

车桥耦合振动对早龄期混凝土性能影响的研究进展

杨军^{1,2}, 刘立^{1,2}, 张高展^{1,2}, 丁庆军³, 赵明宇⁴, 陈冬冬³

(1. 先进土木工程材料安徽省重点实验室, 合肥 230022; 2. 安徽建筑大学材料与化学工程学院, 合肥 230601;
3. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070; 4. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 沈阳 110168)

摘要: 桥梁加固或拓宽通常采用半幅施工、半幅行车模式施工, 新浇筑混凝土不可避免会遭受车桥耦合振动影响, 导致其力学性能和耐久性降低。本文归纳整理了国内外各类桥梁的振动参数和实验室模拟方法, 分析了车桥耦合振动对混凝土离析程度、力学性能、界面粘结与裂缝萌生的影响, 探讨了车桥耦合振动导致组分迁移、孔结构劣化和界面损伤的破坏机理。在此基础上, 总结了车桥耦合振动下缩短混凝土受扰时间、增强其韧性和提高自愈能力等调控措施。为车桥耦合振动条件下混凝土性能调控提供理论依据, 对桥面维修加固中混凝土设计、制备与养护具有重要参考价值。

关键词: 车桥耦合振动; 振动特征; 性能劣化; 微结构演变; 调控方法

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)08-2920-15

网络出版时间: 2026-07-15



近年来, 中国桥梁工程建设规模不断扩大。目前中国桥梁数量已达到 100 万座, 占全球桥梁数量 60% 以上^[1-3]。早期钢桥面铺装普遍采用沥青混凝土或普通混凝土下面层, 随着使用年限的增加, 该铺装层易出现耐久性不足和老化的问题, 如沥青层损坏^[4]、钢桥面疲劳开裂^[5]、混凝土结构裂缝等, 这些病害会影响桥梁的承载能力和使用寿命。此外, 早期桥梁的设计标准较低, 可能无法满足当前的交通量和荷载要求。上述因素使得桥梁的加固和拓宽在国内屡见不鲜。桥面维修和扩建会占用路面空间, 限制车辆通行, 从而对交通造成显著影响。在实际工程中, 为了加快桥梁施工, 缩短建设周期, 不可避免会存在半幅施工、半幅行车的情况(图 1a)。如图 1b 所示, 在该施工方式下, 桥面铺装混凝土或钢筋混凝土梁会受到行车荷载的动力作用^[6]。当车辆行驶在桥梁上时, 车辆与桥梁通过轮轨相互作用, 形成的动态耦合振动即为车桥耦合振动, 该振动作用在公铁两用桥梁中尤为显著。

混凝土硬化阶段是其强度形成的重要时期。微

观尺度上, 混凝土遇水后经历了水泥矿相溶解, 水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和氢氧化钙等水化产物形成、相互搭接并填充孔隙的过程^[9]。掺入矿物掺合料的浆体会发生火山灰反应, 形成二次水化产物从而进一步提高其密实度。在混凝土硬化期间, 外界振动必然会影响到浆体中水分和胶凝材料分布、水化产物间搭接, 从而影响到浆体的胶结和混凝土性能发展。近年来, 学者们开展了大量的研究工作, 探索车桥耦合振动下普通混凝土和超高性能混凝土(UHPC)微细结构和性能的演变, 也提出了相应的性能调控方法。因此, 本文将结合近年来该领域的研究与实践经验, 从车桥耦合振动特征、车桥耦合振动模拟方法、车桥耦合振动对混凝土性能的影响机理及性能调控 4 个方面, 综述国内外相关的研究进展, 并展望未来研究方向。

1 车桥耦合振动特征及实验室模拟

车桥耦合振动特征的准确获取对其实验室模拟研究至关重要, 本文总结了不同类型桥梁的振动形式和波形特征, 及其各部位差异, 列举了现有研

收稿日期: 2025-08-15。 修订日期: 2025-10-24。

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20149, 52478229); 安徽省高校优秀青年科研项目(2022AH030036); 安徽建筑大学青年教师培养行动项目(YQZD2024022)。

第一作者: 杨军(1993—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 丁庆军(1962—), 男, 博士, 教授。

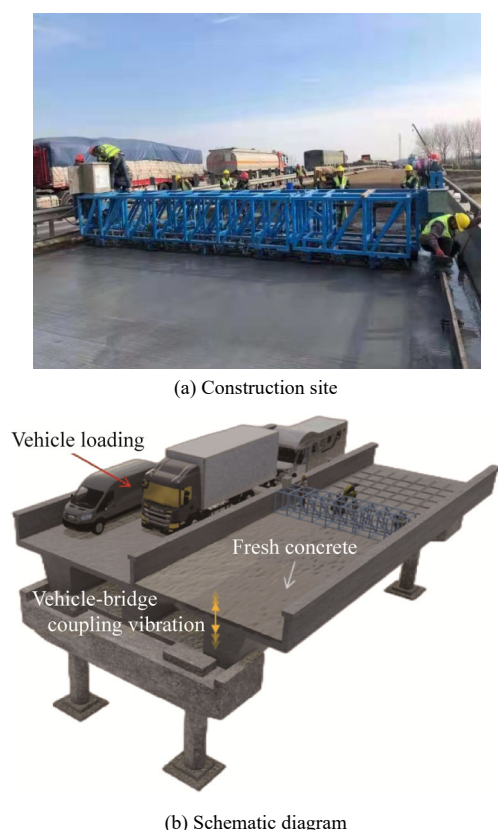
Received date: 2025-08-15. Revised date: 2025-10-24.

First author: YANG Jun (1993—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: jyang017@126.com

Correspondent author: DING Qingjun (1962—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: Dingqj@whut.edu.cn

图 1 车桥耦合振动^[7, 8]Fig. 1 Vehicle-bridge coupling vibration^[7, 8]

究中车桥耦合振动模拟装置的振动原理。最后, 在此基础上总结合适的模拟振动参数。

1.1 车桥耦合振动特征

桥梁自身是一个典型的连续弹性结构, 在受到外界激励时会产生周期性振动, 这种振动会沿结构传播, 就像波纹在水面上传播一样, 具有周期性规律, 故桥梁振动本质上是一种波动现象, 能通过数学模型建立其波动方程(正弦波、余弦波和指数波等)^[10, 11]; 桥梁振动多以竖向振动为主导, 呈正弦类波动形式, 其波形特征通常以频率(反映单位时间内振动次数)和振幅(反映响应强度)组合成某一时刻的位移函数表征[式(1)]^[12, 13]。

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \phi) \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 为位移; A 为振幅; f 为频率; t 为时间; ϕ 为常数。

此外, 还可对该位移函数进行数学推导, 以峰值粒子速度(PPV)和加速度(a)表达桥梁的振动情况[式(2)和式(3)]^[14]。

$$\text{PPV}(t) = A \cdot 2\pi f \cdot \cos(2\pi ft + \phi) \quad (2)$$

$$a(t) = -A \cdot (2\pi f)^2 \cdot \sin(2\pi ft + \phi) \quad (3)$$

何欢等^[15]在九座桥梁上开展车桥扰动监测(车

辆均限速 40 km/h), 确认跨中振动幅值高于 1/4 与 3/4 处, 其频率介于 2.33~10.69 Hz 之间, 振幅高达 1.65 mm。Hong 等^[16]对圣水大桥(跨长度 30.0 m、宽度 19.4 m)拓宽时跨中心与边缘同步监测, 发现振动频率集中在 2.50~5.00 Hz, PPV 超过 0.65 cm/s, 表明两者均受到明显干扰; 同时监测结果表明, 车桥耦合作用下桥梁振动呈现显著的空间非均匀性, 跨中部位由于一阶模态响应(桥梁结构自身固有频率下的振动响应)最强, 通常为振幅最大区域; 桥梁两端及拼接缝等边界位置因连接状态差异或结构不连续性, 易诱发局部扰动或共振现象, 同样会产生较强的车桥耦合振动作用^[17]。例如, Wang 等^[18]通过在旧桥(宽度 1.6 m) 1/4、2/4、3/4 位置的布点监测, 发现频率区间为 1.19~4.67 Hz, 振幅最大值为 2.09 mm, 跨中位置振动最显著; Chen 等^[19]研究沈陕高速公路西段淡水河大桥(长度 25.0 m)拼接缝, 提出新旧桥结构未连接前的振动解耦显著(车辆和桥梁相互独立振动), 模拟分析结果表明桥梁固有频率为 4.32 Hz, 变形控制在 3.00 mm 以内, 表明拼接处在施工期间存在潜在扰动风险^[20]。

从动力特性角度看, 桥梁跨度增加导致刚度下降、自振频率降低, 进而振动幅度增大; 车辆速度提升则会增强冲击效应, 可能激发高阶模态(车辆速度激发桥梁在高频率下的振动形态)甚至产生共振, 从而进一步放大结构振幅, 对混凝土性能影响更为显著, 应在施工及维修阶段引起重视^[21]。Wang 等^[22]在京张高速(桥跨组合 4 m×38.0 m)一座立交桥上记录到跨中振动频率为 2.50~5.50 Hz, 挠度达 3.00 mm, 以竖向为主导响应^[23, 24]; 桂水荣等^[25, 26]以 30.0 m 简支梁桥和三轴 330 kN 载重汽车(60~80 km/h)为原型, 发现桥梁跨中频率和幅值在 3.77~4.93 Hz、1.27~2.70 mm 之间。陶健^[27]和习磊^[28]针对重庆地区中小跨桥梁(长度 180.0 m、宽度 8.0 m、单跨长 20.0 m)开展动挠度与脉动测试, 行车荷载为 2 辆重 13 t、行驶速度 5 km/h 三轴载重汽车时, 跨中自振频率达 8.94 Hz, 动挠度达 4.33 mm。Zhang 等^[29]在研究高速列车荷载作用下的道路铁路两用桥(跨度 160.0 m、列车运行速度为 60~120 km/h)时记录到 12.00 Hz 频率和 28.00 mm 振幅, 显著高于常规车辆作用响应。于鹏等^[30]以广西平南三桥(575.0 m 大跨钢管混凝土拱桥)为研究对象, 研究 32 t 重载汽车以不同速度下振动变化规律, 发现 20~60 km/h 速度下激励桥梁振动特征不会发生改变, 若行车速度超过 60 km/h 桥梁振动幅度会急剧

