

# 混凝土振捣棒作用范围试验研究

边策<sup>1</sup>, 李宁博<sup>1</sup>, 田正宏<sup>2</sup>, 沈蔚康<sup>2</sup>

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

**摘要:** 为研究混凝土振捣施工时振捣棒作用范围, 本文试验研究了作用半径随振动时间、振频、棒径、新拌物流变性、钢筋布置的变化规律。主要试验结果表明: 作用半径随着振动时间延长快速增大然后趋于稳定, 混凝土流变性对稳定历时影响较小; 作用半径随着振频、棒径提高而逐渐增大, 而作用半径与新拌混凝土屈服应力与塑性粘度比值呈反相关关系; 随着钢筋中主筋和横向钢筋相对间距的减小, 振捣棒作用半径明显减小, 同时钢筋、素混凝土中作用半径比值随着振频提高而逐渐减小。试验结果将指导现场振捣作业, 并为后续振捣棒作用半径预测提供可靠参数依据。

**关键词:** 混凝土; 振捣棒; 作用半径; 钢筋

**中图分类号:** TV523

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

我国水利工程建设事业近三十年来取得巨大成就, 其中已建和在建坝高 100m 以上的大中型混凝土工程占 50%以上<sup>[1]</sup>。混凝土振捣是施工过程中关键的工艺环节之一, 目前工程现场最广泛使用同时也是工效最高的混凝土振捣设备为插入式振捣器, 即振捣棒。当采用振捣棒振动混凝土时, 振动能量由振源向四周传递并逐渐衰减, 而混凝土振动密实要求满足最小振动能量<sup>[2]</sup>, 因此振捣棒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。

振捣棒作用半径是混凝土振捣作业时重要的工艺参数之一, 对施工质量影响较大, 开展其相关研究十分必要。但是新拌物振捣密实机理复杂, 相关研究十分稀少且不够深入, 如已有研究混凝土工作性多用坍落度表征, 相比流变参数, 其物理意义不明确, 无法深入探讨混凝土工作性对其振动半径的作用机理, 也未见关于钢筋分布对作用半径的影响分析<sup>[3,4]</sup>, 由此导致目前振捣施工多为经验操作, 质量难以保证。针对上述不足, 本文开展试验研究振动时间、振频、棒径、混凝土流变性和钢筋布置对作用半径影响规律与机理分析, 试验成果将指导现场振捣作业, 并为后续振捣棒作用半径预测提供可靠参数依据。

## 2 试验方案

### 2.1 试验配比及装置

水泥为普硅 42.5 水泥, 性能参数见表 1 所示。砂子为天然河砂, 表观密度 2.61g/cm<sup>3</sup>, 细度模数 2.8。石子为连续级配 5~16mm 碎石, 表观密度分别为 2.79 g/cm<sup>3</sup>, 外加剂选用聚羧酸型减水剂和羟丙基纤维素类增稠剂, 混凝土配合比见

表 2。振捣棒采用手持式振捣棒, 棒径分别为 25 和 35mm, 后接手持式变频器, 通过变频器调节振频、振幅。根据混凝土振捣作业经验, 振捣棒作用范围直径理论经验为棒径 10 倍<sup>[5]</sup>。因此为试验结果准确, 模具水平截面最小边长应超过 10 倍棒径。由于钢筋对振动能量有阻隔衰减作用, 因此为提高振动能量, 加强试验结果对比分析, 当模具中布置钢筋后, 使用  $\phi$  35mm 振捣棒振捣混凝土。

收稿日期: 2020-08-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0401805; 2017YFC0404805); 国家自然科学基金面上项目(51879094)

作者简介: 边策(1988—), 男, 陕西汉中, 工程师, 博士, 主要从事水利水电工程施工新技术及新材料。E-mail: biance@gwip.org.cn

