

# 土工合成材料加筋土桥台变形特性的离心模型试验

王清明<sup>1</sup>, 徐超<sup>1</sup>, 沈盼盼<sup>2</sup>, 赵崇熙<sup>1</sup>, 李格焯<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

**摘要:** 针对工作状态下加筋土桥台变形特征, 以桥梁基础偏移距(即梁座基础到面板内侧的距离)和梁座基础宽度 2 个影响因素为变量, 开展了 5 组离心模型试验, 通过在离心场内分级施加荷载以揭示加筋土桥台的变形规律。试验结果表明: 加筋土桥台变形与基础偏移距大小和基础宽度尺寸密切相关, 变形值随基础偏移距增加而减小, 但存在最优基础偏移距, 超过该值对控制桥台变形作用不大; 变形值随基础宽度增加而增大。试验结果还揭示, 筋材应变极值随基础偏移距增加而减小, 随基础宽度增加而增大; 每层筋材应变极值出现在桥台基础下方并逐渐向筋材与面板连接处过渡, 且呈上大下小的特点; 加筋土桥台体积应变均小于 0.15%, 在设计计算时仍可采用“零体积应变”假设; 现行规范给出的面板最大水平位移计算值与实测值存在较大偏差, 不能很好地反应基础偏移距和基础宽度的影响, 需要进一步优化。研究成果可为加筋土桥台设计及相关技术标准的制定提供参考和依据。

**关键词:** 加筋土桥台; 变形特性; 离心模型试验; 土工合成材料

中图分类号: TU472

文献标志码: A

## Centrifugal Model Tests on Deformation Characteristics of Geosynthetics Reinforced Soil Abutment

WANG Qingming<sup>1</sup>, XU Chao<sup>1</sup>, SHEN Panpan<sup>2</sup>, ZHAO Chongxi<sup>1</sup>, LI Geyao<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

**Abstract:** Five centrifugal model tests were conducted to investigate the deformation characteristics of geosynthetics reinforced soil (GRS) abutment under service conditions. The setback distance (i. e., the

distance from the beam seat to the inner of the facing) and beam seat width were considered as two influencing factors. The GRS abutment was loaded through multi-stage loading in centrifugal field. Test results indicate that the deformation of the GRS abutment is closely related to the setback distance and the beam seat width. The deformation decrease as the setback distance increases, there exists an optimal setback distance, beyond which the effect on controlling the abutment deformation becomes minimal. The deformation increase as the beam seat width increases under the same load. In addition, the maximum reinforcement strain decreases as the setback distance increases, and increases as the beam seat width increases. At each reinforcement layer, the maximum strain occurs below the beam seat and gradually transitions toward the setback area along the facing. Additionally, the peak strain at each reinforcement layer also decreases from top to bottom. The volumetric strain of GRS abutments in all tests is less than 0.15%, and the assumption of “zero volumetric strain” can still be used for GRS abutments. There is a significant deviation between the calculated values of the maximum horizontal displacement given by the existing specification and the measured values, which cannot well reflect the influence of setback distance and beam seat width, indicating the need for further optimization. The results can provide references and basis for the design of GRS abutments and the formulation of relevant specifications.

**Keywords:** reinforced soil abutment; deformation characteristics; centrifugal model test; geosynthetics

近些年来我国在公路桥梁建设领域取得了巨大的成就, 公路桥梁总数已达 103.32 万座, 其中中小型桥梁占比超过 80%。与此同时, 由于路基与桥梁

收稿日期: 2023-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(42002270, 41772284)

第一作者: 王清明, 博士生, 主要研究方向为加筋土结构试验与工程应用。E-mail: qm\_wang@tongji.edu.cn

通信作者: 徐超, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土工合成材料加筋土技术及地基加固。

E-mail: c\_axu@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

桩基间的差异沉降引起的“桥头跳车”现象不仅会使行人感到不适,也可能影响行车安全。加筋土桥台作为一种中小型单跨桥梁结构的解决方案,通过采用小间距加筋土(一般小于0.3m)形成加筋土复合体,其承载能力大幅提高,进而替代传统的刚性桩基础,可以有效减小桥跨结构与引道路基之间的差异沉降,较好地解决了普遍存在于路桥连接处的“桥头跳车”问题<sup>[1]</sup>。现有工程案例表明该结构服役性能良好,同时具有工期短、节省造价以及低碳环保等优点<sup>[2-4]</sup>。

作为一种承受局部荷载的加筋土结构,为了更好地掌握其工作机制并进一步在工程建设中推广应用,国内外学者开展了大量研究工作。Hatami和Doger<sup>[5]</sup>及Hatami和Boutin<sup>[6]</sup>研究了不同面板尺寸及填料级配对桥台承载特性的影响;Zhang等<sup>[7]</sup>分析了模块面板、反包面板以及整体面板对桥台受力变形的影响;王裘申等<sup>[8]</sup>探讨了交通荷载下加筋间距和筋材刚度对加筋土桥台变形规律的影响;罗敏敏等<sup>[9]</sup>及徐超等<sup>[10]</sup>进行了加筋土桥台模型的振动台试验,表明该结构具有良好的抗震性能。此外,Zheng等<sup>[11]</sup>采用有限差分法模拟了筋材最大受力分布;Ardah等<sup>[12-13]</sup>、Gebremariam等<sup>[14]</sup>对不同荷载条件下的桥台变形特征影响因素进行了有限元模拟。

