DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241159

基于受振能量密度的新拌混凝土密实性实时监控方法

边 策[1],崔海涛[2],田正宏[3],迟守旭[1],刘志明[1]

(1. 水利部水利水电规划设计总院,北京 100120;2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司,
天津 300222;3. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:作为混凝土施工过程中的关键工艺环节之一,振捣可排除新拌物中的空气并减少空隙,提高硬化混凝土的密实性能。为此,以反映混凝土受振能量密度(E)作为振捣质量的实时监控指标,构建了结合 E 与新拌混凝土性能参数的混凝土密实性实时评价模型,并提出了振捣质量可视化方法,利用自主研发的混凝土振捣质量监控系统实时显示混凝土受振密实状态。现场应用试验结果表明,所提可视化监控方法能够保证振捣施工质量评估的准确性,可为混凝土智能振捣技术研究提供借鉴参考。

关键词:混凝土振捣;振捣棒;振动能量;实时监控;可视化

中图分类号:TV52^{+}3 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)05-0116-05

1 引言

近30年来,我国水利工程已建及在建坝高100 m以上的大中型混凝土工程占50%以上。作为施工过程中关键的工艺环节之一,振捣产生的高频振动能促使新拌混凝土液化,即骨料相互运动,砂浆充填骨料间的空隙,并排出内部空气,提高混凝土的硬化密实性。因此,振捣施工质量对成型混凝土密度、强度及耐久性等性能影响显著[1]。目前最广泛使用同时也是工效最高的振捣设备为混凝土振捣棒。当采用振捣棒插入并振动混凝土时,振动能量由棒体向四周传递并逐渐衰减,而鉴于混凝土振动密实要求满足最小振动能量[2],因此棒体在混凝土中存在有效作用区域,该区域内混凝土受振密实,而区域范围由作用半径表征。现有的混凝土振捣质量评价方法中,主要通过实时监测振捣轨迹和振捣时间对棒体作用范围内的混凝土振捣质量进行评价。但实践中发现,振捣密实时间阈值和振捣作用范围主要采用人为经验取值,随意性强且未考虑钢筋布置等因素的作用影响,导致质量评价结果存在误差。另外,振捣密实时间阈值忽略了棒体作用半径内混凝土振捣质量的空间差异性,也会影响评价结果的准确性。为此,针对目前振捣密实时间阈值和振捣作用范围的随机经验性和概化合理性等方面的不足,本文以混凝土受振能量密度作为质量监控指标,构建新拌混凝土密实性实时监控体系,以便有效指导施工,为混凝土智能振捣技术研究提供参考。

2 振动密实质量实时监测指标

2.1 振捣作用半径

根据TATTERSALL G H等[3-4]试验成果,受振混凝土的黏度随剪切速率的增加而减小,满足假塑性流体流动特性,其本构方程表达式为:

$$\tau = K\dot{\gamma}^{n} \tag{1}$$

式中,τ 为剪切应力,Pa;K 为稠度系数,Pa·s^{n};n 为流动指数,$n<1$。

此外,本文结合试验成果,基于振捣棒工作原理、新拌混凝土流变和渗流理论,并假定混凝土在钢筋网中流动特性类比多孔介质渗流[5],推导得到振捣作用半径表达式[4]为:

$$R_{is} \approx 10.3\left[(1-0.03\mu^{0.37})(1-0.01\mu^{0.47})fAR_0^2\right]^{\frac{1}{3}} \cdot \left(0.35+\frac{0.21}{\tau_0 fA}+\frac{73.72}{\tau_0}\right)^{\frac{0.33\tau_0 fA}{1.47fA\mu+0.02\tau_0+0.03\tau_0 fA}} \tag{2}$$

收稿日期:2024-06-25,**修回日期**:2024-07-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3005605);国家自然科学基金面上项目(51879094)

