

软土地区超深竖井基坑支护降水设计及其影响分析

彭夏军

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:以青草沙—陈行库管连通工程中开挖深度44.9 m、直径18 m的4#盾构井为例,介绍软土地区超深竖井的基坑支护设计方案和承压水降水设计方案。通过采用两墙合一的叠合墙结构和逆作法内衬结构控制超深基坑的地墙变形,通过设置超深N-Jet墙底水平封底帷幕结合超深地墙和地墙接缝止水,将坑底⑨层承压水隔断进行坑内封闭式降压。采用MIDAS和Visual Modflow建立三维有限元数值模型,分别计算基坑开挖和⑨层承压水降水对周边环境、地面沉降和高架桥桩基变形的影响。计算结果表明采用上述基坑支护和降水方案,对周边环境的影响较小。

关键词:软土地区;超深竖井;承压水降水

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0291-06

Design of Support and Dewatering for Ultra-deep Shaft Foundation Pit and Its Influence Analysis

PENG Xiajun

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking the No. 4 shield shaft with an excavation depth of 44.9 m and a diameter of 18 m in the Qingcaosha - Chenxing Reservoir Pipe Connection Project as an example, the foundation pit support design scheme and the confined water dewatering design scheme for ultra-deep shafts in soft soil areas are introduced. The deformation of the ground walls of the ultra-deep foundation pit is controlled by adopting a two-wall integrated composite wall structure and an inverted lining structure. By setting the ultra-deep N-Jet wall bottom horizontal sealing curtain combined with the ultra-deep ground wall and the ground wall joint waterstop, the confined water at the bottom of the pit ⑨ layer is isolated for the closed pressure reduction within the pit. MIDAS and Visual Modflow are used to establish the three-dimensional finite element numerical models to calculate the influences of foundation pit excavation and confined water dewatering in the ⑨ layer on the surrounding environment, ground settlement and deformation of viaduct pile foundation, respectively. The calculation results show that the above foundation pit support and dewatering schemes have little impact on the surrounding environment.

Keywords: soft soil area; ultra-deep shaft; dewatering of the confined water

0 引言

随着城市化进程不断推进,大口径市政给排水管道工程被迫向更深层地下空间寻求管道敷设空间,从而导致近年来大型城市中出现了越来越多的超深竖井基坑^[1]。目前上海软土地区深井基坑的研究主要针对深度40 m以内的竖井,对超过40 m的竖井基坑研究内容较少。可供借鉴的主要有苏州河深

隧工程的云岭西竖井和苗圃竖井,开挖深度分别为58.65 m和56.3 m^[2]。基坑深度超过40 m后,第⑦层、⑨层和⑪层承压水降水问题成为基坑设计和施工需要重视的突出问题^[3-4]。特别是在城市市区中心,基坑周边现状建构筑物 and 管线分布密集,环境保护要求高,而承压水降水对周边环境和地面沉降的影响持久且深远,导致降水作业难度大。目前对⑨层和⑪层承压水的降水工程案例和相关研究较少,且工程经验和实测数据积累较少,导致⑨层和⑪层承压水降水成为一般不会轻易涉及的工程领域^[5]。

收稿日期: 2024-12-06

作者简介: 彭夏军(1979—),男,本科,高级工程师,从事给水工程结构设计工作。

基于上述背景,本文以上海原水青草沙—陈行库管连通工程为例,选取工程中开挖深度44.9 m,直径18 m的4#盾构井为研究对象,介绍该超深竖井基坑的支护设计方案和降水设计思路。同时,基于M有限元法数值分析软件,建立超深竖井空间效应的三维数值模型,分析基坑开挖对周边环境的影响;基于Visual Modflow有限差分法数值分析软件,建立反映水文地质地层特性的三维地层模型^[6],分析基坑降水对周边环境的影响。可为上海软土地区类似超深竖井基坑的设计和施工提供参考。

