

DOI: 10.11779/CJGE2022S2047

加筋土桥台抗震性能影响因素试验研究

罗敏敏^{1,2}, 徐超², 陈赞¹, 杨阳^{2*}, 梁程³

(1. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038)

摘要: 目前, 关于加筋土桥台抗震性能的影响因素的研究工作主要偏重于数值分析, 且未涉及对面层连接型式的影响研究。通过振动台缩尺模型试验研究水平地震作用下加筋间距、加筋长度、筋材刚度和面层连接型式等因素对加筋土桥台抗震性能的影响。研究表明, 加速度响应和承载区中心下竖向土压力受加筋间距、加筋长度和筋材类型(包括筋材刚度和面层连接型式的不同)的影响很小。面层侧向位移和筋材应变受加筋间距的影响较大, 加筋间距翻倍导致面层侧向位移和筋材应变成倍增长; 加筋长度和筋材刚度的变化对面层侧向位移的影响则较小, 对筋材应变的影响更小; 面层连接型式则对面层侧向变形的模式有较大影响。各变量因素对面层侧向土压力的影响较小, 影响规律不太明显。研究的变量因素中, 加筋间距和面层连接型式对加筋土桥台的抗震性能的影响较大。

关键词: 加筋土; 桥台; 抗震性能; 影响因素; 振动台试验

中图分类号: U443.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0215-05

作者简介: 罗敏敏(1988—), 男, 博士, 主要从事加筋土结构、环境岩土和基坑工程方面的研究。E-mail: zjluominmin@163.com。

Influence factors for seismic performance of bridge abutment with geosynthetic-reinforced soil (GRS)

LUO Min-min^{1,2}, XU Chao², CHEN Yun¹, YANG Yang², LIANG Cheng³

(1. The Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University; Shanghai 200092, China; 3. Institute of Science and Technology, China Three Gorges

Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Currently, most researches on the seismic performance of bridge abutment with geosynthetic-reinforced soil (GRS) and the related influence factors focuses on the numerical analysis, among which the connecting pattern between the reinforcement and the facing system is rarely studied. To solve this issue, a series of shaking table tests are performed to investigate the seismic behaviors of bridge abutment with GRS under horizontal earthquakes with special attention paid on the reinforcement conditions including spacing, length, stiffness and connecting patterns. According to the test results, it is found that the acceleration response and the vertical earth pressure under the load-bearing area are scarcely influenced by the reinforcement conditions as mentioned above. The lateral displacement of the facing and the tensile strain of the reinforcement are obviously affected by the reinforcement spacing, e.g., significant increases in the lateral displacement of facing and tensile strain of reinforcement are noticed under a doubled reinforcement spacing. On the other hand, the length and stiffness of reinforcement have small effects on the lateral displacement of facing as well as the tensile strain of reinforcement. A marked effect is observed in the distribution of the lateral deformation of facing for different connecting patterns between the reinforcement and the facing system. In addition, the influences caused to the lateral earth pressure behind the facing are found to be small. To conclude, among the evaluated factors, a greater influence is observed in the spacing of reinforcement and the connection pattern of reinforcement-facing system on the seismic performance of the bridge abutment with GRS.

Key words: geosynthetic-reinforced soil; bridge abutment; seismic performance; influence factor; shaking table test

0 引言

加筋土桥台是将加筋土结构作为承重结构的一种应用, 研究表明, 当加筋间距不超过 30 cm、填料压

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772284); 国家科技部重点专项项目(2016YFE0105800)

收稿日期: 2022-12-01

***通信作者** (E-mail: 2011yang@tongji.edu.cn)

实度超过 95%时,加筋土结构具有较高的承载能力,完全可以承受中、小型桥梁的上部结构荷载^[1]。工程应用表明加筋土桥台具有造价经济、施工快速方便、工程环境适应性强等优点^[2],在国外中、小型单跨桥梁的工程建设中有着广泛地应用和快速地发展^[3]。

震害调查表明,加筋土结构以其延展特性,表现出比传统重力式挡墙等刚性结构更好的抗震性能^[4];但仍有不少加筋土挡墙破坏的案例^[5],说明对于加筋土结构的抗震性能仍有进一步研究的必要。加筋土桥台作为一种加筋土结构,其顶部受桥梁上部结构的荷载作用和约束,其在地震作用下的动力响应特性应与一般加筋土挡墙有所不同;因此对于现有加筋土挡墙抗震性能的研究结果可以在一定程度上借鉴,但仍有进一步研究的必要。

