

# 连续监控下土石坝碾压参数的控制标准及其确定方法

刘东海<sup>1</sup>, 王倩<sup>1</sup>, 崔博<sup>1</sup>, 沈嗣元<sup>2</sup>, 刘兴宁<sup>3</sup>, 王奇峰<sup>4</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 华能澜沧江水电有限公司, 云南 昆明 650214;

3. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051; 4. 中国水电顾问集团西北咨询公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 为适应连续监控下土石坝施工中碾压参数的控制要求, 提出将行车速度持续超速时间、激振力持续不达标时间、压实厚度及碾压遍数合格率作为施工全仓面碾压参数的控制指标; 并在分析各碾压参数与心墙坝料压实度之间相关性的基础上, 建立了碾压遍数、压实厚度、料性参数(坝料含水率和级配)与压实度的多元回归模型; 进而提出了满足现行规范要求的坝料压实质量所对应的、基于 Monte-Carlo 法的碾压遍数合格率控制标准的确定方法。工程实例分析表明, 遵循所提出的碾压参数控制标准, 心墙区试坑检验的坝料压实度均满足设计要求, 从而为连续监控下土石坝碾压质量的控制提供了有效途径。

**关键词:** 土石坝; 连续施工监控; 压实质量; 碾压参数; 控制标准

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)09-1712-05

**作者简介:** 刘东海(1974-), 男, 浙江舟山人, 教授, 研究方向为水利水电工程系统分析与优化和大坝施工质量实时评估与安全分析。E-mail: liudh@tju.edu.cn。

## Control standards for compaction parameters of earth-rock dams under continuous construction process monitoring

LIU Dong-hai<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, CUI Bo<sup>1</sup>, SHEN Si-yuan<sup>2</sup>, LIU Xing-ning<sup>3</sup>, WANG Qi-feng<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Huaneng Lancang

River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650214, China; 3. HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051, China;

4. Northwest Consulting Company of Northwest Hydro Consulting Engineers CHEEC, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of compaction parameter control for construction of earth-rock dams under continuous process monitoring, the sustained over-speed duration time of roller velocity, continued non-qualification duration time of vibration status, compacted thickness and qualification rate of compaction pass are employed as the control indices of compaction quality of the entire working area. According to the correlation between the compactness of core wall materials and each of compaction parameters (e.g., compaction pass, compacted thickness, and gradation of materials moisture content), a multiple regression model is established. Furthermore, a Monte-Carlo simulation-based method is presented to determine the control standards for the qualification rate of compaction pass which meets the corresponding compaction quality control standards required in the current codes. The case study demonstrates that the compaction quality of all sampling pits in the core wall zone satisfies the design requirements according to the proposed control standards. It may provide an effective approach for compaction quality control of earth-rock dams under continuous construction process monitoring.

**Key words:** earth-rock dam; continuous construction monitoring; compaction quality; compaction parameter; control standard

## 0 引言

根据现行《碾压式土石坝施工规范(DL/T 5128—2001)》规定, 土石坝填筑碾压质量主要通过施工过程中的碾压参数(包括碾压遍数、铺层厚度、行车速度和激振力), 以及碾压结束后试坑抽样检测的压实质量(如压实度或干密度等)来控制, 即“事中控制”和“事后控制”, 且以事中控制碾压参数为主<sup>[1]</sup>。实际上, 常规的依靠监理和施工人员来控制这些碾压参数,

由于受人为因素干扰大, 管理粗放, 难以实现对上述碾压参数 24 h、全天候、全仓面、连续、精确的控制。钟登华等<sup>[2-4]</sup>研制的堆石坝填筑碾压质量实时监控技术实现土石坝施工全仓面任意位置、任意时刻的碾压

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB035904); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51021004); 国家自然科学基金项目(51079096)

