



交通运输工程学报

Journal of Traffic and Transportation Engineering

ISSN 1671-1637, CN 61-1369/U

《交通运输工程学报》网络首发论文

题目：水平往复大位移作用下整体桥台后土压力计算方法
作者：黄福云, 李岚, 张峰, 刘征峰, 陈伟
收稿日期：2022-04-10
网络首发日期：2022-10-25
引用格式：黄福云, 李岚, 张峰, 刘征峰, 陈伟. 水平往复大位移作用下整体桥台后土压力计算方法[J/OL]. 交通运输工程学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1369.U.20221024.1641.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

水平往复大位移作用下整体桥台后土压力计算方法

黄福云^{1,2}, 李 岚^{1,2}, 张 峰^{1,2}, 刘征峰^{1,2}, 陈 伟^{1,2}

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福建 福州 350108)

摘要:为研究整体桥在强震作用下和长整体桥在温度作用下, 桥台产生的水平往复大位移对桥台与台后填土相互作用的影响, 进行了整体式桥台-H形钢桩-土相互作用拟静力试验, 并基于试验结果研究了大位移作用下整体桥台后土压力的分布规律; 根据台后土压力分布, 提出了台后土压力合力作用点位置与加载位移之间的关系式, 并在现有研究的基础上给出了改进的整体桥台后土压力计算方法。研究表明: 正向加载(桥台挤压台后土)时, 台后各处土压力随加载位移的增加先增大后减小; 台背处和台后20%桥台高度处土压力受桥台位移的影响更大, 沿深度方向呈梯形分布; 台背处土压力分布中, 由于台底H形钢桩的约束, 最大土压力位于入土深度0.875 m处, 台底位置的土压力则略有减小; 台后60%桥台高度和1.4倍桥台高度处土压力受桥台位移影响较小, 沿深度方向呈三角形分布; 负向加载(桥台背离台后土)时, 台后土压力沿深度方向呈三角形分布, 且台后各处土压力与加载位移不相关, 其值相对正向加载时可忽略; 水平往复大位移作用下, 整体桥台后土会产生脱空现象, 脱空范围超过桥台高度的37.5%; 台后土压力沿纵向呈指数型衰减, 且相比小位移作用下衰减得更快; 台后土压力合力作用点位置随加载位移的增大而逐渐降低, 且台后土压力系数与加载位移具有明显的非线性关系, 呈现先增大后减小的规律; 现有土压力计算方法未考虑桥台位移的影响或认为台后土压力在桥台发生小位移时随桥台位移的增大而增大, 发生大位移时则基本不变; 提出的土压力拟合公式的判定系数为0.92, 计算值与试验值的相对误差为6.2%, 可作为现有土压力计算方法的有益补充。

关键词:桥梁工程; 整体桥; 拟静力; 台后土压力; 计算方法; 抗震性能

中图分类号: U441.2

文献标志码: A

Calculation method for earth pressure behind integral abutment under reciprocating large displacement action

HUANG Fu-yun^{1,2}, LI Lan^{1,2}, ZHANG Feng^{1,2}, LIU Zheng-feng^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: In order to study the effect of horizontal and reciprocating large displacement of the abutment on the interaction between the abutment and the backfill of the integral abutment jointless bridge under the action of strong earthquake or the effect of temperature, the quasi-static test of integral abutment-H-shaped steel pile-soil interaction was carried out. Based on the test results, the distribution pattern of earth pressure behind the abutment under reciprocating large displacement is studied. According to the earth pressure distribution behind the abutment, the relationship equation between the location of the resultant earth pressure action point behind the abutment and the loading displacement is proposed, and an improved calculation method for the earth pressure behind the abutment of the integral abutment jointless bridge is given on the basis of the existing research. The experimental study indicates

收稿日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578161); 福建省交通运输科技项目(202117)

作者简介: 黄福云(1979-), 男, 江西丰城人, 福州大学研究员, 工学博士, 从事无伸缩缝桥梁结构-土相互作用研究。

引用格式: 黄福云, 李 岚, 张 峰, 等. 水平往复大位移作用下整体桥台后土压力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2022.

Citation: HUANG Fu-yun, LI Lan, ZHANG Feng, et al. Calculation method for earth pressure behind the integral abutment under reciprocating large displacement action[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022.

that when the abutment is loaded in the positive direction (the abutment squeezes the soil behind the abutment), the earth pressure behind the abutment increases and then decreases with the increase of the loading displacement. The earth pressure at abutment back and 20% of the abutment height behind the abutment have a "trapezoidal" distribution along the depth. In the earth pressure distribution at the back of the abutment, due to the constraint of H-shaped steel pile at the bottom of the abutment, the maximum earth pressure at the back of the abutment is located at the depth of 0.875 m, while the earth pressure at the bottom of the abutment is slightly reduced. The earth pressure at 60% of the abutment height and 1.4 times the abutment height behind the abutment is less affected by abutment displacement, and is triangularly distributed along the depth direction. When the abutment is loaded in the negative direction (the abutment deviates from the soil behind the abutment), the earth pressure is triangularly distributed along the depth, and the earth pressure behind the abutment have no connection with the loading displacement, and its value can be neglected compared with the positive loading. Under the action of reciprocating displacement of abutment, the soil behind abutment will be void, and the void range will be exceeded 37.5% the height of abutment. The earth pressure behind the abutment reduces exponentially along the longitudinal direction, and it reduces faster than that under the action of small displacement. The location of the resultant earth pressure point behind the abutment decreases gradually with the increase of loading displacement, and the earth pressure coefficient behind the abutment has an obvious non-linear relationship with the loading displacement, showing the law of first increasing and then decreasing. The analysis shows that the position of the resultant force of earth pressure behind the abutment decreases gradually with the increase of loading displacement. The analysis also shows that there is an obvious nonlinear relationship between the earth pressure coefficient and the loading displacement. Existing earth pressure calculation methods do not take into account the effect of abutment displacement or consider that the earth pressure behind the abutment increases with the increase in abutment displacement when small displacements occur and remains basically unchanged when large displacements occur. The determination coefficient of the proposed earth pressure fitting formula is 0.92, the relative error with the test value is 6.2%, which can be a useful supplement to the existing earth pressure calculation method. 1 tab, 11 figs, 31 refs.

Author resume: HUANG Fu-yun(1987-), male, professor, PhD, Huangfuyun@fzu.edu.cn.

