

山区钢管拱扣挂系统永临结合锚碇施工技术 研究与应用

李康¹, 陈嘉其², 陈诗泉¹

(1. 中交一公局第四工程有限公司, 广西 南宁 530033; 2. 广西工业职业技术学院, 广西 南宁 530001)

摘要: 乌江特大桥为计算跨径475 m的上承式钢管混凝土拱桥, 采用缆索吊装+斜拉扣挂的施工工艺, 扣挂系统利用引桥桩基承台作为锚索锚碇, 巧妙地实现了永临结合。提出了一种承台锚碇水平承载力和穿墩索道管精准放样坐标的计算方法, 并基于该方法详细论述了永临结合桩基承台锚碇关键施工技术要点。结果表明, 在山区大跨径钢管拱桥悬臂拼装施工中, 采用引桥桩基承台作为锚索锚碇, 不仅结构上安全可靠, 而且相比单独建造锚碇, 大大节约了施工成本, 缩短了施工工期, 可为同类似工程提供参考。

关键词: 钢管混凝土拱桥; 扣挂系统; 永临结合; 桩基承台锚碇

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0202-05

Research and Application of Construction Technology for Permanent Temporary Combined Anchoring of Steel Pipe Arch Buckling System in Mountainous Areas

LI Kang¹, CHEN Jiaqi², CHEN Shiquan¹

(1. The Fourth Engineering Co., Ltd., China Communications First Public Bureau, Nanning 530033, China; 2. Guangxi Polytechnic of Industry, Nanning 530001, China)

Abstract: The Wujiang Grand Bridge is a deck concrete filled steel tube arch bridge with the calculated span of 475 m. The construction technology of cable hoisting and cable-stayed buckling is adopted. By utilizing the base slab of pile foundation of approach bridge as the anchorage of anchor cable, the permanent and temporary combination is cleverly realized by the buckling system. A calculation method for the horizontal load-bearing capacity of the base slab anchorage and the precise positioning coordinates for the cableway through the pier is proposed. Based on this method, the key construction technical essentials for base slab anchorage of the permanent and temporary combined pile foundation are discussed in detail. The results demonstrate that in the cantilever assemble construction of long-span concrete filled steel tube arch bridge in the mountainous area, the use of base slab of pile foundation of approach bridge as the anchorage of anchor cable is safe and reliable for the structures, and compared with the single construction of anchorage, it will greatly save the construction cost and shorten the construction period, which can provide the reference for the similar projects.

Keywords: concrete filled steel tube arch bridge; buckling system; permanent presence combination; pile foundation base slab anchorage

0 引言

钢管混凝土拱桥施工时的临时措施斜拉扣挂系统由扣索、锚索、扣塔、锚碇组成, 锚碇的作用是平衡锚索的索力, 确保钢管混凝土拱桥拱肋节段悬臂拼

装施工过程的安全。锚碇为多向受力结构, 承载能力受结构自身荷载以及地质、地形等因素的影响, 常用的结构形式有重力锚、岩锚、桩锚等, 在扣挂系统中经常需要单独建造锚碇, 额外增加了钢管混凝土拱桥施工的建造成本和征地成本。尤其是在山区条件下, 面临建设场地受限等实际困难, 若能合理利用引桥结构作为扣挂系统的锚索锚碇, 实现钢管拱大临结构施工的永临结合, 将有助于节约大临用地, 降低施工成本, 实现绿色高效施工。

收稿日期: 2024-10-09

作者简介: 李康(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁施工管理工作。

通信作者: 陈嘉其(1993—), 女, 硕士, 工程师, 从事工程结构设计工作。电子信箱: 2268522726@qq.com

1 工程概况

乌江特大桥为德余高速控制性工程,跨径组合为 $3\times(3\times 40)\text{ m}+4\times(4\times 40)\text{ m}+504\text{ m}+2\times(4\times 40)\text{ m}$,两岸引桥采用预应力混凝土先简支后结构连续T梁,主桥为计算跨径 475 m 钢管混凝土桁架拱,在乌江中下游横跨U形河谷(见图1)。主桥采用缆索吊装+斜拉扣挂的的无支架施工工艺,整个拱圈共划分为60个拱肋吊装节段,分左右幅吊装。拱肋节段吊装过程中,需要设置斜拉扣挂系统保证节段悬拼施工过程中拱圈结构的临时固定。

