

陈洪凯, 廖学海, 张金浩. 路基塌陷段组合式桥梁应急修复技术及计算方法[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 133–137, 145.
[CHEN Hongkai, LIAO Xuehai and ZHANG Jinhao. Emergency Repair Technology and Calculation Method for Combined Combat Readiness Bridge during a Subgrade Collapse[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 133–137, 145. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.022.]

路基塌陷段组合式桥梁应急修复技术及计算方法^{*}

陈洪凯^{1,2}, 廖学海^{1,3}, 张金浩²

(1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074; 2. 枣庄学院 城市与建筑工程学院, 山东 枣庄 277160;

3. 重庆市地质矿产勘查开发局 南江水文地质工程地质队, 重庆 401147)

摘要: 在山洪、泥石流和地震等自然灾害作用下引发的路基塌陷是山区公路的典型灾害形式, 其快速修复是应急抢险的重要交通保障。针对路基塌陷段公路的应急交通需求, 研发了组合式战备桥梁新技术, 详细解读了组合式战备桥梁的结构组成; 采用超静定结构力学, 建立了战备桥梁的内力计算方法; 基于极限平衡理论, 建立了组合式战备桥梁上部承载结构内力和承载钢丝绳拉力计算方法。通过实例分析表明, 所建立的组合式战备桥梁计算方法完备, 具有较强的工程实用性。

关键词: 路基工程; 路基塌陷; 组合式战备桥梁; 计算方法; 快速修复

中图分类号: U418.4; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)04-0133-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.022

路基塌陷是我国山区道路的主要灾害之一, 出现频率高, 分布范围广, 灾情严重, 给道路交通安全营运及工程养护带来了很大的困难。尤其是在极端气象和道路建设大规模发展的综合宏观背景下, 自然因素引发的道路病害频发, 造成了巨大的经济损失。如2020年重庆开州遭受暴雨袭击, 仅“6.12”和“7.15”两次暴雨就造成开州区多条国省干线和农村公路发生道路灾害。经相关部门不完全统计, 两次暴雨共引发全区道路灾害914起, 造成经济损失超8 000万元。其中路基水毁塌方178处, 总塌方量约 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。山区公路沿线边坡地质灾害隐患问题日益突出^[1], 给应急抢险工作带来了极大的障碍。

已有的研究主要集中在路基破坏机制和常规防护方面。田伟平^[2]采用室内模型试验探讨了有防护结构和无防护结构对路基的冲刷问题; 詹义正^[3]和李奇^[4]对山洪泥石流对桥梁墩台地基冲刷特性研究, 分别提出了多个冲刷深度计算公式; 冯兴波^[5]利用离散元软件模拟路基边坡冲刷的特点, 得出临界冲刷速度与粒径、坡度等的大致关系, 特别是造成道路灾害的泥石流冲击动力学和地震动力学问题已进行了充分研究; 田树峰^[6]就曾指出泥石流特性及其工程危害分析是道路设计施工的重要依据; GUO S^[7]、KATTEL P^[8]等采用两相流体模型分别计算了泥石流沿河床的稳定流速和固相、液相在泥石流冲击特性中的作用; 陈洪凯等基于固液两相流理论提出了泥石流固液分

相冲击力计算方法^[9]和路基所受到的泥石流冲击力^[10], 并通过室内模型试验揭示了水石流冲击信号的概率分布及能量分布特征^[11]和粘性泥石流的冲击特性^[12]; 向波^[13]等调查了四川地震灾区各级公路路基震害及次生地质灾害类型及特征, 提出了公路路基应急调查和评估方法, 并分别给出了有效快速抢通保通灾损路基段的工程技术措施; 陈洪凯^[14]等针对角部悬空型混凝土路面, 构建相应的力学模型, 通过推导获得了角部悬空型混凝土路面断裂承载力的计算公式; 张聚贤^[15]提出BP神经网络算法考虑激活函数后对强震路基塌陷变形预测方法, 解决非线性路基变形特征数提取问题; 李宾^[16]指出G217线天山公路K962—K1040段路基冲刷水毁病害严重。

防灾减灾长期得到公路管理部门与科技工作者的高度重视, 但从未得到有效解决。例如在路基水毁灾害治理新技术研发方面进展不大, 仍然主要集中在丁坝、挑坝、潜坝等水工调治结构及挡土墙方面^[17-19], 基本满足了山区公路路基灾害的常态化修复需求。针对突发性灾害抢险措施, CHINCHIOLLO^[20]等探讨了路基边坡的应急修复问题, 提出了应急修复的工作思路及临时修复技术。王维嘉^[21]等对公路隧道的灾害类型、灾害等级评价以及灾后的快速抢通保通技术进行了总结和研