1 工程简介

1.1 工程概况

青草沙—陈行库管连通工程中的4#盾构井平、剖面图如图1和图2所示。

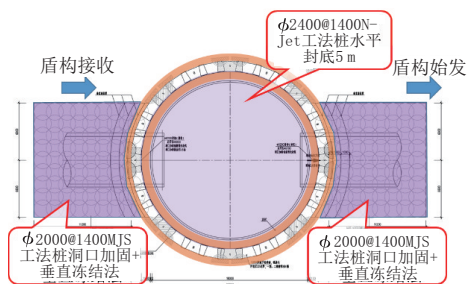


图1 竖井结构平面图(单位:mm)

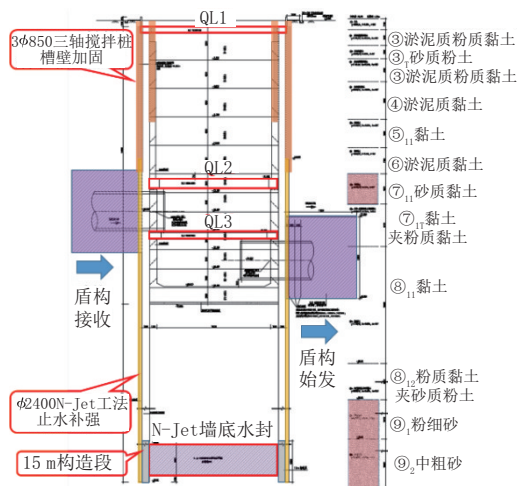


图2 竖井结构剖面图(单位:mm)

4#盾构井基坑周边环境图如图3所示。基坑1倍开挖深度范围内,地下连续墙围护外边线距离现状S20外环高架桥面边缘平面净距 ≥ 4 m,距离其高架桩基础8.17 m。北侧距离现状4层混合结构厂房约39.7 m。基坑1~2倍开挖深度范围内,北侧距现状3层厂房约83 m,南侧距离泰和路南侧的现状3~4层厂房约60.5 m。现状管线与基坑平面位置冲突的需进行临时改搬迁,不冲突的需进行重点监测。



图3 竖井基坑周边环境平面图

综上所述,4#盾构井基坑周边环境复杂,基坑环境保护要求高;S20外环高架为4#盾构井的重点保护对象。

1.2 地质条件

本次勘探孔最大深度120 m,从地面至地下25 m深度范围内为上海典型软土层,包括①层填土,③~⑤层流塑~软塑淤泥质黏土和粉质黏土。25~63 m深度范围为⑦₁₁层砂质粉土(上海第一层承压水含水层),⑦₁₁层、⑧₁₁层、⑧₁₂层粉质黏土和黏土。63 m深度以下为⑨层粉细砂~中粗砂(上海第二层承压水含水层)和⑩₁层粉细砂(上海第三层承压水含水层)。⑨层和⑩₁层之间⑩层硬塑黏土隔水层缺失,仅有厚度0.3 m夹层,可认为这两层承压水上下连通,如图2所示。

2 基坑支护方案

4#盾构井基坑采用1 200 mm厚地下连续墙,墙身混凝土设计强度为C40(水下),P12。地墙深度96.9 m,插入坑底以下52.0 m,墙底15 m为构造段,地墙垂直度要求 $<1/1\,000$ 。地下连续墙槽采用正32边形拟合圆形,每个槽段为169°夹角的“一字形”。槽段单边长度2.8 m。一期为3个槽段,折线总长度7.29 m。二期为1个槽段,直线长度2.8 m。

地墙与内衬形“两墙合一”叠合墙结构,内衬采用逆作法分段施工。圈梁QL2标高以上的内衬逆作分段高度采用4.5 m。QL2标高以下的内衬逆作分段高度3 m。分段数共计12段。在盾构进出洞口上方,分别设置圈梁QL2和QL3,作为井壁大洞口处的洞口加固。

槽壁加固采用3φ850三轴搅拌桩,地下连续墙接头采用铰接头。为防止地墙接缝处在⑦₁₁层及⑨层承压水处产生承压水水平渗漏,在地墙接缝外侧增设φ2400N-Jet工法桩进行止水补强,桩顶标高为⑦₁₁层顶标高以上2 m,桩底至地墙底标高,最大成桩深度96.9 m。N-Jet工法是上海软土地区90 m深

