

公路3×30m三跨连续钢箱梁桥倾覆分析

余国山¹ 杨波²

(1. 重庆市市政设计研究院有限公司 重庆 400020)

(2. 重庆市酉阳县桃花源新城建设开发有限责任公司 重庆 409800)

【摘要】基于3×30m连续钢箱梁桥，参考JTG 3362-2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中关于抗倾覆的规定，通过midas Civil建立有限元模型，分析发现：公路梁桥整体倾覆的主要设计因素是联中双支座横向间距太小，甚至采用单支座设计；现行规范(JTG 3362-2018)能有效计算直桥（小曲率弯桥）的抗倾覆效应，也能定性保证大曲率弯桥抗倾覆安全，但无法有效计算大曲率弯桥的抗倾覆效应；同等条件下，3×30m连续钢箱梁桥抗倾覆能力由强到弱依次为：大曲率弯桥，小曲率弯桥，直桥，斜桥。分析和结论可为公路梁桥抗倾覆设计和加固提供参考。

【关键词】三跨连续钢箱梁；公路桥梁；抗倾覆；斜桥；弯桥

一、近年事故简析

2021年12月18日，湖北省大广高速与沪渝高速花湖互通枢纽匝道中的一座3跨连续钢箱梁桥发生整体侧翻。^[1]近十多年来多座高架桥梁在重车偏载的作用下发生整体倾覆，统计观察倾覆典型案例发现以下两个特点：①事故简支梁均为小间距双支座的钢箱梁；②事故连续梁均为联端双支座，中支点为独柱墩加单支座的结构体系。

该特点表明事故桥梁整体倾覆的必要条件：简支梁为小间距双支座钢箱梁，多跨连续梁中支点为单支座加独柱墩设计。高架跨线桥为了不耽误原有路线的通行，需加快施工，主梁通常整体预制现场吊装，为了方便吊装，大多采用重量较轻的钢箱梁并根据跨越距离选择简支梁或连续梁。若选用连续梁，其中支点桥墩由于受到下方线路的限制，使用空间较小，大多采用独柱墩设计，同时为节约成本（省略盖梁和多余支座），墩顶往往设单支座。当重车集中行驶在主梁一侧时，小间距双支座或者单支座对于主梁扭转的约束较弱，主梁在弯扭耦合变形下部分支座脱空，约束条件恶化，整体发生横向单侧滑移，直至倾覆。桥梁倾覆历程表明：小间距的双支座或者单支座是高架跨线桥倾覆的主要设计不利因素，与独柱墩设计无关，建议：

①独柱墩和主梁固结，提升桥梁整体性；②独柱墩顶加设盖梁或采用花瓶墩，并设置间距较大的双支座。对已有的较不利的独柱墩加单支座设计，较常见的加固措施是在墩顶加设钢托架，近似给独柱墩添加“盖梁”并且增设横向大间距的支座。

二、抗倾覆设计规范分析

(一) 规范条文

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[2]第4.1.8条规定在持久状况下，梁桥不应发生结构体系改变，并应同时满足下列条件：①在作用基本组合下，单项受压支座始终保持受压状态。②按作用标准值进行组合时（汽车荷载应考虑冲击作用），整体式截面简支梁和连续梁的作用效应应符合下式要求：

$$\sum S_{bk,i} / \sum S_{sk,i} \geq k_{qf}$$

式中： k_{qf} ——横桥向抗倾覆稳定性系数，取 $k_{qf}=2.5$ ；

$\sum S_{bk,i}$ ——使上部结构稳定的效应设计值；

$\sum S_{sk,i}$ ——使上部结构失稳的效应设计值。

(二) 条文解读^[3-4]

规范条文将主梁整体倾覆的弯扭耦合变形和非线性运动简化，采用支座是否脱空和主梁是否发生无法恢复的转动两种特征状态来判断主梁的安全性。该方法简便易行，但却不是放之四海而皆准，有其局限性。

第一，条文对于可变作用中的汽车荷载规定不明确。根据JTG D60-2015《公路桥涵设计通用规范》中第4.1.3条^[5]，抗倾覆属于整体计算，应采用车道荷载，但是车道荷载适用于主梁的抗弯和抗剪验算，倾覆主要考虑的是主梁的扭转效应。同时，多是重车局部偏载引发主梁倾覆，由此车辆荷载更合适，但规范中的车辆荷载不属于重车。这说明汽车荷载与抗倾覆验算不匹配。第二，条文不适用于大