^{*} 收稿日期: 2021-03-23 修回日期: 2021-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505405)

第一作者简介: 陈洪凯(1964-), 男, 汉族, 重庆江津人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事动力地貌学、山地灾害演变、安全警报与减灾技术研究。E-mail: chk7777@163.com

抢通保通受灾隧道的技术措施。陈洪凯^[22]等针对路基冲失后公路交通的应急通行需求,研发了组合式战备桥梁,其核心是组合式桥梁,为应急抢险提供了一种新思路。本文重点分析一种组合式战备桥梁的计算问题。

1 组合式战备桥梁结构型式

针对山区沿河公路路基冲失灾害(图1和图2),研发了适用于公路交通应急通行的快速抢修技术—组合式战备桥梁,其主体是由钢架、拉绳系统和路面组成的空间结构(图3),包含立方体形组件(图4)、三角棱柱形组件(图5)、承载钢绳、稳固钢绳、路面和连接螺栓(图6和图7)。钢架和拉绳系统组成该结构的承载系统,路面为该结构的道路通行构件。钢架包括立方体形组件和三角棱柱形组件,组件可由普通钢轨焊接预制,在立方体形钢架的八个角点及三角棱柱形钢架矩形侧面的四个角点处设置连接锁孔,相邻立方体形组件在连接锁孔处采用连接螺杆和连接螺帽机械锁固,在三角棱柱形钢架底面的四个角点处设置承载钢绳锁孔,便于固定承载钢绳,钢绳为普通钢绞线。图3至图7中, f 为组合式战备桥梁高度(m); l 为组合式战备桥梁总长度(m); a 为钢架组件沿道路宽度方向尺寸(m); b 为钢架组件沿道路延伸方向尺寸(m); h 为钢架组件高度(m); c 为连接锁孔宽度(mm); d 为连接螺杆直径(mm); t 为连接螺杆长度(mm); D 为连接螺帽外径(mm)。

