

砂土地基液化判别及防治措施研究

刘宝申

中国新兴建筑工程有限责任公司 北京 100009

【摘要】：砂土地基液化是地震岩土工程领域的重要课题，对工程建设的安全与可持续性都是严峻挑战。本文系统阐述了砂土液化的生成机理、危害特征、判别方法及防治措施，通过整合当前最新研究成果与工程实践经验，揭示了砂土物理力学性质对液化的控制机制，分析了多因素相互作用下的液化行为。研究引入了基于统计与回归分析的砂土刚度评价模型，提出了考虑地震历史与渗流耦合作用的液化判别方法，并构建了分级防治技术体系。结果表明液化判别需结合区域地质条件与动荷载特性，而防治策略应注重多种技术的集成创新。

【关键词】：砂土液化；机理分析；判别方法；防治措施；地基处理

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.031

前言

地震诱发的砂土地基液化一直是岩土与地震工程领域减灾防灾的主要挑战，历史震害如1976年中国唐山地震与2011年基督城地震，均出现了大规模液化现象，造成了巨大的经济损失与人员伤亡，故深入探究砂土液化机理发展防控技术有重要的现实意义。随着岩土工程理论与试验技术发展，砂土液化研究已逐渐进入了层次，当代研究主要关注土体结构异性及渗流场变化等复杂因素的影响。近年有研究通过大量试验数据的统计回归，建立了更精细的刚度评价模型，同时震后渗流与地震历史对再液化抗力的影响也被揭示^[1]，这都推动了判别方法的进步。本文旨在系统梳理砂土液化的物理力学性质、危害特征、判别方法与防治措施，以期构建一个集理论、方法于一体的综合防控体系，为工程实践提供有价值的参考。

1 砂土的物理力学性质概述

1.1 砂土的基本组成与结构特征

砂土是一种松散颗粒集合体，其性质受多方面因素的影响，砂土颗粒通常包括石英、长石等硬质矿物，其形态与表面纹理会直接影响粒间摩擦与咬合作用。颗粒级配是砂土分类的重要指标，通过不均匀系数Cu和曲率系数Cc描述其分布特征，级配良好的砂土由于细小颗粒填充孔隙，往往具有更高的密实度与抗液化能力，而松散饱和的粉细砂土因其结构不稳定性，更易在振动作用下发生液化。

1.2 砂土的关键力学参数

砂土的力学行为有强烈的非线性与应力相关性，其主要力学参数包括刚度、强度、压缩性与渗透性。有研究统计分析表明，砂土刚度显著依赖密度与应力状态，基于962个三轴试验数据建立的经验方程，可有效预测不同应力水平下的刚度变化^[2]，为液化潜在性评估提供依据。此外砂土强度特性与其密度和排水条件密切相关，粗颗粒含量较高的砂土强度符合正态分布，而低粗颗粒含量土体则更接近布尔分布^[3]。

渗透性是影响液化过程中孔隙水排出能力的关键因素，直

接控制着超静孔隙水压力的消散速度。粗砂与砾砂的高渗透性使其在动荷载作用下不易积累孔隙水压力，而粉细砂则因排水不畅而更具液化敏感性。沙土物理力学性质对液化的影响见表1。

表1 砂土物理力学性质对液化潜在性的影响

性质类别	具体参数	对液化潜在性的影响机制	敏感条件
物理性质	相对密度	密度越低，结构越不稳定，液化敏感性越高	Dr<50%时显著
	颗粒级配	均匀细砂较级配良好砂更易液化	Cu<5 的细砂
	渗透系数	渗透性越低，孔隙水压力消散越慢	k<10 ⁻³ cm/s
力学性质	剪切刚度	刚度越低，动变形能力越大，越易液化	小应变范围内
	压缩性	高压缩性土体更易产生体积收缩	循环荷载下
	静强度	强度越低，初始液化所需能量越小	不排水条件

1.3 状态相关性与硬化行为

砂土的力学响应会随其物理状态与应力路径显著变化，在循环荷载作用下，砂土表现出复杂的硬化、软化特性，致密砂土因剪胀倾向可能出现循环硬化，松散砂土则因剪缩作用而呈现循环软化，直至达到液化应力状态。这种状态相关性在传统本构关系中都没有充分考虑密度影响，而最新提出的半经验关系则通过引入密度变化因子，为描述大变形与复杂加载路径下的砂土行为提供了更精确的模型。

2 沙土液化的机理及条件

2.1 液化的物理过程与力学本质

砂土液化是饱和砂土在动荷载作用下由固态转向液态的过程，在循环剪切作用下，砂土颗粒发生重排并趋于密实，如不排水条件占主导，那收缩趋势将会一直累计超静孔隙水压力，当孔隙水压力等于上覆有效应力时，粒间接触应力理论上降为零，土体丧失剪切刚度与强度，发生初始液化。

