

杨张能,陈兴冲,马华军,等.锚定板浅基础桥台抗震性能参数影响分析[J].地震工程学报,2024,46(3):575-583.DOI:10.20000/j.1000-0844.20221005001

YANG Zhangneng, CHEN Xingchong, MA Huajun, et al. Parameter influence on the seismic behavior of shallow foundation abutments with anchor plates[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(3): 575-583. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221005001

锚定板浅基础桥台抗震性能参数影响分析

杨张能, 陈兴冲, 马华军, 王 义, 鲁锦华

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 基于浅基础桥台震后调查得到的破坏特点,参考锚定板挡土墙,设计出一种锚定板浅基础桥台。通过拟静力试验与有限元软件 ABAQUS 研究其抗震性能,探讨钢绞线直径、锚定板布置类型、锚定板面积与台背面积比值、台背填土弹性模量和钢绞线长度变化对结构抗震性能的影响规律。结果表明:有锚定板参与时桥台承载能力有明显提升,耗能能力增强;结构破坏主要由土体失效与钢绞线断裂引起,桥台与锚定板未发生破坏;在一定范围内增大钢绞线直径可以显著提升结构的承载能力,减缓刚度退化;提升台背填土弹性模量可以增加桥台承载能力;锚定板布置方式的改变基本不影响桥台承载能力;锚定板面积与台背面积比值较大时结构初始承载能力较强,但后期刚度退化较快;满足设计要求后钢绞线的长度不宜过大。

关键词: 桥台; 锚定板; 抗震性能; 拟静力试验; 参数分析

中图分类号: U24

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)03-0575-09

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221005001

Parameter influence on the seismic behavior of shallow foundation abutments with anchor plates

YANG Zhangneng, CHEN Xingchong, MA Huajun, WANG Yi, LU Jinhua

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Based on the damage characteristics obtained from the post-earthquake investigation of shallow foundation abutments, a shallow foundation abutment with anchor plates was designed for an anchor plate retaining wall. The seismic performance of the proposed abutment was evaluated with the quasi-static test and finite element software ABAQUS. The effects of various factors, namely, steel strand diameter, anchor plate layout, ratio of anchor plate area to abutment back area, elastic modulus of abutment backfill, and steel strand length, on the seismic performance of the proposed abutment were explored. Results indicate that the bearing and energy dissipation capacities of the abutment improve after the anchor plate is used. The primary causes of structural failure are soil failure and steel strand fracture, and the abutment and anchor plate remain undamaged. Increasing the diameter of the steel strand in a certain range can considerably

收稿日期: 2022-10-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(57178142); 国家自然科学基金项目(51968039)

第一作者简介: 杨张能(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: 1090143212@qq.com。

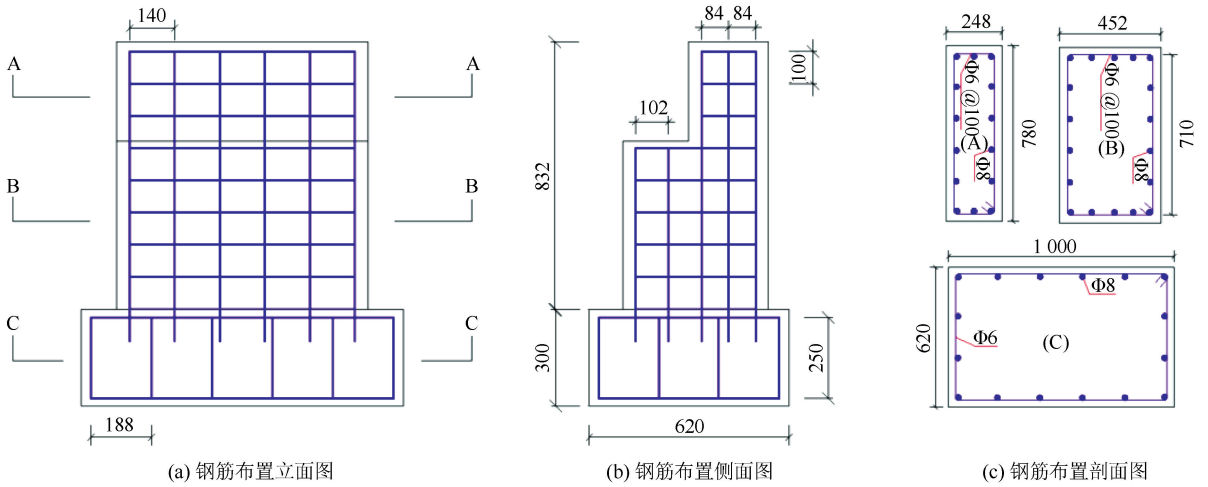


图 2 试件配筋图(单位:mm)