模具分为柱形木模和方形钢模两类，浇筑过程中在模板内壁及底部粘贴发泡橡胶，减小振动能量反射效应，保证更好表现现场实际浇筑情况，见图 1 所示。其中柱形木模，用于浇筑素混凝土，尺寸为  $\phi 50\text{cm} \times 30\text{cm}$ 。而方形钢模用于浇筑钢筋混凝土，模具尺寸为  $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 50\text{cm}$ ，钢模开两排  $\phi 16\text{mm}$  孔，相邻孔心水平间距  $100\text{mm}$ ，垂直间距为  $150\text{mm}$ ，下排孔孔心距底面  $150\text{mm}$ ，孔中可穿钢筋，绑扎后形成钢筋网，上下层钢筋网之间可绑扎弯起钢筋。钢筋布置编号见表 3，其分布由受力钢筋即主筋的相对距离  $x_m$  和横向钢筋即分布筋的相对距离  $x_s$  表征，其中  $x_m = M_m/d_m$ ， $x_s = M_s/d_s$ ， $M_m$ 、 $M_s$  分别为相邻主筋、横向钢筋净距， $d_m$ 、 $d_s$  分别为主筋、横向钢筋直径<sup>[6]</sup>。浇筑时，为保证混凝土保护层厚度，浇筑面高于最顶层钢筋上端边缘  $4\text{cm}$ 。浇筑过程中模板内壁及底层粘贴发泡橡胶，消除模板边界和底层对新拌混凝土振捣能量反射影响。棒体置于模具中心，由脚架固定位置，保持棒身底端至底面约  $1\text{-}2\text{cm}$  间距。

表 1 水泥物理化学性能

烧失量 (%)	三氧化硫 (%)	氧化镁 (%)	比表面积 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	氯离子 (%)	3 天抗折强度 (MPa)	3 天抗压强度 (MPa)
1.5	2.43	1.63	372	0.026	5.7	27.8

表 2 作用半径试验混凝土配比

编号	水灰比	浆骨比	砂率 (%)	水泥用量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	聚羧酸减水剂 (%)	增稠剂 (%)
R-C1	0.55	0.64	45	340	0.4	0
R-C2	0.50	0.64	43	315	0.4	0
R-C3	0.45	0.64	43	353	0.1	0.03
R-C4	0.45	0.64	43	381	0.1	0.02
R-C5	0.40	0.64	48	403	0.1	0.05
R-C6	0.40	0.64	48	420	0.1	0.05



(a) 素混凝土



(b) 钢筋混凝土

图 1 模具及振捣装置

表 3 钢筋布置形式

编号	主筋 (mm)	横向钢筋 (mm)	$x_m$	$x_s$
S1	10@100	10@200	9.0	19.0
S2	10@100	8@100	9.0	11.5
S3	10@100	10@100	9.0	9.0
S4	12@100	10@100	7.3	9.0
S5	14@100	10@100	6.1	9.0

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 流变性

新拌混凝土流变性能采用商用流变仪 ICAR 测定<sup>[7]</sup>，选取宾汉姆模型，模型表达式如下，其中参数屈服应力  $\tau_0$  和塑性粘度  $\mu$  表征新拌物流变特性。

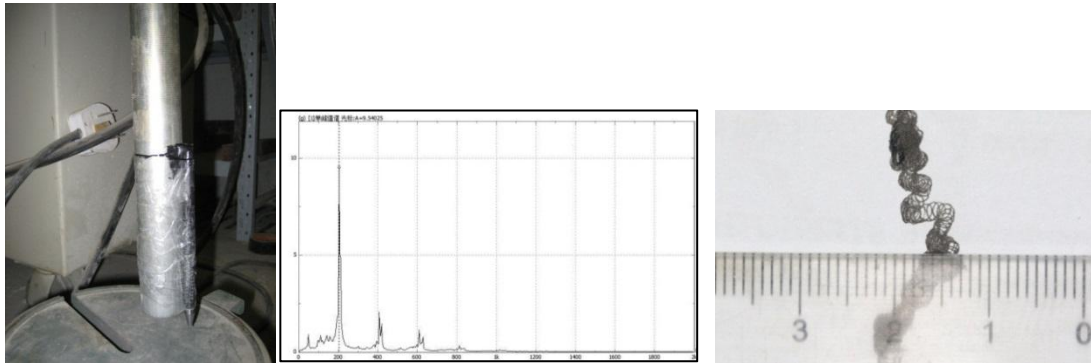
$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中， $\tau$  为剪切应力，Pa； $\tau_0$  为屈服应力，Pa； $\mu$  为塑性粘度，Pa·s； $\dot{\gamma}$  为剪切速率， $s^{-1}$ 。