有研究发现，侧限条件下饱和砂土达到初始液化后，孔隙

水压力与围压将随轴向动荷载同步等值变化，广义剪应力与有效平均主应力将维持在液化应力水平，这一现象是“持续液化”，与常规三轴试验中观察到的“瞬时液化”形成鲜明对比^[4]。在这种持续液化状态下，密度、固结比、粒径等影响剪胀性的因素对液化持续性的影响会减弱，侧限条件会创造一种特殊的液化边界状态。

2.2 液化发生的多因素条件

砂土液化的发生要同时满足多个条件，要有易液化的土类，饱和松散粉细砂结构不稳定是最易液化的土类，初始应力状态决定了土体的初始稳定程度，随着围压增大或静剪应力比降低，土体抗液化能力通常会增强。而动荷载条件是外部触发因素，其强度、频率与持续时间直接控制着能量输入与孔隙水压力发展，故足够强度的循环荷载是产生液化的必要条件。

排水条件在液化过程一方面控制着孔隙水压力的积累与消散平衡，另一方面又受到渗流场的调节，震后再固结阶段向上渗流对浅表层砂土抗液化能力有削弱作用，所以渗流与地震历史相结合会显著降低土体再液化抗力，这也解释了为何某些地区在经历中小强度余震时仍会发生严重液化。

3 沙土液化的危害

3.1 对建筑物与基础设施的直接影响

砂土液化对工程系统最为直观的危害就是建筑物地基损毁，地基土体液化时其承载能力急降，会导致上部结构产生不均匀沉降、倾斜甚至倒塌。在1964年日本新潟地震中，多栋公寓楼因地基液化整体倾斜而无法继续使用，成为液化灾害的经典案例，对于桥梁、港口、闸坝等大型结构，液化可能引起桥墩移位、码头滑移或挡水结构失稳，危害巨大。

此外埋地管道也会因地基土体液化而浮起或断裂，导致供水、燃气管线系统中断，所以管道穿过建筑处应预留足够尺寸或直接采用柔性接头来应对液化引起的位移，而地铁隧道、地下车站等深部结构则可能因受到土体流动产生的巨大侧向压力，直接造成衬砌开裂或内部损坏。

3.2 次生灾害与间接损失

除了直接结构破坏，砂土液化还会引发一系列次生灾害，进一步放大灾情。液化引起的侧向扩展与流滑现象会对河岸、海岸工程构成严重威胁，如1989年美国洛马普列塔地震中，旧金山滨海区因液化侧移导致大量码头设施损坏，这类土体流动能够牵引桩基、拉裂基础，并对桥梁墩台形成巨大的推覆作用。另外城市还会因为交通中断、生产停滞而产生广泛的间接经济损失，更重要的是，液化场地的不均匀沉降可能导致区域地质改变，影响土地长期使用价值，对于沿海经济发达地区，这种资产贬值甚至远超其修复费用，成为区域发展的持久负担。

4 沙土液化的判别方法

4.1 初步判别方法

液化判别通常遵循循序渐进的原则，初步判别要排除明确不存在液化风险的场地，以降低工程评价成本。据我国《建筑抗震设计规范》，地质年代为第四纪晚更新世及其以前的砂层，在7、8度地震烈度下可判为不液化。同样当粉土中的粘粒含量超过临界值时，由于粘土颗粒的胶结作用增强，土体抗液化能力提高，也可判为不液化。

4.2 进一步判定方法

进一步分析时需采用更精确的判定方法，其中标准贯入试验法（SPT）是国际公认的成熟方法被广泛采用。此方法通过比较实测标准贯入锤击数与临界锤击数的相对大小判定液化可能性，临界值由砂层埋深、地震烈度、粘粒含量等多因素共同决定。基于SPT测试结果，进一步计算液化指数，量化地基的液化等级，为抗液化措施选择提供依据。

地震剪应力对比法。可通过计算地震引起的等效平均剪应力与土体液化抗剪强度的比值来判定液化可能性。这一方法提出后经多次改进，现已形成一套完整的分析体系，尤其适用于重要工程的精细化判别。

综合指标法。可尝试通过相对密度、平均粒径d50、孔隙比、不均匀系数等多项指标的综合分析来评估液化风险，这样考虑了液化的多因素情况，在特定场地条件下可能获得更为可靠的判别结果，要注意的是不同区域土体性质存在差异，综合指标的区域性校正是提高判别精度的关键。

4.3 现代判别方法的发展

剪切波速法可通过测量土体小应变刚度来间接评估密实度，来规避取样扰动问题，适用于难以取样的深部砂层。此外考虑地震历史与渗流互相作用的液化判别新方法也展现出良好的应用前景，存在一定的水力梯度阈值，当实际水力梯度超过该阈值时，渗流作用会显著降低砂土抗液化能力，且削弱程度随渗流时间增长而增强。这一发现为反复地震作用下的液化潜在性评估提供了新的依据，推动了考虑时间与渗流场因素的动态判别方法发展。砂土液化判别方法见表2。

