

# 道路交通基础设施韧性研究现状及展望

黄晓明, 赵润民

(东南大学 交通学院, 南京 211189)

**摘要:**自韧性概念被引入交通运输领域以来,韧性交通已经受到交通领域研究者的广泛关注。具有良好韧性的道路交通基础设施结构,能够有效应对自然、人为等各种灾害,进一步满足交通强国建设的高效交通和安全交通需求。为了明确国内外道路交通基础设施韧性的研究现状,本文从道路交通基础设施韧性的定义、度量方式、韧性提升技术等方面出发,综述了道路交通基础设施韧性研究成果,论述了未来道路交通基础设施韧性研究,尤其是韧性提升技术的发展方向和研究重点。分析表明,针对道路交通基础设施韧性的研究,主要集中在路网整体的交通网络组织规划层面,对于基础设施结构本体的韧性研究相对较为分散,缺乏统一全面的定义和度量标准。此外,在针对结构韧性的灾变破坏机理研究中,缺乏对全要素、结构系统间耦合等更为全面的研究认识,难以揭示灾变衍化的链式过程和突变特性。因此,对未来道路交通基础设施韧性的研究,应进一步揭示不同类型设施结构的灾变分析理论和方法,针对道路交通基础设施结构韧性建立全面统一的定义和度量标准,同时从预警监测、结构安全和韧性提升、柔性运行和灾后恢复等角度出发,形成并推广道路交通基础设施韧性提升的相关技术。

**关键词:**道路工程;韧性交通;道路交通基础设施;韧性提升技术;柔性运行;灾后恢复

**中图分类号:**U411 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2023)06-1529-21

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221350

## Status and prospects of highway transportation infrastructure resilience research

HUANG Xiao-ming, ZHAO Run-min

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Since the concept of resilience was introduced into the field of transportation, resilient transportation has received extensive attention from researchers in the transportation field. Road transportation infrastructures with good resilience can effectively deal with various natural and man-made disasters, and further meet the needs of efficient and safe transportation in the future. In order to clarify the current research status of road transportation infrastructure resilience around the world, the research results of road transportation infrastructure resilience were summarized from the definition, measurement methods, and resilience improvement technologies of road transportation infrastructure, and the future road transportation infrastructure resilience research was discussed especially the development direction and

收稿日期:2022-10-22.

基金项目:国家自然科学基金项目(52278444);国家重点研发计划项目(2021YFB2600600,2021YFB2600601).

作者简介:黄晓明(1963-),男,教授,博士.研究方向:道路工程.E-mail:huangxm@seu.edu.cn

research focuses of resilience improvement technology. The analysis shows that the research on the resilience of road transportation infrastructure mainly focuses on the overall traffic network organization and planning level of the road network. The research on the resilience of the infrastructure structure is relatively scattered, and there is a lack of unified and comprehensive definitions and metrics. In addition, in the research on the catastrophic failure mechanism of structural resilience, there is a lack of a comprehensive research understanding of all elements and the coupling between structural systems, and it is difficult to reveal the chain process and catastrophe characteristics of catastrophic evolution. Therefore, the research on the resilience of future road transportation infrastructure should further reveal the theories and methods of catastrophe analysis of different types of facility structures, and establish a comprehensive and unified definition and measurement standard for the structural resilience of road transportation infrastructures. At the same time, from the perspectives of disaster monitoring, structural safety and resilience improvement, flexible operation and post-disaster recovery, etc., more effective technologies for improving the resilience of road transportation infrastructure should be formed and furtherly promoted in the future.

**Key words:** highway engineering; resilient transportation; road transportation infrastructures; resilience improvement technology; flexible operation; post-disaster recovery

## 0 引言

交通运输系统是人类社会正常运行过程中高度依赖的关键基础设施系统之一,其在经济发展、民生改善、文化交流等方面均占有不可替代的位置。随着人类社会科技水平和工程技术的进步,交通运输系统正向着高效化、快速化、便捷化等方面发展;同时,现代交通运输系统也逐渐体现出复杂化、受损后恢复代价高等特性<sup>[1]</sup>。在大型自然灾害方面,2008年汶川特大地震灾害中,仅四川省交通基础设施受损带来的直接经济损失就高达580亿元<sup>[2]</sup>,而2012年的飓风桑迪仅对纽约一市的交通运输系统就造成了高达75亿美元的损失<sup>[3]</sup>。在交通拥堵等日常高频发生的交通效率受阻等事件方面,仅2011年,美国交通拥堵造成的经济总损失就高达1210亿美元<sup>[4]</sup>,此外交通拥堵还会带来公民健康、生态环境等其他诸多方面的间接损失。上述结果均表明,目前国内外交通运输基础设施系统普遍存在抗外界干扰能力较差、受损后恢复难度、成本较高等共性问题。因此,交通基础设施系统稳定性、抗干扰能力等特性近年来越来越受到交通领域相关研究人员的重视。

1973年,加拿大学者Holling<sup>[5]</sup>将韧性的概念引入对生态系统的评价中,用于描述生态系统吸收适应环境改变的能力。这是韧性的概念首次被引入对系统的评价当中。在此之后,韧性的概念被广泛运用于工程、心理学、社会学、经济学等诸多领域。2006年,Murray-Tuite<sup>[6]</sup>首次在交通运

输系统领域中明确引入了韧性的概念,并具体定义了交通系统韧性的衡量维度及相应指标。不同于传统的鲁棒性、可靠性等概念,交通系统韧性概念侧重于在日常高频外界小扰动中吸收干扰维持功能的能力,以及在例如严重地震、洪涝、大型海啸等严重偶发性破坏干扰中性能降低程度及其相应恢复的能力。其强调抗干扰、吸收扰动、快速恢复等能力。随着我国交通运输行业需求水平的日益提升以及工程技术的日臻进步,交通运输系统中的韧性概念在我国也日益受到重视。

针对交通网络系统韧性的研究,主要集中在交通运输系统韧性的定义、韧性的度量、韧性的增强措施等方面。而作为交通网络系统中重要的组成部分,包含公路、桥梁、隧道等设施在内的道路交通基础设施的韧性研究和提升,对交通网络整体韧性提升具有重要意义。本文旨在总结目前国内外关于交通韧性,尤其是道路交通基础设施韧性方面的主要研究成果,提出了现有研究成果及理论中所存在的问题,阐述了目前道路交通基础设施韧性研究的热点领域,并提出了未来的研究重点以及发展方向。

## 1 交通系统韧性的定义

“韧性”一词起源于拉丁语中的“resiliere”,其本意为“反弹”或“弹回”<sup>[7]</sup>。自从韧性概念被引入交通运输领域以来,众多相关学者对其进行过解读和解释。包含针对陆路交通网络、城市交通网

络、货运交通网络、海上交通系统、港口系统、以及客运交通网络等具体细分交通领域的韧性概念解读<sup>[8]</sup>。

### 1.1 交通网络系统韧性定义

2006年 Murray-Tuite<sup>[6]</sup>首次将韧性概念引入交通网络中时,将交通系统韧性定义为交通系统在非正常状况下的剩余性能、功能恢复速度以及恢复至正常功能所需的外界辅助量的综合特性。在此之后,众多学者也针对交通韧性概念进行了相应的阐述。如 Serulle等<sup>[9]</sup>在对圣多明哥交通系统进行研究时,将交通网络韧性描述为交通系统保持其既定的服务能力,或在系统受到破坏后其在规定时间内恢复至既定服务功能的能力。Cox等<sup>[10]</sup>对客运系统的研究中,将系统韧性描述为系统维持服务能力及其从外界扰动中快速“回弹”至初始服务水平的能力。而 Omer等<sup>[11]</sup>在对海运系统进行研究时,则将其系统韧性描述为系统吸收外界冲击的能力,以及系统从外界冲击中恢复至原本或接近原本的运输功能的能力。Bhavathathan等<sup>[12]</sup>针对公路网进行研究时,则将其系统韧性定义为系统能在保证原态稳定前提下所能接受的最大外界冲击扰动量。国内的交通系统韧性研究起步较晚,但目前为止也有众多研究者在对包含航空运输、陆路交通以及综合交通运输系统等诸多运输系统对象的研究中对交通系统韧性进行了解释和描述,如表1所示。

表1 国内文献中对于交通系统韧性的定义

Table 1 Definitions of transportation resilience in domestic researches

文献来源	定义
杨超等 <sup>[13]</sup>	预测环境变化、在突发事件中维持稳定运行或实现快速恢复的能力,即稳健性和冗余性。
王兴隆等 <sup>[14]</sup>	交通网络由于外界扰动部分节点失效后节点恢复正常,网络恢复运行的能力。
吕彪等 <sup>[15]</sup>	扰动事件下系统吸收干扰并从干扰中恢复的能力。
马宝奎等 <sup>[16]</sup>	交通运输系统恢复到初始状态或水平的能力。

### 1.2 道路交通基础设施韧性定义

相较于1.1节中交通网络韧性定义中关注网络系统整体的功能完整性,道路交通基础设施韧性更侧重于包含公路、桥梁、隧道等设施在内的道路设施结构本身的功能完整性。如 Lounis等<sup>[17]</sup>的表述:基础设施韧性指物理系统抵御风险(如降低结构能力的腐蚀和疲劳等)、最大限度减少功能

损失以及减少恢复时间和恢复成本的能力。而 Zimmerman等<sup>[18]</sup>在对极端天气条件下的基础设施研究中,也进行过针对陆路交通基础设施韧性的描述,其描述同样可归纳为例如公路和铁路这种交通基础设施的关键脆弱点承受不利因素扰动的能力以及其从受损中恢复的能力。此外值得关注的是,其在描述恢复能力时,还强调了道路交通设施对其他相关设施的依赖性的影响。

从诸多定义的对比研究中,可总结归纳出其相同点。无论是针对交通网络系统整体的韧性定义,还是针对道路交通基础设施的韧性定义,几乎所有定义描述中都涉及到以下一个或两个部分:①交通运输系统抵抗或者吸收外界扰动的能力;②从受损的服务功能中恢复的能力。故对于道路交通基础设施韧性,可由图1直观表示。

图1中阴影部分面积代表由外界扰动造成的道路交通基础设施功能损失总量,其分为I、II两个部分。I部分阴影面积表示在 $t_0 \sim t_1$ 的外界扰动时间段内造成的系统功能下降损失。其面积越小,则代表着系统抵抗或者吸收外界扰动的能力越强;II部分阴影面积表示在扰动结束后至系统服务能力恢复至原水平的期间内功能损失,同时 $t_1 \sim t_2$ 代表了系统在扰动后恢复正常所需时间,其时间长短和II部分阴影面积大小共同代表了系统受损后的恢复能力。其面积越小, $t_1 \sim t_2$ 之间的时间越短,即表示系统受损后的恢复能力越强,系统恢复所需时间越短。可以认为,图1中阴影部分面积越小,则说明道路交通基础设施韧性越强,抗外界致灾事件等扰动的能力越强。由于图1中的阴影部分由“性能下降”以及“性能恢复”两个部分组成,其整体形状近似于三角形,如图1中的虚线三角形框所示,故一般称其为“韧性三角形”(Resilience triangle)<sup>[19]</sup>。同时也需指出,韧性三角形在描述韧性时也存在一些缺陷。例如其无法体现灾后恢复过程中所需的外界辅助量的大小,无法体现系统使用者的安全性,亦无法体现韧性恢复过程中的经济成本、生态环境成本等。故图1中的韧性三角形实际上无法实现对道路交通基础设施韧性的完整、全面描述。

总结韧性的定义可以发现,无论是对于交通网络整体的韧性定义,还是对于道路交通基础设施等具体某一或某几个对象的韧性定义,定义韧性概念时,均是将其主体对象视为一个系统,从系

