

关于跨座式单轨交通简支梁体系和连续刚构体系的 结构特点及施工特点的比较

重庆单轨交通工程有限责任公司

副总经理 教授级高工

注册一级建造师 苏明辉

2019年7月25日北京





Metro Trans

目录

- 一、序言
- 二、跨座式单轨交通工程的应用与发展
- 三、跨座式单轨的运行原理
- 四、两种梁型的结构与施工工艺特点分析比较
- 五、两种梁型的安装及线型调整工艺特点比较
- 六、分析
- 七、结论





一、序言

大家好！我今天演讲的题目是《关于跨座式单轨交通简支梁体系和连续刚构体系的结构特点及施工特点的比较》。前几年我在境内外单轨论坛上曾经做过几次发言，题目分别是：第一篇《跨座式单轨交通施工技术在重庆的运用与创新》，主要内容是单轨交通工程施工技术采用的方法、工艺、设备、措施以及创新；第二篇《基于简支梁桥体系的跨座式单轨交通施工技术介绍》，主要内容是跨座式单轨土建结构重点部位施工管理和方法，特别是有关PC轨道梁的施工策划和技术管理；第三篇《跨座式单轨交通梁桥结构体系技术经济性比较》，主要内容是简支梁和连续刚构在不同跨径条件下技术经济比较，这篇文章因准备时间仓促，深度和广度不够。目前重庆单轨协会已委托我司正在做课题研究，预计明年初出报告。我演讲这个题目的动因是业内对简支梁体系和连续刚构体系评价各说不一，褒贬都有，时有争议。所以，今天，我只讲问题的一部分，单一地从施工的立场出发，从技术上去分析比较不同轨道梁桥体系的结构特点、施工特点，暂不做经济分析比较，希望能给大家提供一些参考意见。由于我所讲的内容，只是个人在重庆跨座式单轨施工十几年来的工作经验和体会，不代表任何组织，也没有高深的理论概括，难免有错，希望能得到同行们的批评指正。下面我开始今天的演讲汇报。



二、跨座式单轨交通工程的应用与发展

(一) 跨座式单轨交通发展状况

跨座式单轨交通经过近两百年的发展，到目前为止，与钢轮钢轨交通体系相比，其应用规模和应用国家和地区都不算大。全球应用国家12个，线路29条，总里程约389km。

请看右侧的统计表（此统计表是跨座式单轨在二十世纪六十年代到现在的发展情况。）

自上世纪六十年代以来，单轨发展在轨道梁桥结构体系上只要有两种形式，一是简支梁体系，主要是日立单轨和重庆单轨，线路长度约为200公里；二是连续刚构体系，主要是庞巴迪单轨和斯柯米单轨，线路长度约为50公里。

序号	国家	地区	名称	开通年份	线路长度 (KM)	主要系统设计 和生产服务商
1	美国 (6条)	加利福尼亚	迪士尼乐园单轨	1959	4	Mark I、Mark II(德国Alweg、WDI)Mark II、MarkV(WDI) MarkVII(WDI、加拿大Dynamic Structures)
2		西雅图	西雅图单轨	1962	1.54	德国Alweg
3		佛罗里达州	迪士尼世界单轨	1971	23.6	MarkIV(WDI、马丁、玛雨埃塔) MarkVI(WDI、加拿大庞巴迪)
4		新泽西州	纽瓦克单轨	1996	4.8	瑞士Voill Roll、德国Adtranz
5		佛罗里达州	杰克逊维尔单轨	1997	4	加拿大庞巴迪
6		内华达州	拉斯维加斯单轨	2004	6.3	加拿大庞巴迪
7	日本 (6条)	东京	羽田机场单轨	1964	17.8	日本日立
8		大阪	世博园单轨	1970	4.3	日本日立
9		北九州	北九州单轨	1985	8.8	日本日立
10		大阪	大阪单轨	1990	28	日本日立
11		多摩市	多摩单轨	1998	16	日本日立
12		冲绳	冲绳单轨	2003	13.1	日本日立
13	德国 (2条)	多特蒙德	工业大学单轨	1984	3	德国西门子
14		杜塞尔多夫	杜塞尔多夫机场单轨	2002	2.5	德国西门子
15	澳大利亚 (1条)	悉尼	悉尼单轨	1988	3.6	瑞士Voill Roll
16	马来西亚 (1条)	吉隆坡	吉隆坡单轨	2003	8.6	日本日立、马来西亚史格米
17	中国 (5条)	重庆	单轨2号线	2005	31.36	日本日立
18		重庆	单轨3号线	2011	67.09	日本日立
19		深圳	比亚迪跨座式单轨	2016	4.4	中国比亚迪
20		芜湖	单轨1号线	在建	30.4	
21		芜湖	单轨1号线	在建	16.5	
22	俄罗斯 (1条)	莫斯科	莫斯科单轨	2005	4.7	意大利Intamin公司、莫斯科动力技术学院
23	新加坡 (1条)	新加坡	圣淘沙单轨	2007	2.1	日本日立
24	阿联酋 (1条)	迪拜	朱美拉棕榈岛单轨	2009	5.4	日本日立
25	巴西 (1条)	圣保罗	单轨15号线	2014	2.9	加拿大庞巴迪
26		圣保罗	圣保罗单轨17号线	在建	24	马来西亚史格米
27		圣保罗	圣保罗单轨18号线	设计	15	马来西亚史格米
28		马瑙斯	马瑙斯单轨	暂停	20	马来西亚史格米
29	印度 (1条)	孟买	孟买单轨	2014	8.93	马来西亚史格米
30	韩国 (1条)	大邱	大邱单轨3号线	2015	24	日本日立
31	伊朗 (1条)	库姆	库姆单轨	在建	6.8	意大利SPA
32	沙特 (1条)	利雅得	利雅得单轨	在建	3.6	加拿大庞巴迪

