动静联合排水固结技术的覆盖土层厚度研究*

王德咏[1,2]，于雯雯[3]，郑　昕[1]，彭海华[1]

（1. 中交四航工程研究院有限公司，广东 广州 510450；
2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室，广东 广州 510450；
3. 中交第四航务工程局有限公司，广东 广州 510290）

摘要：针对动静联合排水固结技术上覆土层厚度设计缺乏理论依据的问题，分析动静联合排水固结技术和覆盖土层的作用机理，基于典型工程案例的系统分析，明确覆土层厚度与夯击能级、软土强度的统计规律。在此基础上，构建上硬下软双层地基冲击模型，推导以保护下卧软土层与实现有效能量传递为双控目标的上覆土层厚度理论计算公式，并给出关键参数的量化取值范围。结合案例提出动静联合排水固结技术覆土层厚度的系统化设计流程。结果表明：覆土层合理厚度与夯击能级的二次方根呈正相关，与下卧软土的不排水抗剪强度呈负相关，覆土层厚度设计需要考虑冲击荷载的最大允许应力比值、应力扩散特征及排水体系的设置方式。研究结果为优化动静联合排水固结技术设计提供了理论依据与实用参考。

关键词：动静联合排水固结；强夯；覆盖土层厚度；应力扩散角

中图分类号：U655.54；TU472　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)09-0223-07

Study on cushion thickness of dynamic-static combined drainage consolidation technology

WANG Deyong[1,2], YU Wenwen[3], ZHENG Xin[1], PENG Haihua[1]

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;
3. CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The design of the cushion thickness for the dynamic-static combined drainage consolidation (DSCDC) technique has long relied on engineering experience due to the lack of a theoretical basis. To address this issue, the reinforcement mechanism of the DSCDC technique and the role of the cushion layer are first investigated. On the basis of a systematic analysis of representative engineering cases, the statistical relationships among the optimum cushion thickness, tamping energy, and the strength of the underlying soft soil are built. An impact model for stiff-over-soft double-layered foundation is built, and a theoretical equation for determining the optimum cushion thickness is derived by simultaneously considering the dual objectives of protecting the underlying soft soil and ensuring effective transmission of impact energy. Quantitative ranges for the key design parameters are also given. On the basis of engineering cases, a systematic design procedure for determining the cushion thickness of the DSCDC technique is proposed. The results indicate that the optimum cushion thickness is positively correlated with the square root of the tamping energy and negatively correlated with the undrained shear strength of the underlying soft soil. The cushion thickness should be designed by comprehensively considering the maximum allowable impact stress ratio, stress diffusion characteristics, and the configuration of the drainage system. The findings can provide both a sound theoretical basis and practical guidance for optimizing the design of DSCDC technique.

Keywords: dynamic-static combined drainage consolidation; dynamic compaction; cushion thickness; angle of stress distribution

收稿日期：2025-12-20　　**录用日期：**2026-03-11

***基金项目：**国家重点研发计划项目(2025YFE0118000)

作者简介：王德咏(1982—)，男，博士，正高级工程师，从事水运工程地基处理和公路边坡工程等方面的科研与技术工作。

水运工程

动静联合排水固结技术是我国在深厚软土地基处理领域的重要创新与实践成果，通过将静力(真空/堆载预压)排水固结与动力(强夯或振动)冲击作用有机结合，有效地解决了传统单一方法工效低、周期长、加固深度有限等问题，显著提升了软土的固结速率和地基承载能力。该技术在长三角、珠三角、天津滨海新区等沿海软土分布广泛的地区已得到大规模的工程应用[1-2]，有力支撑了区域重大基础设施建设。然而，工程实践中也存在工艺控制不当而导致加固效果不佳乃至失败的教训，凸显了精细化设计与施工控制的重要性。

在该复合工艺体系中，一定厚度的上覆土层不仅是进行动力加载的作业平台与能量传递介质，更是保护下部密封系统与竖向排水体免受直接冲击破坏的关键屏障，其合理厚度是决定“动”“静”工序能否协同生效的核心参数之一。丘建金等[3]认为软土上覆盖大面积填土是实现动力固结的前提和必要条件；刘祖德等[4]在相关理论与试验分析中也强调，优化排水体系与上覆层参数对于实现有效固结与动力密实的双重目标具有决定性意义。

