

南村黄河特大桥主桥总体设计

郭红雨

(苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210017)

摘要: 从结构受力、施工、养护、经济性及国内造桥技术水平等方面综合考虑, 确定南村黄河特大桥静力下采用连续—刚构体系、地震下采用速度锁定装置联合多主墩共同抗震的结构体系, 主梁采用单箱单室箱形截面, 主墩采用四合一超长直径桩柱一体式墩身; 运用 MIDAS/Civil 进行结构静、动力及稳定计算, 并采用 ANSYS 对钢系梁和钢护筒结合部位进行局部计算, 结果表明该桥整体及局部受力均满足规范要求。

关键词: 桥梁; 多跨长联连续梁; 桩柱一体; 大直径桩基; 钢系梁; 速度锁定装置

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)02-0103-05

随着中国桥梁建造技术的不断提高, 大跨度桥梁取得长足发展。多跨长联的连续结构具有行车舒适度高、线条简洁优美、结构形式多样、经济性能优越等优点, 在重要桥梁方案选择中备受青睐。该文以一座颇具代表性的高墩、多跨、长联刚构—连续梁桥为背景, 从桥梁总体跨径布置、上下部结构设计、深水施工、抗震设计等方面阐述其关键技术, 为同类型桥梁设计提供借鉴。

1 工程背景

南村黄河特大桥是垣曲至渑池高速公路(河南段)上一座控制性节点工程, 呈南北走向, 位于三门峡大坝与小浪底大坝之间, 跨越黄河河道(属于小浪底库区)。桥位处属暖温带半湿润区, 夏季暖热多雨, 冬季寒冷干燥, 四季分明。多年平均气温 12.6~13.9℃, 最低气温 -8.7℃, 年极端最低气温 -19.7℃, 年极端最高气温为 41.7℃。年均降水量 567~716 mm, 多集中在 6—9 月(占全年降雨量的 60%~80%)。无霜期 167~218 d, 地面最大冻结深度 20~30 cm, 年平均风速 3.5~4.0 m/s。

桥址区具有典型的河流地貌特征, 地层组成主要为: 1) 分布于黄河的河床。由漂石、卵石、砾石、中粗砂及粉细砂组成, 灰黄色, 中密。下伏灰白色砂质泥岩, 微风化, 泥质胶结。2) 分布于黄河南岸的一级阶地。上部为灰黄色~褐黄色粉土, 下部为卵石, 中密~密实。黄河北岸一级阶地缺失。3) 分布在黄河两岸的二级阶地。上部为马兰黄土, 浅黄色, 稍密~中密。针孔状孔隙发育, 下部为卵石层、粉质黏土层。其中粉土地基容许承载力 50~100 kPa,

卵石地基容许承载力 220~280 kPa。砂质泥岩岩芯呈柱状, 柱长 30~50 cm, 锤击易碎, 浸水后稍有破碎, 岩石饱和单轴抗压强度 5~28.6 MPa, 地基容许承载力 900 kPa。

根据文献[1], 桥位所在河段在水库拦沙初期无明显滩地和主槽, 拦沙后期将形成高滩高槽, 主槽位置不固定; 水库进入正常运用期, 库区河底形成高滩深槽(冲淤平衡状态)。实测资料表明, 利用主槽调水调沙, 主槽河底高程可能发生巨大的淤积或冲深, 可能冲至基岩。冲刷计算结果见表 1。

表 1 桥位桥墩万年一遇洪水总冲刷深度计算结果 m

项目	计算结果
一般冲刷水深	14.20
局部冲刷水深	15.56
总冲刷水深	29.76
现状条件下设计洪水位	240.48
现状河床最低点高程	231.00
冲刷后最低点高程	210.72

2 主要技术标准

(1) 公路等级为高速公路; 设计速度 80 km/h; 设计荷载为公路—I 级。

(2) 桥梁净宽 2×16.25 m(双向六车道, 双幅桥净距 0.5 m); 桥梁横坡为双向 2%。

(3) 桥梁设计洪水频率 1/300; 设计洪水位, 非汛期 275.1 m, 汛期为 270.9 m。

(4) 通航标准为 IV 级航道, 通航孔 4 m 5×8 m, 设计最高通航水位 275.1 m。

(5) 地震基本烈度为Ⅶ度。根据场地地震安全性评价,场地类别为Ⅱ类,100年超越概率63%条件下地表水平向加速度峰值为64.6g,50年超越概率10%条件下地表水平向加速度峰值为126.8g,100年超越概率5%条件下地表水平向加速度峰值为223.5g。