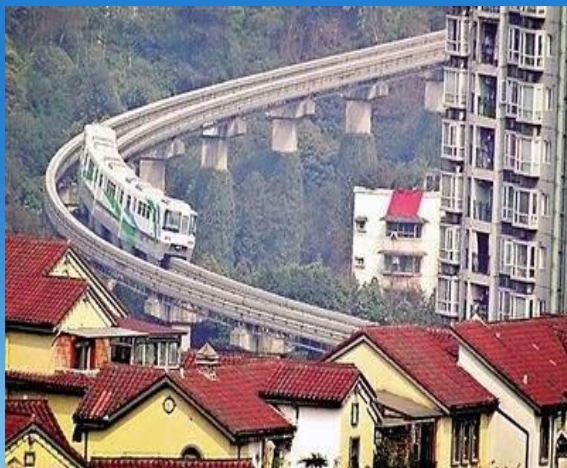


二、跨座式单轨交通工程的应用与发展

(二) 跨座式单轨的主要特点

1、转弯半径小

交通制式	最小平曲线半径	
	正线	车场线
单轨	100m	50m
地铁	250m	110m



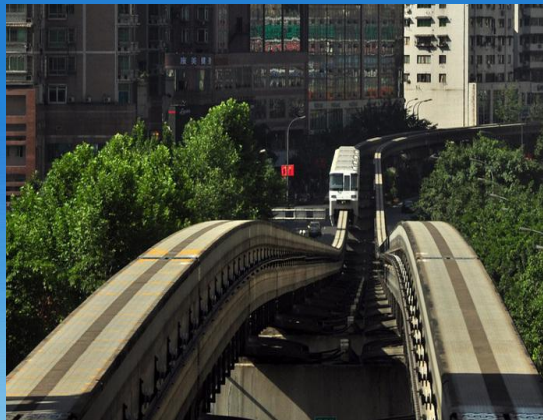


二、跨座式单轨交通工程的应用与发展

(二) 跨座式单轨的主要特点

2、爬坡能力强

交通制式	最大纵坡	
	正线	车场线
单轨	60‰	60‰
地铁	35‰	40‰



3、运行噪音小

- 距离线路中线15m处，单轨的振动和噪音低于70分贝，接近或低于公路汽车的背景噪声，无需设置减振降噪措施。





二、跨座式单轨交通工程的应用与发展

4、占地面积小（相对于高架钢轨）

交通制式	占用面积 (m ³)
单轨	8
地铁	56~80

单轨采用两条带状梁体，中间敷设镂空检修通道，总宽度为4.5m，扣除检修平台，则双线仅占用净1.7m宽。接触轨和线缆随梁敷设于梁腰部和梁底部，轨面是最高点，每延米占用城市空间体积为8m³。地铁高架桥是箱梁或U梁，占用道路上空宽度为8~10m，为全覆盖，若计入架空接触轨、声屏障、栏板等设施设备后，每延米占城市空间体积56~80m³。（上述数据为重庆单轨）





