

DOI: 10.11779/CJGE20240816

不同 PCM 结晶度的相变黏土碾压过程离散元模拟

刘东海¹, 谷泽永¹, 陈 辉¹, 王文东²

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 天津水务投资集团有限公司, 天津 300202)

摘 要: 掺入石蜡基相变材料 (PCM) 的相变黏土可为寒冷地区黏土心墙的冬季施工防冻控温问题提供一种新的解决方案。但是, PCM 在不同温度下特有的相态变化 (即结晶度不同) 会导致相变黏土呈现不同的压实特性, 不同 PCM 结晶度的相变黏土碾压参数控制标准有待进一步研究。考虑到现场碾压试验不仅成本高, 而且在多变环境下难以控制 PCM 达到设定结晶度的试验温度, 采用 PFC 3D 软件, 根据碾轮及荷载模拟相似率, 建立了不同 PCM 结晶度下相变黏土碾压离散元模型, 通过室内击实试验对离散元模型的有效性进行验证, 分析了不同碾压参数对相变黏土压实质量的影响, 进而给出不同 PCM 含量及其不同结晶度下的相变黏土的推荐碾压参数。结果表明: 激振力过小时, 即使增加碾压遍数也难以达到大激振力的压实效果, 适当提高激振力有利于压实; PCM 的结晶度提高会使相变黏土压实干密度降低, 通过增加碾压遍数、减小碾压速度和适当减小摊铺厚度等措施, 可提高相变黏土的压实效果, 达到 PCM 未结晶时的最大干密度。研究可为不同施工温度下分析相变黏土的碾压质量提供新的方法, 也可对不同 PCM 结晶度下心墙相变黏土压实质量控制提供理论依据。

关键词: 相变黏土; 压实质量; 碾压参数; 控制标准; 离散元模拟

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)12-2622-10

作者简介: 刘东海(1974—), 男, 浙江舟山人, 教授, 博士生导师, 主要从事大型工程智能建设、土石坝数字化施工与服役性能研究。E-mail: liudh@tju.edu.cn。

Discrete element simulation on rolling process of PCM-clay with different crystallinity

LIU Donghai¹, GU Zeyong¹, CHEN Hui¹, WANG Wendong²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Water Investment Group Co, Tianjin 300202, China)

Abstract: Paraffin-based phase-change-material mixed clay (PCM-clay) provides a new solution to solve the problem of anti-freezing and temperature control during the construction of clay core wall in cold regions in winter. However, the phase change of PCM with different crystallinity at different temperatures leads to different compaction properties of PCM-clay. The control standards of compaction parameters of PCM-clay with different PCM crystallinity need to be further studied. Considering that field rolling tests not only have high costs, but also make it difficult to control the test temperature of PCM to reach the set crystallinity in a variable environment, the PFC 3D software is used to establish the rolling discrete element model of phase change clay under different PCM crystallinity according to the similarity rate of roller and load simulation. The validity of the discrete element model is verified by the indoor compaction test results. The influence of different rolling parameters on the compaction quality of PCM-clay is analyzed, and then the recommended rolling parameters of PCM-clay under different PCM contents and different PCM crystallinity are given. The results show that when the vibratory force is too small, it is difficult to achieve the compaction effect of large vibratory force even if the number of rolling passes is increased. Properly increasing the vibratory force is beneficial to compaction. The increase of the crystallinity of PCM will reduce the dry density of PCM-clay. By increasing the number of rolling passes, reducing the rolling speed and appropriately reducing the paving thickness, the compaction effect of the phase change clay can be improved to achieve the maximum dry density when the PCM is not crystallized. This study can provide a new method for analyzing the compaction quality of PCM-clay at different construction temperatures, and also provide a theoretical basis for the compaction quality control of PCM-clay in core

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52279136) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52279136).

收稿日期(Received): 2024-08-13 **修回日期(Revised):** 2024-12-24 **接受日期(Accepted):** 2025-01-09 **网络出版日期(Online):** 2025-01-10

wall with different PCM crystallinity.

Key words: phase-change-material mixed clay (PCM-clay); compaction quality; compaction parameters; control standard; discrete element simulation

0 引言

中国西南高海拔寒区一批 200~300 m 级的高黏土心墙堆石坝正在或即将开工建设, 填筑碾压质量是保证大坝安全的关键^[1]。由常规黏土掺混一定比例石蜡基相变材料 (phase change material, PCM) 制备而成的相变黏土为应对土石坝心墙在冬季填筑施工时土料的防冻控温提供了新的途径^[2-4], 目前众多研究已论证了相变黏土的防冻控温性能^[5-6]和筑坝材料可行性^[7-8]等, 但是 PCM 在不同温度下特有的相态变化 (即结晶度不同) 会导致相变黏土呈现不同的压实特性, 故相变黏土用于实际工程之前, 还需进一步研究不同 PCM 结晶度下相变黏土如何确保碾压质量, 即如何确定合理的碾压参数控制标准。

实际工程中, 心墙正式填筑前通常会开展现场碾压试验, 以校核填筑标准和优化施工参数 (碾压速度、摊铺厚度和碾压遍数等), 但现场碾压试验需耗费大量的人力、物力和时间, 试验成本高昂, 加之外界环境温度复杂多变, 难以控制大体积的相变黏土达到试验温度, 数值模拟方法逐渐成为研究碾压过程的重要手段。相变黏土是由矿物颗粒和 PCM 组成的松散集合体, 属于典型的非连续体, 常规的有限元法不能体现颗粒间的复杂相互作用及高度非线性行为, 不能真实刻画散体材料的流变特征, 对于碾压过程等非线性问题的模拟, 离散元方法则更为合理^[9]。

当前国内外学者已对土石料、沥青混凝土等材料的碾压过程展开了研究, 在压实机理和碾压参数对压实特性的影响等方面取得了大量成果。Micaelo 等^[10]使用 PFC^{2D} 对沥青料碾压过程进行模拟, 分析了压实过程中沥青混合料的密度变化。Ma 等^[11]建立了基于 Hill 接触的非饱和粉土模型, 采用 PFC^{3D} 模拟路基碾压过程, 分析了碾压遍数、振动强弱对路基碾压效果的影响。Li 等^[12]采用 PFC^{2D} 来模拟现场堆石料的振动压实, 将堆石料颗粒建模为可破碎的不规则和随机簇状, 模拟了野外堆石料的破碎现象。徐京海等^[13]采用 PFC^{2D} 对碎石路基碾压过程模拟, 分析了摊铺厚度、碾压速度等对碎石路基沉降量的影响。李杨等^[14]基于 PFC^{2D} 开展现场堆石体振动碾压的数值模拟, 较好地反映了堆石体在振动碾压条件下的沉降变形。