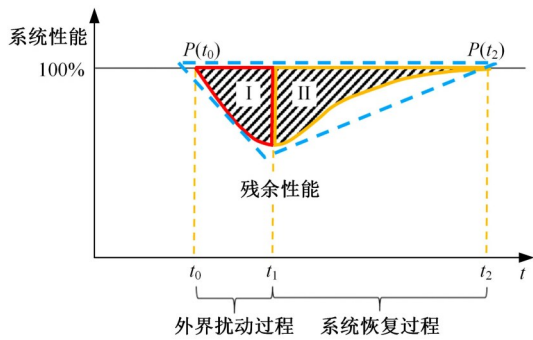


图 1 道路交通基础设施韧性

Fig. 1 Resilience of road transportation infrastructure

统本身的功能性和服务能力出发进行韧性的描述。这就意味着考虑道路交通基础设施韧性时,需要充分关注其显著的网络化协同运行特点,全面考虑其基础设施的网线、节点的空间等系统性的分布特征以及道路系统构成要素间的相互依赖关系及其依赖程度。此外,需要以系统思维的角度全面考虑道路交通基础设施所面临的多样化地域特征、复杂性气候环境、多变性致灾因素,充分认识多因素间的复杂动态耦合作用,充分考虑复杂致灾因子作用下的灾变演化行为的多维度特征,注重灾变演化的链式过程及其突变特性。同时必须从社会、经济层面综合考虑自然条件和人为条件引起的各种致灾因子,从政府和组织多方面入手提升交通基础设施的韧性。

## 2 道路交通基础设施韧性的度量

对道路交通基础设施韧性的具体量化衡量,是实现韧性交通、评估道路交通基础设施建设质量的重要基础。目前,国内外针对交通基础设施韧性评估方面已经有了较多研究成果,在韧性评价指标体系、量化计算方法等方面都有了较多研究进展<sup>[20]</sup>。在交通基础设施韧性评价过程中,通常分为两个步骤:①确定科学的衡量指标;②确定科学合理的计算方法对韧性的衡量指标进行量化计算<sup>[21]</sup>。因此,确定科学合理的韧性衡量指标是道路交通基础设施韧性度量的基础。通常在道路交通基础设施韧性的描述和度量中,可分为对其路网整体通行能力等宏观层面的韧性度量,及其基础设施结构本体的适应性、修复性等微观层面的韧性度量两个维度。

### 2.1 针对道路交通基础设施路网整体的韧性度量

在对道路交通基础设施路网整体宏观层面的

韧性度量时,通常有从拓扑概念出发或从性能角度出发两种技术路线。

#### 2.1.1 基于拓扑的韧性度量

评价道路交通基础设施韧性尤其是路网系统的整体韧性时,许多学者尝试过建立以拓扑概念为基础的拓扑度量评价指标,从而进一步进行系统整体的功能韧性评价,并取得了诸多研究成果。如 Chopra 等<sup>[22]</sup>在对伦敦地铁网络系统进行研究时,提出将地铁系统进行拓扑处理,从而将其抽象化为图 2 所示的空间拓扑网格。其将地铁车站表示为图中的节点,将连接车站之间的线路表示为图中节点之间相连的边,在此基础上创建一个“ $n \times n$ ”阶的邻接矩阵,其中  $n$  即地铁系统中车站的数量。在邻接矩阵中,若第  $i$  节点与第  $j$  节点相连接,则其第  $(i, j)$  项为 1, 否则为 0。

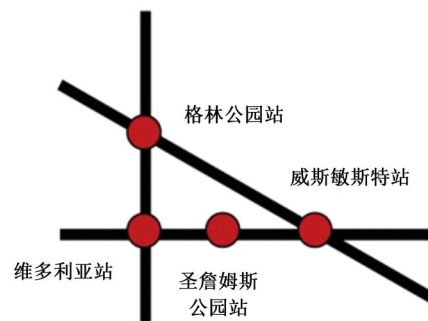


图 2 交通拓扑网格

Fig. 2 Traffic topology network

在上述拓扑分析中,通过节点的度相关性  $a$  计算分析拓扑网格节点连接特性,如下所示:

$$a = \frac{l^{-1} \sum_{(i,j) \in L} k_i k_j - \left[ l^{-1} \sum_{(i,j) \in L} 1/2 (k_i + k_j) \right]^2}{l^{-1} \sum_{(i,j) \in L} 1/2 (k_i^2 + k_j^2) - \left[ l^{-1} \sum_{(i,j) \in L} 1/2 (k_i + k_j) \right]^2} \quad (1)$$

式中:  $(i, j)$  为节点  $i$  和  $j$  之间的一条边;  $L$  为所有边的集合;  $l$  为网络中边的总数量;  $k$  为某一节点的度。

度相关性  $a$  的取值为  $-1 \sim 1$ , 其取值为正时,说明网格系统为度正相关,意味着度大的节点倾向于连接度大的节点;反之,其取值为负时,说明网格系统为度负相关,意味着度大的节点倾向于链接度小的节点。通过对度相关性的计算,可以有效分析拓扑网格中的节点连接特性。此外, Chopra 等<sup>[22]</sup>还定义了冗余度  $r$  指标,以及断裂系

数  $f_c$  用以衡量网格系统的韧性,分别如下所示:

$$r = p_{G_{lg}}/p_G \quad (2)$$

$$f_c = |S_{c1} - S_{c2}|/S_T \quad (3)$$

式中:  $p_G$  为拓扑图中连接节点对的数量,若为无向网格,则  $P_G = n(n-1)/2$ ;  $n$  为节点数;  $p_{G_{lg}}$  为去除  $g$  边之后残余的仍然联通的节点对的数量;  $S_{c1}$ 、 $S_{c2}$  分别为组件 1 和组件 2 中节点的总强度;  $S_T$  为网格系统中全部节点的总强度。

冗余度  $r$  越大,说明网络系统抵御外界冲击的能力越强。当一条连接边的断裂指数较高时,则说明该条边的失效将会在拓扑网格系统中导致两个规模较大的巨件。因此,断裂系数越大,说明系统整体功能越容易受到破坏,表明其韧性较低。

在拓扑度量方面,通常较为常见的指标还有巨件的大小以及平均最短路径等。如 Berche 等<sup>[23]</sup>在对公共交通网络面对巨大冲击时的韧性能力进行研究时,提出分别以下式进行平均最短路径以及平均逆最短路径的计算:

$$\langle l \rangle = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i>j} l(i,j) \quad (4)$$

$$\langle l^{-1} \rangle = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i>j} l^{-1}(i,j) \quad (5)$$

式中:  $N$  为节点的数量;  $l(i,j)$  为从节点  $i$  到节点  $j$  连通的最短路径的长度。

当网格中存在不互相连通的节点时,通过逆最短路径  $l^{-1}(i,j)$  描述,即当节点  $i,j$  不连通时,  $l^{-1}(i,j) = 0$ ,以此实现对最小连通路评价的趋势单调性,即最短路径越长,该指标越小,不连通(即最短路径趋于无限)时,该指标达到最小值 0。

Berche 等<sup>[23]</sup>给出的最大连通集群尺寸  $S$  定义,用以描述连通系统在受到扰动后尚存的连通能力。 $S$  的计算公式如下所示:

$$S = N_1/N \quad (6)$$

式中:  $N$ 、 $N_1$  分别为总结点数以及系统中最大连通巨件中的节点数。

通过衡量计算节点或者连通边的不同失效率情况下的平均逆最短路径  $\langle l^{-1} \rangle$  以及最大连通集群尺寸  $S$ ,即可对系统的抗外界扰动冲击韧性做出评价。通常在某一节点或连通边的失效率下,  $\langle l^{-1} \rangle$  和  $S$  越大,则说明系统韧性越好。以此指标为韧性衡量, Berche 等<sup>[23]</sup>对柏林、巴黎等 14 个城市的公共交通网络进行了上述两项指标计算,结果如图 3 所示。

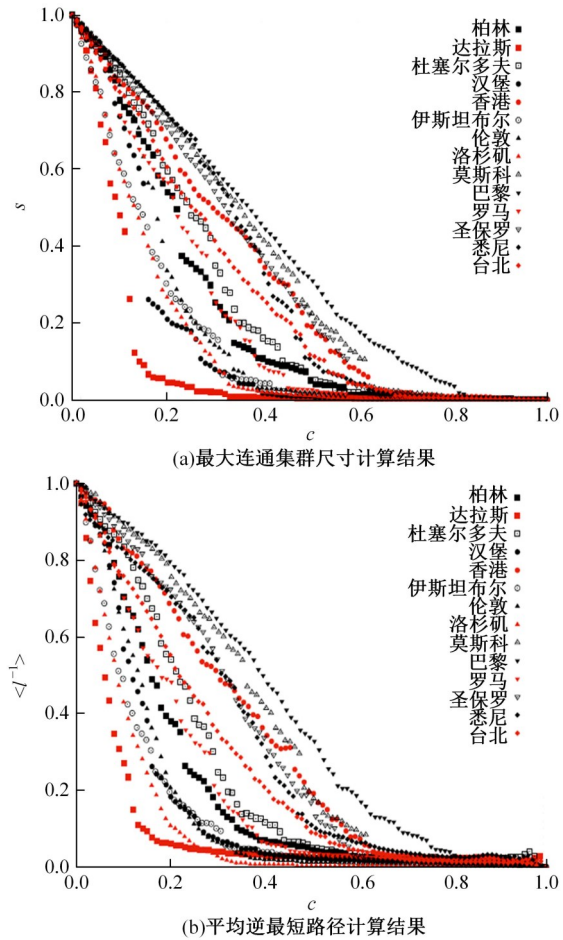


图 3 最大连通集群尺寸和平均逆最短路径计算结果  
Fig. 3 Calculation results of size of the largest cluster and mean inverse shortest path length

通过图 3 的结果可以看出,随着节点失效率  $c$  的逐渐增大,  $\langle l^{-1} \rangle$  和  $S$  两项指标均随之降低,说明交通系统的功能完整性越来越低。在 14 个城市中,巴黎的交通韧性最好,在同一节点失效率下,其两项指标均为最高。此外可以从图 3 中看出,  $\langle l^{-1} \rangle$  和  $S$  两项指标通常具有较好的一致性,即在同一节点失效率下,  $\langle l^{-1} \rangle$  较低的交通网络系统的  $S$  通常也较低。这说明该两项拓扑指标可以一起用于交通网络韧性的综合评价。

另外,一些学者也从拓扑分析的角度对交通路网系统整体韧性评价指标进行了研究。例如 Ip 等<sup>[24]</sup>提出的可靠性连接通道评估指标,其结果表明节点度越均匀,交通网格系统的韧性越好。Testa 等<sup>[25]</sup>则是通过平均节点度、聚集系数、中介中心性、冗余度等拓扑分析指标进行韧性描述。此外,先后有 Osei-Asamoah 等<sup>[26]</sup>利用拓扑网格效率、Hartmann 等<sup>[27]</sup>利用储备能力、Zhang 等<sup>[28]</sup>利用平均节点度和周期循环性、Aydin 等<sup>[29]</sup>利用

中介中心性和巨件尺寸等拓扑概念对交通网络系统的韧性进行评价,均取得了较好的成果。

拓扑学的本质是一种对几何图形或空间进行研究的学科,因此其性质决定了以拓扑学概念衡量道路交通基础设施系统韧性时,只能从路网布局 and 规划、节点布置等空间几何性质方面进行网络系统整体韧性的评价和提升,而且这种整体韧性的评价也通常局限于交通路网内部节点的连通程度、连通效率等几何性质,对于道路交通基础设施本身的结构韧性、安全性、经济性、时效性等更多维度的指标要素等其他非网络几何概念上的韧性则无法度量。因此,在道路交通基础设施韧性研究方面,其他一些研究者从系统性能的角度出发,进行韧性的度量研究。