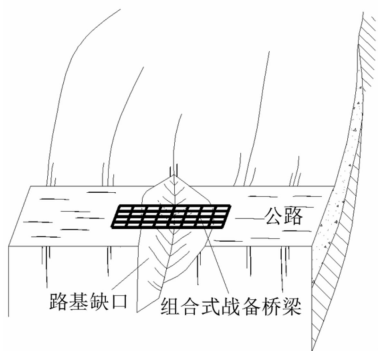


图1 路基破损部位组合式战备桥梁安设位置



图2 G211 开州段 K1303 + 550 处公路路基塌陷

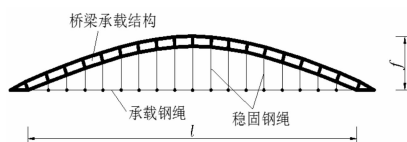


图3 组合式战备桥梁结构图示

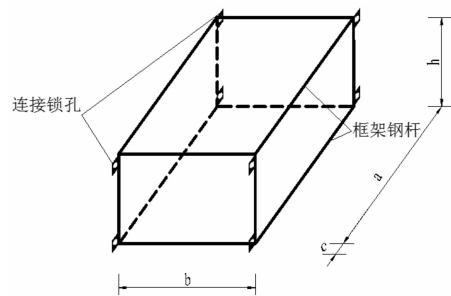


图4 组合式战备桥梁立方体形组件

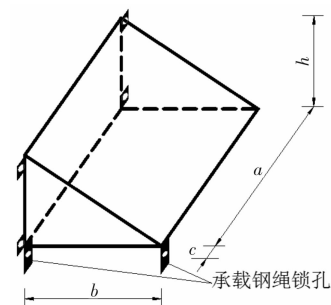


图5 组合式战备桥梁三角棱柱形组件

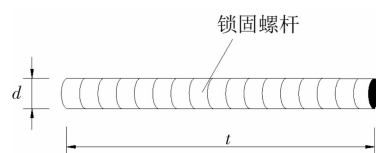


图6 组合式战备桥梁组件连接螺杆

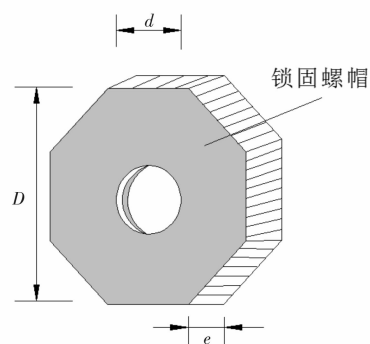


图7 组合式战备桥梁组件连接螺帽

组合式战备桥梁适用于山区公路坍塌形成断道缺口路段,在灾害发生后用运输车辆将应急锚拉框架结构的相应预制构件运至现场,遵循吊装、定位、调整、锁固和固定钢绳等施工工序完成装配,根据路基缺口部位或路基毁损地段的长度估算设置组合式战备桥梁的长度,当长度超过 30 m 后应在缺口或路基毁损地段中部适当位置架设简易支墩。战备桥梁构件均可预制,运至现场直接组装安置,整个装配过程现场作业时间短,可很快实现受灾路段公路交通的应急恢复。

2 组合式战备桥梁结构计算方法

组合式战备桥梁结构的结构计算包括结构强度和结构稳定性等方面, 核心是计算结构内力、螺栓稳定性、钢索稳定性和地基承载力。

2.1 组合式战备桥梁内力计算

组合式战备桥梁为拱形结构, 在竖向荷载作用下, 两端将受到承载钢索的水平约束力, 使上部拱形承载结构内产生轴向压力, 由拱桥的特点可知, 拱内的轴向压力可以大大减小拱圈的截面弯矩, 各钢架结构和连接螺栓受力更合理。

(1) 组合式战备桥梁拱轴线及拱轴线斜率计算。将组合式战备桥梁的结构简化为二铰拱结构(图8), 拱轴线选用对上部承载结构受力影响很大, 并涉及到能否节约材料和方便施工。组合式战备桥梁自重为均布恒载, 拱的压力线为二次抛物线, 采用二次抛物线作为拱轴线。图8中, x 、 y 为以截面重心 A 为原点的拱轴线横、纵坐标轴; f 为拱圈的计算式矢高(m); L 为战备桥梁跨径(m); φ 为拱轴线水平倾角($^\circ$)。

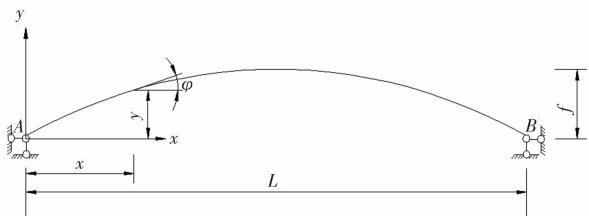


图8 组合式战备桥梁简化模型

则其拱轴线公式为:

$$y = \frac{4f}{L^2}(L-x)x. \quad (1)$$

拱轴线斜率由式(1)对 x 求导得:

$$\tan \varphi = \frac{dy}{dx} = \frac{4f}{L^2}(L-2x). \quad (2)$$

(2) 结构内力计算。当汽车通过组合式战备桥梁时, 桥梁承受的荷载主要有桥梁自重和汽车荷载。组合式战备桥梁为钢架结构自重较小, 暂不考虑。组合式战备桥梁结构为一次超静定结构, 当汽车通过组合式战备桥梁时的力学模型如图9所示, 去掉多余联系, 得到基本结构, 基本体系受到活载 P 和多余未知力 H_p 的共同作用。通过力法方程解出多余未知力, 其余力的计算便与静定结构相同。图9中, H_p 为战备桥梁 A 端受到的水平力(kN); P 为汽车产生的集中荷载(kN)。

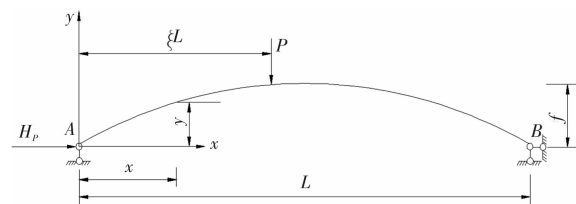


图9 组合式战备桥梁在活载作用下的力法基本结构

组合式战备桥梁的活载内力计算如下, 以图9简支曲梁为基本结构, 基本体系上虽然多余联系被去掉, 其受力和变形情况与原结构一致, 在荷载 P 和多余未知力 H_p 共同作用下, 其位移 Δ_2 应

为零。设多余未知力 $H_p = 1$ 单独作用在基本结构上时 B 点沿 H_p 方向的位移 δ_{22} ; 设在荷载 P 单独作用下 B 点水平方向的位移为 Δ_{2P} 。

