

城市主干道改扩建施工期交通系统韧性评价与提升策略研究

——以上海市山阳镇龙胜东路（杭州湾大道~亭卫南路）为例

王巧林

上海锦石市政建设养护有限公司 上海 200540

【摘要】：改扩建施工造成的通行能力折减叠加突发扰动，使城市主干路交通系统长期处于脆弱性运行状态。本文将韧性理论引入施工交通组织领域，建立涵盖吸收、适应、恢复三维能力的测度框架，以龙胜东路改扩建工程为对象，通过 VISSIM 仿真还原四种施工阶段在两类干扰情景下的韧性表现。结果显示：半幅封闭阶段韧性指数（0.665）较保通阶段（0.761）低 12.6%，事故造成的排队长度峰值（843m）达恶劣天气情景的 1.6 倍。交叉口渠化率、路网备用容量、信息发布时效被识别为关键调控变量。

【关键词】：道路改扩建；交通系统韧性；施工期管理；VISSIM 仿真；应急管理

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.069

1 问题的提出

城市主干路改扩建普遍采用“边施工、边通车”模式，施工占道与交通需求间的矛盾已成为常态性难题。龙胜东路（杭州湾大道—亭卫南路）位于上海金山山阳镇商住密集区，双向四车道压缩为双向两车道后，通行能力骤降 50%，系统冗余度逼近临界。

既有研究对施工交通的评估，主要依托《城市道路施工作业交通组织规范》（GA/T900-2010）中的效率指标——平均车速、行程延误、排队长度^[1]，这类指标在稳态交通假设下运行良好，却难以解释 2022 年台风季的一次系统崩溃：瞬时强降雨引发的局部积水，使本已脆弱的施工路段陷入长达 3 小时的全面瘫痪。常态下的“高效”与非常态下的“脆弱”形成刺眼反差。

韧性理论为理解这种反差提供了新的概念工具。本文将其引入施工交通研究，解决三个问题：施工约束条件下的韧性如何测度？不同施工阶段、不同扰动类型的韧性响应有何差异？哪些要素可作为韧性调控的杠杆点？

2 工程场景与交通约束

2.1 工程边界条件

龙胜东路改扩建工程二标（K0+997.35—K1+368.59）全长 371.24m，现状为城市次干路，规划升级为主干路。设计参数：计算行车速度 40km/h，红线宽度 30m。工程内容包含车行道及人行道改造、雨水管网翻排、多杆合一与多箱合一整合、交通安全设施完善。工期 2022 年 11 月至 2023 年 5 月，跨越冬季低温施工期与梅雨季汛期，环境约束条件严苛。

2.2 分阶段交通组织

龙胜东路改扩建工程分 4 阶段半幅封闭施工，通行能力折减 50%：阶段 1（45 天）北侧管线翻排，南半幅通车；阶段 2（40 天）南侧电力排管，北半幅通车；阶段 3（50 天）南侧共振破碎，北半幅通车；阶段 4（45 天）北侧破碎+摊铺，利用已完工半幅双向通行。全程维持双向 2 车道保通。

2.3 路网结构与与风险源

亿横建材市场与韶建邦国宸府为主要交通生成源。早晚高峰断面流量 2800—3200pcu/d，方向分布系数达 0.62（早高峰西向东）与 0.58（晚高峰东向西），潮汐特征明显。外围分流通道包括杭州湾大道、亭卫南路、同凯路，但缺乏平行替代路径。

施工期需应对三类风险：气象类——雨季强降雨与台风；水文类——浅层地下水水位 0.5—1.5m；施工类——共振碎石化振动可能扰动周边管线。

3 韧性测度框架构建

3.1 概念界定：施工约束下的韧性内涵

改扩建施工场景的特殊性在于“内忧外患”的叠加效应——施工占道构成持续性内部干扰，事故或恶劣天气构成随机性外部冲击。Bruneau 等提出的“4R”韧性框架（Robustness, Redundancy, Resourcefulness, Rapidity）^[2]源于地震工程领域，其社区尺度评估逻辑难以直接映射到施工路段的微观交通流。本文将其转译为“吸收—适应—恢复”三阶段机制。

施工期交通韧性界定为：在施工干扰与外部扰动耦合作用下，系统维持基本通行功能、动态调整资源配置并恢复至可接受服务水平的能力。这一概念操作化为三个可测维度^[3]：吸收能力（Absorption）——扰

动冲击下的功能维持度；适应能力（Adaptation）——运行策略的动态调整度；恢复能力（Restoration）——服务水平的回归速度。

3.2 指标遴选与体系结构

指标设计需兼顾交通工程的可测性与韧性理论的过程性。表1呈现的指标体系包含3个准则层、9个指标层：吸收能力层聚焦系统冗余与备用资源，适应能力层关注调控灵活性与信息覆盖，恢复能力层侧重应急响应与恢复效率。指标量化方法综合参照《城市道路施工作业交通组织规范》^[1]及近年来交通韧性实证研究^[4]的技术路线。