### 2.1.2 基于性能的韧性度量

Murray-Tuite<sup>[6]</sup>首次在交通网络系统中引入韧性概念时,就提出了相应的评价指标。其认为交通网络系统的韧性应该由适应性、安全性、流通性以及恢复性 4 个直接体现性能的指标进行衡量。其中,适应性指交通网络系统非正常情况下的运行能力,如下所示:

$$m_1 = \frac{\sum_w \theta^r \phi_p \rho_w^r}{\sum_w \theta^r \rho_w^r} \times 100 \quad (7)$$

式中: $\theta^r$ 为一个二进制变量,若出发地 $r$ 与目的地 $s$ 之间的路径存在特殊用途车道,则其取值为 1,否则为 0; $\phi_p$ 同样为一个二进制变量,若路径 $p$ 存在特殊用途车道,则取值为 1,否则为 0; $\rho_w^r$ 为车辆 $w$ 从出发地 $r$ 前往目的地 $s$ 所通过的路径。

安全性 $m_2$ 指交通网络系统中交通事故出现的频率,可通过下式进行计算:

$$m_2 = D\lambda \quad (8)$$

式中: $D$ 为总车辆行驶里程数; $\lambda$ 为事故率。

此外,还可以通过危险处境中的车辆数 $H$ 衡量安全性。如在洪水灾害中, $H$ 可视为需要通过洪水威胁区域的车辆数。

流通性指全网通行效率,其可由路网中的居民疏散速度、车辆通行时间、车辆排队长度等衡量;恢复性则指环节交通网络拥堵阻塞所需的时长。

恢复性的衡量通常与交通系统是否受到破坏有关。在系统受到破坏的情况下,恢复性可通过修复系统以使其服务功能恢复至某一个阈值水平

所需的时间成本、经济成本、以及其所需的其他外界协助量来衡量。若系统未受到破坏,则恢复性通常可通过系统缓解交通拥堵所需的时间衡量。

此外,诸多学者在对交通系统韧性度量的研究中,重点关注系统在受到干扰破坏后的“回弹”过程。如 Lima 等<sup>[30]</sup>、Wang 等<sup>[31]</sup>先后在其研究中提出以系统恢复至平衡状态或正常状态的速度为指标衡量系统韧性。在 Lima 等<sup>[30]</sup>对地铁交通网络的研究中,其将乘客数量作为系统是否正常运行的指标,利用随机均值回归模型中的均值回归率体现系统回归正常水平的速度,并将其作为系统韧性的直接度量指标。

从图 1 中所示的韧性三角形出发进行的韧性度量也属于基于性能的度量方法。如 Twumasi-Boakye 等<sup>[32]</sup>在其研究中提出 $R$ 计算公式为:

$$R = \int_{t_0}^{t_0+\tau} [100 - Q(t)] dt \quad (9)$$

式中: $t_0$ 为交通系统开始受到外界干扰的时间点; $\tau$ 为系统从开始受到外界干扰直到恢复至干扰前水平所经历的时间段; $Q(t)$ 为系统的性能水平。

通过式(9)计算出的 $R$ 值,其本质即为图 1 中韧性三角形的面积大小。式(9)中的系统性能水平 $Q(t)$ 的具体衡量指标可根据不同的衡量对象而灵活确定。如在 Adjetej-Bahun 等<sup>[33]</sup>对铁路系统韧性的研究中,将 $Q(t)$ 具化为旅客客流量以及旅客延误时间,而在 Bocchini 等<sup>[34,35]</sup>对公路桥梁基础设施网的研究中,其又将 $Q(t)$ 具化为路网使用者的通行时间以及通行距离等具体化可衡量的指标。虽然这些研究中所选用的衡量系统性能水平的具体指标不尽相同,但其本质均为基于韧性三角形面积计算的系统性能韧性度量方法。

另外一种目前流行的基于性能的系统韧性度量方法则是通过灾后系统需求满足度的期望分数值的计算实现,如下所示:

$$R = E \left( \frac{\sum_{\omega \in W} d_{\omega}}{\sum_{\omega \in W} D_{\omega}} \right) = \frac{1}{\sum_{\omega \in W} D_{\omega}} E \left( \sum_{\omega \in W} d_{\omega} \right) \quad (10)$$

式中: $\omega$ 为第 $\omega$ 对起点-终点对; $d_{\omega}$ 为灾后系统在某一规定的修复代价下所能实现的第 $\omega$ 对起点-终点对的最大需求满足度; $D_{\omega}$ 为灾前系统所能实现的第 $\omega$ 对起点-终点对的最大需求满足度。

这种方法最开始由 Chen 等<sup>[36]</sup>在对货物运输

系统研究时提出,随后 Nair 等<sup>[37]</sup>、Miller-Hooks 等<sup>[38]</sup>在货物运输系统韧性研究中, Faturechi 等<sup>[39,40]</sup>在机场道面系统以及公路系统韧性研究中,以及 Janić 等<sup>[41]</sup>在航空运输网络系统韧性研究中,均利用了类似于式(10)中的灾后系统需求满足度的期望分数值概念进行系统韧性的衡量。相比于前述其他几种例如韧性三角形算法,系统恢复速度衡量法等韧性衡量方法中仅能对系统性能的损失量进行评价衡量,这种基于灾后系统需求满足度的期望分数值衡量法由于规定了固定的修复代价作为前提,因而其还能够体现出交通运输系统韧性回弹过程中的经济性等代价。

为了进一步凸显经济性在交通韧性中的重要性, Vugrin 等<sup>[42]</sup>在对交通系统韧性的衡量方法研究中,加入了对交通系统灾后性能回弹所需的资源消耗量等经济代价因素的考虑。因此,这种方法与前述诸多方法中仅从系统性能损失以及恢复速度等角度衡量韧性不同,其是一种综合考虑系统性能损失、恢复速度以及韧性过程的经济代价等因素进行交通运输系统韧性衡量的方法。该方法认为交通运输系统韧性  $R$  等于外界扰动对系统性能的累积影响量  $SI$  与系统性能恢复所需的总投入量  $TRE$  之和。具体计算方式如下所示:

$$R = SI + \alpha \times TRE \quad (11)$$

$$SI = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_i \{ H_i[x_i(t)] - H_i^0(t) \} + \sum_{rs} \gamma_{rs} e_{rs}(t) \right] \quad (12)$$

$$TRE = \sum_i \sum_j \sum_m \sum_t C_{ijm} u_{ijmt} \quad (13)$$

式中:  $x_i(t)$  为在扰动中  $t$  时刻路线  $i$  上的交通流;  $H_i[x_i(t)]$  为路线  $i$  上交通流的总成本,这里的成本可以指通行时间、通行距离、燃油消耗量等多种指标;  $H_i^0(t)$  为路线  $i$  上的交通流在扰动发生前正常状态下的总成本;  $e_{rs}(t)$  为由于外部扰动破坏而造成的在出发地  $r$  与目的地  $s$  之间无法满足的交通需求;  $\gamma_{rs}$  为由于出发地  $r$  与目的地  $s$  之间无法满足的交通需求而产生的惩罚成本;  $C_{ijm}$  为对路线  $i$  执行模式为  $m$  的修复任务  $j$  产生的成本;  $u_{ijmt}$  为一个二进制数值,当修复任务  $C_{ijm}$  执行时,其值取 1,否则取 0。

从基于性能的交通韧性度量方法综合比较可以看出,每种方式均包含对系统在受到外部干扰形成性能损失后的性能“回弹”阶段的描述。因

此,无论在何种交通韧性评价指标体系和方法中,涉及“回弹”的性能是最重要的首要描述指标。此外,在不同的韧性度量方法中,除性能“回弹”以外的其他描述对象则不尽相同,如安全性、抗干扰或扰动吸收能力、以及韧性过程中的成本代价等。交通韧性作为一个综合概念,其涉及的内部决定要素应多样化,全面化。因此,在考虑道路交通基础设施韧性的度量中,应尽可能多地综合考虑各种衡量指标,达到对系统韧性的综合全面的评价。

由于拓扑概念本身的几何局限性,基于拓扑的道路交通基础设施韧性度量方法通常只能从路网连通性、通行距离长短等几何要素出发进行交通路网层面韧性的度量,而基于性能韧性度量法则可以综合考虑安全性、经济性、时效性等更多维度的指标要素,因而相比于拓扑度量法,基于性能韧性度量方法能够实现更全面、综合的韧性评价结果。

无论是拓扑度量法,还是性能度量法,都是针对交通路网布局的整体层面的韧性度量。如拓度量中,其主要指标集中于节点连通程度、连接距离长短等;基于性能韧性度量中,其性能指标通常也集中于交通流通行能力、通行时间、通行距离等交通成本。然而,针对道路交通基础设施韧性的评估和提升,不应仅局限于宏观路网乃至交通网层面的通行能力,还应关注道路交通基础设施中的公路、桥梁、隧道等结构本身的韧性能力。

## 2.2 针对道路交通基础设施本体结构的韧性度量

相较于 2.1 节中路网整体韧性的评估,针对道路交通基础设施结构韧性的研究较为分散。目前的相关研究主要集中在公路结构、桥梁结构以及隧道结构等方面。其结构韧性的具体度量方式也随结构类型、灾变因子的种类变化而变化。

在针对包含公路、桥梁、隧道等道路交通基础设施结构的韧性度量中, Reed 等<sup>[43]</sup>于 2009 年在研究网络化的基础设施韧性时提出的韧性指数已被广泛应用。其提出的韧性指数如下所示:

$$R(t_h) = \frac{\int_{t_0}^{t_h} Q(t) dt}{t_h - t_0} \quad (14)$$

式中:  $R(t_h)$  为  $t_h$  时刻的韧性指数;  $Q(t)$  为系统在时间  $t$  时刻的性能;  $t_0$  为系统受到外界冲击的时刻;  $t_h$  为系统恢复至正常状态的时刻。

该韧性指数目前在桥梁结构韧性、隧道结构

韧性等道路交通基础设施结构韧性度量方面均已有了有一定的研究成果<sup>[44-47]</sup>。

从式(14)中的韧性指数定义可以看出,其关注的是系统在“扰动-恢复”过程中的残余性能量,而非图1中的韧性三角形所关注的性能损失量,但其原理和韧性三角形本质上较为类似,均为从系统或者结构的功能方面出发衡量系统或结构的韧性。因此,其仍然存在着1.2节中所述的韧性三角形在衡量系统韧性时的缺陷。

为弥补上述韧性指数的缺陷,在衡量道路交通基础设施结构韧性中综合考虑结构性能、经济代价等多方面要素,一些学者在韧性度量的计算过程中加入了对经济成本等其他方面的因素考量。如在公路结构方面,Chan等<sup>[48]</sup>在气候变化的背景下对路面结构韧性进行研究时,着重关注了洪水条件下的路面结构韧性,将韧性的衡量标准具化为路面使用全寿命周期内的成本。其在公路结构全寿命成本计量中综合衡量了公路结构的结构成本以及公路使用者的使用成本,如下所示:

$$J(h, d) = C(h, d) + U(h) + R(h, d) \quad (15)$$

式中: $J(h, d)$ 为路基高度为 $h$ 、沥青面层厚度为 $d$ 的公路每公里总成本; $C(h, d)$ 、 $U(h, d)$ 、 $R(h, d)$ 分别为公路建设的每公里成本、用户的每公里使用成本、公路重建每公里成本。其相应的计算方式如下所示:

$$C(h, d) = C_1 h + C_2 d \quad (16)$$

$$F_i(h) = \sum_{i=1}^{\infty} F_i P_i \{ a_1 [h + (i-1)a_2] + a_2 \leq X_i < a_1(h + ia_2) + a_2 \} \quad (17)$$

$$\text{式中: } F_i(h) = \begin{cases} 0, & X_i < a_1 h + a_2 \\ F_i, & a_1(h + (i-1)a_2) + a_2 \leq X_i < a_1(h + ia_2) + a_2 \\ \text{for } i = 1, 2, \dots \end{cases}$$

$$U(h) = \int_0^T W_t F_i(h) e^{-rt} dt = \int_0^T W_t \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \{ F_i P_i \{ a_1 [h + (i-1)a_2] + a_2 \leq X_i < a_1(h + ia_2) + a_2 \} \} e^{-rt} dt \quad (18)$$

$$R(h, d) = \int_0^T \left[ \frac{n}{N_1(d)} (1 - W_t P_i(X_i \geq a_1 h + a_2)) + \frac{n}{N_2(d)} (W_t P_i(X_i \geq a_1 h + a_2)) \right] \times (R_1 h + R_2 d + R_3) e^{-rt} dt \quad (19)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$ 分别为单位路基高度以及单位沥青面层厚度的建设成本; $a_1$ 为平均降雨持续时长的倒数; $a_2$ 为排水速率; $F_i$ 为道路封闭 $i$ 小时下使用成本的常数; $X_i$ 为降雨量,其取值于一个几何 $\{X_i; t \in [0, T]\}$ 中的随机过程,其中时间 $t=0 \sim T$ 即为公路结构的全寿命周期; $P_i$ 为 $X_i$ 的概率密度分布函数; $W_t$ 为第 $t$ 年的降雨概率; $r$ 为贴现率; $N_1(d)$ 为未受到洪水冲击前的道路结构允许荷载作用次数,即道路结构的原始疲劳寿命; $N_2(d)$ 为受洪水冲击破坏后的道路结构允许荷载作用次数,即道路结构在受洪水冲击破坏之后的剩余疲劳寿命; $n$ 为需要重建公路时的疲劳寿命阈值。

