

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242072

钢筋混凝土中的振捣棒作用半径预测

边 策¹, 李金明¹, 田正宏², 张雨豪¹

(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, 江苏 南京 210098)

摘要: 为准确计算钢筋混凝土中振捣棒的有效作用范围, 提出一种新的基于新拌混凝土流变理论的振捣棒作用半径的预测模型, 在受振混凝土满足假塑性流体特征和钢筋网中流动等效为多孔介质渗流的假定下, 推导了振捣棒在钢筋混凝土中的作用半径表达式, 并结合试验结果对表达式中的经验参数进行了经验拟合。模型计算结果与试验结果对比分析, 发现除棒体振动强度较小的个别工况外, 作用半径预测模型总体预测精度较高, 但考虑到施工现场混凝土浇筑所用振捣棒振动强度大, 因此作用半径预测模型可有效指导现场振捣作业和量化评价钢筋布置方案对棒体振捣作用范围的影响。

关键词: 混凝土; 振捣棒; 钢筋; 作用半径; 预测模型

中图分类号: TV52⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2025)09-0087-05

1 引言

混凝土构件或结构质量与其拌和物振捣工艺密不可分^[1]。目前, 混凝土振捣棒是工程现场最广泛使用同时也是工效最高的混凝土振动器。当采用振捣棒插入并振动新拌混凝土时, 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^[2], 因此振捣棒在混凝土中存在近似圆柱体的有效作用区域, 其柱高为振捣棒的激振棒长, 半径即为棒体作用半径, 在该区域内混凝土受振密实。另外, 现场振捣作业时, 振捣点间距也与棒体作用半径相关。因此, 棒体作用半径的合理取值对混凝土振捣施工质量控制具有重要意义。当振捣棒在钢筋混凝土中振捣时, 与素混凝土相比, 振动能量会因钢筋的阻隔而较快衰减, 因此棒体作用半径会相应减小。尽管目前一些施工规范对作用半径给出了建议取值^[2-5], 如美国混凝土协会提出振捣棒的作用半径约为4~5倍棒径, 但主要针对素混凝土, 且以定性、概化经验评判居多, 对半径的预测缺少理论基础, 导致其取值的准确性和普适性受限。对此, 本文在假定受振混凝土满足假塑性流体特征和新拌物在钢筋网中流动等效为多孔介质渗流的前提

下, 构建了振捣棒在钢筋混凝土中的作用半径预测模型并进行试验验证。研究结果将有助于提高混凝土振捣施工质量精细化控制水平。

2 振捣棒作用半径预测模型

2.1 振捣棒工作原理

振捣棒工作部分为一个棒状空心柱体, 内部安装偏心振子。在动力电源驱动下, 偏心振子振动使整个棒体产生高频小幅的机械振动, 振动过程中棒壳做简谐振动, 用正弦波形式^[6-7]表征为:

$$X = A \sin \omega t = A \sin 2\pi ft \quad (1)$$

式中, X 为棒壳位移, m; A 为振幅, m; ω 为角速度, s^{-1} ; t 为振动历时, s; f 为振频, Hz。

振捣棒插入新拌混凝土中, 振动能量以环形压缩波的形式径向传播, 促使混凝土受振密实^[2]。根据 BANFILL P F G 等^[8]的研究成果, 在混凝土受振密实过程中, 其所受剪切力 τ 随着离棒心距离增大而逐渐减小, 则存在临界半径 R_{is} , 当 $r = R_{is}$ 时 (r 为受振点距棒心距离), 剪切应力等于混凝土屈服应力 τ_0 。而在 R_{is} 区域以内的混凝土所受剪切力 $\tau > \tau_0$, 新拌物内部剪切稀化并逐渐密实。反之, 在 R_{is} 区域以外的混凝土由于 $\tau < \tau_0$ 而无法密实。因此 R_{is} 即为振捣棒作用半径, 作用直径 $D_{is} = 2R_{is}$, 棒径为 D_0 , 如图 1 所示。

