

坝料动力变形特性试验研究

凌 华¹, 傅 华¹, 蔡正银¹, 米占宽¹, 朱 峰²

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 无锡市重点水利工程建设管理处, 江苏 无锡 214062)

摘 要: 在大型动力三轴仪上进行了坝料的动力变形特性试验研究, 分析了围压和固结比对最大动模量、动模量衰减规律和阻尼比的影响。试验研究表明: 随围压和固结应力比的提高, 最大动模量增大; 随应变的增大, 动模量逐渐衰减; 固结比对最大阻尼比影响不大, 随固结比的提高最大阻尼比略有降低。基于沈珠江动力变形特性模型, 提出了可以将固结比影响归一化的最大动模量和模量衰减的修正公式, 该公式能很好地消除围压和固结比对模量衰减规律的影响。结合其它工程试验成果, 通过小于 5 mm 粒径颗粒含量初步探讨了尺寸效应对动力变形特性的影响, 研究表明室内试验得出的最大动模量较工程原位土体的要低, 而最大阻尼比要略高。

关键词: 动力变形特性; 三轴试验; 动模量; 阻尼比

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)12-1920-05

作者简介: 凌 华 (1977-), 男, 江苏盐城人, 博士, 从事坝料试验等岩土工程工作。E-mail: hling@nhri.cn。

Experimental study on dynamic deformation behaviors of dam materials

LING Hua¹, FU Hua¹, CAI Zheng-yin¹, MI Zhan-kuan¹, ZHU Feng²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Engineering Department of Wuxi Municipal Water Conservancy Bureau, Wuxi 214062, China)

Abstract: Dynamic deformation behavior tests on dam materials are conducted using a large scale triaxial test apparatus. The effect of confining pressure and consolidated stress ratio on the maximum dynamic modulus, reduction of dynamic modulus and damping ratio is analyzed. It is shown that the maximum dynamic modulus increases with the increase of the confining pressure and consolidated stress ratio, and that the dynamic modulus decreases with the increase of the dynamic strain. The consolidated stress ratio has little effect on the maximum damping ratio. The modified formula of the maximum dynamic modulus and reduction of dynamic modulus with normalized dynamic strain is developed on the basis of the test results. This formula can describe the effect of the confining pressure and consolidated stress ratio on the dynamic modulus. The effect on dynamic deformation of reduced scale is discussed using particles finer than 5 mm. Compared with the field soil, the maximum dynamic modulus of the soil from laboratory tests is smaller, and the maximum damping ratio of the soil from laboratory tests is larger.

Key words: dynamic deformation behavior; triaxial test; dynamic modulus; damping ratio

0 前 言

土石坝的建设多位于西部, 坝址所在地区地质条件复杂, 地震烈度高, 一旦失事, 将产生灾难性的后果。坝料的动力特性是坝体设计和动力分析的基础。影响动力特性的因素众多, 如母岩成分、密度、级配、动荷载、荷载波形、频率、排水条件等^[1-2]。

目前坝高级别已达到 300 m 级, 坝体内应力高, 应力分布复杂, 应重视坝料在复杂应力状态下, 特别是高应力条件下的动力变形特性问题研究。随着大型碾压设备的运用, 现场筑坝材料最大粒径甚至超过 1 m, 国内室内大型动力试验设备允许试样最大粒径不超过 60 mm, 这种试验设备限制带来的缩尺效应势必对动力变形特性产生影响。

本文对坝高 175 m、地震设防烈度为 7 度的某混凝土面板堆石坝的垫层料和堆石料进行了动力变形特性试验研究, 分析了围压和固结比对坝料动模量及其衰减特性和阻尼比的影响, 通过小于 5 mm 粒径含量初步探讨了缩尺效应对动力变形特性的影响。

1 试验说明

随着大型碾压设备的运用, 坝料特别是堆石料的设计最大粒径甚至超过 1 m。为减少缩尺效应的影响, 本次动力试验在南京水利科学研究院大型静动三轴仪

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金 (50639050)

收稿日期: 2008-09-02

表 1 试验密度与级配

Table 1 Test density and gradation

试样类型	干密度 (g·cm ⁻³)	相对 密度/%	孔隙率 /%	小于某粒径所占比例/%							
				60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	0.5 mm	0.075 mm
垫层料	2.155	92	19.3	100	88	69	55	43	31	17.5	4
主堆石料	2.045	91	23.2	100	82.6	54.5	32.8	16.5	9	—	—