由力法方程得:

$$H_p \delta_{22} + \Delta_{2P} = 0. \quad (3)$$

主变位:

$$\delta_{22} = \int_s \frac{M_2^2}{EI} ds + \int_s \frac{N_2^2}{EA_1} ds. \quad (4)$$

式中: $M_2 = -y = -\frac{4f}{L^2}(L-x)x$; $N_2 = 1 \cdot \cos \varphi$ 。因为组合式战备桥梁矢跨比较小, 对于矢跨比较小的坦拱可近似的取 $\cos \varphi = 1$, 因为 $\frac{dx}{ds} = \cos \varphi = 1$, 故 $ds \approx dx$, 则:

$$\begin{aligned} \delta_{22} &= \int_L \left[\frac{4f}{L^2}(L-x)x \right]^2 \frac{dx}{EI} + \int_L \frac{dx}{EA_1} \\ &= \frac{8f^2 L}{15EI} + \frac{L}{EA_1} = (1 + \mu) \frac{8f^2 L}{15EI}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: μ 为弹性压缩系数, $\mu = \frac{15I}{8f^2 A_1}$; I 为拱圈截面弹性惯性矩(m^4); A_1 为拱圈横截面积(m^2); E 为材料的弹性模量(MPa); ds 为轴向的微段弧长(cm)。

由力法解得:

$$\begin{aligned} \Delta_{2P} &= -\frac{1}{EI} \int_0^L \frac{4f}{L^2} (Lx - x^2) P(1 - \xi) x dx - \\ &\quad \frac{1}{EI} \int_{\xi L}^L \frac{4f}{L^2} (Lx - x^2) P\xi(L - x) dx \\ &= -\frac{PfL^2}{3EI} (\xi - 2\xi^3 + \xi^4). \end{aligned} \quad (6)$$

式中略去了对二铰拱影响不大的轴向力项, 将式(5)和式(6)代入式(3)得水平推力为:

$$H_p = \frac{5}{8} P (\xi - 2\xi^3 + \xi^4) K \frac{L}{f}. \quad (7)$$

式中: $K = \frac{1}{1 + \frac{15I}{Af^2}}$ 。

二铰拱水平推力影响线坐标值见表1。

表1 二铰拱水平推力影响线坐标值表

$x = \xi L$	0	0.05L	0.10L	0.15L	0.20L	0.25L
H_p	0	0.031	0.061	0.089	0.116	0.141
$x = \xi L$	0.30L	0.35L	0.40L	0.45L	0.50L	乘数
H_p	0.159	0.175	0.186	0.192	0.195	PKL/f

当 $x < \xi L$ 时, 结构任意截面以左恒载和竖直反力产生的梁式弯矩 M_{0P} 为:

$$M_{0P} = P(1 - \xi)x. \quad (8)$$

结构任意截面以左恒载和竖直反力产生的梁式剪力 Q_{0P} 为:

$$Q_{0P} = P(1 - \xi). \quad (9)$$

当 $x > \xi L$ 时

$$M_{0P} = P\xi(L - x); \quad (10)$$

$$Q_{0P} = P\xi. \quad (11)$$

活载作用下得知水平推力 H_p , 拱圈任意截面弯矩 M_p 由 $\sum M = 0$ 求出; 轴向力 N_p 及径向剪力 Q_p 则由水平推力 H_p 与竖直剪力 Q_{0P} 分别向轴向和径向投影(图10)叠加得出。

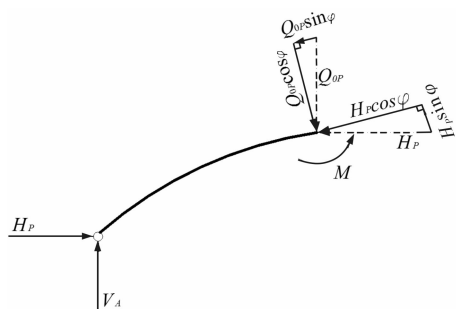


图10 抛物线二铰拱活载内力图

$$M_p = P(1-\xi)x - \frac{5P(\xi - 2\xi^3 + \xi^4)L}{8f\left(1 + \frac{15I}{A_1f^2}\right)}y; \quad (12)$$

$$N_p = \frac{5P(\xi - 2\xi^3 + \xi^4)L}{8f\left(1 + \frac{15I}{A_1f^2}\right)}\cos\varphi + P(1-\xi)\sin\varphi; \quad (13)$$

$$Q_p = \frac{5P(\xi - 2\xi^3 + \xi^4)L}{8f\left(1 + \frac{15I}{A_1f^2}\right)}\sin\varphi + P(1-\xi)\cos\varphi. \quad (14)$$

