DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.021

某桥墩防护结构在堆载作用下的受力安全分析

张万鹏[1]，郝成英[2]，陈林[1]
(1.重庆交通大学 土木工程学院，重庆市 400041；2.中交第二公路勘察设计研究院有限公司)

摘要：当既有桥梁桥下无法避免堆载时，可考虑采用支挡等措施来保证桥梁结构的安全。该文以某既有大桥桥下填筑工程为背景，提出对桥墩实施非接触性筒状防护，对该桥墩护筒防护结构进行结构分析及护筒－堆土－地基交互作用施工全过程进行力学分析。结果表明：该防护结构可有效地隔离堆载对桥梁结构的影响，保证桥梁结构的安全和正常使用；应力及变形的最不利状态均为施工末期、考虑回填土高差和施工机械不利荷载工况；回填土作用下护筒将发生较大的竖向沉降，存在桥墩系梁时应考虑采用增大系梁与护套的间隙或采用后期浇筑系梁护套等措施，以保证桥梁结构的安全性。

关键词：桥梁工程；过程分析；既有桥梁；堆载；防护结构

1 前言

近年来，随着中国基础设施的不断发展和完善，大量桥梁建设在城市和农村中。在既有桥梁运营过程中，后期实施工程将可能与桥梁相交，在既有桥下修建公路、建筑或公园等公共设施。桥下各类工程实施易产生对桥梁下部结构的堆载作用，将会对既有桥梁产生影响并对桥梁安全构成威胁，甚至引发桥梁安全事故。表1为几起近年来由堆载作用而造成的桥梁安全事故。

表1 桥梁受损安全事故

受损桥梁名称	典型病害	事故诱因
连云港疏港高速公路某段跨线桥	桥墩柱偏移、桩基桩身损伤	桥下修路路基填筑引起
杭州至宁波铁路绍兴特大桥	某里程段轨道线发生弯曲	桥侧堆沙过多
昆明高峣立交桥	桥墩开裂并且移位	桥侧堆土过多
郑州西南绕城桥	桥墩倾斜、支座移位	桥下建筑垃圾堆积过高

针对上述桥梁安全事故，国内外学者对此进行了系列研究。宋宁等通过工程实例研究桥梁结构损伤发现桥侧堆载会使桥墩和上部结构产生一系列变位和损伤；孙宗磊等通过对某既有桥梁下穿桥梁的建设工程提出新建桥梁的基础对周围土层产生的附加应力会引发既有桥梁的基础发生沉降变形；黄清、张浩等从软件分析和工程实例的角度验证了堆载是引起墩柱偏移的主要原因；冯忠居等研究提出了当桥下堆载不可避免时，可采用减载、排水、支挡工程的防护措施保证桥梁结构的安全。堆载引起的桥梁墩柱偏移受堆载大小、与墩柱的距离、地基土质等多种因素影响，墩柱单侧受到堆载作用可能发生桥梁下部结构的偏移及沉降。该文结合某大桥建成后的填筑工程及相应桥墩护筒结构防护措施，通过该填筑工程引起的堆载作用下护筒结构静力分析及施工过程分析验证该护筒防护结构的受力安全可靠性。

2 工程背景

图1为某既有大桥立面图，后期景观填筑工程将在桥下进行标高229.5 m平场。各桥墩后期最大回填土高度为7.8～17.8 m。该大桥现状桩顶覆土为0～3.7 m，桥墩为双柱式桥墩，直径为1.8 m。

3 护筒防护结构的构造

既有桥下进行高回填时，由于回填土堆载对桥墩的作用，将对桥梁结构产生不利影响。故相应防护措

收稿日期：2018－10－24
基金项目：国家自然科学基金资助项目(编号：51308571)
作者简介：张万鹏，男，硕士研究生.E－mail:563270849@qq.com

