}^c	MPa	36.2
参考体积模量 K_{ref}^{iso}	MPa	7.0
幂参数 m	—	0.55
参考围压 p_{ref}	kPa	34.5
泊松比 ν	—	0.2
破坏比 R_f	—	0.9

表 2 剩余实体单元本构模型及参数

Table 2 Constitutive models and parameters for different components used in the numerical model apart from the backfill soil used in the reinforced zone

模拟对象	本构模型	材料参数
被挡土体及桥头综合引道填料	摩尔-库伦	$E=20 \text{ MPa}, \nu=0.3, \varphi=30^\circ, c=20 \text{ kPa}, \rho=1\ 750 \text{ kg/m}^3$
基岩	线弹性	$E=2 \text{ GPa}, \nu=0.2, \rho=2\ 000 \text{ kg/m}^3$
桥跨结构	线弹性	$E=20 \text{ GPa}, \nu=0.2, \rho=2\ 500 \text{ kg/m}^3$
砌块面板	线弹性	$E=20 \text{ GPa}, \nu=0.2, \rho=1\ 250 \text{ kg/m}^3$
土工泡沫	线弹性	$E=1.5 \text{ MPa}, \nu=0.15, \rho=11.2 \text{ kg/m}^3$

注: E 为弹性模量; ν 为泊松比; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; ψ 为剪胀角; ρ 为密度。

表 3 模拟筋材的结构单元参数

Table 3 Parameters for structural elements used to simulate the geosynthetic reinforcement

模拟对象	材料参数
“梁”结构单元	$A=0.001 \text{ m}^2, E=700 \text{ MPa}$
“锚索”结构单元	$C=2.002 \text{ m}, E=700 \text{ MPa}$

注: A 为横截面积; C 为周长, 根据厚度 $t=1 \text{ mm}$ 以及垂直纸面方向单位长度 1 m 计算; E 为弹性模量。

表 4 界面单元参数

Table 4 Parameters for interface elements

界面	C_i	$\delta/(^\circ)$	c_m/kPa
加筋区域土体填料-筋材	0.90	35.1	0
加筋区域土体填料-砌块面板	0.65	26.9	0
桥头综合引道填料-筋材	0.90	27.5	0
筋材-砌块面板 (摩擦连接)	—	16.2	9.5
筋材-砌块面板 (机械连接)	—	57.0	46.0
砌块面板-砌块面板	—	31.0	0
土工泡沫-筋材/砌块面板/桥跨结构	—	26.6	0

注: C_i 为界面折减系数; δ 为界面内摩擦角, 可根据 $\delta=\arctan(C_i \cdot \tan\varphi)$ 计算得到; c_m 为界面黏聚力。

为还原实际加筋土桥台的施工过程, 数值模拟采用了如下步骤: (1) 在施工加筋土桥台前, 初始基岩地应力; (2) 开始分层施工加筋土桥台, 具体为激活每一层的砌块面板、加筋土体区域 (包括筋材与填料)、被挡土体以及相应“界面”单元; 此阶段施工完成后, 加筋土桥台处于自重应力作用下; (3) 激活土工泡沫、其背后的桥梁基座 (包括筋材与填料) 以及相应“界面”单元; (4) 激活桥跨结构以及相应“界面”单元; (5) 激活桥头综合引道以及相应“界面”单元。

SHEN 等^[14] 建立了与美国维吉尼亚州交通局 (VODT) 实际建造的加筋土桥台几何尺寸一致的数值模型 (以下简称 VDOT 数值模型), 并对比了现场监测数据与数值模拟计算结果, 发现所建 VDOT 数值模型能够较好地还原实际加筋土桥台在自重及桥跨结构荷载作用下的受力及变形特性, 进而验证了所建 VDOT 数值模型的合理性。本文数值模型是在 SHEN 等^[14] 建立的 VDOT 数值模型的基础上, 分别对桥台高度及桥跨结构长度进行了增大, 进而引起了筋材铺设层数的增加。然而, 本文数值模型对桥台各组成部分所采用的模拟方法及参数取值与 SHEN 等^[14] 建立的 VDOT 数值模型完全一致, 如本文数值模型中增铺的筋材, 其与加筋土体区域填料或砌块面板间的相互作用仍采用与 VDOT 数值模型中一致的模拟方法与参数。正是这