式中： M_p 为在均布恒载 P 作用下拱圈任意截面弯矩(kN·m)； N_p 为在均布恒载 P 作用下拱圈任意截面轴向力(kN)； Q_p 为在均布恒载 P 作用下拱圈任意截面径向剪力(kN)。

(3)最不利荷载作用下组合式战备桥梁结构内力计算。当车辆荷载作用于不同位置，结构受力则会发生改变，选择不同的工况进行计算，对比得出汽车荷载的最不利工况。经分析得，汽车行驶在组合式战备桥梁结构上，假定前后车轮对组合式战备桥梁所产生的压力 P 相等，当汽车前后轮分别作用在组合式战备桥梁距 A 端 $L/4$ 的拱腰和 $L/2$ 的拱顶处时，组合式战备桥梁结构内力最大即最容易失稳破坏，故此情况为最不利工况。分别计算出单一活载 P 作用在结构上时的弯矩，再进行叠加，可得出组合式战备桥梁在最不利工况下结构的弯矩和剪力。

将 $\xi = L/4$ 和 $\xi = L/2$ 分别代入式(7)、式(12)、式(13)和式(14)再叠加，得组合式战备桥梁在最不利工况下结构内的弯矩、轴力和剪力表达式分别为：

$$H_{2p} = \frac{2.675 \cdot 5LP}{8f\left(1 + \frac{15I}{A_1f^2}\right)}; \quad (15)$$

$$M_{2p} = \frac{5}{4}Px - \frac{2.675 \cdot 5LP}{8f\left(1 + \frac{15I}{A_1f^2}\right)}y; \quad (16)$$

$$N_{2p} = \frac{2.675 \cdot 5LP}{8f\left(1 + \frac{15I}{A_1f^2}\right)}\cos\varphi + \frac{5}{4}P\sin\varphi; \quad (17)$$

$$Q_{2p} = \frac{2.675 \cdot 5LP}{8f\left(1 + \frac{15I}{A_1f^2}\right)}\sin\varphi - \frac{5}{4}P\cos\varphi. \quad (18)$$

2.2 螺栓稳定性计算

组合式战备桥梁是由普通钢轨焊接而成的钢架，而相邻立方体形组件在连接锁孔处采用螺栓连接成为整体，螺栓连接将部件组合成承重结构，内力的传递过程中，连接及其接头部位是其中一个受力环节，若连接和接头处的承载力小于

构件的承载力，则构件的承载力就不能充分的发挥。

受剪螺栓依靠螺栓的承压和抗剪来传递垂直于螺栓的外力，在外力不大的时候，由被连接的钢架构件之间的摩擦力来传递外力，当外力继续增大超过静摩擦力后，钢架之间将出现相对滑移，螺栓开始接触孔壁而受剪，孔壁则受压(图11)。当连接处于弹性阶段时，螺栓群中的各螺栓受力不相等，中间钢架构件之间的螺栓受力大(图12)。因为被连接的构件在各区段中所传递的荷载不同，各螺栓的变形不同，因此导致各螺栓所承担的剪力也不同。但是当外力继续增大后，使连接的受力达到塑性阶段时，各螺栓承担的荷载逐渐接近，最后趋于相等直到破坏。因此，当外力作用于螺栓群中心时候，也就是战备桥梁的钢架结构的中心受到竖向外荷载的时候，在计算中认为所有的螺栓受力是相同的。

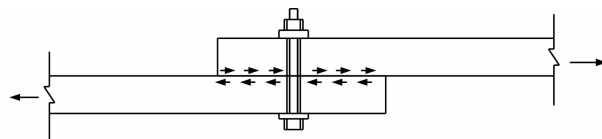


图11 螺栓连接靠摩擦力传力

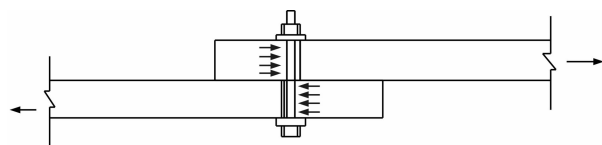


图12 螺栓连接孔壁受压与螺杆受剪

假定螺栓受剪面上的剪应力均匀分布，则一个螺栓的抗剪容许承载力为

$$[N_v^b] = n_v \frac{\pi d^2}{4} [\sigma_v^b]. \quad (19)$$

式中： d 为螺栓杆直径(m)； n_v 为每只螺栓受剪面数量，单剪 $n_v = 1$ ，双剪 $n_v = 2$ ； $[N_v^b]$ 为螺栓抗剪容许承载力(kN)。