相变黏土作为寒区大坝心墙填筑的新方案, 有关其碾压过程的数值模拟尚未涉及, 并且相变黏土的微观接触模型与前人研究的粉土、沥青混合料、堆石

料等有所不同, 因此有必要对相变黏土碾压过程展开相关研究。

基于此, 本文采用 PFC^{3D} 软件开展了不同 PCM 结晶度下相变黏土碾压过程离散元模拟。首先, 建立不同 PCM 结晶度下相变黏土碾压模型; 然后, 根据室内击实试验对相变黏土 PFC 碾压模型的有效性进行验证; 最后, 设置不同的碾压参数进行碾压过程模拟, 分析不同碾压参数对相变黏土压实质量的影响; 进而给出不同 PCM 结晶度下的相变黏土推荐碾压参数, 为不同施工温度下不同 PCM 结晶度的心墙相变黏土的压实质量控制提供理论依据。

1 数值试验的基本原理

1.1 振动碾的模拟方法

(1) 碾压模拟相似率

如果建立与实际碾压机同样大小的模型, 对应生成的相变黏土颗粒数目在亿级以上, 计算资源耗费巨大。因此, 在保证模拟结果具有代表性的前提下, 需要依照相似准则对相变黏土碾压模型和碾压机碾轮缩尺。压实能力系数可以表征振动碾压轮的压实能力, 当模拟碾轮与实际碾轮的压实能力系数相同时, 模拟碾轮与真实碾压机对相变黏土的压实效果相同^[15]。

由滚动压实力学可知, 碾轮的下陷深度与碾压荷载及碾轮尺寸有关 (与 $bD^{0.5}$ 成反比)。

$$\xi = \frac{K_p(G+F)}{bD^{0.5}} \quad (1)$$

式中: ξ 为碾轮的压实能力系数 ($\text{N}/\text{m}^{1.5}$); b 为碾轮宽度 (m); D 为碾轮直径 (m); G 为碾轮的静压力 (N); F 为碾轮的激振力 (N); K_p 为超加系数, 其与碾轮的动静荷载比 (F/G) 有关, 一般按照经验取 0.9~1.7^[16]。

当 PFC 模拟碾轮的动静荷载比与实际碾压机的动静荷载比相等时, 二者的超加系数 K_p 相同,

$$\frac{F_M}{G_M} = \frac{F_S}{G_S} \quad (2)$$

式中: F_M , G_M 分别为模拟碾压机的激振力和静压力; F_S , G_S 分别为实际碾压机的激振力和静压力。

当模型碾轮和实际碾压机的压实能力 ξ 相同时, 需满足:

$$\frac{G_M + F_M}{b_M D_M^{0.5}} = \frac{G_S + F_S}{b_S D_S^{0.5}} \quad (3)$$

式中: b_M , D_M 分别模型碾轮的轮宽和轮径; b_S , D_S

分别为实际碾轮的轮宽和轮径。

为保证模拟碾轮与实际碾压机的压实能力一致，相变黏土碾压模拟的模拟相似律需满足：

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_M}{G_M} &= \frac{F_S}{G_S}, \\ \frac{F_M}{F_S} &= \frac{G_M}{G_S} = \beta, \text{ 且 } \beta = \left(\frac{D_M}{D_S} \right)^{0.5} \cdot \frac{b_M}{b_S}, \\ f_M &= f_S. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： f_M 为模拟碾轮的振动频率； f_S 为实际碾压机的振动频率。

(2) 碾轮荷载施加

碾轮的尺寸、荷载大小要满足式 (4) 的模拟相似率。通过设置的重力场，用 `clump` 生成碾轮可以有效避免底部颗粒沉降时，碾轮与颗粒相分离的情况。同时赋予 `clump` 平动、转动和激振力，来模拟实际碾轮的碾压作用。

模拟碾轮的平动速度 v 与角速度 ω 需要满足如下关系：

$$v = \omega R \quad (5)$$

式中： R 为碾轮半径。

振动碾压机的激振力可简化为简谐力。同时，考虑在振动轮激振力与碾轮重力相反的半个周期内，当激振力大于碾轮重力时，碾轮会向上运动，脱离表面颗粒。模拟中则认为该半个周期内轮子对被压材料无作用，故一个周期内，碾轮 `clump` 外力施加方程可表达为

$$F = \begin{cases} F_M \cos(2\pi ft) & (0 < t < t_1) \\ -G_M & (t_1 < t < T) \end{cases} \quad (6)$$

式中： t 为任意时刻； t_1 为激振力与碾轮重力大小相等方向相反时刻； T 为一个周期； f 为激振频率，负号代表力的方向向下，即认为激振力 F 与碾轮重力 G 的合力方向向上时，对颗粒的合力为零。

(3) 基于单位体积压实功的碾压参数换算

现有研究表明，当单位体积做功相同时，模拟碾轮与实际碾轮对相变黏土具有相同的压实效果^[17]，单位体积压实功 $E_s(\text{J}/\text{m}^3)$ 为

$$E_s = 2A \left(W + \frac{\pi}{4} F \right) \cdot \frac{Nf}{BHv} \quad (7)$$

式中： A 为碾轮振幅 (m)； W 为碾轮的静荷载 (N)； F 为碾轮的激振力 (N)； N 为碾压遍数； f 为碾压机振动频率 (Hz)； B 为碾轮宽度 (m)； H 为碾压厚度 (m)； v 为碾压速度 (m/s)。

因此，在压实能力系数相同的基础上，还需满足实际碾压和模型碾压的单位体积压实功相等，才能实现模型碾压参数与实际碾压参数的转换。同时假定模

型碾压与实际碾压的振幅相同即 $A_M=A_S$ 。

1.2 相变黏土的颗粒流模型

(1) 基本假定

相变黏土是一个复杂的多相体系，若按照实际情况建立 PCM 液固相变过程的模型难度较大。本文所研究的重点为不同 PCM 结晶度下相变黏土的压实特性，而非相变黏土内部作用机制，所以在相变黏土碾压模型建立时，将模型进行简化，具体假设如下：

a) 根据试样内部的物质组成，在相变黏土模型中仅设置一种颗粒，将水和 PCM 的作用，等效为黏土颗粒之间的作用。

b) 假定颗粒单元为刚体，土颗粒本身不发生变形破坏，土颗粒在激振力的作用下发生错动与滚动从而形成土体的压缩变形。

由于上述假定颗粒为刚性，所建相变黏土模型在碾压过程中不会发生颗粒变形和破坏，而是通过接触模型和模型参数，来改变模型整体的力学特性。压实的过程主要是颗粒克服颗粒间的摩擦力而产生运动，重新完成镶嵌、排布，颗粒的破坏并非是影响压实的主要因素^[18]。