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51578161); Transportation Science and Technology Project of Fujian Province (202117)

0 引言

整体式桥台桥梁(以下简称整体桥)取消了支座、伸缩缝和伸缩装置,整体性好,冗余度高,可避免地震中因伸缩缝的存在而导致的碰撞落梁破坏,大大提高了桥梁的抗震防灾能力^[1]。不过,主梁与桥台固结成一体后的整体桥在温度或地震等作用下会产生水平往复位移,并引起桥台-台后土-桩基的相互作用^[2,3]。

目前,国内外众多学者针对整体桥在水平往复小位移作用下的台后土压力进行了有限元模拟分析或长期监测。Frosch等^[4-9]对整体桥实桥进行长期监测后发现,桥台在季节性温度作用下,台后土压力将逐年增大,并将出现不可恢复的位移变形;研究还表明,Coulomb土压力理论与Rankine土压力理论并不能较好地计算台后土压力^[8-9];赵云鹏等^[10-14]探讨了整体桥台后土压力及其分布规律与影

响因素,结果表明当考虑季节性温度变化的影响时,降低桥台高度可减小台后土压力,增加全桥结构的刚度虽不能减小台后土压力,但能减小顺桥向位移,设置泡沫聚苯乙烯(expanded polystyrene, EPS)压缩层可显著减小台后土压力^[15-16],并建议采用土体加筋来增加台后土的自稳定性。此外,学者们还对研究了整体桥台后土压力的计算方法^[17-20],不过,这些方法的准确性还有待试验或实际工程验证。黄福云等^[21-22]开展了整体式桥台-H形钢桩-土体系的拟静力试验研究,探讨了基于温度与小震作用水平往复小位移加载下桥台、H形钢桩和土的相互作用机理,并提出了整体桥台后土压力的计算方法。

然而,整体桥在强震作用下或长整体桥在温度作用下,桥梁上部结构会产生较大的水平往复位移,桥台与填土之间的相互作用更为显著和复杂^[23]。已有研究^[24]表明,现有桥梁抗震设计规范采用的土压力计算方法不能合理地描述整体桥台后动土压力及其分布,该如何设计计算或模拟台-土相互

作用还需进一步的研究, 因此, 研究水平往复大位移作用下整体桥台后土压力分布规律与计算方法具有重要的理论意义和应用价值。为此, 黄福云等^[25]开展了地震作用下整体式桥台-H 形钢桩-土相互作用拟静力试验, 分析了发生大位移变形的整体式桥台-H 形钢桩-土结构体系的滞回性能与耗能能力, 揭示其在地震作用下的破坏模式和变形规律, 但并未深入研究地震作用下发生大位移变形的整体桥台后土压力的分布规律与计算方法。鉴于此, 本文进一步研究整体桥台后土压力的分布规律及相互作用机理, 并提出基于水平往复大位移作用下台后土压力的计算方法, 以期为整体桥的工程应用与规范制定提供参考。

1 试验简介

1.1 模型设计与制作

本文以某整体桥为背景进行试验模型设计。模

表 1 砂土的力学参数

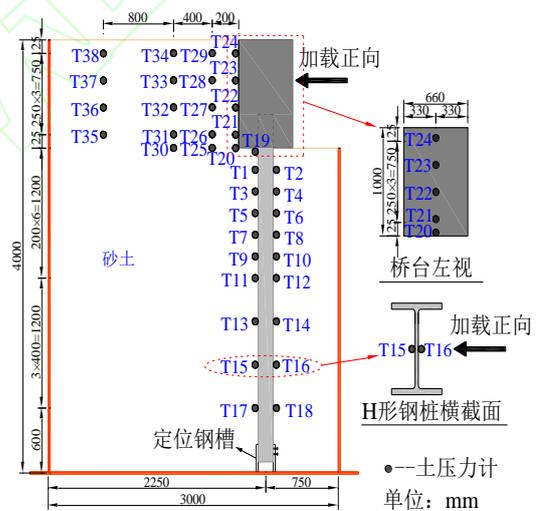
Tab.1 Mechanical parameters of sand

参数名称	相对密实度/%	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率	内摩擦角/(°)	泊松比
参数值	53	1.3	1.5	0.8	35	0.3

桩基与土箱间的距离分别为 0.75 与 2.25 m, 不小于 5 倍桩径, 可忽略土箱边界效应对桩基的影响^[26]; 桥台与土箱之间的距离为 2.0 m, 为 2 倍桥台高度, 可忽略土箱边界效应对桥台的影响^[27]。试验前, 在土箱底部焊接 4 根角钢, 作为桩基的定位钢槽。在定位钢槽中铺设 10 cm 厚的砂土后, 再将试验构件放入定位钢槽中, 并采用高强螺栓将 H 形钢桩固定在钢槽上。随后将砂土从桩底至桩顶以 25 cm 厚分层装入土箱, 每铺设一层就用铁砖振动夯实; 填筑至桩顶后, 按照图 1 (a) 中台后土压力计的布置深度进行分层填筑, 再用铁砖夯实; 最后将土箱底部锚固在试验室反力地坪上。完成装砂后的桥台后侧填土与桥台顶面平齐, 台前侧无填土。试验构件的具体设计制作过程、边界设置以及构件材料特性参见文献^[25]。

型相似比为 0.31^[25]。试验模型桥台高度为 1 m, 纵桥向长度为 0.56 m, 横桥向宽度为 0.66 m。桥台底采用 H 形钢桩, 其强轴向宽度 W 为 0.217 m, 弱轴向宽度 B 为 0.155 m, 腹板厚度 t_1 为 6 mm、翼板厚度 t_2 为 10 mm, 桩长为 3.21 m。为保证 H 形钢桩与桥台间的刚性连接, H 形钢桩嵌入桥台的深度为 2 倍的桩径^[24], 即 0.31 m, 入土深度为 2.9 m。根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) 中的弹性长桩的要求, 选取桩基换算深度 \bar{h} 为 4.3, 桩长可视为无限长。

本试验土箱的尺寸为 3 m (长) × 2 m (宽) × 4 m (高), 土箱内壁粘贴有 5 cm 厚的 EPS 泡沫板。试验所用砂土为中密砂性土, 其力学参数如表 1 所示。



(a) 土压力计布置



(b) 桩基土压力布置



(c) 桥台土压力布置



(d) 台后土中的土压力计

图 1 土压力计布置

Fig.1 Layout of earth pressure cells

1.2 测点布置

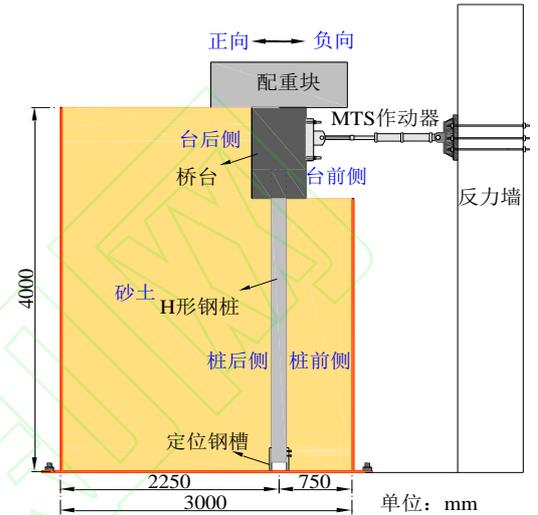
试验采用的土压力计如图 1 (a) 所示, 共布置 38 个土压力计, 其中, 桩侧土压力计 19 个 (T1~T19), 粘贴于桩身弱轴向 H 形钢桩腹板中轴线上 (图 1 (b))。从桩顶至桩身入土深度 1.2 m 处每隔 0.2 m 各布置一对土压力计 (T1~T12); 入土深度为 1.2~2.4 m 时, 每隔 0.4 m 各布置一对土压力计 (T13~T18); T19 粘贴于桩顶后侧, 桩顶前侧土压力基本为 0, 故未布置土压力计。