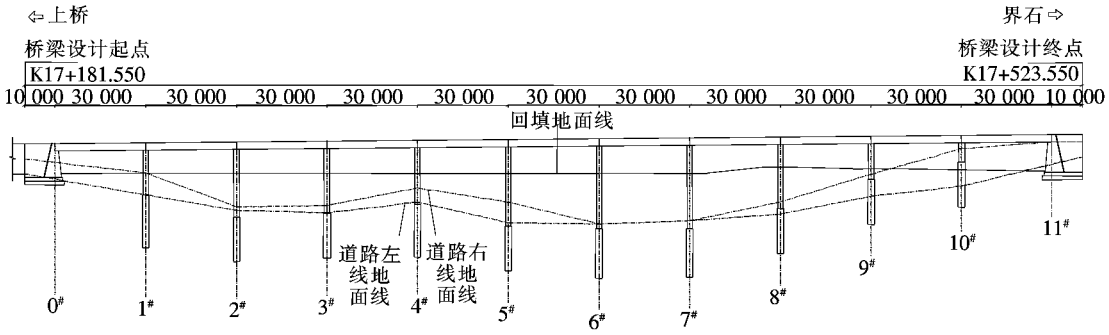


图 1 某大桥堆土填筑工程(单位:mm)

施为设计一种可将回填土与桥梁下部结构完全隔离开的桥墩护筒结构,从而避免桥墩桩基受到堆载的直接影响。当护筒没有发生断裂、倾倒或过大变形时,桥体完全不受堆载作用,从而实现保护桥梁结构不受堆载影响的目的。该护筒结构主要承受防护填土作用下的不均匀侧向力影响,未考虑由于高填方荷载作用下的基础可能下沉,故主要适用于端承桩或其他支承于岩质地基基础形式的桥墩防护。其结构如图 2 所示。

护筒设置在桥墩周围,与桥墩保持一定的隔离空间。采用上小下大的阶梯护筒构造形式,并考虑承载力采用扩大基础,材料为钢筋混凝土结构。在施工方面,护筒的浇筑可采用分层浇筑或一次性浇筑的方法;土体回填采用均匀分层回填并压(夯)实,以减小土体回填时的不均匀影响。若设有墩间横系梁,应同时设置护套结构,避免回填土直接作用在系梁上,如图 3 所示,护套与系梁上下部空隙分别为 30、10 cm。

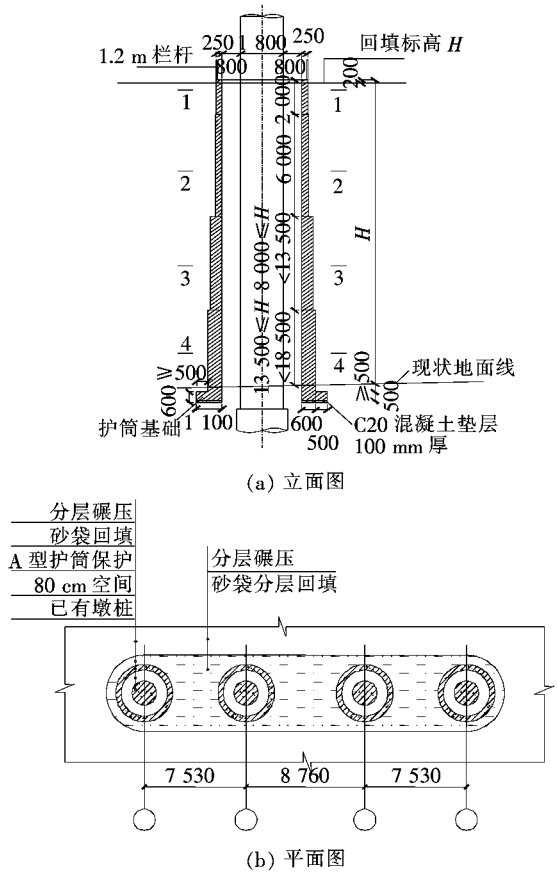


图 2 护筒结构示意图(单位:mm)

