

# 不同压实度下黏性土室内土工试验指标变化规律研究

武建青

河北四达工程检测有限公司 河北石家庄 050021

**摘要:** 本文旨在研究不同压实度下黏性土室内土工试验指标的变化规律。通过对黏性土基本性质和压实原理的阐述,从理论上分析了压实度与土工试验指标之间的关系,以及压实度对物理性质指标和力学性质指标的影响。结合相关试验数据,总结了不同压实度下黏性土物理性质指标和力学性质指标的变化规律,并进行了综合分析比较。研究结果对于深入了解黏性土的工程特性,为工程设计和施工提供了重要的理论依据。

**关键词:** 黏性土; 压实度; 室内土工试验指标; 变化规律

## 引言

黏性土是工程中常用的土体之一,在地基、堤坝填筑及其他工程领域中有着广泛的应用。它的工程特性受很多因素影响,压实度就是其中之一。压实度差异将引起黏性土物理性质与力学性质的改变,从而影响工程稳定性与安全性。因此,对黏性土在不同压实度条件下的室内土工测试指标规律进行研究具有一定的理论意义与现实意义。目前国内外有许多学者对黏性土的强度特征等作了研究并获得较丰富的研究成果。但目前对黏性土在不同压实度条件下室内土工试验各项指标的变化规律进行系统的研究比较缺乏。本文在全面分析总结有关文献的基础上,对黏性土室内土工试验指标在不同压实度条件下的变化规律进行了深入的探讨,旨在为工程实际提供更为精确的借鉴。

## 一、黏性土的基本性质与压实原理

### (一) 黏性土的物理性质指标

黏性土是一种细粒土,含有粘土粒多,透水性弱。它的颗粒较小,孔隙率小,有膨胀和收缩的特性,力学性质因含水率的不同而有明显的差异。黏性土塑性指数是由液限和塑限之差确定的,它对工程特性有直接的影响。黏性土根据塑性指数 $I_p$ ,可以分为粉质黏土( $10 < I_p \leq 17$ )和黏土( $I_p > 17$ ),或者根据其粘粒含量,可以进一步分为黏土(>30%)、亚黏土(10%~30%)和亚砂土(3%~10%)。

黏性土的物理性质指标有含水率、密度和颗粒分析。含水率对黏性土的工程性质至关重要,含水率过高会在黏性土中产生弹簧土,含水率太低会增加颗粒之间的摩擦力。密度是黏性土紧密程度的体现,它与压实度关系

密切。颗粒分析可了解黏性土不同粒径颗粒成分,对于评价工程性质至关重要。

### (二) 压实原理

土壤压实度受压实方法、压实遍数和土壤含水率等因素影响较大。压实旨在通过外力作用使黏性土颗粒重新排列组合以降低孔隙率并增加土体密度与强度。压实时黏性土含水率起主要作用。黏性土具有最优含水率,且含水率在最优含水率附近压实效果最好。

对黏性土进行压实时,不同压实设备及方法所适用的条件各不相同。高塑性黏土需用羊足碾将土块首先碾碎,砂性土宜用振动频率为30~40Hz的压路机碾压。黏性土需增加静压遍数(2~3遍)后再振动碾压,非黏性土可直接采用振动碾压。环境参数如温度、湿度也会对压实参数产生影响,温度影响冻融循环,低温( $< 30^\circ\text{C}$ )加速水分蒸发,需缩短铺压间隔时间至2小时内。

## 二、不同压实度下黏性土土工试验指标的理论分析

### (一) 压实度与土工试验指标的关系

压实度作为土体压实好坏的无量纲指标之一,它是施工工艺和土体工程性质之间的一座桥梁。理论上压实度和土工试验指标有密切的函数关系。首先,压实度直接决定了土体的孔隙比( $e$ ),根据土力学三相图原理,干密度 $\rho_d = G_s \cdot \rho_w / (1 + e)$ (其中, $G_s$ 是土粒比重, $\rho_w$ 是水密度),因此压实度越高,孔隙比越小,土体越密实。这种密实度提高将直接导致一系列连锁反应,从物理性质上看,土体容重增大、孔隙率减小、渗透性变弱、毛细作用加强;从力学性质上看,颗粒之间有效接触应力增大,咬合摩擦作用加强,进而使抗剪强度与模量增大。但是,这一关系并不是一个单纯的线性关系。在压实度较低阶段(如 $K < 0.90$ ),土体结构疏松,颗粒间主

要以点接触为主，此时增加压实度能显著改善土体结构，指标变化剧烈；而在高压实度阶段（如 $K > 0.95$ ），土体已接近最密实状态，颗粒间接触面积大幅增加，进一步压实需要克服巨大的颗粒间斥力，这时各指标变化率将逐步降低，表现为“收益递减”规律。此外，压实度与指标的关系还受到击实能量的影响，相同的压实度在不同的击实功下（例如轻型击实和重型击实等），其内部结构和力学响应也存在差异。因此，分析压实度与指标的关系时，必须引入“结构强度”的概念，即压实度不仅改变了几何参数（密度、孔隙比），还改变了力学参数（结构屈服应力）。