增加。

桥梁类型按照总长度(L)划分, $L > 1000$ m 属于特大桥, $100 \text{ m} \leq L \leq 1000$ m 属于大桥, $30 \text{ m} < L < 100$ m 属于中桥, $8 \text{ m} \leq L \leq 30$ m 属于小桥^[31]。总的来说, 桥梁振动响应的空间差异主要受结构模态特征、车速与荷载位置、连接边界条件等多因素耦合影响。综上所述, 由桥梁维修加固或汽车或火车通行引起的振动的参数取值范围为: 频率 1.19~13.00 Hz、振幅 0.01~28.00 mm^[15–19, 22, 25–30, 32]。

1.2 车桥耦合振动实验室模拟

1.2.1 设备选择 实验室中模拟车桥耦合振动的试验装置可分为三类: 机械式、电磁式和电液式。如图 2a 所示, 机械式振动装置采用电机驱动偏心机构的原理, 利用周期性旋转带动试样产生规律性激振, 从而模拟车桥耦合振动的动态响应。Liu 等^[7]采用的机械式振动装置模拟的 0.3 g (g 为重力加速度)车桥耦合振动曲线如图 2b 所示, 与实测波形特征相似。电磁式和电液式振动装置分别通过交变电流激励线圈和液压泵驱动台面上下振动。各类型振动台由于驱动机理不同, 最大振动频率和荷载量有所差异。此外, 部分研究引入多自由度振动平台进行实验加载。Fossetti 等^[33]结合实测振动参数与桥梁有限元模拟结果, 采用六自由度电动振动器对混凝土进行多方向的振动, 以提升模拟精度。

1.2.2 车桥耦合振动参数 如前所述, 不同交通等级下的行车荷载所引起的振动强度不同。振动强度多以频率与振幅的组合表示。例如, 王育清等^[34]和蒋正武等^[35]选取振动频率 2~3 Hz、振幅 4.00 mm, 振动 60 s 与静置 60 s 交替的方式, 模拟车桥耦合振动。部分试验采用多参数组合或正交试验手段, 探讨不同频率(如 3、6、9 Hz)、振幅(如 2、3、4 mm)或加速度等级(如 0.1~0.4 g)对材料性能的影响演化, 振动时间从数分钟延长至数十小时不等, 覆盖混凝土从浇筑后多个阶段^[18, 22, 27, 29, 36–40]。另一方面, 部分研究也以速度或加速度作为振动强度的等效指标^[37]。例如, Hong 等^[16]通过 PPV (0.3~1.0 cm/s)控制振动强度, 评估其对早龄期混凝土(3~24 h)的损伤行为。图 3a 总结了文献[14, 18, 22, 27, 28, 33–37]中所采用的频率与振幅组合。当前参数主要集中在频率范围 2~10 Hz 与振幅区间 3~10 mm, 不同研究在振动强度与响应目标上存在一定差异, 反映出车桥耦合振动模拟在应用场景与研究目的上的多样性。

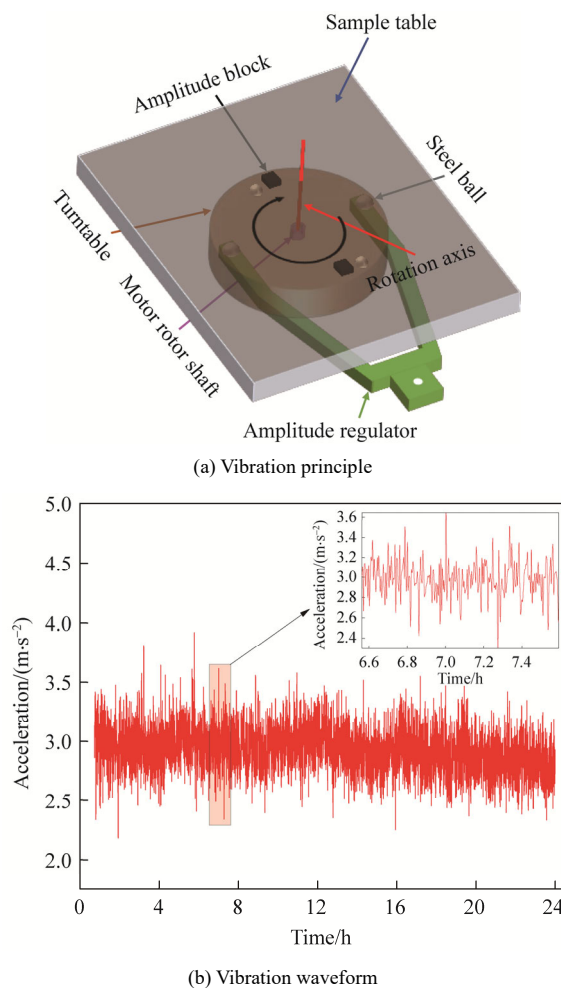


图 2 机械式振动台^[7]

Fig. 2 Mechanical shaker^[7]

1.2.3 混凝土受扰时间 研究表明不同龄期混凝土的振动敏感性不同, 振动受扰时间的选择非常重要。部分研究采用浇筑后立即振动, 直至特定龄期(18、24 h)的方式开展研究^[8, 18]。另一部分研究通过划分混凝土硬化阶段, 分阶段施加车桥耦合振动。如图 3b 所示, Liu 等^[7]通过贯入阻力法获取混凝土初凝和终凝时间为 12.1 h 和 16.1 h (贯入阻力分别为 3.5 MPa 和 28 MPa), 将其分为初凝前、初凝–终凝之间和终凝后 3 个硬化阶段, 研究了不同硬化阶段下车桥耦合振动的影响。

2 车桥耦合振动对混凝土性能的影响及其机理

2.1 车桥耦合振动对混凝土性能的影响

车桥耦合振动对混凝土性能的影响涉及均匀性降低、力学性能演变、界面粘结劣化、裂缝形成及耐久性退化多个方面。

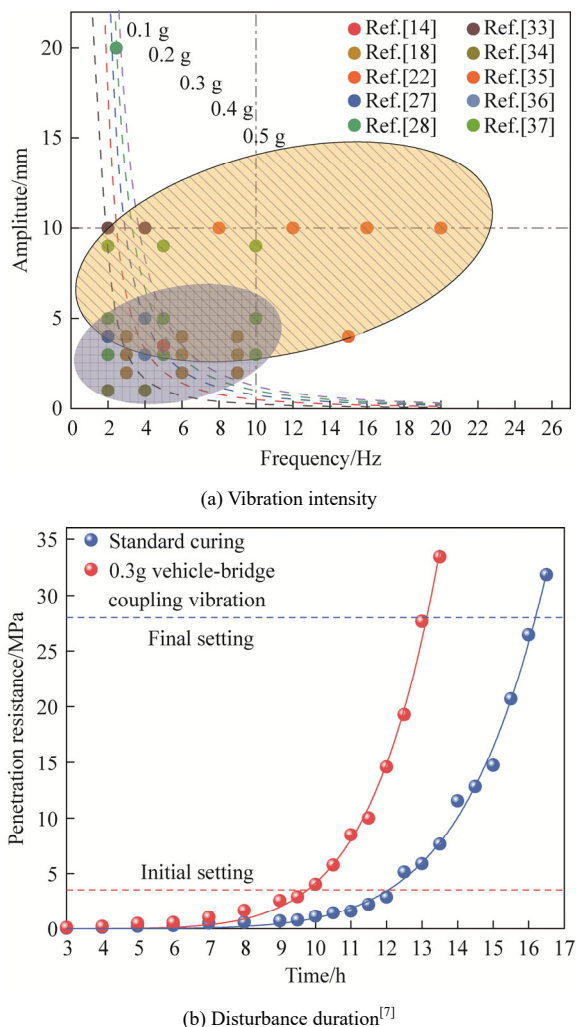


图3 振动参数选择
Fig.3 Vibration parameter selection

2.1.1 均匀性降低 多项研究表明振动加剧了混凝土离析,具体表现为粗骨料与钢纤维下沉、浆体上浮^[7, 35, 36, 41]。混凝土离析程度随振动时间、频率和幅度增加而增强,例如,王雨铮等^[41]发现,当振幅从1.00 mm提升至7.00 mm时,上下层的粗骨料逐层截面面积比从0.44%增至6.75%,而相较于振幅,频率对粗骨料沉降的影响相对较小。此外,在初凝-终凝阶段离析程度也更为显著^[29, 42-44]。高性能混凝土中纤维的加入可改善骨料迁移趋势,提高材料均匀性^[22],Liu等^[7]研究表明,采用了与浆体密度相近的轻骨料UHPC,即使在高振动交通等级下,仍表现出较好的抗离析能力。Wang等^[22]认为,材料组分迁移带来的非均质性,是早期强度波动与后期耐久性隐患的重要诱因。

2.1.2 力学性能演变 混凝土力学性能受车桥耦合振动的影响具有明显的阶段性。多数研究指出,初凝前适度振动有助于提高抗压强度,但抗折

强度会有所降低。初凝-终凝之间(贯入阻力3.5~28 MPa)是振动敏感期,此阶段遭受振动会导致抗压、抗拉和抗折强度的下降。而终凝后长时间振动会增加混凝土抗压强度,但抗折强度仍然降低^[18, 45, 46]。在同一硬化阶段下,随着振动频率与振幅升高,混凝土抗压强度随之增加,但抗折强度却随之降低^[8, 16, 35, 37]。例如,Wang等^[18]设置频率6 Hz,振幅分别为2、3、4 mm,发现随着振幅增大,抗压强度较对照组分别提升3.86%、12.94%、19.04%,抗折强度相较于对照组分别下降14.29%、18.21%、28.21%。Yang等^[47]与Lu等^[48]的研究表明,UHPC与工程水泥基复合材料(ECC)在敏感龄期受扰动后,抗弯与抗拉性能最大降至19.00%,而普通混凝土抗弯强度最高降至33.00%,较普通混凝土相比UHPC、ECC衰减幅度明显减小,表明UHPC和ECC具备较高的车桥耦合振动抵抗能力。总的来说,车桥耦合振动下混凝土抗折强度的降低幅度明显大于抗压强度,是需要重点关注的性能参数。混凝土在初凝-终凝之间受车桥耦合振动性能降低最为明显,需避免此期间受振。由于车桥耦合振动会缩短凝结时间^[49],建议实际工程中测试振动作用下混凝土的凝结时间,以此为交通管制依据,降低车桥耦合振动对混凝土性能的影响。