收稿日期: 2024-11-05, **修回日期:** 2024-12-04

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

作者简介: 边策(1988-), 男, 高级工程师, 研究方向为土木、水利工程施工新技术新材料, E-mail: biance123123@

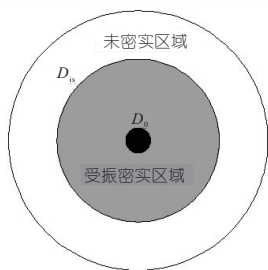


图 1 振捣棒作用范围示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the range of action of poker vibrator

混凝土振捣棒作用范围研究试验^[9]结果表明混凝土内振动强度在液化阶段变化较大,但在排气阶段基本保持稳定。考虑到液化阶段相比整个振捣过程,用时较短,一般仅在几秒以内,因此可认为受振混凝土振动强度不随振动时间变化,新拌物内浆体流速与振动时间无关。此外,根据 VASILIC K 等^[10-11]研究成果,当振捣棒在钢筋混凝土中振动作业时,可假定钢筋层为多孔介质,即等径平行管束。其中,管壁厚度为钢筋直径,管径为相邻钢筋之间净距,则受振新拌混凝土在钢筋中流动可视为多孔介质渗流。

2.2 作用半径预测模型推导

基于振捣棒工作原理的分析,假定:①棒体有效部分长度远大于棒体直径,忽略端部影响;②剪应力沿棒体轴向均匀分布;③新拌物受振前为宾汉流体,受振过程中为假塑性流体^[12];④振捣作用区域内新拌物为非时变性各向均匀不可压缩粘性流体,剪切稀化主要受压缩波的径向流速 v 作用,切向和竖向流动对其影响较小可忽略不计, v 与距振捣棒棒心距离 r 有关,与 θ 、 z 无关;⑤钢筋内新拌物流动为径向稳定层流,其中渗流速度满足达西渗透定律;⑥渗透系数与横向钢筋相对距离 x 呈正比线性关系,其中 $x = M_{ss}/d_{ss}$, M_{ss} 为相邻横向钢筋净距, m, d_{ss} 为横向钢筋直径, m。

则流体连续性方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv) = 0 \quad (2)$$

根据渗流理论,混凝土新拌物流速 v 表达式为:

$$v = -\frac{k}{\mu_{app}} \frac{dP}{dr} \quad (3)$$

其中 $\mu_{app} = K\dot{\gamma}^{n-1}$ (4)

式中, k 为渗透系数, m^2 ; μ_{app} 为受振新拌物表观粘度, $Pa \cdot s$; dP/dr 为沿径向的流体压力梯度, Pa/m ; K 为振捣过程中新拌混凝土的稠度系数, $Pa \cdot s^n$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为振捣过程中新拌混凝土的流动指数, $n < 1$ 。

根据 PERRIN C L 等^[13]研究,非牛顿流体在类

似钢筋层的多孔介质内流动时剪切速率表达式为:

$$\dot{\gamma} = \alpha v / \sqrt{k\phi} \quad (5)$$

式中, α 为形状因子,取值在 1~5.2 之间^[14]; ϕ 为多孔介质孔隙率,等于钢筋体积除以浇筑仓号体积。

联立式(3)~(5),并代入式(2)得:

$$v = \left(\frac{-Ck^{n+1/2}\phi^{n-1/2}}{K\alpha^{n-1}} \right)^{1/n} \frac{1}{r} \quad (6)$$

式中, C 为常数,通过边界条件确定。

由于 v 不小于 0, $n < 1$, 因此 C 不大于 0。当 $r = R_0$ (振捣棒半径)时,考虑到钢筋作用对振动能量阻隔衰减作用,因此振捣棒棒体—混凝土界面处速度衰减较大,剪切速率提高,滑移现象发生^[15]。当滑移发生后,棒身处新拌物速度 v_0 与棒体相对速度不为零,考虑到边界滑移问题产生机理复杂,边界速度理论推导困难,采用量纲分析法推求 v_0 。 v_0 受振频 f 、振幅 A 、渗透系数 k 、孔隙率 ϕ 、形状因子 α 、新拌物屈服应力 τ_0 、塑性粘度 μ 影响,经量纲分析得到 v_0 表达式为:

$$v_0 = \gamma\alpha(fA)^{3/4}(k\phi)^{1/8}(\tau_0/\mu)^{1/4} \quad (7)$$

式中, γ 为经验系数,由试验得到。

令式(6)中 r 等于 R_0 ,并将式(7)代入式(6)得到速度 v 表达式为:

$$v = \gamma\alpha(fA)^{3/4}(k\phi)^{1/8}(\tau_0/\mu)^{1/4}R_0/r \quad (8)$$

剪切应力表达式为:

$$\tau_{ij} = K(\dot{I}_2/2)^{(n-1)/2}A_{ij} \quad (9)$$

其中 $\dot{I}_2 = A_{rr}^2 + A_{\theta\theta}^2 = 4(\partial v/\partial r)^2 + 4v^2/r^2$ (10)