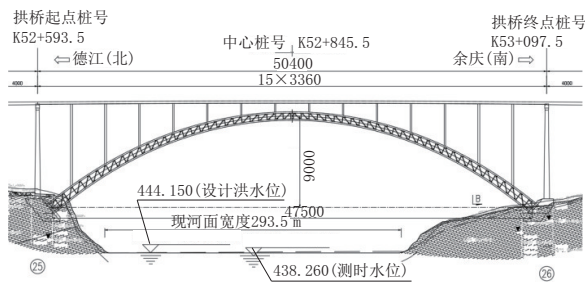


图1 乌江特大桥主桥立面图(单位:cm)

桥址地处溶蚀侵蚀低山地貌区,坡角一般为 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$,德江岸地形较平缓,无明显的外倾结构面,整体稳定性较好,上覆粉质黏土(层厚 $0.6\sim 1\text{ m}$)、下伏强风化~中风化石灰岩;余庆岸地形略为陡峭,中风化层发育平行和垂直主线方向的裂隙,整体稳定性稍差,上覆粉质黏土(层厚 $3\sim 8\text{ m}$)、下伏基岩石灰岩。

2 扣挂系统锚碇设计

斜拉扣挂是拱桥主拱悬臂拼装成拱过程中对已拼装拱肋进行临时支撑的一种方式,本工程将扣塔和缆塔分开设置,目的是为拱上立柱、钢梁等构件在桥面起吊提供条件,同时降低引桥高墩的外荷载,提高扣挂系统的安全度。扣塔采用钢结构塔架,设置于25#、26#交界墩盖梁上,与交界墩共同构成扣锚索之间的荷载传递结构。

结合桥址处的地形地质条件,在考虑既有线路、便道、电线、线杆等既有构筑物的位置后,就近锚固在相应引桥承台上或独立锚碇上,全桥设计扣挂系统锚碇共12个,南北岸锚碇各6个,其中重力式锚碇4个,桩基承台锚碇8个,具体分布见图2、图3。桩基承台锚碇利用了德江岸引桥20#左右幅承台以及余庆岸引桥28#左右幅承台、29#左右幅承台,依靠引桥的墩承台抵抗水平荷载和竖向荷载,在经过结构验算确保满足永久结构不破坏和施工安全的前提

下,实现了工程的永临结合,节省了临时设施和材料费用,具有很好的经济性,其中28#左右幅承台锚碇承担锚索力较小,直接利用原设计承台结构作锚碇即可抵抗锚索传递的荷载,而20#左右幅承台锚碇及29#左右幅承台锚碇由于承担的锚索力较大,需要对原设计桩基承台进行改造方可使用,通过适当增大承台体积和桩基数量以确保结构受力安全。30#~31#承台之间的承台锚碇为单独设置,主要原因是该位置地势较陡,覆盖层较厚(10 m以上),临空面离承台较近,直接利用引桥承台可能会造成对引桥永久结构的破坏,风险较大,而且由于地层以软弱的粉质黏土为主,地基承载力达不到要求,故也无法采用重力式锚碇,考虑粉质黏土的黏结强度较低,同时底层溶洞较多,地质复杂,难以保证其可靠性,也没有采用岩锚,故最终选择设置独立的桩基承台锚碇。

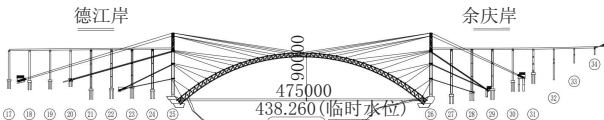


图2 乌江特大桥扣挂系统立面布置图(单位:mm)