台后土压力计共 19 个 (T20~T38), 埋置方式为 5 排 4 列, 每列位置分别为距台背 0、0.2、0.6 和 1.4 m (即 0、0.2h、0.6h、1.4h, h 为桥台高度)。每排入土深度分别为 0.125、0.375 m、0.625、0.875 和 1.000 m, 最深一排 (入土深度 1.0 m 处) 仅布置 3 个土压力计, 其他深度处均布置 4 个土压力计。台背处布置 5 个土压力计 (T20~T24, 图 1 (c)); 台后土中土压力计在砂土分层填筑时直接埋在对应位置 (T25~T38) 中, (图 1 (d))。

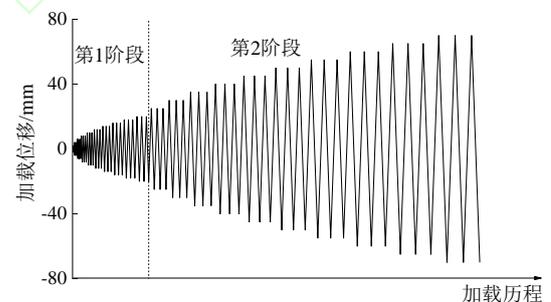
1.3 加载装置与加载制度

本试验采用福州大学工程结构实验室中的 MTS 电液伺服加载系统进行加载。通过 MTS 作动器对桥台施加低周往复水平位移荷载, 模拟主

梁在地震荷载作用下的水平位移, 如图 2 (a) 所示。试验加载以位移为控制量, 采用两阶段加载, 每级荷载加载速度为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 循环 3 次, 加载完成后持荷 1 min。具体位移加载方案如下: 第 1 阶段以 2 mm 为位移增量逐级加载, 直到位移为 20 mm; 第 2 阶段当加载位移大于 20 mm 后, 以 5 mm 为位移为增量逐级加载, 直到结构出现破坏或荷载达到结构最大承载力的 85% 时试验终止, 如图 2 (b) 所示。



(a) 试验装置示意



(b) 试验加载历程

图 2 试验装置与加载历程

Fig.2 Test device and loading process

2 试验结果分析

本试验 3 次循环荷载的结果较为一致, 为便于描述, 在无特殊说明情况下, 均指中间第二次加载的试验结果。同时, 定义试件朝台后侧 (岸坡侧) 移动为正向加载, 试件朝台前侧 (河跨侧) 移动为负向加载。

2.1 台后土压力沿深度方向的分布规律

正向加载作用下, 台背处、 $0.2h$ 和 $0.6h$ 处的台后土压力沿深度方向的分布规律如图 3 所示, 可知: 在正向加载作用下, 桥台朝正向挤压台后填土, 台后 $0\sim 0.2h$ 处的土压力呈先增大后减小的趋势, 呈梯形分布, 这是由于 H 形钢桩对台底位移产生约束, 使得台底(入土深度 1.0 m 处)的土压力值略有减小, 入土深度 0.875 m 处的土压力达到最大; 台后 $0.6h$ 处的土压力受桥台位移影响小, 主要呈三角形分布。

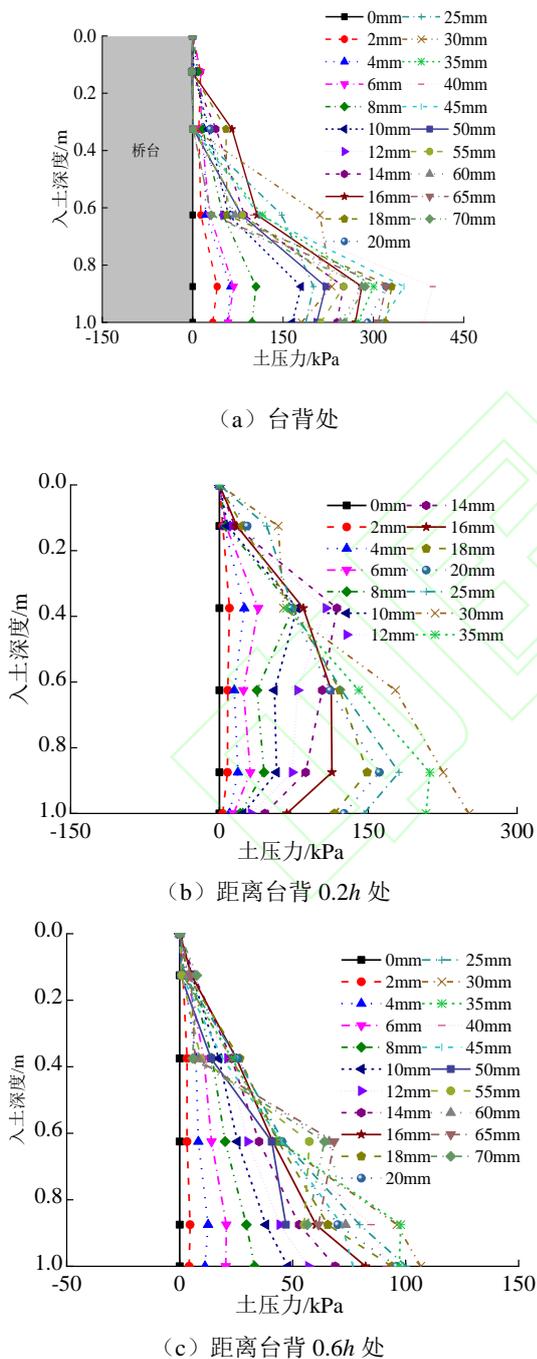


图 3 正向加载台后土压力沿桥台深度分布

Fig.3 Distributions of earth pressure behind abutment along abutment depth under positive loading

负向加载作用下, 台后各处土压力沿深度的分布规律如图 4 所示, 可知: 当桥台背离台后土时, 台后土压力基本呈三角形分布, 且其值均较小, 相对正向加载时的土压力基本可忽略不计。