Metro Trans

二、跨座式单轨交通工程的应用与发展

5、旅游观光性好

6、绿化效果好



7、经济性好

投资仅为地铁的1/2，有的甚至1/3。

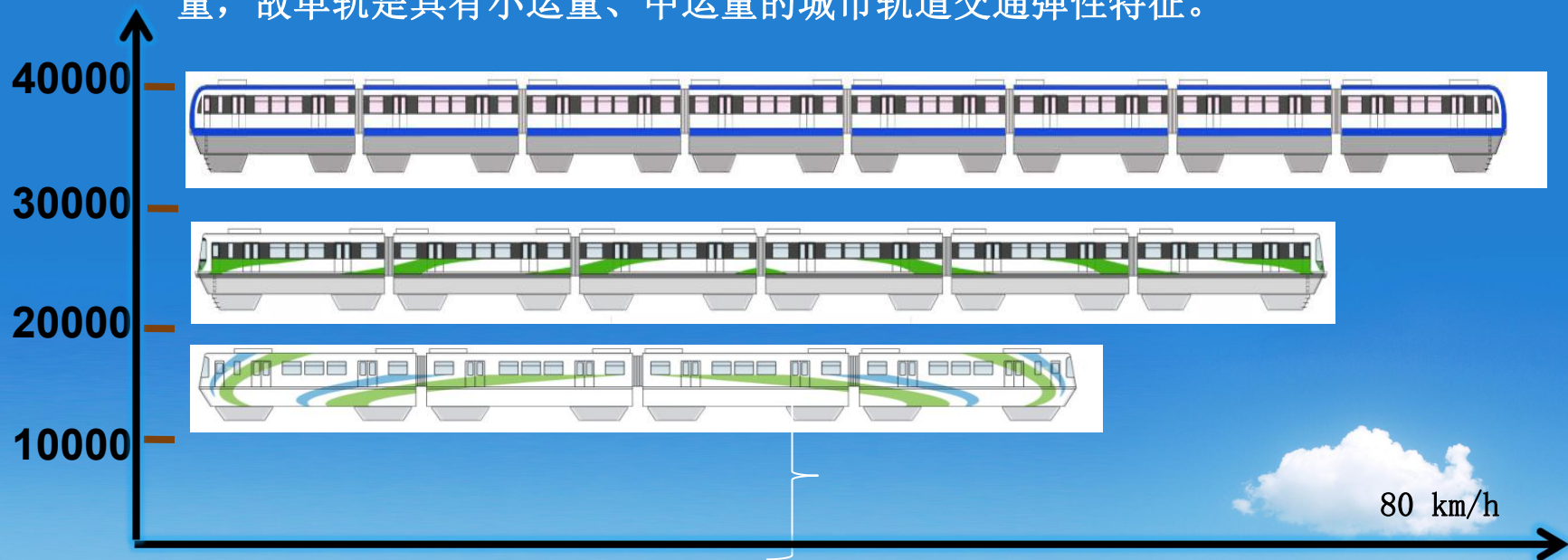




二、跨座式单轨交通工程的应用与发展

7、运量有弹性

根据现有单轨系统的车型及编组设置，可以实现断面1~3.8万人次/小时的客运量，故单轨是具有小运量、中运量的城市轨道交通弹性特征。

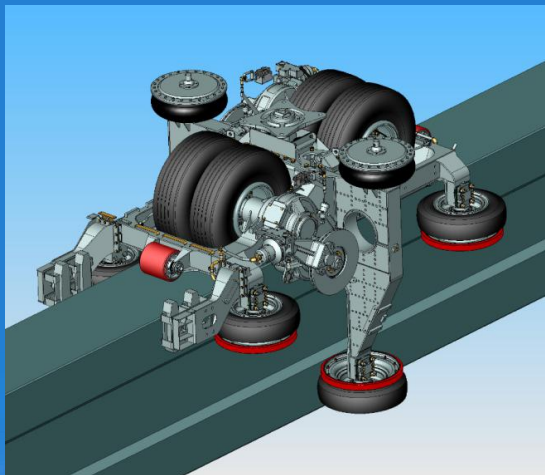




Metro Trans

三、跨座式单轨的运行原理

(一) 轮轨耦合关系



双轴转向架

轮对将轨道梁合围起来，
轮轨关系呈多向耦合接触关系。

顶面：牵引制动，轮轨接触呈垂向关系；

侧面：导向和稳定，轮轨接触呈横向关系。



单轴转向架





Metro Trans

三、跨座式单轨的运行原理

(二) 轨道梁的“核心”本质



1、单轨PC轨道梁在功能上既是承重结构，又是引导单轨列车运行带状轨道，梁轨合一，这就是轨道梁的“核心”本质。而普通桥梁在功能上只是承重结构，行走接触部分需铺装走行面或轨道。

2、PC轨道梁的制造是单件生产，无重复性，并且和桥墩一一对应，不可能像钢轨道梁工业化批量生产。





三、跨座式单轨的运行原理

(三) PC轨道梁主要技术要求

PC轨道梁的梁体精度要求	
项目	安装精度要求
梁长 (弦长)	$\pm 10\text{mm}$