3 桥跨和桥型方案选择

3.1 影响跨径选择的因素

该桥主桥跨径选择主要受航道、水利、已建桥梁等方面因素的制约。

(1) 依据交通部黄河水系航运规划办公室1988年编制的《黄河水系航运规划报告》及黄河水利委员会1990年完成的《黄河治理开发规划报告》,桥位处河段为Ⅳ级航道,通航宽度最小为45 m。

(2) 依据GB 50139—2014《内河通航标准》,当两桥靠近布置时通航孔必须相互对应。拟建桥位上游已建小浪底库区黄河大桥(两座桥净距约16 m),于2002年8月建成通车,大桥全长1 456.36 m,桥面净宽7.0 m,桥跨布置为29孔50 m预应力砼T梁。拟建桥梁桥孔需为50 m的整倍数,使桥孔与原库区黄河大桥桥孔对应。

(3) 依据黄建管[2007]48号《黄河河道管理范围内建设项目技术审查标准(试行)》,桥梁主跨跨径不小于80 m,滩地过水孔跨不小于40 m。

(4) 依据黄河水利科学研究院等单位发布的

《垣曲至湟池高速公路黄河特大桥防洪评价报告》,为满足小浪底库区拦沙运用期内主槽不固定的实际情况,原则上桥梁主跨跨径不小于100 m,桥跨连续长度不小于1 300 m。

综合上述布跨原则,拟建黄河特大桥主孔跨径采用100、150、200、250 m均能满足要求。该桥施工在小浪底水库调水调沙运用期间进行,低水位施工时间非常短(7—9月),且这时间段为黄河汛期,为适应调洪要求,汛期水库的水位有较大不确定性,而黄河非汛期水库蓄水可能达270 m以上高水位。针对以上水位高、水位变化幅度大的特点,宜选择较大跨度以降低施工难度和投资规模,同时兼顾上、下部材料用量的均衡和建设周期成本。

3.2 桥跨、桥型方案分析

主跨跨径在200 m以上的桥梁可供选择的结构形式有多跨拱桥、多跨斜拉桥(或部分)、悬索桥等。依据桥址处地形地貌、地质等因素,选取主跨较合理的250 m跨径进行布跨组合。以单塔双索面部分斜拉桥方案为例,跨径布置为(160+4×250+160) m,主梁采用单箱三室截面,整幅设计,塔高38 m(见图1)。进一步分析比较,采用较大主孔跨径虽然可减少桥墩数量,但基础规模庞大,下部施工设备投入和成本均有所增加,同时这些桥型上部构造复杂、施工投入及难度大,施工工期长。因此,不建议采用。

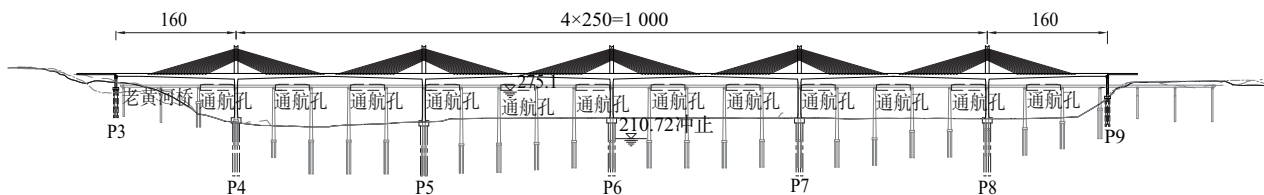


图1 多塔部分斜拉桥方案桥型总体布置(单位:m)

依次选择100、150和200 m跨径进行比选,上部结构采用预应力砼箱梁,分别从结构主要材料用量、上部挂篮悬浇施工工期和下部水中围堰、高栈桥施工工期三方面进行比选。3种桥跨布置方案中,由于随着跨径增加上部结构材料用量也增加,100 m跨方案材料用量低于其他2种方案;考虑下部结构用量后,150和100 m跨2种方案造价基本相当。在挂篮投入数量相同的情况下,150 m跨方案上部施工工期最短,比200、100 m跨方案分别节省120、40 d。在下部施工方案、施工投入相同的条件下,200、150 m跨方案比100 m跨分别缩短工期90、60 d。综合以上分