由公式可知，当  $\tau > \tau_0$  时，混凝土开始流动。

### 2.2.2 振捣棒振频、振幅

振捣棒振动参数包括振频  $f$  和振幅  $A$ ，其中振频测量是将加速度传感器粘贴在棒体，振动后通过动态采集仪采集加速度信号，并经频谱分析得到振频。由于棒体为曲面，加速度传感器平面底层无法仅贴在棒体面上，无法准确通过加速度信号获取振幅。本研究使用胶带将记号笔缠绕固定在悬空振捣棒上，并在棒体底端合适位置放置纸张，保证记号笔正好碰触纸面。棒体振动轨迹通过紧贴棒体的记号笔涂画在纸面上，后经拍照并通过 Image 软件做图像分析，计算得到振幅，如图 2 所示。



(a) 测量装置

(b) 振频采集

(c) 振幅采集

图 2 振动棒振动参数采集

### 2.2.3 振捣棒作用半径

采用法国混凝土协会建议方法测定作用半径<sup>[8]</sup>，具体步骤为振捣棒插入新拌物后，在棒体两侧新拌物表面上，以固定距离间隔（约 1cm）均匀半插入一排铁钉。试验采用铁钉长度 15mm，厚度为 1mm，如图 3 所示。启动振捣棒，直至表面铁钉沉降情况稳定不变后停止振动，并录制整个振动过程铁钉沉降视频，分析作用半径随时间变化规律。振动半径由振动结束后棒体两端未下沉至液面以下的最近两铁钉间距离的一半来表征，见图 4。当测量振捣棒在钢筋混凝土中的作用半径时，考虑到钢筋分布导致作用半径分布不均，因此分别沿平行主筋方向和垂直主筋方向布置钢钉，观察其差异性。试验在混凝土搅拌后十分钟之内完成，因此可忽略水泥水化对试验结果影响。

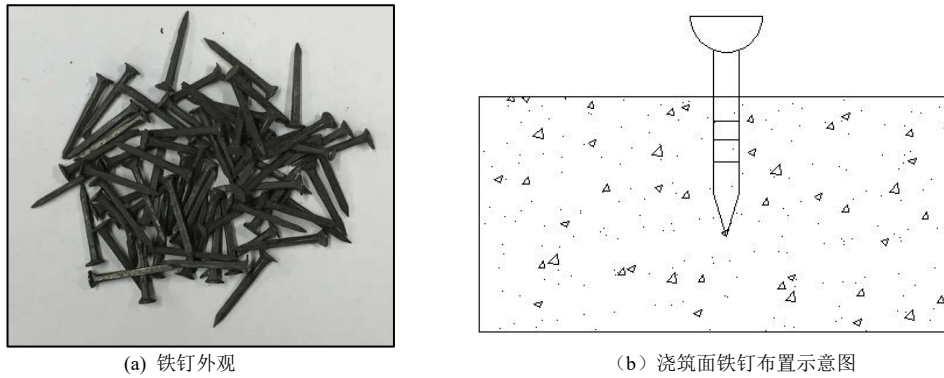


图3 试验铁钉及布置示意图

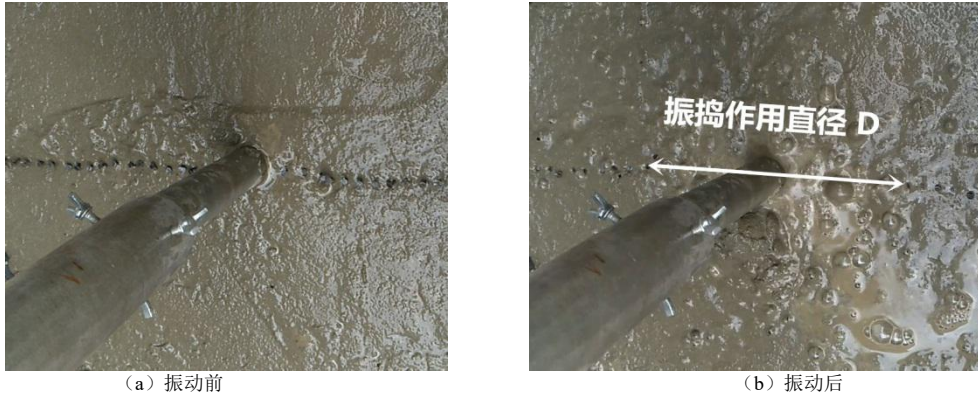


图4 振动前后钢钉沉降情况

为避免布置钢筋可能导致振捣能量传播不均，造成振捣棒作用范围环向变化，以主筋方向为轴，分别沿与主轴 0、30、45、60、90 度夹角布置铁钉，测量振捣棒在钢筋混凝土中的作用半径。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 混凝土流变性