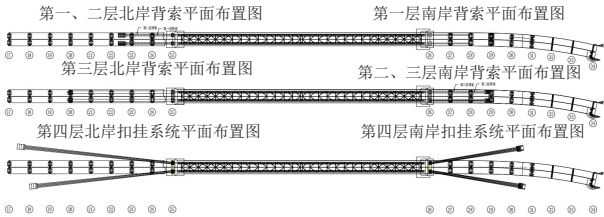


图3 乌江特大桥扣挂系统平面布置图

3 永临结合桩基承台锚碇承载力计算

桩基承台锚碇结构验算的关键在于桩基的水平承载力,比较常用的水平承载力分析方法为弹性地基反力法的m法^[1],该方法假定地基系数随深度而呈直线变化。本文将采用m法并参考桩基规范^[2]的相关规定计算桩基水平承载力,由于实际工程中桩顶受到承台约束,约束关系介于固接与铰接之间,桩顶在承台约束的条件下,单桩水平承载力大于桩头自由条件下的承载力^[3],为了计算方便,本文假定桩顶自由,计算结果是偏于安全的。

下面以扣挂系统28#右幅承台锚碇为例,进行承台锚碇的结构复核算,其锚碇结构见图4、图5。

根据扣挂系统索力计算结果,作用于28#右幅承台锚碇的锚索合力 $T=1315.8\text{ kN}$,锚索弦倾角 $\theta=19.65^{\circ}$,据统计,承台、墩柱以及上部结构传递给桩基的竖向下压荷载为 $47\,787.60\text{ kN}$,而锚索引起的竖向

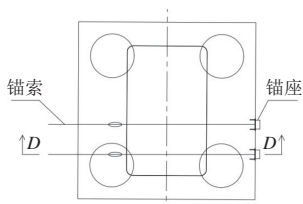


图4 28#右幅承台锚碇平面布置图

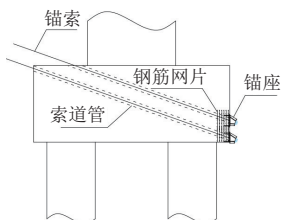


图5 28#右幅承台锚碇D-D剖面立面布置图

上拔力仅为 $1\,315.8 \times \sin 19.65^\circ = 442.5$ kN, 远远小于桩基承受的竖向下压荷载, 故承台锚碇的竖向抗拔承载力能满足要求, 仅需验算其水平承载力即可。如图6所示, 垂直于 T 方向的桩基轴线间距 $L = 5.5$ m, T 合力作用轴线与较近处桩基轴线的距离 $l_1 = 1.32$ m, 按照荷载合力与桩基位置的关系, 得到受力最不利的一根桩基所受水平力 $H = \frac{1}{2} \times T \cos \theta \times \frac{(L - l_1)}{L} = 470.89$ kN。

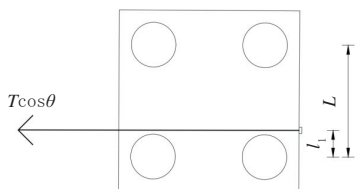


图6 桩基水平受力简图

对于地基水平抗力系数的比例系数 m 值, 当基桩侧面为几种土层组成时, 以主要影响深度 $h_m = 2(d + 1) = 2 \times (2.2 + 1) = 6.4$ m 范围内的 m 值作为计算值, 当 h_m 深度内存在两层不同土时, 按照式(1)计算:

$$m = \frac{m_1 h_1^2 + m_2 (2h_1 + h_2) h_2}{h_m^2} \quad (1)$$

式中: h_1 、 h_2 分别为第1层、第2层岩土厚度; m_1 、 m_2 分别为第1层、第2层岩土的抗力系数。承台底以下依次为粉质黏土(2.7 m厚)、全~强风化石灰岩(2.2 m厚)、中风化石灰岩, 根据勘察报告对应 m 值分别取 18、100 MN/m⁴, 代入数值, 得到主要影响深度内 $m = 44$ MN/m⁴。

对圆形截面, 桩身换算截面受拉边缘的截面模量为:

$$W_0 = \frac{\pi d}{32} [d^2 + 2(\alpha_E - 1)\rho_g d_0^2] \quad (2)$$

式中: d 为桩径; d_0 为桩径减去钢筋保护层; α_E 为 E_s/E_c ; ρ_g 为主筋配筋率。代入数值, 得到 $W_0 = 1.362$ m³。对于钢筋混凝土桩, 桩身抗弯刚度 $EI = 0.85E_c I_0 = 0.85 \frac{E_c W_0 d_0}{2}$, 代入数值得 $EI = 3 \times 10^7$ kN·m²。对于圆形桩, 当直径 $d > 1$ m 时, 桩身计算宽度 $b_0 = 0.9(d + 1) = 0.9 \times (2.2 + 1) = 2.88$ m, 则桩的水平变形系数 α 为