目前,有关加筋土桥台抗震性能的研究工作不多,主要有 Helwany 等^[6]、Zheng 等^[7-8]、Xu 等^[9]、徐超等^[10]的一些振动台试验研究和 Ghaderi 等^[11]的数值模拟工作。文献[10]的振动台缩尺模型试验研究了地震作用强度和加筋间距对加筋土桥台抗震性能的影响,本文在文献[10]的基础上进一步研究加筋长度和筋材刚度等的影响。

1 试验方案

本文试验为平面应变试验,参照文献[10]进行,试验模型缩尺比例为 1/4,模型尺寸如图 1 所示, H_a 为加筋土桥台高度(m)。

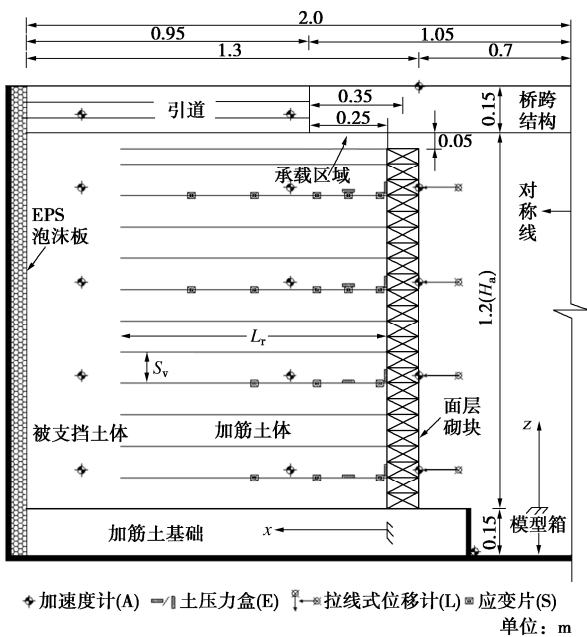


图 1 试验模型纵断面图

Fig. 1 Profile of test model

试验方案如表 1 所示,其中 A, B 两组试验为文

献[10]的数据。各组试验均保持筋材的极限拉伸强度 T_f 与加筋间距 S_v 的比值(T_f/S_v)为一定值,即保证筋材在极限承载能力状态下能够提供的最大抗力在理论上相等。

表 1 模型试验方案

Table 1 Plans of model tests

试验编组	加筋间距 S_v/m	加筋长度 L_r	筋材类型	筋材强度 $T_f/(kN\cdot m^{-1})$
A	0.05	$0.7 H_a$	土工格栅	5
B	0.10	$0.7 H_a$	土工格栅	10
C	0.05	$1.0 H_a$	土工格栅	5
D	0.05	$0.7 H_a$	牛皮纸	5

注:筋材类型的改变,本质上是筋材刚度和面层连接型式的改变。

如表 1 所示,不同试验编组所用的筋材有所不同,试验 B 所用的是未经任何处理的低强度土工格栅,试验 A, C 所用的是经过“剪肋”处理的土工格栅,试验 D 所用的是 120 g 规格的牛皮纸,相应的主要力学性质参数如表 2 所示。

表 2 试验用筋材的主要力学性质参数

Table 2 Main mechanical properties of reinforcements

筋材类型	120 g 牛皮纸	未处理 格栅	剪肋 格栅
极限拉伸强度/($kN\cdot m^{-1}$)	5	10	5
2%伸长率时拉伸强度/($kN\cdot m^{-1}$)	5	3.4	1.6
2%伸长率时筋材刚度/($kN\cdot m^{-1}$)	320	170	80

试验用填料均为级配不良的中粗石英砂,模型制作过程中,砂土的相对密度控制在 0.8 左右。加筋土桥台面层型式采用砌块式,砌块尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = 0.23 m $\times$ 0.10 m $\times$ 0.05 m。不同的筋材类型与面层的连接方式不同,对于土工格栅为机械型连接,而对于牛皮纸则为摩擦型连接。其它如桥跨结构设置、模型施工要点、背壁边界处理、侧壁减阻措施及减阻效果验证等,详见文献[10]。

试验沿模型纵剖面方向施加水平向地震作用,并以指向左侧桥台方向为正方向。施加地震波的振幅(峰值地面加速度 PGA)从 0.1g, 0.2g 依次等差加至 1.0g,具体参见文献[10]。本文仅取 PGA 为 0.4g, 0.8g 两个工况的数据进行对比分析,图 2 所示为这两个工况时施加的地震波,其原型为 Kobe 波(NS 方向)。