### （二）压实度对物理性质指标的影响

压实度是黏性土物理性质指标中最直观、最明显的指标。首先是密度与含水率的关系，在击实曲线上，随着压实度的提升（向最大干密度逼近），土体的含水率通常会向最优含水率收敛。在压实度小于最优的情况下，土体趋于“欠压实”，其内有大量连通孔隙存在，气易进入，造成土体非饱和且饱和度偏低；随着压实度增加，气体被挤出，孔隙逐渐被水填充（假定含水率没有变化，甚至有小幅度上升），饱和度 $S_r$ 显著提高。特别是当压实度接近饱和线（如95%以上）时，土体趋于饱和，此时任何微小的体积变化都会引起孔隙水压力的剧烈波动。二是压实度对液塑限不可忽略。结果表明：高压实度对黏土矿物颗粒吸水膨胀能力有一定制约作用，使击实后液限与原状土相比有一定下降，其原因是颗粒密实压实时吸水空间变小，限制了结合水膜自由膨胀。从渗透性角度来看，压实度对渗透系数起着关键的控制作用。根据Kozeny-Carman公式，渗透系数 $k$ 与孔隙比 $e$ 的平方（或更高次方）成正比。随压实度的增大，孔隙比降低，并将大孔隙破碎成微孔隙，孔隙连通性恶化，曲折度增大，致使渗透系数成倍降低。例如，当压实度从90%增加到95%时，其渗透系数可能会减少1-2个数量级，这对于路基的防水和排水设计是至关重要的。另外，压实时颗粒破碎使土体颗粒级配发生了变化，细颗粒在高压实度作用下含量相对增多，渗流通道进一步被封堵，透水性下降。

### （三）压实度对力学性质指标的影响

压实度所引起的力学性质深刻转化来源于土体内部结构骨架重构和颗粒间作用机制质变，抗剪强度参数响应并不是同步等量变化，黏聚力 $c$ 是结构性指标的灵敏体现，它依靠颗粒间距减小所触发的分子引力剧增和击实产生的假胶结结构而表现出高达内摩擦角 $\phi$ 指数增

长，这一增加在低压实区特别强烈，内摩擦角 $\phi$ 则受颗粒表面粗糙度物理边界限制，其增加幅度只保持在窄幅范围内，即使在极高压实区也会由于颗粒破碎发生轻微劣化，从而揭示出摩擦分量上升的“天花板效应”。压缩性指标的变化具有更深层次的工程意义，压缩模量 $E_s$ 的跃升不仅是孔隙比减小的几何效应，更是土体结构屈服应力 $p_c$ 显著增加的标志，使荷载初期土体塑性变形得到有效抑制而转向显著弹性特征，回弹模量 $M_r$ 和压实度极高线性相关性又准确定量了动荷载作用下弹性变形响应规律。

值得注意的是，随着压实度的增大，应力-应变曲线的形态从应变软化型变为应变硬化型甚至脆性破坏，在宏观上呈现出破坏过程中轴向应变剧烈下降的特征，从微观角度看，颗粒的有序排列导致了咬合锁固效应的增强，这种结构的增强虽然提高了峰值的强度，但也带来了明显的方向性差异，使得高压实区垂直向和水平向力学参数解耦明显，如果设计时忽略这种压实功方向性所引入的力学非均质性，很容易低估复杂应力路径失稳的风险，只有接近最优含水率进行压实才能避免偏湿状态高密度土体由于基质吸力衰减造成有效应力强度缺失的潜在风险。

## 三、不同压实度下黏性土土工试验指标变化规律总结

### （一）物理性质指标变化规律总结

综合室内试验资料分析可知，黏性土物理性质指标在不同压实度条件下表现出明显的阶段性规律。从密度指标上看，干密度随着压实度增大而近乎线性地增大，而在最大干密度附近，其增大斜率稍有变缓，呈现显著的“压实极限”作用。其原因是孔隙比降低至一定程度时，土颗粒之间排斥力剧增，使进一步压实极为困难。孔隙比的波动表现出反S型的曲线特性，当压实度低于90%的时候，孔隙比会迅速下降，而大孔隙则会被迅速填补；在90%-96%的压实度范围内，孔隙比的下降速度逐渐趋于稳定；当压实度达到或超过96%时，土体的孔隙比大致稳定在一个非常低的常数范围内（通常 $e < 0.6$ ），此时的土体主要是由结合水所占据的微小孔隙。含水率变化规律和压实能量输入紧密相关，击实时为实现较高压实度通常需调节含水率使颗粒润滑，所以相同击实功作用下不同压实度所对应含水率将围绕最优含水率上下浮动，但是从整体上看高压实度试样饱和时含水率增量很小，表明其持水能力由于孔隙体积减少而下降。从界限物理性质来看，液限与塑限随着压实度增大呈现“压