Fig.2 Reinforcement arrangement of the specimen (Unit:mm)

定板与桥台连接拉筋选用直径 5 mm 的 304 不锈钢钢丝绳,钢丝绳两端用 U 型锁扣分别连接桥台和锚定板浇筑时预埋的钢筋扣。

试验在土工模型箱中进行,模型试验加载装置如图 3 所示。试验中当土体夯填至设计高度后开挖

基坑并吊入预制桥台,继续夯填至指定高度,然后开挖台背土体并安装锚定板,随后采用钢绞线将桥台与锚定板相连,继续夯土直至三层锚定板布置完成。土体实测材料参数列于表 1。

设置锚定板的目的是防止桥台在地震中向台前

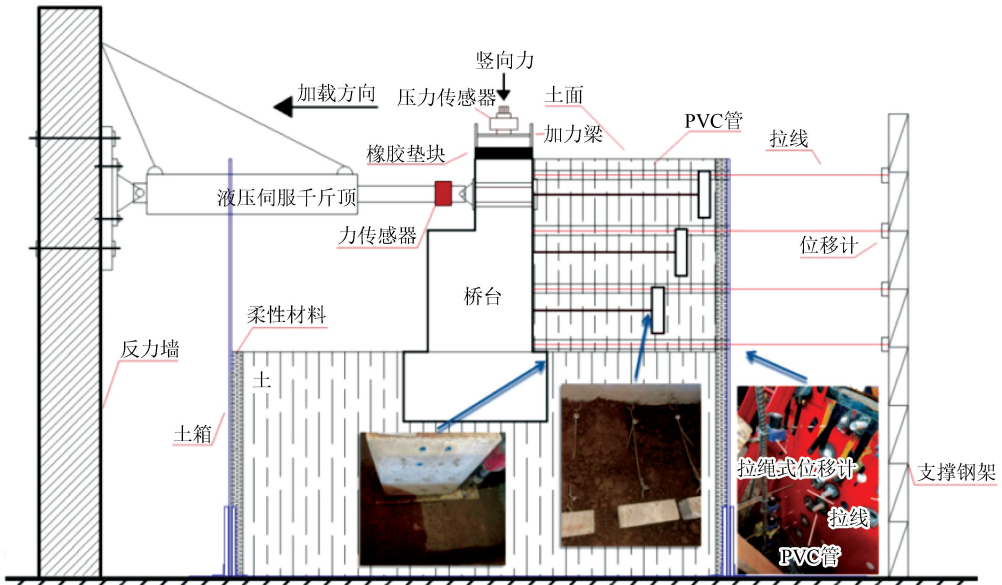


图 3 加载系统示意图

Fig.3 Diagram of loading system

表 1 土体参数

Table 1 Parameters of the soil

含水率/%	密度/(g/cm ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
14.6	1.81	40	31.4

倾覆滑移。为比较锚定板的效果,加载方式为位移控制且只向桥台前重复加载,每一级加载循环 3 次。通过初步模拟,发现桥台顶水平位移小于 12 mm 时,桥台顶荷载与位移基本呈线性关系,则设计加载

制度为从 2 ~12 mm 之间采用 2 mm 步长加载,从 15 mm 开始采用 5 mm 步长加载至 40 mm。加载制度如图 4 所示。台顶梁重按 1/100 比例缩小后,施加于模型台顶的竖向集中力为 52 kN。