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_0}{EI}} \quad (3)$$

代入数值得 $\alpha = 0.335$ m⁻¹。桩基规范^[3]给出了两种关于单桩水平承载力特征值的估算公式, 对于桩身 $\rho_g < 0.65\%$ 的灌注桩, 单桩水平承载力主要以桩身强度控制, 可按下列公式估算:

$$R_{ha} = \frac{0.75\alpha\gamma_m f_t W_0}{\nu_M} (1.25 + 22\rho_g) \left(1 \pm \frac{\xi_N \cdot N}{\gamma_m f_t A_n} \right) \quad (4)$$

式中: $\pm$ 号为桩顶受力状态, 受压取“+”, 受拉取“-”; 其他符号参照桩基规范^[2]。对于钢桩、预制桩及桩身 $\rho_g \geq 0.65\%$ 的灌注桩, 单桩水平承载力主要由水平位移控制, 可按式(5)估算:

$$R_{ha} = 0.75 \frac{\alpha^3 EI}{\nu_x} \chi_{0a} \quad (5)$$

式中: χ_{0a} 为桩顶允许水平位移, 一般取 $\chi_{0a} = 10$ mm, 对于水平位移敏感的建筑取 $\chi_{0a} = 6$ mm; ν_x 为桩顶水平位移系数。

28#右幅承台锚碇桩基的桩身正截面配筋率 $\rho_g = 2.85\% > 0.65\%$, 桩的水平承载力由水平位移控制, 按式(5)计算。由于该承台锚碇桩基为嵌岩桩, 桩基规范表 5.7.2 桩顶水平位移系数 ν_x 取值是基于桩底支承于非岩石类土中或支承基岩面上, 故不可直接从表 5.7.2 取值, 由附录 C.0.3-1 可知, 水平位移 x_0 与桩顶弯矩和水平力有以下关系:

$$x_0 = H_0 \delta_{HH} + M_0 \delta_{HM} \quad (6)$$

式中: δ_{HH} 为单位水平力作用于桩顶时在该处产生的水平位移; δ_{HM} 为单位弯矩作用于桩顶时在该处产生的水平位移。当桩顶弯矩 $M_0 = 0$ 时, 即退化为式(5), 其中式(5)计算水平承载力特征值时考虑了 0.75 倍的折减系数。又由附录 C.0.3-1 注②可知, 当桩底嵌固于基岩中时,

$$\delta_{HM} = \frac{1}{\alpha^3 EI} \times \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (7)$$

综合式(5)至式(7), 可知桩底嵌固于基岩时, $\nu_x = \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2}$, 桩的换算埋深 $\alpha h = 0.335 \times 16 = 5.36 > 4$, 取 $\alpha h = 4$, 查表附录 C.0.3-4, 此时, $\nu_x =$

2.400 74,代入式(5)可得单桩水平承载力特征值

$$R_{ha} = 0.75 \times \frac{0.335^3 \times 3 \times 10^7}{2.400 74} \times 6 \times 10^{-3} = 2 114.1 \text{ kN}$$

锚索索力按永久荷载考虑,按规范的 0.80 倍折减,故调整后的单桩水平承载力特征值取 $R_{ha} = 0.8 \times 2 114.1 = 1 691.3 \text{ kN}$ 。对于多桩基础,需考虑群桩效应,即 $R_h = \eta_h R_{ha}$, η_h 为群桩效应综合系数。距径比 $s_a/d = 5.5/2.2 = 2.5 < 6$,故不需考虑承台底摩阻效应,从而, η_h 的计算式为:

$$\eta_h = \eta_i \eta_r + \eta_l \quad (8)$$

式中: η_i 为桩的相互影响效应系数; η_r 为桩顶约束效应系数,查表 5.7.3-1 取 2.05; η_l 为承台侧向土抗力效应系数,由于承台侧面为新近回填土,土质较为松散,故取 $\eta_l = 0$ 。桩的相互影响效应系数 η_i 可按式计算:

$$\eta_i = \frac{\left(\frac{s_a}{d}\right)^{0.015n_1 + 0.45}}{0.15n_1 + 0.10n_2 + 1.9} \quad (9)$$

