

DOI: 10.11779/CJGE2017S1014

沉积泥沙自重固结系数测试方法研究

郭帅杰^{1, 2}, 张福海³, 宋绪国^{1, 2}

(1. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251; 2. 城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程实验室, 天津 300251;
3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: Terzaghi 理论中的固结系数为定值, 应用于沉积泥沙大变形固结计算时存在较大误差, 而沉积泥沙固结系数的试验测定仍存在一定困难。沉降柱试验能完整的模拟低浓度泥沙的沉积固结过程, 准确获取泥沙沉降过程曲线和沉积层体积分数分布曲线。在此基础上, 基于不同阶段泥沙沉降过程控制方程, 通过作图方法得到沉降控制方程的拟合参数, 得到了随固结过程连续变化的沉积泥沙自重固结系数。根据固结过程中的沉积泥沙渗透系数和体积压缩系数变化规律, 同样得到四种不同的固结系数求解方法, 并讨论了各影响因素对沉积泥沙自重固结系数的影响趋势。

关键词: 沉降试验; 沉积泥沙; 自重固结系数; 大变形固结

中图分类号: TU11.2; TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0069-05

作者简介: 郭帅杰(1987-), 男, 博士, 博士后, 主要从事软基加固、刚性桩复合地基设计计算方面的科研和设计工作。E-mail: ggssjj@hhu.edu.cn。

Test methods for self-weight consolidation coefficient of deposited sediment

GUO Shuai-jie^{1, 2}, ZHANG Fu-hai³, SONG Xu-guo^{1, 2}

(1. The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300251, China; 2. National Engineering Laboratory for Digital Construction and Evaluation Technology of Urban Rail Transit, Tianjin 300251, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The consolidation coefficient in the Terzaghi theory is constant. It will cause significant errors if it is directly applied in the calculation of large strain consolidation of deposited sediment. Meanwhile, it is still extremely difficult to obtain the self-weight consolidation coefficient of deposited sediment. Especially, the sediment deposition and consolidation process can be simulated using the sediment settlement experiment with relatively low initial concentration, and the curves of sediment settlement and deposited layer particle volume fraction also can be obtained accordingly. Based on the sediment settlement control equations for different settlement stages, the fitted sediment settlement parameters can be determined through the mapping method, and then the self-weight consolidation coefficient of deposited sediment at different consolidation stages can be calculated. According to the change laws of hydraulic conductivity and volumetric compression coefficient, four methods for the consolidation coefficient are discussed, and the trends and main influence factors are studied.

Key words: settlement column experiment; deposited sediment; self-weight consolidation coefficient; large strain consolidation

0 引言

泥沙吹填技术近年来广泛应用于大规模围海造陆和人工岛礁建设工程, 并已经取得十分显著的工程应用成果。但流动状态下沉积泥沙固结系数室内测定仍存在较大困难, 常规固结试验并不能满足固结系数测定要求。因此, 沉积泥沙自重固结系数测试方法及其同常规 Terzaghi 固结系数之间的差异分析仍需要进一步研究。

已有研究^[1]表明, 渗透系数与体积压缩系数和孔隙比间满足幂函数关系, 将孔隙比 e 以土体颗粒体积分数 ϕ 表达^[2], 并分别代入 Terzaghi 固结系数表达式,

得到固结系数关于土体颗粒体积分数 ϕ 的关系式, 可进一步讨论 C_v 变化趋势和影响因素^[3]。

泥沙沉降柱试验^[4]可进行不同初始浓度泥沙沉降试验, 研究泥沙颗粒自重应力作用下的沉积固结过程, 通过泥沙沉降试验中记录浊液面(沉积层)位置高度得到泥沙沉降曲线, 由沉积稳定后的沉积层取样, 得到沉积层体积分数分布曲线。