度以上具备成桩能力的水泥土加固桩,在上海机场联络线工程中进行了深度 115 m 的试成桩^[7]。在此深度下,为保证 N-Jet 与地墙接缝的咬合厚度,N-Jet 垂直度要求 $<1/500$ 。

盾构进出洞口采用 $\phi 2000@1400\text{MJS}$ 工法旋喷桩,考虑到洞口上方接近 $\textcircled{7}_{11}$ 层承压水,在洞口加固的基础上辅以垂直冻结法^[9]。

3 承压水降水方案

根据 4#盾构井基坑水文地质专项勘察报告,拟建场地处第 $\textcircled{7}_{11}$ 层承压含水层初始水位为地面以下 0.5 m,第 $\textcircled{9}$ 层承压含水层初始水位为地面以下 2.3 m,第 $\textcircled{11}_1$ 层承压水初始水位与 $\textcircled{9}$ 层一致。

通过现场抽水试验,得到第 $\textcircled{9}$ 层的水力参数如下:水平渗透参数 $K_h=68.5\text{ m/d}$,垂直渗透参数 $K_v=8.3\text{ m/d}$,平均贮水率 $S_s=1.65\times 10^{-3}$ 。现场抽水试验中, $\textcircled{9}$ 层单井出水量达 123~152 m^3/h ,每延米滤管的出水量达 3.9~6.6 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ 。可知,4#盾构井场地处的 $\textcircled{9}$ 层承压水头很高,渗透系数很大,含水量非常丰富,单井出水量很大。且 $\textcircled{9}$ 层和 $\textcircled{11}_1$ 层之间的 $\textcircled{10}$ 层硬塑黏土隔水层缺失,导致第二、三层承压水连通,承压

水含水层厚度较厚,进一步增加了地层含水量。

因此,对 $\textcircled{9}$ 层进行坑内悬挂式降压所需的坑内降水深度较深,抽水量大,影响范围很广,风险较高;且由于 $\textcircled{9}$ 层水位恢复速度快,一旦降压设备故障,地下水可能会迅速灌满基坑。同时,距离 4#盾构井 8.17 m 的外环高速桥桩采用 $\phi 800\text{ mm}$ 钻孔灌注桩,桩底标高 -56.8 m,桩端持力层位于 $\textcircled{8}_{12}$ 层, $\textcircled{9}$ 层降压后可能导致桩端持力层沉降、高架桥桩基沉降。

故经方案比选,4#盾构井基坑选用墙底水平封底帷幕法^[8],即在地墙底部设置满堂水泥土搅拌加固体作为帷幕隔水层,将 $\textcircled{9}$ 层隔断后进行坑内封闭式降压。为避免对水平封层下方的 $\textcircled{9}$ 层进行敞开式降压,通过加深地墙及水平封层深度,直至封层下方 $\textcircled{9}$ 层承压水满足抗突涌要求。据此计算得到水平封层最大深度为 95.9 m,因此地墙深度及地墙接缝 N-Jet 止水深度达到 96.9 m。墙底水平封底帷幕采用满堂 $\phi 2400@1400\text{N-Jet}$ 工法桩,水平封底深度范围为墙底标高以上 1~6 m。

采用上述承压水降水方案后,各层承压水降压计算结果如表 1 所列。

表 1 承压水降压计算汇总表

层号	层顶深度/m	土的自重/kPa	静水压力/kPa	分项系数	临界挖深/m	安全水位/m	水位降深/m
$\textcircled{7}_{11}$	24.4	—	239	—	10.46	基坑开挖揭露 水位控制在开挖面以下 1.0 m	
$\textcircled{9}_1$	62.56	316.6	602.6	0.53	27.4	32.5	30.2
$\textcircled{9}_2$	79.26	643.6	769.6	0.84	35.5	18.0	15.7
水平封底帷幕下 $\textcircled{9}_2$	95.9	982.9	936	1.05	—	—	—
$\textcircled{11}_1$	99.06	1 047.2	967.6	1.08	—	—	—

表 1 中,临界挖深为基坑不开启降压的安全开挖深度,开挖超过临界挖深后需开启降压;安全水位为基坑开挖至坑底时,目标含水层的水位需降低地面以下的深度值;水位降深为基坑开挖至坑底时,目标含水层的水位降深。