2.1.3 界面粘结劣化与裂缝形成 Ng等^[50]发现振动不仅影响混凝土性能,还易在敏感龄期诱发混凝土开裂(图4),表面裂缝宽度可达0.2~0.3 mm,裂纹面积超过700 mm²^[46],且裂缝的尺寸会随时间、频率与振幅增加而增大^[28]。例如,Yang等^[47]和Zhang等^[51]采用3 Hz固定频率,1、3、5 mm振幅,发现振幅增大会降低混凝土的初裂荷载,加速弯曲荷载下裂纹扩展。Sun等^[52]发现高坍落度混凝土处于流动状态时振动会降低新老混凝土粘结强度,而初凝-终凝期间振动对界面影响较小,28 d强度甚至略有提高。此外,新旧混凝土界面的方向不同,在振动下表现的性能发展趋势不同。适度振动有助于提高水平界面的粘结性能;而在垂直界面上,若振动时机不当,则可能导致粘结性能下降^[24]。

2.1.4 耐久性劣化 研究表明,早龄期振动对混凝土的电通量、抗冻性和抗渗能力影响有限,但在敏感期下振动,可能会影响混凝土的抗冻、耐磨性能^[22, 23, 52]。Pan等^[53-55]认为初凝-终凝之间(敏感期)受振动对混凝土的抗冻、耐磨与抗氯离子渗透性能影响最显著,振动时间越长混凝土抗渗性越差。陶健^[27]和凌云等^[56]总结了影响混凝土氯离子渗透系

数的车桥耦合振动参数,认为各参数主次顺序为起振时间、频率、振幅和施加时间。Zhu 等^[57]发现当峰值加速度超过 0.2g 时,混凝土渗透系数、累计毛细吸水高度和电通量显著增加;此外,谢德擎等^[58]认为终凝前受扰动的混凝土最易在表层产生渗透劣化,最大渗透系数增幅达 95.00%。何欢等^[15]研究发现,当振动频率超过 9.00 Hz 时,硫铝酸盐水泥混凝土的抗渗能力也明显下降。

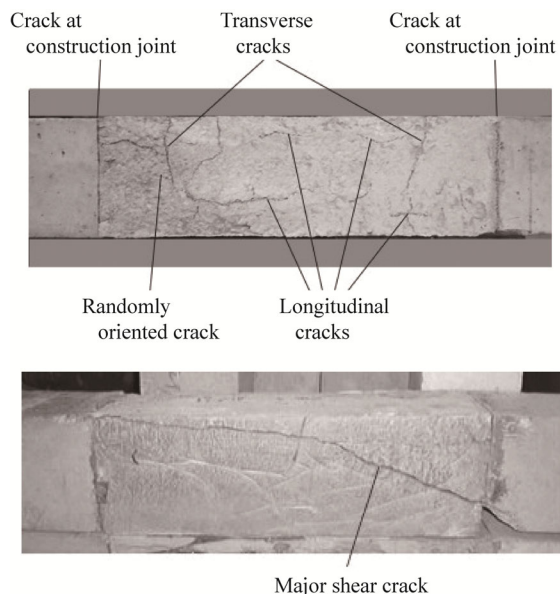


图 4 振动作用下混凝土裂缝破坏形态^[50]

Fig. 4 Failure patterns of concrete cracks under disturbance^[50]

2.2 车桥耦合振动对混凝土的影响机理

借助 X 射线计算机断层成像、扫描电子显微镜(SEM)和纳米压痕等微观表征方法,研究人员揭示了振动对混凝土力学性能与耐久性演化的影响机理,主要可归纳为材料组分迁移、孔隙结构演化、水化进程改变和界面结构破坏 4 个方面。

2.2.1 材料组分迁移 混凝土终凝前具有较好可塑性,车桥耦合振动引发的惯性力将促使其内部组分发生迁移与重排,进而影响材料结构的均匀性与性能稳定性^[59]。振动显著降低水泥浆体的屈服应力,会加速粗骨料、细骨料、浆体之间的分层,导致上层泌水、下层颗粒堆积,从而导致结构不均匀^[60, 61]。Zhang 等^[51]认为初凝前混凝土为塑性流态,振动会加剧骨料和水泥颗粒的分离,尤其是在粗骨料下部形成“充水区”,水分蒸发后产生大量孔隙。习磊等^[28, 62]和黄维蓉等^[63]进一步将混凝土分层现象划分为外分层(粗骨料下沉、水上浮)和内分层(砂、水泥浆体下沉)。如图 5a 所示,导致区域

1 形成孔隙、裂缝。这种迁移过程不仅改变了材料本身的密实性和均质性,还可能影响界面结合。

在高性能或超高性能混凝土中,振动作用还会导致钢纤维等增强材料发生沉降或取向变化。如图 5b 所示,Liu 等^[7]和 Wang 等^[18]研究发现,初凝前振动会促使混凝土表面的水平钢纤维发生沉降,并使其从水平状态转变为竖直方向,进而改变了钢纤维的分布特征。这种变化导致纤维与界面之间出现渗流现象,从而影响其后期桥接裂纹和增韧效果。此外,混凝土在敏感阶段受到振动时,钢纤维仍会略微发生沉降和取向变化^[48]。

2.2.2 孔隙结构演化 孔隙结构的变化是车桥耦合振动作用下混凝土性能变化的重要原因,其不仅决定了混凝土的强度,也直接影响耐久性与渗透性。如图 6a 所示,Zhu 等^[57]研究表明,早期低能量振动(<0.2 g)有助于排除气泡,可有效细化孔隙结构,使大于 20 nm 的孔隙体积减小 50%,而小孔隙(<20 nm)增加 200.00%,促进 C-S-H 凝胶与钙矾石的形成,从而提升密实度、降低渗透系数^[52]。相反,高能量振动则导致孔隙粗化,使大、中孔隙体积增加,小孔体积减少,生成更多结构缺陷与裂缝,反而降低混凝土密实性^[47]。Basler 等^[14]同样发现,适度振动可压实混凝土、减少孔隙,有利于结构致密化,但过高的剪切速率反而可能诱发孔隙扩展。Ling 等^[36]从微观粒子动力学角度指出,水泥颗粒粒子共振与水化产物附着力的变化使得孔隙从纳米尺度逐渐演变为可贯通的毛细孔,造成强度下降。Lu 等^[48]研究指出,凝结中期振动将浆体从线性 Bingham 流变行为转变为幂律假塑性模型,伴随结构絮凝破坏与颗粒碰撞,引入新缺陷,产生有害孔隙和裂缝。如图 6b 所示,Leng 等^[8]发现,在高能振动(3.00 Hz、0.8 mm)下会造成细骨料和基体之间出现永久性微裂缝,从纳米尺度发现,振动引起 C-S-H 凝胶结构(水泥水化中后期生成的致密、稳定的水化产物,是混凝土强度的主要来源)紊乱,使大孔数量和有害孔隙率增加。Liu 等^[7]发现不同硬化阶段混凝土受振后的抗压强度与抗折强度变化趋势并不完全一致,认为振动下混凝土抗压强度提升主要是由于振动引起孔隙率降低;而抗折强度下降的根本原因在于振动引起的孔隙粗化。因此,孔隙结构演化的关键在于振动强度及时期的协调控制。适度振动有利于细化孔隙结构、增强密实性,而高强度振动则会粗化孔隙、诱发裂缝,降低混凝土结构整体性能。

