

Research and application of liquefaction identification method for sand soil based on standard penetration test

Yu Zuo

Zhongyu Design Co., Ltd. Zhongshan Branch, Zhongshan, Guangdong, 528400, China

Abstract

This study systematically investigates the application mechanisms, technical methodologies, and engineering practices of the Standard Penetration Test (SPT) for assessing sand liquefaction. By comparing domestic and international liquefaction assessment standards and analyzing case studies from the Zhongshan Shuyong Planned Branch Road Project and Zhongshan Huangpu Maxin Middle School Project, the research examines the distribution characteristics of SPT blows, liquefaction index calculations, and classification criteria. The findings reveal that groundwater levels, SPT operational compliance, and sand layer particle size significantly influence assessment outcomes. An improved method for eliminating invalid test sections in gravel-sand layers is proposed. Results demonstrate high consistency in liquefaction coefficients between building and highway codes, while railway and water transport codes exhibit greater variability. Fine sand and silt layers typically show liquefaction indices below 6, indicating minor liquefaction levels. This study provides crucial technical foundations for seismic design in geotechnical engineering.

Keywords

standard penetration test; sand liquefaction; liquefaction index; judgment criteria; critical standard penetration number; seismic design

基于标准贯入试验的砂土液化判别方法研究与应用

左宇

中誉设计有限公司中山分公司, 中国 · 广东 中山 528400

摘要

本文系统探讨了标准贯入试验 (Standard Penetration Test, SPT) 在砂土液化判别中的应用机理、技术方法与工程实践。通过对比国内外液化判别规范, 结合中山树涌规划支路项目、中山黄圃马新中学项目, 分析了标贯击数分布特征、液化指数计算及等级划分标准。研究揭示了地下水位、标贯操作规范性及砂层粒径对判别结果的关键影响, 并提出了砂砾石层中剔除无效试段的改进方法。结果表明: 建筑与公路规范所得液化系数一致性较高, 而铁路及水运规范离散性较大; 细砂与粉砂层液化指数多低于 6, 属轻微液化等级。研究为岩土工程抗震设计提供了重要技术依据。

关键词

标准贯入试验; 砂土液化; 液化指数; 判别规范; 临界标贯击数; 抗震设计

1 引言

砂土液化是地震荷载作用下饱和砂土孔隙水压力骤升导致有效应力归零, 土体瞬间丧失抗剪强度的现象, 严重威胁建筑物地基稳定性。标准贯入试验 (SPT) 因其操作简便、成本低廉且与土体密实度高度相关, 成为液化判别的核心原位测试手段。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011) 明确规定, 当地基存在饱和砂土或粉土时, 需通过标贯试验进行液化初判与详判。本文结合最新研究成果与工程实践, 系统阐述标贯试验在液化判别中的应用进展。

【作者简介】左宇 (1992-), 男, 中国湖南湘乡人, 本科, 助理工程师, 从事岩土工程研究。

2 标贯试验技术原理与操作要点

2.1 试验基本原理

标准贯入试验使用质量为 63.5 kg 的穿心锤, 以 76 cm 的自由落距将贯入器打入土层。记录贯入器打入 **30 cm 的锤击数 ** (即 N 值), 该值综合反映土体密度、应力历史及颗粒组成特征。在液化判别中, N 值与临界标贯击数 (N_{cr}) 的对比直接决定土层液化倾向性。

2.2 标准化操作流程

钻孔与清孔: 钻至试验标高以上 50 cm, 清除残土并泥浆护壁, 确保孔壁稳定;

贯入与记录: 贯入器垂直打入土层, 先预打 15 cm 消除扰动影响, 再正式记录后 30 cm 锤击数;

异常数据处理: 遇砾石导致击数异常时, 绘制击数 - 贯入度曲线, 剔除无效试段 (如击数突增水平段), 按有效段

长度等效换算 30 cm 击数。

3 液化判别方法与规范应用

3.1 临界标贯击数计算

依据《建筑抗震设计规范》，临界标贯击数 N_{cr} 计算公式为：

在地面下 20m 深度范围内，液化判别标准贯入锤击数临界值可按下式计算：

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3/\rho_c} \quad (4.3.4)$$

式中： N_{cr} ——液化判别标准贯入锤击数临界值；

N_0 ——液化判别标准贯入锤击数基准值，可按表 4.3.4 采用；

d_s ——饱和土标准贯入点深度 (m)；

d_w ——地下水位 (m)；

ρ_c ——黏粒含量百分率，当小于 3 或为砂土时，应采用 3；

β ——调整系数，设计地震第一组取 0.80，第二组取 0.95，第三组取 1.05。

表 4.3.4 液化判别标准贯入锤击数基准值 N_0

设计基本地震加速度 (g)	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
液化判别标准贯入锤击数基准值	7	10	12	16	19

