

谢颖川, 高静, 刘长玲, 刘迪, 2020. 移动荷载对桥梁动力响应的研究——以开裂预应力混凝土简支梁为例. 震灾防御技术, 15 (3): 510—518. doi: 10.11899/zfy20200304

移动荷载对桥梁动力响应的研究 ——以开裂预应力混凝土简支梁为例¹

谢颖川¹⁾ 高静²⁾ 刘长玲¹⁾ 刘迪³⁾

- 1) 河南工业职业技术学院, 城市建设学院, 河南南阳 473000
2) 华北理工大学, 建筑工程学院, 河北唐山 063210
3) 商丘师范学院, 建筑工程学院, 河南商丘 476000

摘要 混凝土桥梁在工作过程中会产生裂缝, 为分析移动荷载对开裂混凝土桥梁结构刚度的影响, 对开裂梁动力响应进行分析。建立简支 T 梁桥有限元模型, 并将移动荷载施加至有限元模型中。根据简支 T 梁桥破坏横向分布位置和强度的不同, 研究不同工况下各梁荷载横向分布及不同移动速度对裂缝扩展宽度的影响。结果表明, 数值模拟结果能较好地验证计算模型的准确性; 在较大的移动荷载作用下, 混凝土开裂, 导致结构刚度减小、位移增大; 随着移动荷载和速度的增加, 开裂时间增加, 结构刚度降低, 持续时间增加, 位移增大, 使结构响应呈现明显非线性。

关键词: 移动荷载 混凝土桥梁 动力响应 简支梁

引言

随着我国交通运输业的发展, 混凝土桥梁得到大规模应用, 但由此引发的安全问题及隐患逐渐增多。受车辆荷载、地震作用及其他荷载作用影响, 混凝土桥梁每时每刻均产生不同程度的破坏及裂化, 一旦受极限荷载作用或疲劳应力影响, 将导致桥梁突然坍塌, 发生严重的安全事故。

目前国内针对移动荷载作用下开裂混凝土桥梁的研究较少, 主要集中于桥体框架受损研究, 如刘宏伟(2019)研究了桥梁裂缝加固抗力和荷载效应对安全程度的影响, 龙关旭等(2018)采用综合评价体系建立桥梁承载力分析方法, 经薇等(2017)利用车辆桥梁耦合振动分析法对车辆桥梁结构动态响应特性进行模拟与分析。国外学者研究了桥梁裂缝对结构性能的影响, 如 Kim 等(2011)提出检测桥梁破坏的方法, 并采用简支梁模型进行数值模拟分析; Kong 等(2015)综合桥梁与车辆之间的相互作用, 分析冲刷荷载对桥梁的影响; Law 等(2008)分析车辆激励下时变荷载对混凝土桥梁的局部破坏; George 等(2017)研究列车负荷载对铁路桥应力的影响。

1 基金项目 河南省高等学校重点科研项目计划 (19A560018)

[收稿日期] 2019-06-11

[作者简介] 谢颖川, 男, 生于 1985 年。讲师。主要从事工程结构设计与施工研究。E-mail: pasy44@163.com

[通讯作者] 刘迪, 男, 生于 1983 年。讲师。主要从事建筑结构抗震、消能减震研究。E-mail: lutliudi@qq.com

为分析移动荷载对混凝土桥梁开裂的影响, 建立简支 T 梁桥有限元模型, 并将移动荷载应用于有限元模型, 验证模型的准确性。根据钢筋混凝土 T 束桥梁横向分布破坏位置和严重程度, 针对不同条件下各梁荷载横向分布情况, 通过改变移动荷载速度, 分析其对裂缝扩展程度的影响。研究结果对现有桥梁结构评估、改造和加固具有一定指导意义。

1 预应力混凝土开裂梁模型

1.1 结构动力分析模型

为分析移动荷载对开裂预应力混凝土简支梁的影响, 建立开裂预应力混凝土简支梁结构动力分析模型(陈代海等, 2017), 荷载作用下的内力计算示意图如图 1。

横向刚度不同时主梁变形与受力情况如图 2, 图 2 描述了 T 梁桥在横向连接方式不同时受荷载作用的情况, 其中 m 为横向分布系数 ($0.2 < m < 1$), mp 为中梁所承受的实际荷载, w_b 为中间主梁挠度, w_a 表示中间梁在承受集中荷载 ($m=1$) 时的主梁挠度, w_c 表示中间梁在承受分布荷载 ($m=\frac{1}{5}$) 时的主梁挠度。