1.2 试验现象

当桥台顶部水平加载位移达到 4 mm 时,台背与土体之间出现轻微分离现象,之后随着加载位移的增大,裂缝逐渐增大;当加载位移到 15 mm 时,

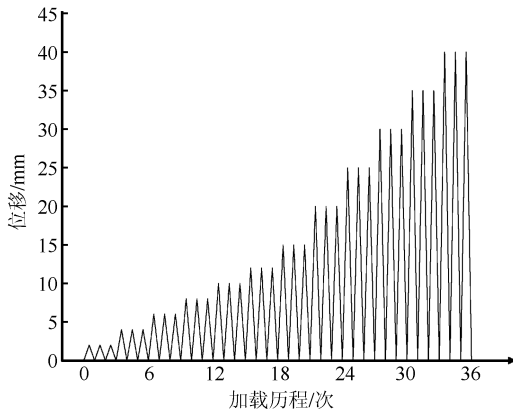


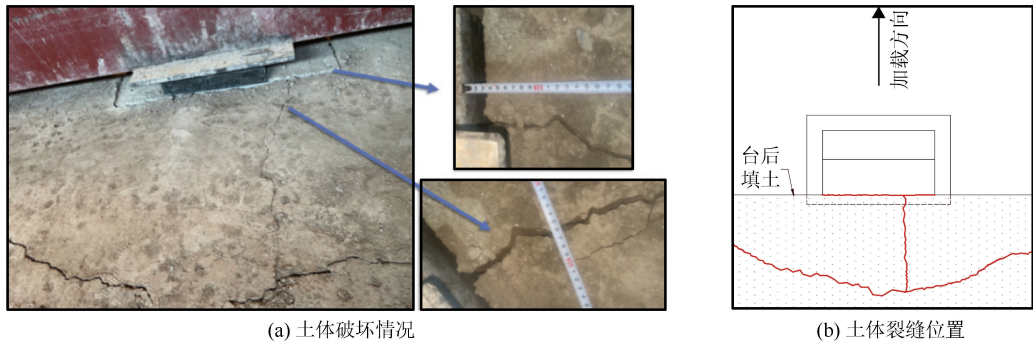
图4 试验加载历程图

Fig.4 Loading history in the test

台背填土表面出现平行于加载方向的裂缝。由试验现象可知,此时钢丝绳被拉直,锚定板开始承载,最

上层钢丝绳与土体间的切应力使土体表层出现裂缝;位移加载至 25 mm 时,由于锚定板分担了桥台所受的土压力,台后土体表面出现垂直于加载方向的新裂缝,距离台背约 70 cm,处于最上层锚定板上方,此后台背与台后土体裂缝宽度增幅减小;当位移加载至 35 mm,台背与台后土体裂缝宽度再次增大,可以判断锚定板挤压板前土体发生破坏,锚定板开始与板前土体产生相对位移;当位移加载至 40 mm 时,钢丝绳断裂,试验终止。台后填土表面裂缝情况如图 5(a)所示,裂缝位置如图 5(b)所示。

试验结束后开挖土体,检查桥台及锚定板破坏情况,发现桥台及锚定板自身并未发生破坏,连接桥台与锚定板的一根钢绞线在台背连接处断裂,如图 6 所示。



(a) 土体破坏情况

(b) 土体裂缝位置

图5 土体裂缝

Fig.5 Soil crack



(a) 桥台试验后状态

(b) 钢绞线破坏情况

图6 试件破坏情况

Fig.6 Failure of test specimen

1.3 试验结果及分析

试验得到的锚定板浅基础桥台荷载-位移滞回曲线与骨架曲线如图 7 所示。由图 7(a)可以发现,在加载前期滞回曲线呈梭形,滞回环包围面积较小;随着加载位移增加,浅基础与周围土相互作用的弹塑性效应增强,滞回曲线愈发饱满,耗能能力增强;加载位移继续增大,浅基础周围土体被挤压后进入塑性状态,残余变形增大,滞回环捏缩,体系刚度下

降。由于钢绞线未进行预张拉,在加载位移达到 10 mm 之前,锚定板仍未起作用,桥台-土体系的承载能力主要由地基土来承担;加载位移达到 10 mm 时承载力达到最大值,随后承载力开始下降;当加载位移至 15 mm 时,随着连接锚定板的钢绞线被拉紧,锚定板开始参与工作,桥台-土体系的承载能力明显提升。从图 7(a)还可以看出,在锚定板工作后滞回环包围面积大于无锚定板时,结构整体耗能能