参考相关研究^[19-21]，本文对颗粒之间的接触采用线性滚动阻力黏结模型，颗粒与墙的接触采用线性接触模型。

(2) 相变黏土模型的建立

根据碾轮尺寸，相变黏土碾压模型尺寸定义为长 500 mm，宽 200 mm，高 300 mm。工程实践表明，碾压机的行进方向变化会影响碾压效果^[22]，故碾轮行进方向 (x 方向) 设置为反弹边界，碾轮轴线方向 (y 方向) 设置为周期性边界，竖直方向 (z 方向) 设置为反弹边界。

在 PFC 中均以球状颗粒代表土颗粒。理论分析表明，只要选取尺度相关的微观本构，放大粒径的试样与原粒径试样具有相同的力学响应^[23-24]。综合考量算力消耗、模拟结果的准确性及颗粒级配差异敏感性分析，对取自西南高海拔寒区某心墙堆石坝工程实际工程土料的级配开展相似处理后得到数值模拟级配如表 1 所示。碾压模型的颗粒数目为 20 万。

表 1 模型颗粒级配表

Table 1 Particle size distribution of PFC model			
粒径/mm	1.25	1.25~5	5
百分比/%	19	54	27

2 模型参数标定

2.1 不同 PCM 结晶度相变黏土击实试验

(1) 试验材料

试验所用黏土料基本物理性质如表 2 所示，属于

含砂低液限黏土 (CLS)。PCM 的主要成分为正十四烷 (含量 95%以上), 凝固相变温度范围 0.05~3.45℃, 液相密度 0.76 g/cm³, 固相密度 0.85 g/cm³, 采用直掺法制备相变黏土。

表 2 土料的基本物理性质
Table 2 Basic physical properties of soil material

砂粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%	相对质量密度	塑限/%	液限/%	塑性指数
31.23	37.82	30.46	2.75	17.46	29.76	12.3

(2) 试验方法

通过差式扫描量热试验, 测得不同温度下相变黏土的结晶度, 结果如表 3 所示。

表 3 相变黏土不同温度下的结晶度
Table 3 Crystallinity of PCM-clay at different temperatures

温度/℃	4%PCM 相变黏土 结晶度/%	8%PCM 相变黏土 结晶度/%
10.0	0	0
3.0	1.6	35
2.5	8.9	38
2.0	38.0	59
1.0	57.0	79
0	61.0	79

采用 MX-TD01 型控温箱, 控制相变黏土温度使其达到不同的结晶度。击实试验时外部环境温度在 5~8℃。试验步骤参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) [25] 确定, 采用 YDT-II 型多功能电动击实仪开展击实试验, 通过改变每层的击实次数实现击实功的改变。

2.2 相变黏土的击实试验模型

通过室内击实试验来标定模型细观参数。在确定接触模型后, 建立击实试验模型, 生成直径 0.051 m 高 0.05 m 的击实锤 clump, 质量为 2.5 kg, 击实锤在距离击实筒 0.308 m 处自由落体, 通过 loop 循环实现击实锤坐标变换, 使其均匀落在颗粒表面上, 以模拟真实试验步骤 (图 1)。

击实试验中, 每层填土约 0.7 kg, 所以球体颗粒的密度 ρ_s 应满足如下关系:

$$\rho_s \sum_{i=1}^3 \left(n_i \frac{4}{3} \pi \bar{R}_i^3 \right) = 0.7 \quad (8)$$

式中: ρ_s 为球体颗粒的密度 (kg/m³); n 为颗粒数目; i 为第 i 段级配; \bar{R}_i 为第 i 段级配的平均颗粒粒径 (m)。

相变黏土击实试验模型的颗粒尺寸与碾压模型相同, 碾压模型体积约为击实模型的 23.4 倍, 故击实模型的 3 层颗粒的总数目为 8440。

3 层击实后土料的干密度 ρ_d 与击实筒内最终土料的高度满足如下关系:

$$\rho_d (1 + w + \alpha) \cdot h \frac{\pi d^2}{4} = 2100 \quad (9)$$

式中: ρ_d 为土料的干密度 (g/cm³); w 为含水率; α 为 PCM 含量; h 为击实筒内土料高度 (cm); d 为击实筒直径 (cm)。

由式 (10) 可确定模型中不同 PCM 掺量的相变黏土在 3 层击实后模型高度与其干密度的关系:

$$\rho_d = \begin{cases} \frac{22.02}{h} & (4\% \text{ PCM}) \\ \frac{21.84}{h} & (8\% \text{ PCM}) \end{cases}, \quad (10)$$

$$h = \bar{Z} + \bar{R} \quad .$$

式中: \bar{Z} 为表层颗粒平均 z 坐标; \bar{R} 为颗粒平均半径。

由式 (10) 即可换算模型击实后的干密度。在轻型击实试验模型中, 可以得到击实完成后模型的表面颗粒 Z 坐标, 进而换算成干密度。通过反演分析可标定出 591.55 kJ/m³ 击实功下不同 PCM 结晶度的相变黏土与宏观物理试验相对应的细观参数, 得到离散元模型中的细观参数如表 4 所示。颗粒与墙体接触的法向刚度 k_n 为 10⁷, 切向刚度 k_s 为 10⁷, 摩擦系数为 0.5。

根据表 4 中的细观参数进行不同 PCM 结晶度和击实功下相变黏土的击实试验数值模拟, 通过改变击实次数来改变击实功, 最终得到不同 PCM 结晶度下相变黏土的击实功-干密度曲线, 将通过 PFC 模拟得到的击实功-干密度曲线与室内击实试验所得到的击实功-干密度进行对比 (图 2), 可以发现数值模拟与