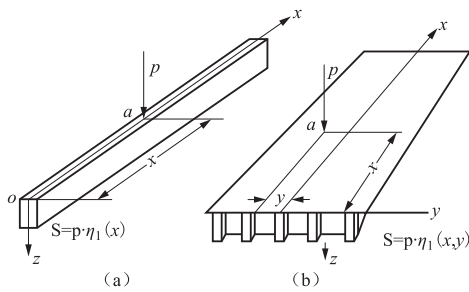


图 1 荷载作用下的内力计算示意图

Fig. 1 Calculation of internal force under load

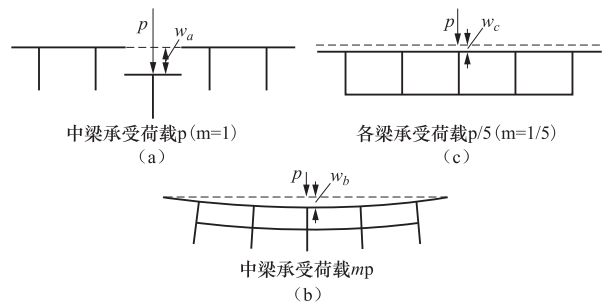


图 2 横向刚度不同时主梁变形与受力情况示意图

Fig. 2 Deformation and stress of main beam with different transverse stiffness

采用修正后的刚性横梁法进行分析, 荷载横向影响线坐标公式为:

$$\eta_{11} = \frac{I_1}{\sum I_i} \pm \frac{ea_1 I_1}{\sum a_i^2 I_i^2} \quad (1)$$

式中, I_1 为主梁抗扭惯性矩, a_i 为各主梁中心到桥梁之间的距离。

抗扭惯性矩为:

$$I_T = \sum_{i=1}^m c_i b_i t_i^3 \quad (2)$$

式中, b_i 、 t_i 分别为单个矩形截面的宽和高, c_i 为矩形截面抗扭刚度系数, m 为组成 T 梁截面的矩形总数。

1.2 裂缝接触分析方法

使用 ABAQUS 软件, 通过虚拟节点法精确模拟混凝土桥梁裂缝(王帆等, 2017), 主要模拟裂缝萌生和扩展过程, 以计算脆性或延性断裂问题。

第一个实际节点重叠的虚拟节点用于表示破坏单元的不连续性(朱劲松等, 2017)。如果单元未破坏, 每个虚拟节点将被限制为相应的实际节点。当组件被裂缝切断时, 破坏的组件被分割成两部分。每个组成环节的节点同时包含 2 种类型, 一类为实际节点, 一类为虚拟节

点,二者均与裂缝导向性有一定关联。每个虚拟节点不会被相应的实际节点绑定,可实现自主移动。根据线性弹性破坏力学原理和虚拟关节移动裂缝模型,模型化方法与基于 XFEM 的黏性碎片法在一定程度范围内存在较高的相似性,如果满足破坏基准,双方均使用虚拟节点表示破坏要素的不连续性。如果等价应变能源解放率超过临界应变能源解放率,实际节点会从对应的虚拟节点分离。破坏单元双方的表面会加上大小相等、方向相反的力以实现牵引,随着时间的推移,牵引力逐渐呈下降趋势,这是为了尽可能地避免产生发散与网格变形现象。

2 试验验证

本研究选取的桥梁(邓露等,2017)如图3所示,为钢筋混凝土T束桥梁。桥梁计算跨度为19.5m,主波束凸缘连接牢固,单片T束高1.4m、宽1.8m,共有5个横梁。主梁体和横向梁体混凝土强度等级为C40,增强材料选用HRB335。

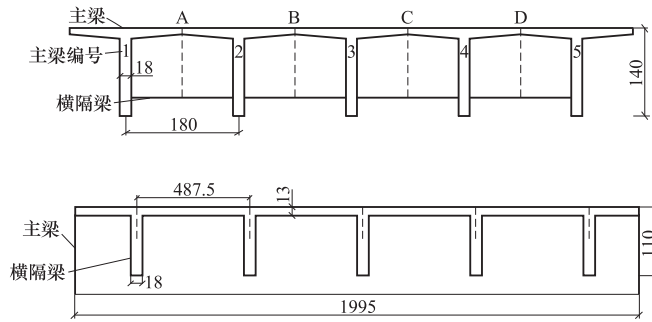


图3 桥梁横断面与主梁纵断面(单位:cm)

Fig. 3 Cross section of bridge and longitudinal section of main beam (unit:cm)