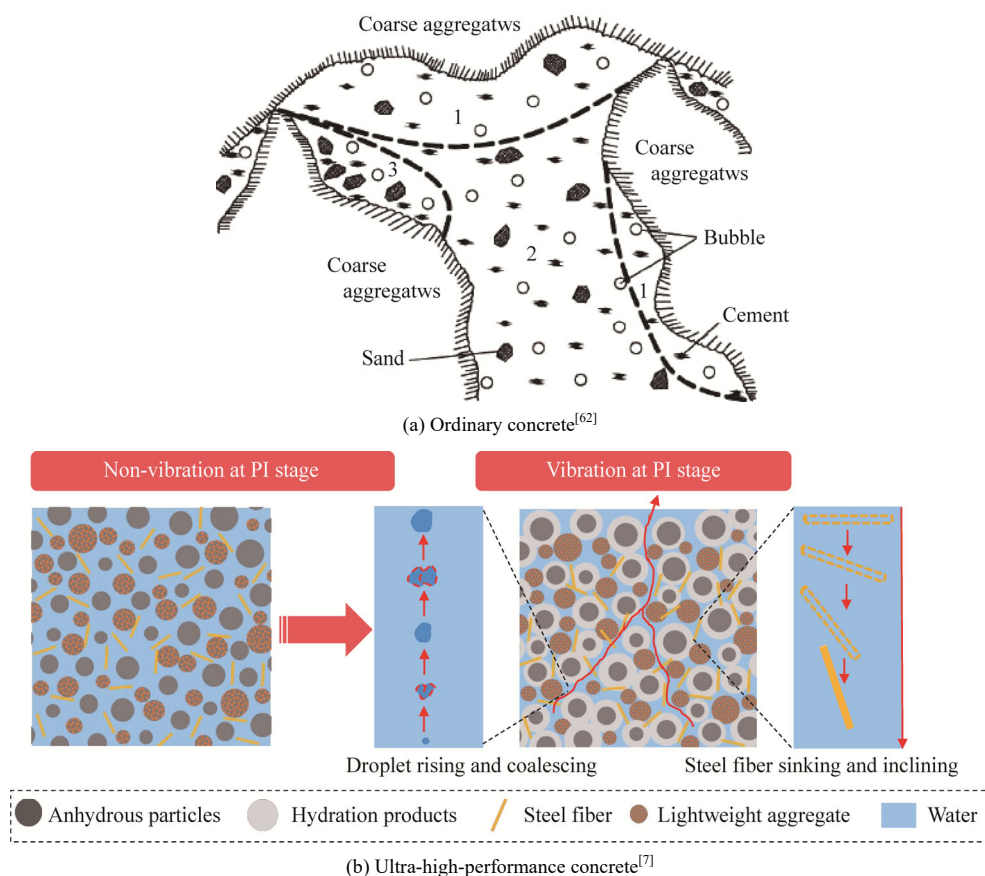


图 5 振动作用下材料组分迁移

Fig. 5 Migration of material components under vibration action

2.2.3 水化进程改变 振动会改变水泥颗粒的分布状态, 从而影响浆体的水化进程和产物的微观结构。习磊等^[62]与蒋正武等^[35]均指出, 泌水现象使得实际水胶比降低, 有利于颗粒紧密堆积, 促进水化反应并提升早期强度。Hong 等^[16]认为, 适度振动可使颗粒排列更紧密, 促进水泥与骨料接触, 增强结构致密性; 但当 PPV 大于 0.6 cm/s 时会破坏凝胶结构, 使相互连接的水化产物网状结构发生断裂, 导致结构连续性受损, 从而产生贯穿性裂缝。另一方面, 初凝-终凝间为 C-S-H 凝胶搭接形成微结构骨架的重要时期, 此时振动可能破坏正在形成的骨架, 使其结构连续性中断, 削弱其力学性能^[51]。如图 7a 所示, Leng 等^[8]从纳米力学角度指出, 振动可分散未水化水泥, 避免其团聚, 使水和水泥更容易接触。此外, 如图 7b 所示, 对比了振幅 3.00 mm, 频率 1.50 Hz 条件下, 初凝前与初凝-终凝间振动和未振动样品的水化产物元素组成, 表明振动下会加速火山灰反应导致钙硅比(Ca/Si ratio)降低, 进而促进 C-S-H 凝胶生成, 缩短水化诱导期, 提升反应速率。然而, Ling 等^[36]指出, 水泥颗粒共振会抑制水化产物在颗粒表面的附着, 从而延缓

凝结时间, 影响结构成形速率。他认为水化产物分布的不均也可能加剧微裂缝产生, 成为后期侵蚀劣化的风险。Wang 等^[22]则认为在早期振动会导致粗骨料、胶凝材料和水分离, 使骨料与胶凝材料表面出现过多自由水, 减缓了混凝土的水化反应, 影响早期强度。

由此可见, 振动对水化反应具有促进与抑制并存的双重效应, 一方面, 适度振动可增强水泥颗粒与水的接触, 释放絮凝结构中自由水, 加速 C-S-H 凝胶生成; 另一方面, 若在“扰动敏感期”(初凝-终凝间)受到过强干扰, 则可能破坏的水化产物间的初步搭接结构, 诱发微裂纹, 削弱混凝土的性能。

2.2.4 界面结构破坏 混凝土内部包括多种界面结构, 如纤维-基体界面、骨料-基体界面(ITZ)等, 界面过渡区是决定其力学性能与耐久性能的关键环节之一。振动作用在初凝-终凝阶段, 对水泥浆体中的界面结构影响最为显著。如图 8a 所示, Liu 等^[7]研究指出, 初凝-终凝之间的振动会阻碍钢纤维表面水化产物的堆积, 增加钢纤维的 ITZ 孔隙率, 破坏钢纤维与基体的界面粘结; 如图 8b 所示, 在此阶段, 振动还会导致基体-轻骨料界面产生宏

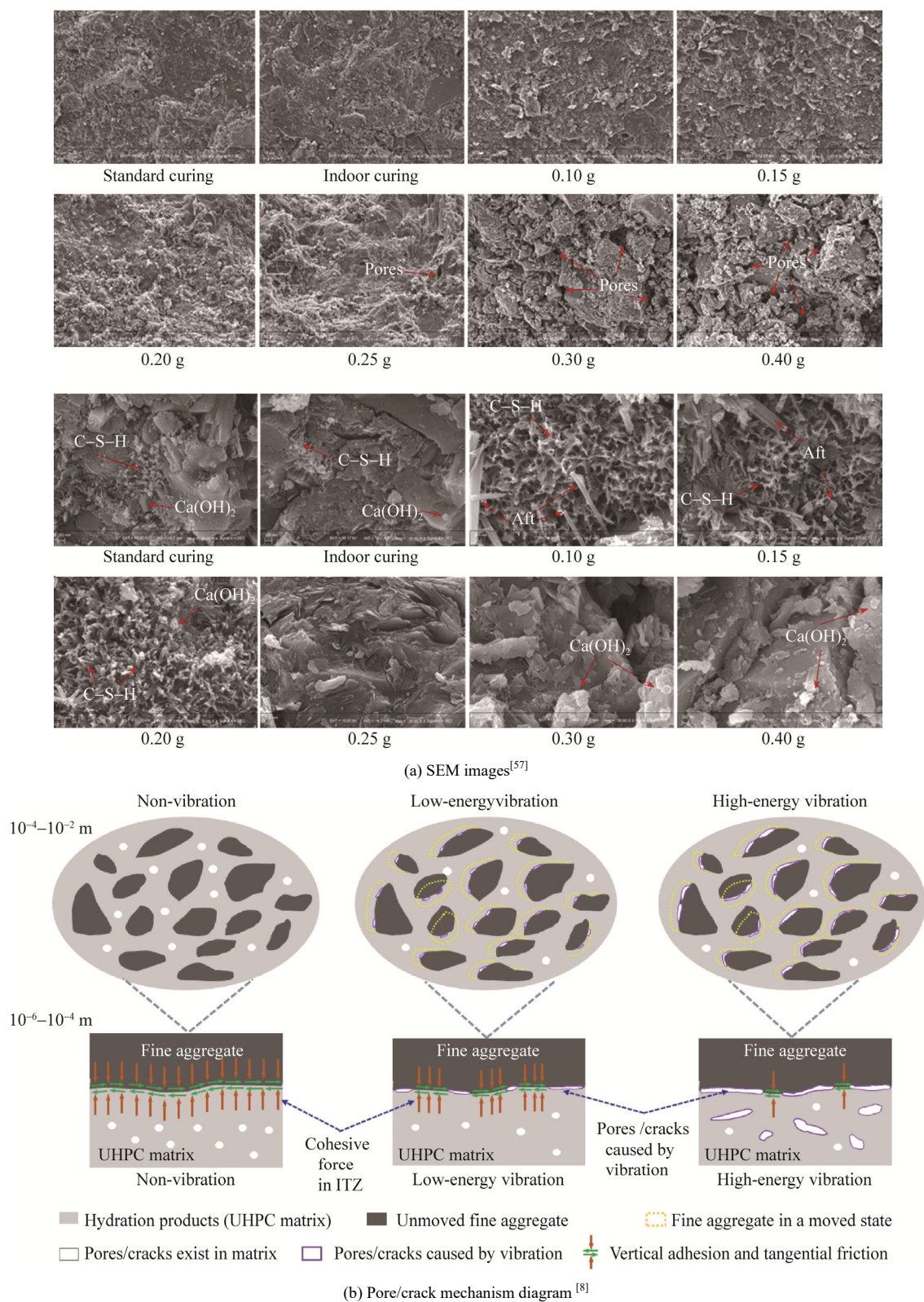


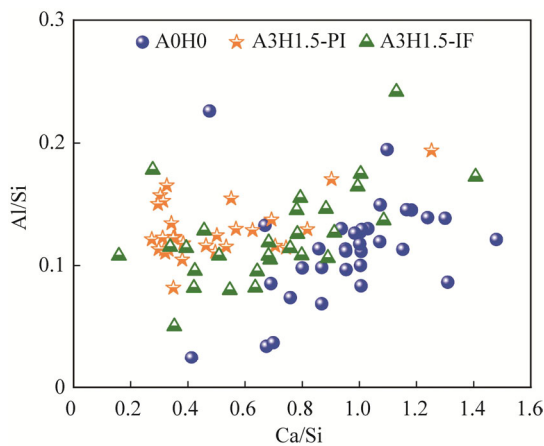
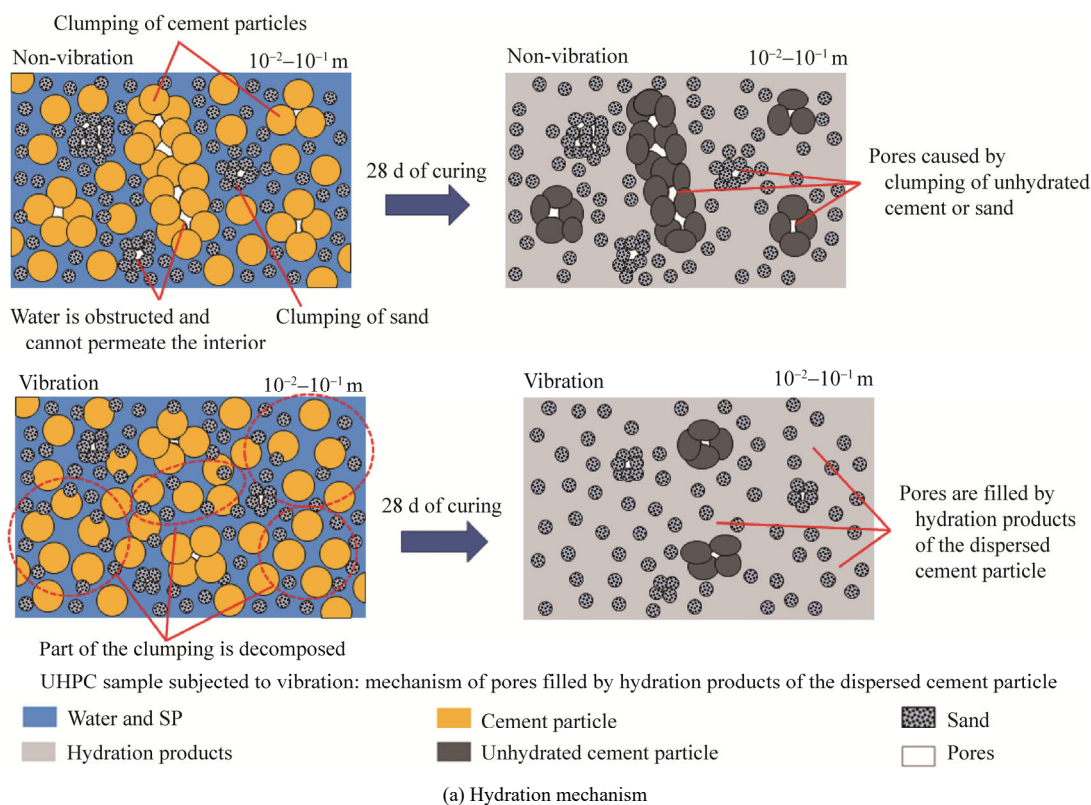
图 6 不同能量振动下孔隙结构演化
Fig. 6 Evolution of pore structure under different energy vibrations