些模拟方法及参数取值，尤其是筋-土相互作用的模拟，才是影响加筋土桥台整体性能的主控因素，因此作者认为，本文数值模型的合理性已在文献^[14]中得到验证。

2 加筋土桥台变形特征

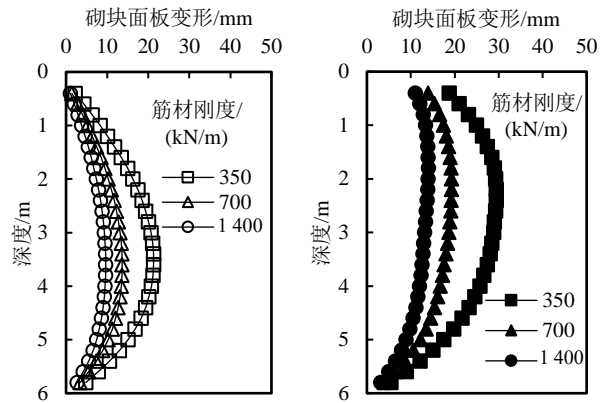
在进行参数分析时，首先建立基准组工况。基准组工况数值模型几何尺寸与第2节完全一致，基准组采用的加筋间距为0.2 m、筋材刚度为700 kN/m。在基准组工况的基础上，每次仅改变一个影响因素进行参数分析，研究桥跨结构作用下加筋土桥台的变形特征，包括面板侧向变形、桥台沉降以及桥台体积变形。本文选定的待研究影响因素为筋材刚度及加筋间距，选定的筋材刚度包括350、700及1 400 kN/m，选定的加筋间距包括0.2、0.4及0.6 m。加筋土桥台一般是采用小间距加筋（即加筋间距为0.2 m），选择0.4及0.6 m作为另外两个研究的加筋间距是由于这两个值是加筋土挡墙常用的加筋间距，加筋土桥台作为加筋土挡墙的应用拓展，在研究其变形特性时有必要借鉴加筋土挡墙已有的工程经验，以便对比参考。

2.1 砌块面板侧向变形

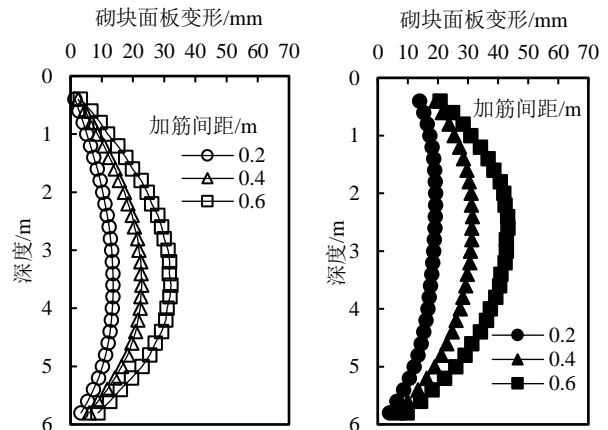
图2给出了不同影响因素下加筋土桥台跨砌块面板侧向变形分布。从图2可以看出，筋材刚度的增大及加筋间距的加密均可以有效减小砌块面板的侧向变形。桥台自重作用下，砌块面板侧向变形随桥台高度而增大，在桥台中部达到最大值后，随高度而减小。当桥跨结构荷载作用于桥台顶部后，砌块面板发生最大侧向变形的的位置明显上移。此外从图2(b)与(d)中还可以看出，筋材刚度的增大或加筋间距的减小使砌块面板侧向变形随桥台高度的分布更均匀；而使用小筋材刚度或大加筋间距的工况，桥台顶部及底部的砌块面板侧向变形明显小于桥台中部。

2.2 桥台沉降

图3给出了不同影响因素下由桥跨结构荷载造成的桥台顶部沉降分布曲线。由图3可以看出，筋材刚度的增大及加筋间距的加密均可以有效减小桥台顶部的沉降。此外，由图3可以明显看到，桥跨结构末端与引道连接处存在差异沉降，这是由于桥跨结构荷载是一个荷载值较高的集中荷载，导致桥跨结构沉降大于其末端引道沉降。筋材刚度的增大及加筋间距的加密均能够减小该差异沉降，有效避免桥头跳车问题。