然而加筋土桥台作为承载结构,基础偏移距和基础宽度是2个重要的设计参数,合理的取值在工程设计中显得尤为重要。目前仅有的一本针对加筋土桥台的现行规范,即美国联邦公路管理局(FHWA)提出的加筋土桥台设计指南<sup>[15]</sup>,该指南基于经验方法,仅给出了基础偏移距和基础宽度设计下限,同时缺乏相应的试验验证,容易造成设计取值过于保守。而在针对基础偏移距与基础宽度对加筋土桥台影响的研究中,主要集中在加筋土桥台的极限承载性能方面。Zheng等<sup>[16]</sup>通过数值模拟探究了基础宽度和基础偏移距对加筋土桥台极限承载力的影响,肖成志等<sup>[17]</sup>和张道等<sup>[18]</sup>则通过模型试验探究了基础偏移距对桥台承载规律的影响。然而,在加筋土桥台设计建造中,不仅对其在极限状态下的承载能力有较高的要求,对工作状态下的变形也有着严苛的标准,在目前的研究中,Shen等<sup>[19]</sup>研究了工作状态下基础偏移距和基础宽度对荷载分布的影响,但并未对变形特征进行分析;Zheng和Fox<sup>[20]</sup>通过数值模拟探究了工作荷载下基础偏移距对桥台变形的影响,但缺乏模型试验进行进一步验证。

离心模型试验作为一种重要的岩土试验手段,相较于常规重力条件下的物理模型试验更贴近工程实际,可以较好地还原工程原型的受力特征。因此,为了进一步研究工作状态下基础偏移距和基础宽度对加筋土桥台变形特征的影响,本文通过5组离心模型试验,对工作荷载下加筋土桥台的变形特性及筋材分布规律进行探讨,同时分析加筋土桥台体积变形规律,探讨“零体积应变”假设在加筋土桥台中应用的可行性,最后指出现有设计指南中基于“零体积应变”假设在面板最大变形计算方法上存在的问题,相关结果可为加筋土桥台的进一步推广应用以及相关设计规范的制定提供参考。

## 1 离心模型试验

### 1.1 试验设备

离心模型试验在同济大学TLJ-150复合型土工离心机上(如图1所示)开展,该土工离心机最大加速度为200g,有效半径为3.0m,选取模型箱内部长、宽、高分别为900、350、700mm。



图1 TLJ-150型土工离心机

Fig. 1 TLJ-150 geotechnical centrifuge

### 1.2 试验模型设计与研究方案

试验模拟对象是一座高度( $H$ )为6m、墙面直立的加筋土桥台,结合模型箱尺寸,试验取模型相似比 $N=10$ ,离心模型试验相似比尺如表1所示。需要指出的是,根据《土工离心模型试验技术规程》(DL/T 5102—2013)<sup>[21]</sup>,离心加速度一般不宜低于10g,当离心加速度达到10g及以上时,由径向加速度和重力加速度的作用引起的误差可以忽略不计;此外由于不均匀加速度场带来的误差,据该规范可知,离心模型等效加速度应选在模型深度1/3位置处,并计算得到误差约为3%,小于5%的误差容许值。根据模型相似比缩放后,模型的长、宽、高分别为600、350、600mm,筋材长度取420mm(满足0.7H),竖

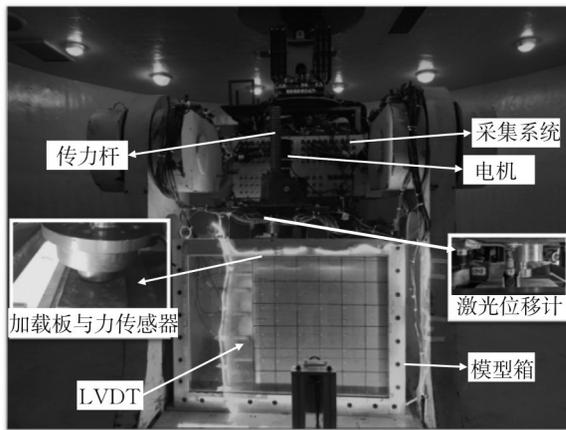
表 1 离心模型试验相似关系

Tab. 1 Similarity scales of centrifugal model test

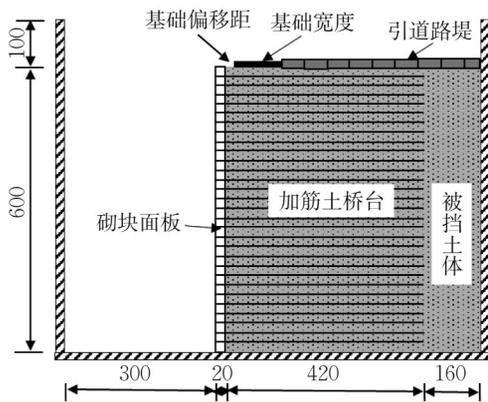
分类	物理量	量纲	原型与模型相似比
几何量	长度	L	N
	密度	$ML^{-3}$	1
	内摩擦角		1
材料性质	黏聚力	$ML^{-1}T^{-2}$	1
	筋材抗拉强度	$MT^{-2}$	N
	筋材抗拉刚度	$MT^{-2}$	N
	集中力	$MLT^{-2}$	$N^2$
外部作用	均布荷载	$ML^{-1}T^{-2}$	1
	应力	$ML^{-1}T^{-2}$	1
响应	应变		1
	位移	L	N

向加筋间距为 20 mm。为了避免加载板在荷载作用下的变形,故采用带横肋刚性加载板模拟梁座基础,此外,采用 50 mm 宽铁块模拟引道路堤堆载。试验模型及其主要尺寸如图 2 所示。

考虑基础偏移距  $a_0$  和基础宽度  $B$  对加筋土桥台



a 试验模型



b 模型尺寸(单位: mm)

图 2 试验模型及主要尺寸

Fig. 2 Centrifugal model and dimensions

变形性能的影响,共设置 5 组试验,试验方案如表 2 所示。

表 2 离心模型试验方案设置

Tab. 2 Centrifugal model test plan

试验组别	$a_0$	$B$
T1	20	100
T2	40	100
T3	60	100
T4	20	150
T5	20	200

1.3 试验材料

1.3.1 填料

试验填料由不同粒径天然河砂均匀混合而成,颗粒粒径及配比根据 FHWA 设计规范<sup>[15]</sup>中填料建议值按相似比折减获得,填料不均匀系数  $C_u = 2.3$ , 曲率系数  $C_c = 1.3$ , 填料为级配不良土,其最大、最小干密度分别为  $1.81 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  和  $1.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。填料颗粒级配曲线如图 3 所示。模型为分层填筑并将压实度控制在 96%,通过直剪试验得到填料的内摩擦角  $\varphi$  为  $38.3^\circ$ ,黏聚力  $c$  为零。