作者简介:边策(1988-),男,高级工程师,研究方向为水利水电工程施工新技术新材料,E-mail:biance123123@126.com

$$\begin{cases} R_{is}^{s} \approx 4.41 R_0^{1/2} (fA)^{3/8} \left(\dfrac{\tau_0}{\mu}\right)^{1/8} \left(k_{pe} \dfrac{M_{ss}}{d_{ss}} \varphi\right)^{1/16} \cdot \\ \left(0.35 + \dfrac{0.21}{\tau_0 fA} + \dfrac{73.72}{\tau_0}\right)^{\frac{0.5\tau_0 fA}{1.47 fA\mu + (0.02+0.03Af)\tau_0}} \\ k_{pe} = -\dfrac{(M_{sm}+d_{sm})}{16}\left[2\ln y + \dfrac{(1-y)^2}{(1+y)^2} + \dfrac{(1-y^4)}{2(1+y^4)}\right] \\ y = d_{sm}/(M_{sm}+d_{sm}) \end{cases} \tag{3}$$

式中,R_{is}、R_{is}^{s} 分别为振捣棒在素、钢筋混凝土中的作用半径,m;μ 为新拌物塑性粘度,Pa·s;f 为振捣棒振频,Hz;A 为振捣棒振幅,m;R_0 为棒体半径,m;τ_0 为新拌物屈服应力,Pa;M_{sm}、d_{sm} 分别为相邻主筋净距及主筋直径,m;k_{pe} 为垂直主筋布向的渗透系数,m^2;M_{ss}、d_{ss} 分别为相邻横向钢筋净距、钢筋直径,m;φ 为多孔介质孔隙率,等于钢筋体积除以浇筑仓号体积。

2.2　混凝土受振能量密度

根据 KIRKHAM R H H 等[6]能量公式可知,真正作用在混凝土上的振动能量公式为:

$$W'_{mr} = v^2 f/(4\pi^2) \tag{4}$$

式中,W'_{mr} 为单位质量混凝土所受的振动能量输入功率,w/kg;v 为距离棒体中心 r 处混凝土流速,m/s[6]。

基于振动能量的概念,创建了新拌混凝土振动能量密度参数[4],其表达式为:

$$E_{uv} = \rho t f^3 \left[(1-0.03\mu^{0.37})(1-0.01\mu^{0.47})A\right]^2 \left(\frac{R_0}{r}\right)^4 \tag{5}$$

$$\begin{cases} E_{uv}^{s} = 2.42\rho t \left(k_{pe} \dfrac{M_{ss}}{d_{ss}} \varphi\right)^{1/4} \left(\dfrac{\tau_0}{\mu}\right)^{1/2} f^{5/2} A^{\frac{3}{2}} \left(\dfrac{R_0}{r}\right)^2 \\ k_{pe} = -\dfrac{(M_{sm}+d_{sm})}{16}\left[2\ln y + \dfrac{(1-y)^2}{(1+y)^2} + \dfrac{1-y^4}{2(1+y^4)}\right] \\ y = d_{sm}/(M_{sm}+d_{sm}) \end{cases} \tag{6}$$

式中,E_{uv}、E_{uv}^{s} 分别为素、钢筋混凝土振动能量密度,J/m^3;ρ 为新拌物密度,kg/m^3;t 为振捣时间,s;r 为振捣棒作用范围内的混凝土某位置处距棒体轴心的垂直距离,m;y 为过程参量,m。

基于振动能量密度和混凝土新拌特性,可通过支持向量机理论方法构建硬化孔隙率预测模型,最终基于遗传寻优算法可获取典型配比条件下硬化孔隙率最小值所对应的新拌混凝土振动密实能量密度阈值 E_0[4]。

3　混凝土密实性实时评价和可视化显示

3.1　密实性实时评价模型

为实现现场混凝土浇筑振捣工艺质量过程控制,需构建现场混凝土振捣密实性实时评价模型。该模型将实时判定浇筑区域内剖分的体元密实状态并最终通过远程监控程序可视化显示。体元密实度表达式为:

$$\begin{cases} E_V = E_0 V_V & \\ |(E-E_V)/E_V| \leqslant \delta & \text{振捣密实} \\ -2\delta \leqslant (E-E_V)/E_V < -\delta & \text{一级欠振} \\ (E-E_V)/E_V < -2\delta & \text{二级欠振} \\ \delta < (E-E_V)/E_V \leqslant 2\delta & \text{一级过振} \\ (E-E_V)/E_V > 2\delta & \text{二级过振} \end{cases} \tag{7}$$