Chan等<sup>[48]</sup>通过公路结构全寿命周期成本计量公路结构在洪水灾害背景下的韧性能力时,认为其公路结构的全寿命周期成本越小,则韧性越强。因此,通过顺序最小二乘规划,以式(15)中的公路结构全寿命周期内成本最小为目标,求解公路结构(即路基高度 $h$ 与面层厚度 $d$ 的组合)的最优解,即可得出相应气候条件下的最具韧性的公路结构组合。

在更为聚焦于工程结构稳定安全的韧性度量评价方面,郑刚等<sup>[49]</sup>在对隧道类的地下工程结构研究时,将结构韧性的概念聚焦于对系统安全性的全面评价上。其对单一安全系数、可靠度、鲁棒性和可恢复性等韧性设计方法进行了总结评估。在以抗震为背景下的结构韧性度量方面,通常其关注的重点在节点抗力韧性以及恢复韧性上。Wachi等<sup>[50]</sup>、Guo等<sup>[51]</sup>认为转动约束较小的节点或构件连接能力,能够带来更高的结构抗震韧性;而另一些学者则认为,结构节点之间的强连接作用能够提供更高的承载力以及能量耗散能力<sup>[52,53]</sup>,因此其结构抗震韧性更好。

由于道路交通基础设施结构大多呈现长线状特征,其局部的灾变破坏引发的整体链式破坏反应也逐渐受到重视。如在2003年的上海地铁施工过程中,由于风井联络道出现的局部漏水漏沙破坏,相继引发了长达264m的隧道体的连锁反应的链式坍塌破坏<sup>[54]</sup>。此类案例说明了结构在致灾因子作用下的失效规模能否及时控制,局部失效是否容易引发更大范围更大规模的整体链式反应的“多米诺骨牌”式的整体失效,也是衡量结构韧性的重要指标。因此,在致灾因子作用下的结构韧性评价,除前述通过衡量结构抵抗由于致

灾因子作用的直接破坏能力、破坏后的恢复能力之外,一些研究中也把结构的抗连续性破坏能力作为衡量其韧性的一个重要考量因素。在抗连续性破坏能力的衡量方面,其通常可以分为抗局部破坏能力、抗连续破坏能力(即局部破坏不引发链式反应的能力)以及连续破坏扩散范围的控制能力3个层次<sup>[49]</sup>。从抗连续性破坏能力的结构韧性度量思路出发,Zheng等<sup>[55]</sup>在对软土路基上的公路复合式路堤桩结构稳定性研究中,提出了防渐进破坏失效的韧性评价方法,将结构韧性定义为路堤在扰动发生至路堤整体失稳的全过程中抵抗外界干扰的能力,进而通过路堤桩结构在渐进破坏阶段各个时间点的敏感性系数 $S_{ij}$ 具体衡量其结构韧性。敏感性系数如下所示:

$$S_{ij} = \frac{\sigma'_{ij} - \sigma_{ij}}{\sigma_t - \sigma_{ij}} \quad (20)$$

式中: $\sigma_{ij}$ 、 $\sigma'_{ij}$ 分别为其他桩断裂前、后相邻桩的拉应力; $\sigma_t$ 为桩的极限拉应力。

从上述定义可知,敏感性系数 $S_{ij}$ 越大,说明结构受连续性破坏的可能性越高,相应的韧性则越低。因此, $S_{ij}$ 是一个完全针对结构本身受力状况所定义的韧性衡量指标。

可以看出,对结构稳定安全性的韧性度量通常随着不同的灾变因子而变化。在针对地震致灾因子作用下的结构韧性评价,与前述针对洪涝灾害致灾因子作用下的结构韧性评价内涵完全不同,度量方式和评价指标也几乎没有相似之处。此外,即使在同一致灾因子作用下,侧重于不同方面的韧性度量方式之间的差异也较大。如在地震致灾因素作用下,考虑结构受到地震作用的节点抗力韧性以及恢复韧性时,与考虑结构整体在地震作用下的抵抗连续破坏韧性时,其度量指标和衡量方式均有着较大区别。此外,针对道路交通基础设施中的公路、桥梁、隧道等不同结构设施的韧性度量时,其度量指标、度量计算方法也随着结构类型的不同而不同。因此,针对道路交通基础设施本体结构的韧性度量,通常具有较强的多样性以及特殊性、针对性。

### 3 道路交通基础设施韧性的提升技术

道路交通基础设施具有显著的网络化协同运行特点,无论是超长线状的道路和长隧道,还是重

点区段点状的桥梁和短隧道,其结构安全和灾变韧性不足均会显著影响整个道路网络乃至综合交通运输体系的功能发挥。与此同时,道路交通基础设施地域特征显著、气候环境复杂、致灾因素多变,且多因素之间存在复杂的动态耦合作用。因此,针对地震、洪水、泥石流、滑坡、台风等自然灾害和撞击、爆炸、火灾等突发灾害事件作用,突破灾变影响机理和模式、灾变主动预测和监测、灾变结构安全保持和提升、灾后柔性运行和快速恢复等实现道路交通基础设施韧性提升的关键技术研究,则显得尤为重要。

为研究科学合理的系统韧性提升策略,Lundberg等<sup>[56]</sup>提出了一个包含免疫(Immunize)、规避(Avoid)、控制(Control)、恢复(Rebuild)、以及充分认知(Know)五层次的SyRes系统韧性策略模型,如图4所示。

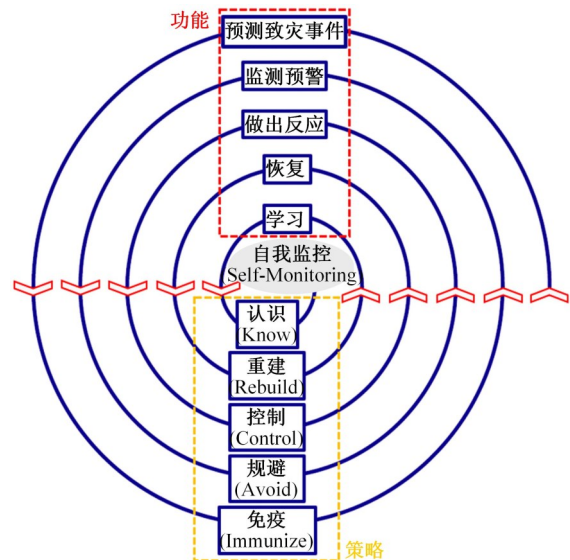


图4 SyRes系统韧性策略模型

Fig. 4 SyRes model

图4中的SyRes韧性策略模型可大致描述如下:具有良好韧性属性的系统首先需要具有良好的免疫(Immunize)能力。其基于良好的灾变因子前置预测基础,通过安排资源调配或动员准备以使得系统免受灾变因子威胁。例如,瑞典的基律纳市由于广泛的矿产开采导致逐渐增大的城市地面坍塌几率,其城市正逐步向新地点搬迁<sup>[57]</sup>,此举即为一个典型的系统主动免疫措施。

在系统由于缺乏足够时间或出于其他客观条件限制,无法对灾变因子进行有效免疫的情况下,对灾变因子的有效规避(Avoid)则是系统韧性的第二层体现。规避致灾因子对系统的危害的措施

相比于免疫措施通常更为直接。规避策略与免疫策略的不同之处在于,免疫策略是通过系统资源调配以期使系统整体免受致灾因子的影响,而规避策略则是在免疫策略无法实施的情况下,通过提前预报预警,对系统中的重要要素受灾可能性进行有效规避,其不追求系统整体对致灾因子的全部规避。典型的规避策略案例,如在海啸、地震、洪涝、泥石流等致灾因子的有效检测以及预报预警下,部分规避居民人身安全以及财产的损失<sup>[58-62]</sup>。与免疫措施相似,系统规避能力通常也需要系统具有良好的致灾因子预测预警基础以实现。

当系统由于监测预警失效而导致免疫和规避策略失效时,系统韧性的体现则来到第3层次,即对灾损的控制(Control)能力。灾损控制能力通常可由基础设施结构本身的坚固稳定性、或是及时有效采取临时损管措施以实现。典型的系统灾损控制策略,如建设具有韧性的抗震基础设施结构、构建临时屏障控制洪涝灾害或火灾蔓延等<sup>[63,64]</sup>。

与韧性三角形概念类似,具有韧性的系统在具有良好的灾损控制能力同时,还应具有良好的恢复或是重建(Rebuild)能力。如图4所示,此能力构成了SyRes韧性策略模型的第4环。

SyRes韧性策略模型的最后一环为认知(Know)能力。其内涵为系统的智能化自适应自学习能力,即通过不断的总结学习,主动寻求对自身的调整,以更好适应未来潜在的外部扰动。其核心目的是实现系统的自我监控(Self-Monitoring)。即系统应该具有不断的自我审视以及自我调整能力,使其自身始终保持适应环境的韧性能力。这种系统的自我监控能力被认为是系统韧性的核心<sup>[65,66]</sup>,是实现系统韧性同时避免资源重复浪费的核心基础。

根据前述各类韧性的定义以及度量方式,结合SyRes韧性提升策略模型,可将道路交通基础设施韧性的提升技术归纳为免疫能力、规避能力、灾损控制能力、恢复能力、以及自我认知监控能力5个方面。其中,免疫能力和规避能力可归纳为系统灾前韧性;灾损控制能力可归纳为系统灾时韧性;恢复能力、自我认知和监控能力可归纳为系统灾后韧性。

### 3.1 道路交通基础设施灾前韧性提升技术

包含免疫能力和规避能力在内的系统灾前韧性高度依赖于良好准确的灾害预测预警技术。因此,在道路交通基础设施灾前韧性的提升方面,其技术重难点主要集中在空天地一体化智能监控和预警上。