在应急桥梁的钢架之间连接为单剪，故取 $n_v = 1$ 。而一个钢架的结构面上有四个螺栓连接，则单个截面上的抗剪容许承载力为 $4[N_v^b]$ 。

式(19)中的 $[\sigma_v^b]$ 为普通螺栓抗剪容许应力值，按照表2采用。

类别	螺栓容许应力值		
	应力种类		
	剪应力/MPa	承压应力/MPa	拉应力/MPa
粗制螺栓	80	170	110
工厂柳钉	110	280	90
工地柳钉	100	250	80

将组合式战备桥梁上部承载钢架结构中剪力 T 和所用四根螺栓的抗剪容许承载力进行比较，如结构中剪力小于螺栓的抗剪容许承载力，即满足式(20)则结构稳定。

$$T < 4[N_v^b] = n_v \pi d^2 [\sigma_v^b]. \quad (20)$$

其中：

$$T = Q_{2p} = \frac{2.675 \cdot 5PL}{8f\left(1 + \frac{15I}{A_1f^2}\right)}\sin\varphi - \frac{5}{4}P\cos\varphi. \quad (21)$$

2.3 承载钢索稳定性计算

组合式战备桥梁下部受到承载钢索的水平拉力, 钢拉索为预先设置的钢绞线, 长度根据现场测定。比较拉索所受的拉力和拉索的容许拉力, 若拉索的容许拉力大于拉索所受到的拉力 F , 即满足式(22)则结构稳定。

$$F = H_{2P} = \frac{2.675 \cdot 5LP}{8f \left(1 + \frac{15I}{A_s f^2}\right)} \leq n f_{pd} A_s \quad (22)$$

式中: n 为钢绞线根数(根); f_{pd} 为钢绞线应力强度(MPa); A_s 为每根钢绞线公称截面积(mm^2)。

2.4 组合式战备桥梁结构所需地基承载力计算

组合式战备桥梁置于缺口两端未破坏地基上, 战备桥梁结构整体可视为刚体, 两端简支, 如图13所示, 战备桥梁两端的基底压力应在地基承载能力之内, 防止由于地基承载力不足而影响战备桥梁的正常使用, 桥梁端部地基承载力应不低于500 kPa。如现场地基地质条件较差, 需对支承部位地基进行简易处理, 如铺设钢板或对原始地基进行换填处理。

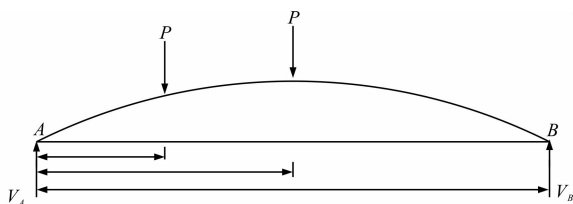


图13 组合式战备桥梁地基反力图

由简支梁结构支座反力计算, 对A点取矩得:

$$V_B - P \cdot \frac{L}{4} - P \cdot \frac{L}{2} = 0; \quad (23)$$

$$V_B + V_A = P + P. \quad (24)$$

由式(23)和式(24)计算得战备桥梁两端所受的反力 V_A 、 V_B 分别为:

$$V_A = \frac{5}{4}P; \quad V_B = \frac{3}{4}P. \quad (25)$$

由式(24)计算桥梁端部的基底压力为:

$$p_A = \frac{V_A}{ab} = \frac{5P}{4ab}; \quad p_B = \frac{V_B}{ab} = \frac{3P}{4ab}. \quad (26)$$

式中: V_A 为战备桥梁A端所受地基反力(kN); V_B 为战备桥梁B端所受地基反力(kN); P 为战备桥梁上部所受集中荷载(kN); a 为钢架组件沿道路宽度方向尺寸(m); b 为钢架组件沿道路延伸方向尺寸(m); p_A 为战备桥梁A端部对基底的压力(kN); p_B 为战备桥梁B端部对基底的压力(kN)。

3 算例分析

G211 开州段在暴雨中发生多处公路水毁情况, K1303+550处约20 m路基垮塌, 交通中断, 形成长约20 m, 高近10 m的缺口路段, 该处因山洪冲刷及软化路基导致路基发生坍塌(见图2)。采用组合式战备桥梁结构进行该受灾路段公路交通应急修复。组合式战备桥梁结构尺寸为, 钢架组件沿道路延伸方向尺寸 $b=2$ m; 钢架组件高度 $h=1$ m; 钢架组件沿道路宽度方向尺寸 $a=4$ m; 连接螺栓选用工厂柳钉, 长度 $t=0.3$ m; 连接螺杆直径 $d=30$ mm; 连接螺帽外径 $D=80$ mm; 组合式战备桥梁长度 $L=20$ m。参照文献[23], 矢跨比取 $1/5 \sim$

