

# 车桥耦合扰动特征对混凝土性能影响研究

符策源<sup>1</sup> 王立伟<sup>2</sup>

1. 海南省交通工程建设局, 2. 交通运输部公路科学研究所

**摘要:** 利用三维地震扰动平台调整振动频率、振幅的扰动参数, 模拟行车荷载作用下新旧桥梁拼宽处的扰动特征, 探明车桥耦合扰动变形对混凝土拌合物工作性能及力学性能的影响。研究表明: 振动扰动后的混凝土拌合物粗集料颗粒会随着振动时间的增加而逐渐趋于稳定, 扰动对混凝土颗粒分布影响时段为混凝土未硬化期间, 其中扰动振幅的影响因子最大。持续的振动扰动会引起混凝土内部出现损伤, 通过抗压强度与黏结强度的衰减规律来看, 扰动损伤发生在4-16h期间, 也即混凝土初凝-不足以抵抗扰动破坏的硬化早期。

**关键词:** 桥梁桥面拼宽; 车桥耦合扰动; 混凝土离散系数; 性能与强度损伤

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.13.028

## 一、前言

桥面铺装过程中, 现浇混凝土从成型一直伴随着桥梁扰动。其中行车荷载作用造成桥梁扰动, 进而影响混凝土性能影响问题<sup>[1-3]</sup>。David Manning在AASHTO的研究指出, 行车荷载作用对桥梁振动的形式、桥面铺装混凝土破坏形式以及桥梁振动形式之间的关系进行讨论。Shradhdakar Harah设计了缩尺新旧桥梁拼宽的简支梁, 研究了钢筋与混凝土黏结力、受振前后修补混凝土的抗压强度等两项指标评价受振后混凝土材料的结构性能差异, 研究认为混凝土材料受到振动后, 影响混凝土自身强度及降低了保护层较薄的钢筋与混凝土之间的黏结强度。国内一些学者<sup>[4-5]</sup>根据工程应用场景的不同, 研究了铁路、公路不同扰动工况下, 对混凝土受扰阶段的确定方法、振动对新浇筑混凝土力学性能产生的影响及抗扰动混凝土的设计与配制进行了的试验研究。通过上述研究可以看出, 混凝土早龄期(浇筑至不具备抵抗扰动破坏强度的时间段)收到扰动作用时, 混凝土的性能变化并未给出明确的结论。基于此本文重点研究振动扰动发生在混凝土凝结硬化不同阶段的影响, 具体为研究振动扰动发生在混凝土凝结硬化初期(初凝前)对混凝土内部均匀性变化(离析性能)的影响、力学性能影响。

## 二、试验方法的建立

### (一) 模拟车桥耦合振动特征的确定

车桥耦合振动特征, 可归结为行车荷载作用下桥梁结构的受迫振动, 类似单自由度系统在简谐荷载作用下的振动<sup>[4]</sup>。车辆行驶在桥面, 行驶位置不断发生变化使荷载和位移位置发生变化, 行车荷载对桥梁的作用形式表现为动应变, 应变是呈周期性变化, 这可理解为车辆荷载迫使桥梁的简谐振动。李国豪<sup>[5]</sup>等人认为桥梁震动是因为一种移动荷载在多自由度的受迫振动。结合国内外学者<sup>[6-7]</sup>相关研究成果, 本文利用可调解振动频率、振幅、振动时间参数模拟车桥耦合扰动。

### 1. 振动频率及振动幅度

振动固有振动频率可采用理论计算和动载试验的方法<sup>[7-8]</sup>, 根据王潮海<sup>[7]</sup>应用车桥耦合的方法计算了跨径10~40m范围的简支梁桥前三阶振动的固有频率大小, 桥梁结构的固有频率随着阶数不断增加, 一阶基频一般在2~10Hz之间; 根据瑞士联邦材料试验和研究实验室EMPA在对226座各类公路梁式桥进行动载试验后, 得到了桥梁一阶基频与跨径之间的经验回归公式1。按EMPA提供的回归公式, 中小跨径简支梁桥简支梁基频范围在2Hz~7Hz之间。

$$f = 90.4 \cdot l^{-0.933} \quad \text{公式 1}$$

$f$  桥梁一阶基频,  $l$ ——梁式桥跨径 (m)

因此, 常见中小跨径简支梁桥, 其固有振动频率范围一般在 2Hz~10Hz 之间; 应用车桥耦合的方法计算了跨径 10~40m范围的简支梁桥前三阶振动的固有频率大小常见中小跨径简支梁桥, 一般跨中位置最大动挠度在1mm~10mm之间。