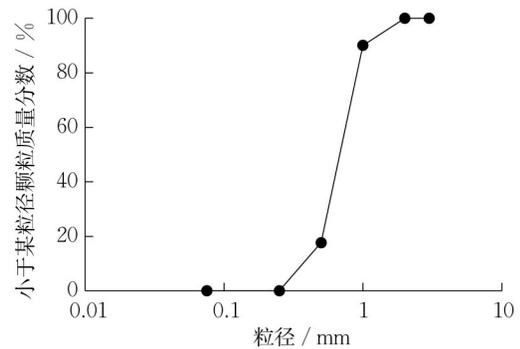


图 3 填料级配曲线

Fig. 3 Grading curve of backfills

1.3.2 筋材

选取聚丙烯材质有纺土工织物作为加筋材料,结合设计指南<sup>[15]</sup>及工程实际,对原型筋材进行相似折减后,得到筋材应变 2% 时目标拉伸强度为  $1.4 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ;筋材应变为 10% 时的目标拉伸强度为  $7.0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,根据宽幅拉伸试验,试验选用的筋材 2% 应变对应拉伸强度为  $1.69 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ;10% 应变对应拉伸强度为  $6.37 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,可以满足试验要求。试验用土工布及拉伸曲线如图 4 所示。

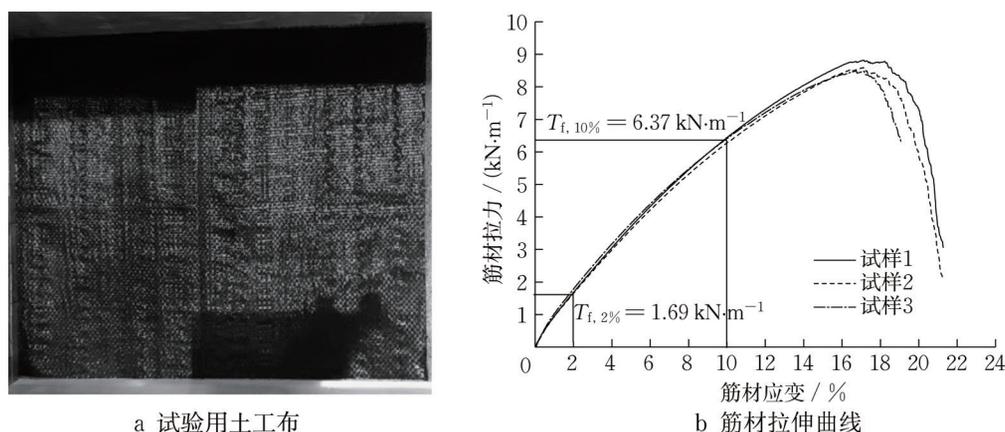


图4 试验用土工布及拉伸曲线

Fig. 4 Geotextile used in this test and tensile curves

### 1.3.3 模型桥台面板

模型桥台面板采用模块式组合面板,缩尺后砌块的长、宽、高分别为40、20、20 mm,鉴于缩尺后砌块尺寸较小,不宜采用混凝土预制,故借鉴汪磊等<sup>[22]</sup>以及Xu和Ling<sup>[23]</sup>的经验,采用表面粗糙的铝块模拟混凝土砌块,同时为了结合工程实际,筋材与砌块之间的连接除顶部3层采用双面胶进行机械连接外,其余筋材与砌块之间均为摩擦连接。

### 1.4 监测方案

试验监测方案如图5所示,主要包括LVDT (linear variable differential transformers)、激光位移计以及应变片等。其中沿桥台高度方向上布设6个LVDT监测桥台面板水平位移,分别位于距桥台底部0.10 H、0.30 H、0.50 H、0.70 H、0.83 H和0.90 H位置处,分别用L1—L6表示;而4个激光位移计则通过钢架固定在桥台顶部量测桥台沉降,分别布设于基础偏移距中点( $a_b/2$ )、加载板中线( $B/2$ )及加载板后0.1 m和0.2 m位置,分别用V1—V4表示;选取第3、9、15、21、28层筋材进行筋材应变监测,电阻应变片通过聚丙烯专用胶粘贴在筋材表面,并用703硅橡胶进行应变片保护。由于应变片刚度与筋材刚度的不同,同时应变片测得的局部应变与筋材整体应变也受到粘贴剂的影响,存在一定差异,因此通过筋材整体应变与应变片局部应变的标定试验,测得标定系数为3.3077。应变片标定结果如图6所示。

### 1.5 加载步骤

模型试验加载分为2个阶段,第1个阶段为离心加速度从1 g均匀加速到10 g,即恢复到原型自重应力状态;待到各监测元件保持稳定后开始第2阶段加载,即在离心场中对加筋土桥台施加局部荷载,本

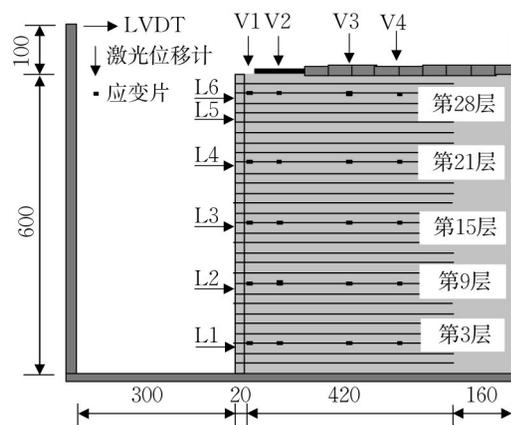


图5 T1的监测方案布置(单位:mm)

Fig. 5 Monitoring plan (unit: mm)