收稿日期: 2013-01-23

遍数、压实厚度、碾压机行进速度和激振力的自动、实时监控。但同时,也给现场质量控制人员的实际操作带来困惑,即是否需要任意时刻任意位置的碾压参数均达到由碾压试验确定的设计标准?若是的话,不仅将会给实际施工进度带来很大影响;而且从操作角度来看,由于实际施工中的误差、碾压机性能等因素(如碾压机从大石块或相对高处经过时瞬时速度会大大超标),也不可能实现碾压参数100%地满足设计要求。事实上,在常规人工监控下,上述碾压参数并不易达到任意时刻任意位置(即100%地)满足相应的碾压参数控制标准;同时很多工程却表明:即使在此情况下,事后试坑试验的坝料压实质量却能满足设计要求。因此,有必要在满足规范中对“事后控制”(即试坑的压实质量控制)要求的前提下,依托土石坝填筑碾压质量实时监控技术<sup>[2-4]</sup>,研究碾压参数在全施工仓面上无需100%地满足设计要求的可行性,即探寻连续监控下的施工全仓面碾压参数的控制指标及其标准,这已成为在堆石坝填筑碾压质量实时监控技术支撑下大坝碾压质量过程控制中亟需解决的重要现实问题。

本文从现行规范对土石坝施工“事后控制”的标准出发,首先分析适应连续监控条件下土石坝碾压参数的控制指标及相应控制准则,进而着重研究碾压遍数合格率控制标准的确定方法,最后是工程实例分析。

## 1 连续监控下碾压参数的控制指标分析

工程实践表明,碾压遍数、压实厚度、碾压机行车速度和激振力状态对土石坝料压实质量有着重要影响;文献[5]通过相关性分析,得出碾压遍数对心墙坝料压实度的影响最大。本文利用糯扎渡堆石坝心墙区掺砾石粘土料试坑检测的68个样本,分析上述碾压参数与压实度的相关性,得到的相关系数见表1。其中,碾压遍数与压实度的相关系数高达0.954;行车速度由于系统的实时监控<sup>[3]</sup>,其变幅很小,一定程度上不能反映其与压实度的真实相关性,故表现为两者的相关系数较小。同时,由于实时监控系统的有效性,使得碾压机机械激振力在碾压过程中基本符合要求(不变化),故无法分析激振力与压实度之间的相关性。

表1 压实度与各碾压参数的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of compactness and compaction parameters

碾压参数	碾压遍数	压实厚度	行车速度	激振力状态
相关系数	0.954	-0.424	0.436	—*

\*注:由于在连续监控下激振力状态基本不变,故其与压实度的相关性无法分析。

在连续监控下,碾压机行车速度与激振力在变化不大时,两者对于压实度变化的影响不大,且考虑到

碾压机在起伏不平的仓面上瞬时速度的不易控制性,故可认为行车速度与激振力状态允许有小段持续时间的超标。实践中,提出以行车速度持续超过足够小的时间 $t_v$ 和激振力不达标状态持续超过足够小的时间 $t_j$ 作为连续监控下行车速度与激振力的控制指标。在糯扎渡心墙堆石坝工程中, $t_v$ 和 $t_j$ 分别取10s和15s。

通过堆石坝填筑碾压质量实时监控系<sup>[2-4]</sup>,获得碾压结束后施工全仓面任意位置处的坝料压实厚度 $h$ ,且考虑到规范对于铺料厚度要求控制在设计标准的 $\pm 10\%$ 范围内,故工程实践中,提出采用以全仓面任意位置处压实厚度 $h \in [90\%h_0, 110\%h_0]$ 范围内来控制。其中 $h_0$ 为设计的设计标准压实厚度,可由碾压试验确定。

同样,在连续监控下,可获得碾压结束后施工全仓面任意位置处的碾压遍数。如上文所述,如果事后坑测压实质量能够满足设计结果,不易或不必要使全仓面任意位置处的碾压遍数100%均符合设计要求。故设定施工全仓面的碾压遍数的合格率 $R_n$ 作为连续监控下的碾压遍数控制指标,且有

$$R_n = \frac{m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $m$ 表示施工仓面中碾压遍数大于设计标准碾压遍数 $n_0$ 的网格个数, $m_0$ 表示整个施工仓面的网格总数。施工全仓面离散成符合工程精度要求的足够小的正方形网格。