器上进行, 试样尺寸 $\Phi 300 \times 700$ mm, 试样最大允许粒径 60 mm。设备最大围压 4 MPa, 最大静出力 1500 kN, 最大动出力 500 kN, 频率 0.01~5 Hz。

共进行了垫层料和主堆石料的动力变形特性试验。堆石料的设计级配平均曲线最大粒径为 600 mm, 超粒径 (大于 60 mm) 含量接近 40%, 根据《土工试验规程》^[3] 的规定进行了级配缩制; 对于垫层料, 设计平均级配最大粒径为 60 mm, 设计平均级配即为试验级配, 垫层料和堆石料的试验级配与密度见表 1。试验周围压力 σ_3 分 4 级, 分别为 500, 1000, 1500 和 2000 kPa, 固结主应力比 K_c 为 1.0, 1.5 和 2.5。试样固结稳定后, 在不排水条件下施加轴向循环荷载, 施加频率为 0.33 Hz。

2 固结比对动力变形特性影响

文献[4]认为最大动弹性模量 E_{dmax} 和围压 σ_3 有如下关系:

$$E_{dmax} = k_2 p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n, \quad (1)$$

式中, p_a 为大气压力, k_2' 和 n 为两个参数。

动弹性模量 E_d 随动应变 ε_d 衰减的关系可用下式表达:

$$\frac{E_d}{E_{dmax}} = \frac{1}{1 + k_1' \bar{\varepsilon}_d}. \quad (2)$$

式中 $\bar{\varepsilon}_d$ 为归一化动应变, $\bar{\varepsilon}_d = \varepsilon_d / (\sigma_3 / p_a)^{1-n}$; k_1' 为常数, 其物理意义为当 $E_d / E_{dmax} = 0.5$ 时归一化动应变的倒数。

动力分析中一般采用剪切模量。动剪切模量 G_d 和动弹性模量 E_d 之间有如下关系:

$$G_d = E_d / 2(1 + \mu_d), \quad (3)$$

式中, μ_d 为动泊松比, 文中取 0.33。为计算动剪切模量 G_d , 模型增加了两个相应的参数 k_1 和 k_2 , 其中 $k_1 = k_1' / (1 + \mu_d)$, $k_2 = k_2' / (2(1 + \mu_d))$ 。

动力有限元分析中阻尼比 λ 可采用下式确定:

$$\lambda = \lambda_{max} k_1 \bar{\gamma}_d / (1 + k_1 \bar{\gamma}_d) \quad (4)$$

式中, λ_{max} 为最大阻尼比, $\bar{\gamma}_d$ 为归一化剪应变, $\bar{\gamma}_d = \bar{\varepsilon}_d (1 + \mu_d)$ 。

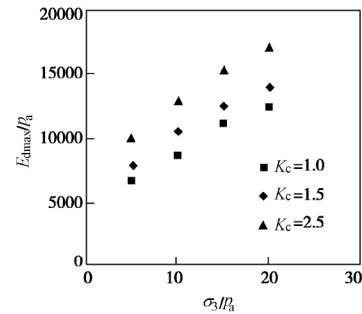
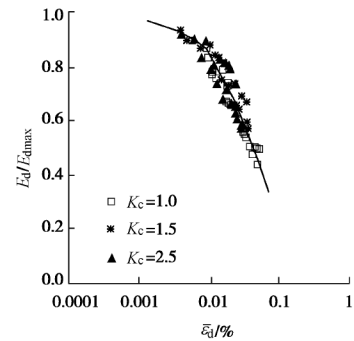
由试验结果, 按照上述模型整理得到的垫层料和主堆料的 $E_{dmax} / p_a - \sigma_3 / p_a$ 和 $E_d / E_{dmax} - \bar{\varepsilon}_d$ 关系曲线见