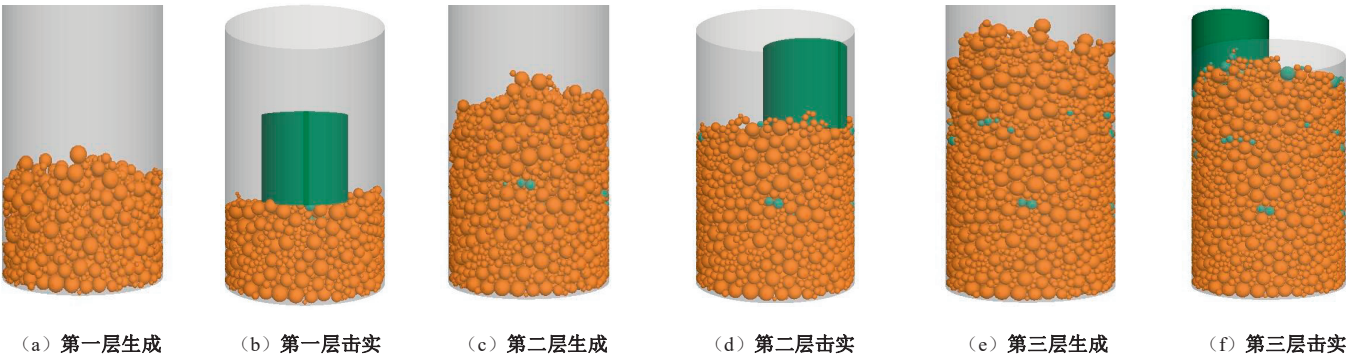


图 1 击实试验模拟流程

Fig. 1 Simulation process of compaction test

表 4 不同 PCM 结晶度相变黏土的颗粒模型参数

Table 4 Model parameters of PCM-clay with different PCM crystallinity									
相变黏土 PCM 掺量/%	结晶度/ %	有效模量 E/Pa	刚度比 K	摩擦 系数	滚动摩 擦系数	吸力值 F_0/N	吸引力间距 D_0/m	法向阻 尼比	切向阻尼 比
4	0	1×10^7	1.5	0.50	0.60	0.2	1×10^{-4}	0.2	0.2
	38	1×10^7	1.5	0.52	0.65	1.0	1×10^{-4}	0.2	0.2
	61	1×10^7	1.5	0.75	0.80	2.5	2×10^{-4}	0.2	0.2
8	0	1×10^7	1.5	0.76	0.85	2.6	2×10^{-4}	0.2	0.2
	35	1×10^7	1.5	1.00	1.10	3.0	7×10^{-4}	0.2	0.3
	79	1×10^7	1.5	1.10	1.20	4.0	1×10^{-3}	0.5	0.5

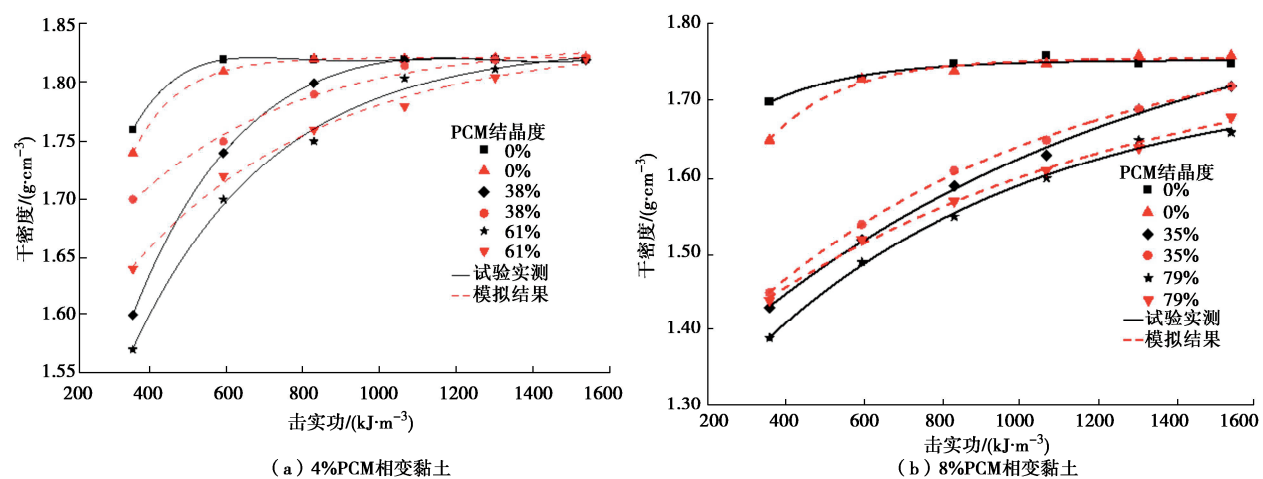


图 2 不同 PCM 结晶度相变黏土的击实曲线模拟与实测对比

Fig. 2 Comparison between model and test results of compaction curves of PCM-clay with different PCM crystallinity

室内试验中击实功-干密度曲线的变化规律较为接近，模型吻合较好。

3 碾压过程模拟及结果分析

3.1 碾压工况设定

实际土石坝工程中常用的 20 t 碾压机参数如表 5 所示。选定碾轮尺寸为宽 200 mm、直径 160 mm。碾轮的生成参照上述方法实现。根据式 (4) 的相似率准则，计算可得模拟碾轮对应的激振力为 10480 N/7274.7 N、质量为 296.93 kg，密度为 73863.2 kg/m³，重力大小为 2909.91 N。

表 5 XS203J 型碾压机主要技术参数

Table 5 Main technical parameters of XS203J roller					
轮宽/ mm	轮直/ mm	前轮质 量/kg	振动频 率/Hz	激振力/ kN	振幅/ mm
2130	1600	10000	28/33	353/245	1.9/0.95

对不同 PCM 结晶度下相变黏土的碾压过程展开模拟。由于相变黏土整平后摊铺系数 1.15，相变黏土碾压过程中土料质量不变，可建立碾压后的高度与土料干密度的关系：

$$C\rho'_d(1+w+\alpha)Sh_0=\rho_d(1+w+\alpha)Sh。$$
 (11)

式中：C 为整平后的压实系数（取 0.87）； ρ'_d 为击实

试验所得土料的最大干密度（g/cm³）； ρ_d 为土料的干密度（g/cm³）；w 为含水率； α 为 PCM 含量； h_0 为摊铺高度（cm）；h 为碾压后土料高度（cm）；S 为模拟模型条带面积。