观裂纹。然而，对于初凝前和终凝后阶段而言，界面的结合较为稳定。Zhang 等^[46]和 Zheng 等^[37]均认为，初凝–终凝之间振动对性能损伤最为严重，因

为此阶段水泥水化进入加速期，界面过渡区结构尚不稳定。此时振动产生的惯性力若大于界面拉应力，易导致界面微裂缝形成和扩展，破坏基体与骨

料的粘结。Pan 等^[54]研究指出, 在凝结中期振动会破坏 ITZ 区初始絮凝结构(水泥颗粒在拌合初期因静电吸引形成的松散聚集体), 形成微裂缝通道, 为有害介质侵入提供路径, 当与硫酸盐反应生成钙矾石后, 会造成进一步膨胀和界面损伤, 严重影响耐久性。此外, Lu 等^[48]认为, 在凝结中期, 浆体流变行为由 Bingham 转变为幂律假塑性流体, 振动会使混合颗粒间发生摩擦和碰撞, 破坏已形成的絮凝结构, 并在纤维周围出现渗流现象, 从而破坏界面粘结性能。混凝土在遭受高能量振动时, 同样会致使其界面结构遭到破坏。Chen 等^[64]的研究表

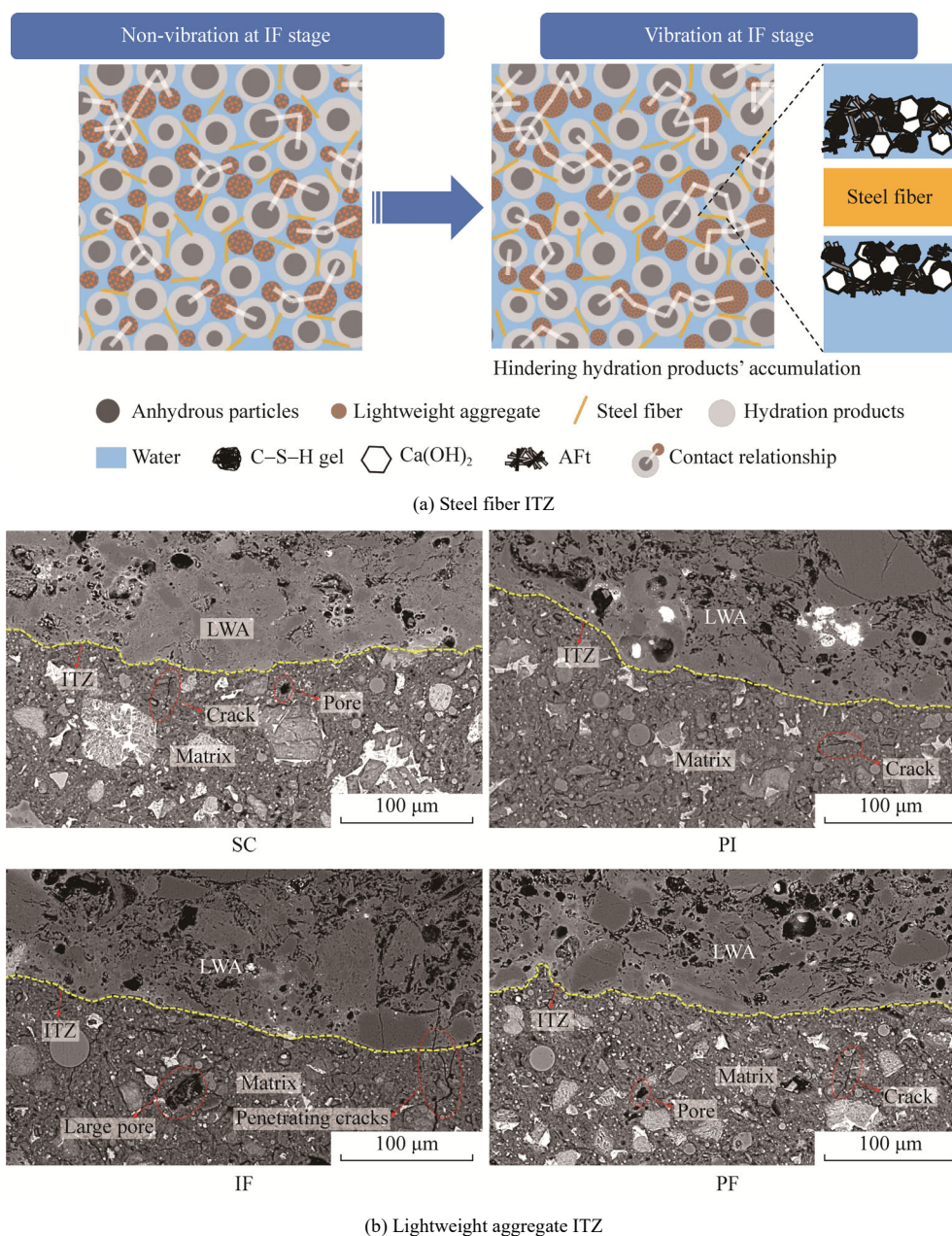
明, 低能量振动(F-频率、A-振幅; F3A1、F3A3)以及中能量振动(F3A5、F5A3)对轻骨料界面结构的影响较小, 然而高能量振动(F7A3)会使轻骨料 ITZ 的孔隙率上升。特别是在初凝至终凝阶段, ITZ 孔隙率会从 6.13%提高至 11.58%, 同时还会增加 ITZ 的宽度。界面结构破坏通常与材料组分的迁移行为协同发生, 其核心机理在于: 水化产物初步接触时整体结构并不牢固, 振动作用破坏了此时脆弱的界面粘结并抑制后续的水化产物搭接, 导致孔隙率增加和微裂纹萌生。一旦界面区形成宏观裂纹, 将导致材料性能产生明显退化。



(b) Ca/Si ratio

图 7 水化进程演变^[8]

Fig. 7 Evolution of the hydration process^[8]

图 8 初凝–终凝阶段界面结构破坏^[7]Fig. 8 Interface structure damage during initial to final setting stage^[7]

3 车桥耦合振动下混凝土性能的调控

针对车桥耦合振动对混凝土材料性能的负面影响,已有研究围绕振动条件下缩短受扰时间、增强材料韧性以及提高自愈能力等^[65]方面开展了调控。与此同时,部分研究成果已在实际工程中得到应用。

3.1 缩短受扰时间

该策略主要通过加快水化进程,使混凝土尽快发展强度,以抵抗振动对结构形成的不利影响。硫铝酸盐水泥(SAC)、早强水泥及其与 P·O 水泥复配

的策略被广泛应用于提升早期强度。Liu 等^[66, 67]以 SAC、磷酸镁水泥(MPC)为胶凝材料,发现振动可提高该胶凝体系样品的抗压和抗折强度,频率 9.00 Hz、振幅 3.00 mm 时抗压和抗折强度分别提升 13.00%和 20.00%,纤维平均粘结强度和弯曲韧性提升 80.00%和 51.90%。微观结构研究发现,孔隙在振动下趋于细化,同时纤维材料中高模量纤维的桥接作用可延缓裂缝扩展,有助于维持结构完整性。郑欣欣^[68]和常青山等^[69]研究硅酸盐水泥复配 SAC,发现 50% SAC 可显著提升硅酸盐水泥早期性能,改善结构致密性,提升了混凝土抗扰动性能。

陈鹏^[70]以广西柳南高速公路拓宽改扩建工程湿接缝为研究对象,通过在湿接缝早强混凝土配合比中额外掺入 5% SAC,发现能够提高混凝土的抗干扰能力。王玲等^[71]通过复配型外加剂(如 PCA-S2、FSB2、C-S-H 晶核剂等)以促进硅酸盐水泥水硬化和增强抗扰动性能,其发现复掺 1.2% 的 PCA-S2、0.4% 的 FSB2 和 1.5% C-S-H 晶核剂时混凝土抗扰动性能最佳,相比标准样品的抗压强度和粘结强度分别提升了 18.00% 和 2.55%^[72]。蒋汉青^[73]将抗干扰混凝土与早强高性能聚羧酸减水剂配合使用,应用于深圳至岑溪高速公路中山新隆至江门龙湾段改扩建工程的新旧桥梁桥面板连接处,结果表明该方法能够有效解决新旧桥梁桥面板的连接问题。此外,也有研究通过硅灰、超细矿粉的引入来提高浆体黏度,增强骨料“互锁”效应,亦可有效提升抗扰动能力;其中,掺入 6% 超细矿粉或 9% 硅灰时效果最佳,早期抗压强度最高增加 46.66%^[74]。田景松等^[75]认为硫铝酸盐水泥组织生产难度大;通过以普通硅酸盐水泥与优质硅灰、粉煤灰为胶凝材料,配制出具有一定黏度的高强快硬抗扰动混凝土,并应用到新建的京包高速公路 1 号标匝道桥,发现可以有效保证混凝土达到设计强度。通过优化材料组成与调控结构形成过程,缩短混凝土受扰期已成为增强其在振动环境中服役可靠性的关键手段^[19, 76]。