式中, A_{ij} 为一阶 Rivlin-Ericksen 张量; \dot{I}_2 为应变速率张量第二不变量; A_{rr} 为一阶 Rivlin-Ericksen 张量在径向 r 的法向分量; $A_{\theta\theta}$ 为一阶 Rivlin-Ericksen 张量在周向 θ 的法向分量。

令式(8)中 $B = \gamma\alpha(fA)^{3/4}(k\phi)^{1/8} \cdot (\tau_0/\mu)^{1/4}R_0$,则联立式(9)、(10),根据 Mises 屈服准则知,剪切屈服强度 K_y 表达式为:

$$K_y = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta})^2 + (\tau_{rr} - \tau_{zz})^2 + (\tau_{\theta\theta} - \tau_{zz})^2} = K(2B/r^2)^n \quad (11)$$

令 $K_y = \tau_0$,代入式(11)得到有钢筋存在情况下振捣作用范围半径 R_{is} 的表达式为:

$$R_{is} = \sqrt{2\alpha\gamma R_0} (fA)^{3/8} (\tau_0/\mu)^{1/8} (k\phi)^{1/16} (K/\tau_0)^{1/2n} \quad (12)$$

根据 VASILIC K^[16]数值模拟与试验研究,渗透系数 k 分为垂直主筋轴向渗透的 k_{pe} 和平行主筋轴向渗透的 k_{pa} ,其中 $k_{pa} = 2k_{pe}$, k_{pe} 由 BOUTIN C^[17]研究的解析式计算得到,取 k_{pe} 上/下限值均值,表达式为:

$$k_{pe} = - (M_{sm} + d_{sm}) [2\ln(y) + (1 - y)^2 / (1 + y)^2 + (1 - y^4) / 2(1 + y^4)] / 16 \quad (13)$$

其中 $y = d_{sm} / (M_{sm} + d_{sm}) \quad (14)$

式中, M_{sm}, d_{sm} 分别为相邻主筋净距及主筋直径, m。

将 v 分别向平行于主筋和垂直主筋方向投影, 并化简得到:

$$\alpha k^{1/8} = \sqrt{\alpha_{pe}^2 k_{pe}^{1/4} + \alpha_{pa}^2 k_{pa}^{1/4}} \quad (15)$$

VASILIC K^[16] 发现形状因子 α 根据流向分为垂直主筋轴向的 α_{pe} 和流向平行主筋轴向的 α_{pa} , 且 $\alpha_{pa} = 2\alpha_{pe}$ 。当流速较小时, α_{pe} 约等于 1.5, 流速较大时, α_{pe} 约等于 1, 取 $\alpha_{pe} = 1$ 。联立式 (12)~(14) 得到:

$$\alpha k^{1/8} = \sqrt{4\sqrt{2} + 1} k_{pe}^{1/8} \approx 2.58 k_{pe}^{1/8} \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (12) 中, 并考虑与主筋垂直的横向钢筋如分布筋或箍筋的布置将导致渗透系数降低, 从而流速下降^[16], 最终得到钢筋混凝土中振捣棒作用半径表达式为:

$$R_{is} = 2.27 \sqrt{\gamma R_0} (fA)^{3/8} (\tau_0 / \mu)^{1/8} \cdot (k_{pe} \psi M_{ss} \phi / d_{ss})^{1/16} (K / \tau_0)^{1/2n} \quad (17)$$

