

王绍崑, 杨正权, 刘小生, 等. 基于标贯试验的覆盖层深埋砂土相对密度确定方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 195-200. WANG S K, YANG Z Q, LIU X S, et al. Determining the relative density of deep sand in overburden layer based on standard penetration test[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 195-200. (in Chinese)

基于标贯试验的覆盖层深埋砂土 相对密度确定方法

王绍崑^{1,2}, 杨正权^{1,2}, 刘小生^{1,2}, 温彦锋^{1,2}, 朱凯斌^{1,2},
赵艺颖^{1,2}, 赵剑明^{1,2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 覆盖层砂土取样易受扰动, 难以确定其原位相对密度, 因此需要开发一种操作简便、适于推广的原位砂土相对密度确定方法。基于标准贯入锤击数、上覆有效应力与土体相对密度间存在的相关关系, 提出一种基于现场标贯试验成果确定覆盖层深埋砂土相对密度的思路。结果表明, 应用该方法计算覆盖层深埋砂土相对密度的结果稳定且符合对于类似砂层密度特性的基本认识, 在难以直接获取砂土原位相对密度时是可行的代替方法。

关键词: 覆盖层深埋砂土; 相对密度; 标准贯入试验; 上覆应力; 经验关系

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdk.2025.0020

砂土相对密度表征了砂土在土层中赋存的密实程度, 是重要的物理性质指标。相对密度对砂土力学性质有重要影响, 是开展砂土力学性质试验的基本控制条件。获取原位砂土相对密度的一般方式是先通过灌砂法、灌水法等原位密度试验或环刀法、蜡封法等室内密度试验确定原位砂土的天然密度^[1], 再通过相对密度试验确定其相对密度。但此类方法仅适用于浅层地表, 对于深层砂土, 需要通过钻探取样确定其天然密度。由于天然砂土颗粒结构不稳定, 取样时的扰动易使砂土的相对密度发生明显变化, 难以获得能够代表砂层的高质量砂土试样^[2-4], 甚至可能无法获取成型砂样。对此, 需要采用冻结法、胶结法及特殊取样器取样等特殊取样方法解决这一问题^[5], 但采取这些特殊取样方法需要多种专用取样设备, 取样流程中需通过复杂的操作避免由应力释放、冻胀等一系列问题带来扰动, 价格昂贵、操作复杂, 对一般工程而言难以负担。因此有必要寻求一种相对简便、适合推广应用的原位深埋砂土相对密度确定方法。

现场原位试验能够反映包括原位结构、原位相对密度等因素对砂土力学性质的影响, 其试验结果能够直接或间接表征土体的多种力学性质^[6-11]。标准贯入试验作为一种常用的现场原位试验, 在国内外都有着广泛的应用^[12-20]。1957年, Gibbs等^[21]通过试验发现标准贯入锤击数和砂土的相对密度间存在明显的相关关系, 随后中外学者^[22-24]对此开展了相关研究。本文基于标准贯入锤击数、上覆有效应力和砂土相对密度间的相关关系, 提出一种基于标贯试验成果确定地基砂土相对密度的思路, 并以某实际工程覆盖层深埋砂土为例, 基于标贯试验成果确定砂土相对密度的流程, 验证所提方法的可行性。

1 标贯击数与相对密度的关系

标准贯入试验是动力触探的一种方法, 以重量为 63.5 kg 的锤, 沿导杆自由下落 76 cm, 以 30 次/min 以下的频率将在钻孔内的标准规格贯入器击入土体, 并记录由距锤击面 15 cm 处击至 45 cm 处所用

收稿日期: 2024-03-01 修回日期: 2024-10-13 网络出版时间: 2024-10-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241015.1402.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF1700504; 2024YFF1700505); 中国水科院基本科研业务费专项项目(GE0145B052021); 中国水科院科技成果转化基金专项项目(GE121003A0032022; GE121003A0032024); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SK12022ZD05)

作者简介: 王绍崑(1994—), 男, 北京人, 博士, 主要从事土动力学与土工结构抗震研究。E-mail: wsskk@sina.com

通信作者: 杨正权(1980—), 男, 吉林集安人, 正高级工程师, 博士, 主要从事土动力学与土工结构抗震研究。E-mail: yangzhq@iwhr.com