进一步地, $R_n$ 的具体控制标准需以满足事后试坑检验的坝料压实质量要求来确定。本文以心墙区坝料为例,讨论 $R_n$ 达到什么标准时可满足规范对于心墙区防渗料压实质量控制的两条准则<sup>[1]</sup>,即:①抽样检测压实度合格率不低于90%,则在连续监控下可理解为满足设计压实度 $D_0$ 所占区域不低于全仓面面积的90%;②坑测不合格的压实度不小于设计压实度 $D_0$ 的98%,则在连续监控下可理解为压实度大于98% $D_0$ 所占区域要达到100%,即全仓面压实度值均大于设计压实度值的98%。

表2为常规人工监控与连续监控下土石坝碾压参数控制指标及其准则的比较。

## 2 碾压遍数合格率控制标准的确定方法

利用连续监控得到的碾压参数及坝料料性参数(级配、含水率)<sup>[2-3]</sup>,可建立这些参数与心墙坝料压实度的多元回归模型,进而采用Monte-Carlo法,可随机确定不同碾压遍数合格率下全仓面任意位置处的压实度值。进一步地,可统计分析压实度合格率随碾压遍数合格率变化的规律,从而可确定符合规范规定(即上文两条压实质量控制准则)的碾压遍数合格率 $R_n$ 的取值标准。

表2 常规人工监控与连续监控下碾压参数控制指标及其标准的比较

Table 2 Comparison of control indices and standards between conventional manual monitoring and continuous construction process

monitoring			
常规人工监控		连续监控	
控制指标	控制标准	控制指标	控制标准*
碾压遍数	不低于设计碾压遍数	碾压遍数合格率	不低于设定的碾压遍数合格率
铺料厚度	按设计铺料厚度, 且不超过层厚的10%	压实厚度	需控制在设计压实厚度的±10%范围
行车速度	不超过设计最大行车速度	行车超速持续时间	不超过设定的最大行车超速持续时间
激振力	符合碾压试验确定的激振力输出状态	激振力状态持续不达标时间	不超过设定的最大激振力状态持续不达标时间

\*注: 依据坑测压实质量符合规范规定, 来确定连续监控下碾压参数的控制标准。

## 2.1 实时监控下心墙坝料压实度回归模型的建立

由对碾压参数的控制指标分析可知: 碾压遍数与压实度相关性很大; 压实厚度与压实度呈负相关, 但其相关系数较小, 主要是因为样本中压实厚度取值范围比较集中; 而行车速度和激振力输出由于基本都符合设计要求, 样本中取值基本保持不变, 故两者在回归模型中对压实度的影响可不予考虑。此外, 现有研究表明坝料级配与含水率对压实度也有较大影响<sup>[5-7]</sup>。因此, 文中将碾压遍数、压实厚度、含水率和级配作为自变量, 根据试坑检测样本, 建立如下模型:

$$D = f(n, h, w, p_1, p_2, p_3, p_4) + \varepsilon \quad (2)$$

式中  $D$  为压实度;  $f(\cdot)$  为回归函数;  $p_1, p_2, p_3$  和  $p_4$  分别表示坝料颗粒粒径 < 0.075 mm、(0.075 mm, 5 mm)、(5 mm, 20 mm) 和 > 20 mm 的含量。  $\varepsilon$  表示残差, 其分布规律可通过对回归后的残差序列进行非参数估计来确定, 一般取均值为零的截断正态分布函数。

## 2.2 全仓面中各碾压遍数所占面积比率的确定

考虑到在碾压遍数不合格区域中, 不同的碾压遍数所占区域的比例对坝料压实质量有着不同的影响, 故需确定不合格区域中各遍数所占的区域比例。根据实际工程分析发现, 小于设计碾压遍数的各碾压遍数所占区域呈递减趋势, 且其所占面积比例受其相邻的碾压遍数 (大于其 1 遍) 所占面积的影响最大。故若令  $r_1 = R_n$ , 则有

$$r_2 = \alpha_1 \cdot r_1, \quad r_3 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot r_1, \quad \dots$$

$$r_j = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \alpha_{j-1} \cdot r_1, \quad \dots, \quad r_{n_0} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \alpha_{n_0-1} \cdot r_1$$