跨度	$\pm 10\text{mm}$
端面倾斜度	$\pm 5/1000\text{rad}(\pm 7\text{mm})$
工作面线形	$\leq L/2000\text{mm}$ (L为梁长)
梁宽	端部 $\pm 2\text{mm}$;中部 $\pm 4\text{mm}$;腰部 -4mm
走行面垂直度	$\pm 5/1000\text{rad}$
梁体高度	$\pm 10\text{mm}$
局部不平整	$\pm 2\text{mm}$
接缝板与梁表面高差	$\pm 2\text{mm}$

三、跨座式单轨的运行原理

PC轨道梁架设安装精度要求		
检查项目		安装精度要求
线形调整	梁端轨面高程	+30mm -15mm
	梁端轨面横坡	7/1000rad
	平面线形矢高	直线5mm (弦长4m) 曲线±20mm (弦长20m)
	竖向线形矢高	<+5mm (弦长4m)
接缝板安装	轨道梁缝	±10mm
	走行面、导向面和稳定面高差	≤2mm
	紧固螺栓低于板表面	≥1mm
	紧固螺栓预紧力矩	150N.m ~ 160N.m
线间距		0mm ~ +25mm
线路中心		0mm ~ +25mm



三、跨座式单轨的运行原理

小结：

1、单轨轨道梁与普通桥梁不同点

为满足单轨列车运行的平稳性和舒适性，轨道梁顶面和侧面分别要满足列车走行轮、导向轮和稳定轮在空间上呈多维度高度贴合。故轨道梁除顶面平顺，其侧面也要求平顺。因此，单轨轨道梁比普通桥梁结构设计制约因数复杂，制造和安装控制精度要求更高。