式中: n_1 , n_2 分别为沿水平荷载方向与垂直水平荷载方向每排桩中的桩数,均为 2,则桩的相互影响效应系数,代入数据得到 $\eta_i = 0.647$ 。故群桩效应综合系数为

$$\eta_h = \eta_i \eta_r + \eta_l = 0.647 \times 2.05 + 0 = 1.33 \quad (10)$$

从而, $R_h = \eta_h R_{ha} = 1.33 \times 2 114.1 = 2 811.7 \text{ kN}$,大于受力最不利的桩基所受水平力 $H = 470.89 \text{ kN}$,故承载力满足要求。

由于桩基承台锚碇承载结构考虑了锚碇前方岩土体的弹性抗力,对于较陡边坡或存在垮塌风险的边坡,尚需验算其边坡土体的稳定性,确保承台锚碇承载力正常发挥。

4 永临结合桩基承台锚碇施工技术要点

总体施工流程:引桥下部结构施工(预埋索道管)→锚座安装→锚索安装及张拉。

4.1 预埋索道管

在施工组织安排方面,依次进行引桥的桩基、承台、墩柱施工,施工过程中在锚索穿墩柱、承台处要预埋索道管,由于扣挂系统锚索钢绞线为柔性索,在自身的重力作用下会产生一定的垂度,而且垂度大小与锚索索力呈非线性关系,长度越长,垂度效应越明显,索道管预埋时应考虑钢绞线的垂度效应影响^[4]。锚索钢绞线形状实际应为悬链线,但悬链线计算较为复杂,对于垂度 f_m 很小或者索长 $l < 300 \text{ m}$ 的

情况下,可近似地按照抛物线计算^[5],结果精度也能满足绝大多数常规工程的需求,锚索受力简图见 7。

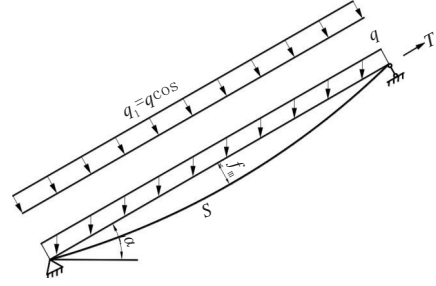


图7 锚索受力简图

假定锚索是只承受轴向拉力,不承受压力,可以确定其任意位置处弯矩为零,可得到:

$$T \times f_m = \frac{1}{8} q l^2 = \frac{1}{8} q l^2 \cos \alpha \quad (11)$$

$$f_m = \frac{q l^2}{8 T} \cos \alpha \quad (12)$$

式中: l 为锚索长度; f_m 为锚索跨中垂度值; T 为锚索索力; α 为锚索两锚固端连线与水平面的夹角; q 为锚索单位均布重量。

以跨中最大垂度处 m 点为坐标原点,锚索两锚固端连线直线方向为 x 轴,垂度方向为 y 轴,建立抛物线坐标系见图 8。

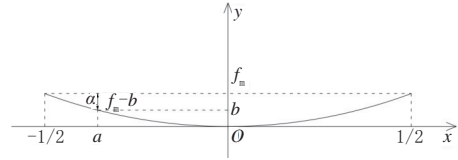


图8 抛物线计算简图

坐标点 $(-l/2, f_m)$ 代入抛物线方程 $y = ax^2$, 求解得到该锚索抛物线方程为:

$$y = \frac{qx^2}{2T} \cos \alpha \quad (13)$$

为方便应用,大桥施工坐标系一般以纵桥向里程增大方向为 x 轴正方向,垂直于 x 轴向右为 y 轴正方向,高程向上为 z 正方向,由于穿墩锚索在同一纵桥向竖直面,故 y 轴坐标可直接采用,仅求解 x 、 z 轴坐标,假设锚索两端锚固点坐标为 (x'_1, z'_1) 、 (x'_2, z'_2) ,则在现场施工坐标系 $x'o'z'$ 中,前述 m 点坐标为 $(\frac{x'_1 + x'_2}{2} + f_m \cdot \sin \alpha, \frac{z'_1 + z'_2}{2} - f_m \cos \alpha)$,根据坐标转换公式有:

$$x = x' \cos \alpha + z' \sin \alpha - \left(\frac{x'_1 + x'_2}{2} + f_m \cdot \sin \alpha \right)$$

$$y = -x' \sin \alpha + z' \cos \alpha - \left(\frac{z'_1 + z'_2}{2} - f_m \cdot \cos \alpha \right)$$