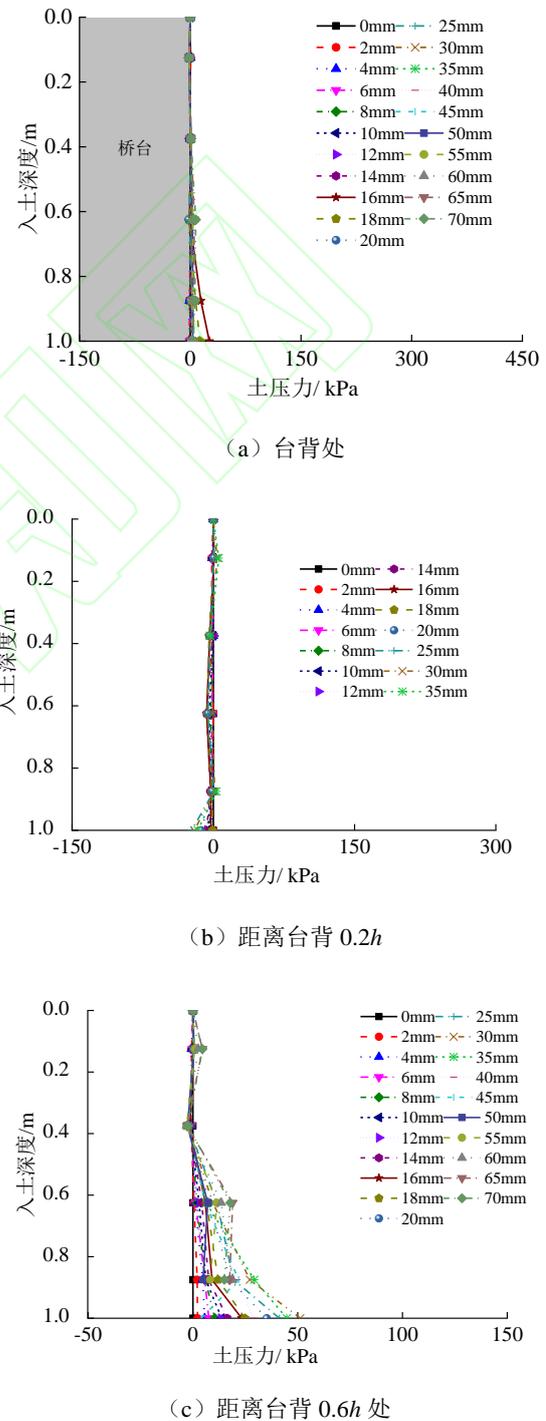


图 4 负向加载台后土压力沿桥台深度分布

Fig.4 Distributions of earth pressure behind abutment

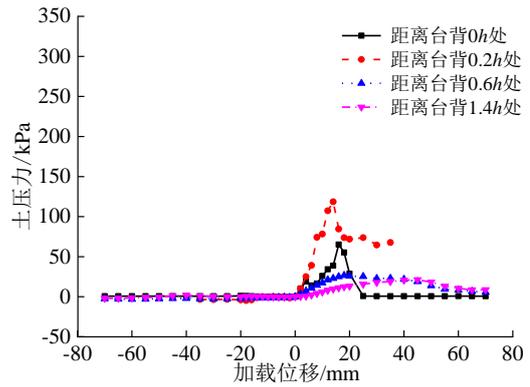
along abutment depth under negative loading

2.2 台后土压力与加载位移的关系

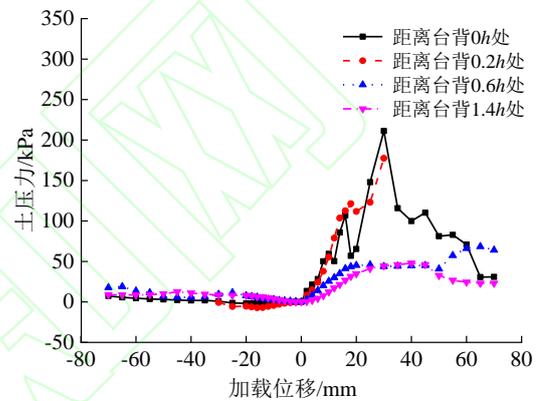
图 5 为桥台入土深度分别为 0.125、0.375、0.625、0.875 和 1.000 m 处的台后土压力随加载位移的关系曲线。试验时, 距离台背 0.2h 处的土压力盒在加载位移超过 35 mm 后出现了损坏, 故该位置处仅给出了前 35 mm 位移内的土压力情况。

由图 5 可知: 负向加载时, 桥台远离台后土体, 台后土压力为主动土压力, 其值很小, 且与加载位移不相关, 基本为接近 0 的直线, 这与文献[22]中所得结论相同; 正向加载时, 台后土压力基本呈先增大后减小的趋势; 相对台后 0.6h、1.4h 处的土压力而言, 台背处和台后 0.2h 处的土压力受桥台运动的影响较大, 土压力也较大, 最大可达到 398.84 kPa; 台背处土压力在入土深度 0.625~1.000 m 处出现了连续锯齿状变化(图 5 (d) 和 (e)), 当加载位移为 18 mm 时, 台背处台后土压力达到了一个较大值(第 1 个峰值); 此后, 桥台背离台后填土(加载位移为 -18mm), 台后土体受到扰动, 出现脱空沉降, 台后土压力消散, 甚至当加载位移继续增加(如加载位移为 20 mm)时, 土压力反而下降; 当台后土建立新的平衡后土压力开始增加, 当新的平衡被打破(如加载位移为 40 mm)后又重复出现上述现象并形成新的平衡, 因此, 在加载过程中土压力产生了连续的锯齿状现象, 距离台背越远, 桥台往复运动对土压力的影响越小, 锯齿现象越不明显; 入土深度为 0.125 与 0.375 m 时台背处土压力为 0, 说明台后土脱空深度超过了 0.375 m; 入土深度为 0.625 m 处的土压力未出现土压为 0 的情况, 说明台后土脱空深度不超过 0.625 m。