在强夯动力响应理论研究中，各学派基于不同力学视角建立相应的分析模型，钱家欢等[6]将夯锤与地基分别简化为刚体与弹性半空间，基于冲击波动理论建立接触应力与夯锤动能、地基弹性模量间的理论关系，奠定了波动分析的基础框架；白冰等[7]在波动理论中引入冲击波动阻抗概念，提出接触应力直接取决于夯锤动量、土体波速及接触面积，深化了对应力波在土体中传播与衰减特性的描述；郑颖人等[8]则从弹塑性接触理论出发，强调夯锤形状、土体塑性变形耗能及“覆盖土层效应”的影响，建立考虑应力扩散的锥体模型，并给出修正的计算公式，使模型更贴近实际土层条件；孟庆山等[9]基于现场试验与数值模拟，重点关注冲击荷载的瞬态脉冲特征(如半正弦波或三角形波)，提出基于冲量与接触时间的动应力峰值计算公式，强调荷载时域特性对动力响应的重要性。

尽管工程界已认识到覆盖土层厚度的重要性，但目前对其优化设计的研究尚不系统，多依赖于工程经验或简化计算，缺乏兼顾能量传递效率、排水路径有效性、经济性及工程安全的统一设计准则与理论体系。为此，本文旨在通过案例分析与理论建模，建立覆盖土层厚度的科学确定方法，以期为该技术的规范化应用与优化设计提供科学依据与技术参考。

1 技术原理与覆盖土层作用机理

1.1 技术原理

真空/井点降水+堆载+强夯加固软基见图 1。该技术通过真空/井点降水快速降低地下水位，尤其是流泥-浮泥等超软土地基，迅速提升土体有效应力，形成工作面；再结合堆载预压进一步促进排水固结。待土体强度初步增长后，进一步实施强夯动力冲击：一方面破坏土颗粒结构，促使结合水转化为自由水；另一方面产生瞬时高孔隙水压力，在巨大水力梯度驱动下，孔隙水沿竖向排水通道加速排出，从而实现软基的快速压密与强度增长。该技术利用动静结合，实现协同作用。

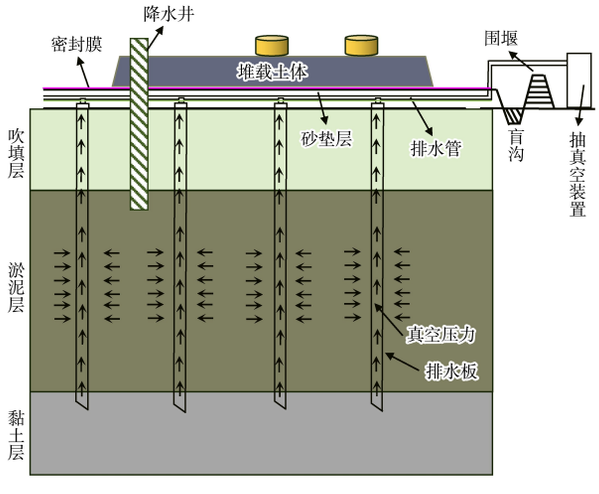

图 1 动静联合排水固结法

Fig. 1 Dynamic-static combined drainage consolidation method

1.2 上覆土层作用机理

上覆土层在动静联合加固中发挥核心介质与保护作用：1)作为应力传递层，将强夯冲击能量有效扩散并向下传递，避免能量集中破坏下部密封系统与排水体；2)作为封闭层，维持真空负压

场的稳定性并约束土体侧向变形；3）自身重力提供持续的静载预压作用；4）作为排水通道，与水平砂垫层共同构成孔隙水排出的水平路径。上覆土层厚度直接影响能量衰减率与排水效率，过薄则能量直接作用于软土表层，易造成局部破坏；过厚则能量过度衰减，有效应力传递不足，需要在保护性和有效性间取得平衡。