具体来说,4#盾构井针对各承压水含水层的降压井设计设计内容如下。

(1)对第 $\textcircled{7}_{11}$ 层而言,层顶埋深约 24.4 m,其上下层均为相对隔水层,层厚约 5 m,被地墙完全隔断。按照初始水位位于地面以下 3 m 最不利工况计算,安全开挖深度为 10.46 m,之后需开启降压井,将坑内 $\textcircled{7}_{11}$ 层承压水进行疏干处理。在随后基坑开挖过 4#盾构井的承压水降水井如图 4 所示。其中, $\textcircled{7}_{11}$ 层被完全挖除,挖除时停止降压。

(2)对第 $\textcircled{9}_1$ 层及 $\textcircled{9}_2$ 层而言,这两层承压水上下

连通性较强,层顶埋深约 62.56 m,按照初始水位位于地面以下 2.3 m 最不利工况计算,设置墙底 N-Jet 水平封底帷幕后将 $\textcircled{9}$ 层分为 2 部分:对水平封底帷幕层以上 $\textcircled{9}$ 层采取坑内疏干减压的方式,安全开挖深度为 27.4 m,之后需开启降压井,将坑内 $\textcircled{9}$ 层承压水水头降至地面下 32.5 m 后方可继续开挖剩余 17.5 m^3 土方,至坑底深度 44.9 m,待底板施工完成且达到设计强度后停止坑内降水。对水平封底帷幕层以下 $\textcircled{9}$ 层,经计算抗突涌安全系数为 1.05,无须降压。

(3) $\textcircled{11}_1$ 层承压水经计算无须降压。

(4)坑内针对 $\textcircled{7}_{11}$ 层设置降压井 1 口,井深 37.4 m,井径 800 mm,滤管进入 $\textcircled{7}_{11}$ 层 10.0 m。

(5)坑内针对 $\textcircled{9}_1$ 及 $\textcircled{9}_2$ 层设置降压井 2 口,坑外针对 $\textcircled{9}_1$ 及 $\textcircled{9}_2$ 层设置降压井兼观测井 3 口,井深

基坑内土体开挖分为 5 个施工步,每步开挖深度约 9 m,总深度 44.9 m。开挖某一土层后施加对应位置的内衬,具体模拟工况如表 3 所示。

表 3 模拟施工工况表

工况	施工内容
0	激活地层并施加边界条件,地应力平衡
1	激活高架桥桩基和承台
2	激活地墙围护结构
3	开挖浅层土体(挖深 2 m)
4	施工 QL1 并开挖第 2 层土方(挖深 6.3 m)
5	施工第一道逆作内衬并开挖第 3 层土方(挖深 10.8 m)
6	施工第二道逆作内衬并开挖第 4 层土方(挖深 15.3 m)
7	施工第三道逆作内衬并开挖第 5 层土方(挖深 19.8 m)
8	施工第四道逆作内衬并开挖第 6 层土方(挖深 24.3 m)
9	施工第五道逆作内衬并开挖第 7 层土方(挖深 27.3 m)
10	施工第六道逆作内衬及 QL2 并开挖第 8 层土方(挖深 30.3 m)
11	施工第七道逆作内衬并开挖第 9 层土方(挖深 33.3 m)
12	施工第八道逆作内衬并开挖第 10 层土方(挖深 36.3 m)
13	施工第九道逆作内衬及 QL3 并开挖第 11 层土方(挖深 39.3 m)
14	施工第十道逆作内衬并开挖第 12 层土方(挖深 42.3 m)
15	施工第十一道逆作内衬并开挖第 13 层土方(挖深 44.9 m)