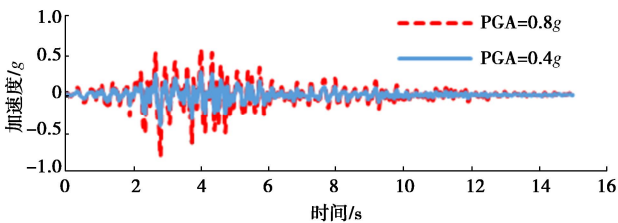


图 2 本文所用工况的施加地震波的时程曲线

Fig. 2 Time histories of earthquake motion

监测内容主要包括加筋土桥台不同部位的加速度响应、面层处的侧向位移和侧向土压力、承载区中心下竖向土压力、筋材应变等。监测元件布置如图 1 所示, 监测数据均为地震作用引起的动力增量值。

2 试验成果分析

2.1 加速度响应

图 3 所示为各组试验平均峰值加速度放大系数的对比, 平均峰值加速度放大系数为各组试验在同一高度上的不同监测断面处的加速度放大系数的平均值。由图可知, 不同变量因素(本文设置的变化范围内, 下同)对加筋土桥台的加速度放大效应的影响不大, 各组试验的平均峰值加速度放大系数值比较接近, 总的变化范围为 1.0~1.3。加筋土桥台顶部的平均峰值加速度放大系数不超过 1.3, 说明该结构受震时的加速度放大效应一般, 可能与上部桥梁结构的限制作用有关, 也可能是模型试验尺寸效应的缘故。

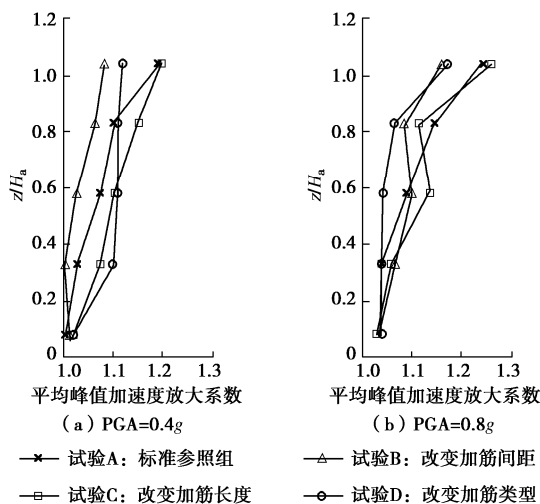


图 3 平均峰值加速度放大系数的对比

Fig. 3 Comparison of amplification factors of average peak acceleration

2.2 面层侧向位移

图 4 所示为各组试验面层残余位移的对比。由图可知, 当输入地震波的 PGA 为 0.4g 时, 各组试验的面层残余位移均很小, 变量因子的影响程度难以体现。当 PGA=0.8g 时, 各变量因素对面层残余位移的影响有如下表现: 加筋间距翻倍使筋材对土体的侧限作用减弱, 加筋土桥台的侧向变形明显增加; 增大加筋长度(从 $0.7H_a$ 变为 $1.0H_a$)可以在一定程度上减小面层侧向变形, 但不如改变加筋间距的影响大; 改变筋材类型(筋材刚度增大, 面层连接型式变为摩擦型)对加筋土桥台面层侧向变形的影响较大, 首先增大筋材

刚度可以减小面层侧向变形, 其次面层连接型式的改变导致面层侧向变形模式由“整体外倾”变为“中间鼓胀”。

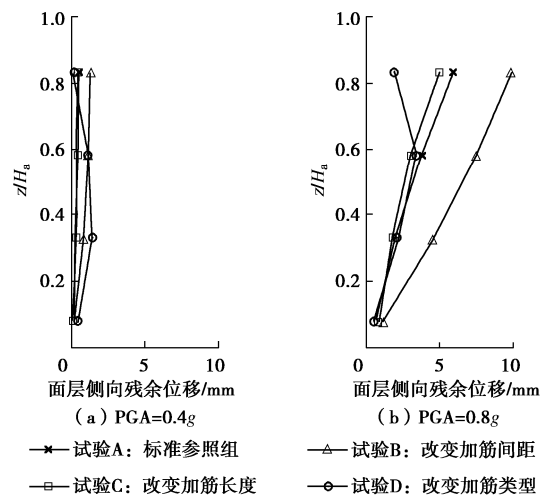


图 4 面层残余位移对比

Fig. 4 Comparison of residual lateral displacements of facing

由于改变筋材类型后, 面层连接型式也改为摩擦型, 面层的整体刚度不如之前的机械型连接, 根据下文土压力与筋材应变的分析, 桥台中间部位受到的侧向土压力相对最大, 因此面层整体刚度较为薄弱的情况下, 面层侧向变形呈现为“中间鼓胀”。