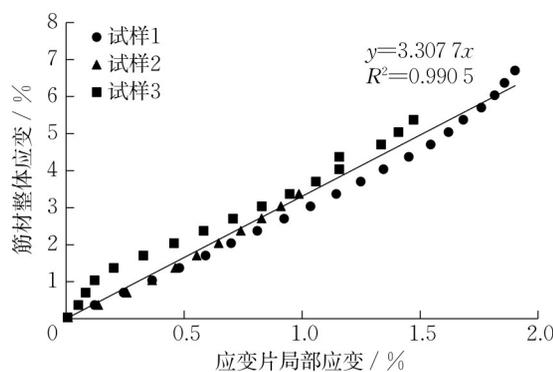


图6 应变片标定试验

Fig. 6 Calibration curves of strain gauge

试验局部荷载通过离心机机械手控制系统,控制电机实现分级加载,每级荷载25 kPa,由于本文主要探究工作荷载条件下加筋土桥台变形特征,故根据设计指南<sup>[15]</sup>,加筋土桥台在工作状态下承受最大荷载不超过200 kPa,故本试验将荷载终止值设为200 kPa,共分8级荷载,在每级荷载稳定5 min,然后

进行下一级荷载的施加。

## 2 试验结果分析

由于本试验主要探讨局部荷载条件下加筋土桥台变形特征,故不考虑施工阶段的影响,即分析桥台在离心加速度达到 $10g$ 后受局部荷载作用下的变形特征。此外,为了便于工程应用参考,在试验结果分析计算时,均将相关变量根据相似比换算为工程原型变量。

### 2.1 桥台顶部沉降

图7为各组试验在局部荷载下加筋土桥台顶部

沉降的分布规律,在分析时对沉降值均做归一化处理,即纵坐标表示为顶部沉降( $s$ )与桥台高度( $H$ )的比值。显然,桥台顶部各监测点沉降随荷载增大均呈现均匀增大,且沉降主要集中在梁座基础及基础偏移距范围内,而引道部分沉降则显著小于承载区沉降。Ambauen等<sup>[24]</sup>和张道等<sup>[18]</sup>同样对加筋土桥台的顶部沉降分布进行了研究,沉降分布规律与本试验结果相似。总体上看,在 $200\text{ kPa}$ 下,5组试验模型最大沉降值为 $0.72\%H$ ,小于FHWA设计规范中工作状态下桥台 $1\%H$ 的最大沉降值<sup>[16]</sup>,表明桥台整体工作状态良好,处于稳定状态。

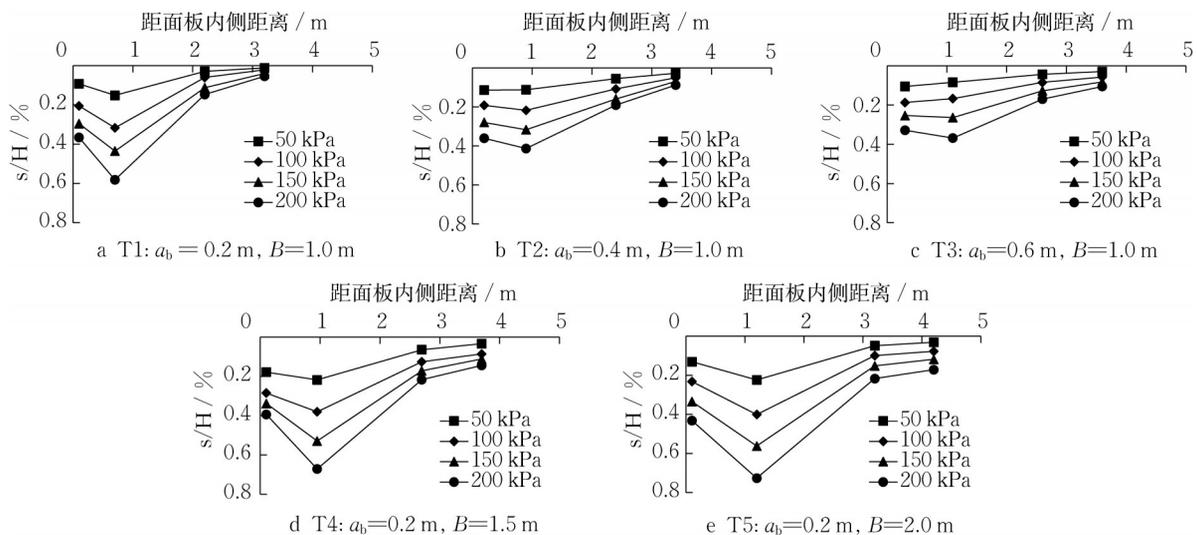


图7 加筋土桥台顶部沉降分布

Fig. 7 Distribution of settlement at the top of abutment

从图7a、7b、7c中可以看出,在相同荷载条件和基础宽度( $B = 1.0\text{ m}$ )下,当基础偏移距分别为 $0.2\text{ m}$ 、 $0.4\text{ m}$ 和 $0.6\text{ m}$ 时,沉降最大值分别为 $0.58\%H$ 、 $0.41\%H$ 和 $0.37\%H$ ,表明基础偏移距对桥台顶部沉降有显著影响;当基础偏移距值从 $0.2\text{ m}$ 增长到 $0.4\text{ m}$ 时,最大沉降值减小 $0.17\%H$ ,而当基础偏移距从 $0.4\text{ m}$ 增长到 $0.6\text{ m}$ 时,最大沉降仅减少 $0.04\%H$ ,说明在加筋土桥台中存在最优基础偏移距。因此在实际工程中应选择合适的基础偏移距,盲目增大基础偏移距不仅不会使基础沉降显著降低,反而增大桥跨长度,使建设成本增加。