图 1~4, 模型参数见表 2。

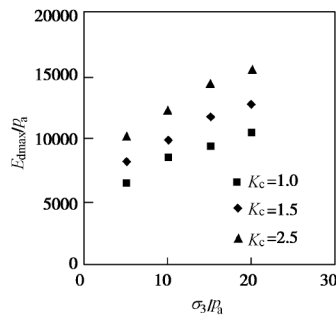
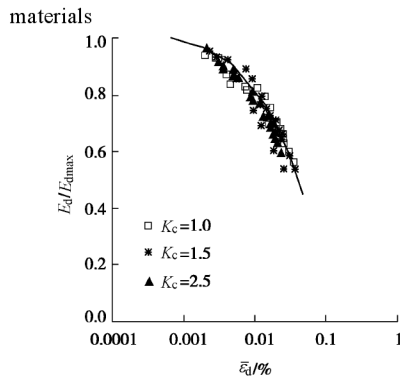
表 2 动力变形特性模型参数

Table 2 Model parameters of dynamic deformation behaviors

试样	K_c	K_2'	n	K_1'	K_2	K_1	λ_{max}
垫层料	1.0	3088	0.468	27.26	1161	20.50	0.26
	1.5	4013	0.420	26.30	1509	19.77	0.25
	2.5	5509	0.379	33.00	2071	24.81	0.23
主堆石料	1.0	3789	0.345	33.00	1424	24.81	0.27
	1.5	4890	0.321	28.00	1838	21.05	0.25
	2.5	6265	0.306	33.20	2355	24.96	0.24

图 1 垫层料 $E_{dmax} / p_a - \sigma_3 / p_a$ 关系曲线Fig. 1 Relationship between E_{dmax} / p_a and σ_3 / p_a for cushion materials图 2 垫层料 $E_d / E_{dmax} - \bar{\varepsilon}_d$ 曲线Fig. 2 Relationship between E_d / E_{dmax} and $\bar{\varepsilon}_d$ for cushion materials

由表 2、图 1~4, 不难发现, ①最大动弹性模量随围压的增大和固结应力比的提高而增大。②随应变的增大, 动模量逐渐衰减。③不同围压和不同固结比情况下的 $E_d / (E_d)_{max} - \bar{\varepsilon}_d$ 衰减曲线落在狭窄的一条带内, 表明归一化动应变能很好地消除围压和固结比的影响。④固结应力比对最大阻尼比的影响不大, 随固结比的提高阻尼比略有降低。

图3 主堆石料 $E_{dmax}/p_a - \sigma_3/p_a$ 关系曲线Fig. 3 Relationship between E_{dmax}/p_a and σ_3/p_a for rockfill图4 主堆石料 $E_d/E_{dmax} - \bar{\epsilon}_d$ 曲线Fig. 4 Relationship between E_d/E_{dmax} and $\bar{\epsilon}_d$ for rockfill

materials

随着固结比的增加, 试样处于偏压固结状态, 一方面 45° 面上的剪应力方向不发生变化, 仅是大小改变; 另一方面 45° 面上的正应力也要随之增大, 因此当固结比增加时最大动模量变大。图1和图3表明, 式(1)不能反映固结比对模量的影响, 甚至用平均主应力 σ_0 替代式(1)中的围压 σ_3 , 也不能完全消除固结比的影响。文献[5~6]也得到了类似的结论。

建议采用如下公式, 归一化固结比对最大动模量的影响:

$$E_{dmax} = k'_2 p_a \left(\frac{K_c \sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (5)$$