2.3 侧向土压力

图 5 所示为各组试验面层侧向峰值土压力的对比。由图 5 可知, 各变量因素对面层侧向土压力的影响规律不是很明显。大体而言, 增大加筋间距, 面层侧向位移增加, 侧向土压力有所减小; 增大加筋长度和筋材刚度, 面层侧向位移减小, 侧向土压力有所增大。

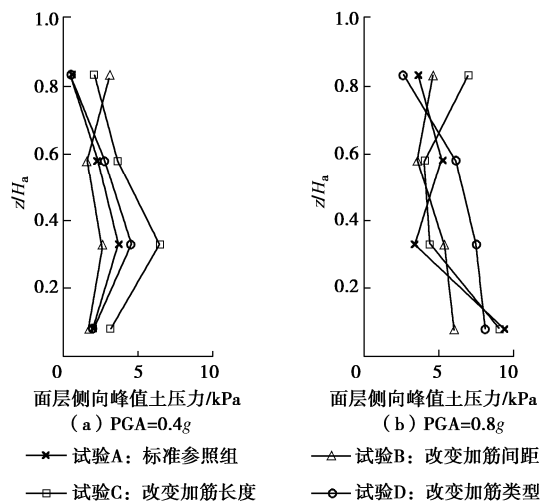


图 5 面层侧向峰值土压力对比

Fig. 5 Comparison of peak lateral earth pressures

2.4 竖向土压力

图6所示为各组试验承载区中心下竖向峰值土压力的对比。由图6可知,加筋间距、加筋长度及筋材类型的改变对竖向土压力的影响均很小。

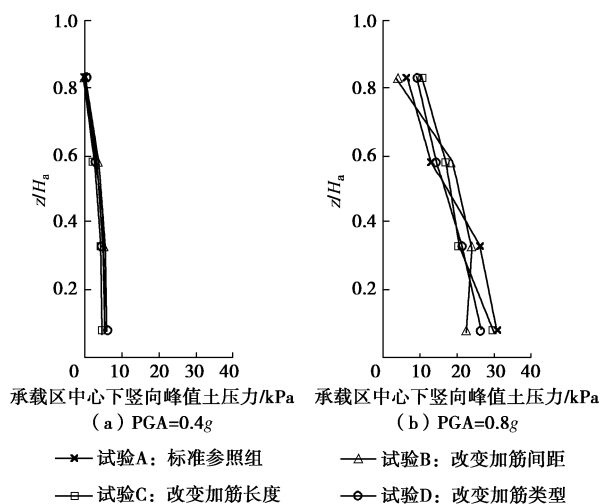


图6 竖向峰值土压力对比

Fig. 6 Comparison of peak vertical stresses

2.5 筋材应变

图7所示为各组试验的筋材峰值应变的对比。由图可知,加筋长度和筋材刚度的变化对筋材应变的影响不大,而加筋间距的翻倍,使得筋材应变有成倍的增长。从理论上讲,筋材刚度越大,相同受力条件下的筋材应变应该越小;而实际上,结构变形程度较小的情况下,筋材刚度的作用可能不能充分发挥,使得增加筋材刚度对减小筋材应变的贡献不大。

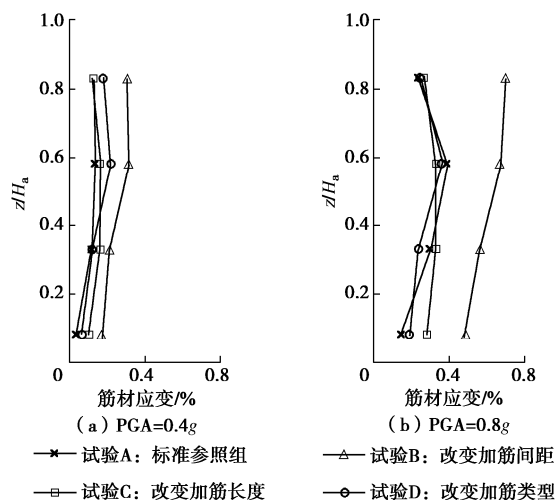


图7 筋材峰值应变的对比

Fig. 7 Comparison of peak strains of reinforcement

3 结 论

(1) 面层连接型式影响加筋土桥台的变形模式,

机械型连接的桥台的侧向变形表现为“整体外倾”,而摩擦型连接的则表现为“中间鼓胀”。

(2) 加筋间距的变化对加筋土桥台抗震性能的影响较大。加筋间距翻倍,面层侧向位移和筋材应变均成倍增加;由于面层侧向位移增加,导致应力释放,侧向土压力有所减小;对竖向土压力的影响则很小。