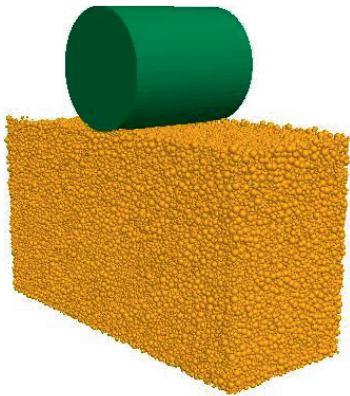


图 3 相变黏土碾压模型

Fig. 3 PFC model of PCM-clay rolling

统计碾压模型中表面颗粒的沉降即可换算出碾压后相变黏土的干密度。

为研究不同碾压参数对相变黏土心墙压实质量的影响，本文建立了不同 PCM 结晶度下心墙相变黏土 PFC 碾压模型（图 3）。碾压模型的工况编号及碾压参数如表 6 所示。

表 6 相变黏土碾压模型工况
Table 6 Test conditions of PCM-clay rolling model

PCM 含量/%	PCM 结晶度/%	碾压速度/(m·s ⁻¹)	摊铺厚度/cm	激振力/kN	碾压遍数	工况编号
4	0	0.690	30	353	10	A ₁
	38	0.417	30	353	12	B ₁
	38	0.690	30	353	14	B ₂
	38	0.690	30	245	14	B ₃
	61	0.417	30	353	16	C ₁
	61	0.690	30	353	18	C ₂
	61	0.690	25	353	16	C ₃
8	0	0.690	30	353	10	D ₁
	35	0.417	30	353	16	E ₁
	35	0.690	25	353	16	E ₂
	35	0.690	30	353	18	E ₃
	79	0.417	25	353	20	P ₁
	79	0.417	30	353	20	P ₂
	79	0.690	25	353	20	P ₃
	79	0.690	30	353	20	P ₄

3.2 碾压过程中颗粒间力链的演化和颗粒位移分析

为研究在碾压过程中相变黏土颗粒的运动情况，对模型中颗粒的力链变化进行了监测， x 方向为碾轮行进方向。不同 PCM 结晶度下相变黏土力链集中分布范围变化结果如图 4 所示。可以发现，碾轮行至中间处，力链主要集中在碾轮下方（1.13~2.66）倍轮径区域内，随着碾压遍数的增加，相变黏土的力链在 x 和 z 方向上分布的越广。

对于同一结晶度的相变黏土，随着碾压遍数的增多，力链在 x 和 z 方向上分布的区域越大。相同碾压遍数下，PCM 结晶度越大，力链在 x 和 z 方向上分布的区域越小。碾压 8 遍后，4%PCM 相变黏土整体的力链分布比较均匀，土料整体压实效果均匀稳定。

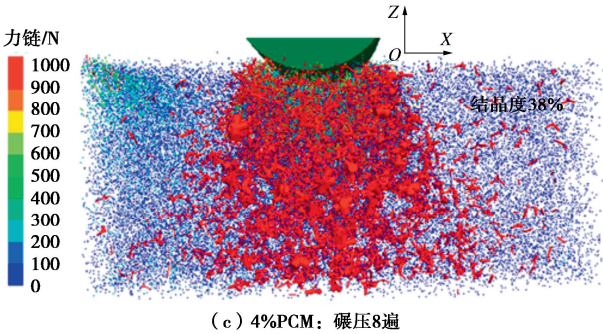


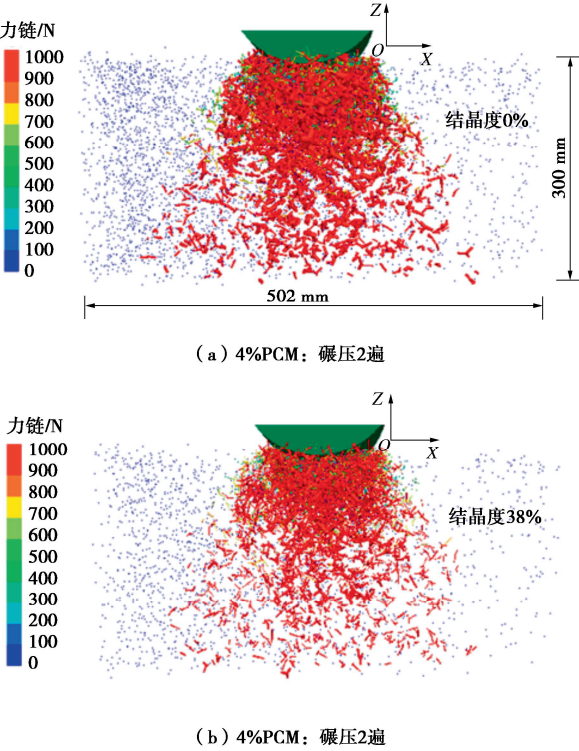
图 4 4%不同结晶度相变黏土碾压过程中力链变化情况
Fig. 4 Change of force chain in the rolling process of 4% PCM-clay with different crystallinity

图 5 为工况 A₁ 在 y - z 平面上随碾压遍数增加的位移场分布，在整个碾压过程中，颗粒产生竖直向下的速度和位移；浅层颗粒的速度和位移始终大于深层颗粒，符合压实功沿层深传递的客观规律。

3.3 不同结晶度相变黏土碾压遍数对压实影响

对模型工况 A₁, B₂, C₂ 和 D₁, E₃, P₄ 中表面颗粒高度进行监测，根据式 (11) 换算出不同碾压遍数下，不同 PCM 结晶度的相变黏土干密度。不同 PCM 掺量、不同 PCM 结晶度下相变黏土碾压遍数与干密度的关系如图 6 所示，需要说明的是，其中 PCM 无结晶时最大干密度是通过室内标准击实试验确定的，4%PCM 相变黏土最大干密度确定为 1.82 g/cm³，8%PCM 相变黏土最大干密度确定为 1.73 g/cm³ (图 2)。

模拟结果表明，随着碾压遍数的增加，不同 PCM 结晶度的相变黏土的干密度同样增加，且增长趋势都表现为先增大后收敛。这是由于前期相变黏土状态较为松散，单遍碾压的沉降量较大。而随着碾压的进行，相变黏土越来越密实，单遍碾压的沉降量趋于稳定。