式中,E_0 为混凝土振动密实能量密度阈值,J/m^3;V_V 为单个体元表征的混凝土体积,m^3;E_V 为体元密实能量阈值,J;δ 为能量容差率,根据工程质量要求确定,系统默认为 0.2;E 为作用半径范围内体元实际受振能量,J。

E_0 可通过典型工程的振捣施工参数,并结合硬化孔隙率预测模型和遗传算法寻优确定最小孔隙率值后反演得到;体元能量 E 为单位时间能量 E_i 累加所求得,表达式为:

$$E = \sum_{i=1}^{T} E_i \tag{8}$$

其中　　$T = t/\Delta t$

式中,Δt 为振捣点数据实时集周期,系统默认 1 s;t 为振捣时间,当 $\Delta t = 1$ s 时,$T = t$。

E_i 计算分为素混凝土和钢筋混凝土两种情况,其中素混凝土中表达式为:

$$\begin{cases} E_i = 0 \quad i = 1,2,\cdots,T & r_i > R_{is} \\ E_i = \rho \Delta t V_V f^3 \left[(1-0.03\mu^{0.37}) \cdot \right. & \\ \left. (1-0.01\mu^{0.47})A\right]^2 (R_0/r_i)^4 & r_i \leqslant R_{is} \end{cases} \tag{9}$$

在钢筋混凝土中表达式为:

$$\begin{cases} E_i = 0 \quad i = 1,2,\cdots,T \quad r_i > R_{is}^{s} \\ E_i = 2.42\rho \Delta t f^{5/2} A^{3/2} V_V \left(k_{pe} \dfrac{M_{ss}}{d_{ss}} \varphi\right)^{1/4} \left(\dfrac{\tau_0}{\mu}\right)^{1/2} \left(\dfrac{R_0}{r_i}\right)^2 \\ \qquad r_i \leqslant R_{is}^{s} \end{cases} \tag{10}$$

式中,r_i 为体元距棒体棒心距离,m。

3.2　振捣质量可视化方法

振捣质量是基于混凝土密实性实时评价模型计算后在客户端电脑程序中三维显示,具体实现步骤如下。

步骤 1　剖分三维建筑模型为若干体元,根据工程编号调用振捣施工参数。

步骤 2 各振捣点处振捣棒作用范围半径根据式(2)、(3)计算，并考虑振捣棒外形，构建振捣作用区域。作用区域为胶囊体，胶囊体由作用范围半径 R_{is}、棒体倾角 Φ、振捣深度 L 表征(图 1)。

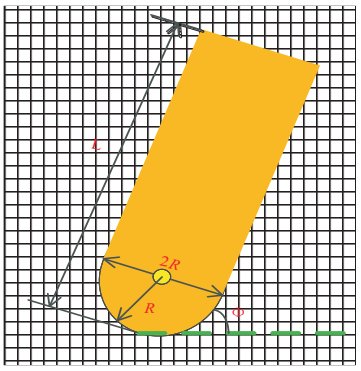
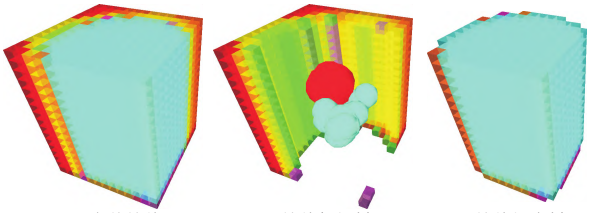