式中, ψ 为布置横向钢筋后渗透性衰减系数, 与 γ 均通过试验得到。

3 试验验证

3.1 试验方案

水泥为普硅 42.5 水泥, 砂子为天然河沙, 细度模数为 2.8。石子为连续级配 5~16 mm 碎石, 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 1。新拌混凝土采用自主研发的振动流变仪测定^[18]。振捣棒采用 35 mm 棒径的手持式振捣棒, 后接手持式变频器, 通过变频器调节振频及振幅。根据混凝土振捣作业经验, 振捣棒作用范围作用半径值一般为棒径 2.5~5.0 倍^[2]。因此为使试验结果准确, 消除模板边界模具水平截面最小边长应超过 10 倍棒径。

表 1 混凝土配比

Tab. 1 Concrete mix

编号	水灰比	浆骨比	砂率 / %	水泥用量 / (kg · m ⁻³)	聚羧酸减水剂 / %
R-C1	0.55	0.64	45	340	0.4
R-C2	0.50	0.64	43	315	0.4

模具采用方形钢模, 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, 保证更好表征现场实际浇筑情况。模具尺寸为 50 cm × 50 cm × 50 cm, 钢模开两排 $\phi 16$ mm 孔, 相

邻孔心水平间距 100 mm, 垂直间距为 150 mm, 下排孔孔心距底面 150 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, 钢筋布置方案见表 2。

表 2 钢筋布置方案

Tab. 2 Scheme of reinforcement arrangement

工况	主筋 / mm	横向钢筋 / mm	x_m	x_s	主筋截	横向钢筋
					面配筋率 / %	截面配筋率 / %
S1	10@100	10@200	9.0	19.0	0.43	0.26
S2	10@100	8@100	9.0	11.5	0.43	0.34
S3	10@100	10@100	9.0	9.0	0.43	0.43
S4	12@100	10@100	7.3	9.0	0.51	0.43
S5	14@100	10@100	6.1	9.0	0.60	0.43

注: ① x_m 为受力钢筋即主筋的相对距离; x_s 为横向钢筋即分布筋的相对距离。② $x_m = M_m / d_m, x_s = M_s / d_s, M_m, M_s$ 分别为相邻主筋、横向筋净距, d_m, d_s 分别为主筋、横向筋直径。③按照双向板结构计算配筋率。

振捣棒作用半径测定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 1 cm) 均匀半插入一排铁钉^[2], 如图 2 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。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 3。试验在混凝土搅拌后 10 min 之内完成, 因此可忽略水泥水化对试验结果影响。

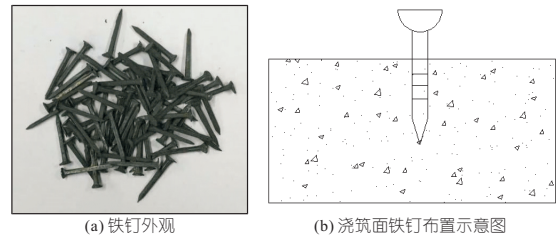


图 2 试验铁钉及布置示意图

Fig. 2 Appearance of iron nails and layout diagram

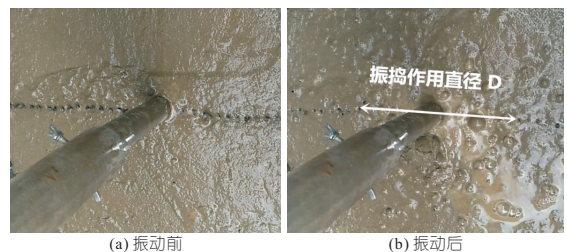


图 3 振动前后铁钉沉降情况

Fig. 3 Settlement of iron nails before and after vibration

3.2 经验参数的确定

利用试验数据^[9], 对 R-C1 钢筋混凝土中 (钢筋布置方案为 S-3) 的不同振频条件下的作用半径测量值数据拟合, 得到 $\gamma \approx 5.27, \psi \approx 0.07$, 预测结果见图 4。

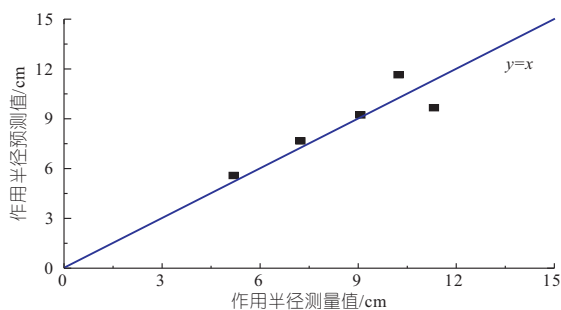


图 4 R-C1 钢筋混凝土中振捣棒作用半径预测结果

Fig. 4 Prediction results of the radius of action of vibrator in R-C1 reinforced concrete