式(13)得到:

$$\begin{aligned}
 & -x' \sin \alpha + z' \cos \alpha - \left(\frac{z'_1 + z'_2}{2} - f_m \cdot \cos \alpha \right) \\
 & = \frac{q}{2T} \cos \alpha \left[x' \cos \alpha + z' \sin \alpha - \left(\frac{x'_1 + x'_2}{2} + f_m \cdot \sin \alpha \right) \right]^2
 \end{aligned}
 \quad (14)$$

若已知锚索两锚固端坐标及锚索的自重和索力,由式(12)、式(14)可求任一锚索穿墩索道管进出口处坐标。穿墩柱索道管预埋时要采取精准定位控制措施,采用高精度全站仪测量放样,偏差控制在3 mm以内。采用角钢焊接支架临时固定预埋索道管时,支架要有足够的刚度,防止混凝土浇筑过程中移位,并注意对称焊接固定预埋索道管,以减少焊接变形的干扰。当预埋钢管与墩柱钢筋发生冲突时,为保证预埋孔道准确,经设计同意可适当的调整钢筋的位置。

4.2 锚座安装

锚碇一侧锚固端锚座由2 cm厚钢板组焊而成,设计锚座时,锚座角度应与锚索弦倾角一致,以确保锚索传力路径顺畅。锚座预埋板随预埋索道管在锚碇浇筑过程中埋置,预埋垫板下应安装3~5层钢筋网片,增强局部抗压能力,防止混凝土开裂。

4.3 锚索安装及张拉

穿索之前,需要将墩柱或承台预埋索道管端口打磨光滑,或者加垫橡胶片,防止其尖锐周口将钢绞线割断。锚索固定端采用P锚形式锚固在承台背面,P锚挤压套挤压后,应将挤压弹簧全部嵌入在挤压套与钢绞线之间,挤压套挤压后外径及长度应满足说明书的要求,外表面应光滑无裂纹。

由于桩基承台锚碇需要依靠桩侧岩土体提供侧向抗力,而岩土体非理想的弹性材料,受力后的实际

变形较为复杂,但计算上基于一定的假设和经验,与实际变形和受力状态有一定差距,因此在锚索分级张拉过程中以及张拉完成后,均应对锚碇受力和变形情况进行持续性监测,确保结构安全。承台锚碇承载力计算时水平位移按6 mm考虑,施工中建议以此为控制值,监测报警值建议取控制值的70%~80%。此外,还需经常性巡视承台锚碇前土体是否出现隆起或开裂现象,以及承台锚碇自身是否出现裂缝,一旦出现以上异常情况,及时进行技术分析并采取可靠的补救、加固措施。

5 结 语

乌江特大桥创新性地利用了引桥桩基承台作为钢管拱扣挂系统的锚索锚碇,实现了永临结合,不仅解决了山区大跨径钢管混凝土施工建设场地受限的技术性难题,而且还节省了大体积圬工材料,大大降低了施工成本,避免了额外征地对原状地面的大量开挖破坏,提高了扣挂锚碇的施工工效,缩短了建设工期,为钢管拱节段悬臂拼装施工中的扣挂锚碇设置提供了新思路。

参考文献:

- [1] 刘超,梁海安,程新俊,等.单桩水平承载特性研究综述[J].重庆建筑,2021,20(2):40-44.
- [2] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
- [3] 梁振宁.承台约束和竖向荷载对桩基水平承载力的影响分析[C]//第十三届全国工程物探与岩土工程测试学术大会论文集.北京:中国建筑学会,2013.
- [4] 刘平,许慧,廖玮.大跨度斜拉索自重下的垂度分析[J].公路交通科技,2016,33(3):60-63.
- [5] 曹梦云.大跨度非对称高铁独塔部分斜拉桥设计及索道管精准定位研究[D].烟台:烟台大学,2023.

《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: roadfloodbridge@163.com