当桥梁基础偏移距相同( $a_0 = 0.2\text{ m}$ )时,对比分析图7a、图7d和图7e可以看出,基础宽度为 $1.0\text{ m}$ 、 $1.5\text{ m}$ 和 $2.0\text{ m}$ 时,基础最大沉降值分别为 $0.58\%H$ 、 $0.67\%H$ 和 $0.72\%H$ 。表明在荷载水平一定时,桥台最大沉降随基础宽度增加而增大。但

需指出的是,在实际工程中因桥跨结构自重增大而采取扩大基础宽度进而保持荷载不变时,应考虑基础扩大带来的沉降增加问题。

### 2.2 面板水平位移

图8为局部荷载条件下加筋土桥台面板水平位移沿高度的分布,其中横坐标表示为面板水平位移 $d$ 与桥台高度 $H$ 的比值, $z$ 为监测点距桥台底部的高度。由图8可知,整体上桥台面板水平位移随荷载的增加而增大,5组试验中面板最大水平位移均出现在 $0.83H$ 处,并由此向顶部和底部逐渐减小,王裘申等<sup>[8]</sup>认为出现这种分布形式的原因是面板顶部处于局部附加应力的应力扩散区域以外。除此之外,由于顶部3层砌块与筋材之间的机械连接,导致顶部区域面板刚度局部增大,进而也会使靠近顶部区域的面板水平变形较小。

当基础宽度相同时,随着基础偏移距从 $0.2\text{ m}$

增大到0.4 m,面板水平位移减小幅度(0.10%  $H$ )小于基础偏移距从0.4 m增大到0.6 m时水平位移减小幅度(0.06%  $H$ ),同样表明在加筋土桥台中存在最优基础偏移距。此外,如图8a、图8d和图8e所

示,在200 kPa下,当基础宽度逐渐增大时,面板最大水平位移均匀增大,分别为0.39%  $H$ 、0.40%  $H$ 和0.41%  $H$ ,从图中还可以看出,随着基础宽度的增大,在面板中下部水平位移增幅显著。

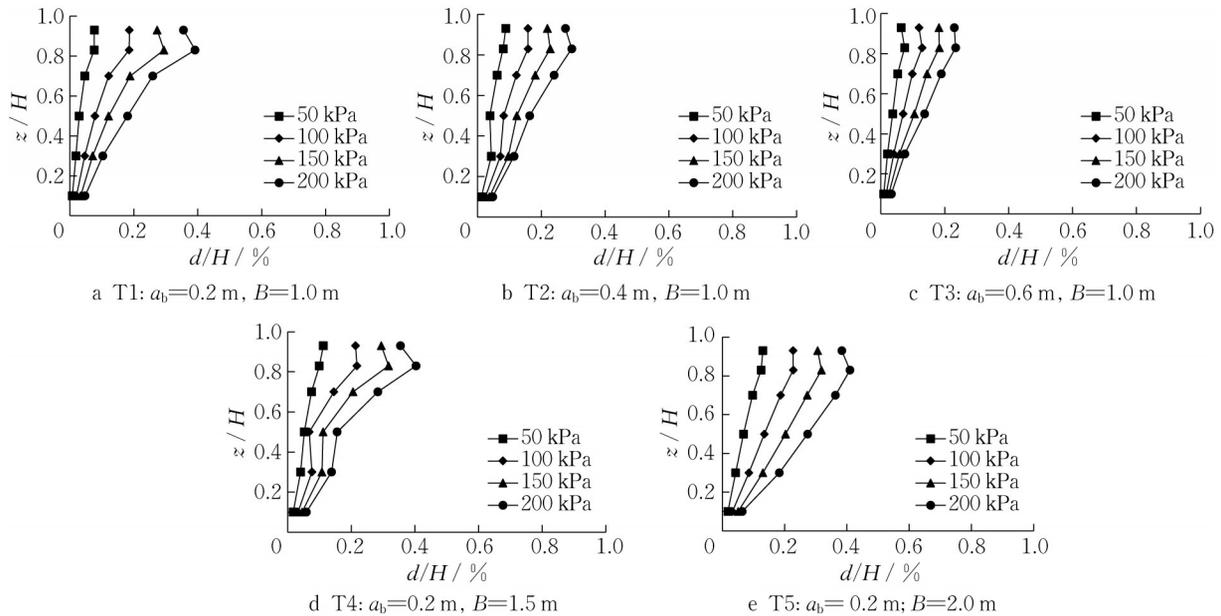


图8 加筋土桥台面板水平位移分布

Fig. 8 Horizontal displacement distribution of facing

### 2.3 筋材应变

在局部荷载条件下加筋土桥台各层筋材应变分布如图9所示。总体上看,各组试验的筋材拉伸应变随荷载增加显著增大,从筋材伸长方向看,每层筋材应变最大值从位于基础下方逐渐向面板与筋材连接处过渡,且随着基础偏移距由0.2 m增大到0.6 m,最大筋材应变值减小0.26%;而随着基础宽度由1.0 m增大到2.0 m,测得最大筋材应变增大0.21%。与此同时,各组试验最大筋材应变基本都出现在中上部,此规律与面板水平位移分布规律表现一致,表明在加筋土桥台中,筋材与填土之间变形协调,筋材可以较好地发挥限制土体侧向变形的作用。此外,各层筋材末端监测点应变值随荷载变化不大,应变几乎可以忽略,表明在加筋土桥台中筋材末端的锚固作用较小,因此也可以解释在文献[18]中采用三角形布筋方式表现出与本试验采用均匀布筋方式类似变形规律的原因。由此可见,在工程设计中可以因地制宜并选择合理的布筋方式。

在200 kPa的工作荷载作用情况下,各组加筋土桥台试验模型中的最大筋材应变均在1.5%以内,远小于筋材的极限延伸率,同时也小于FHWA设计规范中的工作状态下筋材应变不超过2%的限定,

表明在工作荷载条件下,现有筋材强度可以确保桥台不会因筋材断裂而发生失稳破坏。

### 2.4 体积应变

Adams等<sup>[25]</sup>根据微型墩试验提出“零体积应变”假设,并被FHWA设计规范用于计算加筋土桥台的最大水平位移。该假设指出,在荷载作用下,微型墩的竖向体积压缩量与侧向体积膨胀量相等,但关于加筋土桥台体积变形的相关研究尚未见到。因此本文对5组离心模型试验中的桥台体积应变进行了分析计算。