按照上述固结系数确定和泥沙沉降试验思路: 首先推导建立泥沙沉降方程^[5-7]和沉积稳定后的沉积层

体积分数分布方程；其次，通过泥沙沉降试验得到不同初始浓度泥沙的沉降曲线和沉积层颗粒体积分数分布曲线；再次，由泥沙沉降曲线和体积分数分布曲线对数直线段拟合方法，得到泥沙沉积层渗透系数和有效应力关系式参数；最后，根据固结系数表达式和沉积层初始及稳定孔隙比，得到沉积泥沙自重沉积固结过程中的自重固结系数。

1 泥沙沉降体沉降控制方程

泥沙沉降过程中，低浓度泥沙沉降体依次经历流、固两相，分别经历自由沉降、阻滞沉降和固结沉降。自由沉降阶段浊液面沉速基本恒定，并在极短时间内完成，沉降控制方程主要针对阻滞和固结沉降阶段建立。沉降方程建立中以沉积层表面作为物质交换分界面，以沉积层底为 z 坐标零点， z 轴正向竖直向上，固相沉降体沉速 v_s 、颗粒间孔隙水渗流速度 v_f 均相对于固相坐标系 z 。

1.1 基本物理力学方程

一维沉降固结过程中，假定沉降体内部作用力相互平衡，得到竖向力平衡条件：

$$[\phi\rho_s + (1-\phi)\rho_w]g + \frac{\partial\sigma}{\partial z} = 0 \quad , \quad (1)$$

式中， ρ_s 为固体颗粒密度， ρ_w 为土中水密度 (1.0 g/cm³)， ϕ 为固体颗粒体积分数， g 为重力加速度， z 为计算点固相坐标， σ 为 z 点土体总应力。

固相坐标系下 Darcy 定律表达式：

$$(1-\phi)(v_f - v_s) = -k \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial u_e}{\partial z} \quad , \quad (2)$$

式中， v_f 为土中水渗流速度， v_s 为固相沉降体速度， k 土体实际渗透系数， u_e 为超孔隙水应力。

沉降过程中沉降体体积改变量恒定，排出水体积与沉降体体积减小相同，建立物质连续方程：

$$v_s\phi + v_f(1-\phi) = 0 \quad . \quad (3)$$

式 (3) 代入 (2) 式后与式 (1) 联立，并应用有效应力原理化简得

$$v_s = -k \left[\phi \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right] \quad . \quad (4)$$

1.2 沉降体固结沉降阶段控制方程

沉降体自重沉降固结后期， v_s 接近于 0，忽略沉降体下降速度 v_s 影响，令 $v_s=0$ ，则式 (4) 化简为

$$(\rho_s - \rho_w)g\phi = -\frac{\partial\sigma'}{\partial z} \quad . \quad (5)$$

有效应力与泥沙颗粒体积分数间幂函数关系式定义为 $\sigma' = K_\sigma \phi^n$ ， K_σ 为有效应力参数， n 为有效应力指标， $n>0$ 。将 σ' 代入式 (5)，并对 z 从 z 到 h 积分，

ϕ 从 ϕ 到 ϕ_h 积分， ϕ_h 为沉降体表面处的颗粒体积分数，且趋近于 0，将 $\phi_h=0$ 代入，最终整理得

$$h - z = \frac{nK_\sigma}{g(n-1)(\rho_s - \rho_w)} \phi^{n-1} \quad . \quad (6)$$

1.3 沉降体阻滞沉降段控制方程

根据沉降过程假定，沉降体内部物质连续不可压缩，由泥沙颗粒体积分数 ϕ 表达连续方程：

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial z} v_s = 0 \quad . \quad (7)$$

阻滞沉降阶段，粉细颗粒间以絮凝沉降为主，接触有效应力 $\sigma'=0$ ，将式 (4) 代入式 (7)，化简得

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} - \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \frac{\partial}{\partial z} (k\phi^2) = 0 \quad . \quad (8)$$