混凝土流变性能如图 5 所示。由图可知，当加入增稠剂后，相比屈服应力，塑性粘度提高明显，这是因为增稠剂是一种长链高分子表面活性剂，能增加新拌混凝土体系粘度。不同于水泥水化产物形成水泥浆体结构时所引起的粘度增加，掺加增稠剂可以改善新拌混凝土的和易性，使拌合物中悬浮粗骨料分散稳定，形成均匀多相体。

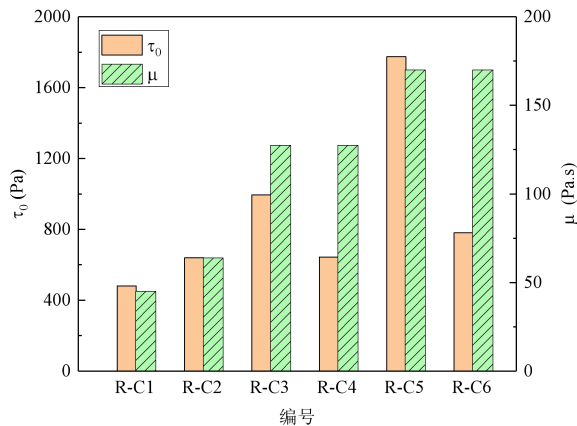


图5 作用半径试验混凝土流变参数

### 3.2 振捣棒作用半径

#### 3.2.1 振动时间影响

使用 $\phi 35\text{mm}$ 振捣棒分别振动 C2、C4 素混凝土，并通过变频器调节振频，测量绘制振捣棒作用半径历时变化曲线，见图 6 所示。图中作用半径随振动时间增长快速增大然后趋于稳定，这表明混凝土受振后固相颗粒间摩擦力并未立即消失，混凝土液化需要一定时间，该现象与 ACI309 报告中指出的混凝土振动液化分阶段现象规律一致<sup>[8]</sup>。

不同振频、棒径条件下，作用半径达到稳定所需时间（即稳定历时）分别见

图 7 和图 8。由图可知，随着振捣棒振频增加，其作用半径稳定历时逐渐减小，而棒径较小的振捣棒作用半径达到稳定所需时间较长。此外，除较干硬的 C5 混凝土外，常态混凝土流变性对半径稳定历时影响较小，稳定历时都在 4s 左右。图 9 结果表明作用半径稳定历时随钢筋量增多而增加，最大稳定历时在 7s 左右。上述因素对作用半径稳定历时的作用影响深层机制原因是当振捣棒振频、棒径增大，或钢筋量减小时，受振混凝土内部剪切速率增加。而根据 Forterre 和 Pouliquen 等人研究结果可知<sup>[9,10]</sup>，固相颗粒所受剪切速率与颗粒间力链形成至断裂时间成反比关系，因此力链断裂时间缩短，颗粒间作用摩擦作用力减小或消失，混凝土振动液化现象较快发生，作用范围区域较快趋于稳定。