力提升。从图 7(b)骨架曲线中发现锚定板的参与明显提高了浅基础桥台的承载能力,且在因钢绞线

拉断停止试验时,承载力约为无锚定板时最大承载力的 1.69 倍。

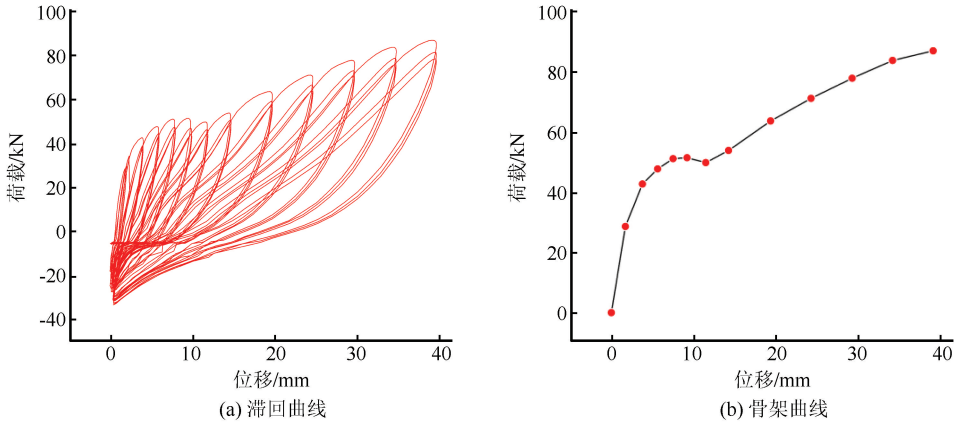


图 7 构件滞回曲线与骨架曲线

Fig.7 Hysteretic curve and skeleton curve of test specimen

2 数值模拟

2.1 有限元模型

采用 ABAQUS 软件建立锚定板浅基础桥台-土体系有限元模型,如图 8 所示。土体、浅基础桥台和锚定板选用 C3D8R 三维实体单元模拟,钢绞线只考虑受拉变形,选用 T3D2 桁架单元模拟,并输入其横截面积^[16]。台背填土选用 Mohr-Coulomb 本构模拟,参数为:容重 $\gamma_{s1} = 18.1 \text{ kN/m}^3$,黏聚力 $c_s = 40 \text{ kPa}$,泊松比为 0.3。钢绞线本构选用线弹性模型,容重 $\gamma_1 = 7 \text{ 850 kg/m}^3$,弹性模量 $E_1 = 195 \text{ 000 MPa}$ 。钢筋选用 T3D2 单元模拟,采用理想弹塑性模型,容重 $\gamma_2 = 7 \text{ 850 kg/m}^3$,弹性模量 $E_1 = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比为 0.3。混凝土本构选用塑性损伤模型(CDP 模型),容重 $\gamma_2 = 24 \text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E_2 = 30 \text{ 000 MPa}$,泊松比为 0.2,塑性参数参考文献^[17]。

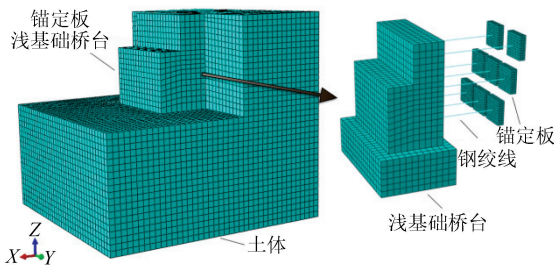


图 8 有限元分析模型

Fig.8 Finite element analysis model

模型中存在多种接触关系,其中桥台与填土接触面、锚定板与填土接触面设置有限滑移的面与面接触,接触方式为法向硬接触。钢绞线与桥台台背、

锚定板设置为绑定约束(Tie),选用点面接触方式。桥台内钢筋设置全部嵌入于混凝土内。土体与桥台采用 10 cm 网格进行划分,锚定板采用 2 cm 网格进行划分。在土体垂直于 X 方向的 2 个侧面约束其 X 向位移,垂直于 Y 方向的 2 个侧面约束其 Y 向位移,在土体垂直于 Z 方向的底部采用固结的方式处理。

锚定板浅基础桥台在拟静力试验中包括了锚定板作用前后两个部分,采用单元“生死”功能模拟。本文建模计算主要研究锚定板结构参数变化对桥台抗震性能的影响,为提高模拟效率,只对位移加载为 15 mm 锚定板作用后的荷载-位移曲线对比分析。

2.2 模型验证

将桥台在锚定板工作后通过试验得到的荷载-位移骨架曲线与模拟结果进行对比,如图 9 所示。通过对比发现在水平重复加载下,模拟结果与试验结果骨

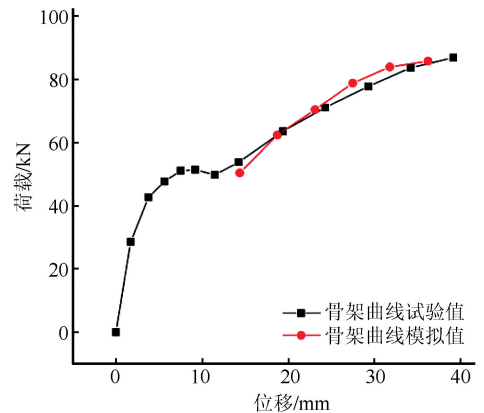


图 9 试验与数值分析结果对比

Fig.9 Comparison between experimental and numerical analysis results

架曲线上上升趋势基本相同,承载能力提高程度也基本吻合。因此,所建立的有限元三维实体模型的模拟结果与试验结果相符,数值模拟的效果良好。

3 参数分析

为进一步研究锚定板浅基础桥台在拟静力荷载作用下的抗震性能,采用上述所建立的有限元分析模型,以试验中锚定板浅基础桥台各项参数为基准,通过数值模拟得到的骨架曲线分析不同参数对锚定板浅基础桥台抗震性能的影响。由于在拟静力试验中因钢绞线断裂而终止试验,说明钢绞线参数是影响锚定板浅基础桥台抗震性能的重要因素,所以据此共设置 17 个工况,综合对比钢绞线长度(从台顶依次向下第一层钢绞线长度 L_1 、第二层钢绞线长度 L_2 、第三层钢绞线长度 L_3)、钢绞线直径 d 、台背填土弹性模量 E 、锚定板与台背面积比 η 等参数的影响。不同工况参数如表 2 所列。