2　案例分析

部分动静联合排水固结案例见表 1。可以看出，动静联合排水固结法对地质的适应性较为广泛，成功应用于从超软弱吹填土（如上海、厦门案例）、深厚淤泥（如广州南沙）到复杂夹层软土（如虎门沙田港案例）等多种恶劣地质条件。从静力排水方案来说，真空井点/深井联合堆载预压较为广泛，动力方案以经济性较高的强夯法为主。从工艺上来说，普遍采用“多遍数、递增能级”的点夯，最后以低能级满夯收面；点夯能级 750~3 000 kN·m，其中 1 500~2 000 kN·m 是最常用的能级范围；根据效果反馈，有效加固深度大致在 6~12 m，对 0~4 m 浅层土体改善尤为显著。

上覆土层的厚度主要集中在 2.1~4.0 m，对于超软土或深厚淤泥地层，覆土层厚度倾向于取中高值（2.8~3.0 m），以提供足够的工作平台和应力缓冲；案例 3 和 10 表明，较高的覆土层厚度常与较高的强夯能级相匹配，以实现深层加固；案例 9~11 采用真空预压进行降水，为了保护密封膜，相应的上覆土层也较厚。案例分析表明，覆盖土层厚度取值呈现一定规律，但其与夯击能级、土体参数间的定量关系尚不明确。工程中“试夯调整”的做法，本质上也是在寻找一个既能有效传递能量、又能保护下卧软土的临界厚度。

表 1　动静联合排水固结案例

Tab. 1　Cases of dynamic-static combined drainage consolidation

案例序号	工程名称	地质条件	静力排水设置	覆土层厚/m	强夯措施	加固效果
1	上海市某大面积软弱路基加固工程[10]	上部吹填粉细砂 2.2~3.8 m，下卧夹层状淤泥质黏性土	真空井点降水	3.1	3 遍降水、3 遍强夯，夯击能分别为 400~600 kN·m（1 击）、1 000~1 200 kN·m（2 击），800~1 000 kN·m（1/4 搭接满夯，1~2 击）	地面下 1~4 m 范围内的吹填细砂和下卧软土层加固效果显著
2	珠海某工业园道路软基处理工程[11]	人工填土（1~7 m）、淤泥层（含水量 70%，10~30 m）、亚黏土层	80 cm 砂垫层后打设排水板，间距 1.0 m，梅花形布置	2.8	强夯分 5 遍进行，夯击能分别为 750、1 500、2 700、2 700、750（满夯）kN·m	强夯影响深度达到 12 m；强夯孔压增量瞬间产生，消散速率是没有强夯时的 3 倍以上；强夯对软基的固结沉降影响不大
3	德清智慧物流产业园项目[12]	上至下：素填黏土（0.30~5.90 m）、粉质黏土（0.60~4.20 m）、淤泥质粉质黏土（0.80~12.0 m）	真空井点降水强夯，间距均为 4 m，深度为 4~12 m	3.0	2 遍点夯的夯击能 3 000 kN·m，夯点间距均为 4 m；满夯的夯击能为 1 500 kN·m	试验处理后地基特征值均大于 80 kPa，沉降变形也较小
4	广州南沙泰山石化仓储区[13]	大部分面积原为鱼塘，淤泥土层厚度为 1.60~21.80 m，平均厚度超过 11.5 m；最高含水量为 122%	插板间距按 1.4 m 呈正方形布置，平均插设深度 15.7 m	2.1~2.5	4 遍点夯，夯击能分别 600~1 000 kN·m、800~1 200 kN·m、1 200~2 000 kN·m（第 3、4 遍）；普夯能量 900 kN·m	工后道路区和油罐区地基承载力特征值分别大于 180 和 120 kPa
5	广州港南沙港区粮食及通用码头工程软基处理	自上而下为人工填土、饱和淤泥质软土（6 m）、混砂层（2 m）、淤泥质黏土（5 m），夹砂层（2 m），地下水离地表 0.5 m	井点降水间距均为 30.0 m。泥浆搅拌墙沿加固区边界	3.0	深井降水联合强夯法，点夯 4 遍，每点夯 4~6 击，夯击能分别为 1 000、1 500、2 000 kN·m（第 3、4 遍）；满夯能量为 500~800 kN·m	强夯加固深度宜按 6 m 考虑。加固后检测比贯入阻力提高 200~300 kPa，地基承载力特征值达 130 kPa