参照图7和图8中桥台顶部沉降和面板水平位移分布,可知桥台沉降主要集中在基础以下及基础偏移距区域内,而在V4测点处,几乎可以忽略不计;在桥台面板水平位移方面,未对桥台顶部和底部位置的水平位移进行监测,根据面板水平位移沿墙高分布规律,认为桥台面板顶部水平位移与监测元件L6所测一致,而底部面板水平位移则设为零。桥台的顶部沉降和面板水平位移变形计算示意图如图10所示,其中 $\Delta S_1$ 为桥台顶部沉降区面积,通过对试验监测得到的桥台沉降曲线进行积分得到; $\Delta S_2$ 为桥台面板水平位移面积,通过对试验监测得到的不同高度下面板水平位移曲线进行积分得到。

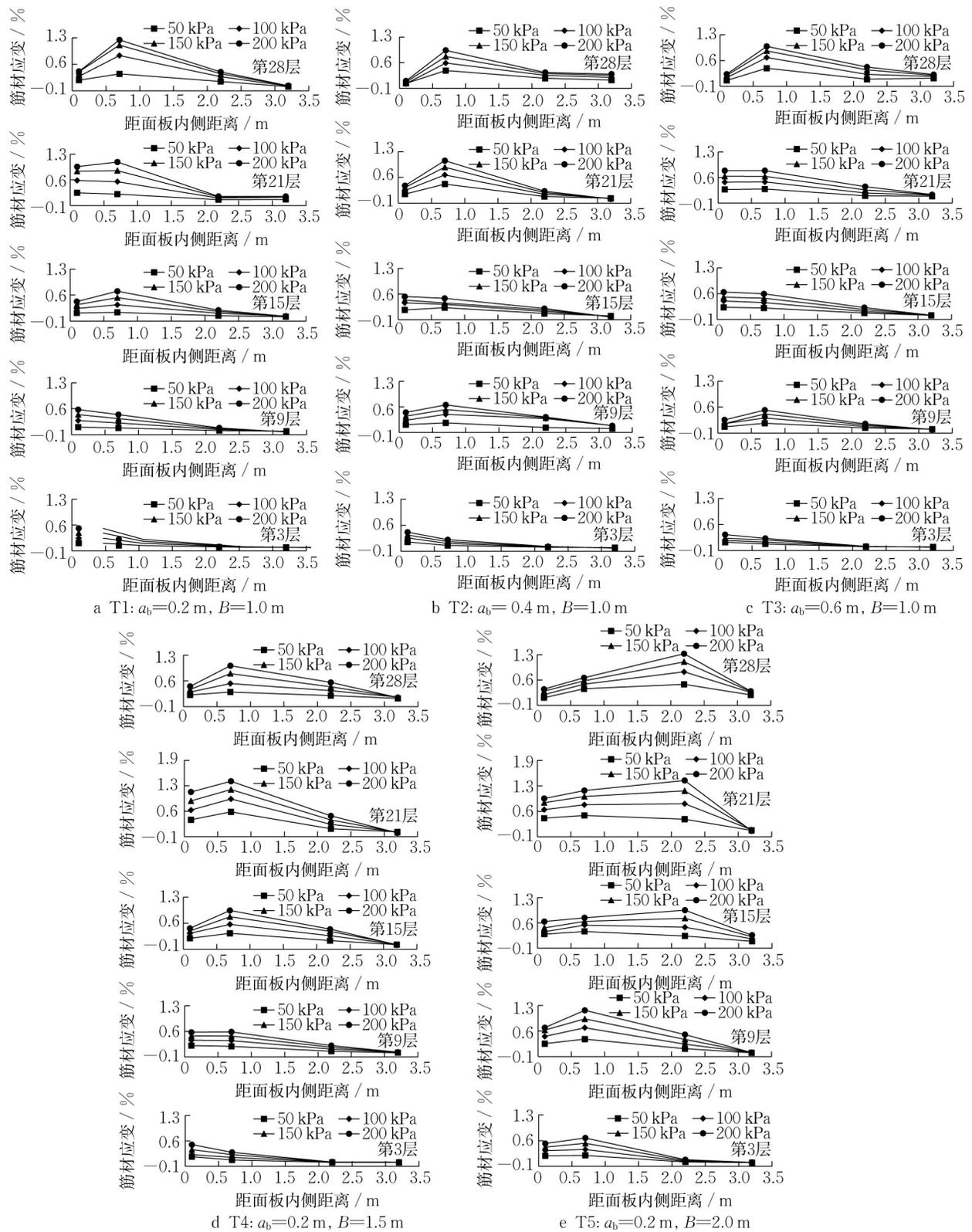


图9 筋材应变分布规律

Fig. 9 Reinforcement strain distributions

假定在加筋土桥台体积变形计算中,以桥台压缩为负、侧向膨胀为正,则桥台竖向体积变形  $\Delta V_v = -\Delta S_v \cdot w$ ,其中  $w$  为桥台宽度,本试验中  $w =$

3.5 m。桥台水平体积变形  $\Delta V_1$  可以通过相同计算得到,即  $\Delta V_1 = \Delta S_1 \cdot w$ ,则桥台的体积应变为  $\epsilon_v = (\Delta V_v + \Delta V_1) / V_0$ ,其中  $V_0$  为桥台原始体积,在本试