利用 ABAQUS 软件建立模型,如图4所示。



图4 桥梁有限元模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of bridge finite element model

将有限元计算结果与使用修正刚梁法获得的理论值进行对比,通过横向分布数值曲线一致性验证模型的合理性(图5)。

由图 5 可知, 主梁荷载横向分布数值与曲线契合度较高。计算结果表明, 所建模型与证明合理性的理论解构造基本相同, 且与模型关联的有限要素解析也能进行使用。

3 移动荷载作用下开裂梁非线性动力响应分析

ABAQUS 软件可用于模拟和分析 T 束桥梁各种形式的横向连接破坏。根据不同位置的横向连接破坏及 T 梁法兰连接破坏, 划分出不同的工作条件, 见表 1。第 1 类破坏 ZF 表示 T 梁翼缘连接处单独损伤, 第 2 类破坏 HL 表示横隔梁连接处单独损伤, 第 3 类破坏 ZF+HL 表示 T 梁翼缘连接处和横隔梁连接处均有损伤; A、B、C、D 表示图 3 中横向连接破坏位置, I、II、III、IV 表示工况类别。根据单纯支撑梁桥机械特性, 负荷最不理想的位置为跨中, 因此使用跨中移动负荷弯曲计算横向分布系数。根据非破坏模型, 改变节点连接模式, 可通过计算移动荷重横向分布系数判断破坏的影响, 并与未破坏情况进行比较, 观察破坏模型横向分布变化规律。由于本文模型为对称结构, 因此仅模拟分析梁 1、梁 2、梁 3。

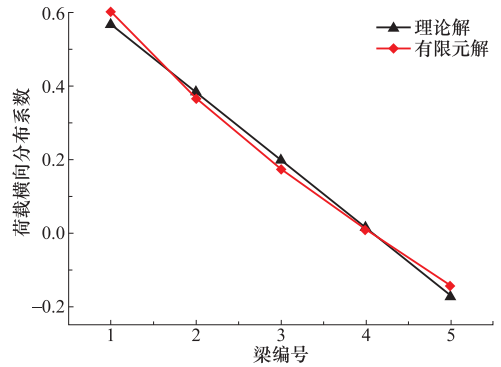


图 5 梁荷载横向分布对比曲线

Fig. 5 Comparison curve of transverse distribution of beam load

表 1 破坏编号

Table 1 Damage number

破坏形式	横向连接破坏位置			
	A	B	C	D
ZF	I-1	II-1	III-1	IV-1
HL	I-2	II-2	III-2	IV-2
ZF+HL	I-3	II-3	III-3	IV-3

3.1 梁横向分布数值变化

以 1 号梁为代表, 分析横向分布破坏后 T 束桥梁侧面束荷载横向分布情况, I、II、III、IV 类工况下的结果分别如图 6—9 所示。

由图 6 可知, 仅 T 型钢法兰连接破坏时, 1 号梁横向荷载分布系数变化不明显, 曲线几乎无破坏; 仅发生刻度盘连接破损时, 横向荷载分布系数会发生很大变化, 当移动荷载作用于 1 号梁时, 横向荷载分布系数显著增加 22.7%, 而 2、3、5 号梁数值明显下降, 最大减幅 38.46%。

破坏同时发生, 横向荷载分布系数较单独破坏膜片时略高, 未发生本质变化。当荷载作用于 4 号梁上时, 横向荷载分布系数较小, 与去年同期相比, 振幅变化较大, 但不具有代表性。概括地说, 在 I 类工况下, 如果对 1 号梁施加荷载, 其横向荷载分布系数增加; 如果对其他梁施加荷载, 1 号梁承载的负荷变小。

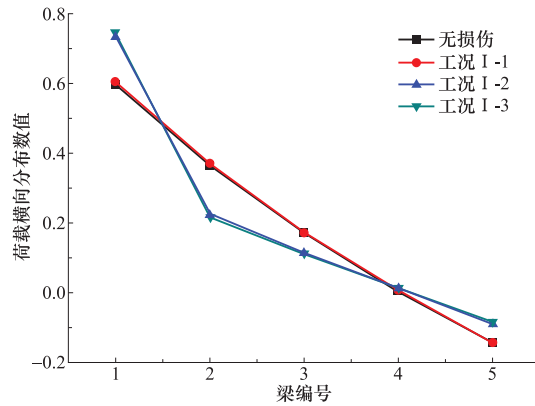


图 6 T 束桥梁侧面束荷载横向分布情况 (I 类工况)