2、跨座式单轨交通难以推广的原因

- ①轨道梁的制造比钢轨道梁难；
- ②轨道梁设计规范中对梁宽、高无统一标准。



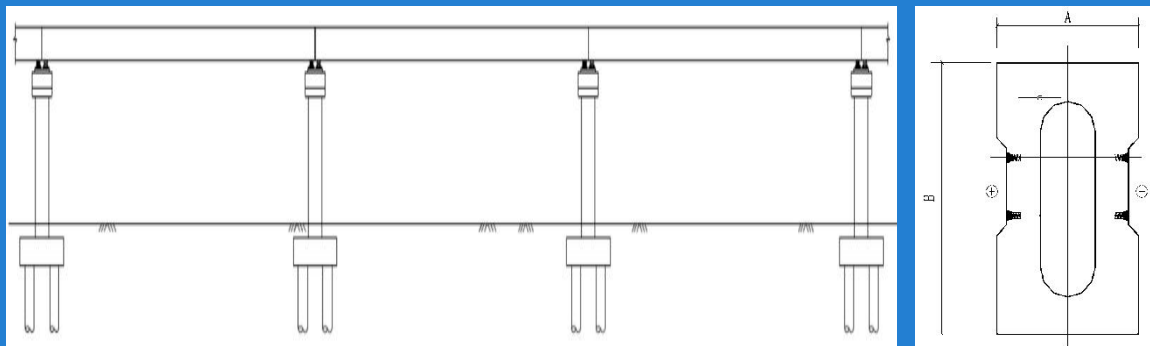


Metro Trans

四、两种梁型的结构与施工工艺特点分析比较

(一) 总体结构图

简支梁桥体系

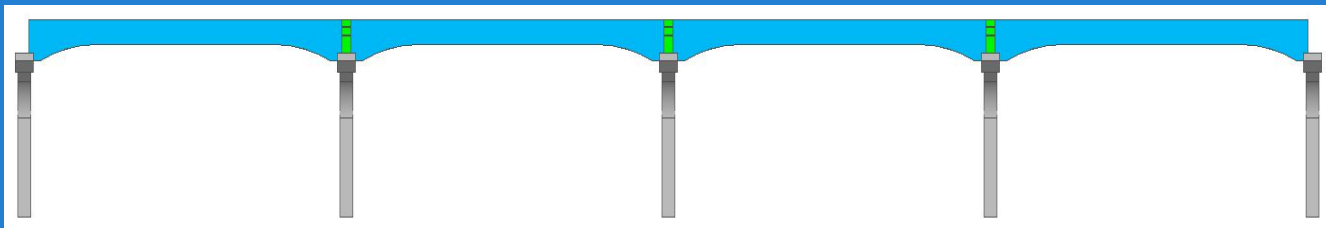




Metro Trans

四、两种梁型的结构与施工工艺特点分析比较

连续刚构体系



巴西



芜湖



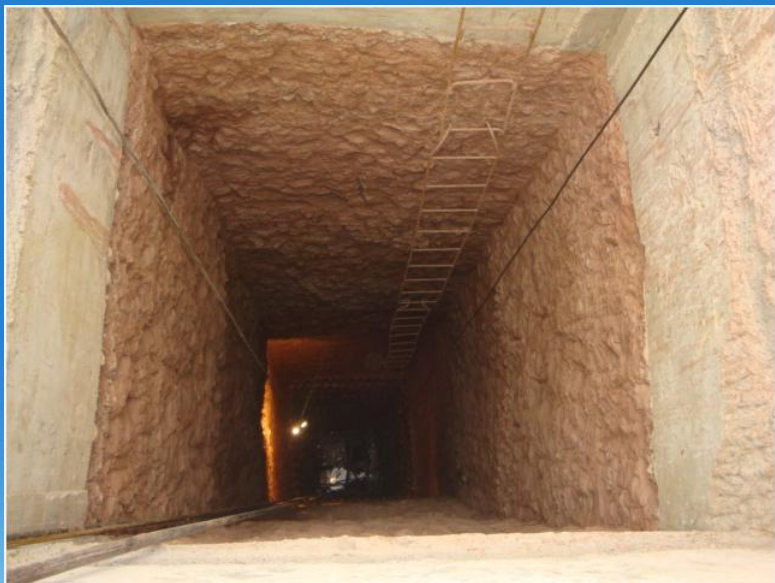


Metro Trans

四、两种梁型的结构与施工工艺特点分析比较

(二) 相同或相似点

1、桩基施工



2、墩身施工





Metro Trans

四、两种梁型的结构与施工工艺特点分析比较

(三) 不同点：两种梁桥体系施工工艺工程比较

简支体系施工流程

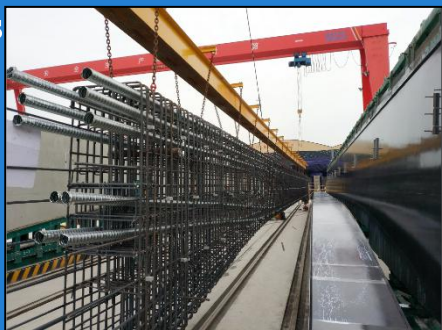




Metro Trans

四、两种梁型的结构与施工工艺特点分析比较

连续刚构体系施工流程



制梁



模板安装



搭设临时支架



绑扎接头钢筋，贯穿通长钢绞线



采用临时固定设施固定轨道梁



PC轨道梁吊装

浇筑中间墩柱
混凝土

张拉通长预
应力钢束

封锚

撤除临
时支架

依次施工下一联轨
道梁



Metro Trans

四、两种梁型的结构与施工工艺特点分析比较

(四) 两种梁型施工工艺特点比较

1、简支梁：

- ①工厂内一次性张拉成型；
- ②现场一次性吊装到位，无需辅助工装；
- ③随时可进行线型调整，且无需辅助工装；
- ④轨道一次成型。



简支体系



Metro Trans

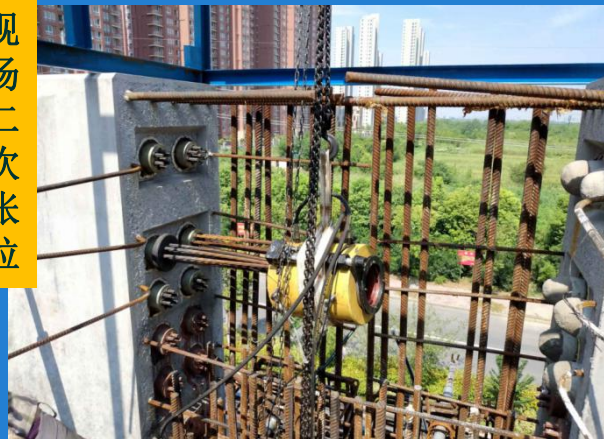
四、两种梁型的结构与施工工艺特点分析比较

2、连续刚构梁：①厂内进行第一次张拉，现场需二次多榀梁张拉；②吊装需辅助工装；③线型调整需辅助工装；④轨道成型需进行二次现场浇筑。

工厂内一次张拉



现场二次张拉



连续刚构体系