锤击数为标准贯入锤击数,以此来确定土体力学性质的现场试验方法^[25]。

Gibbs 等^[21]通过试验获得土层标贯击数、相对密度和上覆有效应力的关系曲线,发现土层标贯击数与相对密度及上覆有效应力存在着正相关关系。通过大量试验, Meyerhof^[22]提出对于同一种砂土,在相同试验条件下,标贯击数和相对密度平方的比值与上覆有效应力大致满足线性关系。基于此种思路, Skempton^[23]进一步将其具体公式化为

$$\frac{N}{D_r^2} = a + b\sigma'_v \quad (1)$$

式中: N 为标准贯入锤击数; D_r 为相对密度; σ'_v 为上覆有效应力, kPa; 系数 a 、 b 和试验条件及土体特性相关。

锤垫的重量、钻杆的长短、取样器衬垫的有无、锤的释放方式、钻孔的孔径大小等均会产生影响^[26]。Seed 等^[27]考察了不同国家和地区的标贯试验方式,发现各种方法间的钻杆能量传递率差异显著,提出了以美国最为常用的标贯试验标准流程对应的钻杆能量传递率 60% 为基准进行归一化的建议,该钻杆能量传递率与我国采用的标贯试验标准流程钻杆能量传递率一致。Skempton^[23]以该能量传递率为基准值,将标贯击数 N 修正标准化为同一能量传递率的标贯击数:

$$N_{60} = N \frac{\eta_r}{60} \quad (2)$$

式中: N_{60} 为能量修正后的标准贯入锤击数; η_r 为实际试验的钻杆能量传递率, %。

当试验钻杆能量传递率可知时,即可由上式获得标准化后的标贯击数 N_{60} 。 N_{60} 与相对密度 D_r 及上覆有效应力 σ'_v 同样有类似式 (1) 的关系

$$\frac{N_{60}}{D_r^2} = a + b\sigma'_v \quad (3)$$

由于 N_{60} 对应标准试验条件,此时式中的系数 a 、 b 取值仅由土体自身特性决定。

2 基于标贯击数确定砂土相对密度方法

基于国际上的室内标定研究成果, Skempton^[23] 汇总整理了 5 种典型砂土的修正标贯击数 N_{60} 、相对密度 D_r 及有效上覆应力 σ'_v 间的关系, 5 种典型砂土的级配曲线见图 1。相应级配特征参数、含水状态及修正标贯击数 N_{60} 、相对密度 D_r 及上覆有效应力 σ'_v 间的关系见表 1。

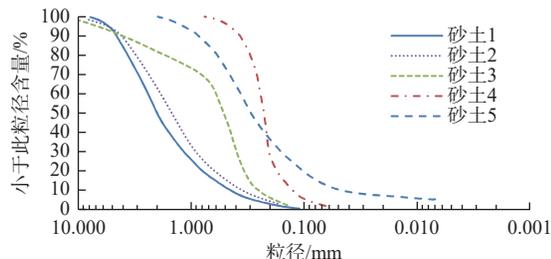


图 1 典型砂土级配曲线^[23]

Fig. 1 Grading curves of typical sand

表 1 典型砂土级配特征参数、含水状态及标贯击数与相对密度关系^[23]

Tab. 1 Grading characteristic parameters, water content status, and relationship between SPT blow counts and relative density of typical sands

典型砂土	D_{50}/mm	C_u	细粒含量/%	含水状态	$\eta_r/60$	N_{60}/D_r^2
砂土1	2.00	5.3	0	浸润	1.1	$33 + 24\sigma'_v$
砂土2	1.50	5.5	0	风干&湿润	1.0	$18 + 22\sigma'_v$
砂土3	0.51	2.5	4	浸润	1.1	$23 + 26\sigma'_v$
砂土4	0.23	1.8	2	浸润	1.1	$17 + 19\sigma'_v$
砂土5	0.30	7.0	14	风干	1.0	$15 + 18\sigma'_v$

表 1 中: 浸润状态代表试验过程中土体位于水位线以下, 状态接近饱和; 风干状态含水率约为 0.5%; 湿润状态为含水率约为 5%; D_{50} 为平均粒径, C_u 为不均匀系数, 表达式为