当相变黏土达到一定密实程度后，继续增加碾压遍数无法继续得到更好的压实效果。

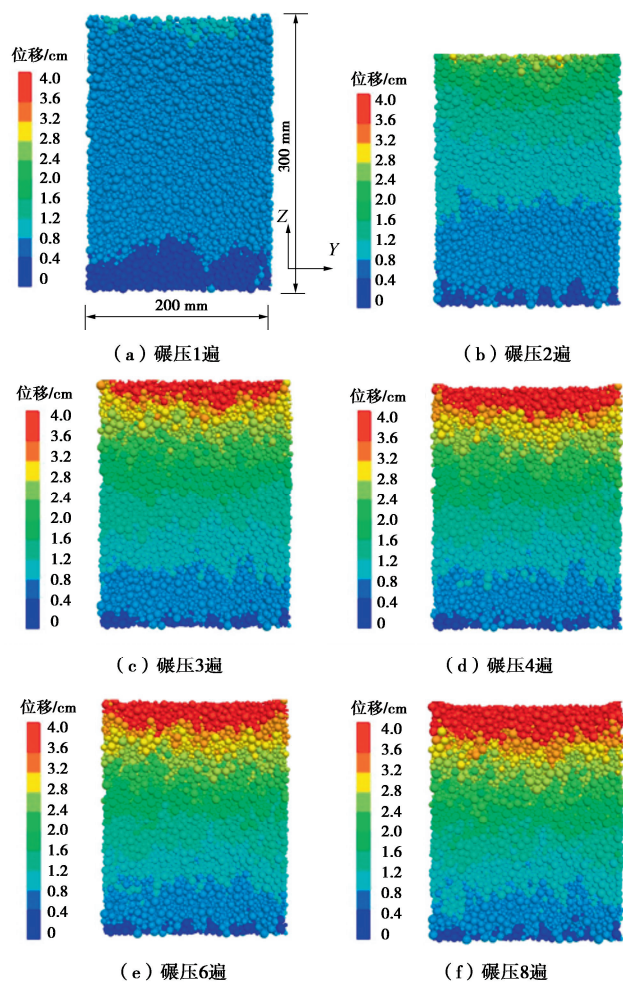
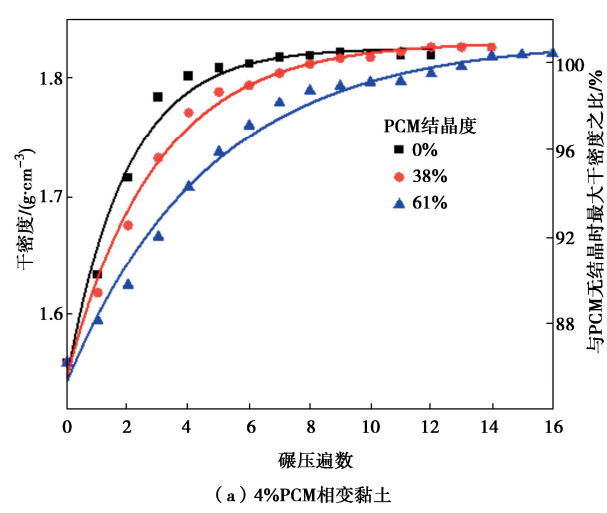
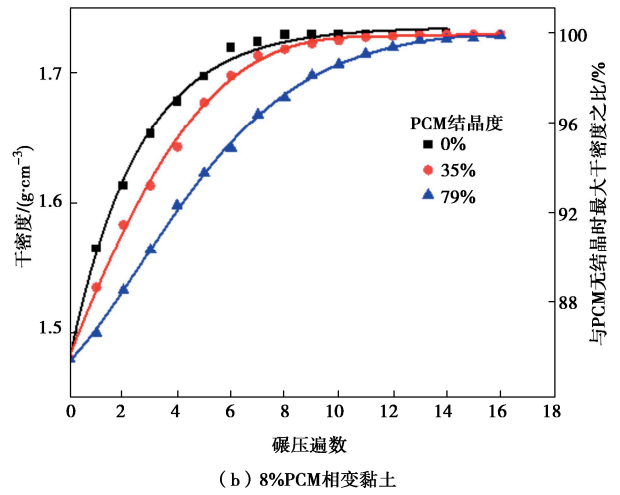


图 5 工况 A₁ 下相变黏土颗粒随碾压遍数增多的位移分布 (y-z 平面)
Fig. 5 Displacement field of test condition A₁ in y-z plane with the different rolling passes



(a) 4%PCM相变黏土



(b) 8%PCM相变黏土

图 6 不同 PCM 结晶度相变黏土碾压遍数与干密度关系
Fig. 6 Relationship between rolling passes and dry density of PCM-clay with different PCM crystallinity

对于同一 PCM 掺量的相变黏土，随着 PCM 结晶度的提高，相变黏土干密度下降，但增加碾压遍数后，可以使 PCM 结晶后的相变黏土干密度达到同掺量 PCM 未结晶时的最大干密度的 98% 以上，与 PCM 结晶度 0% 时达到相同的压实状态。

3.4 不同结晶度相变黏土摊铺厚度对压实影响

在其他碾压参数相同时，通过对比 8%PCM 相变黏土模型工况 E₂, E₃, P₃, P₄，分析不同 PCM 结晶度下，摊铺厚度对相变黏土压实质量的影响。两种不同摊铺厚度的干密度-碾压遍数曲线如图 7 所示。

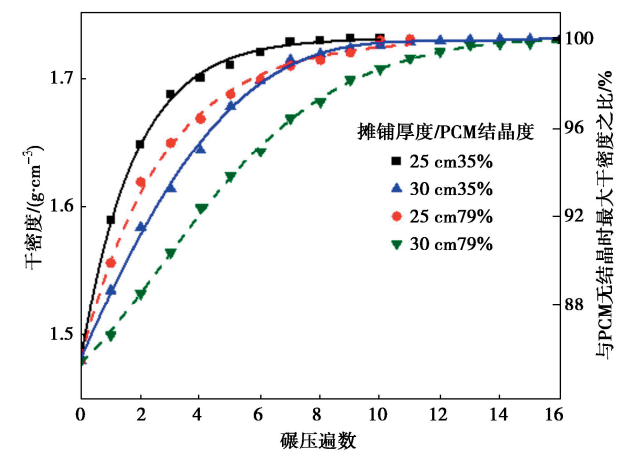


图 7 不同松铺厚度下相变黏土碾压遍数与干密度曲线
Fig. 7 Relationship between rolling passes and dry density of PCM-clay under different lift thicknesses

其他碾压参数相同时，摊铺厚度越小，作用于相变黏土的单位体积压实功越大，干密度也越大。同一摊铺厚度下，PCM 结晶度越高，达到 PCM 未结晶时的最大干密度所需的碾压遍数就越多。