4 堆载作用下护筒结构分析

填筑平场工程由于采用护筒防护结构,故填土完成后护筒环侧所受土压力相比通常单侧堆载情况时基本对称,明显的不均衡侧向土压力主要发生在其填土及压实过程中。通过护筒结构静力分析和填筑施工过程分析来验算堆载产生的附加土应力作用下护筒的可

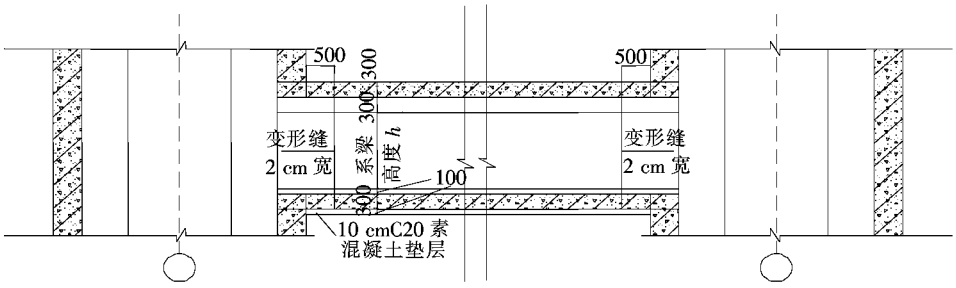


图 3 桥墩系梁防护结构立面图(单位:cm)

靠性及填土过程中的不均衡压力影响。

4.1　单个护筒的结构静力分析

填筑工程中以最大填筑土体高度 6# 桥墩处护筒的受力为最不利（此时填筑高度为 17.8 m），故仅对 6# 护筒进行结构验算分析即可。

4.1.1　最不利分析荷载

分析荷载考虑为 6# 桥墩处的最不利填筑土体的附加土应力，护筒两侧考虑 0.5 m 填筑高差。此外，回填夯实过程的夯实机械自重和动应力的影响将会对护筒产生附加侧压力。碾压机械按 20 t 小型静力式夯实机械计算。由于该桥所处地区降雨较多，故考虑降雨情况影响。降雨情况下土体内摩擦角依据经验取正常情况下内摩擦角的 90%，计算重度取浮重度。

4.1.2　分析参数

材料的各项参数见表 2。

4.1.3　计算图式

在最不利工况下，即护筒在两侧填筑土体压力下，将护筒假定为一悬臂桩受力状况，由于采用填土法故护筒右侧填土比左侧高 0.5 m，护筒的计算图示见图 4。

表 2　材料参数

材料名称	弹性模量/kPa	泊松比	重度/(kN·m^{-3})	黏聚力/(kN·m^{-2})	内摩擦角/(°)	降雨内摩擦角/(°)
原状土	10 000	0.40	20	10	25	22.5
砂性土	35 000	0.30	20	1	35	31.5
混凝土	30 000 000	0.18	26	—	—	—

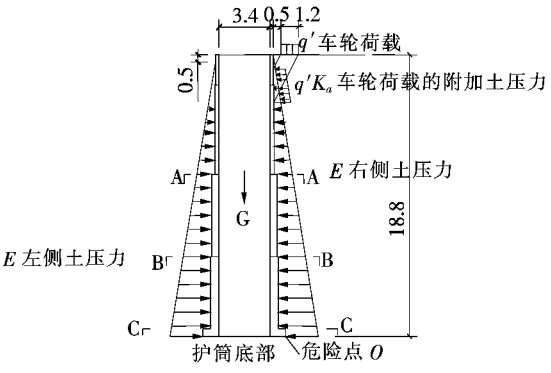


图 4　护筒计算图式（单位：m）

4.1.4　抗弯强度验算及水平向裂缝宽度验算

抗弯强度及水平裂缝验算时，护筒两侧土压力均考虑为被动土压力，碾压机械引起的附加土压力则将车轮荷载扩散的荷载考虑为主动土压力。护筒两侧被动土压力 E_p 和车轮荷载引起的压力 E_{a1} 计算公式如下：