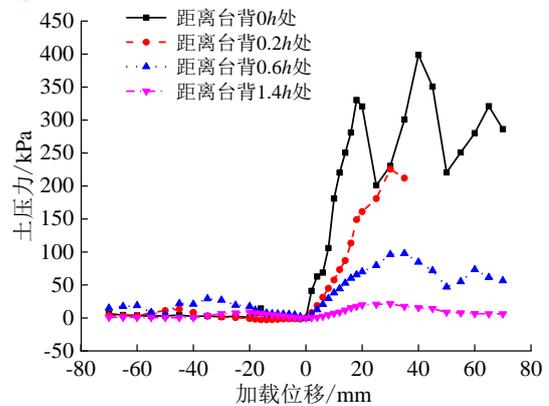
(a) 入土深度 0.125 m



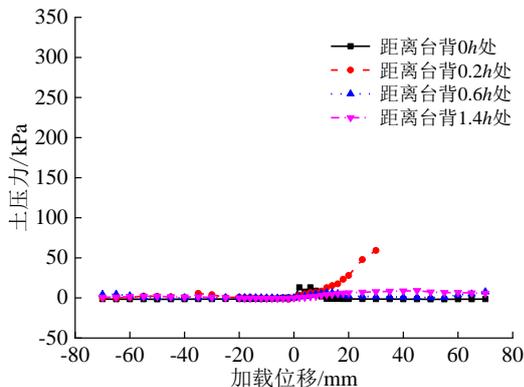
(b) 入土深度 0.375 m

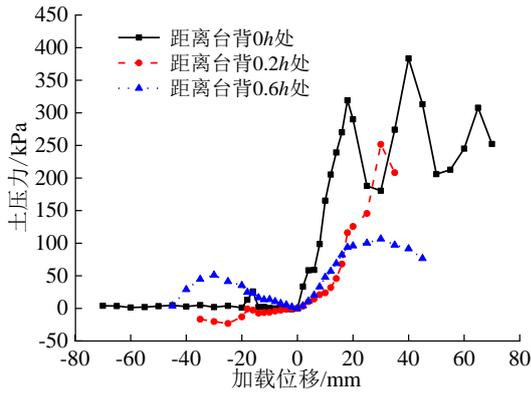


(c) 入土深度 0.625 m



(d) 入土深度 0.875 m

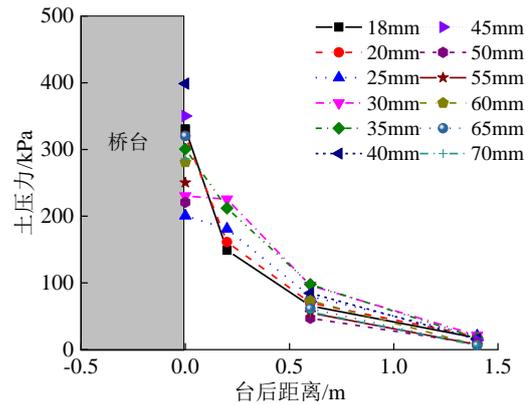




(e) 入土深度 1.0m

图 5 台后土压力与加载位移的关系

Fig.5 Relationships of earth pressure and abutment displacement



(b) 桥台产生大位移

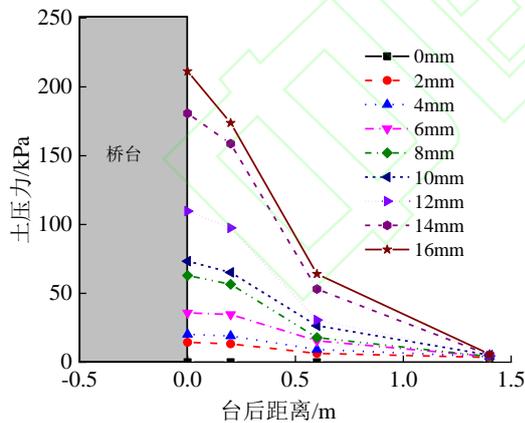
图 6 正向加载台后土压力沿纵桥向分布

Fig.6 Distributions of earth pressure behind abutment along longitudinal direction under positive loading

2.3 台后土压力沿纵桥向的分布规律

由以上分析可知, 负向加载时, 台背处土压力较小, 也基本不受加载位移的影响, 故以下仅分析正向加载时的土压力分布规律。

图 6 为小位移作用下土压力沿纵桥向的分布规律^[22]和本文试验所得的大位移作用下土压力沿纵桥向分布规律, 比较图 6 (a) 与图 6 (b) 可知: 大位移作用下, 台后土压力沿纵桥向基本呈指数型衰减, 且相比小位移作用下的衰减更快。



(a) 桥台产生小位移

3 台后土压力计算方法

3.1 台后土压力合力计算

根据以上分析可知, 桥台正向移动时, 台背处土压力沿桥台入土深度可近似为梯形分布, 如图 7 所示, 其中: h_j 为第 j ($j=1,2,\dots,n$, n 为土层总数) 层土的高度; $P_0=0$, 为桥台顶部的土压力; P_j 为第 j 层土的土压力; E_j 为第 j 层土的土压力合力; F_g 为作动器加载力; F_a 为台后土压力合力; h_j 为各层土压力合力作用点位置; F_p 为台底处的剪力; F'_p 为桩顶处的剪力。 h_j 主要根据本文试验中土压力计的布置确定; P_j 根据各层土压力计测得的土压力确定。计算时应符合下列假定^[22]: 相邻入土深度处土压力为线性分布; 土压力在横桥向均匀分布; 不考虑桥台沉降与台后土脱空的影响。

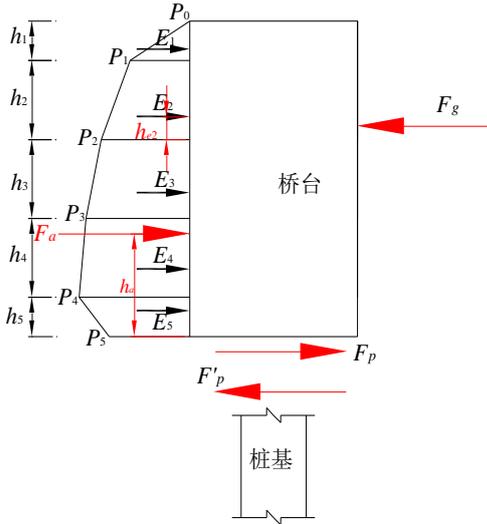


图 7 台背土压力合力计算

Fig.7 Calculation of earth pressure resultant force

各土层的土压力合力 E_j 为

$$E_j = \frac{(P_{j+1} + P_j)h_j}{2} \quad (1)$$

各层土压力合力作用点位置 h_{ej} 为

$$h_{ej} = \frac{h_j(2P_j + P_{j+1})}{3(P_j + P_{j+1})} \quad (2)$$

台后土压力合力 F_a 为

$$F_a = b \sum_{j=1}^n \frac{(P_{j+1} + P_j)h_j}{2} \quad (3)$$

式中: b 为桥台横桥向宽度。

根据式 (3) 计算出台后土压力合力 F_a , 其与作动器加载力 F_g 的关系如图 8 所示, 可知: 当加载位移小于 16 mm 时, F_a 随加载位移的增大而增大, 并略大于 F_g ; 随后 F_a 增长速率减缓, 但仍比 F_g 大; 当位移超过 40 mm 后, 台后土压力合力随位移荷载逐渐减小, 且小于 F_g ; 当 $F_a > F_g$ 时, 台底剪力方向与作动器加载方向相同; 当 $F_a < F_g$ 时, 台底剪力方向将与作动器加载方向相反, 也即台底的剪力作用方向会变化。

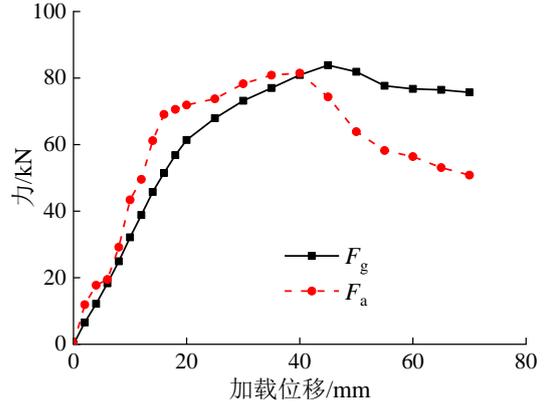


图 8 F_a 与 F_g 的关系

Fig.8 Relationship between F_a and F_g

根据图 7 可计算台背土压力合力对台底的弯矩 M_a 为

$$M_a = b \sum_{j=1}^n E_j \left(h_{ej} + \sum_{j+1}^n h_j \right) = b \sum_{j=1}^n \frac{2P_j + P_{j+1}}{3(P_j + P_{j+1})} h_j E_j + b \sum_{j=1}^{n-1} \left(E_j \sum_{j+1}^n h_j \right) \quad (4)$$