### 2. 振动时间

模拟振动扰动的持续时间对混凝土的影响较为重要, 常见的振动方式有两种, 可分为间歇振动和持续振动。持续振动的特点主要是振动从混凝土拌合物浇筑后开始计算, 持续到混凝土具有抵抗扰动破坏的强度。间歇振动的特点主要是振动从混凝土凝结硬化过程的某一时刻开始, 振动持续2min-10min时间后停止。两种扰动方式都能模拟车桥耦合作用下桥梁扰动特征。结合公路现场条件及试验的目的, 持续振动更符合大交通量行车特征, 混凝土从拌合物可塑状态至凝结硬化过程中都存在扰动和变形, 因此持续振动方式比较符合现场的状况, 本文采用持续振动的方式。

### (二) 混凝土拌合物扰动均与性表征方法

Sandor Popovics 提出了离析系数表征混凝土均匀性的方法, 并通过离析系数大小判断混凝土试件的离析程度。离析系数(SF)按式2表示。Sandor Popovics提出的离析系数(SF)没有确定振动密实的判定状态, SF大小判断混凝土试件的离析程度。

$$SF = \frac{M_t}{M_b} \quad \text{公式 2}$$

$M_t$ : 下半部粗集料含量;  $M_b$ 上半部粗集料含量

### (三) 扰动对混凝土力学性能及新旧黏结性能试验方法

一般认为扰动在混凝土初凝至终凝阶段产生不利影响, 主要表现为振动使得混凝土内部出现微裂纹。还有学者认为, 强度的衰变与离析系数相关, 认为离析系数的临界点是1.3左右。研究行车荷载作用下桥梁振动扰动对修复混凝土性能影响的主要指标是新旧混凝土黏结面的强度。本文利用混凝土劈裂强度作为新旧界面黏结

表1 试验用配合比设计

试件编号	水泥	砂	10-20	5-10	水	高性能减水剂	抗扰动剂	水灰比（水胶比）	砂率	坍落度
C50普通砼	490	757	827	209	151	7.35	0	0.31	42%	200mm
掺某厂家抗扰动剂C50砼	490	757	827	209	151	7.35	24.5	0.31（0.29）	42%	190mm
RH抗扰动剂C50砼	490	757	827	209	151	7.35	24.5	0.31（0.29）	42%	190mm

强度的评价方法。

(四) 试验方案及结果

1. 测试水泥混凝土的配合比设计

基于公路桥面铺装用混凝土设计强度等级多为C50，坍落度180-220mm的工程实际，本文选用普通C50混凝土作为基准混凝土，选用市场购买的某厂家抗扰动剂及RH型抗扰动剂按照水泥质量5%（内掺）的混凝土作为两个对比组，比较三种混凝土抵抗扰动的工作性能及力学性能。配合比见表1。

2. 试验参数的选取

本文模拟试验的目的是通过分析振动扰动在混凝土拌合物逐步硬化全阶段的损伤过程，该模拟试验中的振动持续时间划分为水泥混凝土流塑性阶段、凝结阶段、早期硬化阶段（具有一定强度但不足以抵抗扰动破坏），三个阶段混凝土材料具有不同的形态性能。因此，需要量化不同扰动特征下的混凝土受扰后性能的变化，指导相关抗扰动材料及施工工艺。综合考虑到室内模拟设备的扰动制式，本文中室内模拟试验所选用的振动频率为 3hz、8hz，用以模拟不同交通量带来的扰动差异；振幅的选取3mm、5mm、10mm表征不同桥梁类型的扰动变形。

三、试验结果与分析

(一) 扰动对混凝土拌合物离散系数的影响

通过Sandor Popovics提出的离析系数（SF）大小判断混凝土试件的离析程度，以C50流态混凝土为研究对象，比对了基准C50混凝土、TG抗扰动材料混凝土、RH抗扰动材料混凝土。在模拟桥梁扰动条件为：扰动频率