图 1 混凝土振捣棒影响范围剖面图

Fig. 1 Section of influence scope of concrete vibrator

步骤 3 实时判断每个离散体元与胶囊体空间位置关系，根据振捣质量评价模型中式(8)～(10)确定各体元实际振动能量。再由式(7)确定体元质量等级。

步骤 4 根据体元受振能量与阈值大小关系，依据振捣质量分级标准依次判断体元质量状态，并自动赋予设定不同状态索引颜色，加以区分(图 2)。



(a) 完整柱体 (b) 柱体欠振单元 (c) 柱体振实单元

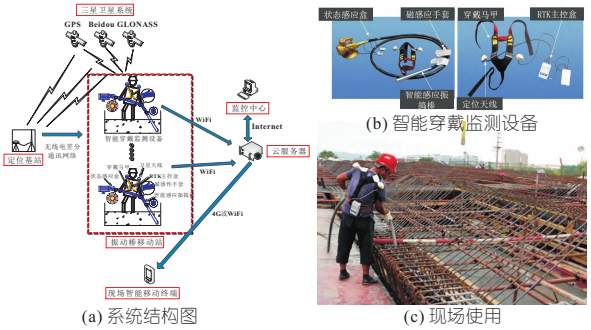
图 2 振捣质量可视化

Fig. 2 Visualization of vibration quality

振捣作业过程中客户端电脑程序将实时发送混凝土振捣质量图、缺陷位置、程度等信息至现场施工管理人员手持的智能移动终端中的应用程序中，指导工人及时修复，提高施工质量。由于欠振区域可补振修复，但过振区域暂无及时有效修复措施，因此本文系统中主要向浇筑现场反馈混凝土欠振信息。为实现此功能，客户端电脑需搜索欠振区域，计算区域体积、空间位置、累计欠振区域体积及其占构件总体积百分比等信息参数。其中欠振区域搜寻采用多叉树搜索算法。

4 混凝土振捣质量监控系统

为实现对单位体积混凝土受振能量 E 的实时监测，在已开发的混凝土振捣质量实时监控系统的基础上[7]，引入新拌混凝土屈服应力、塑性粘度、钢筋直径及净距等监测量，完善了混凝土振捣质量实时监控系统。系统由振捣棒流动站、GNSS 定位基准站、云服务器、监控中心、现场智能移动终端组成，系统组成结构见图 3。



(a) 系统结构图 (b) 智能穿戴监测设备 (c) 现场使用

图 3 混凝土振捣施工实时监控系统

Fig. 3 Real time monitoring system for concrete vibrating construction

系统通过现场振捣施工人员穿戴自主研发智能监测设备，采集监测振捣质量信息，结合监控中心软件分析处理，通过现场智能移动终端中的应用程序反馈缺陷信息至浇筑仓号并修复，实现对混凝土振捣质量实时监控的目的。

5 实例应用

5.1 工程概况

混凝土振捣施工质量监控系统已应用于四川金沙江观音岩水电站$^{\#}$1 安装间 6～8 段底板浇筑，共投入 4 套现场使用。钢筋为双向双排楼板筋，受力筋配筋形式为 Φ16 mm@150 mm，分布筋配筋形式为 Φ10 mm@150 mm，配筋率为 0.34%。混凝土水胶比 0.4，砂子细度模数 2.7，砂率 42%，表观密度为 2.67 g/cm^3，石子为碎石，连续级配且最大粒径 30 mm，表观密度为 2.69 g/cm^3，粉煤灰掺量 20%，减水剂为聚羧酸减水剂，掺量为胶凝料量 0.6%。系统建模完成后输入施工参数，具体参数值见表 1。经计算振捣棒作用半径约为 3.6 倍棒径，即 18 cm。混凝土振动密实能量密度阈值约为 140.6 J/m^3。