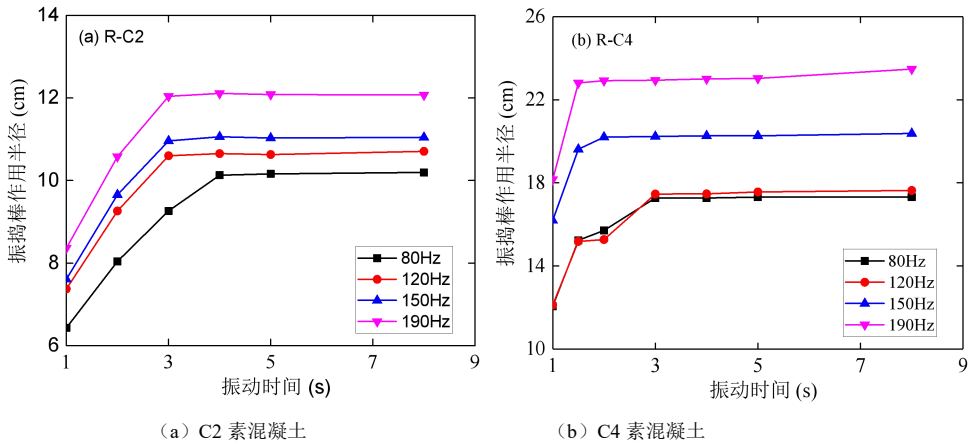


图 6 振捣棒作用半径历时变化

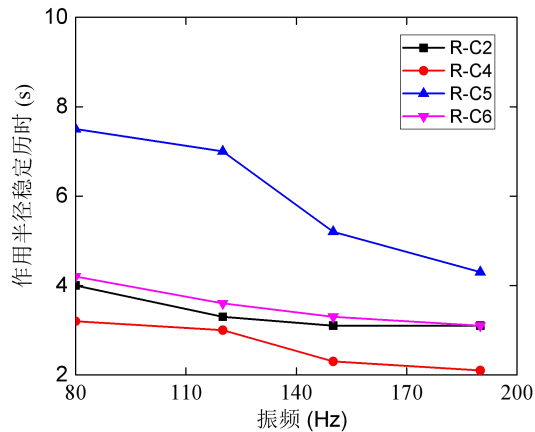


图 7 振频对作用半径稳定历时影响

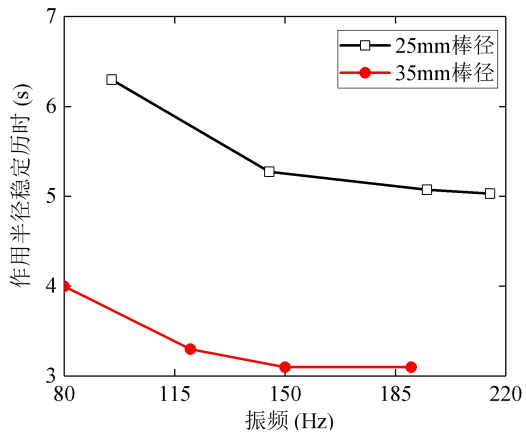


图 8 棒径对作用半径稳定历时影响

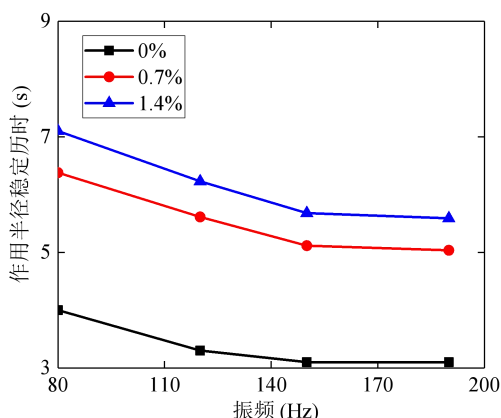


图9 钢筋量对作用半径稳定历时影响

### 3.2.2 振动参数影响

不同振频下振捣棒作用半径见图 10。由图可知，作用半径随着振频提高而逐渐增大，并在 200Hz 左右达到最大值。这可能是由于相比其它振频，200Hz 最接近于新拌混凝土中大部分骨料共振频率，因此混凝土受振稀化明显，振动作用范围最大。其中，使用  $\phi 25\text{mm}$  振捣棒振捣混凝土时，除 R-C4 混凝土外，其他配比混凝土作用半径始终小于 5 倍棒径。  $\phi 35\text{mm}$  振捣棒振捣 R-C2、R-C5 混凝土时，在 40-190Hz 振频条件下，作用半径始终低于  $5D_0$ ，而振捣 R-C4、R-C6 混凝土时，在 190Hz 振频条件下作用半径分别约为 6.5 和 6 倍  $D_0$ 。

不同棒径的振动棒作用半径见图 11，在 R-C2 和 R-C4 混凝土中，较大棒径的振捣棒作用半径更大。这是因为在受振混凝土中，被排开混凝土的质量与振捣器棒头的面积成正相关，根据流体力学原理，被排开混凝土重量与被激起振动混凝土质量有着直接关系，因而作用半径与插入式振捣器棒头直径也成正比关系。