由图 4 可知,模型预测结果较好,作用半径理论模型预测的平均相对误差约为 9.1%,则式(17)变为:

$$R_{is} = 4.41R_0^{\frac{1}{2}} (fA)^{\frac{3}{8}} \left(\frac{\tau_0}{\mu}\right)^{1/8} \left(k_{pe} \frac{M_{ss}}{d_{ss}} \phi\right)^{1/16} \left(\frac{K}{\tau_0}\right)^{1/2n} \quad (18)$$

3.3 预测结果分析

利用式(18)预测 R-C2 钢筋混凝土的振捣棒作用半径,预测结果见图 5。由图 5 可知,随着振频的提高,振捣棒的作用半径不断增加,另外钢筋分布越密,作用半径值越小。模型预测结果与试验结果较为接近,平均相对误差为 5.3%,但当主筋相对距离为 6.1 时(S5 工况),混凝土内钢筋布设紧密,振频在 120 Hz 以下的作用半径预测值存在一定偏差。该误差产生原因一方面是因为钢筋间距减小增强振动能量的阻隔衰减作用,当低频振动混凝土时,混凝土液化程度低,固相骨料颗粒的阻尼作用明显,受振新拌混凝土为均质流体的模型假定合理性下降。另一方面新拌物内流速大幅降低,钢筋对混凝土附加阻力增强,而当流速低至达西渗透定律适用下限后,该阻力同样不可忽略,混凝土在钢筋中流动为线性渗流的模型假定条件也可能不再成立。这两方面原因导致模型对振捣棒在钢筋密集分布的新拌物中低频振动时的作用半径预测值偏高,与实测情况有一定偏差。但考虑到施工现场浇筑钢筋混凝土时,混凝土自身流动性大且振捣棒振动强度高(振频一般均为

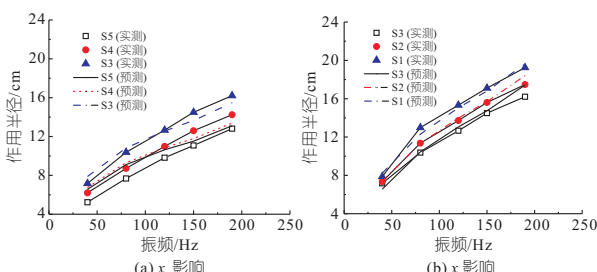


图 5 钢筋混凝土中振捣棒作用半径预测结果

Fig. 5 Prediction results of the radius of action of vibrator in reinforced concrete

200 Hz 及以上),结合图 5 中模型在高频振动工况中的较好预测精度,因此可认为作用半径预测模型计算结果与真实情况一致,能够指导现场混凝土振捣施工。

4 结论

a. 钢筋混凝土条件下振捣棒作用半径预测模型中其他经验参数可通过试验数据拟合确定,其中 $\gamma \approx 5.27$ 、 $\phi \approx 0.07$ 。

b. 除棒体振动强度较小的个别工况外,作用半径预测模型总体预测精度较高,考虑到施工现场混凝土浇筑所用振捣棒振动强度大,因此作用半径预测模型可有效指导现场振捣作业和量化评价钢筋布置方案对棒体振捣作用范围的影响。

c. 鉴于试验数量的限制及基于受振混凝土为连续均匀介质流体等假定条件构建的预测模型相对于实际情况也做了部分简化,因此后续将结合数值模拟仿真手段,针对板、梁、柱等实际钢筋混凝土结构并考虑混凝土骨料颗粒的影响作用,分析更多不同钢筋布置方案及材料配比流变特性下的振捣棒作用范围变化规律,并验证及提高作用半径预测模型的普适性。