将式 (2) 代入式 (5) 可得

$$M_a = \sum_{j=1}^n \frac{(2P_j + P_{j+1})}{6} h_j^2 b + \sum_{j=1}^{n-1} \left[\frac{(P_{j+1} + P_j)h_j b}{2} \sum_{j+1}^n h_j \right] \quad (5)$$

台后土压力合力作用点位置 h_a 为

$$h_a = \frac{M_a}{F_a} \quad (6)$$

由式 (6) 可得各级加载位移下 F_a 的作用点位置 h_a 与桥台高度 h 的比值 h_a/h 的变化如图 9 所示。林上顺等^[22]仅考虑了桥台发生小位移时的情况, 因此, 偏安全地选择距台底 $h/3$ 的位置作为土压力合力的位置。由图 9 可知, 台背土压力合力作用点位置随着加载位移的增大整体上表现为逐渐降低的趋势。当桥台位移与桥台高度比 $\Delta/h < 0.018$ 时, 台背土压力合力作用点位置基本在桥台入土深度 $2h/3$ 位置以上; 当桥台位移增大后, 由于台背土压力为梯形分布, 土压力合力作用点位置会略低于桥台入土深度的 $2h/3$ 故本文通过数值拟合方法得到台背土压力合力作用点位置与加载位移的关系, 即

$$h_a/h = \begin{cases} 0.667 & 0 \leq \Delta/h < 0.002 \\ 1 + 0.089 \ln(\Delta/h) & \Delta/h \geq 0.002 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)的判定系数为0.87, 效果良好(图9)。

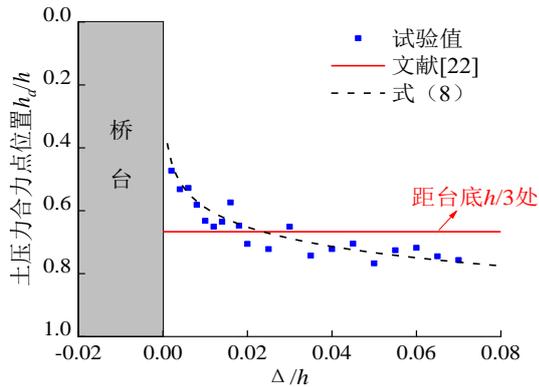


图9 台后土压力合力作用点位置

Fig9 Position of acting point of earth pressure resultant force behind abutment

3.2 正向加载时台后土压力计算

3.2.1 台后土压力系数

为计算方便, 台后总土压力分布 E 为

$$E = \sum_1^n E_j = \frac{1}{2} K \gamma h^2 \quad (8)$$

式中: K 为土压力系数; γ 为土体重度。

对式(8)进行转换得到土压力系数 K 的表达式为

$$K = \frac{2E}{\gamma h^2} \quad (9)$$

3.2.2 现有土压力系数理论计算方法

目前常用的土压力系数计算方法有: Coulomb 土压力理论、Rankine 被动土压力理论、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)法、Barker 法、美国公路合作研究组织(National Cooperative Highway Research Program, NCHRP)曲线法、Burke 和 Chen 法^[28-29]、Massachusetts 法^[30]、George 法、Diciceli 法^[31]等。

林上顺等^[22]基于 Massachusetts 法, 通过试验研究得到小位移荷载作用下整体桥台后土压力系数计算方法为

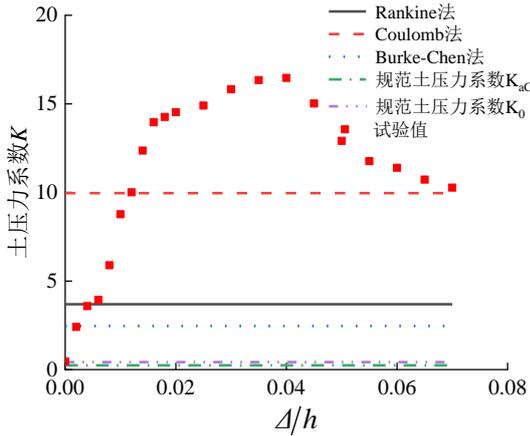
$$K_1 = \begin{cases} K_0 + 155 \left(\frac{\Delta}{h} \right)^{0.73} & 0 \leq \frac{\Delta}{h} \leq 0.008 \\ 14 \left(1 - 4.3e^{-\frac{235\Delta}{h}} \right) & \frac{\Delta}{h} > 0.008 \end{cases} \quad (10)$$

式中: K_1 为文献[22]中计算所得土压力系数; K_0

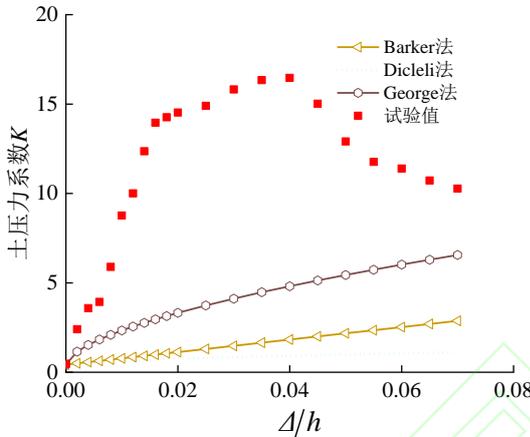
为静止土压力系数。

图10为上述台后土压力计算方法得到的理论计算值与试验实测值的对比可知: 各计算方法的土压力系数不随 Δ/h 的增大而变化, 均为一直线, 而土压力系数试验值随 Δ/h 的增大而逐渐增大; 当 Δ/h 为 0.005 时, 土压力系数试验值已超过 Burke-Chen 法以及《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)法得到的台后土压力系数,

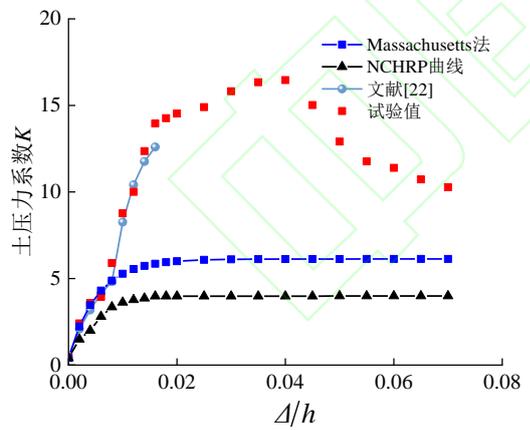
并接近 Rankine 被动土压力系数; 当 Δ/h 为 0.01 时, 土压力系数试验值远大于 Rankine 被动土压力系数, 并接近 Coulomb 被动土压力系数; 此后, 土压力系数试验值将超过 Coulomb 被动土压力系数, 并继续增大; 当 Δ/h 为 0.04 时, 土压力系数试验值达到最大, 随后逐渐减小并接近 Coulomb 被动土压力系数。总之, Coulomb 被动土压力、Rankine 被动土压力、Burke-Chen 法以及《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)法得到的台后土压力系数均与桥台位移 Δ 无关, 这与整体桥的实际台后土压力情况不符, 因而这些方法的计算结果与试验结果偏差较大; 由于 Barker 法、Diciceli 法、George 法和 NCHRP 法都考虑了桥台位移 Δ 的影响, 它们的计算结果会随桥台位移 Δ 的增加而增大, 但 NCHRP 法、Diciceli 法与 Barker 法得到的土压力系数基本与加载位移呈线性关系, 且计算结果较小, 与试验值偏差较大; NCHRP 法、Massachusetts 法与文献[22]中得到的土压力系数与加载位移基本呈非线性关系; 当 $\Delta/h \leq 0.01$ 时, 各计算方法随 Δ/h 的增大而增大, 其中, Massachusetts 法与文献[22]中计算值与试验值更为相符; 当 $0.1 < \Delta/h \leq 0.02$ 时, 仅有文献[22]中的计算值与试验值变化一致; 当 $\Delta/h > 0.02$ 时, 现有计算方法基本不随 Δ/h 变化, 但试验值呈先增大后减小的规律, 现有土压力计算方法已不适用。