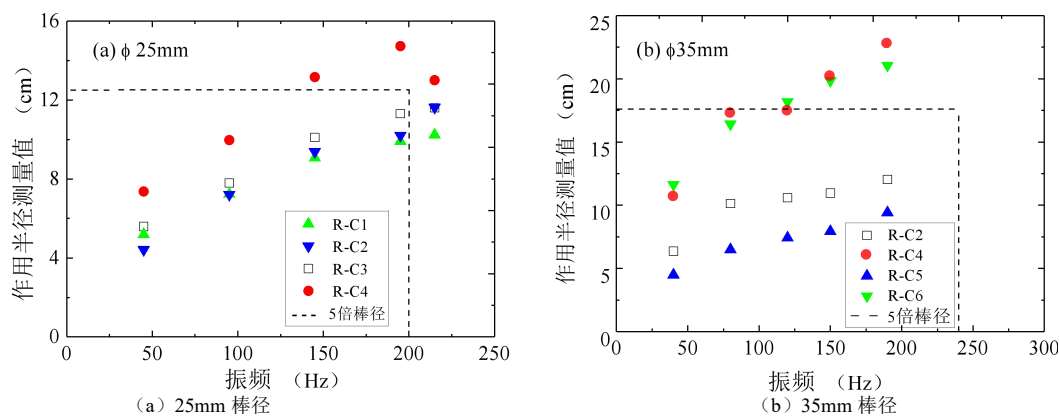
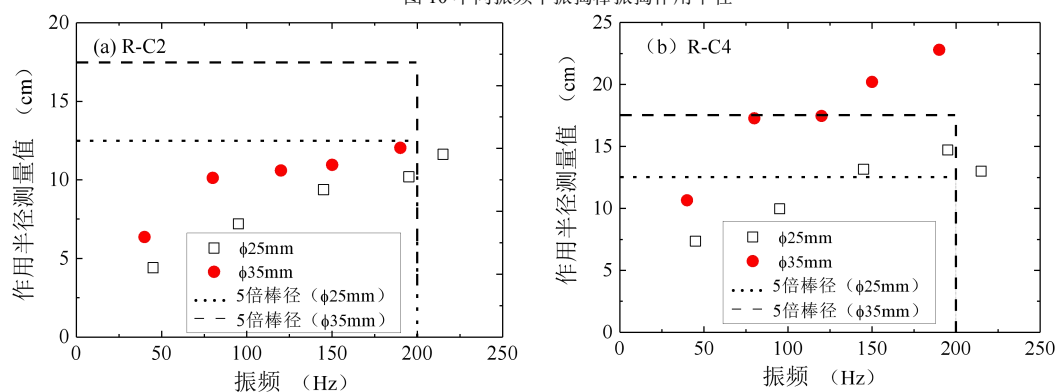


图 10 不同振频下振捣棒振捣作用半径



(a) R-C2 工况

(b) R-C4 工况

图 11 不同棒径对作用半径影响

### 3.2.3 混凝土流变性影响

混凝土中振捣棒作用半径随新拌物 $\tau_0/\mu$ 的变化规律，结果见图 12。由图 12 可知，作用半径与 $\tau_0/\mu$ 基本呈反比关系，其中 $\tau_0/\mu$ 表征颗粒和浆体对振动能量传播的作用影响比值。当 $\tau_0/\mu$ 增加时，颗粒对振动能量传播衰减的影响性增强，即随着 $\tau_0/\mu$ 增加时，混凝土骨料间距离减小，摩擦力增强，振捣能量耗散增多，因此作用半径减小；而 $\tau_0/\mu$ 减小时，浆体对振动能量传播作用影响占主要地位，由于浆体粘度越大，分子间热运动加剧，动量输运交换更多，宏观特征现象是作用半径增加。

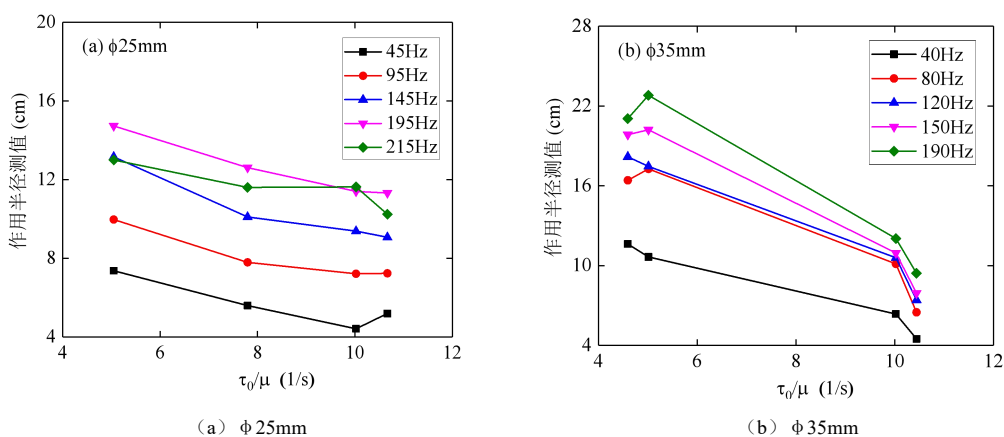


图 12 不同混凝土流变性对作用半径影响

### 3.2.4 钢筋分布影响

不同径向振捣棒作用范围试验结果见图 13。由图 13 可知，在不同钢筋布置形式下，混凝土振捣作用半径在各个方向基本相同，最大差值不超过 1cm，这是因为钢筋网受振后共振导致环向上对能量耗散均匀，因此在钢筋混凝土振捣研究中，作用半径仍可表征振捣棒作用范围。