土层渗透系数 k 与固体颗粒体积分数指数函数关系式定义为 $k=K_k\phi^{-m}$ ， K_k 为渗透参数， m 为渗透指标， $m>0$ ，代入式 (8) 化简得

$$\frac{\partial z}{\partial t} = K_k \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} (2-m)\phi^{1-m} \quad . \quad (9)$$

式 (9) 两边积分，得到任意时间 t 时任意位置 z 处在的泥沙颗粒体积分数 $\phi(z, t)$ 关系式：

$$\phi(z, t) = \left[K_k \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} (m-2) \frac{t}{z} \right]^{m-1} \quad . \quad (10)$$

定义 ζ 为完全密实状态下 ($\phi=1.0$) 的泥沙颗粒密实高度，由颗粒体积分数 ϕ ϕ 沿坐标方向 z 积分得到。沉积层以上水体中颗粒体积分数为 0，式 (10) 积分后得沉积层表面位置 $h(t)$ 与时间 t 的关系式：

$$h(t) = \left(\zeta \frac{2-m}{1-m} \right)^{\frac{1-m}{2-m}} \left[K_k \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} (m-2) \right]^{\frac{1}{2-m}} \cdot t^{\frac{1}{2-m}} \quad . \quad (11)$$

设 R_1 ， a_1 为泥沙阻滞沉降阶段沉降曲线上的对数直线段斜率和截距，对应于式 (11)； R_2 ， a_2 为固结稳定阶段的体积分数分布曲线的对数直线段斜率和截距，对应于式 (6)。式 (6) 和式 (11) 等式两侧取对数，渗透参数 K_k 、有效应力参数 K_σ 、有效应力指标 n 及渗透指标 m 分别表示为：

$$\left. \begin{aligned} m &= (2R_1 - 1)/R_1, \\ \log K_k &= (m-1) \log [\zeta(2-m)/(1-m)] + (2-m)a_1 - \log [(m-2)(\rho_s - \rho_w)/\rho_s], \\ n &= R_2 + 1, \\ K_\sigma &= 10^{a_2} g(\rho_s - \rho_w)(n-1)/n. \end{aligned} \right\} \quad . \quad (12)$$

1.4 一维变形固结理论固结系数

为修正 Terzaghi 假定条件的引入误差，采用修正方法^[8-9]，在一维固结系数基础上，引入修正变量。固结系数基本定义式为

$$C_v = -\frac{k}{m_v \gamma_w} = -\frac{k(1+e_0)}{\rho_w g} \frac{d\sigma_v}{de} \quad . \quad (13)$$

式(13)中渗透系数 k 与土体体积压缩系数 m_v 为变量时, 固结系数 C_v 将成为过程变量。固结系数修正过程中, 单参数修正将渗透系数和体积压缩系数其中之一作为变量, 双参数修正同时将渗透系数 k 和体积压缩系数 m_v 作为变量。

(1) 双参数修正

渗透系数 k 与有效应力 σ' 定义式分别代入式(13), 化简得双参数修正固结系数:

$$C_v = \frac{K_k K_\sigma \phi^{n-m}}{\rho_w g} \quad (14)$$

为研究双参数修正固结系数 C_v 在土体固结过程变化趋势和主要影响因素, 将固结系数关于泥沙颗粒体积分数 ϕ 求导得

$$C'_v = \frac{K_k K_\sigma n(n-m) \phi^{n-m-1}}{\rho_w g} \quad (15)$$

式(15)中, 固结系数一次导数 C'_v 的正负仅与 $n-m$ 值相关: 当 n 大于 m 时, $C'_v > 0$ 恒成立, C_v 在固结过程中保持递增趋势; 当 n 小于 m 时, $C'_v < 0$, 固结系数 C_v 保持递减趋势; 特别的, 当 n 等于 m 时, $C'_v = 0$ 恒成立, C_v 在固结过程中保持为仅与土体自性质相关的常数。