表 1 振捣施工参数

Tab. 1 Vibration construction parameters

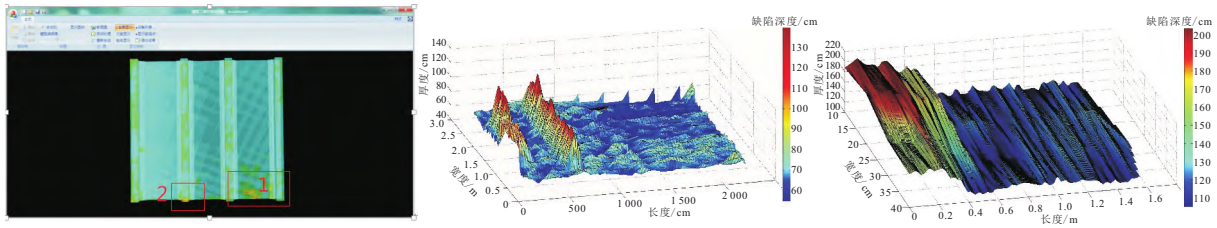
参数	取值	参数	取值	参数	取值
ρ/(kg·m^{-3})	2 297	f/Hz	200	d_{sm}/mm	16
A_C/%	4.1	A/mm	2	M_{sm}/mm	134
τ_0/Pa	796	D_0/mm	50	d_{ss}/mm	10
μ/(Pa·s)	79	φ/%	99.64	M_{ss}/mm	140

振捣过程中利用系统进行施工质量可视化监控，施工结束后实施无损检测，首先通过 IES 扫描式冲击回波测试仪测试验证缺陷显示区域质量

情况[8],并采用 Autoclam 测试仪分别测定混凝土缺陷和振实部位的表层透气系数 I_{API} 和吸水系数 I_{WSI},以表征振捣密实性,量化评价混凝土浇筑密实效果[9],对比振捣质量三维显示图像验证监控方法的可靠性。

5.2　应用效果分析

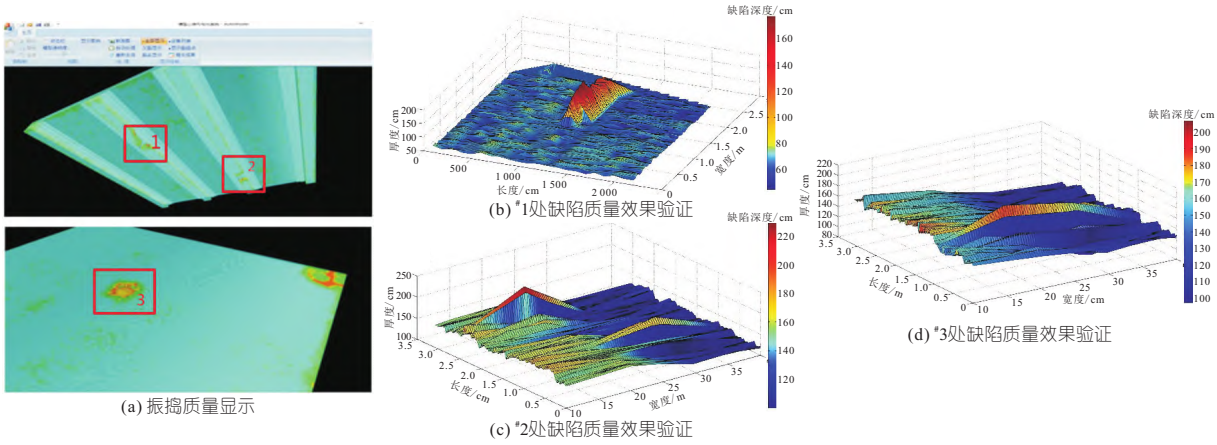
混凝土振捣质量监控系统应用于现场施工,可得底板混凝土浇筑最终振捣质量三维显示及相应缺陷处的冲击回波测试结果分别见图 4～6(图中振捣质量显示中红框标记局域为欠振区域)。由图 4～6 可知,混凝土振捣质量大部分显示颜色为青色和绿色,即稍微过振和振动密实,少部分显示为红色及黄色即欠振区域,且大多集中在钢筋布设密集、气泡不易排出的不同浇筑段的连接处。IES 冲击回波仪对显示缺陷的实际浇筑位置处混凝土质量检测结果表明,上述部位混凝土结构厚度明显不均,内部确实存在缺陷,与系统反映质量情况一致。