续表1

案例序号	工程名称	地质条件	静力排水设置	覆土层厚/m	强夯措施	加固效果
6	深圳宝安新中心区某城市干道路基处理	滨海鱼塘,淤泥顶面高程 0.5~1.2 m,厚度 4.0~8.0 m,平均含水量 75%,其下冲洪积黏土,含大量中砂	铺设砂垫层 1.0 m,设集水井、盲沟后,插板,主车道插板间距均 1.1 m	4.0	第一次填土约 2.5 m 厚,强夯 2 遍,1 500~1 800 kN·m;第二次填土约 1.5 m 厚,强夯 2 遍,夯击能 1 500~1 800 kN·m;满夯,夯击能 1 000 kN·m	动力排水固结法沉降总量达 515~933 mm,处理后淤泥层土的普遍有改善,承载力特征值 f_0 提高 42.5%~195.3%
7	厦门集美大桥高崎侧接线一、二期工程	素填土(1.80~7.00 m,含约 10%的中粗砂)、冲填砂土(厚 0.70~12.90 m),淤泥(厚 0.40~8.80 m)	插设塑料排水板,间距为 1.1 m,等边三角形布置	4.0	点夯 3 遍,夯击能 840 kN·m,第 4 遍为低能满夯	沉降和孔隙水压力均趋于稳定,通过验收
8	洋山深水港的重要配套工程[14]	表层填土厚度为 1.4~2.7 m;浅部分布砂质粉土层,层厚为 2~14 m;其下有厚约 10 m 的软黏土	真空井点降水,外围封管埋深 7 m,间距 1.6 m	2.5	降水与夯击相间进行,第 1 遍夯击 2 次:夯击能 800 kN·m(1 击)、1 000 kN·m(2 击);第 2 遍夯击 2 次:夯击能 1 400 kN·m(2 击)、1 600 kN·m(4 击)	0~4 m 范围内土体加固效果十分明显,而 6~8 m 范围影响不大
9	厦门港海沧港区 14#~19#泊位围埝后方软基处理工程	吹填浮泥-淤泥厚 0~11.3 m,属于超软弱土,含水量达 70%以上,下卧原状淤泥层,含砂量达 5%~15%	真空预压,软土层上铺设有水平排水垫层,软土层已插设塑料排水短板	3.0	浅表层快速加固后堆土强夯。2 遍点夯加 1 遍满夯,强夯能 1 000~1 500 kN·m	强夯引起的超孔隙水压力增加 46.5 kPa,影响深度最高可达 13 m,局部软弱夹层的比贯入阻力由原来的 312 kPa 增强至 412 kPa 以上
10	珠海长隆旅游度假区地基处理工程[15]	主要为淤泥、淤泥质土层,层厚 4.20~16.00 m,平均 8.00 m	真空预压恒载约 40 d,固结度达到 75%的条件下停泵	3.0	2 遍点夯和 1 遍普夯,点夯能量为 2 000 kN·m,普夯 2 500 kN·m	工期比常规真空预压可缩短 1/3,真空预压加固 40 d 后,强夯加固期间消除沉降量平均为 23~25 cm,经加固后的地基的工后沉降小于 15 cm,承载力达到 120 kPa
11	南玻绿色能源产业园工程玻璃二期厂房地基处理工程	表层有淤泥、淤泥质粉质黏土层,层厚 0.6~13.8 m,平均 4.99 m。流塑为主,局部为软塑状	真空预压降水 40 d 后强夯	2.5	真空预压结束后,清膜后强夯,2 遍点夯,夯击能 1 500~2 500 kN·m,2~6 击。普夯能量 1 000 kN·m	仅需 55 d 达到设计要求(承载力 120 kPa),效果较轻型井点降水联合强夯有提高,较真空预压成本显著降低
12	虎门港沙田港区 5 号、6 号泊位工程	自上而下分别为耕植土、淤泥质土(混、间夹砂)-淤泥、粉细砂,中粗砂、砾砂	真空电渗井点降水	2.5	2 遍点夯 1 500、1 800 kN·m,满夯能量为 1 500 kN·m	检测最大承载力超过 125 kN