Fig. 6 Comparison curve of transverse load distribution of main beam (class I working condition)

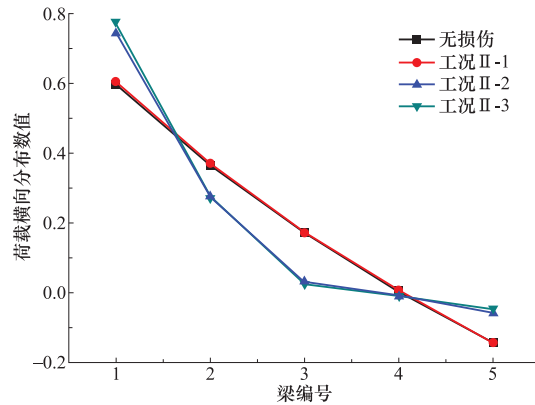


图 7 T 束桥梁侧面束荷载横向分布情况 (II 类工况)

Fig. 7 Comparison curve of transverse load distribution of main beam (class II working condition)

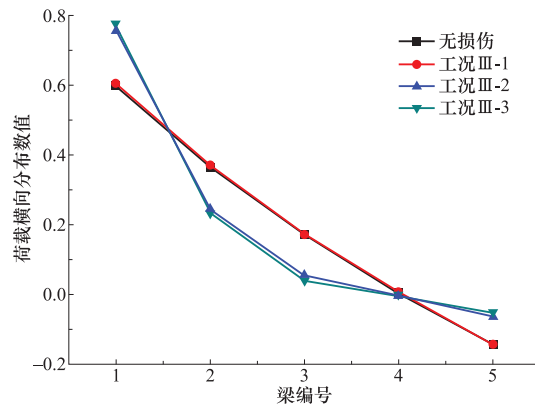


图 8 T 束桥梁侧面束荷载横向分布情况 (III 类工况)

Fig. 8 Comparison curve of transverse load distribution of main beam (Class III working condition)

由图 7 可知, 在 3 号梁上施加荷载后, 此时横向分布数值减幅由 I 类工况的 35.26% 急剧下降至 84.39%, 而 2 号梁承受的横向荷载下降趋势有所缓解, 减幅由 40.93% 升至 25.27%。

由图可知在 I 类工况下, 由于 A 位置破坏的发生, 阻碍了横向荷载由 2 号梁转移到 1 号梁, 从而导致分配给 2 号梁的荷载减小; 在 II 类工况下, 破坏位置为 B, 阻碍了横向荷载由 3 号梁到 1 号梁和 2 号梁的传递, 从而导致 3 号梁横向荷载分布系数减小。当荷载作用于 3、4、5 号梁上时, 1 号梁横向荷载分布系数接近于 0, 这表明 1 号梁基本不承受荷载, 当振动膜位于 B 位置时, 难以将荷载转移到 1 号梁上。因此, 破坏的数目恒定, 但破坏位置不同, 对横向荷载分布的影响不同。

由图 8 可知, 当荷载作用于 2 号梁上时, 1 号梁荷载横向分布数值增幅有所增加, 由 25.27% 升至 35.71%。当荷载作用于 3 号梁、4 号梁、5 号梁上时, 1 号梁横向荷载分布系数较工况 II 有所减小, 但仍接近于 0。随着破坏数量的增加, 2 号梁位于 2 个破坏点之间, 其承受的横向荷载无法传递到 1 号梁的情况较工况 II 严重。

此外, 在 II、III 类工况下, 当移动荷载作用于 1 号梁时, 1 号梁横向荷载分布系数为 0.775, 这意味着 1 号梁几乎承担了全部荷载, 不能与其他梁共同承受荷载。此时, T 束桥梁横向连接功能已在 1 号梁中消耗殆尽。

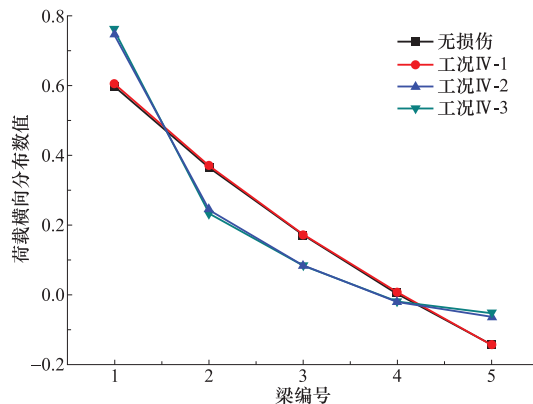


图 9 T 束桥梁侧面束荷载横向分布情况 (IV 类工况)