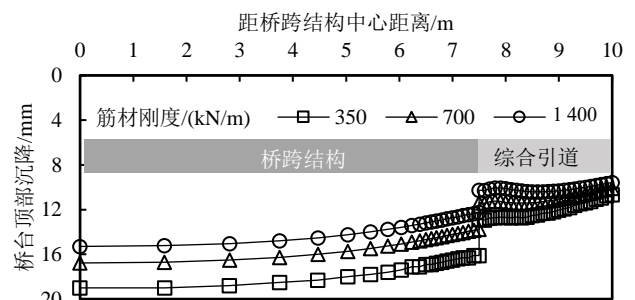


(a) 桥台自重下的筋材刚度 (b) 桥跨结构荷载下的筋材刚度

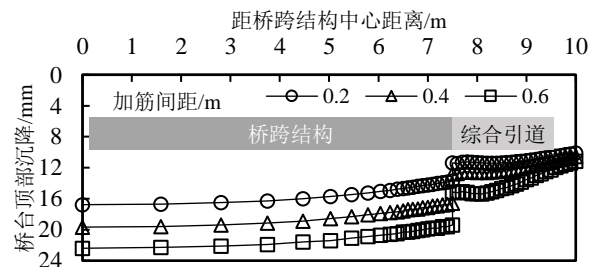


(c) 桥台自重下的加筋间距 (d) 桥跨结构荷载下的加筋间距

图2 不同影响因素对加筋土桥台砌块面板侧向变形的影响
Fig. 2 Effects of different influencing factors on the lateral deformation of GRS abutments block panel



(a) 筋材刚度的影响



(b) 加筋间距的影响

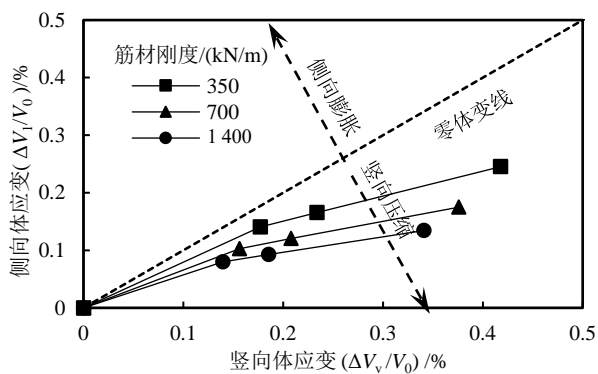
图3 不同影响因素下由桥跨结构荷载造成的桥台顶部沉降
Fig. 3 Effects of different influencing factors on the additional settlements at the top of the GRS abutments induced by bridge slab loading

2.3 桥台体积变形

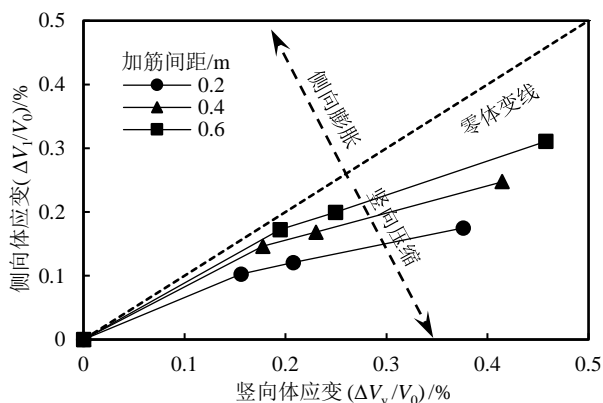
图4给出了不同影响因素下加筋土桥台加筋土体区域受桥跨结构荷载作用而产生的的体积应变,包括竖向压缩体变以及侧向膨胀体变。其中,竖向压缩体变由桥台顶部各点沉降沿筋材长度积分求得,侧向膨胀体变由各砌块面板侧向变形沿桥台高度积分得到。

从图4中可以看出,无论何种工况下,加筋土桥台的竖向压缩体变均大于侧向膨胀体变。由图4可以看出,筋材刚度的增大以及加筋间距的减小使加筋土桥台在桥跨结构荷载下产生的砌块面板侧向变形以及顶部沉降均减小,进而使得加筋土桥台的体变曲线进一步远离美国联邦公路局^[13]提出的“零体积应变”曲线。图4中所有工况的曲线斜率均小于1,表明了比起减小桥台沉降,筋材的增强或者加密对抑制面板侧向变形更有利。