3　覆盖土层厚度模型理论分析

3.1　上硬下软双层地基冲击模型

上硬下软双层地基冲击模型见图 2。依据动量守恒与弹塑性接触理论，计算夯锤与地基接触面的最大动应力；再将覆盖土层(如硬壳层)视为具有衰减与扩散作用的弹塑性介质，应用应力波传播理论或锥体扩散模型，求解冲击应力经覆盖土层衰减与重分布后，传递至下卧软土顶面的有效动应力。

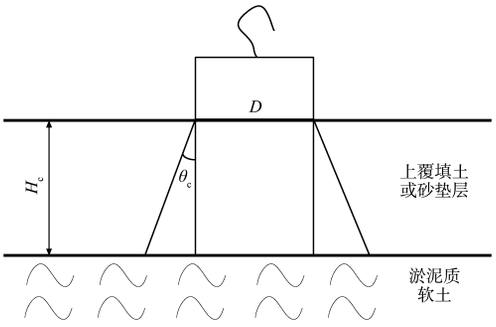

图 2　上硬下软双层地基冲击模型
Fig. 2　Impact model for stiff-over-soft double-layered foundation

水运工程

设夯锤质量 M_h、落高 H、锤底直径 D、锤底面积 $A_h=\pi D^2/4$。冲击速度 $v_0=\sqrt{2gH}$。基于动量守恒，在夯锤接触覆盖土层顶面时有：

$$\int_0^{t_c} F(t)\,\mathrm{d}t = M_h v_0 \tag{1}$$

式中：$F(t)$为冲击力时程；t 为时间；t_c 为冲击接触时间。假设冲击力时程为半正弦脉冲，则 $F(t)=F_{max}\sin(\pi t/t_c)$，积分可得：

$$F_{max} = \frac{\pi}{2}\cdot\frac{M_h v_0}{t_c} \tag{2}$$

式中：F_{max} 为夯锤与地基覆盖土层接触瞬间产生的最大冲击力。

接触面最大应力 σ_0 为：

$$\sigma_0 = \frac{F_{max}}{A_h} = \frac{\pi}{2}\cdot\frac{M_h v_0}{A_h t_c} \tag{3}$$

t_c 由夯锤与覆盖土层系统的动力刚度决定。视覆盖土层为弹性地基，对于刚性夯锤冲击弹性半空间有：

$$t_c = \pi\sqrt{\frac{M_h}{K_c}} \tag{4}$$

式中：K_c 为覆盖土层的等效动刚度。

对于圆形基础(夯锤)在弹性层(覆盖土层)上的动刚度为：

$$K_c = \frac{2G_c D}{1-\nu_c}\cdot\xi \tag{5}$$

式中：G_c 为覆盖土层的动剪切模量，可以根据弹性模量 E_c 和泊松比 ν_c 求出，或者剪切波速求得；ξ 为刚度修正系数，与覆盖土层厚度 H_c 和夯锤直径 D 的比值有关，当 H_c/D 足够大时 $\xi=1$，当有限厚度时 $\xi=1-\mathrm{e}^{-1.5H_c/D}$，$H_c/D$ 为 1.2~1.5 较优。

将式(5)代入式(4)得：

$$t_c = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{M_h(1-\nu_c)}{2G_c D\xi}} \tag{6}$$

将式(6)代入式(3)可得：

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{8}{\pi^3}\cdot\frac{M_h v_0 G_c \xi}{D(1-\nu_c)}} \tag{7}$$