3.2 增强材料韧性

混凝土本身的脆性特征使其在振动环境中易出现裂缝与结构损伤,因此提升韧性成为增强其抗

扰动性能的重要途径。近年来,研究普遍通过引入钢纤维、合成纤维、玄武岩纤维以及纳米增强材料等手段,强化混凝土的应力传递与裂缝控制能力。其中,纤维增强可在混凝土内部形成三维约束结构,提升其抗裂性、延展性与整体性。Kwan 等^[77]研究表明,钢纤维在后期与基体形成良好界面粘结,可有效抵抗荷载引起的振动疲劳,而 PE 纤维则凭借优异的拉伸性能表现出更强的裂缝桥接能力,增韧效果优于 PVA 与钢纤维^[78]。曾过生等^[79]以沈阳至海口国家高速公路阳江至茂名段改扩建工程为研究背景,在混凝土材料中加入端钩型钢纤维后试验强度仍大于混凝土强度设计值。此外,玄武岩纤维可在内部构建网状约束体系,抑制扰动诱导的骨料沉降及微裂纹扩展,尤其以较长纤维(L20)和混合长度掺配效果最佳^[80, 81]。聚丙烯腈纤维也被证明能通过形成三维支撑结构有效分散应力、限制变形,从而提升抗扰动性能^[82]。林培云^[83]在配制出 C50 混凝土后,将聚丙烯纤维加入其中,并应用于广东省深圳市机荷高速公路改扩建项目的新老桥拼接缝处,结果表明,该混凝土具备良好的和易性与抗离析性。通过构建多尺度增韧体系,纤维增强显著提升了混凝土的抗裂性与结构稳定性,为其在复杂振动工况下的应用提供了坚实基础^[76]。

3.3 提高自愈能力

自愈合是增强混凝土抗扰动性能的一种主动修复策略。在裂缝初生阶段激发内部水化反应或释放修复物质,实现微裂缝的有效封闭,从而恢复材料结构完整性、提升服役稳定性。如图 9 所示,Fang

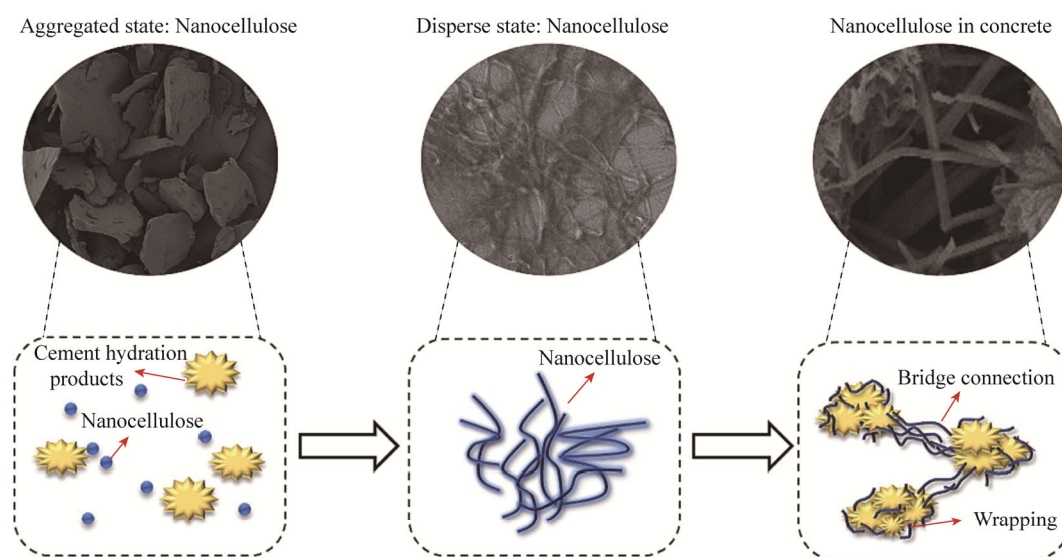


图 9 微尺度纳米纤维抗振动机理图^[84]

Fig. 9 Mechanism diagram of microscale nanofiber anti-disturbance mechanism^[84]

等^[84]研究表明, 掺入 0.5% 的纳米纤维素可有效促进 C-S-H 凝胶生成、优化孔隙结构, 这主要是因为纳米纤维素在混凝土中由聚集态转变为分散态后, 能够在水化反应过程中形成桥接结构, 并包裹水化产物, 在微观尺度上构建起应力传递与孔隙调控网络。为混凝土在动态扰动环境下提供了有效的微观增强与自修复支撑。自愈机制通过在功能材料响应、水化产物调控与裂缝动态修复等层面协同作用, 正在成为提升混凝土抗扰动性能的重要路径。

4 结论

1) 实际桥梁的车桥耦合振动强度受桥梁类型、车流状况和桥梁位置影响, 其中, 跨中位置因模态响应最强、振幅最大以及桥梁两端及拼接缝等边界位置处因结构不连续性是其最易受损的区域, 需重点关注。

2) 车桥耦合振动下混凝土抗折强度的降低幅度明显大于抗压强度, 需要重点关注。混凝土在初凝–终凝之间受车桥耦合振动性能降低最为明显, 需避免此期间受振。

3) 振动引起性能损伤原因主要分为材料组分迁移、孔隙结构演变、水化进程扰动与界面粘结破坏四部分, 其共同作用导致混凝土性能退化。探明特定车桥耦合振动场景下影响混凝土性能的主要因素可为混凝土性能调控提供指导。

4) 超高性能混凝土在振动作用下表现优于普通混凝土, 其致密基体、低孔隙率及纤维增强结构使其在振动敏感期的性能衰减幅度更小, 能够有效延缓裂缝萌生与扩展, 尤其在高频振动和高荷载条件下优势更加明显。

5) 采用早强水泥或外加剂缩短凝结时间, 掺入钢纤维、复合纤维及纳米材料增强韧性, 或添加自愈合剂、膨胀组分及纳米纤维素提高自愈合能力, 均是改善混凝土抵抗车桥耦合振动能力的有效措施。

5 展望

1) 现有研究多采用单一方向、连续短促振动, 而实际车桥耦合振动多为多方向、不连续和长期的。未来应发展贴合实际振动特征的实验室模拟方法, 并考虑温湿度、荷载及侵蚀等多因素耦合作用, 更加全面地探索实际工况下混凝土性能的演变规律。

2) 未来可开发振动加载的原位表征体系, 利用三维计算机断层扫描与核磁共振波谱等捕捉振

动下混凝土微细结构演变过程, 数字图像相关 (DIC) 与声发射等追踪裂缝动态萌生, 建立微细观结构损伤与宏观性能间的动态关联, 为抗振动混凝土设计与寿命预测提供依据。

参考文献:

- [1] LUO K, LI S Q, WANG X Y, et al. Frequency identification of equal-span continuous girder bridge based on moving vehicle responses[J]. *Int J Str Stab Dyn*, 2024, 24(22): 2450258.
- [2] ZHOU G D, YI T H, LI W J, et al. Standardization construction and development trend of bridge health monitoring systems in China[J]. *Adv Bridge Eng*, 2020, 1: 13.
- [3] TANG D N, HUANG M S. The sustainable development of bridges in China: Collapse cause analysis, existing management dilemmas and potential solutions[J]. *Buildings*, 2024, 14(2): 419.
- [4] 丁庆军, 张锋, 林青, 等. 轻质混凝土钢桥面铺装研究与应用[J]. *中外公路*, 2006, 26(4): 188–190.
DING Qingjun, ZHANG Feng, LIN Qing, et al. *J China Foreign Highw*, 2006, 26(4): 188–190.
- [5] 曹君辉. 钢–薄层超高性能混凝土轻型组合桥面结构基本性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
CAO Junhui. *Research on basic performance of steel-thin UHPC lightweight composite deck*[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [6] HAN W S, LIU X D, GUO X L, et al. Research status and prospect of wind-vehicle-bridge coupling vibration system[J]. *J Traffic Transp Eng Engl Ed*, 2022, 9(3): 319–338.
- [7] LIU L, YANG J, ZHANG G Z, et al. An investigation of the structural and performance degradation of lightweight ultra-high performance concrete under vehicle-bridge coupling vibration: Phases distribution and interfacial bonding[J]. *Constr Build Mater*, 2025, 492: 142891.
- [8] LENG J C, YANG J, ZHANG Z Y, et al. Effect of vehicle-induced vibration on the strength, nano-mechanical properties, and microstructural characteristics of ultra-high-performance concrete during hardening process[J]. *Cem Concr Compos*, 2024, 148: 105487.
- [9] ZHANG P, WANG E, XIA Y, et al. Hydration, microstructure and mechanical properties of the research progress of ultra-high-performance concrete[J]. *Hans J Civ Eng*, 2018, 7(2): 194–204.
- [10] CHENG X L, MCFARLAND D M, HUA X, et al. Traveling waves in tensioned Euler-Bernoulli beams with viscoelastic boundary conditions[J]. *Int J Mech Sci*, 2025, 294: 110248.
- [11] 毛崎波. Euler-Bernoulli梁模态公式的修正[J]. *力学与实践*, 2025, 47(1): 233–237.
MAO Qibo. *Mech Eng*, 2025, 47(1): 233–237.
- [12] BAJKOWSKI J M, DYNIEWICZ B, GĘBIK-WRONA M, et al. Reduction of the vibration amplitudes of a harmonically excited sandwich beam with controllable core[J]. *Mech Syst Signal Process*, 2019, 129: 54–69.
- [13] 郭文杰, 洪显, 罗文俊, 等. 振幅增强型超材料梁中弹性波的复能带特性分析[J]. *振动工程学报*, 2025, 38(3): 499–506.
GUO Wenjie, HONG Xian, LUO Wenjun, et al. *J Vib Eng*, 2025, 38(3): 499–506.
- [14] BASLER F, MÄHNER D, FISCHER O, et al. Influence of early-age vibration on concrete strength[J]. *Struct Concr*, 2023, 24(5): 6505–6519.
- [15] 何欢, 杨荣俊, 文俊强, 等. 车桥耦合扰动对硫铝酸盐水泥混凝土修补材料性能的影响[J]. *材料导报*, 2019, 33(增刊2): 288–292.