曲率弯桥。弯桥计算稳定或失稳效应时各力矩方向不同，应求矢量和，条文采用标量和，标量大于其各角度分量，求和后会对稳定和失稳两种效应放大，导致验算中弯桥内侧翻的稳定性系数绝对值相较于同等条件下的直桥偏大，外侧翻却偏小，弯桥曲率越大偏差越明显。评价大曲率弯桥的抗倾覆能力以内外侧翻中较不利的稳定性系数为标准，条文计算表明在同等条件下，弯桥外侧翻抗倾覆较直桥不利，而弯桥的结构自重分布相较于直桥偏离各条侧翻轴更远，能提供更大的稳定效应，其内外侧抗倾覆能力理论上均大于相应直桥，故条文中的效应计算不适用于大曲率弯桥（小曲率可按直桥近似计算）。

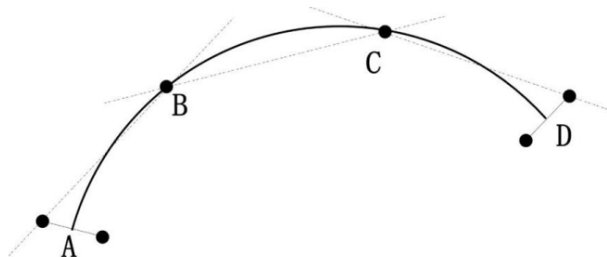


图1 大曲率弯桥

稳定性系数取2.5的合理性存疑。条文参考挡土墙和刚性基础的抗倾覆验算取2.5的安全系数，但主梁的抗倾覆与前两者明显不同。同济大学石雪飞建议取4.0的系数并得到了西南交通大学李乔的认同，说明该系数的取值仍有不同意见，单一的安全系数需要综合纳入多种因素并在实际应用中考虑修正。

（三）实例分析

参考近期湖北事故中的三跨连续钢箱梁桥，选取 $3 \times 30\text{m}$ 标准跨径的三跨连续钢箱梁桥，分四种情况对其倾覆进行对比分析，变量有支座布置方式、主梁轴线形式等，得到各类情况的抗倾覆变化规律。其中主梁截面特性如图2：

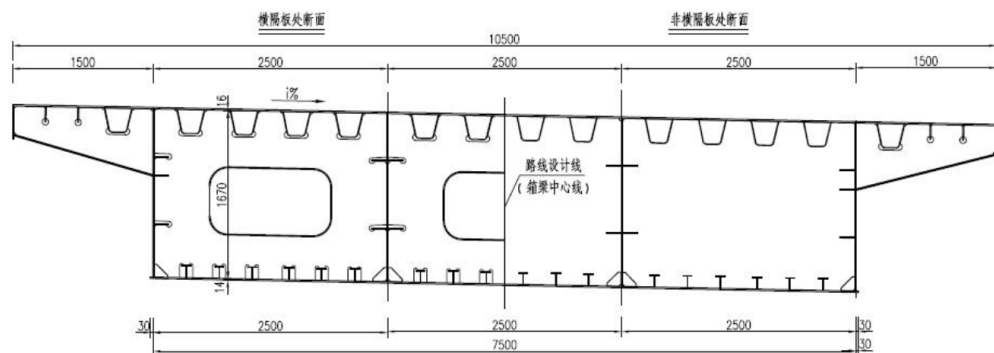


图2 钢箱梁标准横断面（mm）

本次汽车荷载采用JTG D60-2015《公路桥涵设计通用规范》^[5]第4.3.1条中的公路-I级车道荷载，计算跨径取30m， $P_k=320\text{kN}$ ， $q_k=10.5\text{kN/m}$ ，主梁横向布置两车道和一条应急车道，考虑两车道偏载的不利情况，两车道线偏离主梁轴线分别为0.75m和3.85m。栏杆和桥面铺装等计入二期恒载为70kN/m。

1. 联内双支座直桥

本示例中主梁左右对称，仅验算单边侧翻，失效支座为1-1，2-1，3-1和4-1，验算发现：联内支座横向间距3.4m为失效支座不出现负反力的临界宽度；联内支座横向间距2.5m时，失效支座的稳定性系数绝对值接近2.5，为临界状态。故联内支座横向间距大于3.4m可满足规范要求（如图3）。

2. 联中单支座直桥

本示例中主梁左右对称，故验算单边侧翻即可，失效支座为1-1和4-1，经验算得到：联端支座横向间距7.2m为失效支座不出现负反力的临界宽度；联端支座横向间距10m时，失效支座的稳定性系数均为临界值。桥宽总计10.5m，联端支座横向间距不能达到10m，故本例中联端双支座，联中单支座的布置形式不满足规范要求（如图4）。

3. 联中单支座斜桥

斜桥联端平行于斜边设置双支座，联中设单支座，斜角 30° 。支座在垂直于主梁轴线方向间距为11m（ $>10\text{m}$ ）时，左侧翻稳定性系数在支座1-2处最不利，为临界值，右侧翻稳定性系数在支座4-1处最不利，为临界值。计算表明同等条件下本例中的斜桥相对于直桥抗倾覆更不利（如图5）。