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4)$$

式中: D_{60} 、 D_{10} 分别为过筛重量占 60% 和 10% 的颗粒粒径, mm。

基于 Skempton 的研究成果, 可以通过修正标贯击数 N_{60} 与上覆有效应力 σ'_v 估算砂土相对密度 D_r 。根据上文所述关系确定土体相对密度 D_r 的先决条件是获得可靠的土体特性系数 a 、 b 。同时, 砂土的含水状态也会对三者之间的关系产生影响, 这一影响在确定三者相互关系时也应有所考虑。对此, 可根据 Skempton^[23] 公开的典型砂土级配特征, 选择条件相近典型砂土的系数 a 、 b 作为代替, 具体方法为: 根据目标砂土的含水状态, 将其级配曲线与图 1 中的典型砂土级配进行比对, 或通过表 1 比对平均粒径 D_{50} 及不均匀系数 C_u 确定对应的典型砂土。若目标砂土含水率较高、接近饱和, 则将其与砂土 1、砂土 3 及砂土 4 的级配进行对比; 若目标砂土含水率较低、接近干燥, 则将其与砂土 2、砂土 5 的级配进行对比。在确定了分析对象对应的典型砂土类别后, 通过表 1 确定对应的特征参数 a 、 b , 再将其代入

根据式(3),得到 D_r 的表达式为

$$D_r = \sqrt{\frac{N_{60}}{a + b\sigma'_v}} \quad (5)$$

通过式(5),可计算砂土的相对密度 D_r 。Skempton^[23]列出的典型砂土虽然有一定的代表性,但砂土种类及级配的差异依然会带来一定的计算误差。对于安全性和计算精度要求更高的重要工程,有必要开展针对分析砂土的室内模拟原位标定试验来研究确定其相关关系特征参数 a 、 b 。

3 应用实例

3.1 深埋砂土相对密度计算

某调水工程某段位于地震带上,历史上发生过多次中、强地震,工程选址范围内的深厚覆盖层中包含砂土层,该层以含砾中粗砂层为主,呈深灰色-棕黄色,分布连续,埋深12~20 m。现场开展了标贯试验,试验范围内共有9个试验孔穿过该砂土层。由于深埋砂土结构不稳定,取样过程中产生了扰动,其原位密度难以确定。为了确定后续力学试验控制密度条件,保证相应试验结果可靠,采用本方法进行砂土原位相对密度的确定。

地质勘察检测结果表明,该覆盖层位于地下水位线以下。对该砂层取样进行物性试验分析,发现该覆盖层内大致存在两种砂土层,其级配特征分别与砂土3、砂土4较为接近,故选用表1中与砂土3、砂土4对应的特征参数 a 、 b 。为计算分析砂层上覆有效应力,需先对上覆各层土体进行室内物性试验,确定干密度 ρ_d 、含水率 ω 及土颗粒密度 G_s 。随后计算各土层的天然密度 ρ 及与天然密度对应的浮密度 ρ' ,表达式为

$$\rho = \rho_d(1 + \omega) \quad (6)$$

$$\rho' = \rho_d \left(1 - \frac{1}{G_s}\right) \quad (7)$$

设各土层在地下水位以上的厚度为 h_d ,在地下水位以下的厚度为 h_w ,则上覆有效应力 σ'_v 表达式为

$$\sigma'_v = \sum (\rho h_d + \rho' h_w) \quad (8)$$

将标贯击数测试值与计算所得上覆有效应力 σ'_v 及特征参数 a 、 b 代入式(5),即可计算得到不同类别不同埋深砂土的相对密度值,具体见表2。由表2可知,基于标贯试验成果确定砂土相对密度方法可以在已知上覆有效应力与标贯击数的前提下确定砂土的相对密度。在相近深度范围内,所得砂层相

对密度值基本一致,方法具有一定的可行性和合理性。

表2 不同类别不同埋深砂土相对密度计算结果

Tab. 2 Calculation results of relative density of sands with different categories and burial depths