最后工况下,地层位移云图、地墙位移云图、高架桥桩的位移云图,如图 6 至图 8 所示。

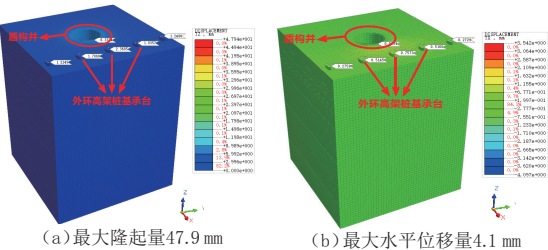


图 6 最后工况下地层位移云图

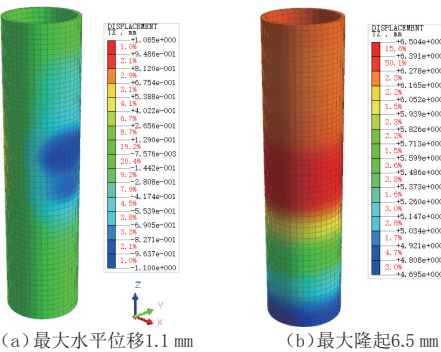


图 7 最后工况下地墙位移云图

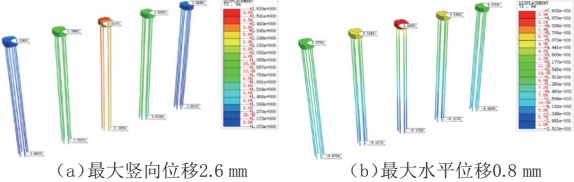


图 8 最后工况下高架桥桩基位移云图

基坑开挖后,由于内部土体的开挖卸载,导致坑底和基坑围护结构出现竖向位移。坑底最大隆起量达到 47.9 mm。

在基坑开挖的影响下,受土体开挖卸载的影响,地墙周边地层朝坑内方向发生位移,最大位移达到了 4 mm,地下连续墙最大水平位移 1.1 mm。

受基坑开挖卸载产生坑底土体隆起的影响,基坑周边的地层及地墙墙体发生了一定隆起变形,高架桩基随地层发生向上位移,但隆起幅度相对较小。桩基所在断面地表隆起大致呈现高斯曲线形态,图中可以看出中间承台的隆起量最大,竖向位移约为 2.6 mm。

从上述计算结果可知,基坑开挖后坑底的最大隆起量为 47.9 mm,地层水平位移量为 4 mm,地墙水平最大位移为 1.1 mm,地墙最大隆起量为 6.5 mm,高架桥桩基的最大竖向位移为 2.6 mm,高架桥桩基的最大水平位移为 0.8 mm。

5 承压水降水对周边环境影响分析

为验证第 3 节中承压水降水方案的可行性,采用 Visual Modflow 有限差分法数值分析软件,建立 4#盾构井处的水文地质地层模型,水平方向剖分为 129 行及 202 列,边缘区最大行列间距 20 m,核心区最小行列间距为 1 m。结合抽水影响半径,地层模型平面尺寸 1 500 m×1 500 m,地层厚度为 100 m,模型最外边缘的承压水水头按照定水头考虑。分析⑨层承压水降水对周边环境的影响。

在坑内进行⑨层减压降水后,坑外⑨层水位降深分布图如图 9 所示。从中可以看出,因地墙隔断⑨层,且在墙底设置 N-Jet 水平封层,⑨层在坑外的最大水位降深约 0.8 m,在高架桥桩处的水位降深约 0.15 m。

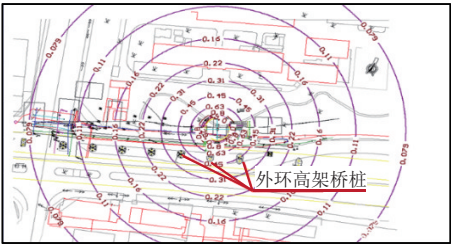


图 9 坑内⑨层减压降水后⑨层水位降深分布图

根据⑨层降压后的水位降深,可以得到⑨层持续降压 180 d 后的地面沉降分布图,如图 10 所示。从中可以看出,180 d 预测坑外最大沉降为 2.2 mm,外环高架桥桩处坑外最大沉降为 1.8 mm。