$$E_p=\frac{1}{2}\gamma H^2K_p,\ E_{a1}=qK_a \tag{1}$$

式中：γ 为土的重度；H 为土体的高度；q 为机械车辆荷载；K_p 为被动土压力系数；K_a 为主动土压力系数。

根据各个变截面处截面尺寸及配筋情况，求出相应左、右侧土压力值，进而求出承载能力极限状态下护筒变截面处的弯矩值 M。参考文献[6]方法计算短期效应组合引起的开裂截面纵向受拉钢筋的应力 σ_{ss}，再根据公路桥规求出最大裂缝宽度。抗弯强度及裂缝的验算截面取 A－A 截面（8 m 处变截面）、B－B 截面（13.5 m 处变截面）、C－C 截面（18.3 m 处变截面）。护筒抗弯强度及裂缝宽度验算结果见表 3。

表 3　护筒抗弯强度及水平向裂缝宽度验算结果

变截面	弯矩值 M_u/(kN·m)	降雨下弯矩值 M_u/(kN·m)	弯矩设计值 M_d/(kN·m)	最大裂缝宽 W_{max}/mm	降雨下裂缝宽 W_{max}/mm	允许最大裂缝宽[W]/mm	验算是否满足
A－A	3 447.02	1 846.72	9 173	0.008	0.005	0.2	满足
B－B	9 029.45	4 426.59	20 193	0.015	0.007	0.2	满足
C－C	16 222.50	7 761.39	20 068	0.021	0.011	0.2	满足

4.1.5　护筒稳定性验算

稳定性验算时，考虑到护筒右侧土压力及车辆荷载产生的土压力比左侧大，故右侧受力按主动土压力计算，左侧按被动土压力计算。护筒右侧主动土压力 E_{a2} 计算式为：

$$E_{a2}=\frac{1}{2}\gamma H^2K_a$$

进行抗倾覆稳定验算时认为护筒底面右侧点（图

4 中 O 点)为最危险点。求出左、右侧土压力及车轮荷载扩散土压力值进而得出倾覆和稳定力矩,参考 GB 50007－2011《建筑地基基础设计规范》取抗倾覆稳定安全系数为 1.6,故护筒的抗倾覆稳定系数需符合下式:

$$K_t=\frac{M_d}{M_q}\geqslant 1.6 \tag{2}$$

式中:K_t 为抗倾覆稳定系数;M_d 为稳定力矩(由左侧被动土压力计算得);M_q 为倾覆力矩(由右侧土压力和车轮荷载、护筒自重对点 O 力矩计算得)。

进行抗滑稳定性验算时,参考规范取抗滑移稳定安全系数为 1.3。护筒抗滑系数用基底与土之间的摩擦力和左侧被动土压力水平向值之和同右侧被动土压力水平向值的比表示,应满足下式:

$$K_s=\frac{\mu G+E_p\sin(90°-\delta)}{(E_{a1}+E_{a2})\sin(90°-\delta)}\geqslant 1.3 \tag{3}$$

式中:μ 为土对基底摩擦系数(参考规范[11]取 0.45);G 为护筒每延米自重;E_p、E_{a1}、E_{a2} 分别为左侧被动土压力、右侧主动土压力、车辆荷载压力;δ 为土对墙背摩擦角(参考规范[11]取 0.5ϕ,ϕ 为砂性土内摩擦角,见表 2)。

计算得护筒抗倾覆稳定系数 $K_t=10.2>1.6$,抗滑稳定系数 $K_s=26.6>1.3$,同理求出降雨情况下的稳定系数 $K_t=4.6>1.6$,$K_s=17.4>1.3$,故抗滑稳定性和抗倾覆稳定性满足要求。

4.1.6 地基承载力验算

通过计算护筒受到的竖向土压力和护筒自重来计算护筒底部应力,即地基承载力。分别求得正常情况和降雨情况下的护筒底应力 σ_0 为 363、269 kPa,均小于地基承载力特征值 400 kPa,故护筒底面土基承载能力满足要求。