频率3hz-8hz、扰动振幅3mm-10mm行车边界下，历时5h的混凝土离散程度。

由图1试验结果表明：不同混凝土受到不同振动能量振动后，离析系数随不同振动时间的变化情况。结合每一种振动能量，混凝土离析系数变化并不是随着振动时间的增加不断增大。当振动时间达到某一时刻后，受振混凝土离析系数不再随振动时间变化而变化。试验结果表明：当基准C50混凝土在振动时间大于3.5小时，基准C50混凝土离析系数不再明显增加；TG抗扰动混凝土，在振动时间为4个小时左右，离析系数趋于平衡；RH抗扰动混凝土，在振动时间为3个小时左右，离析系数不再明显增加，说明混凝土拌合物成型后至初凝前受到振动的混凝土，其离析程度逐渐趋于稳定状态。通过振动能来看，三种混凝土在8hz，10mm振幅的经时扰动破坏最大，在该振动制式下，通过对比三种混凝土的离析系数发现，普通混凝土离析系数最大为1.45，TG抗扰动混凝土次之为1.35，RH抗扰动离析系数最小为1.29。抗扰动剂混凝土更快的趋于稳定，且离散系数较基准C50混凝土小，说明抗扰动剂具有一定的抗扰动特性。

为弄清振动能量与混凝土经时离散系数关系，比较受到不同振动能量振动后，其最大离析系数变化情况。通过图1可以看出，最大离析系数的变化并不是随着振动能量的增加而不断增加。当振动能量达到某一值后，最大离析系数将不发生明显变化。学者认为混凝土的离析系数小于1.33时，具有较好的混凝土均匀性能。按照该规律分析，RH抗扰动在振动能量是 10mm，8hz时离

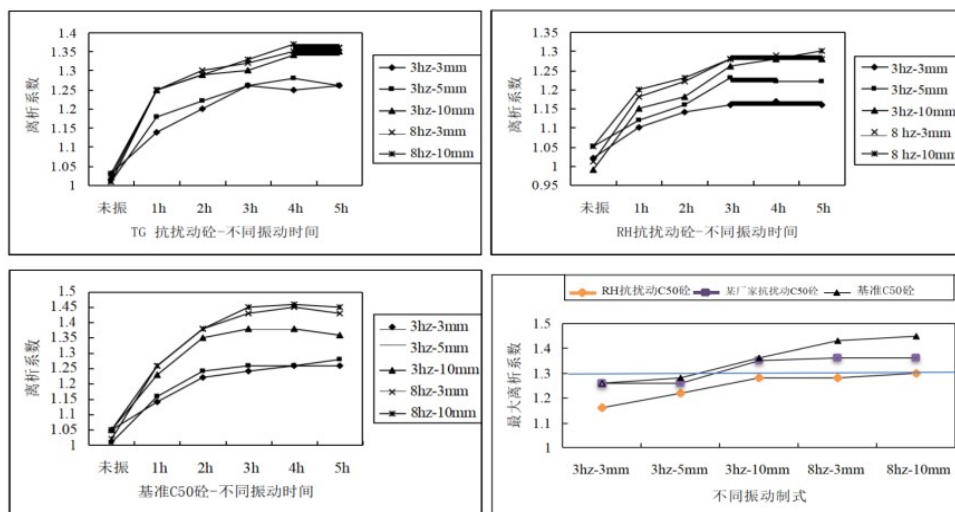


图1 不同扰动制式下混凝土的离散性能变化

析系数让小雨1.33, 该混凝土应还能抵抗更大的振动能量; TG抗扰动混凝土在振动能量为3hz, 6mm时, 超过了1.33, TG混凝土可承受的振动能量约为6mm; 普通混凝土在5mm, 3hz时离析系数达到1.33, 扰动剂的掺入使得混凝土集料分散性较为均匀。

(二) 扰动对混凝土力学性能的影响分析

测试了扰动振动与变形对不同扰动剂混凝土力学性能的影响, 采用振动制式在 8hz、10mm最为不利条件, 监测混凝土经90秒、1h、4h、10h、16h、24h持续振动的抗压强度及黏结强度变化, 以探明扰动破坏的规律。

1. 扰动对混凝土抗压强度的影响分析

模拟振动扰动一直伴随混凝土的初凝、终凝、早期硬化期间, 为弄清扰动破坏发生的时机, 通过调整扰动时间的长短, 测试成型混凝土的抗压强度。通过图2得知, 随着扰动的持续, 三种混凝土抗压强度整体出现衰减, 说明扰动造成了混凝土的内部损伤。从三种混凝土抗压强度发展曲线来看, 扰动初期混凝土没有初凝前, 扰动对混凝土的强度没有损耗, 甚至提高了混凝土的强度; 当扰动持续至4h-10h, 随着水化热的不断进行, 混凝土此时经历初凝-终凝的过程, 从强度降低的趋势来看, 此时振动扰动能量会造成修复混凝土的内部微观损伤。这种损伤随着扰动持续至24h进一步加大。