表1 施工期交通系统韧性评价指标体系

准则层	指标层	指标定义与量化方法	数据来源
吸收能力 A	A1 路网备用容量	(周边路网剩余通行能力/原路网总通行能力)×100%	交通调查+VISSIM
	A2 节点可替代性	关键交叉口可绕行路径数量	路网拓扑分析
	A3 断面冗余度	(施工路段剩余车道数/原车道数)×100%	施工组织设计
适应能力 B	B1 信号配时调节灵敏度	信号周期可调范围/原信号周期	交叉口调查
	B2 交通管制灵活性	可采取的临时管制措施种类数量	交管方案分析
	B3 信息发布覆盖率	可变情报板覆盖范围/受影响路网面积	设施清单
恢复能力 C	C1 应急响应时间	从事件发生到启动应急预案的时间(min)	应急预案
	C2 清障效率	单位时间内可清除的障碍物数量(veh/min)	经验参数
	C3 恢复时间指标	事件结束后恢复到90%通行能力所需时间(min)	VISSIM 仿真

3.3 指标量化方法

路网备用容量（A1）通过 VISSIM 仿真提取周边路网（杭州湾大道、亭卫南路）在不同施工阶段的剩余通行能力，按式（1）计算：

$$A_1 = (C_{\text{剩余}} / C_{\text{原}}) \times 100\%$$

信号配时调节灵敏度（B1）以杭州湾大道—龙胜东路交叉口为例，现状信号周期 $C_0=124\text{s}$ ，可调范围 $[C_{\text{min}}, C_{\text{max}}]=[100,150]\text{s}$ ，调节灵敏度按式（2）计算：

$$B1 = (C_{\text{max}} - C_{\text{min}}) / C_0 \times 100\% = (150 - 100) / 124 \times 100\% = 40.3\%$$

应急响应时间（C1）依据施工组织设计应急预案，交通事故响应时间 6—10min，恶劣天气预警提前 30—60min，管线事故响应时间 11—17min。

4 VISSIM 仿真与韧性测度

4.1 仿真模型标定

仿真路网覆盖龙胜东路、杭州湾大道、亭卫南路、同凯路。交通需求依据现场调查：断面高峰小时流量 450—520pcu/h，转向流量按实测分配。分阶段建模时设置车道封闭、临时限速 30km/h 等参数，校验行程时间误差控制在 8% 以内。

4.2 干扰情景设定

参照龙胜东路 2022—2023 年施工期突发事件统计，设计两类典型干扰情景：

情景 S1（交通事故）：发生于早高峰 8:00—8:30，位置 K1+150（亿横建材市场出入口上游 50m）。模拟单车侧翻事故，占用单向 1 车道，持续 30min（其中清障作业 20min，交通流恢复 10min）。

情景 S2（恶劣天气）：发生于晚高峰 17:30—18:30，模拟短时强降雨（雨强 20mm/h）。此时路段车速衰减 20%—30%，视距受限，干扰持续 60min。

4.3 仿真结果分析

（1）吸收能力测度结果四个施工阶段的吸收能力指数在 0.653—0.738 之间波动，阶段 4 表现最优。其路网备用容量达 22.6%，明显高于其他阶段（17.8%—19.2%），得益于摊铺前完善的临时交通标志系统有效引导了外围分流。节点可替代性各阶段差异较小，断面冗余度均为 50%。

（2）适应能力测度结果适应能力指标计算结果见表 2。阶段 4 信号配时调节灵敏度、交通管制灵活性、信息发布覆盖率均优于其他阶段，因摊铺作业前完善了临时交通标志标线。

表2 适应能力指标评价结果

指标	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
B1 信号配时调节灵敏度(%)	35.2	36.1	34.5	40.3
B2 交通管制灵活性(种类数)	4	4	3	5
B3 信息发布覆盖率(%)	32.5	32.5	32.5	42.8

（3）恢复能力测度结果表 3 数据显示，阶段 3 恢复能力指数 0.592，低于阶段 4 的 0.751。事故冲击高强度短时历时，S1 排队长度 843m 为 S2 的 1.6 倍；恶

劣天气低强度长历时，恢复时间延长 37.2%。阶段 3 薄弱源于施工机械占道，清障效率仅 1.1veh/min（阶段 4 为 1.5veh/min）。障碍清除后，交通恢复仍需 1.5—2.0 倍清障时间。

表 3 恢复能力指标仿真结果

施工阶段	干扰情景	C1 应急响应时间(min)	C2 清障效率(veh/min)	C3 恢复时间(min)
阶段 1	S1(事故)	8.5	1.2	42.3
	S2(天气)	5.0	—	58.6
阶段 2	S1(事故)	8.2	1.3	40.8
	S2(天气)	5.0	—	56.2
阶段 3	S1(事故)	9.6	1.1	48.5
	S2(天气)	5.0	—	65.4
阶段 4	S1(事故)	7.5	1.5	35.6
	S2(天气)	5.0	—	48.3