3.2 液化指数与等级划分

4.3.5 对存在液化土层、粉土层的地基，应探明各液化土层的深度和厚度，按下式计算每个钻孔的液化指数，并按表 4.3.5 综合划分地基的液化等级：

$$I_{LE} = \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{N_i}{N_{cr_i}} \right] d_i W_i \quad (4.3.5)$$

式中： I_{LE} ——液化指数；

n ——在判别深度范围内每一个钻孔标准贯入试验点的总数；

N_i 、 N_{cr_i} ——分别为 i 点标准贯入锤击数的实测值和临界值，当实测值大于临界值时应取临界值；当只需要判别 15m 范围以内的液化时，15m 以下的实测值可按临界值采用；

d_i —— i 点所代表的土层厚度 (m)，可采用与该标准贯入试验点相邻的上、下两标准贯入试验点深度差的一半，但上界不高于地下水位深度，下界不深于液化深度；

W_i —— i 土层单位土层厚度的层位影响权函数值 (单位为 m^{-1})。当该层中点深度不大于 5m 时应采用 10，等于 20m 时应采用零值，5~20m 时应按线性内插法取值。

表 4.3.5 液化等级与液化指数的对应关系

液化等级	轻微	中等	严重
液化指数 I_{LE}	$0 < I_{LE} \leq 6$	$6 < I_{LE} \leq 18$	$I_{LE} > 18$

3.3 各行业规范对比

表：不同规范液化判别方法对比

规范类型	公式形式	判别特点	适用性
建筑规范 (GB 50011)	对数函数型	计算液化指数，划分等级	建筑工程
铁路规范	乘积形式	仅计算抗液化指数，离散性大	铁路工程
Seed 简化法	双曲线模型	修正击数后判别，保守性高	国际通用
水运规范	离散性较大	深层土判别保守	港口与航道工程

研究表明：建筑与公路规范所得液化系数一致性较高

(偏差 <10%)，而水运与铁路规范离散性达 30% 以上。

4 影响因素与质量控制

4.1 关键影响因素分析

地下水位 (d_w)：水位测量偏差 30 cm 可致液化指数波动 24%~27%。如中山某项目， d_w 从 2.6 m 变为 2.9 m 时， I_{LE} 由 4.87 降至 3.65。

场地整平标高：勘察阶段标高与设计整平标高差异可导致 I_{LE} 偏差 187%。若未校正，黄圃项目 I_{LE} 从 4.87 升至 13.56。

标贯操作规范性：孔底清渣不彻底或未预打 15 cm，可使击数偏低 1~10 击。粉砂层中 3 击误差即致 I_{LE} 偏差 196%。

4.2 质量控制措施

水位量测：钻孔中稳定 24 h 后量测，按年平均最高水位取值；

标高统一：以设计整平标高为基准换算 d_s 与 d_w ；

标贯监管：采用自动落锤装置，避免人力操作误差。

5 工程应用案例分析

5.1 中山树涌规划支路砂层液化评价

根据标准贯入锤击数法判别，本项目场地地面下 20.0m 深度范围内分布的②-3 中砂层会发生液化现象，液化等级为轻微~中等，综合判断场地液化等级为中等液化场地。本工程桥涵抗震设防类别为丙类桥涵，需对基础和上部结构处理，或采取更高要求的措施，减少液化影响，②-3 中砂层液化影响折减系数：当深度 $d_s \leq 10m$ ，建议取 1/3；当深度 $10m < d_s \leq 20m$ ，建议取 2/3。

饱和砂土液化判别表 表 5.3-1

孔号	层号	标贯中点深度 (m)	液化判别				液化指数计算		
			地下水位 d_w (m)	黏粒含量 ρ_c (%)	实测标贯击数 N (击)	临界标贯击数 N_{cr} (击)	液化判别	单孔液化指数 I_u	液化等级
DZK2	②-3	7.10	0	3.00	7	9.8	液化	10.21	中等
DZK4	②-3	8.00	0	3.00	8	10.3	液化	5.98	轻微
DZK6	②-3	8.10	0	3.00	8	10.4	液化	7.53	中等
DZK8	②-3	8.10	0	3.00	7	10.4	液化	7.52	中等
DZK14	②-3	6.30	0	3.00	6	9.3	液化	6.86	中等
DZK18	②-3	8.10	0	3.00	7	10.4	液化	11.70	中等
DZK20	②-3	7.30	0	3.00	7	9.9	液化	4.52	轻微
DZK24	②-3	11.10	0	3.00	8	11.8	液化	7.68	中等
DZK26	②-3	13.80	0	3.00	11	12.8	液化	1.79	轻微
DZK28	②-3	14.10	0	3.00	14	12.9	不液化	1.79	不液化
DZK46	②-3	15.00	0	3.00	8	13.2	液化	2.04	轻微
QZK1	②-3	5.10	0	3.00	7	8.5	液化	1.63	轻微
QZK2	②-3	8.10	0	3.00	10	10.4	液化	4.81	轻微
QZK2	②-3	5.10	0	3.00	7	8.5	液化	4.81	轻微