析,初步得出150 m跨方案具有一定优势。但鉴于库区水文变化复杂(施工水深可达40余m),深水双壁钢围堰施工投入大、风险高,结合桥梁钻孔灌注桩技术发展现状,提出无承台的大直径桩柱一体桥墩设计方案,从河床面计最高墩高约63 m。该方案成立的条件主要由高墩稳定及抗震需求控制,因而不宜采用较大跨径的上部构造。

综上,采用主跨跨径100 m的PC连续箱梁是最理想的桥型方案,推荐跨径组成为(60+13×100+60) m,主桥一联连续总长1 420 m(见图2)。该方案的主要优点是可避免深水施工,施工投入少、风

险低,同时上部构造简单,施工工艺成熟,养护工作量小,造价低,行车舒适性好。

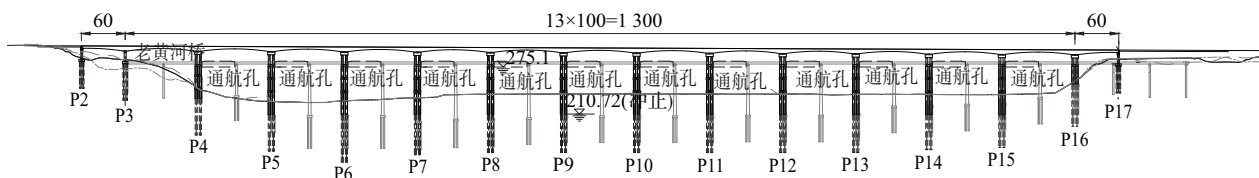


图2 刚构—连续梁方案桥型总体布置(单位:m)

4 主桥设计关键技术

4.1 结构体系

根据桥跨布置,主桥设计为15跨一联共计14个主墩、2个边墩,小浪底水库利用主槽调水调沙,故主槽内墩高变化较大(30~85 m),计算汽车制动力、风力、温度力及地震力等对桥梁下部产生的内力时需考虑淤积和冲刷2种情况。经结构动、静力分析,确定采用连续—刚构结构体系。约束形式为:中间2个主墩为固结墩;为提高桥梁整体抗震性能,固结墩前后各3个主墩设计为锁定墩,设置速度锁定支座;其余主墩均为活动墩,设置单向或双向滑动球型钢支座。主桥两侧采用D720型多向变位梳形板桥梁伸缩装置,以适应体系在温度和地震下的变形。

4.2 主梁

上部构造采用变截面PC箱梁,双幅共14对悬浇T构、30个合龙段。主梁采用单箱单室截面,C55砼,根部梁高6.3 m,高跨比1/15.873;跨中及边墩处梁高2.8 m,高跨比1/35.714;箱梁顶板宽16.25 m,底板宽8.25 m,悬臂长4.0 m;箱梁顶板厚0.3 m,底板厚度由跨中的0.32 m按二次抛物线变化至根部的0.8 m,腹板厚度由0.5 m渐变至0.8 m。活动墩箱梁根部设置1道2.8 m宽横隔梁,墩底设置横向抗震挡块,固结墩根部设置2道各1.5 m宽横隔梁。主梁采用纵、横、竖三向预应力体系,纵、横向钢束采用高强度低松弛预应力钢绞线,竖向采用JL32高强精轧螺纹钢粗钢筋;纵向腹板束采用19 ϕ^s 15.2型钢绞线,顶板束及合龙束采用15、17 ϕ^s 15.2型钢绞线,桥面板采用3 ϕ^s 15.2型钢绞线。

4.3 桥墩及基础

为适应库区水文特点,桥梁下部结构采用无承台大直径桩柱一体化主墩设计、双排双墩布置,横桥向间距6.25 m,顺桥向间距5.0 m(见图3)。活动墩为布置支座需要,墩顶统一设置高4.0 m盖梁,平面尺寸为10.45 m \times 9.8 m。考虑景观效果,固结墩墩