表 2 设计参数

Table 2 Design parameters

模型工况	L_1/cm	L_2/cm	L_3/cm	d/mm	E/MPa	η
工况 1	70	60	50	5	40	0.493
工况 2	70	60	50	6	40	0.493
工况 3	70	60	50	7	40	0.493
工况 4	70	60	50	5	60	0.493
工况 5	70	60	50	5	80	0.493
工况 6	70	60	50	7	60	0.493
工况 7	70	60	50	7	80	0.493
工况 8	60	60	60	5	40	0.493
工况 9	50	60	70	5	40	0.493
工况 10	60	60	60	7	40	0.493
工况 11	50	60	70	7	40	0.493
工况 12	70	60	50	5	40	0.277
工况 13	70	60	50	5	40	0.123
工况 14	70	60	50	7	40	0.277
工况 15	70	60	50	7	40	0.123
工况 16	140	120	100	5	40	0.493
工况 17	210	180	150	5	40	0.493

3.1 钢绞线直径的影响

通过改变钢绞线直径进行有限元分析得到的荷载-位移骨架曲线如图 10 所示。由图中可知:随着钢绞线直径加粗,工况 2、3 加载结束时承载能力比工况 1 分别增大了 29.36%、59.21%,整个锚定板浅基础桥台-土体系刚度^[18]也有明显增大;当位移加载结束,各工况刚度相比于最开始分别下降了 32.52%、27.33%及 20.69%。分析结果表明增加钢绞线直径,使试件体系承载能力增大,抗震性能有显著提升。

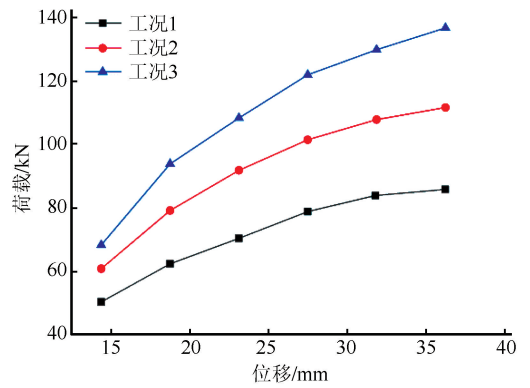


图 10 钢绞线直径的影响

Fig.10 Influence of steel strand diameter

3.2 台背填土弹性模量的影响

钢绞线直径分别为 5 mm 与 7 mm 时,改变台背填土弹性模量分析得到的荷载-位移骨架曲线如图 11 所示。从图中可以看出,通过增大台背填土的弹性模量,承载能力有所提升,且当钢绞线直径增大,弹性模量提高 40 MPa 的情况下,承载能力相比钢绞线直径较小时增大了 61.68%;在弹性模量提高 40 MPa 前后,工况 1 和工况 5 体系刚度分别下降了 32.7%、31.8%,而工况 3 和工况 7 体系刚度分别下降了 20.62%、27.46%。分析结果表明台背填土弹性模量增加可以提升锚定板浅基础桥台承载能力,但在不同钢绞线直径的条件下,弹性模量变化对结构承载能力影响程度也不同,更粗的钢绞线直径有助于提升台背填土弹性模量对体系承载能力的影响;填土弹性模量同样增加 40 MPa,钢绞线直径较大相较于直径较小情况体系刚度下降幅度减小。

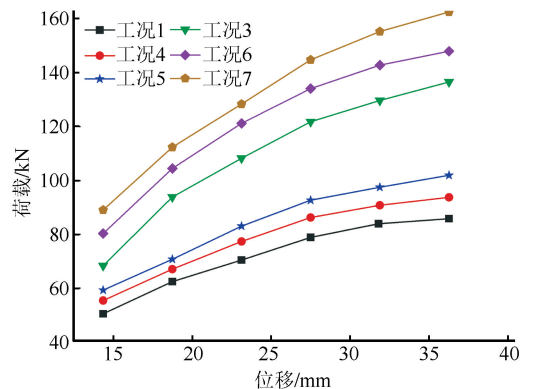


图 11 填土弹性模量的影响

Fig.11 Influence of elastic modulus of filled earth

3.3 锚定板布置方式的影响

早期学者通过交替改变上下三层拉杆长度共提出三种锚定板布置方式,除图 1 所示的第一种布置

方式外,另外两种锚定板布置方式如图 12 所示。对这三种锚定板布置方式进行有限元模拟分析,得到的荷载-位移曲线如图 13 所示。从图 13 中可以看出第一类锚定板在加载结束时承载能力略大于第二