式中,  $r_j$  表示碾压遍数为  $(n_0 - j + 1)$  所占面积占仓面总面积的比率,  $j = 1, 2, \dots, n_0$ , 则  $r_1$  表示碾压遍数合格率;  $n_0$  为设计碾压遍数;  $\alpha_j$  表示碾压遍数为  $(n_0 - j)$  与  $(n_0 - j + 1)$  时所占面积的递减系数, 且  $\alpha_j < 1$ 。进一步地, 可设  $\alpha_j = \alpha$ , 即假设各种遍数所占仓面面积的比率遵循等比递减的规律, 则有

$$r_j = \alpha^{j-1} \cdot r_1 \quad (3)$$

且满足总的不合格遍数的区域所占比率和为  $1 - r_1$ , 有

$$\sum_{j=2}^{n_0} r_j = 1 - r_1 \quad (4)$$

因此, 当确定了某一碾压遍数合格率  $r_1$  后 (即达到设计标准碾压遍数所占面积比率), 可通过求解式 (3)、(4), 得到  $\alpha$ ; 进而由式 (3) 可确定各碾压遍数所占区域面积的比率, 从而为下文利用 Monte-Carlo 方法计算施工全仓面压实度的合格率提供条件。

## 2.3 碾压遍数合格率控制标准确定的 Monte-Carlo 法

确定碾压遍数合格率控制标准的具体方法如下:

(1) 根据试坑样本数据, 建立如式 (2) 的压实度多元回归模型, 并确定  $\varepsilon$  的分布规律。

(2) 确定碾压参数的设计标准, (碾压遍数  $n_0$  和压实厚度  $h_0$ ), 以及当前施工仓面的坝料料性参数 (包括含水率  $w_0$ , 级配  $p_{10}, p_{20}, p_{30}$  和  $p_{40}$ )。

(3) 定义一个施工仓面, 按照足够高的精度剖分为  $M$  个网格, 本文中网格大小定义为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , 文中  $M$  取 1000。对施工仓面上每个网格的压实厚度、含水率和级配均按步骤 (2) 确定的取值进行赋值。

(4) 定义碾压遍数合格率的取值范围为  $r_{1,i} \in [r_{1,i,\min}, r_{1,i,\max}]$ ,  $r_{1,i,\min}, r_{1,i,\max}$  分别表示碾压遍数合格率的最小、最大取值。按足够小间隔, 从小到大取  $r_{1,i}$ , 并随机抽取施工仓面上的任意  $r_{1,i} \cdot M$  个网格, 定义这些网格处的碾压遍数为  $n_0$ , 即这些网格处碾压遍数合格。

(5) 由式 (3)、(4) 确定小于设计碾压遍数的各遍数的所占比率  $r_j$ , 由此得到碾压遍数为  $(n_0 - j + 1)$  的网格数量为  $r_j \cdot M$ ,  $j = 1, 2, \dots, (n_0 - 1)$ ; 并分别按各遍数所对应的网格数量, 随机从剩余的  $(1 - r_j) \cdot M$  个网格中抽样, 同时将抽取的每个网格赋以相应的碾压遍数值  $(n_0 - j + 1)$ , 从而在碾压遍数不合格区域的每个网格上均被赋以了从 1 到  $(n_0 - 1)$  的某个遍数值。

(6) 由  $h_0, w_0, p_{10}, p_{20}, p_{30}, p_{40}$  及每个网格所对应的碾压遍数, 根据建立的式 (2) 计算每个网格上的压实度值  $D_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ 。

(7) 利用所建立的  $\varepsilon$  的分布函数, 对  $M$  个网格进行随机抽样得到误差修正值  $\varepsilon_i$ , 则得到修正后的压