(3) 加筋长度的变化对加筋土桥台抗震性能的影响不大。增加筋材长度(从 $0.7H_a$ 变为 $1.0H_a$),使面层侧向变形有所减小,侧向土压力有所增大,而对竖向土压力和筋材应变的影响则更小。

(4) 在变形程度较小的情况下,筋材刚度的作用不能充分发挥,其对加筋土桥台抗震性能的影响程度与加筋长度相近。

综上所述,在加筋间距、加筋长度、筋材刚度和面层连接型式这些影响因素中,加筋间距和面层连接型式对加筋土桥台的抗震性能的影响较大。实际工程中,建议采用小间距加筋和机械型连接的面层型式,并对桥台面层设置一定程度的倾角,为其可能的“整体外倾”预留变形空间。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] KELLER G R, DEVIN S C. Geosynthetic-reinforced soil bridge abutments[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1819(1): 362 - 368.
- [3] 罗敏敏, 徐超, 杨子凡. 土工合成材料加筋土柔性桥台复合结构及应用[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1): 226 - 232. (LUO Min-min, XU Chao, YANG Zi-fan. Geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system and its applications[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 226 - 232. (in Chinese))
- [4] YAZDANDOUST M. Investigation on the seismic performance of steel-strip reinforced-soil retaining walls using shaking table test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 97: 216 - 232.
- [5] KOERNER R M, KOERNER G R. An extended data base and recommendations regarding 320 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(6): 904 - 912.
- [6] HELWANY S, WU J T H, MEINHOLZ P, et al. Seismic

- behavior of GRS bridge abutments with concrete block facing: an experimental study[J]. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2017, **4**(4): 85 - 105.
- [7] ZHENG Y, MCCARTNEY J S, SHING P B, et al. Transverse shaking table test of a half-scale geosynthetic reinforced soil bridge abutment[J]. *Geosynthetics International*, 2018, **25**(6): 582 - 598.
- [8] ZHENG Y, MCCARTNEY J S, SHING P B, et al. Physical model tests of half-scale geosynthetic reinforced soil bridge abutments. ii: dynamic loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, **145**(11): 04019095.
- [9] XU C, LUO M, SHEN P, et al. Seismic performance of a whole geosynthetic reinforced soil - integrated bridge system(GRS-IBS) in shaking table test[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, **48**(3): 315 - 330.
- [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**(增刊 1): 179 - 186. (XU Chao, LUO Min-min, REN Fei-fan, et al. Experimental study on seismic behaviour of reinforced soil flexible abutment composite structures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(S1): 179 - 186. (in Chinese))
- [11] GHADERI R, HELWANY S, WU J T H, et al. Seismic behavior of geosynthetic reinforced soil(GRS) bridge abutments with concrete block facing: an analytical study[J]. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2017, **4**(2): 52 - 83.

(编校: 胡海霞)

(上接第 187 页)

- [6] 龚江红, 姚登友, 任佳丽. 伞型锚在鄂北调水高膨胀土滑坡治理中的应用[J]. *土工基础*, 2016, **30**(4): 452 - 456. (GONG Jiang-hong, YAO Deng-you, REN Jia-li. Application of umbrella anchors for the mitigation of strong expansive soil landslides in a water transmission project in northern Hubei[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2016, **30**(4): 452 - 456. (in Chinese))
- [7] 龚壁卫, 程展林, 胡波, 等. 膨胀土裂隙的工程特性研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(7): 1825 - 1830, 1836. (GONG Bi-wei, CHENG Zhan-lin, HU Bo, et al. Research on engineering properties of fissures in expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(7): 1825 - 1830, 1836. (in Chinese))
- [8] 吴顺川, 潘旦光. 膨胀土边坡自平衡预应力锚固方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(4): 492 - 497. (WU Shun-chuan, PAN Dan-guang. Reinforcement approach of self-balance pre-stressed bolts for expansive soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(4): 492 - 497. (in Chinese))
- [9] 袁培进, 吴铭江, 陆遐龄, 等. 长江三峡永久船闸高边坡预应力锚索监测[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(增刊 1): 198 - 201. (YUAN Pei-jin, WU Ming-jiang, LU Xia-ling, et al. Monitoring of prestressing anchors in high slope for Three Gorges Projects permanent shiplock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(S1): 198 - 201. (in Chinese))

(编校: 孙振远)