(a) 振捣质量显示　(b) #1处缺陷质量效果验证　(c) #2处缺陷质量效果验证

图 4　第六段混凝土振捣质量显示及缺陷回波成像

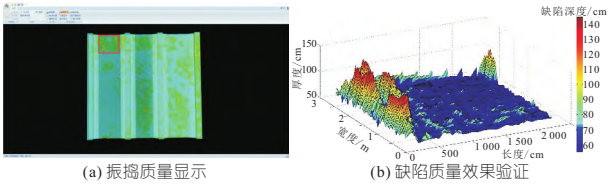
Fig. 4　Vibration quality display and defect echo imaging of the sixth section of concrete



(a) 振捣质量显示　(b) #1处缺陷质量效果验证　(c) #2处缺陷质量效果验证　(d) #3处缺陷质量效果验证

图 5　第七段混凝土振捣质量 3D 显示及缺陷回波成像

Fig. 5　Vibration quality display and defect echo imaging of the seventh section of concrete



(a) 振捣质量显示　(b) 缺陷质量效果验证

图 6　第八段混凝土振捣质量 3D 显示及缺陷回波成像

Fig. 6　Vibration quality display and defect echo imaging of the eighth section of concrete

对 IES 试验数据点插值计算获得实际欠振面积,并与系统中统计各欠振区域水平投影面积比较,结果见表 2。由表 2 可知,系统显示欠振面积与实测缺陷面积相对误差在 10%左右,误差主要来自于监控系统测量误差和由于 IES 设备灵敏性导致的部分稍微过振区域被评价存在质量缺陷,但考虑到施工现场振捣质量控制复杂性,研究认为 10%左右相对误差可满足使用要求,监控方法可较准确定位显示缺陷区域。

表 2　系统显示欠振面积统计

Tab. 2　Statistics of under-vibrated area displayed by the system

缺陷位置	系统显示欠振面积/m^2	实测缺陷面积/m^2	相对误差/%
第六段#1	2.94	3.29	10.6
第六段#2	0.97	1.07	9.3
第七段#1	2.77	2.91	4.8
第七段#2	2.48	2.76	10.1
第七段#3	1.93	2.18	11.5
第八段	3.55	3.91	9.2

根据第六段底板振捣质量显示结果,分别选取振捣密实和欠振部位处多个测点测定表面渗透性,结果见表 3,其中 I_{API}、I_{WSI} 越高,抗渗性越低。由 I_{API} 和 I_{WSI} 划分的混凝土质量等级可知[8],当 $0.1<I_{API}\leqslant 0.5$ 或 $1.3<I_{WSI}\leqslant 2.6$ 时,混凝土质量等级为好;而当 $0.5<I_{API}\leqslant 0.9$ 或 $2.6<I_{WSI}\leqslant 3.4$ 时,质量等级为差,可知密实区域混凝土质量等级高于欠振区域,这与系统显示判定结果一致。

结合 IES 检测的系统缺陷位置定位精度结果，表明本文提出的基于受振能量密度的新拌混凝土密实性实时可视化监控方法能准确评估振捣施工质量，可用于现场混凝土浇筑作业质量控制。

表 3 不同质量区域混凝土 I_{API} 与 I_{WSI} 实测值

Tab. 3 Measured values of I_{API} and I_{WSI} for concrete in different quality areas

测点位置	I_{API}	I_{WSI}	测点位置	I_{API}	I_{WSI}
密实区域#1	0.118	1.335	一级欠振#1	0.654	2.821
密实区域#2	0.253	2.033	一级欠振#2	0.735	3.002
密实区域#3	0.376	2.128	一级欠振#3	0.586	2.734
密实区域#4	0.391	2.586	一级欠振#4	0.695	2.993
密实区域#5	0.182	1.162	二级欠振#5	0.767	3.029
密实区域#6	0.22	1.917	二级欠振#1	0.815	3.326
密实区域#7	0.437	2.402	二级欠振#2	0.899	3.215
密实区域#8	0.484	2.299	二级欠振#3	0.966	3.184