实度值 ( $D_i + \varepsilon_i$ )。

(8) 工程实际情况, 确定设计压实度值  $D_0$ , 然后分别统计由步骤(7)得到的全施工仓面上压实度值大于等于  $D_0$  和大于  $98\% \cdot D_0$  的网格数量  $N_1$  和  $N_2$ , 则有压实度合格率  $R_1 = N_1 / M \times 100\%$ ,  $R_2 = N_2 / M \times 100\%$ , 式中,  $R_1$ ,  $R_2$  分别表示在整个施工仓面上压实度大于等于  $D_0$  和压实度大于  $98\% D_0$  两种情况下的压实度合格率。

(9) 依次改变  $r_{1,r}$  取值, 重复步骤(5)~(8), 直至  $r_{1,r}$  在其取值范围内遍历。

(10) 根据得到的不同  $r_{1,t}$  及其对应的  $R_1$  和  $R_2$ , 绘制碾压遍数合格率  $r_{1,t}$  与  $R_1$ ,  $R_2$  之间的关系曲线。

(11) 根据规范规定的事后控制标准, 即第2节中提到的两条关于压实度控制的准则, 确定设计压实度  $D_0$  所占区域面积达到 90% 时的碾压遍数合格率  $r_{1,a}$ , 以及大于  $98\% D_0$  所占区域面积达到 100% 时的碾压遍数合格率  $r_{1,b}$ 。

由此, 得到连续监控下符合规范事后控制(即压实度控制)标准所对应的碾压遍数合格率的控制标准。

### 3 实例分析

以糯扎渡心墙堆石坝工程为例, 该工程心墙坝料的设计碾压遍数为 10 遍, 设计压实度值为 98%, 压实厚度设计值  $h_0$  为 24 cm, 当前施工仓面坝料含水率及级配由试坑采样或料场试验确定(取含水率  $w_0$  为 15.70%, 4 种级配  $p_{10}$ ,  $p_{20}$ ,  $p_{30}$ ,  $p_{40}$  分别为 38.90%, 24.50%, 8.60%, 28.10%)。在连续监控下, 行车速度、激振力的控制准则分别为行车速度持续超过 3 km/s 的时间小于 10 s、激振力状态为低频高振状态持续时间小于 15 s (26 t 自行碾); 压实厚度的控制准则为全仓面任意位置处压实厚度设计标准值 24 cm 的  $\pm 10\%$  范围内。下面来具体确定连续监控下碾压遍数的控制标准, 即碾压遍数合格率的控制标准。

#### 3.1 压实度回归模型及残差分布函数的建立

根据心墙区 68 个试坑样本, 由公式(2)建立压实度的多元回归模型:

$$D = b_0 + b_1 n + b_2 n^2 + b_3 h + b_4 w + b_5 p_1 + b_6 p_2 + b_7 p_3 + b_8 p_4 \quad (5)$$

该模型各参数估计值如表 3 所示, 模型决定系数  $R^2$  为 0.985, 且能通过  $F$  检验; 回归样本的最大相对误差为 -2.71%; 并且有  $\partial D / \partial n = 0.0671 > 0$ ,  $\partial D / \partial h = -0.0265 < 0$ , 说明压实度随碾压遍数的增大有增大的趋势, 且随压实厚度的增加而减小, 这与工程实际相符, 说明该模型有明显的物理意义。

另选取 16 组样本数据对该回归模型进行检验, 检验组压实度实测值与计算值最大相对误差为 2.09%, 决定系数  $R^2$  为 0.983, 说明该模型具有较高精度, 能满足

工程要求。图 1 所示为压实度计算值与实测值的比较。

表 3 压实度多元回归模型参数估计

Table 3 Parameter estimation of regression model

参数	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
估计值	0.1695	1.8973	-0.9151	-0.0265	-0.0124
参数	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	
估计值	-0.0702	-0.1158	-0.0398	-0.1015	