顶亦设置盖梁。水库运用期最高水位(+276 m处)以上部分墩身采用模板施工,直径2.8 m,采用C40砼浇筑;最高水位以下至桩顶部分墩身采用钢护筒施工,钢护筒为永久性结构,参与结构受力,钢护筒进入冲止标高以下,采用C40水下砼灌注桩施工工艺连续浇筑。基桩为钻孔灌注桩,桩基础直径2.5 m,按嵌岩桩设计,采用C40水下砼。为保证墩身整体受力和体系稳定,墩间设置多道系梁,最高水位以上为砼系梁,高度2.4 m(纵桥向)、2.6 m(横桥向),宽度2.0 m,采用C40砼;最高水位以下为护筒段钢—砼系梁,高度2.4 m,宽度2.0 m,采用Q345C钢板与钢护筒焊接,外包C40砼防腐(见图4)。

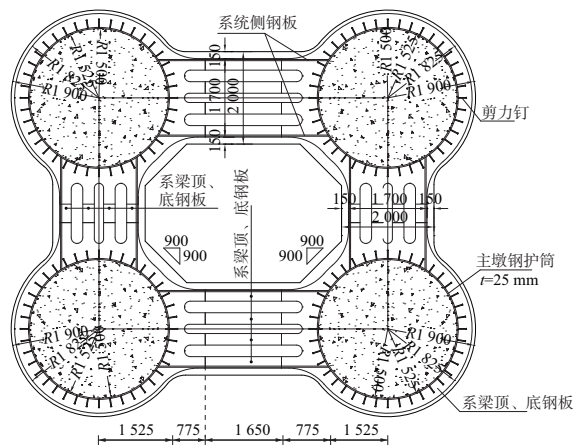


图3 钢系梁处主墩平面构造(单位:mm)

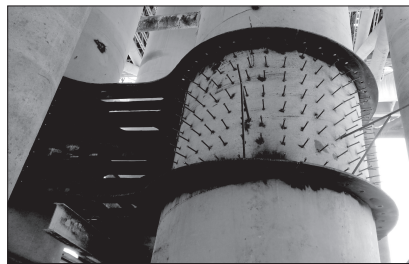


图4 钢系梁现场焊接

主墩钢护筒采用Q345C钢材制作,内径3 000 mm,壁厚25 mm。与钢系梁连接部位四周焊接D16 \times

180 mm 剪力钉,间距 250 mm。

主引桥过渡墩采用矩形空心墩,横桥向宽 9 m,顺桥向 3.5 m,壁厚 0.8 m。盖梁采用 L 形截面,主梁侧厚 2 m,宽 3.8 m。过渡墩承台厚 3.0 m,承台下设 6 根直径 1.8 m 钻孔桩。

4.4 桥梁抗震设计

根据相关抗震设计规范和细则,采用两水准两阶段的抗震设防标准,抗震设防类别为 B 类。E1 水准:100 年超越概率 63%(重现期 100 年)下检算强度,结构无损伤;E2 水准:100 年超越概率 5%(重现期 1 950 年)下检算位移或变形,桥墩可进入塑性但不致倒塌。

采用 MIDAS/Civil 建立主桥动力有限元模型,采用子空间迭代法分析该桥的动力特性,采用反应谱及时程分析法分析两设防水准地震作用下结构主要构件(墩、桩)的抗震需求和抗震能力,并考虑竖向地震作用。动力特性分析结果表明:主桥在最大淤积和最大冲刷情况下,结构第 1 阶振型表现为主梁纵飘,最大冲刷下自振周期达 11.572 9 s,是最大淤积下自振周期的近 3 倍。可见,最大淤积工况控制下部结构强度,最大冲刷工况控制结构位移。地震响应分析结果表明:全桥设置 P9、P10 两处固结墩可满足 E1 地震作用下抗震需求;为提高 E2 地震作用下抗震性能(降低固结墩地震力、改善结构地震位移),应考虑设置多个固定墩共同分担纵向地震力。

引入速度锁定装置可实现上述抗震理念,设计锁定速度为 1 mm/s,在温度荷载等产生慢速位移时,速度锁定器产生很小的反力,等同于活动支座;在地震荷载作用下速度超过锁定速度后,速度锁定器提供的反力随速度上升而迅速增大并锁定,限制墩梁间相对运动,等同于固定支座,从而起到限位保护和分担固结墩水平地震力的作用。