与第三类锚定板,钢绞线直径较大情况下此现象变得较为明显。结果表明三种锚定板布置方式对体系抗震性能影响不大,设计施工中可根据实际情况对比选择不同布置方式。

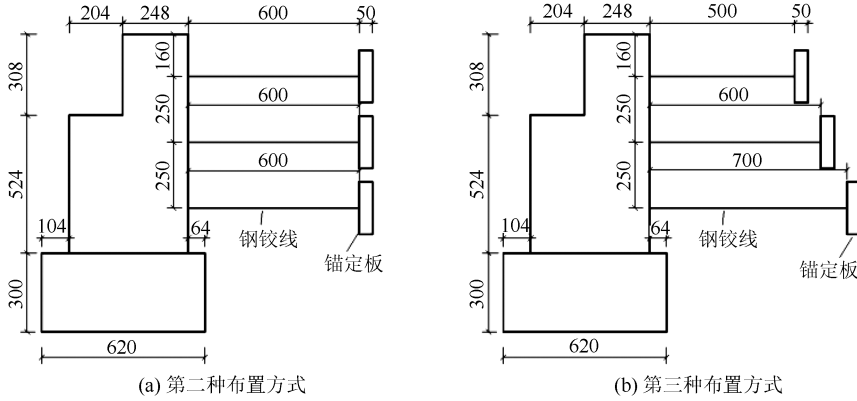


图 12 锚定板布置方式(单位:mm)

Fig.12 Layout of anchor plate (Unit:mm)

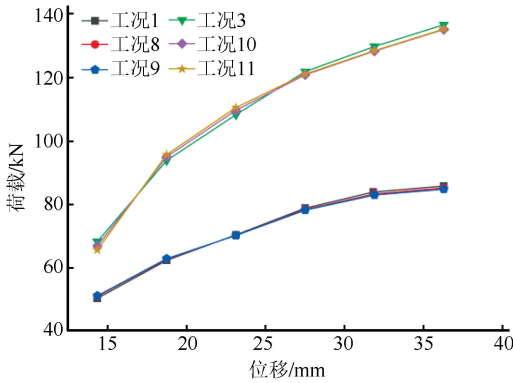


图 13 锚定板布置方式的影响

Fig.13 Influence of anchor plate layout

3.4 锚定板与台背面积比 η 的影响

依据华祖焜等^[15]提出的锚定板面积与挡土结构物面积之比 η ,钢绞线粗细不同的情况下分析三种不同 η 值对体系承载能力的影响,如图 14 所示。从图中可以看出在钢绞线直径较细情况下, η 值在 0.123~0.493 范围内对体系抗震性能几乎没有影响。当钢绞线直径较粗后,前期 η 值较大的锚定板浅基础桥台承载能力分别提高了 7.98%、14.06%,但在加载结束时 η 值最大的工况承载能力最小,随着 η 值的减小,加载结束时体系刚度分别退化了 20.67%、14.44%、8.63%。分析结果表明 η 值最大时,虽然加载前期桥台承载能力较强,但在加载结束时,其刚度下降幅度是 η 值最小时的 2.39 倍,且承载能力也低于 η 值最小时的工况。

3.5 钢绞线长度的影响

通过改变钢绞线长度对整个锚定板浅基础桥

台-土体系数值模拟得到的荷载-位移骨架曲线如图 15 所示。从图中可以发现:由于弹性模量 $E = (F/S)/(\Delta L/L)$,当钢绞线横截面积 S 与材料未发生变