(2) 单参数修正

将渗透系数 k 关系式代入式(13), 体积变形模量 m_v 保持为常数, 化简得单参数修正固结系数:

$$C_v = \frac{K_k \phi^{-m}}{\rho_w g (1 - \phi_0 / \phi_t)} \quad (16)$$

式中, ϕ_0 和 ϕ_t 分别固结开始时和固结历时 t 时泥沙沉积层体积分数。

将体积变形模量 m_v 作为固结过程变量, 将 σ' 关系式代入式(13), 渗透系数 k 保持为常数, 化简得单参数修正固结系数:

$$C_v = \frac{k n K_\sigma \phi^n}{\rho_w g} \quad (17)$$

2 泥沙沉降试验

2.1 试验装置

泥沙沉降试验中采用的沉降柱试验装置和泥沙沉积层取样设备分别如图 1(a)、(b) 所示。

沉降柱为 1000 mm 高有机玻璃管(图 1(a)), 内径 130 mm, 泥沙悬浊液初始浓度分别为 100, 50, 20 g/L。泥沙悬浊液初始配置采用干物质含量控制方法, 应用搅拌器上下搅拌, 使其尽量处于完全分散状态。沉积层采用取样器(图 1(b))进行深度方向上的逐层取样, 沉降试验历时约 37 d。

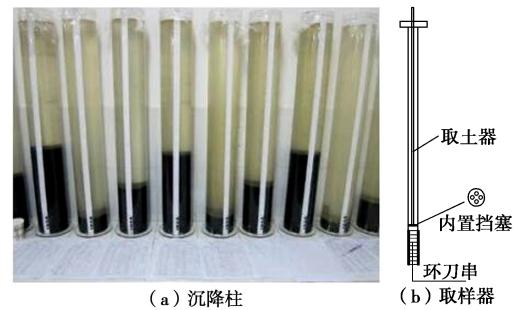


图 1 泥沙沉降试验装置和取样装置

Fig. 1 Settlement column and sampler devices

2.2 沉降试验过程

沉降试验中的泥沙为自然水域淤积形成的沉积泥沙, 剔除大粒径杂质后, 得到试验用分选泥沙。泥沙试样基本性质指标列于表 1, 依照土的塑性图分类, 试验泥沙为高液限黏土 (CH)。

表 1 泥沙试样物理性质指标

Table 1 Physical property indices of sediment samples

比重 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指 数 I_p	水比重 G_w	粒组含量/%		
					黏粒	粉粒	砂粒
2.71	67	30	37	1.0	49.7	43.6	6.7

泥沙沉降试验间期的泥沙悬浊液及泥沙沉积层初、末状态基本试验情况如表 2 所示。

表 2 泥沙沉降初末状态

Table 2 Initial and final states of experimental parameters

浓度 $/(g \cdot L^{-1})$	自重沉降初始状态			自重沉降终了状态		
	高度 h_1/m	体积 分数 ϕ	密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$	高度 h_2/m	体积 分数 ϕ	密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$
100	0.216	0.1599	1.300	0.209	0.1653	1.320
50	0.125	0.1382	1.263	0.113	0.1529	1.298
20	0.056	0.1234	1.237	0.050	0.1382	1.272

2.3 泥沙沉降曲线及沉积层体积分数分布曲线

泥沙沉降试验过程中, 泥沙悬浊液于沉降初期快速形成, 通过连续记录浊液面的位置高度 $h(t)$, 得到不同浓度泥沙悬浊液沉降曲线如图 2 所示。

图 2 中, 阻滞沉降段泥沙沉降曲线表现出双对数直线特点, 可用对数直线方程进行拟合, 相应的对数拟合方程表达式和相关系数列于表 3。

表 3 阻滞沉降段对数曲线拟合参数

Table 3 Fitted line-parameters of hindered settlement stage

浓度 $/(g \cdot L^{-1})$	$\log h(t) = R_1 \log(t) + a_1$		相关系数 R^2
	斜率 R_1	截距 a_1	
100	-0.1749	0.4258	0.9991
50	-0.2504	0.5664	0.9983
20	-0.2758	0.2438	0.9977