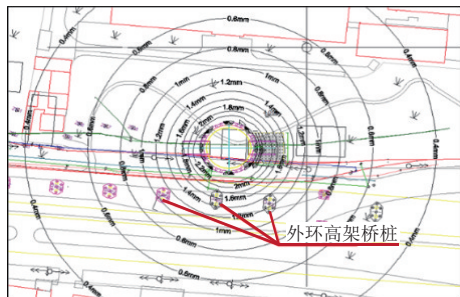


图10 ⑨层降水180 d后沉降分布图

因此,采取前述方案对⑨层承压水降水后,对周边地下水位和地面沉降的影响较小。

6 结 语

根据本文所述内容,可总结出4#盾构井的基坑支护设计和降水设计要点如下。

(1)超深竖井采用两墙合一的叠合墙结构和逆作法内衬结构,在盾构洞口上方增设圈梁作为洞口加固措施。地墙接缝采用N-Jet隔断⑦₁₁层和⑨层承压水,避免地墙接缝处横向渗漏。盾构洞口加固采用MJS加固辅以垂直冻结法以保证盾构在承压水含水层下进出洞的安全性。

(2)采用墙底N-Jet水平封底帷幕结合地墙隔断⑨层承压水,加深地墙及N-Jet水平封底帷幕直至水平封底帷幕以下⑨层及⑪₁层承压水满足抗突涌要求,对水平封底帷幕以上的⑨层进行坑内封闭式降压。

(3)通过建立三维有限元数值模型,分别计算了基坑开挖和⑨层承压水降水对周边环境、地面沉降和高架桥桩基变形的影响。计算结果表明,采用上述基坑支护结构和承压水降水方案,对周边环境的影响较小。

参考文献:

[1] 马昕,孙德安,刘树佳.软土地区某超深圆形基坑变形特性及流固

耦合分析[J].水文地质工程地质,2024,51(6):74-85.

[2] 刘树佳,季军,白占伟,等.上海苏州河深隧工程建设中超常规技术管理方法[J].隧道与轨道交通,2021,(增刊1):84-87.

[3] 翁其平,王卫东,周建龙.超深圆形基坑逆作法“两墙合一”地下连续墙设计[J].建筑结构学报,2010,31(5):188-194.

[4] 乔亚飞,闫凯,赵腾腾,等.软土地区超深圆形竖井的坑底隆起特性与机制[J].岩土力学,2023,44(9):2707-2716.

[5] 杜策,周振,张力,等.软土地区超深基坑多层承压水控制技术研究[J].施工技术(中英文),2023(6):1-8.

[6] 王林,高程鹏.某强透水承压含水地层基坑工程降水方案比较分析[J].城市道桥与防洪,2024(8):195-199.

[7] T/CECS 1290—2023,超高压喷射注浆(N-Jet工法)技术规程[S].

[8] 王卫东.软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术[J].岩土工程学报,2024,46(1):1-25.

[9] 张胜利,杨杰.冻结法施工手册[M].北京:应急管理出版社,2021.

[10] 汪鹏程,吴云涛,徐永恺.深基坑悬挂止水帷幕结合回灌对控制沉降数值模拟分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(8):1097-1102.

[11] 王卫东,王浩然,徐中华.基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J].岩土力学,2012,33(8):2283-2290.

[12] 宗露丹,王卫东,徐中华,等.软土地区56 m超深圆形竖井基坑支护结构力学分析[J].隧道建设(中英文),2022,42(7):1248-1256.

[13] 高程鹏,杨峰,卢瀚,等.基于强度折减法的圆形顶管井基坑变形及稳定性分析[J].城市道桥与防洪,2024(9):257-263.

[14] 徐中华,王卫东.敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J].岩土力学,2010,31(1):258-264;326.

[15] 崔剑峰,胡建华,贺炜,等.圆形地下连续墙的环向刚度折减效应及修正方法研究[J].岩土工程学报,2017,39(11):2132-2138.

[16] 翟之阳,聂东清,周质炎.考虑地下连续墙环向抗力的基坑稳定性分析[J].特种结构,2024,41(4):36-42.

[17] DG/TJ 08-61—2018,基坑工程技术标准[S].

[18] 宗军良.某城市核心区软土超深基坑支护设计方法与实践[J].城市道桥与防洪,2023(11):245-249;329.

[19] 南文文.软土超深基坑开挖对紧邻结构影响分析[J].城市道桥与防洪,2023(7):298-303.

[20] 张晶磊.超大超深基坑涌水涌砂预案及抢救措施[J].城市道桥与防洪,2015(6):159-161.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