摊铺厚度的减小, 可以使相变黏土在更少的碾压遍数下达到压实状态。因此, 在施工过程中可根据温控要求可以适当减小摊铺厚度, 提高压实质量。但是一味减小摊铺厚度不仅会严重影响施工效率, 还可能导致相变黏土松铺保温效果变差, 下层压实土料发生冻结。因此, 摊铺厚度要结合现场温控要求和施工效率综合选择。

3.5 碾压荷载对结晶相变黏土压实影响分析

为研究碾压荷载大小对相变黏土压实质量的影响, 对比模型工况 B₂, B₃ 在不同碾压遍数下的干密度, 碾压模拟结果如图 8 所示。因为本研究的主要目的在于如何压实 PCM 结晶后的相变黏土, 所以, 其余 PCM 结晶度下的相变黏土, 直接采用大激振力 353 kN 碾压, 不再过多分析其余工况下激振力对的压实干密度的影响。

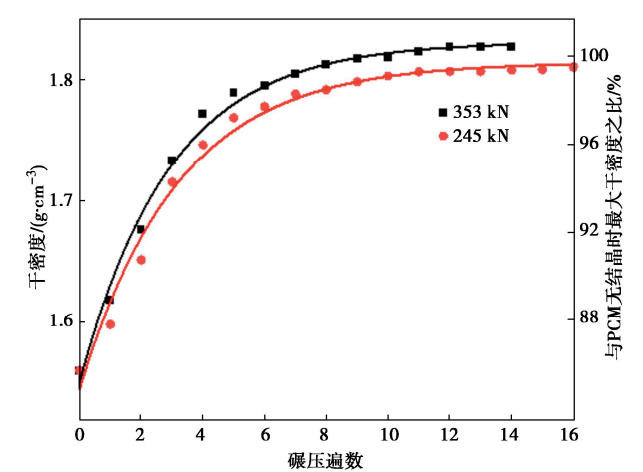


图 8 不同激振力下碾压遍数与干密度

Fig. 8 Relationship between rolling passes and dry density under different vibratory forces

由图 8 可知, 模型 B₂, B₃ 的模型最终干密度分别为 1.827, 1.811 g/cm³, 均在 PCM 未结晶时最大干密度的 99% 以上。其他参数不变时, 碾压荷载越大, 相变黏土的压实质量越好。这是由于碾压荷载越大, 越容易令相变黏土颗粒发生相对运动, 重新排列镶嵌, 使得干密度越大。小激振力即使在更多的碾压遍数下也难以达到同样的压实效果。

因此, 增加碾压荷载, 对相变黏土压实质量是有利的。同时, 增加碾压荷载还可以更快达到理想的压实效果, 提高压实效率。但需要注意, 过大的碾压荷载反而容易造成陷碾, 降低相变黏土心墙的压实效果。

3.6 不同结晶度相变黏土推荐碾压参数

通过对表中各模拟工况的计算, 得出不同 PCM 结晶度下相变黏土达到完全压实状态 (达到 PCM 未结晶时的最大干密度) 的所需碾压遍数, 如表 7 所示。

相变黏土最大干密度是以 PCM 无结晶时的标准击实试验结果来确定的, 因此模拟结果中出现了压实度超过 100% 的情况, 但是实际工程中, 过高的压实度可能对工程质量产生不利影响。故不同结晶度相变黏土推荐碾压参数组合如表 8 所示。

表 7 不同结晶度相变黏土压实所需碾压遍数

Table 7 Required rolling passes for PCM-clay compaction with different crystallinity

相变黏土	PCM 结晶度/%	摊铺厚度/cm	碾压速度/(m·s ⁻¹)	碾压遍数	压实程度 ^① /%
4% PCM	0	30	0.690	8	99.9
	38	30	0.417	6	100.7
	38	30	0.690	10	99.7
	61	25	0.690	10	100.1
	61	30	0.417	9	99.7
8% PCM	61	30	0.690	14	99.2
	0	30	0.690	8	99.9
	35	25	0.690	10	99.2
	35	30	0.417	8	100.1
	35	30	0.690	14	100.3
PCM	79	25	0.417	8	100.4
	79	25	0.690	12	99.7
	79	30	0.417	10	100.6
	79	30	0.690	16	99.3

注: ①压实程度定义为碾压干密度与同掺量 PCM 未结晶时最大干密度之比。

表 8 不同结晶度相变黏土推荐碾压参数组合

Table 8 Recommended parameters for PCM-clay compaction with different crystallinity

相变黏土	PCM 结晶度/%	摊铺厚度/cm	激振力/kN	碾压速度/(km·h ⁻¹)	碾压遍数
4% PCM	0	30	353	2.5	8
	38	30	353	2.5	10
	61	30	353	2.5	14
8% PCM	0	30	353	2.5	8
	35	25	353	2.5	14
	79	30	353	1.5	10
	79	25	353	2.5	12

4 结 论

本文提出了不同 PCM 结晶度下相变黏土碾压过程离散元模拟方法, 用不同的细观参数建立了不同 PCM 结晶度的相变黏土碾压模型, 给出了不同 PCM 结晶度下相变黏土的推荐碾压参数, 从而可为心墙相变黏土压实质量控制提供理论依据。

(1) 基于离散元数值模拟得到的相变黏土击实功-干密度关系曲线与室内击实试验所得结果进行对比可知数值模拟与室内试验所得击实变化规律吻合较好, 证明了离散元方法模拟相变黏土压实性能的可行性与合理性。