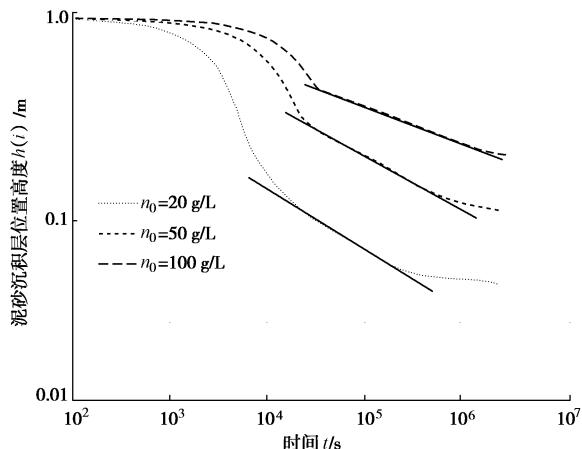


图2 不同浓度泥沙沉降曲线

Fig. 2 Curves of sediment settlement with different concentrations

泥沙沉降试验完成后应用图1(b)中取土器进行泥沙沉降层取样测试,得到不同初始浓度对应的泥沙沉积层体积分数分布曲线如图3所示。

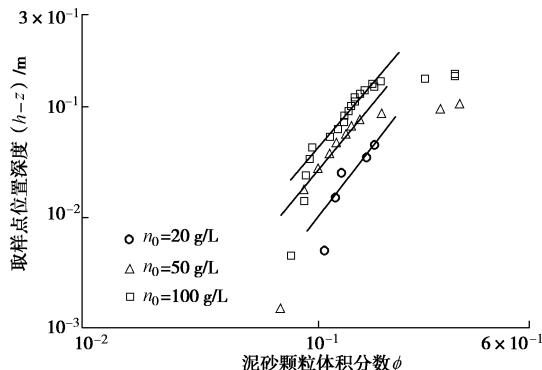


图3 泥沙沉积层体积分数分布曲线

Fig. 3 Curves of volume fraction of deposited sediment layer

图3中,泥沙沉积层一定深度范围内,泥沙颗粒体积分数在双对数坐标上表现出线性分布关系,同样可采用双对数直线方程进行参数拟合,对数直线段拟合方程表达式和相关系数列于表4。

表4 泥沙沉积层体积分数分布方程拟合参数

Table 4 Fitted line-parameters of deposited sediment

浓度 (g·L ⁻¹)	$\lg(h-z) = R_2 \lg(\phi) + a_2$		相关系数 R^2
	斜率 R_2	截距 a_2	
100	2.4017	1.0613	0.9642
50	2.7030	1.1515	0.9937
20	2.4099	0.4751	0.8981

3 沉积泥沙自重固结系数计算

3.1 四种固结系数计算方法

根据泥沙沉降试验和沉积层取样得到的参数,同时考虑渗透系数 k 和体积压缩系数 m_v 在泥沙沉积固结过程中是否发生变化,共采用四种方法进行沉积泥沙自重固结系数计算:①方法一为Terzaghi固结理论, k 与 m_v 均保持不变;②方法二采用双修正方法, k 与 m_v 均变化;③方法三为 m_v 不变, k 连续变化的单参数

修正方法;④方法四为 k 保持不变, m_v 连续变化的单参数修正方法。通过四种方法比较,确定合理的沉积泥沙固结系数测定方法。

固结系数计算采用式(13), (14), (16), (17)和式(12)中过程变量进行固结系数计算,根据表3和表4中泥沙沉降曲线和沉积层体积分数分布曲线拟合参数,得到表5中四种方法各自对应的固结系数计算结果。此外,表5中的自重固结系数时均采用沉积层固结过程中的平均孔隙比或平均体积分数指标。

