

Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Fine Soil

Zengjun Li

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

In a certain project, the stability of the upper channel body was affected by the vibration of the lower traffic tunnel during driving. In this regard, triaxial compression tests and vibration triaxial tests were conducted on the fine-grained soil gravel in the channel body to identify the shear strength parameters, nonlinear and elastic-plastic model calculation parameters, and dynamic calculation model parameters. Based on the test results, the three-dimensional finite element numerical analysis method can be used to comprehensively and deeply analyze the stress and deformation characteristics of the fine-grained soil gravel in the channel body during construction, operation, and vibration conditions through static and dynamic calculations, in order to verify the adaptability and rationality of the filling soil material in the channel body. From this, it can also be seen that the accuracy of the test data from the static and dynamic triaxial tests is crucial for subsequent static and dynamic calculations.

Keywords

containing fine grain soil and gravel; triaxial compression; model parameters; dynamic elastic modulus; damping ratio

含细粒土砾静动力特性分析

李增军

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

在某工程中, 由于下部交通隧道行车震动的影响, 对上部渠道的渠身的稳定性造成影响, 对此, 针对渠身的含细粒土砾进行了三轴压缩试验、振动三轴试验, 查明了抗剪强度参数、非线性模型以及弹塑性模型的计算参数、动力计算的模型参数等, 然后根据试验结果才能采用三维有限元数值分析法通过静、动力计算, 对渠身含细粒土砾在施工期、运行期以及震动情况下的应力、变形特性进行全面、深入的分析研究, 以验证渠身填筑土料的适应性和合理性。由此也可以看出静、动力三轴试验的试验数据的准确性对于之后的静动力计算的重要性。

关键词

含细粒土砾; 三轴压缩; 模型参数; 动弹性模量; 阻尼比

1 研究内容和目的

本项目旨在查明某工程渠身含细粒土砾的物理、力学性能指标, 判别土体性质; 通过对渠身含细粒土砾静力试验、动力试验, 研究力学性能并为有限元数值分析提供计算参数。

2 工程特性室内试验

2.1 静力三轴 CD、CU 试验

试验用料为某工程交通隧道渠身含细粒土砾。围压 4 级: 50kPa、100kPa、200kPa、400kPa。通过测定试验料在不同恒定周围压力下, 主应力差和轴向应变以及轴向应变和体积应变的关系, 从而确定抗剪强度参数和非线性模型以及弹塑性模型的计算参数。

【作者简介】李增军(1990-), 男, 中国河南柘城人, 本科, 工程师, 从事水利工程试验检测研究。

2.2 动力三轴试验

试验用料为某工程交通隧道渠身含细粒土砾。试验内容: 测定土体动力应力变形特性。通过试验, 测定材料在动应力作用下的动应力和动应变的关系曲线, 确定最大动弹性模量 E_{\max} 与有效固结压力的关系、动弹性模量 E 和阻尼比 λ 与动剪应变的关系, 整理动力计算的模型参数^[1]。

3 工程特性试验工作

3.1 试验设备

粗粒土静动力三轴试验设备: 静动力三轴试验设备为高精度 DJSZ-150 型三轴试验机。它的特点是精度高、操作方便, 功能齐全。

3.2 静动力参数整理方法

3.2.1 静力参数

第一, 邓肯 E-v 非线性模型。

①绘制应力应变关系曲线。

Kondner 在 1963 年根据大量土的三轴试验的应力应变关系曲线, 提出可以用双曲线拟合三轴试验的 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线, 即:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (1)$$

对于常规三轴压缩试验, $\varepsilon_a = \varepsilon_1$ 。

其中, a 为起始变形模量 E_i 的倒数; b 为双曲线的渐近线所对应的极限偏差应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的倒数。

破坏比则按下式计算:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (2)$$

②绘制 E_i 和 σ_3 的关系曲线。

简布发现三轴试验的初始模量 E_i 与围压 σ_3 有关, 即:

$$E_i = kP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \quad (3)$$

如果给出 $\lg(E_i/P_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/P_a)$ 的关系图则二者近似呈直线关系。

其中, P_a 为大气压, 量纲与 σ_3 相同; k 、 n 为 $\lg(E_i/P_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/P_a)$ 直线的截距和斜率。