表2 砂土液化判别方法特点及适用条件

判别方法	基本原理	优点	局限性	适用条件
标准贯入试验法	综合指标法	经验成熟、应用广泛	离散性大、需深度修正	深度<20m的砂土、粉土
地震剪应力对比法	地震剪应力与抗液化强度对比	物理意义明确、可考虑地震特性	需动三轴试验、参数确定复杂	重要工程、特定地震动
剪切波速法	波速与土体密实度关系	不受取样扰动影响、测试快捷	间接性、需经验关联	深部砂层、难以取样土层

静力触探法	锥尖阻力、侧摩阻力与液化阻抗关系	连续记录、效率高	经验性、粗颗粒土适用性差	均匀土层、区域经验丰富区
综合指标法	多参数统计判别	全面考虑多种因素	权重确定主观、区域差异大	前期筛选、区域性研究

5 防治措施

5.1 地基处理技术

目前地基处理技术围绕密实、置换与加固三大方向展开，加密法通过提高砂土密实度增强其抗液化能力，其中包括振冲法、振动加密、挤密碎石桩与强夯等，通过外力迫使颗粒重新排列，减少孔隙比，从而降低振动下的体积收缩趋势，经工程实践表明，振冲碎石桩处理砂土液化地基时，能够有效减轻或消除液化影响^[5]。此外换填法也是一种直接可靠的处理方式，采用非液化土替换全部或部分液化土层，从根本上改变土体的液化特性，这种方法成本较高，但对于重要工程或液化层厚度不大的情况，往往能取得立竿见影的效果。

5.2 排水与围封策略

排水法通过加速孔隙水压力的消散来抑制液化发生，理论基础是动荷载作用下孔隙水压力增长与消散动态平衡，碎石排水桩是非常典型排水措施，既具有良好的透水性又具备一定刚度，在振动过程中不仅能提供排水通道，还能分担部分剪应力，从而有效延缓超静孔隙水压力的积累。

围封法通过设置地下连续墙、板桩等竖向屏障，限制液化土体的侧向流动，同时阻隔地下水运动，从而控制液化危害范围。这种方法特别适用于已建结构的液化加固，或作为液化敏感区的边界控制措施。与排水法相比，围封法更注重于液化后

果的控制而不是预防，体现了从抗灾到减灾的理念转变。

5.3 基础与上部结构处理

当全面消除液化不经济或不可行时，采取合理的基础与上部结构处理就是减轻液化危害的有效途径，深基础可将荷载传递至液化层以下的稳定土层，如桩基端部应伸入液化深度以下稳定土层中的长度，对碎石土、砾砂等尚不应小于0.5m，对其他非岩石土不宜小于1.5m，这样可避免结构物与液化土直接相互作用，但需注意桩基在液化土层中可能受到的负摩擦力的问题。

上部结构处理侧重于提高建筑整体性与适应变形能力，需要采用箱基、筏基或钢筋混凝土交叉条形基础增强基础刚度，加设基础圈梁提高整体性，并合理设置沉降缝以分隔不同结构单元。同时应减轻荷载、增强上部结构的整体刚度和均匀对称性，来有效降低结构对不均匀沉降的敏感性，为液化变形提供足够的冗余度。

6 结语

砂土地基液化研究是一个复杂的课题，本文系统梳理了其物理力学基础、生成机制与综合防治策略，揭示了多场联合作用下的液化行为规律，为工程风险评估与防控提供了理论框架。但该领域仍面临诸多挑战，液化启动与传播规律尚未完全明晰，现有室内外测试方法在模拟实际边界条件与排水路径时仍存在差距，尤其是地震与渗流耦合作用的试验方法值得进一步深入研究。未来的研究路径应更趋向于学科交叉，借助数字孪生、人工智能等新兴技术，构建智能化的液化判别与预警系统，或将成为关键突破口。

参考文献：

- [1] Xiaoli X ,Bin Y ,Longwei C , et al.Effects of coupled seepage and seismic histories on liquefaction resistance of shallow sand deposits[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2024,176.
- [2] Rafael S .三轴试验中砂土刚度的统计和回归分析及应用[J].岩土力学,2022,43(10):2873-2886.
- [3] 尹悦,吴凯鑫.砂土力学指标的统计分析研究[J].江西建材,2017,(24):16-17.
- [4] 许成顺,刘海强,杜修力,等.侧限条件下饱和砂土的液化机理研究[J].土木工程学报,2014,47(04):92-98.
- [5] 高艳.振冲法在水库坝基抗液化处理中的应用[J].河南水利与南水北调,2023,52(01):62-63.