大地作为道路交通基础设施的基本载体,其地质条件对于道路交通基础设施结构稳定性、结构安全性、系统完整性具有决定性的影响。因此,对于例如崩塌、滑坡、泥石流、塌陷等致灾因素在内的地质灾害的监控预警,是道路交通基础设施的灾前韧性提升技术的关键核心之一。目前针对地质灾害的监控预警系统中,主要有基于合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术<sup>[67-69]</sup>、机载激光雷达(LiDAR)技术<sup>[70,71]</sup>、高分辨率航天卫星遥感技术<sup>[72]</sup>、以及GPS,北斗等卫星导航技术<sup>[73]</sup>等多种技术途径。考虑到不同技术手段自身的优势和局限性,例如卫星导航技术普遍存在精度受限、时效性差等缺陷;而LiDAR技术通常又存在空间域范围限制较大,易受不良天气、地面植被的影响等不足。因此,目前也有大量研究将几种不同的技术进行融合,着力于解决异源异构监测数据融合和前置性预警的理论瓶颈,突破传统单技术检测的技术局限,开发更为先进的地质灾害监控预警系统。如张勤等<sup>[74]</sup>指出的综合卫星导航技术、InSAR技术、以及其他传感器测量技术的融合系统(见图5),可以实现时间域和空间域的全覆盖、多尺度点面综合处理等优势。此外,还有如Roering等<sup>[75]</sup>在山体滑坡预警监测系统中融合了差分干涉测量、LiDAR等技术手段,从而在多植被覆盖、多山复杂地形等传统干涉雷达精度及结果一致性受限的区域实现了对泥石流、山体滑坡等动态过程的多尺度监测;Chen等<sup>[76]</sup>在对由台湾地区集集地震诱发的1999年草岭滑坡灾害后区域地形变化的研究中融合了LiDAR、DEM等多源数据,实现了大时间跨度下的地理形貌信息综合对比分析;Ciampalini等<sup>[77]</sup>在山体滑坡灾害预警监测中融合了LiDAR与持续散射体干涉合成孔径雷达PSInSAR等技术,实现了对山体滑坡状态及其地面变形速率的动态评价,并得出了DEM分辨率越高,越有利于对地表变形的动态分析评价的结论。

在更为针对公路结构的地质灾害监测预警方

面,相关研究通常将公路边坡作为重点监测对象。如 Zhang 等<sup>[78]</sup>利用视频图像处理技术,提出了可以快速识别公路边坡灾害事件的自动化检测方法。在此类针对具体设施的地质灾害监测预警方面,由于其监测范围较小,监测地点固定,故可以使用固定摄像机、固定传感器等更为局部精确的方式进行灾害监控预警系统的搭建。

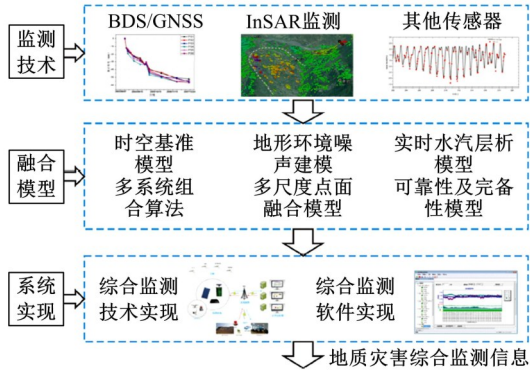


图 5 多技术融合的监测预警系统  
Fig. 5 Multi-technology monitoring and warning system

除地质灾害外,常见的威胁道路交通基础设施的自然灾害还有洪涝、海啸、台风等。针对此类灾害的监测预警系统,其技术路径和原理通常与前述地质灾害预警监测系统具有较多的共通性和相似性。如在海啸的监测预警研究方面,Liu 等<sup>[79]</sup>、Ohta 等<sup>[80]</sup>、Tsushima 等<sup>[81]</sup>均利用全球卫星定位技术(GNSS)实现了对海啸预测系统的建立。

随着技术水平的进步,以及交通基础设施灾前韧性对精准预报预测的需求日益提高,单一的技术手段已经难以满足当下的致灾因子监控和预警需要。因此,充分融合多种技术手段,实现空地一体化的致灾因子预测预警技术,将是未来实现道路交通基础设施灾前韧性提升技术的重点研究内容。

### 3.2 道路交通基础设施灾中韧性提升技术

与道路交通基础设施韧性度量类似,其灾中韧性提升技术也可分为路网整体的灾中韧性提升和基础设施结构本体的灾中韧性提升两个方面。

#### 3.2.1 路网整体的灾中韧性提升技术

Nipa 等<sup>[82]</sup>以专家调查的方法,收集分析了 92 份调查问卷,并根据相应的调查结果制定了针对交通基础设施网络恢复能力的韧性增强策略。如其提出确保路网交通中节点数量处于最优值;在

交通网中建立更多的备选路线;尽量采取多车道公路等提高整体路网韧性的措施。然而,其给出的结论仍属于定性的框架性结论,且其结论完全基于专家调查结果得出,缺乏足够的量化指标以及内在机理解释。

针对路网整体的灾中韧性提升的量化研究,通常是从网络系统的整体几何网络规划、桥梁等关键控制性节点点位布置等方面进行的。如 Zhang 等<sup>[83]</sup>基于 Ip 等<sup>[24]</sup>的可靠性连接通道评估原理,在提出网络韧性指标 WIPW(见式(21))的基础上,引入 WIPW 最大化和成本最小化兼顾的多目标优化算法,以此实现道路交通网络整体的高韧性几何最优化布局,并可以实现对现有道路交通网络中重要关键性节点的有效评估,衡量关键性节点(如重要桥梁等)的加强对网络整体韧性的提升效果。

$$WIPW(G) = \sum_{i=1}^n w_i \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \sum_{k=1}^{K_{(i,j)}} w_k(i,j) \cdot R_k(i,j) \quad (21)$$

式中: $n$ 为交通网络系统中的总结点数; $w_i$ 为节点  $i$  的加权因子,网络中的所有节点的该加权因子之和为 1; $K_{(i,j)}$ 为节点  $i$  与  $j$  之间的独立路径(IPW,即同一对起终点之间不共享任何道路的两条连接路径)的总数; $R_k(i,j)$ 为独立路径  $P_k(i,j)$ (即节点  $i$  与节点  $j$  之间的第  $k$  条独立路径)的可靠度; $w_k(i,j)$ 为独立路径  $P_k(i,j)$  的加权因子。

考虑到道路交通基础设施网络的韧性通常不仅由其路网本身决定,其与能源供应网络、电信网络等其他基础设施网络通常具有明显的关联协同作用<sup>[84-86]</sup>,因此,针对这种多层网络的复杂结构韧性,众多学者从关键节点强化<sup>[87-89]</sup>、增加连接路径<sup>[90-93]</sup>等角度出发,进行交通基础设施网络的韧性增强研究。例如,Fan 等<sup>[93]</sup>以增加连接路径原理为基础,给出了一种改进的基于度偏差的连接路径添加策略,以提高多层网络遭受针对性攻击下的韧性能力。

综上所述,路网整体的灾中韧性的提升技术,其本质都是从几何拓扑学角度,将道路交通合适网络抽象化为图 2 所示的“节点-连线”的网络结构,进而对网络整体的韧性提升进行的针对性研究。因此,其已经成为目前针对道路交通基础设施网络韧性提升研究的主要技术路线。

### 3.2.2 基础设施本体结构的灾中韧性提升技术

在道路交通基础设施结构本体韧性提升研究中,地震作用下的抗震韧性通常是重点研究的对象<sup>[94,95]</sup>。抗震韧性概念最初由 Bruneau 等<sup>[19]</sup>于 2003 年提出,其后迅速得到土木工程结构领域研究者的重视。在地下结构抗震韧性方面,防止结构由于地震导致的直接破坏能力通常由结构的鲁棒性实现。如在盾构隧道方面,Zhang 等<sup>[96]</sup>通过结构补强加固钢板提升隧道的抗大变形鲁棒性。与提升鲁棒性的技术路线不同,震后可恢复功能结构目前正逐渐受到各类工程结构的重视<sup>[97]</sup>。如摇摆隔震结构<sup>[98,99]</sup>,其主要原理为采用柔性可变形支座、柔性夹层支柱<sup>[100]</sup>等结构,实现结构对大变形的吸能适应能力以及自恢复能力。摇摆隔震韧性结构如图 6 所示。

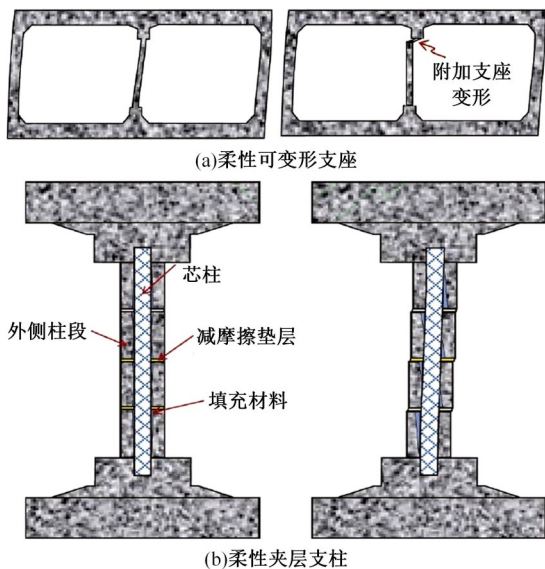


图 6 摇摆隔震韧性结构

Fig. 6 Rocking isolation resilience structure

在抗连续性破坏即灾损控制能力方面,郑刚等<sup>[101]</sup>首次提出连续性破坏传递的阻断单元法。其原理为在连续性结构体中,按照每一定距离间隔设置一道加强型支撑结构,如图 7 所示,以阻断连续性破坏的扩散传递。

与隧道、桥梁等结构的韧性提升技术不同,公路结构韧性研究目前主要集中在路堤的结构稳定

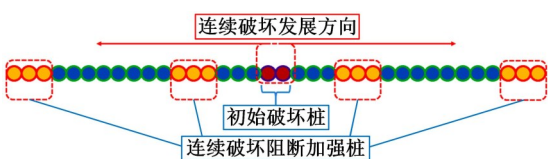


图 7 抗连续破坏的阻断单元原理图

Fig. 7 Blocking unit against continuous damage

性上。针对软土地基等承载力薄弱地区,Chen 等<sup>[102]</sup>将传统的加强桩替换为加筋碎石桩,从而显著提高了桩体的变形协调能力,从而进一步提高路堤整体韧性。类似的,赵明华等<sup>[103]</sup>将碎石桩与土工格栅结合,也实现了软土地基上路堤韧性的提升。此外,针对路堤肩坡滑塌破坏,一些学者通过连续桩墙等措施<sup>[104,105]</sup>,在实现结构稳定性的同时,提升了路堤结构的整体韧性。

总体而言,在基础设施本体结构的灾中韧性提升方面,其核心主要围绕设施结构安全与影响因素间的力学解析关系,通过明确定位结构系统中的薄弱点、重点区段,针对性采用相应韧性提升装置或措施,达到良好的结构灾损控制能力。目前,这方面的研究仍存在如设施结构安全与影响因素间的力学关系难以显性解析、现有基于智能检测的安全性评价技术中并未体现结构动力响应与力学性能的主导地位,导致其因检测精度和智能化程度不足、桥梁传统韧性提升装置自回弹性差、抗损能力低、隧道和高陡边坡的抗灾韧性研究仍处于理论分析的初步阶段、相关技术及装置匮乏,产生重点区段结构抗灾韧性提升效果不佳等问题。

### 3.3 道路交通基础设施灾后韧性提升技术

道路交通基础设施灾后韧性主要体现在恢复能力、自我认知和监控能力方面。对道路交通基础设施网络整体的恢复能力而言,科学合理地选定交通基础设施恢复支援中心的位置,对于网络整体的灾后恢复能力的提升具有显著的作用<sup>[106]</sup>。交通基础设施恢复支援中心通常指一些针对可能出现的灾害造成的如桥梁损毁等的交通基础设施损失而预先设立的救灾物资存储点、抢修救援中心等交通系统恢复性设施。针对此类恢复支援中心进行科学合理的选位,能够有效避免灾时支援中心与救灾地点连接中断、连接不畅、通行距离过远、多点恢复过程中资源分配不协调不平衡等问题。如麻省理工大学的 Akkihal<sup>[107]</sup>使用整数规划模型以及路径可靠性等方式对系统中救灾物资储存设施的选位进行研究;Rawls 等<sup>[108]</sup>利用最大覆盖位置模型确定响应灾难的人道主义救援设置的系统中选址;Soltani-Sobh 等<sup>[109]</sup>通过基于可靠性路径的整数规划模型对交通网络中桥梁修复中心位置预定位的研究等。这些通过对网络系统的恢复支援中心进行科学合理预定位,从而提高系统整体恢复韧性的研究,可以统归为可靠性韧性设