需要指出的是,本文计算所得的加筋土桥台的体积应变曲线虽然与“零体变线”不重合,但实际桥台的体积应变值较小,在各种工况下均小于0.5%,因此,“零体积应变”假定的适用性仍有待进一步验证。



(a) 筋材刚度的影响



(b) 加筋间距的影响

图4 不同影响因素下加筋土桥台加筋土体区域受桥跨结构荷载作用而产生的体积应变

Fig. 4 Effects of different influencing factors on the volumetric strain of the GRS abutments induced by bridge slab loading

3 结论

本文采用二维有限差分数值模拟方法,对桥跨结构荷载作用下加筋土桥台的变形特征进行了研究,具体分析了筋材刚度以及加筋间距两种影响因素作用下桥台砌块面板侧向变形、桥台顶部沉降以及桥台体积变形。通过本文的研究工作,可以得到以下结论:

(1) 桥跨结构荷载作用使得加筋土桥台砌块面板发生最大侧向变形的的位置由自重荷载下的桥台中部发生明显上移。

(2) 由于桥跨结构荷载是一个荷载值较高的集中荷载,使得桥跨结构沉降大于综合引道,桥跨结构末端与引道连接处存在差异沉降。

(3) 桥跨结构荷载作用下,加筋土桥台的体积变形不为零,桥台的竖向压缩体变大于侧向膨胀体变。

(4) 筋材刚度的增大或加筋间距的减小可有效减小加筋土桥台在桥跨结构荷载下产生的砌块面板侧向变形以及顶部沉降,进而使得加筋土桥台的体变曲线进一步远离“零体变”假设曲线。

参考文献

- [1] 周志刚, 郑健龙, 宋蔚涛. 土工格栅加筋柔性桥台的机理分析[J]. 中国公路学报, 2000, 13(1): 18-21.
ZHOU Zhi-gang, ZHENG Jian-long, SONG Wei-tao. Analysis of mechanism of flexible abutment reinforced by geogrids[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1): 18-21.
- [2] HELWANY S M B, WU J T H, KITSABUNNARAT A. Simulating the behavior of GRS bridge abutments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(10): 1229-1240.
- [3] WU J T H, PHAM T Q. Load-carrying capacity and required reinforcement strength of closely spaced soil-geosynthetic composites[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(9): 1468-1476.
- [4] XU C, LIANG C, SHEN P. Experimental and theoretical studies on the ultimate bearing capacity of geogrid-reinforced sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(3): 417-428.
- [5] 徐超, 梁程. 土工格栅加筋砂土复合体极限承载能力

- 分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 41(增刊 1): 221–224.
- XU Chao, LIANG Cheng. Ultimate bearing capacity of geogrid-reinforced sand composite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 41(S1): 221–224.
- [6] NICKS J E, ADAMS M, OOI P, et al. Geosynthetic reinforced soil performance testing-axial load deformation relationships[R]. US: The US Federal Highway Administration, 2013.
- [7] XIAO C, HAN J, ZHANG Z. Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(1): 81–94.
- [8] 肖成志, 陈倩倩, 韩杰, 等. 顶部条形基础作用下加筋挡墙性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1586–1592.
- XIAO Cheng-zhi, CHEN Qian-qian, HAN Jie, et al. Experimental study of performance of geogrid-reinforced retaining wall subjected to load from strip foundation at top surface of wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1586–1592.
- [9] 王贺, 杨广庆, 吴连海, 等. 墙顶荷载对加筋土挡墙工作特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2573–2581.
- WANG He, YANG Guang-qing, WU Lian-hai, et al. Experimental study of geogrid reinforced retaining wall under overhead loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2573–2581.
- [10] 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): 72–80.
- LI Li-hua, SHI An-ning, XIAO Heng-lin, et al. Model test and mechanical properties study of reinforced earth retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 72–80.
- [11] 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.
- [12] WU J, KETCHART K, ADAMS M. Two full-scale loading experiments of geosynthetic-reinforced soil (GRS) abutment wall[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 2(4): 305–317.
- [13] ADAMS M, NICKS J. Design and construction guidelines for geosynthetic reinforced soil abutments and integrated bridge systems[R]. US: The US Federal Highway Administration, 2018.
- [14] SHEN P, HAN J, ZORNBERG J G, et al. Responses of geosynthetic-reinforced soil (GRS) abutments under bridge slab loading: numerical investigation[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 103566.