孔号	砂土类别	标贯深度/m	上覆有效应力 σ'_v /kPa	标贯击数	相对密度 D_r /%
1号孔	砂土3	14.00	163.0	18	52
1号孔	砂土3	15.00	172.7	20	54
1号孔	砂土3	16.00	182.4	19	52
2号孔	砂土3	15.20	173.3	14	45
2号孔	砂土3	16.20	183.0	15	46
2号孔	砂土3	17.20	192.7	12	41
2号孔	砂土3	18.20	202.4	14	43
2号孔	砂土3	19.20	212.1	15	44
3号孔	砂土3	13.90	160.9	20	56
4号孔	砂土4	16.45	177.9	10	44
4号孔	砂土4	17.95	192.5	10	43
5号孔	砂土4	13.30	136.7	12	53
5号孔	砂土4	14.30	146.4	12	52
5号孔	砂土4	15.30	156.1	11	49
6号孔	砂土4	15.00	155.2	18	62
7号孔	砂土4	13.65	141.7	20	67
7号孔	砂土4	14.55	150.4	21	68
7号孔	砂土4	15.65	161.1	21	66
8号孔	砂土4	13.00	141.4	14	56
8号孔	砂土4	14.00	151.1	15	57
8号孔	砂土4	15.00	160.8	13	52
8号孔	砂土4	16.00	170.5	15	55
9号孔	砂土4	11.00	111.4	11	54
9号孔	砂土4	12.00	121.1	10	50
9号孔	砂土4	13.00	130.8	13	56
9号孔	砂土4	14.00	140.5	11	50
9号孔	砂土4	15.00	150.2	10	47
9号孔	砂土4	16.00	159.9	13	52

3.2 砂土密度替代对计算结果的影响分析

如前文所述,该砂土层由于取样扰动无法确定其密度,而上覆砂土的密度又是上覆应力确定的前提。对此,考虑使用相对密度50%的砂土干密度进行近似代替,这种代替会产生一定的误差,为此,基于该场地上覆土层物性试验结果,就近似替代法对估算结果可能产生的影响进行计算分析:假设某场地地下水位深度为1 m,地表以下10 m为粉质壤土,其土颗粒密度为2.7,天然干密度为1.5 g/cm³,天然

含水量为 20%;粉质壤土以下为厚度大于 10 m 的细砂,土颗粒密度为 2.65,天然干密度未知,最大干密度为 1.8 g/cm³,最小干密度为 1.2 g/cm³;深度 10、15、20 m 处标贯击数为 14、18、21。根据以上条件,计算得到砂层不同深度的上覆有效应力和推算相对密度,见表 3。

表 3 密度替代对计算结果的影响
Tab. 3 Influence of soil density substitution

深度 /m	假设最大上覆应力 $\sigma_{v,max}$ /kPa	假设最小上覆应力 $\sigma_{v,min}$ /kPa	最大上覆应力对应相对密度/%	最小上覆应力对应相对密度/%
10	103.0	103.0	65	65
15	140.4	159.0	67	65
20	177.7	215.1	67	63

由于深埋砂土有较厚的覆盖层,受上覆土体重量及地下水影响,砂土自身的重量在上覆应力中的占比并不高,故砂土干密度取值对计算结果的影响也较小。由表 3 可知,对于深度 20 m 处有 10 m 厚的上覆砂层,在分别取最大、最小干密度计算后,所得相对密度结果相差 4%,即采用相对密度 50% 的砂土干密度进行近似代替的条件下,相对密度误差为 $\pm 2\%$,干密度误差为 ± 0.012 g/cm³,该误差小于 0.03 g/cm³,即相对密度试验容许平行误差^[12],故认为在这种条件下密度替代法所带来的影响是可以接受的。

在上覆有效应力因砂层自身密度难以确定而无法获得时,可以在采用上述方法分析对相对密度估算结果的影响程度后,考虑使用相似代替法确定上覆有效应力。当深埋砂层较厚,深层计算误差较大无法忽略时,则本方法不再适用,应先确定上层砂土的密度后再对深层砂土进行分析,或采用其他方法确定深层砂土的密实度。

3.3 估算方法的局限性及其他影响因素

采用标贯试验结果来确定砂土相对密度的思路是基于 Skempton^[23] 汇总的试验成果,同样也受限于 Skempton^[23] 汇总标贯试验的结果,且样本数量有限。部分结果受到当时实验条件的影响,如:在 Skempton^[23] 汇总的 5 种典型砂土室内标贯试验中,砂土 1、砂土 3、砂土 4 所用室内试验器材尺寸偏小,为直径约 30 cm 的圆环筒。这一试验条件可能存在边界效应,导致最终标贯击数偏大。针对这一问题,后续应开展相应的试验及数值模拟,以确定该效应的影响程度。