施选址问题研究。需要指出的是,在一些以往的研究综述中,将此类韧性设施预定位的研究内容定义为“Preparedness”,即准备阶段,将其与灾后反应和恢复阶段划分为不同的韧性阶段。而本文中认为,科学合理的韧性设施选址预定位,其最终目的和效果仍然是为了达到更加迅速、低成本的系统性能恢复能力。因此,本文中仍将这部分研究归为道路交通基础设施系统的恢复能力提升,即灾后韧性提升部分。

此外,在道路交通基础设施柔性运行、灾后快速恢复技术和方法的研究上,除韧性设施、恢复支援中心合理预定位外,另一重点方向是灾后柔性运行、抢修以及恢复技术和装备的开发以及结构本身的易修复性。在路陆交通基础设施灾后结构快速抢修恢复技术和装备的研究方面,目前成果主要集中于桥梁结构、公路结构、铁路结构等方面。在桥梁结构灾后快速修复技术方面,目前的研究成果主要集中在梁体快速修复及桥墩快速修复等方面,如梁体整孔更换技术、钢筋混凝土桥墩震后快速恢复技术等。石家庄铁道大学提出的高墩桥换架梁技术<sup>[110,111]</sup>,如图 8 所示,在现有桥梁结构基础上,利用专用龙门吊具设备实现新旧梁的快速更换。在桥墩的震后修复方面,Sun 等<sup>[112]</sup>研究了包含早强混凝土夹套、植加纵向钢筋、环氧树脂和碳纤维增强聚合物(CFRP)缠绕等受损预应力桥墩快速修复技术,并在综合考虑修复性能、经济成本等因素后,最终推荐了早强混凝土护套与 CFRP 缠绕相结合的震后破损圆柱形桥墩快速修复技术。此外,曾兴贵等<sup>[113]</sup>提出的基于二次刚度新型桥墩的快速修复加固方法,可以针对桥墩震后受损实现快速修复。Zhang 等<sup>[114]</sup>利用一种预应力不锈钢箍和护套设备,实现对圆柱形破损桥墩的快速修复等。当现有桥梁结构破损严重、无法实现快速抢修时,也可通过如简易浮桥、架桥车等临时快速架桥设备实现交通的临时快速恢复,如图 9 所示。

对于公路结构的灾后快速恢复,可分为路基结构快速修复及路面结构快速修复两个方面。路基结构的灾损通常体现在震后、滑坡等致灾因子作用后的整体结构性破坏。目前已有的快速抢修技术通常有如袋装土抢修、简易桩加强、简易桥代路等措施,如图 10 所示。此外,目前在以日本为代表的路基抢修恢复的技术研究以及工程案例



图 8 破损梁整体快速更换

Fig. 8 Rapid replacement of damaged beams



图 9 临时快速架桥设备

Fig. 9 Temporary rapid bridging equipment

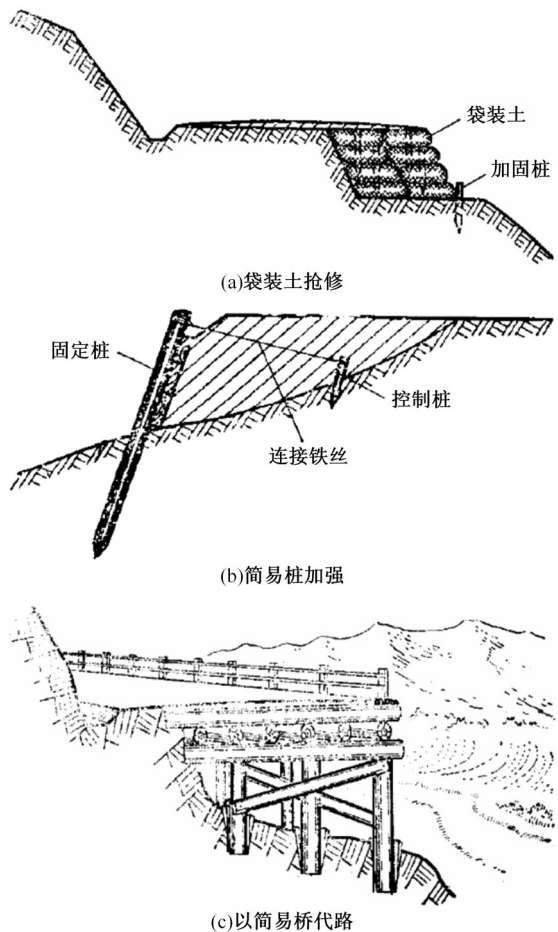


图 10 快速抢修措施

Fig. 10 Quick repair techniques

中,也有利用气泡轻质土作为主要材料,实现路基的快速修补换填的技术。由于气泡轻质土是一种在天然土中加入一定比例的固化剂、起泡剂、水等添加剂制造而成的具有重量轻、强度高、流动性

好、耐久性高等优点的优良填料,将其与简易的树根抗滑桩结合,可以实现受灾后的破损路基的快速修复<sup>[115]</sup>。此外,对于破坏程度较轻、路基和下承层结构完整性仍然较好,只是存在局部开裂、渗漏等承载能力下降的灾后破坏,利用各类有机溶液(如改性环氧树脂类浆液、聚氨酯类浆液、木质素类浆液等)和无机溶液(如水泥、水玻璃类浆液)进行化学灌浆,也可以实现路基结构强度的快速恢复<sup>[116]</sup>。在路面面层结构快速修复技术方面,针对水泥混凝土路面的快速修复,主要思路为利用合适的早强水泥材料进行破损路面的修补、或是利用预制混凝土板拼装进行路面板的替换。如Guan等<sup>[117]</sup>提出的硫铝酸钙水泥(CSA),具有良好的早期强度以及长期强度,是一种适用于混凝土路面快速修复的修复型材料。孙佳龙等<sup>[118]</sup>也曾指出,磷酸镁水泥的抗折抗压强度、耐磨性能等能够满足路用要求,同时磷酸镁水泥砂浆和普通硅酸盐水泥具有良好的兼容性和再水化反应<sup>[119-122]</sup>,可以与原水泥混凝土路面产生较好的粘结效果,因此可通过灌浆、板块修复等技术,实现水泥混凝土路面的灾损后快速修复。针对高速铁路普遍运用的无砟轨道结构的快速修复技术,整体思路与上述水泥混凝土公路结构类似,如水泥注浆<sup>[123,124]</sup>、聚氨酯注浆技术<sup>[125]</sup>等路基加固及抬升技术等。

目前,我国公路交通节点设施灾后柔性运行、抢通和恢复技术的研究还处于起步阶段,相关研究成果仍然较少,既有技术和装备还不能有效满足灾后交通应急保障能力需求。

#### 4 现存问题及展望

通过对道路交通基础设施韧性的定义、度量、以及相应韧性提升技术等研究现状和热点进行综述,笔者认为目前道路交通基础设施韧性研究仍存在很多问题。交通韧性概念目前主要的研究领域主要集中于交通网络组织规划层面,且具有丰富的研究进展以及相应韧性定义、度量方式等成果,而对于基础设施结构本体的韧性研究则相对较为分散,其具体研究内容、韧性定义方式、度量方式通常随着结构类型、致灾因子类型、研究尺度等的变化而显著不同,缺乏统一全面的定义和衡量标准。此外,针对结构韧性的研究中,通常是针对单一特殊地区或特定极端条件下,对单一结构

类型基于静态、浅层特征的独立因素分析,缺乏对全要素、结构系统间耦合等更为全面的研究认识,难以揭示灾变衍化的链式过程和突变特性,导致道路交通基础设施服役周期内灾变失效机制不明确、不同结构间的耦合效应考虑不全面、全路段范围动态预测及防控难以实现等。因此,在今后针对道路交通基础设施韧性提升技术的研究中,应从以下几个方面进行深入的研究和探讨:

(1)充分揭示不同类型设施结构的灾变分析理论和方法。针对地震、洪水、泥石流、滑坡、台风等结构破坏性自然灾害及撞击、爆炸、火灾等结构致损性突发事件作用,揭示道路、长隧道等线性基础设施以及桥梁、短隧道等节点基础设施在致灾因子和常规服役条件动态耦合作用下的结构动力响应特性;通过跨维度致灾因子耦合的灾害效应分析,揭示复杂条件灾变衍化和结构损伤机理;明确不同设施结构灾变作用的失效判定准则和失效模式。以此为基础,针对道路交通基础设施结构韧性建立全面统一的定义和度量标准。

(2)研究建立空-天-地一体化多维度融合的监控预警技术和方法。在融合全球卫星导航系统的基础上,构建例如大范围动态时序星载InSAR识别、靶向区域无人机群智能监控和重要区段结构实时多维监测等多手段多层次技术融合的逐级递进式立体监控技术体系,开发“空-天-地”一体化监控系统 and 智能超前预警平台,解决异源异构监测数据融合和前置性预警的理论瓶颈,突破传统监测和近实时预警的技术局限。

(3)进一步研究道路交通基础设施结构安全、抗灾韧性提升的关键技术和方法。充分运用动力特性间接捕捉、精密三维测量技术等实测技术、数值模拟和缩尺模型试验等室内仿真验证手段,通过系统优化设计方法研发重点区段结构安全智能检测和抗灾韧性提升技术及装置,突破传统结构安全检测不精和抗灾韧性提升效果不佳的技术局限。

(4)进一步研究道路交通基础设施柔性运行、灾后快速恢复技术和方法。构建科学合理的道路交通基础设施灾损分级体系,提出不同灾毁类级下的加固、降载、限速、临时路网构建等柔性运行技术,结合交通基础设施结构和地形地势特点,着力研发其损毁状态下的应急保通及“临-永”快速转化技术和装备。

## 5 结束语

当前在道路交通基础设施韧性的研究方面,已有成果和研究重点主要集中于路网整体的交通网络组织规划层面,在基础设施结构本体的韧性研究方面,其研究重点、研究内容及研究成果均随基础设施结构种类的不同而有着较大差异,总体上较为分散,缺乏统一全面的定义和度量标准。此外,在针对结构韧性的灾变破坏机理研究中,缺乏对全要素、结构系统间耦合等方面更为全面的研究认识,难以揭示灾变衍化的链式过程和突变特性。因此,在未来道路交通基础设施韧性的研究领域,应进一步将重点集中于不同类型设施结构的灾变分析理论和方法,针对道路交通基础设施结构韧性建立全面统一的定义和度量标准,以及从预警监测、结构安全和韧性提升、柔性运行和灾后恢复等多角度出发,形成并推广道路交通基础设施韧性提升的相关技术,从而进一步提升道路交通基础设施韧性研究的全面性、系统性、实用性。