同时归一化动应变改变为

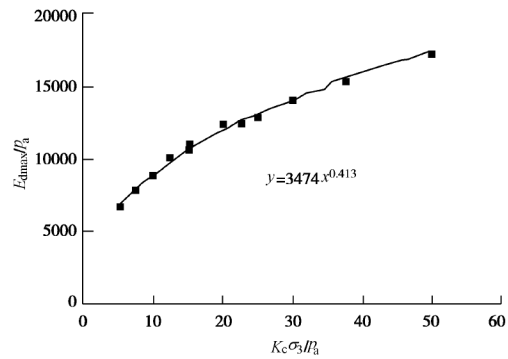
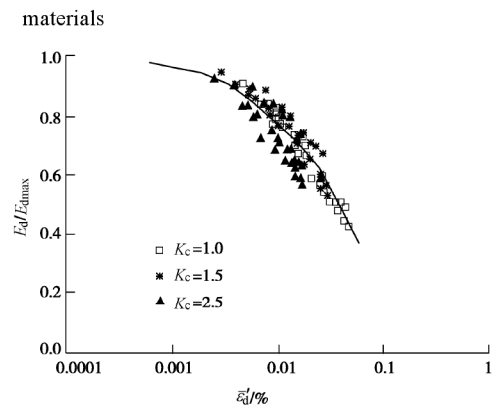
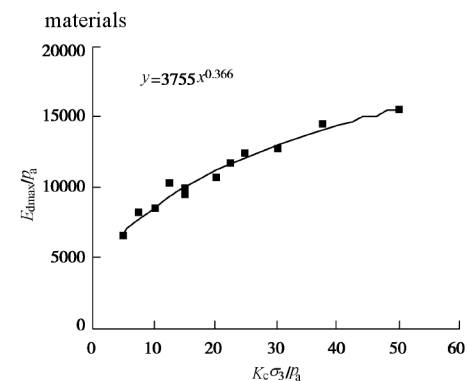
$$\bar{\epsilon}_d = \frac{\epsilon_d}{(K_c \sigma_3 / p_a)^{1-n}} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)整理得到的模型参数见表3, 垫层料和主堆料 $E_{dmax}/p_a - K_c \sigma_3/p_a$ 和模量衰减关系曲线见图5~8。

表3 归一化模型参数

Table 3 Normalized model parameter

试样	$F(e)$	G'_i	K'_2	n	K'_1	K_2	K_1	λ_{max}
垫层料	5.47	217	3474	0.413	30	1306	22.6	0.26
主堆石料	6.02	258	3755	0.366	28	1411	21.1	0.27

图5 垫层料 $E_{dmax}/p_a - K_c \cdot \sigma_3/p_a$ 关系曲线Fig. 5 Relationship between E_{dmax}/p_a and $K_c \cdot \sigma_3/p_a$ for cushion图6 垫层料 $E_d/E_{dmax} - \bar{\epsilon}_d$ 曲线Fig. 6 Relationship between E_d/E_{dmax} and $\bar{\epsilon}_d$ for cushion图7 主堆石料 $E_{dmax}/p_a - K_c \cdot \sigma_3/p_a$ 关系曲线Fig. 7 Relationship between E_{dmax}/p_a and $K_c \cdot \sigma_3/p_a$ for rockfill

materials

图5和图7表明, 式(5)能很好的将不同固结比情况下的最大动模量归一化; 图6和图8表明, 采用式(6)模量随归一化动应变的衰减也能落在一个狭长的带内。这表明了式(5)和式(6)能较好地反映不同围压和不同固结应力比情况下的动力变形特性。

3 p_5 对动模量和阻尼比的影响

目前坝体的填筑材料的最大粒径已经提高至

1000 mm。国内室内动力试验最大允许粒径仅为 60 mm, 试验前应首先对坝料进行级配缩制, 这种缩制结果带来的缩尺效应使室内试验成果与现场实际坝料力学特性之间存在差异, 有必要深入研究缩尺效应对强度变形的影响^[7]。现阶段关于缩尺效应问题的研究, 还停留在静力问题上。

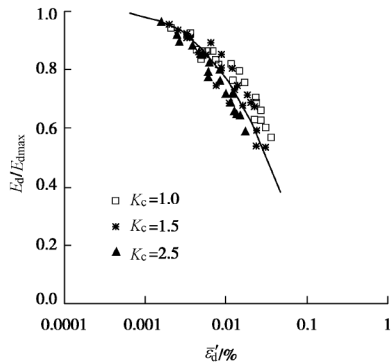


图 8 主堆石料 $E_d/E_{dmax} - \bar{\varepsilon}_d$ 曲线
Fig. 8 Relationship between E_d/E_{dmax} and $\bar{\varepsilon}_d$ for rockfill materials

试验级配由现场筛分级配或设计级配缩制而来, 一般缩制后得试验级配最大允许粒径要变小, 小于 5 mm 粒径颗粒含量 P_s 变大, 同时曲率系数和不均匀系数也要发生变化。工程实践中坝料小于 5 mm 粒径颗粒含量 P_s 是一个重要的指标, 下文仅从 P_s 来初步探讨尺寸效应对动力变形特性的影响。