实硬化”，即液限下降，塑限上升，造成塑性指数小幅下降。这一规律表明高压实作用制约黏土矿物亲水活性，使土体受含水率变化敏感程度减弱，利于路基水稳定性改善。饱和度的波动表现出显著的非线性特性，在压实度相对较低的情况下，即便水分含量较高，由于存在大量的封闭气泡，其饱和度依然不是很高；随着土壤压实度的增加，气体开始排出，导致饱和度迅速上升到90%以上，接近饱和状态。这个转折点通常出现在压实度在92%~94%之间，这是判断土体是否进入“阻隔水”状态的关键阈值。

### (二) 力学性质指标变化规律总结

力学性质指标随着压实度演化而变化，深刻地揭示黏性土在结构性重塑过程中的非线性本质和抗剪强度参数响应机理显著不同，黏聚力 $c$ 依靠颗粒间距减小所触发的分子引力剧增和假胶结结构形成来表现出高达内摩擦角 $\phi$ 指数增长趋势，且后者受颗粒表面粗糙度物理边界限制，增幅只保持在2%~5%窄幅范围内，即使在极高压实区由于颗粒破碎也会发生轻微劣化，这一现象确凿无疑地证实了黏性土强增过程中内摩擦分量具有“天花板效应”。压缩性指标的变化具有更高的工程应用价值，压缩模量 $E_s$ 的显著提升不仅是孔隙比降低的几何效应，更是土体结构屈服应力 $p_c$ 显著增加的明确标志，使荷载初期土体的塑性变形得到有效地抑制而转向显著弹性特征；回弹模量 $M_r$ 和压实度最大线性相关系数大于0.95，进而为路基在动荷载作用下弹性变形估算提供准确本构依据。有必要深究一下，随着压实度的增大，应力—应变曲线的形态从应变软化型变为应变硬化型甚至脆性破坏，在宏观上呈现出破坏过程中轴向应变剧烈下降的特征，从微观角度看，颗粒的有序排列导致了咬合锁固效应的增强，这种结构的增强虽然提高了峰值的强度，但也带来了明显的方向性差异，使得高压实区垂直向和水平向力学参数存在显著解耦现象，在设计中如果忽略这种差别，就会造成安全储备失真。

### (三) 综合分析比较

压实度改造黏性土实质是孔隙比缩减触发物理性质的协同演化，孔隙比既是密度变化的几何表征也是控制抗剪强度和压缩模量变化的核心变量，土体颗粒之间有效接触面积随着孔隙比的降低急剧增大，这直接使黏聚力呈指数增长趋势，但由于颗粒表面粗糙度的限制，内摩擦角增长幅度较为平缓。高压实度显著增强垂

直向承载能力，但也必然诱导出明显各向异性，击实功定向作用使水平向模量常小于垂直向模量，在边坡稳定分析中，如果忽略这种差别，就会造成安全储备失真。压实度和含水率之间的耦合效应，揭示出仅仅追求高密度指标是盲目的，只有接近最优含水率进行压实，土体才可能同时具有高强度和优异延性，偏湿状态的“高密度”试件，由于基质吸力下降，常暗含有效应力不足等潜在风险。从整体角度分析，93%至95%的压实度范围内可以用最少的能源消耗获得最大的工程性能增长，而过度的压实会导致经济效益的下降，更容易由于颗粒破碎诱发结构屈服而重塑微观结构，宏观上体现在土体由透气性较好的架空结构向隔水但易于应力集中的致密骨架过渡。

### 结论

压实度显著重塑了黏性土的性质，具体表现为干密度的线性增加和孔隙比的降低，并直接诱发渗透系数的指数级衰减和抗剪强度的显著跃升。尽管黏聚力的增长速度大大超过了内摩擦角，但当压实度超过95%时，强度的增长开始放缓，颗粒的破碎和各向异性的风险变得更为明显。高压实度虽然强化土体结构强度但加剧力学性质方向差异，在设计时需要考虑垂直和水平方向模量折减。在最优含水率左右压实才能使强度和延性达到最佳配合，而偏湿状态的“高密度”其实暗含着有效应力缺乏强度的潜在风险。在工程实施中，建议将经济压实的范围限制在93%~95%之间，因为过度压实不仅会导致能源消耗急剧增加，还可能触发结构不稳定，从微观角度看，这可能是从絮凝结构到紧密团聚结构的不可逆转变。

### 参考文献

- [1] 李青山, 贺云, 傅旭东. 巴东组压实黏性土湿化变形特性试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(3): 7.
- [2] 李忠, 刘勇文, 赵纪飞. 花岗岩风化残积土海崖崩解过程的室内试验研究[J]. 水力发电, 2018, 44(6): 4.
- [3] 陈超. 路基土压实度自动连续检测新技术研究[D]. 重庆交通大学, 2019.
- [4] 黄华南. 重塑湿陷性黄土桩基单桩桥梁基础承载特性模型试验研究[D]. 兰州交通大学, 2017.
- [5] 杨广庆, 隋传毅. 土工格栅与土体界面摩擦特性试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报, 2010.