5 主桥施工关键技术

5.1 上部合龙方案

主桥上部结构采用挂篮对称悬浇逐段施工方案,施工中合龙次数较多,超长多跨连续结构属于多次超静定体系,受力状态复杂,其合龙方案对成桥后结构应力和位移有显著影响。在分析悬臂施工及成桥运营中体系稳定、应力水平及合龙束不同张拉顺序的基础上,得到较优的合龙方案为:先由各墩 0#块对称向两侧悬臂施工形成单“T”,然后每相邻 2 个单“T”之间合龙,经体系转换形成稳定的“II”;再

依次合龙相邻“II”,经过多次体系转换形成“4T”和“8T”;最后进行全桥合龙,完成最终体系转换。边跨合龙时张拉全部底板合龙束,每次中跨合龙时均只张拉部分底板合龙束,待成桥后再一次性全部张拉剩余底板钢束,以减少各次体系转换过程中二次力的影响,有利于结构受力。

5.2 下部深水施工方案

按照小浪底水库运营水位状况考虑,该桥下部施工方案需按高水位进行设计,其施工水深可达 40 余 m,下部桥墩、承台、基桩的深水施工方案成为关键。根据国内超大直径钻孔灌注桩的技术现状,设计采用超大直径基桩,同时取消承台设计,单幅桥下部结构采用桩柱式一体桥墩,以避免深水围堰的风险和巨大投入。超大直径钻孔灌注桩一般指直径 >2.5 m 的钻孔灌注桩,是近年来钻孔灌注桩工程技术的一个发展趋势,且已有过成功案例:1) 2013 年建成的浙江嘉绍跨杭州湾大桥,为避免水中区桩基施工困难,引桥大量应用直径达 3.8 m、桩长达 105~111 m 的超大直径钻孔灌注桩;2) 2017 年建成的湖南 G319 国道泸溪绕城公路白沙大桥,应用大直径深水桩基施工技术完成了上部直径 3.6 m、下部直径 3.2 m 的变截面桩基连续灌注 45.6 m。

针对设计提出的桩柱一体式主墩方案,下部选择高栈桥、超长直径钻孔灌注桩的深水施工方案。其优点如下:1) 施工中仅用桩基护筒作基桩和水下墩身施工设施,无需深水双壁钢围堰,可节省大量材料与费用,且可回避深水围堰施工风险;2) 水中墩施工工序简化为下沉钢护筒→钻孔→安装钢筋笼→不间断灌注水下桩基、墩柱砼→水面上破桩头浇筑水上墩柱砼→墩柱砼段上横系梁挂模施工→低水位下墩柱钢护筒段横系梁挂模施工,相对于桩基、承台双墙(或薄壁)墩的深水围堰施工不仅工序简化,且更适用于水位剧变及水深过大等情况,施工风险少、速度快、投入少;3) 桩柱式一体桥墩造型轻巧,枯水期亦能保持简洁美观;4) 墩身、桩自身刚度大,有利于较大跨径、长联连续一刚构桥承受巨大竖向、水平荷载。

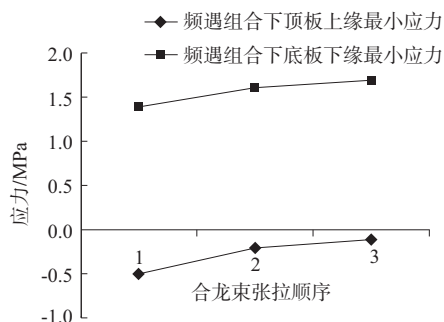
施工期间需重点关注:1) 钢护筒材料、规格、制造工艺及钢结构防腐等应符合设计和相关规范要求,钢护筒下沉后允许平面误差为 ± 50 mm,倾斜度 $\leq 1/400$;2) 由于结构受力需求,要求桩、墩身(钢护筒施工段)砼不间断地连续灌注,单墩砼达 600 m³,砼的供应需满足用量要求;3) 由于墩柱较高,墩柱系梁施工中应考虑墩柱的稳定性,设置必要的临时