### 参考文献:

- [1] Zhou Y, Wang J, Yang H. Resilience of transportation systems: concepts and comprehensive review[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(12): 4262-4276.
- [2] 李军, 曾鸷, 李妍峰. 基于汶川地震的震后交通受损评估研究[J]. 管理评论, 2008, 20(12): 35-40.  
Li Jun, Zeng Ying, Li Yan-feng. Study on the assessment of post-earthquake traffic damage based on Wenchuan earthquake[J]. Management Review, 2008, 20(12): 35-40.
- [3] Faturechi R, Miller-Hooks E. Measuring the performance of transportation infrastructure systems in disasters: a comprehensive review[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2015, 21(1): No. 4014025.
- [4] Schrank D, Eisele B, Lomax T. TTI's 2012 urban mobility report powered by INRIX traffic data[R]. Austin: Texas Transportation Institute, 2012.
- [5] Holling C. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [6] Murray-Tuite M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]//2006 Winter Simulation Conference, Monterey, USA, 2006: 1398-1405.
- [7] Alexander D E. Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, 13(11): 2707-2716.
- [8] Meng C. Transportation resilience: a summative review on definition and connotation[C]//2015 International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering, Jinan, China, 2015: 672-677.
- [9] Serulle N U, Heaslip K, Brady B, et al. Resiliency of transportation network of Santo Domingo, Dominican Republic case study[J]. Transportation Research Record, 2011, 2234: 22-30.
- [10] Cox A, Prager F, Rose A. Transportation security and the role of resilience: a foundation for operational metrics[J]. Transport Policy, 2011, 18(2): 307-317.
- [11] Omer M, Mostashari A, Nilchiani R, et al. A framework for assessing resiliency of maritime transportation systems[J]. Maritime Policy & Management, 2012, 39(7): 685-703.
- [12] Bhavathrathan B, Patil G. Quantifying resilience using a unique critical cost on road networks subject to recurring capacity disruptions[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2015, 11(9): 836-855.
- [13] 杨超, 唐鹏程, 郝旭宽, 等. 韧性交通建设实践与启示[J]. 综合运输, 2021, 43(8): 134-138.  
Yang Chao, Tang Peng-cheng, Hao Xu-kuan, et al. The practice of the construction of resilient transportation infrastructures[J]. China Transportation Review, 2021, 43(8): 134-138.
- [14] 王兴隆, 石宗北, 陈仔燕. 空中交通网络模式识别及子图结构韧性评估[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 558-568.  
Wang Xing-long, Shi Zong-bei, Chen Zi-yan. Air traffic network motif recognition and sub-graph structure resilience evaluation[J]. Acta Aeronautica, 2021, 42(7): 558-568.
- [15] 吕彪, 高自强, 刘一骞. 道路交通系统韧性及路段重要度评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(2): 114-121.  
Lv Biao, Gao Zi-qiang, Liu Yi-liu. Evaluation of road transportation system resilience and link importance[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(2): 114-121.
- [16] 马宝奎, 柴浩, 张志鹏. 后疫情时期城市轨道交通客流特征与韧性探讨[J]. 综合运输, 2022, 44(7): 75-80.

- Ma Bao-kui, Chai Hao, Zhang Zhi-peng. Assessment and countermeasures for urban rail transit resilience governance in post-pandemic era[J]. *China Transportation Review*, 2022, 44(7): 75-80.
- [17] Lounis Z, McAllister T. Risk-based decision making for sustainable and resilient infrastructure systems[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(9): No. F4016005.
- [18] Zimmerman R, Zhu Q, Leon F, et al. Conceptual modeling framework to integrate resilient and interdependent infrastructure in extreme weather[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2017, 23(4): No. 4017034.
- [19] Bruneau M, Chang S, Eguchi R, et al. A Framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [20] 唐少虎, 朱伟, 程光, 等. 暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(7): 143-150.
- Tang Shao-hu, Zhu Wei, Cheng Guang, et al. Safety resilience assessment of urban road traffic system under rainstorm waterlogging[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(7): 143-150.
- [21] Zhou Y, Wang J, Yang H. Resilience of transportation systems: concepts and comprehensive review[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(12): 4262-4276.
- [22] Chopra S S, Dillon T, Bilec M, et al. A network-based framework for assessing infrastructure resilience: a case study of the London metro system[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2016, 13(118): No. 20160113.
- [23] Berche B, Von-Ferber C, Holovatch T, et al. Resilience of public transport networks against attacks[J]. *European Physical Journal B*, 2009, 71(1): 125-137.
- [24] Ip W H, Wang D W. Resilience and friability of transportation networks: evaluation, analysis and optimization[J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5(2): 189-198.
- [25] Testa A, Furtado M, Alipour A. Resilience of coastal transportation networks faced with extreme climatic events[J]. *Transportation Research Record*, 2015, 2532(1): 29-36.
- [26] Osei-Asamoah A, Lownes N. Complex network method of evaluating resilience in surface transportation networks[J]. *Transportation Research Record*, 2014, 2467(1): 120-128.
- [27] Hartmann A. Large-deviation properties of resilience of transportation networks[J]. *The European Physical Journal B*, 2014, 87(5): No. 114.
- [28] Zhang X, Miller-Hooks E, Denny K. Assessing the role of network topology in transportation network resilience[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 46: 35-45.
- [29] Aydin N, Duzgun H, Wenzel F, et al. Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards [J]. *Natural Hazards*, 2018, 91(1): 37-68.
- [30] Lima M, Medda F. A new measure of resilience: an application to the London underground[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81: 35-46.
- [31] Wang Y, Liu H, Han K, et al. Day-to-day congestion pricing and network resilience[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2015, 11(9): 873-895.
- [32] Twumasi-Boakye R, Sobanjo J. Resilience of regional transportation networks subjected to hazard-induced bridge damages[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2018, 144(10): No. 4018062.
- [33] Adjetey-Bahun K, Birregah B, Châtelet E, et al. A model to quantify the resilience of mass railway transportation systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 153: 1-14.
- [34] Bocchini P, Frangopol D. Optimal resilience and cost-based post-disaster intervention prioritization for bridges along a highway segment[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(1): 117-129.
- [35] Bocchini P, Frangopol D. Restoration of bridge networks after an earthquake: multicriteria intervention optimization[J]. *Earthquake Spectra*, 2012, 28(2): 427-455.
- [36] Chen L, Miller-Hooks E. Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport[J]. *Transportation Science*, 2011, 46(1): 109-123.
- [37] Nair R, Avetisyan H, Miller-Hooks E. Resilience framework for ports and other intermodal components [J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2166(1): 54-65.
- [38] Miller-Hooks E, Zhang X, Faturechi R. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(7): 1633-1643.
- [39] Faturechi R, Levenberg E, Miller-Hooks E. Evaluating and optimizing resilience of airport pavement net-

- works[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 43: 335-348.
- [40] Faturechi R, Miller-Hooks E. Travel time resilience of roadway networks under disaster[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 70: 47-64.
- [41] Janić M. Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 71: 1-16.
- [42] Vugrin E, Turnquist M, Brown N. Optimal recovery sequencing for enhanced resilience and service restoration in transportation networks[J]. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2014, 10: 218-246.
- [43] Reed D A, Kapur K C, Christie R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure [J]. *IEEE Systems Journal*, 2009, 3(2): 174-180.
- [44] Frangopol D M, Bocchini P. Resilience as optimization criterion for the rehabilitation of bridges belonging to a transportation network subject to earthquake [C]//2011 Structures Congress, Las Vegas, USA, 2011: 2044-2055.
- [45] Karamlou A, Bocchini P. Computation of bridge seismic fragility by large-scale simulation for probabilistic resilience analysis[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44: 1959-1978.
- [46] Karamlou A, Bocchini P. Sequencing algorithm with multiple-input genetic operators: application to disaster resilience[J]. *Engineering Structures*, 2016, 117: 591-602.
- [47] Huang H, Zhang D. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: characterization and field application[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 51: 301-312.
- [48] Chan K, Wang Y. Resilient pavement design with consideration of flooding effect caused by climate change[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2020, 16(3): 1136-1155.
- [49] 郑刚,程雪松,周海祚,等. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(7): 1-38.  
Zheng Gang, Cheng Xue-song, Zhou Hai-zuo. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(7): 1-38.
- [50] Wachi K, Asano S, Maeda N, et al. Mechanical characteristics of simplified connection of pile head for precast concrete pile[J]. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 2003, 68: 85-91.
- [51] Guo Z, He W, Bai X, et al. Seismic performance of pile-cap connections of prestressed high-strength concrete pile with different details[J]. *Structural Engineering International*, 2017, 27(4): 546-557.
- [52] Zhang J, Wang W, Jiang D, et al. Tests for aseismic performance of pile-to-pile cap joint of cast-in-place piles with steel casings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(3): 79-84.
- [53] Roeder C, Stringer S, Jellin A. Seismic performance of improved pile-to-wharf deck connections[J]. *PCI Journal*, 2013, 58: 62-80.
- [54] 方江华,张志红,张景钰. 人工冻结法在上海轨道交通四号线修复工程中的应用[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(8): 124-128.  
Fang Jiang-hua, Zhang Zhi-hong, Zhang Jing-yu. Application of artificial freezing to recovering a collapsed tunnel in Shanghai metro No. 4 line[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(8): 124-128.
- [55] Zheng G, Yu X, Zhou H, et al. Stability analysis of stone column-supported and geosynthetic-reinforced embankments on soft ground[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(3): 349-356.
- [56] Lundberg J, Johansson B. Systemic resilience model [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 141: 22-32.
- [57] Tepecik-Diş A, Karimnia E. Reframing Kiruna's relocation—spatial production or a sustainable transformation[J]. *Sustainability*, 2021, 13(7): No. 3811.
- [58] Phuong N, Hiroshi S. Disaster avoidance control against tsunami[C]//2016 28th International Teletraffic Congress, Würzburg, Germany, 2016: 26-34.
- [59] Saba S, Ahsan F, Mohsin S. BAT-ANN based earthquake prediction for Pakistan region[J]. *Soft Computing*, 2017, 21(19): 5805-5813.
- [60] Preethi G, Santhi B. Study on techniques of earthquake prediction[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2011, 29: 55-58.
- [61] Ramli A, Samad A, Ruslan F. A 3-hours river water level flood prediction model using NNARX with improves modelling strategy[C]//2016 6th International Conference on System Engineering and Technology, Bandung, Indonesia, 2016: 23-27.
- [62] Yu B. Research on prediction of debris flows triggered in channels[J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(1): 391-406.
- [63] 张精岳,王志强. 大跨高墩刚构与低墩连续组合桥