五、两种梁型的安装及线型调整工艺特点比较

(一) 存梁

简支梁：可叠两层放置，存梁场占地面积相对较小。



简支梁双层存梁

连续刚构梁：只能单层放置，存梁场占地面积大。



连续梁单层存梁



Metro Trans

五、两种梁型的安装及线型调整工艺特点比较

(二) 架梁方法、设备

1、简支梁

汽车吊

是基本方法，
适应范围：公
路路面上。





五、两种梁型的安装及线型调整工艺特点比较

架桥机

可作汽车吊的补充，适合没有公路路面的山地、穿越立交桥、天桥上面、穿越车站、穿越隧道等一切地段。

若在交通复杂、场地狭窄、路面通信电力拆迁多及公路天桥拆迁多的路段，架桥机有极强的经济性。



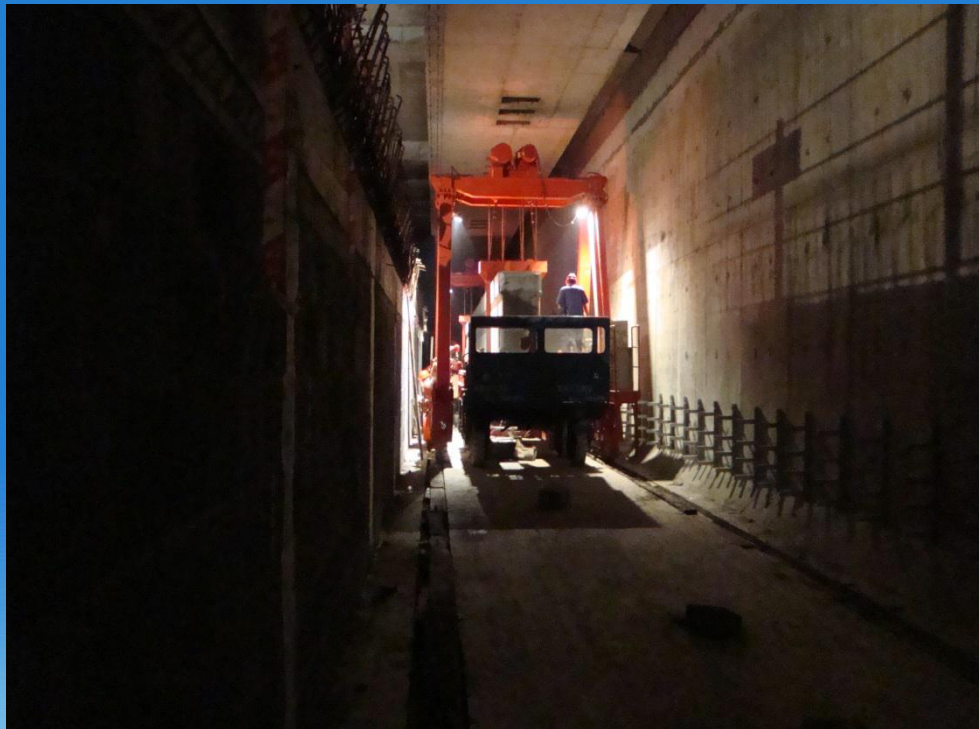


Metro Trans

五、两种梁型的安装及线型调整工艺特点比较

龙门吊

地面如车辆段、
隧道内、大桥上面。





Metro Trans

五、两种梁型的安装及线型调整工艺特点比较

钢导梁

专架穿越车站。





五、两种梁型的安装及线型调整工艺特点比较

2、连续刚构

①根据连续刚构梁的结构特点可知，它不能用架桥机架设。因此，当穿越山地、立交桥或汽车运输不能到达的地方，必须要专修施工便道，或采取特殊施工措施。



②由于连续刚构梁，在浇筑湿接头前，需要在现场连接两榀梁之间的钢筋、穿通长钢绞线、多次线型调整，且现场还需要在盖梁上立模板浇筑混凝土再张拉，并且轨道梁都需要在盖梁上临时支撑。因此，连续刚构梁的架设效率相对较低，并且要长时间占用公路路面而影响交通通行。



五、两种梁型的安装及线型调整工艺特点比较

(三) 线型调整

1、简支梁

简支梁线型调整是在一个区间内从线路中间向两头车站局部调整，梁缝误差消除在车站里。





Metro Trans

五、两种梁型的安装及线型调整工艺特点比较

2、连续刚构梁

连续刚构梁线型调整是两头车站向区间局部调整，梁缝误差消除在湿接头处。



PC轨道梁吊装



采用临时固定设施固定轨道梁



湿接头浇筑及二次张拉

需二次张拉通长钢绞线，其成桥线形控制难度较大，后期运行过程中，各种因素还会使轨道梁的变形继续恶化。因此，在全寿命周期内，连续梁体系的线型是可修复性较差，最终可能导致运行舒适性较差。