对比表5中四种方法计算结果发现,方法一中Terzaghi理论假定渗透系数和体积压缩系数为常数,相同初始浓度下的自重固结系数相较于其它三种方法最小,而其它三种方法可一定程度上反映出沉积泥沙的大变形固结特征。这也符合部分学者结论^[10]:小变形假定条件下, Terzaghi一维固结理论中的固结系数相较于大变形理论中的固结系数偏小。

方法二中双参数修正相较于其它方法计算结果最大,部分结果甚至高出一个量级,说明渗透系数 k 与体积压缩系数 m_v 在土体固结过程是否为常数的假定对固结系数影响很大,而沉积泥沙固结过程中土体状态变化明显,应考虑两参数修正反映大变形固结特点。

此外,泥沙初始浓度越高,相应的沉积层自重固结系数计算结果越大。此现象主要由低浓度泥沙沉降中的黏粒絮凝效应引起,并且进入自重固结沉降阶段的泥沙沉积层平均浓度远高于初始阶段,沉积层性质前后差异明显。因此,沉积泥沙自重固结系数测试中,应选用较高初始浓度泥沙。同时,表5中100 g/L初始浓度泥沙计算结果更具有代表性,沉积泥沙自重固结系数测试中的初始泥沙浓度应不低于100 g/L。

3.2 沉积泥沙自重固结过程中的固结系数变化趋势

将100 g/L初始浓度的泥沙沉降试验和沉积层取样确定的方程参数 m 、 n 分别代入式(13), (14), (16), (17),得到沉积泥沙固结系数变化趋势如图4所示。

图4中,体积压缩系数 m_v 恒定,固结系数在固结过程中逐渐减小; k 恒定,固结系数将逐渐增大; m_v 与 k 均变化时,固结系数在也将逐渐减小。固结系数的变化趋势由 m_v 与 k 影响的相对强弱决定,而渗透系数修正直接决定固结系数变化趋势,说明 k 对沉积泥沙自重固结中的孔隙变化更为敏感,直接决定沉积泥沙的自重固结速率。沉积层平均颗粒体积分数 ϕ 趋近0.2时,各方法计算的固结系数趋势线出现相交趋势。表5中三种初始浓度的沉降试验关于 n 和 m 的拟合结果均表明 $n < m$,根据前述分析,式(15)固结系数一阶导数 $C'_v < 0$ 恒成立,故沉积泥沙自重固结系数 C_v 将在固结过程中将保持减小趋势。

表 5 固结系数计算结果

Table 5 Final calculated results of consolidation coefficient by different methods

浓度 $/(g \cdot L^{-1})$	密实 高度 ζ/m	固结 应力 σ'/Pa	渗透 系数 $k/(m \cdot s^{-1})$	渗透指 数参数 m	渗透 参数 K_k	应力指 数参数 n	有效应力 参数 K_σ $/(g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-2})$	固结系数 $C_v/(cm^2 \cdot s^{-1})$			
								Terzaghi 理论方法一	双参数修正方法二	渗透系数修正方法三	体积模量修正方法四
100	0.0345	301.50	5.75×10^{-9}	7.72	1.96×10^{-14}	3.40	1.38×10^6	5.32×10^{-6}	2.32×10^{-5}	2.23×10^{-5}	5.55×10^{-6}
50	0.0173	150.75	6.61×10^{-9}	5.99	4.20×10^{-13}	3.70	1.75×10^6	1.03×10^{-6}	2.24×10^{-5}	6.83×10^{-6}	3.39×10^{-6}
20	0.0069	60.30	3.41×10^{-9}	5.63	7.02×10^{-13}	3.41	3.57×10^5	1.91×10^{-7}	7.72×10^{-6}	3.67×10^{-6}	4.02×10^{-7}