4.2 填筑施工过程中堆载作用分析

4.2.1 参数选取

通过 Midas GTS NX 有限元分析 6# 桥墩护筒在填土堆载、机械荷载等作用下分层填筑施工过程等工况下的桥墩护筒力学与变形行为。有限元分析模型材料中填土为砂性土,土体选用理想弹塑性莫尔－库仑模型、护筒结构选用线弹性模型,具体参数根据工程勘察状况及施工用料选取,见表 2。

4.2.2 分析工况

根据填筑方式、机械位置及重量等确定如下分析工况:工况 1:护筒底部原状土作为初始应力状态;工况 2:浇筑钢筋混凝土护筒;工况 3:回填护筒埋深原状土;工况 4～11:按每层 2 m 分层填上部砂土;工况 12:护筒两侧填土0.5 m 高差,两排护筒之间填土1.3 m,护筒外侧填土1.8 m,在护筒填土较高侧将机械荷载以压力荷载形式施加。

4.2.3 计算模型

根据填筑工程平场标高与既有结构的空间关系,并考虑实际地形和地质情况的影响建立以钢筋混凝土护筒和周围岩土为研究对象的三维空间弹塑性有限元模型。

4.2.4 施工过程中护筒受力分析

(1) 护筒应力:不同分析工况下护筒的应力如图 5 所示。

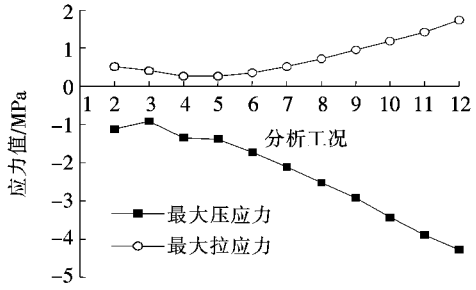
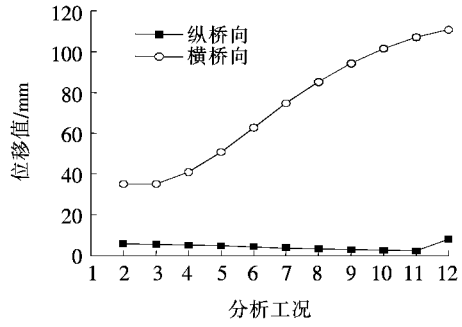


图 5 护筒应力变化图

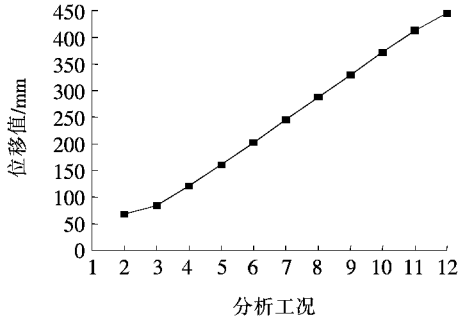
由图 5 可知:护筒在分层回填过程中拉压应力值呈逐渐上升状态,且处于工况 12 时的受力最为不利,此时护筒最大拉应力为 1.74 MPa,最大压应力为 4.28 MPa,均未超过 C30 混凝土允许强度值。

(2) 护筒位移:不同分析工况下护筒的位移如图 6 所示。

由图 6 可知:① 护筒在施工过程中的纵桥向位移很小,横桥向位移随施工的进行不断增大。当处于工况 12 时达到最不利状态,此时护筒最大纵桥向位移为 8.02 mm,最大横桥向位移为110.79 mm,因为护筒与桥墩间距为 80 cm,故水平向变形对桥墩无影响;② 护筒在竖向的变形位移远大于水平位移,其竖向位移随着回填施工的进行不断增大且涨幅较大,护筒竖向变形在工况 12 下达到最大。故若既有桥梁设有桥墩系梁,应考虑竖向变形对系梁防护结构的影响。建议处理方法有两种:① 在设计和施工防护结构时,在系梁上方与防护结构下壁间留有大于竖向沉降变形的足够空间;② 在回填至系梁位置时再施工系梁的防护结构,此时该部位的最终沉降将不再是从施工一开始的累计变形,而是从系梁防护结构施工后的部分累计变形。