Hardin (1972)^[8]根据砂土室内试验结果, 给出了初始等效剪切模量的经验公式:

$$G_{max} = G_i p_a F(e) (\sigma_0 / p_a)^n \quad (7)$$

式中 σ_0 是平均有效应力; p_a 是工程大气压; G_i 是模量系数; e 是孔隙比; $F(e)$ 孔隙比的函数, 圆粒状颗粒孔隙比函数 $F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$, 棱角状颗粒

的为 $F(e) = (2.97 - e)^2 / (1 + e)$; n 为模量指数, 大致在 0.4~0.6, 常取 0.5。

由式 (7), Hardin 认为影响最大动剪切模量的主要因素是应力状态和孔隙比。工程实践中以孔隙率为碾压控制标准, 坝料得孔隙率比较接近, $F(e)$ 相差不大。本次试验堆石料和垫层料的母岩 (砂岩) 相同, $F(e)$ 相差不大, 但由表 2 和表 3 的结果可以看出 K'_2 (对应于 G'_i) 和 n 还是有明显差别的。

式 (1) 与式 (7) 中的最大剪切模量都是将骨干应力应变曲线看成是双曲线求得的, 两式的形式也相似。仿照式 (7), 引入 $F(e)$ 以消除孔隙比 (或密度) 的影响, 并考虑到式 (3), 式 (5) 变成

$$G_{dmax} = F(e) G'_i p_a \left(\frac{K_c \cdot \sigma_3}{p_a} \right)^{n'} \quad (8)$$

由式 (8) 整理得到的垫层料和主堆料的 $F(e)$ 和 G'_i 具体数值见表 3。在南京水利科学研究院大型静动力三轴试验仪上进行的代表性水利工程坝料的动力变形特性试验成果见表 4。

由上述分析可知, 式 (8) 已综合考虑到了孔隙比 (或密度)、应力状态 (围压和固结比) 的影响。但从表 3 和表 4, 不难发现同种母岩的坝料, 模型参数并不一致, 这应主要归因于级配的影响。

点绘各料的 G'_i 和 λ_{max} 随 P_s 的关系曲线见图 9 和图 10。由表 3、4 和图 9、10 可以发现: ①随着小于 5 mm 粒径颗粒含量的增加, G'_i 降低, n' 略微增大 (为节省篇幅, 未附图), 但总体而言随 P_s 的增加, 最大动剪切模量要有所降低。②随着小于 5 mm 粒径颗粒含量的增加, λ_{max} 有增大的趋势, 但是变化很小。上述两条, 与随最大动弹性模量增大阻尼比反而减小的规律相符。③室内试验级配一般要比坝料设计级配要

表 4 坝料动力特性模型参数

Table 4 Model parameters dynamic deformation behaviors of dam materials

母岩 (坝高级别)	试样类型	干密度 (g·cm ⁻³)	孔隙比	P_s /%	$F(e)$	G'_i	n'	λ_{max}
花岗岩 (300 m 级)	过渡料	2.107	0.272	17.0	5.72	353	0.305	0.21
	下游堆石料	2.078	0.290	11.0	5.57	410	0.255	0.22
	反滤 I	2.033	0.318	86.0	5.34	273	0.449	0.22
流纹岩 (200 m 级)	垫层料	2.200	0.223	42.0	6.17	276	0.298	0.21
	下游堆石料	2.150	0.251	17.0	5.91	360	0.266	0.20
	反滤 I	2.070	0.300	86.0	5.48	248	0.311	0.21
砂岩板岩混合 (300 m 级)	堆石 I	2.087	0.322	12.0	5.30	366	0.268	0.19
	反滤 I	2.135	0.293	67.5	5.54	176	0.321	0.23
	反滤 II	2.088	0.322	31.5	5.30	228	0.300	0.22
板岩 (300 m 级)	堆石 III	2.099	0.315	17.5	5.36	339	0.279	0.21
	过渡料	2.014	0.299	24.0	5.49	290	0.328	0.22

注: ①砂岩板岩混合料反滤 I、反滤 II 由河海大学岩土所在中型动力试验仪上完成; ②花岗岩过渡料动力变形特性试验固结比为 1.0, 其余所有试验固结比均为 2.0。