由式(7)可以看出：覆盖土层越硬(G_c 越大)、锤质量越大、落速越高，接触应力越大；锤底面积越大(D 越大)，应力越分散。

动荷载冲击应力波从覆盖土层顶面传播到底部(软土顶面)，会发生衰减。衰减机制包括[16]：1)几何扩散；2)材料阻尼耗散；3)层间阻抗失配反射。

软土顶面最大动应力 $\sigma_{d,max}$ 为：

$$\sigma_{d,max} = \sigma_0\eta_g\eta_d\eta_t \tag{8}$$

式中：η_g 为几何扩散衰减系数；η_d 为阻尼衰减系数；η_t 为透射系数。

定义扩散角为 θ_c，应力从锤底面积 A_h 扩散到覆盖土层底面积 A_b，相关公式为：

$$A_b = A_h + \pi(H_c\tan\theta_c)^2 + \pi D H_c\tan\theta_c \tag{9}$$

$$\eta_g = \frac{A_h}{A_b} = \frac{1}{(1+2H_c\tan\theta_c/D)^2} \tag{10}$$

$$\eta_d = \exp(-\beta H_c) \tag{11}$$

$$\beta = \pi f\lambda_c/v_{sc} \tag{12}$$

式中：f 为主频，$f=1/(2t_c)$；λ_c 为材料的阻尼比，对于压实良好的级配砂石，阻尼比较小，取 $\lambda_c=0.02\sim0.03$；v_{sc} 为覆盖土层得剪切波速，取 200~300 m/s。

应力波从上部覆盖土层传入到软土时有：

$$\eta_t = \frac{2\rho_s v_{ss}}{\rho_s v_{ss}+\rho_c v_{sc}} \tag{13}$$

式中：v_{ss} 为软土层的剪切波速；v_{sc} 为覆盖土层的剪切波速，$v_{sc}=\sqrt{G_c/\rho_c}$，其中 ρ_c 为覆盖土层密度。因为 v_{ss} 远小于 v_{sc}，所以 η_t 远小于 1。

将式(10)~(13)代入式(8)，可求出 $\sigma_{d,max}$。

为了求上部覆盖土层的最小厚度，需要满足：

$$\sigma_{d,max} \leqslant Rf_{ak} \tag{14}$$

式中：R 为最大容许应力比值；f_{ak} 为承载力特征值。根据文献[5]可知，配套良好的排水系统是实现高 R 值的前提条件，良好排水条件下 R 取值在 4~6，表明软土顶面允许承受的冲击动应力峰值可达其静承载力特征值 f_{ak} 的 4~5 倍，应力扩散角可以大于 45°，大于 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》[17]的 23°~30°。

取 $\theta_c=45°$，则 $\eta_g=1/(1+2H_c/D)$，则可得出：

水运工程

$$\sqrt{\frac{8}{\pi^3}\cdot\frac{M_h v_0 G_c \xi}{D(1-\nu_c)}}\cdot\frac{1}{(1+2H_c/D)^2}\cdot\frac{2\rho_s v_{ss}}{\rho_s v_{ss}+\rho_c v_{sc}}\leqslant Rf_{ak} \tag{15}$$

令 $C_0=\sqrt{\frac{8}{\pi^3}\cdot\frac{M_h v_0 G_c \xi}{D(1-\nu_c)}}\cdot\frac{2\rho_s V_{ss}}{\rho_s V_{ss}+\rho_c V_{sc}}$，则有：

$$H_c\geqslant\frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{C_0}{Rf_{ak}}}-1\right) \tag{16}$$

式(16)表明：覆土层合理厚度与夯击能级的二次方根($\sqrt{M_h gH}$)呈正相关关系，夯击能量越大，所需覆盖层厚度越大，以实现有效的能量传递；夯击动量或覆盖土层刚度越大，所需 H_c 越大；锤径 D 越大，所需 H_c 成比例增加，同时扩散效应也增强。覆土层合理厚度与下卧软土的不排水抗剪强度呈负相关，软土强度越低，需要更厚的覆盖层保护下卧土层，所需 H_c 越大，允许的动应力越高，所需 H_c 越小。