(a) 纵、横向最大位移



(b) 竖向最大位移

图 6　护筒位移变化图

由于该工程 6# 墩左幅设置有墩间系梁，该系梁标高为220.2 m。考虑到混凝土的硬化时间，系梁护筒在回填标高至217.7 m 浇筑，即分析工况 7。工况 7 与 12 之间的累计竖向位移差即为该系梁护套浇筑后在回填施工过程中最不利工况下的沉降变形计算值。桥墩护筒及系梁护套相对桥墩发生了199.763 mm 的累计沉降，小于 30 cm(系梁护套与系梁间空隙)。

上述结构分析表明：桥墩护筒在分层填筑施工过程中，没有发生过大变形、混凝土开裂或压碎等现象。该工程现已实施完成，实践证明在该高填方土体作用下，桥墩护筒防护结构可以有效地确保桥梁结构安全。

5　结论及建议

当桥下堆载不可避免时，须采用相应堆载支挡工程等措施以防安全事故发生。该文以某既有大桥的填筑工程及相应防护措施为背景，通过堆载作用下的防护结构静力分析与堆载施工过程有限元分析，对该结构的可靠性进行验算，得出以下结论及建议：

(1) 实际工程案例分析验证了针对既有桥梁下堆载提出的桥墩隔离性护筒结构防护的可靠性，该护筒结构可以作为一种桥下高填方土体堆载时的工程安全措施。

(2) 该护筒结构的工作原理是将堆载对桥梁的作用转移到与桥梁结构无直接接触的外围防护结构中，通过隔离堆载作用的方式避免堆载附加土压力对桥梁结构的影响。当护筒没有发生断裂、倾倒或过大变形时，桥梁结构完全不受堆载的影响。

(3) 堆载过程分析表明：钢筋混凝土桥墩护筒的最不利工况发生在堆载高度最大时，此时的拉压应力值与变形位移均为最大。

(4) 护筒在堆载作用下，其竖向位移远大于水平位移。故若设有墩间横系梁，应考虑系梁防护结构的变形。建议通过增大系梁与护套的间隙或采用后期浇筑系梁护套(当堆载工程至系梁护套处再浇筑护套)的方法，以保证系梁防护结构的可靠性。

参考文献：

[1] 宋宁，许宏元，钟元，等.土体侧移引起桥梁结构损伤的加固对策[J].公路，2012(7).

[2] 孙宗磊，李悄.石济客专桥梁下穿京沪高铁沉降影响分析[J].铁道工程学报，2013(2).

[3] 黄清.地面堆载对既有桥梁结构的影响分析[J].桥梁建设，2014(5).

[4] 张浩，石名磊，胡伍生，等.互通区跨线桥邻近路基墩柱偏移事故分析[J].东南大学学报：自然科学版，2013(3).

[5] 冯忠居，周桂梅，付长凯，等.堆载滑动对陡坡柱式桥墩与桩基的力学与变形特性分析[J].公路，2016(3).

[6] 杨洪标.钢筋混凝土环形、圆形截面构件最大裂缝宽度计算[J].土木工程学报，1990(2).

[7] 聂如松，冷伍明，魏丽敏，等.堆载对既有桥墩桩基础影响距离分析[J].水文地质工程地质，2017(1).

[8] 马远刚，王艳芬，陈晨.堆载作用下桥梁被动桩偏移受力分析及处理措施[J].桥梁建设，2014(4).

[9] Goh A T C，Teh C I，Wong K S.Analysis of Piles Subjected to Embankment Induced Lateral Soil Movements[J].Journal of Geotechnical &Geoenvironmental Engineering，1997，123(9)：792－801.

[10] Stewart D P，Jewell R J，Randolph M F. Design of Piled Bridge Abutments on Soft Clay for Loading from Lateral Soil Movements[J]. Geotechnique，1996，46(2)：277－296.

[11] GB 50007－2011　建筑地基基础设计规范[M].