(2) 随着 PCM 结晶度提高, 相变黏土干密度降低, 而通过适当减小碾压速度、摊铺厚度等措施, 可

进一步提高相变黏土压实效果, 最终可实现与 PCM 无结晶时相同的压实效果; 适当增加碾压荷载, 对相变黏土压实质量有利, 同时会提高压实效率。

(3) 针对实际施工现场不同的碾压工况, 通过离散元数值模拟分析给出了不同 PCM 结晶度下相变黏土推荐的碾压参数 (摊铺厚度、碾压速度、碾压遍数等)。基于推荐的碾压参数组合可使不同 PCM 结晶度下相变黏土的最大干密度达到 PCM 未结晶时的 98% 以上。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 刘东海设计研究内容和提供指导; 谷泽永完成试验和数值分析; 刘东海, 谷泽永, 陈辉, 王文东参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed and guided by LIU Donghai. The experiments and numerical analyses were conducted by Gu Zeyong. The manuscript was drafted and revised by LIU Donghai, GU Zeyong, CHEN Hui and WANG Wendong. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 郑守仁. 我国水库大坝安全问题探讨[J]. 人民长江, 2012, **43**(21): 1-5. (ZHENG Shouren. Discussion of safety issues of reservoir dam in China[J]. Yangtze River, 2012, **43**(21): 1-5. (in Chinese))
- [2] LIU D H, LIANG J Y, WANG Y L. Numerical simulation on anti-freezing performance of PCM-Clay in core wall during winter construction[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, **215**: 118951.
- [3] LIU D H, WANG Y L, LIANG J Y. Potential applications of phase change materials to extend the winter construction time of earth-rock dam in cold regions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, **33**(8): 04021194.
- [4] 刘东海, 戴怀建, 郑 涵. 心墙相变砾质土工程特性及寒区冬季施工防冻控温研究[J]. 水利学报, 2022, **53**(8): 914-925. (LIU Donghai, DAI Huajian, ZHENG Han. Engineering characteristics and temperature control of phase change material and gravel mixed soil for core wall anti-freezing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, **53**(8): 914-925. (in Chinese))
- [5] 刘东海, 郑 涵, 杨家琦. 松铺覆盖下心墙相变土防冻控温性能试验研究[J]. 水力发电学报, 2022, **41**(7): 38-46. (LIU Donghai, ZHENG Han, YANG Jiaqi. Investigation on anti-freezing performance of core wall phase change material-incorporated clay with an upper loose-covering layer[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, **41**(7): 38-46. (in Chinese))
- [6] LIU D H, ZHENG H. Numerical simulation of the anti-freezing performance of a phase change clay core-wall with loose covering[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, **233**: 121042.
- [7] 杨家琦, 刘东海, 王泽帆. 相变黏土在三轴压缩下的渗透和应力应变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(12): 2584-2593. (YANG Jiaqi, LIU Donghai, WANG Zefan. Permeability and strain-stress characteristics of phase-change clay under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(12): 2584-2593. (in Chinese))
- [8] LIU D H, YANG J Q. Influences of paraffin-based phase change material on soil engineering properties[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, **23**(7): 04023090.
- [9] WU K, SUN W C, LIU S Y, et al. Discrete element modeling of vibration compaction effect of the vibratory roller in roundtrips on gravels[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2021, **49**(5): 3869-3884.
- [10] MICAEL R, RIBEIRO J, AZEVEDO M, et al. Asphalt compaction study[J]. Road Materials and Pavement Design, 2011, **12**(3): 461-491.
- [11] MA Z T, LU K Y, SONG D F, et al. Study on compaction characteristics and compaction process of an unsaturated silt based on PFC3D[J]. Applied Sciences, 2023, **13**(9): 5547.
- [12] LI Y, SHE C X. Discrete simulation of vibratory roller compaction of field rockfills[J]. Shock and Vibration, 2021, **2021**(1): 9246947.
- [13] 徐京海, 徐宇冉, 张远博. 铁路碎石路基碾压效果的数值模拟[J]. 铁道学报, 2023, **45**(5): 113-118. (XU Jinghai, XU Yuran, ZHANG Yuanbo. Numerical simulation of roller compaction of coarse granular soil[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, **45**(5): 113-118. (in Chinese))
- [14] 李 杨, 余成学, 朱焕春. 现场堆石体振动碾压的颗粒流模拟及验证[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊 2): 432-442. (LI Yang, SHE Chengxue, ZHU Huanchun. Particle flow simulation and verification of vibration compaction of rockfill in site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S2): 432-442. (in Chinese))
- [15] 刘东海, 马鸿雁, 孙龙飞. 堆石坝离散元模拟中缩尺碾轮

- 等效荷载确定[J]. 水力发电学报, 2018, **37**(9): 93-102. (LIU Donghai, MA Hongyan, SUN Longfei. Determination of equivalent loads on downsized rollers in DEM simulation of rock-fill dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, **37**(9): 93-102. (in Chinese))
- [16] 尹继瑶. 单轮振动压路机技术性能参数计算: 单轮振动压路机压实能力的评价与分析[J]. 工程机械, 2006, **37**(9): 72-76, 0. (YIN Jiyao. Evaluation and analysis of compacting capability for single drum vibratory compactors[J]. Construction Machinery and Equipment, 2006, **37**(9): 72-76, 0. (in Chinese))
- [17] 刘东海, 李子龙, 王爱国. 基于碾压机做功的堆石坝压实质量实时监测与快速评估[J]. 水利学报, 2014, **45**(10): 1223-1230. (LIU Donghai, LI Zilong, WANG Aiguo. Roller working-based real-time monitoring and rapid assessment of rock-fill dam compaction quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(10): 1223-1230. (in Chinese))
- [18] 冯瑞玲, 陶建利, 赵占厂, 等. 含粗粒的细粒土的压实特性研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 382-386. (FENG Ruiling, TAO Jianli, ZHAO Zhanchang. Research on compaction property of fine soil containing coarse granulae[J]. Rock and Soil Mechanics. 2010, **31**(2): 382-386. (in Chinese))
- [19] 崔蓬勃, 朱永全, 刘 勇, 等. 非饱和砂土隧道土拱效应模型试验及颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(12): 3451-3466. (CUI Pengbo, ZHU Yongquan, LIU Yong, et al. Model test and particle flow numerical simulation of soil arch effect for unsaturated sandy soil tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(12): 3451-3466. (in Chinese))
- [20] GILABERT F A, ROUX J N, CASTELLANOS A. Computer simulation of model cohesive powders: plastic consolidation, structural changes, and elasticity under isotropic loads[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2008, **78**(3 Pt 1): 031305.
- [21] CHEN H, LIU D H. DEM analysis of wetting deformation characteristics of rockfill material considering the influence of different compaction levels[J]. Powder Technology, 2025, **452**: 120568.
- [22] 刘东海, 刘志磊, 冯友文. 堆石坝料压实监测指标影响因素及适用性分析[J]. 水力发电学报, 2019, **38**(6): 1-10. (LIU Donghai, LIU Zhilei, FENG Youwen. Analysis on applicability and influence factors of real-time monitoring compaction indexes for rockfill dam materials[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, **38**(6): 1-10. (in Chinese))
- [23] FENG Y T, OWEN D R J. Discrete element modelling of large scale particle systems: I: exact scaling laws[J]. Computational Particle Mechanics, 2014, **1**(2): 159-168.
- [24] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野: 宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(2): 195-254. (JIANG Mingjing. New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(2): 195-254. (in Chinese))
- [25] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))