3.2　参数取值建议

当上覆土层条件较好时，$\theta_c=45°$，R 可取 5；首先可根据式(16)计算 $H_{c,min}$；其次根据夯击能适配系数 K_E 进行校核调整夯击能或者锤径，$K_E=M_h gH/(f_{ak}A_h)$，一般取值在 0.8～1.2；最后在 $H_{c,min}$ 的基础上增加 0.2～0.3 m 安全余量。

理论上确定最小覆盖土层厚度后，再通过现场试夯监测 $\sigma_{d,max}$，确保实际 R 值在设计范围内，并根据监测数据微调后续区段施工参数。

在保证 R 取 4～6 后，为了防止软土瞬时剪切破坏，$\sigma_{d,max}\leqslant 2S_u$($S_u$ 为软土不排水抗剪强度)；为了保障覆盖土层动力稳定性，$\sigma_0\leqslant 0.5q_{u,c}$($q_{u,c}$ 为覆盖土层无侧限抗压强度)；$k_c H_c/q_w\geqslant 5$(q_w 为单宽排水量，k_c 为覆盖土层的水平向渗透系数)可确保从下卧软土中排出的水能及时通过覆盖土层排走。

需要注意的是：1)软土灵敏度 $S_t>4$ 时，R 值应降低至 3.0～3.5；2)地下水位高时，覆盖土层厚度增加 10%～15%；3)当存在夹砂层时，利用其排水作用，R 可取上限值；4)大面积施工时，分区采用不同厚度，边缘区加厚 20%。

需要说明的是，理论模型 $H_{c,min}$ 计算出的是一个“必要条件”下的最小值，在满足理论安全底线的基础上，实际工程还需要考虑真空膜的保护、经济性和安全冗余度等复杂因素，研究构建的理论体系，使得覆土厚度的确定从“纯经验定性”走向“理论指导下的定量-定性结合”。

3.3　案例分析

为了验证理论模型，并反演关键综合参数，以表 1 的案例 10 为例，分析 2 000 kN·m 点夯所需的最小覆盖土层厚度。夯锤质量 M_h 为 20.4 t，落距 $h=10$ m，夯锤直径 $D=2.2$ m，锤底面积为 3.8 m^2。处理后硬壳层的弹性模量 $E_d=40.5$ MPa，剪切波速 $v_s=150$ m/s，密度 $\rho=1\,800$ kg/m^3，根据波动理论 $G_c=\rho v_s^2=40.5$ MPa，泊松比 $\nu=0.45$，根据式(5)可得 $K_c=2.53\times10^8$ N/m；根据式(4)可得 $t_c=0.04$ s。

v_0 约为 14 m/s，根据式(3)或(7)可得 $\sigma_0=2.95$ MPa。取应力扩散角为 45°，取上部覆盖土层 $\rho_1=1\,800$ kg/m^3、$v_{s1}=140$ m/s，真空预压后软土层 $\rho_1=1\,700$ kg/m^3、$v_{s1}=110$ m/s，根据式(10)～(13)可以求出：$\eta_g=0.09$、$\eta_d=0.90$、$\eta_t=0.85$，将案例已知条件(D、M_h、v_0、f_{ak} 等)代入式(8)，得出 $\sigma_{d,max}=0.2$ MPa。根据文献[15]的软基承载力特征值 $f_{ak}=120$ kPa，若将 $H=3.0$ m 及 $\sigma_{d,max}=0.2$ MPa 代入式(16)，则可反演得到该案例条件下的综合系数 $C_0=6\,426$。

此时理论计算所得最小安全厚度 $H_{c,min}=2.5$ m，小于案例实际采用的 3.0 m。这并非表明理论有误，而恰恰揭示了 3.0 m 中包含了约 0.5 m 的工程安全裕度。该工程通过动静联合排水加固后，软基取得了较好的加固效果。

4　结论

1）本文提出了动静联合排水固结技术的最小上覆土层厚度 $H_{c,min}$ 的确定方法。工程统计分析表明，覆盖土层厚度的合理取值集中在 2.1～4.0 m。理论模型揭示了该范围背后的力学机理，即厚度随夯击能级增大而增加，以满足动应力衰减要求。