不同横向钢筋相对距离 $x_s$ 、主筋相对距离 $x_m$ 条件下振捣棒作用半径值见图 14。加入横向钢筋后，振捣棒作用半径明显减小，且横向钢筋相对距离越小，即横向钢筋分布越密，作用半径越小。当振频为 190Hz 时，相对距离为 9cm、11.5 cm、19 cm 的混凝土中作用半径分别约为 16.21cm、17.8cm 和 19.25cm，相比素混凝土，降幅分别约为 23%、17%和 8.6%。主筋对作用半径作用影响与横向钢筋相同，即随着主筋直径增加，相邻主筋间间距减小，对振动能量阻隔耗散作用增强，作用半径减小。

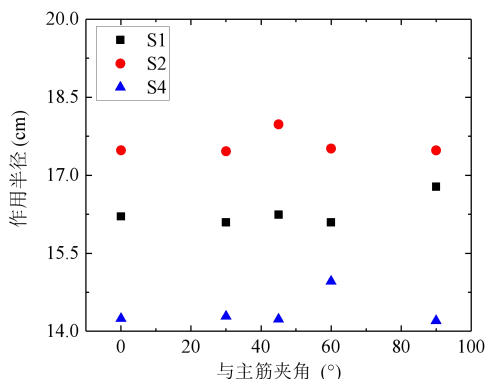


图 13 振捣棒环向不同位置作用半径

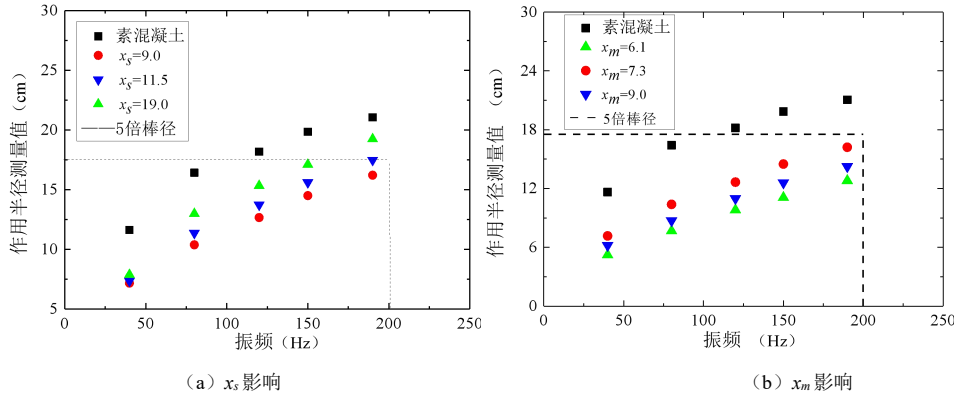


图 14 钢筋分布对振捣作用半径影响

R-C2 混凝土中按表 3 中 S3 方案布置钢筋, 不同流变性能钢筋混凝土与素混凝土中振频对作用半径比值即  $R_{is}^s / R_{is}$  作用影响见图 15。  $R_{is}^s / R_{is}$  随着振频提高而逐渐减小, 表明随着振频提高, 钢筋对振动能量阻隔衰减影响逐渐降低。而在同振频条件下, R-C6 混凝土中  $R_{is}^s / R_{is}$  高于 R-C2, 表明在粘性较大的混凝土中钢筋对振动能量的阻隔衰减作用减小。这可能是因为较高粘度的混凝土受振时, 不易发生骨料离析沉降, 避免了因骨料堵塞钢筋网孔而导致的新拌物流速降低和振捣棒作用半径减小。同时, 图中当振频增高时, R-C2 与 R-C6 两种配比中的  $R_{is}^s / R_{is}$  逐渐接近, 表明粘度对剪切稀化特性作用影响逐渐减弱并趋于稳定。