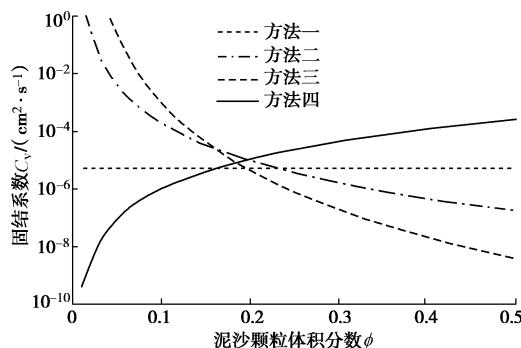


图 4 沉积泥沙自重固结系数变化趋势

Fig. 4 Trends of self-weight consolidation coefficient

4 结 论

(1) 基于泥沙沉降过程中的基本规律, 建立泥沙沉降体阻滞沉降阶段和固结沉降阶段的沉降控制方程, 并通过室内试验曲线的参数拟合方法确定对应固结参数, 得到沉积泥沙自重固结系数的测试方法在理论和实践上均是可行的。

(2) 沉降柱试验能较好地模拟泥沙沉积固结和沉积层形成的全过程, 可作为沉积泥沙自重固结系数测定方法, 沉降柱试验中泥沙初始浓度不应低于 100 g/L。

(3) Terzaghi 理论中固结系数关于渗透系数与体积压缩系数均为常数的假定使得计算结果偏小; 基于一维固结理论固结系数表达式, 采用不同类型的参数修正方法计算沉积泥沙自重固结系数是可行的, 能一定程度地减小大变形固结引起的计算误差。

(4) 沉积泥沙自重固结系数在固结过程中保持减小趋势, 并主要决定于固结过程中的渗透系数。

参考文献:

- 谢新宇, 朱向荣, 夏建中. 饱和土体一维大变形固结系数研究[J]. 浙江大学学报, 1998, 32(3): 319 - 324. (XIE Xin-yu, ZHU Xiang-rong, XIA Jiang-zhong. The research on the one-dimensional large-strain coefficient of consolidation for saturated soil[J]. Journal of Zhejiang University, 1998, 32(3): 319 - 324. (in Chinese))
- LUCAS M B. Consolidation and strength evolution of soft mud layers[D]. Technische University Delft, 2000.
- 谢新宇, 朱向荣, 谢康和, 等. 饱和土体一维大变形固结理论新进展[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 30 - 38. (XIE Xin-yu, ZHU Xiang-rong, XIE Kang-he, et al. New developments of one-dimensional large strain consolidation theories[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 30 - 38. (in Chinese))
- 刘莹, 王清. 江苏连云港地区吹填土室内沉积试验研究[J]. 地质通报, 2006, 25(6): 762 - 765. (LIU Y, WANG Q. The deposition laboratory tests for the sedimentation of dredger fill in the Lianyungang area, Jiangsu[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(6): 762 - 765. (in Chinese))
- 林丽敏, 冯荣兴. 淤泥类软土的应变特征与沉降计算[J]. 皖西学院学报, 2003, 19(2): 81 - 84. (LIN Li-min, FENG Rong-xing. The Strained characteristic of mud and the calculation of the foundation's settlement[J]. Journal of West Anhui University, 2003, 19(2): 81 - 84. (in Chinese))
- TOH S H, FAHEY M. Numerical and centrifuge modeling of large strain consolidation[C]// Computer Methods and Geomechanics. Rotterdam: Balkema, 1991: 279 - 284.
- 洪振舜. 吹填土的一维大变形计算模型[J]. 河海大学学报, 1987, 15(6): 27 - 36. (HONG Zhen-shun. One-dimensional mathematical model for large-strain consolidation of dredged-fill soil[J]. Journal of Hohai University, 1987, 15(6): 27 - 36. (in Chinese))
- 林鹏, 许镇鸿, 徐鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 106 - 112. (LIN Peng, XU Zhen-hong, XU Peng, et al. Research on coefficient of consolidation of soft clay under compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 106 - 112. (in Chinese))
- OLSON R E. Settlement of embankment on soft clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, 124(4): 278 - 288.
- 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zong-ze. Geotechnical principles[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))