(a) 与 Δ 无关



(b) 与 Δ 相关



(c) 与 Δ 呈非线性关系

图 10 K 与 Δ/h 的关系曲线

Fig.10 Relation curves between K and Δ/h

3.2.3 改进的台后土压力系数计算方法

3.2.2 节所述土压力系数计算方法并不适用于整体桥出现大位移的土压力计算, 故应对现有台后土压力系数计算方法进行改进。考虑到文献[22]中的方法法相比其他方法与试验结果更接

近, 且变化趋势也较相似, 因而在文献[22]中方法的基础上, 对图 10 中的实测台后土压力系数采用数学回归法进行数值拟合, 得到改进的土压力系数 K 与 Δ/h 的计算公式为

$$K = \begin{cases} K_1 & \frac{\Delta}{h} \leq 0.016 \\ 16.206 \left(1 - 1.54e^{-\frac{120.891\Delta}{h}} \right) & 0.016 < \frac{\Delta}{h} \leq 0.040 \\ -3.015 \ln \left(\frac{\Delta}{h} - 0.035 \right) + 0.034 & \frac{\Delta}{h} > 0.040 \end{cases} \quad (11)$$

图 11 给出了台后土压力系数试验值与改进各种计算方法所得计算值的对比, 可知: 试验值与式 (11) 所得计算结果吻合良好, 其判定系数为 0.92; Δ/h < 0.02 时台后土压力系数增长较快; Δ/h 在 0.020~0.040 范围内时土压力系数增长速度减缓; 当 Δ/h > 0.040 后, 土压力系数迅速下降, 其变化规律符合试验结论。

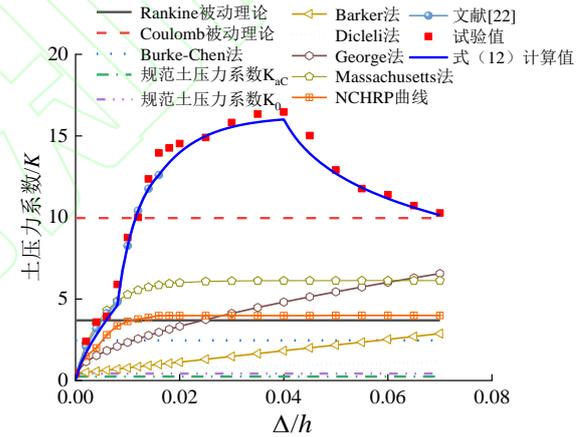


图 11 正向加载下台后土压力试验值与计算结果对比

Fig.11 Comparison of earth pressures behind abutment between test and calculation results under positive loading

4 结 语

(1) 正向加载时, 台后土压力随加载位移的增大先增大后减小; 台背处和 0.2h 处土压力沿深度方向呈梯形分布、台后 0.6h 和 1.4h 处土压力沿深度方向呈三角形分布。负向加载时, 桥台脱离台后土, 台后土压力较小, 沿深度方向呈三角形分布。

(2) 大位移作用下, 整体桥台后土脱离深度达到了 37.5% 的桥台高度; 台后土压力合力作用点位置随加载位移的增加逐渐下降。

(3) 大位移作用下整体桥台后土压力沿纵向呈指数型衰减,且其衰减速率相比小位移作用时更快。

(4) 经典台后土压力理论在计算大位移作用下整体桥台后土压力时不准确,本文提出的计算方法可较好地预测大位移作用下整体桥的台后土压力。

(5) 本文仅开展了整体式桥台-H形钢桩-相互作用的抗震性能拟静力试验,所采用的填土为中密砂性土,所给出的公式对其他类型土的适用性还有待探究,后续应开展更广泛的实桥监测或有限元参数分析。

参考文献:

References:

- [1] 陈宝春,付 鑫,庄一舟,等. 中国无伸缩缝桥梁应用现状与发展对策[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 87-95.
CHEN Bao-chun, FU Cui, ZHUANG Yi-zhou, et al. Application status and development countermeasures of jointless bridges in China[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2018, 38(1): 87-95. (in Chinese)
- [2] SALMAN N N, ISSA M A. Displacement capacities of H-piles in integral abutment bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(12): 04019122.
- [3] SALMAN N N, ISSA M A. Calibration and parametric investigation of integral abutment bridges[J]. Engineering Structures, 2021, 227: 111381.
- [4] FROSCH R J, LOVELL M D. Long-term behavior of integral abutment bridges[R]. West Lafayette: Joint Transportation Research Program, 2011.
- [5] RAZMI J, MCCABE M. Analytical and computational modeling of integral abutment bridges foundation movement due to seasonal temperature variations[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(3): 04019189.
- [6] KIM W, LAMAN J A. Seven-year field monitoring of four integral abutment bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(1): 54-64.
- [7] CIVJAN S A, KALAYCI E, QUINN B H, et al. Observed integral abutment bridge substructure response[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1177-1191.
- [8] HUNTLEY S A, VALSANGKAR A J. Behaviour of H-piles supporting an integral abutment bridge[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(7): 713-734.
- [9] HUNTLEY S A, VALSANGKAR A J. Field monitoring of earth pressures on integral bridge abutments[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(8): 841-857.
- [10] 赵云鹏, 于天来, 毕瑞锋. 整体式桥梁在温度荷载作用下的台后土压力研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(6): 56-60.
ZHAO Yun-peng, YU Tian-lai, BI Rui-feng. Study of earth pressure behind abutment of integral bridge under action of temperature load[J]. Bridge Construction, 2016, 46(6): 56-60.
- [11] 洪锦祥, 彭大文, 汪新惠. 整体式桥台桥梁的台后被动土压力研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 721-725.
HONG Jin-xiang, PENG Da-wen, WANG Xin-hui. Passive earth pressure behind abutment of integral abutment bridges[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2003, 31(6): 721-725. (in Chinese)
- [12] 陈晓冬. 季节性温度荷载下整体式桥台桥梁的台后土压力研究[D]. 福州: 福州大学, 2002.
CHEN Xiao-dong. Study on earth pressure of integral abutment bridges under seasonal temperature load[J]. Fuzhou: Fuzhou University, 2002.
- [13] 王先前, 郭晓燕, 严国齐. 整体式桥梁力学性能的关键参数分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9): 2276-2284.
WANG Xian-qian, GUO Xiao-yan, YAN Guo-qi. Parametric study on the mechanical properties of integral bridges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(9): 2276-2284. (in Chinese)