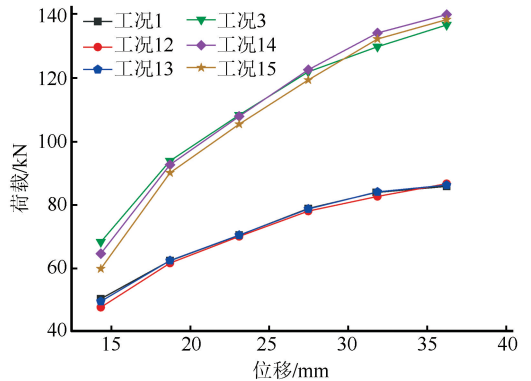


图 14 锚定板与台背面积比 η 的影响

Fig.14 Effect of the ratio of anchor plate area to abutment back area η

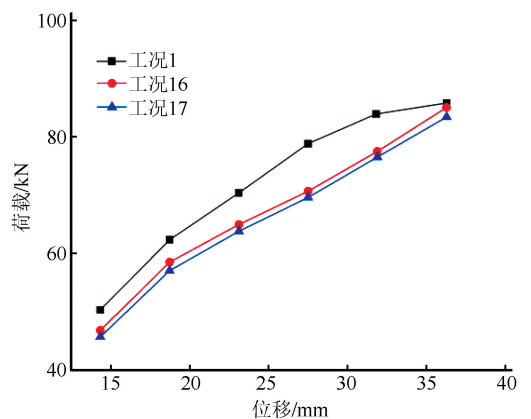


图 15 钢绞线长度的影响

Fig.15 Effect of steel strand length

化时,钢绞线长度 L 增加后其伸长量 ΔL 也会随之增加,所以增加钢绞线长度后在加载过程中桥台承载能力增幅相对较低,直至加载结束,三个工况承载能力才相接近。这说明增加钢绞线长度会降低桥台的承载能力,满足设计要求后钢绞线的设计长度不宜过大。

4 结论

通过锚定板浅基础桥台的拟静力试验、有限元建模及参数分析得到以下主要结论:

(1) 锚定板的参与明显改善桥台的抗震性能,提升了桥台的耗能能力;锚定板桥台的破坏主要由土体失效与钢绞线断裂引起,桥台与锚定板自身未发生破坏。

(2) 钢绞线直径增加可显著提升锚定板浅基础桥台的承载能力,减缓桥台-土体系的刚度退化。

(3) 提高台背填土弹性模量使桥台承载能力增加,且当钢绞线直径加大,提高台背填土弹性模量对提升桥台的承载能力影响更大,结构刚度下降幅度减小。

(4) 改变锚定板的布置方式并不能明显改善桥台的承载能力。

(5) 钢绞线直径较小时,增加锚定板与台背面积比对桥台-土体系的承载能力影响不明显;当钢绞线直径较大时,增加 η 值可以在加载初期提高结构承载能力,但随着加载进行刚度下降速度加快。

(6) 增加钢绞线长度会降低桥台的承载能力,满足设计要求后钢绞线的设计长度不宜过大。

参考文献(References)

- [1] 焦驰宇,鲁子明,龙佩恒,等.桥台-土-结构相互作用对桥梁结构地震反应影响的研究进展[J].工程抗震与加固改造,2016,38(6):1-8,31.
JIAO Chiyu, LU Ziming, LONG Peiheng, et al. Advanced researches on the influences of abutment-soil-structure interaction on the seismic response of bridges[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(6): 1-8, 31.
- [2] 孙治国,王东升,张蓓,等.高原大桥桥台地震破坏机理与抗震措施分析[J].地震工程与工程振动,2012,32(4):79-87.
SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, ZHANG Bei, et al. Analysis of seismic failure mechanism and earthquake resistant measures for the abutments of Gaoyuan bridge[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(4): 79-87.
- [3] 王海涛,高大,申佳玉,等.梁的约束对液化场地桥台震害模式的影响分析[J].地震工程学报,2017,39(4):632-638.
WANG Haitao, GAO Da, SHEN Jiayu, et al. Impact of beam

restriction on seismic damage mode of abutments in liquefied ground[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 632-638.