$1/8$ 范围内合适, 结合现场情况, 组合式战备桥梁的矢高越小越利于车辆通行, 则矢跨比取其最小值 $1/8$, 则组合式战备桥梁矢高 $f=2.5$ m。承载钢绳为7束直径15.2 mm的钢绞线构成, 稳固钢绳为直径5 mm的普通钢绞线。框架结构上部受力拟定为汽车荷载为200 kN, 则 $P=100$ kN。

在最不利荷载组合情况下, 将结构中上部结构所受剪力与四根连接螺栓的抗剪容许承载力进行比较, 查表2得 $[\sigma_v^b]=110$ MPa, 代入式(20)得, $n_v \pi d^2 [\sigma_v^b]=310.86$ kN; 组合式战备桥梁结构剪力为: $T=Q_{2P}=222.96 \sin \varphi - 125 \cos \varphi$, φ 为拱轴线水平倾角, 取值 $0 \sim 90^\circ$ 范围内, $\sin \varphi < 1$, $T=222.96 \sin \varphi - 125 \cos \varphi < 222.96$ kN < 310.86 kN, 螺栓连接结构稳定。

锚固钢绳选用直径为7束15.2 mm的钢绞线, 截面面积 $A_s=165$ mm^2 , $f_{pd}=1\ 260$ MPa 代入式(22)得:

$$n f_{pd} A_s = 7 \times 1\ 260 \times 165 = 1\ 455.3 \times 10^3 \text{ N} = 1\ 455.3 \text{ kN}. \quad (27)$$

组合式战备桥梁的承载钢绳承受水平拉力为: $F=H_{2P}=222.96$ kN $< 1\ 455.3$ kN, 则承载钢绳稳定。

通过上述对结构尺寸和荷载的拟定, 将尺寸数据代入式(26)得出则桥梁端部的基底压力 p_A 为:

$$p_A = \frac{5P}{4ab} = 15.625 \text{ kPa} < 500 \text{ kPa}. \quad (28)$$

p_B 为:

$$p_B = \frac{3P}{4ab} = 9.375 \text{ kPa} < 500 \text{ kPa}. \quad (29)$$

两端压力均小于地基容许承载力, 地基稳定。

4 结论

(1) 针对山区公路路基塌陷灾害路段的应急通行问题, 研发了组合式战备桥梁快速抢修新技术, 其主体由钢架、拉绳系统和路面板组成的空间结构, 包含立方体形组件、三角棱柱形组件、承载钢绳、稳固钢绳、路面板和连接螺栓六部分。

(2) 分析了组合式战备桥梁的工程计算问题, 应用超静定结构力学方法, 建立了战备桥梁内力计算方法, 基于极限平衡理论, 建立了组合式战备桥梁上部承载结构内力和承载钢绳拉力计算方法。

(3) 以重庆开州区G211线K1303+550段路基病害为例, 分析了组合式战备桥梁的应用流程。工程实例分析表明, 所建立的组合式战备桥梁结构计算方法完备, 实用性较强。可为路基塌陷段灾害应急抢险工作提供参考。

在接下来的研究中, 应加强组合式战备桥梁受荷性能的试验研究, 并构建该技术的施工方法。

参考文献:

- [1] 吴维义. 山区在役公路边坡地质灾害隐患防控技术探讨[J]. 公路, 2020, 65(8): 43-47.
- [2] 田伟平, 李惠萍. 沿河路基的护坦冲刷防护试验研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(4): 11-13.
- [3] 詹义正, 王军, 谈广鸣, 等. 桥墩局部冲刷的试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(5): 1-4, 9.
- [4] 李奇, 王义刚, 谢锐才. 桥墩局部冲刷公式研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 85-88.

(下转第145页)

sists of 12 standards is presented, including the theme, content and scope of each standard, from two dimensions of establishment and management respectively; For series interface of emergency preplanning system, on the basis of combing relevant laws and regulations requirements, discussions are addressed in three categories, standards of crisis-specific preplans, standards of emergency preplans of the grass-roots level organizations, and standards of major event preplans. Contingency preplanning is a combination of technology, industries and management. Standardized method, as a means of modern management, will improve the efficiency and scientific nature of the establishment and management of emergency preplanning system, in a way that summing up experience of emergency management and rescue efforts to standard forms and procedures scientifically and systematically.