4.4 韧性综合评价

采用熵权法赋权，恢复能力权重最高（0.412）。半幅封闭阶段平均韧性（0.665）较保通阶段低 12.6%，恢复能力降幅达 23.6%。

表 4 各施工阶段韧性综合评价

施工阶段	吸收能力得分	适应能力得分	恢复能力得分	韧性综合值
阶段 1	0.682	0.715	0.643	0.675
阶段 2	0.695	0.724	0.658	0.688
阶段 3	0.653	0.678	0.592	0.632
阶段 4	0.738	0.812	0.751	0.761

5 关键调控要素与韧性增强策略

5.1 敏感性分析与要素识别

基于仿真数据的敏感性分析，识别出三类关键调控要素：

(1) 交叉口渠化率——通行效率的杠杆点。仿真结果显示，渠化率每提升 10 个百分点，S1 情景下的恢复时间缩短 8.5%。龙胜东路—杭州湾大道交叉口现状渠化率约 65%，若通过压缩中央分隔带、增设左转待转区等方式优化至 80%，预计事故情景下的排队长度可由 843m 缩减至 723m，削减 120m。

(2) 路网备用容量——恢复时间的决定因子。与恢复时间相关系数-0.83（ $p < 0.01$ ）。每增加 5 个百分点，S2 恢复时间缩短 12.3%。

(3) 信息发布覆盖率——应急响应的催化剂。由 32.5%提升至 42.8%，应急响应时间由 9.6min 压缩至 7.5min，效率提升 21.9%。

5.2 “空间—时间—信息”协同增强策略

针对阶段 3 韧性薄弱的问题，提出三维协同的干预方案：

空间维度：硬扩容与冗余强化。打通同凯路—卫阳南路衔接通道，释放 8%—10%备用容量；亿横建材市场出入口施划临时右转专用道；每 200m 设置紧急掉头缺口。施工路段每 200m 设置紧急掉头缺口，确保突发事件下车辆可快速逆向疏散，避免系统“死锁”。

时间维度：软错峰与动态调控。将共振碎石化等高振动作业严格压缩至交通低峰窗口（9:30—16:00）；建立施工—交通联动预警机制，编制分时段应急响应卡，明确高峰、平峰、夜间三类场景的差异化处置流程，实现由“事后处置”向“事前预防”的转型。

信息维度：智协同与社会参与。在杭州湾大道、亭卫南路等分流节点布设临时 LED 诱导屏，实时推送施工区拥堵指数；与导航平台建立数据直连；开发面向沿线居民的施工交通韧性监测小程序，提供个性化绕行方案。

5.3 策略效果仿真验证

将组合策略植入阶段 3 仿真模型：S1 恢复时间由 48.5min 压缩至 38.2min（提升 21.2%），S2 由 65.4min 降至 49.7min（提升 24.0%）；韧性综合指数由 0.632 提升至 0.723（增幅 14.4%），接近阶段 4 水平（0.761）。上述结果表明，通过空间、时间、信息三维度的协同干预，即使在共振破碎等干扰施工阶段，交通韧性仍可被有效修复至可接受区间。

6 结论与展望

本文将韧性理论引入城市主干路改扩建施工交通研究，以龙胜东路工程为实证，得出以下结论：

(1) 施工期交通韧性具有显著阶段性。半幅封闭阶段（阶段 1—3）韧性综合指数（0.665）较保通阶段（0.761）低 12.6%，恢复能力降幅更达 23.6%。施工占道不仅压缩通行空间，更削弱系统自愈能力。

(2) 不同扰动类型冲击机制各异。交通事故呈高强度短历时冲击，排队峰值（843m）为恶劣天气的 1.6 倍；恶劣天气呈低强度长历时特征，恢复时间延长

更显著。韧性提升需针对扰动类型差异化设计。

(3) 关键调控要素可干预。交叉口渠化率、路网备用容量、信息发布覆盖率为韧性敏感调控点。通过空间扩容、错峰施工、信息协同,阶段3韧性指数从

0.632 提升至 0.723 (增幅 14.4%), 策略有效性获验证。

后续可构建多模式交通动态韧性模型,探索智慧工地与交通韧性管理的数据融合机制。

参考文献:

- [1] 郑晟.城市道路改扩建工程交通组织方案的评价与应用[D].杭州:浙江大学,2023:45-52.
- [2] BruneauM,ChangSE,EguchiRT,etal.Aframeworktoquantitativelyassessandenhancetheseismicresilienceofcommunities[J].EarthquakeSpectra,2003,19(4):733-752.
- [3] HollingCS.Resilienceandstabilityofecologicalsystems[J].AnnualReviewofEcologyandSystematics,1973,4(1):1-23.
- [4] 吕斌,孙立山.城市交通系统韧性评价与提升策略研究综述[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(5):12-21.