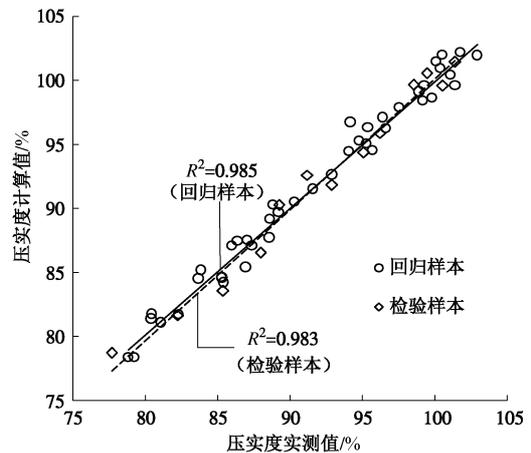


图 1 实测压实度值与计算值的比较图

Fig. 1 Comparison between measured compactness and calculated value

同时对模型残差  $\varepsilon$  进行正态分布  $T$  检验和 Kolmogorov-Smimov 检验<sup>[8]</sup>, 可知残差服从均值为 0, 标准差为 0.91% 的正态分布。在实际计算中, 为避免产生的随机误差过大, 对该分布进行 2 倍残差截断。

#### 3.2 碾压遍数合格率控制标准的确定

利用式(5)分别计算碾压遍数  $n$  为 6, 7, 8, 9 和 10 时的压实度, 结果见表 4。计算中, 式(5)的其他参数选用设计标准值。

表 4 不同碾压遍数下压实度计算值

Table 4 Calculated compactness with corresponding compaction

碾压遍数	6	7	8	9	10
压实度/%	92.69	94.77	96.58	98.13	99.42

由表 4 可知, 当  $n=7$  时, 其压实度为 94.77%, 考虑残差在 2 倍标准差范围内随机取值, 修正后的压实度取值范围为 [92.94%, 96.59%], 其上限大于设计压实度值的 98% (即  $98\% D_0 = 98\% \times 98\% = 96.04\%$ )。而  $n=6$  时, 其压实度为 92.69%, 修正后的压实度取值区间为 [90.86%, 94.52%], 其上限小于 96.04%。根据规范规定, 不合格的压实度需大于设计压实度的 98%, 所以  $n \leq 6$  时计算得到的压实度不满足规范要求; 且从实际工程的碾压遍数图形报告<sup>[3]</sup>可知,  $n \leq 6$  所占的比重很小。因此, 可以将  $n \leq 6$  的区域均用  $n=6$  来代替, 不影响压实度合格率的计算。因此, 本文中小于标准碾压遍数 ( $n_0=10$ ) 的情况可只考虑  $n=6, 7, 8, 9$  这 4 种情况。由此, 可由式(3)和式(4)确定上述 4 种

不同遍数所占区域面积的比率。

根据第 2.3 节方法, 可得到一系列碾压遍数合格率  $r_{1,a}$  及其对应的压实度合格率  $R_1$  和  $R_2$ , 结果如图 2 所示。由图可知,  $r_{1,a}$  和  $r_{1,b}$  分别为 87% 和 82%, 则:

(1) 要满足规范规定的“满足设计压实度的合格率不小于 90%”, 需要碾压遍数合格率达到 87% 以上。

(2) 要满足“不合格压实度不得低于设计压实度的 98%”, 需要碾压遍数合格率达到 82% 以上。

当碾压遍数合格率达到 87% 以上时, 可同时满足上述两条准则。在糯扎渡工程实践中, 为了确保施工质量, 提高了该标准, 其设计碾压遍数合格率的控制标准取为  $\geq 90\%$ , 即当仓面碾压结束时, 若碾压遍数合格率不符合该标准, 则需进一步在未达到设计碾压遍数的区域进行补碾, 直至满足碾压遍数合格率达到 90% 以上这个控制标准为止。