Key words: emergency preplanning system; standardization; essential elements; general requirements; series interface

(上接第 137 页)

- [5] 冯兴波, 宋丹青, 徐永福. 路基边坡冲刷特性的颗粒流模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(2): 558-564.
- [6] 田树峰, 陈宁生, 高云建, 等. 九绵高速平武段泥石流运动参数特征与工程危害[J]. 人民长江, 2018, 49(11): 64-70.
- [7] GUO S, XU P, ZHENG Z, et al. Estimation of flow velocity for a debris flow via the two-phase fluid model[J]. Nonlinear Processes in Geophysics Discussions, 2015, 1(1): 109-116.
- [8] PARAMESHWARI K, JEEVAN K, JAN-THOMAS F, et al. Interaction of two-phase debris flow with obstacles[J]. Engineering Geology, 2018, 242: 197-217.
- [9] 陈洪凯, 唐红梅. 泥石流两相冲击力及冲击时间计算方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 19-23.
- [10] 徐士彬, 钱德玲, 姚兰飞, 等. 基于结构两相流模型计算泥石流对路基的冲击力[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 373-377.
- [11] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅, 等. 水石流冲击信号能量分布试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14): 56-59.
- [12] 何晓英, 唐红梅, 陈洪凯. 浆体黏度和级配颗粒组合条件下泥石流冲击特性模型试验[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 977-982.
- [13] 向波, 何云勇, 蒋劲松, 等. 公路路基灾后抢通及保通技术研究[J]. 公路, 2020, 65(3): 174-183.
- [14] 陈洪凯, 王圣娟, 周福川. 沿河公路角部悬空型混凝土路面板断裂承载力计算方法[J]. 应用力学学报, 2018, 35(5): 1045-1049.
- [15] 张聚贤, 刘伟. BP 神经网络算法考虑激活函数后对强震路基塌陷变形预测研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(2): 406-411, 475.
- [16] 李宾. 国道 217 线天山公路冲刷模型试验及应用[J]. 公路工程, 2015, 40(1): 96-101.
- [17] 乔国文. 国道 217 线天山公路沿河路基水毁防护优化工程——以 K970+564~K970+839 段为例[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 747-752.
- [18] 林小平, 凌建明, 赵鸿铎, 等. 丁坝群和挡土墙配合防护沿河公路路基的机理分析[J]. 中南公路工程, 2007, 32(2): 45-48.
- [19] 罗文功, 魏学利, 陈宝成. 中巴公路盖孜河段水毁类型与防治工程优化设计[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 877-886.
- [20] JAMES, CHINCHIOLLO, COLBY, et al. Emergency Roadside Repair and Slope Stabilization[J]. Land & Water, 2012, 56(2): 36-41.
- [21] 王维嘉, 向波, 钟勇, 等. 公路隧道灾后抢通及保通技术研究[J]. 公路, 2019, (3): 194-202.
- [22] 陈洪凯, 何晓英, 唐红梅. 组合式应急桥梁及其架设方法[P]. 国家知识产权局, 专利号 ZL2010105 90254. 5.
- [23] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2015)[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

Emergency Repair Technology and Calculation Method for Combined Combat Readiness Bridge during a Subgrade Collapse

CHEN Hongkai^{1,2}, LIAO Xuehai^{1,3} and ZHANG Jinhao²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400071, China;

2. School of city and architecture engineering of Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China;

3. Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade of Chongqing Institute of Geology & Mineral Resources Survey, Chongqing 401147, China)

Abstract: Subgrade collapse arising from natural disasters such as mountain torrents, debris flow and earthquake, is a typical disaster form in mountain roads. Its quick repair relies on a solid protocol for emergency rescue. The combined combat readiness bridge is developed to meet the emergency traffic flow demands during a road subgrade collapse and this paper fully explicates its structural composition. With the adoption of statically indeterminate structural mechanics, the calculation methods for the internal forces of combat readiness bridge are established. Also based on the ultimate balance theory, the calculation methods for both the internal force of the upper load-bearing structure in the combined combat readiness bridge and the pulling forces in the carrying ropes are formulated. Analysis of engineering examples presented demonstrates the high precision and practicability of this calculation method for combined combat readiness bridge in the event of a segmented subgrade washout.

Key words: subgrade engineering; subgrade collapse; combined combat readiness bridge; calculation method; quick fix