注：I_{API}、I_{WSI} 单位分别为 Ln(mbar)/min、$10^{-7}m^3/min^{0.5}$。

6 结论

a. 构建了现场混凝土振捣密实性实时评价模型，实现了浇筑区域内剖分体元密实性的实时判定，为远程监控程序可视化判定显示振捣施工质量状态提供了计算依据。

b. 在考虑混凝土振动能量衰减变化和作用半径重叠区域振动能量叠加的实际情况下，研发了混凝土振捣质量可视化方法，通过振动能量累加计算并与剖分体元振动密实能量阈值比较分析，确定了振捣质量状态，并通过对所有体元受振质量信息遍历计算及着色显示，形成了现场混凝土浇筑实时质量云图。

c. 改进后的振捣监控系统的工程现场应用效果表明，基于受振能量密度的新拌混凝土密实性实时可视化监控方法可较准确定位显示缺陷位置与程度，建立了混凝土精细化振捣施工控制新途径。未来将依托开发的监控系统获得振捣信息大数据，并通过数据分析挖掘等工作，对本文提出的监控方法的普适性开展更详细深入的研究。

参考文献：

[1] 马宇航，田正宏，马元山. 表面振动激励下新拌混凝土动力响应与能量传递特征[J]. 水电能源科学，2023，41(3)：157-160，116.

[2] KOLEK J. Research on the vibration of fresh concrete[C]// Conference on Vibrations-Compaction Techniques，Julius Hoban，Budapest，1963.

[3] TATTERSALL G H，BAKER P H. The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete[J]. Magazine of concrete research，1988，40(143)：79-89.

[4] 边策. 受振混凝土密实流变理论模型及实时智能监控方法研究[D]. 南京：河海大学，2018.

[5] VASILIC K，MENG B，KÜHNE H C，et al. Flow of fresh concrete through steel bars：A porous medium analogy[J]. Cement and concrete research，2011，41(5)：496-503.

[6] KIRKHAM R H H，WHIFFIN A C. The compaction of concrete slabs by surface vibration：First series of experiments[J]. Magazine of concrete research，1951，3(8)：79-91.

[7] 田正宏，边策，毛龙，等. 混凝土振捣动态可视化监测系统开发研究[J]. 建筑材料学报，2013，16(3)：508-513.

[8] ZHANG M X，ZHANG Y S. Study on the internal defects of concrete slab on the basis of IES[C]// Proceedings of the 2016 International Conference on Civil，Transportation and Environment，30-31 January 2016，Guangzhou，China，2016.

[9] BASHEER L，CLELAND D J，BASHEER M P A，et al. Autoclam permeability system to assess the protection provided by surface treatments[C]//International Conference on Durability of Concrete Structures Hangzhou，PEOPLES R China，2008.

Real-time Monitoring Method for Compactness of Fresh Concrete Based on Vibration Energy Density

BIAN Ce[1]，CUI Hai-tao[2]，TIAN Zheng-hong[3]，CHI Shou-xu[1]，LIU Zhi-ming[1]

(1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design，Ministry of Water Resources，Beijing 100120，China；2. China Water Resources Beifang Investigation，Design and Research Co. Ltd.，Tianjin 300222，China；3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering，Hohai University，Nanjing 210098，China)

Abstract：As one of the critical process steps in concrete construction，vibration can eliminate air from the fresh concrete and reduce voids，thereby improving the compactness of hardened concrete. Based on the energy density (E) of vibrated concrete as monitoring index of quality，a real-time evaluation model of concrete compactness combining E and performance parameters of fresh concrete is constructed. Meanwhile，a visualization method of vibration quality is proposed and applied in the self-developed monitoring system for concrete vibration quality to display the process of concrete compaction in real-time. The test results on site show that the method can effectively ensure the accuracy of assessment for construction quality，which will provide reference for the study of intelligent vibration technology for concrete.

Key words：concrete vibration；vibrator；vibration energy；real-time monitoring；visualization