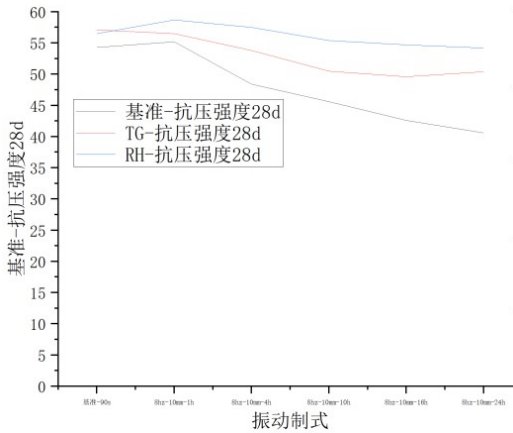


图2 振动制式对混凝土抗压强度的影响

2. 扰动对新旧混凝土界面黏结性能影响分析

为进一步弄清持续扰动对混凝土黏结强度的影响规律, 测试了振动制式为 经90秒、1h、4h、10h、16h、24h持续振动下的黏结强度变化。通过测试发现该工况下受扰混凝土黏结强度(图3)可知: 黏结强度与抗压强度的整体发展规律相同, 随着扰动的持续呈现强度下降的趋势, 也即持续的扰动对混凝土造成了不同程度的扰动破坏, 但三种混凝土抗受扰的程度不一。扰动破坏发生在4-24小时期间, 也即混凝土在经历了初凝-终凝-早期强度形成期间。16h后混凝土具有抵抗扰动破坏的强度后, 扰动破坏也随之消失。

通过三种不同混凝土黏结强度的衰减来看, 扰动破坏对普通混凝土的损耗较大, 高达1.1MPa, TG 抗扰动混凝土次之, RH-抗扰动混凝土最小, 抗扰动材料的掺入具有一定抵挡扰动破坏的功效。

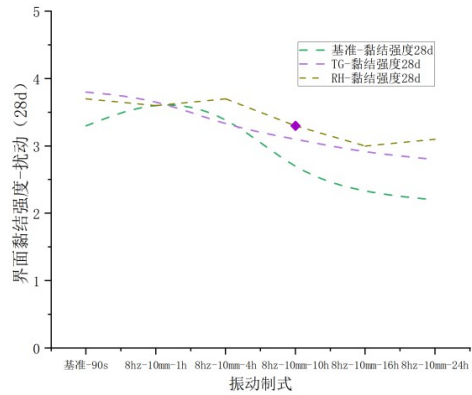


图3 扰动对黏结强度的影响

四、结论

本文模拟了车桥耦合扰动是否会引混凝土材料内部结构变化, 进行了探讨。试验结果表明持续的振动和扰动变形能引起混凝土集料颗粒分布不均及强度降低的问题。文中在5种不同振动制式下, 测试了三种不同混凝土材料。分析了振动时间, 振动幅度和频率等因素对新成型混凝土离析程度变化的影响规律。得出如下结论: 1) 振动扰动后的混凝土拌合物离析程度会随着振动时间的增加而逐渐趋于稳定, 扰动对混凝土颗粒分布影响时段为混凝土未硬化期间, 其中扰动振幅的影响因子最大。2) 持续的振动扰动会引起混凝土内部出现损伤, 通过抗压强度与黏结强度的衰减规律来看, 扰动损伤发生在4-16h期间, 也即混凝土初凝-不足以抵抗扰动破坏的硬化早期。

参考文献

[1] 赵伟. 旧桥加宽桥面接缝处纵向裂纹的成因与防治[J]. 交通标准化, 2005 (7): 34-36.  
 [2] 潘慧敏, 潘会滨, 赵庆新. 车桥振动对新浇筑混凝土性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (02): 449-452+457.  
 [3] 张亚辉. 结构动力学基础[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2007. 5-55.  
 [4] 苏木标. 提速列车荷载作用下车桥耦合振动与桥梁振动控制研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.  
 [5] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992. 301-338.  
 [6] 王潮海. 车辆荷载对公路桥梁结构的冲击力研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
 [7] 李淑芬. 带翼小箱梁桥荷载横向分布计算分析及其试验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2007.  
 作者简介: 符策源, 男, 1974.06, 海南省交通工程建设局, 高级工程师, 主要从事道路及桥梁工程建设和管理工作。  
 通讯作者: 王立伟, 男, 1991.01, 交通运输部公路科学研究所, 助理研究员, 主要从事公路工程科研及施工技术应用工作。