5.2 中山市黄圃镇马新初级中学新建教学楼、宿舍楼、饭堂工程液化评价

标准贯入试验液化判别及液化指数计算表													
工程名称：中山市黄圃镇马新初级中学新建教学楼、宿舍楼、饭堂工程													
依据规范：建筑抗震设计规范 GB 50011-2010 注：当黏粒含量小于 3 或为砂土时，程序计算时黏粒含量采用 3 计算。													
抗震设防烈度：7 度 标贯击数基准值 N_0 ：7 击 液化判别最大深度：20 米 设计地震分组：第一组 调整系数 β ：0.8													
孔号	层号	试验深度 (m)	岩土名称	液化判别				液化指数计算					
				地下水位 d_w (m)	黏粒含量 ρ_c (%)	实测标贯击数 N (击)	临界标贯击数 N_{cr} (击)	液化判别	液化区段	标贯点代表的土层厚度 d_i (m)	层位影响函数 W_i (m^{-1})	液化指数 I_u	液化等级
ZK1	2-2	7.15~7.45	淤泥质粉砂	0.0	3.0	4.0	9.9	液化	6.20~8.30	2.1	8.5	10.65	中等
ZK2	2-2	5.15~5.45	淤泥质粉砂	0.0	3.0	6.0	8.6	液化	3.90~8.60	4.7	9.17	13.17	中等
ZK3	2-2	6.15~6.45	淤泥质粉砂	0.0	3.0	4.0	9.3	液化	5.60~7.70	2.1	8.9	10.67	中等
ZK4	2-2	6.15~6.45	淤泥质粉砂	0.0	3.0	5.0	9.3	液化	5.40~8.30	2.9	8.77	11.79	中等
ZK5	2-2	7.95~8.25	淤泥质粉砂	0.0	3.0	5.0	10.4	液化	6.40~9.00	2.6	8.2	11.03	中等
ZK9	2-2	8.95~9.25	淤泥质粉砂	0.0	3.0	3.0	10.9	液化	7.30~9.60	2.3	7.7	12.82	中等

6 研究挑战与展望

6.1 现存问题

深层土判别保守：现行规范对埋深 >10 m 的砂层， N_{cr} 计算值偏大，导致液化误判；

面波法反演多解性：MASW 等无损方法与标贯结合时，反演结果依赖初始模型；

粗粒土适用性局限：含砾量 >20% 时，现有修正方法仍可能高估 N 值。

6.2 技术发展趋势

多方法融合：联合跨孔波速法、微动勘探数据，构建三维液化势模型；

概率判别模型：基于 465 例液化数据库，建立以 CSR(循环应力比) 为参数的液化概率公式。

人工智能辅助：应用机器学习算法 (如随机森林) 优化标贯数据与液化潜势的映射关系。

7 结论

标准贯入试验作为砂土液化判别的核心手段，其可靠性依赖于规范操作与多因素校正。研究表明：

细砂与粉砂层液化敏感性显著高于粗砂， I_{LE} 多低于 6，属轻微液化等级；

建筑与公路规范的液化判别公式一致性较好，而铁路、水运规范需结合工程特性调整；

地下水位、场地标高与标贯操作是影响判别精度的三大主因，偏差控制需贯穿勘察全程；

砂砾石层液化判别 ** 需通过分试段击数记录与无效段

剔除，避免砾石导致的 N 值高估。

随着数据库建设与智能算法应用，标贯试验在液化判别中的精度与深度将进一步提升，为重大工程抗震设计提供更可靠支撑。

参考文献

1. 黄敬军. 标准贯入试验在砂土液化判别中的应用研究 [J]. 工程机械与维修, 2023(5).
2. 张雪东;侯瑜京;梁建辉;李京爽. 饱和砂土地基液化离心机振动台模型试验研究[J]. 水利学报,2014(S2).
3. 王维铭等. 基于中国砂土液化数据库的标贯液化判别方法 [J]. 岩土力学, 2023(1).
4. 张果柱等. 昆明粉土层液化平面分布规律研究 [J]. 工程地质学报, 2006(S1).
5. 杨玉生等. 砂砾石层液化的标贯判别方法: CN201610953303.4 [P]. 2017.
6. 自由场地液化响应特性的离心机振动台试验[J]. 梁孟根;梁甜;陈云敏.浙江大学学报(工学版),2013(10).
7. 液化自由场地震响应大型振动台模型试验分析[J]. 许成顺;豆鹏飞;杜修力;陈苏;韩俊艳.岩土力学,2019(10).
8. 中山市黄圃镇马新初级中学新建教学楼、宿舍楼、饭堂工程 (Z). 工程编号: ZYZSKC202406.中誉设计有限公司, 2024.
9. 树涌工业园市政规划支路建设工程 (Z). 工程编号: ZYZSKC202414.中誉设计有限公司, 2024.
10. 中山树涌规划支路砂层液化研究.
11. 铁路与建筑抗震规范液化判别对比
12. 标准贯入试验操作误差分析