细, 小于 5 mm 粒径颗粒含量要偏高, 因此室内试验得到的最大动剪切模量相对于工程原位土体而言要偏低, 最大阻尼比要略大。

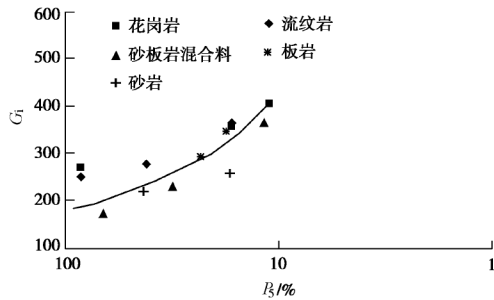


图 9 G'_i 随 P_5 的变化

Fig. 9 Variation of G'_i with P_5

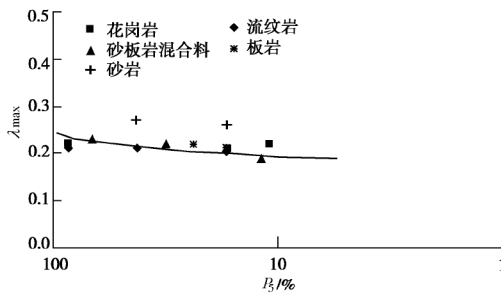


图 10 $\lambda_{\max}$ 随 P_5 的变化

Fig. 10 Variation of $\lambda_{\max}$ with P_5

上述研究是由不同分区坝料的试验成果, 消除孔隙比(密度)的影响, 探讨了 P_5 与最大动模量和阻尼比的关系, 从 P_5 含量的角度浅析了缩尺效应对动力特性的影响。严格来说, 缩尺效应问题的试验研究, 应将现场筛分级配或设计级配缩制成若干条不同最大粒径 (P_5 相应改变) 的级配, 再由相对密度或孔隙率确定试验密度, 然后进行试验研究。进行试验成果对比分析, 探讨模型参数随级配特征的变化, 建立由室内试验推求现场原位土体的动力模型并进行数值分析。这需要依靠大量试验进行进一步的深入研究, 也是下一步的研究方向。

4 结 论

(1) 最大动模量随围压和固结应力比的提高增大; 随应变的增大, 动模量逐渐衰减, 归一化动应变能很好地消除围压和固结比对模量衰减规律的影响; 固结比对最大阻尼比影响不大, 随固结比的提高最大阻尼比略有降低。

(2) 基于沈珠江动力变形特性模型, 提出了可以将固结比影响归一化的最大动模量和模量衰减的修正公式。

(3) 从 P_5 初步探讨了缩尺效应对坝料动力变形特性的影响, 分析表明室内试验得出的最大动模量较

工程原位土体的要低, 最大阻尼比要略高。

(4) 坝料动力变形特性的缩尺效应问题, 需要通过大量的室内试验进行进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988. (XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988. (in Chinese))
- [2] 孙 静, 袁晓铭. 土的动模量和阻尼比研究评述[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1): 88 - 95. (SUN Jing, YUAN Xiao-ming. A state-of-art of research on dynamic modulus and damping ratio of soils[J]. World Earthquake Engineering, 19(1): 88 - 95. (in Chinese))
- [3] SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China WaterPower Press. (in Chinese))
- [4] 沈珠江, 徐 刚. 堆石料的动力特性. 水利水运科学研究[J]. 1996(2): 143 - 151. (SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. Hydro-science and Engineering, 1996(2): 143 - 151. (in Chinese))
- [5] 陈存礼, 何军芳, 胡再强, 杨 鹏. 尾矿砂的动力变形及动强度特性研究[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 365 - 370. (CHEN Cun-li, HE Jun-fang, HU Zai-qiang, YANG Peng. Experimental study on dynamic deformation and dynamic strength of tailing sands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 365 - 370. (in Chinese))
- [6] 袁晓铭, 孙 静. 非等向固结下砂土最大动剪切模量增长模式及 Hardin 公式修正[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 264 - 269. (YUAN Xiao-ming, SUN Jing. Model of maximum dynamic shear modulus of sand under anisotropic consolidation and revision of Hardin's formula[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 264 - 269. (in Chinese))
- [7] 郦能惠, 朱 铁, 米占宽. 小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J]. 水电能源科学, 2001, 19(2): 39 - 42. (LI Neng-hui, ZHU Tie, MI Zhan-kuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi dam and scale effect[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2001, 19(2): 39 - 42. (in Chinese))
- [8] HARIDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divison, ASCE, 1972, 98(7): 667 - 692.