4. 联中单支座弯桥

弯桥轴线曲率半径为100m（大曲率），联端双支座横向间距为8.1m（ $<10\text{m}$ ）时，内侧翻稳定性系数在支座4-2处最不利，为临界值；间距为11.3m（ $>10\text{m}$ ）时，外侧翻稳定性系数在支座1-1处最不利，

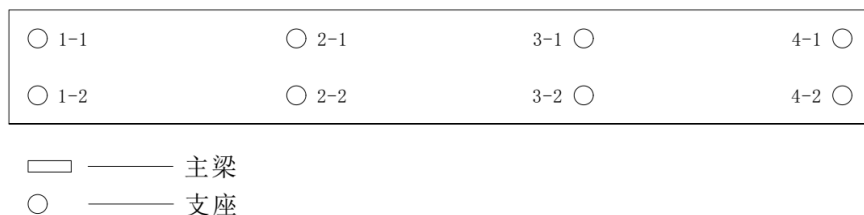


图3 联内双支座直桥

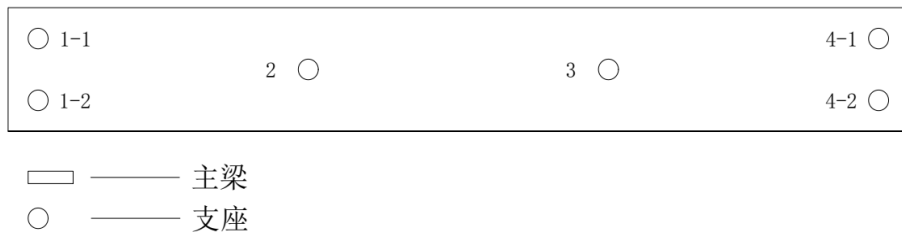


图4 联中单支座直桥

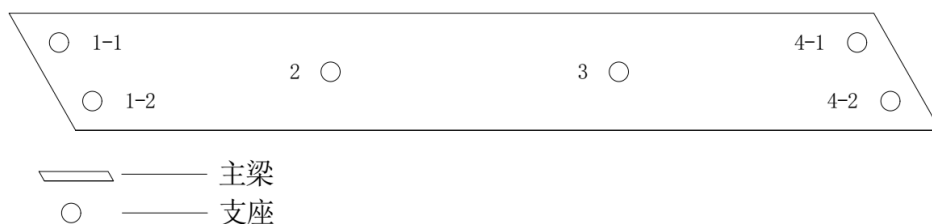


图5 联中单支座斜桥

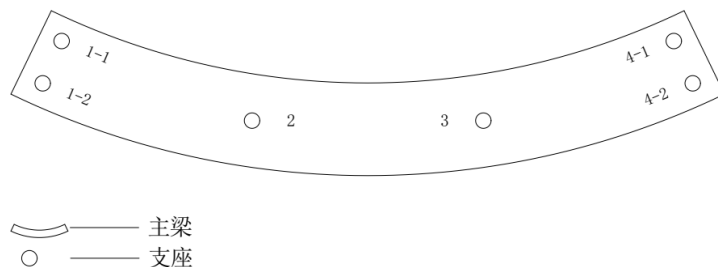


图6 联中单支座弯桥

为临界值。验算表明：同等条件下，大曲率弯桥外侧翻时稳定性逊于直桥，内侧翻时稳定性优于直桥，为条文谬误，实际工程应根据具体情况确定大曲率弯桥的抗倾覆安全（如图6）。

三、结论

本文对近年的公路梁桥倾覆事故进行整理研究，探讨了现行规范的合理性和适用性，并通过具体实例进行了对比分析。主要结论如下：

①公路梁桥整体倾覆的主要设计因素是联中双支座横向间距太小，甚至采用单支座设计；②JTG 3362-2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[2]能有效计算直桥（小曲率弯桥）的抗倾覆效应，也能定性保证大曲率弯桥抗倾覆安全，但无法有效计算大曲率弯桥的抗倾覆效应；③同等条

件下，3×30m连续钢箱梁桥抗倾覆能力由强到弱依次为：大曲率弯桥，小曲率弯桥，直桥，斜桥。

参考文献：

- [1]彭卫兵,李翠华.12.18湖北G50沪渝高速花湖互通匝道倾覆事故分析,2021,12,19.
- [2]JTG 3362-2018.公路钢筋混凝土及预应力混凝土设计规范[S].北京:人民交通出版社,2018:12,68,153-155.
- [3]李乔.李乔说桥-25:梁桥倾覆机理与受力特征,2020,01,10.
- [4]李乔.李乔说桥-38:独柱墩还能不能用? 2022,01,21.
- [5]JTG D60-2015.公路桥涵设计通用规范[S].北京:人民交通出版社,2015:26-31.