- 梁纵向抗震结构体系分析[J]. 公路, 2020, 65(8): 103-108.
- Zhang Jing-yue, Wang Zhi-qiang. Analysis on longitudinal aseismic structure system of long span continuous composite bridge with high pier rigid frame and low pier[J]. Highway, 2020, 65(8): 103-108.
- [64] Chen S, Li H, Guo L, et al. Testing the key performance of mobile flood protection system[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: No. 5641385.
- [65] Hollnagel E. Resilience Engineering Perspectives [M]. London, UK: CRC Press, 2009.
- [66] Ai F, Comfort L, Dong Y, et al. A dynamic decision support system based on geographical information and mobile social networks: a model for tsunami risk mitigation in padang, indonesia[J]. Safety Science, 2016, 90: 62-74.
- [67] Van-Halsema D, Van-Der-Kooij M. Satellite radar measurements of land subsidence[C]//1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, NE, USA, 1996: 963-965.
- [68] Achache J, Fruneau B, Delacourt C. Applicability of SAR interferometry for monitoring of landslides[J/OL]. [2022-10-04]. [https://www.researchgate.net/publication/234499028\\_Applicability\\_of\\_SAR\\_Interferometry\\_for\\_Monitoring\\_of\\_Landslides](https://www.researchgate.net/publication/234499028_Applicability_of_SAR_Interferometry_for_Monitoring_of_Landslides)
- [69] Zhang Q, Zhu W, Ding X, et al. Two-dimensional deformation monitoring over Qingxu (China) by integrating C-, L- and X-bands SAR images[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5: 27-36.
- [70] 马洪超, 姚春静, 张生德. 机载激光雷达在汶川地震应急响应中的若干关键问题探讨[J]. 遥感学报, 2008(6): 925-932.
- Ma Hong-chao, Yao Chun-jing, Zhang Sheng-de. Some technical issues of airborne LIDAR system applied to Wenchuan earthquake relief works[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2008(6): 925-932.
- [71] 刘圣伟, 郭大海, 陈伟涛, 等. 机载激光雷达技术在长江三峡工程库区滑坡灾害调查和监测中的应用研究[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 507-517.
- Liu Sheng-wei, Guo Da-hai, Chen Wei-tao. The application of airborne lidar technology in landslide investigation and monitoring of Three Gorges Reservoir area[J]. Geology in China, 2012, 39(2): 507-517.
- [72] 杨景玉. 基于高分遥感影像的道路灾害监测关键技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学电子与信息工程学院, 2019.
- Yang Jing-yu. Research on key technologies of road disaster monitoring based on high-resolution remote sensing imagery[D]. Lanzhou: School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [73] 张勤, 黄观文, 王利, 等. GPS在西安市地面沉降与地裂缝监测中的应用研究[J]. 工程地质学报, 2007(6): 828-833.
- Zhang Qin, Huang Guan-wen, Wang Li, et al. GPS monitoring and surveying on land subsidence and land fissure in Xi'an city[J]. Journal of Engineering Geology, 2007(6): 828-833.
- [74] 张勤, 黄观文, 杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1300-1307.
- Zhang Qin, Huang Guan-wen, Yang Cheng-sheng. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1300-1307.
- [75] Roering J, Stimely L, Mackey B, et al. Using DInSAR, airborne LiDAR, and archival air photos to quantify landsliding and sediment transport[J/OL]. [2022-10-09]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2009GL040374>
- [76] Chen R, Chang K, Angelier J, et al. Topographical changes revealed by high-resolution airborne LiDAR data: the 1999 Tsaoling landslide induced by the Chi-Chi earthquake[J]. Engineering Geology, 2006, 88(3): 160-172.
- [77] Ciampalini A, Raspini F, Frodella W, et al. The effectiveness of high-resolution LiDAR data combined with PSInSAR data in landslide study[J]. Landslides, 2016, 13(2): 399-410.
- [78] Zhang Z, He S, He C, et al. Research on highway slope disaster automated monitoring method based on video image processing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2095(1): No. 12042.
- [79] Liu J, Lin C, Chen Y, et al. The source detection of 28 September 2018 Sulawesi tsunami by using ionospheric GNSS total electron content disturbance[J]. Geoscience Letters, 2020, 7: No. 11.
- [80] Ohta Y, Inoue T, Koshimura S, et al. Role of real-time GNSS in near-field tsunami forecasting[J]. Journal of Disaster Research, 2018, 13(3): 453-459.
- [81] Tsushima H, Hino R, Ohta Y, et al. tFISH/RAPiD: rapid improvement of near-field tsunami forecasting based on offshore tsunami data by incorporating onshore GNSS data[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(10): 3390-3397.

- [82] Nipa T, Kermanshachi S, Subramanya K. Development of innovative strategies to enhance the resilience of the critical infrastructure[C]//Construction Research Congress 2022, Arlington, USA, 2022: 111-120.
- [83] Zhang W, Wang N. Resilience-based risk mitigation for road networks[J]. *Structural Safety*, 2016, 62: 57-65.
- [84] Dixit V, Verma P, Tiwari M. Assessment of pre and post-disaster supply chain resilience based on network structural parameters with CVaR as a risk measure [J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 227: No. 107655.
- [85] Huang Y, Dai H. Multiplex conductance and gossip based information spreading in multiplex networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2019, 6(3): 391-401.
- [86] Oliveira I, Carpi L, Atman A. The multiplex efficiency index: unveiling the Brazilian air transportation multiplex network—BATMN[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): No. 13339.
- [87] Tang L, Jing K, He J, et al. Complex interdependent supply chain networks: cascading failure and robustness[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, 443: 58-69.
- [88] Nguyen D, Shen Y, Thai M. Detecting critical nodes in interdependent power networks for vulnerability assessment[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(1): 151-159.
- [89] Fan B, Zheng C, Tang L, et al. Critical nodes identification for vulnerability analysis of power communication networks[J]. *IET Communications*, 2020, 14(4): 703-713.
- [90] Cao X, Hong C, Du W, et al. Improving the network robustness against cascading failures by adding links[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2013, 57: 35-40.
- [91] Beygelzimer A, Grinstein G, Linsker R, et al. Improving network robustness by edge modification[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2005, 357(3): 593-612.
- [92] Wang X, Cao J, Li R, et al. A preferential attachment strategy for connectivity link addition strategy in improving the robustness of interdependent networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, 483: 412-422.
- [93] Fan D, Sun B, Dui H, et al. A modified connectivity link addition strategy to improve the resilience of multiplex networks against attacks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 221: No. 108294.
- [94] 吕西林, 陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(1): 27-36.
- Lv Xi-lin, Chen Cong. Research progress in structural systems with replaceable members[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(1): 27-36.
- [95] 周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程:从抗震、减隔震到可恢复性[J]. *工程力学*, 2019, 36(6): 1-12.
- Zhou Ying, Wu Hao, Gu An-qi. Earthquake engineering: from earthquake resilience, energy dissipation, and isolation, to resilience[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(6): 1-12.
- [96] Zhang D, Zhai W, Huang H, et al. Robust retrofitting design for rehabilitation of segmental tunnel linings: using the example of steel plates[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83: 231-242.
- [97] 吕西林, 陈云, 毛苑君. 结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2011, 39(7): 941-948.
- Lv Xi-lin, Chen Yun, Mao Yuan-jun. New concept of structural seismic design: earthquake resilience structures[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(7): 941-948.
- [98] Anastasopoulos I, Gazetas G, Loli M, et al. Soil failure can be used for seismic protection of structures[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, 8(2): 309-326.
- [99] 路德春, 马超, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震韧性研究进展[J]. *中国科学:技术科学*: 1-15.
- Lu De-chun, Ma Chao, Du Xiu-li, et al. Earthquake resilience of urban underground structures: state of the art[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*: 1-15.
- [100] Lu D, Wu C, Ma C, et al. A novel segmental cored column for upgrading the seismic performance of underground frame structures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 131: No. 106011.
- [101] 郑刚, 朱晓蔚, 程雪松, 等. 悬臂排桩支护基坑连续破坏控制理论及设计方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(6): 981-990.
- Zheng Gang, Zhu Xiao-wei, Cheng Xue-song, et al. Study on the control theory and design method of progressive collapse in excavations retained by cantilever piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(6): 981-990.
- [102] Chen J, Li L, Xue J, et al. Failure mechanism of

- geosynthetic-encased stone columns in soft soils under embankment[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(5): 424-431.
- [103]赵明华, 刘猛, 马宾辉, 等. 路堤下“土工格室+碎石桩”双向增强复合地基桩土应力比及沉降计算[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(5): 1-10.  
Zhao Ming-hua, Liu Meng, Ma Bin-hui, et al. Calculation for stress concentration ratio and settlement of bidirectional reinforced composite foundation consisting of geocell mattress and stone column under embankment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(5): 1-10.
- [104]Broms B. *Stabilization of Soil with Lime Columns* [M]. Boston, MA: Springer US, 1991: 833-855.
- [105]Jamsawang P, Voottipruex P, Boathong P, et al. Three-dimensional numerical investigation on lateral movement and factor of safety of slopes stabilized with deep cement mixing column rows[J]. *Engineering Geology*, 2015, 188: 159-167.
- [106]Irohara T, Kuo Y, Leung J. From preparedness to recovery: a tri-level programming model for disaster relief planning[C]//4th International Conference on Computational Logistics, Copenhagen, Denmark, 2013: 213 - 228.
- [107]Akkihal A. *Inventory pre-positioning for humanitarian operations*[D]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, Engineering Systems Division, 2006.
- [108]Rawls C, Turnquist M. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, 44(4): 521-534.
- [109]Soltani-Sobh A, Heaslip K, Scarlatos P, et al. Reliability based pre-positioning of recovery centers for resilient transportation infrastructure[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2016, 19: 324-333.
- [110]张耀辉, 陈士通, 徐光兴, 等. 铁路高墩换架梁技术方案研究[J]. *国防交通工程与技术*, 2014, 12(5): 29-32.  
Zhang Yao-hui, Chen Shi-tong, Xu Guang-xing, et al. A study of the beam-replacing techniques for the railway bridge with tall piers[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2014, 12(5): 29-32.
- [111]张耀辉, 徐光兴. 京广线“百孔大桥”既有梁的整孔换架施工[J]. *铁道建筑*, 2004(3): 17-19.  
Zhang Yao-hui, Xu Guang-xing. Construction of the whole existing beam replacement of "Baikong Bridge" on the Beijing-Guangzhou line[J]. *Railway Engineering*, 2004(3): 17-19.
- [112]Sun Z, Li H, Bi K, et al. Rapid repair techniques for severely earthquake-damaged circular bridge piers with flexural failure mode[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2017, 16(2): 415-433.
- [113]曾兴贵, 徐鑫城, 巫文君, 等. 基于二次刚度的新型桥墩快速修复加固方法研究[J]. *福州大学学报:自然科学版*, 2013, 41(4): 562-569.  
Zeng Xing-gui, Xu Xin-cheng, Wu Wen-jun, et al. Study on the rapid repair and reinforcement methods for a novel bridge pier with post-yield stiffness[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4): 562-569.
- [114]Zhang D, Li N, Li Z, et al. Rapid repair of RC bridge columns with prestressed stainless-steel hoops and stainless-steel jackets[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 177: No. 106441.
- [115]李子运. 山区公路路基塌方快速修复新技术研究[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院, 2013.  
Li Zi-yun. Study on quick recovery technique of mountain highway subgrade collapsing[D]. Chongqing: School of Civil Engineering, Chongqing University, 2013.
- [116]吴树威. 山区公路路基崩塌灾害快速修复技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学土木工程学院, 2018.  
Wu Shu-wei. Study on rapid restoration technology of roadbed collapse disaster in mountain area[D]. Chongqing: School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [117]Guan Y, Gao Y, Sun R, et al. Experimental study and field application of calcium sulfoaluminate cement for rapid repair of concrete pavements[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2017, 11(3): 338-345.
- [118]孙佳龙, 黄煜斌, 范英儒, 等. 磷酸镁水泥用作道路的快速修补材料研究[J]. *功能材料*, 2018, 49(1): 1040-1043.  
Sun Jia-long, Huang Yu-bin, Fan Ying-ru, et al. Magnesium phosphate cement as rapid road repair material[J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(1): 1040-1043.
- [119]Yang Q, Zhu B, Wu X. Characteristics and durability test of magnesium phosphate cement-based material for rapid repair of concrete[J]. *Materials and Structures*, 2000, 33(4): 229-234.
- [120]Ding Z. Research of magnesium phosphosilicate ce-

- ment[D]. Hong Kong: School of Civil Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, 2005.
- [121]汪宏涛. 高性能磷酸镁水泥基材料研究[D]. 重庆:重庆大学材料科学与工程学院, 2006.  
Wang Hong-tao. Study on the high performance magnesium-phosphate cement based composites[D]. Chongqing: College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, 2006.
- [122]杨楠. 磷酸镁水泥基材料粘结性能研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2014.  
Yang Nan. Research on the bonding properties of magnesium phosphate cement-based materials[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2014.
- [123]李宗典, 刘世益, 尹立杰. 铁路路基道碴囊及路基空洞注浆加固治理[J]. 路基工程, 2007(6): 179-180.  
Li Zong-dian, Liu Shi-yi, Yin Li-jie. Reinforcement and treatment of ballast bag and subgrade cavity grouting[J]. Subgrade Engineering, 2007(6): 179-180.
- [124]吕续臣, 于立俊. 既有铁路路基注浆加固技术[J]. 铁道建筑, 2006(4): 39-41.  
Lv Xu-chen, Yu Li-jun. Existing railway subgrade grouting reinforcement technology[J]. Railway Engineering, 2006(4): 39-41.
- [125]孙冬冬. 道床填料循环累积变形与铁路沉降修复试验研究[D]. 杭州:浙江大学建筑工程学院, 2017.  
Sun Dong-dong. Experimental study on cycle cumulative rehabilitation of railway settlement[D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2017.