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] ACI Committee 309. Report on behavior of fresh concrete during vibration: ACI 309. 1R-08[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T 3650-2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [4] 国家能源局. 水电水利工程泵送混凝土施工技术规范: DL/T 5824-2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [5] 国家能源局. 水电水利工程纤维混凝土施工规范: DL/T 5797-2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [6] LI J J, TIAN Z H, YU X, et al. Vibration quality evaluation of reinforced concrete using energy transfer model[J]. Construction and building materials, 2023, 379: 131247.
- [7] LI J J, TIAN Z H, SUN X, et al. Modeling vibration energy transfer of fresh concrete and energy distribution visualization system[J]. Construction and building materials, 2022, 354: 129210.
- [8] BANFILL P F G, TEIXEIRA M A O M, CRAIK R J M. 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] VASILIC K, SCHMIDT W, KÜHNE H C, et al. Flow of fresh concrete through reinforced elements: Experimental validation of the porous analogy numerical method[J]. Cement and concrete research, 2016, 88: 1-6.
- [12] PICHLER C, RÖCK R, LACKNER R. Apparent power-law fluid behavior of vibrated fresh concrete: Engineering arguments based on Stokes-type sphere viscometer measurements[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics, 2017, 240: 44-55.
- [13] PERRIN C L, TARDY P M J, SORBIE K S, et al. Experimental and modeling study of Newtonian and non-Newtonian fluid flow in pore network micro-models[J]. Journal of colloid and interface science, 2006, 295(2): 542-550.
- [14] LOPEZ X, VALVATNE P H, BLUNT M J. Predictive network modeling of single-phase non-Newtonian flow in porous media[J]. Journal of colloid and interface science, 2003, 264(1): 256-265.
- [15] 吴承伟, 马国军, 周平. 流体流动的边界滑移问题研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(3): 265-282.
- [16] VASILIC K. A numerical model for self-compacting concrete flow through reinforced sections: A porous medium analogy[D]. Federal Institute for Material Testin, Germany, 2016.
- [17] BOUTIN C. Study of permeability by periodic and self-consistent homogenisation[J]. European journal of mechanics-A/solids, 2000, 19(4): 603-632.
- [18] 边策, 李金明, 田正宏, 等. 受振混凝土流变性试验研究 [J]. 水利规划与设计, 2020(10): 94-100, 145.

Prediction of Action Radius of Poker Vibrator in Reinforced Concrete

BIAN Ce¹, LI Jin-ming¹, TIAN Zheng-hong², ZHANG Yu-hao¹

(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: To accurately calculate the effective range of vibration rods in reinforced concrete, this study proposes a new prediction model for the effective radius of vibration rods based on the rheological theory of fresh concrete. Under the assumptions that the vibrated concrete exhibits pseudoplastic fluid characteristics and the flow in the steel mesh is equivalent to seepage through porous media, an expression for the effective radius of the vibration rod in reinforced concrete is derived. The empirical parameters in the expression are then empirically fitted in conjunction with experimental results. By comparing the model calculations with experimental values, it shows that, except for a few cases with low vibration intensity of the rod, the overall prediction accuracy of the effective radius prediction model is higher. Considering that the vibration intensity of the rods used in concrete pouring at construction sites is generally high, the model can effectively guide on-site compaction operations and quantitatively evaluate the impact of steel bar layout schemes on the vibration range of the rod.

Key words: concrete; poker vibrator; steel; action radius; prediction model

(上接第 178 页)

Application of Feedforward Function in Hydroelectric Primary Frequency Regulation

HUANG Xing¹, ZHU Bin², YU Da-hai¹, WANG Ben-hong²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443133, China)

Abstract: In order to solve the problem that the response ability of a large mixed-flow hydropower unit is affected by the change of operating water head, a method based on the adaptive feedforward function is proposed for the application of the turbine's primary frequency regulation function. The 3D curve function library of turbine's water head, guide vane opening and power is introduced into the primary frequency regulation feedforward control of the turbine. According to the real-time water head and power and the position of guide vane, the power change corresponding to the frequency change is calculated through the 3D database to directly affect the output of the controller. Compared with the conventional control mode of primary frequency regulation, it is verified by field practice. The experimental results show that the feedforward function can not only satisfy the consistency of the next frequency regulation performance of different water heads, but also effectively avoid setting and switching multi-group PID control parameters. Thus, it provides a new way to realize the function of primary frequency regulation of hydraulic turbine units.

Key words: self-adaption; feedforward; primary frequency modulation; PID parameters; water head; three-dimensional curve function library