同时,Skempton^[23] 汇总标贯试验的结果中,部分原位砂土自身性质的影响也无法体现,如:砂土的固结时间与其超固结程度同样会对标贯击数产生影响,砂层的沉积年代越久远、超固结程度越大对其开展标贯试验所得标贯击数 N 也会随之增大,而 Skempton^[23] 汇总的 5 种典型砂土室内标贯试验的对象均为重塑土,其试验结果会略小于同等应力、密度条件下的现场试验结果。量化分析这一现象的试验样本量尚不充分,后续需针对此类影响开展系统性研究。

为提升方法的实用性及计算精度,后续应开展多种砂土的室内模拟原位标定试验,对样本量进行扩充。对于安全性和计算精度要求更高的重要工程,有必要开展针对分析砂土的室内模拟原位标定试验来研究确定其相关关系特征参数。

4 结论

基于标准贯入锤击数、上覆有效应力与土体相对密度间存在的相关关系,提出一种基于现场标贯试验成果确定覆盖层深埋砂土相对密度的方法。建议采用比对含水状态与级配特征的方式,选择相对密度和标准贯入锤击数、土层上覆有效应力间经验关系特征参数的方法。工程实例分析结果表明,应用该砂土相对密度估算方法计算覆盖层深埋砂土相对密度具有一定的可行性和合理性,在难以直接获取砂土原位相对密度时是一种可行的代替方法。

参考文献:

- [1] 李玥. 波速测试与标贯试验在预估砂土密度中的应用研究 [J]. 吉林水利, 2021(4): 22-27. DOI: 10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2021.04.006.
- [2] 刘世伟, 杨宇, 宿辉, 等. 基于混合优化算法的砂砾料面板堆石坝压实质量评价模型及工程应用研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 154(7): 141-149. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.07.012.
- [3] 王青薇, 钟道旭, 尹业新, 等. 砂土卵石地层高频冲击直推半合管取样工艺应用研究 [J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 111-116. DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.04.017.
- [4] 郑洪文. 静压振动取样在砂源勘察中的应用 [J]. 工程设计与设计, 2022(8): 104-106. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2022.04.233.
- [5] 董教社, 沈日庚, 王学究, 等. 砂砾石取样器研制及配套工艺优化研究 [J]. 工程勘察, 2023, 51(9): 40-47.
- [6] 马永明, 郭聚坤, 王瑞, 等. 砂-结构界面剪切机理及

- 微观行为演化研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2024, 55(7): 186-196. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2024.07.016.
- [7] 张立丽. 利用标准贯入试验估算土体抗剪强度指标 [J]. 工程勘察, 2022, 50(8): 22-27.
- [8] 荣誉, 倪万魁, 聂永鹏, 等. 黄土标贯击数与物理力学参数相关性及其微观机制分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1192-1199.
- [9] 甘小泉, 杨松, 王振红, 等. 马尔代夫珊瑚礁地基现场试验研究 [J]. 科技通报, 2020, 36(8): 75-80. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.08.016.
- [10] 徐庆功. 原位测试在岩土工程勘察中的应用研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(3): 88-91. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2024.03.022.
- [11] 曾岳, 管圣功, 张芳, 等. 湛江结构性黏土现场原位试验及分析 [J]. 路基工程, 2023(6): 73-79. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202305003.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019, 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [13] 谭松娥, 刘兵. 利用标贯试验击数确定岩土参数的探讨 [J]. 地质装备, 2021, 22(1): 37-39, 29. DOI: 10.3969/j.issn.1009-282X.2021.01.017.
- [14] 陈龙伟, 陈童, 王云龙, 等. 标准贯入试验锤击贯入能量测试与分析 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1757-1766. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0209.
- [15] 侯向阳, 王振军, 孙巍, 等. 标准贯入试验在黄河流域砂土液化地层判别中的应用 [J]. 建筑技术开发, 2024, 51(7): 65-67.
- [16] 麻栋栋. 锤击打桩桩周岩土体力学特性试验研究 [J]. 工程勘察, 2024, 52(3): 15-18.
- [17] 舒武堂, 姚知秋, 张利斌. 湖北地区砂土压缩模量与标准贯入试验结果的相关关系 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024(4): 107-109. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202404035.
- [18] 闫傲坤, 王俊锋, 张中善, 等. 黄土改良砂土的三轴剪切渗透试验 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2024, 22(5): 1007-1015. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2024.0100.
- [19] 杨嘉豪, 何欢, 刘松玉, 等. 黏土中基于 SPT 静载试验锤击数能量修正方法 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(增刊 2): 132-140. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2023.s2.wt07.
- [20] 赵拓宇. 三种用标准贯入判别地震液化方法的效果分析 [J]. 天然气与石油, 2024, 42(2): 137-144.
- [21] GIBBS H J, HOLTZ W G. Research on determining the density of sands by spoon penetration testing [J]. Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 1957, 1: 35-39.
- [22] MEYERHOF G G. Discussion on research on determining the density of sands by penetration testing [J]. Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 1957, 3: 110.
- [23] SKEMPTON A W. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, particle size, ageing and overconsolidation [J]. Géotechnique, 1987, 37(3): 411-412.
- [24] 刘军, 苗现国, 许军龙, 等. 砂土相对密度试验研究和探讨 [J]. 工程勘察, 2023, 51(9): 26-34.
- [25] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [26] YOU D T L, IDRIS I M. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(4): 297-313. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(297).
- [27] SEED H B, TOKIMATSU K, HARDER L F, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(12): 1425-1445. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:12(1425).