2）本文构建的“刚锤-弹塑性覆盖土层”冲击分析模型，定量表达了夯击动量、覆盖土层刚度、夯锤尺寸及下卧软土容许动应力比对最小必要厚度的设计框架。模型明确指出，在良好的排水条件下，R 值可取 4~6。

3）覆盖土层厚度确定是一个涵盖理论计算、安全修正、多维校核及现场验证的系统流程。除动应力比控制外，必须同步校核软土瞬时剪切破坏条件、覆盖土层自身动力稳定性、水平排水能力要求。设计厚度需要在理论最小值基础上增加 0.2~0.3 m 的安全余量。

参考文献：

[1] 邓安华, 孙振涛, 张磊. 静动力排水固结法处理吹填海相泥沙软基试验研究[J]. 水运工程, 2024(4): 162-167, 195.
DENG A H, SUN Z T, ZHANG L. Treatment of hydraulic fill marine soft soil ground using static and dynamic drainage consolidation method [J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 162-167, 195.

[2] 朱文波, 田朋飞. 复杂吹填土地基分区处理的现场试验研究[J]. 水运工程, 2023(8): 176-183.
ZHU W B, TIAN P F. Field experiment of zonal treatment scheme for complex dredger fill foundation [J]. Port & waterway engineering, 2023(8): 176-183.

[3] 丘建金, 张旷成, 刘强, 等. 软土路基动力排水固结法实践与理论分析[J]. 土工基础, 2004, 18(4): 1-3, 29.
QIU J J, ZHANG K C, LIU Q, et al. Theoretical analysis and practice of dynamic consolidation by drainage treatment on soft clay foundation [J]. Soil engineering and foundation, 2004, 18(4): 1-3, 29.

[4] 刘祖德, 杜斌, 司马军, 等. 静动联合排水固结法及其在填海工程中的应用[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 67-72.
LIU Z D, DU B, SIMA J, et al. Static dynamic combined consolidation method and its application in the sea backfilling engineering [J]. Journal of civil engineering and management, 2012, 29(3): 67-72.

[5] 李彰明. 软土地基静动力排水固结法理论与工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
LI Z M. Static-dynamic drainage consolidation theory and engineering technology for soft ground [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.

[6] 钱家欢, 赵维炳. 真空预压砂井地基固结分析的半解析方法[J]. 中国科学(A 辑), 1988(4): 439-448.
QIAN J H, ZHAO W B. Semi-analytical method for consolidation analysis of vacuum preloading sand drain foundation [J]. Science in China (series A), 1988(4): 439-448.

[7] 白冰, 刘祖德. 冲击荷载作用下饱和软粘土孔压增长与消散规律[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 33-38.
BAI B, LIU Z D. Pore pressure development and dissipation in saturated soft clay under impact loading [J]. Rock and soil mechanics, 1998, 19(2): 33-38.

[8] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 21-25.
ZHENG Y R, LU X, LI X Z, et al. Research on theory and technology of improving soft clay with DCM [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2000, 22(1): 21-25.

[9] 孟庆山, 汪稔, 陈震. 淤泥质软土在冲击荷载作用下孔压增长模式[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1017-1022.
MENG Q S, WANG R, CHEN Z. Pore water pressure mode of oozy soft clay under impact loading [J]. Rock and soil mechanics, 2004, 25(7): 1017-1022.

[10] 周健, 张健, 姚浩. 真空降水联合强夯法在软弱路基处理中的应用研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(S1): 198-200.
ZHOU J, ZHANG J, YAO H. Study on technique of low-energy dynamic consolidation method combined with dewatering used to treat soft roadbed [J]. Rock and soil Mechanics, 2005, 26(S1): 198-200.

[11] 彭冬梅, 张惠明, 赵有明. 强夯处理软基的工后沉降[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2003, 2(6): 569-573.
PENG D M, ZHANG H M, ZHAO Y M. Post-construction settlement of soft ground after dynamic compaction [J]. Journal of Guangzhou University (natural science edition), 2003, 2(6): 569-573.

（下转第 241 页）