六、分析

1、简支体系就是完全的装配式结构，现场施工仅用螺栓联结即可。而连续刚构体系则是不完全的装配式结构，需要在现场做大量的支撑、张拉、立模、现浇及交通占道等工作。（连续刚构体系不是目前提倡的装配式理念，现场需要大量辅组工作。）

2、简支体系轨道线形具备可维修性，而连续刚构体系是**不具备可维修性**。

3、进一步分析，可以有三个特点：

①当车辆运行一段时间后，若感到或检查到轨道线形不舒适时，简支体系可以调整，而连续刚构则不可以。前者已在重庆的运营中实践了。

②若遇地基沉降变化或轻微地震，简支体系具备一定的修复能力，而连续刚构体系却非常困难或不可能。



六、分析

③由于简支梁是在工厂内一次性且只有一榀梁进行预应力张拉，则其线形相对容易控制，而连续刚构分别在工厂内和施工现场进行两次张拉，且第二次张拉是三榀或者多榀通长张拉，则预应力的控制和成桥后的变形控制困难程度大大增加，相比之下成桥线形控制困难得多！

4、从上面分析可推论如下：

①连续刚构体系的成桥线形不如简支体系的线形容易控制，车辆运行的舒适性不如简支体。

②同理，简支体系轨道梁线形的可维修性比连续刚构体系好。



七、结论

上面的理论分析和推理当然有局限性。比如：在中国国内仅有简支体系在运行，连续刚构体系仍在建设施工中，没有实际运行的工程案例。在国外运行的连续刚构体系我们没有真实地体验，也没有更多公开数据。所以，有关连续刚构体系分析难免存在主观臆断，希望未来与同行更多交流。

最后，我想就今天的演讲作出如下结论，供大家参考和批评。

- 1、就满足国家现在提倡的装配式建筑和便于施工线型控制及运行可维修性而言，简支体系明显优于连续体系。
- 2、就地域或环境而言：①对地势起伏大、地质条件差、年温差大、交通拥堵、沿线拆迁较大的城市，建议以简支结构体系为主；②对地势平坦、地质条件好、年温差较小、或新建新区，城市规划较好、拆迁工作量少，施工条件较好的城市，建议以连续刚构体系为主。
- 3、就同一工程而言，简支和连续应根据工程实际，灵活选用。如穿越市政桥梁、铁路、车站以及曲线地段、折返段、出入段等地段等应采用简支梁。



Metro Trans

谢谢观看！

Thanks