- HE Huan, YANG Rongjun, WEN Junqiang, et al. Mater Rep, 2019, 33(Suppl 2): 288–292.
- [16] HONG S, PARK S K. Effect of vehicle-induced vibrations on early-age concrete during bridge widening[J]. Constr Build Mater, 2015, 77: 179–186.
- [17] 杨建荣. 车—桥耦合作用下公路桥梁局部振动研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- YANG Jianrong. Local dynamic response of highway bridges to moving vehicles[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [18] WANG S F, YU L, YANG F, et al. Effect of steel fiber distribution on the mechanical properties of UHPC caused by vehicle-bridge coupling vibration[J]. Compos Part B Eng, 2022, 245: 110201.
- [19] CHEN D H, ZHU C Y, SHI X F, et al. Influence of random vehicle-bridge coupling vibration on the anti-disturbance performance of concrete materials[J]. Appl Sci, 2023, 13(13): 7584.
- [20] 李全林, 杨超, 李朝, 等. 车辆动力作用对拓宽桥现浇混凝土拼接缝的不利影响及控制对策[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(33): 14424–14431.
- LI Quanlin, YANG Chao, LI Zhao, et al. Sci Technol Eng, 2024, 24(33): 14424–14431.
- [21] 李毅. 高墩大跨度连续刚构桥的动力学特性分析思考[J]. 智能城市应用, 2024, 7(3): 37–40.
- LI Yi. Smart City Appl, 2024, 7(3): 37–40.
- [22] WANG W, LIU S, WANG Q Z, et al. The impact of traffic-induced bridge vibration on rapid repairing high-performance concrete for bridge deck pavement repairs[J]. Adv Mater Sci Eng, 2014, 2014: 632051.
- [23] 刘硕. 行车振动对桥面快速修补高性能混凝土性能影响试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
- LIU Shuo. The impact of traffic-induced bridge vibration on rapid repairing high-performance concrete for bridge deck pavement repairs[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.
- [24] 马帅. 行车振动对桥面维修新老混凝土粘结性能影响试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.
- MA Shuai. Experimental research on the impact of vibration on bridge deck maintenance of adherence of new and old concrete[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2015.
- [25] 桂水荣, 陈水生, 万水. 公路梁桥车桥耦合振动模型试验设计及校验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 463–469.
- GUI Shuirong, CHEN Shuisheng, WAN Shui. J Jiangsu Univ Nat Sci Ed, 2014, 35(4): 463–469.
- [26] 桂水荣. 基于桥面不平顺公路梁桥车桥耦合随机振动研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- GUI Shuirong. Research of deck irregularity excitation on highway vehicle-bridge coupling random vibrations[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [27] 陶健. 基于车桥耦合振动的现浇混凝土耐久性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- TAO Jian. Based on the vehicle bridge coupling vibration of cast-in-situ concrete durability study[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [28] 习磊. 基于车桥耦合振动的现浇混凝土力学性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- XI Lei. Mechanics performance study on cast-in-place concrete based on the vehicle bridge coupling vibration[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [29] ZHANG Y H, QIAN Z D, CHEN L L, et al. Research on the segregation and mechanical properties of epoxy asphalt concrete under the condition of train vibration in road-railway bridge[J]. Constr Build Mater, 2022, 353: 129107.
- [30] 于鹏, 余存, 任兆永, 等. 车辆参数对大跨钢管混凝土拱桥车桥耦合振动响应的影响规律研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 118–131.
- YU Peng, YU Cun, REN Zhaoyong, et al. J Hunan Univ Nat Sci, 2025, 52(1): 118–131.
- [31] 交通运输部公路局, 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. JTG B01—2014 公路工程技术标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [32] 张煜, 潘传银, 石雪飞, 等. 桥梁混凝土力学性能振动效应试验评估[J]. 结构工程师, 2014, 30(1): 155–159.
- ZHANG Yu, PAN Chuanyin, SHI Xuefei, et al. Struct Eng, 2014, 30(1): 155–159.
- [33] FOSSETTI M, MACALUSO G, SICILIANO A F, et al. An innovative procedure to mechanical characterization of repairing materials under vehicle-induced vibrations[J]. Structures, 2020, 25: 943–955.
- [34] 王育清, 梅迎军, 王宇, 等. 车桥耦合振动对钢纤维—水泥石界面黏结性能的影响[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(2): 40–44.
- WANG Yuqing, MEI Yingjun, WANG Yu, et al. J Qingdao Univ Technol, 2021, 42(2): 40–44.
- [35] 蒋正武, 任强, 袁政成. 车桥耦合振动对混凝土早期性能的影响及其损伤机理[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3): 471–476.
- JIANG Zhengwu, REN Qiang, YUAN Zhengcheng. J Build Mater, 2015, 18(3): 471–476.
- [36] LING G, SHUI Z H, SUN T, et al. Particle distribution characteristics and hydration mechanism of cement-based paste subjected to mechanical vibrations[J]. J Mater Civ Eng, 2022, 34: 04021393.
- [37] ZHENG Y C, YANG J F, LIAO B L, et al. Investigation on the concrete strength performance of underlying tunnel structure subjected to train-induced dynamic loads at an early age[J]. Constr Build Mater, 2022, 337: 127622.
- [38] 魏建军, 付智, 张金喜. 行车荷载引起桥梁振动对新老混凝土黏结性能影响[J]. 公路交通科技, 2016, 33(5): 61–65.
- WEI Jianjun, FU Zhi, ZHANG Jinxi. J Highw Transp Res Dev, 2016, 33(5): 61–65.
- [39] 王奉献. 早期扰动对混凝土性能的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- WANG Fengxian. Effect of early disturbance on properties of concrete[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [40] 张长江, 徐佰顺, 赵志蒙, 等. 基于声发射技术的早龄期扰动对混凝土力学性能影响分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 3964–3975.
- ZHANG Changjiang, XU Baishun, ZHAO Zhimeng, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2021, 40(12): 3964–3975.
- [41] 王雨铮, 周浩天, 谢鑫, 等. 车桥耦合振动对拼宽混凝土匀质性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(8): 2849–2855.
- WANG Yuzheng, ZHOU Haotian, XIE Xin, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2025, 44(8): 2849–2855.
- [42] 魏建军, 张金喜, 付智. 早期振动引起混凝土离析变化规律及对后期强度影响[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(4): 535–540.
- WEI Jianjun, ZHANG Jinxi, FU Zhi. J Beijing Univ Technol, 2016, 42(4): 535–540.
- [43] 张悦然, 张永娟, 张雄. 混凝土凝结硬化阶段抗扰动性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2009(5): 1–3.
- ZHANG Yueran, ZHANG Yongjuan, ZHANG Xiong. China Concrete Cem Prod, 2009(5): 1–3.
- [44] CAI Y X, LIU Q F, YU L W, et al. An experimental and numerical