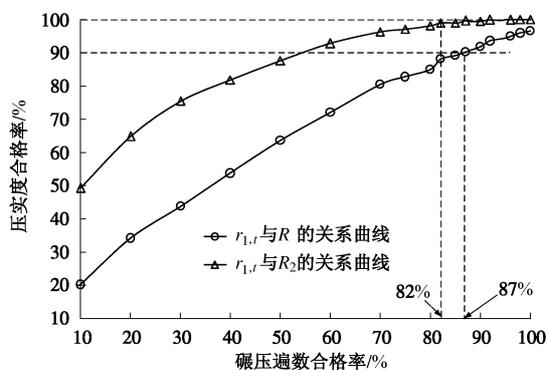


图 2 碾压遍数合格率与压实度合格率的关系曲线

Fig. 2 Relationship between qualification rate of compactness and that of compaction pass

实际施工中, 严格遵循表 2 所提出的 4 个碾压参数在连续监控下的控制标准, 所有心墙区试坑试验结果表明坝料压实度均满足设计要求 (2009 年 9 月—2012 年 9 月共 8032 个试坑检测样本), 可见上述碾压参数的控制标准是有效的。事实上, 上述连续监控下碾压参数的控制准则已在梨园面板堆石坝、长河坝砾石土心墙堆石坝和南水北调中线河南段等多项工程中得到推广应用。

## 4 结 语

为适应连续监控下土石坝碾压参数的控制要求, 本文提出将碾压机行车速度持续超速时间、激振力持续不达标时间、压实厚度及碾压遍数合格率作为施工全仓面碾压参数的控制指标; 并通过分析各碾压参数与压实度之间的相关关系, 建立了碾压遍数、压实厚度、坝料含水率、级配与压实度的多元回归模型; 基于该模型, 并利用 Monte-Carlo 方法, 得到了压实度合格率随碾压遍数合格率变化的规律曲线, 进而可根据规范对事后试坑压实质量控制的要求来确定相应的

碾压遍数合格率的控制标准。工程实例分析表明, 遵循本文所提出的碾压参数控制标准, 心墙区坝料试坑检验的坝料压实度均能满足设计要求, 说明了该控制准则的有效性, 从而为连续监控下土石坝碾压质量的控制提供了有效途径。本文研究只针对心墙防渗坝料, 所得到的连续监控下碾压参数的控制指标及其准则是否适用于土石坝的堆石料还需作进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] DL/T 5128—2001 碾压式土石坝施工规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001. (DL/T 5128—2001 Specifications for rolled earth-rockfill dam construction[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001. (in Chinese))
- [2] ZHONG Deng-hua, CUI Bo, LIU Dong-hai. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rock-fill dam[J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2009, **52**(11): 3406 - 3412.
- [3] ZHONG Deng-hua, LIU Dong-hai, CUI Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam[J]. Science China—Technological Sciences, 2011, **54**(7): 1906 - 1913.
- [4] 马洪琪, 钟登华, 张宗亮, 等. 重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其应用[J]. 中国工程科学, 2011, **13**(12): 20 - 27. (MA Hong-qi, ZHONG Deng-hua, ZHANG Zong-liang, et al. Key technologies of real-time construction control for major hydraulic and hydroelectric projects[J]. Engineering Science, 2011, **13**(12): 20 - 27. (in Chinese))
- [5] LIU Dong-hai, SUN Jing, ZHONG Deng-hua. Compaction quality control of earth-rock dam construction using real-time field operation data[J]. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 2012, **138**(9): 1085 - 1094.
- [6] 柳育刚. 心墙坝料压实质量实时评估理论方法及应用[D]. 天津: 天津大学, 2011. (LIU Yu-gang. Theory and its application of real-time compaction quality evaluation for earth-rock dam material at core wall[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese))
- [7] SHANKLIN D W, RADEMACHER K R, TALBOT J R. Construction quality control by testing of compacted fills: Optimum moisture density values[C]// Symposium on Constructing and Controlling Compaction of Earth Fills. Seattle, WA: American Society Testing and Materials, 2000: 126 - 136.
- [8] TUMIDAJSKI P J, FIORE L, KHODABOCUS T. Comparison of Weibull and normal distribution for concrete compressive strengths[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, **33**(10): 1287 - 1292.