③绘制轴向应变和侧向应变关系曲线。

Duncan 等人根据一些试验资料, 假定在常规三轴压缩试验中轴向应变 ε_a 与侧向应变 $-\varepsilon_r$ 之间也存在双曲线关系。

$$\varepsilon_a = \frac{-\varepsilon_r}{f + D(-\varepsilon_r)} \quad (4)$$

$$\text{或者 } -\varepsilon_r/\varepsilon_a = f + D(-\varepsilon_r) = f - D\varepsilon_r \quad (5)$$

其中, $f = \mu_i$ 为初始切线泊松比; D 为轴向应变渐近线值的倒数。

④绘制 μ_i 与 $\lg\sigma_3$ 关系曲线。

$$\mu_i = f - G - F \lg(\sigma_3 / P_a) \quad (6)$$

其中, μ_i 为不同 σ_3 作用下的初始切线泊松比; G 、 F 由公式 (6) 关系曲线确定。

C 、 φ 根据摩尔-库仑包线确定。由此可确定 Duncan E-v 模型的 8 个参数 K 、 n 、 R_f 、 C 、 φ 、 G 、 F 、 D 。

第二, 邓肯 E-B 非线性模型。

Duncan E-B 模型的 K 、 n 、 R_f 、 C 、 φ 5 个参数的整理方法同 Duncan E-v 模型, Kb 和 m 的确定方法如下。

试验表明体变模量 B 与 σ_3 有关, 二者关系在双对数坐标中可近似为一直线, 这样:

$$B = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^m \quad (7)$$

在三轴试验中用式 (8) 确定 B :

$$B = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{0\%}}{3(\varepsilon_r)_{0\%}} \quad (8)$$

其中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{70\%}$ 与 $\varepsilon_r_{70\%}$ 为 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 达到 70% $(\sigma_1 - \sigma_3) f$

时的偏差应力和体应变的试验值。这样对于每一个 $\sigma_3 = \text{常数}$ 的三轴压缩试验, B 就是一个常数。

由于实际土体在试验中, 除正应力变化引起体积变化外, 剪应力变化也引起体积变化, 故按 (8) 式计算的 B 值, 在取曲线不同点所求得的并非常数, Duncan 在研究了许多土的体积变化特征后, 提出对计算 B 值采用下述两条原则:

①如体积变化曲线达到强度 70% 以前并不呈切线水平的程度, 则在应力应变和体积变化曲线上取相应于 70% 的应力水平值;

②如体积变化曲线达到强度 70% 以前已呈切线水平, 则在体积变化曲线上取切线开始变成水平的那一点。在应力应变曲线上也取与其相应的点^[2]。

第三, φ_0 和 $\Delta\varphi$ 参数的整理方法。

对于某些无粘性土, 内摩擦角 φ 随围压减少, 表示成:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) \quad (9)$$

其中, φ_0 为当 $\sigma_3/P_a = 1$ 时的 φ 值; $\Delta\varphi$ 为当 σ_3 增加 10 倍时 φ 值的减少量。

为求得 φ_0 和 $\Delta\varphi$, 首先通过三轴 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ε_a 的关系曲线, 读出 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ 与 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$, $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ 表示峰值强度, 然后通过式 (10) 求得各级 σ_3 下的 φ , 最后通过数值拟合求得 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 。

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_p}{(\sigma_1 + \sigma_3)_p} \quad (10)$$

3.2.2 动力参数

土工建筑物地震反应分析大多采用有限元法, 并假定土的非线性动应力和动应变关系可以采用等效线性模型描述。将轴向动应力和轴向动应变的滞回性和非线性近似用等效线动弹性模量 E_d 和等效阻尼比 λ 来表示。

①阻尼比。

$$\lambda = \frac{A_z}{4\pi A_s} \times 100 \quad (11)$$

式中, A_z 为滞回圈的面积; A_s 为三角形的面积。

②动弹性模量 E_d 。

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \quad (12)$$

式中, σ_d 为轴向动应力; ε_d 为轴向动应变。

动弹性模量的倒数 $1/E_d$ 与动应变 ε_d 之间的关系可近似采用直线拟合, 即

$$1/E_d = a + b\varepsilon_d \quad (13)$$

式中, a 、 b 分别为拟合直线的截距和斜率。当 $\varepsilon_d = 0$ 时, $1/a$ 即代表最大的动模量 E_{dmax} 。

动剪切模量和动模量之间如下关系:

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\nu_d)} \quad (14)$$

而动剪应变 r_d 和动应变 ε_d 之间有如下关系:

$$\gamma_d = (1+\nu_d)\varepsilon_d \quad (15)$$

式(14)和式(15)中 ν_d 为动泊松比。本次试验渠道含细粒土砾取值 0.27。

4 渠身含细粒土砾

4.1 试验控制密度及级配

渠身含细粒土砾试验成果见表 1。

表 1 渠身含细粒土砾试验成果表

试样编号	天然状态下			粒径组成 (mm)					
	湿密度	含水率	干密度	200~60	60~40	40~20	20~10	10~5	5~2
	ρ	ω	ρ_d	含量 (%)					
	g/cm^3	%	g/cm^3						
平均值	2.03	4.2	1.95	1.0	2.8	9.6	13.6	16.8	56.2

4.2 静力三轴试验成果

三轴压缩试验成果详见表 2、表 3。

表 2 三轴压缩试验成果表 (固结排水 CD)

试样编号	干密度	抗剪强度指标				E-B (μ) 模型参数							
		C_{cd}	ϕ_{cd}	ϕ_0	$\Delta\phi$	k	n	k_b	m	R_f	G	F	D
	g/cm^3	kPa	°										
渠身含细粒土砾	1.95	25.9	39.6	53.4	6.5	851	0.58	277	0.55	0.762	0.40	0.11	0.92

表 3 三轴压缩试验成果表 (固结不排水 CU)

试样编号	干密度	抗剪强度指标			
		C_{cu}	ϕ_{cu}	C_{cu}'	ϕ_{cu}'
	g/cm^3	kPa	°	kPa	°
渠身含细粒土砾	1.95	76.3	18.4	23.2	34.0

表 5 动弹模量系数

试样名称	K_c	k	n
渠身含细粒土砾	2.0	2686	0.636

4.3 动力三轴试验

动力三轴试验成果详见表 4、表 5。

①动弹性模量比和阻尼比与动应变的关系见表 4。

表 4 动弹性模量比和阻尼比与动应变关系表

Kc=2.0									
$\sigma_3=100kPa$			$\sigma_3=200kPa$			$\sigma_3=400kPa$			
ε_d (%)	E_d/E_{dmax}	λ	ε_d (%)	E_d/E_{dmax}	λ	ε_d (%)	E_d/E_{dmax}	λ	
0.008	0.880	0.149	0.012	0.753	0.139	0.017	0.781	0.135	
0.020	0.722	0.155	0.030	0.599	0.194	0.043	0.585	0.204	
0.032	0.642	0.205	0.065	0.397	0.289	0.085	0.403	0.325	

②动弹模量系数 k' 与指数 n 见表 5。

5 结论

①渠身含细粒土砾在探坑每 1m 做原位密度、颗粒级配等试验,由试验结果看,渠身粉土不同深度内的颗粒级配相差不大,基本定名为含细粒土砾 (GF),天然干密度、含水率变化比较接近,说明渠身含细粒土砾比较均匀,密度符合沉积规律,可以用颗粒平均级配以不同深度天然干密度平均值制备试样进行固结、静三轴、动三轴等力学性试验。

②三轴压缩试验:渠身含细粒土砾固结排水剪 $C_{cd}=25.9kPa$ 、 $\phi_{cd}=39.6^\circ$ 、固结不排水剪 $C_{cu}=76.3kPa$ 、 $\phi_{cu}=18.4^\circ$ 、 $C_{cu}'=23.2kPa$ 、 $\phi_{cu}'=34.0^\circ$ 。

③动力三轴试验:通过对渠身含细粒土砾进行动力三轴试验,查明了动弹性模量比、动剪切模量比和阻尼比与动应变的关系。从试验结果可以看出动弹性模量比随动应变增大而减小,阻尼比随动应变增大而增大。

参考文献

- [1] GB/T50123—2019 土工试验方法标准[S].
- [2] T/CHES 29—2019 粗粒土试验规程[S].