- [4] 程志明,魏红卫.桥头路堤-桥台-地基作用体系的地震反应分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(9):2225-2234.
CHENG Zhiming, WEI Hongwei. Analysis of abutment-embankment-foundation interaction system subjected to seismic load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(9): 2225-2234.
- [5] 宋修广,杨鹤,陈晓燕,等.砂土中浅埋竖向锚定板极限承载力[J].山东大学学报(工学版),2021,51(1):24-31,38.
SONG Xiuguang, YANG He, CHEN Xiaoyan, et al. Ultimate uplift capacity of shallow vertical plate anchors in sand[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(1): 24-31, 38.
- [6] 葛光宾.重力式与锚定板相结合的挡土墙[J].路基工程,1991(3):19-24.
GE Guangbin. Gravity retaining wall combined with anchor plate[J]. Subgrade Engineering, 1991(3): 19-24.
- [7] 梁爱涛,勾玉龙.高速铁路锚定板挡土墙结构设计[C]//北京力学学会第二十八届学术年会论文集(下).北京:北京力学学会,2022:602-604.
LIANG Aitao, GOU Yulong. Structural design of anchor slab retaining wall for high speed railway[C]//Proceedings of the 28th Annual Conference of Beijing Force Society (II). Beijing: Beijing Mechanics Society, 2022: 602-604.
- [8] 张宏博,解全一,岳红亚,等.预应力悬锚式挡土墙受力特性[J].山东大学学报(工学版),2016,46(5):95-101.
ZHANG Hongbo, XIE Quanyi, YUE Hongya, et al. Mechanical performance of prestressed anchor plate retaining wall[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(5): 95-101.
- [9] GIAMPA J R, BRADSHAW A S, GERKUS H, et al. The effect of shape on the pull-out capacity of shallow plate anchors in sand[J]. Géotechnique, 2019, 69(4): 355-363.
- [10] 岳红亚.基于PIV技术的浅埋锚定板和管道抗拔破坏机理及计算理论研究[D].济南:山东大学,2020.
YUE Hongya. Research of pullout failure mechanism and computational method of shallow plate anchors and pipelines based on PIV technology[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
- [11] WANG S R, WANG Y H, WANG Z L, et al. Anchoring performances analysis of tension-torsion grouted anchor under free and non-free rotating conditions[J]. DYNA, 2021, 96(1): 166-172.
- [12] SHAHRIAR A R, ISLAM M S, JADID R. Ultimate pullout capacity of vertical anchors in frictional soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(2): 04019153.
- [13] 王红红.压力分散型悬锚式挡土墙支护理论及应用研究[D].济南:山东大学,2011.
WANG Honghong. Support theory and application of pressure-dispersed anchor cantilever retaining wall[D]. Ji'nan:

- Shandong University, 2011.
- [14] SAHOO J P, GANESH R. Seismic uplift resistance of circular plate anchors in sand[J]. Proceedings of the ICE: Geotechnical Engineering, 2019, 172(1): 55-66.
- [15] 华祖焜, 罗国武. 锚定板挡土结构设计中的墙背土压力问题—锚定板结构墙背土压力与锚定板尺寸的关系[J]. 路基工程, 1986(1): 65-69.
- HUA Zukun, LUO Guowu. Earth pressure on the back of the wall in the design of anchor plate retaining structure—the relationship between the earth pressure on the back of the wall of anchor plate structure and the size of anchor plate[J]. Sub-grade Engineering, 1986(1): 65-69.
- [16] 蔡正银, 侯伟, 关云飞. 遮帘式板桩码头的工作机理[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1745-1750.
- CAI Zhengyin, HOU Wei, GUAN Yunfei. Mechanism of sheet-pile wharf with barrier piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1745-1750.
- [17] 杨宝刚, 李永庆, 张玥, 等. 中小跨径桥梁座式桥台抗震性能参数敏感性分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(2): 321-327.
- YANG Baogang, LI Yongqing, ZHANG Yue, et al. Sensitivity analysis for seismic performance parameters of seat abutment of small and medium span bridges[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(2): 321-327.
- [18] 黄福云, 何凌峰, 单玉麟, 等. 整体式桥台-混凝土桩-土相互作用拟静力试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1803-1814.
- HUANG Fuyun, HE Lingfeng, SHAN Yulin, et al. Experiment on interaction of soil-abutment-RC pile in integral abutment jointless bridges (IAJBs)[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(7): 1803-1814.

(本文编辑:张向红)

(上接第 556 页)

- CAI Fengwei, JIN Canguo. Discussion on the influence of light in-filled wal on the calculation and analysis of frame structure[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2020, 27(6): 17-21.
- [15] BAKER J W, LEE C. An improved algorithm for selecting ground motions to match a conditional spectrum[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22(4): 708-723.
- [16] 孙攀旭, 杨红. 基于等效黏性阻尼模型的非比例阻尼体系反应谱 CCQC 法[J]. 工程力学, 2021, 38(10): 160-172, 180.
- SUN Panxu, YANG Hong. A response spectrum CCQC method for non-proportionally damped systems based on equivalent viscous damping model[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(10): 160-172, 180.
- [17] KURAMA Y C, FARROW K T. Ground motion scaling methods for different site conditions and structure characteristics [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32(15): 2425-2450.
- [18] KOTTKE A, RATHJE E M. A semi-automated procedure for selecting and scaling recorded earthquake motions for dynamic analysis[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(4): 911-932.
- [19] 徐天妮, 杜永峰, 马守才. 基于易损性的基础隔震结构地震动选取方法研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(1): 46-53.
- XU Tianni, DU Yongfeng, MA Shoucai. A method of ground motion selection for base-isolated structures based on vulnerability analysis [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 46-53.

(本文编辑:任 栋)