- investigation of coarse aggregate settlement in fresh concrete under vibration[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 122: 104153.
- [45] 关彦斌, 魏建军. 行车荷载引起桥梁振动对混凝土抗压强度影响分析[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2015, 11(3): 244–246.
GUAN Yanbin, WEI Jianjun. *J Highway Transp Res Dev* 2015, 11(3): 244–246.
- [46] ZHANG X, ZHAO M, ZHANG Y J, et al. Effect of vehicle-bridge interaction vibration on young concrete[J]. *KSCE J Civ Eng*, 2015, 19(1): 151–157.
- [47] YANG J, LENG J C, ZHOU J T, et al. Study on the impact of vehicle-induced vibration on the flexural behavior of UHPC joints in widened bridges[J]. *Urban Lifeline*, 2024, 2: 20.
- [48] LU S, LIU S G, YIN L Q, et al. Evolution characteristics of engineered cementitious composite pore structure and its correlation with the tensile property under simulated traffic vibrations at an early age[J]. *J Mater Sci*, 2024, 59(2): 491–518.
- [49] 潘慧敏, 王奉献, 赵庆新. 硬化期扰动对混凝土力学性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(4): 631–636.
PAN Huimin, WANG Fengxian, ZHAO Qingxin. *J Build Mater*, 2016, 19(4): 631–636.
- [50] NG P L, KWAN A K H. Effects of traffic vibration on curing concrete stitch: Part II: Cracking, debonding and strength reduction[J]. *Eng Struct*, 2007, 29(11): 2881–2892.
- [51] ZHANG X D, LIU S G, YAN C W, et al. Effects of traffic vibrations on the flexural properties of newly placed PVA-ECC bridge repairs[J]. *Materials*, 2019, 12(20): 3337.
- [52] SUN S, SHEN J, GUO H, et al. Performance evolution of high-slump concrete under vibration: Influence of vibration timing on mechanical, durability, and interfacial properties[J]. *Materials*, 2025, 18(23): 5389.
- [53] 潘慧敏, 付军, 赵庆新. 硬化期受扰动混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能[J]. *材料导报*, 2018, 32(2): 282–287.
PAN Huimin, FU Jun, ZHAO Qingxin. *Mater Rep*, 2018, 32(2): 282–287.
- [54] Pan H. Damage evolution model of early disturbed concrete under sulfate attack and its experimental verification[J]. *Dyna*, 2018, 93(1): 52–59.
- [55] 潘慧敏. 早期扰动对混凝土性能的影响及机理分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
PAN Huimin. Influence of early disturbance on the concrete and mechanism analysis[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [56] 凌云, 易金明, 黄维蓉, 等. 基于车桥耦合振动的现浇混凝土渗透性能研究[J]. *混凝土*, 2020(4): 55–59.
LING Yun, YI Jinming, HUANG Weirong, et al. *Concrete*, 2020(4): 55–59.
- [57] ZHU B Z, ZHENG Y C, RONG Z L, et al. Impact of early-age vibration on the permeability and microstructure of mature-age concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 453: 139124.
- [58] 谢德擎, 穆松, 刘建忠, 等. 扰动对混凝土抗氯离子渗透性能的影响研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(10): 27–30.
XIE Deqing, MU Song, LIU Jianzhong, et al. *China Concr Cem Prod*, 2020(10): 27–30.
- [59] HUERTA D A, RUIZ-SUÁREZ J C. Vibration-induced granular segregation: A phenomenon driven by three mechanisms[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(11): 114301.
- [60] KE J, SHUI Z H, GAO X, et al. Effect of vibration procedure on particle distribution of cement paste[J]. *Materials*, 2023, 16(7): 2600.
- [61] 魏建军, 邢姣秀, 付智. 行车荷载引起桥梁振动对修复混凝土性能影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(5): 1057–1060.
WEI Jianjun, XING Jiaoxiu, FU Zhi. *J Southeast Univ Nat Sci Ed*, 2010, 40(5): 1057–1060.
- [62] 习磊, 黄维蓉. 车桥耦合振动对新拌混凝土的性能影响研究综述[J]. *混凝土*, 2018(1): 148–150.
XI Lei, HUANG Weirong. *Concrete*, 2018(1): 148–150.
- [63] 黄维蓉, 习磊. 车桥耦合振动对新拌混凝土力学性能的影响研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(15): 131–135.
HUANG Weirong, XI Lei. *Sci Technol Eng*, 2017, 17(15): 131–135.
- [64] CHEN D D, DING Q J, ZHANG G Z, et al. Investigation of early vehicle-bridge coupling vibration on the properties and microstructure of lightweight UHPC incorporating coal gangue ceramics[J]. *Constr Build Mater*, 2025, 493: 143105.
- [65] 张永娟, 张悦然, 张雄. 改善混凝土抗扰动性能的三种途径[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(1): 26–29.
ZHANG Yongjuan, ZHANG Yueran, ZHANG Xiong. *J Build Mater*, 2011, 14(1): 26–29.
- [66] LIU S J, YU L, XU B W, et al. Damage resistance of calcium sulfoaluminate cement-based engineered cementitious composite (CSA-ECC) under vehicle-bridge coupling vibration[J]. *Mater Struct*, 2024, 57(5): 121.
- [67] LIU S J, YU L, HAN H, et al. Effect of vehicle-bridge coupled vibration on the performance of magnesium phosphate cement repair materials[J]. *Materials*, 2021, 14(24): 7743.
- [68] 郑欣欣. 抗扰动超早强伸缩缝修补混凝土制备与性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
ZHENG Xinxin. Preparation and properties of anti-disturbance super early strength concrete for the repair of expansion joints[D]. Xi'an: Changan University, 2023.
- [69] 常青山, 安昊文, 郎慧东, 等. 用于桥梁加固的抗扰动超高性能混凝土制备及性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2022, 49(7): 17–21.
CHANG Qingshan, AN Haowen, LANG Huidong, et al. *New Build Mater*, 2022, 49(7): 17–21.
- [70] 陈鹏. 桥梁湿接缝早强混凝土配比设计与力学功效分析研究[J]. *交通世界*, 2022(7): 36–37.
CHEN Peng. *Transpoworld*, 2022(7): 36–37.
- [71] 王玲, 蔡同星, 夏前进, 等. 早强剂对混凝土抗扰动性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2025(5): 23–27.
WANG Ling, CAI Tongxing, XIA Qianjin, et al. *China Concr Cem Prod*, 2025(5): 23–27.
- [72] 孟乔, 黄维蓉, 马晓东, 等. 抗扰动复合外加剂对水泥水化产物的影响[J]. *中外公路*, 2022, 42(1): 240–243.
MENG Qiao, HUANG Weirong, MA Xiaodong, et al. *J China Foreign Highw*, 2022, 42(1): 240–243.
- [73] 蒋汉青. 新旧桥梁桥面板连接施工中抗扰动混凝土的应用[J]. *工程技术研究*, 2024, 9(14): 121–123.
JIANG Hanqing. *Eng Technol Res*, 2024, 9(14): 121–123.
- [74] 周浩天, 王雨铮, 谢鑫, 等. 矿物掺和料对混凝土抗扰动性能的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2025, 47(4): 15–20.
ZHOU Haotian, WANG Yuzheng, XIE Xin, et al. *J Wuhan Univ Technol*, 2025, 47(4): 15–20.
- [75] 田景松, 杨荣俊, 杨思忠, 等. C70抗扰动高性能混凝土的应用研究[J]. *市政技术*, 2013, 31(1): 115–117.
TIAN Jingsong, YANG Rongjun, YANG Sizhong, et al. *Munic Eng Technol*, 2013, 31(1): 115–117.
- [76] WANG Y, ZHENG X X, ZHANG J H, et al. Research on the anti-disturbance performance of concrete[J]. *J Phys: Conf Ser*, 2023,

- 2437(1): 012028.
- [77] KWAN A K H, NG I Y T. Adding steel fibres to improve shock vibration resistance of concrete[J]. *Mag Concr Res*, 2007, 59(8): 587–597.
- [78] 李利伟, 杨建辉. 抗扰动快硬高延性混凝土的制备[J]. *砖瓦*, 2021(12): 17–19.
- LI Liwei, YANG Jianhui. Block-Brick-Tile, 2021(12): 17–19.
- [79] 曾过生, 陈德华. 基于抗扰动混凝土材料性能的拼宽桥梁接缝方案仿真分析[J]. *运输经理世界*, 2023(16): 157–159.
- ZENG Guosheng, CHEN Dehua. *Transp Bus China*, 2023(16): 157–159.
- [80] 戴民, 李昊欣. 玄武岩纤维对混凝土扰动条件下力学性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(2): 642–648.
- DAI Min, LI Haoxin. *Bull Chin Ceram Soc*, 2017, 36(2): 642–648.
- [81] 李昊欣. 桥梁工程抗扰动混凝土的性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
- LI Haoxin. Performance study of anti-disturbing concrete for bridge engineering[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.
- [82] 周大庆, 任达成, 尤诏, 等. 交通修补用机制砂抗扰动自密实混凝土的配制与工程应用[J]. *混凝土世界*, 2013(5): 56–61.
- ZHOU Daqing, REN Dacheng, YOU Zhao, et al. *China Concr*, 2013(5): 56–61.
- [83] 林培云. C50高抗扰动混凝土在新老桥拼接缝中的应用[J]. *中国水泥*, 2025(1): 85–87.
- LIN Peiyun. *China Cem*, 2025(1): 85–87.
- [84] FANG Y K, HE X B, ZHOU Y P, et al. Multiscale anti-disturbance Characterization of nanocellulose concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 408: 133722.

作者贡献声明:

杨军: 论文构思、分析/综合数据并推导结论、撰写初稿、获取资助

刘立: 调查研究、数据管理、分析/综合数据并推导结论、绘制图表

张高展: 软件使用、验证

丁庆军: 提供资源、获取资助、审阅与修订

赵明宇: 监督指导、项目管理

陈冬冬: 调查研究

Effect of Vehicle-Bridge Coupling Vibration on Early-Age Concrete Performance: A Short Review

YANG Jun^{1,2}, LIU Li^{1,2}, ZHANG Gaozhan^{1,2}, DING Qingjun³, ZHAO Mingyu⁴, CHEN Dongdong³

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China;

2. School of Material Science and Chemical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Extended Abstract

Mastering the impact of vehicle-bridge coupling vibration on the mechanical properties and durability of early-age concrete is crucial for implementing effective countermeasures based on the extent of damage. This vibration typically occurs during bridge widening and reinforcement projects, particularly when employing a half-width construction and half-width traffic. This review summarizes recent advancements on the concrete performance changes and modulation under vibration environments induced by vehicles or trains, focusing on the characteristics of vehicle-bridge coupling vibration, the evolution of concrete properties, its underlying mechanisms, and the existing modulation measures. The aim is to thoroughly analyze the impact of vehicle-bridge coupling vibration on the concrete performance and explore the corresponding modulation strategies, thus providing theoretical guidance and design references for such construction methods.

The spatial variation in bridge vibration response is affected by a combination of factors, including structural modal characteristics, vehicle speed and load position, as well as boundary conditions. The vibration of a bridge is closely related to its structural design, and the stiffness and the natural frequency decrease as the span increases, leading to larger vibration amplitudes. Vibrations exhibit a significant spatial non-uniformity, with the dominant vertical response and the most pronounced vibration at mid-span. An increase in vehicle speed and load enhances the impact effect, potentially exciting higher modes and even causing resonance, further amplifying the vibration amplitude. The expansion joints at the ends of the bridge and the junctions between new and old bridge sections, due to differences in connection status or structural discontinuity, are prone to local disturbances or resonance phenomena, intensifying the vibration response.

Vehicle-bridge coupling vibration significantly affects the structure and performance of concrete, and the interaction between these factors is closely related. Vibration leads to the migration of material components, reducing the yield stress of the cement paste, which in turn causes segregation and affects the stability of mechanical properties. Moderate vibration refines the pore structure, enhancing density and improving concrete performance, while high-intensity vibration coarsens the pores, induces cracks, and reduces overall performance. Moderate vibration can also damage the semi-permeable membrane layer on the cement surface, promoting cement hydration, generating more C-S-H gel, and improving the performance. However, excessive vibration or vibration during sensitive periods can disrupt the gel interconnections, weakening concrete performance. High-intensity and sensitive-period vibrations further damage the interfacial transition zone, increase porosity, and induce microcracks, thus leading to a significant performance degradation.

Modulation measures for vehicle-bridge coupling vibration mainly include reducing the disturbance time, enhancing material toughness, and improving self-healing ability. Reducing disturbance time can be achieved by using early-strength agents/cement or composite admixtures/cement, enabling concrete to gain strength quickly and resist the adverse effects of vibration. Enhancing material toughness can be achieved *via* incorporating steel fibers, synthetic fibers, basalt fibers, or other materials, improving the stress transfer and crack modulation ability of concrete. Improving self-healing ability involves activating hydration reactions or releasing repair substances during the early stages of crack formation to seal microcracks, restoring material structural integrity and improving service stability. Moreover, reducing disturbance time and enhancing material toughness are applied in engineering with the significant results.

Summary and prospects This review summarizes the latest research progress on the performance changes and modulation of early-age concrete under vehicle-bridge coupled vibration, focusing on the analysis of vibration characteristics, concrete performance changes, and the underlying mechanisms, and discussing the existing modulation measures. Future research should develop lab-scale simulation methods that more closely reflect actual vibration characteristics, considering the coupling effects of temperature, humidity, load, and corrosion, to comprehensively explore the evolution of concrete performance under practical conditions. In addition, *in-situ* characterization systems for vibration loading should be also developed, using techniques such as 3D CT, NMR, DIC, and acoustic emission to capture the evolution of the concrete microstructure and crack dynamics, thus providing a basis for the design and life prediction of vibration-resistant concrete.

Keywords vehicle-bridge coupling vibration; vibration characteristics; performance degradation; microstructure evolution; modification methods