Determining the relative density of deep sand in overburden layer based on standard penetration test

WANG Shaokun^{1,2}, YANG Zhengquan^{1,2}, LIU Xiaosheng^{1,2}, WEN Yanfeng^{1,2},
ZHU Kaibin^{1,2}, ZHAO Yiyi^{1,2}, ZHAO Jianming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100871, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100871, China)

Abstract: The relative density of sand characterizes its compactness in the soil layer and is an important indicator of its physical property. It has a significant impact on its mechanical properties and is a basic control condition for conducting mechanical property tests. Due to the unstable particle structure of the deep sand layer, the interference

of conventional sampling methods may cause significant changes in macroscopic properties (including relative density) of sand. Meanwhile, special sampling methods, such as frozen sampling, are complex to operate and costly. For general engineering projects, the undisturbed sampling of deep-buried sand is difficult in practice. Therefore, a simple, efficient, and reasonable method for determining the relative density of deep-buried sand is a necessity.

Internationally, the standard penetration test is a commonly used field test, and its test results can directly or indirectly represent various mechanical properties of the soil. It has been demonstrated that there is a correlation between the standard penetration blow count and the relative density of sand under certain overburden stress conditions. Based on relevant research results internationally, standard penetration test results of 5 typical sand were summarized by Skempton, and the correlation among standard penetration test blow count, relative density and effective overburden stress was formulated as $\frac{N}{D_r^2} = a + b \frac{\sigma'_v}{100 \text{ kPa}}$. Based on the recommended standard penetration test energy transfer rate (60%) proposed by Seed et al., the standard penetration test blow count N was standardized as standard penetration test blow count with the same energy transfer rate N_{60} by Skempton. Therefore, the above formula was standardized as $\frac{N_{60}}{D_r^2} = a + b \frac{\sigma'_v}{100 \text{ kPa}}$. Based on these relationships, a relative density estimate formula

$D_r = \sqrt{\frac{N_{60}}{a + b \frac{\sigma'_v}{100 \text{ kPa}}}}$ and the corresponding method for deep-buried sand in the overburden layer based on the results of standard penetration tests were established. Based on the moisture content and gradation of 5 typical sand summarized by Skempton, a sand relationship selection method was proposed for selecting the characteristic parameters of the empirical relationship between relative density, standard penetration blow count, and effective overburden stress.

The effectiveness and stability of the established method for estimating the relative density of sand were demonstrated by the analysis of various engineering examples. A method was suggested to replace uncertain overburden sand density with estimated sand density, and the influence of this method on the results was analyzed through an example calculation. The analysis results indicate that replacing uncertain overburden sand density with this method has little impact on calculation results. It is recommended that an iterative calculation method may be used when high accuracy is required. Additionally, indoor tests should be conducted simulating field calibrations on the analyzed sand for projects with strict safety and accuracy requirements.

Key words: deep-buried sand in the cover layer; relative density; standard penetration test; overburden stress; empirical relationship