连接,同时在水位变化大时注意护筒内外水位的调节,防止护筒局部失稳变形。

6 结构受力分析

6.1 静力分析

采用平面杆系进行结构模拟,按照实际施工流程进行结构离散,全桥划分为804个单元、805个节点。边界条件处理:1)固结墩墩底考虑最大淤积及最大冲刷2种工况,按土侧压力的m法计算固结点处的弯剪系数、水平刚性约束及转动刚性约束的弹性系数,模拟群桩基础实际刚度;2)主梁在过渡墩及连续墩设竖向约束,纵向活动。上部箱梁按全预应力砼构件进行验算,正常使用极限状态下主梁处于全受压状态,最不利荷载组合下截面上、下缘最大应力为16.3和14.1 MPa,上、下缘最小应力为0.1和1.22 MPa(见图5、图6)。



张拉序号1代表每次合龙时均一次性张拉全部顶、底板束;2代表本次合龙时张拉全部顶板束及底板长束,剩余底板短束下次合龙时张拉;3代表本次合龙时张拉全部顶板束及底板长束,剩余底板短束最后合龙时一次性全部张拉。

图5 正常使用极限状态下主梁抗裂计算

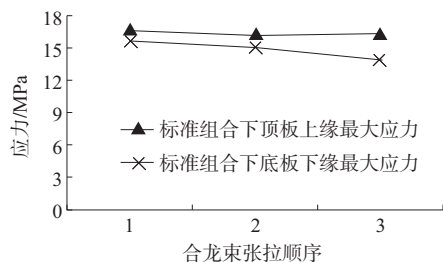


图6 持久状况下主梁受压计算

6.2 动力分析

采用空间梁单元模拟墩、梁和基础,并考虑支座的空间作用和桩土相互作用,采用反应谱法和非线性时程分析法对主桥进行地震响应分析。对于墩梁固结,采用刚性连接模拟;对于速度锁定器,反应谱计算采用弹性连接模拟,时程计算采用Maxwell模

型,锁定器刚度取600 kN/mm,计算时不考虑活动支座的摩擦效应。分析表明:在E1、E2地震作用下,桥墩及桩基均处于弹性工作状态;速度锁定器在整个地震过程中最大轴力为2750 kN,小于设计锁定力3000 kN,锁定位移为±10 mm;各支座横桥向地震剪力均小于其水平承载力;梁端顺桥向位移小于伸缩缝装置位移。桥梁的抗震性能满足要求。

6.3 局部分析

为分析钢系梁与护筒结合部位在运营期间的受力状态,采用ANSYS进行局部应力分析。两者共同受力时,计算最大拉应力为65.4 MPa;考虑钢系梁局部脱空时,最大拉应力上升至125 MPa,出现在系梁与钢护筒连接钢板的加腋附近。均远小于Q345钢的容许应力,满足设计要求。

6.4 稳定分析

采用MIDAS/Civil进行稳定屈曲分析,结果表明:最大冲刷工况下稳定验算最为不利,裸墩状态下稳定系数为22.3,最大悬臂施工时稳定系数为7.02,运营阶段全桥一阶失稳模态表现为纵向失稳、稳定系数为10.0。桥梁稳定安全系数均大于规范要求。

7 结语

南村黄河特大桥对加强豫晋两省交通联系、促进豫西北和晋东南地区经济社会发展影响深远。该桥为国内多跨长联预应力砼连续箱梁桥中的典型案例,已于2016年8月正式开工建设,目前正处在施工关键期。该桥的建设为中国跨河(湖)特大型桥梁建设提供了新思路和解决方案,建成的大桥也将成为黄河上一道新的亮丽风景线。

参考文献:

- [1] 黄河水利科学研究院,水利部黄河泥沙重点实验室.垣曲至渑池高速公路黄河特大桥防洪评价报告[R].郑州:黄河水利科学研究院,2014.
- [2] JTG/T B02-01-2008,公路桥梁抗震设计细则[S].
- [3] 张永亮,陈兴冲,颜志华.Lock-up装置在连续梁桥上的减震性能研究[J].世界地震工程,2010,26(2).
- [4] 余小华,窦胜谭.速度锁定器在桥梁抗震中的有限元模拟[J].铁道标准设计,2015,59(2).
- [5] 李剑锋,季日臣.多跨预应力砼连续梁桥合龙顺序研究[J].铁道建筑,2018,58(2).
- [6] 宋卫国,伏首圣,程德林.嘉绍跨江大桥水中区引桥单桩独柱墩设计[J].桥梁建设,2010(增刊1).
- [7] 史鹏飞.深水大直径超长桩基础施工技术[J].山西建筑,2007,33(9).

收稿日期:2019-06-24