- [14] 彭大文, 陈晓冬, 袁 燕. 整体式桥台桥梁台后土压力的季节性变化研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 135-139.
PENG Da-wen, CHEN Xiao-dong, YUAN Yan. Study on seasonal fluctuation of earth pressure behind the abutment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 135-139. (in Chinese)
- [15] FIORENTINO G, CENGIZ C, DE Luca F, et al. Shaking table tests on an integral abutment bridge model: preliminary results[C]// PAPADRAKAKIS M, FRAGIADAKIS M. Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Crete: COMPDYN 2019: 10.7712/120119.7176.19103.
- [16] DAVIES L, BULL J, KUCKI T. Lightweight backfill materials in integral bridge construction[J]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Bridge Engineering, 2014, 167(1): 3-16.
- [17] 彭大文, 洪锦祥, 郭爱民, 等. 整体式桥台桥梁的动力试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 59-63.
PENG Da-wen, HONG Jin-xiang, GUO Ai-min, et al. Dynamic field-test of integral abutment bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 59-63. (in Chinese)
- [18] 赵云鹏. 升温荷载作用下整体式桥梁台后土压力计算方法研究[J]. 北方交通, 2017(1): 9-12.
ZHAO Yun-peng. Research on calculation method for pressure of earth at the back of integral type bridge abutment under the influence of temperature rise load[J]. Northern Communications, 2017(1): 9-12. (in Chinese)
- [19] 王佳佳. 整体式桥台桥梁台后土压力的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
WANG Jia-jia. The research of earth pressure behind the abutment of integral abutment bridge[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [20] 王明昊, 袁 明, 颜东煌. 无缝桥梁整体式桥台台后主动土压力计算方法研究[J]. 中外公路, 2010, 30(2): 140-143.
WANG Ming-ze, YUAN Ming, YAN Dong-huang. Study on calculation method of active earth pressure behind integral abutment of seamless bridge[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2010, 30(2): 140-143. (in Chinese)
- [21] 黄福云, 林友炜, 程俊峰, 等. 整体式桥台-H形钢桩-土相互作用低周往复拟静力试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 100-114.
HUANG Fu-yun, LIN You-wei, CHENG Jun-feng, et al. Interaction of integral abutment-h-shaped steel pile-soil under reciprocating low-cycle pseudo-static test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 100-114. (in Chinese)
- [22] 林上顺, 林友炜, 黄福云, 等. 往复位移作用下整体桥台后土压力计算方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 116-125.
LIN Shang-shun, LIN You-wei, HUANG Fu-yun, et al. Method to calculate earth pressure of backfill of integral abutment bridges under the action of reciprocating longitudinal displacement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(2): 116-125. (in Chinese)
- [23] FARAJI S, TING J M, CROVO D S, et al. Nonlinear analysis of integral bridges: finite-element model[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(5): 454-461.
- [24] 石丽峰, 徐 明. 整体式桥台地震反应机理分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3289-3297.
SHI Li-feng, XU Ming. Analysis of seismic response of integral bridge abutments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3289-3297. (in Chinese)
- [25] 黄福云, 陈 伟, 徐 普, 等. 整体式桥台-H形钢桩-土体系抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 180-192.
HUANG Fu-yun, CHEN Wei, XU Pu, et al. Experimental study on seismic performance of

- integral abutment- steel h-pile-soil system [J].
China Journal of Highway and Transport, 2020,
33(9): 180-192. (in Chinese)
- [26] 刘昌杞. 桩与承台(基础)板连接的设计与
施工[J]. 建筑技术, 1993, 24(3): 164-168.
LIU Chang-qi. Design and construction of the
connection between pile and pile cap
(foundation)plate[J]. Architectural Technology,
1993, 24(3): 164-168. (in Chinese)
- [27] 钱海敏. 整体式桥台PHC管桩基础的抗震
性能试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2017.
QIAN Hai-min. Experimental investigation on
seismic performance of PHC Pile in integral
abutment bridge[D]. Fuzhou: Fuzhou
University, 2017. (in Chinese)
- [28] BUKER M P. Design of integral concrete
bridges[J]. Concrete International, 1993, 15(6):
37-42.
- [29] CHEN Y F. Important considerations
guidelines and practical details of integral
bridges[J]. Journal of Engineering
Technology, 1997, 14(1): 16-19.
- [30] ALIZADEH M H, RASHID A R K, CHIK Z,
et al. Investigation of abutment displacement
of a full height integral bridges in dense
granule backfill[J]. American Journal of
Engineering and Applied Sciences, 2010, 3(4):
749-756.
- [31] DICLELI M. Simplified model for
computer-aided analysis of integral bridges[J].
Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(3):
240-248.

参数解释表

符号	符号意义	下标与上标意义
W	H 形钢桩的强轴向宽度	
B	H 形钢桩的弱轴向宽度	
t_i	H 形钢桩的厚度	t 是 thickness 的首字母, 表示厚度, $i=1,2$, 其中 t_1 表示腹板厚度, t_2 表示翼板厚度。 i 是变量, 用斜体。
\bar{h}	由《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008 计算所得的桩基换算深度	
h_j	土层高度	h 是 height 的首字母, 表示高度; i 表示土层的层数, 是变量, 用斜体。
P_j	各土层的土压力	P 是 pressure 的首字母, 表示土压力; i 表示土层的层数, 是变量, 用斜体。
E_j	各土层的土压力合力	E 是 earth 的首字母, 表示土压力合力; i 表示土层的层数, 是变量, 用斜体。
h_{ej}	各土层的土压力合力的作用点高度	h 是 height 的首字母, 表示高度; e 是 earth 的首字母, 表示土压力合力, 用正体; i 表示土层的层数, 是变量, 用斜体。
F_a	台后总土压力合力(kN)	F 是 force 的首字母, 表示合力; a 是 all 的首字母, 表示总的, 用正体。
F_g	MTS 产生的作用力	F 是 force 的首字母, 表示力; g 是 generate 的首字母, 表示产生, 用正体。
M_a	土压力合力对桥台底部产生的弯矩	M 是 moment 的首字母, 表示弯矩; a 是 all 的首字母, 表示总的, 用正体。
h_a	土压力合力的沿入土方向的深度	h 是 height 的首字母, 表示高度; a 是 all 的首字母, 表示总的, 用正体。
E	台后总土压力分布	

γ	土体重度	
h	桥台入土深度	
Δ	桥台沿横桥向的产生的位移	
K_0	静止土压力系数	
K	台后土压力系数	