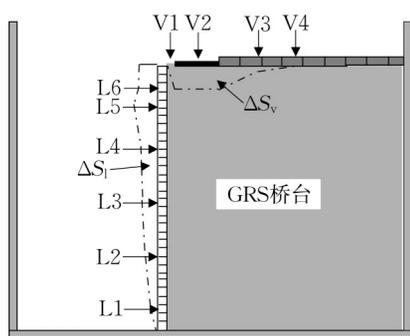


图10 加筋土桥台变形平面示意

Fig. 10 Schematic of deformed GRS abutment

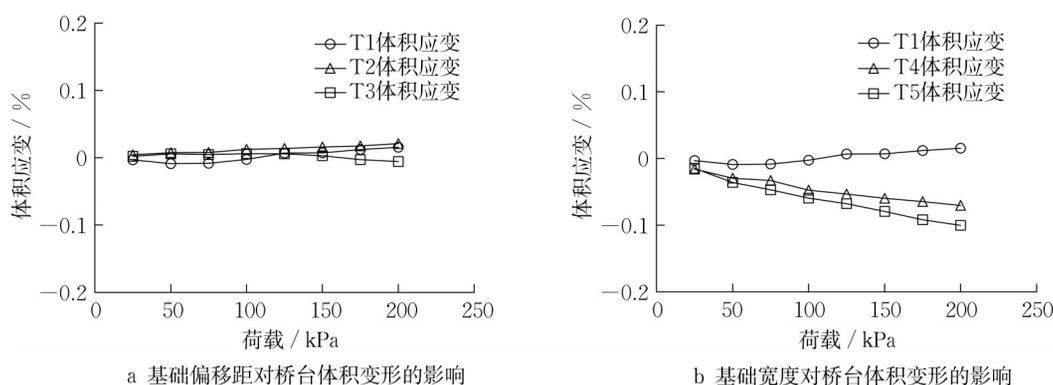


图11 加筋土桥台体积变形分布规律

Fig. 11 Volumetric deformation of GRS abutment

在设计指南<sup>[15]</sup>中,基于“零体积应变”假设,同时假定面板水平变形呈三角形分布,顶部沉降在荷载作用范围内呈矩形均匀分布,给出了面板最大水平位移 $D_L$ 计算公式,为

$$D_L = \frac{2b_q D_v}{H} \quad (1)$$

式中: $b_q$ 为包括基础偏移距在内的顶部荷载作用宽度,即 $b_q = a_0 + B$ ;  $D_v$ 为桥台竖向最大沉降;  $H = 6.0$  m。

表3给出了各组试验在200 kPa荷载下桥台面最大水平位移测量值和规范计算值的对比。从表中可见,在T1~T3中,实测值显然大于规范计算值,但随着基础偏移距的增大,实测值逐渐接近规范计算值;对比分析T1、T4和T5,可以发现随着基础宽度的增大,最大水平位移实测值从大于计算值到逐渐小于计算值。而Saghebfar等<sup>[4]</sup>和Khosrojerdi等<sup>[26]</sup>指出该计算方法会严重低估面板最大水平变形,并未出现实测值大于计算值的情况,分析其原因主要是因为Saghebfar等<sup>[4]</sup>和Khosrojerdi等<sup>[26]</sup>的研究中未

验中 $V_0 = 121.8$  m<sup>3</sup>。

图11为不同基础偏移距和基础宽度条件下加筋土桥台体积应变随荷载变化情况,可以看出在200 kPa内,基础偏移距对加筋土桥台体积应变影响较小,而随着基础宽度的增大,桥台体积应变逐渐从正应变变为负应变,表明随着基础宽度增大,桥台竖向体积压缩逐渐大于水平膨胀体积。从图11还可以看出,加筋土桥台应变虽然不完全符合“零体积应变”假设,但总体而言,在工作荷载下,桥台体积应变均小于0.15%,因此可以认为工作状态下加筋土桥台在设计计算时仍可采用“零体积应变”假设。

将基础偏移距和基础宽度作为影响因素考虑在内。因此,FHWA设计规范中提出的计算方法并不适用于所有基础偏移距大小和基础宽度尺寸。而面板水平位移最大变形值与基础偏移距和基础宽度都密切相关,在FHWA设计规范中进行顶部沉降分布假设时,未将基础偏移距和基础宽度下的沉降分开考虑,仅将基础偏移距和基础宽度统一为荷载作用范围,同时将面板水平位移简单等效为三角形分布,并未建立与基础偏移距和基础宽度之间的联系,进而造成在面板最大水平位移计算时产生较大误差。

表3 面板最大水平位移实测值与计算值对比

Tab. 3 Comparison between measured and theoretical values of maximum facing displacement

试验组别	实测最大沉降值	最大水平位移值	
		实测值	计算值
T1	34.9	23.5	13.9
T2	24.8	17.7	11.5
T3	22.1	14.0	11.7
T4	40.3	24.2	22.8
T5	43.5	24.6	31.9

### 3 结语

针对基础偏移距和基础宽度2个影响因素,完成了5组工作荷载下加筋土桥台离心模型试验,研究了加筋土桥台顶部沉降、面板水平位移、筋材应变的分布规律以及体积变形规律,得到以下结论:

(1)在工作荷载条件下,面板水平位移主要集中在中上部,最大位移出现在距桥台底部 $0.83H$ 处;桥台顶部沉降主要分布在桥梁基础下方,引道路堤处沉降较小,因此在桥台设计施工时,为了减少桥台基础与引道部分的差异沉降,可对桥梁基础下方进行局部加固处理。

(2)适当增加桥梁基础偏移距可以有效减小桥台顶部沉降和桥台面板水平位移,但存在最优基础偏移距 $0.4\text{ m}$ ,大于该最优值对减小桥台变形效果不明显;在荷载一定时,桥台最大沉降和面板水平位移随基础宽度增加而增大。

(3)筋材应变最大值出现在基础底部且呈现出沿墙高向下逐渐向筋材与面板连接处过渡的特点。此外,在加筋土桥台中采取等长均匀布筋方式时,筋材末端的锚固作用较小,与三角形布筋方式表现规律相似。因此在实际工程中,需要因地制宜选择合理布筋方式。