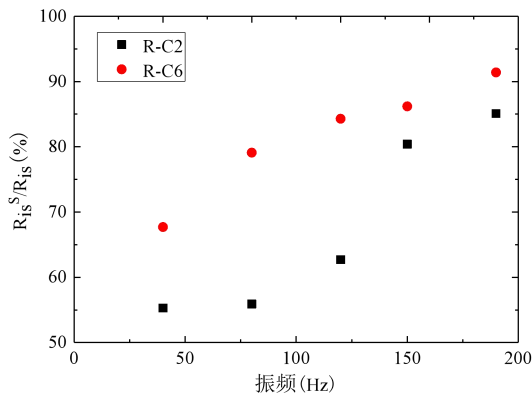


图 15 混凝土流变性对振捣作用半径降幅影响

## 4 结论

- (1) 作用半径随着振动时间延长快速增大然后趋于稳定, 而半径稳定历时随振频、振幅提高而缩短, 而随钢筋增加而延长, 混凝土流变性对稳定历时影响较小。
- (2) 作用半径随着振频、棒径提高而逐渐增大, 并在 200Hz 左右达到最大值, 此外同振频条件下, 作用半径与新拌混凝土屈服应力与塑性粘度比值呈反相关关系。
- (3) 钢筋对能量环向分布影响很小, 因此仍可用作用半径表征振捣作用范围, 且随着主筋和横向钢筋相对间距的减小, 振捣棒作用半径明显减小。
- (4) 钢筋、素混凝土中作用半径比值随着振频提高而逐渐减小, 且同振频条件下, 较高粘度混凝土中, 该比值较大, 但随着振频增高, 不同粘度混凝土中比值差异逐渐减小。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 席浩, 李克信. 水利水电工程施工技术全书. 第三卷, 混凝土工程, 混凝土工程施工规划[M]. 中国水利水电出版社, 2016.
- [ 2 ] Kolek J. Research on the vibration of fresh concrete[C]. Conference on Vibrations— Compaction Techniques, Julius Hoban, Budapest, 1963.
- [ 3 ] 张艳聪. 道路水泥混凝土施工振动性能研究[D]. 河北工业大学, 2011.
- [ 4 ] 张艳聪, 王大鹏, 田波,等. 钢筋网对道路混凝土振动能量的阻隔研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(6):37-41.
- [ 5 ] Banfill P. F. G, Teixeira M., Craik R. Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(9): 932-941.
- [ 6 ] Ksenija V. A Numerical model for self-compacting concrete flow through reinforced sections: A porous medium analogy[D]. Federal Institute for Material Testin, Germany, 2016.
- [ 7 ] Koehler E. P., Fowler D. W., Ferraris C. F., et al. A new, portable rheometer for fresh self-consolidating concrete[J]. ACI Materials Journal. 2006, 233.
- [ 8 ] 李道棱. 混凝土的振动密实(一)[J]. 建筑机械, 1983, (1):14-23.
- [ 9 ] Pouliquen O., Forterre Y. Friction law for dense granular flows: application to the motion of a mass down a rough inclined plane[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 453(453): 133-151.
- [ 10 ] Forterre Y., Pouliquen O. Flows of Dense Granular Media[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2008, 40(1): 1-24.

## Experimental study on action range of concrete vibrator

BIAN Ce<sup>1</sup>, LI Ningbo<sup>1</sup>, TIAN Zhenghong<sup>2</sup>, SHEN Weikang<sup>2</sup>

(1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study the variation of range of action of vibrator immersed into concrete during vibration, the influences of vibration duration, frequency, rod diameter, rheological characteristics of fresh concrete and reinforcement arrangement on action radius are studied in this paper. The main experimental results show that the radius increases rapidly with the duration and then tends to be stable and rheological properties for concrete has little effect on the time reaching stable radius. Furthermore, the radius increases gradually with increasing the frequency and rod diameter, while it is inversely related to the ratio of yield stress to plastic viscosity of fresh mix. In addition, the radius reduces obviously with decreasing relative spacing between main steels and transverse ones, and at the same time, the ratio of the radius of action in reinforced concrete to plain one falls with increasing frequency. In all, the results will guide field vibration operation and provide reliable parameter basis for subsequent prediction of the radius.

**Key words:** concrete; vibrator; action radius; steels

第一作者:

边策(1988—), 男, 博士, 工程师. 主要从事水利水电工程施工新技术新材料研究.

通讯地址: 北京市西城区六铺炕北小街 2-1 号, 水利部水利水电规划设计总院, 13520096115, [biance@giwp.org.cn](mailto:biance@giwp.org.cn).