Fig. 9 Comparison curve of transverse load distribution of main beam (class IV working condition)

由图 9 可知, 在 IV 类工况下, 除作用于 4 号梁的荷载外, 作用于其他梁的横向荷载分布系数变化幅度略低于 III 类工况下, 当荷载作用于 4 号梁上时, 1 号梁横向荷载分布系数减小幅度由 III 类工况下的 142.86% 增至 400%, 这表明 C 处的破坏阻碍了荷载传递。1 号梁在 III 类工况下仅有一处破坏导致产生了位移现象, 更能证明破坏位置的变化会影响 1 号梁侧面束横向荷载分布的结论。

3.2 梁横向破坏的影响

由上述分析可知, 当横向连接破坏后, 梁横向荷载分布系数受移动荷载的影响较大, 具体如下:

(1) 横向连接被切断后, 侧面束横向荷载分布系数与未破坏状态相比发生很大变化, 当侧面束梁自身产生负荷时, 横向荷载分布系数大幅度增加, 出现“单梁体支撑力”状态, 对结构性能产生严重影响。

(2) 只有当 T 型凸缘连接受损时, 破坏对横向荷载分布系数产生的影响较小, 但在水平

分布曲线接近无损曲线的情况下, T 型凸缘连接不会过多影响桥梁服务功能; 当膜片与 T 梁法兰连接及膜片发生破坏时, 横向荷载分布系数的变化更明显, 这表明膜片连接是否完好对膜片横向变化有较大影响。隔板破坏时, 应小心处理。

(3) 横向连接破坏后, 仅侧梁横向分布系数有所增加, 而其他梁某些部分(主要位于 2 号梁)横向荷载分布系数略有增加, 但整体趋势为减小。特别是在荷载作用于 4 号梁的情况下, 4 号梁横向荷载分布系数在各种工况下显著减小, 尤其是正值变为负值, 导致其机械性能发生变化。

3.3 移动荷载速度对开裂梁非线性动力响应的影响

根据驾驶员外部和主观因素的变化, 车辆以不同速度行驶在桥上, 进而导致裂缝发展速度产生差异。首先对 3 号梁跨度预先设定裂缝数值, 分别以 20km/h、40km/h、60km/h 和 80km/h 的速度通过桥梁, 建立模型分析移动荷载速度的影响。

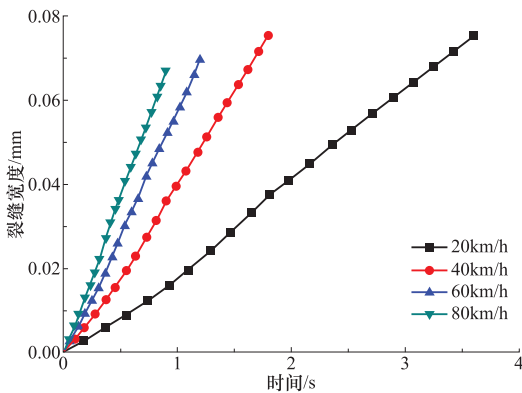


图 10 不同速度对裂缝扩展的影响

Fig. 10 Effect of different velocities on fracture propagation

由于每种速度通过电桥的时间不同, 因此将时间平均分为 20 个相等的部分。分别取每个时间节点在梁底跨中位置处的裂缝扩展宽度, 绘制不同速度下裂缝宽度曲线, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 当移动荷载为 20km/h 时, 裂缝扩展速度最大, 裂缝宽度越来越小。这是因为车速越慢, 车辆与桥梁之间产生的接触越多, 且移动荷载可完全作用于桥梁上, 从而充分产生裂缝。在裂缝扩展方面, 低速车辆副皮带的开裂桥效应较高速车辆高。同时, 车辆的

低速驾驶对交通顺畅的流动产生不利影响。低行驶会大幅度提高发生车辆追尾和其他交通事故的可能性, 需相关管理部门合理规划桥速, 极大程度上降低低速行驶带来的道路安全风险性。

4 结论

本文以开裂预应力混凝土简支梁为例, 通过分析桥梁在移动荷载作用下的位移变化, 研究移动荷载和移动速度对桥梁动力响应的影响, 主要结论如下:

(1) T 梁桥横向荷载分布系数受膜片连接破坏的影响较大, 会引起桥内力重新分配。这种影响的最严重后果是当荷载作用于 1 号梁时, 横向荷载分布系数最大值可达 0.762。此时, 1 号梁和 2 号梁之间的横向连接已经用尽, 1 号梁可能发生横向翻转。

(2) 在横穿桥梁移动荷载速度不同的情况下, 低速对裂缝扩展的影响较大, 高速的影响较小。因此, 在桥梁实际使用过程中, 需注意超速和低速行驶的风险。桥梁管理部门须根据实际情况合理设定桥梁速度, 只有科学合理的管控举措才有利于桥梁的长期使用。

(3) 当 T 梁法兰和隔板均破坏时, 横向荷载分布系数仅在分区破坏情况下略微增加, 由此引起的变化与隔板破坏相比通常不足 10%。这进一步表明, 横向荷载分布系数的变化主要取决于隔板是否完好。

参考文献

- 陈代海, 李整, 刘琼等, 2017. 公路桥梁 2 种车桥耦合振动分析方法的对比研究. 铁道科学与工程学报, **14** (7): 1449—1456.
- 邓露, 屈夏霞, 王维, 2017. 考虑车桥耦合振动的钢梁桥腹板间隙的疲劳分析. 中外公路, **37** (4): 89—95.
- 经薇, 李松, 李强等, 2017. 多车车桥耦合振动特性研究. 科学技术与工程, **17** (6): 111—116.
- 刘宏伟, 2019. 大跨度预应力混凝土桥梁裂缝加固监测仿真. 计算机仿真, **36** (2): 400—403, 457.
- 龙关旭, 刘修平, 唐龙龙等, 2018. 混凝土桥梁承载力综合评价体系研究. 中国安全科学学报, **28** (10): 162—168.
- 王帆, 吴红林, 2017. 横梁效应对车-桥耦合振动的影响研究. 重庆交通大学学报 (自然科学版), **36** (4): 7—11.
- 朱劲松, 李俊驰, 2017. 基于 DVV 算法的车桥耦合振动响应非线性规律研究. 合肥工业大学学报 (自然科学版), **40** (10): 1376—1381, 1415.
- George R. C., Posey J., Gupta A., et al., 2017. Damage detection in railway bridges under moving train load. In: Barthorpe R., Platz R., Lopez I., et al., eds., Model Validation and Uncertainty Quantification, Volume 3. Cham: Springer, 349—354.
- Kim J., Lynch J. P., Lee J. J., et al., 2011. Monitoring of vehicle-bridge interaction using mobile and static wireless sensor networks. In: Proceedings of the SPIE 7981, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011. San Diego: SPIE, 79811J.
- Kong X., Cai C. S., Kong B., 2015. Damage detection based on transmissibility of a vehicle and bridge coupled system. Journal of Engineering Mechanics, **141** (1): 04014102.
- Law S. S., Li J., 2008. Condition assessment of a bridge structure under moving vehicle load including uncertainties. In: Proceedings of Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction. Taipei, China: National Taiwan University.

Research on Influence of Moving Load on Dynamic Response of Bridges under Different Moving Load Values and Different Moving Speeds——Taking Cracked Prestressed Concrete Simply Supported Beam as An Example

Xie Yingchuan¹⁾, Gao Jing²⁾, Liu Changling¹⁾ and Liu Di³⁾

1) Henan Institute of Industry and Technology, College of Urban Construction, Nanyang 473000, Henan, China

2) School of Civil Engineering and Architecture, North China University of Technology, Tangshan 063210, Hebei, China

3) Shangqiu Teachers College, School of Architecture and Engineering, Shangqiu 476000, Henan, China

Abstract Concrete bridges may have cracks during the working process. In order to analyze the effect of moving loads on the structural stiffness of concrete bridges with cracks, the dynamic response of cracked beams during moving loads is analyzed. A finite element model of a simply supported T-beam bridge is established, and a motion load is applied to the finite element model. According to the different locations and strengths of the transverse damage distribution of the simply supported T-beam bridge, the transverse distribution of the load of each beam under different working conditions and the influence of different moving speeds on the crack propagation width were studied. The results show that the simulation results can well verify the accuracy of the simulation model; under large moving loads, concrete cracks will open, resulting in a decrease in structural stiffness and an increase in structural displacement; with the increase of the motion load value and velocity, the crack opening time will be longer, the structural stiffness will be reduced, the duration will be longer, and the increase in displacement will be greater, which makes the structural response appear significantly non-linear.

Key words: Moving load; Concrete bridge; Dynamic response; Simply supported beam