(4)加筋土桥台体积应变均小于 $0.15\%$ ,在设计计算中仍可以采用“零体积应变”假设;当改变基础偏移距或基础宽度时,计算值与实测值之间误差变化较大,因此在FHWA规范中关于面板水平变形和顶部沉降分布形式的假设不合理,需做进一步研究。

#### 作者贡献声明:

王清明:试验开展、数据处理、论文撰写与修改。

徐超:提出研究思路、论文整体构思与审阅。

沈盼盼:研究思路指导与试验设计。

赵崇熙:协助试验开展、数据分析。

李格焯:指导试验设计。

#### 参考文献:

- [1] HAN J, JIANG Y, XU C. Recent advances in geosynthetic-reinforced retaining walls for highway applications[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2018, 12(2): 23..
- [2] ZHANG J, GUO W, JI M, *et al.* Field monitoring of vertical stress distribution in GRS-IBS with full-height rigid facings[J]. *Geosynthetics International*, 2021, 29(6): 610.
- [3] OOI P S K, ADAMS M T, LAWRENCE J B. Long-term behavior of a geosynthetic reinforced soil integrated bridge system in Hawaii[J]. *Transportation Research Record*, 2019, 2673(2): 571.
- [4] SAGHEBFAR M, ABU-FARSAKH M, ARDAH A, *et al.* Performance monitoring of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS) in Louisiana [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45(2): 34.
- [5] HATAMI K, DOGER R. Load-bearing performance of model GRS bridge abutments with different facing and reinforcement spacing configurations [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(5): 1139.
- [6] HATAMI K, BOUTIN J. Influence of backfill type on the load-bearing performance of GRS bridge abutments [J]. *Geosynthetics International*, 2022, 29(5): 506.
- [7] ZHANG J, JIA Y, GUO W, *et al.* Experimental study on the load bearing behavior of geosynthetic reinforced soil bridge abutments with different facing conditions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(4): 632.
- [8] 王裘申, 徐超, 张振, 等. 交通荷载下加筋土桥台工作性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(12): 3416.  
WANG Qiushen, XU Chao, ZHANG Zhen, *et al.* Experimental study on service performance of reinforced soil abutment subjected to traffic loads [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(12): 3416.
- [9] 罗敏敏, 徐超, 杨阳, 等. 加筋土柔性桥台复合结构抗震性能试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(11): 1541.  
LUO Minmin, XU Chao, YANG Yang, *et al.* Seismic performance of geosynthetic reinforced soil-integrated structure in shaking table test [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11): 1541.
- [10] 徐超, 罗敏敏, 任非凡, 等. 加筋土柔性桥台复合结构抗震性能的试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S1): 179.  
XU Chao, LUO Minmin, REN Feifan, *et al.* Experimental study on seismic behaviour of reinforced soil flexible abutment composite structures [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S1): 179.
- [11] ZHENG Y, FOX P J, MCCARTNEY J S. Numerical study on maximum reinforcement tensile forces in geosynthetic reinforced soil bridge abutments [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46(5): 634.
- [12] ARDAH A, ABU-FARSAKH M, VOYIADJIS G. Numerical parametric study of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS) [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(1): 289.
- [13] ARDAH A, ABU-FARSAKH M, VOYIADJIS G. Numerical evaluation of the effect of differential settlement on the performance of GRS-IBS [J]. *Geosynthetics International*, 2018, 25(4): 427.
- [14] GEBREMARIAM F, TANYU, B F, GULER E, *et al.* Numerical investigation of reinforced soil structures with GRS-IBS design features [J]. *Geosynthetics International*, 2021, 28(1): 95.
- [15] ADAMS M T, NICKS J. Design and construction guidelines

- for geosynthetic reinforced soil abutments and integrated bridge systems [R]. McLean: The US Federal Highway Administration, 2018.
- [16] ZHENG Y, FOX P J, MCCARTNEY J S. Numerical simulation of deformation and failure behavior of geosynthetic reinforced soil bridge abutments [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(7): 0401803
- [17] 肖成志, 刘贺, 王荣霞, 等. 土工格栅加筋土柔性桥台结构性能的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(4): 767.  
XIAO Chengzhi, LIU He, WANG Rongxia, *et al.* Experimental study on performance of GRS bridge abutment with flexible face [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(4): 767.
- [18] 张逍, 徐超, 王裘申, 等. 加筋土桥台承载特性的载荷试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 4027.  
ZHANG Xiao, XU Chao, WANG Qiushen, *et al.* Load test study of bearing characteristics of reinforced soil abutments [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 4027
- [19] 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.
- [20] ZHENG Y, FOX P J. Numerical investigation of the geosynthetic reinforced soil - integrated bridge system under static loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(6): 04017008.
- [21] 中国水利水电科学研究院. 土工离心模型试验技术规程: DL/T 5102—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Specification for geotechnical centrifuge model test techniques: DL/T 5102—2013 [S]. Beijing: China Water and Power Press, 2014.
- [22] 汪磊, 张垭, 向前勇, 等. 不同筋材刚度下加筋土挡墙离心模型试验[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(10): 109.  
WANG Lei, ZHANG Ya, XIANG Qianyong, *al et.* Centrifuge tests of reinforced soil retaining wall with different reinforcement stiffness [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(10): 109.
- [23] XU L, LING H. Centrifuge modeling and numerical analysis of reinforced soil retaining walls with concrete block facing [J]. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2020, 7(3): 405.
- [24] AMBAUEN S, LESHCHINSKY B, XIE Y, *et al.* Service-state behavior of reinforced soil walls supporting spread footings: a parametric study using finite-element analysis [J]. *Geosynthetics International*, 2016, 23(3): 156.
- [25] ADAMS M, LILLIS C, WU J, *al et.* Vegas mini pier experiment and postulate of zero volume change [C]//7th International Conference on Geosynthetics. Nice: International Geosynthetics Society, 2002: 389-394.
- [26] KHOSROJERDI M, XIAO M, QIU T, *et al.* Prediction equations for estimating maximum lateral displacement and settlement of geosynthetic reinforced soil abutments [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 125(1): 103622.